HAL
open science

KLM for Heritage

Florent Laroche

To cite this version:

Florent Laroche. KLM for Heritage : Vers une humanisation de l'industrie par les Connaissances Patrimoniales Ou comment considérer le patrimoine comme pilier de connaissances pour construire un futur durable.. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes, 2017. tel-01712318

HAL Id: tel-01712318

https://hal.science/tel-01712318

Submitted on 26 Feb 2018

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.

KLM for Heritage

Vers une humanisation de l'industrie par les Connaissances Patrimoniales
Ou comment considérer le patrimoine comme pilier de connaissances pour construire un futur durable.

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches
Soutenance 8 décembre 2017
Diplôme délivré par l'Université de Nantes

Florent LAROCHE, Maître de conférences
Laboratoire LS2N, Ecole Centrale de Nantes
florent.laroche@ec-nantes.fr

Jury

Président
- Lionel ROUCOULES, Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech (section CNU 61)

Rapporteurs
- Emmanuel CAILLAUD, Professeur des Universités, Université de Strasbourg (section CNU 60)
- Livio DE LUCA, Directeur de recherche, laboratoire MAP, CNRS Marseille (section CNU 27)
- Pierre LAMARD, Professeur des Universités, Université de technologie de Belfort-Montbéliard (section CNU 72)

Examinateurs
- Nada MATTA, Professeur des universités, Université des Technologie de Troyes (section CNU 27)
- Alain BERNARD, Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes (section CNU 60)
- Benoit FURET, Professeur des Universités, Université de Nantes (section CNU 60)

Le 21 mai 2004, alors en stage de DEA à PSA Peugeot Citroën, je reçois un appel téléphonique d'un chercheur qui me propose un financement pendant 3 ans pour préparer une thèse. Le Professeur Alain Bernard s'associe au Professeur Michel Cotte et tous deux vont devenir mes mentors…

Le 7 décembre 2007, lors de ma soutenance de thèse le Professeur Patrick Serrafero me qualifie de

> *« ressusciteur de machines anciennes ».*

Le 11 juin 2015, lors d'un échange scientifique avec le Professeur Georges Fadel il résume en une phrase ce pourquoi j'ai toujours travaillé :

> *« Aider l'humanité à comprendre ce qu'elle a fait et l'aider à se projeter demain ».*

Au patrimoine est souvent associé une image poussiéreuse et hors du temps, et pourtant je crois que

> *« regarder vers le passé peut nourrir notre futur ».*

17 ans après mes premiers travaux de capitalisation des connaissances patrimoniales, ce manuscrit d'habilitation à diriger des recherches va faire le bilan scientifique, déontologique et personnel pour répondre aux deux questions induites par la citation précédente : Comment et Pourquoi travailler sur les connaissances du passé ?
La recherche scientifique est un monde parallèle à elle seule. Parfois déconnectée de la réalité comme le souligne Bernard Stiegler :

> *« Ce que les startups cherchent à faire c'est du business.*
> *Ce que les chercheurs cherchent c'est la vérité et ça n'a pas de prix. »*

3

3DSA = 3D Semantic Annotation.

A

AIP-Primeca = Ateliers Inter-établissements de Productique et Pôles de Ressources Informatiques pour la MECAnique.
APP = Apprentissage par Problèmes et par Projets.
ASTM = American Society for Testing and Materials.

B

BIM = Building information modeling.
BN = Biscuiterie Nantaise.
BRep = Boundary Representation.

C

CAO = Conception Assistée par Ordinateur.
CCSTI = Centre de culture scientifique, technique et industrielle.
CEA = Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternative.
CFV = Centre François Viète.
CINES = Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur.
C-K = Concept-Knowledge.
CLES = Département Communication Langues Entreprise et Sport.
CNRS = Centre National de la Recherche Scientifique.
CNU = Conseil National des Universités.
Copil = Comité de pilotage.
CPS = Cyber-physical Production Systems.
CR = conservateur-restaurateur.

D

DataViz = Visualisation de Données.
DFA = Digital Factory Assistant.
DH = Digital Humanities.
DHRM = Digital Heritage Reference Model.
DRAC = Direction Régionale des Affaires Culturelles.

E

ECN = Ecole Centrale de Nantes.
ECPk = Ecole Centrale Pékin.
EMN = Ecole des Mines de Nantes.
ENSAM = Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
EPOTEC = Evolution des Procédés et des Objets Techniques.
ERP = Enterprise Ressource Planning.
ESPRIT = Programme Stratégique Européen pour la Recherche en Technologies d'Information.

F

FBS = Function, Behavior, Structure.
FBS-PPRE = Function Behaviour Structure - Process, Product, Resource, External effects.

G

GDR-MACS = Groupe de Recherche du CNRS en Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques.
GED = Gestion Electronique de Documents.
GI = Génie Industriel.
GIS = Groupement d'intérêt scientifique.
GT = Groupes de Travail.

H

HBIM = Historic Building Information Model.

I

IA = Intelligence Artificielle.
ICOMOS = Conseil International des monuments et sites.
IFC = Industry Foundation Classes.
IHM = Interface Homme Machine.
INNOVA = Virtual Archaeology International Network.
INPACT = Ingénierie et Numérique pour le Patrimoine, l'Art et la Culture.
INTEROP = Interoperability Research for Networked Enterprises Applications and Software.
IPPOP = Intégration Produit Processus Organisation pour l'amélioration de la Performance en ingénierie.
IPSI = Département Ingénierie des Produits et Systèmes Industriels.
IRAA = Institut de Recherche sur l'Architecture Antique.
IRCCyN = Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes.
IRSTV = Institut des Recherches en Sciences et Techniques de la Ville.
IS3P = Ingénierie des Systèmes Produits, Processus, Performances.
ISTA3 = Interopérabilité de 3ème génération pour les Sous-Traitants de l'Aéronautique.
IVGI = Ingénierie Virtuelle du Génie Industriel.

K

KADS = Knowledge Acquisition and Documentation Structuring.
KBE = Knowledge Based Engineering.
KBS = Knowledge Based System.
KLM = Knowledge Lifecyle Management.
KM = Knowledge Management.
KOD = Knowledge Oriented Design.

L

L'AMo = L'Antique et le Moderne.
LAMIC = Laboratoire de muséologie et d'ingénierie de la culture.
LCE = Life Cycle Engineering.
LINA = Laboratoire d'Informatique de Nantes Atlantique.
LOD = Level Of Detail.
LS2N = Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes.

M

MADS = Modeling Application Data with Spatio-temporal features.

MASK = Method for Analysing and Structuring Knowledge.
MBD = Model-based Definition.
MCC = Maître de Conférence Contractuel.
MCF = Maître de Conférences.
METIS = ModElisation Tridimensionnelle de maquettes numériques par l'Intégration de données géométriques et de connaissances hétérogèneS.
MIS = Mediation Information System.
MKSM = Methodology for Knowledge System Management.
MLC = Manager, Leader et Communicateur.
MMT = Machine à Mesurer Tridimensionnelles.
MNT = Modèle Numérique de Terrain.
MOKA = Methodology and software tools Oriented to Knowledge based engineering Applications.
MUST = Réseau des professionnels de l'information et de la documentation pour les Musées, le patrimoine et la Culture scientifique et Technique.

N

NIST = National Institute of Standards and Technology.

O

OCIM = Office de Coopération et d'Information Muséales.
OF = Ordre de Fabrication.
OST = Organisation Scientifique du Travail.
OSTIC = Objets Sociétés Technologies de l'Information et de la Communication.

P

PA = Principe Administratif.
PAST = professeur associé à temps partiel.
PCRD = Programme-Cadre pour la Recherche et le Développement.
PDA = Pocket Data Assistant.
PDM = Product Data Management.
PEI = Projets d'Etudes Industrielles.
PES = Prime d'Encadrement Scientifique.
PHI = Pôle historique d'Indret.
PICS-PPO = Plate-forme d'Intégration logicielle pour la gestion des Connaissances et la Simulation du comportement Produit-Processus-Organisation en Ingénierie.
PLC = Product Life Cycle.
PLM = Product Lifecyle Management.
PPO = Produit-Processus-Organisation.
PPR = Produit Processus Ressource.
PSS = Product Service System.
PU = Professeur des Universités.

R

RA = Réalité Augmentée.
RDF = Resource Description Framework.
RE = reverse-engineering.
ReSeed = Rétro-conception SémantiquE d'objEts patrimoniaux Digitaux.
RFBS = Requirements/Function/Behavior/Structure.
RFID = Radio Fréquence IDentification.
ROI = Return Of Investment.
RV = Réalité Virtuelle.

S

SADT = Structured Analysis and Design Technique.
SFHST = Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques.
SGDT = Systèmes de Gestion de Données Techniques.
SHS = Sciences Humaines et Sociales.
SI = Système d'Information.
SIC = Système d'Information à base de Connaissances.
SIG = Système d'Information Géographique.
SLM = Service Life Cycle.
SOC = Systèmes d'Organisation des Connaissances.
SOVA = Simple Ontology Visualization API.
SPI = Sciences pour l'Ingénieur.
STC = Scientific Technical Commitees.
STEP = STandard for Exchange of Product model data.
STIC = Sciences et techniques de l'information et de la communication.
STL = StéréoLithographie.

T

TGIR Huma-Num = Très Grande Infrastructure de Recherche Humanités Numériques.
TNA = Trans-National Access.
TRIZ = Théorie de résolution des problèmes inventifs.

U

UDPN = Usages Des Patrimoines Numérisés.
UML = Unified Modeling Language.
UMR = Unité Mixte de Recherche.
UNESCO = Organisation des Nations Unies pour la Science, l'Art et la Culture.
UTBM = Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

V

Visionair = VISION Advanced Infrastructure for Research.
VPERI = Virtual Parts Engineering Research Initiative.

W

W3C = World Wide Web Consortium.
WBS = Unified Modeling Language.
WBS = Work Breakdown Structure.

Sommaire

Pourquoi écrire ce manuscrit ? ... 15
Plan du manuscrit ... 15
Mon CV en 1 page ... 16
Ma thématique de recherche en 1 page ... 16

1. Parcours professionnel… être enseignant-chercheur ? ... 19

1.1 Diplômes et parcours professionnel ... 19
1998 - Diplôme du Baccalauréat ... 19
2003 - Diplôme d'ingénieur généraliste ... 19
Expériences professionnelles à BAC+5 ... 19
2004 - Diplôme d'Etudes Approfondies ... 19
Expérience professionnelle à BAC+6 ... 20
2007 - Diplôme de Doctorat ... 20
2008 - Poste ATER ... 20
2008 - Poste de Maître de Conférences n°1193 ... 21

1.2 Activités pédagogiques et administratives ... 21
1.2.1 Mon positionnement comme formateur dans l'enseignement supérieur ... 21
1.2.2 Compétences apportées en enseignement des sciences de l'ingénierie ... 22
Profil de poste ... 22
1.2.3 Description des formations en sciences de l'ingénierie ... 22
Gestion des connaissances et Systèmes d'Information d'Entreprise ... 22
Analyse de la valeur et méthode TRIZ ... 23
Outils numériques et Réalité Virtuelle ... 23
Management de projet : initiation et projet appliqué avec industriel ... 23
Option MLC « Manager, Leader et Communicateur » ... 24
1.2.4 Compétences complémentaires apportées en enseignement des sciences humaines et sociales ... 25
Option INPACT « Ingénierie et Numérique pour le Patrimoine, l'Art et la Culture » ... 25
1.2.5 Description des formations en sciences humaines et sociales ... 26
Objectifs du cours ... 26
1.2.6 Niveaux d'études et établissements ... 26
Niveaux d'études enseignés ... 26
Etablissement de rattachement principal ... 26
Autres établissements ... 27
1.2.7 Ma méthode de formation : ingénierie pédagogique et pédagogie par projets ... 27
1.2.8 Synthèse des enseignements et bilan des charges de services ... 28
1.2.9 Responsabilités collectives ... 29
1.2.10 Partenariats et implication académique à l'international ... 30
Enseigner le Génie industriel à ECPk ... 30
Summer Design Academy, Université de Penn State ... 30

1.3 Animation scientifique et cadre institutionnel de la recherche ... 31
1.3.1 Mon laboratoire de rattachement : du LAN au LS2N en passant par l'IRCCyN ... 31
Historique de l'IRCCyN ... 31
Le laboratoire IRCCyN, jusqu'à fin 2016 ... 32
Le LS2N, début 2017 ... 32
1.3.2 Mon équipe de rattachement : de IVGI à IS3P ... 32
Equipe IVGI de 2004 à 2010 ... 32
Equipe IS3P de 2010 à 2016 ... 32
Nouvelle équipe IS3P en 2017 ... 33
1.3.3 Direction thèses et masters ... 34
Encadrement post-doctoral ... 34
Encadrement doctoral (en cours) ... 34
Encadrement doctoral (thèses soutenues) ... 34
Encadrement master ... 35

Comité de suivi de thèses ... 36
1.3.4 Rayonnement scientifique : projets et responsabilités collectives ... 36
Rayonnement scientifique – international et européen ... 36
Rayonnement scientifique – national ... 36
Rayonnement scientifique – région Pays de Loire ... 37
Responsable et Coordinateur scientifique ... 37
Collaborations européennes et internationales ... 37
1.3.5 Contrats de recherche et contrats industriels ... 37
1.3.6 Organisation de colloques ... 38
Membre du comité d'organisation ... 38
Organisateur général et co-chairman ... 38
1.3.7 Expertises scientifiques ... 39
Jurys de thèses de doctorat ... 39
Expertises scientifiques ... 40
Expertises scientifiques avec contrats de recherche ... 40
1.3.8 Diffusion du savoir : publications et production scientifique ... 40
Evolution du nombre de publications scientifiques ... 41
Publication marquante dans le parcours scientifique – Journal international avec comité de lecture ... 41
Publication marquante dans le parcours scientifique – Direction d'ouvrage ... 42
Les 10 communications marquantes de mon parcours scientifique ... 42
Concours / Récompenses / Prix ... 43
Presse télévisuelle et émission radio ... 43
Synthèse de la répartition des publications scientifiques ... 44

2. Synthèse des activités de recherche ... 45

2.1 Historique et contexte de mes recherches ... 47
2.1.1 La pluridisciplinarité : de l'ingénieur au docteur ... 47
Cursus ingénieur ... 47
Première approche de la gestion des connaissances ... 47
Interdisciplinarité dans le monde de la recherche… ... 47
Première approche de la gestion des connaissances ... 48
2.1.2 Mon travail de thèse comme 1ère étape marquante ... 48
Contexte ... 48
Résumé de ma thèse ... 49
Verrou scientifique « vue processus » ... 49
Verrou scientifique « vue produit » : le DHRM ... 50

2.2 Verrous et problématiques scientifiques ... 51
2.2.1 Problématique économique et industrielle : vers un patrimoine trop numérique ! ... 51
2.2.2 Problématique scientifique : vers une représentation digitale sémantique ou physique ? ... 52
2.2.3 Synthèse des problématiques scientifiques ... 53

2.3 Playground : le cadre scientifique de mes recherches ... 55
2.3.1 Les structures fondatrices ... 57
OSTIC ... 57
EPOTEC ... 57
2.3.2 Les projets de recherche appliqués : études objets techniques ... 58
La machine à laver le sel du Musée des Marais salants de Batz-sur-Mer ... 58
La cintreuse à membrures Bennie des chantiers de La Ciotat ... 60
L'entreprise DCNS : du canot à vapeur de 1861 à l'usine d'Indret ... 61
2.3.3 Les projets de recherche appliqués : les systèmes techniques ... 61
Entreprise DCNS : l'usine d'Indret ... 62
Forges de Paimpont ... 63
Poudrerie royale de St Chamas ... 64
2.3.4 Les projets de recherche appliqués : intégration hybride objets/systèmes en connaissances/géométries ... 66
La maquette du port de Nantes en 1900 ... 66
Le pont transbordeur de 1903 ... 68
Le projet ExplorNova ... 69

2.3.5 Les projets de recherche fondamentaux francophones ... 71
Région Artur ... 71
Le projet ANR METIS ... 72
Le projet ANR ReSeed ... 74
2.3.6 Les projets de recherche fondamentaux européens ... 76
Réseau européen InterOP ... 76
Réseau européen VRL-KCiP ... 76
Projet européen Dorothy ... 77
VISIONAIR ... 78
2.3.7 Les thèses encadrées ... 79
2008-2011 - Joanna Daaboul ... 79
2012-2016 - Mohamed Anis Dhuieb ... 80
2013-2016 - Mohamed Ouamer Ali ... 81
2011-2014 - Fabrice Le Pavic ... 82
2011-2014 - Benjamin Hervy ... 82
2014-2017 - Matthieu Quantin ... 83
2016-2019 - Loic Jeanson ... 85
2017-2020 - Oussama Keddache ... 85
2017-2020 – Paul Francois ... 85
2.3.8 Les fédérations de recherche et réseaux locaux ... 86
La MSH Ange Guépin ... 86
La PRI-IDEV ... 86
La pluridisciplinarité au sein de l'IRSTV ... 88
2.3.9 Consortiums de recherche et réseaux scientifiques nationaux ... 89
Le Consortium 3D de la TGIR Huma-Num ... 89
Le réseau UDPN (IDEX-SPC) ... 90
Le GDR-MACS ... 91
AIP-Primeca ... 92
2.3.10 Sociétés savantes, collaborations européennes et internationales ... 93
Le CIRP ... 93
De l'entreprise Creaform3D au Laboratoire LAMIC, Université de Laval à Québec ... 94
Le réseau européen COST Action TU0801 et l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège, Belgique ... 95
Le réseau COSCH TD 1201 et le projet Schema-TEC ... 96
2.3.11 Synthèse du playground ... 98

2.4 Positionnement de mes travaux dans les communautés scientifiques ... 101
2.4.1 Problématique et cadre général de mes apports : le « KLM for Heritage » ... 101
2.4.2 La gestion des connaissances ... 103
Pourquoi prendre en compte les connaissances ? ... 103
Les missions de l'ingénierie des connaissances ... 105
Vers une définition de la connaissance ? ... 106
Les méthodologies de gestion des connaissances ... 109
Les méthodes de capitalisation des connaissances ... 110
Vers un système d'information pour supporter la connaissance ... 112
Structuration multi-échelle de la connaissance ... 114
2.4.3 Capture des connaissances physiques : numérisation 3D et Reverse-engineering ... 116
Des connaissances à la numérisation 3D ... 116
Apport de la numérisation 3D et particularités pour la restauration des objets culturels ... 116
Spécificités de la numérisation 3D des objets patrimoniaux ... 118
Définition et applications du Reverse-Engineering ... 120
Positionnement des travaux dans l'histoire des modèles numériques ... 121
La reconnaissance de formes dans les modèles numériques 3D par la segmentation ... 122
Les projets de rétro-conception intelligente ... 123
La méthodologie Ki4D ... 124
2.4.4 Modèles de produits et modèle de contexte pour un PLM industriel ... 126
Les premiers modèles de produits ... 126
Les modèles produits élargis ... 127
Du Système d'Information au PLM ... 131
Les fondements du PLM : la structuration des données techniques dans les entreprises ... 132
Machine learning et web sémantique ... 133

Intégration d'un modèle de contexte pour mieux adapter les connaissances 134
2.4.5 Vers un PLM dédié au patrimoine : le KLM patrimonial 137
Le PLM pour le patrimoine : verrous technologiques et humains 137
Le cycle de vie étendu du patrimoine 138
Un modèle ontologique dédié au patrimoine : le Digital Heritage Reference Model 140
Des ontologies du réel grâce aux modèles spatio-temporels 142
Modèles multidimensionnels pour le domaine patrimonial 143
Un PLM muséologique 145
Analyse sémantique des sources/archives et dataviz 148

2.5 Travaux en cours et futurs 153
2.5.1 Extraction de connaissances 154
Déontologie de la 3D patrimoniale : vers un standard 154
Archivage pérenne des données 155
Multi-modalités pour la muséologie virtuelle 156
RV/RA pour le musée de demain 158
Interaction avec les connaissances : l'annotation virtuelle 159
Immersion dans les connaissances : la RA in-situ in-vivo 161
Aide à la décision et médiateur virtuel 163
L'impression 3D 165
2.5.2 Une démarche anthropocentrée 166
La place de l'humain dans le numérique 166
Un processus de co-conception interdisciplinaire 168
Un modèle heuristique pour définir l'outil de médiation multimodal 170
Innovation grâce au patrimoine et impact sur le métier de l'Ingénieur 172
Entre historien et reverse-engineer : un métier transdisciplinaire 173

3. Bibliographie générale et personnelle 175

3.1 Références bibliographiques du manuscrit 175

3.2 Liste complète de mes publications scientifiques 188
3.2.1 Thèse de doctorat et thèse de master 188
3.2.2 Journaux internationaux avec comité de lecture 188
3.2.3 Journaux francophones avec comité de lecture 189
3.2.4 Direction d'ouvrage 190
3.2.5 Contribution à des ouvrages ou revues collectives 191
3.2.6 Conférences internationales avec comité de lecture et actes 192
3.2.7 Conférences nationales avec comité de lecture et actes 196
3.2.8 Conférences sans acte et communications invitées 197

3.3 Copie des publications scientifiques majeures 203

Index des figures

Figure 1 - Répartition des enseignements effectués depuis 2007 28
Figure 2 - Synthèse des heures d'enseignements effectuées depuis 2007 29
Figure 3 - Surveillance d'examen à Centrale Pékin : confiscation obligatoire des téléphones portables ! 30
Figure 4 - Evolution du nombre de publications en cumulé depuis 2004 41
Figure 5 - Nombre de publications en journaux et facteurs d'impact 41
Figure 6 - Schéma synoptique des évolutions des publications majeures 42
Figure 7 - Répartition des publications et diffusion de la recherche depuis 2004 44
Figure 8 - Répartition des publications en fonction des types et co-auteurs principaux 44
Figure 9 - Ma trajectoire scientifique 46
Figure 10 - Méthodologie générale pour la conservation du patrimoine technique et industriel (Laroche, 2007) 50
Figure 11 - Evolution temporelle de mes activités de recherche depuis 2004 56
Figure 12 - Machine à laver le sel : Numérisation 3D par théodolite laser 59
Figure 13 - Machine à laver le sel : Maquette 3D CAO 59
Figure 14 - Machine à laver le sel : objet reconstruit et implanté dans le nouveau Musée 59
Figure 15 - La cintreuse à membrures : réalité VS virtualité 60
Figure 16 - Canot à vapeur de 1861 : plan d'origine et modèle CAO 61
Figure 17 - Usine d'Indret : modèle CAO et portage dans un environnement de Réalité Virtuelle 62
Figure 18 - Forges de Paimpont : Analyse systémique 63
Figure 19 - Forges de Paimpont : Comparaison de plusieurs états pour valider la modélisation CAO 64
Figure 20 - Forges de Paimpont : Modèle 3D virtuel texturé du bâtiment de laminage 64
Figure 21 - Poudrerie royale : Relevés numériques multi-process 65
Figure 22 - Poudrerie royale : Modèle CAO et environnement en réalité virtuelle 65
Figure 23 - Projet Nantes1900 : Dispositif muséographique 66
Figure 24 - Projet Nantes1900 : représentation sémantique des connaissances et modèle 3D numérisé 67
Figure 25 - Pont transbordeur : Modèle CAO intégré dans l'environnement virtuel de Nantes en 1900 et au XXIème siècle 68
Figure 26 - ExplorNova : Création du MNT à partir des images satellites 70
Figure 27 - ExplorNova : Application Curiosity in Mars 70
Figure 28 - ExplorNova Augmented : Application de RA à échelle 1 :1 en fonctionnement sur site 70
Figure 29 - ExplorNova Augmented : Application de RA sur « table » et affichage des éléments de connaissance en RA 70
Figure 30 - Projet ARTUR : Interactions du DFA dans le périmètre industriel (Dhuieb, 2016) 72
Figure 31 - Projet METIS : Processus global de la coévolution d'une maquette numérique et de son système réel 73
Figure 32 - Projet ReSeed : Schéma de la proposition scientifique combinant analyses fonctionnelle et sémantique 74
Figure 33 - Synoptique de valeur du processus de ReSeed aligné sur Metis 75
Figure 34 - Projet européen Dorothy : Proposition scientifique (Pedrazzoli, 2009) 77
Figure 35 - Projet européen Dorothy : Schéma de principe des contraintes (Pedrazzoli, 2009) 77
Figure 36 - Projet ARTUR : proposition scientifique de l'assistant virtuel (Laroche, Dhuieb, Belkadi, & Bernard, 2016) 80
Figure 37 - Projet METIS : Exemple d'application de la méthodologie Ki4D (Ouamer-Ali, Laroche, Remy, & Bernard, 2017) 81
Figure 38 - Articulation des problématiques scientifiques et industrielles de la thèse de Benjamin Hervy 83
Figure 39 - Illustration de la patrimonialisation de masse (Quantin, Hervy, Laroche, & Kerouanton, 2015) 84
Figure 40 - Heuristique des connaissances selon Matthieu Quantin (Quantin, Laroche, & Kerouanton, 2016) 84
Figure 41 - PRI-iDEV : cartographie méthodologique des usages des technologies dans les expériences de visite 87
Figure 42 - Comparaison de la méthodologie entre Nantes1900 et Virtual Leodium (Billen, et al., 2012) 96
Figure 43 - Barycentre de mes problématiques scientifiques appliquées aux projets réalisés 99
Figure 44 - Cycle de vie des connaissances patrimoniales 101
Figure 45 - Définition des domaines de recherche concernés 102
Figure 46 - Caractéristiques clés de l'usine du futur (Dhuieb, 2016) 103
Figure 47 - Les composants du système de représentation du miroir de la connaissance selon Genelot (Genelot, 1992) 105
Figure 48 - Définition des thèmes de recherche sur le KM (IRCCyN, 2015) 106
Figure 49 - De la donnée à la compétence – lien avec les services industriels (Gardoni, 1999) 106
Figure 50 - Transformation Données, informations et connaissances selon Xu (Xu Y. , 2010) 107
Figure 51 - Modèle systémique du cycle de vie de la connaissance (Zimmermann, Lorenz, & Specht, 2003) 107
Figure 52 - La pyramide de la collaboration basée sur les connaissances 108
Figure 53 - Représentation du modèle SECI de Nonaka (Nonaka & Takeuchi, 1995) 108
Figure 54 - Répartition des connaissances en entreprise (Dhuieb, 2016) 108
Figure 55 - La fontaine de la connaissance 109
Figure 56 - Cercle vertueux de la connaissance de Grundstein (Grundstein, 2002) 110
Figure 57 - Le cycle en Ω de capitalisation des connaissances de Ardans (Besson & Berger, 2015) 110

Figure 58 - Les 4 Piliers de l'intégration de l'expertise (Candlot, 2006) 112
Figure 59 - Couplage système documentaire et systèmes technique & humain (Keraron, Bernard, & Bachimont, 2009) 113
Figure 60 - Principe de transformation de modèles de connaissances (Benaben, Boissel-Dallier, Lorré, & Pinguaud, 2010) .. 113
Figure 61 - Périmètre d'action des connaissances en entreprise 114
Figure 62 - Exemple d'hypergraphes pour structurer à multi-échelle les connaissances d'entreprise (Dhuieb, 2016) 115
Figure 63 - Approche double de captation des connaissances : 3D et corpus (Hervy, 2014) 116
Figure 64 - Taxonomie des techniques d'acquisition de formes 3D (Ben Amor, 2006) 117
Figure 65 - Arbre décisionnel pour l'outil de numérisation 3D (Bernard, Ammar-Khodja, Laroche, & Perry, 2007) 117
Figure 66 - Numérisation 3D par laser en musée (projet Nantes 1900) et sur ruine industrielle (La Ciotat) 118
Figure 67 - Processus et contraintes pour la numérisation 3D d'objets patrimoniaux 119
Figure 68 - Traitement en RE intelligent de la numérisation 3D de la maquette de Nantes1900 119
Figure 69 - Processus global de VPERI (VPERI, 2003) 121
Figure 70 - Processus de RE par segmentation sémantique (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012) 122
Figure 71 - Prototype de segmentation sémantique automatique (Laroche, Servieres, Lefevre, & Kerouanton, 2011) 122
Figure 72 - Processus de reverse-engineering intelligent (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012) 123
Figure 73 - Workflow de PHENIX (Durupt, Remy, Bricogne, & Troussier, 2013) 124
Figure 74 - Les différentes formes de représentations des connaissances (Chandrasegaran, et al., 2013) 125
Figure 75 - Espace Ki4D simplifié (Ouamer-Ali, Laroche, Remy, & Bernard, 2017) 125
Figure 76 - Concept de famille et de variantes exprimées au format UML (Chambolle, 1999) 127
Figure 77 - Modèle FBS proposé par Gero (Gero, 1990) 127
Figure 78 - Diagramme de classes du modèle FBS-PPRE (Labrousse, 2004) 128
Figure 79 - Diagramme de classes du modèle PPO (Noël & Roucoules, 2008) 129
Figure 80 - Diagramme de classes du modèle MOKA (Managing Engineering Knowledge, 2001) 129
Figure 81 - Diagramme de classes du modèle CPM (Sudarsan, Fenves, Sriram, & Wang, 2005) 130
Figure 82 - CPM and OAM for representing assembly structure (Fiorentini, Rachuri, Suh, Lee, & Sriram, 2008) 131
Figure 83 - Cycle d'élaboration du produit (Mony, 1992) 131
Figure 84 - Système PLM et applications métiers (Le Duigou, 2010) 132
Figure 85 - Positioning KM tools in the context of the knowledge lifecycle (Xu, Bernard, Perry, & Lian, 2011) 133
Figure 86 - Infrastructure d'échange d'informations entre les acteurs (Chambolle, 1999) 133
Figure 87 - Structure de la solution d'interopérabilité des ontologies selon Gherasim (Gherasim T. , 2013) 134
Figure 88 - Les dynamiques de l'environnement du système de production (Tolio, et al., 2010) 135
Figure 89 - Situation de travail en atelier : les interactions 135
Figure 90 - Modèle de contexte (Dhuieb, 2016) 136
Figure 91 - Modélisation des contextes métiers 136
Figure 92 - Framework de mappage contexte/connaissances (Dhuieb, Belkadi, Laroche, & Bernard, 2015) 137
Figure 93 - Approche holistique du cycle de vie (Inoue, et al., 2012) 138
Figure 94 - Evolution linéaire du cycle de vie patrimonial et les métiers associés (Hervy, Laroche, & Bernard, 2012) 139
Figure 95 - Le cycle de vie des objets anciens selon le point de vue du restaurateur (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015) 140
Figure 96 - Les poupées russes du modèle FBS dans un contexte élargi 141
Figure 97 - DHRM : couche haut niveau 141
Figure 98 - DHRM : couche bas niveau 142
Figure 99 - Principales classes proposées du modèle de référence du CIDOC (Crofts, Dionissiadou, Doerr, & Stiff, 1999) 144
Figure 100 - Framework simplifié de Hervy : modèle de connaissances patrimoniales (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015) 144
Figure 101 - Interfaces principales du SI de Nantes1900 145
Figure 102 - Framework de Hervy : application au SI du projet Nantes1900 (Hervy, Laroche, & Bernard, 2017) 146
Figure 103 - Etat de l'art des outils considérés comme des PLM muséologiques associés à du RE 147
Figure 104 - Framework intelligent pour la reconnaissance de nuage de points (Poux, Hallot, Neuville, & Billen, 2016) 148
Figure 105 - Processus HARUSPEX simplifié (Quantin, Hervy, Laroche, & Bernard, 2016) 150
Figure 106 - Processus de Haruspex (Quantin, Hervy, Laroche, & Bernard, 2016) 150
Figure 107 - Premiers résultats de Haruspex sur un corpus d'histoire de la chimie du solide 151
Figure 108 - Définition des thèmes de recherche futurs (Laroche & Kerouanton, 2016) 153
Figure 109 - Plusieurs finalités et plusieurs technologies en fonction des éléments à valoriser (Vidal & Laroche, 2017) 154
Figure 110 - Graphe séquentiel des pratiques 3D en SHS pour un archivage pérenne (Consortium 3D) 156
Figure 111 - VR continuum : degré d'intégration de la réalité physique (Dangelmaier & Blach, 2016) 157
Figure 112 - Multi-modalités d'extraction des connaissances en RV (Hervy, Laroche, Kerouanton, & Bernard, 2012) 158
Figure 113 - Catégorisation des dispositifs de visualisation de connaissances patrimoniales 158
Figure 114 - Représentation spatio-temporelle des transformations d'un bâtiment (De Luca, et al., 2010) 160
Figure 115 - Nantes1900 – premier prototype interactif (Hervy, et al., 2014) 160
Figure 116 - Nantes1900 – prototype interactif de l'ensemble de la maquette et des connaissances associées 161
Figure 117 - Le pont transbordeur de Nantes en Réalité Augmentée 162

Figure 118 - Prototype de visite sérendipité des salons Mauduit (Laroche & Kerouanton, 2016) 163
Figure 119 - Architecture informatique mise en place pour ce DFA (Dhuieb, Laroche, & Bernard, 2013) 164
Figure 120 - Du PLM au système de RA (Dhuieb, Belkadi, Laroche, & Bernard, 2014) 165
Figure 121 - Photo de la maquette à échelle 1:80 de la salle à manger de Néron au Musée d'archéologie de Marseille..... 166
Figure 122 - Le cercle vertueux de la connaissance patrimoniale « KLM for heritage » 166
Figure 123 - Figure fractale de correspondances entre usages et connaissances numériques (Vidal & Laroche, 2017) 168
Figure 124 - Le processus du modèle épistémologique transdisciplinaire (Laroche & Kerouanton, 2016)..... 169
Figure 125 - Processus de co-développement en spirale des « 3C » (Vidal & Laroche, 2017)..... 170
Figure 126 - L'outil de médiation multimodal décrit dans son espace vectoriel complexe (Laroche & Kerouanton, 2016)..... 171

Préambule

Pourquoi écrire ce manuscrit ?
Après dix années en poste comme maître de conférences, j'ai exercé plusieurs métiers :

- *Professeur* – enseignant – où j'ai su mettre en place des formations innovantes tout en répondant aux cahiers des charges fixés par l'institution et aux besoins de mes élèves, les futurs ingénieurs qui construiront notre société de demain.

- *Chercheur* par les recherches que je mène depuis 14 ans. Elles m'ont permis de prendre ma place dans la - ou plutôt – dans les communautés scientifiques dans lesquelles je suis amené à travailler. Cette interdisciplinarité est une des particularités de mon profil. Caractéristique toujours difficile à assumer lorsque l'on évolue dans un domaine qui n'existe pas, car tout est à créer.

Il ne faut donc pas attendre que les idées viennent ou que les projets se montent tout seul, c'est à moi d'être générateur de propositions scientifiques et d'aller chercher les partenaires et les financements pour démontrer les hypothèses dans lesquelles je crois.
Avoir une idée, la développer, imaginer un « bidule » pour la matérialiser, et parcourir le monde pour montrer ce « bidule » (© Alain Bernard) et semer des graines d'idées… la recherche scientifique est un vrai parcours de vie !
Tout comme il y a 208 ans, si Galvani et Volta n'avaient pas su dépasser ces montagnes géographiques et franchir les barrières idéologiques, peut-être n'aurions-nous jamais eu d'électricité ! (Bernardi, 2001)
Car la recherche scientifique ce n'est pas qu'un monde de concepts ! Certes, il y a des recherches fondamentales ; mais elles vont rythmer les recherches plus appliquées. Pour ma part, j'ai réalisé une thèse de doctorat dite fondamentale, grâce à une allocation du ministère de la recherche. Et pourtant, j'ai tenu à ce que mes travaux soient également appliqués. Travailler en mode projet et en interdisciplinarité est le principe même de l'approche inductive du Génie Industriel : une problématique industrielle concrète va trouver sa réponse dans un principe scientifique. Il faut essayer/tâtonner, puis théoriser/standardiser, et enfin développer/appliquer.

Plan du manuscrit

0. A l'issue de ce préambule, je synthétiserai en 2 pages mon CV ainsi que mes recherches scientifiques.
1. Dans la première partie de ce manuscrit, j'exposerai mon parcours professionnel traduisant les convictions qui m'animent à transformer l'essai de mon diplôme d'ingénieur en celui de docteur puis d'enseignant-chercheur à plein temps.
2. Dans un deuxième temps, je décrirai l'environnement dans lequel je travaille. Il s'agit du bac à sable de mes recherches qui définit les frontières du terrain d'expérimentations.
   Cette synthèse de mes activités de recherche permettra d'identifier mes apports scientifiques et circonscrire mes contributions dans les domaines de recherche identifiés ; tout en les positionnant dans l'état de l'art.
   Cet état des lieux fera émerger des pistes et dégager des perspectives définissant ainsi des axes de recherche pour les années futures.
3. En annexes figurent la liste des références bibliographique de mes thématiques de recherche ainsi que mes publications scientifiques réalisées avec une copie des 10 publications majeures ayant marquées mon parcours.

Mon CV en 1 page

Emploi actuel

Enseignant-chercheur (60ème section CNU) – Maître de Conférences
Département Ingénierie des Produits et Systèmes Industriels – Laboratoire LS2N / équipe IS3P
Ecole Centrale de Nantes – 44 000 NANTES - www.ec-nantes.fr

Parcours universitaire

- 2007 - Diplôme de Doctorat (60ème et 72ème sections CNU) - mention "Très honorable" - allocation de recherche MNRT - "*Contribution à la sauvegarde des Objets techniques anciens par l'Archéologie industrielle avancée*"
  Laboratoire IRCCyN - Institut de Recherche en Communication et Cybernétique (UMR CNRS 6597)
  Ecole Centrale de Nantes - 44 000 NANTES - www.irccyn.ec-nantes.fr
  Centre François Viète d'Epistémologie et d'Histoire des Sciences et des Techniques (EA CNRS 1161)
  Université de Nantes - 44 000 NANTES - www.sciences.univ-nantes.fr/cfv
- 2004 - Diplôme d'Etudes Approfondies – Conception de Produits et Innovation (60ème section CNU) - mention "Bien" - "*Etude et évaluation d'outils d'aide à l'innovation intégrant les données et connaissances capitalisées*"
  Laboratoire Conception de Produits et Innovation (EA CNRS 3927)
  Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – 75 013 PARIS - cpn-web.paris.ensam.fr
- 2003 - Diplôme d'ingénieur généraliste – spécialisation Génie Mécanique et Conception
  Université de Technologie de Belfort Montbéliard - 90 400 SEVENANS - www.utbm.fr

Disciplines pédagogiques enseignées et compétences scientifiques

- Ingénierie, Génie Industriel et Génie Mécanique : Gestion de projet, développement de produits en conception mécanique, amélioration/optimisation/innovation, méthode TRIZ, analyse de la valeur, mise en place de processus de conception, capitalisation et gestion des connaissances, Systèmes d'informations, PLM, ERP, Réalité Virtuelle.
- Etudes historiques socio-économico-techniques d'objets techniques et scientifiques, conservation et valorisation du patrimoine, muséologie.

Production scientifique

- H-Index = 17,84 pour 307 citations (source researchgate, octobre 2017) / h-index 12 pour 457 citations (source Google Scholar, octobre 2017)
- 14 revues à facteur d'impact de 0,71 à 5,02
- 19 revues internationales et 16 revues nationales
- 19 chapitres d'ouvrages et 1 livre en tant qu'éditeur
- 51 conférences internationales et 26 conférences nationales (avec comité de lecture et actes)
- 72 keynotes ou conférences et séminaires invités

Thèses et masters

- 8 jury de thèses depuis 2010
- encadrement de 11 thèses de doctorat dont 6 défendues, 2 CIFRE, 1 thèse en cours de montage pour 2018
- encadrement de 2 post-doc
- encadrement de 24 Master dont 23 défendus

Projets & réseaux d'excellence scientifiques – partenaire, coordination & expertise

- 7 projets européens comme partenaire : Visionair, COSCH, Interop, VRL-KCiP, Dorothy, SMCS, Leonardo
- 2 projets ANR : Metis comme partenaire et ReSeed comment partenaire et coordinateur scientifique national
- 3 projets régionaux : Explornova, Artur, Mervi
- 2 réseaux scientifiques internationaux : CIRP associate member et expert ICOMOS
- 6 réseaux scientifiques nationaux : UDPN, IRSTV, GDR-MACS, Consortium3D, SFHST, MUST
- 4 réseaux scientifiques régionaux : PRI-IDEV, AIP Primeca, MSH, Nantes métropole

Activités scientifiques

- 8 prix et distinctions : papers award, thèses ou projets
- 3 expertises de projets européens et nationaux
- reviewers pour 8 revues et conférences internationales depuis 2011
- Chairman, co-chairman ou soutien technique et logistique dans l'organisation de 7 conférences internationales et 6 conférences nationales depuis 2005 : CIRP GA, CIRP Design, ESDA, DET…
- 16 contrats européens, nationaux, institutions ou industriels depuis 2005 (budget cumulé de 1,5 millions d'euros)

Ma thématique de recherche en 1 page

Lors de ma soutenance de thèse en décembre 2007, le Pr Patrick Serrafero, un des membres de mon jury, m'a qualifié de « ressusciteur des machines anciennes ». Cette description peut faire sourire, mais elle traduit parfaitement l'idée principale de mes travaux.
Aujourd'hui, pour créer nos objets du quotidien (qu'ils soient outil ou machine (Simondon, 1989)), les entreprises utilisent la Conception Assistée par Ordinateur, la numérisation 3D ou encore la Réalité Virtuelle. Ces outils sont les piliers de l'industrie contemporaine. L'idée originale proposée par Michel Cotte en 1999 était simple (Cotte & Deniaud, 2005) : utiliser ces outils sur de la « vieille industrie ».

Alors pourquoi ne pas utiliser ces outils contemporains pour faire revivre des machines anciennes, voir même des usines complètes, qui ont été construites depuis la Révolution Industrielle ?

De nos jours, lorsqu'il est question de Patrimoine, la priorité est donnée aux châteaux, aux vieilles pierres… mais ce n'est là que du patrimoine bâti, inerte. Alors qu'en est-il des machines et du savoir-faire que les hommes vont emporter avec eux lorsque les sites industriels seront arrêtés ? C'est un peu comme un puzzle dont les pièces s'usent et disparaissent au fur-et-à-mesure du temps emportant toute la connaissance technique, celle « de l'humanité ». Alors si l'on ne veut pas réinventer la roue, ou la bielle-manivelle, mes travaux de recherche permettent - non pas de tout sauvegarder – mais de trouver une méthodologie pour « sauver » ce patrimoine immatériel.

A l'issue de ma thèse de doctorat, depuis 10 ans, mes travaux de recherche ont ainsi permis de créer une nouvelle discipline : l'Archéologie Industrielle Avancée.

Avec l'explosion des contenus sur le Web, le citoyen fait face à une profusion d'informations. Comment faire le lien entre ce monde virtuel et le monde réel dans lequel il évolue ? Le double numérique peut - s'il est conçu avec rigueur scientifique - devenir un outil de démonstration de la valeur du savoir-faire du passé. Les outils actuels développés par l'industrie du numérique présentent des limites liées aux technologies elles-mêmes. Nos travaux cherchent à développer des outils d'aide à la décision pour permettre tant aux professionnels qu'à la vulgate de mieux appréhender cette connaissance.

Il s'agit de changer le rapport du citoyen à la culture et d'apporter un nouveau regard sur le savoir dans un objectif d'amélioration des conditions d'existence de l'être humain.

Vulgariser cette connaissance auprès d'un large public est également nécessaire pour essaimer les bonnes pratiques. A ces fins, je développe de nombreuses collaborations avec des structures et des institutions de valorisation patrimoniale. Imaginons des Techno-Musées : les musées de demain qui nous feront apprendre grâce à des machines virtuelles car, comme le disait Malraux : « Un musée est une utopie, un lieu qui échappe à la mort ».
A très long terme, un des enjeux de mon projet de recherche sera de contribuer – à la hauteur de mes moyens – à la capture de l'ensemble des savoir-faire de l'humanité. Considérant que la matérialisation dans une réalisation architecturale, artistique ou encore un objet n'est que la projection d'un savoir-faire immatériel.

Comment, demain, pourrons-nous capturer ces gestes anciens et permettre ainsi leur pérennisation ?

Les approches actuelles tendent à matérialiser certains savoir-faire dans des ouvrages linéaires. Lier la réalisation physique et le geste est pourtant fondamental ! Il s'agit là d'une nouvelle forme de collaboration homme-machine pour hybrider l'encapsulation de données de masse. Stocker cette connaissance dans des silos numériques ne ferait qu'accroitre les archives virtuelles de notre Société. Mes travaux veulent également exploiter cette connaissance afin, un jour, de permettre de réinjecter ce savoir-faire ancien au sein de nos entreprises. En effet, ces dernières n'ont ni le temps, ni les ressources humaines nécessaires pour capitaliser un savoir ancestral qui n'aurait pas de rentabilité directe.

Et pourtant, cette connaissance peut devenir source d'innovation afin de créer un monde plus durable.

D'un point de vue industriel, il s'agit d'anticiper les démarches actuelles de rétro-conception en ne se plaçant pas uniquement du point de vue du patrimoine passé. Comment assurer la pérennisation d'une maquette numérique et du double numérique d'un avion ou d'un bâtiment pour envisager son démantèlement dans 50 ans ? Il faut considérer dès que possible le patrimoine du présent qui deviendra un jour le patrimoine de demain.

Le patrimoine représente un réel enjeu contemporain qui permettra de construire les projets pour notre futur.

Tout est à inventer : nouvelles démarches de diffusion de la connaissance, nouvelles pédagogies d'apprentissage, nouvelles structurations de la connaissance intégrant le contexte, le temps… nouveaux outils de digitalisation de nos savoir-faire, nouveaux métiers pour des projets transdisciplinaires… le chantier est vaste.
Rédiger ce mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches est donc pour moi une étape dans ce parcours afin d'analyser les pistes qui furent un succès, les échecs et définir les hypothèses pour la recherche future.
Depuis 10 ans, j'ai démontré que la thématique scientifique interdisciplinaire que je développe peut exister. Désormais, je souhaite assumer cette autonomie tant pédagogique que scientifique et administrative. Des responsabilités que je veux porteuses de sens afin que la science aide à construire la Société de demain, toujours plus respectueuse de notre humanité et de la planète.

1. Parcours professionnel… être enseignant-chercheur ?

1.1 Diplômes et parcours professionnel

1998 - Diplôme du Baccalauréat
Série Scientifique option technologie
Mention "AB"[1]

2003 - Diplôme d'ingénieur généraliste
"Spécialisation mécanique" / grade de Master

Depuis 1998, date d'obtention du Baccalauréat, je suis rentré en formation supérieure. Mais, avoir un projet professionnel à 18 ans n'est pas évident. A l'origine je souhaitais devenir ingénieur… du son ! Le concours pour rentrer au conservatoire de Paris étant bien trop complexe, je manquais d'assise scientifique et technique solides. J'ai donc dû faire un choix et me convaincre que la musique serait une passion et non un métier. Intégrer une école d'ingénieur était une façon de m'ouvrir vers de nouveaux horizons. Ainsi, en 1998, je suis rentré à l'UTBM[2] directement en prépa intégrée.
Avec un passé de bricoleur, j'ai pu acquérir les bases de la mécanique que tout ingénieur utilise dans sa vie "quotidienne" et me forger de réelles compétences professionnelles. Désormais, la conception de produits, l'innovation des systèmes techniques, la gestion de projet… sont des domaines qui me passionnent ; et pour lesquels j'ai également pu mettre en pratique la théorie à travers des projets industriels et des projets scientifiques.
Pour autant, une divergence est apparue en 2000 lorsqu'il a fallu que je choisisse ma spécialité. Même si être ingénieur c'est être généraliste avant tout, nous devons choisir un domaine de prédilection. Mon dilemme était : mécanique ou informatique ? J'ai donc choisi le génie mécanique en partant du postulat que tout mécanicien pourra faire de l'informatique mais que le contraire était plus difficile. Le choix fut le bon car aujourd'hui j'apporte ma vision de mécanicien-utilisateur des nouvelles technologies en préconisant et faisant avancer les outils et méthodes du monde de l'informatique.

Comme beaucoup d'étudiants, je considérais que faire des études était plus une occupation et non pas la préparation à un futur métier. Les résultats académiques n'étant pas à la hauteur, à BAC+1 j'ai dû envisager de repartir vers un IUT. Mais, à la suite de mon stage ouvrier que j'ai réalisé dans une entreprise de fabrication de panneaux en fibres composites, j'ai pris conscience de mes aptitudes au travail intellectuel. À cette période, en parallèle à mes études, j'étais également professeur de musique (percussion) à raison de 12 heures par semaine ; et là aussi, j'ai pris conscience que le travail routinier n'était pas ce que je préférais.

Durant mes études supérieures, j'ai réalisé d'autres stages ingénieurs qui m'ont permis de mieux appréhender le monde industriel. Ils m'ont également confirmé que le travail routinier en bureau d'études n'était pas pour moi.
Comme détaillé dans la partie ci-après de mes activités de recherche sur une *Première approche de la gestion des connaissances*, mon stage de fin d'études à Alstom Transport fut décisif pour mon domaine scientifique actuel : j'ai réalisé ma première approche du monde de la gestion des connaissances.

Expériences professionnelles à BAC+5

- Février 1999 - Stage ouvrier à UDD-FIM[3] (Delle, 90) - Travail dans une équipe de fabrication de composants isolants
- Sept. 2001 - Fév. 2002 - Stage de technicien supérieur à PSA Peugeot Citroën[4], (Belchamp, 25) - Direction des Plates-formes et Achats (DPTA/DOGN/CGMP/CCAI), Centre de recherche de Belchamp - "Mise au point de plans de tests pour un banc d'intégration moteur"
- Fév. 2003 - Juil. 2003 - Stage d'ingénieur à ALSTOM TRANSPORT SA[5], Bureau d'Etudes (Ornans, 25) - Management des connaissances - "Réalisation d'un guide de conception mécanique des moteurs électriques de traction"

2004 - Diplôme d'Etudes Approfondies
Spécialité Conception de Produits et Innovation[6] *- 60ème section CNU*
Mention "Bien"

[1] Lycée Technique Raoul FOLLEREAU - 90000 BELFORT
[2] UTBM = Université de Technologie de Belfort-Montbéliard – www.utbm.fr
[3] http://www.vonroll.com
[4] www.psa-peugeot-citroen.com
[5] www.alstom.fr
[6] Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – 75013 PARIS - cpn-web.paris.ensam.fr

Peu convaincu de rejoindre l'industrie immédiatement après mon stage de fin d'études, j'ai décidé de poursuivre ma formation en DEA Conception de produit et innovation à l'ENSAM Paris. Même avec une équivalence du grade de Master déjà obtenu par mon diplôme ingénieur, l'objectif était d'enrichir mes connaissances sur les méthodologies et processus utilisés en entreprise (LCE[7]) tout au long du cycle de vie du produit (PLC[8]).
Je détaillerai les compétences acquises durant ces études complémentaires ainsi que les aboutissants du stage de Master réalisé au sein de la société PSA Peugeot Citroën dans la partie ci-après de ce manuscrit sur la *synthèse de mes activités de recherche*.

Expérience professionnelle à BAC+6

- 2003-2004 - Projet de recherche de DEA à PSA Peugeot Citroën, Direction de l'Innovation et de la Qualité (DINQ/DSIN/SIPP/PGQD/SDOQ/OMIC), Centre Technique de la Garenne-Colombes - Management des connaissances et gestion de l'innovation - "Etude et évaluation d'outils d'aide à l'innovation intégrant les données capitalisées"

2007 - Diplôme de Doctorat
60ème section CNU[9] et 72ème section CNU[10]
Mention "Très honorable"
1er prix du Monde de la Recherche en Sciences Exactes

A l'issue de cette première expérience dans le monde de la recherche, j'ai donc envisagé la possibilité de réaliser une thèse de doctorat. Grâce à Michel Cotte, alors enseignant-chercheur à l'UTBM et qui deviendra par la suite mon futur co-directeur de thèse, j'ai monté un dossier pour réaliser ma thèse au sein de l'UTBM. La CCSTI [11]du Parc du Pré la Rose à Montbéliard m'ouvrait ses portes ; la communauté d'agglomération me fournissait un salaire d'ingénieur et une enveloppe budgétaire pour mener toutes les expérimentations nécessaires, le directeur de thèse était trouvé. Mais les politiques des laboratoires de recherche ne m'étaient pas encore familières ; mon projet de thèse ne correspondait pas au projet de recherche du laboratoire qui aurait pu m'accueillir à l'UTBM. J'ai donc dû abandonner cette voie.
Fort d'une rencontre entre Michel Cotte et Alain Bernard, je suis arrivé à l'Ecole Centrale de Nantes en 2004. J'ai donc continué ma migration géographique vers l'Ouest où j'ai été accueilli pour réaliser une thèse sur la base d'une allocation de recherche du ministère. Alain Bernard et Michel Cotte deviendront mes deux co-directeurs de thèse.
La vulgate pense souvent que les chercheurs sont un peu décalés et qu'il faut être encore plus fou pour surenchérir avec 3 ans d'études après son diplôme d'ingénieur ! Il est vrai que BAC+8 peut paraître beaucoup ; mais l'essentiel n'est-il pas de trouver un métier qui non seulement nous fasse vivre, mais surtout qui nous plaise ? Nous allons travailler pendant plus de 40 ans de notre vie alors autant faire le bon choix. Les entreprises privées sont une solution mais la recherche scientifique en est une autre. Avoir une idée ; la développer ; imaginer un « bidule » pour la matérialiser ; et parcourir le monde pour le montrer et semer des graines d'idées… la recherche scientifique est un vrai parcours de vie !
Tout comme il y a 208 ans, si Galvani et Volta n'avaient su dépasser ces montagnes géographiques et franchir les barrières idéologiques, peut-être que n'aurions-nous jamais eu d'électricité !
Mon doctorat porte sur l'application des outils des sciences pour l'ingénieur au patrimoine industriel ; à noter que ces travaux me vaudront trois récompenses dont le prix des thèses du Monde de la Recherche en Sciences Exactes. Les résultats et avancées scientifiques de ma thèse seront détaillés dans la prochaine partie de ce manuscrit.

2008 - Poste ATER
60ème section CNU
Ecole Centrale de Nantes[12] – Département IPSI[13] et CLES[14]

Depuis mon arrivée à l'Ecole Centrale de Nantes, mes trois années de doctorat en tant qu'allocataire de recherche ministérielle et l'année en poste de ½ ATER m'ont permis de comprendre les enjeux et de cerner les réels besoins de la formation des ingénieurs de nos jours. J'ai ainsi pu participer activement aux enseignements du département IPSI et prendre conscience qu'à mon tour je pouvais donner un peu de mon savoir-faire aux futurs ingénieurs de demain.

[7] LCE = Life Cycle Engineering
[8] PLC = Product Life Cycle
[9] Laboratoire IRCCyN – 44000 NANTES - www.irccyn.ec-nantes.fr
[10] Centre François Viète – 44000 NANTES - www.sciences.univ-nantes.fr/cfv
[11] CCSTI = Centre de culture scientifique, technique et industrielle
[12] www.ec-nantes.fr
[13] Département IPSI = Ingénierie des Produits et Systèmes Industriels
[14] Département CLES = Communication Langues Entreprise et Sport

2008 - Poste de Maître de Conférences n°1193
60ème section CNU - Profil Génie Industriel
Ecole Centrale de Nantes – Département IPSI

Au-delà de l'aspect universitaire, se savoir impliquer dans un projet plus vaste et contribuer à la formation et l'éducation des jeunes d'aujourd'hui est pour moi une raison de vivre.
Désormais docteur-ingénieur en mécanique et en histoire, je travaille sur la transposition des connaissances du passé en connaissances contemporaines, lisibles et compréhensibles dans le système sociotechnique présent. L'un des objectifs de ces recherches est de pouvoir réutiliser le patrimoine technique comme base pour l'innovation.
Décrochant ce poste de Maître de Conférences au terme de 10 années d'études après BAC, compte tenu des nombreux rebondissements durant mon parcours, je ne regrette en aucun cas mes choix qui me confortent dans l'idée que le métier d'ingénieur est un métier qui mène à « tout ».

1.2 Activités pédagogiques et administratives

1.2.1 Mon positionnement comme formateur dans l'enseignement supérieur

Depuis mon stage de fin d'étude d'ingénieur, réalisé au sein d'Alstom Transport, une thématique transversale à mes activités tant professionnelles que personnelles est devenue mon fil conducteur : la gestion des connaissances. En effet, en 2003, lors de mon passage au sein de la division Bureau d'Etudes d'Ornans, j'étais en charge de réaliser un guide de conception des moteurs asynchrones de traction. En d'autres termes, je devais capitaliser l'ensemble des connaissances des concepteurs afin d'écrire la méthodologie de conception d'un moteur de TGV depuis le besoin du client (conditions de fonctionnement du train et puissances requises pour la motrice) jusqu'à sa maintenance. Cette mission était primordiale pour plusieurs enjeux :

- Alstom basculait du logiciel CAO 2D Medusa vers Catia V4 et Catia V5 était en test,
- De nombreux ingénieurs et techniciens du bureau d'études étaient proches de leur fin de carrière et allaient partir emportant avec eux tout leur savoir.

Intégrer une école d'ingénieurs comme enseignant-chercheur était donc pour moi une façon de pouvoir contribuer encore plus activement à transmettre les connaissances aux futurs ingénieurs. Ainsi, au sein du département Ingénierie de Produits et Systèmes Industriels, j'ambitionne de les préparer au métier d'ingénieur afin qu'ils puissent exploiter pleinement les méthodes et les outils qui font et feront la réussite des industriels de demain.

Allier pédagogie et recherche scientifique est une bijection indispensable pour tout enseignant-chercheur. Une partie de mon enseignement est dédié aux projets durant lesquels j'applique les résultats de mes recherches ; en retour, les élèves me permettent d'alimenter et d'enrichir mes expériences. C'est un exercice parfois très difficile de combiner les plannings pédagogiques et les « envies » en recherche ; mais les rencontres humaines sont très enthousiasmantes et les résultats scientifiques souvent prometteurs…

Afin d'être acteur de la formation, j'expérimente de nouvelles méthodes pédagogiques pour renouveler les pratiques didactiques : jeux d'entreprises, travail en équipe sur des projets concrets à enjeux économiques et sociétaux… La réforme des enseignements de l'Ecole Centrale menée en 2015 m'a permis de mettre en place des séries de TPs inédits en Réalité Virtuelle et rétro-conception (reverse-engineering) ; des échanges au niveau national via le réseau AIP Primeca avec des collègues d'autres établissements supérieurs ont également pu enrichir ces modules. Ayant repris l'option professionnelle Management de Projet à la suite de Philippe Depincé, j'ai, à l'aide de Catherine Michel, intégralement revisité les 130h de cours élèves en l'accent sur 3 thèmes : Manager / Leader / Formateur-Communicateur. L'objectif est de mieux faire appréhender aux futurs ingénieurs le contexte social complexe dans lequel ils vont exercer.

Comme il va l'être décrit par la suite, à l'exception de la discipline du Management de Projets, les autres matières que j'enseigne sont à considérer comme en perpétuelles évolutions. Il est donc difficile d'avoir des cours avec des polycopiés établis et des TD parfaitement réglés. Chaque année, je remets à jour mes cours/supports en fonction des nouveaux outils et nouvelles modalités de fonctionnement des entreprises. Ce travail est coûteux en temps mais riche d'enseignement pour pouvoir toujours transmettre aux étudiants le bon savoir.

1.2.2 Compétences apportées en enseignement des sciences de l'ingénierie

Profil de poste

> *« Le poste MCF n°1193 permettra de renforcer la formation des ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes sur les aspects liés à la modélisation, à l'étude et à l'organisation des systèmes industriels, à la gestion de projets. Un intérêt pour l'ingénierie des systèmes et la modélisation de systèmes mécaniques serait apprécié.*
>
> *L'enseignant recruté, affecté au département d'enseignement « Ingénierie de Produits et Systèmes Industriels » (IPSI), interviendra sur les trois années de la formation ingénieur ECN (1ère et 2ème année de tronc commun et en 3ème année en option DPSI (Développement des Produits et Systèmes Industriels)), ainsi qu'en MASTER (M2) Sciences Mécaniques Appliquées.*
>
> *En option de 3ème année DPSI (Développement des Produits et Systèmes Industriels), il s'agit de participer aux enseignements concernant la modélisation et le pilotage d'entreprise, la gestion des connaissances et compétences, les systèmes d'information d'entreprise, la gestion et la simulation des systèmes industriels.*
>
> *Le candidat devra également s'investir au sein des projets pédagogiques du département IPSI. »*

Malgré un profil d'ingénieur en Génie Mécanique j'ai donc été sélectionné afin d'enseigner la discipline du Génie Industriel[15]. Cette ouverture au GI[16] m'a permis de prendre du recul tant sur les disciplines à enseigner que sur ma recherche. Au lieu d'enseigner un savoir j'allais enseigner comment acquérir un savoir : c'est du management des connaissances. J'ai ainsi pu mettre en place une vraie pédagogie active afin de développer l'esprit d'auto-analyse des élèves et de progression personnelle. Le référentiel de l'ingénieur centralien défini en 2015 a permis de conforter l'apport de compétences que je mettais en œuvre au regard du profil de mon poste. Ce référentiel est constitué de 4 thèmes :

1. L'entreprise et l'innovation
2. L'appréhension des problèmes complexes
3. La conception et la mise en place de projets transdisciplinaires
4. Le management international et responsable

Mes savoirs développés et mis à disposition pour transformer les capacités des élèves en compétences se partagent en deux parties :

- Volet sémantique : **connaissances et processus industriels**
  - Capitalisation, modélisation et gestion des connaissances sur tout le cycle de vie
  - Systèmes d'informations / ERP[17] et PLM[18]
  - Méthodes et outils pour les processus de conception et l'analyse de la valeur (développement de produits, innovation de rupture par l'utilisation avancée de TRIZ)
  - Management de Projets / gestion des risques / leadership et gestion d'équipe
- Volet outils numériques : **Réalité Virtuelle en Conception et Production**
  - Numérisation 3D et reverse-engineering
  - Modélisation de situations dynamiques de travail en environnements virtuels et outils de Réalité Virtuelle

1.2.3 Description des formations en sciences de l'ingénierie

Gestion des connaissances et Systèmes d'Information d'Entreprise

Ce cours a pour objectif d'appréhender les systèmes d'information au sens le plus général pour l'ingénierie et l'entreprise.
Les élèves sont initiés à la définition d'un ERP et du PLM. Ils apprennent comment spécifier et configurer un système d'information du point de vue métier et non du point de vue informatique. L'accent est mis sur l'usage et non sur les outils requis pour mettre en place une base de données ou sur l'architecture logiciel : comment rédiger un cahier des charges d'un SI[19], comment configurer un SI, comment former le personnel, quelle stratégie de mutation et d'accompagnement au changement pour mettre en place un SI…
Je développe la modélisation des systèmes d'entreprise avec les langages associés. De même que les problématiques liés à l'interopérabilité des SI en vue d'un décloisonnement du stockage des données.

---

[15] À noter que j'ai fait le choix d'intégrer l'Ecole Centrale de Nantes parmi les quatre établissements d'enseignement supérieur qui m'avaient classé 1er lors des auditions de maître de conférences au printemps 2018.
[16] GI = Génie Industriel
[17] ERP = Enterprise Ressource Planning
[18] PLM = Product Lifecyle Management
[19] SI = Système d'Information

Enfin, une des déclinaisons possibles du SI pour le rendre plus opérationnel au plus proche des métiers est la structuration d'un KLM[20]. En lieu et place d'une vision stratégique de l'entreprise est laissée la place à une vision tant opérationnelle que tactique. Le KM [21] permet une intégration et une utilisation des outils métiers et des bases de connaissances. La Gestion des Connaissances est en plein développement au sein des entreprises, c'est pourquoi cette partie de cours s'appuie entre autres sur mes travaux de recherche.

Analyse de la valeur et méthode TRIZ

L'analyse de la valeur est une méthode de compétitivité systématique et créative visant la satisfaction du besoin de l'utilisateur par une démarche spécifique de conception à la fois fonctionnelle, économique et pluridisciplinaire. Cette méthode regroupe une multitude d'outils d'aide au développement comme, le diagramme pieuvre, la bête à cornes, l'analyse fonctionnelle, le FAST, les 9 images ou encore la méthode TRIZ.

Les objectifs de ce cours sont :

1. Analyser un problème industriel,
2. Prendre du recul sur ses pratiques de conception classique,
3. Savoir innover et définir la valeur d'un produit.

Je réalise ce cours en pédagogie active. De courtes interventions théoriques générales ponctuent un travail réalisé en équipe par les étudiants eux-mêmes. Les connaissances sont acquises par la pratique d'un cas d'étude propre à chaque équipe projet ; mon rôle d'enseignant est alors de personnaliser le cours général auprès de chaque équipe d'étudiants et de travailler directement avec eux en adaptant mon discours et en les aidant à prendre du recul.

Outils numériques et Réalité Virtuelle

Aujourd'hui les technologies de Réalité Virtuelle sont très largement utilisées. Tant dans notre vie quotidienne que dans les milieux professionnels, les technologies et les outils prolifèrent de façon exponentielle. Ce cours a pour objectif d'introduire les outils, méthodes et domaines d'application utilisant la réalité virtuelle. Permettre de créer des interactions entre le monde virtuel et la réalité : transférer un objet réel vers le monde virtuel et pouvoir le simuler/interagir avec des outils simples à mettre en place ; de la numérisation 3D à la visualisation immersive en passant par la modélisation et la simulation, les étudiants découvrent un aperçu des possibilités offertes par ces technologies.

Ce cours propose de prendre en main les principaux outils de création de mondes virtuels (par exemple Unity3D, Blender, etc.) ainsi que les outils et logiciels illustrant les notions présentées dans les différents cours (scanner 3D pour la modélisation 3D de pièces réelles, interaction 3D, etc.).

Je décline ce module en plusieurs versions.

Une base « light » de 4h pour permettre une découverte de la RV : il ne s'agit pas de transformer les étudiants en experts mais de les sensibiliser au monde du virtuel afin qu'ils connaissent les possibilités et puissent réutiliser ces acquis dans leur futur métier.

Ce cours peut aussi devenir un module de 32h pour approfondir certaines techniques. Par exemple, dans la partie avancée, nous développons les fondements mathématiques des surfaces paramétriques et les méthodes usuelles de génération de maillages. Il s'agit de définir les modèles géométriques et physiques requis en environnement virtuel. Pour pouvoir créer des mondes virtuels, il est indispensable d'être capable de représenter des objets en 3D – par exemple par la CAO. Ce cours présente les différentes manières permettant de représenter un objet en 3D (maillages, tesselation, surfaces paramétriques, modèles volumiques, etc.) en se basant sur des objets réels (scanner 3D) ou à partir de leur double numérique (nuage de points).

Des travaux pratiques appliquent alors la théorie et les élèves déroulent des mini-projets :

- Numérisation 3D avec scanner laser et digitalisation 3D en photogrammétrie,
- Traitement du nuage de points et reconstruction volumique (reverse-engineering en nurbs-splines ou en Freeform).

Management de projet : initiation et projet appliqué avec industriel

La compétence de l'ingénieur est aujourd'hui non seulement scientifique et technique, elle doit également se manifester par des connaissances et des savoir-faire dans les domaines économique, financier, juridique, social et éthique.

Intégré au sein de ce cours dit de Connaissance du Monde de l'Entreprise, un module d'initiation au management de projet est dispensé à tous les élèves BAC+3 de l'Ecole Centrale de Nantes.

[20] KLM = Knowledge Lifecyle Management

[21] KM = Knowledge Management

Un cours introductif et des vidéos permettent ensuite de réaliser une application unique sur un mini-projet de 10h réalisé en équipe en présentiel lors des séances de TD.
Il s'agit de faire connaître les notions indispensables à la maîtrise des processus du management de projets (PMI, 2004) et faire découvrir le monde de l'entreprise du point de vue du chef de projet :

- Management des Ressources Humaines (fonctionnement de l'entreprise en mode projets, direction, acteurs…),
- Management du contenu du projet (décomposition de projet),
- Management des délais (gestion temporelle et planification),
- Management des coûts (financement du projet),
- Management des risques.

Afin de compléter cette formation « sur table », les étudiants vont réaliser un projet en partenariat avec un industriel de la région ligérienne. Cette étude est pour l'étudiant une première approche du métier d'ingénieur et constitue une ouverture vers les réalités du monde industriel. Le projet se déroule en équipe. Le groupe d'étudiants impliqué sur un sujet va prendre conscience des méthodes et des techniques pour aborder un problème industriel et gérer un projet.
A noter que ces PEI (Projets d'Etudes Industrielles) se réalisent auprès des 350 élèves de l'Ecole Centrale de Nantes totalisant près de 60 projets chaque année. Même si j'assume la responsabilité pédagogique de ce module, il requiert des ressources humaines conséquentes pour établir le portefeuille de projets avec les entreprises de la région, mettre en place les projets et animer pédagogiquement le suivi. A ces fins, j'ai une équipe de 2 personnes qui travaille à mes côtés. Catherine Michel et Jean-Marc Benguigui sont à mi-temps à l'Ecole Centrale et exercent pour l'autre mi-temps une activité professionnelle permettant d'avoir une bonne connaissance du milieu industriel du bassin nantais toutes industries confondues (statut de PAST[22]).

Option MLC « Manager, Leader et Communicateur »
Ce module se déroule sur un semestre complet des étudiants en fin de cursus ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes. Il s'agit d'une option dite professionnelle qui permet d'aller plus loin que l'initiation à la Gestion de projet détaillée dans le module de cours ci-avant.
Initialement créé sous le terme de Management de Projet par Philippe Depincé, j'en ai repris la responsabilité en 2011. J'ai souhaité élargir le spectre sur 3 compétences requises pour amener les futurs ingénieurs en position de Manager, de Leader et de Formateur (Communicateur). Ce cours forme aux techniques avancées du management de projets en abordant les notions nécessaires pour une bonne maîtrise des processus à mettre en œuvre en mode projet tout en dotant les élèves d'une excellente connaissance de l'environnement socio-économique dans lequel ils sont amenés à évoluer : aspects socio et macro-économiques des entreprises, organisations internes et partenaires externes, service juridique, contexte de la mondialisation… c'est donc la gestion d'une douzaine de professionnels qui interviennent comme vacataires dans les disciplines suivantes.

Etre Manager :

- Connaître les outils nécessaires au management d'un projet et témoignages sur des projets d'envergure,
- Apporter un éclairage sur les montages contractuels (passation de marché) inhérents à l'activité de management de projets et les aspects juridiques afférents,
- Avoir des notions permettant d'échanger avec leurs futurs collaborateurs sur les aspects comptables et Gestion comptable,
- Être sensibiliser aux aspects humains : être capable de définir la fonction RH / connaître ses interlocuteurs type syndicats, prud'homme, inspection du travail.

Etre Leader-Communicateur :

- Savoir accompagner et cerner ses co-équipiers,
- Assumer la responsabilité sociétale de l'ingénieur,
- Pouvoir prendre en compte les problématiques d'interculturalité dans la mondialisation,
- Etre capable d'analyser une gestion de crise en gérant la communication interne entreprise et également externe vis-à-vis des médias,
- Acquérir des connaissances permettant d'évaluer la vulnérabilité aux risques, d'élaborer et d'activer un plan de gestion de crises,
- Connaître les bases des techniques de formation.

La partie Cours et TP appliqués a une durée de 96h. En parallèle, la partie Projet d'équipe se réalise sur un équivalent de 40h.

[22] PAST = professeur associé à temps partiel

Deux projets sont réalisés durant le semestre :

- Le Challenge de l'Innovation est organisé par les entreprises Nokia & Orange qui s'associent pour l'occasion. Pour ce premier projet, les étudiants de l'option MLC[23] sont associés à ceux du Master de Management de l'Ecole de commerce Audencia, dans la major "Marketing for Product manager". Durant 3 mois, ils travaillent en équipe pluridisciplinaire de 6-7 étudiants et en langue anglaise exclusivement dans l'objectif de créer un nouveau produit (étude de marché, faisabilité technique, business plan…). Ils sont coachés par les enseignants de Centrale, Audencia ainsi que les ingénieurs de Nokia et d'Orange. Puis les équipes nantaises sont mises en compétition pour qu'une seule d'entre elles puisse concourir en finale. Le Challenge réunit les 10 meilleures équipes issues de grandes écoles supérieures françaises ; le jury est composé de l'ensemble des dirigeants de ces 2 grandes entreprises.
- Le deuxième projet consiste à mettre en situation d'application les élèves. Ils doivent démontrer leurs capacités à pouvoir mobiliser les connaissances théoriques acquises et les bonnes pratiques de la gestion de projet sur un cas réel. Les études réalisées viennent en application et en support aux associations étudiants de l'Ecole Centrale ou en aide à une association extérieure qui a un fort besoin de conseils pour structurer ses activités (exemple : Croix Rouge, handisport, mairie de Nantes…)

1.2.4 Compétences complémentaires apportées en enseignement des sciences humaines et sociales

Aux compétences en sciences de l'ingénierie, il convient d'ajouter un deuxième volet destiné à enrichir ces mêmes approches par les sciences humaines. Durant mon cursus de doctorat, j'ai mis en œuvre une double compétence alliant SHS[24] et SPI[25]. La partie SHS était dédiée à l'histoire des sciences et des techniques. Soulignons que lors de ma demande de qualification au CNU en 2007, j'ai été reconnu en 60ème section ainsi qu'en 72ème section ; une double culture que je continue encore aujourd'hui à faire fructifier tant en enseignement qu'en recherche (voir partie ci-après sur le projet scientifique la *Synthèse des activités de recherche*).
Il m'est ainsi possible d'enrichir les cours de conception mécanique, de gestion de projet ou de modélisation d'entreprises par l'apport d'une vision systémique et historienne des objets industriels complexes. Alors intégré au sein de départements de Formation Humaine, mes qualités de technologue sont particulièrement appréciées, tant par les équipes enseignantes que par les élèves, rétablissant ainsi un lien souvent oublié que l'Histoire des Techniques et le Génie Industriel ne faisaient qu'une seule et même discipline il y a 200 ans en France.

Mes savoirs développés et mis à disposition pour transformer les capacités des élèves en compétences sont :

- Réalisation d'études historiques (social / économique / technique) d'objets techniques et scientifiques,
- Conseil en conservation et valorisation du patrimoine, muséologie.

Option INPACT « Ingénierie et Numérique pour le Patrimoine, l'Art et la Culture »
Suite aux enseignements réalisés en SHS et au fort besoin de diffuser mes travaux de recherches, j'ai ouvert ce nouveau module de cours à la rentrée de septembre 2017. Tout comme l'option MLC, il se déroule sur un semestre complet pour les étudiants de l'Ecole Centrale de Nantes au niveau BAC+5.
« L'ingénieur là où on ne l'attend pas ». L'objectif est d'ouvrir les portes des futurs ingénieurs au monde de l'art, du spectacle et du patrimoine avec la vision ingénierie :

- Domaines techniques : archéologie numérique, réalité virtuelle, expérience utilisateur, muséographique, numérisation 3D, Text Encoding Initiative…
- Métiers : ingénieur bureau d'études théâtre, ingénieur projet scènes de spectacle, ingénieur luthier, ingénieur photographe…
- Structures d'accueil : institutions culturelles, musées, théâtres, Compagnie artistique, laboratoires de recherche, sociétés de production ou d'ingénierie, entreprises privées spécialisées dans les médias, le patrimoine…

Ce cours de 136h se veut réellement interdisciplinaire en créant des équipes projets plurielles : Centrale Nantes, fac de lettres, Beaux-Arts… Il ne s'agit pas d'être générateur de technologies et/ou de start-ups dans l'ère du numérique mais de permettre d'appréhender les autres disciplines pour mieux s'intégrer dans les filières de l'art, de la culture et du patrimoine.
Comment allier Sciences de l'Homme et Sciences de l'Ingénierie : quelles méthodes, quels outils, quels langages... A travers des témoignages d'ingénieurs en activités, des projets culturelles ou des expérimentations en pédagogie active, l'option INPACT[26] permet également une respiration dans le cursus ingénieur.

[23] MLC = Manager, Leader et Communicateur
[24] SHS = Sciences Humaines et Sociales
[25] SPI = Sciences pour l'Ingénieur
[26] INPACT = Ingénierie et Numérique pour le Patrimoine, l'Art et la Culture

1.2.5 Description des formations en sciences humaines et sociales

Les conférences que je dispense en Sciences Humaines sont adaptées à chaque public. Le nombre d'heures est très variable. Ce module permet aux élèves de mieux comprendre leur environnement socio-économico-scientifico-technologique en leurs faisant prendre du recul sur leurs pratiques.
Plusieurs intitulés pour ce module :

- Un voyage à travers le temps et l'espace,
- Quand la technique outre passe son domaine d'action : un détour par l'histoire…,
- Histoire des ingénieurs,
- Epistémologie des objets et histoire des techniques.

Objectifs du cours
De nos jours, un ingénieur n'est plus un homme uniquement pourvu de potentialités techniques, il doit intégrer l'ensemble du système technique pour lequel il est voué. Cette dimension pluridisciplinaire lui procure alors tous les outils nécessaires et indispensables pour mener à bien la mission confiée : science mécanique, science physique, science de la chimie, informatique, communication, gestion, droit…
Mais le système technique présente des antériorités et implique des impacts qu'il faut connaître. L'acte de l'ingénieur aura des répercussions à terme sur sa propre existence, son métier ou sur la société elle-même. En suivant l'évolution de la formation des hommes de la technique depuis la Renaissance jusqu'à la création des premières écoles d'ingénieurs, je tente de leur faire cerner la mission confiée à ce nouveau métier. De Vinci… ingénieur ou inventeur ? Pourquoi une telle classification ? Où se situe la limite entre l'invention, la création et la conception ?
Plus récemment, la société a subi des changements importants dans sa façon de penser, de voir l'aboutissement de son œuvre… Que ce soit le développement de l'industrie de masse au début du XXème siècle ou l'électrification de la France et en particulier son électro-nucléarisation avec les balbutiements de la bombe nucléaire au sein du projet Manhattan, le recul historique permet désormais d'en cerner les conséquences tant sur l'évolution des sciences et des techniques, que les fondements du contexte socio-économique ou de l'éthique qui s'en échappent.
Ce cours permet de donner des points de repères dans notre histoire aussi bien scientifique que technique pour les futurs ingénieurs.

1.2.6 Niveaux d'études et établissements

Niveaux d'études enseignés

- Cycle court : BAC+2
- Cycle ingénieur et master : BAC+3 à BAC+5
- Ecole Doctorale : BAC+8
- Formation continue et par alternance (en cycle ingénieur)

Etablissement de rattachement principal : Ecole Centrale de Nantes (44) **-** www.ec-nantes.fr (à la date du 1/1/2017)

- département IPSI (Ingénierie des Produits et des Systèmes Industriels) – responsable Matthieu Rauch
- département CLE (Communication, Langues et Entreprises) – responsable Frédéric Dorel

Options concernées à l'Ecole Centrale de Nantes (à la date du 1/1/2017)

- Génie Industriel – responsable Raphael Chenouard
- Réalité Virtuelle – responsable Jean-Marie Normand / Guillaume Moreau
- Intégration des Techniques Numériques en Sciences – responsable Alban Leroyer
- Sciences de l'Ingénieur pour l'Habitat et l'Environnement Urbain – responsable Jean-François Hetet
- Recherche & Développement – responsable Sébastien Bourguignon
- Institut des Techniques d'Ingénieurs de l'Industrie des Pays de la Loire[27] – responsable Pascal Cosson

[27] L'ITII est rattaché à l'Ecole Centrale de Nantes pour le parcours Mécanique dans lequel j'interviens. http://www.itii-pdl.com

Autres établissements pour des conférences invitées, des cours magistraux ou des TPs dans ma spécialité :

- Ecole Nationale Supérieure des Arts-et-Métiers, Angers (49) - www.angers.ensam.fr
- Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (90) – www.utbm.fr
- Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques, Toulouse (31) - www.ensica.fr
- Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (44) - www.polytech.univ-nantes.fr
- Ecole d'Ingénieur en Génie des Systèmes Industriels, La Rochelle (17) - www.eigsi.fr
- Institut Catholique des Arts et Métiers de Nantes (44) - icam.groupe-icam.fr
- Institut Supérieur de Technologie de Vendée (85) - ist.groupe-icam.fr
- Institut Universitaire de Technologie de Nantes (44) - www.iutnantes.univ-nantes.fr
- Ecole des Beaux-Arts de Tours (37) – tours.esba-talm.fr

Je tiens à souligner qu'enseigner dans les formations dites continues ou en alternance, tant SPI que SHS, relève d'un réel défi. Face à des élèves qui ont parfois plus de 20 ans d'expérience en entreprise permet de remettre en cause mes pratiques d'enseignant. A chaque élément théorique annoncé, je dois me demander si le langage utilisé est le bon et si l'applicabilité est possible ou bien s'il s'agit d'une idée nébuleuse d'un enseignant-chercheur. Ce challenge est particulièrement motivant et c'est avec plaisir que chaque année, je retourne enseigner auprès des apprentis et re-signe pour être tuteur pédagogique d'un apprenti sur 2 ou 3 années consécutives.

1.2.7 Ma méthode de formation : ingénierie pédagogique et pédagogie par projets

Avec l'arrivée de la génération Y, le corps enseignement a pris conscience que simplement enseigner avec les méthodes traditionnelles ne suffit pas. Perte d'attention, manque de concentration, papillonnage, monde du web à portée de main (Lévy, 2010), autant de problématiques qui questionnent et demandent une adaptation permanente des modalités d'enseignement. Ayant été moi-même professeur de musique lorsque j'étais étudiant, j'ai toujours cherché à innover pédagogiquement. Enseigner dans le supérieur n'est pas bien différent et la formation reste la formation. Transmettre des connaissances scientifiques, techniques et humaines, c'est avant tout acquérir des compétences (Berio & Harzal, 2007). Pourquoi ne pas le faire par… le jeu de formation (Hourst & Thiagararajan, 2008) !

La pédagogie scoute développée par Baden Powell propose une démarche active où la théorie s'acquiert par la pratique d'une expérience vécue. Dans le scoutisme, les jeunes apprennent en vivant réellement les choses, et non en écoutant sagement un exposé. Entre autres, la situation expérimentée prend souvent la forme d'un jeu afin de mieux faire appréhender la situation ; de plus elle se vit avec un esprit d'équipe.
Pratiquant le scoutisme dans mon cadre extra-professionnel, c'est cette vision de la formation que je m'efforce de mettre œuvre dans l'ensemble de mes enseignements. A chaque discipline, j'adapte les modalités (Beaufort, 2007) ; par exemple :

- Le positionnement de l'élève : j'essaie de veiller à ce qu'il soit le plus acteur possible.
- Le rôle du formateur : il doit accompagner et arriver à s'effacer pour ne laisser visible que le contenu de la formation.
- Le cadre de la formation : il est primordial d'adapter les moyens requis pour arriver aux fins.

Voici quelques réalisations que je mets en œuvre et qui ont été éprouvées dans mes enseignements :

- Le **jeu d'apprentissage**. Qu'il soit un serious game édité par le CIPE, un scénario de jeu de rôle que j'ai créé, le jeu d'apprentissage se vit en TD et remplace une multitude de petits exercices par une situation simili-réelle intégrée et complexe où l'élève doit effectuer des choix et les assumer.
- Les **TP Bac à sable**. Rien de plus anti-pédagogique qu'un TP presse bouton où il faut suivre un guide et cliquer à chaque étape. Former un élève à un logiciel n'est pas une finalité en soi car les outils évoluent très vite et les ingénieurs de demain sauront s'adapter. Mes TP présentent l'objectif final et la méthodologie générale pour y parvenir mais c'est à l'élève de créer lui-même son cheminement ; il y passera le temps qu'il faut car car je souhaite qu'il intellectualise et comprenne ce qu'il fait.
- La **pédagogie par projet**. L'APP où Apprentissage par Problèmes et par Projets constitue mon outil pédagogique principal (Milgrom, Raucent, & Bourret, 2010). Définir un cas d'étude, une réelle problématique industrielle, mettre en situation professionnelle et faire assumer le rôle des élèves comme futur ingénieur est sûrement une des meilleures écoles de la vie qui soit (cas d'applications : PEI, ITII, Campus Mix…). Le rôle de l'enseignant est complexe car il doit préparer le terrain et anticiper toutes les possibilités pour borner au mieux le travail ; l'enseignant n'est alors plus un sachant mais un guide, il devient tuteur, favorisant ainsi les échanges et facilitant l'appropriation des notions avec les élèves.
- L'**enseignement par les pairs**. Avoir un soutien par les générations montantes permet de faire passer plus aisément les bonnes pratiques. Entre autres, dans le domaine de la gestion de projets, j'ai été amené à proposer aux élèves BAC+5 de venir former les élèves BAC+3 en utilisant le jeu de formation. Mon rôle en tant qu'enseignant est alors de préparer au mieux les interventions par ces élèves plus expérimentés, considérés comme les pairs. Cette forme de

tutorat s'applique également pour l'encadrement de projets, c'est une nouvelle forme de compagnonnage (Laroche, Michel, Martelle, & Depince, 2011). A noter que je mets également mes doctorants en position de formation et d'encadrement de projets.

- Aller sur le **terrain**. Changer le cadre et le contexte de l'apprentissage est nécessaire pour mieux ouvrir les récepteurs des élèves. Dans la mesure du possible, j'adapte le cadre de l'enseignement : cela peut passer par le remaniement d'une salle de TD pour faire des petites équipes de travail, faire une grande salle de réunion (même à 30 élèves) pour mieux se voir et échanger, faire le module de cours en extérieur si le temps est clément ou bien encore aller directement sur site dans une entreprise ou un musée. J'ai également mis en place des séminaires résidentiels en dehors du campus sur plusieurs jours (suppression des modules de 2h répartis sur un semestre et réalisation d'un programme complet en 3 fois 2 jours 24/24h) ; cette formule permet aux élèves de se soustraire de leurs quotidiens et du cadre scolaire pour se recentrer sur eux-mêmes dans un environnement inconnu ; les résultats sont très bons (projet Yaka ITII).
- L'**auto-analyse** par les élèves. C'est un chantier difficile à mettre en place. Le modèle éducationnel français se veut sanctionnant et non valorisant. Il nous est demandé des évaluations avec des notes qui relatent un résultat et non une démarche. Ce nouveau moyen d'évaluation s'effectue directement par les élèves en autonomie (mais réalisé sous le contrôle du corps enseignant). Il a fallu plusieurs années d'expérimentation pour faire admettre tant aux élèves qu'aux tuteurs de projets qu'une auto-analyse par les élèves est possible. Ce mode de fonctionnement a désormais été adopté et permet ainsi aux élèves de prendre du recul sur leurs futures pratiques professionnelles.

D'une façon générale, les projets que je propose et réalisés dans un cadre pédagogique apportent un résultat à un client : industriel, chercheur ou même associations étudiantes afin de permettre une transmission des connaissances. En ce sens, il me tient à cœur que les rapports réalisés par les élèves ne servent pas uniquement « à caler des armoires ! » ; ce sont des documents utilisés pour la traçabilité d'un projet ou pour appliquer les résultats ultérieurement par l'équipe qui a réalisé le travail ou par une future équipe étudiante.

1.2.8 Synthèse des enseignements et bilan des charges de services

Cette partie descriptive des enseignements est une synthèse des modules dispensés. En fonction du public, du module concerné ou de l'établissement demandeur, je décline les cours. Le nombre d'heures affichées peut donc aller du simple au quintuple en fonction du temps disponible dans les maquettes pédagogiques et de l'importance qui y est accordée.
Il faut préciser que beaucoup de temps est également passé à rechercher les vacataires et programmer leurs interventions ; le tableau ci-dessous ne révèlent donc que le nombre d'heures élève et non le nombre d'heures que j'effectue en tant qu'enseignant. Les heures réelles en présentiel élèves figurent dans le graphique ci-après.

Discipline	Public concerné	Type d'activités	Nombre d'heures élèves / an	Nombre étudiants / an tout établissement confondu
Gestion des connaissances et Systèmes d'Information d'Entreprise	BAC+5	CM, TD	32h	25 à 40 élèves
Outils de réalité virtuelle	BAC+2 BAC+5	CM, TD, TP Mini-projets	4h à 32h	120 élèves
Analyse de la valeur	BAC+5	CM Mini-projets	40h	25 à 40 élèves
Initiation au Management de Projets	BAC+3	CM, TD	16h	350 élèves
Projets d'Etudes Industrielles	BAC+3	Mini-projets	40h	350 élèves
Option Professionnelle Manager-Leader-Communicateur	BAC+5	CM, TD, TP Mini-projets	136h	20 à 60 élèves
Option Ingénierie et Numérique pour le Patrimoine, l'Art et la Culture	BAC+5	CM, TD, TP Mini-projets	136h	10 à 20 élèves
Histoire des Techniques et Histoire des Ingénieurs	BAC+3 et BAC+4	CM, TD	6h à 18h	40 à 100 élèves
Encadrement de projets tutorés, toute discipline confondue	BAC+3 à BAC+5	Projets	5h à 8h	8 à 12 projets (50-60 élèves)
Encadrement de stages, PFE, apprentis, master	BAC+3 à BAC+6	Projets	4h à 12h	7 à 15 élèves

Figure 1 - *Répartition des enseignements effectués depuis 2007*

Le tableau ci-dessus n'est qu'une estimation car depuis 2004 l'ensemble des maquettes pédagogiques a évolué et des ajustements ont été effectués ; mais malgré tout, la base des disciplines enseignées demeure.
Précisons que l'option INPACT a ouvert en septembre 2017. Cette formation interdisciplinaire destinée aux étudiants BAC+5 sur 136h eqTD est expérimentale. Un bilan financier sera réalisé à l'issue du semestre en mettant en regard les apports effectués avec les emplois exercés par les étudiants ayant suivi le module.

J'exerce en tant que Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Nantes depuis 9 ans. Le monde de l'enseignement et de la recherche est très riche et complexe et c'est pourquoi, depuis mon embauche, je resserre l'éventail des possibilités qui me sont offertes tant sur les domaines scientifiques que sur mes enseignements. Ainsi, j'ai appris à savoir dire « non » aux heures d'enseignements que l'on me propose de faire afin de ne me concentrer que sur mon cœur de compétences privilégiant le qualitatif au quantitatif. La charge nominale étant de 192h eqTD, comme le montre le graphique ci-après, je suis actuellement stabilisé à 350h eqTD. Les barres principales sont les heures d'enseignement propres à l'Ecole Centrale de Nantes ; les heures minoritaires ajoutées en haut des barres sont les heures effectuées à l'extérieur de mon établissement d'appartenance, interventions pour lesquels j'ai été contacté de par ma spécialité (entre autres interventions dans des masters).

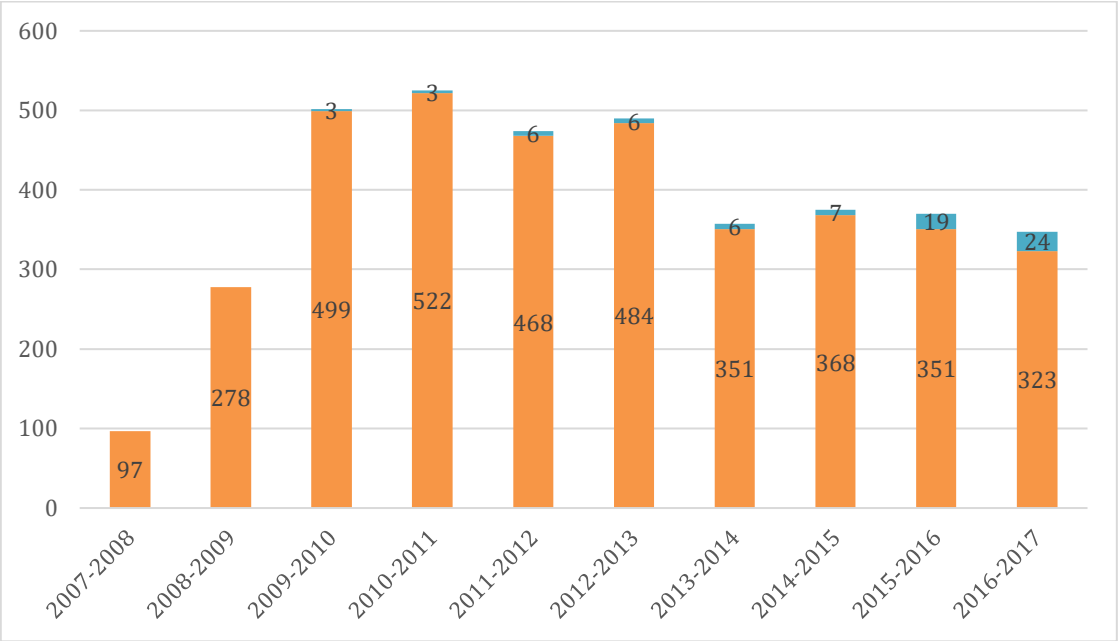


Figure 2 - *Synthèse des heures d'enseignements effectuées depuis 2007*

Remarques sur le graphique précédent :

- L'année 2007-2008 correspond à la charge du poste de ½ ATER que j'occupais.
- La charge 2016-2017 est estimée.
- Le sommet des colonnes représente les interventions que j'effectue dans d'autres établissements que l'ECN. Ce nombre d'heures croit progressivement. En effet, ceci s'explique de par la reconnaissance de ma spécialité pour laquelle je suis invité à intervenir dans d'autres établissements.

1.2.9 Responsabilités collectives

Afin de mieux comprendre le fonctionnement et pouvoir contribuer activement à la vie de mon établissement, je me suis investi dans plusieurs responsabilités collectives :

- Membre du Comité d'Hygiène et Sécurité de l'Ecole Centrale de Nantes – depuis 2015,
- Membre du Conseil d'Administration de l'Ecole Centrale de Nantes – de 2010 à 2014 – je n'ai pas tenu à renouveler ce mandat car jugeant les possibilités d'action des élus trop contraignantes,
- Membre du Conseil de Laboratoire de l'IRCCyN[28] – de 2010 à 2016 – l'objectif encouru dans cette responsabilité collective était de permettre un meilleur lien entre le monde de la recherche et le cadre administratif de mon établissement universitaire.

[28] Laboratoire IRCCyN, Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597

1.2.10 Partenariats et implication académique à l'international

Plusieurs opportunités se sont présentées pour se confronter à d'autres cultures dans le domaine de l'ingénierie.

Enseigner le Génie industriel à ECPk[29]

J'ai enseigné de 2010 à 2014 à l'Ecole Centrale de Pékin dans un module d'initiation au génie industriel. Les élèves devaient être capables d'appréhender les principaux concepts du Génie Industriel : produit/service, processus, flux, organisation, entreprise.
Avec 16 heures en présentiel élèves réparties entre cours magistral et travaux dirigés, chaque année, j'ai enseigné à 120 jeunes chinois appelés à devenir ingénieurs centraliens. Les objectifs opérationnels étaient :

- Savoir définir une entreprise et son fonctionnement,
- Connaître le monde de la fabrication : les ateliers, l'implantation, les commandes,
- Savoir planifier et utiliser des méthodes d'organisations d'entreprises.

Figure 3 - *Surveillance d'examen à Centrale Pékin : confiscation obligatoire des téléphones portables !*

Cette expérience fut très riche en enseignement pour moi. Il n'est pas question de petits groupes de 30 élèves mais plutôt d'enseignement « en masse » ; ce qui impose d'adapter les modalités pédagogiques.
Ce fut aussi l'opportunité de mieux comprendre nos différences culturelles : Asie vs Occident. Par exemple, les réponses des élèves sont souvent déconcertantes : sur un simple calcul d'approvisionnement en matière première, il est possible qu'un élève demande de fabriquer 2,4 pièces. Le résultat ne le choque pas car le calcul mathématique est juste ; mais la réalité en est toute autre : c'est 2 ou 3 pièces qu'il faut commander ! La culture asiatique est bien différente de notre culture occidentale.

Summer Design Academy, Université de Penn State

En collaboration avec d'autres collègues du département IPSI de l'école centrale de Nantes, nous avons créé en mai 2010 une formation intitulée Summer Design Academy. Cette école d'été est destinée à une quinzaine d'étudiants undergraduate de l'Université Penn State, USA issus du département de Design d'un collègue américain, le Pr. Richard Devon.
Cette formation comprend 2 semaines de cours dans le domaine de la conception de produit, en introduisant des outils de réalité virtuelle, de numérisation de formes et de prototypage rapide. L'objectif est de faire pratiquer aux étudiants le reverse-engineering ainsi que de leur proposer un séjour linguistique et culturel dans un établissement français d'enseignement supérieur.
J'ai encadré de 2009 à 2012 les activités pédagogiques liées à la modélisation CAO et au reverse-engineering (6h). Je suis également intervenu comme expert dans le Design Project (17,5h) proposé aux étudiants couvrant ainsi un cycle de développement de produits standard :

1. User requirements,
2. Needs statements,
3. Concept generation : Physical mock up – modeling clay,
4. Concept selection - Concept scoring method (Pugh method),
5. Digital modeling (CATIA) : 3D digitalization, Surface Reconstruction, Part design,
6. Rapid manufacturing,

[29] ECPk = Ecole Centrale Pékin

7. User tests and user assessments,
8. Virtual Reality simulation.

Les sujets travaillés par les étudiants étaient liés à des objets de la vie courante mal conçus ou ergonomiquement non adaptés (exemple : enrouleur pour écouteurs de lecteur MP3, décapsuleur de bouteilles de boissons gazeuses…).

1.3 Animation scientifique et cadre institutionnel de la recherche

Maître de conférences signifie enseignant mais également chercheur : il s'agit là d'une bijection. Ainsi, au sein de mon laboratoire, j'alimente mes cours par les travaux de recherche en Ingénierie Virtuelle. En effet, dans un contexte où les entreprises doivent s'adapter en permanence afin de réduire les coûts, d'optimiser les flux, et de mieux répondre au client… la problématique de la modélisation et de la virtualisation représente une piste de recherche capitale pour les milieux industriels de demain. Mais les domaines de compétences et les connaissances mises en jeu sont nombreux !
La ligne directrice de mes travaux scientifiques est celle de la captation et de la modélisation des connaissances multi-échelles / multi-temporelles. Comme listé dans la partie ci-après sur mes responsabilités scientifiques, je participe activement à la vie de mon équipe de recherche au sein de mon UMR[30]. A ces fins, j'assume la responsabilité d'un des axes scientifiques de l'équipe : capitalisation/gestion/modélisation des connaissances comme établi lors du dernier projet quadriennal (IRCCyN, 2015).

L'interdisciplinarité est au cœur de mes problématiques scientifiques comme expliqué en introduction de ce mémoire et comme en témoigne la liste de mes publications. Aussi, je tiens également à cultiver cette pluralité sur les thèses et masters auxquels je contribue :

- tant au niveau de l'encadrement ou des co-encadrements mis en place,
- que des sujets abordés.

Cette richesse me conduit à repousser les limites de la transdisciplinarité. Dans le cadre de ma double compétence en histoire des sciences et des techniques, j'ai était associé au co-encadrement d'une thèse en histoire (Le Pavic, 2014) apportant alors mon expertise en ingénierie système et modélisation des produits-processus (point de vue innovant en SHS). De même, depuis 2011 deux thèses de doctorats étudient les perspectives que j'ai établies à l'issue de ma propose thèse de doctorat en décembre 2007. Elles sont également en co-encadrement Sciences Humaines et Sciences de l'Ingénieur. La première sur une bourse CIFRE (Hervy, 2014) et la deuxième sur la base d'une allocation ministérielle (soutenance prévue à l'automne 2017). Il s'agit là, entre autres, des travaux fondateurs pour cette Habilitation à Diriger les Recherches.
Attestation de mon engagement pour la formation et la recherche, mon dossier de PES a été accepté en 2012 et reconduit en 2016.

1.3.1 Mon laboratoire de rattachement : du LAN au LS2N en passant par l'IRCCyN

Historique de l'IRCCyN
Mon laboratoire a été créé en 1958 par le Professeur Romane Mezencev au sein de l'ENSM (Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, devenue Centrale Nantes en 1991). Il a été associé au CNRS[31] pour la première fois en 1968. Il comptait alors une vingtaine de personnes. À cette époque à Nantes, seules deux unités étaient associées au CNRS : le laboratoire de chimie de Jean Rouxel (qui deviendra plus tard l'IMN) et le laboratoire d'Automatique (qui deviendra plus tard l'IRCCyN).
A la fin des années 80, le laboratoire d'Automatique compte 50 personnes environ, thésards compris. En 1992, il devient le LAN (Laboratoire d'Automatique de Nantes) et devient laboratoire commun entre l'ENSM et l'Université de Nantes. Les domaines de recherche sont clairement identifiés : automatique, robotique et productique.
Puis le LAN se transforme en IRCyN (Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes), et avec trois tutelles académiques locales (Université de Nantes, ECN[32], EMN[33]) l'IRCyN devient une UMR du CNRS. Les domaines d'activité « Images » et « Télécommunications » entrent dans le laboratoire : L'IRCyN se transforme en IRCCyN. Quelques temps plus tard, une nouvelle équipe des Sciences de la Vie « PsyCoTec » spécialisée en psychologie cognitive travaillant sur les problèmes d'interaction Homme-machines est accueillie.

[30] UMR = Unité Mixte de Recherche
[31] CNRS = Centre National de la Recherche Scientifique
[32] ECN = Ecole Centrale de Nantes
[33] EMN = Ecole des Mines de Nantes

Le laboratoire IRCCyN, jusqu'à fin 2016
L'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes a été une Unité Mixte de Recherche du CNRS, rattachée principalement à l'Institut des Sciences de l'Information et de leurs Interactions (INS2I), ainsi qu'à l'Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) et à l'Institut des Sciences Biologiques (INSB).
Ses tutelles locales étaient l'École Centrale de Nantes, l'École des Mines de Nantes et l'Université de Nantes, établissements membres de la Communauté d'Universités et d'Etablissements, L'UNAM (L'Université Nantes, Angers, Le Mans).
A la fin de l'année 2016, l'IRCCyN comptait 11 équipes avec 270 chercheurs dont 110 doctorants.

Le LS2N, début 2017
En janvier 2017, l'IRCCyN fusionne avec le laboratoire LINA, Laboratoire d'Informatique de Nantes Atlantique. Le LINA était une Unité Mixte de Recherche (UMR 6241) commune au CNRS, à l'Université de Nantes et à l'École des Mines de Nantes, et en association avec INRIA depuis 2013. Cette unité se répartissait sur trois sites : la Faculté des Sciences de Nantes (site principal), l'École Polytechnique de l'Université de Nantes, et l'École des Mines de Nantes. Le LINA comptait 170 chercheurs dont 55 doctorants.
Le LS2N pour Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes est le fruit d'une réflexion entamée depuis plusieurs années au sein de la fédération AtlanSTIC. Cette fusion s'appuie surtout sur la complémentarité entre les activités de l'IRCCyN qui étaient principalement tournées vers la modélisation, l'analyse et la conduite des systèmes en ingénierie classique pour des applications industrielles avec celles du LINA tournées vers la théorie des langages, les outils de preuve, l'algorithmique, les systèmes distribués et les applications en ingénierie numérique. Le LS2N est une UMR CNRS, n°6004.
Soulignons que notre thématique de recherche alliant les sciences de l'ingénierie du numérique et les sciences de l'humain dépend de l'un des axes transversaux du laboratoire : « création, culture et sociétés numériques », axe dont je suis co-responsable.

1.3.2 Mon équipe de rattachement : de IVGI à IS3P

Malgré toutes ces évolutions organisationnelles, mon laboratoire de rattachement demeure le même. Notre équipe de recherche va donc elle aussi s'adapter aux changements : les thématiques changent quelque peu mais les domaines scientifiques eux, restent fidèles.

Equipe IVGI de 2004 à 2010
IVGI pour Ingénierie Virtuelle du Génie Industriel

L'ingénierie virtuelle représente tout un pan de recherche qui s'enrichit des théories systémiques, des approches des modèles de produits/processus/organisations, en s'appuyant sur de nouveaux environnements de conception et de manipulation des systèmes complexes, tant physiques qu'organisationnels. Après s'être intéressée à l'amélioration de la conception et de la mise en œuvre des systèmes industriels complexes par l'utilisation d'environnements intégrés supportant des approches d'ingénierie virtuelle, l'équipe IVGI s'est orientée vers deux axes fédérateurs :

- La capitalisation des connaissances et la modélisation des systèmes complexes,
- Le pilotage et l'amélioration des performances par le suivi d'indicateurs.

Ces thématiques scientifiques sont enrichies par deux particularités propres à notre équipe :

- l'intégration des aspects liés à la présence de l'Homme dans le système,
- et la prise en compte des indicateurs économiques et plus généralement, de la valeur.

Nos fondements thématiques principaux sont centrés sur l'ingénierie des modèles et de la connaissance, et l'intégration des facteurs technico-économiques pour la prise en compte de la Chaîne de Valeur. L'enjeu scientifique majeur consiste à proposer des modèles et des méthodes pour l'aide à l'amélioration des performances lors de la conception des produits et systèmes industriels en prenant en compte les aspects fonctionnels, structurels et comportementaux des processus d'entreprise.
Les verrous scientifiques de l'équipe IVGI sont liés à la complexité de la conception validée d'un produit ou d'un système industriel complexe due :

- au nombre et à la diversité des fonctionnalités gérées, et à leurs interactions,
- à l'intégration de points de vue des métiers et des phases du cycle de vie des produits et systèmes,
- à la contrainte de cohérence globale des modèles d'information des processus-produits-ressources et effets externes, en référence sur les ontologies de chacun des domaines concernés,
- à la contrainte de la maîtrise des processus d'ingénierie de modélisation, depuis le cahier des charges jusqu'à la spécification détaillée des applications à base de connaissance,
- à la contrainte de la maîtrise dynamique de cohérence au cours du déploiement de la modélisation.

Créée et animée depuis 2002 par Alain Bernard avec 2 permanents (1 PU et 1 MCF), l'équipe a atteint sa vitesse de croisière en 2010 avec 4 permanents (1 PU et 3 MCF) et 6 doctorants.
Equipe IS3P de 2010 à 2016

IS3P pour Ingénierie des Systèmes : Produits, Performances, Perceptions (IRCCyN, 2015)

L'équipe IS3P a été créée en septembre 2010 en regroupant des enseignants-chercheurs de l'IRCCyN issus des communautés du génie industriel, du génie mécanique et des sciences de la conception. L'équipe s'intéresse au développement de méthodes et outils pour la modélisation, l'analyse, le pilotage, la conception et l'optimisation de systèmes. Elle a ainsi élargi son spectre par rapport au précédent quadriennal afin d'étudier les systèmes[34] au sens large, qu'ils soient des produits, services ou organisations (entreprises), avec un intérêt particulier pour les systèmes complexes[35] et les interactions avec l'utilisateur. L'objectif général est de comprendre les relations entre les performances d'un système et les paramètres (ou variables de conception) qui le définissent, afin de prendre des décisions améliorant ses performances. La production scientifique de l'équipe a donc pour cadre général l'aide à la décision en conception ou pilotage de systèmes. L'équipe IS3P reprend une partie des axes de l'ancienne équipe IVGI et les complètent pour se structurer en quatre thèmes de recherche :

1. Facteurs humains en conception de systèmes,
2. Modélisation des connaissances,
3. Pilotage et conception optimale,
4. Variabilité et performances.

L'équipe, dirigée par Jean-François Petiot, était constituée de 10,5 permanents, dont 5 titulaires de l'HDR. Les chercheurs appartiennent principalement aux sections CNU 60 et 61 ce qui permet d'asseoir autant les fondements en Génie Mécanique qu'en Génie Industriel. A noter que grâce à l'ensemble des projets réalisés et déposés, nous avons pu mutualiser nos ressources et ainsi recruter un ingénieur de recherche en 2013 (Farouk Belkadi).
Durant ces 7 années d'existence, selon le bilan du quadriennal que nous avions rédigé, le bilan quantitatif de l'équipe IS3P :

- 1 soutenance d'HDR,
- 21 soutenances de thèses
- Plus de 265 communications scientifiques réalisées, tout type confondu.

Nouvelle équipe IS3P en 2017
IS3P pour Ingénierie des Systèmes : Produits, Processus, Performances (IRCCyN, 2015)

Avec le nouveau laboratoire LS2N, l'équipe IS3P évolue en se concentrant plus sur les aspects Génie Industriel que perceptifs. Le nom de l'équipe est très légèrement changé en modifiant la Perception par Processus : Ingénierie des Systèmes, Produits, Processus, Performance. C'est donc dans la continuité que s'inscrit notre nouvelle équipe IS3P.
L'équipe est constituée de 4 permanents (1 PU, 1 MCF HDR, 1 MCF et 1 équivalent MCC[36]). Elle est dirigée par Alain Bernard.

La performance des systèmes a jusque-là été l'un des fils conducteurs des problématiques scientifiques. L'idée scientifique forte défendue par l'équipe est la prise en compte des différents aspects techniques et humains afin de favoriser la mise en place de systèmes d'informations et de modèles de connaissances apportant des outils d'aide à la décision.
Les nouveaux axes se réfèrent d'une part à une certaine continuité thématique mais aussi à des initiatives nouvelles permettant d'étendre les attendus scientifiques et de créer des opportunités de projets de recherche principalement collaboratifs, soit en direct avec des entreprises, soit dans le cadre de projets plus larges en lien avec des acteurs académiques et industriels nationaux et européens.
La thématique générale contribue à définir de nouvelles approches d'aide à la décision pour l'amélioration des performances des systèmes produits-services au cours de leur cycle de vie. Le projet scientifique est structuré autour de trois axes ; chacun d'eux est piloté par un jeune enseignant-chercheur ou chercheur permanent de l'équipe.

- Performance des systèmes : aspects durables (causalités inducteurs/indicateurs), attentes client (différenciation/standardisation, valeur perçue et aide au choix) – responsable Catherine Da Cunha,
- Modèles et systèmes d'information : extension au concept produit-service, gestion de la diversité et des évolutions (aspects dynamiques de co-évolution) – responsable Farouk Belkadi,
- Ingénierie des connaissances : extraction et formalisation des connaissances (ensembles complexes, objets patrimoniaux, expertise technique), interaction/utilisation/décision – responsable Florent Laroche.

Au sein du LS2N, notre équipe est rattachée au pôle "conception et simulation de système" d'une part, et "sciences des données et de la décision" d'autre part ; elle contribue également à l'axe transverse sur "l'entreprise du futur". Personnellement, je suis également acteur de 2 thèmes transverses du LS2N et co-responsable d'un des deux avec Yannick Prié : "Entreprise du futur" ainsi que "Création, Culture & Sociétés numériques".

[34] Système = ensemble d'éléments (humains ou matériels) interagissant entre eux selon un certain nombre de principes ou règles
[35] Système complexe = système constitué d'un grand nombre d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction, son comportement ou son évolution par le calcul.
[36] MCC = Maitre de Conférence Contractuel, actuellement sous le statut d'Ingénieur de Recherche

1.3.3 Direction thèses et masters

Les encadrements doctoraux listés ci-dessous, dont les thèses ont été soutenues ou qui vont l'être prochainement, seront détaillés ultérieurement dans la partie intitulée *Les thèses encadrées*.

Encadrement post-doctoral

2014-2015	Benjamin Hervy	Contribution à la mise en place de méthodes et d'outils numériques innovants pour la muséologie numérique
2011-2012	Joanna Daaboul	Mise en place d'outils opérationnels pour la diffusion de la Mass Customization dans l'industrie du textile

Encadrement doctoral (en cours)

2018-2021	Valentin Frebet	Sémantisation de nuages de points 3D à des fins de reconception automatique. Application aux environnements industriels complexes	• thèse CIFRE avec la société TagLabs (demande de financement en cours) • co-encadrement : 70% Florent Laroche + 30% Alain Bernard
2017-2020	Oussama Keddache	Développement d'un modèle sémantique pour l'aide à la décision dans le contexte de l'Industrie 4.0 : Application aux machines d'usinage à grande vitesse intelligentes	• financement ANR projet SmartEmma • co-encadrement : 30% Florent Laroche + 30% Farouk Belkadi + 40% Benoit Furet
2017-2020	Paul Francois	Système d'interaction en réalité virtuelle basé sur des connaissances issues de données historiques tangibles. Application au théâtre virtuel de la Foire à Paris du XVIIIe siècle	• financement RFI OIC + Direction recherche ECN • co-encadrement : 60% Florent Laroche + 40% Françoise Rubellin pour les Sciences Humaines et Sociales
2016-2019	Loic Jeanson	Rétro-conception d'objets patrimoniaux par une assistance digitale à l'hybridation sémantique : Méthodologie d'intégration de connaissances hétérogènes historiques	• financement ANR projet ReSeed • co-encadrement : 30% Florent Laroche + 40% Alain Bernard + 30% Jean-Louis Kerouanton pour les Sciences Humaines et Sociales
2014-2017	Matthieu Quantin	Digitalisation de masse VS popularisation personnalisée du patrimoine numérique : vers une approche uniformisée pour le partage des connaissances historiques	• allocation Ministère de la recherche • co-encadrement : 30% Florent Laroche + 40% Alain Bernard + 30% Jean-Louis Kerouanton (pour les SHS) • publications réalisées : 12 revues et conférences

Encadrement doctoral (thèses soutenues)

2013-2016	Mohamed Islem Ouamer Ali	Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique et les données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique	• financement ANR projet Metis • co-encadrement : 30% Florent Laroche + 40% Alain Bernard + 30% Sébastien Remy • publications réalisées : 6 revues et conférences
2012-2016	Mohamed Anis Dhuieb	Structuration multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise ; vers un compagnon virtuel ubiquitaire	• financement Région Pays de Loire • co-encadrement : 50% Florent Laroche + 50% Alain Bernard • publications réalisées : 17 revues et conférences
2011-2015	Fang Liu[37]	Model-based process planning with knowledge integration in decision-making	• bourse CSC • co-encadrement : 50% Florent Laroche + 50% Alain Bernard

[37] A noter : le sujet de thèse de Fang Liu a évolué entre le dépôt de la candidature et la soutenance finale, s'éloignant fortement de mes préoccupations scientifiques. Aussi, malgré cette évolution du sujet de thèse voulue par la doctorante et ma forte contribution à la finalisation de son master, je me suis tout de même impliqué dans l'encadrement et nous avons maintenu mon association à cette thèse.

2011-2014	Fabrice Le Pavic	De 1945 à fin 1980, une histoire des techniques de la construction militaire dans le port-arsenal de Lorient	• financement propre car enseignant en secondaire • co-encadrement : 30% Florent Laroche + 30% Jean-Louis Kerouanton + 40 % Martine Acerra (PU UFR Sciences Nantes) pour les SHS • publications réalisées : 2 dont 1 conférence en Sciences de l'Ingénierie
2011-2014	Benjamin Hervy	Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe : application via la mise en place d'un PLM pour la muséologie	• thèse CIFRE avec le Musée de Nantes, Château des Ducs de Bretagne • co-encadrement : 30% Florent Laroche + 40% Alain Bernard + 30% Jean-Louis Kerouanton (pour les SHS) • publications réalisées : 23 revues et conférences
2008-2011	Joanna Daaboul	Etude de l'influence de la personnalisation des produits sur la performance des entreprises étendues mondialisées. Application à l'industrie de la chaussure	• financement projet européen Dorothy • co-encadrement : 50% Florent Laroche + 50% Alain Bernard • publications réalisées : 16 revues et conférences

Encadrement master

2016-2017	Alexis Puysilloux	Modélisation en réalité virtuelle s'un site archéologique : la salle à manger de Néron	Ecole Française de Rome
2016-2017	Yann Guillou	Mesure de performances industrielles et optimisation	FAMAT St Nazaire
2016-2017	Clément Viau	Extension de la gamme actuelle de mélangeurs, développement de nouveaux produits	Tetra Pak Guérin Systems
2016-2017	Paul-Loup Gobinet	Archéologie digitale par acquisition de données historiques des aspects architecturaux et scientifiques	MCC Héritage
2015-2016	Guillaume Petot	Assemblage d'un injecteur solénoïde	Delphi, Blois
2015-2016	Alexandre Langeois	Implémentation et visualisation sémantique de connaissances historiques via un Système d'information patrimonial	IRSTV
2014-2015	Etienne Peillard	Conception d'applications de réalité augmentée pour la valorisation de contenus historique et scientifique	CEA, Université de Nantes
2014-2015	Damien Tournache	Study of the «de Quervain-Picard» seismograph of Neuchâtel Observatory	HE-ARC, Neuchâtel, Suisse
2014-2015	David Alexandre	Optimisation du processus de surveillance opérationnelle	Airbus Nantes
2014-2015	Mathieu Charrier	Etudes mécaniques pour le développement des systèmes de navigation	SAGEM Securité Défense
2013-2014	Sébastien Rouquet	Modélisation numérique de l'ancienne Poudrerie Royale de Saint-Chamas	ID Méditerranée
2013-2014	Quentin Lemée	Solution de visualisation de données historiques. Mise en place d'un outil de visualisation de données historiques dans un monde 3D virtuel sous Unity3D	Arts et Métiers ParisTech Angers
2013-2014	Hannah Rawcliffe	Analyse et traitement d'un modèle 3D numérisé d'une maquette historique	University of East Carolina, Archaeology department
2012-2013	Thomas Berland	Gestion des connaissances	Aerolia St Nazaire
2012-2013	Nan Ma	Visualisation 4D historiques enrichies en réalité virtuelle	Ecole Centrale de Nantes
2012-2013	Paul-Yves Lucas	Implémentation d'une interface web pour la gestion de données d'objets de collections de musées	Ecole Centrale de Nantes
2012-2013	Camille Autran	Projet Lenoir	Le Louvre INHA
2011-2012	Nerea Otero Salazar	Création des dossiers de capitalisation des usines d'assemblage véhicule des partenaires Nissan et Lada	Renault
2011-2012	Vianney Lefebvre	Développement d'un knowledge management - calcul de structure vibratoire par éléments finis	Eurocopter

2011-2012	Alexandre Nativel	Conception de base de données pour la gestion d'objets de collections de musée	Ecole Centrale de Nantes
2010-2011	Benjamin Hervy	Recherche et développement de nouveaux usages des NTIC en muséologie	Musée d'Histoire de Nantes
2010-2011	Francois Dedieu	Mise en place d'une supply chain sur le temps long	Legrand
2010-2011	Cyrielle Kleff	Etude de la mise en flux du secteur des bois moulés en soutien "méthodes Lean"	BJ Technologies
2009-2010	Jérémy Lecourt	Mise en oeuvre du process achat lors de l'intégration de SAP pour un client de l'industrie agroalimentaire	CTAC

Comité de suivi de thèses

2015-2018	Jing Chang	Muscle fatigue analysis using virtual human techniques based on anthropometric fatigability data	• encadrants : Fouad Bennis & Damien Chablat
2013-2016	Deep Seth	To study whole body muscles fatigue and recovery models to improve working ergonomics	• encadrants : Damien Chablat, Sophie Sakka & Fouad Bennis

1.3.4 Rayonnement scientifique : projets et responsabilités collectives

Les projets et réseaux listés ci-dessous seront détaillés ultérieurement dans la partie intitulée *Playground : le cadre scientifique de mes recherches.*

Rayonnement scientifique – international et européen

- Participation et coordinateur scientifique pour l'Ecole Centrale de Nantes d'un réseau d'infrastructure européenne : « VISIONAIR» (24 partenaires) pour le 7ème PCRD
- Participation au réseau européen COSCH, Colour & space in cultural heritage, réseau d'experts de technologies avancées pour la conservation et la restauration des œuvres culturelles - http://cosch.info
- Membre du réseau INNOVA, Virtual Archaeology International Network (29 partenaires) - http://virtualarchaeology.net ; enseignant-chercheur dans le master international en digital archeology - http://seavtraining.com
- Membre du CIRP, associate member, International Academy for Production Engineering – www.cirp.net
- Membre d'honneur de l'association Ars Mathematica qui ambitionne de "favoriser la rencontre de l'art, de la science et de la technique par la recherche en matière d'objets numériques" - http://www.arsmathematica.org
- Participation à 2 réseaux d'excellence européens : « INTEROP » (45 partenaires) et « VRL_KCiP » (24 partenaires) pour le 6ème PCRD
- Participation à 2 projets européens : projet DOROTHY du programme NMP (12 partenaires) et projet SMCS (12 partenaires) pour le 7ème PCRD
- Participation à 1 projet de coopération européenne : « Leonardo » (6 partenaires)

Rayonnement scientifique – national

- Participation et coordinateur scientifique du consortium pour le projet ANR ReSeed, Rétro-conception SémantiquE d'objEts patrimoniaux Digitaux (8 partenaires) www.reseed.fr
- Participation au projet ANR METIS, ModElisation Tridimensionnelle de maquettes numériques par l'Intégration de données géométriques et de connaissances hétérogèneS (7 partenaires)
- Participation active au GDR-MACS du CNRS et plus particulièrement dans les GT IS3C, C2EI et Easy-Dim
- Membre du consortium national Consortium3D pour la diffusion des bonnes pratiques d'utilisation de la 3D pour le patrimoine, l'histoire et l'archéologie, labélisé par la TGIR Human-Num du CNRS (10 partenaires)
- Membre du réseau UDPN, Usages Des Patrimoines Numérisés, étude des usages, des pratiques et des représentations du patrimoine culturel digital - IDEX-SPC - http://udpn.fr
- Membre de l'IRSTV, Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, Axe Tomographie Urbaine - http://www.irstv.fr
- Membre du réseau MUST, Réseau des professionnels de l'information et de la documentation pour les Musées, le patrimoine et la Culture scientifique et Technique – www.reseaumust.fr
- Membre de la SFHST, Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques – https://sfhst.hypotheses.org

Rayonnement scientifique – région Pays de Loire

- Participation au projet région Pays de Loire : « EXPLORNOVA » (4 partenaires) – www.explornova.fr
- Participation au projet région Pays de Loire : « MERVI» (6 partenaires)
- Participation au projet région Pays de Loire : « ARTUR» (7 partenaires)
- Membre actif du pole AIP Primeca Pays de La Loire - http://www.aip-primeca.net
- Membre du Comité de Pilotage de la PRI iDEV (Plateforme Régionale d'Innovation - Innovation & Design d'Expériences de Visites) - http://pri-idev.fr
- Membre du Comité de Pilotage de la MSH Ange Guépin, axe « Sociétés Numériques » - www.msh.univ-nantes.fr
- Membre du Comité Scientifique du Patrimoine de la ville de Nantes

Responsable et Coordinateur scientifique

- de la Plateforme mutualisée de Réalité Virtuelle à l'Ecole Centrale de Nantes (budget d'investissement 400 k€) http://www.ec-nantes.fr/immersion13000
- de l'axe Modélisation des Connaissances de l'équipe IS3P de l'IRCCyN/LS2N – http://www.irccyn.ec-nantes.fr/fr/equipes/is3p
- co-responsable de
- co-responsable de l'axe transversal coordinateur scientifique du consortium pour le projet ANR ReSeed, Rétro-conception SémantiquE d'objEts patrimoniaux Digitaux (8 partenaires) www.reseed.fr
- co-animateur du GT IS3C du GDR-MACS avec Frédéric Demoly – http://gdr-macs.cnrs.fr

Collaborations européennes et internationales

depuis 2007	avec le LAMIC[38], Laboratoire de muséologie et d'ingénierie de la culture, Université Laval, Québec, Canada	échanges de stagiaires ingénieur, jury de thèse
depuis 2011	avec l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège [39], Belgique	échanges de stagiaires ingénieur, accueil de chercheurs, publications communes
depuis 2013	avec la Haute Ecole Arc Conservation-restauration [40] à Neuchâtel, Suisse	échanges de stagiaires ingénieur, accueil de chercheurs, publications communes

1.3.5 Contrats de recherche et contrats industriels

La réalisation de contrats avec des industriels permet de :

- Donner un cadre formel aux projets étudiants (élèves ingénieurs, masters ou doctorats) pour assurer un transfert de technologie des résultats de recherche,
- Tester de nouvelles technologies / méthodologies afin de valider leur applicabilité industrielle (fabricants de matériels de numérisation 3D ou de Réalité Virtuelle, développeurs de logiciels, constructeurs automobiles, chantiers navals, communautés d'agglomération, DRAC, associations de patrimoine…),
- Assurer une diffusion scientifique des résultats par la participation à des conférences scientifiques internationales.

La liste ci-dessous des projets de recherche financés ou des contrats de recherche avec des partenaires privés/publics qui sont/ont été significatifs dans ma carrière professionnelle totalise un montant de 1,5 millions d'euros dont je suis/ai été le responsable budgétaire. Les sommes indiquées ne font apparaitre que la part Ecole Centrale ou LS2N, le budget global des projets sera indiqué dans la partie ci-après sur *le Playground : le cadre scientifique de mes recherches.*

2016-2020	Projet ANR **ReSeed**	responsable scientifique pour le LS2N	186 k€
2016-2017	Réalisation d'une étude et maquette physique de la salle à manger de Néron Musée Archéologique de Marseille et Ecole Française de Rome		6 k€
2016-2015	Réseau européen **VISIONAIR**	responsable scientifique pour l'Ecole Centrale de Nantes	200 k€
2015-2016	Collaboration interdisciplinaire **CPTCN** avec l'Université de Nantes	responsable scientifique pour l'Ecole Centrale de Nantes	14 k€
2013-2015	Projet région **EXPLORNOVA**	responsable scientifique pour l'IRCCyN	237 k€
2011-2015	Réseau européen **VISIONAIR**	responsable scientifique pour l'Ecole Centrale de Nantes	200 k€
2011-2014	Projet ANR **METIS**	responsable scientifique pour l'IRCCyN	200 k€
2011-2014	Projet région **ARTUR**	correspondant scientifique pour l'IRCCyN équipe IS3P	180 k€

[38] http://www.lamic.ulaval.ca
[39] http://www.geo.ulg.ac.be
[40] http://www.he-arc.ch/cr

2011-2013	Projet région **MERVI**	correspondant scientifique pour l'IRCCyN	35 k€
2011-2012	Validation scientifique et coordination de la mise en place d'un objet muséographique à vocation patrimoniale technique pour le Musée de Batz-sur-Mer (Communauté d'Agglomération de Cap Atlantique)		15 k€ + 15 k€
2008-2014	Conseil d'expertise scientifique intégrant l'accompagnement CIFRE pour la valorisation de la maquette du port de Nantes en 1900 exposée au Musée du Château des Ducs de Bretagne de Nantes		120 k€
2008-2011	Projet européen **Dorothy**	correspondant scientifique pour l'IRCCyN	200 k€
2005	Réalisation d'une application didactique pour l'Ecomusée du Creusot-Montceau (71)		5 k€

1.3.6 Organisation de colloques

Depuis 2004, date d'entrée en thèse, j'ai participé tant comme organisateur que comme co-chairman à de nombreuses conférences.

Membre du comité d'organisation

2014 nov	**Nantes**	5ème **Rencontres Internationales** Jules Verne http://rencontresjulesverne.ec-nantes.fr
2014 août	Nantes	64ème **General Assembly CIRP** http://www.cirp2014.com
2013 juillet	Nantes	10ème conférence internationale **PLM** www.plm-conference.org
2012 juillet	Nantes	11ème conférence internationale **ESDA** (ASME) www.asmeconferences.org/ESDA2012
2011 juillet	Nantes	4ème Journées de l'interopérabilité des applications d'entreprise du **Pôle GSO** - JIAE'11
2010 avril	Nantes	20ème conférence internationale **CIRP Design Seminar** www.cirp.net
2009 avril	La Plagne	11ème colloque **AIP Primeca** www.aip-primeca.net
2008 oct.	Nantes	5ème conférence internationale **DET** Digital Enterprise Technology
2005-2009	Nantes	Cycle de 3 journées d'étude la thématique du patrimoine, des musées et des outils du numérique, du virtuel 2005 (30 conférenciers), 2007 (12 conférenciers), 2009 (9 conférenciers)
2007 déc.	Pornichet	**Doctoriales** des Pays de La Loire Assistance audiovisuelle 100 doctorants et 100 intervenants

Organisateur général et co-chairman

2018 mai	Nantes	28ème conférence internationale **CIRP Design Seminar** http://cirpdesign2018.ec-nantes.fr/	Organisateur général et chairman
2017 avril	Strasbourg	Colloque national **SFHST** https://sfhststras2017.sciencesconf.org	co-chair d'une session spéciale "Modèles et outils numériques au profit du patrimoine scientifique, technique et industriel" 8 communications
2015 sept	Lille	Colloque international **ICOTECH – TICCIH** "Industrial Heritage in the 21st Century: New Challenges" https://ticcih-2015.sciencesconf.org	co-chair d'une session spéciale "Le patrimoine industriel à l'ère numérique" 5 communications
2011 mai	Nantes	Colloque national **SFHST**	co-chair d'une session spéciale "Histoire des techniques, modélisation et TIC" 12 communications
2010 juil.	Tampere, Finlande	Colloque international **ICOTECH – TICCIH** "Reusing the industrial past"	organisation et co-chair d'une session spéciale "Digital uses for museology: a new way to describe technical and industrial heritage"

A noter en 2014 l'organisation du colloque des 5ème Rencontres Internationales Jules Verne à Nantes pour lequel j'ai été l'organisateur tant logistique que scientifique :

- Thème : « Jules Verne, la science : jusqu'où explorer ? »,
- 40 communications scientifiques francophones,
- Actes publiés sous la forme d'un ouvrage de 335 pages aux Editions Coiffard,
- Budget 17 k€.

Ce colloque s'adressait aux professionnels (chercheurs, enseignants, acteurs de la culture scientifique, industriels…) comme aux citoyens. Les « Rencontres Jules Verne » ont réunies des chercheurs des disciplines scientifiques ou des sciences humaines, mais également des ingénieurs, architectes, journalistes, artistes… Ce fut l'occasion de croiser et de confronter des approches différentes : histoire des idées, histoire littéraire, analyses philosophiques et anthropologiques de l'imaginaire social.

Enfin, dans le cadre de mes activités de recherche, afin de permettre des échanges avec les communautés scientifiques dans lesquelles je suis impliquées, j'ai organisé et organise régulièrement des journées d'études.
A noter dernièrement la Journée d'Etudes réalisée le 22 juin 2016 à Nantes pour l'IDEX-SPC UDPN[41] « Vers une Politique numérique : usages et modélisation des applications numériques "durables" des institutions patrimoniales ». Après plus d'un an d'un travail de terrain pour comprendre comment les outils numériques sont utilisés dans les lieux de patrimoine, avec ma collègue sociologue Geneviève Vidal[42], nous avons souhaité confronter nos résultats avec des experts. Un panel de 13 communicants et 40 participants interdisciplinaires a permis d'aborder la question de l'utilisation des outils numériques patrimoniaux pour un large spectre des métiers professionnels du patrimoine : chercheurs, industriels, ingénieurs, informaticiens, architectes, muséographes, conservateurs, médiateurs, thésards, étudiants en master… Trois thèmes ont guidé cette journée :

1. Conception-réalisation et gestion du patrimoine numérique dans les musées et les institutions,
2. Création d'applications numériques,
3. Recherche et R&D musées, patrimoine.

Le résultat de l'étude est un rapport de plus de 50 pages qui a été distribué en open source sur le web et donne lieu a deux publications : un livre détaillant l'analyse sociologique de l'étude (Vidal & Laroche, 2017) ainsi qu'une communication sous la forme d'un article étendu dans la lettre de l'OCIM[43] afin de donner les pratiques de conception/utilisation du numérique pour les professionnels des Musées (Laroche & Vidal, 2017).
Cette étude est reconduite pour 2017-2018 et a déjà donné lieu à une deuxième Journée d'Etudes le 28 février 2017 au Centre Georges Pompidou sur le thème : « Acteurs de la numérisation du patrimoine et usagers des patrimoines numérisés : conservation, médiation, éducation, création et recherche ».

1.3.7 Expertises scientifiques

Jurys de thèses de doctorat

2017 juil.	Tommy Messaoudi	Proposition d'une ontologie de domaine dédiée à l'annotation d'images spatialisées pour le suivi de la conservation du patrimoine bâti	Marseille
2016 nov.	Mohamed Islem Ouamer Ali	Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique et les données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique	EC Nantes
2015 oct.	Mohamed Anis Dhuieb	Structuration multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise ; Vers un compagnon virtuel ubiquitaire	EC Nantes
2015 juil.	Fang Liu	Model-based process planning with knowledge integration in decision-making	EC Nantes
2014 janv.	Fabrice Le Pavic	De 1945 à fin 1980, une histoire des techniques de la construction militaire dans le port-arsenal de Lorient	Université de Nantes
2014 déc.	Benjamin Hervy	Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe : application via la mise en place d'un PLM pour la muséologie	EC Nantes

[41] Usages Des Patrimoines Numérisés (Idex-SPC) - http://www.udpn.fr
[42] Université Paris 13
[43] OCIM = Office de Coopération et d'Information Muséales – www.ocim.fr

2011 déc.	Joanna Daaboul	Etude de l'influence de la personnalisation des produits sur la performance des entreprises étendues mondialisées. Application à l'industrie de la chaussure	EC Nantes
2010 sept.	Yang XU	Proposition d'un système intégré de référence de connaissances pour l'évaluation de la connaissance dans le développement de produits	EC Nantes

Expertises scientifiques

	Expert du projet SCHEMA-TEC	Haute Ecole Arc Conservation-restauration à Neuchâtel, Suisse - http://www.he-arc.ch
	Reviewer : conférences et revues internationales	JS Univ-Nantes, ASME ESDA, IMETI, PLM, IFAC, CIRP, JMST, COMIND, Cahiers d'histoire du Cnam
	Expert	ICOMOS auprès de l'UNESCO pour le patrimoine scientifique et technique
2011	Expertise scientifique	Région Champagne-Ardenne
2009	Membre du Comité Scientifique	Colloque CoDeKF – UTBM – Montbéliard - http://acsp2.utbm.fr/codekf

Expertises scientifiques avec contrats de recherche

2016-2017	Réalisation d'une étude et maquette physique de la salle à manger de Néron	Musée Archéologique de Marseille et Ecole Française de Rome	6 k€
2012	Assistance à maitrise d'ouvrage	Musée de Batz-sur-Mer Communauté d'Agglomération de Cap Atlantique	15 k€
2011-2012	Validation scientifique et coordination de la mise en place d'un objet muséographique à vocation patrimoniale technique	Musée de Batz-sur-Mer Communauté d'Agglomération de Cap Atlantique	15 k€
2008-2014	Conseil d'expertise scientifique intégrant l'accompagnement CIFRE pour la valorisation de la maquette du port de Nantes en 1900	Musée du Château des Ducs de Bretagne de Nantes	120 k€

1.3.8 Diffusion du savoir : publications et production scientifique

Mes travaux et ma production scientifique s'effectuent en 60ème section du CNU. Cependant, compte tenu du caractère interdisciplinaire de mes travaux de recherche, je suis également amené à publier dans d'autres sections afin de diffuser mes travaux de recherche et permettre un maillage scientifique plus riche avec d'autres chercheurs.
Ainsi il est à noter une coloration en 72ème section CNU ("Epistémologie Histoire des Sciences et des Techniques"), discipline pour laquelle j'ai également été qualifié en 2008. Cette pluridisciplinarité est détaillée dans la partie ci-après sur le groupement de recherche *EPOTEC*[44] qui réunit :

1. mon laboratoire ex-IRCCyN pour la partie Sciences de l'Ingénieur,
2. ainsi que l'équipe d'histoire des techniques du Centre François Viète d'Histoire des Sciences et des Techniques (EA 1161) pour la partie Sciences Humaines et Sociales.

Chacun conserve ses propres compétences et champs d'expertises mais les projets et les publications scientifiques sont réalisés principalement en binôme avec, entre autres, mon collègue historien maître de conférences Jean-Louis Kerouanton.

Le caractère novateur et la diversité de ces travaux de recherche m'ont fait prendre conscience de la difficulté de mise en place d'une nouvelle discipline. Aussi la diffusion du savoir acquis se fait à tous les niveaux :

- tant auprès des experts avec des communications scientifiques en revues ainsi que des conférences nationales et internationales,
- qu'auprès du grand public afin d'avoir un moyen de mesure de l'intérêt de nos travaux (et un juste retour sur investissement des fonds publics qui financent nos salaires et nos projets). Le nombre de conférences invitées est en forte croissance : aussi bien dans la presse écrite/radio/télévisuelle que les manifestations organisées par des institutions ou des associations… (Laroche, 2017)

[44] La fédération EPOTEC sera expliquée dans la suite de ce mémoire.

Ma stratégie de valorisation et de diffusion de la recherche ne se concentre pas uniquement sur les « revues classées en haut de la pyramide » ; j'essaye simplement de diffuser mes idées et mes résultats au sein de communautés qui peuvent être à même d'utiliser mes travaux. De nombreuses disciplines sont impliquées :

- La conception de produits, la gestion de projets, l'innovation et le reverse-engineering,
- L'informatique, la Réalité Virtuelle et les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication,
- La pédagogie : expliquer les faits techniques contemporains par l'histoire,
- Les Digital Humanities pour un renouveau des pratiques en Histoire des Sciences et des Techniques.

De plus, comme suite aux coopérations avec des chercheurs de laboratoires nationaux et internationaux (LASMIS, LAMIC, CFV[45], CLARTE[46]…), ces collaborations ont permis de faire progresser la problématique de recherche sur la sauvegarde et la valorisation du patrimoine technique et réaliser des "papiers" scientifiques interdisciplinaires et transnationaux.

Evolution du nombre de publications scientifiques

Ma bibliographie complète est donnée en annexe de ce mémoire.

La courbe de la figure suivante démontre une publication régulière de mes activités de recherche. A ce jour, je totalise un peu plus de 200 communications avec acte, sans acte, invité, dans des revues, des contributions à des chapitres ou la rédaction d'ouvrages.

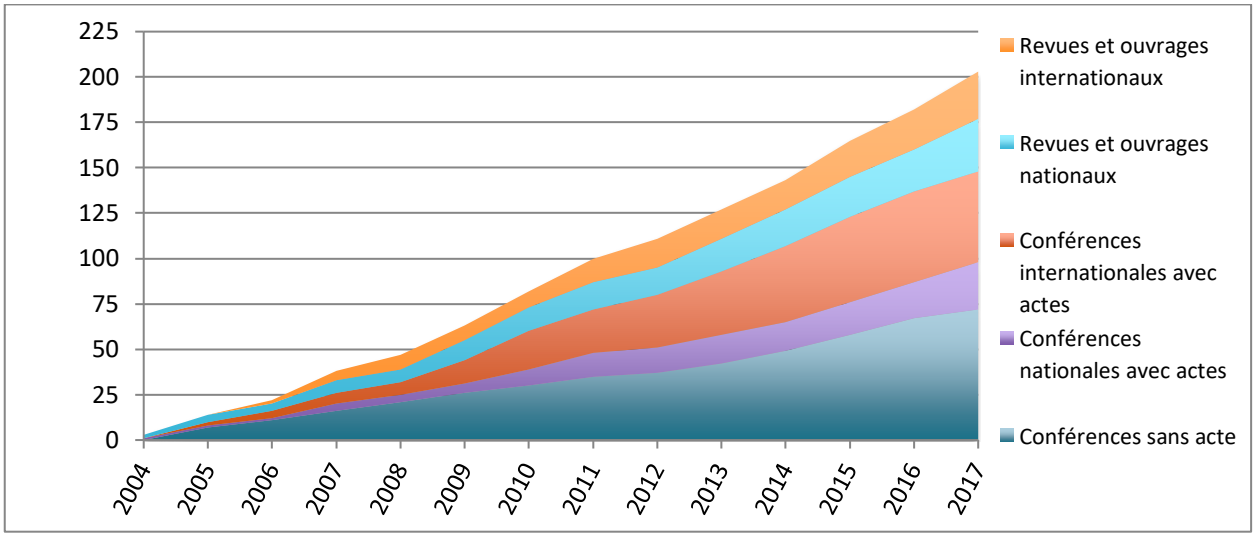


Figure 4 - *Evolution du nombre de publications en cumulé depuis 2004*

A la date du 15 octobre 2017, selon Google Scholar mon h-index est de 12 pour 457 citations et selon Researchgate il est de 17,84 pour 307 citations. A titre de référence, le tableau suivant indique le nombre d'article de que j'ai publié par revues avec son facteur d'impact associé.

Titre de la revue	Editeur	Facteur d'impact	Nombre de publications
Journal Knowledge-Based Systems	Elsevier	5,02	1 article
CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology	Elsevier	2,69	5 articles
International Journal of Intelligent Manufacturing	Springer	2,61	1 article
Journal Computer-Aided Design & Applications	Elsevier	2,47	1 article
International Journal Virtual and Physical Prototyping	Taylor & Francis	1,53	3 articles
International Journal of Virtual Reality		0,79	1 article
International Journal of Product Lifecycle Management	Inderscience	0,71	2 articles

Figure 5 - *Nombre de publications en journaux et facteurs d'impact*

Publication marquante dans le parcours scientifique – Journal international avec comité de lecture

- F. Laroche, A. Bernard, B. Hervy, DHRM: A new model for PLM dedicated to product design heritage, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, 2015, vol. 64, 4p., DOI : 10.1016/j.cirp.2015.04.027 (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015)

[45] CFV = Centre François Viète - www.cfv.univ-nantes.fr

[46] www.clarte-lab.fr

Publication marquante dans le parcours scientifique – Direction d'ouvrage

- B. Guillet, C. Courtin, F. Laroche, J.-L. Kerouanton, Nantes1900 - la maquette du port, ouvrage collectif, Musée d'histoire de Nantes, France, 88 p., ISBN 978-2-906519-49-7, 2015 (Guillet, Courtin, Laroche, & Kerouanton, 2015)

Les 10 communications marquantes de mon parcours scientifique

Les 10 publications sélectionnées sont détaillées dans le tableau ci-après et se composent de :

- 4 revues, qui constituent les bases scientifiques de mes travaux de recherche,
- 2 ouvrages, qui ont permis de diffuser et vulgariser mes travaux,
- 3 conférences, qui assoient les prospectives de mes recherches.

En complément, est joint un chapitre d'ouvrage historique auquel j'ai fortement contribué.

Le schéma synoptique de la figure suivante explique le choix de sélection de ces publications :

- Il permet d'expliquer les liens thématiques entre mes travaux de recherche : contribution ou poursuite.
- La séparation en ordonnées illustre la double quête entre les modèles sémantiques et les modèles physiques (voir partie ci-après *Problématique et cadre général de mes apports : le « KLM for Heritage »*)
- Les 3 colonnes en abscisse : les fondements de mes travaux sont positionnés dans la colonne centrale et permettent soit d'être vulgarisés soit faire de la prospective pour de futurs recherches.

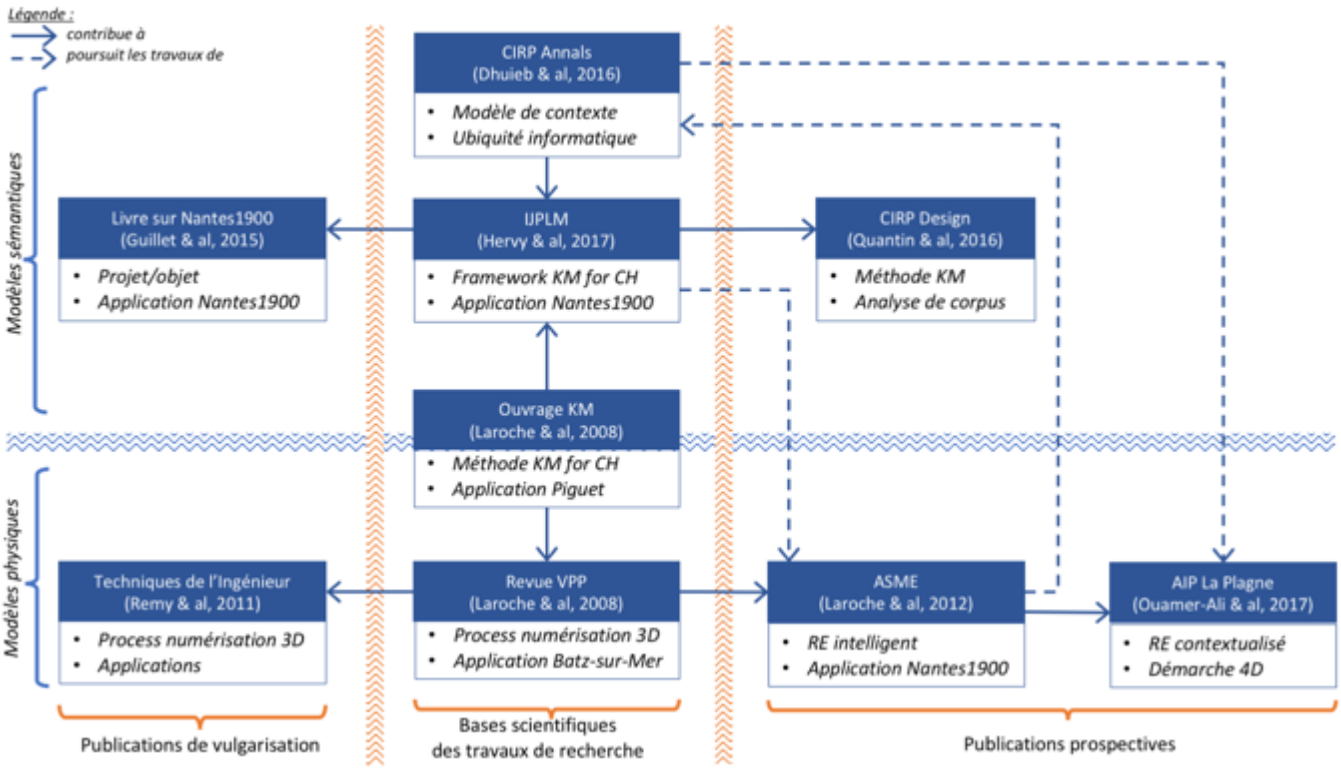


Figure 6 - *Schéma synoptique des évolutions des publications majeures*

Concours / Récompenses / Prix

2016	Projet Nantes1900	Label Or dans la Catégorie culture « Territoires innovants » des Interconnectés Nationales
2014	M. Anis Dhuieb, F. Belkadi, F. Laroche, A. Bernard, *Interoperability framework for supporting information-based assistance in the factory*, The IFIP Working Group WG 5.1 11th International Conference on Product Lifecycle Managment, Jul 2014, Yokohama	nominé pour les best paper award
2011	F. Laroche, M. Servieres, D. Lefevre, J.-L. Kerouanton, *Where Virtual Enhances Physical Mock-Up: A Way to Understand our Heritage*, 10th IEEE international symposium on mixed and augmented reality, Basel, Suisse, 6 p.	nominé pour les best paper award
2010	Thèse de doctorat F.Laroche (Laroche, 2007)	2ème prix ex-æquo des thèses de Nantes Métropole[47]
2009	Thèse de doctorat F.Laroche (Laroche, 2007)	1er prix du « Reverse-Engineering » de l'Association française de prototypage Rapide[48]
2009	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche, *Extended value chain modelling and simulation for mass customization implementation*, Conférence internationale DET, Hong Kong, Actes édités par Springer, 8 p.	best paper award
2008	Thèse de doctorat F.Laroche (Laroche, 2007)	1er prix ex-æquo des thèses du journal Le Monde de la Recherche en Sciences Exactes[49]
2007	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte, *Une vision produit-process et sa méthodologie dédiée à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel sous une forme virtuelle*, Revue MICADO Ingénierie Numérique Collaborative, version étendue de CPI 2007 conference, Rabat, Maroc, 26 p.	best paper award

Presse télévisuelle et émission radio

29 janvier 2014	TéléNantes Emission « 18h à savoir » www.telenantes.com	Interview sur le thème « Jules Verne et les limites du savoir, comment mettre en perspective le rôle des ingénieurs aujourd'hui »
17 juin 2009	France 3, Journal Télévisé Edition Estuaire, 18/19h	reportage de 2 minutes sur l'opération de numérisation 3D de la maquette du port de Nantes en 1900 menée en partenariat avec le Château des Ducs de Bretagne
17 juin 2009	Nantes 7, Journal Télévisé journal « l'actualité en 7 minutes »	reportage de 1.30 minutes sur l'opération de numérisation 3D de la maquette du port de Nantes en 1900 menée en partenariat avec le Château des Ducs de Bretagne
22 octobre 2007	France 3 Journal Télévisé 19/20h Edition régionale	reportage de 3 minutes sur le projet du Canot à vapeur de DCNS
13 juin 2005	Nantes 7 Journal Télévisé 19/20h	reportage de 1.30 minutes sur le projet de la laverie de sel de Batz-sur-Mer
avril 2016	Euradio www.euradionantes.eu	invité de l'émission l'Heure Centralienne interview d'une heure en anglais
novembre 2014	Radio Prun www.prun.net	invité de l'émission le Labo des Savoirs
novembre 2011	Euradio	interview individuelle dans l'invité de la rédaction
avril 2010	Euradio	invité de l'émission l'Heure Centralienne interview d'une heure en anglais

[47] www.nantesmetropole.fr
[48] www.afpr.asso.fr
[49] www.lemonde.fr

Synthèse de la répartition des publications scientifiques

Nota : sur la deuxième figure seulement, les publications réalisées en mon nom propre sans collaborateur n'ont pas été comptabilisées.

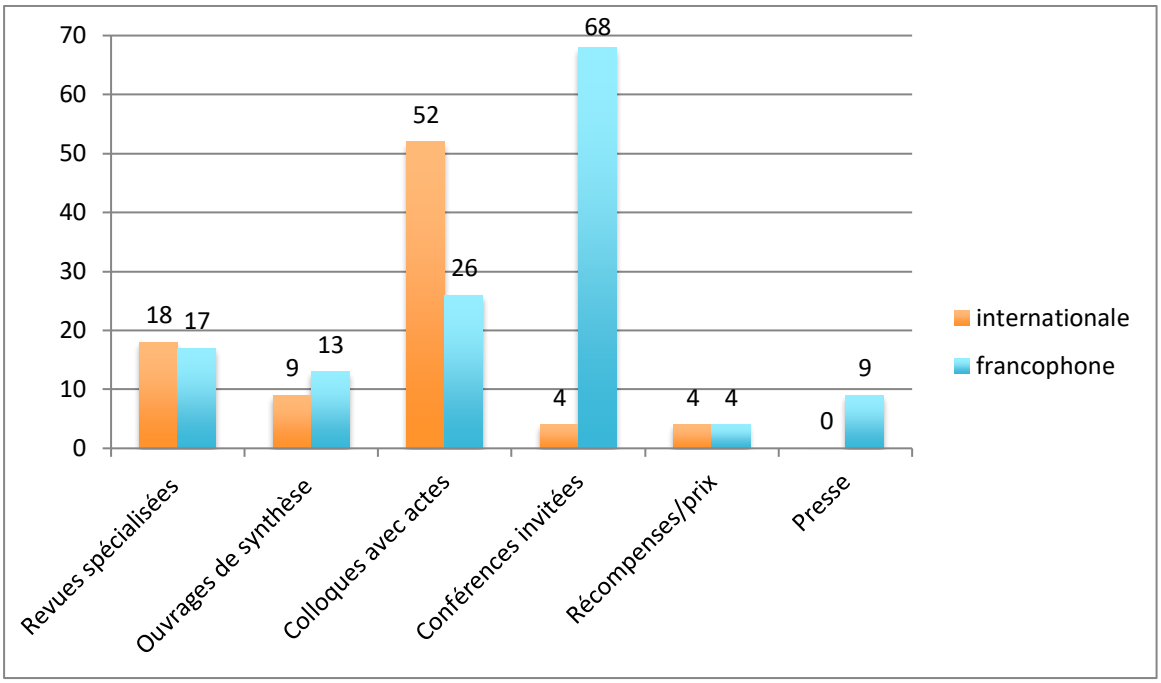


Figure 7 - *Répartition des publications et diffusion de la recherche depuis 2004*

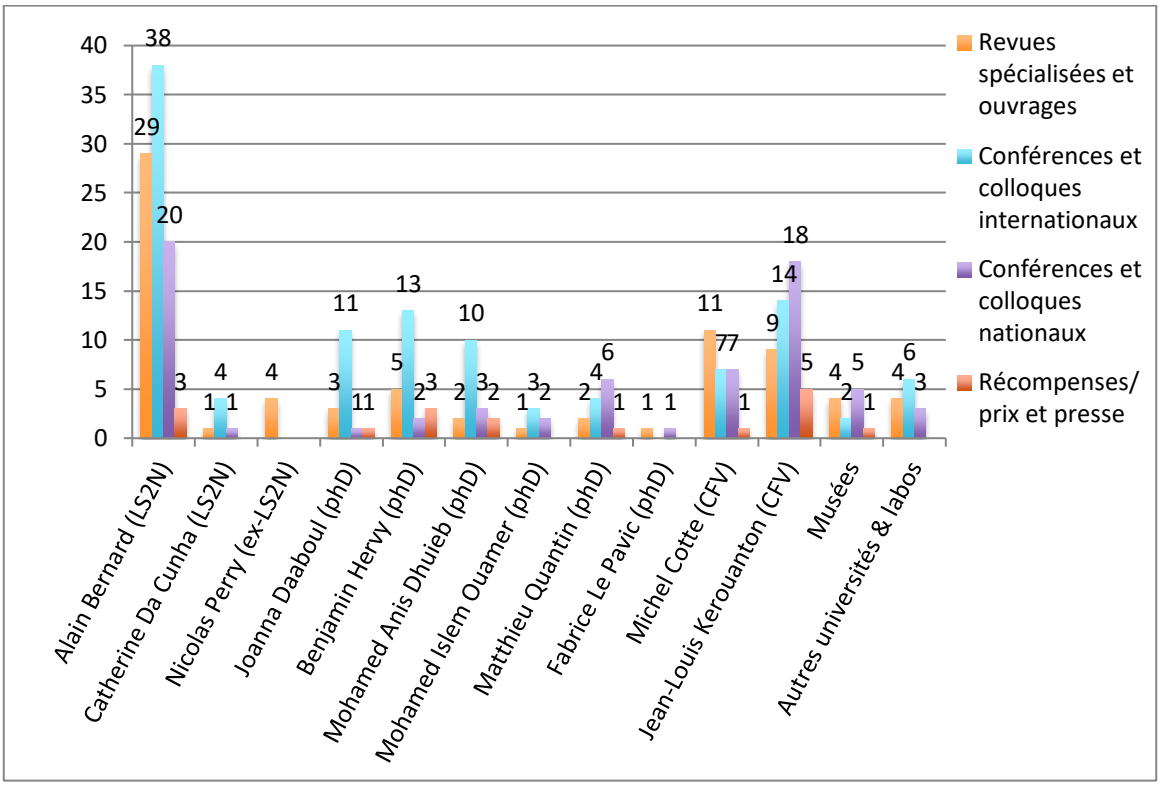


Figure 8 - *Répartition des publications en fonction des types et co-auteurs principaux*

2. Synthèse des activités de recherche

Me situant à la croisée de plusieurs chemins comme en témoigne mon parcours professionnel, ce chapitre va définir mon champ de recherche.

Dans un premier temps, je vais exposer le contexte de mes travaux depuis l'idée jusqu'à ma participation à des sociétés savantes en passant par l'ensemble des projets, collaborations, contrats… que j'ai réalisé et qui me permettent d'alimenter mes activités de recherche.
Tout en cultivant mon interdisciplinarité, les champs disciplinaires concernés seront développés et permettront de définir ma trajectoire scientifique.

Avec comme fil conducteur la gestion des connaissances patrimoniales (« KLM for Heritage »), ce chapitre va démontrer mes capacités à générer des idées et mettre en regard les moyens nécessaires pour valider ou invalider ces hypothèses.
Mon parcours se décompose en 4 grandes parties se basant sur mon vécu, auxquelles une partie prospective conclura ce mémoire :

- Partie 1. Historique et contexte de mes recherches,
- Partie 2. Hypothèses fondatrices et définition des verrous scientifiques,
- Partie 3. Playground = définition du périmètre des travaux,
- Partie 4. Positionnement des thématiques et de mes contributions dans les domaines de recherche,
- Partie 5. Travaux en cours et futurs.

Le schéma de la figure suivante illustre ma trajectoire scientifique depuis la naissance de l'idée jusqu'à la poursuite de mon projet.

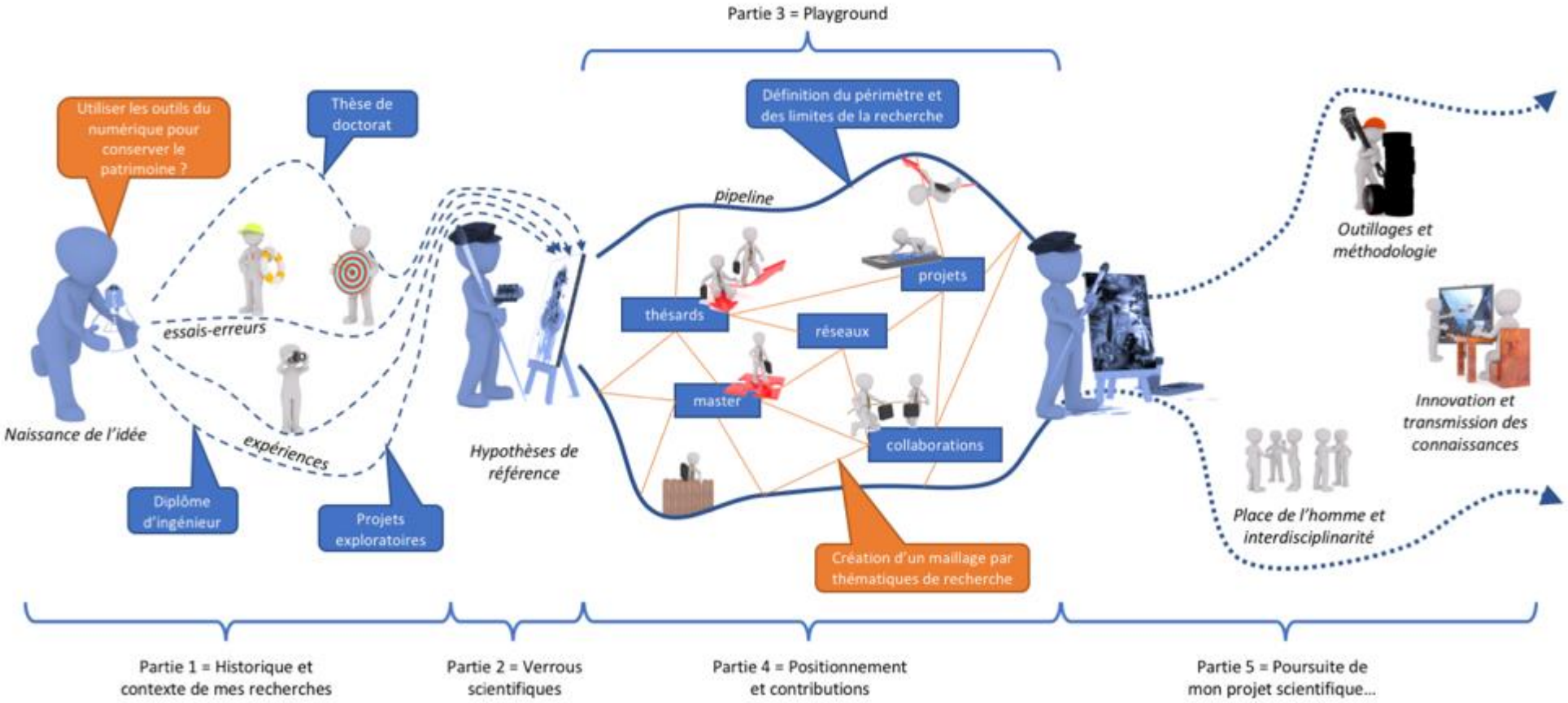


Figure 9 - *Ma trajectoire scientifique*

2.1 Historique et contexte de mes recherches

2.1.1 La pluridisciplinarité : de l'ingénieur au docteur

Cursus ingénieur…
Diplômé de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard en 2003, j'ai suivi une formation d'ingénieur généraliste avec spécialisation en Génie Mécanique et Conception. Durant mes études, j'ai pu acquérir les compétences nécessaires à la gestion de projet, à la conception de produits en innovation incrémentale ou de rupture… De plus, la Commission des Titres d'Ingénieur imposant un ratio conséquent de formation en Culture Générale, outre les compétences techniques et scientifiques, j'ai également étudié des disciplines complémentaires et plus particulièrement dans le domaine historique. Cette spécialisation m'a permis de m'initier aux dimensions socio-économiques et historiques des objets industriels, des systèmes techniques complexes et de la créativité. Elle s'est traduite par des enseignements spécifiques et des travaux de recherche personnels en :

- histoire industrielle du XIXème siècle et du XXème siècle,
- histoire des ingénieurs,
- histoire des techniques : matériaux et énergies en Europe,
- culture technique : genèse et évolution des objets,
- initiation à l'innovation et au design industriel.

Dans ce cadre, l'opportunité m'a également été donnée de contribuer à la réalisation de l'étude et de l'écriture du dossier sur le Train Jaune des Pyrénées Orientales en vue de sa candidature au patrimoine mondial de l'Unesco pour la région Languedoc-Roussillon. Le Professeur Michel Cotte dirigeait cette étude pour l'équipe d'une douzaine d'étudiants que nous étions. Ces travaux m'ont faire prendre conscience de la valeur des objets industriels dans notre vie de tous les jours et du contexte socio-économico-technique complexe dans lequel ils évoluent.
C'est ainsi que j'ai également obtenu en 2003, le diplôme du mineur de sciences humaines intitulé « histoire des techniques » me permettant de valoriser une spécialisation complémentaire dans ce domaine.

Première approche de la gestion des connaissances
Pour terminer mon cursus d'ingénieur, j'ai réalisé mon projet de fin d'étude chez Alstom Transport SA au sein de la division Transport dans le département Traction Ferroviaire. Dans les années 2000, la notion de KM, Knowledge Management ou Gestion des Connaissances, n'était pas encore largement diffusée au sein du monde industriel mais la prise en compte d'une capitalisation représentait un enjeu sous-jacent des entreprises.
Mon sujet de stage était flou mais j'ai rapidement cerné l'enjeu de ce qui m'était demandé. Les anciens concepteurs mécaniques, piliers de la technologie Alstom, partaient en retraite ; les jeunes embauchés ne restant que quelques années dans l'entreprise, une perte rapide des connaissances et des compétences techniques allait s'en suivre. Or le site d'Alstom Ornans a été créé en 1884 (entreprise Olivier) et dès 1919, il équipe les premières locomotives électriques françaises sur la ligne Paris-Orléans. Devant un savoir-faire unique fort de 90 années d'expériences, ma mission consistait à capitaliser l'ensemble de la connaissance nécessaire à la conception d'un moteur de traction. Jonglant entre les bureaux d'études mécaniques, les bureaux d'études électriques, le bureau des méthodes, la fabrication, les achats… le Guide du Dessinateur Industriel, les brevets, les normes AFNOR, NF, ISO, CEI, les spécifications techniques internes à l'entreprise… et de nombreux entretiens… j'ai donc fait du KM sans savoir moi-même que cela existait ! Au bilan, le document de 200 pages redéroule l'analyse fonctionnelle externe et interne d'un moteur asynchrone de traction (TGV). Quelques années plus tard, suite à cette étude, un département R&D à Alstom Transport Ornans a été créé.

Interdisciplinarité dans le monde de la recherche…
Soucieux d'enrichir mes compétences, de découvrir de nouveaux domaines et de me confronter à de nouvelles disciplines en travaillant conjointement avec les ingénieurs, j'ai continué mes études par un Diplôme d'Etudes Approfondies en Conception de Produits et Innovation à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts-et-Métiers de Paris dans le laboratoire Conception de Produits Nouveaux et Innovation dirigé lorsque j'y étais par le Professeur Robert Duchamp et aujourd'hui par le Professeur Améziane Aoussat. Outre les enseignements dispensés dans les domaines de l'innovation, l'évaluation perceptive et le prototypage rapide, il nous a été donné l'opportunité de mener, en interne, des projets pluridisciplinaires dans lesquels plusieurs métiers n'ayant pas la même formation ni les mêmes méthodes avaient un objectif commun. Les équipes pluridisciplinaires étaient composés des métiers suivants :

- technologues issus d'écoles d'ingénieurs,
- technologues issus d'IUT et de licences,
- ergonomes,
- designers.

Très vite, il est apparu des difficultés pour aligner nos référentiels ; en effet chacun utilisait son propre vocabulaire et aucun dictionnaire n'existait. Pour réussir à créer des équipes plurielles, il était donc nécessaire de se créer une sémantique commune et une démarche de conception en innovation transversale.

La création de langages et de modèles communs pour mieux intégrer une équipe avec des compétences interdisciplinaire est alors devenue un des axes de ma recherche scientifique.

Première approche de la gestion des connaissances

Dans le cadre de mon DEA, j'ai effectué mon projet de recherche au sein de la société PSA Peugeot Citroën à la Direction de l'INnovation et de la Qualité, sous la direction de Christophe Coppens pour PSA et Marc Le Coq pour l'ENSAM. J'ai intégré un projet plus large débuté par PSA en 2001 et qui s'est déroulé sur près de 10 ans. L'objectif était de créer de l'innovation de rupture en utilisant les connaissances. Peu avant mon Diplôme d'Etudes Approfondies, il avait été prouvé la possibilité d'innover en rupture en utilisant les connaissances capitalisées en interne à la société (le savoir-faire automobile). Lors de mes travaux au sein de PSA en 2004, la problématique a été élargie aux connaissances externes. Je devais prouver que l'utilisation des connaissances aussi bien internes qu'externes permettait également d'innover en rupture et plus particulièrement en utilisant la méthode TRIZ, Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs. Fort de notre réussite, PSA s'est, depuis, appliquée à déployer la démarche sur l'ensemble du Département Recherche, DINQ, afin de créer une plateforme de tests pour ensuite vulgariser le programme à l'ensemble des bureaux d'études, DPTA.

Cette expérience a permis de définir un nouveau verrou scientifique : comment prendre en compte les connaissances afin de pouvoir les réutiliser. Il s'agit d'un enjeu tant humain que méthodologique présentant une forte problématique d'interopérabilité sémantique.

2.1.2 Mon travail de thèse comme 1ère étape marquante

Contexte

C'est fort de ces expériences et de l'appréhension de nouveaux domaines n'étant pas en lien direct avec l'ingénierie industrielle que j'ai ensuite réalisé mon doctorat. Ayant été sensibilisé, dès mes études d'ingénieur, aux problématiques de conservation/valorisation des connaissances (le patrimoine technique, que celui-ci soit contemporain ou plus ancien), mes travaux de recherche s'inscrivent dans la catégorie des approches interdisciplinaires. Les sujets d'étude étant des objets à caractère industriel mais nécessitant une vue historienne, il s'agit de se placer à l'interface des Sciences de l'Ingénieur et des Sciences Humaines et Sociales en créant un nouveau champ d'application commun : l'Archéologie Industrielle Avancée.

Pour ce faire, la thèse a été réalisée en co-encadrement :

- Pour le Génie Mécanique et Génie Industriel par le Professeur Alain Bernard, au sein du laboratoire IRCCyN (UMR CNRS 6597) à l'Ecole Centrale de Nantes,
- Pour l'Histoire des Sciences et des Techniques par le Professeur Michel Cotte, au Centre François Viète (EA CNRS 1161) à l'Université de Nantes.

Lors de ma soutenance du 7 décembre 2007 (Laroche, 2007), le jury fut également pluridisciplinaire : composé pour moitié de membres des Sciences de l'Ingénieur et pour l'autre moitié des Sciences Humaines et Sociales :

- Philippe Dube, Professeur d'Histoire à l'Université de Laval à Québec, Canada (Président),
- Améziane Aoussat, Professeur des Universités, ENSAM Paris (Rapporteur),
- André Guillerme, Professeur titulaire de la chaire d'histoire des techniques, CNAM Paris (Rapporteur),
- Patrick Serrafero, Professeur des Universités associé, Ecole Centrale de Lyon (Examinateur),
- Bruno Jacomy, Conservateur en chef HDR, Musée des Confluences de Lyon (Examinateur),
- Samuel Gomes, Maître de conférences, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard,
- Alain Bernard, Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes (Examinateur),
- Michel Cotte, Professeur des Universités émérite, Université de Nantes (Examinateur).

Ce doctorat a été réalisé grâce à une allocation de recherche ministérielle. S'agissant d'un travail de recherche fondamentale, aucun partenaire privé n'a pu être identifié dès le début de la thèse. Aussi, de nombreuses études d'applications furent réalisées afin de valider la faisabilité de la méthodologie développée. Itérer entre la théorie et la pratique, telle est la démarche de recherche développée usuellement en Génie Industriel.

Résumé de ma thèse

CONTRIBUTION A LA SAUVEGARDE DES OBJETS TECHNIQUES ANCIENS PAR L'ARCHEOLOGIE INDUSTRIELLE AVANCEE. Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode interdisciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel.

Pour optimiser sa création de valeur, l'entreprise adapte sans cesse son mode de fonctionnement et ses outils de production. Les machines considérées comme obsolètes car ne répondant plus à la demande sont arrêtées, remisées voire même démantelées. Ainsi, certains sites industriels disparaissent et les hommes, catalyseurs des savoir-faire, les emportent avec eux. L'absence de protection de ce patrimoine technique et industriel pose aujourd'hui question car cette culture technique s'avère parfois transposable à des domaines d'applications connexes. Sauvegarder, analyser et comprendre ces objets du Patrimoine Passé peut permettre de les transformer en Capital Présent et devenir source d'innovation pour anticiper notre futur et aider les industriels à créer les objets de demain. Quant à leurs conservations et leurs vulgarisations dans les musées et les sites, le vieillissement intrinsèque de l'information technique nécessite d'implémenter une nouvelle muséologie pour ce 3ème millénaire.

La méthodologie développée consiste à renverser l'axe des temps de la conception : c'est le Rétro-processus de Conception Patrimoniale. L'Archéologie Industrielle Avancée permet la constitution du Dossier d'Oeuvre Patrimoniale Technique en capitalisant les connaissances du passé sous une forme numérique et en les repositionnant virtuellement en situation d'usage à des fins de muséographie et de valorisation. La complexité des objets induisant une multiplicité des compétences, le Processus Coopératif d'Ingénierie Patrimoniale requiert la collaboration de métiers qui, jusqu'alors, ne collaboraient pas ou peu. Dès lors, une nouvelle forme d'Equipe Interdisciplinaire émerge pour laquelle un référentiel commun permet de faire cohabiter les différentes sémantiques. Ainsi, le Système d'Information proposé encapsule cette taxonomie des Hommes en considérant également les acteurs du passé. Le modèle définit l'Objet Technique à caractère patrimonial dans ses Aspects Internalistes et Externalistes. Le Digital Heritage Reference Model ou Dossier d'Oeuvre Patrimonial Numérique de Référence, DHRM, peut alors être considéré comme un nouvel outil de travail muséologique.
Dans ces travaux de recherche, de nombreux cas d'études sont analysés et conceptualisés pour construire les ontologies validant ainsi l'applicabilité du DHRM.

Verrou scientifique « vue processus »

La thèse a contribué à la sauvegarde des objets techniques anciens en instaurant une nouvelle discipline qui a fait ses preuves et est désormais reconnue par l'ensemble de la communauté scientifique : l'Archéologie Industrielle Avancée. L'objectif est de permettre l'interopérabilité des outils des sciences pour l'ingénieur par une méthode interdisciplinaire de capitalisation des connaissances du patrimoine technique et industriel.
Le premier apport a été celui d'une méthodologie générique dédiée à la virtualisation du patrimoine tel que représenté par la figure suivante du schéma A➔B➔C :

1. depuis la numérisation de l'objet et la capitalisation des connaissances,
2. en passant par la modélisation numérique de l'objet physique, de sa cinématique et de sa dynamique,
3. jusqu'à sa vulgarisation dans un cadre muséal, d'expertise et d'archivage.

Phase de capitalisation et d'acquisition

La première phase concerne l'acquisition des données. Il s'agit d'un travail classique en histoire des techniques, consistant à rassembler la documentation. La première catégorie concerne les plans, les données archéologiques, anthropologiques ou ergonomiques, les restes de machines. La deuxième catégorie est constituée par des données économiques, sociales, architecturales, paysagères.
Par la suite, un travail de numérisation des données, de prise de côtes, est mené. Les premiers outils de base sont bien entendu le pied à coulisse et le mètre à ruban. Cependant, afin de gagner en temps de mesure et afin de pouvoir prendre en charge des machines complexes, la numérisation 3D peut être utilisée : théodolite à balayage laser, photogrammétrie, scanner laser 3D avec reconstruction topographique en temps réel… Afin de choisir la meilleure technique en fonction des contraintes de l'environnement et de l'objet patrimonial, nous avons développé un algorithme de décision pour guider la démarche de sauvegarde (Laroche, Bernard, & Cotte, 2007).

Phase de compréhension/interprétation et de re-conception

La phase de capture explicitée précédemment est guidée par un processus s'appuyant sur un framework ad-hoc que nous avons développé. Piloté par un méta-modèle conceptuel de données, ce modèle est également utilisé pour la seconde phase d'analyse des données numérisées dans le but d'élaborer la maquette numérique de référence de l'état B et ainsi conduire au DHRM. Pour cette phase, nous avons également développé un rétro-processus de patrimonialisation (Laroche, Bernard, & Cotte, 2009).

Le DHRM est le silo numérique qui contient le double digital de l'objet numérisé dans son contexte. Il fait intervenir toutes les données à caractères scientifique, technique et dynamique de la machine. Ainsi, une base de données à caractère historique lui est associée. Cet ensemble constitue donc le dossier d'œuvre patrimonial technique, supportant la gestion des connaissances.

Phase de valorisation, diffusion de la connaissance

A partir de l'état de référence constitué précédemment, plusieurs possibilités d'utilisation de cette maquette à des fins de valorisation sont envisageables (état C) : thésaurus virtuel (archives numériques), sauvegarde en archéologie industrielle, utilisation didactique pour experts ou universitaires, reconstruction, valorisation muséographique pour tout type de public. Pour le dernier cas d'application, plusieurs approches peuvent être développées. Au vu de la croissance exponentielle des technologies de réalité virtuelle (Laroche, Bernard, & Cotte, 2006), nous menons actuellement des recherches d'un point de vue utilisateur afin de cerner au mieux les besoins du public quant à l'appréhension de ces nouvelles formes de muséologie (Laroche & Kerouanton, 2016).

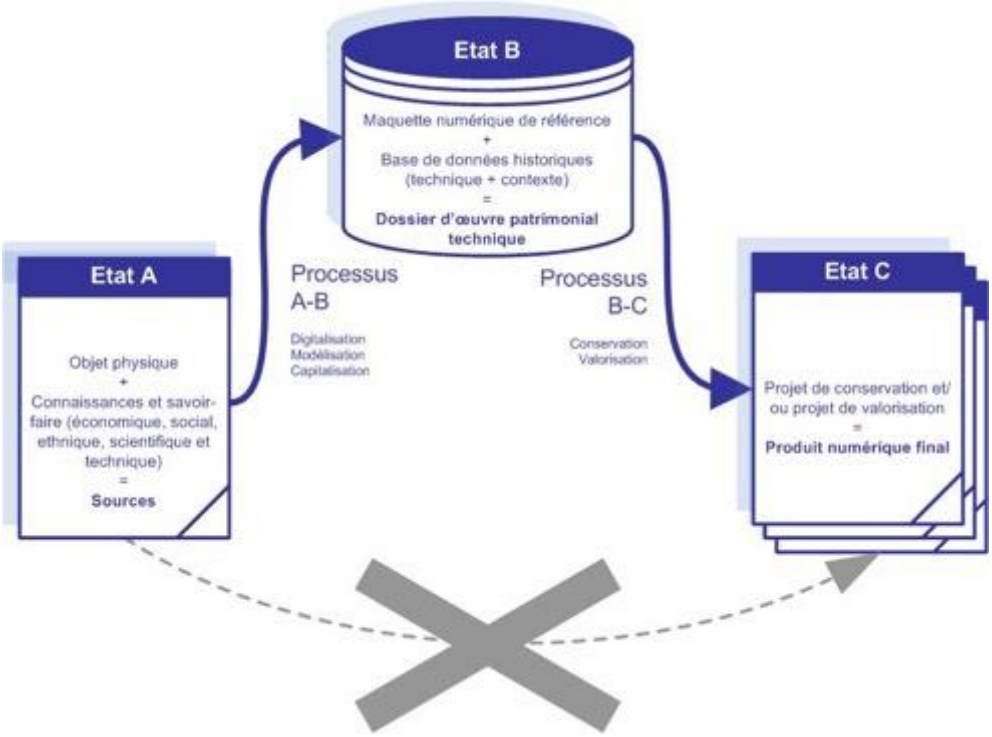


Figure 10 - *Méthodologie générale pour la conservation du patrimoine technique et industriel (Laroche, 2007)*

L'enjeu de ce processus réside dans la complémentarité des liens. Il faut une interopérabilité totale des étapes afin d'éviter la perte d'informations. Cependant, une des difficultés réside dans la complexité de vouloir généraliser la méthode. En effet chaque objet patrimonial est unique et fait appel à des connaissances, des savoir-faire ancestraux et des expertises contemporaines divers et propres à lui seul ; de plus, lorsqu'un objet est capitalisé/numérisé, la dernière étape de valorisation n'est quasi jamais connue. Passer directement de l'état A à l'état C n'est donc pas recommandé.

Aussi, il convient de capitaliser un maximum d'informations, de les organiser et les interrelier afin de pouvoir envisager un large spectre de possibilités de valorisation. Nos objets contenus dans les lieux de mémoire, plus communément appelés Musées, ne sont pas uniquement destinés à "prendre la poussière sur une étagère", ils doivent devenir lieu de savoir, lieu d'appropriation de savoir-faire et porteur d'un message à destination de l'ensemble des acteurs de cet objet et non seulement au grand public ou à une poignée d'experts.

> *Il faut diffuser cette connaissance à une plus large population ; cela passe donc par la création d'un outil conceptuel ayant une véracité scientifique non négociable, objectifs des travaux de recherche d'après thèse qui ont été menés.*

Un état intermédiaire structuré contenant l'ensemble des informations, des données et des connaissances est indispensable : c'est ce que l'on appelle, par extension à la définition muséographique du dossier d'œuvre, le dossier d'œuvre patrimonial numérique. Notons que l'appellation anglaise, déjà signalée précédemment, est plus signifiante et qu'elle est utilisée plus largement (DHRM pour Digital Heritage Reference Model) (Laroche, Bernard, Cotte, & Deniaud, 2006).

Verrou scientifique « vue produit » : le DHRM

Durant le doctorat, les recherches ont également porté sur la mise en place d'un processus coopératif d'ingénierie patrimoniale et la constitution du dossier d'œuvre patrimonial technique. Elles ont abouti à la proposition d'un nouveau modèle d'information de référence muséologique : le Digital Heritage Reference Model. L'étude historique des objets manufacturés - ainsi que des machines et usines nécessaires à leur production - a permis de démontrer que les outils de l'ingénierie système[50] sont incomplets - voire trop parfaits.

L'IS ne peut prendre en compte des espaces vectoriels spatio-temporels multiples à base de logique floue. Nous développerons cet aspect dans la partie suivante sur le Positionnement de mes travaux dans les communautés scientifiques.

En réalité, il s'agissait là d'un vœu pieu qui, avec le recul, se révèle particulièrement délicat : vouloir structurer l'ensemble des connaissances du passé signifie également connaître l'ensemble infini de ces connaissances. Par extrapolation il faut considérer que toute l'humanité doit être modélisée, elle sera alors connue et prédictible. C'est une question métaphysique complexe. La théologie peut apporter des réponses mais ce manuscrit n'est pas le lieu pour discuter de la frontière entre science et religion (Valiron & Deterre, 2009). J'ai donc accepté de laissé ce paradigme non résolu privilégiant des approches locales de capitalisation des connaissances plutôt qu'universelles.

2.2 Verrous et problématiques scientifiques

A la suite de ces premiers travaux et depuis 10 années de recherche, les problématiques ont évoluées.

Désormais acceptées, la question de l'importance de ces nouveaux outils et nouvelles méthodes dans le processus de patrimonialisation et de valorisation se pose. C'est un possible danger pour certaines démarches comme alibi possible de la destruction, ou de la reconception/modélisation et la valorisation du tout numérique. Nos recherches s'intéressent tout particulièrement à « l'usage de la 3D » mais également aux systèmes d'informations ou la mise en œuvre dans les systèmes d'encapsulation de la connaissance type bases de données relationnelles comme un des éléments nécessaires pour comprendre et capitaliser notre Histoire.
A l'heure du web et de la réalité virtuelle, nous enrichissons donc les méthodes et outils dans de nombreux domaines connexes. Ces travaux sont souvent considérés comme précurseurs car de par leur nature interdisciplinaire ils ne s'inscrivent dans aucune discipline type du CNU.

Avant de détailler mes apports dans les communautés scientifiques concernées, il me semble nécessaire d'exposer en préliminaire le contexte scientifique dans lequel je puise mes problématiques et j'injecte les résultats de mes recherches. Ma double implication (SPI et SHS) au sein de projets régionaux, nationaux ou de réseaux européens assoit la thématique scientifique émergente dans les sociétés savantes.

2.2.1 Problématique économique et industrielle : vers un patrimoine trop numérique !

Comme je l'ai démontré dans ma thèse de doctorat (Laroche, 2007), capitaliser les connaissances du passé est complexe de par la nature intrinsèque des connaissances mises en jeu pour lesquelles les outils et les méthodes contemporaines n'existent pas sur étagère. Il convient alors d'adapter l'existant au patrimoine. Depuis 15 ans, cette problématique touche tous les domaines dont l'objet d'étude est historique : machines, usines, outils de défense du Moyen-Age, châteaux forts, patrimoine sacré (statuaire et bâti), instruments scientifiques ou techniques… Tout artefact, témoignage de notre passé ou de notre histoire, que l'on dénomme "patrimoine" est concerné. On pourra ainsi rapprocher mes travaux de 2007 sur l'archéologie industrielle à ceux de Livio de Luca en 2006 sur le patrimoine bâti ; deux approches méthodes différentes mais des problématiques scientifiques communes (De Luca, Véron, & Florenzano, 2005) (De Luca, 2006).

Reverse-engineering et numérisation 3D, capitalisation des connaissances, modélisation de systèmes d'information, réalité virtuelle… les outils de l'ingénieur peuvent apporter une réponse robuste et pérenne.

S'appuyant sur des technologies répandues, stables, et toujours en pleine dynamique d'innovation, les outils numériques issus de l'industrie manufacturière permettent la mise en scène des objets, la représentation des flux de matière, du personnel, de l'environnement, sous forme de maquettes numériques.

[50] Si l'ingénierie système travaille sur le fond de l'activité de conception, de création ou d'ingénierie ; le PLM est une activité de structuration et de gestion de l'information comme nous allons le voir dans la suite de ce manuscrit (AFIS, 2009).

D'un autre côté la valorisation du patrimoine n'est plus seulement considérée comme un devoir de mémoire mais comme un besoin et un atout économique (Gasnier M. , 2007) et pédagogique, facilitée par le développement des technologies numériques comme le statuait Jean Davallon dès 2002 (Davallon, 2002).

La palette des outils de réalité virtuelle croît en permanence, avec de nouvelles interfaces, de nouvelles modalités interactives. Ces outils rendent possible l'accès à l'ensemble des connaissances d'un objet, dans la mesure où celles-ci sont numérisées et capitalisées (avec indexation voire mise en relations sémantiques). Ainsi, tout en dépassant l'approche techniciste, les applications, entendues comme des programmes et des médiations numériques culturelles, se trouvent au croisement des arts, des sciences et du numérique. Les applications, qui recoupent les prescriptions techniques (inscrites dans les dispositifs), mais aussi méthodologiques (institutions patrimoniales et publics de la culture), se développent dans le domaine patrimonial. Mais ce foisonnement de dispositifs ne s'inscrit pas dans les guides de bonnes pratiques existants (TICCIH, UNESCO, London Charter), et ne donne lieu à aucun standard. Les rares préconisations existantes (CIPA pour l'ICOMOS[51], Getthy Conservation Institute[52]…) ne font qu'état des outils de digitalisation ou de stockage des données 3D brutes, aucune préconisation n'est proposée quant aux processus d'interprétation ou de compréhension des modèles virtuels 3D.
Et pourtant cette haute technologie est de plus en plus utilisée dans les musées, les associations du patrimoine ou par les collectionneurs privés qui sont les réels lieux de conservation de la mémoire ; mémoire d'objets exposés aux visiteurs de façon pérenne ou temporaire. Capitaliser et valoriser notre patrimoine, quoi de plus commun en somme ?
Mais le domaine culturel, et *a fortiori* le domaine patrimonial, n'échappe pas aux réalités économiques de notre société actuelle visant toujours une rentabilité au plus rapide. Trop souvent les appels à propositions de subventions ou les demandes de valorisation sont fortement contraintes par le temps et ne permettent pas une réflexion de fond. En conséquence (néfaste), les outils du numérique et du virtuel sont partout utilisés à des fins de communication tel un effet de mode : "le visuel primant sur l'usage et la mémoire".

Lorsque l'analyse d'un objet historique croise des disciplines aussi différentes que complémentaires, faire renaître de vieux objets requiert d'utiliser des langages techniques et des savoirs scientifiques pointus. Il est de notre devoir de transmettre aux nouvelles générations non pas de simples belles images en 3D mais des maquettes réellement porteuses de sens pour la transmission des connaissances et des savoir-faire de notre humanité.

2.2.2 Problématique scientifique : vers une représentation digitale sémantique ou physique ?

L'utilisation des outils de l'ingénieur et du numérique au profit de la conservation et de la valorisation du patrimoine culturel a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche théorique. Cependant, les institutions patrimoniales, et plus particulièrement les musées et le champ de la muséologie souffrent d'un manque méthodologique pour accompagner de manière durable la gestion des connaissances et la valorisation du patrimoine. Il est donc nécessaire de formaliser cette nouvelle chaîne numérique afin d'y apporter une validité scientifique, porteuse d'une déontologie signifiante tant pour les professionnels, les experts que le grand public.

Proposer des applications à base de nouvelles technologies et de 3D doit tout d'abord permettre un apport de connaissances et un enrichissement de l'objet patrimonial.

Depuis une dizaine d'années, avec l'essor des technologies de numérisation, conservation et valorisation, le patrimoine culturel est un domaine dont l'ensemble des disciplines des Humanités Numériques s'empare. On note par exemple les travaux initiés sur les bases de données par la TGIR Huma-Num (voir partie ci-après *Playground :* le cadre scientifique de mes recherches). Pour autant, les problématiques soulevées par l'utilisation de données physiques de type 3D représentent encore des champs d'investigations largement ouverts.
L'utilisation de la 3D n'est plus réservée à la seule production des images cinématographiques ni au monde du jeu vidéo. La 3D a intégré tous les environnements de notre vie quotidienne personnelle et professionnelle… Le champ patrimonial n'a pas échappé à cette tendance. Il est désormais partagé entre deux points de vue :

- une capitalisation des connaissances (géométriques) à des fins d'analyse scientifique, de mesure, de partage et de conservation,
- une médiation destinée au grand public.

L'enjeu de notre approche réside dans la déontologie que chaque acteur du patrimoine est prêt à mettre en œuvre pour aller au-delà des belles images figurant usuellement de faux artefacts de notre réalité passée.

[51] http://cipa.icomos.org
[52] http://www.getty.edu/conservation

Un constat s'impose : la production de documents numériques (à vocation d'archivage ou non) devient quasi systématique lors de l'étude d'objets patrimoniaux. Comme le déclarait Emmanuel Le Roy Ladurie dans une tribune du Nouvel Observateur en 1968 : « L'historien de demain sera programmeur ou ne sera plus ». Face à ce changement de paradigme plusieurs questions émergent :

- celle de la capitalisation de cette documentation numérique (Quoi et Comment stocker ?),
- celle de l'accès à ces données (Comment accéder efficacement à ce qui est stocké ?),
- celle de l'interopérabilité de ces données (Comment partager ce qui est stocké ?),
- celle des usages.

La mise en correspondance de sources hétérogènes (manuscrits, savoir-faire, archives orales) est essentielle à la recontextualisation de ces objets dans leur utilisation d'origine. Comprendre le contexte nécessite une réelle approche sémantique : les objets portent d'abord du sens avant de porter une fonctionnalité, c'est ce que nous apprend le contexte de l'époque, l'histoire, la culture… En ce sens, la documentation de l'objet de patrimoine est essentielle.
Les outils des sciences de l'ingénieur et les technologies numériques en particulier offrent un terrain d'expérimentation fertile pour les possibilités de modélisation et d'accès aux documents historiques (archives, vestiges archéologiques, etc.).

De plus, une des problématiques est qu'il n'existe toujours pas de méthodologie formalisée (avec les outils associés) pour la gestion du processus global de patrimonialisation. Il existe certes de nombreux travaux proposant des méthodes détaillées pour la numérisation (2D ou 3D) d'artefacts, notamment en archéologie, ou pour la structuration des données historiques à destination du web de données, mais il n'existe pas de méthodologie couvrant l'intégralité du processus de patrimonialisation tel qu'utilisé par les multiples domaines des *Digital Humanities*.

Il s'agit là de la problématique scientifique qui m'anime sur la Gestion des Connaissances tout au long du cycle de vie patrimoniale : le « KLM for Heritage ».

2.2.3 Synthèse des problématiques scientifiques

L'étude des objets anciens et de ce qui se dénomme patrimoine aujourd'hui nous apprend beaucoup sur notre façon de travailler. L'utilisation des outils de l'ingénierie démontre qu'il y a un manque dans ces outils « clés en main ». Il est donc possible d'envisager un enrichissement mutuel entre les deux disciplines des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales.

1. *La première problématique est celle de **l'adéquation des outils aux utilisateurs**. Il s'agit de démontrer que les outils sont au service de l'homme et que ce n'est pas à l'homme de s'adapter aux outils. D'un point de vue épistémologique cette question se traduit par une problématique bijective : "que nous apprennent les humanités sur le numérique ?" et "que nous apprend le numérique sur les humanités ?"*
2. *La deuxième problématique est celle de **l'opérationnalisation du processus**. Tant dans le domaine du patrimoine que dans l'industrie, les méthodes, les modèles et les outils développés présentent un certain nombre de limites. Nos recherches visent à repousser les contraintes en permettant une meilleure agilité des méthodologies de la conduite de projets et en développant des outils intégrant l'humain comme un utilisateur et un décisionnaire de l'outil d'aide à la décision et non comme un « facteur humain ».*

2.3 Playground : le cadre scientifique de mes recherches

Afin de répondre aux problématiques détaillées précédemment, j'ai mis en place depuis 2004 un cadre général de recherche propice à l'expérimentation. Basée principalement sur des **études de cas**, j'applique la démarche inductive utilisée en Génie Industriel :

1. analyser les problématiques de terrain,
2. modéliser le cas d'étude pour l'aligner sur le modèle théorique général,
3. proposer une solution théorique,
4. adapter la solution au contexte de la situation.

Le cadre scientifique de mes travaux ne se limite pas qu'à des cas d'applications. Afin de pouvoir comparer, modéliser, théoriser, confronter les idées scientifiques… j'ai intégré, **collaboré** ou créé des **structures de recherche** tant au niveau **local** que **national** ou **international**.
Ces cas d'études et ces groupes de recherche sont complétés par des apports plus fondamentaux sur les **thèses** et **master** que j'encadre. Ils permettent d'asseoir les méthodologies et les outils.
Cet ensemble constitue le « bac à sable » qui borne les limites de mes travaux.

Dans cette partie de ce manuscrit, je vais résumer mes principaux apports et contributions tant sur les projets réalisés que les réseaux support à la réflexion ou à la diffusion des résultats scientifiques :

1. structures fédératrices,
2. projets de recherches réalisés ou en cours de réalisation : au niveau francophone et au niveau européen,
3. fédérations de recherche et réseaux scientifiques à 3 niveaux :
    - local – régional,
    - national,
    - international.

Cette partie sur le *Cadre de la recherche* se terminera par un tableau de synthèse reprenant l'ensemble de mes activités en les positionnant thématiquement au regard des apports réalisés pour chacune des actions menées.
A noter que certains projets, réseaux ou collaborations mentionnés précédemment dans mon CV étendu ne figurent pas dans cette partie car ils ne représentent pas d'avancées significatives pour mes recherches (par exemple : Leonardo, SMCS…)

Le schéma de la figure ci-après est une chronologie qui positionne l'ensemble de mes activités de recherche depuis 2004 jusqu'à maintenant. Le classement figurant en abscisse reprend le plan de cette partie de mémoire.

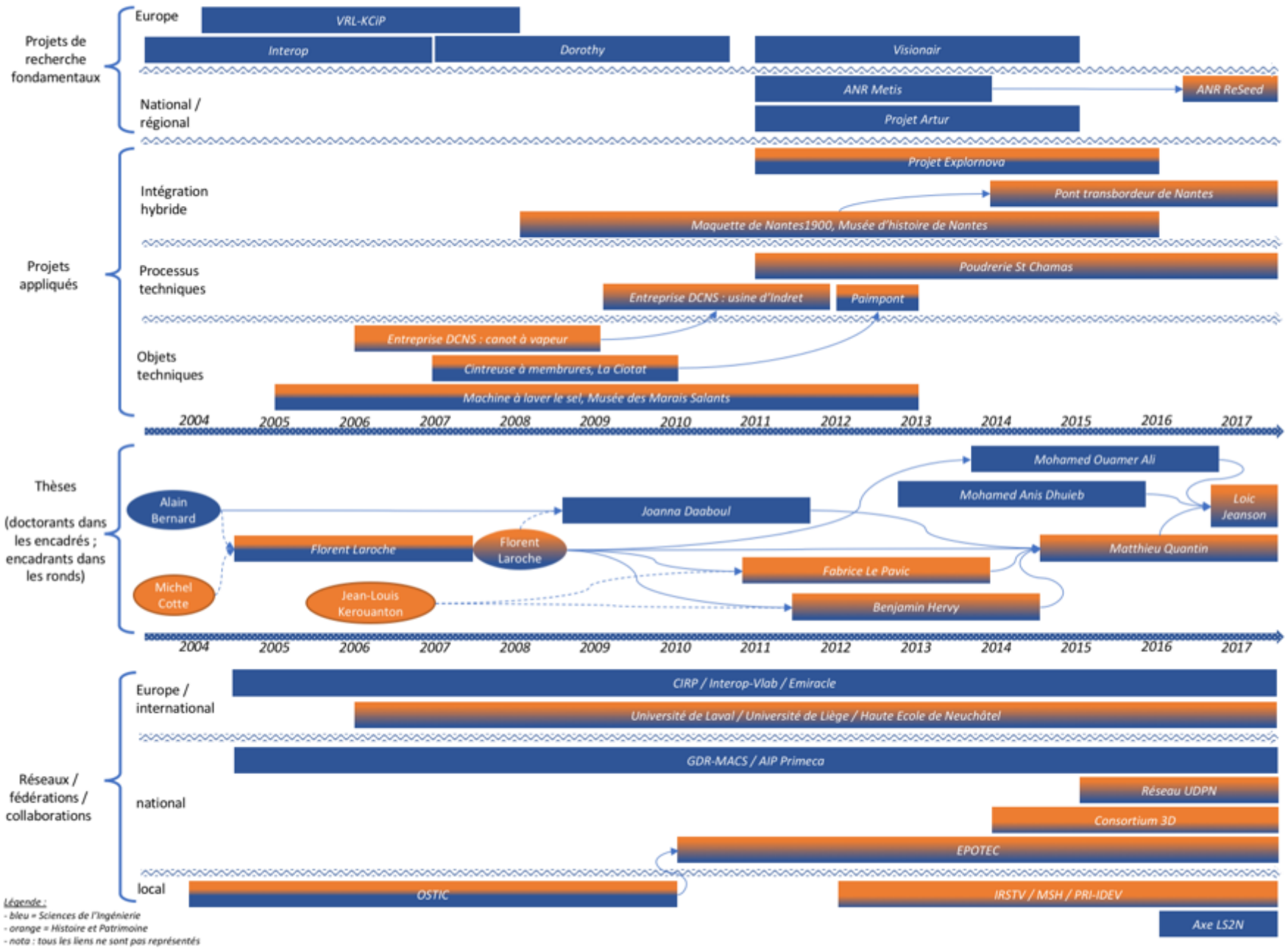


Figure 11 - *Evolution temporelle de mes activités de recherche depuis 2004*

2.3.1 Les structures fondatrices

OSTIC

Afin de structurer la thématique émergente, à l'initiative de Michel Cotte et d'Alain Bernard, il est créé en novembre 2004 un groupe de recherche pluriel (à cette époque, le terme d'interdisciplinarité n'était pas encore bien établi).
Le pôle de recherche – action O.S.TiC a une dimension exploratoire ; il entend regrouper et amorcer une réflexion collective sur le thème « Objets, Société et Technologies de l'Information et de la Communication».
Le consortium est constitué de collectivités, d'institutions ou d'entreprises considérées comme pionniers dans cette thématique auxquelles d'autres partenaires sont invités et associés, notamment dans le domaine des technologies numériques appliquées au patrimoine. OSTIC était un pôle pluridisciplinaire rassemblant des experts de 2 domaines : les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines et sociales.

La zone de convergence des préoccupations apparaissait à la rencontre de trois aspects :

- l'étude des objets, qu'ils soient du passé ou bien du présent et du futur proche ;
- leur mise en perspective par les approches de sciences humaines et sociales ;
- leur traitement éventuel qui est de plus en plus vraisemblable par les technologies de l'information et de la communication, les technologies de numérisation et de réalité virtuelle.

Le pôle fonctionnait comme une société savante en se définissant comme une plateforme de rencontres, de débats et de projets en cours ou en phase de démarrage. J'ai ainsi contribué à l'organisation de plusieurs journées d'études dans le cadre d'OSTIC comme énoncé dans la partie *Organisation de colloques* du chapitre précédent.

Chaque terme du titre O.S.TiC indique un champ de recherche très général qui fut décliné dans des projets et des actions précises :

- *O pour Objets* - Le thème des « objets » a par exemple invité à une réflexion sur les collections, la muséographie ou encore sur celui de l'innovation, de la conception et de la créativité technique.
- *S pour Société* - Le terme de « société » a évoqué bien entendu l'immense domaine des sciences humaines et sociales, la sociologie bien entendu, mais aussi l'histoire et la philosophie.
- *TIC pour Technologies de l'Information et de la Communication* – Au début du XXIème siècle, les « TIC » couvrent un champ devenu très large : celui des nouvelles technologies de l'information et de la communication, des images numériques, de la CAO...

En complément, OSTIC se voulait également contribuer à la question de la formation liée à l'usage des TIC dans des champs professionnels spécialisés. C'est ainsi que les premières expériences de capitalisation du patrimoine technique sous une forme virtuelle ont été réalisées grâce à des projets pédagogiques.

OSTIC a été la première fédération de recherche qui a permis de travailler de façon interdisciplinaire et a permis de fournir des cas d'étude pour expérimenter les premiers travaux de recherche (Laroche & Kerouanton, 2005) (Le Loch & Laroche, 2005) (Buron, Simonnin, & Laroche, 2005) (Laroche F. , 2007).

EPOTEC

Suite au changement de statut de Michel Cotte en tant que Professeur Emérite, et aux évolutions récentes des questions du numérique qui ont fait considérablement avancer ces problématiques de recherche tant du point de vue épistémologique que du point de vue de l'utilisation des technologies numériques, le groupe de recherche a lui aussi évolué.
Au sein du laboratoire d'histoire, le centre François Viète, Jean-Louis Kerouanton a été embauché comme maître de conférences pour sa spécialité internationalement reconnue sur le patrimoine maritime. Originellement chargé de mission à la DRAC[53] des Pays-de-la-Loire, il reprend l'activité patrimoniale et historienne des techniques pour son laboratoire.
Nous avons donc décidé de créer un groupement de recherche réunissant nos deux laboratoires. Il n'était pas question de fusionner en une structure commune mais bien de faire en sorte d'avoir un outil de travail commun où chacun garde ses compétences et ses propres champs d'expertises. Les projets et les réflexions sont abordés à deux voix (Jean-Louis et moi-même) donnant ainsi toute la profondeur nécessaire à la crédibilité de notre démarche.
Dans la lignée des initiatives d'OSTIC, nous déployons actuellement des travaux alliant histoire et ingénierie, dans le cadre des Digital Humanities. L'enrichissement est double : permettre une meilleure compréhension de l'histoire par les outils des sciences pour l'ingénieur et donner de nouveaux cas d'études pour enrichir les savoir-faire et méthodes des sciences des technologues.

Cette fédération de recherche se désigne EPOTEC : Evolution des Procédés et des Objets TEChniques[54].

[53] DRAC = Direction Régionale des Affaires Culturelles
[54] www.epotec.fr

C'est un groupe de recherche réalisant des projets scientifiques en Archéologie Industrielle Avancée.

Les travaux visent à allier compréhension de l'histoire, sauvegarde du patrimoine industriel et technique par l'ensemble des outils des Sciences pour l'ingénieur (Laroche & Courtin, 2009) (Buron, Simonnin, & Laroche, 2009). L'hypothèse de travail fondatrice est qu'un objet industriel qu'il appartienne au présent ou passé reste un objet industriel. Celui-ci peut être : un produit manufacturé diffusé à grande échelle, un objet artisanal unitaire, une machine ou un outil ayant servi à sa conception ou sa fabrication, voire une usine complète et son processus industriel mis en regard.

Afin de capitaliser et d'augmenter sémantiquement les objets étudiés, l'ensemble des outils de l'ingénierie contemporaine et des avancées scientifiques en traitement de données sémantiques et/ou spatiales sont utilisés. Les études menées permettent ainsi de structurer, conserver et valoriser le patrimoine technique.

Réalisés dans le cadre d'EPOTEC, les projets listés ci-après ont permis des avancées significatives. Ils se répartissent en plusieurs groupes en fonction de la nature intrinsèque de l'objet/système étudié. Par exemple :

1. Etude de l'objet technique seul
    - La machine à laver le sel de Batz-sur-Mer
    - Le canot à vapeur de l'entreprise DCNS
    - La cintreuse à membrures Bennie des chantiers de La Ciotat
2. Etude de l'objet dans son contexte = le système technique
    - Les forges de Paimpont
    - La poudrerie royale de St Chamas
    - L'usine d'Indret de DCNS
3. Intégration hybride de l'objets et du système par une représentation des connaissances et de sa géométrie
    - La maquette du port de Nantes en 1900
    - Le pont transbordeur de Nantes

2.3.2 Les projets de recherche appliqués : études objets techniques

Comme nous le détaillerons en fin de ce manuscrit dans la partie intitulée *Entre historien et reverse-engineer : un métier transdisciplinaire*, appelant de nos vœux la création d'une nouvelle génération d'ingénieur-historien ou d'ingénieur-généticien au service de la genèse des produits et de leurs techniques, nous avons expérimenté la méthode sur de nombreux cas d'études. Un axe fort de développement de notre théorie s'appuie sur la formation. Les acteurs des projets peuvent provenir du vivier suivant :

- Futurs ingénieurs en mécanique, thermique, informatique, géomatique…, Ecole centrale de Nantes, UTBM et Ecole polytechnique de l'Université de Nantes,
- Etudiants en licence professionnelle, IUT de Nantes,
- Etudiants en master professionnel valorisation du patrimoine, UFR Lettres de l'Université de Nantes,
- Etudiants en master recherche histoire des sciences et des techniques, laboratoire CFV de l'Université de Nantes,
- Futurs architectes, Ecole Nationale d'Architecture de Nantes,
- Etudiants en master recherche en Réalité Virtuelle, ENSAM site de Laval.

La machine à laver le sel du Musée des Marais salants de Batz-sur-Mer
Durée : 2005-2013
Partenaires : IRCCyN, Centre François Viète
Commanditaire : Musée des Marais salants de Batz-sur-Mer

Cette expérience a débuté il y a 20 ans suite à une rencontre fortuite avec un objet technique industriel : une machine artisanale du XXème siècle. Il s'agit d'une des dernières laveries à sel de la presqu'île Guérandaise. Celle-ci fait partie du parcours muséographique du futur Musée de France des Marais Salants de Batz-sur-Mer[55] (44).

Notre démarche de conservation et d'investigation pour comprendre cet objet a permis de répondre à de nombreuses questions : Comment sauver cet objet mobilier fait de métal et de bois et fortement détérioré par le sel ? Comment fonctionnait-il ? Comment l'utilisait-on ? Quelle était sa capacité de traitement ? Pourquoi laver le sel de Bretagne ? Pourquoi le lavage s'est-il arrêté et pourquoi commercialise-t-on aujourd'hui du sel gris ? Mangerait-on de nos jours du sel impropre ? La prise en compte d'un Système Technique complet dans ses multiples contextes socio-économico-technico-industriel a

[55] www.museedesmaraissalants.fr

permis de comprendre les évolutions des valeurs transmises par ce produit de consommation courante : le Sel. (Laroche, Bernard, & Cotte, 2008)

Après une première phase d'analyse, la capitalisation des connaissances intrinsèques de l'objet a délivré le savoir-faire nécessaire pour concevoir et utiliser la machine à laver le sel. Ainsi, suite à une numérisation 3D, sa modélisation 3D sous la forme d'une maquette numérique 3D a aidé à calculer les informations sur les flux de production mis en œuvre : quantité de sel lavé recueilli, lavé, vendu, exporté.

Depuis la phase de numérisation 3D, aux fouilles de terrain jusqu'à la modélisation virtuelle, j'ai réalisé le travail d'archéologue et d'ingénieur reconcevant un objet ancien. Cette partie de capitalisation des connaissances a fait l'objet de l'expérimentation du chapitre 6 de ma thèse de doctorat. (Laroche, 2007)

Figure 12 - *Machine à laver le sel : Numérisation 3D par théodolite laser*

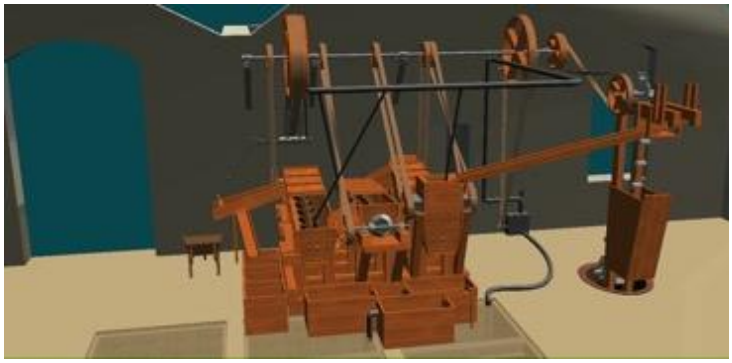


Figure 13 - *Machine à laver le sel : Maquette 3D CAO*

Mais cette machine faite de bois et de métal était dans un état de dégradation tel qu'il fut impossible de la sauvegarder ; un démantèlement était donc inévitable. Malgré tout, la problématique soulevée par cette découverte pour tenter de répondre à la question « pourquoi laver du sel ? » a convaincu les conservateurs d'inscrire cette nouvelle étape dans l'histoire du sel (Simonnin & Laroche, 2014). Ce rebondissement technico-historique a été intégré au parcours muséographique du nouveau musée. En effet, dans le cadre de l'agrandissement du Musée des marais salants de Batz-sur-Mer, il a été décidé de reconstruire l'objet fonctionnel à échelle 1:1 (Laroche, 2010).

Durant la phase de reconstruction de la machine et de construction du nouveau musée, j'assumais le rôle d'assistance à la maîtrise d'ouvrage pour réaliser l'interface entre les professionnels du patrimoine, les artisans et l'architecte du futur Musée. Il s'agissait là d'une des perspectives de mes travaux de recherche que j'ai pu éprouver.

Figure 14 - *Machine à laver le sel : objet reconstruit et implanté dans le nouveau Musée*

La cintreuse à membrures Bennie des chantiers de La Ciotat
Durée : 2007-2010
Partenaires : Centre François Viète, IRCCyN
Commanditaire : DRAC13

Dans le cadre du label Patrimoine du XXème attribué par le Ministère de la Culture et de la Communication, une collaboration scientifique a été engagée de 2007 à 2010, entre la Direction régionale des affaires culturelles de Provence-Alpes Côte d'Azur et le Centre François Viète d'épistémologie, d'histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes avec la collaboration de l'ex-IRCCyN, afin d'inventorier et d'étudier l'histoire technique et le patrimoine des anciens chantiers navals de La Ciotat (Laroche, Kerouanton, & Serveille, 2010).

Cette première étude sur le fonctionnement global du site a laissé la place à une autre étude plus resserrée sur une machine présente sur le site industrialo-portuaire de La Ciotat (à côté de Marseille) : la cintreuse à membrure Bennie.
Cette machine est implantée en 1959 dans la nef n°1 des chantiers maritimes de La Ciotat (13). Il s'agit d'une machine impressionnante avec un système de presse articulée horizontale à cardan mobile fonctionnant sous très haute pression. Elle avait pour mission de réaliser les profilés courbes des membrures avant l'assemblage des éléments préfabriqués par soudure.
La « Scottish Machine Tool Corporation », constructeur anglais de cette machine, est le résultat de la fusion en 1937 de cinq entreprises écossaises de pointe en construction mécanique et de machines-outils, dont la James Bennie & Sons.

Juste avant sa destruction inexorable réalisée courant 2008 suite à la réhabilitation du site industriel, une première phase de numérisation 3D a été réalisée afin de pouvoir conserver virtuellement la machine. Une deuxième phase de recherche de documentation, d'interprétation technique de son fonctionnement et donc de rétroconception avec modélisation 3D sous Catia V5 s'est ensuite poursuivie.
Des modélisation hybrides en CAO intégrant tant du surfacique que du volumique ou des nuages de points ont permis de valider l'utilisation de Catia V5 comme outil de modélisation CAO qui peut être détourné au profit de la capitalisation du patrimoine industriel. Toutes les pièces modélisées lors de cette étude l'ont été avec un seul objectif : avoir une machine qui fonctionne virtuellement.

Ce travail de recherche a permis d'établir un corpus numérique technique complet définissant un ensemble méthodologique global. C'est ainsi que la question de la rétroconception des machines anciennes grâce aux outils numériques contemporains a permis de définir des enjeux plus vastes allant de la machine en local, à son implantation dans le processus de fabrication de navires jusqu'à sa justification à l'échelle du territoire social.

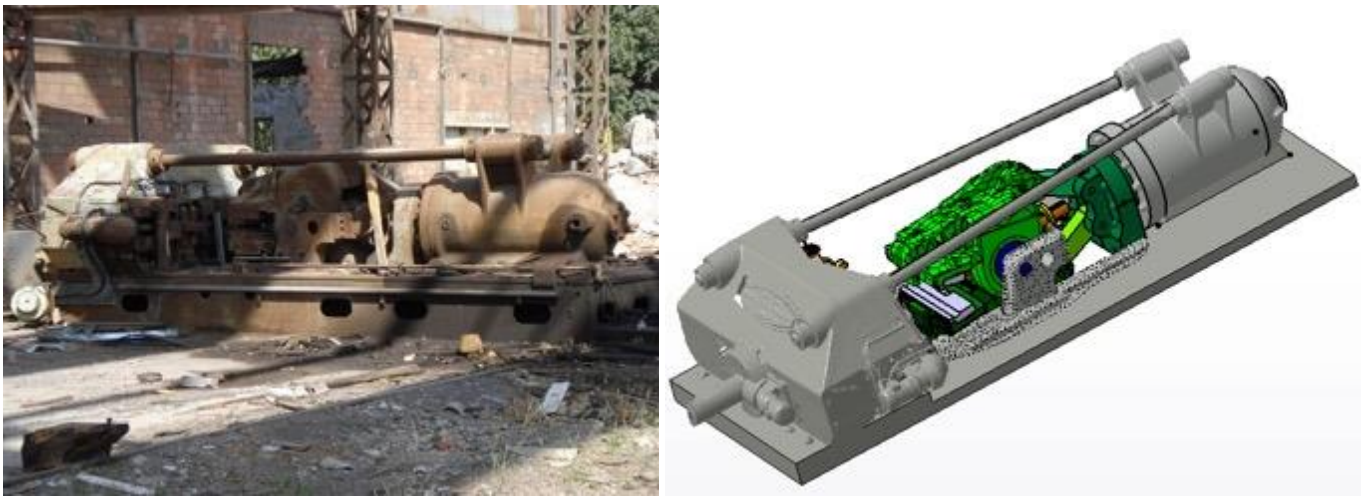


Figure 15 - *La cintreuse à membrures : réalité VS virtualité*

L'entreprise DCNS : du canot à vapeur de 1861 à l'usine d'Indret
Durée : 2006-2009
Partenaires : Centre François Viète, IRCCyN
Commanditaire : Phi - DCNS Indret

En septembre 2001, diverses archives de l'entreprise DCNS[56] sont rassemblées. Afin de valoriser ce patrimoine, le Pôle historique d'Indret a été créé en janvier 2002. Le PHI[57] est considéré comme une entité à part entière de l'entreprise et est placé sous la coordination du secrétaire général de l'établissement ainsi que du Service communication. Sa mission : sauvegarder le patrimoine historique, industriel et bâti du site créé en 1777 sous tutelle de la Marine. L'ensemble de ce fonds est placé sous le contrôle du conservateur des Archives de la Marine de Lorient.

Le premier projet réalisé avec ce partenaire porte sur le premier canot à vapeur à hélice construit à Indret en 1861 (10 mètres de longueur). Afin de valoriser son patrimoine historique industriel, le PHI a décidé d'étudier cet objet en alliant l'histoire technique du canot aux métiers actuels concernés par la propulsion. L'objectif fixé était de pouvoir expliquer le fonctionnement du canot, mais également de pouvoir comprendre son dimensionnement, ainsi que les choix techniques réalisés à l'époque et sa place dans l'évolution des bâtiments militaires réalisés ensuite sur le site d'Indret.

Un des enjeux majeurs de ce projet consistait à tester la méthodologie de rétro-conception à partir d'un corpus documentaire sans aucune donnée physique tel des traces ou des vestiges archéologiques industriels (Laroche F. , 2009).

Plusieurs phases se sont réalisées en parallèle (Kerouanton & Laroche, 2010) :

- Définition du corpus historique et traduction des documents anciens,
- Modélisation thermodynamique des échanges et de la machine à vapeur,
- Réalisation d'une maquette numérique à partir de l'unique plan d'ensemble restauré,
- Simulation numérique de la résistance à l'avancement, vitesse de croisière et comparaison des résultats des calculs contemporains aux documents d'archives,
- Numérisation 3D de la maquette physique réalisée par un professionnel afin de réaliser une étude comparative des 2 modèles 3D créés.

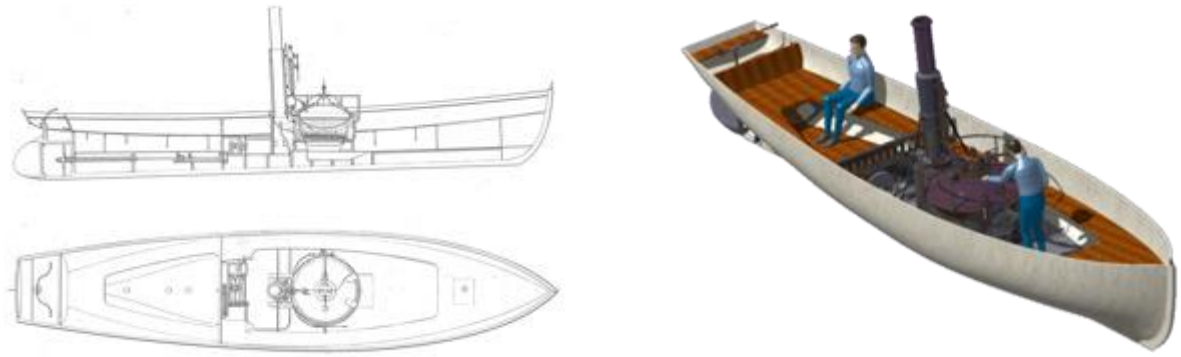


Figure 16 - *Canot à vapeur de 1861 : plan d'origine et modèle CAO*

2.3.3 Les projets de recherche appliqués : les systèmes techniques

Toujours dans une perspective de capitaliser le patrimoine technique, nous avons élargi le spectre des études pour l'orienter non pas seulement vers des objets mais vers des systèmes techniques. Les analyses systémiques globales permettent d'avoir une vision multi-échelle des sites industriels passés.
La méthode a tout d'abord été expérimentée sur un premier cas d'étude puis validée sur d'autres sites industriels anciens. L'ensemble de ces travaux a permis de proposer une démarche formelle mais restée à l'état de théorie. Applicable sans difficulté sur le « papier », il n'a pas encore été développé d'outils informatiques adaptés dû à la complexité des contraintes auxquelles un tel système devrait répondre. Pour asseoir la réflexion, la thèse de Fabrice le Pavic synthétise ces travaux dans un autre cas d'étude : l'Arsenal de Lorient (Le Pavic, Laroche, & Kerouanton, 2013).

[56] http://www.dcnsgroup.com
[57] PHI désigne le Pôle historique d'Indret, service interne de l'entreprise DCNS.

Entreprise DCNS : l'usine d'Indret
Durée : 2009-2012
Partenaires : Centre François Viète, IRCCyN, société MG Design
Commanditaire : Phi - DCNS Indret

Faisant suite aux précédents travaux menés sur la modélisation du Canot à vapeur et fort de l'expérience interdisciplinaire acquise, il fut décidé de travailler sur l'ensemble du passé du site industriel de DCNS : entre autres l'usine de forerie de canons qui y fut installée en 1778 et qui n'existe plus de nos jours. Les archives et les gravures sont fort nombreuses et témoignent de ce patrimoine industriel de la fin du XVIIIème siècle.
Entre autres, en 1791, l'espagnol Agustin de Betancourt réalisera un relevé manuel avec des dessins techniques sur la forerie de canons d'Indret. Les planches furent publiées par la bibliothèque nationale de Madrid.

Déployant la même méthodologie que sur le canot, l'objectif du projet a tout d'abord consisté à étudier la machine à feu de Watt, installée sur le site en 1788 ; puis envisager sa modélisation CAO 3D+t avec les études complémentaires en dynamique ainsi que les études mécaniques de type RDM.

L'étude a ensuite été étendue à l'ensemble de la forerie eu égard à la précision technique des dessins de Betancourt pour en réaliser une maquette numérique de l'usine de l'époque. Le point de départ du travail consistait à définir la documentation socio-économique et technique en question. A ces fins, nous avons appliqué avec plus de robustesse une démarche issue du Génie Industriel pour modéliser les flux :

- Étude du fonctionnement général de la forerie, compréhension de l'organisation sur le site,
- Analyse des procédés, des techniques et des méthodes employées sur le site de la forerie,
- Modélisation du fonctionnement de la forerie sous forme de diagramme fonctionnel et analyse détaillée des différentes zones de travail,
- Recherche de différentes pistes /outils de description du fonctionnement du site et des échanges entre les différentes usines (forerie, fonderie…) du site.

Cette modélisation systémique d'un site industriel ancien a démontré la complexité de la non adaptabilité des outils contemporains pour prendre en compte une évolution sur le temps long. Cette expérience sur l'usine d'Indret a permis d'expérimenter la méthodologie qui sera validée sur les deux autres cas d'étude présentés ci-après : les forges de Paimpont et la poudrerie de St Chamas. Cette même méthodologie (Laroche F. , 2011) fera l'objet de la thèse de doctorat de Fabrice Le Pavic (Le Pavic, 2014).

Fidèle à notre démarche scientifique éprouvée (Laroche, Bernard, & Cotte, 2009), le travail de modélisation globale de l'usine mené sous Catia V5 a ensuite été porté dans un environnement virtuel par une entreprise professionnelle. La Société MG Design[58] a texturé le modèle afin de le rendre plus réaliste et a décliné l'application sous la forme d'une visite virtuelle interactive. (Kerouanton & Laroche, 2010)

Figure 17 - *Usine d'Indret : modèle CAO et portage dans un environnement de Réalité Virtuelle*

[58] www.mgdesign.fr

Forges de Paimpont
Durée : 2012-2013
Partenaire : IRCCyN
Commanditaire : Site historique des forges de Paimpont

Ce projet traite de la réalisation d'une étude technico-scientifique d'un site industriel patrimonial ancien : les forges de Paimpont[59] (près de Rennes, 35). Elles ont été fondées en 1645 et fermées en 1880. Les forges atteignent leur âge d'or autour de 1850 et emploient alors près de 500 personnes en comptant les bûcherons et les mineurs. Construites et aménagées dans la forêt de Brocéliande, elles se composent de deux hauts-fourneaux, d'une affinerie munie de martinets, d'un laminoir, de trois fours à Puddler et d'une fonderie. Un étang artificiel est créé en amont pour permettre l'alimentation en force motrice pour les soufflets et autres norias. Le fer produit est renommé à travers toute l'Europe : les textes de l'époque le qualifient « d'aussi bonne qualité que les meilleurs fers de Suède ou d'Espagne ». A noter que les forges de Paimpont approvisionnent les arsenaux de Brest et Lorient, participent à la reconstruction de la ville de Rennes après l'incendie de 1720…

Les plans du site industriel sont repris par Diderot et d'Alembert lors de la rédaction de l'Encyclopédie démontrant ainsi son intérêt national. Fort de l'expérience déjà acquise en rétro-conception de machines anciennes, l'étude menée ne consistait pas seulement à produire de « belles images 3D » du site mais l'objectif de l'étude était de pouvoir analyser le processus de production de l'usine : flux de matière première, produits finis et force motrice de l'eau. (Laroche F. , 2017)

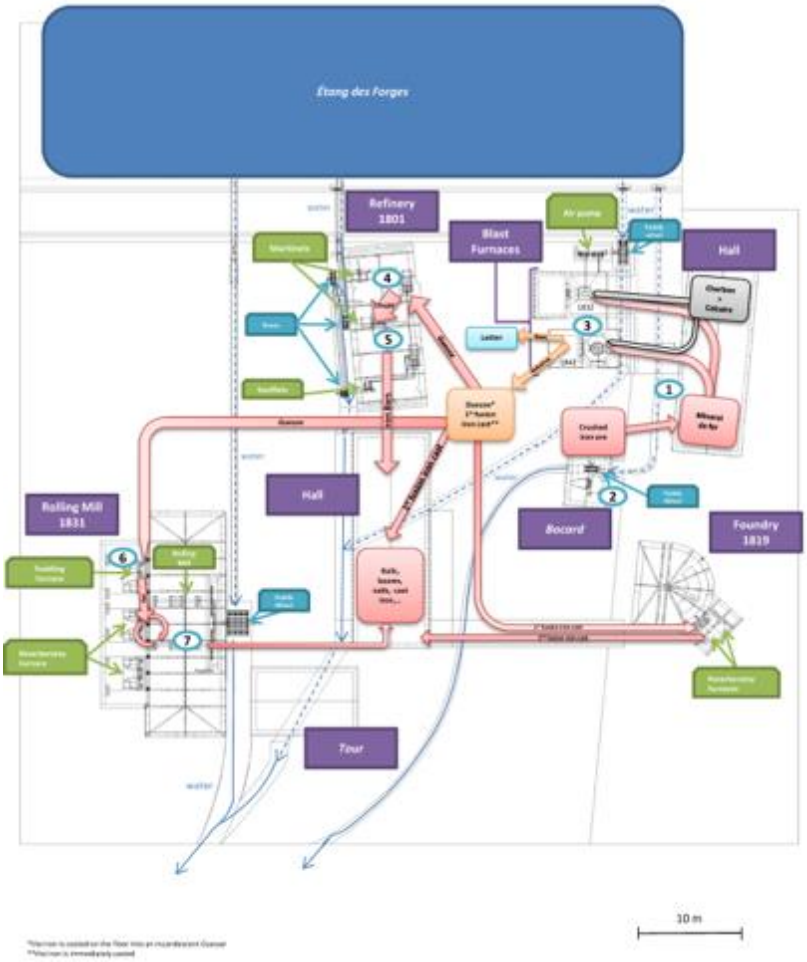


Figure 18 - *Forges de Paimpont : Analyse systémique*

Cette modélisation systémique a permis de valider la reconstitution virtuelle réalisée en CAO. Les figures suivantes comparent plusieurs états datés des forges de Paimpont issues de plusieurs sources :

- Plan de 1821 déposé aux archives nationales de France,
- Carte postale datée de 1930,
- Modèle CAO 3D+t réalisé par notre équipe de recherche en 2013.

[59] www.forgesdepaimpont.fr

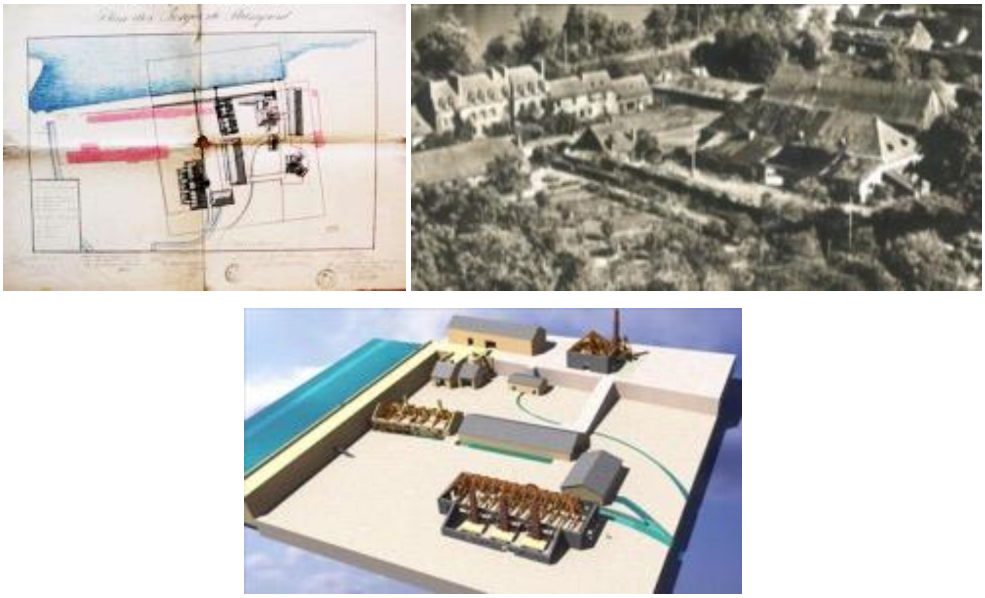


Figure 19 - *Forges de Paimpont : Comparaison de plusieurs états pour valider la modélisation CAO*

A terme, le développement d'un modèle 3D interactif permettra au visiteur de mieux comprendre comment les forges s'organisaient car aujourd'hui, il ne subsiste plus de matériel industriel. Seules quelques ruines demeurent sur le site.
Des expérimentations ont été réalisées grâce au portage du modèle CAO simulé en une maquette blanche ou texturée sous Unity 3D. Une application prototype a été réalisée sur tablette tactile a été développée par Cédric Rajaofera-Renard, étudiant ingénieur (Laroche & Rajaofera-Renard, 2013) (Laroche & Rajaofera-Renard, 2014).

Le cas d'étude des Forges de Paimpont a permis à l'ensemble de nos travaux de recherche de donner une autre dimension : celle de la diffusion du savoir-faire technique capitalisé.

Figure 20 - *Forges de Paimpont : Modèle 3D virtuel texturé du bâtiment de laminage*

Poudrerie royale de St Chamas
Durée : 2011-…
Partenaire : IRCCyN
Commanditaire : ID Méditerranée
https://projetpoudrerie.wordpress.com

La Poudrerie Royale de Saint-Chamas – Miramas est un ancien complexe industriel créé par Louis XIV en 1690 qui a fermé ses grilles en 1974, laissant derrière lui trois siècles d'activité et une économie locale fortement impactée. C'est un témoin exceptionnel de l'histoire industrielle, mais aussi une aventure humaine qui a marqué les habitants de Saint-Chamas, de Miramas et des villes alentours.
Le « Projet Poudrerie » a été lancé fin 2011, par l'association ID Méditerranée. Il vise, outre la valorisation des archives et du site patrimonial, à sensibiliser à la richesse de ce site historique qui est aujourd'hui reconverti en « Parc de la poudrerie », zone protégée par le Conservatoire du Littoral pour la richesse de sa faune et de sa flore.

Suite à son démantèlement intégral en 1974 sur les 135 hectares du site, la Poudrerie, privée de ses 25 bâtiments industriels, ne permet plus au visiteur de visualiser le fonctionnement des machines, d'entendre le bruit des roues à aubes ou encore de sentir les odeurs de la poudre noire. La réalité virtuelle peut être une solution partielle à ce manque, en ce sens qu'elle permet de restituer une partie de l'histoire à travers une maquette numérique des ouvrages et outillages de l'époque. Elle permet aussi de faire découvrir le fonctionnement du site aux publics de tous âges.
Le projet « poudrerie digitale » est née d'une collaboration interdisciplinaire entre ID Méditerranée et EPOTEC. Sébastien Rouquet, étudiant ingénieur, avec Carole Koch, permanente de l'association ID Méditerranée, ont très fortement contribué à cette expérience (Laroche & Rouquet, 2014). Ce partenariat sur le long terme a pour objectif un travail de recherche et d'étude pour faciliter la compréhension du processus industriel de la Poudrerie.

Plusieurs phases se sont enchaînées :

1. Recollement de sources primaires et secondaires au sein des Archives Municipales de Saint-Chamas et Miramas, les Archives Départementales des Bouches-du-Rhône, le Centre des Archives de l'Armement et du personnel du Ministère de la défense à Châtellerault, et de nombreux fonds d'archives privés,
2. Enrichissement du corpus par des témoignages oraux : entretiens avec d'anciens poudriers ou descendants de poudriers,
3. Chantier de recherche et d'observation de terrain multi-process : relevés numériques des bâtiments, fouilles superficielles, relevés photographiques, numérisation 3D et photogrammétries, tomographie par prospection magnétique[60],
4. Études des flux de matières et d'énergies pour une modélisation systémique globale du site industriel avec comparaison SIG temporalisée,
5. Focus sur les processus de trituration de la poudre et les moulins à meule,
6. Production de bases de données et de maquettes 3D dynamiques,
7. Portage en réalité virtuelle,
8. Création de parcours de visite in-situ dans le parc de la Poudrerie avec refabrication de maquettes réelles à échelle des anciens bâtiments détruits en utilisant les travaux d'archéologie industrielle réalisés (en cours).

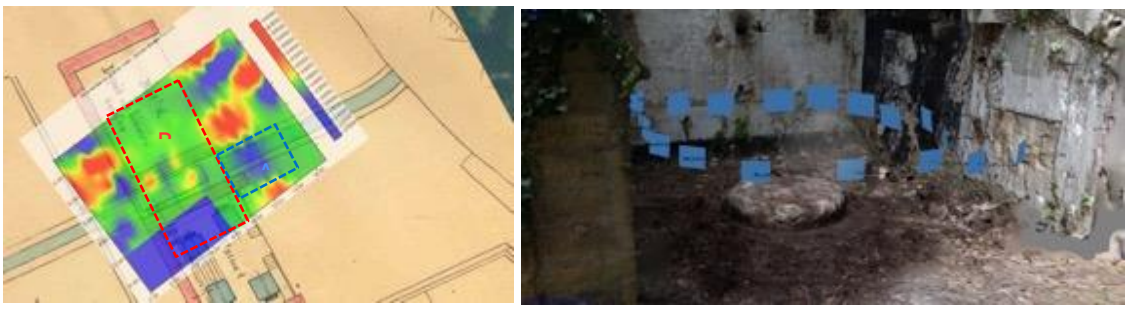


Figure 21 - *Poudrerie royale : Relevés numériques multi-process*

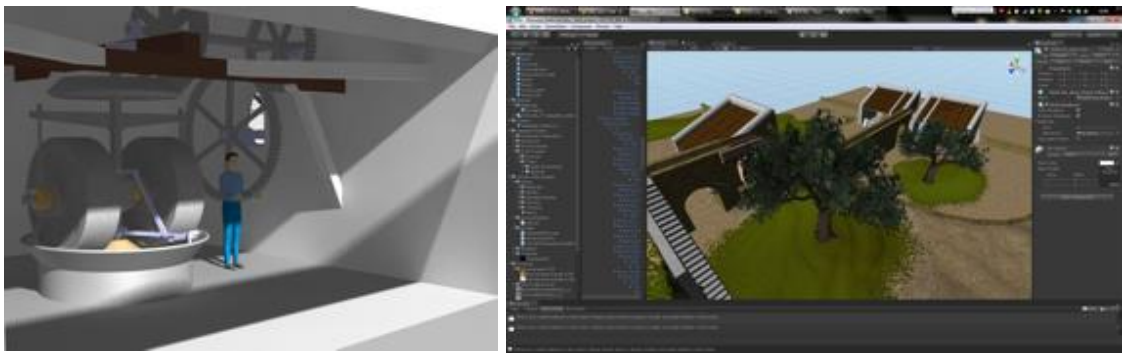


Figure 22 - *Poudrerie royale : Modèle CAO et environnement en réalité virtuelle*

Ce projet avait pour objectif de tester la méthodologie sur un cas complet depuis l'idée jusqu'à sa valorisation en développant tant le fond que la forme, les outils et les compétences nécessaires. A noter que ce projet se continue actuellement en collaboration avec le Conservatoire du Littoral[61] actuel propriétaire du site ; de plus, une thèse de doctorat est en cours de montage avec Carole Koch sur ces travaux.

[60] La tomographie par prospection magnétique a été réalisée grâce à une collaboration avec le laboratoire CEREGE (UMR CNRS 7330) de Aix-Marseille Université.
[61] www.conservatoire-du-littoral.fr

2.3.4 Les projets de recherche appliqués : intégration hybride objets/systèmes en connaissances/géométries

Fort de l'expérience acquise en archéologie industrielle avancée sur des objets ou des systèmes techniques en contexte, la question de l'exploitation des résultats - ou extraction des connaissances - s'est très rapidement posée. La valorisation par les outils de la réalité virtuelle est une des possibilités envisagées ; cependant, elle impacte la structuration même des connaissances manipulées et induit de nouvelles problématiques anthropocentrées. Les projets détaillés ci-dessous ont permis d'expérimenter cette nouvelle phase de nos travaux de recherche.

La maquette du port de Nantes en 1900
Durée : 2008-2016
Partenaires : Centre François Viète, IRCCyN
Commanditaire : Musée d'Histoire de la Ville de Nantes
Budget global : 150 k€
http://www.chateaunantes.fr/fr/nantes-1900

Le projet proposé par le musée d'Histoire de Nantes — en partenariat avec les laboratoires CFV et ex-IRCCyN — vise à mettre en place un dispositif novateur autour de la médiation culturelle et l'aide à la lecture d'un objet patrimonial. Il s'agit de valoriser la maquette du port de Nantes réalisée en 1899 par Pierre Auguste Duchesne (1841-1933). Grâce à sa taille imposante (9,2 x 1,85 m) mais également par l'étendue du territoire qu'elle représente, elle a été présentée à Paris pour l'Exposition Universelle de 1900 afin de promouvoir l'activité portuaire de la ville de Nantes (Kerouanton, Guillet, & Huron, 1999) (Kerouanton J.-L. , 2002).
Elle est actuellement exposée en salle 21 au Musée d'Histoire de la Ville de Nantes, Château des Ducs de Bretagne. Dans sa vitrine, comme un poisson dans un aquarium, la maquette est inerte alors qu'elle est pourtant porteuse de sens : le directeur du musée, Bertrand Guillet, nous alors confier la mission de la faire parler (Laroche & Kerouanton, 2010) !

> *Le projet Nantes1900 oblige de travailler à multi-échelle en sublimant la maquette (l'objet patrimonial) tout en y adjoignant l'ensemble des connaissances qu'elle renferme, et le territoire qu'elle représente.*

A terme la finalité est de capitaliser l'ensemble des connaissances autour de la maquette du port de Nantes en 1900 dans un unique modèle de données, et permettre différentes formes de médiation culturelle via des interfaces adaptées selon les besoins en exploitant la base de connaissances. Il s'agit de mettre en place un nouvel outil transversal interdisciplinaire : le PLM muséographique.
L'objectif de Nantes1900 est de concevoir une méthodologie structurée et reproductible dédiée à la valorisation scientifique d'objets patrimoniaux. Ces travaux ont fait l'objet d'une demande de financement de thèse CIFRE. Le dossier que j'ai monté ayant été accepté, le doctorat a été réalisé par Benjamin Hervy (Hervy, 2014) ; voir la partie développée ci-après sur *Les thèses encadrées*.

Le dispositif muséographique imaginé met à disposition des visiteurs du musée des écrans tactiles situés devant la maquette, ces écrans permettent, au moyen d'une interface spécifique, de naviguer de différentes manières au sein du corpus de documents (par thématique, points d'intérêt, zones géographiques…). Les premières recherches sur le dispositif ont été réalisées en 2010 à l'aide de Dorian Pasturel, stagiaire sur le projet (Laroche, Pasturel, Kerouanton, & Lecoq, 2010).

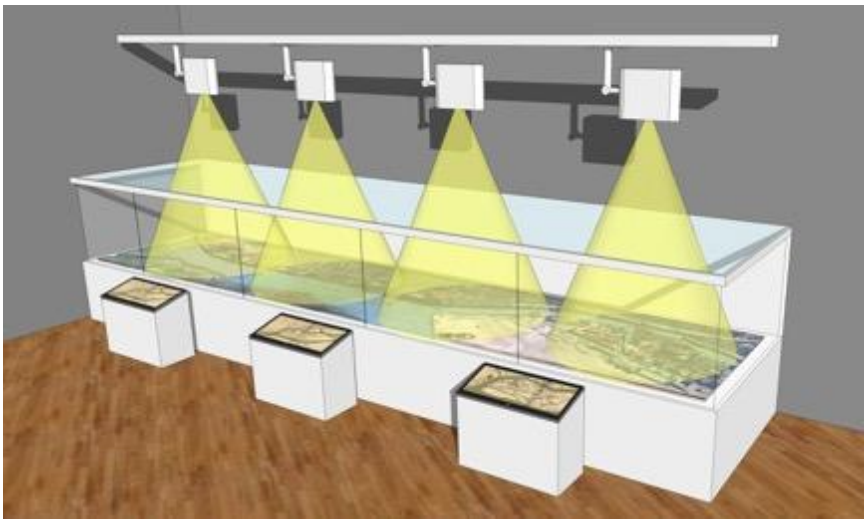


Figure 23 - *Projet Nantes1900 : Dispositif muséographique*

Le dispositif final se présente de la façon suivante : au-dessus de la maquette, 4 vidéoprojecteurs connectés au serveur informatique couvrent l'intégralité de la surface de l'objet : ils permettent un retour lumineux sur la maquette, dépendant des actions de l'utilisateur (Hervy, Laroche, Kerouanton, Bernard, & Courtin, 2014).
Ce dispositif peut être déployé sur d'autres objets car le nombre d'écrans et de vidéoprojecteurs est modulable et adaptable. L'ensemble est piloté par la partie logicielle, disponible sous licence libre (Hervy, Laroche, Kerouanton, & Bernard, 2014).
En visite libre, l'interface tactile multipoints se compose de plusieurs éléments visuels et interactifs : image de fond, carrousel de sources historiques… Depuis cet écran, le visiteur peut sélectionner une zone. Lors de la sélection d'une zone, l'application calcule, grâce au modèle 3D virtuel, le calque lumineux géographiquement correspondant à afficher sur la maquette.
Deux niveaux d'accès à l'information sont prévus : un premier niveau affiche les quartiers de la ville puis les éléments du quartier sont proposés à la sélection. Dans le cas de la sélection d'un élément non renseigné dans la base de données, un message indique qu'il est possible d'ajouter de l'information. (Hervy, et al., 2015)

La base de données, qui capitalise l'ensemble des connaissances historiques relatives au territoire représenté par la maquette, s'appuie sur plusieurs centaines de sources iconographiques (cartes postales, photographies, estampes, etc.) consultables en ligne. Le système va même plus loin puisqu'il permet une évolution dynamique du contenu par la participation de public non-expert qui vient enrichir les connaissances disponibles autour de cette maquette historique.
Le modèle conceptuel de la base de données permet de stocker des informations spatiales et temporelles. L'élément de base est une fiche dédiée à un élément de la maquette (bâtiment, bateau, entreprise…) ou une thématique particulière (les points, les chantiers navals, la métallurgie…). Des métadonnées simples (titre, description, auteur, mots-clés) sont associées à ces éléments. (Hervy, 2014)
Une des particularités de la base de données est qu'elle propose des liens entre les éléments identifiés de manière manuelle par les historiens ou de manière automatique à partir de mots-clés. Cette fonctionnalité permet au système de proposer aux utilisateurs des pistes exploratoires relatives à la recherche.
L'ensemble du dispositif est géré par un serveur informatique hébergeant la base de données en ligne du projet ; l'objectif de cette architecture réseau est de permettre une mise à jour automatique des contenus ainsi qu'un découpage en Réalité Augmentée. En ce sens, lorsqu'un historien ou un visiteur met à jour la base de données, il n'est pas nécessaire de recalibrer le découpage lumineux de la maquette, celui-ci est ajusté automatiquement par son programme car basé sur un SIG historique.

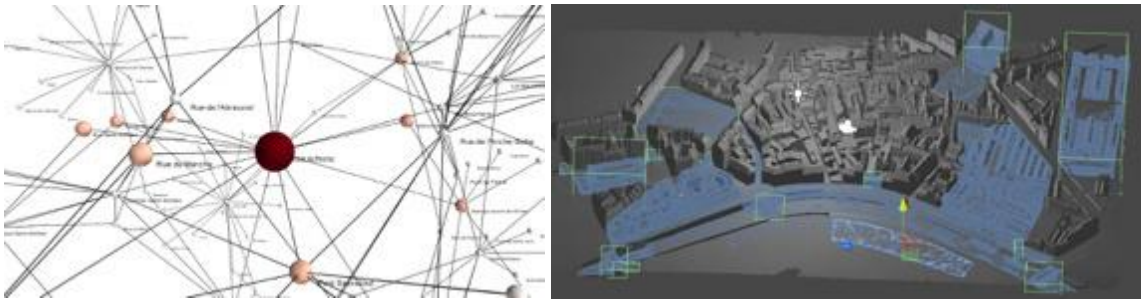


Figure 24 - *Projet Nantes1900 : représentation sémantique des connaissances et modèle 3D numérisé*

En plus de ce dispositif à destination du public, il a été imaginé et mis en place un système de gestion de contenus dédié aux médiateurs du musée. Il s'agit d'un logiciel d'administration permettant de préparer à l'avance un scénario de visite. L'équipe de médiation peut donc accéder aux fiches de la base de données ainsi qu'à l'ensemble du fonds iconographique et programmer un badge RFID avec l'ensemble du contenu nécessaire à la visite guidée. Une fois arrivé devant la maquette, le médiateur pourra prendre le contrôle des écrans tactiles et du système de Réalité Augmentée qui affichera le contenu pré-programmé pour la visite. Cette fonctionnalité est en cours de développement.

Contributions majeures :

- *Cette gestion dynamique des contenus extraits d'une base de données accessible en ligne est l'une des principales innovations de ce projet. Il s'agit là d'une avancée novatrice dans le domaine de la muséographie numérique et digitale, une contribution vers les Digital Humanities. La thèse de doctorat de Benjamin Hervy a permis de contribuer significativement à nos travaux de recherche (Hervy, 2014).*
- *La numérisation 3D de cet objet a également été le cœur de nombreux développements afin de pouvoir rendre le nuage de points intelligible ; voir partie ci-après sur Les projets de rétro-conception intelligente (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012).*
- *Ce projet a donné lieu à un ouvrage collectif que j'ai dirigé avec les trois collègues membres du Comité de Pilotage : (Guillet, Courtin, Laroche, & Kerouanton, 2015).*

Le pont transbordeur de 1903
Durée : 2014-2017
Partenaires : Centre François Viète, IRCCyN, société MG Design, Musée d'Histoire de la Ville de Nantes, Projet Bretez

Ce projet scientifique consiste en la modélisation historique du pont transbordeur installé sur la Loire à Nantes en 1903 et démonté en 1958. Haut de 75 mètres et long de près de 200 mètres, il avait pour mission de faire traverser les travailleurs nantais, les chevaux… entre le quai de la Fosse et l'île de la Prairie au Duc. La technologie du tablier haut utilisé par Arnaudin permettait de s'affranchir des problématiques de marées de l'estuaire et ainsi ne pas freiner le développement des chantiers maritimes nantais, tout en favorisant la libre croissance de la ville. Aujourd'hui, il a été remplacé par le pont Anne de Bretagne.

Notre travail scientifique a consisté à reconcevoir le pont transbordeur à partir des plans originaux retrouvés aux Archives Départementales de Loire Atlantique. Le modèle numérique fonctionnel a été réalisé en CAO. Cette collaboration a permis de confronter le point de vue de Antoine Le Floch et Sébatien Rouquet, étudiants futurs ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes, ainsi que Paul Naegel, docteur en histoire du laboratoire CFV ; cette rencontre interdisciplinaire et intergénérationnelle fut très riche en enseignements et son analyse a permis de valider la reproductivité de la méthodologie.
Le portage en Réalité Virtuelle permet d'en réaliser une application « légère » pour effectuer une visite virtuelle interactive : visite en 3D avec possibilité de se déplacer sur les quais, sur la passerelle, en haut du pont...
Pour replacer le pont dans son contexte, la maquette numérique est enrichie de l'environnement de la ville de Nantes grâce au modèle triangulé issu de la maquette de Nantes en 1900 (Salle 21 - Musée d'Histoire de Nantes) ainsi que du modèle contemporain réalisé par la société MG Design. Grâce à la collaboration avec Mylène Pardoen du projet Bretez[62], une modélisation sonore immersive des deux époques a pu être ajoutée dans l'environnement virtuel.
Des expérimentations et enquêtes auprès du public ont été réalisées pour tester la validité du modèle (Journées Européennes du patrimoine, Digital Week (Laroche & Peillard, 2016)…). Un développement d'une application autonome à l'aide d'un casque de Réalité Virtuelle est en cours de développement par Capacités[63], la société filiale de L'université de Nantes.

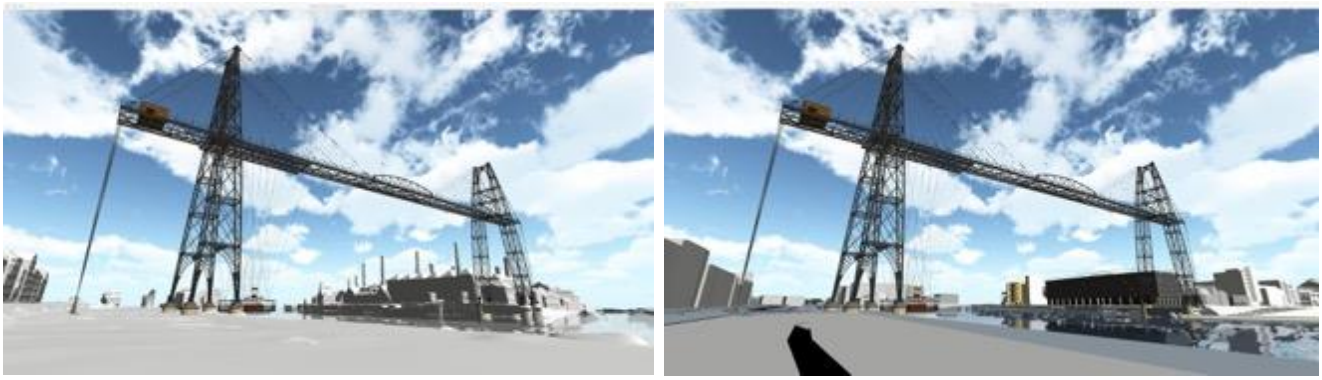


Figure 25 - *Pont transbordeur : Modèle CAO intégré dans l'environnement virtuel de Nantes en 1900 et au XXIème siècle*

Contributions majeures :

- *Ce projet a permis de fédérer des acteurs industriels et universitaires autour d'un objet patrimonial.*
- *En termes de technologies de réalité virtuelle, ce projet est à l'origine des nombreux développements que nous allons mener par la suite, dans le cadre de nos travaux de la valorisation du patrimoine en réalité augmentée ainsi que l'intégration de modèles géométriques à forte densité de nuages de points.*

[62] Modélisation de la ville de Paris grâce au plan de Bretez au XVIIIème siècle - https://sites.google.com/site/louisbretez/home/
[63] http://www.capacites.fr

Le projet ExplorNova
Coordinateur scientifique du consortium : Vincent Minier, CEA et Centre François Viète
Partenaires : CEA, LPG, CFV, IRCCyN
Durée : 2011-2016
Budget : 267 k€ piloté par l'Université de Nantes
http://explornova.cea.fr

L'astronomie est une science populaire capable de rassembler un public très large et s'appuyant aujourd'hui sur des instruments d'observation en orbite de très haute technicité. L'objectif est de voir et aller toujours plus loin grâce à la sophistication, la robustesse et la sobriété énergétique des sondes et des télescopes spatiaux. Les missions spatiales telles que la sonde Cassini, actuellement en orbite autour de Saturne, ou le rover Curiosity, actuellement sur Mars, emportent avec elles tous nos rêves d'exploration, mais elles reposent sur des objets techniques qui sont les fruits d'une élaboration longue et complexe.
Le projet ExplorNova étudie en particulier les technologies dans 4 grandes missions spatiales (Herschel, Cassini, Curiosity, JWST) qui sont les quatre jalons scientifiques et technologiques pour l'astronomie infrarouge et la planétologie. L'étude se concentre sur les systèmes de photodétection (optique, détecteur, cryogénie) et les sources d'énergie (photovoltaïque, RTG/générateur thermoélectrique à radio-isotope). (Minier, 2010)

ExplorNova vise à étudier les processus d'innovation qui se concrétisent dans la construction d'une mission spatiale. Explorer les dimensions scientifiques, technologiques et culturelles des sciences spatiales. En extraire des modèles innovants pour le futur. Rendre les connaissances accessibles à tous.
D'un point de vue scientifique, l'ambition d'ExplorNova est de définir, pour le CEA, le processus d'innovation grâce à des modèles de conception, de créativité et d'innovation dans le cadre d'une réflexion interdisciplinaire ; à terme la finalité est de définir des concepts de technologies durables.

Trois ensembles de résultats sont attendus :

- Etude d'un corpus de connaissances sur les technologies spatiales et transposition à la recherche industrielle. Le décryptage de la complexité socio-technologique d'une mission spatiale et l'analyse des systèmes techniques s'appuie sur des archives scientifiques et des entretiens avec les acteurs. Cette phase a abouti à la compréhension des lignées techniques et des processus de concrétisation technique des instruments.
- La capture des connaissances et la modélisation de l'essence des innovations. Les données recueillies ont été intégrées et modélisées dans une base de connaissance.
- Technologies numériques pour valoriser, diffuser, communiquer et enseigner les connaissances : mise au point de maquettes interactives, d'immersion 3D et d'e-books enrichis.

Les 2 applications réalisées en coopération avec des partenaires du consortium ExplorNova sont :

- **Curiosity in Mars**. Grâce à une collaboration étroite avec le laboratoire LPGNantes, il a été possible de réaliser un MNT[64] de l'environnement de la planète directement à partir de véritables données satellitaires. Les ortho-photos prises sur Mars ont été optimisées sous Unity 3D[65] pour permettre une manipulation aisée du MNT grâce aux outils de Réalité Virtuelle. L'intégration d'un modèle CAO du rover Curiosity a nécessité une interopérabilité parfaite pour pouvoir récupérer l'ensemble de la cinématique nécessaire aux interactions dans le monde virtuel. Muni du casque de réalité virtuelle ou face à l'écran 3D, on pilote le rover martien à la surface de la planète rouge, comme si l'on y était. La navigation est assurée par une IHM[66] intuitive de type "grand public" : le RazerHydra du laboratoire LPG.
- **ExplorNova Augmented**. Grâce à l'ensemble des travaux réalisés précédemment, il a été décidé d'aller plus loin dans l'intégration des techniques de réalité virtuelle de pointe et la diffusion du savoir interstellaire. Une application de réalité augmentée a été développée pour permettre aux utilisateurs de se rendre compte de la taille du rover Curiosity (robot qui mesure 3m par 2.6 m et jusqu'à 2 m de hauteur instrumentation dépliée). Après intégration du modèle 3D du robot dans l'environnement virtuel développé sous Unity3D, nous avons utilisé les modules Vuforia Augmented Reality SDK développé par l'entreprise Qualcomm et Metaio SDK, produits pas la société Eponyme. L'objectif final est de superposer l'image virtuelle sur l'image réelle filmée par la caméra d'une tablette ou d'un téléphone. Nous n'avons pas utilisé un marqueur classique de type Flashcode ou QRcode, nous avons programmé une image comme élément de référence pour la RA[67]. Il s'agit là d'une innovation majeure proposée par notre équipe de recherche afin de ne pas utiliser de marqueurs standards (Hsieh & Smith, 2016) mais d'apprendre au système à utiliser son environnement réel pour réaliser une Réalité Augmentée ubiquitaire (voir partie ci-après dans l'état de l'art des travaux de recherche sur l'*Intégration d'un modèle de contexte pour mieux adapter les connaissances*). Enfin, des interactions et un accès aux

[64] MNT = Modèle Numérique de Terrain
[65] Unity3D = logiciel de création d'environnements virtuels interactifs
[66] IHM = Interface Homme Machine
[67] RA = Réalité Augmentée

connaissances ont été intégrés dans le modèle virtuel : affichage de la cinématique de fonctionnement et des informations que la NASA nous a fourni sur les composants mécaniques classés par type de domaine. (Laroche & Peillard, 2016)

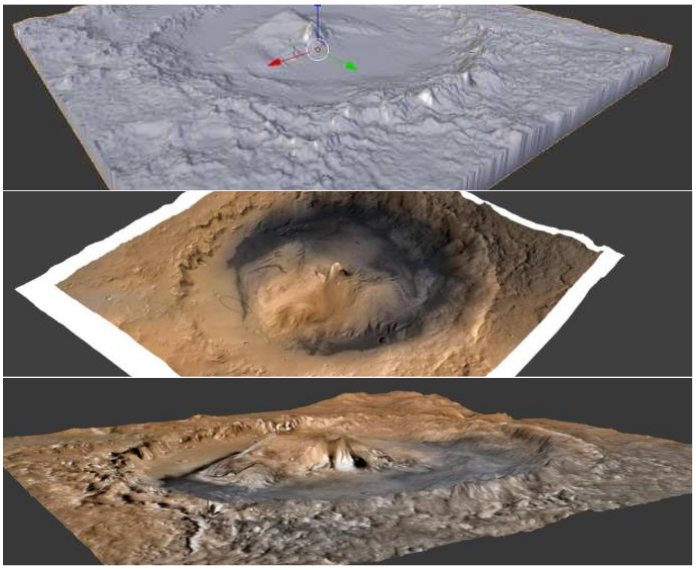


Figure 26 - *ExplorNova : Création du MNT à partir des images satellites*

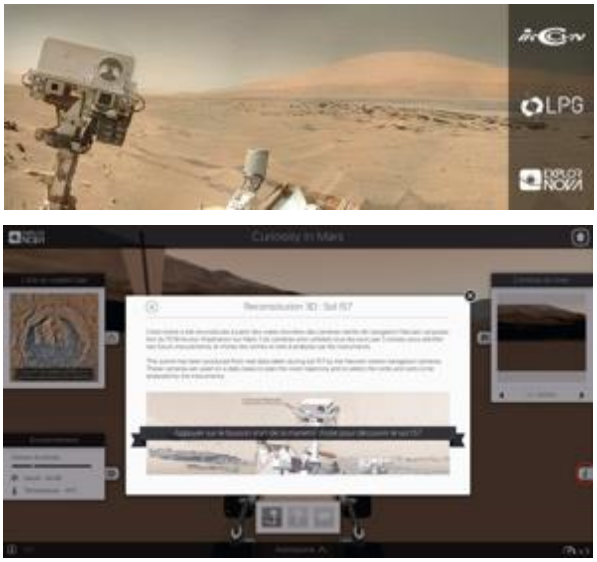


Figure 27 - *ExplorNova : Application Curiosity in Mars*

Figure 28 - *ExplorNova Augmented : Application de RA à échelle 1 :1 en fonctionnement sur site*

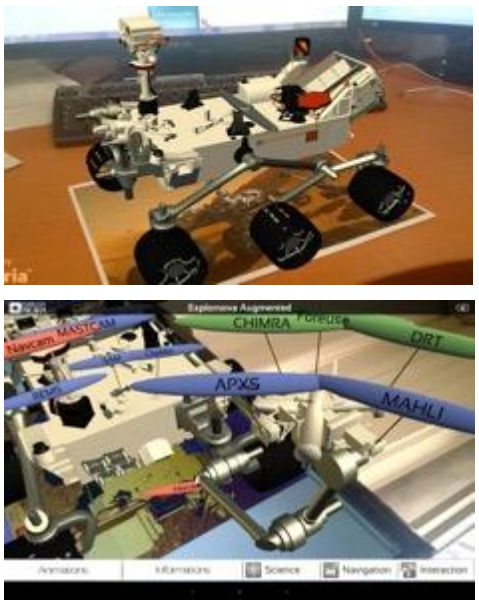


Figure 29 - *ExplorNova Augmented : Application de RA sur « table » et affichage des éléments de connaissance en RA*

Contribution majeure :

- *Le travail que j'ai mené dans le cadre de ce projet porte essentiellement sur le développement d'outils numériques pour partager les connaissances. Après traitement des données numériques spatiales, des applications en réalité virtuelle et en réalité augmentée ont été développées pour permettre d'accéder aux informations sur le rover Curiosity et l'environnement martien.*

2.3.5 Les projets de recherche fondamentaux francophones

Pour compléter ces projets exploratoires en Archéologie Industrielle, nous avons participé à des projets de recherche fondamentaux tant au niveau ligérien qu'au niveau national ou européen.

Région Artur
ARTUR = AtelieR du FuTuR = Vers l'usine du futur pour une approche intégrée "matériel-processus-information-être humain"
Durée : 2011-2015
Budget : 180 k€
Coordinateur scientifique du consortium : Paco Chinesta, GEM
Partenaires : GEM, IRCCyN, CERMA, Crini et CLARTE

De nos jours, les entreprises ont acquis et mettent à disposition de leurs employés un certain nombre d'outils qui leur permettent d'être confiants dans les produits qu'elles développent. Le concept dénommé « smart factories » propose d'automatiser et de contrôler la plupart de leurs tâches. Grâce à des robots sophistiqués, ils peuvent augmenter leurs capacités de fabrication. Les procédés industriels et les méthodes scientifiques sont si nombreux qu'il est désormais possible d'imaginer, de concevoir et de fabriquer des produits incroyables.
L'objectif principal de ARTUR est d'intégrer des techniques avancées pour les usines de nouvelle génération.

Dans les phases d'ingénierie, les employés de bureau ont à leur disposition de nombreux logiciels pour les aider à travailler. Ces « assistants » sont en fait de simples dictionnaires avec de bons lexiques. Toutefois, lorsqu'il est question d'éléments scientifiques et techniques, il est plus difficile de fournir une telle assistance. De même, lors de la phase de manufacturing, il n'existe pas d'outils intelligents d'aide à la décision spécifiques pour l'atelier.
Les enjeux scientifiques du projet ARTUR sont :

1. La capitalisation et la restitution contextualisée des connaissances,
2. La prise en compte du facteur humain et des interactions homme-machine,
3. La proposition de nouvelles modalités d'interactions à l'aide de la réalité virtuelle.

Les 2 premiers enjeux ont été portés par notre équipe de recherche. Ils ont fait l'objet d'une thèse de doctorat qui a permis de définir un framework pour structurer la connaissance in-extenso d'entreprise à multi-échelles (Dhuieb, 2016).

Les fondements de ce projet de recherche consistent en une nouvelle proposition pour modéliser et structurer les informations, et plus généralement les connaissances d'entreprise (Vallespir & Chapurlat, 2007). Par conséquent, prenant en compte les données globales, les informations, les connaissances et les savoir-faire, il faudra pouvoir être en mesure de remettre en contexte ces connaissances afin de pouvoir les réutiliser dans de nouvelles situations. Nous dénommons ce concept « Digital Factory Assistant » (Laroche F. , Bernard, Bordeu, & Chinesta, 2012) défini comme un système de support et d'aide à la décision destiné aux opérateurs en lignes de production. Il s'agit d'un assistant personnalisable agissant comme un système multi-agents (Lyytinen & Yoo, 2002) qui peut interagir avec un ensemble complet d'informations (base de connaissances in-extenso) et disposant de fonctionnalités de décision assistée par les techniques utilisées en Réalité Virtuelle. Ces travaux visent également à contribuer à enrichir les recherches menées en réalité virtuelle en intégrant des ensembles de données complexes via la mise en place d'un nouveau modèle de système d'information permettant une interopérabilité avec les modèles numériques 3D scientifiques et mécaniques (i.e. CAO), avec les outils de gestion du cycle de vie produit (i.e. PLM), ou encore avec les flux de matières, les processus industriels, les données de simulation ou de planification des ressources d'entreprise (i.e. ERP)… (Dhuieb, Belkadi, Laroche, & Bernard, 2014)

Pour évaluer la validation de nos propositions scientifiques (dont les apports de la thèse de Mohamed Anis Dhuieb), l'outil d'assistance contextuelle à la tâche dénommé « Digital Factory Assistant » - ou DFA - dédié aux acteurs d'une ligne de production permet de :

- Avoir un accès aux variables de l'échelle fine associées à une modélisation fine des matériaux par le biais de la simulation numérique avancée,
- Prendre en compte la situation de travail de l'utilisateur lors de l'exploitation du couple information/connaissance,
- Assurer une structuration des connaissances basée sur la complétude du couple information/connaissance à exploiter,
- Avoir un couplage entre le système d'information existant dans l'entreprise et une base de connaissances dans le but de favoriser une meilleure réutilisation des connaissances non exploitées auparavant dans l'atelier,
- Faciliter l'emploi des technologies de réalité virtuelle/augmentée afin de favoriser une meilleure restitution des connaissances et des informations,
- Aider à l'évaluation de la coopération homme-machine et d'une modélisation des stratégies humaines dans le cadre d'une prise de décision rapide dans un contexte d'incertitude.

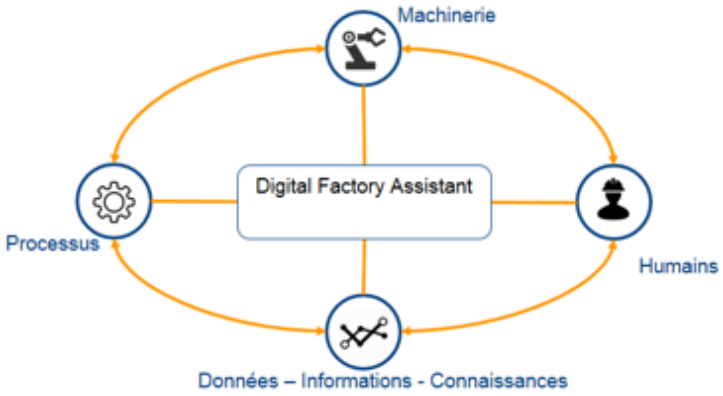


Figure 30 - *Projet ARTUR : Interactions du DFA dans le périmètre industriel (Dhuieb, 2016)*

En termes de résultats, la proposition scientifique de ARTUR permet une modélisation globale des éléments de l'entreprise en favorisant une réutilisation interactive des connaissances dans le but d'optimiser les performances. Le système distingue automatiquement, à l'aide de l'extraction des informations contextuelles, le profil de l'utilisateur en le positionnant depuis l'utilisateur expérimenté jusqu'à l'utilisateur débutant. Ensuite, il peut fournir à chacun d'eux la bonne information en la conditionnant de la façon la plus appropriée tout en laissant l'utilisateur décider de l'usage final et de la personnalisation selon les connaissances contextualisées.
Le scénario type est celui d'un opérateur débutant dont l'interface évoluera au cours de la formation avant son intégration totale dans l'entreprise. On parle alors de livre de connaissances personnelles et personnalisables qui implémente des technologies intelligentes de présentation des connaissances.
Afin de permettre à l'opérateur de bien accomplir ses tâches par la prise d'une décision la plus satisfaisante au bon moment, il a fallu définir des mécanismes permettant l'extraction des informations et des connaissances pertinentes. Il s'agit de les mettre à la disposition de l'opérateur en lien avec sa situation de travail. Ces mécanismes sont basés sur un couplage entre le système d'information global de l'entreprise et une base de connaissances sur le procédé considéré comme nous allons le voir dans le chapitre suivant de ce mémoire sur les apports de mes travaux scientifiques.

Notre contribution au projet ARTUR a consisté à créer un nouveau « compagnon » (ou DFA) dédié à l'entreprise du futur. Grâce à un couplage à une base de connaissances, le système aide automatiquement l'utilisateur dans ses tâches quotidiennes en lui délivrant la bonne information au bon moment et au bon lieu via des dispositifs et des interfaces en adéquation avec les métiers.

Le projet ANR METIS
ModElisation Tridimensionnelle de maquettes numériques par l'Intégration de données géométriques et de connaissances hétérogèneS
Durée : 36 mois 2011-2014
Budget : 2,8 M€ dont 1 M€ de subvention ANR
Partenaires : UTT, UTC, ECN, ENSAM, IFP, Deltacad
Coordinateur scientifique du consortium : Harvey Rowson, société Deltacad
http://metis.deltacad.fr

Ce projet s'intègre dans le domaine de la rétro-conception. Largement utilisée dans l'industrie manufacturière, cette méthode est utilisée pour capitaliser des connaissances qui ne l'ont pas été jusque-là et qui deviennent aujourd'hui cruciales pour faire évoluer les produits. Les applications sont diverses, comme par exemple, la rétro-conception de produits existants en vue d'en modifier/combiner des composantes (cas de la rétroconception de moteurs) ou alors la maintenance des produits mécaniques à très longue durée de vie (avions, navires, centrales nucléaires, plateformes pétrolières, trains…), lorsqu'il faut reconcevoir et refabriquer un composant dont on ne dispose pas des informations de conception d'origine (sous-traitance, évolution temporelle…).
L'évolution globale des industries vers des structures de type entreprise étendue conjuguée à l'émergence de nouveaux besoins en termes d'approches d'ingénierie présente un potentiel de nouveaux modèles économiques pour des entreprises qui seront en mesure d'innover.

Une hypothèse forte portée par le projet METIS est que, pour la rétroconception d'un grand ensemble mécanique complexe, les informations purement géométriques sont insuffisantes. METIS propose une solution pour intégrer l'ensemble des informations (nuage de points, photos, documentations techniques textuelles, nomenclature…) disponibles sur l'ensemble mécanique étudié afin de les traiter et d'en extraire une maquette numérique, en s'appuyant sur une base de connaissances tel qu'illustrée par la figure suivante.
METIS vise à combler les lacunes des méthodologies classiques de la rétroconception à travers l'intégration de connaissances produit relatives au contexte PLM et l'utilisation de données hétérogènes associées aux produits analysés (Ouamer-Ali, Laroche, Bernard, & Remy, 2014).

1. L'une des problématiques principales de METIS est la gestion des connaissances dans sa vision globale, allant de la capture des connaissances à travers l'analyse des processus métier et la mise en place des connaissances formalisées par les experts de ces métiers, jusqu'à son utilisation dans le processus de rétroconception.
2. La seconde problématique est la mise en place d'une nouvelle méthodologie de rétroconception qui permet de prendre en compte les différentes connaissances formalisées précédemment, et donc d'intégrer un contexte d'étude plus large que celui de la géométrie ou topologie seules. (Bruneau, 2015)
3. La troisième problématique concerne la mise en place d'outils d'extraction d'informations à partir des données hétérogènes, caractérisée par le développement de différents algorithmes de traitement de données spécifiques (Anwer & Mathieu, 2016) (extraction d'entités géométriques à partir de modèles 3D ou nuages de points, ou encore, identification des parties d'informations relatives au produit à partir d'un texte), et de les intégrer dans le processus de rétroconception. Finalement, METIS ambitionne de faire de la rétroconception pour les ensembles mécaniques complexes (grands assemblages avec un nombre de pièces important).

L'un des enjeux clés de la démarche repose sur les concepts de signatures et d'identifications, qui doivent fournir les moyens de lier les données hétérogènes avec les connaissances afin de les exploiter pour reconstruire un modèle adapté à l'exploitation souhaitée.

Le consortium du projet METIS était composé de 6 partenaires dont 2 industriels (IFP Energies Nouvelles et Deltacad). Le financement ANR a permis d'embaucher 2 doctorants et 2 ingénieurs de recherche. La thèse co-encadrée entre notre équipe de recherche à l'école centrale et l'UTT a été réalisé par Mohamed Ouamer Ali ; elle a permis de mettre en place une démarche de rétroconception générique basée sur un corpus de données hétérogènes : modèle 3D et corpus contextualisant (Ouamer Ali, 2016).

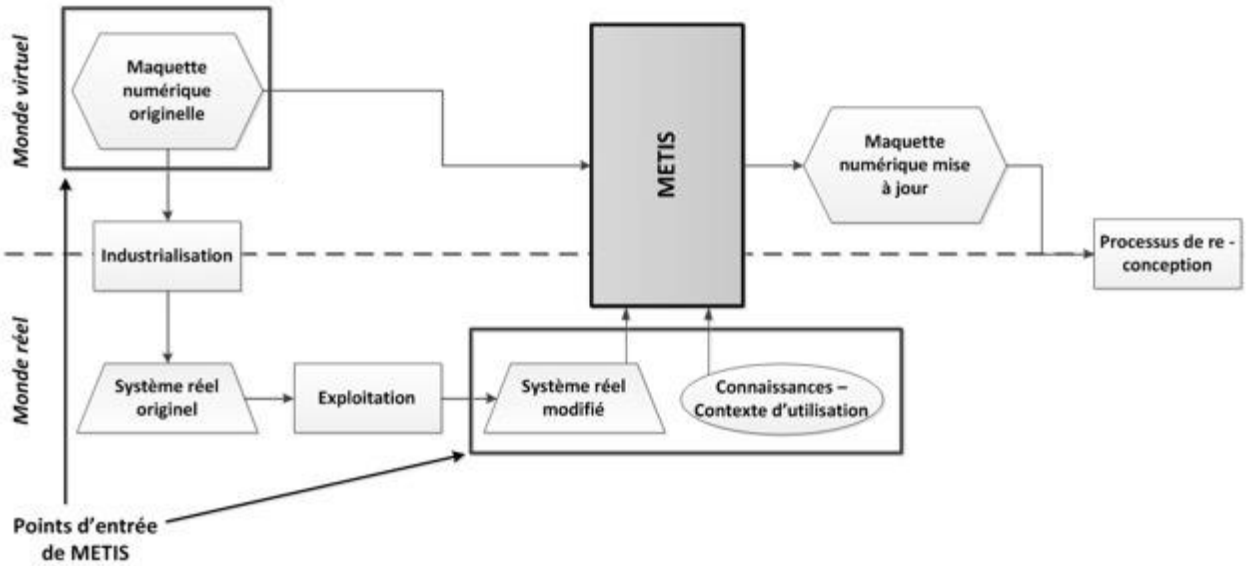


Figure 31 - *Projet METIS : Processus global de la coévolution d'une maquette numérique et de son système réel*

Le projet ANR ReSeed
Rétro-conception SémantiquE d'objEts patrimoniaux Digitaux
Durée : 42 mois 2016-2020
Budget : 1,5 M€ dont 692 k€ de subvention ANR
Partenaires : UTT, UTC, ECN, Univ.Nantes, MCC Héritage, Deltacad, Musées des Arts-et-Métiers et Ministère de la Culture
Coordinateur scientifique du consortium : Florent Laroche, LS2N
www.reseed.fr

Ce projet vient dans la continuité des précédents travaux du projet ANR Metis. Il s'intègre toujours dans le domaine de la rétro-conception (ou Reverse Engineering en anglais) mais cette fois-ci s'allie avec les besoins et les particularités liés au patrimoine. Les objectifs scientifiques s'inscrivent pleinement dans le Défi 7 de l'ANR qui permettra de construire notre future société de l'information et de la communication.
Aujourd'hui, la rétro-conception est utilisée par l'industrie pour capturer l'information 3D des produits. Mais digitaliser les données physiques ne rend pas compte des connaissances portées par les produits, capitaliser ce savoir-faire est pourtant crucial aujourd'hui pour faire évoluer les produits de demain.

Pour atteindre ces objectifs, on distingue donc deux types d'approches :
1. les démarches de gestion des connaissances classiques s'appuyant sur les sources sémantiques,
2. et les outils de numérisation / modélisation 3D.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de processus alliant ces deux domaines et globalisant la démarche : les verrous technologiques résidant dans cette interdisciplinarité fondatrice amènent à des verrous scientifiques nécessitant un alignement des modèles et une remise à plat des processus usuels des industriels. La proposition de ReSeed est décrite par la figure suivante.

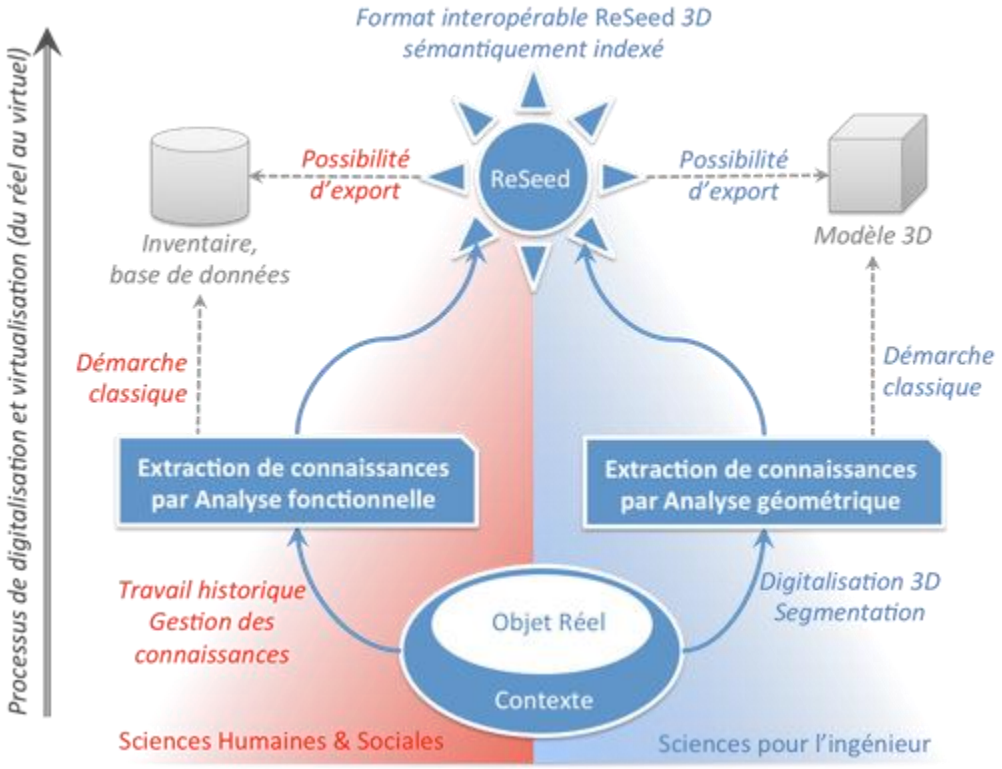


Figure 32 - *Projet ReSeed : Schéma de la proposition scientifique combinant analyses fonctionnelle et sémantique*

Le projet ANR RéSeed vise à mettre en place une nouvelle méthodologie, un outil et un format interopérable pour permettre l'alliance de la digitalisation sémantique et physique des objets.

Cet outil permettra une mise à disposition des informations 3D segmentées sémantiquement sur plusieurs niveaux de lectures. Répondant aux volontés de partage des connaissances de ce début du XXIème siècle, le consortium envisage de définir des outils interopérables OpenSource.

Avant d'appliquer les démarches sur l'industrie contemporaine il a été choisi de tester les approches sur un corpus déjà existant dont les connaissances ont été identifiées et dont la valeur intrinsèque n'est pas à renégocier : RéSeed sera testé sur le patrimoine industriel.

Les objectifs scientifiques de ce projet ANR sont donc réellement transdisciplinaires :

1. du point de vue des Sciences Humaines et Sociales : apporter une réponse méthodologique par la possibilité de l'indexage sémantique des modèles 3D,
2. du point de vue des Sciences de l'Ingénieur : mettre en place une maquette numérique hybride permettant de structurer les modèles 3D en développant de nouveaux algorithmes de reconnaissance automatique de formes dans un nuage de points (reverse-engineering contextualisé).

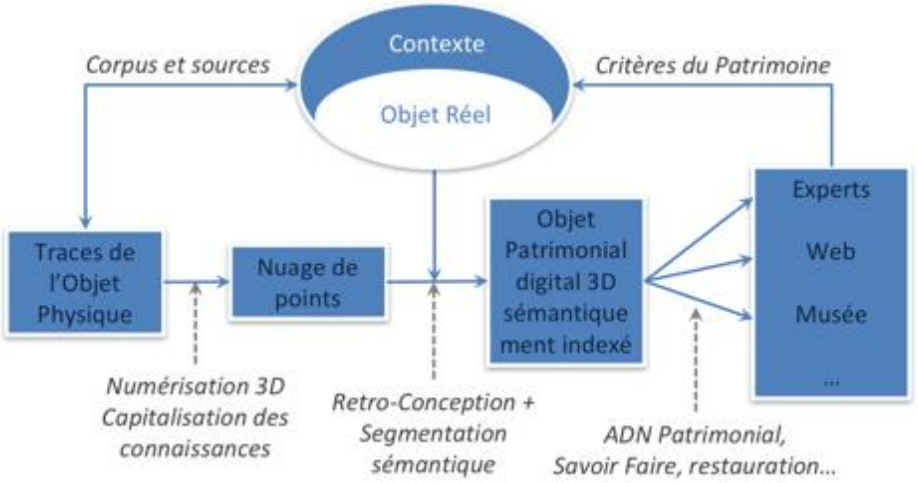


Figure 33 - *Synoptique de valeur du processus de ReSeed aligné sur Metis*

A terme, si l'ANR RéSeed est un succès, un rebouclage entre les connaissances du passé et les connaissances du présent sera envisagé. Sauvegarder, analyser et comprendre ces objets du "patrimoine passé" peut permettre de les transformer en "capital présent".

La transposition des connaissances du passé en connaissances contemporaines, lisibles et compréhensibles dans le système sociotechnique présent peut alors devenir source d'innovation pour anticiper notre futur.

Une attention particulière est portée sur la qualification du processus mis en place. Appelés indicateurs de performances dans l'industrie manufacturière, RéSeed veut mettre en place une déontologie adaptée permettant de garantir l'authenticité et l'unicité des futurs objets numériques sémantiquement augmentés. Ce "standard" vise à garantir la validité de l'objet digitalisé pour en assurer la pérennité et la durabilité.

Ce projet ANR étant par nature transdisciplinaire, le consortium constitué est également pluriel :

- 4 laboratoires de recherche universitaire dont 3 en sciences pour l'Ingénieur et 1 en sciences Humaines et Sociales,
- 2 entreprises dont 1 en sciences pour l'Ingénieur et 1 en sciences Humaines et Sociales,
- 2 partenaires institutionnels apportant des cas d'études à échelle nationale tant dans le domaine scientifique que dans le domaine technique.

Les impacts du projet sont nombreux et se situent sur plusieurs niveaux. Tant sur les emplois requis pour mettre en place le projet (2 thèses, 2 post-docs, plusieurs enseignants-chercheurs et ingénieurs impliqués) que sur les retombées économiques pour les industriels fournisseurs de solutions logiciels ou de service. De plus, compte tenu du champ d'expérimentation défini pour ReSeed, le consortium ambitionne de mettre à disposition des experts du patrimoine de nouveaux outils pour faciliter la digitalisation sémantique des objets. Ces outils permettront des accès multi-niveaux et visent, à terme, de mettre à disposition de tout citoyen les connaissances capitalisées. Entre autres, un label "patrimoine numérique 3D" sera étudié en accord avec le Consortium3D de la TGIR Huma-Num qui soutient ce projet ANR.

Ce projet ANR que je pilote en tant que coordinateur scientifique global est pour moi le terrain d'expérimentation de la théorie proposée permettant l'alliance des modèles géométriques et des modèles sémantiques de connaissances patrimoniales. Il s'agit donc, à travers RéSeed, de valider l'ensemble des travaux de recherche que j'ai réalisés depuis 2004.

2.3.6 Les projets de recherche fondamentaux européens

Réseau européen InterOP
Interoperability Research for Networked Enterprises Applications and Software
Durée : 2003-2007
Budget : 96 k€ pour l'ECN
www.interop-noe.org ➔ *http://interop-vlab.eu*

Lors de mon arrivée en thèse, le premier réseau européen dans lequel j'ai été impliqué a été INTEROP. Il s'agissait d'un réseau d'excellence du 6ème PCRD. Avec 45 partenaires, le pilotage était assuré par le professeur Jean-Paul Bourrières de l'Université de Bordeaux.
Le réseau INTEROP s'est principalement consacré à rechercher de nouveaux principes de coopération pour des solutions informatiques hétérogènes. Il s'agissait des premières recherches appliquées dans le cadre des entreprises étendues avec en particulier la contribution de notre équipe de recherche à la synchronisation de différents modèles distribués d'entreprises. Ce concept de modélisation d'entreprise a été développé dans l'HDR de Nicolas Perry (Perry, 2007).
Ces recherches ont permis de définir la syntaxe UEML 2.0 et, dans une démarche de généralisation, ont permis d'analyser les principes sémantiques des formalismes existants : INTEROP a confirmé le besoin de renforcer les domaines de la formalisation des connaissances et de l'interopérabilité des modèles (ou des ontologies).
Depuis, ce réseau de partenaires existe toujours et a évolué sous la forme d'un GIS étendu de l'Europe vers l'international : c'est une association à but non lucratif de statut belge intitulé INTEROP-VLab. Une conférence a été créée en son sein : I-ESA.

D'un point de vue scientifique, INTEROP a mis en exergue un besoin fort d'interopérabilité des systèmes : qu'ils soient destinés aux produits, aux entreprises, aux utilisateurs… Avec le big data, cette problématique d'interopérabilité des données est aujourd'hui fondamentale. Grâce à INTEROP j'ai pu prendre conscience de cet enjeu et acquérir les bases théoriques pour mieux les intégrer dans mes travaux de recherche actuels.

Ce projet a été riche d'enseignements pour me permettre de comprendre comment fonctionnent la recherche à l'échelle européenne et les coopérations internationales.

Réseau européen VRL-KCiP
Virtual Research Lab for Knowledge Community in Production
Durée : 2004-2008
Budget : 136 k€ pour l'ECN
www.vrl-kcip.org ➔ *www.emiracle.eu*

Le réseau d'excellence européen VRL-KCip s'est déroulé dans le cadre du 6ème PCRD. Il a rassemblé 24 partenaires et était piloté par le Professeur Serge Tichkiewitch de Grenoble INP.

L'objectif était de créer une structure de recherche en réseau de type « Communauté du savoir » basée sur la connaissance relative aux processus et aux technologies de « production ». VRL-KCiP était un laboratoire virtuel d'excellence de partage de stratégies de recherche, de connaissances, de ressources.
Grâce aux synergies entre les partenaires, ce réseau a fait avancer la recherche dans le domaine des modèles et méthodes pour la gestion des connaissances tout au long du cycle de vie. Les résultats de ces travaux ont directement impacté l'évolution des entreprises actuelles : entre autres la mise en place de ce qui plus communément appelé PLM.
Pour notre équipe de recherche, nos contributions ont porté sur les compétences et la gestion des connaissances, qui sont au cœur du concept du PLM. Un ouvrage collectif fondateur a été publié par Springer en 2006 sous l'intitulé « Methods and Tools for Effective Knowledge Lifecycle Management » (Bernard & Tichkiewitch, 2008) dans lequel j'ai pu publier mes travaux (Laroche, Bernard, & Cotte, 2008).

Tout comme pour INTEROP, ce réseau de chercheurs existe toujours sous la forme d'une association à but non lucratif de statut belge : EMIRACLE.

Le réseau VRL-KCiP m'a permis de prendre conscience que capitaliser les connaissances, les structurer et les gérer est fondamental pour tout projet d'amélioration de la performance dans un cadre industriel. Le système d'information permettant d'encapsuler les connaissances doit être robuste et interopérable. Cette problématique scientifique est au cœur de mes travaux de recherche sur la modélisation des systèmes techniques anciens par la capitalisation des connaissances.

Projet européen Dorothy
Innovative Customer Driven Product-Service Design in a Global Environment
Durée : 2007-2010
Budget : 296 k€ pour l'ECN
http://dorothy.ttsnetwork.net

Le projet DOROTHY fait partie du programme européen du 7ème PCRD et a rassemblé 12 partenaires.
L'objectif était de répondre aux problèmes causés par la mondialisation de l'industrie. La tendance étant à la réduction de la vie d'un produit et à la demande permanente d'un client à la recherche d'une solution adaptée à son besoin, se différencier et avoir un avantage compétitif vis-à-vis des concurrents est nécessaire pour la survie des entreprises. Un des axes de solutions proposées est celui de l'application du concept de personnalisation de masse[68] définie comme étant la capabilité de produire des produits et services personnalisés, mais avec le coût de la production de masse (Davis, 1987). La personnalisation de masse, si bien appliquée, apporte plusieurs avantages comme une augmentation de la satisfaction du client, une meilleure compréhension du marché, une meilleure performance, et un accroissement du gain. En même temps, elle entraîne une augmentation des coûts matériel, une augmentation du stock nécessaire pour chacun des composants d'un produit, et une augmentation du temps mis pour répondre à un ordre.
Le projet DOROTHY consiste à définir le business model et structurer l'architecture industrielle nécessaire pour fournir au client une solution personnalisée tout en augmentant sa satisfaction. Cette stratégie demande un environnement très dynamique et une coordination entre les différents acteurs de toute la supply chain (Pedrazzoli, 2009). En plus elle nécessite l'existence d'un système d'information très avancé et d'un système de production très agile et flexible. (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2009)

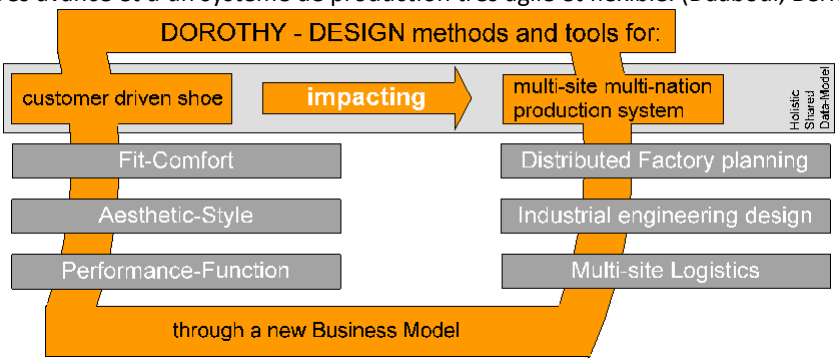


Figure 34 - *Projet européen Dorothy : Proposition scientifique (Pedrazzoli, 2009)*

Les résultats ont été démontrés sur des cas réels grâce aux partenaires industriels du consortium : Hugo Boss, Alpina, Decathlon et Inspire. Il s'agissait d'appliquer un processus complet du client au client dans un contexte de globalisation des marchés pour des acteurs concepteurs, fabricants et distributeurs de produits personnalisés (Daaboul, et al., 2009).

Figure 35 - *Projet européen Dorothy : Schéma de principe des contraintes (Pedrazzoli, 2009)*

Le scénario type est tel que décrit par la figure précédente qui illustre le concept général de DOROTHY (Pedrazzoli, 2009). Le but était de produire intelligemment à l'échelle planétaire des chaussures dont le design est initialisé par le client qui se trouve n'importe où dans le monde. Le client entre dans le magasin « DOROTHY » et choisit le design de sa chaussure qui pourra être

[68] La personnalisation de masse est plus souvent connue par sa définition anglaise de « mass customisation ».

fabriquée par une organisation internationale et multi-sites. Dans ce contexte, la chaussure sera fabriquée en tenant compte des dimensions des pieds du client mesurées via un scanner 3D.

Ce projet, pourtant très orienté ingénierie, a permis d'intégrer des notions plus tangibles avec la prise en compte des aspects économiques, organisationnels et socio-techniques.

Faisant face à des organisations complexes, le projet DOROTHY a conforté les travaux de notre équipe de recherche venant en support aux acteurs métiers de l'entreprise par l'utilisation d'environnements intégrés dans des approches d'ingénierie virtuelle pour :

- Aider à la décision,
- Automatiser les expertises,
- Mesurer la performance.

La contribution de notre équipe a été la mise en place de la thèse de Joanna Daaboul (Daaboul, 2011). Deux problématiques ont été soulevées par ce projet :

1. La capitalisation des connaissances et modélisation des systèmes complexes avec l'intégration des aspects liés à la présence de l'Homme dans le système,
2. Le pilotage des performances par la prise en compte des indicateurs économiques et plus généralement, de la valeur.

La thèse de Joanna Daaboul soutenue en 2011 a permis de mettre en place un système d'information personnalisable et adaptable basée sur la valeur d'un produit. Elle a démontré qu'il était possible de gérer les connaissances pour la personnalisation de masse (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2010).

Désormais, les fondements scientifiques de nos travaux s'axent sur :

- l'ingénierie des modèles et de la connaissance,
- l'intégration des facteurs technico-économiques et la prise en compte de la Chaîne de Valeur.

Partant du postulat qu'un objet historique est lui aussi porteur de valeur, j'ai proposé d'étendre les travaux de Joanna Daaboul au domaine patrimonial. La thèse de Matthieu Quantin a débuté en 2013 sur cette dichotomie de la numérisation de masse du patrimoine numérique au regard d'une exploitation/valorisation personnalisée.

VISIONAIR
VISION Advanced Infrastructure for Research
Durée : 2011-2015
Budget : 6,5 millions d'euros dont 200 k€ pour l'ECN
www.infra-visionair.eu

Visionair est une infrastructure issue du 7ème PCRD initié par la commission européenne en 2011. Doté d'un budget de 6,5 millions d'euros, elle a pour but de créer en Europe un regroupement d'installations pour mener des recherches de pointe dans les domaines :

- de la réalité virtuelle,
- de la visualisation scientifique,
- du traitement d'images en ultra-haute définition,
- ainsi que de la réalité augmentée.

Animé par le Professeur Frédéric Noël de Grenoble INP, Visionair fédère 29 installations universitaires, toutes intégrées dans des laboratoires scientifiques européens pionniers dans l'utilisation de la Réalité Virtuelle. Les objectifs de ce réseau sont de :

1. partager et valoriser les connaissances et les compétences en matière de visualisation virtuelle,
2. supporter des moyens de visualisation et de représentation de données 3D,
3. fournir un accès élargi aux chercheurs à des infrastructures de visualisation de très haut niveau,
4. améliorer la visibilité et l'attractivité de la recherche européenne utilisant les technologies de RV.

Le troisième objectif est une innovation proposée par l'union européenne : il s'agit des TNA ou Trans-National Access. Ce cadre de travail permet à des chercheurs du monde entier de proposer leur projet à Visionair et, s'ils sont sélectionnés, d'utiliser gratuitement une des installations affiliées à Visionair de leur choix pour mener à bien leur projet. Dans ce cadre, j'ai pu accueillir à plusieurs reprises à Nantes : Cyril Carré, chercheur à l'Université de Liège et Romain Jeanneret, chercheur à He-ARC Neuchâtel (voir partie ci-après sur les *Sociétés savantes, collaborations européennes et internationales*).

Ma participation active au sein du réseau européen Visionair a permis à la communauté française et européenne de m'identifier comme un acteur utilisateur de la Réalité Virtuelle dans la thématique émergente du patrimoine.

De plus, dans le cadre de ce projet de recherche, j'ai contribué au montage de la plate-forme de RV de l'école centrale de Nantes (voir partie ci-après sur l'AIP-Primeca). Cet outil est toujours utilisé par tous les acteurs du campus centraliens, qu'ils soient mécaniciens, informaticiens, roboticiens, designers, psychologues… La vulgarisation des outils de Réalité Virtuelle grâce à Visionair a permis de fédérer tous les métiers considérant que la RV est un outil pluriel et interdisciplinaire.

2.3.7 Les thèses encadrées

Les thèses détaillées ci-après constituent le cœur des apports scientifiques permettant de tester les hypothèses et faire avancer la recherche. Elles sont à l'intersection entre les projets de recherche et les fédérations/réseaux/collaborations qui viennent en support (voir ci-après la description de ces structures).

En 2007, lorsque j'ai soutenu mon doctorat, j'avais identifié 4 perspectives pour mes travaux sur le patrimoine technique et industriel. Chacune de ces perspectives a permis de donner lieu à des dépôts de sujets de thèse, soit pour les ANR ou les CIFRE citées précédemment ou encore sur des demandes d'allocations ministérielles.

1. Reconstruire les objets d'autrefois ? ➔ Thèse de Mohamed Ouamer Ali (Ouamer Ali, 2016)
2. La maquette virtuelle comme médiateur ➔ Thèses de Matthieu Quantin (soutenance automne 2017) et Mohamed Ouamer Ali (Ouamer Ali, 2016)
3. La Réalité Virtuelle rentre dans les Musées ➔ Thèse de Benjamin Hervy (Hervy, 2014)
4. La culture technique, un tremplin pour l'innovation ➔ Thèses de Fabrice Le Pavic (Le Pavic, 2014) et Loic Jeanson (soutenance automne 2019)

2008-2011 - Joanna Daaboul
« Etude de l'influence de la personnalisation des produits sur la performance des entreprises étendues mondialisées. Application à l'industrie de la chaussure »
Cette thèse de doctorat vient en support au projet européen DOROTHY dédié à la personnalisation de masse des chaussures. Les fondements scientifiques développés par Joanna Daaboul seront ensuite appliqués au patrimoine dans la thèse de Matthieu Quantin.

La customisation de masse (MC) qui consiste à produire un produit personnalisé mais à un prix proche de celui de la production de masse (MP), est devenue une réalité et une stratégie importante pour survivre dans l'économie actuelle. Néanmoins il existe plusieurs façons d'offrir des produits customisés, comme la combinaison des différents modules, et la co–conception du produit. Depuis 1993, plusieurs travaux ont aidé les entreprises sur plusieurs domaines spécifiques, mais des questions demeurent : comment décider de passer de la MP à la MC ? Comment évaluer cette opportunité afin d'améliorer la performance de l'entreprise ? Comment décider du type de MC à mettre en place ? Quels sont les facteurs les plus importants à piloter ? Et surtout comment évaluer la performance d'un système de MC ? Afin de répondre à ces problématiques nous proposons un système d'aide à la décision pour passer de la MP à la MC (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2009). L'approche développée qui vise à évaluer la performance de l'entreprise, se base sur la modélisation et la simulation d'un réseau de valeur. Le langage SimulValor a été utilisé mais des améliorations ont été apportées ; entre autres un système de simulation à évènements discrets dans lequel nous avons créé notre propre librairie de réseau de valeur. L'indicateur principal du niveau de performance est la valeur générée pour laquelle nous proposons un modèle qui est combiné avec le modèle conceptuel du réseau de valeur. Le tout est simulé et évalué afin d'aider à décider le passage de la MP à la MC en considérant le profit, les délais, les coûts, et la satisfaction des clients. La proposition scientifique a été validée par un cas d'étude issu de l'industrie des chaussures du projet européen DOROTHY.

Ces travaux de doctorat ont permis de prendre conscience que la production dite de masse vient désormais à l'encontre de la volonté des clients souhaitant posséder des objets adaptés à leurs besoins. Ce paradigme pour lequel nous avons œuvré en 2008 prend tout son sens 10 ans plus tard dans notre société de la connaissance (voir ci-après la Partie *Positionnement de mes travaux dans les communautés* scientifiques).

Contributions majeures :

- *Nécessité d'adapter (personnaliser) pour le client malgré une base produit-processus commune*
- *Définition de la valeur d'un produit/objet*

2012-2016 - Mohamed Anis Dhuieb
« Structuration multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise. Vers un assistant ubiquitaire pour l'usine du futur »
Cette thèse de doctorat vient en support au projet région ARTUR détaillé ci-avant.

Malgré « l'invasion » du numérique dans les lignes de production actuelles, le rôle et le savoir-faire de l'être humain restent incontournables dans le métabolisme de l'usine. Les visions autour de l'usine du futur exprimées à travers les feuilles de route récentes sont unanimes affirmant la nécessité de prendre en compte l'être humain et renforcer le rôle de son savoir-faire dans la conception de futurs systèmes de production (Laroche, Bernard, Bordeu, & Chinesta, 2012).
La littérature sur les approches existantes de structuration des connaissances en entreprise et de la conception de systèmes à base de connaissances montre quelques lacunes dans la prise en compte de l'aspect dynamique du contexte pour lequel les connaissances seront réutilisées.
L'hypothèse de départ de cette thèse est que l'utilisation d'un moyen technologique autonome, permettra une meilleure exploitation de la connaissance dans le cadre d'une prise de décision ciblée et précise : c'est « Digital Factory Assistant » (Dhuieb, Laroche, & Bernard, 2013). Dans ce contexte, les objectifs des travaux ont visé à adapter les connaissances exploitées à travers un système à base de connaissances à chaque contexte d'une activité en environnement de travail. Nous nous basons sur la notion du contexte telle qu'elle a été définie dans le paradigme de l'informatique ubiquitaire au début des années 2000 (Werle, kilander, Jonsson, Lönnqvist, & Jansson, 2001) (Lyytinen & Yoo, 2002). La finalité de cette approche consiste à concevoir des modèles conceptuels permettant de structurer les connaissances suivant plusieurs échelles de complétude et de gérer l'information contextuelle dans un système à base de connaissances.

La figure suivante illustre l'architecture conceptuelle globale dite multi-échelle mise en place pour le projet ARTUR. Cette approche se base sur une modélisation du concept de situation de travail qui traduit les inputs et les besoins des utilisateurs tout en intégrant trois éléments complémentaires (Dhuieb, Laroche, Belkadi, & Bernard, 2013) :

1. Un couplage entre les systèmes d'information existants dans l'entreprise et les bases de connaissances dans le but de favoriser une meilleure réutilisation du savoir-faire dans l'atelier,
2. Un module de simulation des processus afin de permettre à l'opérateur de bien maîtriser le processus sur lequel il agit,
3. Un module de réalité virtuelle pour une meilleure restitution de l'information.

Contributions majeures :

- *conception et implémentation d'un modèle de contexte pour supporter la connaissance,*
- *proposition d'un « assistant virtuel » pour contribuer à l'omniprésence de l'informatique dans le monde industriel.*

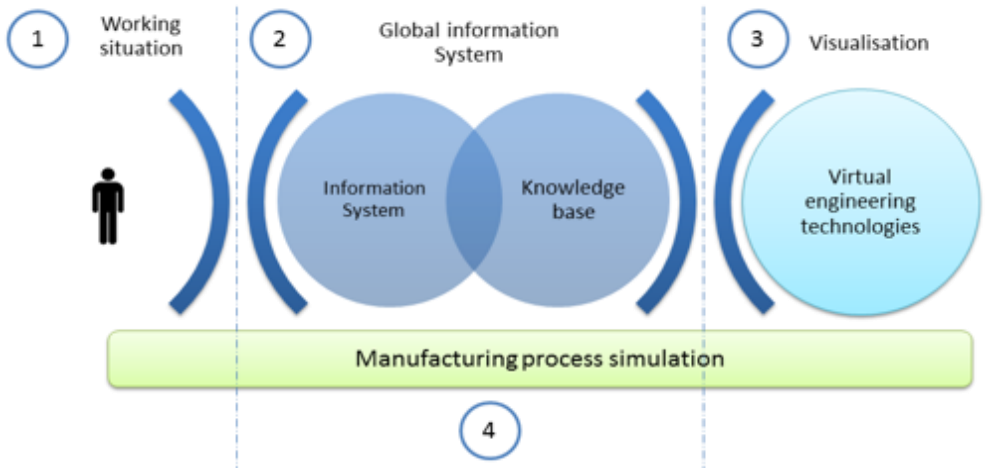


Figure 36 - *Projet ARTUR : proposition scientifique de l'assistant virtuel (Laroche, Dhuieb, Belkadi, & Bernard, 2016)*

2013-2016 - Mohamed Ouamer Ali
« Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique aux données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique »
Cette thèse de doctorat vient en support au projet ANR Metis détaillé ci-avant.

La rétro-conception est une activité de plus en plus utilisée dans l'industrie manufacturière qui, en réutilisant des composants ou des sous-systèmes déjà existants, permet de réduire le temps de développement des produits (Remy, 2012).
Cette activité repose essentiellement sur la capture de la forme du produit, en étudiant sa topologie et sa géométrie. Cependant, l'aspect de forme seul, ne permet pas une intégration optimale dans les processus de conception. Le recours à la représentation du produit sous d'autres aspects complémentaires à celui de la forme est une piste prometteuse.
Ce travail de recherche a permis de proposer une nouvelle façon de faire la rétro-conception, en utilisant un ensemble de données hétérogènes qui peuvent représenter le produit. Ces données sont de types différents : elles peuvent être textuelles, picturales, ou virtuelles, et représentent le produit selon des aspects différents, tels que les fonctions, la structure, ou la dynamique (comportementale).

La thèse de Mohamed Ouamer Ali a défini dans un premier temps une démarche d'intégration de ces données hétérogènes à travers une analyse détaillée qui permet d'identifier les informations pertinentes à intégrer. Ces travaux ont abouti à une démarche qui permet de faire le lien entre ces données analysées et le modèle produit qui intègre différents aspects du produit. L'objectif final est de construire une représentation sémantiquement plus riche de l'objet numérisé qu'une simple représentation géométrique. La figure suivante illustre la méthodologie mise en place : évolution de la reconstruction de l'objet selon plusieurs chemins (pointillés rouge et vert) et modèle systémique de recomposition (puzzle bleu).
Les travaux menés dans cette thèse constituent une étape conséquente pour mes travaux de recherche sur les objets patrimoniaux. Ces apports scientifiques seront développés ultérieurement dans la partie sur *La méthodologie Ki4D* (Ouamer Ali, 2016).

Contributions majeures :

- *reverse-engineering de grands ensembles patrimoniaux,*
- *création de la démarche 4D pour un processus de rétro-conception intégral évoluant dans un espace à 4 dimensions (Ki4D).*

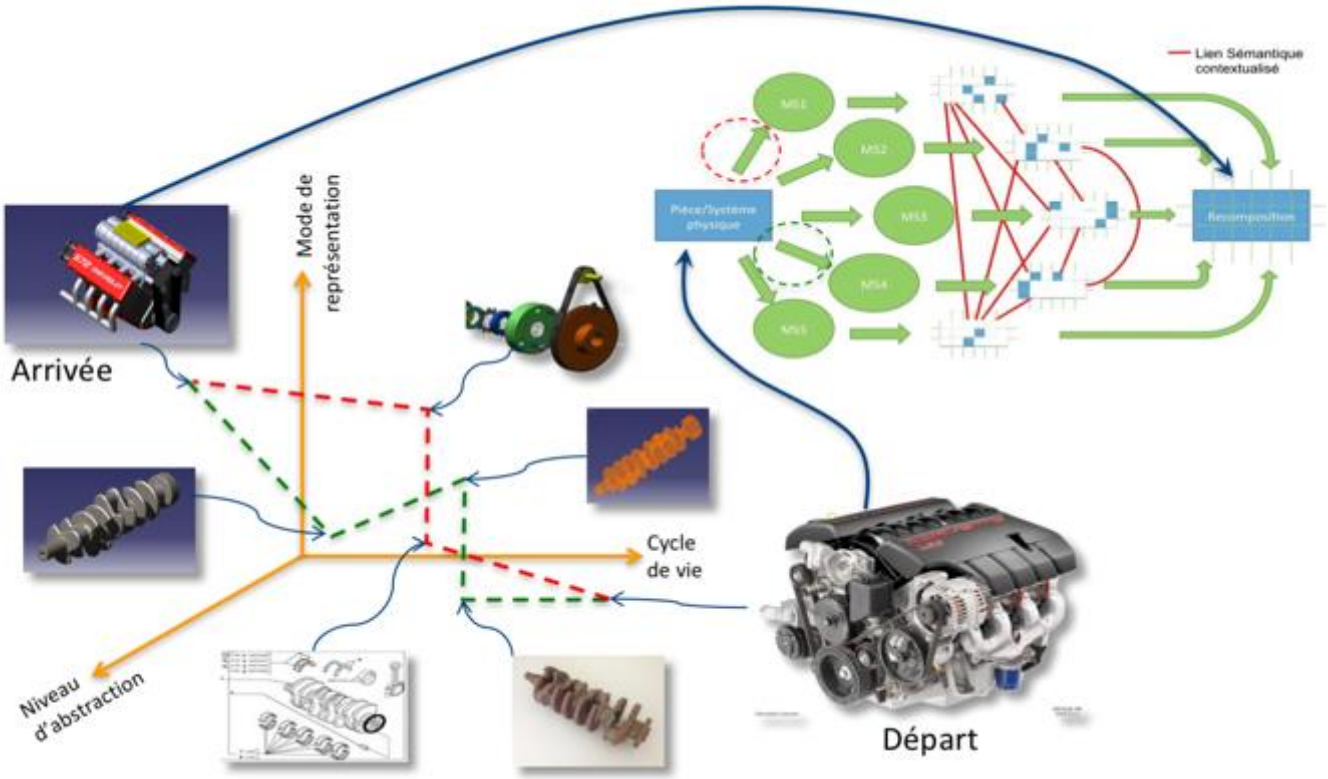


Figure 37 - *Projet METIS : Exemple d'application de la méthodologie Ki4D (Ouamer-Ali, Laroche, Remy, & Bernard, 2017)*

2011-2014 - Fabrice Le Pavic
« De 1945 à fin 1980, une histoire des techniques de la construction militaire dans le port-arsenal de Lorient »

Au cours de la seconde moitié du XXème siècle, de grands chantiers de construction navale relèvent de nouveaux défis. Dans la lignée de ces grands établissements, l'arsenal de Lorient, qui sort de cinq années difficiles fait le pari de la préfabrication soudée. Il relance son potentiel industriel et s'essaie au procédé de construction qu'il étend peu à peu aux navires d'après-guerre.
Ces premiers défis d'après-guerre en entraînent d'autres : ceux pris par les décideurs qui s'engagent à moderniser les installations et les équipements industriels des Constructions neuves de l'arsenal. Pourtant, si certains projets sont de véritables succès, d'autres, au contraire, finiront par être abandonnés. Pour surmonter les obstacles et réussir les défis, l'arsenal n'est pas seul. Il peut compter sur ses réseaux de partenaires : arsenaux de Brest et de Cherbourg, Service Technique des constructions navales de Paris, fournisseurs, etc. Matérialisé par des échanges de vues, ces réseaux favorisent la création de connaissances collectives.

Pour décrire ces changements de méthodes, nous avons utilisé les outils de modélisation des systèmes techniques complexes pour la rétro-conception de sites industriels anciens. Ainsi, les traces des personnes qui ont conçus, développés, pensés et améliorés les systèmes peuvent être replacées dans leurs contextes. Mettant en évidence les « phases essentielles » repérées dans le cycle de vie du projet, la méthode IDEF0 a, par exemple, été adaptée aux enjeux patrimoniaux. Dans la thèse de Fabrice Le Pavic, le Génie industriel est un « outil » pour enrichir la compréhension et l'explication d'un site manufacturier.

Contribution majeure :

- *Démarche de modélisation systémique de sites industriels anciens.*

2011-2014 - Benjamin Hervy
« Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe : application via la mise en place d'un PLM pour la muséologie »

Cette thèse de doctorat consiste en un dispositif de thèse CIFRE sur le projet Nantes1900 détaillé ci-avant.

La valorisation du patrimoine n'est plus considérée comme un devoir de mémoire mais comme un besoin et un atout économique et pédagogique, facilitée par le développement des technologies numériques. Il convient donc de mettre en place des directives méthodologiques pour une conservation et une valorisation scientifique pérenne de notre patrimoine. La mise en œuvre des outils du génie industriel au profit de l'histoire des techniques et du patrimoine industriel a déjà fait l'objet de recherches théoriques. Cette thèse s'inscrit dans la poursuite de ces travaux et vise à mettre en œuvre un cadre opérationnel pour le Digital Heritage Reference Model en contexte muséal (Laroche, 2007). Nous présentons une approche duale produit-processus adaptée des problématiques de PLM en entreprise pour la gestion des connaissances historiques du patrimoine. La méthodologie proposée est appliquée à un cadre industriel relatif à la valorisation muséographique d'un objet des collections du musée d'histoire de Nantes : la maquette du port de Nantes réalisée en 1899. La solution développée est un dispositif de réalité augmentée in situ couplé à un système d'information multi-métiers. L'utilisation des outils de la réalité virtuelle est également étudiée pour la conception de dispositifs d'aide au processus d'écriture de l'historien. À la frontière disciplinaire entre SPI et SHS, nous contribuons ici à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015).

Les apports scientifiques de la thèse de Benjamin Hervy seront détaillés dans les parties suivantes sur l'ingénierie des connaissances, les multi-modalités de réalité virtuelle… (Hervy, 2014)

Contributions majeures :

- *Démonstration de l'application possible de la gestion des connaissances à des objets historiques,*
- *Mise en place d'un système d'information dédié au patrimoine,*
- *Application muséographique en Réalité Augmentée.*

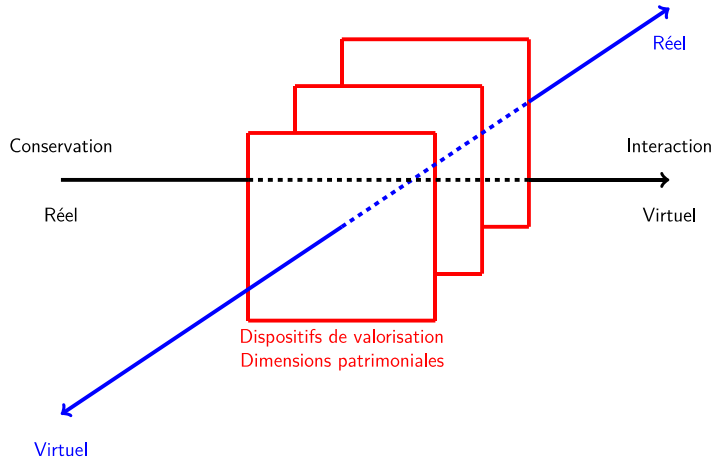


Figure 38 - *Articulation des problématiques scientifiques et industrielles de la thèse de Benjamin Hervy*

2014-2017 - Matthieu Quantin
« Digitalisation de masse VS popularisation personnalisée du patrimoine numérique : vers une approche uniformisée pour le partage des connaissances historiques »
Cette thèse est en cours ; la soutenance est prévue pour l'automne 2017.

Financée grâce à une allocation du ministère de la recherche, cette thèse permet de faire une synthèse de l'ensemble des travaux réalisés jusqu'alors dans le domaine de la gestion des connaissances patrimoniales tout en identifiant de nouvelles contributions et en dégageant de nouvelles problématiques.
La dynamique interdisciplinaire débutée 10 années auparavant a démontré l'intérêt de s'approprier certaines méthodes des sciences pour l'ingénieur et les outils numérique pour la conservation, l'analyse et la valorisation du patrimoine industriel. Désormais, la production de documents numériques (3D ou non) devient quasi-systématique lors de l'étude d'objets patrimoniaux. Cette numérisation de l'existant est accompagnée d'une production massive de documents nativement numériques par notre société contemporaine : CAO, photographie, art numérique, textes...[69] On parlera de patrimonialisation de masse : numérisation de l'existant et production de documents nativement numériques.

D'un point de vue scientifique ces travaux s'inscrivent dans la lignée du projet Nantes1900, avec une orientation plus théorique – des résultats dédiés aux experts et, par conséquence, plus éloignés du grand public. Il s'agit de documenter le patrimoine à l'aide de corpus textuels. La méthode développée produit différentes vues du corpus selon les usages :

- analyse en interaction avec les connaissances qualitatives du chercheur spécialiste,
- valorisation de ces connaissances auprès d'un public curieux et avisé.

Les problématiques traitées au sein de la thèse de Matthieu Quantin sont :

1. La construction automatique d'un réseau de connaissances. Partant du principe que les vues du corpus sont des graphes, le principe utilisé est celui de l'analyse des proximités entre les documents. Ces proximités sont sémantiques, temporelles, spatiales. Le résultat est donc un graphe multiple pondéré : les documents sont des nœuds reliés entre eux par une multitude de liens de type et d'intensité variables. Cette intensité variable (non binaire) fait écho à la notion de nuance en sciences humaines et de logique floue. L'intensité variable est un levier pour répondre à un des enjeux majeurs du développement de cette méthode : co-créer des connaissances historiques, dépasser l'utopie d'une modélisation des connaissances qualitatives de l'historien (expert du domaine) pour plutôt lui proposer une méthode heuristique : une analyse suffisamment fine et précise dont l'interprétation suscite l'émergence de nouvelles certitudes et hypothèses.
2. Les résultats prennent des formes de représentations dynamiques (graphes interactifs). Ils permettent de valoriser le patrimoine, éventuellement nativement numérique, à l'aide de représentations et d'accès personnalisés pour chaque usager souhaitant accéder à une documentation/analyse précise.
3. Enfin, le troisième sujet est la problématique de l'archivage pérenne des données 3D. L'archivage s'inscrit dans la continuité du processus décrit précédemment : les données collectées et analysées par l'historien, réappropriées par les publics sont la matière centrale de la fabrique du patrimoine (Davallon, 2002). C'est cette matière qu'il faut archiver. Un grand écart pourtant s'impose entre l'analyse portée par des descripteurs spécifiques au corpus et l'archivage qui impose un usage très normatif des descripteurs de données (génériques). En ce sens et avec le soutien

[69] A noter que la charte de l'UNESCO définit les bonnes pratiques vis-à-vis de ce patrimoine potentiel (UNESCO, 2003) mais qu'elle est souvent difficile à appliquer dû à la diversité et l'unicité des objets et connaissances étudiés.

de la TGIR Huma-Num, un outil de portage des données vers le CINES est en développement (voir partie ci-après sur l'*Archivage pérenne des données*).

Les 2 figures suivantes sont à lire en simultanée : l'une est la description sémantico-spatio-temporelle des corpus (Quantin, Hervy, Laroche, & Kerouanton, 2015) et l'autre est la vision heuristique qui synthétise les apports des travaux de Matthieu Quantin (Quantin, Laroche, & Kerouanton, 2016). Plusieurs cas d'étude valident les méthodes proposées : le corpus identifié par une couleur (bleu ou rouge) se retrouve dans une visite pré-modélisée de la même couleur dans l'espace vectoriel.
Un outil scientifique exploitant les résultats de la thèse de Matthieu Quantin est en phase de dépôt de brevet : logiciel HARUSPEX. Une publication dans la revue Knowledge-Based Systems a également été soumise. Voir partie ci-après sur l'*Analyse sémantique des sources/archives et dataviz*.

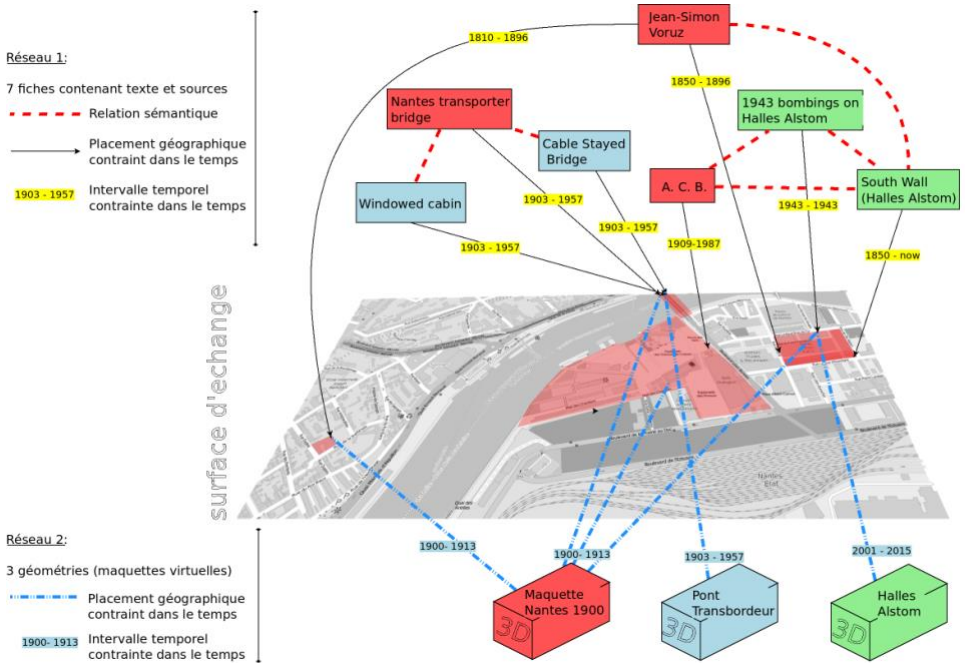


Figure 39 - *Illustration de la patrimonialisation de masse (Quantin, Hervy, Laroche, & Kerouanton, 2015)*

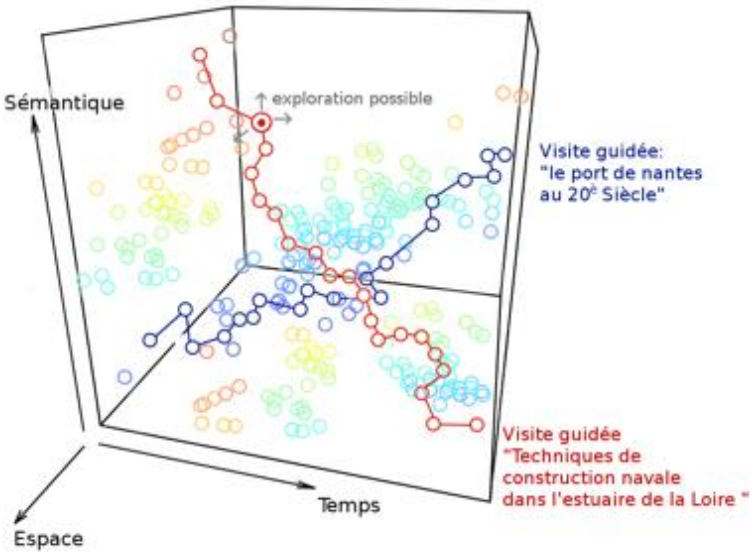


Figure 40 - *Heuristique des connaissances selon Matthieu Quantin (Quantin, Laroche, & Kerouanton, 2016)*

Contributions majeures :

- *Prise en compte d'une capitalisation des connaissances plurielles : objet et ses contextes,*
- *Traitement de masse des données 3D et des sources historiques par les méthodes de KM.*

2016-2019 - Loic Jeanson
« Rétro-conception d'objets patrimoniaux par une assistance digitale à l'hybridation sémantique : Méthodologie d'intégration de connaissances hétérogènes historiques »
Cette thèse de doctorat vient en support au projet ANR ReSeed détaillé ci-avant. Elle a débutée en décembre 2016.

La reconstruction virtuelle d'un objet, patrimonial ou non, passe par sa modélisation géométrique. Celle-ci a déjà suscité de nombreux travaux et elle est désormais accessible par le grand public. Néanmoins, une telle reconstruction ne produit qu'un modèle 3D mathématique dans lequel les surfaces de l'objet sont représentées par des équations de surfaces et/ou des coordonnées de points. En aucun cas, un tel modèle ne supporte la connaissance et le savoir-faire que le concepteur originel de l'objet a mis en œuvre lors de la « primo création » de celui-ci.
L'enjeu de ce travail de doctorat consiste donc à accompagner le changement méthodologique en passant d'une approche historique itérative classique à une assistance à la création des modèles. Un des objectifs est de pouvoir étudier tant les objets simples que complexes, complets ou éparses…

Les verrous scientifiques identifiés font état que :

- les outils de gestion de connaissances et de données à disposition des professionnels du patrimoine culturel semblent limiter les possibilités de compréhension, de valorisation et de suivi de conservation.
- une dissociation existe entre les données géométriques et spatiales, et les données sémantiques (tant dans la conceptualisation des données que dans les outils logiciels). De plus, la dualité espace-temps, pourtant évidente dans le monde réel, reste à développer et intégrer de façon précise dans le monde virtuel pour permettre la création de "doubles-numériques" cohérents (Vitalis, 2016) (Bernard, 2017).

La question de la sémantique est centrale dans ces travaux de thèse car elle va permettre de définir les descripteurs ontologiques de l'objet patrimonial. Après encapsulation des connaissances dans une base de données, il sera possible d'attacher son double numérique afin d'enrichir sémantiquement le modèle 3D.

A la frontière de plusieurs domaines, la thèse de Loic Jeanson s'inscrit dans la continuité de la thématique de digitalisation du patrimoine industriel virtuel initiée en 2004. Les résultats vont permettre de définir des bases solides pour cette nouvelle approche méthodologique interdisciplinaire sur la recherche et la modélisation des connaissances. L'enjeu est double :

- Permettre de réaliser un travail d'historien grâce à un socle solide en sciences de l'ingénieur : mise en place d'une méthode de captation des connaissances du passé et d'un outil ontologique pour les encapsuler de façon ordonnée,
- Démontrer que ces compétences ne sont pas doubles mais qu'elles peuvent s'unir pour donner naissance à de nouvelles façons de travailler (voir un nouveau métier ?).

Contributions majeures attendues à l'issue de la thèse de doctorat :

- *gestion des connaissances plurielles,*
- *modélisation du patrimoine et système d'information intelligent,*
- *nouveau modèle de données pour les représentations virtuelles.*

2017-2020 - Oussama Keddache
« Développement d'un modèle sémantique pour l'aide à la décision dans le cadre de l'Industry 4.0 : application à des machines d'usinage à grande vitesse intelligentes »
Cette thèse de doctorat vient en support au projet ANR SmartEmma. Elle a débutée en octobre 2017 et ne possède pas encore assez de résultats pour être présentés ici.
La thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de Matthieu Quantin pour l'intelligibilisation des connaissances et ceux de Mohamed Anis Dhuieb pour la création d'outils d'assistance dans le cadre de l'usine du futur.

2017-2020 – Paul Francois
« Système d'interaction en réalité virtuelle basé sur des connaissances issues de données historiques tangibles : application au théâtre virtuel de la Foire à Paris du XVIIIe siècle »
Cette thèse de doctorat bénéficie d'un financement du RFI OIC et de la Direction de la Recherche de l'ECN. Elle a débutée en novembre 2017 et ne possède pas encore assez de résultat pour être présentés ici.

2.3.8 Les fédérations de recherche et réseaux locaux

Afin de circonscrire nos travaux de recherche (projets et doctorants) et les intégrer dans des réseaux scientifiques cohérents, nous avons élargi les structures fondatrices énoncés précédemment (OSTIC et EPOTEC) à 3 niveaux :

1. Réseaux locaux et régionaux,
2. Réseaux nationaux,
3. Réseaux et collaborations internationaux.

Dans un premier temps je vais développer le réseau local et régional ; en particulier :

- Mon implication au sein de la MSH Ange Guépin,
- Ma contribution à la PRI-IDEV,
- Ma participation à l'IRSTV.

La MSH Ange Guépin

Comme mentionné dans la première partie de ce manuscrit, je fais partie du comité de pilotage de la Maison des Sciences de l'Homme Ange Guépin des Pays-de-la-Loire.
A ce titre j'interviens comme expert des nouvelles technologies au sein d'un consortium interdisciplinaire.

Dans le cadre de son projet quinquennal 2017-2021, la MSH Ange Guépin s'est dotée d'un programme transversal sur le thème « Sociétés numériques ». A l'inverse des axes de la MSH dont la logique est essentiellement « bottom-up » se repose sur les projets déposés par les chercheurs, ce programme transversal incorpore une dimension « top-down » dans la mesure où il s'agit d'initier et d'impulser une dynamique de recherche sur la dimension numérique des SHS.

Dans ce cadre, le comité de pilotage oriente et anime ce programme transversal. D'une part il s'agit de réfléchir sur la numérisation de la société en définissant une de ses mutations majeures ; et d'autre part, en abordant les questions des nouvelles méthodes, des enjeux pratiques et des nouvelles configurations de la recherche sur ces sociétés en mouvement. La mission de ce groupe, tout en veillant à l'articulation entre la dimension technique et la dimension réflexive impliquées par la numérisation de la société, consiste notamment à :

- réfléchir aux thèmes de recherche susceptibles de nourrir le dialogue et le croisement entre les SHS et les STIC[70],
- organiser plusieurs rencontres annuelles (idéalement 4 à 5 par an au sein d'un séminaire ou de journées d'études) afin de questionner les transformations actuelles liées à l'intégration du numérique dans la société, en dégageant des enjeux de recherche et de formation.

Le comité de pilotage est constitué de :

- Pour les sciences humaines : Florence Alibert, Emmanuelle Bousquet, Brigitte Ouvry-Vial, Daniel Bourrion, Jean-Louis Kerouanton, Stéphane Tirard
- Pour les sciences du numérique : Chantal Enguehard, Claire Gauzente, Pascale Kuntz, Florent Laroche, Yannick Prié
- Pour le droit : Carine Bernault, Jean-Pierre Clavier
- Pour la MSH : Amélie Renard, Benjamin Hervy, Arnauld Leclerc, Stéphane Loret

Ma participation au Copil du programme « Sociétés numériques » de la MSH me permet d'avoir des échanges scientifiquement riches avec des chercheurs utilisant le numérique au sein de leur discipline en SHS ou avec des chercheurs des STIC œuvrant pour les SHS.

Grâce aux possibilités offertes par la MSH pour impulser des dynamiques nouvelles, j'ai fait inscrire le patrimoine numérique comme champ de recherche ligérien.

La PRI-IDEV[71]

Surprendre les visiteurs, les conduire vers des chemins inattendus, parsemés d'émotions, et leur offrir une expérience mémorable : les clés de la visite réussie - et satisfaisante pour tous les publics - sont parfois difficiles à trouver. Afin de fédérer les acteurs et les initiatives dans le domaine de l'expérience de visite des sites patrimoniaux, la Région Pays de la Loire finance

[70] STIC = Sciences et techniques de l'information et de la communication
[71] http://www.pri-idev.fr

la plateforme Régionale d'innovation iDEV. Elle est portée par l'Abbaye de Fontevraud et compte une quarantaine d'acteurs sur le territoire répartis comme suit :

- entreprises du numérique : MG Design, Axians, Cent Millions de Pixels…,
- partenaires académiques: ITBS d'Angers, Ecole de Design de Nantes, Ecole Centrale de Nantes…,
- sites de visites,
- réseaux/institutionnels.

iDEV vise à favoriser le développement de services et de dispositifs numériques de visites innovants au bénéfice du public et au service des professionnels du tourisme, de la culture/ du patrimoine et du numérique du territoire ligérien. La plateforme se veut un lieu de partage et de dynamisme positionnée sur 3 axes : ressources, méthodologie et expérimentation.
Les axes stratégiques de la PRI-iDEV sont :

1. Consolider un réseau : renforcer la connaissance des membres et des compétences, solliciter la contribution des membres et communiquer ensemble,
2. Développer une plateforme de ressources par un observatoire dédié : sensibiliser, observer et former le réseau,
3. Favoriser l'innovation, l'expérimentation et l'internationalisation de la plateforme,
4. Accompagner les acteurs dans leurs projets tant sur le fond (outils et méthodes…) que sur la forme (financements…).

L'observatoire des pratiques collectives a ainsi permis de créer :

- une cartographie géographique des lieux et structures ligériennes acteurs du domaine,
- une cartographie méthodologique des usages des technologies dans les expériences de visite de sites patrimoniaux classant l'ensemble des outils et technologies selon 4 étapes : informer ➔ utiliser ➔ interagir ➔ collaborer (voir figure),
- des mises à plat méthodologique entre autre dans mon domaine d'expertise de la numérisation 3D du patrimoine et sa valorisation par les outils de la réalité virtuelle (Simonnin & Laroche, 2014) (Laroche, 2016).

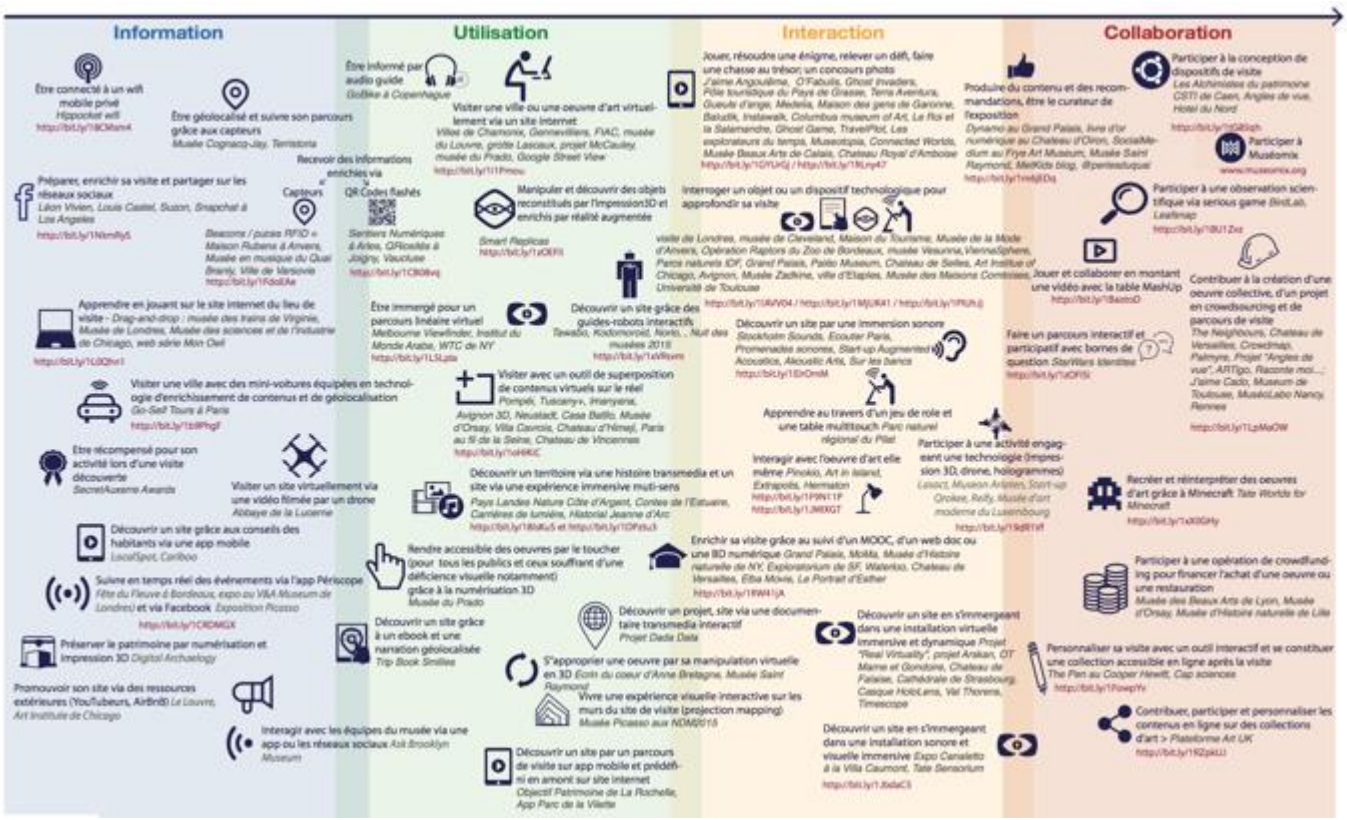


Figure 41 - *PRI-iDEV : cartographie méthodologique des usages des technologies dans les expériences de visite*

Le comité de pilotage est constitué de :

- Pour le collège des industriels : Martial Brard (société Centmillionsdepixels), Roland Roy (directeur Axians 44)
- Pour les institutions : Michel Roux (Grand Patrimoine Loire Atlantique), Murielle Manin (Région Pays de La Loire)
- Pour les lieux muséaux : Marguerite Rolland (Anjou tourisme), Tiphaine Yvon (directrice Escal'Atlantic St Nazaire), Jean-Yves Grandidier (Escal'Atlantic St Nazaire), Christophe Courtin (Château des Ducs de Bretagne), David Martin (directeur Abbaye Royale de Fontevraud)
- Pour la PRI-iDEV : Marie-Aude Gaillard, Lydia Labalette

- Pour les académiques : Philippe Violier (ESTHUA), Jean-René Morice (ESTHUA), Florent Laroche (ECN)

Siégeant au sein de ce comité, outre d'être un représentant académique j'ai en charge le lien avec le monde scientifique du bassin ligérien : fléchage et orientation des projets et collaborations de recherche à l'échelle ligérienne.

En parallèle j'ai fortement contribué aux cartographies thématiques réalisées et aux expérimentations comme l'illustre la figure précédente.

La pluridisciplinarité au sein de l'IRSTV[72]

Qu'il s'agisse d'un produit, d'une machine ou d'une usine, la question de la compréhension en contexte des objets anciens étudiés est nécessaire. Élargir le spectre du contexte pour prendre en compte l'ensemble du territoire peut également s'avérer nécessaire. En ce sens l'IRSTV apporte un complément réflexif et opérationnel aux approches classiques que nous déployons. Les problématiques de représentation virtuelle associées aux bases de données nous permettent ainsi de collaborer avec des géomaticiens.

L'IRSTV apporte le cadre local en Pays de Loire pour continuer ces échanges scientifiques. EPOTEC et le LS2N sont membres à part entière de l'IRSTV dans l'axe « Ville et Image[73] » piloté par Myriam Servières, maître de conférences à l'Ecole Centrale de Nantes et chercheur au CRENEAU[74]. L'objet d'étude de cet axe se centre sur « l'image » et s'intéresse à ses trois statuts principaux :

- l'image comme outil de compréhension de la ville existante où l'objectif est de mettre en œuvre des approches automatiques ou semi-automatiques d'extraction d'informations à partir d'image(s) ou de séquence(s) d'images d'une ville : extraction d'objets urbains 1D, 2D, 3D ou spatio-temporelles, de leurs attributs et de leurs relations,
- l'image comme outil de conception de la ville où l'on s'appuie sur des modèles de représentation et de structuration des données urbaines et de leur dynamique,
- l'image comme vecteur de communication notamment auprès des acteurs du projet urbain où l'on s'interroge sur les nouveaux modes de représentation visuelle (visualisation) d'informations urbaines complexes.

L'équipe est composée des chercheurs suivants :

- CRENEAU Ecole Centrale de Nantes / Ecole d'Architecture de Nantes : Myriam Servières, Guillaume Moreau, Vincent Tourre, Thomas Leduc
- IETR Université de Nantes : Luce Morin, Muriel Pressigout
- IFSTTAR Nantes : Hervé Andrieu
- LS2N Ecole Centrale de Nantes / Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes : Loic Jeanson, Florent Laroche, Matthieu Quantin, Nicolas Normand
- IRENAV Ecole navale de Brest : David Brosset, Cyril Ray, Eric Saux, Rémy Thibaud
- L2G ESGT Le Mans : Jean-Michel Follin, Billel Soussi
- L3I Université de La Rochelle : Alain Bouju.

Au sein de ce groupe de recherche sont ainsi partagés des projets communs ou des réflexions sur des projets portés par certains membres (présentation des travaux sur Nantes1900, les salons Mauduit…) ; des matériels et des stagiaires de type master sont mutualisés pour permettre d'expérimenter de nouvelles modalités de structuration et d'interactions (ce fut le cas d'Alexandre Langeois en 2015-2016 que j'ai encadré avec Myriam Servières et Vincent Tourre).

L'IRSTV apporte un cadre de réflexion nouveau : au lieu de travailler sur des connaissances contemporaines - connaissances éparses et non encore formalisées de façon exhaustive - les connaissances patrimoniales étant constituées en corpus ordonné, il est plus aisé de tester de nouveaux modèles de données sur par exemple, les problématiques spatio-temporelles.

[72] IRSTV = Institut des Recherches en Sciences et Techniques de la Ville - http://www.irstv.fr/
[73] http://www.irstv.fr/fr/ville-et-image
[74] http://www.crenau.archi.fr

2.3.9 Consortiums de recherche et réseaux scientifiques nationaux

Au plan national, je suis impliqué dans de nombreux réseaux et groupes de recherches scientifiques. Tant dans le domaine des sciences de l'ingénierie que le patrimoine, je participe activement et/ou anime :

- Le Consortium 3D de la TGIR Huma-Num
- Le réseau UDPN (IDEX-SPC)
- Le GDR-MACS
- Le réseau AIP Primeca

Ces 4 structures vont être détaillées ci-après. A noter que les 2 réseaux ci-dessous me permettent de faire de la veille mais ne seront pas détaillées ici :

- Le réseau MUST[75]
- La SFHST[76]

Le Consortium 3D de la TGIR Huma-Num
Coordinateur scientifique du consortium : Robert Vergnieux / Jean-Francois Bernard, Archeovision, Bordeaux
Durée : 2014-2017
https://shs3d.hypotheses.org

A l'échelle nationale, l'ex-IRCCyN et le CFV sont membres du Groupe de Recherche Consortium 3D qui a pour objectif de définir les nouveaux usages de la 3D pour le patrimoine et l'archéologie. Ce consortium est une émanation de la TGIR Huma-Num[77] ; la Très Grande Infrastructure de Recherche en Humanités Numériques est issue d'une première ébauche du TGE Adonis fondé, entre autres par Stéphane Pouyllau, un des pionniers pour la diffusion du numérique dans les sciences humaines et sociales (Pouyllau, 2008).

Avec les usages des technologies 3D qui se diversifient et qui occupent une place de plus en plus importante dans les processus d'étude des sociétés humaines et de leur environnement, il y a un réel besoin de structuration des démarches et des bonnes pratiques. Les objectifs du consortium 3D sont :

- de diffuser des recommandations pour l'usage de la 3D : méthodologique, outils, formats,
- de sensibiliser les acteurs de la recherche en sciences humaines et sociales aux enjeux liés aux usages des modèles 3D et définir les bonnes pratiques d'utilisation de la 3D.

Les axes de recherche sont :

1. Établir un lexique avec un vocabulaire commun multi-métiers,
2. Réaliser un cahier des charges type sous la forme d'un livre blanc de bonnes pratiques à destination des institutions et des industriels qui souhaitent mettre en place une démarche 3D patrimoniale,
3. Assurer un état de l'art exhaustif des logiciels et matériels pouvant être utilisés ; en dégageant les impératifs patrimoniaux en vue de fournir aux industriels des contraintes pour le futur développement de matériels/logiciels,
4. Définir des procédures et des conseils pour un archivage numérique pérenne.

A raison d'un minimum de 2 séminaires annuels, il a donc été possible de définir dans un premier temps un vocabulaire commun malgré la forte pluridisciplinarité du consortium (voir la liste des membres ci-dessous). Un deuxième travail a consisté à mettre en place un processus standard, accepté de tous (voir partie ci-après sur la *Déontologie de la 3D patrimoniale : vers un standard*). Celui-ci fait apparaître plusieurs éléments remarquables dont les montées de versions des fichiers numériques 3D, intégrant ainsi le niveau maturité et de validité scientifique des modèles.

> *Ces travaux contribuent aux perspectives de recherche que je me suis fixé sur la création d'une norme pour la structure des données patrimoniales 3D et sémantique.*

Cependant, le consortium 3D se concentre sur des artefacts mono-composants et ne cherche pas à capitaliser les connaissances en contexte des objets patrimoniaux.
Il s'agit là d'un élargissement pourtant nécessaire au regard de ma problématique de recherche ; ces aspects seront développés dans la suite de ce manuscrit. A noter entre autres ma participation au projet européen PARTHENOS[78] qui m'a permis de contribuer à l'écriture d'un livre blanc sur les problématiques de conservation, préservation et interopérabilité des données 3D pour les musées (Joffres, et al., 2017).

[75] Réseau des professionnels de l'information et de la documentation pour les Musées, le patrimoine et la Culture scientifique et Technique
[76] SFHST = Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques
[77] http://humanum.hypotheses.org/1422
[78] www.parthenos-project.eu

Le consortium 3D labellisé par la TGIR Huma-Num a été fondé par 7 équipes de recherche reconnues et ayant déjà une pratique de la production de modèles 3D dans le contexte scientifique des sciences humaines et sociales. On citera particulièrement les chercheurs reconnus comme pionniers de ces problématiques : Philippe Fleury du CIREVE à Caen sur la Rome Antique (Fleury, 1997) ou plus récemment Robert Vergnieux d'ARCHEOVISION à Bordeaux pour l'archéologie virtuelle (Vergnieux, 2003) (Vergnieux, 2007) (Vergnieux, 2009) et Livio de Lucas du MAP à Marseille sur l'intégration du virtuel pour le patrimoine bâti (De Luca, 2006) (Luca, Busayarat, Stefani, Veron, & Florenzano, 2010).

Grâce au consortium 3D, je collabore plus étroitement avec ces 3 structures et j'ai ainsi intégré ce panel de chercheurs de référence sur le patrimoine numérique à l'échelle nationale.

Dix structures forment désormais les membres fondateurs du consortium 3D :

- ARCHEOVISION, Plateforme Technologique pour l'utilisation de la 3D en archéologie (UMS 3657), Bordeaux,
- MAP - Unité Mixte de Recherche du CNRS et du Ministère de la Culture et de la Communication (UMR 3495), Ecole d'architecture de Marseille,
- CIREVE - Centre Interdisciplinaire de Réalité Virtuelle, plateau technique de l'Université de Caen Basse-Normandie,
- EPOTEC – IRCCyN (UMR 6597) & Centre François Viète (EA 1161), Nantes,
- LARA – Laboratoire de Recherches Archéologiques et Architectures (UMR 6566), Nantes – Rennes,
- MSH Val-de-Loire (USR 3501) & CITERES-LAT (UMR 7324), Tours,
- ASM – Archéologie des Sociétés Méditerranéennes (UMR 5140), Montpellier,
- INRAP – Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, Direction Scientifique et Technique, Paris,
- MOM – Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux (UMR 5138), Fédération de recherche sur les sociétés anciennes, Université Lumière Lyon,
- CEPAM – Cultures et Environnements Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge (UMR 7254), Nice.

Le pilotage du consortium est assuré par ARCHEOVISION à Bordeaux et le financement est reconduit chaque année depuis 2014. Il permet de financer à 75% un ingénieur, des stagiaires et du matériel de numérisation 3D mutualisé.
Il est envisagé de reconduire ce consortium pour 2018-2022 en l'élargissant à l'ensemble des acteurs du patrimoine et de l'archéologie numérique au plan national.

Le réseau UDPN (IDEX-SPC)
« Usages Des Patrimoines Numérisés »
Coordinateur scientifique du consortium : Michel Bernard
Durée de l'axe « Muséographie » : 2015-2018
Budget de l'axe « Muséographie » : 14 k€ porté par l'Université Sorbonne-Nouvelle (Paris 3)
http://udpn.fr/spip.php?article103

Le réseau Usages Des Patrimoines Numérisés est un programme scientifique interdisciplinaire et interinstitutionnel qui met en réseau des projets autour d'un axe commun de réflexion : les usages des patrimoines numérisés.
Issue de l'observation du vaste mouvement de numérisation du patrimoine et des contenus culturels, le réseau UDPN se donne pour tâche d'étudier et de concevoir les usages des patrimoines numérisés et d'envisager les évolutions engendrées par la numérisation dans les pratiques et les représentations.
Ce questionnement est mis en œuvre au sein de 16 projets de recherches portés par 21 chercheurs des universités Sorbonne Nouvelle, Paris Descartes, Paris Diderot et Paris 13. Le réseau UDPN est piloté par le Professeur Michel Bernard de Paris Sorbonne.
Les projets adoptent différentes perspectives sur le patrimoine et le numérique, en exploitant des matériaux divers (corpus textuels, images, vidéos, spectacles vivants), en réalisant et concevant des outils et en faisant s'étendre l'enquête menée par le réseau sur plusieurs champs disciplinaires : notamment la littérature, la linguistique, la traductologie, l'informatique, l'histoire, l'histoire des sciences, l'histoire de l'art, l'esthétique, la muséologie, l'audiovisuel, la sociologie, les sciences de l'information et de la communication.

Un des axes engage une recherche sur la modélisation et la simulation du patrimoine numérisé, en tenant compte des usages des applications numériques. Je copilote cette étude avec Geneviève Vidal, sociologue, maître de conférences HDR, laboratoire Labsic, Université Paris 13-Université Sorbonne Paris Cité.
Sont abordées la question des bonnes pratiques en matière de développement d'applications "durables" et celle de la place accordée au versant numérique dans la médiation et la conception d'une exposition. Il s'agit de mettre en évidence tant la nécessité que la complexité de la coordination d'usages scientifiques, culturels et éducatifs des patrimoines numérisés.
Grâce à une évaluation critique des applications numériques, notamment mobiles, existantes dans le secteur patrimonial, nous proposons d'identifier les outils à tester pour envisager de nouvelles interactions entre les publics de musées, les experts, et

les objets patrimoniaux numérisés. L'analyse, objectif de ce projet, vise à aider les institutions muséales à mieux cibler les orientations de leurs applications numériques.

Ces réflexions viennent alimenter les travaux actuels de mes recherches pour définir une approche anthropocentrée de la muséologie numérique du patrimoine (voir partie ci-après de ce manuscrit).

Avec le soutien du réseau UDPN, j'ai ainsi été invité à 1 journée d'étude. J'ai pu co-organiser 2 journées d'étude, participer à 2 écoles d'été et contribuer à 2 ouvrages de synthèse. J'ai intégré le Comité de pilotage du Ministère de la Culture qui travaille sur « Les patrimoines et les dispositifs participatifs ».

Le GDR-MACS

Groupe de Recherche du CNRS en « Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes dynamiques »
http://gdr-macs.cnrs.fr

Du côté de la communauté de l'ingénierie, je participe à plusieurs réseaux de chercheurs. Entre autres, mon intégration au GDR-MACS depuis 2005 m'a permis de mieux connaître mes collègues français spécialistes de mes domaines de recherche.
Le GDR MACS est une structure qui fédère au niveau national et francophone des chercheurs et des industriels travaillant originellement en productique et automatique. On entend par productique la capacité à mettre en place des outils utilisant des techniques informatiques et automatiques pour améliorer la productivité.
Ce groupement de recherche vise à faciliter la diffusion des connaissances sur les recherches actuelles, à valoriser les liens avec l'industrie et à fédérer tous les acteurs de la recherche, institutionnels ou privés. Les 4 axes scientifiques sont :

- systèmes de commande et interactions,
- modélisation, aide à la décision et supervision,
- systèmes de production de biens et de services,
- domaines applicatifs - objets d'études.

Les rencontres du GDR-MACS ont lieu bi-annuellement. Depuis 2006, lors des sessions, je propose[79] systématiquement de faire un état des recherches en cours : projets, thésards, réseaux, problématiques à débattre entre chercheurs…

Pour répondre aux problématiques des axes, plusieurs GT[80] ont été créés. Je participe à 3 d'entre eux et suis très actif au sein de IS3C dont j'assure la co-animation avec Frédéric Demoly depuis 2016 :

- C2EI = Modélisation et pilotage des systèmes de connaissances et de compétences dans les entreprises industrielles,
- Easy-DIM = Ingénierie d'Entreprise et de Système d'Information Dirigée par les Modèles,
- IS3C = Ingénierie des systèmes de conception et conduite du cycle de vie produit.

Le GT IS3C aborde les problématiques liées à la croissance de la valeur des produits et des systèmes pour rendre les entreprises plus performantes. A ces fins, il faut mettre en place des services supports adéquats via des modèles et des outils dédiés. Au sein d'IS3C je contribue aux recherches liées au cycle de vie du produit en intégrant les problématiques de modélisation du temps long et multi-sémantique au sein des modèles conceptuels (voir partie ci-après de ce manuscrit sur *Des ontologies du réel grâce aux modèles spatio-temporels*). En 2017, IS3C évolue et devient IngéFutur pour une "Ingénierie pour l'industrie responsable du futur orientée méthodes, modèles et outils". Cette communauté est portée par la mécanique et ses applications avec la présence conjointe de la 60ème et de la 61ème section du CNU. Nous avons redéfini les objectifs suivants afin de fédérer la communauté :

- Support à l'ingénierie pour les métiers de la conception,
- Prise en compte du client, des produits, des procédés,
- Fournir un PSS[81] innovant intégré pour la Société de demain.

Les thèmes « Conception intégrée », « Eco conception », « Développement durable », « Conception robuste », « PLM », et « Ingénierie système » apparaissent toujours comme des éléments incontournables à l'ingénierie de produit et donc aux centres d'intérêt du GT IS3C, mais ces problématiques doivent prendre en compte « l'usine du futur » de manière plus importante comme élément incontournable dans la conception globale des produits et services. Par exemple, c'est en ce sens que l'équipe de Benoit Eynard à l'UTC développe des travaux pour passer du PLM vers le SLM[82].

Participer au GDR-MACS est essentiel car c'est un lieu de rencontres entre chercheurs qui m'a permis de m'intégrer dans la communauté scientifique. Preuve de cette reconnaissance mon élection comme animateur du GT IS3C en 2016.

[79] On peut par exemple citer (Laroche, 2007) (Laroche, Bernard, & Cotte, 2007) (Laroche, 2008) (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2009).
[80] GT = Groupes de Travail
[81] PSS = Product Service System
[82] SLM = Service Life Cycle

AIP-Primeca
« Ateliers Inter-établissements de Productique et Pôles de Ressources Informatiques pour la MECAnique »
http://www.aip-primeca.net/

Cette structure nationale est née dans les années 2000 de la fusion entre l'AIP (créé en 1984) et de Primeca (créé en 1991). Elle ambitionne de fédérer les acteurs, les outils et les moyens dans le domaine de la productique. Elle est principalement financée par le Ministère de l'Education Nationale, le Ministère de l'Industrie et les régions concernées.
Dédié majoritairement à la 60ème section du CNU, AIP-Primeca rassemble tant les établissements d'enseignement supérieur (IUT, écoles d'ingénieur…) que les laboratoires de recherche. Les actions sont définies autour du triptyque "Formation, Recherche, Industrie". Ses missions sont :

- La fédération de moyens et de compétences pour la formation et la recherche,
- L'innovation pédagogique par l'intégration des technologies de l'information et de la communication,
- L'organisation et le soutien scientifique de manifestations ou congrès nationaux et internationaux,
- Le développement de nouvelles formations à l'international et le soutien à l'industrie.

Actuellement dirigé par le Professeur Benoit Eynard, le réseau est divisé en plusieurs centres de ressources régionaux :

- Auvergne,
- Dauphiné-Savoie,
- Franche-Comté,
- Ile-de-France,
- Lorraine,
- Nord - Pas-de-Calais,
- Pays de la Loire,
- Rhône-Alpes Ouest,
- Toulouse.

Chaque pôle possède son autonomie et définit son mode de fonctionnement propre (par exemple : personnel rémunéré par AIP, achat de matériel spécifique...). A noter une action remarquable menée en 2016 par Yannick Graton : la mutualisation d'outils de CAO par la négociation à l'échelle nationale avec Dassault Système d'un coût et d'un mode de fonctionnement identique pour tous les établissements utilisant le logiciel Catia.

Le réseau AIP-Primeca réalise des actions d'animation scientifique et technique auxquelles je contribue régulièrement dans :

- sa revue internationale : International Journal for Interactive Methods in Design ans Manufacturing (IJIDeM),
- son colloque national qui a lieu tous les 2 ans à La Plagne[83],
- l'organisation de journées thématiques[84] avec des professionnels ou le sponsoring de manifestations nationales ou internationales,
- des formations spécifiques mutualisées avec les établissements du pole,
- la mise en place de plates-formes mutualisées de dimensions industrielles pour des collaborations de recherche et de la formation.

Au niveau local, dans le cadre d'AIP Primeca, je contribue à l'animation du réseau ligérien. J'apporte les cas d'applications auprès des collègues mécaniciens ou bien assure un soutien méthodologique pour leurs projets étudiants ; en ce sens, je réalise des cours pour d'autres établissements du pole sur les plateformes portées par l'Ecole Centrale de Nantes.

Par ailleurs, depuis mon arrivée dans le monde de la recherche, j'ai régulièrement publié mes travaux dans le colloque annuel de la Plagne et j'ai fait partie du comité d'organisation du 11ème colloque.

Avec l'objectif de mutualisation explicité précédemment, je suis responsable de la plateforme de Réalité Virtuelle implantée au plateau B de l'Ecole Centrale de Nantes. La démarche a été initiée par Emilie Poirson et Alain Bernard. Cet outil a été cofinancé par l'AIP-Primeca, l'Ecole Centrale de Nantes, la région Pays de Loire et Nantes métropole.
Dédié aussi bien à l'enseignement qu'à la recherche, cette salle immersive est équipée d'un système de projection 3D passif permettant la simulation en temps réels de modèles complexes. Grâce au système de tracking ART à 8 caméras équipé d'un « full body », il est possible d'immerger complètement l'utilisateur pour des applications diverses allant de la conception de produits dans des environnements complets d'usages... à des simulations de sites industriels ou médicales. En effet, grâce à un

[83] Mes contributions : (Chandrakar A. , Zhang, Laroche, & Bernard, 2017) (Quantin, Laroche, Andre, & Villedieu, 2017) (Ouamer-Ali, Laroche, Remy, & Bernard, 2017) (Ouamer-Ali, Laroche, Remy, & Bernard, 2015) (Laroche, Kerouanton, Servière, & Bernard, 2011) (Daaboul, et al., 2009) (Laroche, Bernard, & Cotte, 2007) (Laroche & Le Loch, 2007)
[84] Mes contributions : (Laroche, Graton, & Martelle, 2010) (Laroche & Kerouanton, 2015)

bras haptique à retour d'effort 6D de la société Haption, il est possible de manipuler virtuellement les objets du monde virtuel pour valider les concepts et gagner en temps de prototypage physique.
Complété par des scanners 3D couleur de Creaform, un système de son immersif et d'autres outils périphériques « low cost » (occulus, kinect, tablettes…) la plateforme a pour objectif de permettre une itération permanente entre le monde réel et le monde virtuel. De plus, grâce à sa localisation sur le plateau B de l'Ecole Centrale de Nantes, il bénéficie d'un atout indéniable pour la formation des jeunes technologues : la configuration physique de la salle est calquée sur le monde industriel de demain : depuis la création du concept en équipe métier, à la conception du monde virtuel dédié et sa visualisation/simulation en salle immersive.

La gestion de la plateforme de RV[85] est assurée par le département IPSI de l'ECN. Assurer la gestion de la RV par des mécaniciens et non par des personnes fournissant de l'outillage comme les informaticiens est un atout fort pour lequel je suis partie prenante. Ce mode de fonctionnement permet la mise en place d'expériences virtuelles orientées sur le besoin des utilisateurs privilégiant ainsi le fond à la forme. La technologie est au service de l'usage et n'est pas considérée comme une problématique en soi sur la plateforme de RV de l'ECN.

2.3.10 Sociétés savantes, collaborations européennes et internationales

Au plan international les recherches que je mène s'intègrent dans un réseau de sociétés savantes et de laboratoires étrangers.

Dans le champ de l'ingénierie, je participe activement dans la communauté du CIRP que nous nous allons détailler ci-après.
Dans le champ du patrimoine et de l'archéologie, mon appartenance à des réseaux internationaux me permet d'assurer une représentation française sur la thématique et d'assurer une veille continue :

- membre de l'ICOMOS auprès de l'UNESCO pour mon expertise sur le patrimoine scientifique et technique par les outils du numérique,
- membre du réseau international INNOVA[86] des archéologues utilisant le virtuel.

Les échanges scientifiques menés avec des laboratoires étrangers permettent tant l'alimentation de la réflexion que la validation des méthodologies :

- depuis 2007 avec le LAMIC, Laboratoire de muséologie et d'ingénierie de la culture, Université Laval à Québec au Canada,
- depuis 2011 avec l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège en Belgique (soutien au réseau européen COST Action TU 0801),
- depuis 2013 avec la Haute Ecole Arc Conservation-restauration à Neuchâtel en Suisse (soutien au réseau européen COST Action TD 1201),
- depuis 2016, une nouvelle collaboration est en cours avec l'Ecole Française de Rome en Italie (accord Erasmus+).

Je vais détailler ces coopérations à l'exception de la dernière qui est très récente ; elle consiste en l'utilisation de la Réalité Virtuelle en archéologie du bâti pour la compréhension de mécanismes très anciens et la modélisation du site romain du palatin (Quantin, Laroche, André, & Villedieu, 2017) (Quantin, Laroche, Andre, & Villedieu, 2017).

Le CIRP
« Collège International pour la Recherche en Productique ou International Academy for Production Engineering »
http://www.cirp.net

Le CIRP est une organisation scientifique internationale dans le domaine du Génie Industriel (manufacturing et production industrielle) qui contribue à la conception, l'optimisation, le contrôle et la gestion des processus, des machines et des systèmes, des procédés et des technologies de fabrication.
Cette communauté a comme objectif premier d'aider les entreprises à définir et mettre en place des méthodes suite à l'évolution rapide des nouveaux procédés de fabrication. Créée par le Général Pierre Nicolau en 1951 c'est une association à but non lucratif d'origine française qui réunit désormais plus de 600 chercheurs et industriels internationaux représentant 50 pays.

[85] RV = Réalité Virtuelle
[86] Virtual Archaeology International Network

Aujourd'hui le CIRP veut promouvoir la recherche et le développement en contribuant à la croissance économique mondiale et le bien-être de la société. Structurée sous la forme d'une société savante, c'est désormais un des plus grands réseaux internationaux d'industriels et de chercheurs reconnus.
Avec 10 STC[87], je m'intéresse plus particulièrement à deux d'entre eux :

- Le STC Dn - Design[88] sur les aspects méthodologie des processus d'ingénierie, aide à l'utilisateur par des systèmes d'intelligence artificielle, les bases de données et de connaissances pour structurer les modèles numériques,
- Le STC O - Production Systems and Organizations[89] pour l'organisation des entreprises, et les modèles associés aux systèmes de production ou de services avec, entre autres, le management des opérations qui intègre les points de vue humains.

En 2006, j'ai présenté la première fois mes recherches à la conférence CIRP Design afin de confronter la méthodologie de capitalisation/modélisation/exploitation des connaissances patrimoniales à la communauté scientifique (Laroche, Bernard, Cotte, & Deniaud, 2006). Désormais je participe à l'ensemble des réunions bi-annuelles (Winter meetings et CIRP General Assembly en août) et propose régulièrement des papiers à la conférence internationale CIRP Design Seminar[90].
En 2013, lors de l'Assemblée Générale à Copenhague, j'ai présenté l'ensemble de mes travaux de recherche (Laroche F. , 2013) en définissant l'objectif suivant : « guider l'entreprise par les connaissances du passé en mixant le patrimoine et les outils du virtuel ». Depuis, ma thématique de recherche est connue et les échanges avec d'autres collègues internationaux dans leur domaine d'expertise me permettent d'enrichir mes approches. J'ai ainsi présenté plus en détail mes travaux lors de 2 papiers à la General Assembly, donc devant un public de chercheurs de renommée internationale (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015) (Laroche, Dhuieb, Belkadi, & Bernard, 2016).

> *Le CIRP est une communauté internationale très ressourçante pour mes travaux de recherche. On notera tout particulièrement le Keynote réalisé en 2014 par Eric Lutters (Lutters, van Houten, Bernard, Mermoz, & Schutte, 2014). Un des objectifs de ce papier est de replacer l'homme au cœur du processus d'ingénierie afin de lui redonner toute sa place. Après plus de 50 ans d'avancées techniques et d'optimisation des machines, l'homme a été délaissé et est devenu un simple « facteur ». En ce sens, la communication scientifique de Eric Lutters est pour moi fondatrice d'une ère nouvelle pour des travaux de recherches d'ingénierie intégrant les aspects humains.*
>
> *Au sein du CIRP je contribue à enrichir les approches contemporaines en numérisation 3D par l'intégration des contraintes des objets patrimoniaux et proposé un modèle de représentation produit intégrant les connaissances du passé (Laroche, Bernard, & Cotte, 2007)*

J'ai été admis comme membre Research Affiliate du CIRP en 2013 (groupe de travail réservé aux « jeunes » chercheurs). Depuis août 2017, j'ai été accepté comme membre à part entière, dit « Associate Member ».
Après avoir organisé à Nantes la 20ème conférence CIRP Design en 2010 puis la 64ème assemblée générale du CIRP en 2014, je suis organisateur et co-chairman de la 28ème conférence CIRP Design qui aura lieu à Nantes en 2018.
Ma collaboration au sein du CIRP porte également sur la richesse des discussions scientifiques, des collaborations, des échanges de pratiques pédagogiques ou de stagiaires pour « aligner » nos modèles dans nos domaines.

De l'entreprise Creaform3D au Laboratoire LAMIC, Université de Laval à Québec
www.creaform3d.com ➔ *www.ametek.fr*
www.lamic.ulaval.ca

Cette collaboration franco-québécoise est née d'une rencontre avec l'entreprise Ametek.
Charles Mony a soutenu sa thèse de doctorat à l'Ecole Centrale de Paris en 1992 ; il était sous la direction de Jean-Claude Bocquet et Alain Bernard (Mony, 1992). Puis, en 2002, Charles Mony a créé au Canada une société dédiée à la numérisation 3D : Creaform3D. Pionnière dans le domaine du reverse-engineering, nous avons, dès 2004 pu acquérir un scanner, réaliser des expérimentations tant en pédagogie qu'en recherche. Faisant partie du usergroup d'origine, il a même été envisagé de créer une antenne de Creaform rattachée à l'Ecole Centrale de Nantes avec du personnel détaché par l'entreprise. Fort de son succès, en 2013, Creaform3D sera racheté par la société Ametek, leader international dans les technologies d'acquisition 3D.

[87] STC = Scientific Technical Commitees
[88] Chairman : Prof. Eric Lutters
[89] Chairman : Prof. Roberto Teti
[90] Mes contributions : (Laroche, Bernard, Cotte, & Deniaud, 2006) (Laroche, Bernard, & Cotte, 2008) (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2010) (Xu, Bernard, Perry, & Laroche, 2012) (Ouamer-Ali, Laroche, Bernard, & Remy, 2014) (Quantin, Hervy, Laroche, & Bernard, 2016).

C'est lors des premières journées du usergroup dédié à la numérisation 3D que des affinités scientifiques se sont créées avec le LAMIC, le Laboratoire de Muséologie et d'Ingénierie de la Culture qui se situe au sein de l'Université de Laval à Québec (Canada). Utilisateurs de la technologie 3D tout comme notre équipe de recherche, nous avons des problématiques scientifiques communes liées à la capitalisation et la valorisation du patrimoine par les outils du virtuel.
Le LAMIC a été fondé en 2004 par le professeur Philippe Dubé. Grâce à une subvention de 3,4M can$ de la Fondation Canadienne de l'Innovation, le laboratoire a pu s'installer dans l'ancien centre muséographique de l'université. Il occupe des locaux s'étendant sur une superficie de 500 m^2.

Ce laboratoire est une petite structure constituée d'un nombre variable de personnes. On y trouve actuellement 3 doctorantes (muséologie, histoire de l'art ou encore ethnologie), son directeur et occasionnellement un polytechnicien (spécialisé en informatique). Des étudiants de 2ème et 3ème cycle s'y trouvent également de manière régulière.
Le laboratoire se veut être une plate-forme d'expérimentation en muséologie : musées, artistes et organismes proches sont encouragés à venir y découvrir les possibilités que recèlent pour eux les nouvelles technologies. Il se compose :

- D'un laboratoire de captation équipé d'un poste de numérisation 3D (scanner 3D) et d'un poste d'archéométrie (microscope électronique),
- D'un laboratoire de visualisation (cyclorama, station de téléprésence, théâtre 3D),
- D'un laboratoire de spatialisation (panoscope 360°) communiquant directement avec une salle de montage vidéo…

Le cas d'application qui a réuni notre équipe de recherche française et les canadiens a porté sur le monastère des Ursulines de Québec (Dubé & Courchesne, 2012).
Cet édifice est reconnu patrimoine de l'UNESCO. Il a été fondé le 1er août 1639 par Marie de l'Incarnation et Marie-Madeleine de Chauvigny de la Peltrie qui avaient entrepris un voyage depuis la France. Initialement dans la Basse-Ville de Québec et dans un immeuble étroit, il fut décidé de construire un nouveau bâtiment en 1637 sur un terrain cédé par la Compagnie des Cent-Associés. Ce monastère fut détruit (tout ou en partie) et reconstruit à plusieurs reprises pour diverses raisons. Un incendie le détruisit complètement en 1651, et en partie en 1686 (chapelle extérieure). En 1870 le monastère devint trop étroit pour les religieuses et leurs élèves, et on y ajouta donc la chapelle Sainte Angèle, qui plus tard sera dédiée à Marie de l'Incarnation. Enfin, en 1900, on décida d'agrandir le Chœur des religieuses mais pour des raisons techniques (risque d'effondrement) il fallut également reconstruire l'ancienne chapelle.
Même si classée au patrimoine mondial, il est impossible de visiter cette chapelle afin de pouvoir la conserver dans le meilleur état possible.

> *La collaboration avec le LAMIC a porté tant sur les méthodologies et les outillages pour numériser et structurer digitalement le site patrimonial que sur la muséologie virtuelle à mettre en place pour valoriser le site virtuellement.*

Les actions conjointes menées :

- Partage d'expériences et de savoir-faire par l'accueil de stagiaires de l'Ecole Centrale au sein du LAMIC : Elsa Goarrin, Camille Autran et Géraud Lefalher,
- Participation du professeur Philippe Dubé à mon jury de thèse et possibilité d'un post-doc envisagé en 2008,
- Organisation de journées d'études francophones, sessions spéciales dédiées au patrimoine numérique dans les conférences internationales.

Le réseau européen COST Action TU0801 et l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège, Belgique
http://www.geo.ulg.ac.be

Depuis 2011, grâce à l'IRSTV, une coopération avec l'Université de Liège et plus particulièrement avec l'équipe du professeur Roland Billen a été initiée.
La rencontre entre nos équipes de recherche s'est réalisée autour des réflexions sur la modélisation des données urbaines issues de connaissances patrimoniales. Deux objets sont étudiés et comparés :

- la maquette de Nantes en 1900, voir la description du projet ci-avant,
- la maquette de la ville de Liège de 1730, acquis par l'université en 1907.

A la différence de Nantes1900, la maquette belge n'est pas exposée au public à cause des conditions de conservation et de préservation très contraignantes. Mais, tout comme le projet nantais, une numérisation 3D a été réalisée et est devenu le point de départ des études. L'objectif final consiste à réaliser une modélisation pour une porte d'accès à l'ensemble des connaissances de la ville. L'équipe belge développe un système appelé SpatioData pour devenir la gestion interne des données 3D historiques assurant une interopérabilité avec les bases de données extérieures et les standards du web sémantique (Poux, Neuville, Hallot, & Billen, 2016).

Les deux projets ont également en commun l'aspect pluridisciplinaire de la recherche : géomaticien, archéologue, physicien, mécanicien, infographiste, historien, muséologue…
Ces études ont permis de démontrer que les méthodologies développées à Nantes sur le patrimoine numérique peuvent se confronter à d'autres approches comme celles développées à Liège sur les modèles 3D de villes anciennes. Plusieurs publications communes ont été réalisées par nos laboratoires (Hervy, et al., 2012) (Billen, et al., 2012).

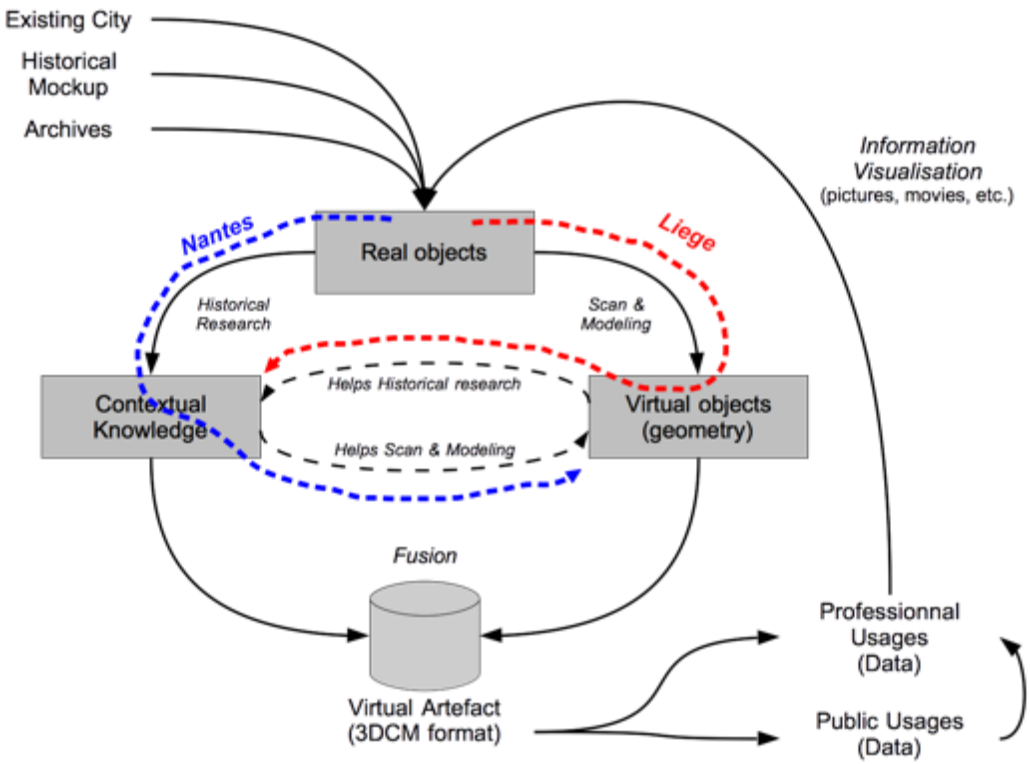


Figure 42 - *Comparaison de la méthodologie entre Nantes1900 et Virtual Leodium (Billen, et al., 2012)*

Orientée sur la thématique des maquettes historiques de villes, notre coopération consiste à développer un modèle européen de données permettant le stockage d'informations urbaines hétérogènes[91] ainsi que de nouvelles techniques de visualisation des données urbaines.

Le premier échange réalisé fut l'accueil de Benjamin Hervy à l'Université de Liège comme stagiaire ingénieur ; c'est lui-même qui continuera en thèse de doctorat sur le projet Nantes1900 (voir descriptif ci-avant). Puis la collaboration s'est renforcée :

- accueil de chercheurs et séjours de recherche dans nos structures respectives,
- accueil de post-doc, entre autre dans le cadre des TNA du projet européen Visionair ou du réseau européen COST Action TU0801),
- échange de stagiaires : géomaticiens et ingénieurs.

Le réseau COSCH TD 1201 et le projet Schema-TEC
Partenaire : Haute Ecole Arc Conservation-restauration, Neuchâtel – Suisse
Durée : 2014-2016
http://www.he-arc.ch/cr

Les approches de conservation-restauration classiques peinent à s'appliquer aux caractéristiques et aux besoins spécifiques du patrimoine technique et industriel. Les interventions minimales à réaliser et la nécessité de leur réversibilité sont en conflit avec des stratégies de remise en fonctionnement, nécessitant parfois des réparations invasives ou le changement de pièces, mais permettant d'un autre côté de revaloriser ces objets. Schema-TEC ambitionne de combler une lacune : celle de l'absence de méthodologie descriptive des objets fonctionnels scientifiques et techniques patrimoniaux adaptée à leur conservation-restauration.

[91] Thèse de Cyril Carré en cours à l'Université de Liège.

Le projet Schema-TEC est piloté par le Docteur Christina Degrigny et son collègue Romain Jeanneret.
Le travail mené avec le consortium du projet a permis de valider la nouvelle méthodologie. Elle se compose de 8 niveaux de lecture. Ils permettent de passer intuitivement de la compréhension globale de l'usage des objets à celle plus détaillée de ses composants, organes fonctionnels jusqu'au modèle complet en systémique. Basés sur des représentations 2D, complétés parfois de représentations 3D ainsi que d'animations des mécanismes complexes, ils bénéficient également de l'apport des diagrammes SADT ou FAST pour visualiser l'impact des altérations sur les chaînes fonctionnelles. Ainsi c'est l'ensemble des outils virtuels de l'ingénierie technique qui a été analysé, optimisé et adapté. (Degrigny, Jeanneret, Köhler, Laroche, & Baudin, 2017)
La méthodologie de représentation schématique de la fonctionnalité scientifique et technique ne se limite pas seulement à améliorer la compréhension du fonctionnement, mais couvre l'ensemble du projet de conservation-restauration (constat d'état, diagnostic, propositions d'interventions adéquates en vue d'éventuelles remises en fonction). Ainsi les schémas techniques réalisés ne sont pas seulement des outils d'observation et de description mais également des moyens essentiels d'analyse et support à la discussion entre les acteurs d'un projet de conservation-restauration.

L'objet est le point de départ de la démarche. Il est photographié dans un état proche de celui de son utilisation (niveau 1). Des documents d'archives, voire des schémas illustratifs du contexte d'usage peuvent enrichir le propos (niveau 2) pour replacer l'objet photographié dans son contexte historique d'usage. Un premier organigramme (fonctionnel) décrivant les principaux organes fonctionnels des objets est alors proposé (niveau 3). Ces mêmes organes sont alors photographiés en gros plan, les clichés pouvant être optimisés (illustration d'identification) afin d'améliorer leur lisibilité et l'information transmise (niveaux 4 et 5). Leur fonctionnement est ensuite décrit à l'aide de schémas techniques simplifiés (représentation fonctionnelle et dessin technique fonctionnel) permettant de mieux détailler les interactions et degrés de liberté entre les différents éléments de chacun des organes (niveau 6). Les éléments des organes se déplaçant dans plusieurs plans rendent le fonctionnement global de ces derniers difficile à percevoir sur une vue 2D. Ces groupes de pièces peuvent requérir un autre mode de représentation comme une ou plusieurs vues en perspective isométrique, complétée(s) parfois par séquences fonctionnelles, voire des animations 3D (niveau 7). Le dernier niveau reprend l'organigramme de base (niveau 3) en détaillant le fonctionnement de chaque organe (niveau 8). Ces huit niveaux ne sont pas systématiquement utilisés. En fonction de la complexité de l'objet, certains sont davantage développés que d'autres.

Afin de pouvoir encapsuler, stocker et valoriser ces connaissances, une base de données en ligne Schema-TEC (schematec.he-arc.ch) a été créée dans le cadre du projet. Elle permet la sauvegarde complète des projets construits selon la méthodologie Schema-TEC mais également leur consultation. A terme elle devrait devenir le support du savoir partageable entre plusieurs communautés concernées par la conservation-restauration des objets scientifiques et techniques patrimoniaux fonctionnels.

Cette rencontre avec le milieu des professionnels de la restauration des œuvres a permis de donner à mes travaux de recherche une dimension non abordée jusqu'à présent : l'intégration de l'incertitude dans les modèles numériques pour rester le plus fidèle possible à la réalité. En effet, la digitalisation d'un objet a souvent tendance à restituer une version simplifiée de la réalité ; malheureusement, pour réaliser un constat d'état - travail préliminaire à toute restauration – la surface de l'objet étudié doit révéler tous ses défauts. Comment intégrer un objet non parfait qui évolue temporellement dans un modèle virtuel idéalisé : cette problématique est à l'origine du projet ANR RéSeed et de la thèse associée.

La collaboration avec la Haute Ecole Arc Conservation-restauration de Neuchâtel en Suisse s'est concrétisée par :

- des accueils de chercheurs,
- des échanges de stagiaires ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes,
- la participation aux réunions du réseau européen COSCH pour l'expertise des technologies avancées pour la conservation et la restauration des œuvres culturelles,
- la participation à une summer school européenne dédiée à la photogrammétrie (COST-Action TD 1201),
- une publication commune en 2017 (Degrigny, Jeanneret, Köhler, Laroche, & Baudin, 2017).

2.3.11 Synthèse du playground

Au début de cette partie, en préliminaire à l'état des lieux des projets et travaux réalisés, je rappelais les deux problématiques qui se sont dégagées à l'issue de ma thèse de doctorat :

- Une **problématique économique et industrielle**. Ne pas tendre vers un patrimoine trop numérique mais trouver un juste équilibre entre virtualisation et pérennisation/valorisation par le virtuel,
- Une **problématique scientifique**. Comment représenter la connaissance patrimoniale : s'orienter vers une représentation virtuelle de la géométrie physique ou une modélisation digitale de la sémantique portée par l'objet d'étude patrimonial ?

L'application des outils de l'ingénierie – et plus particulièrement des domaines de l'Ingénierie des systèmes et du Génie industriel - au champ de l'histoire et du patrimoine culturel en particulier implique une augmentation des dimensions à considérer plutôt qu'une restriction du spectre d'étude. Ainsi, comme nous avons pu le décrire, les travaux scientifiques sont nombreux. Je les envisage comme des expérimentations permettant d'explorer certaines investigations : parfois des échecs car ne présentant pas d'aboutissants d'autres seront des réussites dégageant de nouvelles perspectives de recherche. Ces recherches s'alternent :

- tantôt sur l'application d'outils provenant de l'ingénierie (web sémantique, fouille de données, réalité virtuelle),
- tantôt sur des considérations philosophiques ou sociologiques (prise en compte de l'utilisateur, de l'expert, etc.).

D'un point de vue thématique de recherche, l'ensemble des contributions crée un maillage comme illustré par la figure présentée au début de ce chapitre sur « Ma trajectoire scientifique ». Le parcours évolue au fur et à mesure des années mais permet de définir le périmètre général des travaux. Il se situe à la frontière de plusieurs antipodes. L'ensemble des projets réalisés, des thèses encadrées ou des réseaux/collaborations menés présentent tous des caractéristiques similaires que je répartis en six groupes. Nos travaux constituent donc un équilibre à définir par un barycentre à plusieurs composantes qui se partagent aux extremums comme suit :

- La définition du corpus manipulé : de la **géométrie** physique à la **sémantique** déduite ou induite par l'étude,
- L'échelle des études : de l'**objet** (le produit ou l'artefact) au **système** (le processus industriel) jusqu'au **système hybride** (l'objet et son contexte),
- Les modes de représentation : le monde du **réel** avec les objets physiques et le monde du **virtuel / numérique** avec des maquettes qui ne sont que des représentations/interprétations ; l'hybridation par de la **réalité augmentée** est aussi une alternative envisagée,
- La définition de la frontière entre l'**homme** et la **machine**, dans laquelle la dualité ne doit pas se restreindre à suppléer l'homme par la machine – avec l'opposition 100% manuelle à 100% automatique - mais bien positionner nos recherches comme une **Aide à la décision**,
- La résolution d'une problématique industrielle avec un apport sur de l'**outillage** ou la résolution d'une problématique scientifique avec un apport sur de la **méthodologie**,
- La présence d'une interdisciplinarité des métiers avec le partage entre les **Sciences de l'Ingénierie** et les **Sciences Humaines & Sociales** pour l'histoire & le patrimoine.

Plusieurs contraintes secondaires rendent nos recherches interdisciplinaires :

- La définition de l'**objet** qui crée le projet et le **projet** qui est prétexte à la création de l'objet.
- La dichotomie du **fond** des objets étudiés et de la **forme** en mettant avant tout en exergue la narration et non les services supports (effet buz).

Le schéma de la figure suivante positionne les projets appliqués réalisés en fonction des critères que nous venons de lister.

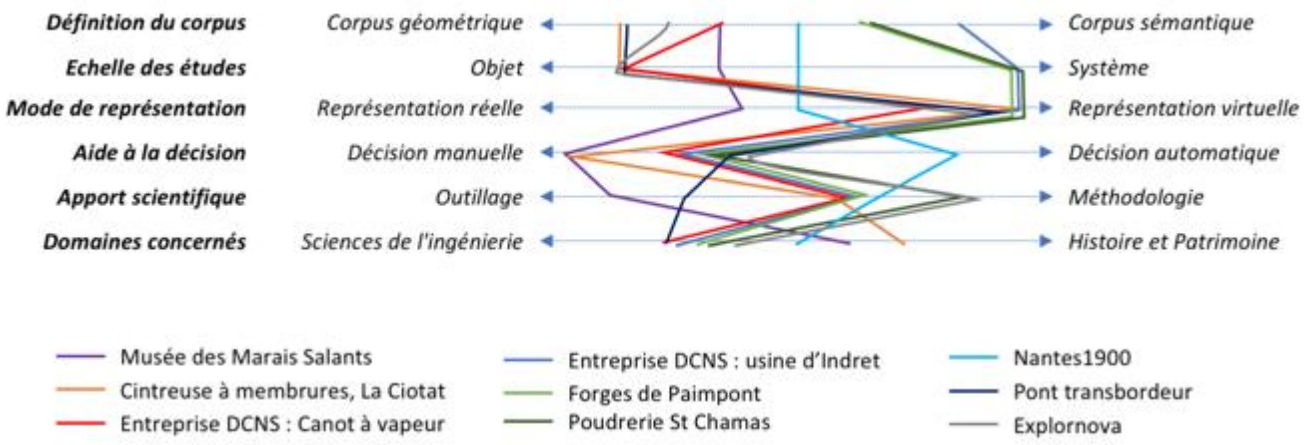


Figure 43 - *Barycentre de mes problématiques scientifiques appliquées aux projets réalisés*

Cette analyse démontre que :

1. Peu de projets permettent d'explorer des pistes alliant la réalité physique et les connaissances associées,
2. Peu de projets intègrent tant l'objet d'étude que son contexte,
3. Beaucoup de projets sont orientés vers le virtuel mais peu réitèrent avec le réel,
4. L'usager est encore très acteur du processus ; l'aide à la décision peut prendre encore plus de place, comme par exemple par le machine learning,
5. La tendance générale est orientée vers les Sciences de l'ingénierie, confirmant ainsi mon appartenant à la 60ème section du CNU.

Pour combler les manques de cette analyse et démontrer les 4 premières problématiques, de nouveaux projets appliqués sont en cours de montage. Les récents travaux m'ont amené par exemple à proposer une nouvelle forme d'exploitation des connaissances : la rematérialisation de l'objet par un artefact physique fonctionnel ou non, à échelle 1:1 ou réduite. Cette modalité vient valider les hypothèses d'interdisciplinarité dans le processus de rétro-conception : il s'agit là de confronter directement les utilisateurs à l'objet afin de pouvoir mieux le décrire, le critiquer, transmettre les connaissances et savoirs dont il est porteur…

Pour les futures thèses de doctorat et projets en cours de montage, on peut citer par exemple :

- La sauvegarde des Salons Mauduit à Nantes par la numérisation 3D, la création d'une base de données historiques en ligne et une application en réalité augmentée in-situ (Laroche & Kerouanton, 2016).
- L'analyse systémique du bassin industriel du bas Chantenay avec sa modélisation en virtuel couplée à une base de données SIG temporalisée (Laroche F. , 2014).
- Le théâtre de la foire de Paris à la fin du 18ème siècle avec une thèse co-encadrée par Françoise Rubellin du laboratoire L'AMo[92] pour l'utilisation d'intelligence artificielle dans un système de Réalité Virtuelle sur un patrimoine littéraire (démarrage novembre 2017). Un dépôt de projet ANR est prévu pour 2018.
- La modélisation et la simulation virtuelle de la salle à manger de Néron avec impression 3D d'une maquette fonctionnelle pour une exposition muséographique (Quantin, Laroche, Andre, & Villedieu, 2017). Grâce à ce projet, la rencontre entre différents partenaires a permis le dépôt d'un projet ANR pour permettre « la gestion des couches sémantisées du patrimoine architectural en archéologie ».

[92] Laboratoire L'AMo, L'Antique et le Moderne, Université de Nantes, EA CNRS 4276 – http://lamo.univ-nantes.fr

2.4 Positionnement de mes travaux dans les communautés scientifiques

2.4.1 Problématique et cadre général de mes apports : le « KLM for Heritage »

Comme le démontre l'analyse des cas d'études, réseaux et collaborations mis en place pour supporter nos recherches, deux paradigmes animent nos travaux :

- d'un côté la **matérialité physique** de l'objet lui-même : les outils de contrôle et de mesure dimensionnelle (principalement les théodolites à balayage laser et les outils de stéréovision), les outils de la Conception Assistée par Ordinateur, l'imagerie de synthèse et la rétro-conception (Bernard, Ammar-Khodja, Laroche, & Perry, 2007),
- d'un autre côté la prise en compte **du sens et de la fonction d'usage** (Laroche, Bernard, & Cotte, 2008) portés par l'objet dans **son contexte** (Dhuieb, Laroche, & Bernard, 2015): la gestion des connaissances avec les métadonnées, la gestion de documents, les bases de données, le traitement automatique du langage…

Il s'agit donc de répondre aux questions associées à la manipulation des connaissances telles que définies précédemment :

- Identifier quoi et comment stocker cette connaissance patrimoniale numérique ?
- Comment accéder efficacement à ce qui est stocké ?
- Comment partager ce qui est stocké ? Quels usages à définir ?

*Nos recherches s'inscrivent dans le domaine de la **Gestion des Connaissances** plus communément appelée KM pour Knowledge Management. Cependant, afin de ne pas considérer les connaissances comme des éléments inertes - simples résultantes de savoir - nous positionnons les recherches sur l'ensemble du cycle de vie des connaissances patrimoniales : « KLM for Heritage ».*

Comme détaillé au début de ce chapitre relatif aux apports de ma thèse et les problématiques qui en découlent, et grâce à l'ensemble des cas d'études, projets et réseaux auxquels j'ai participé, il est maintenant possible d'étayer l'état de l'art et les apports réalisés. Le « KLM patrimonial » s'inscrit dans la lignée du cercle vertueux de la connaissance selon Grundstein (Grundstein, 2009). La méthodologie est décrite par trois activités du processus de patrimonialisation. Elles définissent les liens et frontières techniques proposés pour prendre en compte cette nouvelle forme d'ingénierie industrielle intégrant les connaissances du passé :

1. La capacité à **manipuler des connaissances**. Depuis la captation des traces de l'objet : il s'agit ici de capturer et stocker des éléments de type 3D, documentations, analyses, archives.... Deux processus sont mis en parallèle : la capacité à numériser l'objet et la possibilité de capitaliser les connaissances associées pour permettre son analyse et sa compréhension.
2. Les systèmes d'information qui viennent en support à **la gestion des connaissances**. Depuis la modélisation numérique de l'objet physique pour un traitement et une exploitation à des fins d'expertise et de chaînage des connaissances, il s'agit ici de mettre en lien les éléments entre eux, par la mise en place, par exemple, d'un "container de connaissances" : associer la documentation et les archives à la géométrie, au fonctionnement de l'objet.
3. La Réalité Virtuelle comme moyen **d'exploitation des connaissances**. Cette phase va permettre d'aller jusqu'à la conservation et la valorisation de l'objet numérique par la visualisation et l'exploitation des données à des fins de transmission et de médiation. Il s'agit d'exploiter le container de connaissances à différents niveaux : de la médiation pour le grand public, à l'outil d'analyse pour la recherche en histoire, en passant par l'amateur curieux ; et dans différentes situations : sur site patrimonial, en musée, à distance...

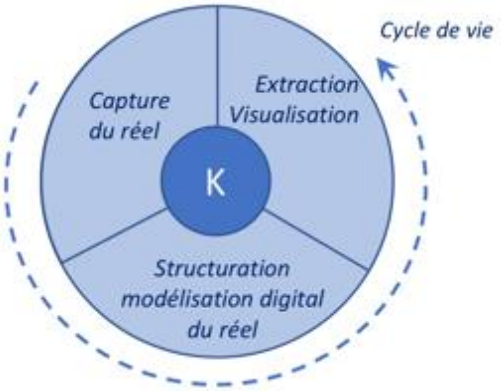


Figure 44 - *Cycle de vie des connaissances patrimoniales*

En pratique, il est très difficile de ne pas faire chevaucher ces trois phases. Comme nous allons le voir dans cet état de l'art, ces domaines scientifiques sont en tout ou partie liés au processus de capitalisation des connaissances historiques :

- Difficulté de distinguer la structuration des informations et la capture de la connaissance de l'historien,
- Multiplicité des modalités d'appréhension (visuelle ou non) de ces informations pour différentes catégories d'utilisateurs (conservateurs, équipes techniques du musée, historiens, visiteurs, etc.) via des interfaces homme machine dédiées avec visualisation spécifique (2D, 3D, interfaces tactiles, réalité virtuelle/augmentée).

Précisons que l'intégration des connaissances se fait sous la forme d'une **aide à la décision** pour l'expert métier, l'expert développeur ou l'utilisateur/client. Il est donc nécessaire de repositionner l'humain au cœur du système, des outils et des framework scientifiques. Comme le propose Emilie Poirson (Poirson, 2016), cette approche anthropocentrée doit permettre à l'homme de rester acteur du projet et non le subir. Une approche **interdisciplinaire** et **unifiée** est donc nécessaire pour pouvoir **capitaliser/modéliser/restitue**r la connaissance en fonction de l'usager concerné.

Pour résoudre ces problématiques, je m'appuie sur des thématiques scientifiques reconnues. Nous allons les développer dans cette partie afin de positionner mes travaux de recherche dans l'état de l'art des domaines concernés.

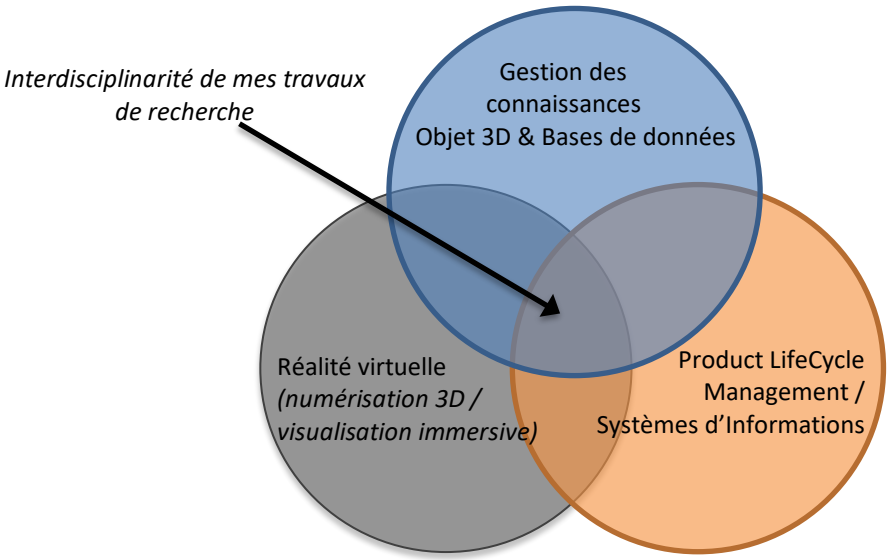


Figure 45 - *Définition des domaines de recherche concernés*

La figure précédente schématise les liens entre les domaines scientifiques concernés :

1. La capture du monde réel par la **Gestion des connaissances** et le **Reverse-engineering** (Remy, Laroche, & Bernard, 2011). La finalité de l'ingénierie des connaissances est de fournir une assistance à la capitalisation et l'interprétation de modèles manipulés. La **gestion des connaissances** est formalisée par des méthodologies comme définies par Grunstein, Ermine ou Nonaka et prend appui sur des outils issus de l'intelligence artificielle.
2. La structuration / modélisation sous une forme numérique du monde réel digitalisé. Les produits présentant un **cycle de vie long** doivent disposer de modèles d'information à la fois complets et actualisés en contexte. Il faut donc que les éléments archivés évoluent sur leur contenu et sur leur structuration en fonction de l'état de la connaissance (Bernard, Laroche, & Hervy, 2015). Les **SI** mis en place pour opérationnaliser ces modèles doivent pouvoir évoluer, tout comme la connaissance qu'ils supportent ; on parlera **d'interopérabilité dans le temps**. Les usagers doivent également disposer de mécanismes d'enrichissement et d'interrogation de ces éléments. En ingénierie, il s'agit souvent de systèmes, de plus en plus complexes, voire de « systèmes de systèmes » interagissant avec d'autres systèmes. Ces systèmes, définis et conçus selon différents points de vue et par différents acteurs, évoluent au cours du temps. Leur représentation est donc également **multi-échelle** comme nous allons le voir ci-après. Grâce à des framework opérationnels pour intégrer ces multi-dimensions et le contexte d'usage, nous proposerons un **PLM dédiée aux connaissances patrimoniales**.
3. Enfin, le 3ème thème sur la **Réalité Virtuelle** est positionné pour extraire et visualiser les connaissances. Dans un premier temps nous verrons comment l'utilisation des outils de capture du support physique de l'objet comme la **numérisation 3D** peut devenir un support pour les connaissances capitalisées. Enfin, nous contribuerons à la définition des nouveaux **moyens d'interactions en RA/RA** à la fin de cette partie de manuscrit. Les SI devront donc prendre en compte les contraintes de la RV mais nous ne prétendrons pas permettre de faire avancer la palette d'outils informatiques de la RV, laissant ce domaine à d'autres sections du CNU (Moreau, 2009).

2.4.2 La gestion des connaissances

Pourquoi prendre en compte les connaissances ?
Au XIXème siècle l'invention de la machine à vapeur a permis d'impulser une expansion des moyens de production. Une rupture s'est observée dans les systèmes techniques et industriels en transformant l'artisanat (Domestic system) en systèmes proto-industriels (Manufactory System).
Avec la mise en place de l'OST[93] par Frédéric Taylor et Henri Ford au début du XXème siècle, c'est tout le fonctionnement de l'entreprise qui doit changer. L'apparition d'une science des organisations, aujourd'hui appelée Génie Industriel, a fait émerger de nouveaux métiers comme celui des services supports à la production (le PA[94] de Henri Fayol) ou l'apparition des Bureaux d'Etudes pour « penser » les objets complexes. Pendant la seconde guerre mondiale, la pénurie de main d'œuvre dans les usines ne fera que renforcer ce besoin d'optimisation de la production pour être toujours plus réactif à la demande ; c'est ainsi que des entrepreneurs comme André Citroën vont, dès lors, prendre une place importante dans la structuration des entreprises de demain.
A partir du milieu du XXème siècle, les méthodes de travail évoluent. Le bureau d'étude ne doit plus simplement penser un objet, Herbert Simon propose de l'intégrer dans un système technique complet. Basculant du monde de la conception au Design - dans le sens *artistique* du terme - de nouvelles méthodes de conception sont mises en place grâce à des processus adaptés. Les objets doivent transcender la technologie pour faire apparaître leur fonction, ce sont les travaux menés sur les théories du Design comme le propose Georges Fadel avec le concept d'affordance (Maier & Fadel, 2009).

Aujourd'hui, le secteur industriel est à un nouveau virage de son évolution : le mode traditionnel de fonctionnement de l'usine doit encore changer. Tant du point de vue de la fabrication que celui de la conception. L'arrivée du numérique remet également en question la place de l'homme dans les systèmes techniques : tant du point de vue de l'usage que de celui du concepteur-fabricant. L'objet industriel n'est plus porteur d'une simple fonction, il devient conteneur de connaissances et de compétences (Kadj-Hamou, Aldanondo, & Caillaud, 2004). C'est une nouvelle révolution industrielle qui se produit et induit de nouveaux paradigmes dans les domaines scientifiques (Kuhn, 1970).
Comme l'analyse Engelbert Westkämper, cette 4ème révolution industrielle réoriente les préoccupations industrielles (Westkämper & Walter, 2014) : il n'est plus question de produit, ni de processus mais de systèmes complexes (Landherr, Schneider, & Bauernhansl, 2016). Cette mutation engendre alors des multiples visions et plans stratégiques autour du concept de l'usine du futur, qui sera le mode de fonctionnement de l'usine de demain. Que ce soit à l'échelle nationale ou européenne, des roadmaps ont été établies afin d'esquisser le chemin vers une usine intelligente qui intègre les technologies de l'information au cœur des processus industriels (IFFRA, 2013) (AFM, 2015). On parle désormais de Systèmes Cyberphysiques[95].

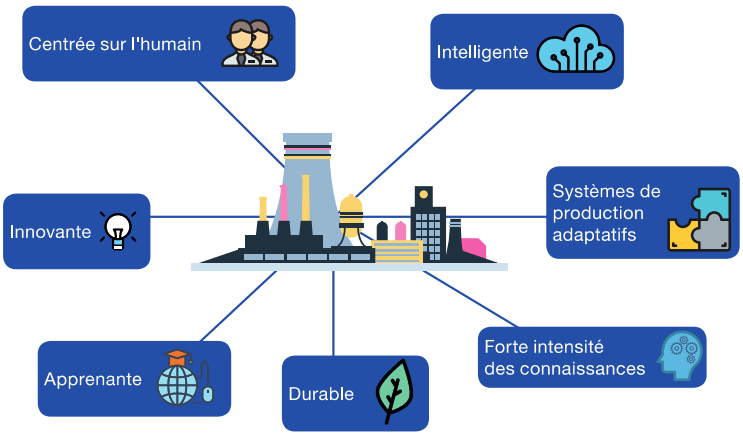


Figure 46 - *Caractéristiques clés de l'usine du futur (Dhuieb, 2016)*

Cette usine du futur se compose de deux fondamentaux :

- L'usine intelligente qui intègre les nouvelles technologies de l'information au sein même des processus industriels (exemple : internet des objets, big data… (Zuehlke, 2010))
- L'usine virtuelle basée sur les technologies de réalité virtuelle et réalité augmentée ou mixte. L'objectif est de simuler en temps réel un environnement virtuel afin de pouvoir itérer et piloter plus aisément l'usine réelle.

[93] OST = Organisation Scientifique du Travail
[94] PA = Principe Administratif
[95] CPS = Cyber-physical Production Systems

Le concept d'industrie 4.0 est issu de la vision germaniste qui cherche à définir au mieux les périmètres de l'usine intelligente. Dans ce concept, les mondes physique et virtuel interagissent dans le même environnement (Kagermann, Helbig, Hellinger, & Wahlster, 2013).

De nos jours, agréger de l'information pour mieux piloter son entreprise est devenu l'arme parfaite de la business intelligence qui vise à toujours générer plus de profits. Comme le rappelle Nejib Moalla en 2015 lors de son Habilitation à Diriger des Recherches : « il est possible d'améliorer la performance des systèmes d'information en entreprise en capitalisant le savoir-faire » (Moalla, 2015). Si l'on anticipe les parties suivantes de ce manuscrit qui détailleront l'ingénierie des connaissances et les modèles produits d'entreprise, comme le souligne Jean-Louis Ermine, il y a un lien très fort entre l'intelligence opérationnelle des entreprises et la chaîne de valeur de la connaissance (Ermine, Mouradi, & Brunel, 2012); l'analogie portant entre le modèle d'évolution donnée ➔ information ➔ connaissance avec le modèle stratégique ➔ tactique ➔ opérationnel. La gestion des connaissances est considérée comme un des piliers de l'intelligence économique comme l'avait écrit Socrate en son temps :

> *« Le savoir est la seule matière qui s'accroît quand on la partage »*

Au milieu de cette révolution numérique les compétences du capital humain et des savoir-faire associés restent des éléments catalyseurs dans les systèmes de production. La structuration et l'exploitation intelligente des connaissances métiers de l'entreprise sont désormais au cœur des verrous industriels et problématiques de recherche. Dans le domaine manufacturier en particulier, la réutilisation optimale de connaissances devient un enjeu de plus en plus important notamment avec l'expansion de l'utilisation des outils numériques favorisant la capitalisation du savoir-faire métier.

> *Gérer les connaissances est aujourd'hui crucial.*

Comme le rappelait le philosophe Francis Bacon au XVIème siècle « scientia potentia est » qui se traduit par « knowledge is power » ou « le vrai pouvoir c'est la connaissance » (Bacon, 1597):

> *Pour nos travaux, nous considérons que la connaissance est une ressource essentielle pour conserver notre savoir-faire, apprendre, résoudre des problèmes, définir les compétences clés, et penser tant l'organisation individuelle que collective de notre futur.*

Davenport définit la connaissance comme un mélange d'expériences, de valeurs, d'informations contextuelles et de perspicacité d'experts fournissant un cadre pour évaluer et incorporer de nouvelles expériences. (Davenport & Prusak, 1998). Comme le rappelle Jean-Yves Prax, autrefois la connaissance était considérée comme le miroir d'une réalité, un objet universellement partagé et à la recherche d'une vérité unique (Prax, 1998). Le système de représentation proposé par Dominique Genelot permettait ainsi de faire un lien direct entre le passé, le présent et le futur (Genelot, 1992). Notons que 100 ans auparavant ces théories, la Belgique invente Internet, mais dans sa version papier : c'est le Mundaneum[96]. Créé Par Paul Otlet et Henri La Fontaine en 1895 il s'agit d'une entreprise de la connaissance à but non lucratif portant les valeurs d'internationalisme, d'humanisme et de pacifisme, qui se veut collecter et réorganiser puis diffuser la connaissance universelle. A travers un système très ingénieux d'ontologie « papier », Paul Otlet entame la révolution des données, il formalise sa théorie dans son traité de documentation (Otlet, 1934) et déclare :

> *« L'humanité est à un tournant de son histoire. La masse de données acquises est formidable. Il faut de nouveaux instruments pour les simplifier, les condenser ou jamais l'intelligence ne saura ni surmonter les difficultés qui l'accablent, ni réaliser les progrès qu'elle entrevoit et auxquels elle aspire. »*

Aujourd'hui, l'ingénierie des connaissances ainsi que les applications qui en découlent touchent l'ensemble des métiers de l'entreprise tant les opérationnels, que les services support ou même les clients grâce aux capteurs embarqués dans les produits qui remontent automatiquement de l'information à leur créateur, comme les objets connectés ou l'internet des objets ainsi que le suggère Éric Ballot (Ballot & Montreuil, 2014). C'est un thème de recherche très vaste. L'objectif opérationnel est de concevoir des modèles de connaissances qui incorporent et formalisent les connaissances des experts (Bernard & Tichkiewitch, 2008).

> *La méthodologie du KLM que nous proposons veut unifier et rendre interopérable les connaissances patrimoniales.*

[96] www.mundaneum.org

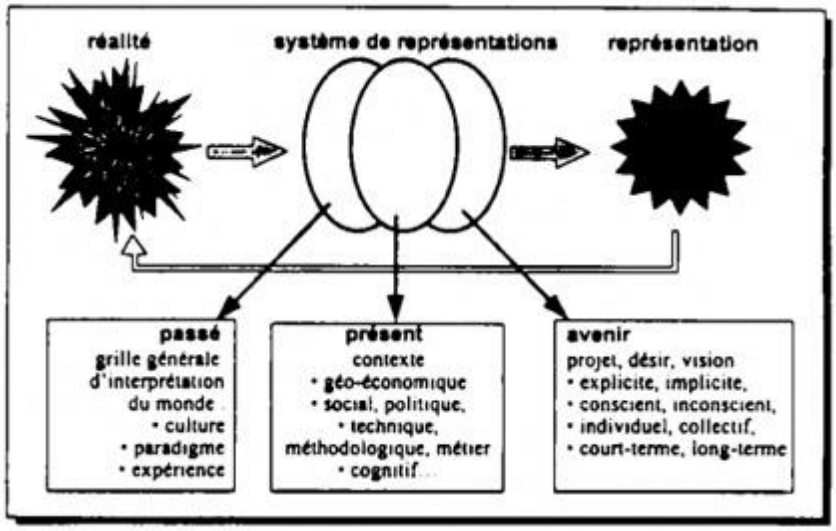


Figure 47 - *Les composants du système de représentation du miroir de la connaissance selon Genelot (Genelot, 1992)*

Les missions de l'ingénierie des connaissances

La gestion de la connaissance est née avec l'apparition des systèmes experts. Il s'agissait de donner à une machine la possibilité de définir son propre raisonnement et prendre la décision elle-même. Il s'agissait des prémices de l'algorithmie pour laquelle des règles étaient programmées et allaient interagir entre elles par inférences : l'expression usuelle de la "règle" était « Si... alors... ».

L'ingénierie des connaissances est donc une discipline issue de l'intelligence artificielle[97]. Comme le rappelle Alain Berger (Berger, 2015), depuis l'invention du terme « *Artificial Intelligence* » par John McCarthy en 1956 pour démontrer la possibilité qu'une machine pouvait penser[98], le terme d'IA a évolué au cours des années : modèles de pensée (*models of thinking*), réseautage (*networking*), apprentissage (*learning*) et recherche (*search*), vision (*vision*), raisonnement (*reasoning*), langue (*language*) et cognition (*cognition*), jeux (*gaming*), interactions humaines (*human interactions*), machines intelligentes, robots… et aujourd'hui il est question d'objets connectés.

En 2002, Liao réalise un état des lieux des technologies et des applications de KM sur la période 1995-2002 (Liao, 2003). Son étude fait apparaître plusieurs axes de développement :

- La mise en place de framework pour le KM et la création d'outils informatiques pour supporter ces concepts,
- La création de bases de connaissances,
- La diffusion des connaissances par des outils technologiques dédiés,
- La fouille de données ou data mining pour des domaines d'applications identifiés (médecine, finance, marketing…),
- La mise en place de systèmes experts ou d'intelligence artificielle pour l'aide à la décision.

Au regard de ces aspects technologiques, la science de l'ingénierie des connaissances fournit des structurations conceptuelles et des représentations formelles exploitables de la connaissance (Matta, 2004).

*L'évolution de l'ingénierie des connaissances amène vers de nombreux domaines connexes ; les avancées sont essentiellement liées aux progrès réalisés tant sur le plan technologique que sur le plan épistémologique des modèles de données. Malgré tout, la mission première de l'ingénierie des connaissances demeure : il s'agit de l'**Aide à la décision**, qui permettra d'apporter des réponses à notre Société numérique de demain (Lévy, 2010).*

Pour nos travaux, nous considérons les définitions suivantes :

- *La gestion des connaissances ou Knowledge Management recouvre l'ensemble des activités visant à identifier, organiser, partager, valoriser et enrichir les connaissances d'une organisation,*
- *La phase de formalisation s'effectue grâce à des modèles. C'est une représentation de la réalité dans un monde virtuel et/ou conceptuel. Un modèle peut être l'instanciation d'un méta-modèle générique,*
- *Le KM permet de faciliter l'innovation et l'amélioration de la valeur des produits et des processus, de réduire les coûts et les délais des entreprises, et de mieux les piloter en identifiant leurs avantages stratégiques.*

[97] IA = Intelligence Artificielle www.afia.asso.fr

[98] Le premier système expert est né en 1960. Dénommé Dendral, son objectif était l'aide au Diagnostic pour définir la composition chimique à partir d'un spectrogramme de masse.

Dans le cadre de la gestion des connaissances patrimoniales, nos travaux en ingénierie des connaissances peuvent se synthétiser dans le tableau suivant. Il s'agit des objectifs que j'ai définis pour l'axe KM de notre équipe de recherche IS3P dont je suis le responsable (IRCCyN, 2015).

Objectifs de recherche	Problématiques scientifiques	Champs disciplinaires / thématiques concernées
• Assurer l'extraction et la formalisation des connaissances (ensembles complexes, objets patrimoniaux, expertise technique), interaction / utilisation / décision (Laroche, 2007) • Définir des modèles et des méthodes structurés pour une meilleure intégration des connaissances en entreprise (représentation / formalisation / évolution) (Dhuieb, 2016) • Permettre l'implémentation des connaissances dans les systèmes numériques de gestion industrielle de l'entreprise étendue (Perry, 2007)	• Comment formaliser le monde réel ? Quels modèles utiliser ? • Transformation de modèles ? Adéquation aux méta-modèles ? • Extraction de tendances ? Fouille de données ?	• Formalisation de connaissances métier sur le cycle de vie du produit • Proposition de modèles, méthodes et outils pour l'aide à la décision • Modélisation spatio-temporelle et sémantique • Interopérabilité des modèles, ainsi que des solutions • Implémentation des modèles dans des outils industriels gérant les relations Homme-Machine

Figure 48 - *Définition des thèmes de recherche sur le KM (IRCCyN, 2015)*

Vers une définition de la connaissance ?

Selon Ackoff, le contenu de l'esprit humain peut être classifié en cinq catégories : donnée, information, connaissance, compréhension et sagesse (Ackoff, 1989). Gardoni a mis en miroir de cette typologie les services métiers de l'entreprise comme l'illustre la figure suivante (Gardoni, 1999).

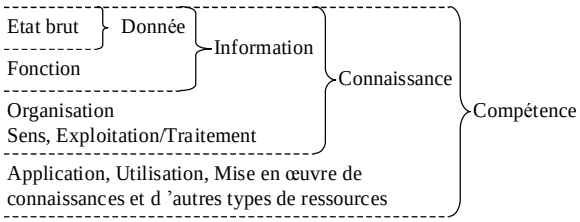


Figure 49 - *De la donnée à la compétence – lien avec les services industriels (Gardoni, 1999)*

D'un point de vue opérationnel, seules les trois premières catégories s'exploitent réellement. Albert Einstein le résumait ainsi :

> *« La connaissance c'est l'expérience, tout le reste n'est qu'information. »*

En prenant en compte le cycle de vie de la génération de la connaissance Spiegler propose un modèle récursif aspirant à une immatérialité de la connaissance en tendant vers la sagesse (Spiegler, 2003). Considérant, comme beaucoup de chercheurs, que les données, l'information et la connaissance doivent être encapsulées dans un modèle intégré, Yang Xu propose de cartographier ces 5 éléments en 4 étapes de transformation (Xu Y. , 2010) :

1. Les données représentent un fait ou un rapport d'événement sans relation aux autres choses,
2. L'information incarne la compréhension d'une relation d'une certaine sorte, probablement la cause et l'effet,
3. La connaissance représente un modèle qui relie et fournit généralement un haut niveau de prévisibilité quant à ce qui est décrit ou à ce qui se produira après,
4. La sagesse incarne la compréhension des principes fondamentaux appliqués dans la connaissance. Ces principes servent essentiellement comme une base de la connaissance. La sagesse est essentiellement systémique.

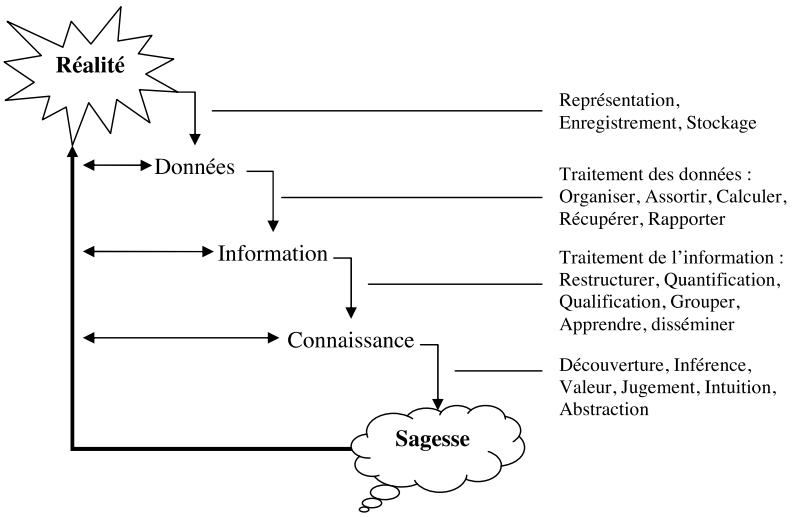


Figure 50 - *Transformation Données, informations et connaissances selon Xu (Xu Y. , 2010)*

En 2003, Zimermann a proposé un modèle systémique pour montrer le passage d'une catégorie à l'autre. A noter que ce début du XXIème siècle voit tout juste arriver l'internet du web et les premières réflexions sur les ontologies pour structurer les données en vue de les réexploiter. Après des premières propositions sur les prémices des SIG[99], Zimermann va appliquer ses travaux au domaine des musées à titre expérimental (Zimmermann, Lorenz, & Specht, 2003).

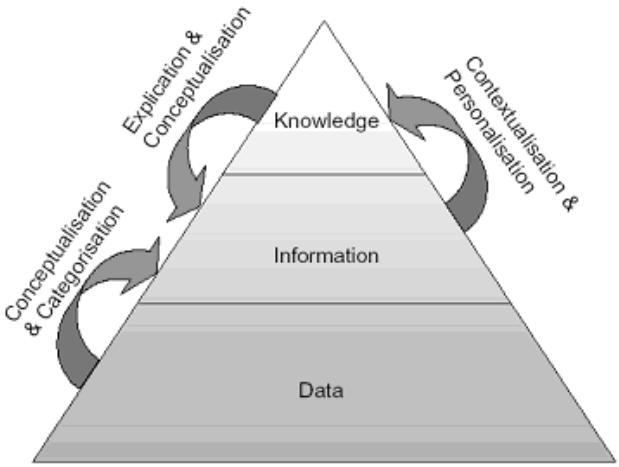


Figure 51 - *Modèle systémique du cycle de vie de la connaissance (Zimmermann, Lorenz, & Specht, 2003)*

Un des modèles les plus utilisés pour formaliser la notion de connaissance est la classification de Nonaka et Takeuchi (Nonaka & Takeuchi, 1995). En 1994, Nonaka a introduit la dimension sociale de la gestion des connaissances (Nonaka, 1994) en distinguant les connaissances explicites et les connaissances implicites. En ingénierie des connaissances, la métaphore de l'iceberg est très souvent utilisée pour illustrer les 90% de connaissances non explicites sous la surface de l'eau. C'est cette analogie que nous retiendrons dans l'ensemble de nos travaux de recherche car nous souhaitons capitaliser non pas les connaissances visibles mais les connaissances invisibles du patrimoine, réel savoir-faire témoin de l'Humanité.
La figure suivante originale est de Oscar Berg et a été traduite par Pascal Bernardon en l'adaptant à la problématique des connaissances.

[99] SIG = Système d'Information Géographique

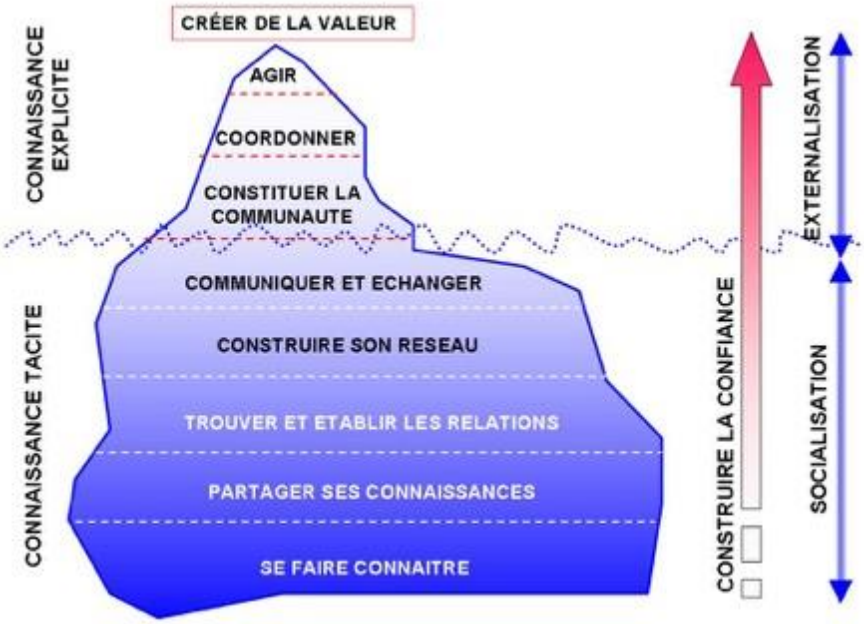


Figure 52 - *La pyramide de la collaboration basée sur les connaissances*

Grundstein (Grundstein, 1994) et Ermine (Ermine, Chaillot, Bigeon, Charreton, & Malacieille, 1996) vont compléter ces classifications de la connaissance en introduisant les problématiques de gestion et de prise en compte des processus externes. Le processus de création de connaissance se réalise selon un processus en spirale défini par 4 étapes :

- Externalisation : production de concepts (analogies, hypothèses),
- Combinaison : articulation complexe et systémique (modélisation, tri…),
- Internalisation : acquisition (formation, apprentissage…),
- Socialisation : partage et échange de connaissances (discussions…) pour en créer de nouvelles.

Dans le cadre d'une démarche de KM en entreprise, la typologie des connaissances manipulées peut être organisée comme proposée sur la figure suivante dans la thèse de Mohamed Anis Dhuieb.

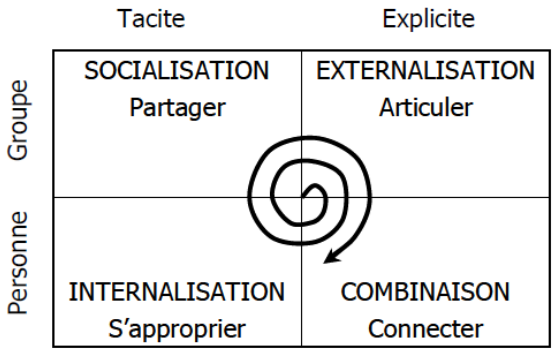


Figure 53 - *Représentation du modèle SECI de Nonaka (Nonaka & Takeuchi, 1995)*

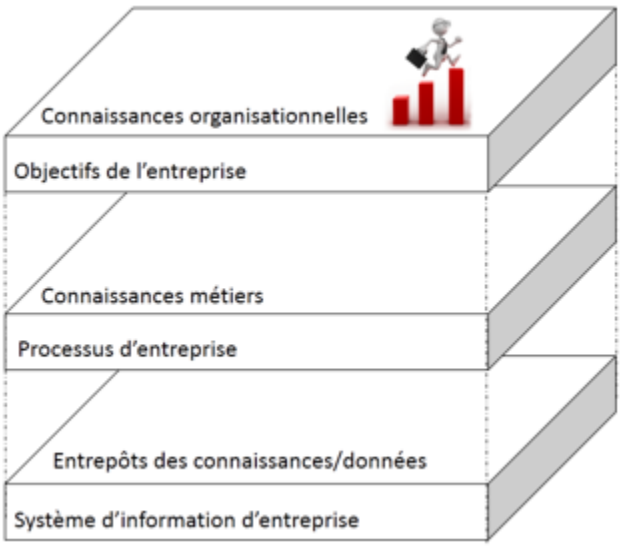


Figure 54 - *Répartition des connaissances en entreprise (Dhuieb, 2016)*

Les méthodologies de gestion des connaissances

De nombreuses méthodologies sont développées pour capitaliser et gérer la connaissance. Chaque cas d'utilisation étant différent, la démarche est adaptée. Les activités de gestion de la connaissance permettent par exemple : la création de la connaissance, le stockage, le partage, le transfert, la récupération, l'application, l'évaluation… Laurent Thevenot utilise la métaphore d'une fontaine pour illustrer les possibilités d'exploitation des éléments de connaissances manipulables au sein d'une entreprise (Thévenot, 1998).

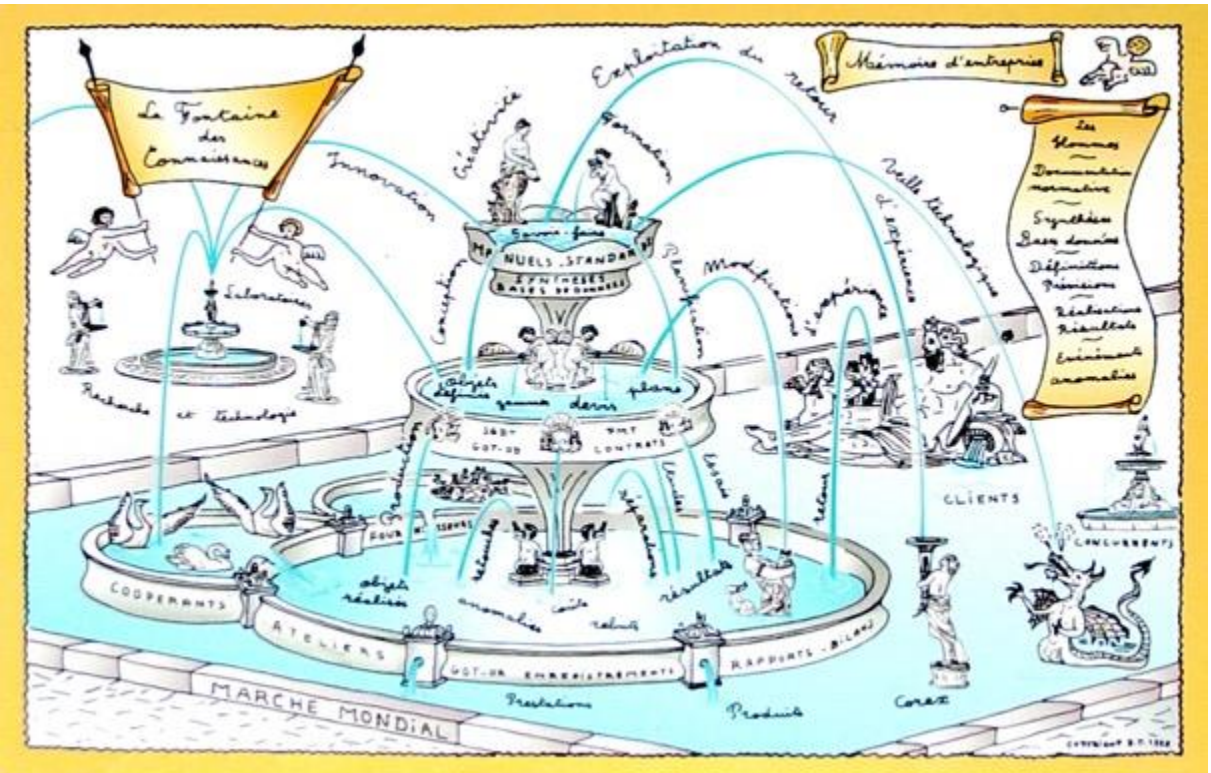


Figure 55 - *La fontaine de la connaissance*

Les méthodologies de gestion de la connaissance peuvent aussi servir de catalyseur pour les processus de la gestion de la connaissance (Tsui, 2003). Par exemple, d'un point de vue industriel, les méthodes de KM facilitent les activités quotidiennes des métiers (Alavi & Leidner, 1999).

La méthodologie de KM la plus adoptée est celle de Grundstein (Grundstein, 2009). Ce cercle vertueux travaille sur les connaissances cruciales de l'entreprise. 4 étapes et 1 processus support la définissent comme sur la figure ci-après :

1. Repérer, c'est identifier et constituer une base de connaissances,
2. Préserver, c'est structurer et garder le plus de sens possible, afin de faciliter les interprétations ultérieures,
3. Valoriser, c'est montrer, apporter et adapter à l'utilisateur,
4. Actualiser, c'est maintenir et enrichir les connaissances et mettre à jour le statut des experts,
5. Manager, pour mettre en place la démarche d'accompagnement au changement.

Nos travaux s'inscrivent dans ce cercle vertueux de la connaissance pour permettre une capitalisation intégrée et contextuelle en vue d'une réutilisation des connaissances.

Figure 56 - *Cercle vertueux de la connaissance de Grundstein (Grundstein, 2002)*

Un élément clef de réussite d'un projet de gestion des connaissances est celui de l'interopérabilité parfaite des différentes phases et éléments supports à la connaissance : quels sont les éléments de connaissances en jeu, quels liens entre les éléments en relation, quel modèle conceptuel ou ontologique… Issus des premiers travaux théoriques universitaires de Jean-Michel Penalva ou de Michel Grunstein, Alain Berger appliqua la théorie de gestion des connaissances au monde industriel (Berger, 1990). Puis, en 1999, il créa l'entreprise Ardans[100] en développant une démarche du recueil d'expertise qui sera éprouvée sur de nombreux cas industriels (Berger & Cotton, 2016). Elle correspond à tout un processus décrivant un cycle en Ω (Coppens, Laroque-Malbert, Berger, Mariot, & Cotton, 2006) (Besson & Berger, 2015).

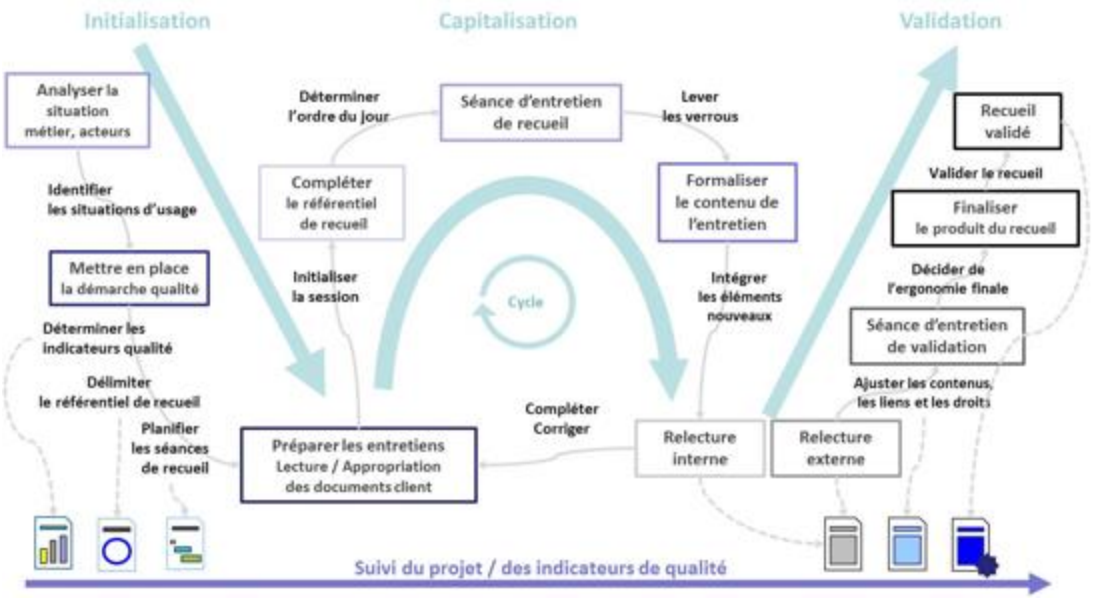


Figure 57 - *Le cycle en Ω de capitalisation des connaissances de Ardans (Besson & Berger, 2015)*

Les méthodes de capitalisation des connaissances

Comme nous venons de le voir toutes les méthodologies de KM mettent place une démarche qu'Alain Bernard généralise en 4 étapes (Bernard, Laroche, & Cunha, 2009) :

1. Un processus d'identification,
2. Un processus de capture,
3. Un processus de structuration,
4. Un processus de formalisation des connaissances.

[100] www.ardans.fr

Les méthodes de KM peuvent être :

- Ascendantes : l'expertise est remontée vers le SI,
- Descendantes : la structuration des connaissances est diffusée aux acteurs métiers,
- Ou coopératives : le corpus de connaissances est créé par l'expérience ou la rencontre d'individus.

Dès la fin des années 90, les premières méthodes de KM voient le jour dans le monde universitaire et trouvent tout de suite des applications dans l'industrie (Prax, 1998). On peut citer : KOD (Vogel, 1991), SAGACE (Penalva, 1990), KADS (Schreiber, B., & J.B., 1993), REX (Malvache, 1993), CORPUS (Grundstein, 1996), MKSM (Ermine, Chaillot, Bigeon, Charreton, & Malacieille, 1996), MEREX (Corbel, 1997), GAMETH (Grundstein, 2000)...

Nous ne détaillerons pas ici toutes les méthodes de KM existantes. Prenons quelques méthodologies et modèles les plus usités (Ouamer-Ali, Laroche, Bernard, & Remy, 2014) :

- Jean-Louis Ermine a proposé MKSM (Methodology for Knowledge System Management) pour modéliser et collecter la connaissance (Ermine, Chaillot, Bigeon, Charreton, & Malacieille, 1996). La méthode MKSM permet de réaliser un « livre de connaissances ». Plutôt que de constituer une collection de synthèses techniques, elle a adopté une organisation structurée en plusieurs points de vue afin de mieux comprendre les diverses connaissances prises en considération. À la différence d'un livre traditionnel, elle permet par une lecture non linéaire d'explorer les divers composants aussi bien que les interactions associées. MKSM intègre une cartographie des sources de connaissances et des flux, capitalise les activités (sous la forme d'un SADT[101]) ainsi que les tâches associées (sous la forme d'un WBS[102]).
- Basée sur MKSM, la méthode MASK (Method for Analysing and Structuring Knowledge) a été développée comme méthode d'analyse préliminaire à l'installation d'un système opérationnel de la gestion de la connaissance (Aries, 2010). MASK permet la collecte de la connaissance des « sources de connaissance » et l'identification des dépositaires de la connaissance : experts, spécialistes ou documents de référence. Une des avancées proposées par MASK est de pouvoir transférer les modèles créés dans une application, grâce notamment au formalisme UML[103].
- MOKA (Methodology and software tools Oriented to Knowledge based engineering Applications) est une autre méthodologie de la gestion de la connaissance largement identifiée (Stokes, 2001). Les objectifs principaux de MOKA sont de réduire le temps et les coûts de développement d'ingénierie à base de connaissance[104], de fournir une manière cohérente de développer et de maintenir des applications de KBE, et de créer la base d'un standard international. Elle fournit aux utilisateurs industriels une méthodologie formalisée pour analyser et modéliser les produits, les processus de conception et la connaissance associée. MOKA prend appui sur un modèle informel et textuel outillé par des fiches dites "fiches ICARE" (entités, règles, contraintes, activités, instances) (Ammar-Khodja, 2007). Alexandre Candlot propose un processus de transformation de la connaissance basé sur le formalisme MOKA (voir figure suivante) (Candlot, 2006).
- KADS (Knowledge Acquisition and Documentation Structuring) a été développée à l'Université d'Amsterdam. C'est une démarche permettant de structurer et de développer des KBS[105] (Schrieber, Wielinga, de Hoog, Akkermans, & van de Velde, 1994) (Kingston, 1998). KADS contient une méthodologie et une plateforme de travail pour gérer les projets d'ingénierie de la connaissance et assurer l'extraction de la connaissance. A noter que KADS a évolué vers CommonKADS, qui est une méthodologie de pointe pour soutenir l'ingénierie de la connaissance structurée. CommonKADS a été graduellement développée et validée par de nombreux d'industriels et d'universitaires dans le cadre du programme ESPRIT106. La démarche a été adoptée dans son intégralité ou en partie par de grandes entreprises européennes, asiatiques ou américaines ; elle fournit entre autres une analyse détaillée des tâches et des processus des connaissances mises en jeu. CommonKADS s'adapte très bien au monde du business.
- La méthode KOD (Knowledge Oriented Design) propose d'enchaîner deux phases de modélisation, pratique et cognitive. Dans la phase de pratique, il est possible d'identifier des dictionnaires par des analyses textuelles, et dans la phase de cognition, on structure les entités pour construire l'ossature de la base de connaissances (Vogel, 1991).
- Grundstein a proposé la méthodologie GAMETH qui vise à localiser les connaissances cruciales de l'entreprise, c'est-à-dire le savoir (connaissances explicites) et le savoir-faire (connaissances tacites) qui sont nécessaires pour les assurer un processus décisionnel en vue d'un progrès significatif (Grundstein, 2009).
- Enfin, nous n'oublierons pas la méthode ArdansMake comme vu précédemment (Besson & Berger, 2015).

[101] SADT = Structured Analysis and Design Technique, Méthode d'analyse fonctionnelle descendante
[102] WBS = Work Breakdown Structure, Méthode utilisée pour décomposer un projet
[103] UML = Unified Modeling Language
[104] Egalement appelé en anglais KBE pour Knowledge Based Engineering
[105] KBS = Knowledge Based System, Système à Base de Connaissances
[106] Programme Stratégique Européen pour la Recherche en Technologies d'Information

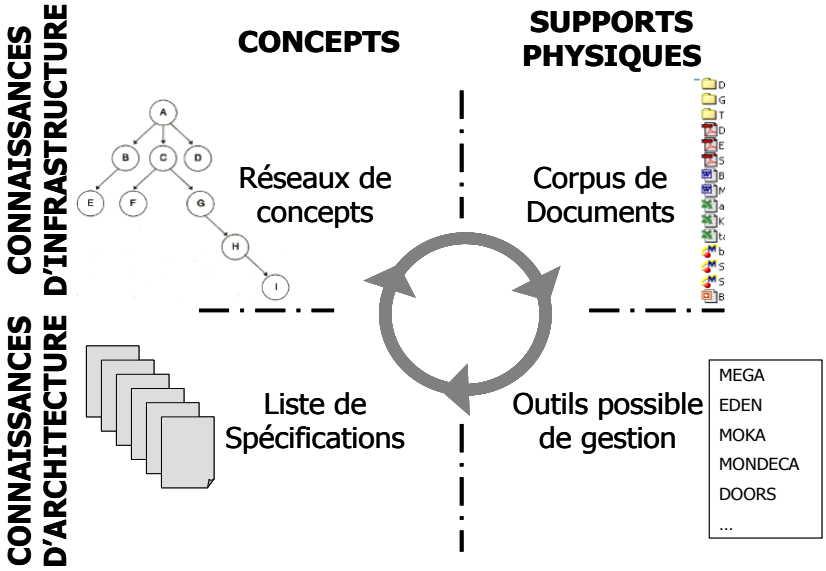


Figure 58 - *Les 4 Piliers de l'intégration de l'expertise (Candlot, 2006)*

Vers un système d'information pour supporter la connaissance

Structurer les connaissances d'un point de vue conceptuel permet de définir une vision ontologique de la réalité : c'est un modèle. On entend par modèle une représentation de la réalité réalisée dans un but précis (Le Duigou, 2010). Le modèle répond à des règles de langage comme :

- En modélisation d'entreprise : Geram, Aris, Pera, Merise…
- En modélisation produit et/ou process : IDEF, BPMN, UML, SysML…

Cependant, afin de pouvoir appliquer ces théories, il est nécessaire de mettre en place des outils pratiques utilisables en entreprise. Le principe de conception des systèmes à base de connaissances repose sur l'identification, la capture, l'analyse, la structuration et la formalisation des connaissances de telle sorte que celles-ci puissent être accessibles et ré-exploitées par tous les acteurs concernés (Bernard, Laroche, & Cunha, 2009).

Tout comme mes travaux de doctorat ont proposé un cadre théorique (Laroche, 2007), le projet Nantes1900 a été le premier démonstrateur appliqué sur la thématique des connaissances patrimoniales (Hervy, 2014). Nous détaillerons ces apports dans la prochaine partie ce mémoire sur la *RV/RA pour le musée de demain*.

D'une façon générale, le recours à l'ingénierie des connaissances n'est pertinent que si les informations modélisées ont un sens par rapport à l'utilisation que l'on souhaite en faire. Ce sens est donné par le niveau sémantique apporté au contenu du modèle mis en place. Ainsi, un objet technique ou une œuvre patrimoniale ont un sens et l'ensemble des informations relatives à cet objet ou à cette œuvre doit être soutenu par des documents contenant les fragments d'information ou de connaissance exploitables dans des environnements particuliers et au moyen d'interfaces spécifiques.

Afin de rendre opérationnel la capitalisation des connaissances, il est nécessaire de mettre en place :

- *Un modèle de données adapté, également appelé modèle produit,*
- *Une base de données supportant la connaissance, c'est le système d'information.*

Un système d'information contient et véhicule des données et fournit un accès à des documents. Comme le définit Yves Kéraron (Keraron, 2007) : « un document est un objet technique qui apparaît lors d'un processus d'inscription intentionnel sur un support dans des conditions assurant la stabilité dans le temps de l'inscription, de représentations codées et destinées à être maniées, traitées de façon manuelle ou automatique par une machine puis interprétées lors d'un acte de représentation d'un utilisateur ». De nombreux travaux à destination industrielle sont menés afin de pouvoir exploiter les connaissances sans tout réinventer ; on peut citer les travaux de Gardoni, Houssin ou Caillaux (Xu, Houssin, Bernard, & Caillaud, 2013).

Un des enjeux est donc cet accès à la connaissance possible grâce à un système à plusieurs niveaux. Bachimont et Crozat proposent un principe de fonctionnement en 3 parties selon le schéma suivant (Bachimont & Crozat, 2004) :

1. le cœur des connaissances avec la structure d'interaction, la structure de contrôle et la structure d'organisation,
2. qui interagit d'un côté avec le système technique ou l'œuvre technique ou patrimoniale,
3. et, de l'autre, avec le système humain.

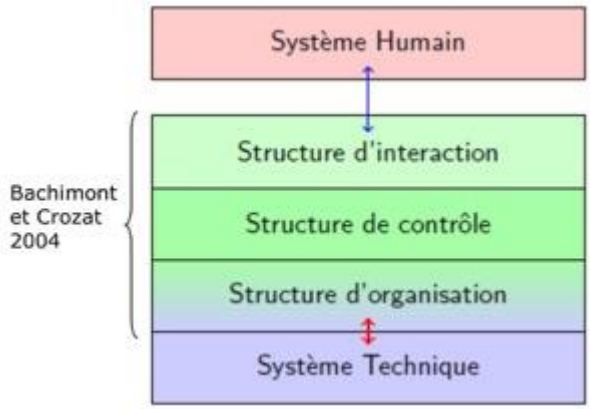


Figure 59 - *Couplage système documentaire et systèmes technique & humain (Keraron, Bernard, & Bachimont, 2009)*

L'interaction et l'enrichissement peut se faire par le principe des annotations (Keraron, Bernard, & Bachimont, 2009). Il s'agit là de l'évolution récente des outils du numérique, encapsulation de la connaissance : GED[107], ERP, web2.0, wiki, blog, FB... Christophe Routhieau, créateur de la société Bluekiwisoftware[108] part du postulat que la capitalisation des informations et des données dans le contexte d'un projet collaboratif va créer de la connaissance. La capitaliser est crucial pour l'entreprise. Les outils développés par Bluekiwi depuis 2007 fonctionnent sur le principe de la porosité des réseaux sociaux : l'analyse et la mise en corrélation des données est transparente pour l'utilisateur mais pérenne pour l'entreprise.
D'un point de vue scientifique, Frédérick Benaben définit cette pratique comme un Systèmes d'information de médiation pour la collaboration d'organisations (Benaben, Boissel-Dallier, Lorré, & Pinguaud, 2010). La connaissance alors stockée dans une base de données est manipulée et transformée ; elle doit matcher avec un modèle de données lui-même répondant à un méta-modèle comme expliqué par la figure ci-après. Le projet MISE 2.0 a appliqué la méthode en 4 étapes (capture ➔ transfert ➔ complétude ➔ extraction) et a développé un SI dédié : le MIS[109] (Benaben, et al., 2015) :

- De positionner un SI sur le triptyque données-informations-connaissances,
- De créer des modèles de contextes pour comprendre l'environnement.

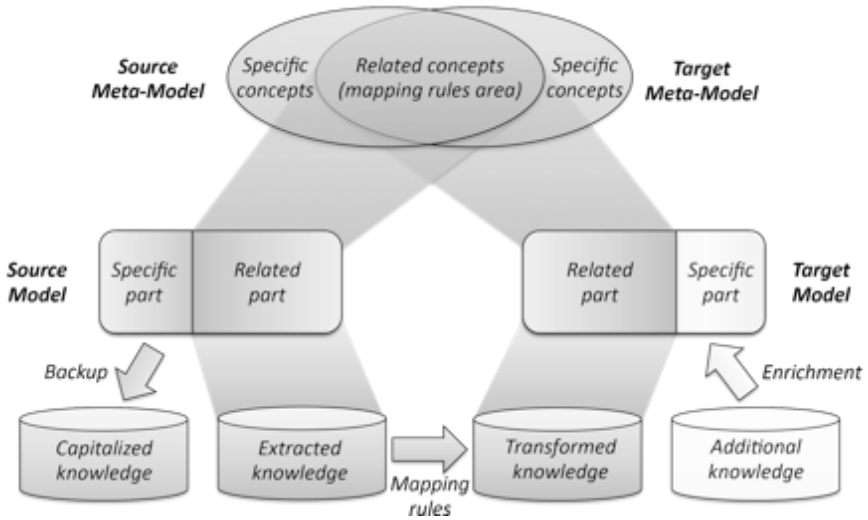


Figure 60 - *Principe de transformation de modèles de connaissances (Benaben, Boissel-Dallier, Lorré, & Pinguaud, 2010)*

Dans le domaine de l'ingénierie des connaissances, Manuel Zacklad propose la mise en place d'un SOC[110]. Fruit de l'ingénierie des connaissances et de l'intelligence artificielle, il s'agit d'une alternative aux modèles ontologiques (Bachimont, 2007) par un langage d'écriture codifiée permettant la description d'une situation donnée. Les SOC ont pour objectif de définir des principes de description d'un domaine pour faciliter les opérations de classement et de recherche « d'items » plus ou moins abstraits : documents, personnes, lieux, produits, opinions ou activités. (Zacklad & Giboin, 2010)

[107] GED = Gestion Electronique de Documents
[108] https://bluekiwi.io
[109] MIS = Mediation Information System
[110] SOC = Systèmes d'Organisation des Connaissances

Structuration multi-échelle de la connaissance

Les évolutions actuelles sur le plan des modèles et des systèmes d'information associés tendent à s'étendre sur l'ensemble du cycle de vie des "produits-services" (Belkadi, Troussier, Messaadia, Eynard, & Bonjour, 2010). Capitaliser les connaissances requiert donc de prendre en compte l'ensemble des situations d'utilisation. Il s'agit de proposer des modèles les plus pertinents au regard des processus de transformation et d'évolution inhérents à la vie des produits-services au cycle de vie long. (IRCCyN, 2015). Au sein même de l'entreprise, les connaissances peuvent être catégorisées en fonction de leur périmètre d'application ; le tableau ci-dessous détaille quelques exemples.

Périmètre industriel	Usages	
Produit(s)	• Modèle CAO • Nomenclature, plans et schémas	• Caractéristiques matière
Processus	• Données acquises en temps réel ou produites lors d'un processus (ie gamme) • Procédures (ie OF[111]) • Règles d'experts (Grabot & Caillaud, 1996)	• Résultats de simulation • Connaissances organisationnelles • Programmes des machines • Documentation technique
Ressource(s)	• Connaissances sur les outils (ie machines de fabrication, logiciels CAO) • Notices d'utilisation	• Notices de maintenance • Fiches de réparation

Figure 61 - *Périmètre d'action des connaissances en entreprise*

La connaissance ne doit donc pas être considérée comme un élément inerte mais au contraire être structurée de façon à s'adapter au contexte donné (voir partie ci-après sur l'*Intégration d'un modèle de contexte pour mieux adapter les connaissances*). Acquérir de nouvelles connaissances et prendre les bonnes décisions au bon moment est un processus complexe pour les acteurs de l'entreprise et surtout pour ceux en position d'apprentissage. Plusieurs travaux sont menés en ce sens en ingénierie des connaissances :

- La méta-modélisation de la connaissance : les méta-connaissances sont des connaissances ayant la spécificité de porter sur des connaissances (connaissances sur les connaissances) (Mahé, 2000)
- La modélisation multi-utilisateurs/acteurs : la connaissance peut être structurée en fonction du degré de liberté de l'utilisateur (Blanco, 1998) (Menand, 2002)
- La modélisation multi- vues : en fonction des acteurs métiers (Tichkiewitch, 1996) (Demoly, 2010)

La modélisation multidimensionnelle/multi-temporelle : en fonction des évolutions et des transformations intermédiaires des objets de l'entreprise (Laroche, 2007).

Dans la thèse de Mohamed Anis Dhuieb, nous avons proposé une nouvelle approche pour structurer la connaissance à multi-échelle (Dhuieb, 2016). Grâce à l'introduction de la notion de niveaux de complétudes, il est possible d'adresser à chaque acteur de l'entreprise un ensemble de connaissances adapté en fonction de sa capacité à l'assimiler. Cela permet de donc de réduire la charge cognitive, d'améliorer le processus d'apprentissage et de visualiser les connaissances en les adaptant à l'utilisateur.

La figure suivante illustre ce concept grâce à des hypergraphes et des graphes emboités (Laroche, Dhuieb, Belkadi, & Bernard, 2016). Les connaissances sont décomposées par les éléments suivants :

- Produit P_i avec la vue VP_i composé de concepts e_i avec des attributs att. $_i$ et des relations entre les concepts,
- Processus Pr_i composé d'activités A_i et d'un ensemble de tâches T_i et de sous-tâches T_{ij} (Vernadat, 2002),
- Ressources R_i avec un mode d'interaction MI_i.

[111] OF = Ordre de Fabrication

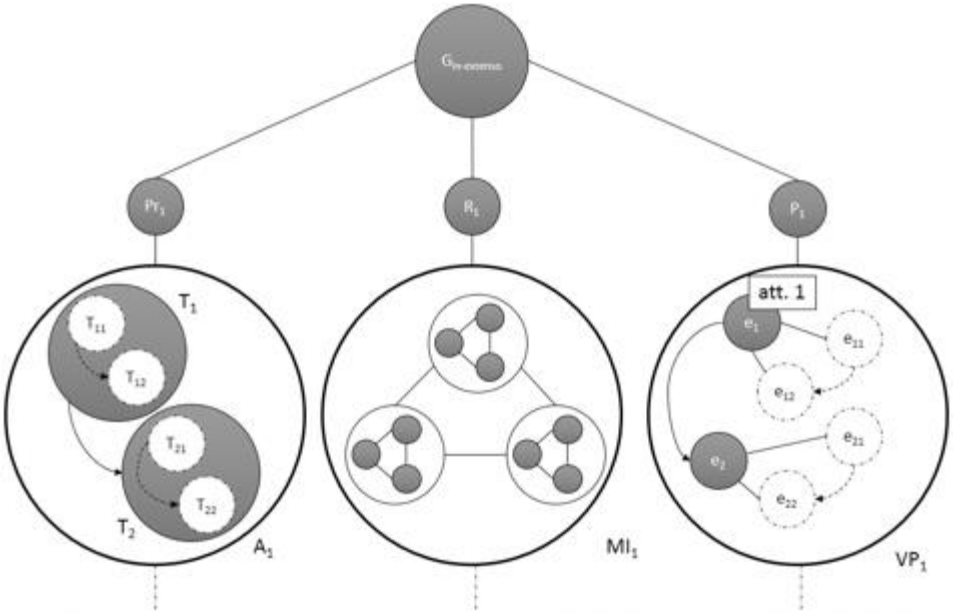


Figure 62 - *Exemple d'hypergraphes pour structurer à multi-échelle les connaissances d'entreprise (Dhuieb, 2016)*

2.4.3 Capture des connaissances physiques : numérisation 3D et Reverse-engineering

Des connaissances à la numérisation 3D

Quelle que soit la nature des objets, si un objet existe c'est qu'il est porteur de sens.

La phase de capture ne peut donc pas dissocier la double approche qui consiste à (Hervy, 2014) :

- Travailler sur l'objet physique (ou les traces),
- Capturer les données sémantiques pour contextualiser le corpus considéré.

Nos travaux de recherche sur le KLM visent à aligner ces deux points de vue car les 2 approches doivent être menées en parallèle (voir chapitre précédent sur le projet ANR ReSeed) :

- Comme nous venons de le détailler ci-avant, capturer la connaissance requiert des méthodes et des outils adaptés.
- En simultané à la phase de KM se déroule le processus de représentation physique : c'est la capture de la géométrie 3D que nous allons détailler dans cette partie. Elle se compose :
    1. D'une phase de numérisation 3D pour la capture de la géométrie 3D
    2. D'un processus de reverse-engineering ou reconnaissance de formes
    3. D'un couplage final entre données 3D virtuelles et la sémantique des connaissances capitalisées.

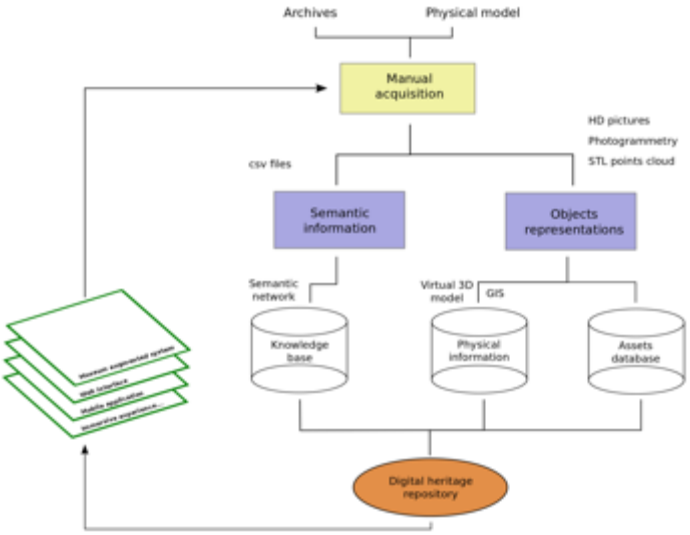


Figure 63 - *Approche double de captation des connaissances : 3D et corpus (Hervy, 2014)*

Travailler directement sur l'objet 3D est riche d'informations. En ce sens, on considère que le modèle 3D est un sous-modèle systémique d'un modèle de connaissance primaire qui va permettre d'aller vers la captation de l'intention de conception.

L'objectif de la numérisation 3D consiste à « passer d'un modèle physique à une représentation numérique ».

Apport de la numérisation 3D et particularités pour la restauration des objets culturels

Rappelons les différents types de procédés des systèmes d'acquisition de formes 3D :

- Les processus passifs : il n'y a pas d'interaction ni avec la pièce ni avec l'environnement. Les capteurs travaillent uniquement en mode réception et l'acquisition s'effectue par caméras qui donnent une ou n images. Grâce à l'information de profondeur calculée (niveaux de gris, z-buffers), une image en relief puis en 3D peut être restituée.
- Les processus actifs :
    - Les capteurs à contact physique : le plus souvent montés sur des MMT[112] avec palpeur mécanique ; on n'oubliera pas les outils de base comme le décamètre, le pied à coulisse ou le palmer,
    - Les capteurs sans contact :
        - Éclairement de la pièce et acquisition par caméras : ce sont les capteurs à base de lumière structurée comme l'effet de Moiré,
        - Les principes initialement mis en œuvre pour l'imagerie médicale : échographie, résonance magnétique nucléaire, tomographie avec l'émission d'ondes électromagnétiques, d'ultrasons ou de rayons X,

[112] MMT = Machine à Mesurer Tridimensionnelles

- Une catégorie dédiée pour les capteurs optiques basés sur des technologies laser : le principe utilisé est la mesure de distances (temps de vol, triangulation, variation de densité). Ce sont les radars, les télémètres, les théodolites à balayage laser ou les scanner 3D auto positionnés. Ils permettent la mesure d'objets en point à point avec une grande précision pour des dimensions de tailles moyennes à grandes.

Les performances des capteurs optiques actuels se stabilisent. Quel que soit le système d'acquisition de forme 3D utilisé, la fidélité de la restitution et de la précision dépend des algorithmes employés dans les systèmes d'interprétation des relevés et des images. Mathématiquement, il s'agit d'une chaîne de cotes tridimensionnelles complexe.

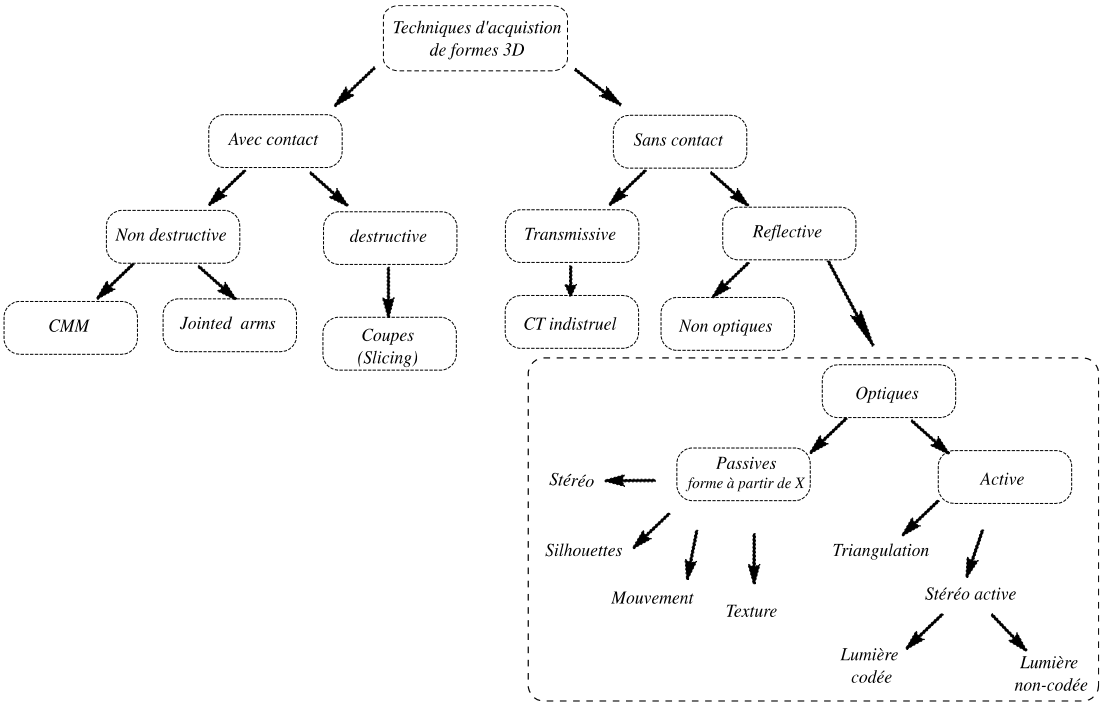


Figure 64 - *Taxonomie des techniques d'acquisition de formes 3D (Ben Amor, 2006)*

Nos travaux ne prétendent pas contribuer à enrichir les moyens de numérisation 3D tel que le propose Sébastien Remy (Remy, 2012). Cependant, nos recherches permettent d'affiner la taxonomie des techniques d'acquisition de formes 3D de Boulbaba Ben Amor (Ben Amor, 2006) en spécifiant les contraintes liées aux objets anciens (Bernard, Ammar-Khodja, Laroche, & Perry, 2007).

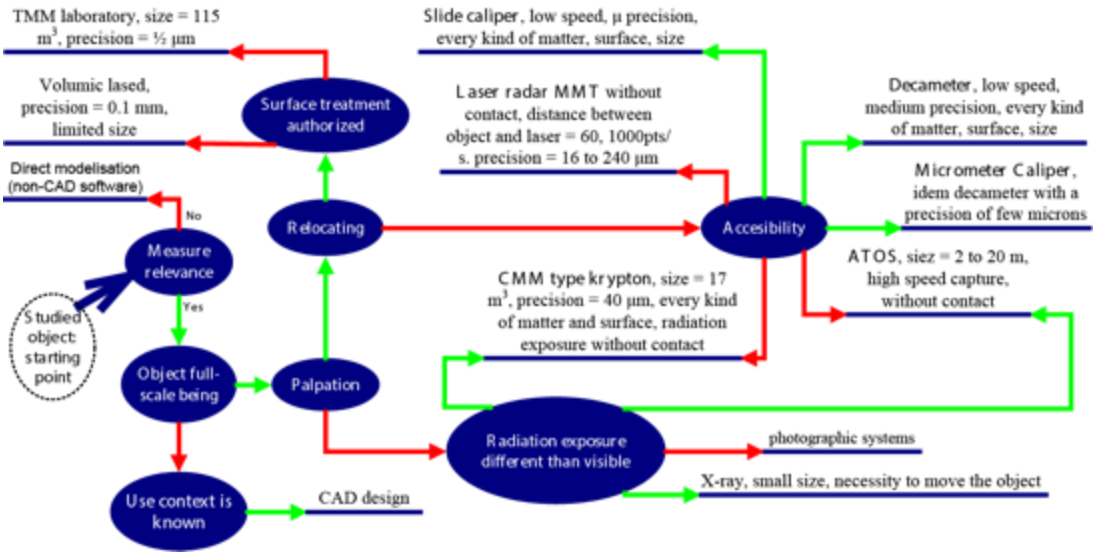


Figure 65 - *Arbre décisionnel pour l'outil de numérisation 3D (Bernard, Ammar-Khodja, Laroche, & Perry, 2007)*

Parmi les nombreuses technologies d'acquisition possibles, le scanner laser 3D est certainement l'outil de référence pour l'acquisition exhaustive de la morphologie d'objets patrimoniaux à plusieurs échelles. Entre autres, il permet d'agir in situ sur un chantier de fouille ou dans un Musée sans destruction de l'objet. La digitalisation par laser auto-positionné comme les scanners Creaform permet de créer en temps réel un maillage avec la normale et la texture associée aux triangles.

Figure 66 - *Numérisation 3D par laser en musée (projet Nantes 1900) et sur ruine industrielle (La Ciotat)*

En parallèle, les récentes avancées réalisées en photogrammétrie permettent de capturer une géométrie et la texture associée par colorisation du nuage de points. Dans sa thèse, David Lo Buglio définit la photogrammétrie comme une technique de mesure indirecte utilisant les photographies pour support d'étude. Cette technique se base sur le principe de triangulation de points homologues à un ensemble de photographies du même objet. A partir de l'identification de leur position et coordonnées, il est possible d'obtenir les mesures de l'objet, de le reconstruire et de le texturer précisément. (Lo Buglio, 2016)

On notera que depuis 2016, avec la propagation des drones, la photogrammétrie à large spectre s'est démocratisée. Les potentialités offertes par cet outil ouvrent de nouvelles perspectives pour nos travaux sur la digitalisation du patrimoine.

Spécificités de la numérisation 3D des objets patrimoniaux

Avant de détailler les démarches de RE, il convient d'exposer les problématiques spécifiques liées à l'unicité des objets patrimoniaux (De Luca, 2006). Au regard des modèles utilisés dans le monde industriel, l'approche développée vise à aller au-delà de la simple maquette numérique. En effet, reconcevoir virtuellement une œuvre d'art, un monument historique ou un objet patrimonial avec de « belles surfaces bien maillées » ou des « volumes finis » serait, d'un point de vue épistémologique, une véritable erreur. La remodélisation 3D d'un artefact passé n'est plus l'objet patrimonial d'origine, objet unique, porteur de sens et d'émotion. La phase de numérisation physique de l'objet doit donc être prudente tant dans les outils utilisés que dans la démarche mise en place.

Les collaborations menées avec l'Ecole des Hautes Etudes de Neuchâtel et plus récemment avec le laboratoire Arc'Antique de Nantes dans le cadre des programmes européens COST et VISIONAIR ont permis de mettre en exergue les points critiques à prendre en compte en vue d'une restauration des objets (Degrigny, Jeanneret, Rapp, & Gelbert-Miermon, 2015).
Le premier travail d'un conservateur-restaurateur[113] lors d'un traitement de restauration d'objet scientifique ou technique est de comprendre son fonctionnement. Cette démarche est obligatoire pour bien saisir son usage, ses dégradations et les moyens à mettre en œuvre pour assurer sa pérennité (Tomsin, 2007). Les documents techniques du fabricant tels que plans, modes d'emplois ou autres archives représentatives d'un état authentique de l'objet sont très utiles au CR pour mieux comprendre la

[113] CR = conservateur-restaurateur

construction et l'état d'origine de l'objet. En effet, le CR doit donc comprendre le fonctionnement de l'objet à partir d'un mécanisme à l'arrêt, passablement altéré et souvent incomplet. (Degrigny, Jeanneret, Köhler, Laroche, & Baudin, 2017).

En parallèle, comme illustré par la figure suivante, il est possible d'utiliser la numérisation 3D pour réaliser le constat d'état. Les travaux que j'ai réalisé avec Romain Jeanneret de Neuchâtel ont permis de mettre en évidence les points d'attention tant sur le processus d'acquisition que sur celui de traitement ; en particulier sur :

- La réflexivité de l'objet,
- Les surfaces usées,
- Des preuves historiques externes,
- Les mécanismes internes.

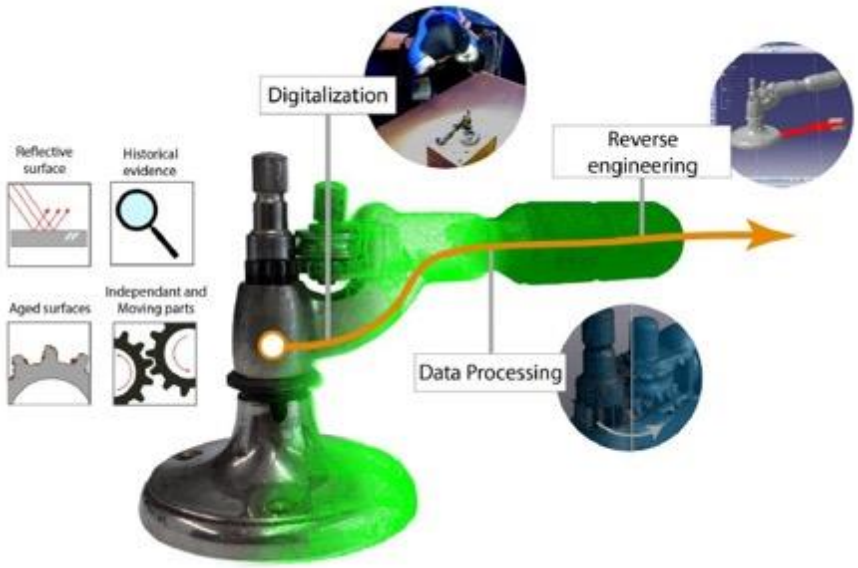


Figure 67 - *Processus et contraintes pour la numérisation 3D d'objets patrimoniaux*

Ainsi, lors de la phase de RE de la digitalisation 3D, il faudra être vigilant pour ne pas effacer virtuellement par décimation les traces d'usures qui sont les indices historiques permettant une restauration des plus fidèles. La figure suivante illustre les différents traitements non réalisés sur la numérisation de la maquette de Nantes1900 afin de conserver toute la véracité de l'objet physique d'origine (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012).

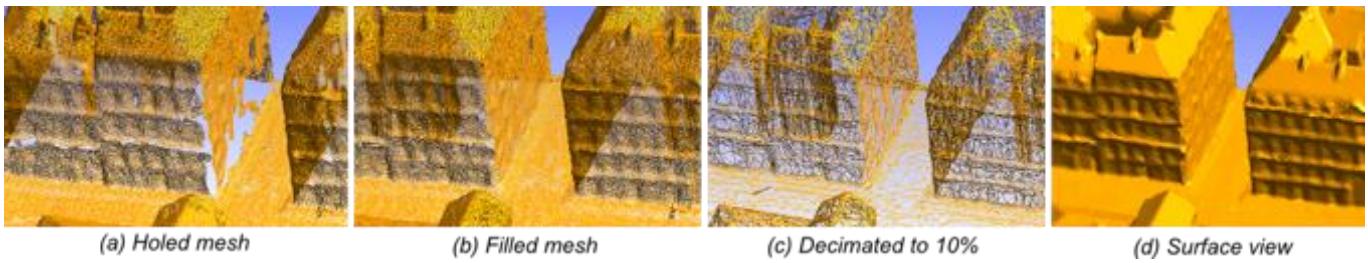


Figure 68 - *Traitement en RE intelligent de la numérisation 3D de la maquette de Nantes1900*

Dans le cadre d'un travail de CR, outre le relevé laser, la photogrammétrie offre de nouvelles possibilités. On citera l'expérience réalisée en 2014 par le laboratoire Arc'Antique pour le musée Dobrée sur l'écrin du cœur d'Anne de Bretagne[114]. Grâce à un appareil photo numérique "PhaseOne", la photogrammétrie a permis d'obtenir une digitalisation de plus de 20 millions de triangles.

114 https://grand-patrimoine.loire-atlantique.fr/jcms/l-agenda/les-expositions/expositions-passees/expositions-au-chateau-de-chateaubriant/le-coeur-d-anne-de-bretagne/2014-le-coeur-d-anne-de-bretagne-fr-t1_130422

Définition et applications du Reverse-Engineering
Une fois l'objet digitalisé, la donnée 3D peut soit être stockée brute en l'état soit subir un traitement comme du filtrage ou de la décimation. Elle peut également être reconstruite : c'est la phase de reverse-engineering[115] ou rétroconception.

De façon générale, le Reverse-Engineering consiste en l'analyse de produits et d'objets pour en retrouver les techniques d'élaboration et de fabrication qui ont permis de les construire, ou dans le but d'en dévoiler les secrets, afin d'en identifier les faiblesses et les exploiter (Ouamer-Ali, Laroche, Bernard, & Remy, 2014). Le RE n'est pas une activité si récente car de nombreux cas d'applications historiques existent, majoritairement dans le contexte militaire :

- Analyse et amélioration des chars des Hyksos afin de les produire en masse et ainsi gagner les batailles contre les Egyptiens,
- Pour construire la flotte de la marine romaine, utilisation comme modèles des bateaux de guerre étrangers coulés dans le bassin méditerranéen,
- Rétro-conception par l'armée américaine du missile BGM-71 TOW produit par l'armée iranienne en une nouvelle série de missiles dits Toophan après l'échec des négociations pour la co-production du missile et la révolution Iranienne de 1979.

La rétro-ingénierie n'est pas seulement appliquée aux objets physiques et mécaniques ; elle peut répondre à des problématiques diverses en informatique (Bruneliere, Cabot, Dupé, & Madiot, 2014), en électronique (Torrance & James, 2011) ou en biologie (Scete & Doyle, 2002) (Basso, et al., 2005). Dans le contexte de l'industrie manufacturière et plus particulièrement dans le domaine de la mécanique, la rétro-conception a évolué avec l'émergence des solutions de métrologie électroniques et automatisées telles que les scanners laser ou les MMT (Dalton, 1998).

L'objectif encouru est toujours le même : capturer les données géométriques d'un objet et les transformer en données informatiques. Ces données (nuages de points) sont ensuite analysées, et traitées, ce qui permettra de donner vie à une représentation tridimensionnelle virtuelle de l'objet analysé. Le but est souvent de retrouver un modèle CAO orienté procédé ou fonctionnel.
Dans le cadre des travaux menés pour le projet ANR METIS, Mohamed Oumer-Ali donne la définition suivante du RE (Ouamer Ali, 2016) :

> *La rétro-conception est le processus d'analyse d'un artefact, qui permet d'identifier les différentes informations et connaissances relatives à celui-ci à travers l'analyse de données de l'artefact, de types et de sources hétérogènes, et l'élaboration de représentations à des niveaux d'abstractions plus élevés de cet artefact, qui permettent de le remettre dans son contexte selon la phase de vie voulue de l'artefact.*

Comme le précise Hichri Nouha, malgré les avancées rapides des technologies du virtuel, il y a aujourd'hui un besoin urgent de pouvoir passer rapidement et efficacement d'un enregistrement de données 3D à un modèle CAO enrichi sémantiquement (Hichri, Stefani, Luca, & Veron, 2013). La rétro-conception, qui n'est pas à considérer comme une fin en soi, peut être un outil utilisé pour retrouver la sémantique structurelle d'un objet (Chikofsky & Cross, 1990). Dans le cadre de la refabrication de pièces, le RE permettra de retrouver les données géométriques et topologiques, les matériaux et les méthodes de fabrication…, c'est tout un panel de connaissances allant de la modélisation fonctionnelle au calcul de structures jusqu'à la fabrication qui est mis en œuvre.

Depuis 1962 avec les travaux de Pierre Bézier sur la formalisation mathématique des formes physiques par des courbes paramétrées, de nombreuses initiatives ont permis de faire avancer la représentation virtuelle des objets. Parmi les précurseurs, on peut citer des travaux de (Thompson, Owen, Germain, Stark, & Henderson, 1999) qui permettent d'associer une entité (feature) de fabrication au nuage de points (Shah & Mantyla, 1995).
Désormais, le RE a fait de nombreux progrès mais d'une façon générale, quelle que soit la méthode proposée, le processus de RE reste long et fastidieux. Afin d'optimiser ce processus, plusieurs travaux ont été engagés afin d'intégrer non seulement des données mais des connaissances géométriques :

- Le projet REFAB avait pour objectif de permettre l'extraction des entités géométriques à partir d'un modèle 3D (Thompson, Owen, Germain, Stark, & Henderson, 1999),
- Le projet VPERI[116] avait lui, pour objectif, la mise en place de stratégies différentes pour la rétro-conception du point-de-vue géométrique des pièces mécaniques de remplacement pour véhicules militaires (VPERI, 2003). Le processus était manuel, il y avait peu d'automatisme,
- Le projet MERGE avait pour objectif la conception d'un système fournissant un environnement unifié dans lequel le rétro-concepteur peut visualiser et traiter les informations simultanément à partir de plusieurs ressources. Un des buts étant d'obtenir, outre les entités géométriques, l'intention de conception des composants physiques (Musuvathy, et al., 2005),

[115] RE = reverse-engineering ou rétroconception
[116] VPERI = Virtual Parts Engineering Research Initiative

- La rétro-conception d'ensembles industriels basée sur la reconnaissance de formes (plans, cylindres…) et d'éléments métier tels que des tuyaux ou des structures (Chaperon, Droulez, & G., 2001). On notera les récents travaux de l'INRIA basés sur l'extraction et l'inférence de connaissances dans des assemblages mécaniques CAO pour la reconnaissance de formes primitives (Vilmart, Léon, & Ulliana, 2017).
- La rétro-conception d'ensembles urbains avec reconnaissance d'éléments métier préalablement gérés par une librairie de composants architecturaux (De Luca, Véron, & Florenzano, 2006). A noter que ces travaux sont en pleine expansion avec entre autres, la reprise par le laboratoire MAP[117] de Marseille des algorithmes de l'IGN comme MICMAC qui permet d'améliorer les processus de reconnaissance photogrammétrie et d'envisager une reconnaissance de formes 3D.

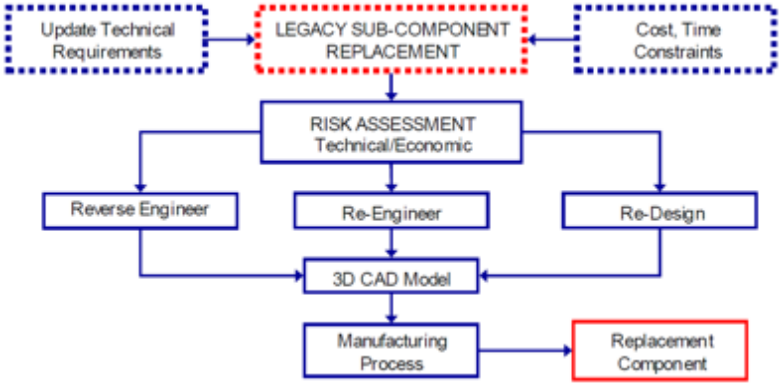


Figure 69 - *Processus global de VPERI (VPERI, 2003)*

Positionnement des travaux dans l'histoire des modèles numériques

Que ce soit l'activité de conception ou l'activité de rétroconception, les formats de données utilisés sont similaires. Il existe plusieurs types de modélisations géométriques (Gardan, 2007).

La première est historique : c'est la modélisation filaire. Mais celle-ci entraîne souvent de mauvaises interprétations de la géométrie de la pièce et est très peu usitée depuis de nombreuses années (Poitou, 1989). Cependant, dans le cadre d'une analyse de la cinématique d'un objet technique ou d'une machine en fonctionnement, les mécaniciens sont régulièrement amenés à réaliser des modèles filaires en CAO afin de valider le fonctionnement dynamique.

Par la suite, il est possible de rajouter « une peau » sur cette cinématique : c'est la modélisation surfacique ; elle permet de définir la pièce par des surfaces ou des carreaux. Ces dernières se tracent selon des courbes de Bézier (Bézier, 1987), des Nurbs[118] (Piegl & Tiller, 1997) ou de façon paramétrique… Le mode de représentation le plus utilisé en CAO est le modèle BRep[119] structurant les surfaces d'une pièce par leurs équations. Le surfacique sert de base à une représentation hiérarchique où la pièce est limitée par des surfaces, elles-mêmes limitées par des courbes qui sont, elles-mêmes limitées par des points (Flynn, 1990). Ainsi les courbes polynomiales paramétriques formalisées par Pierre Bézier en 1962 sont issues de ce mode de représentation dit Splines[120], qui sera transformé par la suite en B-Splines pour Bézier-Splines.
Parmi les projets industriels et travaux scientifiques précurseurs, on peut citer (Cotte, Laroche, & Bernard, 2008) :

- Chez Citroën, les travaux de De Casteljau en modélisation des surfaces avec application pour concevoir la carrosserie de la DS,
- Chez Renault, ce fut l'intégration des travaux de UNISURF de Pierre Bézier dans le modeleur Euclid inventé par le Professeur Jean-Marc Brun au CNRS.

Désormais, grâce à l'utilisation d'outils de conception dédiés comme ceux de la CAO 3D, c'est une nouvelle phase de l'évolution du graphisme technique qui s'opère (Lavoisy, 2000) (Vandendriessche, 2005).

> *Au même titre que l'invention de l'imprimerie par Gutenberg au XVème siècle a permis un réel « saut » technologique ; nos travaux de recherche n'auraient jamais pu exister sans ceux de Pierre Bézier qui apporta toute la théorie de la modélisation 3D (Laroche, Kerouanton, & Serveille, 2010). Travailler sur des objets techniques du passé en utilisant les B-splines est devenu désormais pratique courante dans l'industrie et le Reverse-Engineering ; même si bon nombre des ingénieurs du domaine ignore ces principes historiques formalisés par Bézier !*

[117] http://www.tapenade.gamsau.archi.fr
[118] Principe d'affichage remplaçant les polygones par une enveloppe constituée de lignes courbes dites, entre autres, courbes de Béziers. Les surfaces sont alors calculées mathématiquement par extrapolation et non par les coordonnées de chaque point.
[119] BRep = Boundary Representation
[120] Une spline est une fonction mathématique permettant un découpage en tronçon interpolé.

La reconnaissance de formes dans les modèles numériques 3D par la segmentation

Afin d'optimiser les résultats de la reconception, certains travaux vont rajouter de l'intelligence dans le processus de RE. Au lieu de considérer l'objet dans son ensemble, le nuage de points va être segmenté. Ce domaine de recherche en pleine expansion (Erdos, Nakano, Horvath, Nonaka, & Vancza, 2015) envisage trois approches : la segmentation manuelle, automatique et semi-automatique. A ces fins il est indispensable d'associer les connaissances externes pour compléter le modèle physique.

Selon Alexandre Durupt, la segmentation est un processus qui vise à séparer un maillage 3D en zones de courbures homogènes au regard d'un critère, ou de variations régulières ; c'est une opération qui permet de constituer des sous-ensembles logiques dans la donnée numérique (Durupt, 2010). La segmentation permet donc de séparer la donnée en la partitionnant en un jeu d'ensembles de points qui représentent des parties de l'objet analysé (Delest, Boné, & Cardot, 2007).

Dans le cadre du projet Nantes1900, la maquette a été numérisée en 3D dans son intégralité grâce à un laser auto-positionné. Le nuage de points obtenu est composé de 250 millions de triangles. Le fichier STL[121] ne pouvant être manipulé en l'état, les travaux de Didier Serveille et Daniel Lefevre ont consisté à segmenter automatiquement le modèle numérique en fonction du type de géométrie sémantiquement analysée. Un prototype a été programmé et permettait de séparer le sol, les murs, les toits…

On notera malgré tout une problématique récurrente en RE qui n'a pas encore trouvé de réponse technique : celle des coutures automatiques des surfaces dans les nuages de points stockés dans les bases de données.

A terme, Elsa Arroud-Vignod a envisagé une vectorisation 2D afin de porter la maquette vers un SIG en vue de la comparer avec la carte IGN actuelle.

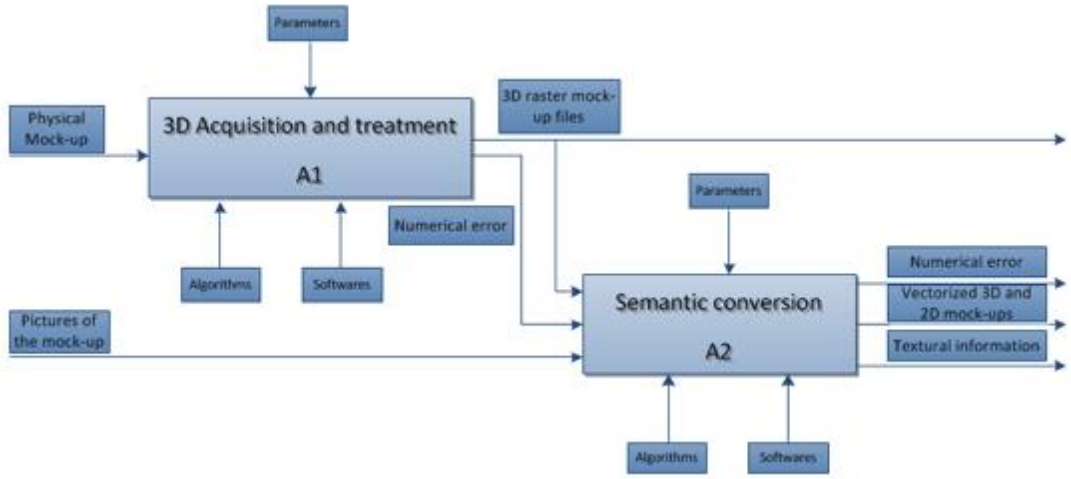


Figure 70 - *Processus de RE par segmentation sémantique (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012)*

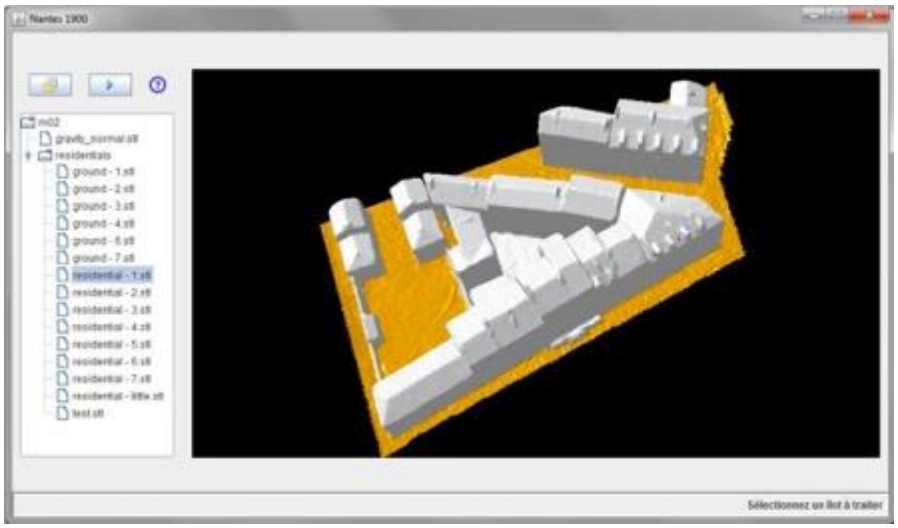


Figure 71 - *Prototype de segmentation sémantique automatique (Laroche, Servieres, Lefevre, & Kerouanton, 2011)*

[121] Fichier STL = StéréoLithographie

Ces travaux ont suscité un fort intérêt tant dans le domaine mécanique à la conférence ESDA en 2012 (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012) que dans le domaine de la réalité virtuelle à la conférence ISMAR en 2011 (Laroche, Servieres, Lefevre, & Kerouanton, 2011).
Des échanges ont été réalisés avec Christine Chevrier et Kévin Jacquot du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie de Nancy sur la méthodologie et les bonnes pratiques de numérisation 3D de maquettes en vue de l'exploitation du modèle virtuel. Ils travaillaient sur un projet analogue à Nantes1900 : le plan-relief de la ville de Toul (Chevrier, Jacquot, & Perrin, 2010).

Les projets de rétro-conception intelligente

Comme nous venons de le voir la segmentation automatique va jouer un rôle prépondérant dans les futurs travaux de recherche liés à l'interprétation des modèles 3D digitalisés. Il s'agit de contribuer au big data par la création de doubles numériques fidèles à la réalité physique (Bernard, 2017).
Voyons quelques-uns des projets de rétro-conception intelligente qui suivent le processus de reverse-engineering intelligent comme décrit par la figure suivante. L'ensemble de ces travaux nous a conduits à proposer la démarche Ki4D dans la thèse de Mohamed Ouamer-Ali (Ouamer Ali, 2016).

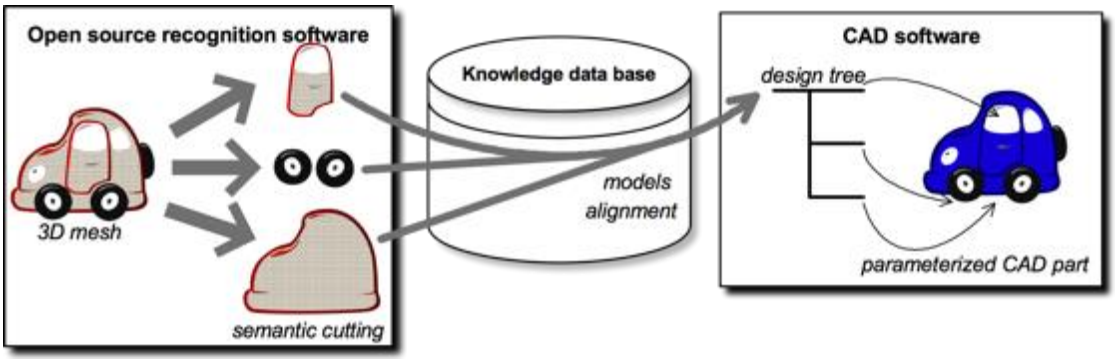


Figure 72 - *Processus de reverse-engineering intelligent (Laroche, Lefevre, Hervy, Servières, & Bernard, 2012)*

En 2008, le projet ANR PHENIX avait pour domaine d'application la pièce mécanique manufacturée. Considérant ces pièces, souvent issues de produits anciens (vieilles voitures, vieilles machines encore exploitées mais plus fabriquées), il s'agissait de les reconstruire virtuellement afin de les refabriquer (Durupt, Remy, & Ducellier, 2010). Il a été mis en évidence que la forme d'une pièce mécanique était le fruit de deux aspects :

- sa fonction,
- et les procédés de fabrication mis en œuvre.

En effet, la géométrie d'une pièce n'est pas que liée à son rôle dans le mécanisme (esthétisme, robustesse, effort, intégration avec d'autres composants…) mais également aux modalités de fabrication (exemple : présence de formes nécessaires à la forge, à la fonderie ou à l'usinage …). La forme d'une pièce est donc le fruit d'un processus de conception par intégration de connaissances. Le projet PHENIX a proposé une approche d'extraction des connaissances en se focalisant sur l'utilisation de connaissances relatives au produit plus tôt dans le processus de rétro-conception afin d'explorer plusieurs alternatives de représentation géométrique du produit (Durupt, Remy, Bricogne, & Troussier, 2013). Le workflow de rétro-conception est schématisé dans la figure suivante :

1. Réalisation de plusieurs segmentations des nuages de points issus de la digitalisation de l'objet en utilisant plusieurs algorithmes de segmentation,
2. Génération de groupes de points issus de la segmentation,
3. Pour chaque groupe de points, des entités sont sélectionnées. Dans le cas où plusieurs entités peuvent être sélectionnées pour un seul groupe de points, alors des alternatives sont générées qui correspondent au nombre d'entités sélectionnées pour le groupe (deux entités sélectionnées pour un seul groupe donneront deux alternatives différentes), et plus il y a de groupes de points pour lesquels il y a plusieurs entités, plus le nombre augmente (en combinatoire).

D'un point de vue technique, PHENIX permet de retrouver le modèle CAO qu'aurait obtenu le concepteur originel s'il avait utilisé un modeleur CAO moderne. Ces résultats ont positionné PHENIX en avance sur les logiciels du marché (exemple : GEOMAGIC, RAPIDFORM ou les modeleurs CAO classiques type CATIA V5) qui ne proposent que des approches géométriques, non basées sur les connaissances des concepteurs.

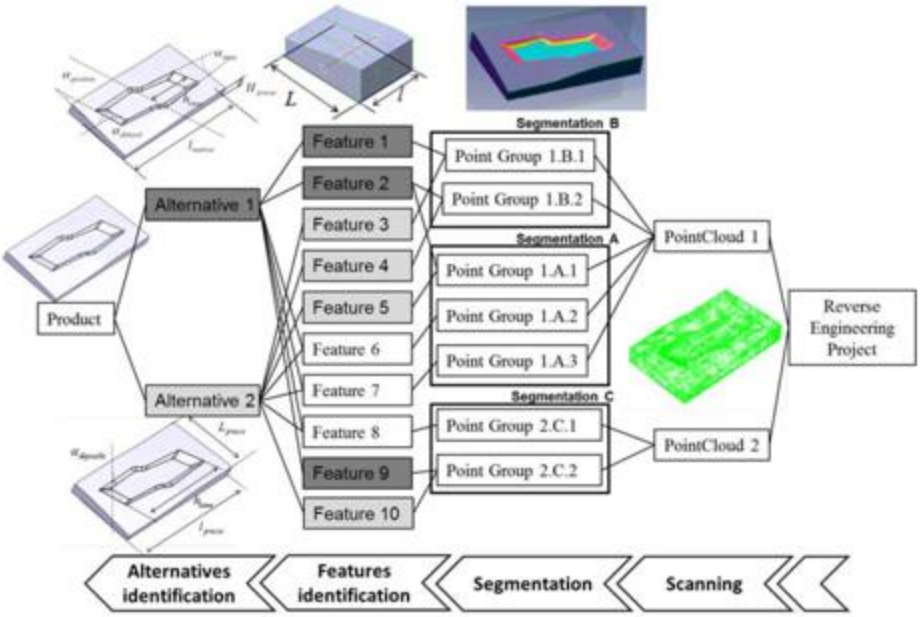


Figure 73 - *Workflow de PHENIX (Durupt, Remy, Bricogne, & Troussier, 2013)*

Après que l'approche PHENIX ait permis de traiter le cas d'une pièce mécanique, il fallut s'intéresser au produit/mécanisme dans son ensemble. Ce fut le but du projet ANR METIS qui a débuté en 2012.

L'hypothèse principale du projet METIS était que, pour la rétro-conception d'un grand ensemble mécanique complexe, les informations purement géométriques sont insuffisantes. METIS propose une solution intégrant l'ensemble des informations (y compris les informations géométriques) disponibles sur l'ensemble mécanique étudié afin de les traiter et d'en extraire une maquette numérique qui intègre les connaissances des concepteurs mais aussi des utilisateurs, fabricants… et plus globalement de tous les acteurs du cycle de vie.
Il s'agissait donc de créer une approche permettant à un utilisateur d'extraire les connaissances qui ont été intégrées au fil du temps dans le produit au sein d'un ensemble de données hétérogènes (géométriques mais pas uniquement) parfois incomplètes, telles que des images, des plans 2D, des nuages de points issus de numérisations 3D, des croquis, des photographies, des rapports de maintenance, des résultats de calculs…, voire même une ancienne version de la maquette numérique. D'un point de vue technique, METIS permet de générer une maquette numérique intégrant les connaissances que les acteurs originels du développement avaient prises en compte.

Dans le domaine du Génie Civil la reconnaissance automatique de forme à partir d'un nuage de points suscitent de forts intérêts : recherches de l'Université de Bonn en Allemagne pour la reconstruction automatique paramétrique de modèles de bâtiments (Ochmann, Vock, Wessel, & Klein, 2016), ou les progrès de la société Autodesk[122] qui désormais propose une chaîne intégrée depuis la numérisation 3D des données jusqu'à son stockage et sa visualisation pour inspection.

La méthodologie Ki4D

Horváth propose de représenter les connaissances avec un filtre sur le modèle de connaissance. Cette méthode consiste à décontextualiser les données. Ce concept permet d'identifier cinq formes principales, qui caractérisent l'information de manière générale : Algorithmique, Linguistique, Picturale, Symbolique, et Virtuelle (Owen & Horváth, 2002). Ainsi, chaque information issue du processus de création de valeur dans l'entreprise se trouvera caractérisée par l'une de ces formes.
Ces travaux ont été repris par Chandrasegaran pour encapsuler les connaissances opérationnelles sur le processus de conception (Chandrasegaran, et al., 2013) . Ils constituent le point de départ de la méthodologie Ki4D qui a été développée dans l'optique d'intégration de données hétérogènes. Dans notre cas, ces données sont hétérogènes dans le sens où elles sont de formes et de sources différentes : données virtuelles telles que des nuages de points, des modèles 3D, données textuelles telles qu'un cahier des charges, ou données picturales telles que des plans 2D, des images…

[122] www.autodesk.fr

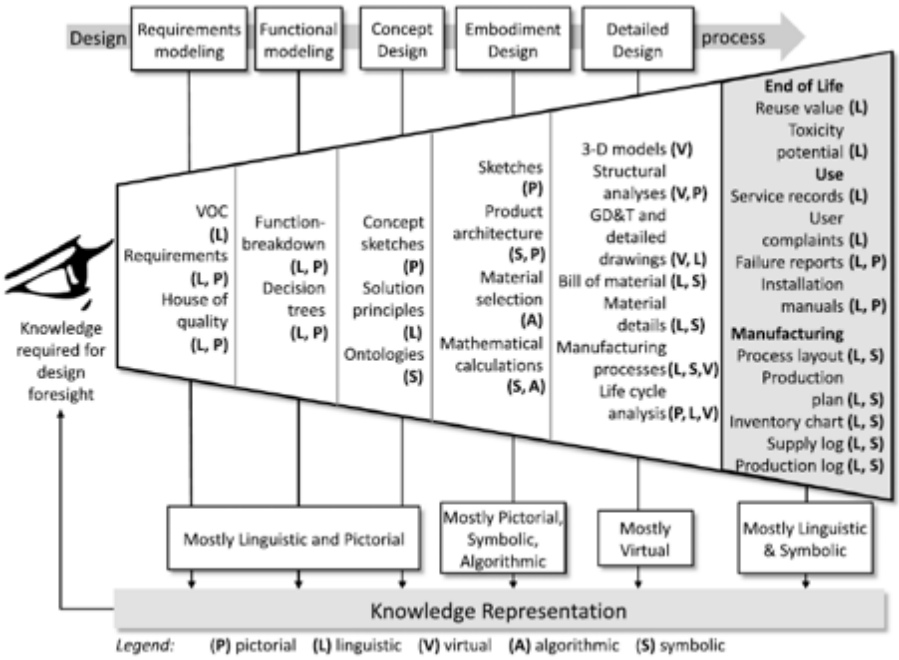


Figure 74 - *Les différentes formes de représentations des connaissances (Chandrasegaran, et al., 2013)*

La méthodologie Ki4D se base sur un espace en quatre dimensions. Le processus de rétro-conception est décrit tant du point de vue statique avec les différents points relatifs aux informations en entrée et sortie, que du point de vue dynamique avec les vecteurs qui permettent de passer d'un état à un autre. La figure suivante illustre cet espace d'informations et de connaissances Ki4D avec l'exemple des points P, Q et R qui représentent les différents états du produit.

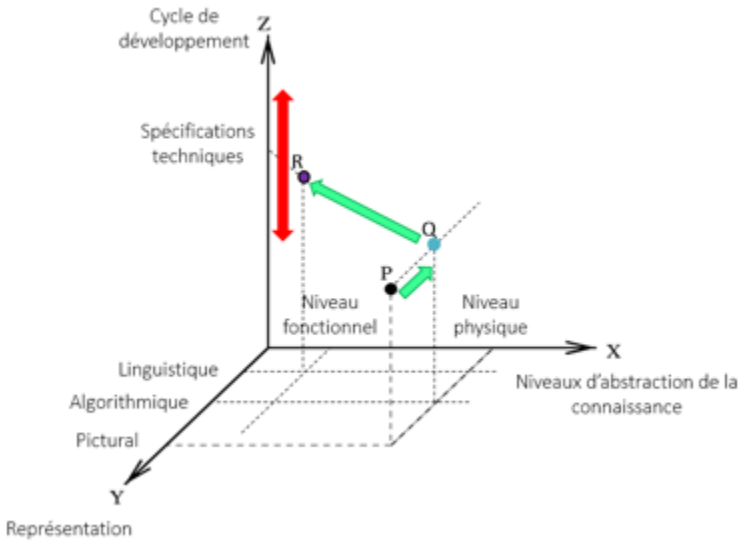


Figure 75 - *Espace Ki4D simplifié (Ouamer-Ali, Laroche, Remy, & Bernard, 2017)*

Les quatre dimensions considérées sont :

1. Le niveau d'abstraction qui identifie les différentes entités d'informations décrivant le cycle de développement du produit : de son immatérialité fonctionnelle à sa représentation physique,
2. La forme de représentation qui définit les formes dans lesquelles sont communiquées les informations (Chandrasegaran, et al., 2013) :
    - La représentation picturale : photos, vidéos, tableaux, dessins…,
    - La représentation symbolique : les aspects logiques tels que des diagrammes, des tables de décision, des graphiques…,
    - La représentation linguistique : le langage avec les communications verbales enregistrées, des textes…,
    - La représentation virtuelle : les modèles virtuels tels que la CAO, les modèles de réalité virtuelle, les animations…,

- La représentation algorithmique : les expressions mathématiques, les algorithmes informatiques, les procédures de calcul...

3. La décomposition systémique qui cible les composants sujets à la rétro-conception dans le système global dans le cas où une partie du système est analysée.
4. Le cycle de vie qui fournit une échelle temporelle avec les différentes phases de vie du produit.

Même si Ki4D est une méthode RE, c'est avant tout un outil d'aide à la décision ; l'utilisateur guide la démarche et reste maître de ses choix.
Ce processus de RE est modulaire car il est possible de construire des workflows différents en fonction du contexte. Ce moteur de workflow utilise des familles d'algorithmes tels que le traitement du langage naturel pour les données textuelles, les algorithmes de rétro-conception conventionnelle pour les données virtuelles (Bruneau, Durupt, Vallet, Roucoules, & Pernot, 2016), et la vision d'ordinateur pour les données picturales. Ces travaux complémentaires à la thèse de Mohamed Ouamer Ali ont fait l'objet d'une deuxième thèse dans le cadre du projet ANR METIS : Marina Bruneau était encadrée par l'UTT et l'ENSAM d'Aix en Provence (Bruneau, 2015).

2.4.4 Modèles de produits et modèle de contexte pour un PLM industriel

Afin de rendre opérationnel l'ensemble des principes scientifiques exposés précédemment, il convient d'aligner ces méthodologies sur :

1. Des modèles produits pour encapsuler les données,
2. Un système d'information pour supporter la connaissance et devenir un outil applicable en entreprise : le PLM.

Les premiers modèles de produits
Un des modèles de produits le plus courant est le STEP[123]. Ce standard de représentation est constitué de modules de base et de protocoles d'application. Concernant les systèmes « physiques », les principaux protocoles sont l'AP 203, pour ce qui relève de la géométrie, et l'AP 242, pour les concepts liés aux processus d'ingénierie des systèmes. Intégrer les métiers et les applications au sein d'un référentiel produit unique contribue à améliorer les processus de conception et le travail en entreprise étendue. Cela concourt également à renforcer la pérennité des données stockées, en particulier les informations relatives à la géométrie ou à la configuration.
D'autres standards sont disponibles, notamment l'ISO 15926, pour les grandes structures industrielles, comme les usines de production d'énergie ou les champs d'exploitation et d'extraction de ressources naturelles (Oil and Gas).
Le principal intérêt de ces standards multi-applications est qu'ils permettent de traiter tous les produits manufacturés, tous les métiers et tous les stades d'un cycle de vie. Ils contribuent ainsi à l'archivage à long terme des informations, en organisant l'échange via un format neutre et l'intégration des applications autour d'une base de données unique et partagée.

Parmi les travaux pionniers réalisés sur le format STEP, on peut citer la thèse de Doctorat de Frédéric Chambolle effectuée en collaboration avec le constructeur automobile Peugeot-Citroën PSA (Chambolle, 1999).
Nous allons développer ici les principaux éléments structurants de la norme STEP afin de montrer en quoi les concepts proposés peuvent être appliqués aux objets patrimoniaux qu'il s'agisse d'œuvres ou d'objets techniques anciens.
Le premier aspect considéré est celui de la diversité, avec l'introduction du concept de famille et de variante. Cette approche permet de prendre en compte la structure physique du produit, qui est alors décomposé en organes reliés entre eux par des interfaces et associés à des fonctions auxquelles ce dernier est censé répondre.
Le deuxième concept est celui de pièce (d'item), étroitement lié à celui de vue. Chaque vue prend en compte les modèles relatifs à un métier donné (esthétique, mécanique, ergonomie, fabrication, maintenance, etc.) ; chaque pièce est ensuite déclinée en instances, chaque instance possédant son cycle de vie propre.

[123] STEP : STandard for Exchange of Product model data - Norme ISO 10303

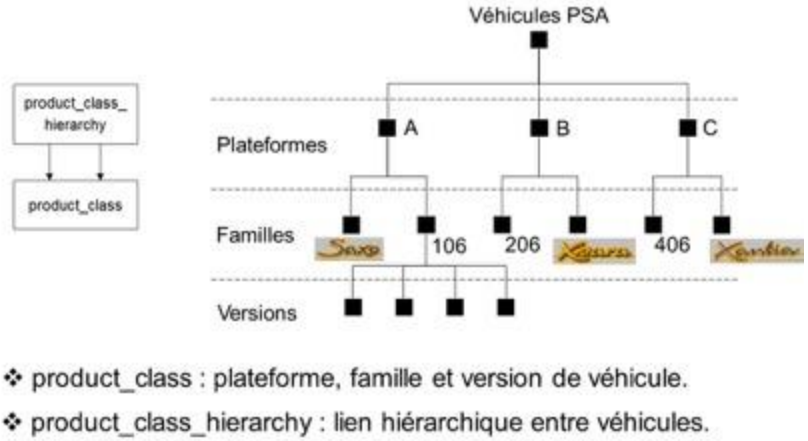


Figure 76 - *Concept de famille et de variantes exprimées au format UML (Chambolle, 1999)*

Une telle approche permet ensuite de créer une base de données et de représenter les objets réels sous forme d'instances. Les instances sont constituées de solutions techniques permettant d'établir la nomenclature des composants du produit, prenant en compte les éventuelles solutions techniques alternatives.
Ainsi, à partir de l'ensemble de ces éléments, le concept de configuration émerge, s'appuyant sur le concept d'effectivité, lequel dépend de nombreux facteurs systémiques (temporels, spatiaux, etc.).
Enfin, chacun de ces items est accompagné de données que l'on qualifie parfois d'« administratives » et qui consistent en un ensemble de documents visant à caractériser le produit sous différents aspects organisationnels pragmatiques.
Finalement, la synthèse des relations permet de mettre en évidence les liens existants entre la définition d'un système, de ses organes (ou constituants) et des fonctions qu'il est censé assurer. À cela, on associe, outre les fonctions et les solutions techniques, les modèles de comportement permettant de prouver que les solutions techniques choisies répondent bien aux performances attendues du produit, en particulier définies dans les fonctions.
Aujourd'hui dénommés MBD[124], ces modèles sont les fondements indispensables pour décrire les objets virtuels issus de l'industrie, comme la CAO (Quintana, Rivest, Pellerin, Venne, & Kheddouci, 2010).

Les modèles produits élargis

Une des bases conceptuelles pour la représentation des modèles produits est celle proposée par Gero en 1990 (Gero, 1990). Le modèle FBS - Function, Behavior, Structure - est une approche pour concevoir des produits, qui permet la représentation de manière explicite (Hu, et al., 2000) :

- des fonctions du produit (le problème),
- de la structure du produit (la solution),
- et des comportements internes du produit.

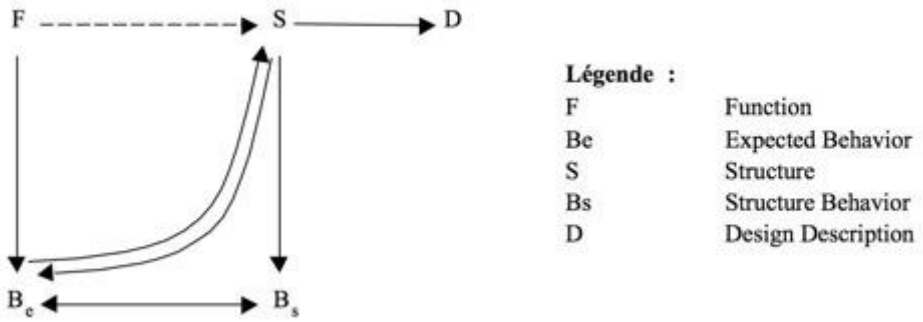


Figure 77 - *Modèle FBS proposé par Gero (Gero, 1990)*

Reprenant les concepts clés de Gero, dans la thèse de Michel Labrousse (Labrousse, 2004), un nouveau modèle fédérateur générique, FBS-PPRE[125] a été proposé (voir figure ci-dessous). Ce dernier permet une modélisation intrinsèque du produit ainsi que de ses différents rôles au cours de son cycle de vie. Le concept d'External effect intègre l'ensemble des éléments

[124] MBD = Model-based Definition
[125] FBS-PPRE = Function Behaviour Structure - Process, Product, Resource, External effects

influençant la vie du produit. Il en résulte une définition claire du produit et de ce qui lui est externe, de ce qui est susceptible d'induire des changements ou des évolutions de ses caractéristiques au cours du temps.
À partir de ces éléments de modélisation, un système d'information peut être conçu afin de suivre la progression des fragments d'information et de connaissances relatifs à un produit. Ce système ouvre un accès bi-directionnel à l'ensemble des métiers et des acteurs du cycle de vie, disposant d'un modèle pérenne accessible tout au long du cycle de vie du produit (Labrousse, Bernard, & Véron, 2004).

Dans la continuité des travaux de Michel Labrousse, la thèse de François Christophe a proposé de rajouter les exigences de conception au cadre FBS (Christophe, 2012) : c'est le modèle étendu RFBS (Requirements/Function/Behavior/Structure) développé par le Professeur Éric Coatanea (Christophe, Bernard, & Coatanea, 2010).

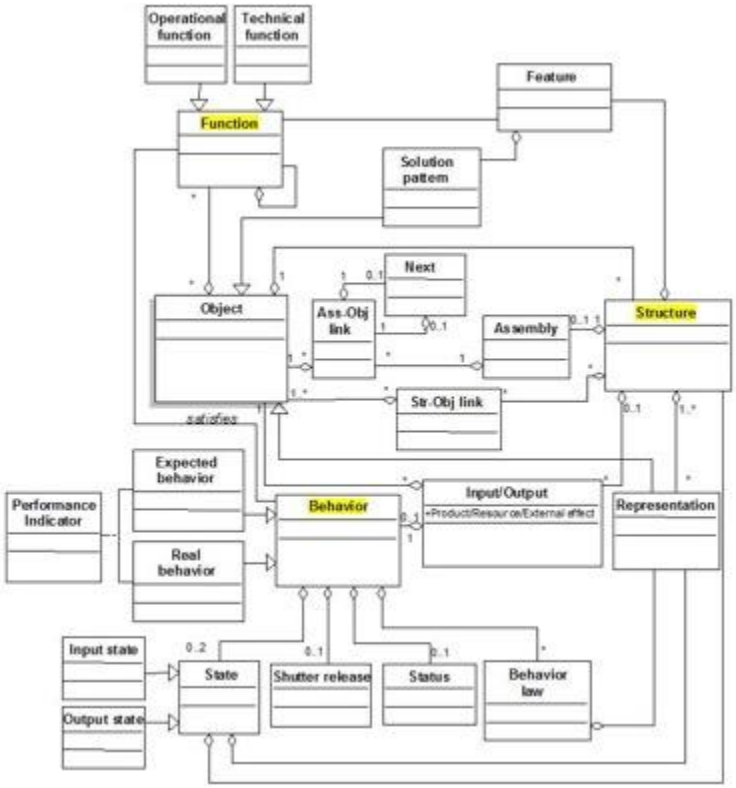


Figure 78 - *Diagramme de classes du modèle FBS-PPRE (Labrousse, 2004)*

Dans le domaine de la conception mécanique, de nombreuses ontologies métiers sont développées pour supporter la connaissance et les informations techniques manipulées (Lombard, 2006).
On soulignera les résultats du projet IPPOP[126] qui débuta en 2001. Philippe Girard définit un cadre de modélisation des données manipulées en entreprise en ajoutant le contexte organisationnel à la base Produit-Processus.

PPO pour Produit-Processus-Organisation (Girard, 2005).

Lionel Roucoules propose alors un Système d'Information basé sur PPO permettant la structuration des données produits (Roucoules, 1999). Le projet PICS-PPO[127] a permis de créer un démonstrateur logiciel pour gérer les connaissances et le comportement du triptyque PPO en contexte d'ingénierie (Roucoules, 2007).
En 2010, dans sa thèse de doctorat, Manuel Gonçalves reprendra le modèle PPO et l'adaptera au suivi des spécifications produits-projets dans le cadre de la conception de produits manufacturés (Gonçalves, 2010).

[126] IPPOP = Intégration Produit Processus Organisation pour « l'amélioration de la Performance en ingénierie »
[127] PICS-PPO = Plate-forme d'Intégration logicielle pour la gestion des Connaissances et la Simulation du comportement Produit-Processus-Organisation en Ingénierie

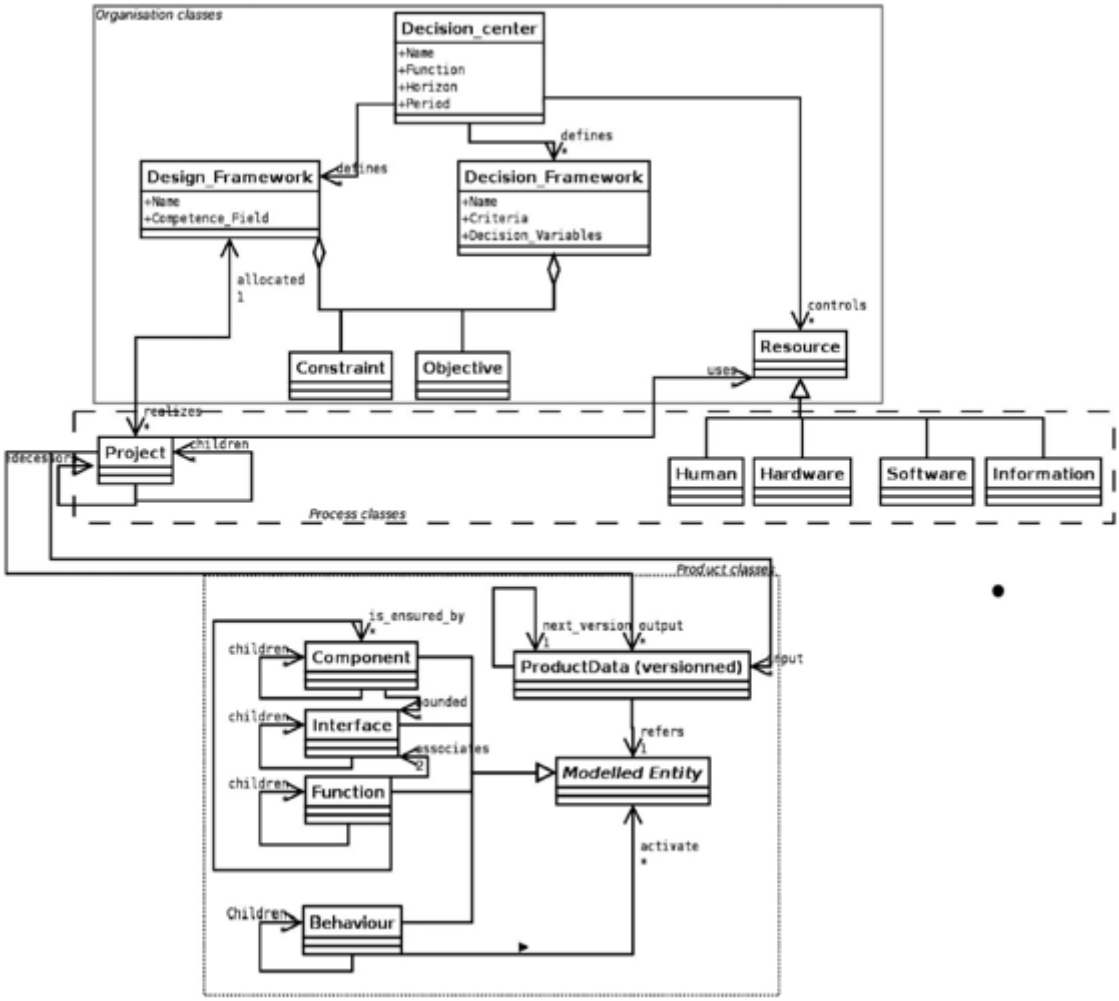


Figure 79 - *Diagramme de classes du modèle PPO (Noël & Roucoules, 2008)*

Nous rappellerons également la méthode de capitalisation des connaissances MOKA. En effet, dans le cadre du projet ESPRIT, un outil a été proposé pour formaliser une méthodologie de capitalisation et de réutilisation des connaissances. MOKA prend ses origines dans le modèle FBS et se base sur deux ontologies : formelle et informelle. Le modèle informel reprend les fiches ICARE comme détaillé précédemment dans les méthodes de KM (Skarka, 2007).

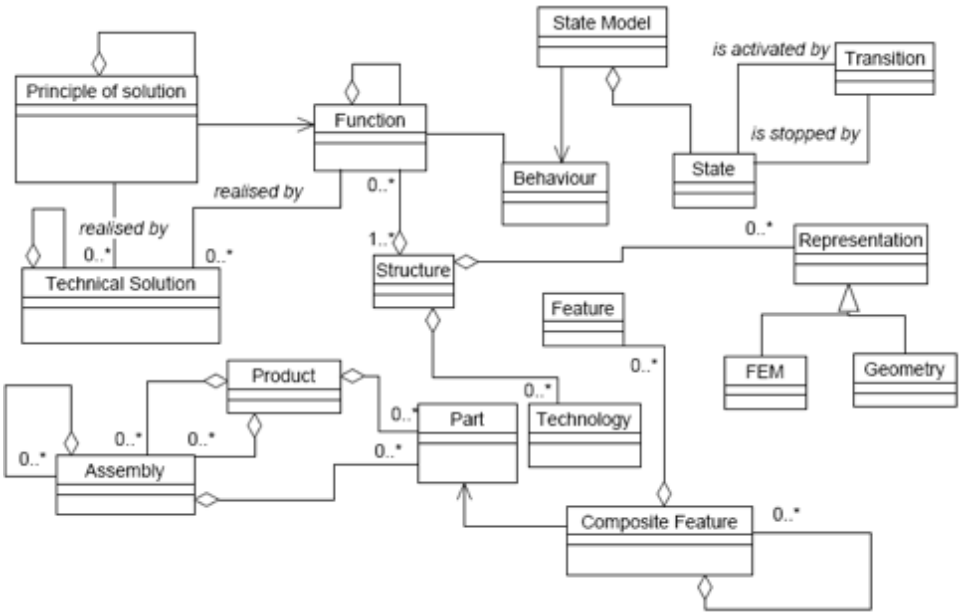


Figure 80 - *Diagramme de classes du modèle MOKA (Managing Engineering Knowledge, 2001)*

Pour terminer cet état de l'art des principaux modèles de données, citons les travaux développés par le NIST[128]. Il s'agit d'un modèle-produit dont le but est de proposer un support générique, simple et extensible pour représenter les informations liées à la gestion du cycle de vie du produit indépendamment des applications informatiques métier qui vont utiliser ces informations (Sudarsan, Fenves, Sriram, & Wang, 2005) (Fenves, 2001). Deux modèles principaux sont utilisés pour décrire le produit à deux niveaux différents :

- Le « Core Product Model » : permet la représentation des différentes informations relatives à la description d'un artéfact (composant, sous-assemblage, assemblage). Il fournit une description multi-vues grâce à la notion d'artéfacts. En plus des concepts géométriques, ce modèle prend en compte les aspects de forme, de fonction, de comportement, de matériaux, de décomposition physique et fonctionnelle, de mise en correspondance entre la fonction et la forme ainsi que plusieurs relations entre ces différents concepts.
- Le « Open Assembly Model » : permet la représentation des différentes informations sur les relations d'assemblage entre les artéfacts. OAM vient étendre le modèle CPM afin d'intégrer les différentes informations qui caractérisent les liens des artéfacts dans un système (Foufou, Fenves, Bock, Rachuri, & Sriram, 2005). Ce modèle s'appuie sur la norme d'échange de données STEP pour l'extraction des informations géométriques à partir du CPM.

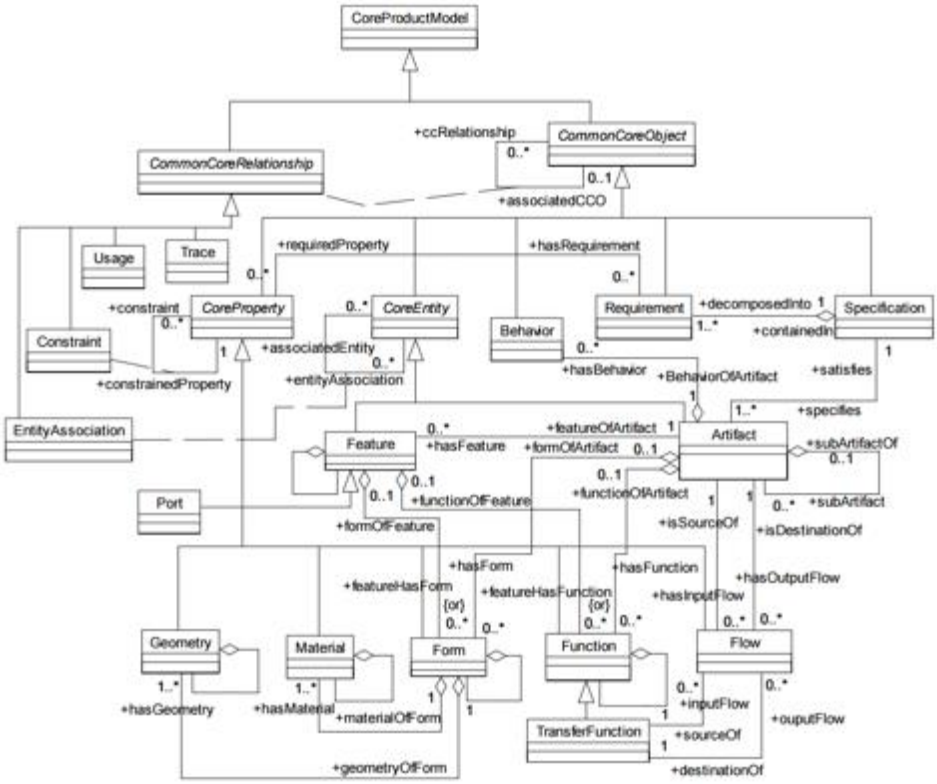
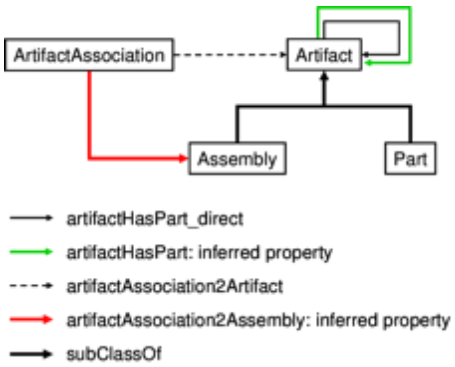


Figure 81 - *Diagramme de classes du modèle CPM (Sudarsan, Fenves, Sriram, & Wang, 2005)*

On notera tout particulièrement les travaux de Fiorentini visant à aligner le CPM et l'OAM par un méta-modèle de plus haut niveau (Fiorentini, Rachuri, Suh, Lee, & Sriram, 2008). Comme l'illustre la figure suivante, ces recherches contribueront au modèle générique dédié au patrimoine que nous mettons en place : le Digital Heritage Reference Model (voir partie ci-après).



[128] NIST = National Institute of Standards and Technology

Figure 82 - *CPM and OAM for representing assembly structure (Fiorentini, Rachuri, Suh, Lee, & Sriram, 2008)*

Du Système d'Information au PLM

Grâce à l'ensemble des modèles proposés précédemment, il est possible de mettre en place des outils pour supporter la connaissance et la mettre à disposition des usagers concernés (Yildiz, 2015). L'ensemble de cet état de l'art sur les modèles structurant les Systèmes d'Information des produits et processus d'entreprise constitue un des fondements pour une opérationnalisation de nos travaux de recherche. Nous exposons ici les éléments relatifs aux cycles de vie d'un produit, d'un objet technique, d'un artefact, d'un système complexe… La prise en compte du temps et de l'évolution des produits ou des systèmes étudiés. Le domaine scientifique faisant référence est celui du PLM.

En 1992, dans sa thèse de doctorat, Charles Mony détaillait l'ensemble des services de l'entreprise requérant des données techniques tout au long du cycle de développement d'un produit (Mony, 1992).

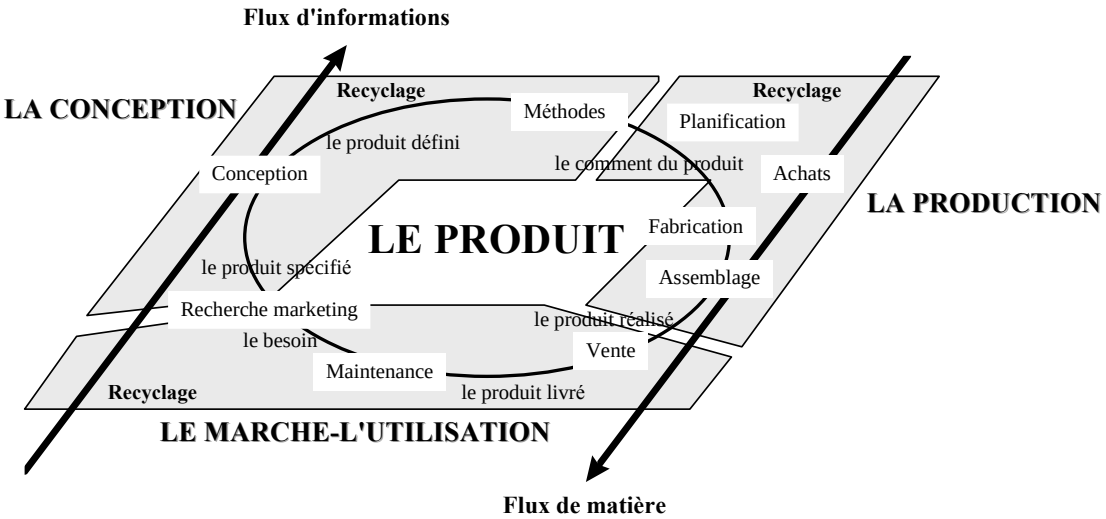


Figure 83 - *Cycle d'élaboration du produit (Mony, 1992)*

Pour supporter l'ensemble de ces informations et permettre une interopérabilité tant des données que des services opérationnels de l'entreprise, il faut mettre en place un Système d'Information approprié. De nos jours, le SI est devenu l'élément clef nécessaire au bon fonctionnement d'une entreprise (Pepin, 2016). Abramovici définit le PLM comme une approche intégrée incluant des méthodes, des modèles et des outils informatiques pour gérer l'information des produits, les processus d'ingénierie et les applications tout au long du cycle de vie. Le PLM ne s'adresse pas uniquement à une entreprise seule ; c'est un outil de collaboration interdisciplinaire entre les fabricants, les fournisseurs et les utilisateurs. (Abramovici, 2007).

Rappelons que cette vision structurante était déjà proposée par Le Moigne à la fin du XXème siècle (Le Moigne, 1977) (Le Moigne, 1990) mais cependant elle n'était pas aussi précise qu'elle ne l'est aujourd'hui. Debaecker retrace cette évolution en 3 phases (Debaecker, 2004) :

1. Dans les années 1980, les systèmes mis en place étaient internes aux métiers de l'ingénierie des entreprises et permettaient de gérer les données techniques. C'était les SGDT[129] et les PDM[130] (Eynard & Caillaud, 2003),
2. Puis les usages se sont élargis à l'ensemble des services (achats, stocks, BE, fabrication…). Entre autres la mise en réseau des entreprises par internet dans les années 1990 a contribué à l'expansion des Systèmes d'Information. (Eynard, 2005),
3. Avec le besoin d'intégrer les clients et les fournisseurs pour aller vers une entreprise étendue, les années 2000 ont fait évoluer le SGDT vers un Système plus global : le PLM. A noter que cette transition reposant sur des valeurs communes de confiance, les entreprises ne communalisent pas toutes leurs données (Lamouri, 2006).

Actuellement, les systèmes PLM sont déployés dans tous les secteurs de l'industrie : produits ou services. Ils concernent principalement les grands groupes et les entreprises de taille moyenne. Cependant, les secteurs de niches des petites entreprises ou des entreprises non industrielles (dont celui des professionnels du patrimoine) ne possèdent pas encore d'outils appropriés, c'est l'objet de nos travaux de recherche.

[129] SGDT = Systèmes de Gestion de Données Techniques

[130] PDM = Product Data Management

Le PLM désigne l'ensemble des informations ou des méthodes et des outils permettant de produire, traiter et exploiter les informations concernant un produit, de sa conception à son recyclage ou à sa mise au rebut. (Bernard, Laroche, & Hervy, 2015).

Les fondements du PLM : la structuration des données techniques dans les entreprises

Les équipes projets en entreprise fonctionnent le plus souvent en ingénierie concourante ou simultanée[131] (Houssin, Bernard, Martin, Ris, & Cherrier, 2006). En effet, de plus en plus d'acteurs sont impliqués tôt au cours du processus de développement des systèmes. Le cycle de vie d'un produit manufacturé peut être décomposé en trois phases selon Dimitri Kiritsis (Kiritsis, Bufardi, & Xirouchakis, 2003) :

1. Beginning of Life (BOL), correspondant au début du cycle de vie et englobant les phases de conception et de fabrication,
2. Middle of Life (MOL), correspondant à la période d'utilisation du produit et englobant principalement la phase de distribution (du point de vue de l'entreprise) et l'activité de support,
3. End of Life (EOL), caractérisant la fin de vie du produit (recyclage par exemple).

La prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des produits a pour conséquence le développement de coopérations entre différents acteurs en entreprise étendue, coopérations souvent distantes et asynchrones. L'apport du PLM (Le Duigou, Bernard, & Perry, 2012) (Le Duigou, Bernard, Perry, & Delplace, 2012) permet un partage d'informations et l'accès aux éléments clés pour chacun des métiers, qui se trouvent alors intégrés tout au long du processus de développement des systèmes (Urban-Galindo, 2017). Julien Le Duigou définit par exemple le PLM comme « une stratégie d'entreprise visant la gestion collaborative des activités centrées sur le produit durant l'ensemble de son cycle de vie à travers l'entreprise étendue » (Le Duigou, Bernard, Perry, & Delplace, 2010). La figure suivante définit les grandes étapes du cycle de vie d'un produit ainsi que les domaines métier de la conception et de la fabrication mis en regard.

Figure 84 - *Système PLM et applications métiers (Le Duigou, 2010)*

Les applications métiers sont ainsi connectées à un système d'information global véhiculant toutes les données indispensables à l'élaboration d'un produit mais aussi à l'ensemble des scénarios de son cycle de vie, depuis sa fabrication jusqu'à sa destruction ou à son recyclage, total ou partiel. Le système PLM fournit un accès aux données partagées de l'entreprise (Dutta & Wolowicz, 2005), principalement via la maquette numérique (coûts et délais de conception et de fabrication), grâce à un système d'information basé sur les modèles produit détaillés ci avant (par exemple : (Mony, Dupinet, & Bernard, 1992) (Labrousse, 2004)).

On notera également d'autres travaux de PLM adapté avec le management des connaissances (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2010) (Daaboul, Bernard, & Laroche, 2010) ou les travaux exploratoires de la thèse de Xang Xu pour intégrer le KM au sein d'un PLM afin de pouvoir mesurer et évaluer la connaissance (Xu Y. , 2010).

[131] L'ingénierie concourante ou simultanée (à la différence de l'ingénierie séquentielle) consiste à associer dès le début l'ensemble des acteurs impliqués dans un processus de production ou dans l'élaboration d'un projet (Bernard, Laroche, & Hervy, 2015).

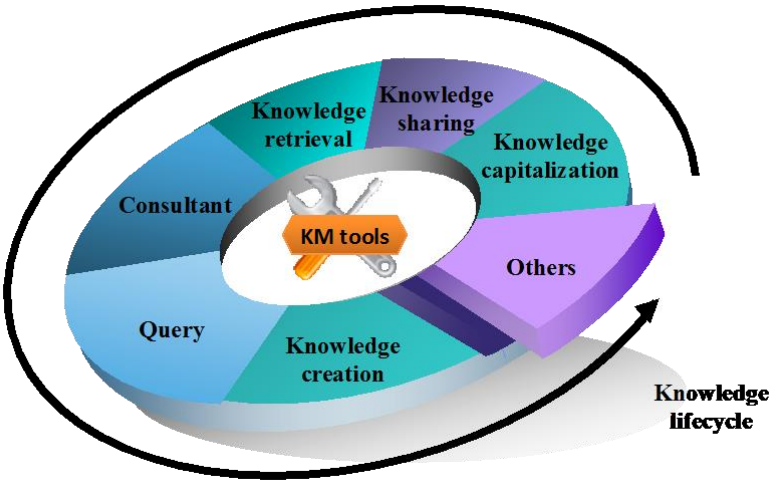


Figure 85 - *Positioning KM tools in the context of the knowledge lifecycle (Xu, Bernard, Perry, & Lian, 2011)*

Machine learning et web sémantique

Pratiquement, un système PLM s'appuie sur une infrastructure permettant à la fois des échanges structurés et un partage documentaire (du Preez, et al., 2005) dont les règles et les processus sont mis en place lors de l'entrée en jeu de chacun des acteurs. L'architecture est de type client-serveur comme l'illustre la figure suivante (Chambolle, 1999).

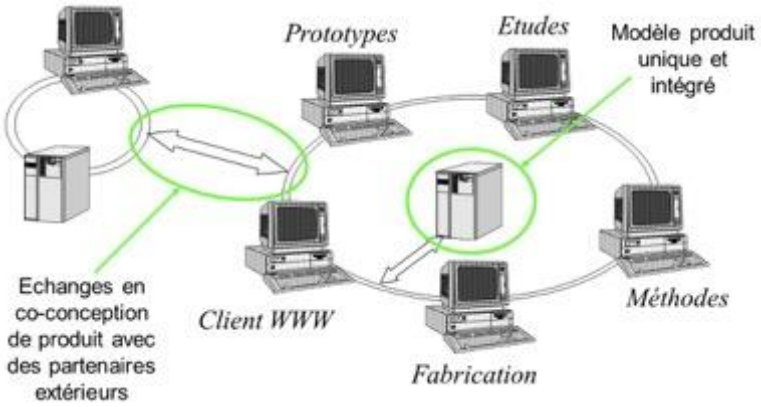


Figure 86 - *Infrastructure d'échange d'informations entre les acteurs (Chambolle, 1999)*

Pour stocker intelligiblement l'ensemble des données, des ontologies formelles sont mises en place : elles font appel au web sémantique et au machine learning qui est en pleine expansion. Dans le monde industriel particulièrement car il permet de trouver, sélectionner et apporter la bonne information au bon moment, à la bonne personne. Le machine learning se base sur les modèles cités précédemment afin d'organiser les connaissances en vue de les structurer.

Mentionnons malgré tout, que ces travaux ne sont pas si récents si l'on cite le cas particulier du Web sémantique. Le web sémantique prend ses origines de travaux dès les années 1990 portant sur la gestion des connaissances. Berners-Lee le définissait en 2001 comme la capacité des machines à lire les contenus présents sur Internet tout comme le font les humains ; et ainsi faciliter la mise en relation et la recherche d'information (Berners-Lee, 2001). Désormais, le web sémantique repose sur des protocoles informatiques promus par le W3C[132].
Parmi les standards les plus utilisés en modélisation des métadonnées, on peut citer le Dublin Core décrit par la norme ISO 15836. C'est est un schéma générique qui permet la représentation de ressources numériques et leurs relations avec d'autres ressources.

Mais le web sémantique présente des limites dont l'absence de possibilité d'une approche multi points de vue.
Une alternative est l'utilisation de modèles socio-sémantiques pour l'analyse et la représentation d'informations dans un contexte d'accès collectif tel que le PLM. Serge Garlatti et Yannick Prié proposent une recherche d'information adaptative sur le web basée à la fois sur les métadonnées des ressources mais aussi sur les profils des utilisateurs (Garlatti & Prié, 2004). Roth

[132] W3C = World Wide Web Consortium, organisme de normalisation et de promotion des standards du web (HTML, RDF, XML…)

a démontré cette théorie grâce à l'utilisation de frameworks socio-sémantiques basés sur la mise en place de treillis agents-concepts (Roth, 2013). L'objectif est de déstructurer les éléments de connaissances pour les restructurer sous une forme popularisée ; il s'agit du même principe de capitalisation et de structuration des connaissances tel qu'imaginé par Paul Otlet pour le Mundaneum (Otlet, 1934).

Pour structurer les informations et les mettre en relation, il est établi une ontologie de domaine, composée de classes et de prédicats. Le rôle des ontologies consiste à résoudre les problèmes d'hétérogénéité sémantique et ainsi permettre une interopérabilité parfaite entre les systèmes. En 2013, Toader David Gherasim propose dans sa thèse de mettre en place (Gherasim T. , 2013) :

- Des métadonnées qui décrivent les services :
  - Son intitulé,
  - L'intitulé de ses entrées,
  - L'intitulé de ses sorties.
- Des données métiers utilisées dans chaque système.

La modélisation ontologique permet de formaliser un cadre de compréhension et d'interrogation des connaissances relatives à un corpus de documents numériques.

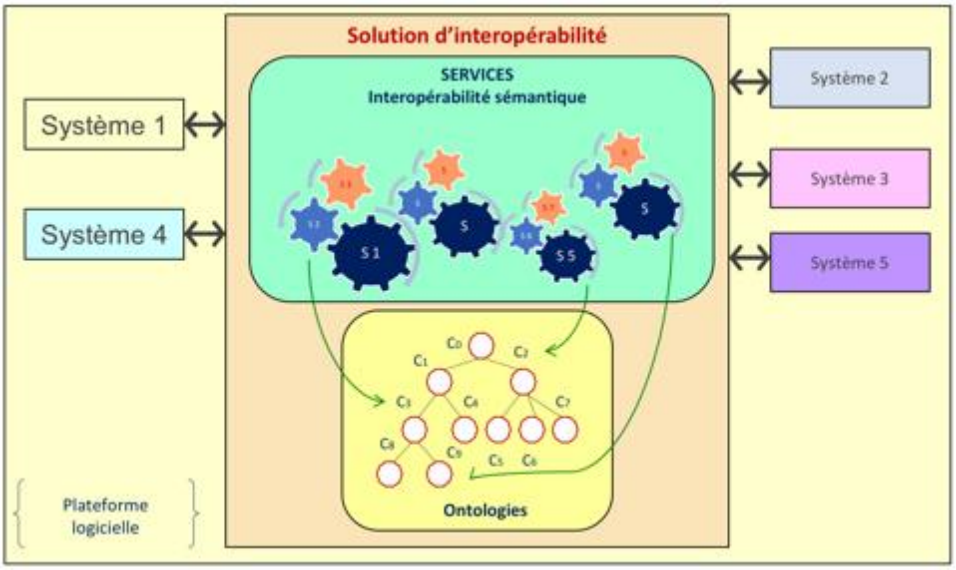


Figure 87 - *Structure de la solution d'interopérabilité des ontologies selon Gherasim (Gherasim T. , 2013)*

Usuellement, ces ontologies de domaine sont créées par un groupe d'experts du domaine d'études en collaboration avec des cogniticiens et informaticiens. Cependant, ces modèles sont principalement basés sur l'utilisation de descripteurs non définis par utilisateur. Il est donc difficile de choisir la méthode de classification sans connaître la finalité (Hervy, 2014). L'ingénierie du web socio-sémantique repose non pas sur des modèles formels mais sur l'utilisation d'ontologies sémiotiques. La différence provient du fait que les concepts intégrés dans les ontologies sémiotiques sont dépendants de la situation d'usage moyennant un accord de la communauté de pratique sur l'association entre les signes et le contenu sémiotique associé.

L'approche basée sur des ontologies socio-sémantiques est dite contextuelle car privilégiant des éléments faisant sens pour l'utilisateur et non pour la machine.

Intégration d'un modèle de contexte pour mieux adapter les connaissances

Dans le contexte de l'usine 4.0 énoncé précédemment, l'entreprise ne peut plus travailler de façon traditionnelle avec des processus linéaires. Le système doit en permanence se réadapter tant à son environnement interne qu'aux contraintes du monde extérieur. Tullio Tolio appelle ce phénomène la coévolution des produits, des processus et du système de production (Tolio, et al., 2010).

Figure 88 - *Les dynamiques de l'environnement du système de production (Tolio, et al., 2010)*

A cette vision externaliste organisationnelle des nombreuses interactions avec le système de production (Tolio, et al., 2010), il faut également envisager que le système puisse s'adapter à la situation de travail en atelier. Il doit être sensible au contexte et permettre un accès/utilisation des contraintes/paramètres tant pour un utilisateur débutant qu'expert.

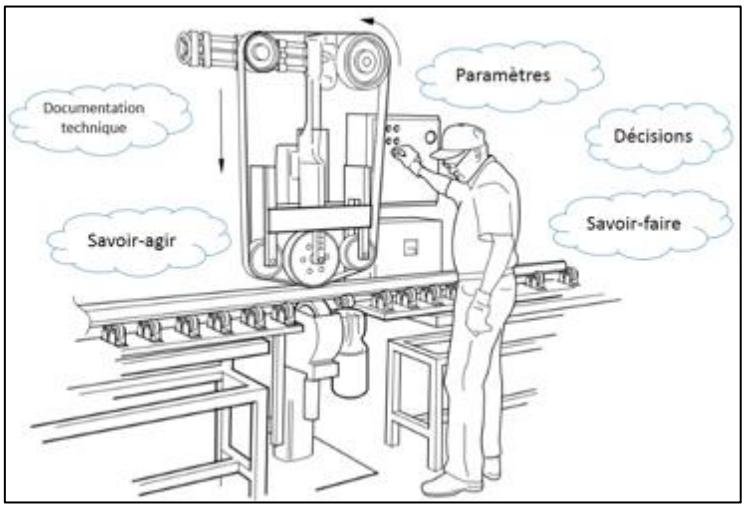


Figure 89 - *Situation de travail en atelier : les interactions*

Pour apporter des réponses scientifiques par des propositions de modèles et des outils dédiés, il faut se tourner vers la notion de contexte qui prend ses racines dans le monde de l'informatique. En 1991, Weiser définit le nouveau paradigme de l'informatique distribuée et mobile sur le fait que les technologies vont devenir omniprésentes dans notre vie et être incorporées dans le monde physique qui nous entoure (Weiser, 1991). C'est ce que nous nommons aujourd'hui l'informatique ubiquitaire. Pour mieux s'adapter à son environnement, il est donc nécessaire de prendre en compte les contextes. Zimmermann définit 5 éléments principaux : l'individualité, le temps, l'emplacement, l'activité et les relations (Zimmermann, Lorenz, & Oppermann, 2007).

Grâce aux modèles produits définis précédemment, dans la thèse de Mohamed Anis Dhuieb, nous avons proposé un modèle intégrant le contexte pour structurer la connaissance des objets d'entreprise (Dhuieb, 2016). Le schéma UML suivant intègre les classes PPR[133] ainsi le niveau de complétude de la connaissance décrit dans la partie ci-avant sur *La gestion des connaissances*.

[133] PPR = Produit Processus Ressource

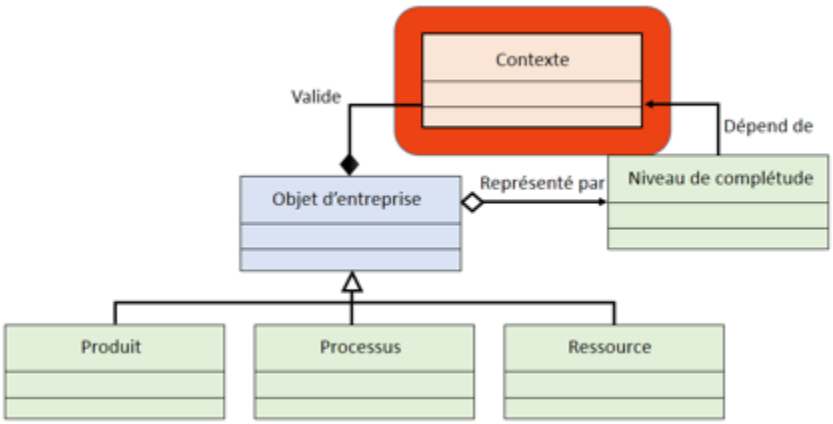


Figure 90 - *Modèle de contexte (Dhuieb, 2016)*

Appliquant la théorie de l'activité à cette vision de représentation du contexte, Dhuieb a défini 3 contextes intervenant en entreprise :

- La dimension opérationnelle prend en compte le mode opératoire de l'utilisateur et permet d'identifier la tâche dans laquelle il est impliqué. L'artefact fait référence à l'ensemble des outils utilisés pour réaliser l'activité. Ce concept inclut les ressources à disposition de l'utilisateur y compris le système qui l'utilise,
- La dimension centrée utilisateur permet de prendre en compte les données contextuelles décrivant le profil de l'utilisateur du système dont ses compétences. Le profil joue un rôle très important dans le processus d'adaptation de l'information,
- La dimension organisationnelle regroupe les concepts qui organisent l'activité dans une communauté.

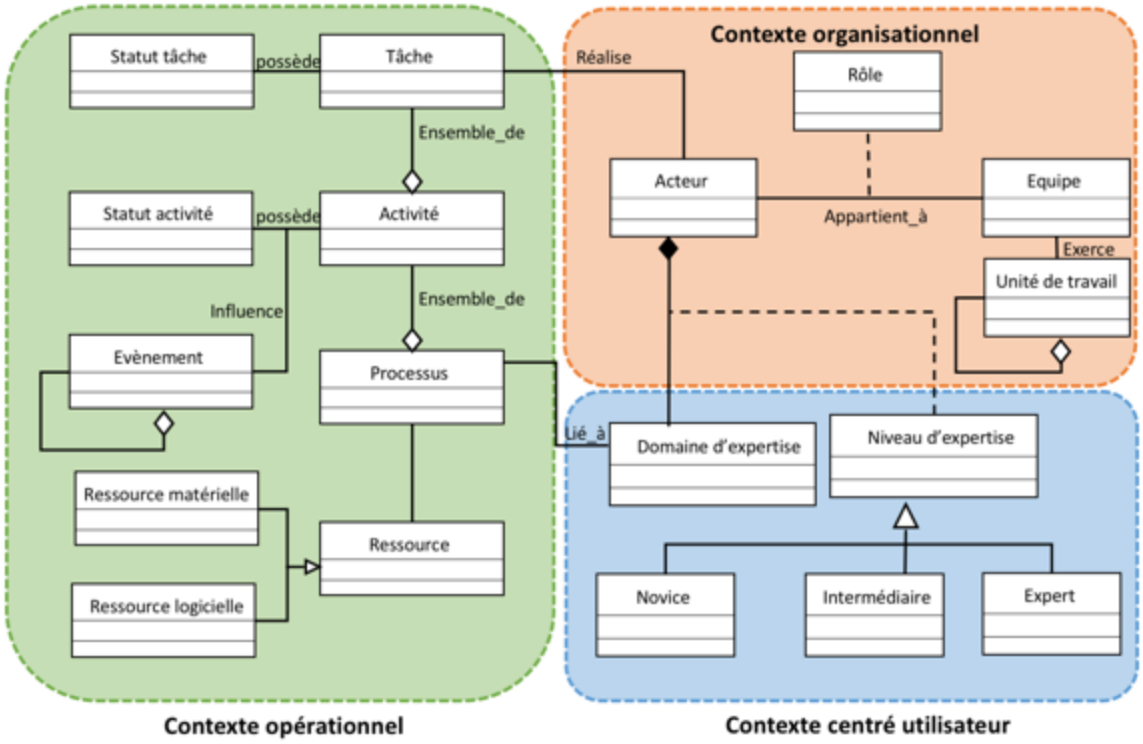


Figure 91 - *Modélisation des contextes métiers*

L'objectif final attendu pour la thèse de Anis Dhuieb était d'étendre le PLM non pas aux simples données manipulées en entreprise mais à un ensemble multi-échelle de connaissances. Cette approche a nécessité de prendre en compte le contexte d'utilisation comme nous venons de le détailler. Ce modèle de contexte a donc été proposé et couplé au processus de captation des connaissances pour créer un mécanisme d'adaptation contexte/connaissances.
Ces travaux se basent sur un agent intelligent qui interagit avec l'ensemble du SI de l'entreprise (Dhuieb, Laroche, & Bernard, 2013) permettant ainsi de résoudre un des problèmes majeurs de ce type d'assistant qu'est l'interopérabilité (Dhuieb, Belkadi,

Laroche, & Bernard, 2014). La finalité est une application de réalité virtuelle in-situ dans l'entreprise développée dans le cadre du projet ARTUR qui sera détaillé dans la partie ci-après sur les applications d'*Extraction de connaissances*.
La figure suivante décrit l'architecture de ce framework de mappage contexte/connaissances.

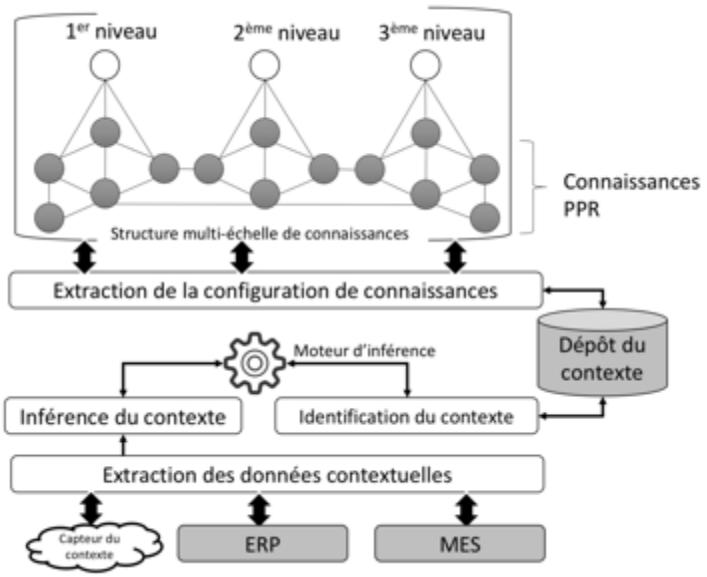


Figure 92 - *Framework de mappage contexte/connaissances (Dhuieb, Belkadi, Laroche, & Bernard, 2015)*

2.4.5 Vers un PLM dédié au patrimoine : le KLM patrimonial

Comme nous venons de le voir dans l'état de l'art précédent et le positionnement de nos apports scientifiques, les travaux sur le KLM patrimonial requièrent 2 aspects que nous allons développer :

- *Dans un premier temps nous allons voir comment structurer les connaissances par les modèles dédiés,*
- *Puis dans un deuxième temps comment rendre opérationnels ces modèles par des outils adaptés.*

Le PLM pour le patrimoine : verrous technologiques et humains
Quel que soit l'objet considéré, qu'il soit industriel ou patrimonial, il porte avec lui son histoire. Mais pour pouvoir partager cette histoire, l'enrichir par la contribution de tous les acteurs qui côtoient l'objet, et la faire perdurer au cours du temps, la transcription au travers de modèles est essentielle. Pendant des générations, la connaissance historique des objets a été partagée entre les acteurs, et parfois transcrite dans des écrits, des schémas, puis des photos, des films, et plus récemment avec l'informatique, dans des bases de données. Ces modèles peuvent interagir avec les acteurs humains au travers d'interfaces reliés à un système d'information nouveau : le PLM du patrimoine, qui gère le cycle de vie des informations relatives au cycle de vie du produit.
Les problèmes nouveaux qui apparaissent sont relatifs à la durée de vie des produits, certains éphémères, d'autres plus durables, pour lesquels la préservation des connaissances essentielles est primordiale. Mais définir les connaissances essentielles revient à savoir comment on construit, puis comment on peuple les modèles et, surtout, comment, de fait, on classifie et on rend cohérent les documents générés au cours de la vie du produit. L'enjeu crucial est le maintien d'une cohérence entre les différentes vues métiers engendrées au fil des évolutions et des modifications du produit, dans la diversité des éventuelles variantes de configuration. La réelle complexité est que l'on gère, non seulement les informations intrinsèques au produit, mais aussi celles qui concernent tout ce qu'il est nécessaire de créer pour que le produit existe (outils, outillages, systèmes de fabrication, moyens de transport...) et, enfin, celles qui concernent les écosystèmes dans lesquels la vie du produit se déroule (environnements, acteurs, temporalités, rôles...). Les dimensions multi- technologiques, multiculturelles, multi-métiers, multi- temporelles, liées à la fragmentation des connaissances acquises et produites, justifient pleinement l'existence d'un système dont le rôle est d'effectuer le suivi et le maintien de la cohérence de l'ensemble.

Le concept du PLM n'est pas si éloigné de l'histoire des techniques. Il est possible de trouver une certaine analogie à la notion de génétique technique telle que développée par Michel Cotte depuis les années 2000 (Cotte, 2010). Celle-ci se base sur l'étude

des courants de pensées d'un point de vue technique en s'appuyant sur les points d'inflexion technologique tant tacites qu'explicites (par exemple par le dépôt de brevets). L'objet technique est replacé au cœur des préoccupations et il est défini par des filières techniques dans l'esprit de la mécanologie de Gilbert Simondon (Simondon, 1989).
La mécanologie est une démarche épistémologique apportant la compréhension structurale d'un ouvrage technique et de ses lignées techniques le traversant. Sur la base d'entretiens avec des ingénieurs, des concepteurs ou des inventeurs, cette démarche permet de réaliser une analyse historique de chaque système tout en considérant le système complexe complet. La mécanologie et la génétique technique présente des similarités avec la méthode MKSM de Jean-Louis Hermine dédiée à la gestion des connaissances (Ermine, Chaillot, Bigeon, Charreton, & Malacieille, 1996).
Les approches développées par Simondon et Cotte s'inscrivent dans une nouvelle historiographie de l'histoire des techniques. En effet, nous ne commenterons pas ici l'ensemble des travaux couramment utilisés et cités sur la systémique de l'histoire des techniques dont ceux de Maurice Daumas (Daumas, 1962-1979) et Bertrand Gille (Gille, 1978).

Le cycle de vie étendu du patrimoine
La complexité des artefacts historiques est bien plus élevée que celle des produits issus de l'industrie manufacturière car elle intègre un nouveau cycle de vie. Répondant aux mêmes dogmes, les recherches menées sur les phases de recyclage des objets peuvent contribuer à nos recherches sur le « KLM for Heritage » (Perry, Bernard, Laroche, & Pompidou, 2012). La figure suivante illustre les frottements entre le cycle de vie de l'objet au sein de l'outil de production et le cycle de vie en utilisation (Inoue, et al., 2012).

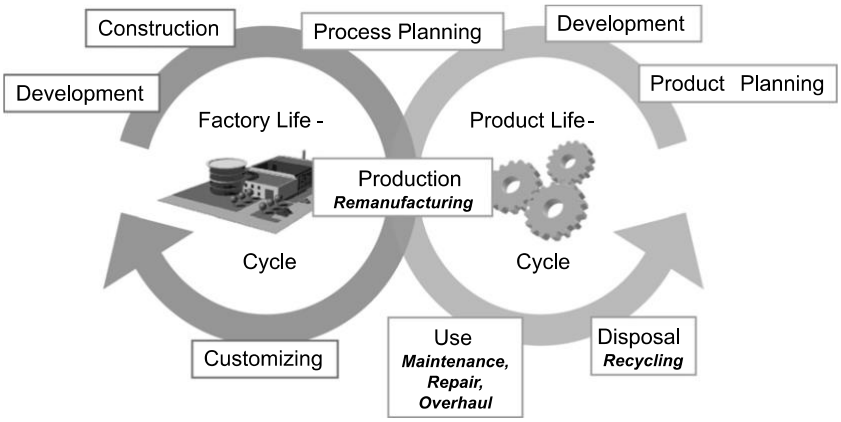


Figure 93 - *Approche holistique du cycle de vie (Inoue, et al., 2012)*

Les modèles produits utilisés dans nos entreprises contemporaines, même si complexes et difficiles à mettre en place, prennent très rarement en compte leur longue durée de vie et la multiplicité des points de vue. Nos travaux s'inscrivent dans une avancée bijective où l'étude et la modélisation des objets patrimoniaux permettront d'enrichir les modèles dirigeant notre société d'aujourd'hui. A terme, l'idée est de ne pas subir la patrimonialisation d'un objet mais d'en anticiper son déclin lors de sa phase de création et d'utilisation. Si la capitalisation est anticipée dès le début du cycle de vie du produit, il en sera alors bien plus aisé de le valoriser en fin de vie.

D'un point de vue opérationnel, nos recherches visent à étudier les possibilités de rajouter les couches dédiées au patrimoine directement au sein des Systèmes d'Information des entreprises contemporaines : gain de temps pour la suite du processus patrimonial et augmentation de la capacité d'innovation en évitant de "réinventer la roue" !

Comme vu précédemment, même si le projet METIS était orienté vers les connaissances industrielles, la méthodologie Ki4D prend racine dans les premiers travaux menés avec Benjamin Hervy sur la formalisation du cycle de vie patrimonial. Il s'agit de définir un processus de recomposition des bribes de connaissances patrimoniales comme illustré par la figure ci-dessous (Hervy, Laroche, & Bernard, 2012).

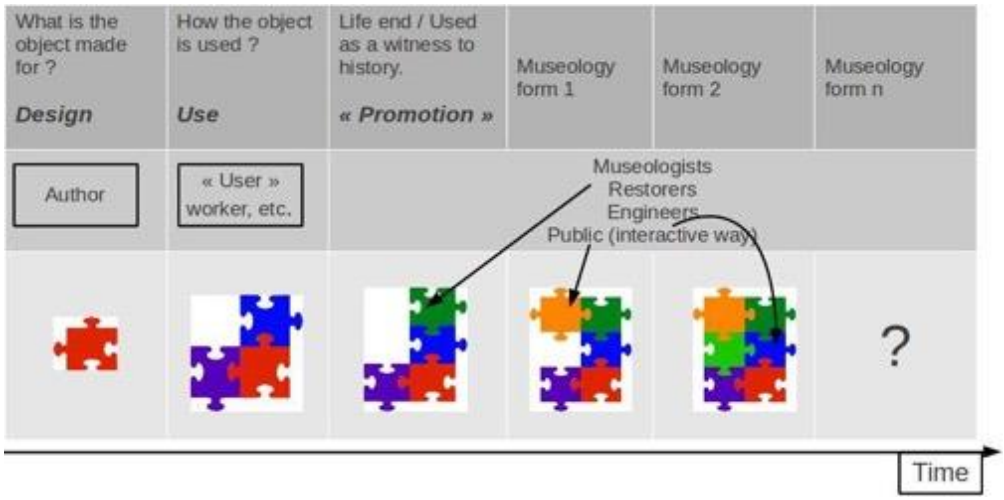


Figure 94 - *Evolution linéaire du cycle de vie patrimonial et les métiers associés (Hervy, Laroche, & Bernard, 2012)*

Les traces ou archives à capitaliser d'un objet historique sont avant tout des données hétérogènes (historiques, techniques, économiques…). Une fois la captation des données réalisées, il s'en suit une phase de reconnaissance et de traduction temporelle ; en effet, les archives sont parfois exprimées dans un langage différent de celui que nous employons aujourd'hui. Il s'agit ici de définir de nouveaux moyens de compréhension des connaissances anciennes ; nos travaux ne s'orientent donc pas uniquement vers des grilles de lecture "manuelles" qui seraient superposées les unes aux autres mais ambitionnent la construction d'ontologies à encapsuler dans un système d'information.

Vouloir modéliser la temporalité est un exercice complexe comme va le démontrer l'état de l'art ci-après sur les modèles ontologiques spatio-temporels. Vouloir modéliser le temps c'est, d'une certaine façon, vouloir contrôler le temps. Ce paradigme touche de très près le monde industriel avec les nouveaux concepts d'usine du futur pour lesquels le double numérique évolue dans un environnement virtuel possédant sa propre temporalité (Bernard, 2017). Mais cette rupture épistémologique a également un impact sur notre société comme le précise Juan Carlos Pita Castro dans son livre sur « Reconnaissance et temporalités » (Pita Castro, 2017).

Dans le domaine du patrimoine, et travaillant depuis plus de 15 ans sur des objets anciens, j'ai pu améliorer le cycle de vie des objets utilisé dans le PLM. L'ensemble de mes travaux se base sur une évolution du cycle de vie comme illustré par la figure suivante (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015).

Je distingue deux types d'éléments positionnés sur l'axe temporel :

- Les « évènements » sont des moments significatifs intervenant aussi bien sur l'objet que sur son environnement (les contextes). Ces étapes sont franchies à des dates précises permettant le passage d'une phase à l'autre. Il s'agit plus de jalons que d'une continuité linéaire. Exemples : redécouverte d'un objet mis au rebut, acte de patrimonialisation d'un objet, fermeture d'une entreprise…,
- Les « phases de vie » possèdent une durée et sont bornées par les « évènements ». Les phases standards dans le cadre d'objets patrimoniaux destinés à être capitalisés, analysés, étudiés, restaurés et valorisés sont :
    1. Création de l'artefact : définition du besoin ➔ conceptualisation ➔ conception/fabrication,
    2. Usages : ce pourquoi l'objet a été créé,
    3. Fin de vie / abandon. Exemple : l'entreprise existe toujours mais la machine n'est plus utilisée et est mise au rebus,
    4. Phase de patrimonialisation : conservation ➔ restauration ➔ valorisation.

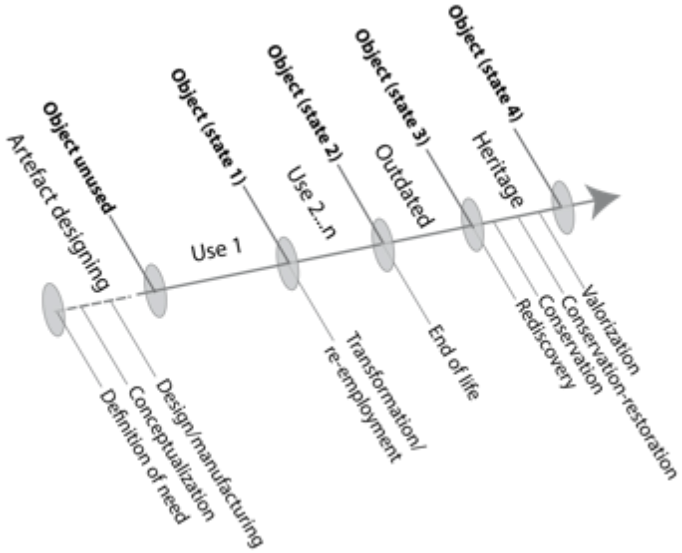


Figure 95 - *Le cycle de vie des objets anciens selon le point de vue du restaurateur (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015)*

Un modèle ontologique dédié au patrimoine : le Digital Heritage Reference Model

Comme nous venons de le voir, lorsqu'il s'agit de considérer un objet technique, il est indispensable de le recontextualiser dans son utilisation d'origine, dans ses différentes phases de vies afin de pouvoir en cerner toutes ses dimensions et toutes ses transformations. Dans le cas du patrimoine historique, chaque objet est unique et fait appel à des connaissances, des savoir-faire ancestraux et des expertises contemporaines diverses et propres à lui seul. Compte-tenu de la masse colossale d'informations hétérogènes à intégrer, il est nécessaire de structurer les connaissances.

De nombreuses bases de données patrimoniales existent à l'échelle planétaire : elles s'appellent Bibliocommons, DataBNF, Joconde, Samarcande. Souvent dénommées interfaces documentaires, un état de l'art complet sur ces bases patrimoniales a été réalisé en 2014 (ENSSILAB, 2014). Malheureusement, cette étude démontre que la mise à disposition d'un modèle de donnés générique est un vœu pieux : outre les particularités intrinsèques de chaque objet étudié, la culture propre à chaque pays rajoute en elle-même une complexité supplémentaire. C'est donc à un stade supérieur de modélisation, vers un langage méta que nous nous sommes tournés pour créer une ontologie permettant de piloter ces projets de gestion de la connaissance historique et patrimoniale.

En 2007, lors de ma thèse de doctorat j'ai établi les principes méthodologiques et le modèle d'information dédiés à la capitalisation du patrimoine (Laroche, 2007). Le *Digital Heritage Reference Model* est appelé à devenir la nouvelle référence en matière de muséologie[134] du patrimoine. Le DHRM définit l'objet technique à caractère patrimonial dans ses fonctionnalités et dans son histoire, et à différentes échelles (du boulon à l'usine et depuis l'opérateur de l'époque jusqu'au visiteur de musée). Il apporte une réponse structurée au besoin de modèle de représentation de l'ensemble des fragments de connaissance relatifs à un objet patrimonial donné et à tout ce qui en a fait un objet porteur de valeur au cours du temps.

Reprenant le modèle FBS de Gero, nos travaux ont conduit à étendre le cycle de vie des objets anciens en prenant en compte l'environnement. L'objet interne est mis en relation avec une enveloppe externe (son environnement) composée d'un certain nombre d'éléments de contexte, par exemple :

- Environnement naturel ou écologique (humidité relative, température, lumière, polluants, risques naturels…),
- Environnement matériel (usine, stockage, transport…),
- Environnement humain (opérateur, exploitant…),
- Contexte politique (politique de l'entreprise, politique communale/régionale/nationale/internationale), géopolitique…,
- Contexte économique (local, global).

En ajoutant la temporalité comme vu précédemment, un contexte peut donc évoluer et se retrouver lui-même lié avec un autre contexte temporel. La figure suivante illustre ce concept de poupées russes où le modèle FBS est lui-même intégré dans un autre modèle de contexte.

[134] Nous définissons la muséologie comme l'activité allant de la capitalisation des objets à sa valorisation pour des experts ou pour le grand public.

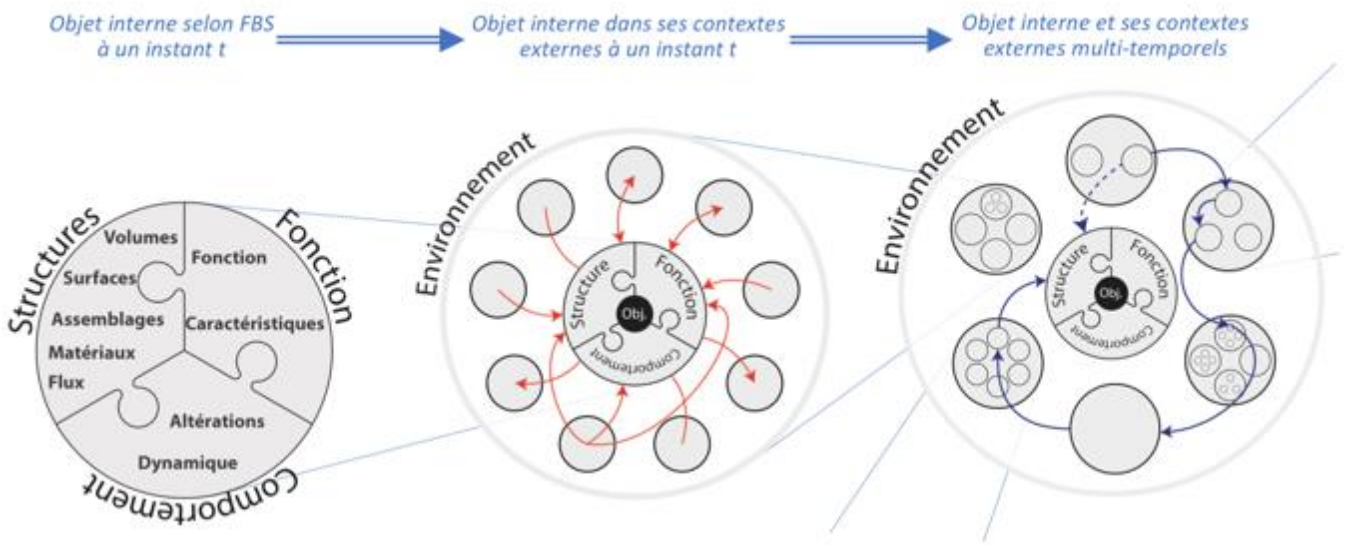


Figure 96 - *Les poupées russes du modèle FBS dans un contexte élargi*

Ces principes ont été mis en œuvre dans le DHRM[135]. C'est un méta-modèle conceptuel exprimé dans le langage UML[136]. Il se définit à 2 niveaux :

- Une couche bas niveau pour décrire l'ossature générale infra-structurale, architecturale et temporelle d'une chose, d'un objet, d'un processus… avec une vue internaliste et une vue externaliste. (Laroche, Bernard, & Cotte, 2009),
- Une couche haut niveau qui est la structure d'information atemporelle et adimensionnelle permettant d'encapsuler un Système Technique complexe. Le DHRM permet une description multi-temporelle (du passé vers le futur ou du futur vers le passé) ainsi qu'une description multidimensionnelle (de l'infrastructure vers l'architecture ou de l'architecture vers l'infrastructure). (Hervy, Laroche, & Bernard, 2012).

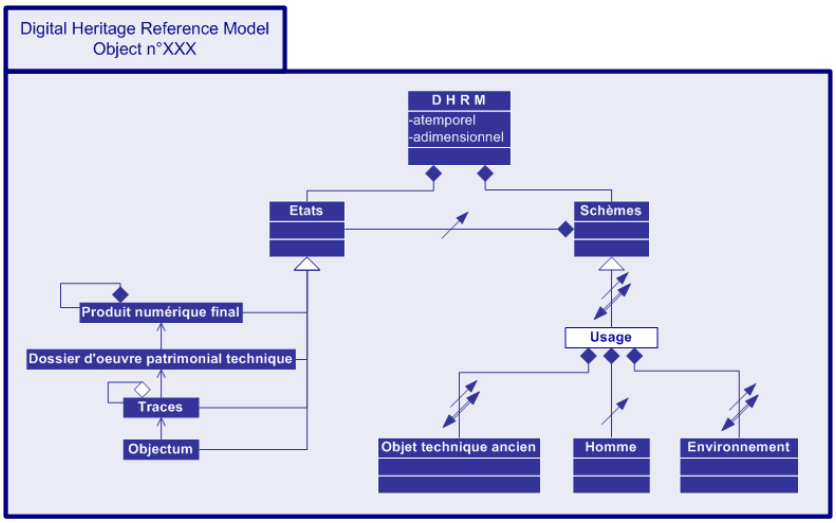


Figure 97 - *DHRM : couche haut niveau*

[135] DHRM = Digital Heritage Reference Model ou dossier d'œuvre patrimoniale numérique de référence
[136] UML = Unified Modeling Language

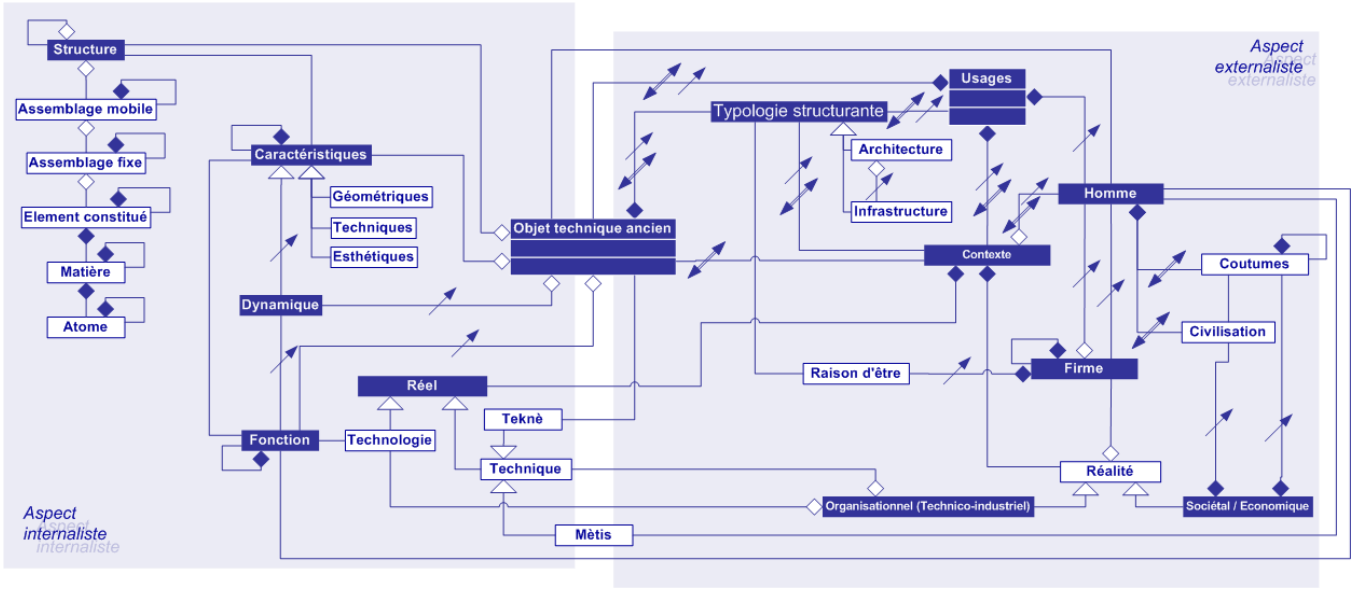


Figure 98 - *DHRM : couche bas niveau*

Comme nous venons le voir, d'un point de vue pratique, le DHRM se décline en :

- Une maquette numérique de référence,
- Maquette associée à des connaissances externes et au savoir-faire anthropologique.

Même si ces résultats scientifiques sont considérés comme une nouvelle approche novatrice pour les pratiques muséologiques, je n'ai pas développé durant ma thèse d'outil opérationnel pour supporter le DHRM. Il s'agit des travaux de la thèse de Benjamin Hervy (Hervy, 2014) que nous allons développer dans la suite de ce mémoire.

Des ontologies du réel grâce aux modèles spatio-temporels

Le cadre de recherche fixé est celui des « Humanités Numériques » ou « Digital Humanities[137] ». L'objectif est de proposer aux chercheurs en sciences humaines des outils performants d'aide à la décision, grâce aux sciences de l'information et de l'informatique (Chavalarias, 2016). Initialement basé sur la reconnaissance automatique de textes - notamment pour les langues anciennes - le champ des DH s'est progressivement étendu au web sémantique (Isaksen, 2011). Avec des interfaces quasi-intuitives, il est désormais possible de traiter de gros volumes de données (ou big data) sans être expert en programmation algorithmique. Avec des origines ancrées dans les disciplines de l'histoire, pour être traitées convenablement, les connaissances doivent être structurées sous la forme d'un triplet :

- La référence spatiale se base sur les modèles de produits développés précédemment dans la partie sur la *Capture des connaissances physiques : numérisation 3D et Reverse-engineering*.
- La référence temporelle est souvent associée à l'ontologie du temps proposé par le W3C[138] ; elle reste cependant difficilement applicable car complexe et peu évoluable (voir partie ci-après sur le *Un PLM* muséologique).
- La référence sémantique permet ainsi de pallier l'incomplétude des données spatio-temporelles, ce qui est souvent le cas pour la recherche en histoire (Janowicz, 2009).

> *Considérant que les historiens font des hypothèses sur des faits du passé, que les sources utilisées sont d'un autre passé et que le processus d'analyse se déroule dans une temporalité contemporaine, la problématique de prise en compte de la temporalité est complexe. Il s'agit là d'un vrai paradigme pour lequel la gestion des connaissances doit pouvoir aider le domaine du patrimoine.*

Etant donné la nature des informations (spatiales et temporelles) manipulées dans le cadre de nos recherches en KLM, le domaine scientifique de la géomatique peut apporter des réponses. Afin de résoudre la problématique de la modélisation spatio-temporelle pour créer des SI appliqués, on peut citer les travaux de nos collègues de l'Université de Liège qui développent des modèles mathématiques poussés pour encapsuler ces multi-dimensions (Hallot & Billen, 2016).

[137] DH = Digital Humanities, voir la bibliographie du laboratoire COSTECH, EA 2223, de l'UTC : http://www.costech.utc.fr/spip.php?article81
[138] https://www.w3.org/TR/owl-time

D'un point de vue opérationnel, nous nous intéressons donc aux modèles conceptuels existants relatifs aux espaces urbains et plus particulièrement les SIG adaptés aux données archéologiques qui présentent des attributs d'évolution au cours du temps (Banos, 2013). On peut citer :

- Parmi les modèles de référence des données spatio-temporelles, le modèle le plus ancien : MADS[139]. Il permet de représenter des données urbaines multi-échelles et multi-représentations (Parent, et al., 1997) (Parent, Spaccapietra, & Zimányi, 2006). Ce modèle est particulièrement complexe à mettre en œuvre mais il peut être utilisé simplement pour un contexte muséal. En 2011, lors de sa thèse de doctorat co-encadrée par Gérard Hégron, Guillaume Moreau et Myriam Servières du laboratoire CRENEAU[140], Zaki Chamseddine a implémenté MADS dans un système de gestion de base de données (Chamseddine, 2011).
- Pour la représentation de données 3D urbaines, certains travaux s'appuient sur le modèle CityGML. C'est le cas pour la maquette de Liège (Billen, et al., 2009). CityGML se base sur GML mais est adapté aux spécificités des objets urbains avec l'utilisation de 5 niveaux de détail (du modèle de terrain jusqu'à la modélisation de l'intérieur des bâtiments) (Kolbe, Gröger, & Plümer, 2005). Dans le domaine des SIG, des initiatives de laboratoires d'informatiques ont modifiées le CityGML pour modéliser l'évolution spatiale des villes et de ses bâtiments en fonction du temps (Samuel, Périnaud, Servigne, Gay, & Gesquière, 2016).
- Plus spécifiquement sur l'évolution du bâti, la thèse de Chiara Stefani avait pour objectif de structurer les données virtuelles pour les édifices patrimoniaux (Stefani, 2010). Dans la même lignée est apparu le modèle BIM[141] destiné à l'histoire : HBIM[142] (Murphy, McGovern, & Pavia, 2013). Il permet d'associer des données architecturales numérisées (nuages de points) avec des photographies en associant une texture aux éléments architecturaux.
- D'autres travaux se basent sur des modèles d'agrégation de connaissances autour d'un ensemble de modèles 3D (Baldissini, Manferdini, & Masci, 2009). Il s'agit en fait de constituer un SIG 3D conçu autour du modèle 3D d'un site de fouilles archéologiques par exemple, auquel vient s'adjoindre l'ensemble des traces archéologiques découvertes. Cette approche est très répandue car elle permet de garantir la valeur scientifique du travail de représentation (De Luca, Busayarat, Stefani, Véron, & Florenzano, 2011). Ainsi, comme préconisé par la charte de Londres (London charter, 2009) et les principes de Séville, la maquette 3D devient le résultat d'un enrichissement sémantique de données géométriques (De Luca, Véron, & Florenzano, 2006) (voir partie ci-avant sur *Les projets de rétro-conception intelligente*).

Aujourd'hui, il existe de nombreuses ontologies dans le domaine des sciences de l'univers, de l'industrie ainsi que du patrimoine (Pouyllau, 2008) (Pouyllau S. , 2012). Dans le domaine de l'IA, des chercheurs ont développé des ontologies qui se construisent semi automatiquement à partir de textes. C'est le projet ISTA3[143] qui utilise la norme STEP (ISO10303-239) pour définir une ontologie générique centrée autour des concepts produit et processus d'entreprise (Gherasim, Harzallah, Kuntz, & Berio, 2011).

Modèles multidimensionnels pour le domaine patrimonial

On entend par multi-dimensions, la capacité des modèles à intégrer 3 attributs :

- *La multi-temporalité,*
- *La multi-échelle également appelé multi-dimensionnalité,*
- *Le contexte qui est l'environnement de l'objet.*

Précédemment, nous avons vu le format Dublin Core, on peut également citer le CIDOC- CRM[144], format plus approprié à la connaissance historique. En 1993, Gruber propose l'ontologie de domaine CRM comme un ensemble de concepts dédiés à la modélisation des données du patrimoine culturel, sous la forme d'entités et de liens (ou propriétés) (Gruber, 1993). C'est un ensemble de 80 entités à utiliser pour la catégorisation des objets manipulés et 130 propriétés différentes.
Puis, en 2006, la norme du CIDOC-CRM est posée (ISO 21127) (Crofts, Dionissiadou, Doerr, & Stiff, 1999) (Doerr, 2003). Créé par le comité international de documentation, c'est un modèle conceptuel de référence basé sur le modèle RDF. Le modèle de la figure suivante illustre les entités disponibles dans le modèle CIDOC-CRM. De nombreux travaux scientifiques proposent d'utiliser ce modèle pour traiter les données historiques (Szabados & Letricot, 2012) (Isaksen, 2011).

[139] MADS = Modeling Application Data with Spatio-temporal features
[140] http://aau.archi.fr/crenau/
[141] BIM = Building Information Model ou modélisation des données du bâtiment, utilisation des modèles 3D pour le Génie Civil
[142] HBIM = Historic Building Information Model
[143] ISTA3 = Interopérabilité de 3ème génération pour les Sous-Traitants de l'Aéronautique
[144] www.cidoc-crm.org

Le CIDOC-CRM est une ontologie formelle qui permet de faciliter l'intégration, la médiation et l'échange d'information hétérogènes du patrimoine culturel.

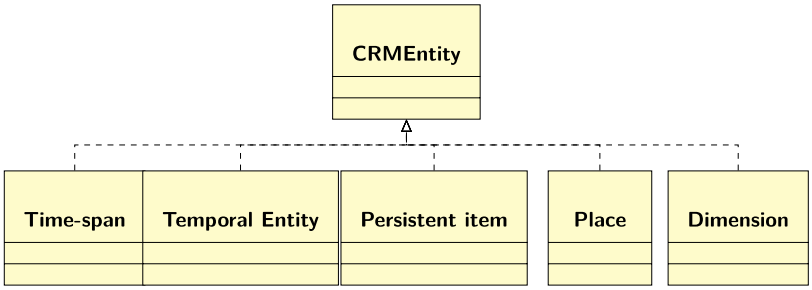


Figure 99 - *Principales classes proposées du modèle de référence du CIDOC (Crofts, Dionissiadou, Doerr, & Stiff, 1999)*

Cependant, une des problématiques rémanentes est celle de la description de la classe « CRM Entity ». Elle peut encapsuler des connaissances de types variés qui n'ont, *apriori* aucun rapport entre elles.

Exemple : dans la phrase historique « Mon grand-père travaillait à la BN[145] », les entités « grand-père » et « BN » sont liées entre elles par un lien complexe sémantico-spatio-temporel (Kerouanton & Laroche, 2010).

Pour résoudre cette problématique, dans la thèse de Benjamin Hervy, nous avons proposé un framework basé sur CIDOC-CRM (voir figure ci-après). L'intérêt est de ne pas utiliser d'ontologies préétablies pour « Entity ». Dans la figure suivante « Entity » devient « Item » (Hervy, Laroche, Kerouanton, & Bernard, 2012). Précisons ces classes :

- « Item » définit l'objet concerné « Objet »,
- Entre deux « Objets » un lien « Relation » est défini. Le lien est soit direct (entre 2 artefacts réels ; exemple : « l'Usine BN de mon grand-père ») soit indirect (entre un artefact réel et un concept abstrait comme un événement ; exemple : « La classe ouvrière de Nantes »),
- La « Documentation » encapsule les sources historiques associées,
- « Objet » possède des « Attributs » : spatial, temporel et sémantique.

Ce modèle ne possède donc aucune limite car c'est sur la classe « relation » qu'il convient de définir la taxonomie appropriée. Une telle modélisation est pérenne dans le temps car, lors d'ajout de nouvelles classes et de nouveaux liens, il ne sera pas nécessaire de reprendre l'ensemble du modèle de données déjà stockées.

C'est sur ce principe que, s'affranchissant de la technologie, la base de connaissances du projet Nantes1900 a été constituée. Le musée nous avait donné le défi de créer un système pérenne pour 40 ans, la thèse CIFRE de Benjamin Hervy est une réponse. Ce framework permet de modéliser les différentes phases de capitalisation/structuration des connaissances d'un objet patrimonial ainsi que de les valoriser selon des modalités différentes et non connues à l'avance.

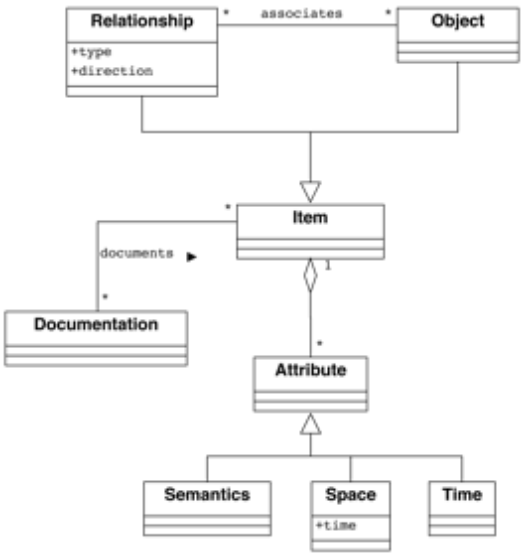


Figure 100 - *Framework simplifié de Hervy : modèle de connaissances patrimoniales (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015)*

[145] BN = Biscuiterie Nantaise

Un PLM muséologique

Le framework de la thèse de Benjamin Hervy a été appliqué sur un cas concret : c'est le projet Nantes1900. Ces travaux ont permis de démontrer l'applicabilité des concepts et modèles proposés.

Afin de renseigner la maquette historique, un corpus est constitué au fil de l'eau. Ces données sont intégrées dans le système d'information qui permet alors de mettre en interaction les connaissances de l'objet. Cet outil est dénommé le PLM muséologique.

L'ajout d'informations peut se faire soit directement par l'interface dédiée soit par l'import d'un fichier CSV. Il pourra ensuite continuer à être alimenté par les futures connaissances acquises. Et celles-ci pourront également être consultées, valorisées, étudiées au fur et à mesure de la nouvelle vie de l'objet.

L'objectif principal est de rendre l'objet patrimonial "vivant" afin qu'il soit lui-même acteur de son futur.

La figure suivante présente les différentes vues proposées par le PLM muséologique :

- Interface principale d'accueil,
- Liste des connaissances intégrées,
- Modification d'une fiche de connaissance, de ses relations avec les autres connaissances et des ressources associées,
- Interfaces de géolocalisation de la connaissance basées sur OpenStreetMap[146].

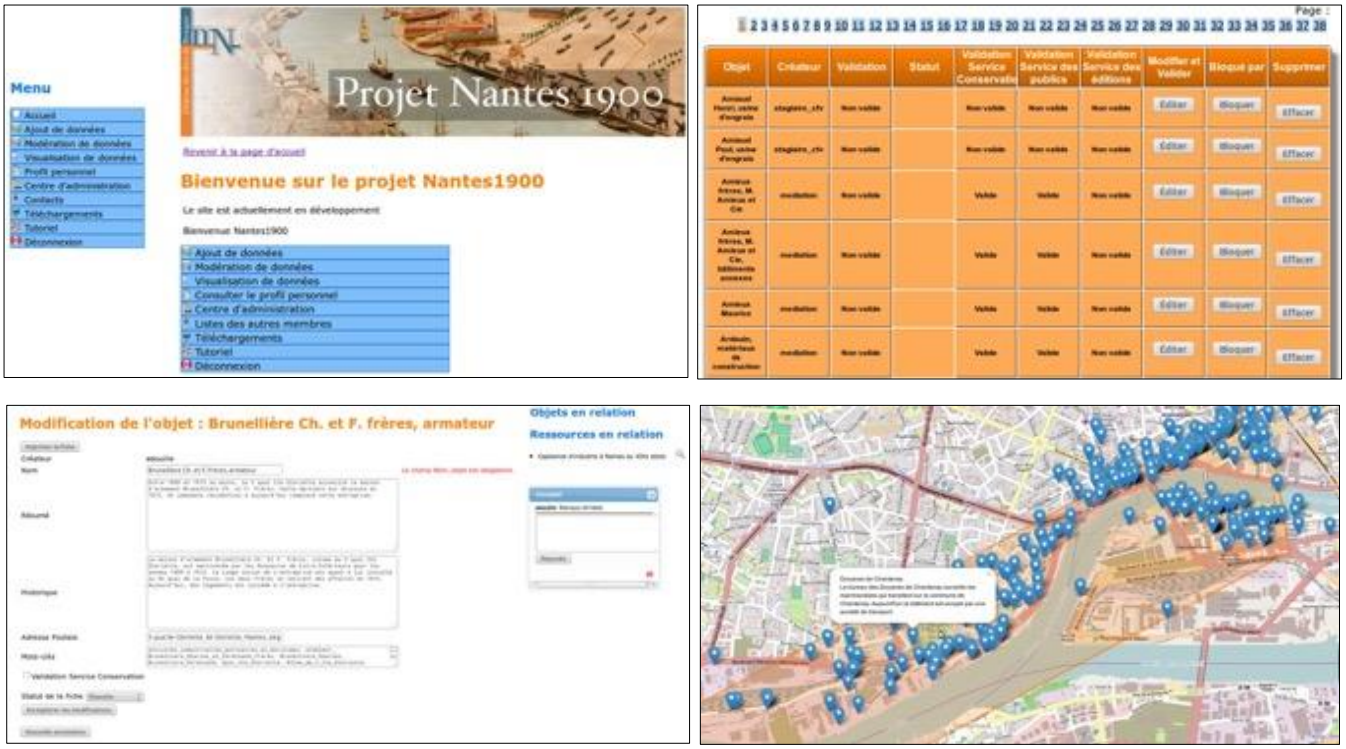


Figure 101 - *Interfaces principales du SI de Nantes1900*

Le framework mis en place implique différentes catégories d'utilisateurs et donc plusieurs typologies de besoins en termes d'accès aussi bien à l'information native qu'à l'information sémantiquement enrichie ou aux données hétérogènes. L'ensemble des fonctions du Système d'Information à base de Connaissances[147] intègre la création du corpus de base, la structuration et l'intégration des connaissances, l'accès et le filtrage des données et le retour d'expériences. Le modèle de la figure suivante a servi de base pour la mise en place des processus d'interactions dans le cadre d'un environnement multi-acteurs concernés par la vie de l'objet et son patrimoine historique, véritable outil d'intermédiation culturelle (Laroche, et al., 2013) que ce soient les contributeurs historiens ou les visiteurs récepteurs de ces informations (Hervy, Laroche, & Bernard, 2013).

[146] http://openstreetmap.org

[147] SIC = Système d'Information à base de Connaissances

Les classes de ce SI ajoutées au framework expliqué précédemment sont décrites comme suit :

- La classe « item » est ici une classe abstraite, permettant d'englober la diversité des données manipulées dans le contexte du patrimoine culturel. Ainsi, un item peut être :
    1. Un « objet » au sens large, c'est-à-dire aussi bien un objet physique (par exemple un objet de collection du musée) qu'un sujet ou une thématique. Aux objets physiques, il est possible d'associer des attributs représentant les caractéristiques physiques (temporalité, spatialité) ou sémantiques,
    2. Une « relation ». La particularité ici est l'attribution d'une importance égale de la classe « relation » et de la classe « objet ». En effet, la compréhension du contexte d'un objet implique de pouvoir aussi bien expliciter l'objet en lui-même que ses relations avec son environnement. Il s'agit de pouvoir décrire les tenants et aboutissants d'une relation entre un chef d'entreprise et son entreprise, dont la complexité peut être aussi importante que les relations entre les entités elles-mêmes.
- La classe « connaissances » fait directement référence aux connaissances formalisées sous forme de fiches et liées à un item,
- La classe « cogniton » est une adaptation du concept proposé par (Serrafero, 2000). Il s'agit ici de différencier les connaissances accumulées par les experts relatives à un item et les connaissances élémentaires produites par un expert d'après son point de vue et ses connaissances personnelles,
- La classe « utilisateur-acteur » caractérise à la fois les utilisateurs du système mais aussi les utilisateurs générant potentiellement de nouvelles connaissances.

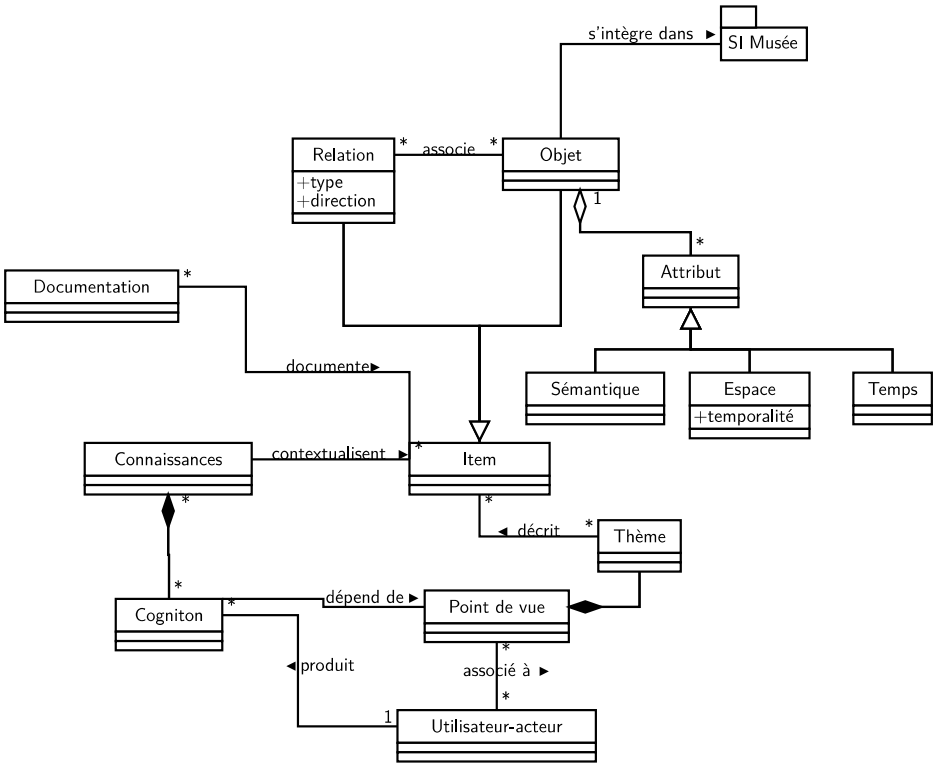


Figure 102 - *Framework de Hervy : application au SI du projet Nantes1900 (Hervy, Laroche, & Bernard, 2017)*

Nous avons comparé cette proposition scientifique dans l'état de l'art des technologies existantes dédiées au patrimoine. Les travaux de recherche sont très nombreux et sont tous réalisés à titre expérimental. La figure ci-dessous est un tableau récapitulatif des projets/formats remarquables qui présentent des caractéristiques similaires à nos projets :

- Intégration de données géométriques avec segmentation du nuage de points et reconnaissance de formes,
- Ajout d'éléments sémantiques,
- Intégration multi-échelle et multi-temporelle.

Cette étude montre qu'il n'existe pas encore d'outil global pour le PLM muséologique. C'est un défi que je souhaite relever dans le cadre du projet ANR ReSeed qui a débuté fin 2016 et dont je suis le coordinateur scientifique national.

La proposition développée dans RéSeed est novatrice : au lieu d'utiliser seulement les données 3D (CAO, nuages de points…) liées à un modèle produit figé, RéSeed va tout d'abord définir un modèle sémantique de l'objet sur lequel seront attachées les données 3D. Pour autant, le projet ne consiste pas dans le seul agrégat de plusieurs méthodes existantes comme l'analyse

fonctionnelle et l'analyse géométrique, il s'agit de définir un nouvel outil et un nouveau format : une enveloppe digitale porteuse de sens sur laquelle une représentation virtuelle 3D peut être attachée si elle existe.

Projet	3Dicons[148] Europeana [149]	3D-SYSTEK[150]	Approches BIM	Arches project[151]	ANR SEMAPOLIS [152]	ANR Usines 3D[153]	ANR ReSeed [154]	Univ. de Liège
Gestion de multi-objets uniques	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Segmentation du nuage de points	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✓✓	✓
Reconnaissance de forme du mesh/point cloud	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓
Identification zonage 3D	✗	✓	✓✓	✗	✓	✗	✓	✓
Modélisation mécanique	✗	✗	✗	✗	✗	~	~	✗
Mise en lien d'éléments	✓	✓	✓	✓✓	✓	✗	✓✓	✓
Intégration à multi-échelle	✓	✗	✓	✓	✓✓	✗	✓	✓
Intégration/gestion du temps long	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Enrichissement sémantique	✓	✓✓	✓	✓✓	✓	✗	✓	✓
Adaptabilité de l'outil à d'autres domaines	✓✓	✓	✓✓	✓✓	*en cours*	✗	*en cours*	✗

Figure 103 - *Etat de l'art des outils considérés comme des PLM muséologiques associés à du RE*

On notera les très récents travaux de l'équipe de notre collègue belge Rolland Billen du laboratoire de Géomatique de Liège, particulièrement ceux de son doctorant Florent Poux. Il propose un framework intelligent pour combiner de nombreux concepts détaillés dans l'état de l'art de ce manuscrit ; l'objectif visé est de permettre la reconnaissance automatique de nuage de points. Le workflow de la figure suivante détaille ce process qui allie de la numérisation 3D, du RE, une base de contexte, une base de connaissance… (Poux, Hallot, Neuville, & Billen, 2016). Ces travaux, pourtant encore très théoriques, vont amener des collaborations par le rapprochement méthodologique avec notre projet ANR RéSeed.

[148] http://3dicons-project.eu
[149] http://www.europeana.eu
[150] http://www.ics.forth.gr/isl/3D-SYSTEK/
[151] http://archesproject.org
[152] https://project.inria.fr/semapolis/fr/
[153] http://www.usines3d.fr
[154] http://www.reseed.fr

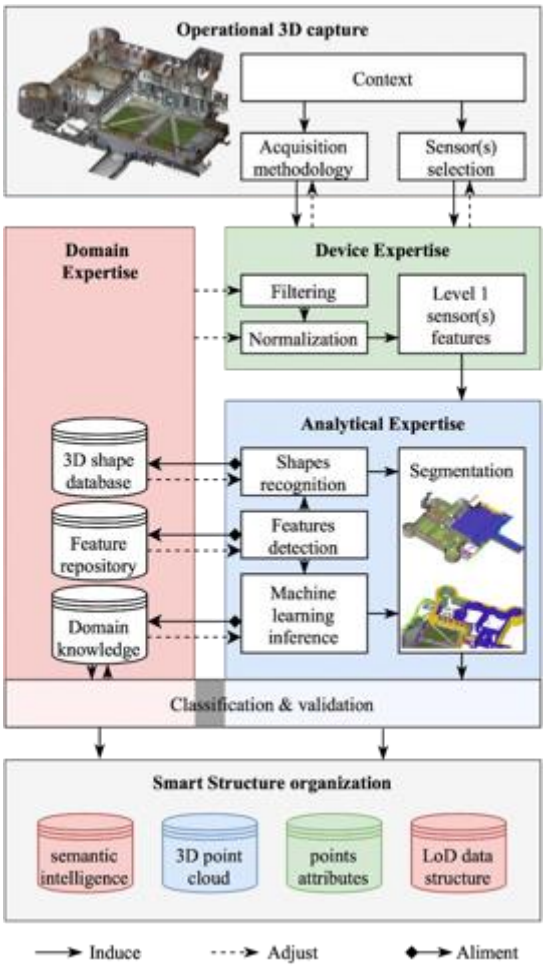


Figure 104 - *Framework intelligent pour la reconnaissance de nuage de points (Poux, Hallot, Neuville, & Billen, 2016)*

Analyse sémantique des sources/archives et dataviz

L'étude des pratiques de l'inventaire général du patrimoine culturel réalisée par Heinich démontre que l'authenticité et la typicité de l'objet et de son contexte sont des critères majeurs définissant son caractère patrimonial (Heinich, 2009). Pour Daniel Thoulouze, ancien directeur du Musée des Arts-et-Métiers :

> *« L'objet est un témoignage de la création de l'esprit humain » (Thoulouze, 2005)*

Jean Davallon précise même que le patrimoine n'est pas un objet transcendant qui vient du passé. Il est plutôt ce qu'on en fait, ce qu'on en dit, la manière dont on le considère. Il ne doit pas simplement servir d'effet mémoire mais doit être transformé pour devenir mémoire collective ou individuelle (Davallon, 2000).

> *Modéliser l'histoire c'est déstructurer l'information pour la restructurer. L'historien se projette par rapport à une expérience et c'est grâce à cette association d'idées qu'il va construire ses hypothèses et son propos. Un modèle historique c'est comme une boite de « connaissances » dont le contenu est accessible depuis n'importe quel côté (multi-vues, multi-métiers…). De plus, l'histoire n'est pas en « lecture seule », il y a possibilité d'un enrichissement voire d'un auto-enrichissement.*

Dans un strict cadre documentaire, il faut donc penser l'outil d'accès au corpus comme accessible tant aux néophytes qu'aux spécialistes en histoire des sciences ou encore aux spécialistes de la documentation, aux simples visiteurs curieux du sujet…

Pourtant, comme nous venons de le voir, les travaux menés pour structurer les connaissances patrimoniales requièrent des modèles préétablis avant d'être programmés dans les bases de données muséographiques (voir partie ci-avant sur *Un modèle ontologique dédié au patrimoine* : le Digital Heritage Reference Model*)*. Comme le souligne souvent Frédéric Kaplan[155], la majorité des travaux dans le monde des musées porte sur la question des données ouvertes (ou open data) et de leur liaison

[155] Frédéric Kaplan occupe la chaire de Digital Humanities à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

grâce aux outils du web sémantique : ce sont les ontologies de type CIDOC-CRM, langages de représentation RDF[156]… (Nuessli & Kaplan, 2014)
Au vu des objectifs fixés de personnalisation des données et des bases de connaissances, on se heurte donc à la traditionnelle vision classificatoire dite du "Web sémantique". Il s'agit là d'un des problèmes majeurs du framework de Benjamin Hervy qui doit être figé avant d'être instancié dans une application informatique. Pour Manuel Zacklad, c'est le paradigme d'accès informationnel socio sémantique. Autrement dit, une fois les connaissances formées, il faudra les stocker dans un Système d'Information dirigé par un modèle intelligent. S'agissant ici d'objets ayant eu une longue durée de vie, les modèles mis en regard devront prendre en compte cette possibilité d'évolution et ainsi envisager d'être autoalimentés par le méta-modèle de données.
En 2000, le juriste spécialiste de la cybernétique Lawrence Lessig écrivait un article[157] depuis devenu célèbre dans lequel il imaginait qu'un jour il serait possible de faire évoluer les structures de données et l'architecture informatique par elles-mêmes. C'était il y a 17 ans et il avait raison. (Lessig, 2000)

Afin de résoudre cette problématique, la tendance actuelle s'oriente vers le "Web cognitivement-sémantique" (Caussanel & Chouraqui, 1999) qui hybride la classification et les besoins communicationnels sociaux, ordinairement individualisés. On notera le travail précurseur réalisé en 2009 du prototype OntologyNavigator qui combine le traditionnel moteur de recherche et l'accès par graphe avec possibilité d'enrichissement sémantique (Kembellec, Saleh, & Sauvaget, 2009). A terme, l'objectif de ces ontologies serait de pouvoir disposer d'une interface aux accès pluriels avec personnalisation automatique en fonction des usagers (Zacklad, et al., 2011).
Pour aller dans ce sens, on citera les travaux de Larry F. Hodges de l'Université de Clemson qui envisagent de créer un dispositif de numérisation de l'utilisateur pour définir automatiquement ce qu'il attend du SI.
Gila Molcho à Technion, Israël, propose un outil de visualisation sémantique des connaissances intitulé MIND qui se base sur une ontologie et une méthode en 3 étapes : Semantic Analysis Module ➔ Multilingual Dynamic Ontology ➔ Visual Analytics capability (Molcho & Schneor, 2015).

C'est dans ce contexte scientifique et cet objectif scientifique de permettre un interfaçage dynamique avec les connaissances que se déroule la thèse de Matthieu Quantin. Il s'agit de démontrer comment il est possible d'interagir et de comprendre l'histoire et le patrimoine en pilotant le système par les connaissances plutôt que par les objets manipulés tel que cela est ordinairement réalisé en CAO via le PDM ou pour les SIG. Le concept de personnalisation de masse du patrimoine industriel numérique est au cœur de cette thèse de doctorat (Daaboul, 2011). Cette pratique est de nos jours très largement utilisée dans l'industrie comme le rappelle Boer (Boer & Dulio, 2007) :

> *La personnalisation de masse c'est apporter la bonne information-produit à la bonne personne tout en permettant de gérer une masse de données-produit importante.*

Pour le patrimoine, l'idée même de produire en masse est à proscrire. Il s'agit davantage de se démarquer des démarches historiques artisanales actuellement en pratique. Considérant l'accès au patrimoine comme un service de diffusion de la culture, l'accès doit être pluriel et constitue un enjeu majeur pour ce patrimoine dit désormais personnalisé. Les problématiques à résoudre sont :

1. Comment créer des outils informatiques pour assister la production de patrimoine à partir d'une grande quantité de données hétérogènes : géométrie 3D, récit historique, iconographie… ?
2. Comment structurer cette production hétérogène avec des limites floues et des attributs sémantico-spatio-temporel fluctuants ?

L'objectif est d'éviter les écueils du paradigme du stockage à outrance des connaissances historiques industrielles et ainsi établir des modalités innovantes pour les entreprises de demain. Les résultats permettront d'enrichir les limitations des systèmes industriels actuels. La nouvelle forme de ce double numérique deviendra alors un conteneur des connaissances universelles résolvant les problématiques d'interopérabilité spatio-temporelle et sémantique. Il doit s'installer une dialectique permanente :

> *Il n'est pas question que l'ingénierie prenne le dessus sur l'histoire ni que l'histoire fasse front sans tenir compte des technologues.*

Ces travaux en Humanités Numériques sont issus des problématiques liées à la masse colossale d'informations du corpus documentaire de Nantes1900. L'historien est souvent confronté à des textes organisés en corpus ; l'avantage du corpus est qu'il contient un contenu précis, limité, résultant d'une sélection par un expert. Même si connu qualitativement, le corpus est souvent composé de textes non structurés, hétérogènes par leur forme et spécifiques par leur terminologie (Garric & Longhi, 2012).

[156] RDF = Resource Description Framework, modèle formel de description des ressources web sous forme de triplet Sujet/Prédicat/Objet
[157] http://harvardmagazine.com/2000/01/code-is-law-html

Basé sur une méthode d'apprentissage qui guide l'utilisateur – la sérendipité (Deuschel, Heuss, Humm, & Fröhlich, 2014) - HARUSPEX va générer un modèle de connaissance dynamique. Techniquement, l'outil se base sur l'algorithme ANA dont la théorie a été développée par Chantal Enguehard en 1993 (Enguehard, 1993). Comme l'illustre la figure suivante, le corpus historique est alors déconstruit puis reconstruit grâce à l'extraction de mots-clés alternant l'individuation et le collectif au sens où Bruno Latour l'entend (Latour, 2013).

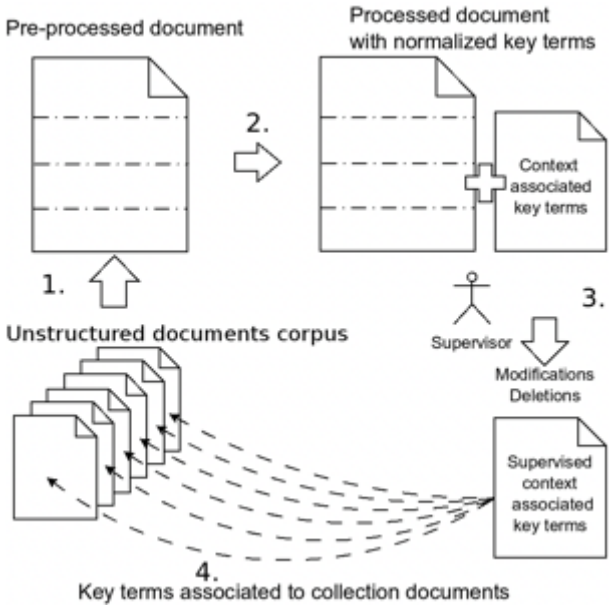


Figure 105 - *Processus HARUSPEX simplifié (Quantin, Hervy, Laroche, & Bernard, 2016)*

Pratiquement, HARUSPEX calcule les proximités entre les textes d'un corpus sans modèle prédéfini, sans vocabulaire de référence et sans corpus d'entraînement. L'outil ambitionne de construire un réseau de concepts de manière inductive, en laissant la place à l'innovation et l'intuition, par la mise en exergue de liens imprévus. En comparant cette approche au projet TECTONIQ[158], Eric Kergosien qualifie notre démarche comme « la volonté de créer une ontologie de domaine »… oui mais semi automatiquement !

L'analyse automatique se fait à deux niveaux :

1. Analyse à gros grain : cluster de documents, visualisation des liens généraux structurant le corpus,
2. Analyse fine : visualisation des thèmes partagés, des co-occurrences, calculs de proximité temporelle et spatiale…

L'objectif est d'identifier des "chaînons singuliers", des anomalies, perturbant les connaissances de l'historien. Ces anomalies génèrent de nouvelles hypothèses de recherche ou en confirment d'autres déjà établies. Cette méthode vise ainsi à tirer le meilleur parti de l'interaction entre analyse quantitative numérique et connaissances qualitatives de l'expert (Quantin, Hervy, Laroche, & Bernard, 2016).

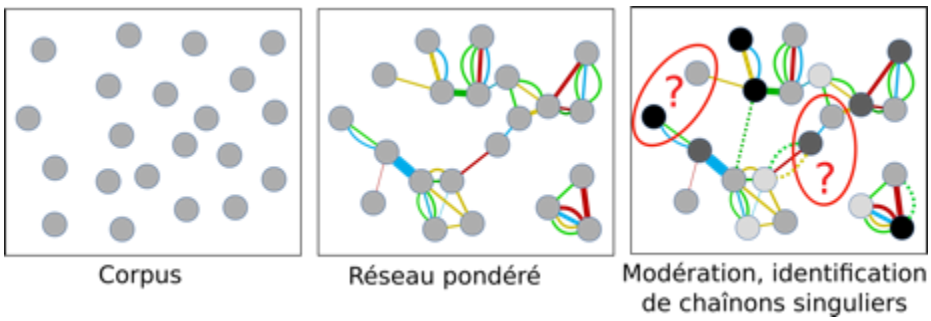


Figure 106 - *Processus de Haruspex (Quantin, Hervy, Laroche, & Bernard, 2016)*

[158] Projet de valorisation du patrimoine numérique de l'industrie du Nord–Pas-de-Calais

Pour visualiser les résultats, les outils de Dataviz[159] ont été adaptés aux ontologies liées au KM (Vexler, Berger, Cotton, & Belloni, 2013) (Berger, 2015), tout comme le permet le plug-in SOVA[160] du logiciel Protégé[161]. HARUSPEX permet donc de visualiser un réseau sémantique grâce à un graphe multiple pondéré, où les documents du corpus sont liés par co-occurrence d'expressions clés (Quantin, Laroche, & Kerouanton, 2016).
Les applications possibles sont extrêmement nombreuses. Des expérimentations ont été menées sur des corpus historiques, sur des bases documentaires de plus de 1000 fichiers textes, et il est envisageable de l'ouvrir au monde de la médecine et du biomédical, à l'économie… HARUSPEX est actuellement en phase d'un dépôt de brevet.

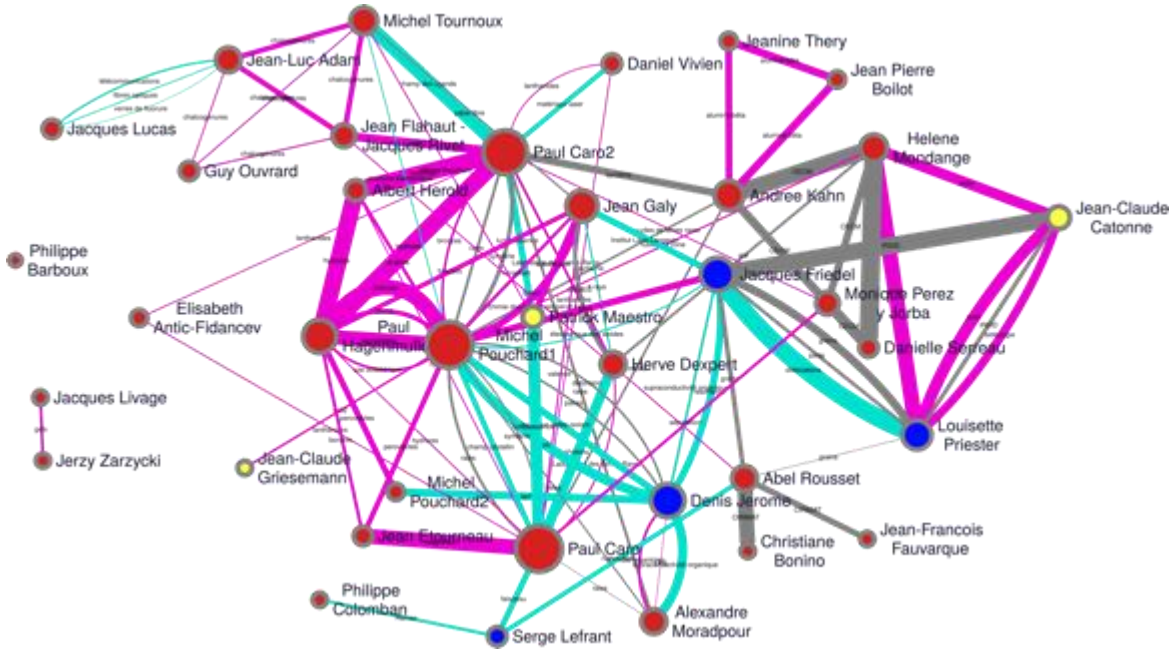


Figure 107 - *Premiers résultats de Haruspex sur un corpus d'histoire de la chimie du solide*

[159] DataViz = Visualisation de Données
[160] SOVA = Simple Ontology Visualization API
[161] Logiciel de modélisation d'ontologies, particulièrement utilisé en web sémantique.

2.5 Travaux en cours et futurs

Travaillant depuis 17 ans dans le domaine de **la captation et de la conservation du patrimoine** par les **outils du numérique**, j'ai pu mettre en place **des méthodologies et des modèles de données adaptées**.
Les perspectives actuelles s'orientent, grâce, entre autres, aux avancées technologiques, vers des moyens de valorisation de la connaissance capitalisée. À ces fins je distingue deux problématiques qui sont les perspectives de mes travaux de recherche :

1. Comment **diffuser et enrichir les connaissances** capitalisées/structurées ? Quel outillage d'**extraction des connaissances** pour une **médiation multimodale pérenne** ?
2. Quelle **place pour l'humain** dans ce nouveau paradigme ? Contributeur, acteur, spectateur, victime… ?

A travers les travaux en cours ou futurs, je vais expliquer dans cette dernière partie quel mode opératoire et quels projets je mets en place pour contribuer à faire avancer ces problématiques.

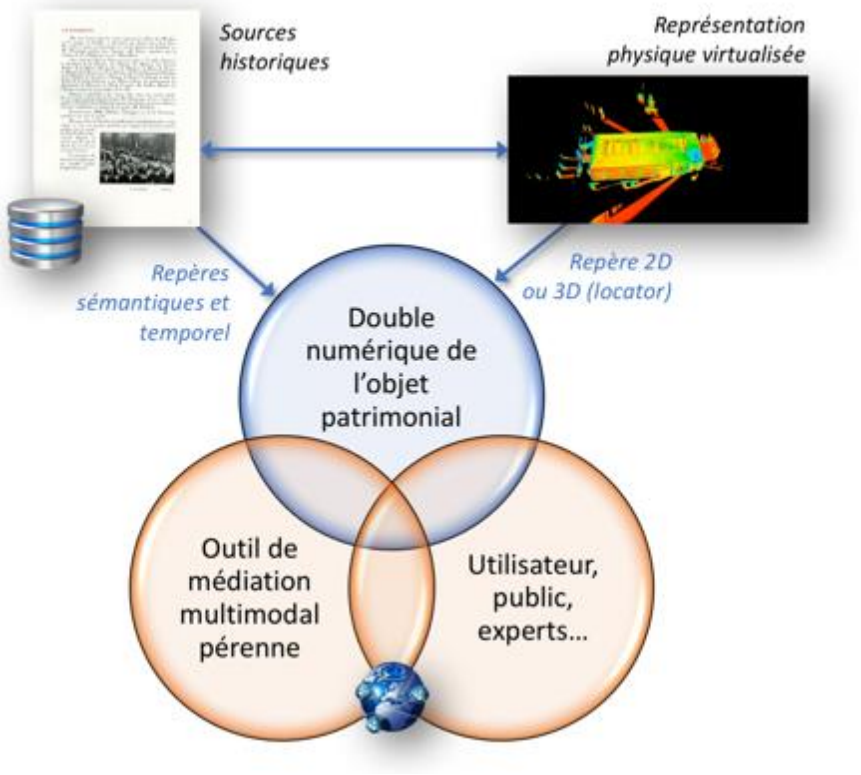


Figure 108 - *Définition des thèmes de recherche futurs (Laroche & Kerouanton, 2016)*

Le public ne veut plus être simplement contemplatif et obtenir exclusivement des informations descriptives des objets patrimoniaux ou un simple accès aux connaissances s'y référant. Plusieurs composantes interviennent dans le processus de création d'outils numériques culturel et patrimonial. Les flux et les relations entre l'utilisateur et les technologies deviennent le leitmotiv de cette approche nécessitant la création de plusieurs IHM. En effet, les dispositifs actuels mettant en œuvre des applications de RV sont multiples et permettent de très nombreuses formes de réalisations mais leur utilité et leur pertinence dans le cadre considéré doivent être questionnées.

> *Les technologies doivent être mises en regard des usages pour définir si elles sont appropriées ou non à la réalité des utilisateurs (et non le contraire).*

La figure ci-dessous illustre quelques-uns de ces croisements possibles en prenant comme point de départ l'objet et les éléments associés que l'on souhaite valoriser. Nous allons détailler les modalités de construction de ces IHM dans cette dernière partie de mémoire.

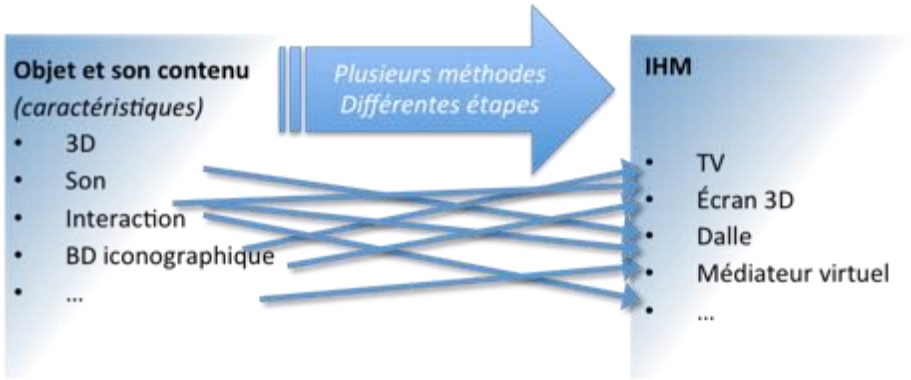


Figure 109 - *Plusieurs finalités et plusieurs technologies en fonction des éléments à valoriser (Vidal & Laroche, 2017)*

2.5.1 Extraction de connaissances

Une fois les phases d'acquisition et de structuration des données terminées, il est possible de visualiser les connaissances selon différentes modalités. La finalité choisie dépendra du type de données d'entrée, des contraintes de présentation, des exigences d'observation et d'analyse, ainsi que du niveau d'interaction envisagée. Cette dernière phase a comme objectif l'exploitation du double numérique.
La posture épistémologique de l'objet unique et porteur de sens en sciences humaines rompt avec les principes d'utilisation en masse des données numériques. Il est donc nécessaire de construire un nouveau référentiel transdisciplinaire et mettre à disposition des communautés scientifiques des outils adaptés (Rocheleau, 2011). A terme, il s'agit donc d'un nouvel impact économique dans le monde professionnel qui peut se décliner en deux aspects :

- Le patrimoine matériel via la « reconstruction » de sites, de monuments ou d'œuvres... afin d'obtenir un modèle numérique qui peut être utilisé à deux fins : par des « experts » pour réaliser diverses missions (analyses, études, simulations…) et par des « exploitants » pour valoriser/promouvoir les sites (RV, marketing, pédagogie…).
- Le patrimoine immatériel, il s'agit là de pouvoir retrouver le savoir-faire des acteurs (souvent artistes / artisans) ayant produit ou bâti des œuvres afin, par exemple, de pouvoir caractériser les œuvres en fonction des particularités de leurs productions (gestes de l'artisan, tracé des pinceaux, types d'outils ou de machines, contexte…) ou bien encore pour pouvoir distinguer les productions originales des imitations. Retrouver le geste ancien peut également permettre de définir des critères de validité de la définition du patrimoine dans le sens où l'UNESCO l'entend, entre autres sur les problématiques d'authenticité et d'intégrité ; il s'agit donc de pouvoir « aider » les professionnels du patrimoine à mieux qualifier les objets étudiés en utilisant les outils du numérique comme moyen de justification (Severeo & Cachat, 2016).

Déontologie de la 3D patrimoniale : vers un standard
Avant d'engager une quelconque valorisation des connaissances, il convient de s'interroger sur la validité des données numériques créées. Les modèles 3D sont particulièrement concernés. L'étude de l'apparition de ces « nouvelles images » de synthèse ou de 3D comme les appellent respectivement Cécile Welker (Welker, 2015) ou Véronica Camacho (Camacho, 2004), montre que :

Les maquettes de patrimoine en 3D ne sont pas de faux artefacts de notre réalité passée.

En ce sens, Livio de Luca définit nos travaux comme précurseurs pour intégrer l'incertitude historique avec des niveaux de détails multiples tout en permettant l'intégration de la gestion temporelle.
Comment faire la différence sur deux versions numériques d'un même objet, par exemple sur une machine-outil à caractère patrimonial, entre un traitement type jeux vidéo et un modèle numérisé en 3D assurant le respect quantitatif des données physiques de l'objet et le respect qualitatif de ses valeurs patrimoniales ? Tendre vers un "label de valeur" est une façon de garantir que l'objet numérique patrimonial est valide et qu'il correspond à une valeur patrimoniale reconnue par la double communauté des reverse-engineers et des évaluateurs du patrimoine culturel. Les industriels possèdent déjà des indicateurs de performances sur les modèles CAO (modèles produits, modèles processus…) et la communauté des évaluateurs du patrimoine culturel possède leurs indicateurs de démonstration de la valeur (UNESCO, 2003), alors pourquoi ne pas tendre vers des indicateurs partagés en se renforçant mutuellement à propos des objets de patrimoine, en particulier de patrimoine technique, scientifique et industriel ? A noter que contrairement à l'industrie manufacturière, ces indicateurs ne sont pas que quantitatifs mais peuvent aussi être qualitatifs : authenticité et unicité sont les garanties de ce label.

Il s'agit ici d'un des résultats attendus pour le projet ANR RéSeed, prémices d'une future normalisation des pratiques du domaine émergeant. La création d'un label "patrimoine numérique 3D" permettra de garantir une déontologie scientifique des objets digitalisés en 3D et ainsi de bien distinguer entre les efforts réels de patrimonialisation 3D par le respect des indicateurs et des prescriptions envisagés, et la communauté des « communicants » qui se contente d'évocations plus ou moins fantaisistes sur le modèle des animations vidéo. La prolifération des outils virtuels a rendu fréquentes et peu onéreuses de telles approches, au détriment de la crédibilité des véritables archéo-rétroconcepteurs, et plus largement du sérieux scientifique que peut avoir la « réalité virtuelle » dans le domaine du grand public. Le label pourrait aussi apporter une garantie « d'authenticité de connaissance » aux professionnels de l'évaluation patrimoniale.
Ces normes de qualité et de diffusion des « bonnes pratiques » quant à la restitution virtuelle des patrimoines seront proposées pour validation à un certain nombre d'institutions nationales et internationales reconnues, à des plateformes de diffusion de la documentation virtuelle spécialisées comme le Consortium3D de la TGIR Huma-Num et en lien avec l'UNESCO pour les processus de reconnaissance et de valorisation du Patrimoine Mondial. L'objectif international à terme est de pouvoir proposer un label de qualité patrimonial et de validité scientifique pour des objets restitués virtuellement. Cette démarche n'est pas guidée par les aspects économiques car répondant au caractère universel de la valeur des biens patrimoniaux.

Si la démarche de normalisation promue par RéSeed aboutit à un label reconnu, un processus pratique de labellisation de projets doit ensuite prendre le relais. Il sera proposé aux acteurs privés et publics de la patrimonialisation, en France et à l'étranger. Le processus comprendra un audit du projet numérique et d'éventuelles recommandations d'accompagnement. Un business model avec une structure idoine à caractère privé ou semi-publique de valorisation de la recherche sera à créer. Un comité scientifique accompagnera cette démarche de labélisation sous caution des laboratoires de recherche impliqués.

Archivage pérenne des données

A très long terme, pour assurer la continuité numérique des données, se pose la question de l'archivage pérenne. Comme nous venons de le voir, nos travaux du KLM patrimonial visent à créer un SI complet pour supporter la chaîne de valeur ; il n'est pas uniquement question de technologies numériques de pointe mais également d'un travail nécessaire sur les modèles.
Dans le domaine du Génie Civil, la communauté s'est structurée autour du BIM en spécifiant des formats comme IFC162 avec un LOD163 adapté au niveau de maturité de la maquette numérique.
Pour les domaines de la géographie et de la géomatique convergeant vers les SIG, le CityGML s'impose comme un standard avec là aussi un LOD définissant le niveau de profondeur de détail de la zone topographique.

Les avions sont conçus pour une durée de vie de 50 ans : comment pourra-t-on garantir que la maquette virtuelle (son double numérique) sera-t-elle pérenne dans 50 ans ? De même, sur la base de la nature intrinsèque du BIM, les bâtiments construits actuellement pourront-ils continués à être exploités, maintenus/entretenus voir démantelés ?

Les ontologies utilisées pour sémantiser les données sont parfois trop fermées par rapport aux usages du patrimoine. C'est pourquoi il est nécessaire de penser au plus tôt un archivage pérenne pour conserver, préserver avec intelligibilité et rendre accessible les données.
Par analogie au BIM ou au SIG, nous travaillons avec les collègues du consortium 3D de la TGIR Huma-Num pour définir un modèle pérenne pour les historiens et les archéologues. Nous avons ainsi formalisé le processus de virtualisation des données 3D statiques patrimoniales qui décrit les données à encapsuler pour assurer une bonne contextualisation des données numériques. Le schéma de la figure suivante inclus également les différentes versions requises pour valider la déontologie des modèles 3D expliquées ci-avant :

1. Version A0 après acquisition brute,
2. Version V0 réalisée grâce au processus de traitement avec des versions intermédiaires A1, A2 et A3,
3. Version V2 validée issue des itérations V1n sur les hypothèses de restitution.

[162] IFC = Industry Foundation Classes
[163] LOD = Level Of Detail

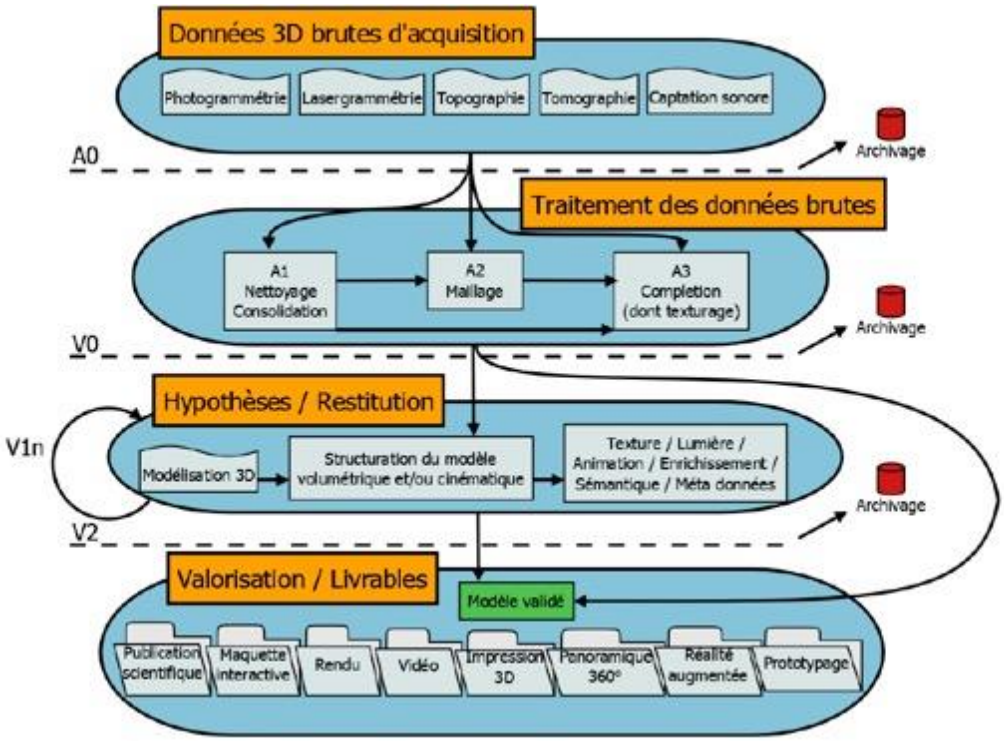


Figure 110 - *Graphe séquentiel des pratiques 3D en SHS pour un archivage pérenne (Consortium 3D)*

En étroite collaboration avec le CINES[164], nous envisageons un dépôt pérenne des données 3D patrimoniales statiques[165]. Les développements sont actuellement en cours pour permettre l'import des données et le portage vers les serveurs de stockage nationaux. Les données ciblées pour cet archivage pérenne sont structurées selon les préconisations du schéma de métadonnées CARARE[166] adapté pour Europeana[167] qui comprend les classes suivantes :

- Généralités :
  - Nom du projet / de l'archive,
  - Objectifs,
  - Acteurs, scientifiques concernés…,
  - Date.
- Le contenu de l'archive : nombre de morceaux, nombre de sources…
- L'objet 3D en lui-même :
  - Maillage,
  - Géométrie 3D, textures,
  - Sources.

Du côté de nos voisins italiens on citera les récents travaux du projet ARIADNE[168] menés par l'équivalent du CNRS italien qui est un service web pour visualiser des modèles 3D à base de nuages de points via de la lumière RTI. De même, le format HBIM se veut comme une intégration des aspects historiques (H) au BIM (Quattrini, Pierdicca, & Morbidoni, 2017).
On peut également citer l'initiative de l'ASTM – un organisme de normalisation américain - qui propose le format opensource e57.04[169] pour stocker les données 3D issues de numérisation 3D physique (Huber, 2011).

Multi-modalités pour la muséologie virtuelle

Comme l'analyse Nicolas Thely dans l'ouvrage collectif que nous avons réalisé à l'issue du projet Nantes1900 (Guillet, Courtin, Laroche, & Kerouanton, 2015), au final les humanités numériques posent plus de questions qu'elles n'apportent de réponses. On constate une accumulation de documents travaillés par des chercheurs et des scientifiques ; et pourtant, cette accumulation de documents ne construit pas l'histoire. Il faut avoir la possibilité de créer un récit historique « augmenté » à partir de ces éléments.

[164] CINES = Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur - www.cines.fr
[165] En effet il n'est actuellement pas possible de stocker des assemblages complexes comme des machines ou des usines.
[166] Projet européen CARARE 2010-2013 - www.carare.eu
[167] Base donnée autonome qui diffuser les objets patrimoniaux du territoire européen - www.europeana.eu
[168] http://visual.ariadne-infrastructure.eu
[169] http://www.libe57.org

Se pose donc la question des moyens et des modalités des parcours d'exploration et d'organisation des connaissances.

Un des champs d'investigation pour résoudre cette problématique est celui de l'utilisation des outils de la réalité virtuelle (Fuchs & Moreau, 2004) qui se qualifie par le triptyque : Immersion – Interaction – Imagination.
La figure suivante est issue des travaux précurseurs de Milgram en 1994 (Milgram, Takemura, Utsumi, & Kishino, 1994) dans laquelle on pose que la Réalité virtuelle et la Réalité Augmentée définissent un contexte plus large dénommé la Réalité Mixte (Normand, Servières, & Moreau, 2012). Comme le rappelle Manfred Dangelmaier et Roland Blach (Dangelmaier & Blach, 2016), la place de l'homme joue un rôle fondamental car si la réalité physique et la réalité virtuelle ont atteint une part égale, la superposition entre les deux environnements doit être plus précise pour fournir une expérience cohérente à l'utilisateur. La Réalité Mixte vaut alors "1" représentation physique pour "n" représentations numériques : depuis la présence de l'utilisateur dans le monde réel jusqu'à une totale immersion virtuelle par différentes modalités : interfaces tangibles, AR, salles immersives…

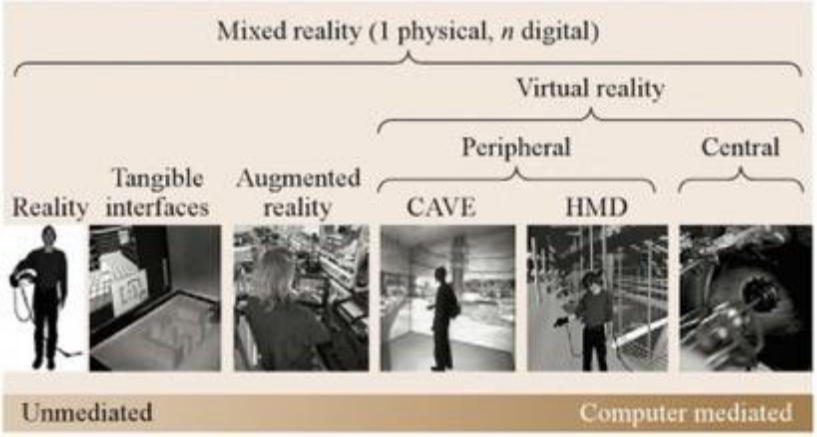


Figure 111 - *VR continuum : degré d'intégration de la réalité physique (Dangelmaier & Blach, 2016)*

Si l'on s'intéresse au domaine de la muséographie numérique, l'objectif est d'enrichir les moyens d'accès à l'histoire des techniques par une mise en situation virtuelle d'un expert ou d'un visiteur.

Ces avancées pour faire évoluer les pratiques muséographiques sont déjà anciennes car initiées en 1989 par Rivière et Dessalées (Desvallées & Mairesse, 2010). On se souviendra entre autres des premières tentatives de systèmes de RA en 1996 pour définir un « Meta-Museum » (Mase, Kadobayashi, & Nakatsu, 1996) ou plus récemment la proposition d'une application mobile en RA pour musée (Ghouaiel, Cieutat, Jessel, & Garbaya, 2016). Pour guider le visiteur, on peut citer l'une des premières applications réalisées en 2005 avec la technologie RFID[170] qui permettait de connecter le visiteur de Musée avec l'objet et des données complémentaires (Perro, 2005), technologie reprise pour préparer le travail de personnalisation des données des médiateurs dans le projet Nantes1900; de même, en 2008, la création d'un guide virtuel augmenté pour les musées (Miyashita, et al., 2008).

Aujourd'hui, faisant partie intégrante du « KLM patrimonial », un dispositif immersif pour la visualisation de connaissances patrimoniales en RV doit permettre de :

- *Capitaliser les connaissances et contextualiser les informations,*
- *Démontrer la valeur patrimoniale de l'objet/système du passé,*
- *Piloter la visualisation et la manipulation de données par les connaissances,*
- *Assurer la possibilité d'enrichissement des données directement en immersion.*

C'est une nouvelle forme d'historiographie qui se crée, renouvelant ainsi les pratiques professionnelles des historiens (voir partie ci-après sur l'aide aux métiers). En ce sens, avec le réseau de la PRI-IDEV nous avons pu construire une cartographie des applications actuelles et des futures des évolutions en termes de muséologie (voir le schéma dans la partie ci-avant sur *Les fédérations de recherche et réseaux locaux*). De plus, grâce au réseau Visionair, j'ai ainsi pu diffuser les bonnes pratiques d'utilisation de la RV/RA pour le patrimoine à l'échelle européenne.

[170] RFID = Radio Fréquence IDentification

RV/RA pour le musée de demain

Considérant les phases de capitalisation et de structuration des connaissances comme achevées, le point de départ d'un dispositif de RV muséographique est un conteneur de connaissances constitué de :

1. Une modélisation 3D permettant une exploration spatiale et temporelle des données,
2. Des informations associées manipulées grâce à une navigation sémantisée.

Les possibilités de déclinaison des dispositifs sont illustrées par la figure suivante.

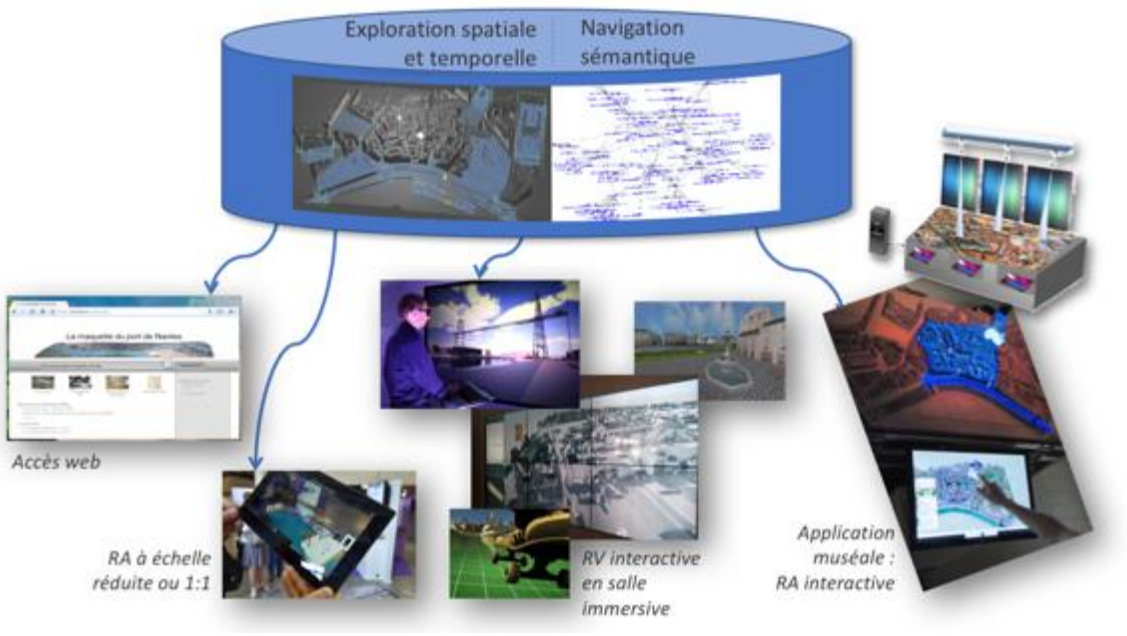


Figure 112 - *Multi-modalités d'extraction des connaissances en RV (Hervy, Laroche, Kerouanton, & Bernard, 2012)*

Appliquées directement aux travaux menés grâce à la maquette de Nantes en 1900, nos recherches contribuent aux avancées en RV à plusieurs niveaux. Depuis les applications web jusqu'à un dispositif de RA dans la ville, nous proposons le tableau de la figure[171] suivante pour définir les niveaux de gradation d'immersion et d'interaction et les dispositifs mis au regard. Cette formalisation in/ex situ/vivo est issue des riches discussions scientifiques avec Philippe Dubé du laboratoire LAMIC de l'Université de Québec à Montréal (Dubé & Courchesne, 2012).

Interaction \ Immersion	Ex-situ	In-situ
Ex-vivo	Web	Musée
In-vivo	Salle immersive	RA dans la ville

Figure 113 - *Catégorisation des dispositifs de visualisation de connaissances patrimoniales*

Comme détaillé précédemment, le modèle d'information développé par Benjamin Hervy a permis de mettre en place une méthode de valorisation au sein d'un outil permettant de pouvoir capitaliser l'ensemble des connaissances d'un objet patrimonial. Il s'agissait de définir les modalités d'interaction entre l'objet physique (généralement exposé dans un Musée), sa représentation numérique et les éléments issus de son contexte (traces ou archives) permettant d'en cerner toute sa compréhension (Ma, Laroche, Hervy, & Kerouanton, 2013).

La première application a été réalisée pour les visiteurs et les médiateurs du Musée d'Histoire de la ville de Nantes. Plusieurs prototypes ont été créés au sein du laboratoire IRCCyN afin de valider la robustesse de l'outil et son ergonomie (évaluations quantitatives sur les données et qualitatives par interviews des testeurs) (Hervy, et al., 2015). Le dispositif final a été développé par Arnaud Waels de la société Dev'O Cité[172].

[171] *situ* est relatif au lieu du dispositif ; *vivo* défini la possibilité de simulation de la situation.
[172] http://devocite.com

Le dispositif proposé s'apparente à une « maquette historique augmentée » par l'ajout d'informations sur une représentation virtuelle de l'objet sur écran ainsi que sur l'objet réel. Les visiteurs du musée peuvent interagir virtuellement avec l'objet, ce qu'ils ne pouvaient pas faire auparavant, pour des raisons de conservation de la maquette. Des écrans tactiles situés devant la maquette sont mis à la disposition des visiteurs du musée. Ces écrans permettent, au moyen d'une interface spécifique, de naviguer de différentes manières au sein du corpus de documents (par thématique, points d'intérêt, zones géographiques, etc.). Les rebonds thématiques permettent au visiteur de pouvoir explorer des éléments de connaissance relatifs à l'élément sélectionné mais également des éléments abstraits (catégories génériques, sujets thématiques, ou tout sujet n'ayant pas de représentation physique sur la maquette). Il s'agit là de la visualisation directe du framework de connaissances issu du DHRM proposé pour structurer les données de Nantes1900.
Au-dessus de la maquette, 4 vidéoprojecteurs connectés au serveur informatique permettent de couvrir l'intégralité de la surface pour l'affichage des zones lumineuses avec retour lumineux sur la maquette dépendant des actions de l'utilisateur. La base de données, qui capitalise l'ensemble des connaissances historiques relatives au territoire représenté par la maquette, s'appuie sur plusieurs centaines de sources iconographiques (cartes postales, photographies, estampes...) consultables en ligne. Le système va même plus loin puisqu'il permet une évolution dynamique du contenu avec la participation de public non-expert qui vient enrichir les connaissances disponibles autour de cette maquette historique (Andreacola, Sanjuan, & Poli, 2015).

Pour terminer cette partie sur les outils de RV, on soulignera la montée en puissance des serious game qui, à terme, représenteront surement un fort potentiel pour la diffusion de la culture par les outils du numérique. Dans les serious game avec un caractère historique, on peut citer le jeu "Le mystère de la Cordelière" développé pour les archives départementales de l'Aube[173] ou la création du serious game "Gueule d'ange" dans le cadre des commémorations de la première guerre mondiale par les archives départementales des Yvelines[174].

Interaction avec les connaissances : l'annotation virtuelle

Suite au dispositif de RA mis en place pour la maquette de Nantes en 1900, un manque est rapidement apparu : celui de la nécessité d'enrichir directement les données historiques. L'objectif est de pouvoir renouveler les habitudes des historiens en proposant non pas une interface de type Web ou un fichier Excel (avec import ultérieur dans la base de données) mais un dispositif immersif et interactif de RV. Il s'agit d'un des objectifs de l'ANR RéSeed : concevoir un système interactif pour y placer en son sein un historien dans lequel il pourrait évoluer et manipuler virtuellement les connaissances. A la frontière entre le KM et la RV, cette phase dite d'annotation virtuelle permet de reboucler le cercle du « KLM for Heritage » : la phase d'exploitation des connaissances vient enrichir la phase de capitalisation et la phase de structuration afin de valider et enrichir les hypothèses.

Rejoignant la thématique du web sémantique et du web socio-sémantique développée précédemment (Zacklad, Bénel, L'Hédi, Cahier, & Zhou, 2007), la mise en œuvre d'annotations est un concept clef pour la formalisation de contenus culturellement riches (Zacklad, Lewkowicz, Boujut, Darses, & Détienne, 2003). L'intérêt des annotations est, par exemple, de pouvoir directement taguer le modèle 3D pour pouvoir établir des liens entre différents modes de représentations, spécifier la temporalité concernée tout en ajoutant des para données.
Présentant une corrélation directe avec les modèles spatio-temporels pour structurer la connaissance patrimoniale, Livio de Luca a étudié les modalités pour pouvoir associer ce système de visualisation d'annotations aux aspects temporels. Le principe repose sur l'utilisation de maquettes représentant différents états temporels. Ces travaux montrent que la spatialisation des informations peut aussi permettre de gérer le suivi d'évolution temporel d'un objet. Dans la continuité de ces recherches, Adeline Manuel qui travaille désormais au laboratoire MAP de Marseille a développé durant sa thèse de doctorat l'outil 3DSA[175] qui permet l'annotation de modèles 3D simples (Manuel, 2016).
Enfin, une proposition simple mais efficace a été proposée par des archéologues italiens pour visualiser les différentes évolutions et hypothèses de modélisation (Aparicio Resco & Figueiredo, 2014). Chaque élément 3D est représenté avec un gradient de couleur permettant d'identifier s'il s'agit d'une hypothèse ou d'une preuve avérée. Ce concept de code couleur de niveaux de certitude archéologique a été repris pour la maquette imprimée en 3D de la salle à manger de Néron : rouge = évident ➔ gris = probable ➔ blanc = hypothétique (voir détail ci-après).

[173] http://www.archives-aube.fr/a/155/le-mystere-de-la-cordeliere/
[174] http://archives.yvelines.fr/article.php?laref=1047&titre=jeu-gueule-d-ange
[175] 3DSA = 3D Semantic Annotation

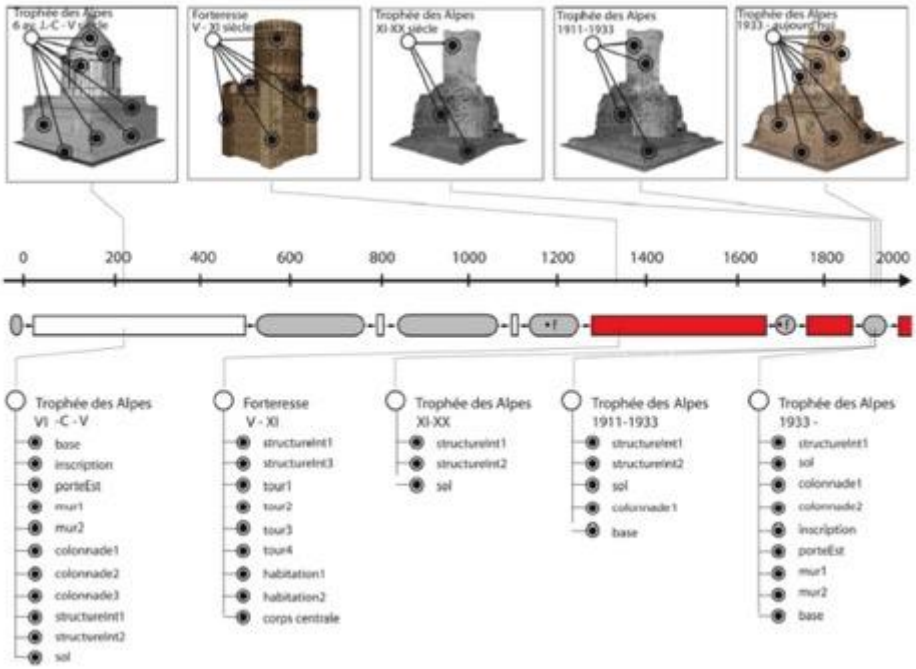


Figure 114 - *Représentation spatio-temporelle des transformations d'un bâtiment (De Luca, et al., 2010)*

La base de données de Nantes1900 est composée de plus de 300 points d'intérêts localisés, 1500 notices historiques et 3000 relations. Nous l'utilisons pour démontrer ce concept d'annotation virtuelle en proposant une interaction en temps réel entre l'utilisateur-acteur et le système d'organisation des connaissances. Plusieurs prototypes ont été réalisés sous Unity 3D.

Le premier dispositif a été créé par Boris Lam (projet R&D ECN) et Quentin Lemée (master). Il est composé d'un modèle 3D avec des éléments primitifs (cubes) et des fiches de connaissance contenant des métadonnées, des liens vers des documents textuels ou iconographiques, ainsi que vers des représentations 3D (Hervy, et al., 2014). Trois types de données sont utilisés pour la visualisation d'information au sein de l'interface :

- Éléments géolocalisés avec une géométrie 3D : bâtiments et mobilier urbain par exemple. Les contenus historiques inhérents à ce type de données sont facilement accessibles par identification ou sélection au sein du modèle 3D virtuel (bloc rouge),
- Éléments géolocalisés sans géométrie spécifique. C'est le cas des zones n'ayant qu'une valeur conceptuelle comme les quartiers. Afin de visualiser ces éléments, des indicateurs visuels sont intégrés dans la scène 3D et peuvent être sélectionnés comme par exemple : des « drapeaux » pour les éléments ponctuels (ou géolocalisés de façon ponctuelle) et des halos transparents de zone pour les surfaces polygonales.
- Éléments n'ayant pas d'existence physique ou ne possédant pas d'informations de géolocalisation comme les acteurs ou les évènements historiques… Ces informations ne peuvent pas être représentées simplement dans la scène 3D virtuelle, l'accès se fait par le biais de métaphores de représentation.

L'utilisateur a la possibilité d'enrichir un élément de connaissance sélectionné ou de modifier/ajouter un lien avec un autre élément de connaissance. De plus, l'intérêt d'un tel dispositif réside dans sa capacité à pouvoir laisser à l'utilisateur le choix de modifier en temps réel le niveau de profondeur d'affichage de l'information voulu : autrement dit le nombre d'éléments de connaissance.

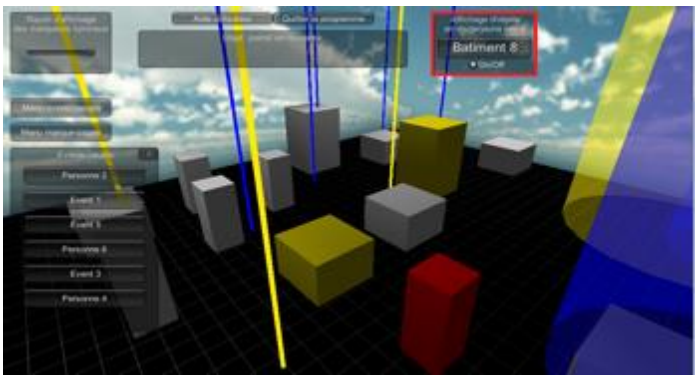


Figure 115 - *Nantes1900 – premier prototype interactif (Hervy, et al., 2014)*

Après plusieurs prototypes successifs, la dernière version de 2016 a été créée par Alexandre Langeois (master) et Quentin Arragon (stage Ecole des Beaux-Arts). L'ensemble de la maquette numérisée en 3D de Nantes1900 a été porté en Réalité Virtuelle ; les connaissances associées ont été structurées dans une base de données selon un format CityGML que nous avons adapté aux données historiques. Le système interactif développé assure un contrôle visuel immédiat à l'utilisateur pour vérifier la cohérence entre les données sémantiques et physiques. Cet outil de visualisation de données multi-spatio-temporelles avec annotations par interface interactive est essentiellement dédié à un usage expert pour l'enrichissement des modèles par l'historien et la mise en évidence de nouvelles hypothèses.

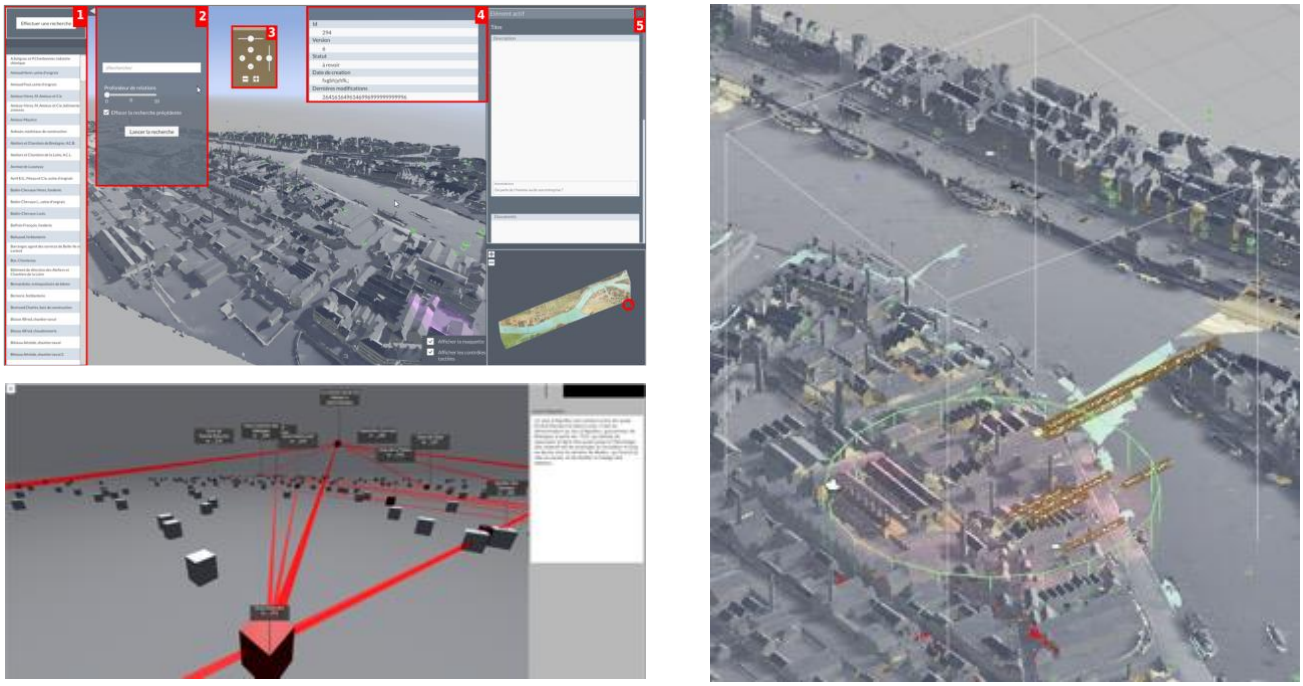


Figure 116 - *Nantes1900 – prototype interactif de l'ensemble de la maquette et des connaissances associées*

Immersion dans les connaissances : la RA in-situ in-vivo

La réalité virtuelle se caractérise par son interaction et son immersion. Or le système d'annotation virtuelle détaillé ci-avant ne rend pas compte d'une immersion de l'utilisateur dans le système.

A ces fins, nous avons développé des applications disponibles en salle immersive mais également avec casque Occulus, skateboard pour naviguer en 3D… Au bilan, que ce soit devant un écran 3D ou avec un « artefact sur la tête », le degré d'immersion n'est que peu ressenti par les professionnels, même si le grand public, lui, le perçoit plus aisément. Cela s'explique par le fait que les historiens n'ont pas besoin d'artifices pour émettre des hypothèses.

Aussi, pour améliorer le degré d'immersion, nous avons adapté nos modèles pour réaliser des applications sur tablette en utilisant la Réalité Augmentée.

Ce fut le cas du projet Explornova qui permet de se déplacer physiquement autour d'une représentation virtuelle à échelle 1:1 du rover martien Curiosity dans un système de RA sur tablette sans marqueur standard (voir partie ci-avant sur *Le projet ExplorNova*). Une expérience similaire a été réalisée avec le modèle 3D du pont transbordeur de Nantes. Malheureusement, même en intégrant les algorithmes de robotique humanoïde pour augmenter la stabilité des images affichées en réalité augmentée sur la tablette, les résultats à échelle 1:1 pour un objet de si grande dimension (le tablier mesure 200 mètres de long) ne sont pas encore assez concluants.

Figure 117 - *Le pont transbordeur de Nantes en Réalité Augmentée*

Plus récemment, la poursuite de ces travaux nous a conduits à œuvrer pour une navigation en réalité virtuelle dans un autre univers patrimonial nantais : les Salons Mauduit. Deux grandes salles de réception datant du début du XXème siècle qui avaient été le lieu de nombreuses manifestations nantaises (congrès, sport, politique, association…) ayant été détruites.

Le corpus des salons Mauduit, constitué de 176 éléments de connaissances, a été réalisé en respectant le standard Dublin Core. La structuration des sources vise un archivage des éléments d'un espace patrimonial disparu (thématiques, supports, usages et destinations) dans la base de données relationnelle Omeka[176]. A l'aide d'une numérisation 3D à balayage laser des salons Mauduit avant destruction, l'ensemble des sources historiques sont géolocalisées dans l'espace vectoriel virtuel en 3D. Basé sur des métriques de proximité spatiale, sémantique et temporelle pour organiser les relations à créer entre les données et les métadonnées, un démonstrateur scientifique a été développé pour lier la base de données et la visualiser en immersion/interaction en RV. Cette modélisation des données historiques se veut de faire cohabiter une vision d'atomicité des données telles que conçues par les ontologies formelles et leur dimension thématique et relationnelle telle qu'utilisée en Sciences Humaines et Sociales.

Cette interface prolonge les travaux de Nantes1900 en accentuant le caractère "sémantique" de la navigation, permettant par exemple l'accès à des données non situables comme la biographie d'un personnage (éventuellement artificiellement spatialisée), tout en offrant une immersion spatiale dans les lieux disparus.
En effet, l'utilisateur peut se déplacer librement dans le nuage de points texturé selon 3 axes (espace/temps/thème). Selon sa position, des informations temporelles ou sémantiques sont réparties dans l'espace 3D et les liens sont matérialisés par des fils d'Ariane de couleurs. Il peut alors se rapprocher de l'archive et cliquer dessus pour consulter la donnée historique. C'est la visite sérendipité. L'interface de "visite guidée mais libre" permet à l'utilisateur d'accéder à un grand nombre de données historiques artificiellement spatialisées et sémantiquement liées (Laroche & Kerouanton, 2016).
Ce type de navigation dans les connaissances est novateur car il permet à l'utilisateur de choisir son parcours. Le prototype logiciel calcule la pondération à partir de l'égalité ou l'éloignement spatial, l'égalité ou l'éloignement temporel, l'égalité ou l'éloignement thématique ainsi que le nombre de passage des visiteurs sur un même lien ou un même parcours. Le système enregistre les trajets réalisés par les utilisateurs comme une nouvelle donnée indiquant une pondération des liens. L'utilisateur peut enregistrer sa visite dans un panier pour la reproduire plus tard, l'envoyer à d'autres ou composer un « récit historique » consultable à distance. Le système utilisera également cet historique pour le proposer de nouveau à un autre utilisateur ultérieurement. Ainsi, la phase de valorisation des connaissances va créer de nouveaux liens entre les données historiques capitalisées grâce à des utilisateurs contemporains qui seront acteurs du patrimoine (Stiegler, 2009). Voir schéma de l'heuristique des connaissances selon Matthieu Quantin dans la partie descriptive de sa thèse (*2.3.7 Les thèses encadrées)* (Quantin, Laroche, & Kerouanton, 2016).

En partenariat avec la communauté d'agglomération de Nantes métropole, il est envisagé une application mobile dédiée à la visualisation immersive en réalité augmentée du corpus historique dans les futurs salons Mauduit reconstruits qui seront inaugurés en 2018.

[176] https://omeka.org

Figure 118 - *Prototype de visite sérendipité des salons Mauduit (Laroche & Kerouanton, 2016)*

Aide à la décision et médiateur virtuel

Les résultats présentés ci-avant ont focalisé sur un objectif de personnalisation de masse des données numériques mais ils ne proposent pas d'outils d'accompagnement ou d'aide à la fouille de données (Kuntz, Lehn, Guillet, & Pinaud, 2006) (Blanchard, Pinaud, kuntz, & Guillet, 2007).

Dans un cadre muséographique, plusieurs dispositifs de RV proposent d'autres canaux de médiation pour faciliter l'accès aux contenus culturels. Ces outils d'aide à la visite sont (Vidal & Laroche, 2017) :

- Les audioguides. Dispositifs parmi les premiers à intégrer le parcours de médiation des musées et sites patrimoniaux, les audioguides restent toujours l'outil numérique développé en priorité dans ces structures. Ils ont peu à peu évolué, passant des casques à cassette aux compagnons de visite interactifs et sont aujourd'hui couramment utilisés par un grand nombre de visiteurs. Ils peuvent aussi être couplés à des dispositifs plus récents, comme de la localisation indoor par exemple.
- La géolocalisation. L'objectif ici n'est pas d'obtenir une localisation extrêmement précise de l'utilisateur mais d'avoir une localisation approchée afin de proposer un contenu personnalisé et dynamique lors de la visite. Majoritairement basée sur des techniques utilisant des signaux électromagnétiques, elle implique un certain nombre de contraintes et de dysfonctionnements potentiels.
- Localisation indoor. Jusqu'à récemment, la géolocalisation indoor fonctionnait par des triangulations de signaux Wi-Fi voire infrarouge et nécessitait un développement spécifique souvent long et coûteux. Aujourd'hui, grâce à la technologie Bluetooth Low Energy et le développement des Beacons, cette fonctionnalité est devenue relativement simple à déployer. Elle consiste en l'utilisation d'une puce permettant de mesurer la distance relative entre l'appareil connecté et celle-ci. Cette technologie présente l'intérêt d'être compatible avec la plupart des terminaux (smartphones et tablettes) actuels et d'être accessible à faible coût. Dans la même catégorie on trouve les puces NFC. Elles aussi compatibles avec la majorité des terminaux, elles supposent une démarche volontaire de l'utilisateur, qui doit rapprocher son appareil de la puce. Ces puces sont très utilisées pour associer du contenu à un objet précis.
- Localisation Outdoor. Dans la majorité des cas, la localisation outdoor est obtenue par le biais des outils usuellement embarqués dans le terminal. Basés sur des signaux GPS mais aussi Wi-FI, tous les terminaux (smartphones et tablettes) du marché proposent des fonctionnalités natives permettant de faire de la localisation outdoor précise à quelques mètres. Pour des usages plus inhabituels, qui nécessitent une meilleure précision, les applications combinent la géolocalisation avec les compas et accéléromètres embarqués dans les terminaux.
- On peut aussi mentionner les dispositifs basés sur la vision. Plus précis que ceux énoncés jusque-là, ils sont souvent utilisés épisodiquement pour des besoins spécifiques et nécessitant l'action de l'utilisateur. Il "pointe" à l'aide de la caméra un objet ou une image qui est reconnu par le dispositif et permet donc d'estimer la position de la caméra par rapport à cet objet. Cette technique est très précise si l'objet recherché est bien visible. Elle est notamment utilisée pour la réalité augmentée mais aussi plus simplement pour des technologies comme le QR code.

L'objectif de nos travaux est de définir les interconnexions et les conditions de dialogue des acteurs entre l'objet, le contenu et l'outil de médiation. Ce processus d'interaction va permettre d'analyser les besoins et les mécanismes de progression des différents types d'utilisateurs en prenant comme postulat fondateur que l'usager est désormais acteur de son apprentissage et non plus un simple récepteur.

En 1998, des travaux précurseurs ont été menés par le laboratoire d'informatique de l'Université de Kent dans le Canterbury. Ils utilisaient un PDA[177] pour proposer des informations contextualisées en fouilles archéologiques. Il s'agissait là des prémisses d'un assistant personnalisé. (Ryan, Pascoe, & Morse, 1998)

[177] PDA = Pocket Data Assistant, premiers équivalents de "tablettes" mais faiblement connectés et très fortement utilisés dans les milieux professionnels à la fin des années 2000 avant l'apparition des smartphones.

Ainsi, reprenant les concepts vus précédemment mais dans un cadre industriel, nous avons mené des recherches pour la mise en place d'un outil d'assistance in-situ : c'est le concept du « médiateur virtuel ubiquitaire ».
S'inscrivant dans le contexte économique de l'industrie du futur du projet de recherche multidisciplinaire ARTUR, le « Digital Factory Assistant[178] » permet d'intégrer l'ensemble des connaissances de l'entreprise pour la restituer à l'utilisateur. Ce « compagnon d'entreprise » a été développé sur un système à base de connaissances (Sajja, 2008) qui assiste les acteurs de l'entreprise – plus particulièrement pour les opérateurs en action sur les machines de production - dans leurs tâches quotidiennes. Agissant sur le triptyque processus/produit/service, le « compagnon » leurs permet de prendre la meilleure décision au bon moment (Dhuieb, Laroche, & Bernard, 2013).
Les travaux de la thèse de Anis Dhuieb se basent sur les notions issues de l'informatique ubiquitaire (Dhuieb, Laroche, Belkadi, & Bernard, 2013). Il s'agit de définir des modèles d'interaction homme-machine dont le traitement de l'information est intégré directement dans les objets utilisés dans notre vie quotidienne. Aujourd'hui, ce thème de recherche est en plein essor bien que les fondements de ce paradigme aient été initiés par Weiser à la fin des années 80 comme nous l'avons vu dans la partie de ce mémoire sur l'*Intégration d'un modèle de contexte pour mieux adapter les connaissances* (Weiser, 1991).
Le framework de la figure suivante décrit l'architecture informatique mise en place pour ce DFA.

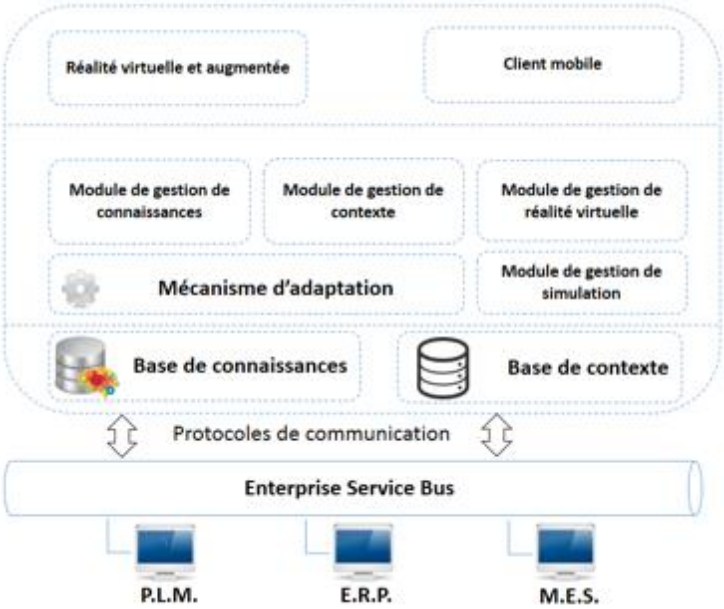


Figure 119 - *Architecture informatique mise en place pour ce DFA (Dhuieb, Laroche, & Bernard, 2013)*

Les finalités de la figure précédente sont doubles :

- Mettre en place un client mobile de type tablette in-situ, à disposition des opérateurs sur leurs postes de travail afin qu'ils puissent accéder à la connaissance et décider en ayant toutes les informations ; il s'agit ici d'un démonstrateur des principes envisagés par Syvanen en 2005 (Syvanen, 2005). Le prototype développé dans la thèse de Mohamed Anis Dhuieb a été repris par CLARTE, un des membres du consortium ARTUR, afin de le diffuser à d'autres entreprises,
- Envisager une application plus invasive par un système de RA qui viendrait guider l'opérateur dans ses tâches. Toujours dans le cadre de Artur, après que nous ayons posé les bases conceptuelles de ce dispositif ; il a été testé par Jean-Marie Normand et Guillaume Moreau du CERMA, un autre partenaire du consortium ARTUR.

[178] DFA = Digital Factory Assistant

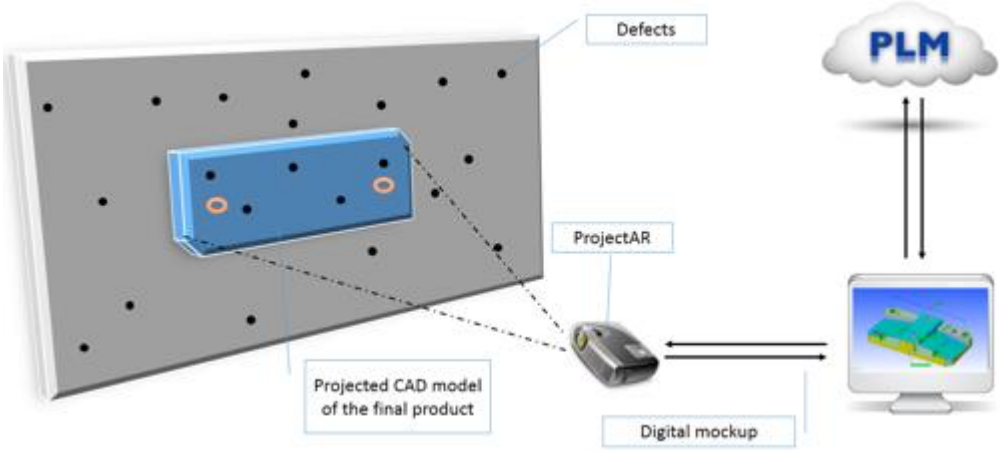


Figure 120 - *Du PLM au système de RA (Dhuieb, Belkadi, Laroche, & Bernard, 2014)*

À terme, une fois ces dispositifs de RA rendus robustes, il sera envisageable de les intégrer dans le PLM muséographique afin d'enrichir l'approche du « KLM for Heritage ».

L'impression 3D

Pour conclure sur les possibilités d'exploitation des connaissances, en parallèle à toute forme de virtualisation, il est possible d'envisager des réhabilitations industrielles, voir de pouvoir refabriquer l'objet (Gasnier M. , 2007). La réplique d'un objet est une forme de visualisation de connaissances très avancée. Comme le souligne la chercheuse en art Ellen Berman, passer d'un objet virtuel à un objet réel requiert un processus cohérent car il nécessite de pouvoir simuler dans notre réalité physique un modèle virtuel.

Dans le cadre du projet de réhabilitation du Musée des Marais Salants de Batz-sur-Mer, après la reconstitution virtuelle de la machine à laver le sel (Laroche, 2007), les deux conservateurs en chef Michaële Simmonin et Gildas Buron ont eu l'audace de proposer la reconstruction de l'objet à échelle 1:1 et fonctionnel. Ce nouvel artefact de plus de 30 m^3 est une nouvelle forme de base de données car il contient désormais toute la connaissance en son sein. Une nouvelle problématique émerge alors : comment intégrer cette forme représentation physique dans un SI cohérent (Simonnin & Laroche, 2014) ?

Pour enrichir ces questionnements, une nouvelle collaboration est en cours avec le laboratoire IRAA[179] et l'Ecole Française de Rome pour mettre à disposition des outils de compréhension de la salle à manger de Néron (Quantin, Laroche, Andre, & Villedieu, 2017). Après le travail de simulation virtuelle, le premier rendu a été l'impression 3D en PLA et ABS d'une maquette à échelle 1:80 pour le Musée d'Archéologie de la Vieille Charité à Marseille[180]. Constituée de plus de 106 pièces imprimées en un temps restreint auxquelles ont été ajoutées un mécanisme fonctionnel, cette "rematérialité" réalisée à moindre coût avait un double objectif :

- Devenir un objet de discussion interdisciplinaire pour valider les hypothèses scientifiques,
- Etre un outil de médiation pour le Musée à destination du grand public.

[179] Institut de Recherche sur l'Architecture Antique USR CNRS 3155 http://iraa.mmsh.univ-aix.fr
[180] http://vieille-charite-marseille.com

Figure 121 - *Photo de la maquette à échelle 1:80 de la salle à manger de Néron au Musée d'archéologie de Marseille*

On citera également l'expérience remarquable réalisée pour la grotte Chauvet en France, depuis sa découverte à sa reconstitution physique dans le projet muséographique de la Caverne du Pont d'Arc[181].
La "rematérialité" et l'impression 3D peuvent venir en support aux métiers artisanaux comme celui du socleur. Pour présenter un objet dans un musée il faut mettre en place un support ; celui-ci est unique car il doit s'adapter parfaitement à l'objet qu'il soutient. Afin d'offrir plus de possibilité pour le soclage, nous développons une méthode intégrée pour le réassemblage d'objets fragmentés. Il s'agit de travaux expérimentaux basés sur les algorithmes de positionnement automatique des pièces utilisées par les imprimantes 3D. (Chandrakar A. , Zhang, Laroche, & Bernard, 2017)

2.5.2 Une démarche anthropocentrée

Pour autant, le grand public n'est pas le seul utilisateur concerné par nos travaux de recherche. Les experts, à travers leurs communautés respectives, doivent également être acteurs de cette capitalisation des connaissances sur le long terme. La place des entreprises qui construisent notre société de demain doit être questionnée et repositionnée dans un contexte plus large.
Nous avons démontré préalablement que les deux domaines scientifiques concernés peuvent cohabiter. La question est désormais de savoir comment ? L'enrichissement proposé est bijectif et défini ainsi deux processus faisant sens comme nouvelles problématiques de mes travaux de recherche :

- Vers une humanisation de l'industrie par les Connaissances Patrimoniales,
- Le patrimoine comme pilier de connaissance pour construire un futur durable.

La figure suivante démontre l'élargissement du cercle vertueux de la connaissance de Grundstein (Grundstein, 2009) en inscrivant les connaissances patrimoniales dans un nouveau cercle vertueux que l'on nomme désormais « KLM for heritage ».

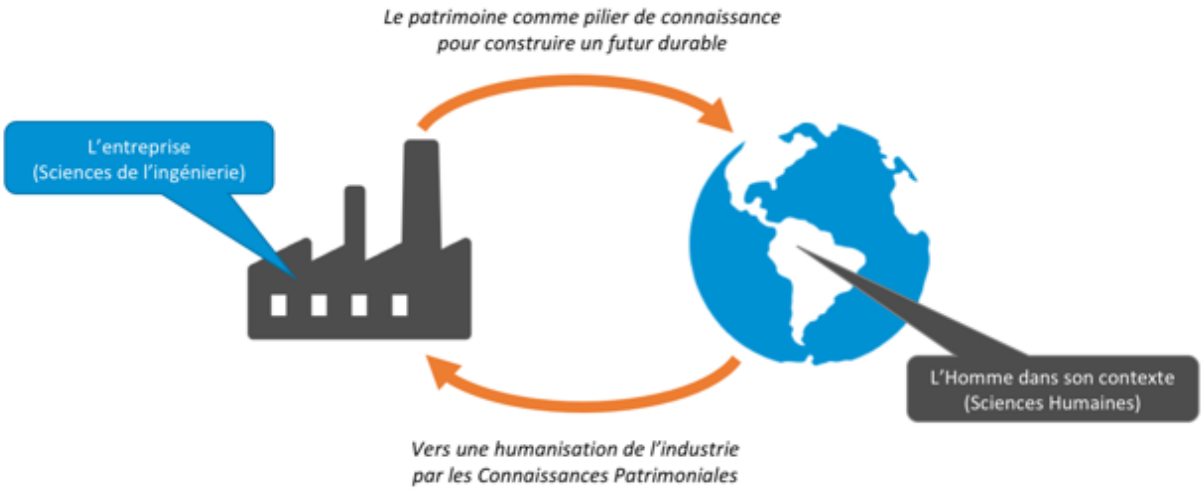


Figure 122 - *Le cercle vertueux de la connaissance patrimoniale « KLM for heritage »*

La place de l'humain dans le numérique

Aujourd'hui, faire du numérique c'est changer ses habitudes de travail. Malgré le temps passé, seul devant son ordinateur, nos métiers évoluent car nous produisons des données qui ne restent plus en local : dès leurs créations, elles sont partagées.
C'est une forme de révolution numérique intellectuelle pour laquelle il faut inventer de nouveaux modes de fonctionnement pour nos métiers (Vitalis, 2016).
Mais le numérique se comporte comme une boite noire dans laquelle il n'est pas possible de voir ni de comprendre le fonctionnement interne. Il y a là une dichotomie avec le fondement même de la science qui se veut de décortiquer et de comprendre notre monde.

[181] http://lacavernedupontdarc.org

C'est ce que Bernard Stiegler appelle la Disruption dans le sens où la technologie va plus vite que la pensée humaine, l'homme se sentant impuissant (Stiegler, 2016).

Fort heureusement, même si le numérique prend une place importante dans notre société et notre monde économique, il n'en reste pas moins que l'implication de l'être humain reste incontestable. Prenant comme prisme les visions autour de l'usine du futur, les avis des experts sont unanimes pour conclure à la nécessité de donner plus d'ampleur au rôle de l'être humain dans le but d'améliorer ses conditions de travail. Westkämper l'exprime ainsi (Westkämper & Walter, 2014) :

> *« Factories are the place of human's work. Humans generate and drive factories. Humans are the most flexible resource in the manufacturing system [...] but their cognitive, physical and tactile perceptions are limited [...] Humans can use computational intelligence to learn and overcome « oblivion » and taking advantages of computational knowledge. Humans are able to learn, to forget, to communicate and cooperate in the digital environment [...] Their motivation and their creativity as well as their experience are the driving forces for innovation, adaptation and optimization in manufacturing. »*

La commission Européenne[182] définit 3 roadmaps génériques d'utilisation du numérique pour renforcer le rôle de l'être humain :

1. L'innovation organisationnelle. Il s'agit de révolutionner la répartition des missions et les responsabilités en permettant plus de flexibilité et d'adaptabilité des tâches tout en tenant compte des changements dynamiques des environnements de travail. Il s'agit de définir des démarches collaboratives et cela nécessite de repenser les relations interhumaines.
2. La place de la formation et de l'apprentissage par la pratique (dans le cadre de l'usine du futur, ce concept est dénommé usine apprenante ou « Learning Factory »).
3. Les interactions homme-machine. Il faut promouvoir l'utilisation des interfaces homme-machine intuitives et sophistiquées pour accéder à la bonne information, au bon moment ; et dynamiser les modalités des interactions homme-robot.

Il y a une certaine analogie entre les systèmes de production des usines et les musées : au lieu de produits manufacturés, il est question d'objets patrimoniaux ; au lieu d'informations industrielles, il est question de connaissances historiques ; au lieu d'opérateurs–concepteurs, il est question d'historiens–experts–visiteurs. Nos travaux visent également une meilleure encapsulation du savoir-faire et une diffusion de la culture. Ce postulat amène à trois problématiques scientifiques transdisciplinaires :

- Questionner la valorisation patrimoniale des acteurs culturels, en particulier l'usage des nouvelles technologies à partir du statut du « visiteur », entendu dans le sens le plus globalisant du terme comme lecteur, auditeur ou spectateur, doté d'un capital spécifique d'expériences sociales et culturelles, et ainsi déterminer les meilleures voies de progression possibles dans un enrichissement culturel incluant une part variable des connaissances.
- Discuter des conditions de promotion culturelle des individus à partir de leurs acquis, quels qu'ils soient, analyser l'ensemble des procédés mobilisables, en particulier numériques, pour mettre les visiteurs en situation d'être les principaux acteurs de leur progression. Il ne s'agit plus seulement d'adapter un discours savant aux capacités illustratives du numérique mais de convier ce dernier à un effort d'innovation pour répondre aux défis lancés par la rénovation des actions de médiation et de valorisation.
- Explorer les nouveaux champs d'interactions entre disciplines des sciences humaines et des sciences de l'ingénierie et du numérique. Il conviendra donc dans un premier temps de définir les nouvelles méthodologies à mettre en place pour élaborer ces interactions tant sur le plan épistémologique qu'opérationnel.

Se pose alors la question de l'importance de ces nouvelles méthodes dans le processus de patrimonialisation et de valorisation. Danger pour certains comme alibi possible de la destruction, la modélisation et la valorisation numérique (tout particulièrement la 3D mais également les SIG, le BIM…) peuvent bien au contraire apparaître comme un des éléments nécessaires de capitalisation / structuration / diffusion de la connaissance à l'heure du web et de la réalité virtuelle.

La structuration des connaissances relatives aux objets patrimoniaux est donc le pilier nécessaire à la valorisation du patrimoine. Ces connaissances sont structurées à multi-échelles car elles dépendent des outils de médiation numérique mis en place pour répondre aux pratiques disciplinaires. La figure ci-dessous démontre cette imbrication des niveaux de connaissances.

[182] http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/

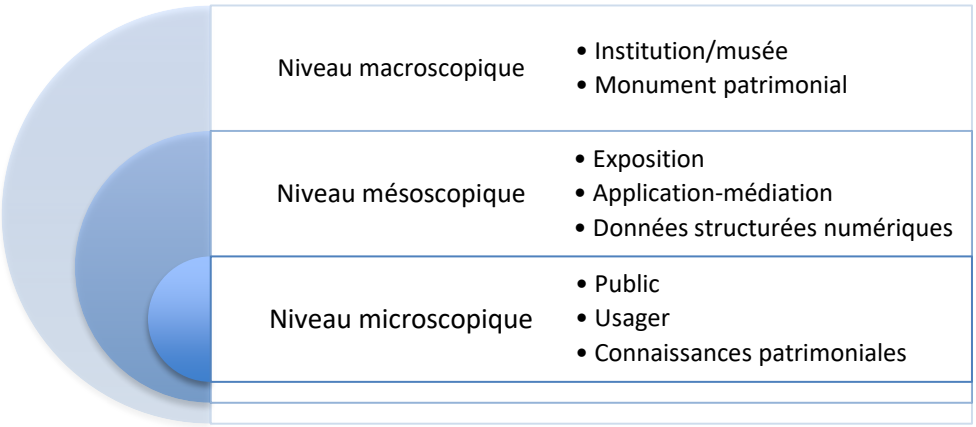


Figure 123 - *Figure fractale de correspondances entre usages et connaissances numériques (Vidal & Laroche, 2017)*

S'appuyant sur le big data et les métadonnées pour répondre au besoin d'adaptation des contenus, l'autonomisation des publics de la culture grâce aux technologies numériques, pose un nouveau paradigme. Les dispositifs d'extraction de connaissances (par exemple l'audioguide) mettent alors directement en relation les institutions patrimoniales et les utilisateurs de la culture.
La numérisation du patrimoine fournit un cadre de gestion des collections des institutions patrimoniales, dont la mission de diffusion conduit à la conception-réalisation d'applications numériques pour susciter des usages culturels, esthétiques, éducatifs, pédagogiques, et scientifiques. Engager une numérisation de masse et une digitalisation par indexation de la connaissance patrimoniale OUI mais comment, dans quel but et pour qui ?

L'ambition du « KLM for Heritage » est de définir un nouveau modèle épistémologique de médiation culturelle et patrimoniale qui se basera sur :

1. *La mise en place d'un processus interdisciplinaire,*
2. *Un modèle heuristique pour structurer ces recherches,*
3. *Une évolution des pratiques professionnelles, dont celle des historiens,*
4. *Une évolution du métier de l'ingénieur afin de donner les outils aux entreprises pour innover grâce à leur patrimoine.*

Un processus de co-conception interdisciplinaire

Au-delà de la communauté de l'ingénierie, comme en témoigne l'intégralité de ce manuscrit, travailler sur les connaissances patrimoniales présente un intérêt scientifique fort car de nombreux domaines à priori non miscibles se rencontrent. Il s'agit là d'une stratégie de rupture affirmée où chacun des acteurs va mettre son expertise au service de l'industrie du numérique. Dès lors, il est nécessaire de construire un rapprochement interdisciplinaire.

Les enjeux du « KLM for Heritage » imposent de décloisonner les silos usuels utilisés en médiation culturelle.

Le schéma de la figure suivante est appliqué au cas d'étude des Salons Mauduit. Le processus reprend le triptyque défini en introduction de cette partie sur les *Travaux en cours et* futurs : Objet/public/outil de médiation. Il fait correspondre les différentes couches métiers et démontre que le triptyque assure les 3 piliers fondateurs qui sont déclinés en fonction des acteurs métiers concernés.

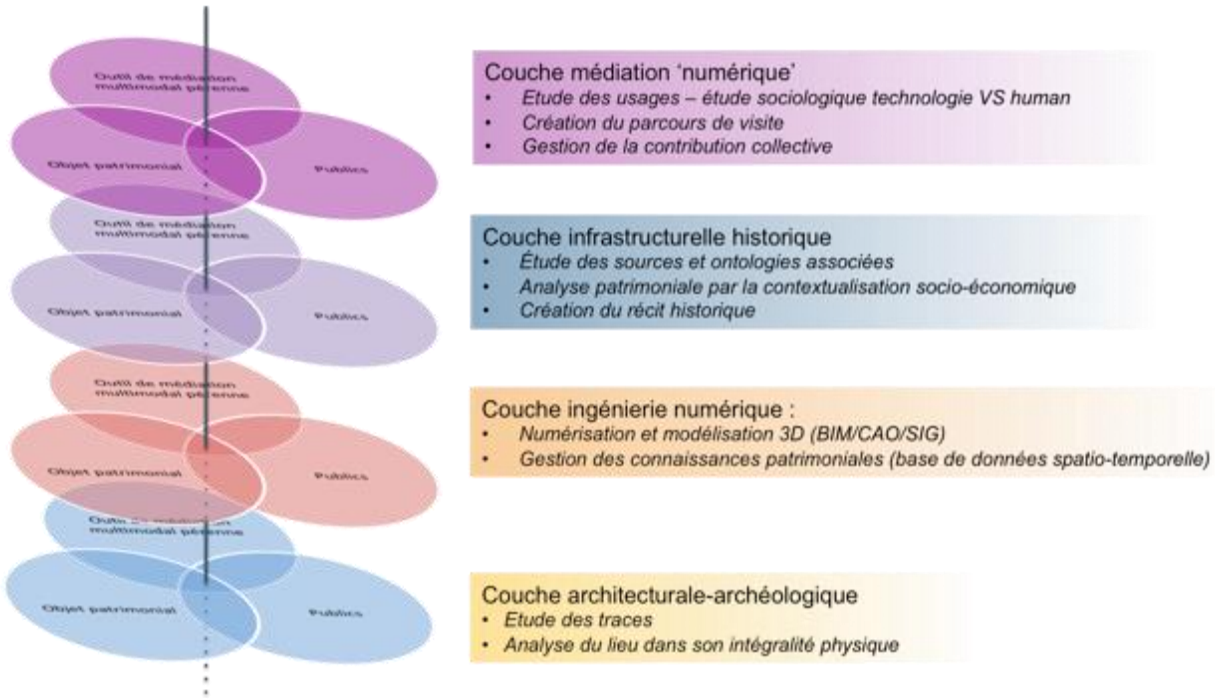


Figure 124 - *Le processus du modèle épistémologique transdisciplinaire (Laroche & Kerouanton, 2016)*

Comme vu précédemment, compte-tenu des nombreuses possibilités de création d'outils numériques, il convient de se poser la question de penser la création d'un SI global. Le PLM muséographique permet de stocker la connaissance patrimoniale et peut la diffuser en multi-vues sans altérer la donnée-source. Ce PLM devra pouvoir s'interfacer avec les objets du monde réel : c'est l'internet des objets (ces mêmes futurs objets connectés qui seront les objets patrimoniaux de demain).
Poussé à son paroxysme, il serait possible d'envisager des applications standards. Cependant, chaque objet étant unique et chaque institution possédant ses propres caractéristiques, il n'est pas possible, dans le secteur patrimonial, culturel en général, d'uniformiser les outils pour les développements.

Le « KLM for Heritage » se veut être un artisan du numérique et non une industrialisation des outils de médiation.

Ainsi, d'un point de vue économique, nos travaux de recherche favorisent le partage des données en open data et les applications en open source, favorisant ainsi l'appropriation, l'alimentation, la lecture… des connaissances. Pour autant, ce parti pris n'est pas incompatible avec la mise en place d'un business model, comme en témoigne le dépôt de brevet de l'outil HARUSPEX.
Au contraire, cette ouverture du numérique participe à l'établissement d'une intelligence collaborative interdisciplinaire favorisant la CO-conception et la CO-fabrication. En ce sens, il n'y a pas de discipline au service d'une autre, elles travaillent ensemble. Les démarches usuelles de gestion de projets (Pepin, 2016) (Penciuc, Durup, Belkadi, Eynard, & Rowson, 2014) ne peuvent donc plus être appliquées, il faut inventer autre chose. Le cycle de vie des applications numériques à destination patrimoniale s'oriente vers l'innovation ouverte incluant entre autres la recherche scientifique, les institutions patrimoniales et l'industrie du numérique. Ce fut le cas du projet Nantes1900 qui fut un succès grâce à sa démarche de collaboration.
On notera également les travaux du Pr Tomohiko Sakao de l'université de Linköping en Suède qui s'intéresse également à ces problématiques de collaboration, coopération et co-création dans le milieu de la production manufacturière ; des échanges scientifiques ont été initiés pour mener des projets en commun.

Nous définissons le cycle de développement des applications numériques à des fins patrimoniales et culturelles en 3 étapes : « Concevoir, Créer et Conserver » :

1. Concevoir c'est définir l'objet étudié, le caractériser et le mettre en regard des technologies les plus adaptées pour répondre au besoin.
2. Créer aborde la partie immergée de l'iceberg ; entre autres la structuration des données à mettre à disposition : quels modèles ? quelles ressources ? En ce sens, la notion de cahier des charges n'est plus d'actualité car elle représente une relation usuelle de type client-fournisseur ; il faut créer en interdisciplinarité entre tous les acteurs.
3. Conserver met l'accent sur la pérennité des applications. Aujourd'hui, allant toujours au plus vite et au moindre coût, les applications sont développées pour une seule finalité et sont en général non réutilisables. Mais le « one shot » n'est pas compatible avec le principe même de conservation de la culture ! Les enjeux de pérennisation des outils doivent être inclus dès la phase de conception.

La figure suivante décline ce processus en ajoutant trois facteurs majeurs issus des trois thèmes transverses du triptyque :

- L'Homme utilisateur, public ou expert ainsi que les fournisseurs et créateurs de solutions numériques,
- Les usages des contenus patrimoniaux,
- Les technologies à utiliser ou développer.

A chaque étape des « 3C », il est donc possible d'associer les trois facteurs concernés et ainsi définir un processus de développement des applications numériques à des fins patrimoniales selon un cycle en spirale.

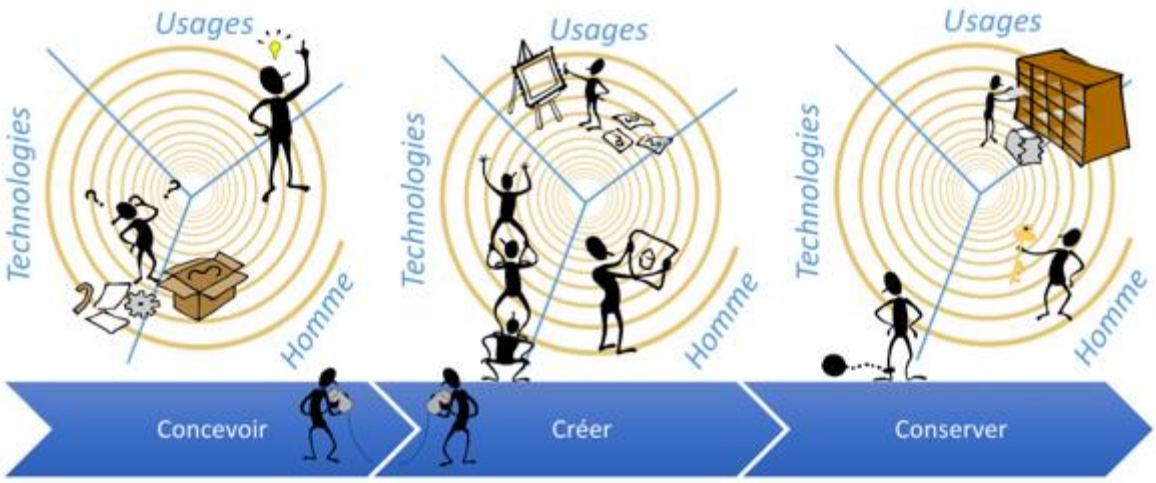


Figure 125 - *Processus de co-développement en spirale des « 3C » (Vidal & Laroche, 2017)*

Un modèle heuristique pour définir l'outil de médiation multimodal

Le processus détaillé ci-avant va conduire à la création d'un outil de médiation multimodal qui pose un certain nombre de problématiques tant dans son utilisation que dans sa structuration. À ces fins, nous allons mettre en place un modèle heuristique pour le définir dans toutes ses dimensions.

Un enjeu fort est celui du changement de rapport du patrimoine avec le numérique qui induit celui de l'industrialisation/marchandisation des données. La sémantisation des données patrimoniales est développée par de nombreuses PME offrant un large éventail de solutions pour documenter, taguer, agréger, lier, archiver, conserver, rendre accessible, intelligibiliser les données. Cette démocratisation présente des atouts et des limites sur la traçabilité des comportements et l'exploitation même des données numériques patrimoniales. La virtualisation du patrimoine peut conduire à la catégorisation des connaissances orientant les usages au détriment d'une appropriation par la diversité. L'intégration sociale du numérique et l'acceptation sociale du tout numérique instaurent souvent une confusion entre communication et médiation. La question de la médiation est pourtant devenue incontournable, notamment depuis la loi n°2002-5 du 4 janvier 2002 relative aux Musées de France. Les contenus numérisés doivent s'inscrire dans des modèles structurant la connaissance patrimoniale mais on constate que les bases de données font souvent apparaître des modèles redondants.

Par ailleurs, une des problématiques actuelles de nombreux sites de patrimoine est leur incomplétude pour le visiteur. Il en résulte des difficultés de compréhension et rapidement un décrochage de l'intérêt (voir la description du projet des *Forges de Paimpont* par exemple). Il est donc nécessaire d'aider le visiteur à comprendre les sites archéologiques souvent très abîmés tant par le temps que par les fouilles elles-mêmes (intelligence du lieu, des circulations, des modes de vie) ou les sites de patrimoine industriel contenant des machines inanimées ou sans aucune machine restante (restitution de la dynamique des machines, des processus et des flux matériels, de l'ergonomie, de l'ensemble usinier à différentes époques…).

Le processus de co-développement interdisciplinaire du « KLM for Heritage » se modélise selon la figure suivante. On retrouve le modèle tridimensionnel développé par le DHRM pour caractériser l'objet patrimonial par le triplet espace/temps/sémantique. Ce modèle se déplace dans un espace vectoriel plus large défini par le triplet public/temps/technologie issu du processus de co-conception des « 3C ».
D'un point de vue scientifique, l'outil de médiation multimodal est donc défini par une méthodologie évoluant dans un espace vectoriel à 6 dimensions : c'est le modèle heuristique.

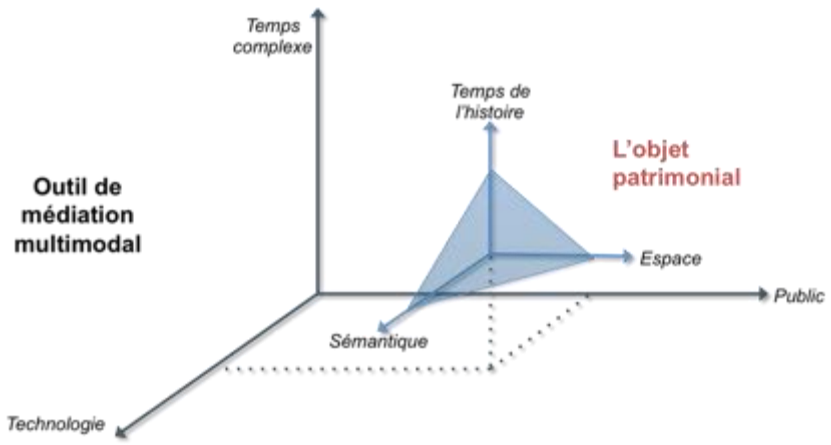


Figure 126 - *L'outil de médiation multimodal décrit dans son espace vectoriel complexe (Laroche & Kerouanton, 2016)*

Dans le cadre du projet ANR RéSeed, nous œuvrons pour concrétiser ce modèle multimodal en prenant notamment comme point de départ le nuage de points. L'objectif est de proposer un nouvel outil interopérable pour mettre à disposition des informations 3D segmentées sémantiquement. Le Reverse-Engineering contextualisé (par exemple la méthodologie Ki4D) permet d'avoir une référence visuelle (géométrique) d'un site à un moment donné afin d'envisager des actions de restauration possibles. C'est un nouvel outil de suivi et de conservation du patrimoine matériel. Dans le cas du patrimoine technique et industriel, il ajoute la dimension dynamique et fonctionnelle de l'étude effectuée. C'est une plateforme commune de travail entre diverses communautés de professionnels.

Il s'agit de mettre en place un PLM patrimonial comme outil de gestion de configuration des données historiques.

Si les restitutions virtuelles d'objets, de machines ou de processus technologiques sont effectuées dans le respect des normalisations et des bonnes pratiques définies dans la partie précédente de la *Déontologie de la 3D patrimoniale* : vers un standard, alors l'outil de médiation multimodal deviendra « valeur ajoutée à l'objet réel » pour diffuser cette connaissance aux chercheurs, aux professionnels du patrimoine, aux entreprises et aux enseignants.

La création d'un nouvel outil numérique dédié au patrimoine – associé à son format approprié – deviendra un outil d'expertise pour répondre au paradigme patrimonial des fonctionnalités attendues : capitalisation, modélisation, protection, restauration, valorisation. A terme on peut ambitionner un Catia +++ de chez Dassault System (mais OpenSource) à destination des historiens.

Pour autant, il n'est pas question d'écarter la possibilité d'approfondir et de rendre plus opérationnelle la notion de produit d'animation et de valorisation du patrimoine de haute qualité à destination des institutions patrimoniales et muséographiques ouvertes au grand public. Il s'agit là d'une garantie apportée directement par les instances universitaires sur le caractère scientifique de ces restitutions, en les distinguant nettement du travail des simples bureaux d'études en communication ou de « design digital » qui tendent à accaparer un marché prometteur, mais le plus souvent sans grande compétence historique, archéologique ou patrimoniale et sans aucun cadre déontologique précis.

La question de recherche consiste désormais à savoir qui va porter cet outil ? Qui va exercer ce métier ?

Innovation grâce au patrimoine et impact sur le métier de l'Ingénieur

La création d'un espace de rencontre interdisciplinaire va enrichir les approches de type PLM utilisées dans l'industrie. Il s'agit d'aller au-delà des structurations standard des modèles 3D en faisant de l'hybridation des connaissances. Réaliser de la gestion de configuration des objets digitalisés en 3D grâce à un indexage sémantique du modèle 3D est un champ d'investigation nouveau pour le monde industriel (objectif de RéSeed). Ainsi les recherches scientifiques menées grâce à l'étude des objets patrimoniaux vont permettre de faire évoluer les modes de pensées et les modèles de données (Laroche, Bernard, & Hervy, 2015).
A terme le projet RéSeed ambitionne de renouveler les approches classiques de l'ingénierie. Trop souvent les entreprises réinventent la "roue" ! Le passé n'est pourtant pas si lointain et est porteur de tant de richesses : pourquoi passer du temps à refaire ce qui a déjà été fait au lieu de concentrer ses efforts sur la construction de l'avenir de l'humanité ? Des liens forts apparaissent entre le thème du patrimoine technique et celui de la créativité à partir du moment où l'outil numérique devient une aide à la conception (Cliquet, 2010).

D'une part il s'agit du même outil de conception mais appliqué simplement… avec un renversement de l'axe des temps. Il y a donc une continuité de méthodes et une possibilité de communication passé – présent – futur (Gasnier & Lamard, 2007). C'est ce même processus qui définit le cheminement de la veille concurrentielle industrielle : il s'agit de montrer les évolutions technologiques entre les objets. La vision historique d'une technologie va permettre d'enrichir le contexte passé de l'usage, modéliser son environnement, les objets internes…

L'apport de la vision patrimoniale va permettre de recentrer le modèle sur l'évènement et non sur l'objet afin d'en percevoir toutes les subtilités des liens et des interactions.

D'autre part, le traitement numérique du patrimoine apparaît comme une action de capitalisation des connaissances pouvant induire une démarche de créativité. Réinjecter le savoir-faire ancien dans les bureaux d'étude de l'industrie contemporaine peut permettre d'innover ou simplement d'éviter les erreurs en apprenant des meilleurs pratiques (Lutters, van Houten, Bernard, Mermoz, & Schutte, 2014). Le projet patrimonial participe à la création d'une culture de connaissance des objets du passé apte à aider, à concevoir leur usage présent comme leur devenir, tant dans la conception que dans la production ou la mise sur le marché. Les théories de l'innovation en conception peuvent contribuer à enrichir la méthodologie du modèle heuristique du « KLM for Heritage ». C'est déjà le cas des théories C-K[183] et TRIZ[184] basées sur des SIC qui pourraient se coupler à des outils comme HARUSPEX pour assurer la fouille de données, l'extraction de règles d'association…

Intégrer le patrimoine digital dans les processus industriels contemporains, entre autres dans les modèles produits et les SI des entreprises, augmentera la capacité d'innovation des produits/service.

Le patrimoine devient alors un outil d'aide à la décision pour améliorer les performances industrielles : le « KLM for X ».

Précurseurs dans le domaine, on citera les quelques entreprises qui ont déjà fait le pari d'utiliser le patrimoine à des fins industrielles. Que ce soient des services, des associations ou des personnes ressources, et ici il n'est pas question d'un collectif d'anciens nostalgiques des siècles passés, on peut citer DCNS, Michelin, la fondation EDF (Welty, 2015), la maison Chanel (Coquery, 2015) ou encore la NASA (Melendez, 2016). Ce pari est osé car le ROI[185] est difficilement calculable : il faut capitaliser une grande masse de connaissances pour qu'un seul cogniton ne soit utile demain !

A moyen terme, il s'agit d'introduire dans notre réalité économique un nouveau métier qui trouvera pleinement sa place dans les entreprises et contribuera à se réapproprier le savoir-faire ancien pour bâtir le futur.

Le « KLM for Heritage » permet d'ambitionner la création d'une formation dédiée, d'une école consacrée à un nouveau métier dans les écoles d'ingénieurs : l'ingénieur-historien.

[183] La théorie C-K (Concept-Knowledge) propose un cadre de formalisation pour l'innovation en conception (Hatchuel & Weil, 2002)
[184] TRIZ = Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch ou Théorie de résolution des problèmes inventifs est une méthode algorithmique élaborée par le russe Genrich Altschuller pour la résolution de problèmes techniques à partir de l'évolution des systèmes.
[185] ROI = Return Of Investment ou Retour sur Investissement

Entre historien et reverse-engineer : un métier transdisciplinaire

La dialectique patrimoine et numérique ouvre sur la problématique de la diffusion des connaissances relatives au patrimoine dans notre société des savoirs. L'outil de médiation multimodal décrit ci-avant nous conduit à envisager une interface Homme/Homme où la classe Homme prend des typologies multiples : experts, historiens, conservateurs de musée, visiteurs, public, utilisateurs… Quel que soit l'outil de médiation, des caractéristiques communes sont à relever : la versatilité des moyens, le temps de consultation et de chargement, les modes d'accès aux données, la facilité d'accès en fonction des usages, …
De façon générale, la plupart des utilisateurs souhaitent accéder à toutes les connaissances sans se soucier des autorisations ou restrictions d'accès. Se pose alors la problématique juridique des données numériques inhérente aux droits d'auteur et aux possibilités d'utilisation du contenu. Au regard de la loi pour une République numérique d'octobre 2016, cette légitimité des données ne pose guère de questions dans un cadre de recherche scientifique ou au sein des institutions patrimoniales. En revanche, à distance, la problématique du numérique renvoie aux questions de l'authenticité : où est le vrai objet ? Est-ce un artefact ? Une copie ?

Bernard Werber a démontré que « 1+1=3 » alors pourquoi les données virtuelles ne pourraient-elles pas enrichir le réel ? Nos travaux sur le « KLM for Heritage » s'inscrivent dans cette volonté déontologique d'augmentation des objets par leur double numérique.

Un métier doit évoluer : celui de l'historien. Au début de ce chapitre on rappelait qu'Emmanuel Le Roy Ladurie a déclaré en 1968 que « L'historien de demain sera programmeur ou ne sera plus ». Aujourd'hui les avis sont partagés pour définir les humanités numériques : discipline et technique doivent pourtant aller de pair, sans asservissement ni de l'un ni de l'autre, ni pour l'un ni pour l'autre. Il y a eu l'avènement de la 3D, des bases de données, du web sémantique, de la Dataviz, du TALN, du RE, de la RV, de la RA... La récente naissance des humanités numériques n'est ni vraiment reconnue par la communauté des historiens, ni par celles de l'informatique, de la cybernétique, de la mécanique… les humanités numériques se présentent comme un nouveau champ disciplinaire.

Avec l'intensification de la numérisation et la croissance du rayonnement des données patrimoniales, nous vivons désormais dans un contexte d'injonction du numérique. La recherche au sein du secteur patrimoine par le biais du numérique peut prendre deux orientations :

- Pour le secteur muséal, il s'agit de mettre en place une présentation ou une représentation d'un objet, avec la mise en public pour permettre l'appropriation des données patrimoniales,
- Pour le chercheur et les industriels-innovants, il s'agit d'analyser les pratiques et les usages.

Il convient alors de s'interroger sur ces nouvelles compétences requises pour utiliser un patrimoine numérique. Pour répondre à cet enjeu, des formations spécifiques sont à élaborer. Une double compétence est requise pour établir des collaborations, fondées sur le dialogue, entre industriels et acteurs du patrimoine, qui doivent partager un vocabulaire. Dès lors, il est en effet urgent d'engager de nouvelles formations universitaires et professionnelles interdisciplinaires.

L'idée d'une utilisation des outils numériques pour l'histoire des techniques a été initiée en 1999 par Michel Cotte alors en charge de la formation humaine à l'UTBM (Laroche, Kerouanton, & Servières, 2011). Comme le rappelle la CTI, « posséder une solide culture scientifique, assurer la pérennité des entreprises et se préoccuper des hommes… » (CTI, 2009) sont autant de valeurs requises pour un ingénieur mais très peu développées dans nos écoles. Allier Sciences de l'Ingénieur et Sciences Humaines n'est jamais simple car chacun possède ses propres référentiels. Pour preuve, la rédaction de ce manuscrit qui fut… complexe car chacun utilise son propre vocabulaire dans son champ d'expertise. Et pourtant, l'objectif est commun ! « Mieux comprendre notre monde, anticiper les évolutions socio-économico-techniques pour le bien-être collectif » (CTI, 2009) peut aussi s'entendre dans une logique d'anticipation par un regard des techniques du passé dans une vision du futur. C'est donc une nouvelle formation qu'il faut créer dans l'enseignement supérieur avec un profil hybride d'ingénieur-historien ou archéologue-industriel.
Afin d'initier cette formation interdisciplinaire, en accord avec la Direction de la Formation de l'Ecole Centrale de Nantes, j'ai ouvert, depuis septembre 2017, un nouveau module destiné aux étudiants BAC+5 intitulé « Ingénierie et Numérique pour le Patrimoine, l'Art et la Culture ». Il s'agit de 136h de modules expérimentaux dédiés pour définir le nouveau métier de « l'ingénieur là où on ne l'attend pas ».

Des écoles d'ingénieurs-historiens pour l'avenir du « KLM for Heritage » ?

3. Bibliographie générale et personnelle

3.1 Références bibliographiques du manuscrit

Abramovici, M. (2007). Future Trends in Product Lifecycle Management (PLM). *The Future of Product Development, chapter*, pp. 665-674.

Ackoff, R. (1989). From Data to Wisdom. *Journal of Applies Systems Analysis, 16*, pp.3-9.

AFIS. (2009). *Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système.* Association Frnçaise d'Ingénierie Système.

AFM. (2015). *Enjeux industriels et sociétaux - Recherche, Innovation, Formation.* Association Française de Mécanique. Livre Blanc de la recherche en mécanique, EDP Sciences.

Alavi, M., & Leidner, D. (1999). Knowledge management systems: issues, challenges, and benefits. *Communication of AIS, Vol.1(7)*, pp.21–41.

Ammar-Khodja, S. (2007). *Processus d'aide à la spécification et à la vérification d'application d'ingénierie à base de connaissances expertes.* Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

Andreacola, F., Sanjuan, E., & Poli, M.-S. (2015). Méthodologie d'analyse de la participation informatique de l'usager d'un musée. *Canadian Journal of Information and Library Science, University of Toronto Press, Vol.39*, pp. 329-349.

Anwer, N., & Mathieu, L. (2016). From reverse engineering to shape engineering in mechanical design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, Vol.65*, pp. 165-168.

Aparicio Resco, P., & Figueiredo, C. (2014). Scale of historical evidence. *Arquelogia y patrimonio virtual.*

Aries, S. (2010). Méthode MASK. http://aries.serge.free.fr/doc/Gc/Index_GC.htm.

Bachimont, B. (2007). *Ingénierie des connaissances et des contenus : le numérique entre ontologies et documents.* Hermes Science Publications, ISBN: 978-2746213692.

Bachimont, B., & Crozat, S. (2004). Réinterroger les structures documentaires : de la numérisation à l'informatisation. *Information-Interaction-Intelligence, Vol. 4, no1*, pp. 59–74.

Bacon, F. (1597). *Meditationes sacrae.*

Baldissini, S., Manferdini, A., & Masci, M. (2009). An information system for the integration, management and visualization of 3D reality based archaeological models from different operators. *3rd ISPRS International Workshop 3D-ARCH.*

Ballot, E., & Montreuil, B. (2014). *L'Internet Physique: Le réseau des réseaux des prestations logistiques.* Predit. La Documentation Française, ISBN 978-2-11-009513-8.

Banos, A. (2013). Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et en SHS. *Habilitation à diriger des recherches, Université de Paris 1 - Panthéon-Sorbonne*, pp. 1-108.

Basso, K., Margolin, A. A., Stolovitzky, G., Klein, U., Dalla-Favera, R., & Califano, A. (2005). Reverse engineering of regulatory networks in human B cells. *Nature genetics, Vol.37(4)*, pp. 382-390.

Beaufort, T. (2007). *40 exercices ludiques pour la formation.* Ed. ESF.

Belkadi, F., Troussier, N., Messaadia, M., Eynard, B., & Bonjour, E. (2010). Collaboration based on Product Lifecycles integration for Extended Enterprise. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), Vol. 4, N° 3*, pp.169-179.

Ben Amor, B. (2006). Contributions à la reconstruction, la reconnaissance et l'authentification faciale 3D. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon*, pp. 1-150.

Benaben, F., Boissel-Dallier, N., Lorré, J., & Pinguaud, H. (2010). Semantic Reconciliation in Interoperability Management through Model-Driven Approach. *Collaborative networks for a sustainable world*, pp. 756-764.

Benaben, F., Mu, W., Boissel-Dallier, N., Barthe-Delanoe, A.-M., Zribi, S., & Pingaud, H. (2015). Supporting interoperability of collaborative networks through engineering of a service-based Mediation Information System (MISE 2.0). *Journal Enterprise Information Systems, Taylor & Francis, Volume 9, Issue 5-6*, 556-582, DOI : 10.1080/17517575.2014.928949.

Berger, A. (1990). *Ergonomie cognitive de l'interface homme-machine d'un système pédagogique à base de connaissances à finalité industrielle.* Paris: Thèse de doctorat, Paris 6.

Berger, A. (2015). Évolution dans l'industrie du métier d'ingénieur cogniticien ou d'ingénieur de la connaissance entre 1985 et 2015: Plate-forme Intelligence Artificielle. *conférence sur les Application Pratiques de l'Intelligence Artificielle*, (pp. 1-11). Rennes.

Berger, A., & Cotton, J.-P. (2016). Les outils et méthode de KM exploités au profit d'applications informatiques : un pas vers la fertilisation croisée informations & connaissances ? *AIM*, (pp. 1-23).

Berio, G., & Harzal, M. (2007, February). Towards an integrating architecture for competence management. *Computers in Industry, Volume 58, Issue 2*, pp.199–209, doi:10.1016/j.compind.2006.09.007.

Bernard, A. (2017). Entreprises et usines du futur. *Ouvrage collectif sous la direction de Claire Martz "Les Big Data à l'échelle de l'individu et de la société"*, pp. 284-285.

Bernard, A., & Tichkiewitch, S. (2008). *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management.* Springer, ISBN: 978-3-540-78430-2.

Bernard, A., Ammar-Khodja, S., Laroche, F., & Perry, N. (2007). Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems. *Vol. 56/1*, pp. 143-148, DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.035, ISSN 0007-8506.

Bernard, A., Laroche, F., & Cunha, C. D. (2009). Models and methods for knowledge formalisation in a PLM context . *keynote paper, 3rd International Congress design and Modelling of Mechanical Systems (CMCS).* Hammamet, Tunisie.

Bernard, A., Laroche, F., & Hervy, B. (2015). Le document comme outil de préservation. *Documentation technique et techniques de documentation*, pp. 46-55, ISBN: 978-2-9553458-0-1.

Bernardi, W. (2001). La controverse sur l'électricité animale dans l'Italie du XVIIIe siècle : Galvani, Volta et... d'autres. *Revue d'histoire des sciences, Volume 54 Numéro 1, "L'électricité dans ses premières grandeurs (1760-1820)"*, pp. 53-70.

Berners-Lee, T. (2001). The semantic web. *Scientific American, Vol.284(5)*, pp. 28–37.

Besson, V., & Berger, A. (2015). To initiate a corporate memory with a knowledge compendium: ten years of learning from experience with the ardans method. *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, Extraction et Gestion des Connaissances, RNTI-E-28*, pp.401–412.

Bézier, P. (1987). *Courbes et surfaces.* Paris: Editions Hermès.

Billen, R., Blain, P., Donneau, O., Habraken, S., Renotte, Y., & Van Ruymbeke, M. (2009). Virtual model of the city of Liège in the eighteen century - " Virtual Leodium". *International 3D Stereo Film and Technology Festival.* Liège: Verly, J., éditeur.

Billen, R., Carré, C., Delfosse, V., Hervy, B., Laroche, F., Lefevre, D., . . . Ruymbeke, M. V. (2012). 3D historical models: the case studies of Liege and Nantes. *European COST action TU801, Semantic Enrichment of 3D city models for sustainable urban development*, (pp. 1-9). Espagne.

Blanchard, J., Pinaud, B., kuntz, P., & Guillet, F. (2007). A 2D-3D visualization support for human-centered rule-mining. *Computer and Graphics, Vol.31(3)*, pp. 350-360.

Blanco, E. (1998). *L'émergence du produit dans la conception distribuée - Vers de nouveaux modes de rationalisation dans la conception de systèmes mécaniques.* Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble.

Boer, C., & Dulio, S. (2007). Mass Customization and Footwear: Myth, Salvation or Reality? Springer.

Bruneau, M. (2015). Une méthodologie de Reverse Engineering à partir de données hétérogènes pour les pièces et assemblages mécaniques. *thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne*, pp. 1-214.

Bruneau, M., Durupt, A., Vallet, L., Roucoules, L., & Pernot, J.-P. (2016). A three-level signature by graph for Reverse Engineering of mechanical assemblies. *Tools and Methods for Competitive Engineering*, *Vol.16*, pp. 669-681. Aix-en-Provence.

Bruneliere, H., Cabot, J., Dupé, G., & Madiot, F. (2014). Modisco: A model driven reverse engineering framework. *Information and Software Technology, Vol.56(8)*, pp. 1012-1032.

Buron, G., Simonnin, M., & Laroche, F. (2005). Un objet industriel patrimonial voué à disparaître sauvé par le numérique : exemple de la machine à laver le sel de Batz-sur-Mer. *3ème journée d'étude IHT, Nantes.*

Buron, G., Simonnin, M., & Laroche, F. (2009). La question de la reconstitution de la laverie de sel de Batz-sur-Mer,. *journée d'étude OSTIC, Château des Ducs de Bretagne.* Nantes.

Camacho, V. (2004). *L'Odyssée de la 3D.* thèse de doctorat, Université Paris 8.

Candlot, A. (2006). Principes d'assistance à la maitrise d'ouvrage pour la modélisation et l'intégration d'expertise. *Thèse de doctorat - École Centrale de Nantes et Université de Nantes*, pp. 1-246.

Caussanel, J., & Chouraqui, E. (1999). Information et Connaissances : quelles implications pour les projets de Capitalisation des Connaissances. *Revue Document numérique - Gestion des documents et Gestion des connaissances, vol. 3-4*, pp. pp. 101-119.

Chambolle, F. (1999). Un modèle produit piloté par les processus d'élaboration : application au secteur automobile dans l'environnement STEP. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.* Paris.

Chamseddine, Z. (2011). Modélisation spatio-temporelle multi-échelle des données dans un SIG urbain. *Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes*, pp. 1-164.

Chandrakar, A., Zhang, Y., Laroche, F., & Bernard, A. (2017). Development of an Integrated Method for Reassembly Fragmented. *15ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-6). La Plagne: www.aip-primeca.net.

Chandrakar, A., Zhang, Y., Laroche, F., & Bernard, A. (2017). Physical Assembly Sequence Optimization for Developing an Integrated 3D Reconstruction Method. *Journal Virtual and Physical Prototyping, Taylor & Francis*, pp. 1-18.

Chandrasegaran, S. K., Ramani, K., Sriram, R. D., HorváTh, I., Bernard, A., Harik, R. F., & Gao, W. (2013). The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. *Computer-aided design, Vol.45(2)*, pp. 204-228.

Chaperon, T., Droulez, J., & G., T. (2001). Extracting cylinders in full 3D data using a random sampling method and the Gaussian image Reliable camera. *Vision, Modeling and Visualization.* Stuttgart: T.Ertl, B. Girod, G.Greiner, H. Niemann, and H.-P. Seidel, editors.

Chavalarias, D. (2016). Reconstruction et modélisation des dynamiques sociales et de l'évolution culturelle. *Habilitation à diriger des recherches, EHESS-Paris*, pp. 1-99.

Chevrier, C., Jacquot, K., & Perrin, J.-P. (2010). 3D modelling of a town scale model. *EuroMed Conference.* Limassol, Cyprus.

Chevrier, C., Jacquot, K., & Perrin, J.-P. (2011). Modelling specificities of a physical town scale model. *2nd International Conference on Digital Media and its Applications in Culture Heritage.* Amman, Jordany: DMACH.

Chikofsky, E. J., & Cross, J. H. (1990). Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. *IEEE software, Vol.7(1)*, pp. 13-17.

Christophe, F. (2012). Semantics and Knowledge Engineering for Requirements and Synthesis in Conceptual Design : Towards the Automation of Requirements Clarification and the Synthesis of Conceptual Design Solutions. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes ; Aalto University.*

Christophe, F., Bernard, A., & Coatanea, E. (2010). Rfbs : A model for knowledge representation of conceptual design. *CIRP Annals- Manufacturing Technology, Vol.59(1)*, pp.155–158.

Cliquet, G. (2010). Méthode d'innovation à l'ère du Web 2.0. *Thèse de doctorat, Arts-et-Métiers Paris Tech*, pp. 1-155.

Coppens, C., Laroque-Malbert, J., Berger, A., Mariot, P., & Cotton, J. (2006). La capitalisation des connaissances dans l'industrie : implanter un référentiel métier et le déployer : l'exemple d'Icare. *SdC 2006.*

Coquery, E. (2015). La Maison CHANEL et son patrimoine, une valorisation culturelle. *séminaire de recherche "Patrimoine contemporain: Science, Technique, Culture & Société", Musée des arts et métiers.* Paris.

Corbel, J. (1997). Méthodologie et retour d'expérience : démarche MEREX de Renault. *Hermès*.

Cotte, M. (2010). La génétique technique a t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des techniques ? *journées d'études de la SFHST* (pp. 187–201). Lille: Rey, A.-L., éditeur Méthode et Histoire.

Cotte, M., & Deniaud, S. (2005). CAO et patrimoine : perspectives innovantes. *revue Archéologie industrielle en France, n°46*, pp. 32-38.

Cotte, M., Laroche, F., & Bernard, A. (2008). Les outils de réalité virtuelle sont-ils applicables au patrimoine technique et industriel ? *Revue Historiens et géographes, n°401*, pp. 245-255.

Crofts, N., Dionissiadou, I., Doerr, M., & Stiff, M. (1999). *Définition du Modèle Conceptuel de Référence du CIDOC (CRM).* Rapport technique.

CTI. (2009). Commission des Titres d'Ingénieur, Références et Orientations, 6ème édition. pp. 1-46.

Daaboul, J. (2011). Modélisation et simulation de réseau de valeur pour l'aide à la décision stratégique du passage de la production de masse à la customisation de masse. *Thèse de doctorat de l'École Centrale de Nantes*, (pp. 1-143). Nantes.

Daaboul, J., Bernard, A., & Laroche, F. (2009). L'influence de la Personnalisation du Produit sur la Performance de L'Entreprise Etendue. *Journées des GDR du CNRS, groupe MACS.* Polytech'Savoie, Annecy.

Daaboul, J., Bernard, A., & Laroche, F. (2009). Nouveau Business Model et Nouvelles Stratégies Industrielles pour la Production Personnalisée. *2ème journée du pole GSO interop-VLab « l'interopérabilité des applications d'entreprise ».* Tarbes.

Daaboul, J., Bernard, A., & Laroche, F. (2010). Knowledge Management for Mass Customization. *20th International CIRP Design conference.* Nantes.

Daaboul, J., Bernard, A., & Laroche, F. (2010). PLM Requirements for Mass Customization. *7th International Conference on Product Lifecycle Management.* Bremem, Allemagne.

Daaboul, J., Xu, Y., Vergara, V., Duigou, J. L., Chevallereau, B., Rauffet, P., . . . Bernard, A. (2009). Amélioration de la performance industrielle par l'ingénierie numérique. *11ème colloque national AIP Primeca*, (pp. 1-12). La Plagne.

Dalton, G. (1998). Reverse engineering using laser metrology. *Sensor Review, Vol.18(2)*, pp. 92-96.

Dangelmaier, M., & Blach, R. (2016). Odor in Immersive Environments. *Springer Handbook of Odor, Andrea Buettner*, pp. 1043-1065, e-ISBN 978-3-319-26932-0.

Daumas, M. (1962-1979). *Histoire générale des techniques, 5 vol.* Paris: PUF.

Davallon, J. (2000). Le patrimoine : "une filiation inversée" ? *Espaces Temps, Vol.74(1)*, pp. 6-16.

Davallon, J. (2002). Comment se fabrique le patrimoine ? *Sciences humaines. Hors série, Vol. 36*, pp.74–77.

Davenport, T. H., & Prusak, L. (1998). Working knowledge : How organizations manage what they know. *Harvard Business Press*.

Davis, S. (1987). *Future Perfect.* (R. M. Addision-Wesley, Éd.)

De Luca, L. (2006). Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural : Définition d'une approche hybride de reconstruction d'édifice. *Thèse de l'école doctorale Arts et Métiers ParisTech*, pp. 1-207.

De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., Renaudin, N., Florenzano, M., & Véron, P. (2010). An Iconography-Based Modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage. *Shape Modeling International Conference.* Aix-en-Provence.

De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., Veron, P., & Florenzano, M. (2010). NUBES : describing, analysing, documenting and sharing digital representations of heritage buildings. *FOCUS K3D Conference on *Semantic 3D Media and Content*.* Sophia Antipolis.

De Luca, L., Busayarat, C., Stefani, C., Véron, P., & Florenzano, M. (2011). A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage. *Computers & Graphics, Vol.35(2)*, pp. 227–241.

De Luca, L., Véron, P., & Florenzano, M. (2005). Rétro-conception d'objets architecturaux basée sur une méthodologie de reconstruction hybride. *9ème Colloque National AIP PRIMECA*, (pp. 1-9).

De Luca, L., Véron, P., & Florenzano, M. (2006). Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. *Computers & Graphics, Vol.30*, pp. 160–176.

Debaecker, D. (2004). *PLM la gestion collaborative du cycle de vie des produits : Product Life-Cycle Management.* Paris: Hermès - Lavoisier.

Degrigny, C., Jeanneret, R., Köhler, G., Laroche, F., & Baudin, C. (2017). SCHEMATEC : une méthodologie utilisant des outils basés sur le virtuel et une base de données au service de la conservation-restauration des objets scientifiques et techniques patrimoniaux. *6ème congrès de la SFHST.* Strasbourg.

Degrigny, C., Jeanneret, R., Rapp, G., & Gelbert-Miermon, A. (2015). Le projet OBS ou une approche pluridisciplinaire intégrée pour l'étude et la conservation de la collection d'objets de l'Observatoire chronométrique de Neuchâtel, Suisse. *congrès TICCIH.* Lille.

Delest, S., Boné, R., & Cardot, H. (2007). Etat de l'art de la segmentation de maillage 3D par patchs surfaciques. *GTMG'07: Groupe de Travail en Modélisation Géométrique*, pp. 171-185.

Demoly, F. (2010). Conception intégrée et gestion d'informations techniques : application à l'ingénierie du produit et de sa séquence d'assemblage. *Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard*.

Desvallées, A., & Mairesse, F. (2010). Key Concepts of Museology. pp. 1-90.

Deuschel, T., Heuss, T., Humm, B., & Fröhlich, T. (2014). Finding without Searching - A Serendipity-based Approach for Digital Cultural Heritage. *Digital Intelligence.* Nantes.

Dhuieb, M. (2016). Structuration multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise - Vers un assistant ubiquitaire pour l'usine du futur. *Thèse de doctorat, École centrale de nantes*, (pp. 1-136). Nantes.

Dhuieb, M., Belkadi, F., Laroche, F., & Bernard, A. (2014). Interoperability framework for supporting information-based assistance in the factory. *11th International Conference on Product Lifecycle Managment.* Yokohama.

Dhuieb, M., Belkadi, F., Laroche, F., & Bernard, A. (2014). Thinking factory for the future: from PLM to augmented reality. *conference EuroVR.* Bremen, Allemagne, ISBN : 978 3 905674 76 7, DOI : 10.2312/eurovr.20141340.

Dhuieb, M., Belkadi, F., Laroche, F., & Bernard, A. (2015). Conceptual framework for enhancing knowledge reuse in PLM environment with the concept of Digital Factory Assistant. *International Journal of Product Lifecycle Management, vol. 8, n°4*, pp. 330-347, DOI <10.1504/IJPLM.2015.075929>.

Dhuieb, M., Laroche, F., & Bernard, A. (2013). Digital Factory Assistant: Conceptual Framework and Research Propositions. *International Conference on Product Lifecycle Management, volume 409, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pp. 500–509.

Dhuieb, M., Laroche, F., & Bernard, A. (2013). Multi-scale structuring of enterprise's knowledge: Towards an ubiquitous virtual assistant. *9th International Conference on Integrated Design and Production, CPI'13*, (pp. ISBN : 978-9931-9117-0-8). Tlemcen, Algérie.

Dhuieb, M., Laroche, F., & Bernard, A. (2013). Toward a cognitive based approach for knowledge structuring. *4th International Conference on Cognitive Infocommunications.* Budapest: IEEE.

Dhuieb, M., Laroche, F., & Bernard, A. (2013). Un compagnon virtuel d'aide à la décision : une structuration d'informations multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise. *22ème congrès de l'AFM.* Bordeaux.

Dhuieb, M., Laroche, F., & Bernard, A. (2015). Context-awareness: a key enabler for ubiquitous access to manufacturing knowledge. *48th CIRP Conference on manufacturing systems - CIRP CMS.* Ischia, Italy.

Dhuieb, M., Laroche, F., Belkadi, F., & Bernard, A. (2013). Vers un système ubiquitaire d'aide à la décision in-vivo dédié au Manufacturing. *conférence SCIGRAD 2013, Systèmes Complexes d'Information et de Gestion des Risques pour l'Aide à la Décision.* Brest.

Doerr, M. (2003). The CIDOC conceptual reference module: an ontological approach to semantic interoperability of metadata. *AI Mag., Vol.24(3)*, pp. 75–92.

du Preez, N., Perry, N., Candlot, A., Bernard, A., Uys, W., & Louw, L. (2005). Customised high-value document generation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.54/1/2005*, pp. pp.123-126.

Dubé, P., & Courchesne, L. (2012). Un lieu qui parle : la modélisation architecturale 3D vers une quatrième dimension. *Hereditas Monasteriorum, Vol.1*, pp. 129-137.

Durupt, A. (2010). *Définition d'un processus de rétro-conception de produit par intégration des connaissances de son style de vie.* Thèse de doctorat, Université de Troyes.

Durupt, A., Remy, S., & Ducellier, G. (2010). Knowledge Based Reverse Engineering – An approach for Reverse Engineering of a Mechanical Part. *Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol.10*, pp. 1-4.

Durupt, A., Remy, S., Bricogne, M., & Troussier, N. (2013). PHENIX: product history-based reverse engineering. *International Journal of Product Lifecycle Management, Vol.6(3)*, pp. 270-287.

Dutta, D., & Wolowicz, J. P. (2005). An introduction to product lifecycle management. *12th ISPE International Conference on Concurrent Engineering : Research and Applications.* Worth/Dallas, USA.

Enguehard, C. (1993). Acquisition de terminologie à partir de gros corpus. *Informatique & Langue Naturelle*, pp. 373-384.

ENSSILAB. (2014). Etude et reprérages sur les interfaces documentaires innovantes. pp. 1-116.

Erdos, G., Nakano, T., Horvath, G., Nonaka, Y., & Vancza, J. (2015). Recognition of complex engineering objects from large-scale point clouds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.64*, pp. 165-168.

Ermine, J.-L., Chaillot, M., Bigeon, P., Charreton, B., & Malacieille, D. (1996). MKSM : Méthode pour la gestion des connaissances. *Ingénierie des systèmes d'information, Vol.4*, pp. 541-575.

Ermine, J.-L., Mouradi, M., & Brunel, S. (2012). Une chaîne de valeur de la connaissance. *Management international, HEC Montréal, Vol.16*, pp. 29-40.

Eynard, B. (2005). Gestion du cycle de vie des produits et dynamiques des connaissances industrielles en conception intégrée. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne*, pp. 1-113.

Eynard, B., & Caillaud, E. (2003). De l'échange de données techniques au PLM. *Revue internationale de CFAO et d'inforamtique graphique, vol. 18, n°4*, ISBN 2-7462-1172-9.

Fenves, S. J. (2001). *Core Product Model for Representing Design Information.* US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.

Fiorentini, X., Rachuri, S., Suh, H., Lee, J., & Sriram, R. (2008). An Evaluation of Description Logic for the Development of Product Models. *US National Institute of Standards and Technology Interagency Report, Vol.7481*, pp. 1-31.

Fleury, P. (1997). La Rome antique sur l'internet. *Informatics and statistics review for human sciences*.

Flynn, P. (1990). *CAD based computer vision: modelling and recognition strategies.* Thèse de doctorat, Michigan State University, USA.

Foufou, S., Fenves, S. J., Bock, C., Rachuri, S., & Sriram, R. D. (2005). A Core Product Model for PLM with an illustrative XML implementation. *International Conference on Product Lifecycle Management.*

Fuchs, P., & Moreau, G. (2004). Traité de Réalité Virtuelle. *Les presses de l'école des Mines de Paris*, pp. 1-548.

Gardan, Y. (2007). CAO : modélisation géométrique. *H 3 750-1*, pp.1-24.

Gardoni, M. (1999). *Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en Ingénierie Intégrée : Cas d'étude Aérospatiale.* thèse de doctorat, Université de Metz.

Garlatti, S., & Prié, Y. (2004). Adaptation et personnalisation dans le Web sémantique. *Interaction, Intelligence, Information, Hors série*.

Garric, N., & Longhi, J. (2012). L'analyse de corpus face à l'hétérogénéité des données : d'une difficulté méthodologique à une nécessité épistémologique. *Revue Langages, Vol.3 n°187, Éditeur : Armand Colin*, pp. 3-11.

Gasnier, M. (2007). *Le patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique.* Belfort: Collection Histoire, Mémoire, Patrimoine, UTBM.

Gasnier, M., & Lamard, P. (2007). Le patrimoine industriel comme vecteur de reconquête économique. *Actes du colloque de Belfort, Laboratoire RECITS*, 199 p.

Genelot, D. (1992). *Manager dans la complexité.* INSEP Editions.

Gero, J.-S. (1990). Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. *Revue AI Magazine, volume 11, n°4*, pp. 26-36.

Gherasim, T. (2013). Détection de problèmes de qualité dans les ontologies construites automatiquement à partir de textes. *Thèse de doctorat, Université de Nantes*, (pp. 1-140). Nantes.

Gherasim, T., Harzallah, M., Kuntz, P., & Berio, G. (2011). Construction semi-automatique d'ontologies à partir de textes : application au projet ISTA3. Nantes: JIAE.

Ghouaiel, N., Cieutat, J.-M., Jessel, J.-P., & Garbaya, S. (2016). Mobile Augmented Reality in Museums : Towards Enhancing Visitor's Learning Experience". *International Journal of Virtual Reality*, pp. 1-11.

Gille, B. (1978). *Histoire des techniques.* Paris: La pléiade.

Girard, P. (2005). La conception : satisfaction des spécifications vs conduite des activités humaines. *17ème Congrès Français de Mécanique.* Troyes.

Gonçalves, M. (2010). Formalisation des transferts de spécifications projet dans le cycle de conception de produits manufacturés : application à un environnement de type Produit-Processus-Organisation. *thèse de doctrat, Université de Bordeaux 1*, pp. 1-76.

Grabot, B., & Caillaud, E. (1996). Imprecise Knowledge in Expert Systems: A Simple Shell. *Expert Systems with Applications, 10(1)*, pp.99-112.

Gruber, T. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*.

Grundstein, M. (1994). Développer un système à base de connaissances : un effort de coopération pour construire en commun un objet inconnu,. *Actes de la journée « Innovation pour le travail en groupe ».* Cercle pour les Projets Innovants en Informatique.

Grundstein, M. (2000). From capitalizing on company knowledge to knowledge management. *Knowledge Management, Classic and Contemporary Works by Daryl Morey, Mark Maybury, Bhavani Thuraisingham, chapter 12*, pp.261–287.

Grundstein, M. (2002). *Le Management des Connaissances dans l'Entreprise : Problématique, Axe de progrès, Orientations.* rapport - bilan de la société MG Conseil.

Grundstein, M. (2009). GAMETH®: a constructivist and learning approach to identify and locate crucial knowledge. *International Journal of Knowledge and Learning, Vol. 5*, pp. 289-305.

Guillet, B., Courtin, C., Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2015). Nantes 1900 - la maquette du port. *ouvrage collectif, Musée d'histoire de Nantes*, 89p., ISBN 978-2-906519-49-7.

Hallot, P., & Billen, R. (2016). Enhancing Spatio-Temporal Identity: States of Existence and Presence. *International Journal of Geo-Information*, pp. 1-22.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2002). La théorie C-K : Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. *Colloque Sciences de la conception*, (pp. 1-24). Lyon.

Heinich, N. (2009). *La fabrique du patrimoine.* Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme.

Hervy, B. (2014). Contribution à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine. *Thèse de doctorat de l'École Centrale de Nantes*, 204p.

Hervy, B., Billen, R., Laroche, F., Carré, C., Servieres, M., Ruymbeke, M. V., . . . Kerouanton, J.-L. (2012). A generalized approach for historical mock-up acquisition and date modelling: towards historically enriched 3D city models. *3U3D conference, utility of 3D city models* (pp. 02-09). EDP Sciences.

Hervy, B., Laroche, F., & Bernard, A. (2012). An information system for driving the future PLM for museum: the DHRM, digital heritage reference model. *11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis* (pp. 1-7). Nantes: ASME.

Hervy, B., Laroche, F., & Bernard, A. (2013). Coworking for knowledge management in cultural heritage: towards a PLM for museum. *10th International Conference on Product Lifecycle Management. Vol.409*, p. pp. 317. Nantes: IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer Berlin Heidelberg, DOI : 10.1007/978-3-642-41501-2.

Hervy, B., Laroche, F., & Bernard, A. (2017). Framework for historical knowledge management in museology. *Int. J. Product Lifecycle Management, vol. 10 (1)*, pp. 44-68.

Hervy, B., Laroche, F., Kerouanton, J.-L., & Bernard, A. (2012). Advanced virtual reality visualization systems based on a meta-model dedicated to historical knowledge. *3rd IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*, (pp. 225-230). Kosice, Slovakia, http://dx.doi.org/10.1109/CogInfoCom.2012.6421984.

Hervy, B., Laroche, F., Kerouanton, J.-L., & Bernard, A. (2014). Projet Nantes1900 : les nouvelles technologies au service de la capitalisation des connaissances et de la valorisation du patrimoine historique. *Heritage and Digital Hunamities. How should practices envolve ?*, pp.243-256.

Hervy, B., Laroche, F., Kerouanton, J.-L., Bernard, A., & Courtin, C. (2014). Augmented historical scale model for museums: from curation to multi-modal promotion. *Laval Virtual VRIC.* Laval.

Hervy, B., Laroche, F., Kerouanton, J.-L., Bernard, A., Courtin, C., D'Haene, L., . . . Waels, A. (2015). Museum augmented interface for historical scale models: towards a new way for cultural heritage promotion. *International Journal of Virtual Reality, Vol.15 (1), ISSN: 1081-1451*, pp.3-9.

Hervy, B., Laroche, F., Lam, B., Tourre, V., Servières, M., Kerouanton, J.-L., & Bernard, A. (2014). Historical Knowledge Management Through Virtual Reality: Theoretical Aspects and Experiment Proposal. *Digital Intelligence.* Nantes.

Hichri, N., Stefani, C., Luca, L. D., & Veron, P. (2013). Review of the “as-buit BIM” approaches. *3D-ARCH* (pp. 107-112). Trento, Italy: XL-5/W1.

Hourst, B., & Thiagararajan, S. (2008). *Modèles de jeux pour la formation.* Ed. d’organisation.

Houssin, R., Bernard, A., Martin, P., Ris, G., & Cherrier, F. (2006). Information system based on a working situation model for a new design approach in concurrent engineering. *Journal of engineering design, Taylor & Francis, Vol.17 (1)*, pp. 35-54.

Hsieh, Y.-A., & Smith, S. (2016). A dynamic marker-based augmented reality system using multi-point color tracking. *TMCE*, (pp. 1-6). Aix-en-Provence.

Hu, X., Pang, J., Pang, Y., Atwood, M., Sun, W., & Regli, W. C. (2000). A survey on design rationale: representation, capture and retrieval. *Conférence DETC ASME Design Engineering Technical Conferences.* Baltimore, Maryland.

Huber, D. (2011). The ASTM E57 File Format for 3D Imaging Data Exchange. *Electronics Imaging Science and Technology Conference (IS&T), 3D Imaging Metrology, 7864A*, 9 p.

IFFRA. (2013). *Factories of the future : Multi-annual roadmap for the contractual ppp under horizon 2020.* Technical Report, Manufuture Platform.

Inoue, M., Lindow, K., Stark, R., Tanaka, K., Nham, Y.-E., & Ishikawa, H. (2012). Decision-making support for sustainable product creation. *Advanced Engineering Informatics, 26*, pp. 782–792.

IRCCyN. (2015). Bilan AERES IRCCyN 2010-2015 et projet 2017-2021. 744 p.

Isaksen, L. (2011). Archaeology and the semantic web. *phD thesis, University of Southampton*, 260p.

Janowicz, K. (2009). The role of place for the spatial referencing of heritage data. *The Cultural Heritage of Historic European Cities and Public Participatory GIS Workshop.*

Joffres, A., Larousse, N., Pouyllau, S., Puren, M., Riondet, C., Romary, L., . . . Laroche, F. (2017). Digital 3D Objects in Art and Humanities: challenges of creation, interoperability and preservation. *Projet européen PARTHENOS, White paper, 26 co-auteurs*, pp. 52-58.

Kadj-Hamou, K., Aldanondo, M., & Caillaud, E. (2004). Configuration de produits et capitalisation de connaissances, Gestion dynamique des connaissances industrielles. *Traité IC2*, pp. 335-351, ISBN : 2-7462-0952-7.

Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 : Securing the Future of German Manufacturing Industry.* Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.

Kembellec, G., Saleh, I., & Sauvaget, C. (2009). OntologyNavigator: WEB 2.0 scalable ontology based CLIR portal to IT scientific corpus for researchers. *International Journal of Design Sciences and Technology, Vol.16(2)*, pp. 1-12.

Keraron, Y. (2007). Couplages entre le système documentaire et les systèmes technique et humain : les mutations numériques. *Thèse de l’Ecole Centrale de Nantes et de l’Université de Nantes*, 250p.

Keraron, Y., Bernard, A., & Bachimont, B. (2009). Annotations to improve the using and the updating of digital technical publications. *Research in Engineering Design, Vol. 20, N°3*, pp. 157-170.

Kerouanton, J.-L. (2002). Nantes : un modèle ? *Revue Archéologie industrielle en France, Vol.41*, pp.4-93.

Kerouanton, J.-L., & Laroche, F. (2010). History promotes technical culture thanks to pedagogical project: An inter-disciplinary team dedicated to virtual reality development, a case study with DCNS Indret. *3ème conférence internationale History of Science in Education and training in Europe.* Barcelone, Espagne.

Kerouanton, J.-L., & Laroche, F. (2010). Modélisation numérique et interprétation d’un paysage portuaire : les réseaux du port de Nantes au début du XXe siècle. *135ème Congrès national des sociétés historiques et scientifiques.* Neuchâtel.

Kerouanton, J.-L., Guillet, B., & Huron, L. (1999). La maquette du Port de Nantes. *Congrès national des Sociétés savantes "Des villes, des ports : la mer, les hommes"* (pp. 143-155). Paris: CTHS.

Kingston, J. (1998). Designing knowledge based systems: the CommonKADS design model. *Knowledge-Based Systems, Vol.11(5-6)*, pp. 311-319.

Kiritsis, D., Bufardi, A., & Xirouchakis, P. (2003). Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems. *dvanced Engineering Informatics, Vol.17(3)*, pp. 189–202.

Kolbe, T., Gröger, G., & Plümer, L. (2005). CityGML: Interoperable access to 3D city models. *Geo-information for disaster management*.

Kuhn, T. (1970). La structure des révolutions scientifiques. 284 p.

Kuntz, P., Lehn, R., Guillet, F., & Pinaud, B. (2006). Découverte interactive de règles d'association via une interface visuelle. *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, Vol.7*, pp. 113-126.

Labrousse, M. (2004). Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes*, 161p.

Labrousse, M., Bernard, A., & Véron, P. (2004). Generic FBS concept for Process/Product/Resource integration. *Tools and Methods of Competitive Engineering, Vol.1*, pp. 383-394.

Lamouri, S. (2006). Synchronisation des prises de décisions dans une chaîne logistique : robustesse et stabilité. *Habilitation à diriger des recherches, Ecole Doctorale d'Informatique et Electronique de Paris.* Paris.

Landherr, M., Schneider, U., & Bauernhansl, T. (2016). The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven manufacturing, research and development. *49th CIRP Conference on Manufacturing Systems* (pp. 26-31). Elsevier.

Laroche, F. (2007). Contribution à la sauvegarde des objets techniques anciens par l'archéologie industrielle avancée. Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel. *Thèse de doctorat Ecole centrale de Nantes*, 450p.

Laroche, F. (2007). Etat des lieux de la thèse : Contribution à l'amélioration des modèles de situation dynamique d'usage. Application à la muséographie numérique du patrimoine technique et industriel . *Journées des GDR du CNRS, groupe MACS, GT IS3C.* EIGSI, La Rochelle.

Laroche, F. (2007). Les outils du virtuel : la mécanisation du lavage du sel à Batz-sur-Mer au XXème siècle. *Revue Archéologie Industrielle en France, édité par le CILAC, n°51*, pp. 46-51, ISSN 0220-5521.

Laroche, F. (2007). Vers une muséologie numérique : méthodologie générale pour conserver et valoriser le patrimoine technique et industriel. *4ème journée d'étude IHT.* Nantes.

Laroche, F. (2008). Retour sur une nouvelle discipline : l'Archéologie Industrielle Avancée. *Journées des GDR du CNRS, groupe MACS, GT IS3C et GT C2EI.* Université de Roanne.

Laroche, F. (2009). « Quand l'industrie et le patrimoine ne font qu'un ! » : Une expérience scientifique originale réalisée par des étudiants en partenariat avec DCNS. *Revue Hippocampe, n°6, ISSN 1624-6683*.

Laroche, F. (2010). L'apport des outils de la numérisation 3D et des méthodes de Gestion des connaissances pour les pratiques muséographiques : La question de la reconstitution de la laverie de sel de Batz-sur-Mer. *Assises annuelles de l'AFPR et de l'AEPR, Ecole Centrale Paris.*

Laroche, F. (2011). Entre procédés industriels et histoire des techniques : un outil méthodologique pour comprendre et modéliser les modes de fonctionnement anciens - Cas d'étude de l'usine d'Indret de DCNS. *132ème Congrès national des sociétés historiques et scientifiques.* Nantes.

Laroche, F. (2013). Modeling and driving industry by ancient design knowledge - Perspectives of development and new trades of merging industrial heritage and virtual tools. *CIRP General Assembly.* Copenhague, Pays-Bas.

Laroche, F. (2014). Digitalisation du patrimoine industriel : 2D, 3D, 4D...? *Journées du patrimoine, Maison Régionale de l'Architecture des Pays de Loire.* Chantenay.

Laroche, F. (2016). L'utilisation du numérique pour la conservation et la valorisation du patrimoine. *Atelier numérisation 3D, Plateforme régionale d'innovation IDEV.* Angers.

Laroche, F. (2017). La 3D comme source et approche de substitution. *revue CeROArt « replace or remake : état des lieux », à paraître e-ISSN : 1784-5092*.

Laroche, F. (2017). Les Forges de Paimpont en Réalité Augmentée : des sources historiques à la modélisation industrielle systémique, Revue Archéologie Industrielle en France. *Revue Archéologie Industrielle en France, édité par le CILAC, ISSN 0220-5521*.

Laroche, F., & Courtin, C. (2009). La maquette du port de Nantes : modélisation d'un territoire technique. *journée d'étude OSTIC, Château des Ducs de Bretagne.* Nantes.

Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2005). Le patrimoine : quel domaine d'application pour quel champ d'application ? *3ème journée d'étude IHT, Nantes .*

Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2010). Creating interactivity of our heritage stored in Museums : Experimentation with Château des Ducs de Bretagne History Museum of Nantes. *Laval Virtual VRIC*, (pp. ISBN 2-9515730-9-X, www.laval-virtual.org). Laval.

Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2015). Numérisation du patrimoine, un état des lieux. *Digital Week.* Nantes: www.nantesdigitalweek.com.

Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2016). Muséologie, patrimoine, humanités numériques et 3D. *Conférence Digital Intelligence*, (pp. 1-7). Québec, Canada.

Laroche, F., & Le Loch, S. (2007). Maquettes numériques de machines patrimoniales pour l'enseignement de la CAO en projet tuteuré. *10ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-11). La Plagne: ISBN 978-2-86272-451-5, www.aip-primeca.net.

Laroche, F., & Peillard, E. (2016). Vers un patrimoine numérique des connaissances historiques : le projet Nantes1900. *Digital Week.* Nantes.

Laroche, F., & Rajaofera-Renard, C. (2013). La réalité augmentée aux Forges de Paimpont ou comment mettre en valeur le patrimoine historique et industriel des forges ? *Virtual Retrospect, Archéologie et réalité virtuelle, Vol.6, ISBN 1771-5911*, pp.113-120.

Laroche, F., & Rajaofera-Renard, C. (2014). La réalité augmentée aux forges de Paimpont. *Revue Hippocampe, n°83, ISSN 1624-6683*.

Laroche, F., & Rouquet, S. (2014). *Digitalisation du patrimoine industriel : La poudrerie royale de St Chamas.* Mairie de St Chamas, France.

Laroche, F., & Vidal, G. (2017). Vers des applications numériques « durables » pour les institutions patrimoniales. *Revue La Lettre de l'OCIM, à paraître*.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2006). A new approach for preserving the technical heritage. *colloque scientifique international VRIC*, (pp. 1-11). Laval, France, ISBN 2-287-48363-2.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2007). 3D digitalization for patrimonial machines. *Future of product development, Springer*, pp.397-408, ISBN 978-3-540-69819-7.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2007). De l'objet à l'idée : entre reverse-engineering et archéologie industrielle ou comment refaire vivre le patrimoine industriel. *10ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-12). ISBN 978-2-86272-451-5, www.aip-primeca.net.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2007). Un nouveau processus coopératif d'ingénierie et ses modes de représentations intermédiaires : les objets patrimoniaux à caractère industriel. *Workshop du GT C2EI, GDR-MACS du CNRS*, (pp. 1-9). UTBM Belfort.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2008). Advanced Industrial Archaeology: A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects. *Journal Virtual and Physical Prototyping – Effective Reverse-Engineering Issues, Taylor & Francis, Vol. 3, n°2*, pp.105-122, ISSN 1745-2759.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2008). Knowledge management for industrial heritage. *Ouvrage collectif Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management, Springer*, pp.307-330.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2008). Virtualization of ancient technical objects: a new design process and its inter-disciplinary team . *Conférence CIRP Design Seminar*, (pp. 1-6). Twente University, Pays-Bas.

Laroche, F., Bernard, A., & Cotte, M. (2009). Une vision produit-process et sa méthodologie dédiée à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel sous une forme virtuelle. *Revue Ingénierie Numérique Collaborative*, 26 p.

Laroche, F., Bernard, A., & Hervy, B. (2015). DHRM: A new model for PLM dedicated to product design heritage. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, Vol.64*, pp.161–164, DOI : 10.1016/j.cirp.2015.04.027.

Laroche, F., Bernard, A., Bordeu, F., & Chinesta, F. (2012). Towards the factory of future - An integrated approach of material-processes-information-human being. *VRIC conference.* Laval, France: ACM.

Laroche, F., Bernard, A., Cotte, M., & Deniaud, S. (2006). A new methodology for a new life of old technical machines. *conférence internationale CIRP Design Seminar*, 12 p.

Laroche, F., Dhuieb, M., Belkadi, F., & Bernard, A. (2016). Accessing enterprise knowledge: a context-based approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, Vol.65*, pp.189-192.

Laroche, F., Graton, Y., & Martelle, J.-P. (2010, Mars). Des espaces de travail collaboratif en pédagogie ? retour d'expériences à Centrale Nantes. *Journée thématique « Les outils de la conception collaborative : nouveaux développements, nouveaux apprentissages ».* Grenoble: organisé par le pôle AIP Primeca Dauphiné Savoie.

Laroche, F., Hervy, B., Courtin, C., Kerouanton, J.-L., Guillet, B., & Bernard, A. (2013). From heritage knowledge capitalization to cultural mediation thanks to augmented digital technologies. Experimentation at the Museum of Nantes History. *15th International Conference and Exhibition on Virtual Reality & Converging Technologies.* Laval.

Laroche, F., Kerouanton, J.-L., & Serveille, D. (2010). Bézier s'invite dans la sauvegarde virtuelle de notre patrimoine industriel. *Colloque International : Pierre Bézier et les machines-outils.* Paris.

Laroche, F., Kerouanton, J.-L., & Servières, M. (2011). La reconversion de notre patrimoine technique et industriel : comment l'utiliser comme support aux projets pédagogiques. *20ème congrès de l'AFM.*

Laroche, F., Kerouanton, J.-L., Servière, M., & Bernard, A. (2011). Un renouveau des pratiques muséographiques grâce au virtuel : un support à des applications pluridisciplinaire en pédagogie active. *12ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-11). Mont-Dore: www.aip-primeca.net.

Laroche, F., Lefevre, D., Hervy, B., Servières, M., & Bernard, A. (2012). Intelligent reverse-engineering segmentation: automatic semantic recognition of large 3D digitalized cloud of points dedicated to heritage objects. *11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis* (pp. 1-1). Nantes: ASME.

Laroche, F., Michel, C., Martelle, J.-M., & Depince, P. (2011). De la pédagogie active en Génie Industriel : une nouvelle forme de compagnonnage,. *20ème congrès de l'AFM* (pp. 1-7). Besancon: www.afm.asso.fr.

Laroche, F., Pasturel, D., Kerouanton, J.-L., & Lecoq, M.-E. (2010). Quand les NTIC rassemblent didactique et patrimoine. *3ème journées démonstrateurs, club EEA*, (pp. 1-10). Angers.

Laroche, F., Servieres, M., Lefevre, D., & Kerouanton, J.-L. (2011). Where Virtual Enhances Physical Mock-Up: A Way to Understand our Heritage. *10th IEEE international symposium on mixed and augmented reality* (pp. 1-6). Basel, Suisse: ISMAR.

Latour, B. (2013). Le tout est toujours plus petit que ses parties. *Réseaux, Vol.177*, pp. 201-232.

Lavoisy, O. (2000). La matière et l'action – le graphisme technique comme instrument de la coordination industrielle dans le domaine de la mécanique depuis trois siècles. *Thèse de doctorat, Laboratoire CRISTO, INPG*, 293 p.

Le Duigou, J. (2010). *Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue Application aux PME mécaniciennes.* Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

Le Duigou, J., Bernard, A., & Perry, N. (2012). Framework for Product Lifecycle Management integration in Small and Medium Enterprises networks. *Computer-Aided Design & Applications, Vol.8, Issue 4*, pp. pp.531-544, DOI: 10.3722/cadaps.2011.531-544.

Le Duigou, J., Bernard, A., Perry, N., & Delplace, J.-C. (2010). Generic model for the implementation of PLM systems in mechanical SMEs. *7th International Product Lifecycle Management Conference*, (pp. 200–209). Bremen, Germany.

Le Duigou, J., Bernard, A., Perry, N., & Delplace, J.-C. (2012). Generic PLM system for SMEs : Application to an equipment manufacturer. *International Journal of Product Lifecycle Management, Vol. 6, N°1*, pp. 51-64.

Le Loch, S., & Laroche, F. (2005). Une démarche pédagogique pour l'apprentissage de la CAO par l'étude de machines anciennes : cas d'une presse à platine du Musée de l'imprimerie de Nantes. *3ème journée d'étude IHT, Nantes.*

Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du Système Général : théorie de modélisation.* P.U.F.

Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes.* Dunod.

Le Pavic, F. (2014). De 1945 à fin 1980, une histoire des techniques de la construction militaire dans le port-arsenal de Lorient. *Thèse de doctorat, Université de Nantes*, 347p.

Le Pavic, F., Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2013). Vers une extension de la modélisation d'entreprise pour la rétro-conception de sites industriels disparus : cas d'étude de l'Arsenal de la Marine de Lorient. *10ème Congrès International de Génie Industriel*, (pp. 1-8). La Rochelle.

Lessig, L. (2000). Code is Law - On Liberty in Cyberspace. *Harvard Magazine*.

Lévy, A. (2010). *Sur les traces de Big brother - La vie privée à l'ère du numérique - Document.* L EDITEUR.

Liao, S. (2003). Knowledge management technologies and applications literature review from 1995 to 2002. *Expert Systems with Applications, 25*, pp. 155–164.

Lo Buglio, D. (2016). *Caractérisation de formes architecturales : une approche expérimentale intégrant complexité et intelligibilité des représentations numériques.* Bruxelles, Belgique: Thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles.

Lombard, M. (2006). Contribution de la Modélisation Informationnelle aux Processus de Conception et Réalisation de Produits Manufacturiers : vers une Ontologie Métier. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université Henri Poincaré, Nancy 1*, 166p.

London charter. (2009). For the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage. 13p.

Lutters, E., van Houten, F., Bernard, A., Mermoz, E., & Schutte, C. (2014). Tools and techniques for product design. *CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol.63(2)*, pp. 607–630.

Lyytinen, K., & Yoo, Y. (2002). Issues and challenges in ubiquitous computing. *ACM special issue, Vol.45(12)*, pp.62-65.

Ma, N., Laroche, F., Hervy, B., & Kerouanton, J.-L. (2013). Virtual conservation and interaction with our cultural heritage: Framework for multi-dimension model based interface. *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, *Vol.1*, pp. 323–330. Marseille.

Mahé, S. (2000). *Démarche et outil actif de Gestion des Connaissances pour les P. M. I./P. M. E.- Réutilisations et échanges de connaissances tacites.* Thèse de doctorat, Université de Savoie.

Maier, J., & Fadel, G. (2009). Affordance based design: a relational theory for design. *Research in Engineering Design, volume 20, issue 1*, pp.13-27, DOI 10.1007/s00163-008-0060-3.

Managing Engineering Knowledge. (2001). *MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Application.* Edited by Melody Stokes for the MOKA Consortium.

Manuel, A. (2016). Annotation sémantique 2D/3D d'images spatialisées pour la documentation et l'analyse d'objets patrimoniaux. *thèse de doctorat, ENSAM Paris*, 209p.

Mase, K., Kadobayashi, R., & Nakatsu, R. (1996). Meta-museum: A supportive augmented-reality environment for knowledge sharing. *ATR Workshop on Social Agents: Humans and Machines*, pp. 107–110.

Matta, N. (2004). *Ingénierie des connaissances en conception pour la mémoire de projets.* Habilitation à Diriger des Recherches, Université de technologie de Troyes.

Melendez, S. (2016). NASA Is Harnessing Graph Databases To Organize Lessons Learned From Past Projects. *Mind and machine*.

Menand, S. (2002). *Modélisation pour la réutilisation du processus de conception multi-acteurs de produits industriels.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., & Kishino, F. (1994). Augmented reality: A class of displays on thereality-virtuality continuum. *Telemanipulator and Telepresence Technologies - A new typology of Augmented Reality applications, Vol.2351(34)*, pp. 282–292.

Milgrom, E., Raucent, B., & Bourret, B. (2010). Guide pratique pour une pédagogie active : les APP, Apprentissages par Problèmes et par Projets. *Ecole Polytechnique de Louvain, INSA de Toulouse*, 103 p., ISBN 978-2-87649-059-8.

Minier, V. (2010). Le télescope spatial Herschel : Construction sociale et concrétisation technique. *Mémoire de Master en Histoire et Philosophie des Sciences, Université Paris Diderot*, 137p.

Miyashita, T., Meier, P. G., Tachikawa, T., Orlic, S., Eble, T., Scholz, V., . . . Lieberknecht, S. (2008). An augmented reality museum guide. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 103–106). IEEE.

Moalla, N. (2015). Amélioration de la performance des systèmes d'information en entreprise. *Habilitation à diriger des recherches, Université Lumière Lyon 2*, 104p.

Molcho, G., & Schneor, R. (2015). MIND –semantic based knowledge visualization. *25th CIRP Design Conference* (pp. 89-94). Elsevier.

Mony, C. (1992). Un modèle d'intégration des fonctions conception-fabrication dans l'ingénierie de produit : définition d'un système mécanique en base de données objet. *Thèse de doctorat Ecole centrale de Paris.* Paris.

Mony, C., Dupinet, E., & Bernard, A. (1992). A mechanical product integrated model for machining and manufacture of raw parts. *CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol.21, n°2*, pp. 137-145, ISSN : 0176-3377.

Moreau, G. (2009). Représentation et construction des systèmes d'information par l'image. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nantes*, 125p.

Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic building information modelling (HBIM). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.76*, pp. 89-102.

Musuvathy, S. R., Johnson, D. E., Germain, H. J., Cohen, E., Xu, C., Riesenfeld, R. F., & Henderson, T. C. (2005). Integrating multiple engineering resources in a virtual environment for reverse engineering legacy mechanical parts. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 1149-1158). ASME.

Noël, F., & Roucoules, L. (2008). The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol.21 (2)*, pp. 139–145, doi:10.1080/09511920701607782.

Nonaka, I. (1994). A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization science, Vol.5(1)*, pp.14–37.

Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The knowledge-creating company.* Oxford, University Press New York.

Normand, J.-M., Servières, M., & Moreau, G. (2012). A new typology of augmented reality applications. *conférence Augmented Human* (pp. 1-8). Megève: ACM, DOI: 10.1145/2160125.2160143.

Nuessli, M.-A., & Kaplan, F. (2014). Encoding metaknowledge for historical databases. *Digital Humanities* (pp. 1-4). Lausanne, Suisse: UNIL.

Ochmann, S., Vock, R., Wessel, R., & Klein, R. (2016). Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers & Graphics, Vol.54*, pp. 64-103.

Otlet, P. (1934). Le livre sur le livre - Traité de documentation. 480p., ISBN : 978-2-87449-299-0.

Ouamer Ali, M. I. (2016). Proposition d'un modèle produit liant la maquette numérique et les données hétérogènes d'un grand ensemble mécanique. *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes*, 216p.

Ouamer-Ali, M.-I., Laroche, F., Bernard, A., & Remy, S. (2014). Toward a methodological knowledge based approach for partial automation of reverse engineering. *24th CIRP Design conference*, (pp. 1-6). Milan, Italie.

Ouamer-Ali, M.-I., Laroche, F., Remy, S., & Bernard, A. (2015). Structuration de la connaissance dans le cadre de la rétro-conception de systèmes mécaniques. *14ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-6). la Plagne: www.aip-primeca.net.

Ouamer-Ali, M.-I., Laroche, F., Remy, S., & Bernard, A. (2017). Ki4D : Nouvelle méthodologie de rétro- conception intégrée. *15ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-7). www.aip-primeca.net.

Owen, R., & Horváth, I. (2002). Towards product-related knowledge asset warehousing in enterprises. *4th international symposium on tools and methods of competitive engineering* (pp. 155-170). TMCE.

Parent, C., Spaccapietra, S., & Zimányi, E. (2006). Conceptual Modeling for Traditional and Spatio-Temporal Applications. *The MADS Approach, Springer*.

Parent, C., Spaccapietra, S., Zimanyi, E., Donini, P., Plazanet, C., Vangenot, C., . . . Crausaz, P.-A. (1997). MADS : un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles. *Revue internationale de Géomatique, Vol.7(3-4)*, pp. 317–352.

Pedrazzoli, P. (2009). Design Of customeR dRiven shOes and multi- siTe factory – DOROTHY. *Technology Management Conference (ICE)* (pp. 1-8). IEEE, DOI: 10.1109/ITMC.2009.7461384.

Penalva, J.-M. (1990). SAGACE : une représentation des connaissances pour la supervision de procédés, Systèmes Experts de deuxième génération. Avignon: EC2 (Ed.).

Penciuc, D., Durup, A., Belkadi, F., Eynard, B., & Rowson, H. (2014). Towards a PLM Interoperability for a Collaborative Design Support System,. *Procedia CIRP, Vol.25*, pp. 369–376.

Pepin, J. (2016). Architecture d'entreprise : alignement des cartographies métiers et applicatives du système d'information. *Thèse de Doctorat, Université de Nantes*, 222p.

Perro, C. (2005). L'apport de la technologie RFID en muséographie. *La Lettre de l'OCIM, n°99*, pp. 21-25.

Perry, N. (2007). Industrialisation des connaissances : approches d'intégration pour une utilisation optimale en ingénierie (cas de l'évaluation économique). *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nantes*, 222p.

Perry, N., Bernard, A., Laroche, F., & Pompidou, S. (2012). Improving design for recycling – Application to composites. *CIRP Annals – Manufacturing Technology, Elsevier, Vol. 61, issue 1*, pp. 151-154.

Piegl, L., & Tiller, W. (1997). *The Nurbs book.* New York: Editions Springer-Verlag.

Pita Castro, J.-C. (2017). *Reconnaissance et temporalités* (Vol. 24). Genève: Temporalités [En ligne].

PMI. (2004). Project Management Institute - Guide du corpus des connaissances en management de projet. 407p.

Poirson, E. (2016). *De la prise en compte des perceptions à la conception universelle.* Nantes: Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nantes.

Poitou, J.-P. (1989). 30 ans de CAO en France ou les petits enfants de Gaspard Monge. 160 p.

Poux, F., Hallot, P., Neuville, R., & Billen, R. (2016). Smart point cloud: definition and remaining challenges. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.IV-2/W*, pp. 119-127.

Poux, F., Neuville, R., Hallot, P., & Billen, R. (2016). Point clouds as an efficient multiscale layered spatial representation. *Conference UDMV16 - 11th Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualisation.* Liège: DOI: 10.2312/udmv.20161417 ·.

Pouyllau, S. (2008). Digital humanities en France : le temps des pionniers. http://blog.stephanepouyllau.org.

Pouyllau, S. (2012). Utilisons RDFa pour nos corpus. *THATCamp : non-conférence sur les humanités numériques.* Paris: Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

Prax, J.-Y. (1998). Le management des connaissances : des concepts aux expériences, des expériences à la méthode. *Communication et organisation, Vol.13, DOI : 10.4000/communicationorganisation.2024*.

Quantin, M., Hervy, B., Laroche, F., & Bernard, A. (2016). Supervised Process of Un-structured Data Analysis for Knowledge Chaining. *26th CIRP Design Conference*, (pp. 1-6). Stockholm, Sweden.

Quantin, M., Hervy, B., Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2015). Semantic integration in cultural heritage 3D modeling for multi-dimension access to historical knowledge: mass customization for cultural heritage 3D models. *Digital Heritage International Congress*, (p. 4 p.). Granada, Espagne.

Quantin, M., Laroche, F., & Kerouanton, J.-L. (2016). Récit historique et objet technique : outil de valorisation mutuelle. *Cahiers d'histoire du CNAM : Les musées scientifiques et techniques innovent, Vol.5*, pp. 93-120.

Quantin, M., Laroche, F., André, N., & Villedieu, F. (2017). Numérisation, modélisation et impression 3D pour la recherche historique et la muséographie. Cas d'étude sur la salle à manger de Néron. *6ème congrès de la SFHST.* Strasbourg.

Quantin, M., Laroche, F., Andre, N., & Villedieu, F. (2017). Rétroconception et maquettage d'un batiment mécanique de la Rome antique. *15ème colloque national AIP Primeca* (pp. 1-5). La Plagne: www.aip-primeca.net.

Quattrini, R., Pierdicca, R., & Morbidoni, C. (2017). Knowledge-based data enrichment for HBIM: Exploring high-quality models using the semantic-web. *Journal of Cultural Heritage*, pp. 1-11.

Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F., & Kheddouci, F. (2010). Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. *Computers in Industry, Vol.61*, pp. 497-508, doi:10.1016/j.compind.2010.01.005.

Remy, S. (2012). *Contribution au processus de développement de produit : rétro-conception et simulation de procédés de fabrication.* Troyes: Habilitations à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Troyes.

Remy, S., Laroche, F., & Bernard, A. (2011). Numérisation 3D et prototypage rapide : Exemples d'industrialisation de produits. *Techniques de l'ingénieur - AG 3 404*, 11p.

Rocheleau, M. (2011). La modélisation 3D comme méthode de recherche en sciences historiques. *10e colloque international d'ARTEFACT* (pp. 245-265). Université de Laval.

Roth, C. (2013). Socio-Semantic Frameworks. *Advances in Complex Systems, Vol.16*.

Roucoules, L. (1999). Méthodes et connaissances : contribution au développement d'un environnement de conception intégrée. *Thèse de doctorat en Mécanique, INPG*, 182 p.

Roucoules, L. (2007). Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. *Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Technologie de Compiègne*, 145p.

Ryan, N., Pascoe, J., & Morse, D. (1998). Enhanced Reality Fieldwork: the Context Aware Archaeological Assistant. *Computer applications in archaeology. Tempus Reparatum*, pp. 269-274.

Sajja, P. (2008). Multi-Agent System for Knowledge-Based Access to Distributed Databases. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management, Vol.3*, pp. 2-9.

Samuel, J., Périnaud, C., Servigne, S., Gay, G., & Gesquière, G. (2016). Representation and Visualization of Urban Fabric through Historical Documents. *EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage* (pp. 1-10). ACM.

Scete, M. E., & Doyle, J. C. (2002). Reverse engineering of biological complexity. *Science, Vol.295(5560)*, pp. 1664-1669.

Schreiber, G., B., W., & J.B. (1993). KADS: A Principled Approach to Knowledge-based System Development. San Diego.

Schrieber, G., Wielinga, B., de Hoog, R., Akkermans, H., & van de Velde, W. (1994). CommonKADS: a comprehensive methodology for KBS development. *IEEE Expert*, pp. 28–37.

Serrafero, P. (2000). Cycle de vie, maturité et dynamique de la connaissance : des informations aux cognitons de l'Entreprise Apprenante. *Revue Annuelle UE des Arts et Métiers sur le Knowledge Management*, pp. 158–169.

Severeo, M., & Cachat, S. (2016). Patrimoine culturel immatériel et numérique : transmission, paritcipation, enjeux. *Ouvrage de synthèse, Editions L'Harmattan*, 208p., ISBN 978-2-343-10654-0.

Shah, J., & Mantyla, M. (1995). Parametric and feature-based CAD/CAM. *Library of Congresss Cataloging in Publication Data*.

Simondon, G. (1989). Du mode d'existence des objets techniques. *Aubier, Editions*, 333 p., ISBN 2-7007-3414-9.

Simonnin, M., & Laroche, F. (2014). De l'objet à l'image et de l'image à l'objet – Stratégies de valorisation patrimoniales : La laverie à sel du Musée des marais salants à Batz-sur-Mer (44). *Journée d'études PRI Innovation & Design d'Expériences de Visites.* Fontevraud.

Skarka, W. (2007). Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.20(5)*, pp. 677-690.

Spiegler, I. (2003). Technology and knowledge: bridging a "generating" gap. *Information & Management review, Vol. 40(6)*, pp. 533-539.

Stefani, C. (2010). Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. *Thèse de doctorat, ENSAM*, 192p.

Stiegler, B. (2009). Technologies culturelles et économie de la contribution. *Culture et recherche, Ministère de la Culture, Vol.(121):31*.

Stiegler, B. (2016). Dans la disruption : Comment ne pas devenir fou ? *Les liens qui libèrent Edition*, 480p., ISBN : 979-1020903624.

Stokes, M. (2001). Managing Engineering Knowledge: MOKA Methodology for Knowledge-Based Engineering Applications. (A. Press, Éd.)

Sudarsan, R., Fenves, S. J., Sriram, R. D., & Wang, F. (2005). A product information modeling framework for product lifecycle management. *Computer-aided design, Vol.37(13)*, pp. 1399-1411.

Syvanen, R. B. (2005). Supporting Pervasive Learning Environments: Adaptability and Context Awareness in Mobile Learning,. *IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies in Education.* IEEE Computer Society.

Szabados, A.-V., & Letricot, R. (2012). L'ontologie CIDOC CRM appliquée aux objets du patrimoine antique. *3e Journées d'Informatique et Archéologie de Paris - JIAP 2012*, (pp. 1-14).

Thévenot, L. (1998). Le partage des connaissances : une mémoire interactive pour la compétitivité de l'entreprise. *Editions Tec & Doc, Lavoisier*, 136 p.

Thompson, W. B., Owen, J. C., Germain, H. D., Stark, S. R., & Henderson, T. C. (1999). Feature-based reverse engineering of mechanical parts. *IEEE Transactions on robotics and automation, Vol.15(1)*, pp. 57-66.

Thoulouze, D. (2005). Pour une véritable culture scientifique et technique. *La revue du Musée des arts et métiers : Un patrimoine scientifique et technique pour l'avenir. n°43/44.* Paris: Ed. Stratéus.

Tichkiewitch, S. (1996). Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model. *3 rd Biennial Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA*, *Part 8(of 9)*, pp. 101–108.

Tolio, T., Ceglarek, D., ElMaraghy, H., Fischer, A., Hu, S., Laperrière, L., . . . Vancza, J. (2010). SPECIES - Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.59*, pp.672–693, DOI:10.1016/j.cirp.2010.05.008.

Tomsin, P. (2007). Les patrimoines mobiliers scientifique et technique : spécificités de leur restauration, de leur conservation et de leur valorisation,. *CeROArt, Vol.1*.

Torrance, R., & James, D. (2011). The state-of-the-art in semiconductor reverse engineering. *48th Design Automation Conference* (pp. 333-338). ACM.

Tsui, E. (2003). Tracking the role and evolution of commercial knowledge management software. In . *C. W. Holsapple (Ed.), Handbook on knowledge management 2: Knowledge directions*, pp. 5–28.

UNESCO. (2003). Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel. 14 p.

Urban-Galindo, J.-G. (2017). Product Lifecycle Management (PLM). Introduction à la stratégie. *Techniques de l'Ingénieur AG3159 V1*, 30p.

Valiron, P., & Deterre, P. (2009). Chercheurs en science - chercheurs de sens. *Les éditions de l'atelier*, 142 p., ISBN 978-2-7082-4083-4.

Vallespir, B., & Chapurlat, V. (2007). Enterprise modelling and verification approach for characterizing and checking organizational interoperability. *12th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Vol. 1-3*, pp. 839–846.

Vandendriessche, O. (2005). Mise en œuvre d'une solution métier intégrée pour la filière électrique, Société Volvo IT. *Conférence MICAD.*

Vergnieux, R. (2003). Réalité virtuelle : un outil pour l'archéologie. *Virtual Retrospect*, (pp. 13-16). Biarritz.

Vergnieux, R. (2007). Archéogrid – Des modèles numériques 3D pour quoi faire ? *Virtual Retrospect*, (pp. 241-245). Bordeaux.

Vergnieux, R. (2009). Sauvegarder les données numériques 3D du patrimoine. *Virtual Retrospect*, (pp. 181-184). Bordeaux.

Vernadat, F. (2002). Ueml : towards a unified enterprise modelling language. *International Journal of Production Research, Vol.40(17)*, pp. 4309–4321.

Vexler, F., Berger, A., Cotton, J.-P., & Belloni, A. (2013). Eléments d'appréciation et d'analyse d'une base de connaissance : l'expérience industrielle d'Ardans. *AIDE-EGC*, (pp. 1-14).

Vidal, G., & Laroche, F. (2017). Usages et compétences : pour une politique numérique des institutions patrimoniales. *Editions Bord de l'eau, à paraître*, 35 p.

Vilmart, H., Léon, J.-C., & Ulliana, F. (2017). Extraction et Inférence de Connaissances à partir d'Assemblages Mécaniques Définis par une Représentation CAO 3D. *Conférence Extraction et Gestion des Connaissances*, 32p.

Vitalis, A. (2016). L'incertaine révolution numérique. *Collection systèmes d'information, web et société, Ltd, ISTE Editions*, 117p., ISBN 978-1-78405-155-6.

Vogel, C. (1991). Expression langagière de l'expertise : problèmes d'analyse. *Intellectica, Vol.2*, pp. 65-100.

VPERI. (2003). *Virtual Parts Engineering Research Initiative : Army research final report.*

Weiser, M. (1991). The computer for the 21st century. *Scientific american, Vol.265(3)*, pp. 94–104.

Welker, C. (2015). La fabrique des "nouvelles images", l'émergence des images de synthèse en France dans la création audiovisuelle (1968-1989). *Thèse de doctorat*, 317p.

Welty, C. (2015). Conservation et valorisation du patrimoine d'EDF. *Séminaire de recherche "Patrimoine contemporain : Science, Technique, Culture & Société", Musée des arts et métiers.* Paris: Fondation EDF .

Werle, P., kilander, F., Jonsson, M., Lönnqvist, P., & Jansson, C. (2001). A ubiquitous service environment with active documents for teamwork support,. *Computer science, Vol.2201*, pp. 139-155.

Westkämper, E., & Walter, F. (2014). Towards the Re-Industrialization of Europe: A concept for manufacturing for 2030. *Springer Berlin Heidelberg*, 112p., ISBN : 978-3-642-38501-8.

Xu, J., Houssin, R., Bernard, A., & Caillaud, E. (2013, décembre). Systemic modeling of knowledge for innovation in design. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 6(1)*, 1-21.

Xu, Y. (2010). Proposition d'un système intégré de référence de connaissances pour l'évaluation de la connaissance dans le développement de produits. *thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes*, 137p.

Xu, Y., Bernard, A., Perry, N., & Laroche, F. (2012). Improvement of product design process by knowledge value analysis. *CIRP Design 2012 – Sustainable Product Development* (pp. 207-217). ed. Springer.

Xu, Y., Bernard, A., Perry, N., & Lian, L. (2011). Managing knowledge management tools: a systematic classification and comparison. *International Conference on Management and Service Science (MASS)*, (pp. 1-4). Wuhan, China.

Yildiz, O. (2015). Atelier de conception pour l'évolution des systèmes PLM : une approche d'ingénierie dirigée par les modèles. *thèse de doctorat, Université de Grenoble*, 201 p.

Zacklad, M., & Giboin, A. (2010). Systèmes d'organisation des connaissances hétérogènes pour les applications documentaires. *Document numérique, Vol. 13(2)*, pp. 7–12.

Zacklad, M., Bénel, A., L'Hédi, Z., Cahier, J.-P., & Zhou, C. (2007). Hypertopic : une métasémiotique et un protocole pour le Web socio-sémantique. *18eme journées francophones d'ingénierie des connaissances* (pp. 217-228). Cépaduès.

Zacklad, M., Desfriches-Doria, O., Bertin, G., Mahe, S., Ricard, B., Musnik, N., . . . Lewkowicz, E. (2011). Miipa-Doc : vers une gestion de l'hétérogénéité des classifications documentaires en entreprise. *Hypermedia et pratiques numériques* (pp. 323-333). Paris: Hermes Sciences – Lavoisier.

Zacklad, M., Lewkowicz, M., Boujut, J.-F., Darses, F., & Détienne, F. (2003). Formes et gestion des annotations numériques collectives en inégnierie collaborative. *14èmes journées francophones d'Ingénierie des Connaissances* (pp. 207-224). Laval: Presses Universitaires de Grenoble.

Zimmermann, A., Lorenz, A., & Oppermann, R. (2007). An operational definition of context, Modeling and using context. *Springer Berlin Heidelberg*, pp. 558–571.

Zimmermann, A., Lorenz, A., & Specht, M. (2003). The Use of an Information Brokering Tool in an Electronic Museum Environment. *Museums and the Web.* Toronto, Canada.

Zuehlke, D. (2010). Smartfactory - towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control, Vol.34(1)*, pp. 129–138.

3.2 Liste complète de mes publications scientifiques

3.2.1 Thèse de doctorat et thèse de master

2007 Déc.	F. Laroche	Contribution à la sauvegarde des Objets techniques anciens par l'Archéologie industrielle avancée : Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode interdisciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel	Thèse de Doctorat, Laboratoire IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes, 563 p. + annexes
2004 Sept.	F. Laroche	Etude et évaluation d'un outil d'aide à l'innovation intégrant les données capitalisées	Mémoire de DEA, Laboratoire CPI, ENSAM Paris, 62 p.

3.2.2 Journaux internationaux avec comité de lecture

2017	M. Quantin, B. Hervy, F. Laroche, A. Bernard	Haruspex: Multi-fuzzy-graph from Unstructured Texts Keyphrase Extraction	Journal Knowledge-Based Systems, Editions Elsevier, 2017, pp.1-19 *article soumis*
2017	A. Chandrakar, Y. Zhang, F. Laroche, A. Bernard	Physical Assembly Sequence Optimization for Developing an Integrated 3D Reconstruction Method	Journal Virtual and Physical Prototyping, Taylor & Francis, 2017, pp.1-18, DOI:10.1080/17452759.2017.1311930
2017	B. Hervy, F. Laroche, A. Bernard	Framework for historical knowledge management in museology	Int. J. Product Lifecycle Management, Inderscience, 2017, vol. 10 (1), pp.44-68, DOI: 10.1504/IJPLM.2017.083001
2017	M.Ouamer-Ali, F. Belkadi, F. Laroche, S. Remy, A. Bernard	Facet-based approach for the management of information multi points-of-view in product modelling	Journal Computer-Aided Design & Applications, Taylor & Francis, Vol. 14, No. 5, 15 p.
2016	B. Hervy, F. Laroche, J.-L. Kerouanton, C. Courtin	3D digitisation of Nantes historic harbour	TICCIH Bulletin, number 73, 3rd quarter 2016, ISSN 1605-6647, pp.3-4
2016	F. Laroche, M.A. Dhuieb, F. Belkadi, A. Bernard	Accessing enterprise knowledge: a context-based approach	CIRP Annals – Manufacturing Technology, Elsevier, vol. 65, pp.189-192, DOI:10.1016/j.cirp.2016.04.136
2015	M.A. Dhuieb, F. Belkadi, F. Laroche, A. Bernard	Conceptual framework for enhancing knowledge reuse in PLM environment with the concept of Digital Factory Assistant	International Journal of Product Lifecycle Management, Inderscience, 2015, vol. 8, n°4, pp.330-347 DOI : 10.1504/IJPLM.2015.075929
2015	F. Belkadi, A. Bernard, F. Laroche	Knowledge Based and PLM Facilities for Sustainability: Perspective in Manufacturing: A Global Approach	Procedia CIRP Life Cycle Engineering, 2015, 29, pp.203-208 DOI : 10.1016/j.procir.2015.01.065
2015	F. Laroche, A. Bernard, B. Hervy	DHRM: A new model for PLM dedicated to product design heritage	CIRP Annals – Manufacturing Technology, Elsevier, 2015, vol. 64, pp.161-164 DOI : 10.1016/j.cirp.2015.04.027
2015	B. Hervy, F. Laroche, J.-L. Kerouanton, A. Bernard, C. Courtin, L. D'Haene, B. Guillet, A. Waels	Museum augmented interface for historical scale models: towards a new way for cultural heritage promotion	International Journal of Virtual Reality, volume 15 (1), pp.3-9, ISSN: 1081-1451
2012	N. Perry, A. Bernard, F. Laroche, S. Pompidou	Improving design for recycling – Application to composites	CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 61, issue 1, ed. Elsevier, pp.151-154 DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.081

2011	J. Daaboul, C. Da Cunha, A. Bernard, F. Laroche	Design for Mass Customization: Product variety vs. Process variety	CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 1, Editions Elsevier, ISSN: 0007-8506, pp169-174 DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.093
2010	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Extended value network modelling and simulation for mass customization implementation	International Journal of Intelligent Manufacturing, volume 23, issue 6, Taylor & Francis, ISBN 10845-010-0493-1, pp. 2427-2439 DOI: 10.1007/s10845-010-0493-1
2008	F. Laroche	Advanced Industrial Archaeology and Techno-Museology: A new virtual life for industrial heritage	TICCIH Bulletin, number 41, summer 2008, ISSN 1605-6647, pp.3-4 http://www.mnactec.com/ticccih
2008	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Advanced Industrial Archaeology: A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects	Journal Virtual and Physical Prototyping, Vol. 3, n°2 – Effective Reverse-Engineering Issues, Taylor & Francis, ISSN 1745-2759, pp.105-122
2007	A. Bernard, S. Ammar-Khodja, N. Perry, F. Laroche	Virtual engineering based on knowledge integration	Journal Virtual and Physical Prototyping, Vol. 2, n°3 – Advanced Manufacturing Technology for Product Development, Taylor & Francis, ISSN 1745-2767, pp.137-154 DOI: 10.1080/17452750701677509
2007	A. Bernard, F. Laroche, S. Ammar-Khodja, N. Perry	Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorization of mechanical systems	CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 56/1/2007, ISSN 0007-8506, pp.143-148 DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.035
2006	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Between heritage and Industrial Engineering, a new life for old product: virtuality	revue Research in Interactive Design, Vol.2, 7 p., Ed. Springer ISBN 2-287-48363-2
2006	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Methodology for simulating ancient technical systems	Revue Internationale d'Ingénierie Numérique / Integrated Design and Production, Vol. 2 n°1-2/2006, pp.9-28, Hermès-Science, Ed. Lavoisier ISBN 978-2-7462-1679-2 riin.revuesonline.com

3.2.3 Journaux francophones avec comité de lecture

2017	F. Laroche	La 3D comme source et approche de substitution	revue CeROArt « replace or remake : état des lieux », *à paraître* e-ISSN : 1784-5092 https://ceroart.revues.org
2017	F. Laroche, G. Vidal	Vers des applications numériques « durables » pour les institutions patrimoniales	Revue La Lettre de l'OCIM, *à paraître*
2017	F. Laroche	Les Forges de Paimpont en Réalité Augmentée : des sources historiques à la modélisation industrielle systémique	Revue Archéologie Industrielle en France, édité par le CILAC ISSN 0220-5521, *pp.36-43*
2017	F. Laroche, M. Quantin	Numérisation 3D, modélisation virtuelle et impression 3D de la salle à manger de Néron à Rome	Revue Hippocampe, Journal de l'Association des Ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes, n°93, mars 2017 ISSN 1624-6683
2016	M. Quantin, F. Laroche & J.-L. Kerouanton	Récit historique et objet technique : outil de valorisation mutuelle	Cahiers d'histoire du CNAM : Les musées scientifiques et techniques innovent, vol. 5, pp.93-120

2014	F. Le Pavic, F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Circulation des savoirs et savoir-faire : cas d'étude de l'Arsenal de la Marine de Lorient dans l'après-Seconde Guerre mondiale	revue e-Phaïstos d'histoire des techniques, 3 (1), 2014 ISSN : 2262-7340
2014	F. Laroche, C. Rajaofera-Renard	La réalité augmentée aux Forges de Paimpont	Revue Hippocampe, Journal de l'Association des Ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes, n°83, sept. 2014 ISSN 1624-6683
2011	S. Remy, F. Laroche, A. Bernard	Numérisation 3D et prototypage rapide – exemples d'industrialisation de produits	Les Techniques de l'ingénieur, AG 3 404, 11 p. www.techniques-ingenieur.fr
2011	F. Laroche	La machine à vapeur Sulzer de Finlayson à Tampéré	Revue Hippocampe, Journal de l'Association des Ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes, n°72, décembre 2011 – ISSN 1624-6683
2010	F. Laroche & J.-L. Kerouanton	La machine à vapeur Sulzer de Finlayson à Tampéré : une visite patrimoniale en Finlande	Revue Archéologie Industrielle en France, n°57, édité par le CILAC, pp.54-61 - ISSN 0220-5521
2010	F. Laroche	Une nouvelle forme de capitalisation des connaissances grâce à l'Archéologie Industrielle Avancée	Revue DHT, Dossier pour l'histoire des techniques, La numérisation du patrimoine technique, n°18, 2ème semestre 2009, pp.51-60 ISBN 9782953077902
2009	F. Laroche	« Quand l'industrie et le patrimoine ne font qu'un ! » : Une expérience scientifique originale réalisée par des étudiants en partenariat avec DCNS	Revue Hippocampe, Journal de l'Association des Ingénieurs de l'Ecole Centrale de Nantes, n°61, mars 2009 ISSN 1624-6683
2009	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Une vision produit-process et sa méthodologie dédiée à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel sous une forme virtuelle	Revue Ingénierie Numérique Collaborative, 26 p.
2009	M. Cotte, F. Laroche, A. Bernard	Les outils de réalité virtuelle sont-ils applicables au patrimoine technique et industriel ?	Revue Historiens et géographes, n°401, pp.245-255 - www.aphg.fr
2007	F. Laroche	Les outils du virtuel : la mécanisation du lavage du sel à Batz-sur-Mer au XXème siècle	Revue Archéologie Industrielle en France, n°51, édité par le CILAC, pp.46-51 - ISSN 0220-5521
2005 Juin	F. Laroche, C Coppens, M. Le Coq	La connaissance au service de l'innovation	Design Management Magazine, n°7, pp.7-9, ISSN 1638-6418 - www.cdra.asso.fr

3.2.4 Direction d'ouvrage

2015	B. Guillet, C. Courtin F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Nantes1900 – la maquette du port	ouvrage collectif, Musée d'histoire de Nantes, France, 88 p., distribution opensource, ISBN : 978-2-906519-49-7 http ://boutique.chateaunantes.fr/produit/nantes-1900-la-maquette-du-port

3.2.5 Contribution à des ouvrages ou revues collectives

2017	G. Vidal, F. Laroche	Usages et compétences : pour une politique numérique des institutions patrimoniales	Editions Bord de l'eau, 35 p., *à paraître*
2017	F. Laroche & al	Digital 3D Objects in Art and Humanities: challenges of creation, interoperability and preservation	Projet européen PARTHENOS, White paper, 26 co-auteurs, Coordination A. Joffres, N. Larousse, S. Pouyllau, M. Puren, C. Riondet, L. Romary, R. Scopigno, pp.52-58
2017	M. Lassalle, C. Arvieu, F. Laroche	Le mariage du cuivre et de la vapeur, au cœur de la première révolution industrielle	Ouvrage collectif *Quatre mille ans d'histoire du cuivre – Fragments d'une suite de rebonds*, sous la direction de Michel Pernot, THEA, Ausonius éditions / Presses Universitaires de Bordeaux, pp.209-239, ISBN 979-10-300-0164-8
2015	A. Bernard, F. Laroche, B. Hervy	Le document comme outil de préservation	*Documentation technique et techniques de documentation*, pp.46-55, 978-2-9553458-0-1
2013	F. Laroche, C. Rajaofera-Renard	La réalité augmentée aux Forges de Paimpont ou comment mettre en valeur le patrimoine historique et industriel des forges ?	Virtual Retrospect, Archéologie et réalité virtuelle, Vol. 6, pp.113-120 ISBN 1771-5911
2013	J.-L. Kerouanton, F. Laroche	La modélisation d'un canot à vapeur	Ouvrage collectif *Autour de Jean Le Bot, physicien, transmetteur, ethnologue naval, de la connaissance technologique*, Université de Rennes 1
2013	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Modélisation du patrimoine industriel et projets interdisciplinaires	Revue de la Fédération Historique de Provence, autonome 2013 – *à paraître*
2012	F. Laroche, F. Bordeu, A. Bernard, F. Chinesta	Towards the factory of future an integrated approach of material-processes-information-human being	Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference, ACM digital library, ISBN 978-1-4503-1243-1, 6p. DOI : 10.1145/2331714.2331730
2012	Y. Xu, A. Bernard, N. Perry, F. Laroche	Improvement of product design process by knowledge value analysis	CIRP Design 2012 – Sustainable Product Development, ed. Springer, ISBN 978-1-4471-4507-3, pp.207-217 DOI 10.1007/978-1-4471-4507-3_20
2012	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Extended value chain modelling and simulation for mass customization implementation	Journal of Intelligent Manufacturing 23, issue 6
2011	A. Bernard, J. Daaboul, C. Da Cunha, F. Laroche	Mass Customisation as a Competitive Factor for Sustainability	Ouvrage collectif *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, Springer, pp. 18-25
2011	F. Laroche, J.-L. Kerouanton, A. Bernard	A case study of capitalisation and valorisation of our technical heritage	Global Product Development, Editions Springer, pp.521-533 ISBN 978-3-642-15973-2
2011	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Knowledge Management, Value Chain Modelling and Simulation as Primary Tools for Mass Customization	Global Product Development, Editions Springer, pp.421-426, International Conference on Concurrent Enterprising, Jun 2008, Leiben, Netherlands, ISBN 978-3-642-15973-2
2009	F. Laroche, M. Cotte, J.-L. Kerouanton, A. Bernard	L'image virtuelle comme source de connaissance pour le patrimoine technique et industriel : Comment allier Histoire et Ingénierie ?	132ème congrès national des sociétés historiques et scientifiques CTHS, Arles, 13 p., 2007, Extrait de : *Genres et usages de la photographie* (édition électronique www.cths.fr) sous la direction de Bertrand Lavédrine, 2009, Editions du CTHS, pp. 53-64

2008	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Knowledge management for industrial heritage	Ouvrage collectif *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management*, Editions Springer, pp.307-330, ISBN 978-3-540-78430-2, DOI 10.1007/978-3-540-78431-9, ouvrage publié avec le soutien du réseau d'excellence européen VRL-KciP
2007	M. Cotte, F. Laroche	Le monumentalisme et la mise en scène des techniques à l'époque de Jules Verne	Colloque « Jules Verne ou la science en drame », 2005, Museum d'histoires naturelles de Nantes, Revue Jules Verne n°25, 136 p. ISBN 978-2-901811-34-3
2007	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	3D digitalization for patrimonial machines	in Future of Product Development, Ed. Springer, pp.397-408 ISBN 978-3-540-69819-7
2005	M. Cotte, F. Laroche, A. Bernard	Le patrimoine des machines anciennes et la Conception Assistée par Ordinateur	3ème rencontre de l'Association Patrimoine et Mémoires d'entreprise, Avril 2005, Musée des Arts-et-Métiers, Paris, ouvrage à paraître – www.patrimoine-et-memoire.com
1999 - 2000	Participation à l'écriture et réalisation de la mise en page d'un dossier de candidature au patrimoine mondial de l'UNESCO en collaboration avec Michel Cotte (Professeur des Universités, Histoire des Techniques, expert de l'ICOMOS pour le patrimoine mondial de l'UNESCO) : « *Le Train Jaune dans les Pyrénées Orientales* »		

3.2.6 Conférences internationales avec comité de lecture et actes

2016 Juin	M. Ouamer-Ali, F. Belkadi F. Laroche, S. Remy, A. Bernard	Points of View Classification: A concept to Manage Knowledge Multi-representation in CAD Models and PDM/PLM Systems	conference CAD 2016, pp.178-182 DOI : 10.14733/cadconfP.2016.178-182
2016 Juin	M. Quantin, B. Hervy, F. Laroche, A. Bernard	Supervised Process of Un-structured Data Analysis for Knowledge Chaining	26th CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 6 p.
2016 Avril	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Muséologie, patrimoine, humanités numériques et 3D	Conférence Digital Intelligence, Apr 2016, Québec, Canada, 7 p.
2015 Oct.	M.-I. Ouamer-Ali, F. Laroche, S. Remy, A. Bernard	Knowledge and Information Structuring in Reverse Engineering of Mechanical Systems	12th International Conference on Product Lifecycle Management, octobre 2015, Doha, Qatar www.plm-conference.org
2015 Sept.	M. Quantin, B. Hervy, F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Semantic integration in cultural heritage 3D modeling for multi-dimension access to historical knowledge: mass customization for cultural heritage 3D models	Digital Heritage International Congress, Granada, Espagne, 4 p.
2015 Sept.	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	3D modélisation informatique et patrimoine industriel	Industrial Heritage in the 21st Century: New Challenges, TICCIH, Lille, France –*à paraître*
2015 Juin	M.A. Dhuieb, F. Laroche, A. Bernard	Context-awareness: a key enabler for ubiquitous access to manufacturing knowledge	48th CIRP Conference on manufacturing systems - CIRP CMS, Ischia, Italy
2015 Mai	M.A. Dhuieb, F. Laroche, F. Belkadi, A. Bernard	Activity theory based context model: application for enterprise intelligent assistant systems	IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing, May 2015, Ottawa, Canada
2014 Déc.	M.A. Dhuieb, F. Belkadi, F. Laroche, A. Bernard	Thinking factory for the future: from PLM to augmented reality	conference EuroVR, Dec 2014, Bremen, Germany
2014 Sept.	B. Hervy, F. Laroche, B. Lam, V. Tourre, M. Servières, J.-L. Kerouanton, A. Bernard	Historical Knowledge Management Through Virtual Reality: Theoretical Aspects and Experiment Proposal	Digital Intelligence, Sep 2014, Nantes

2014 Juil.	R. Kumar Gupta, P. Sreenu, A. Bernard, F. Laroche	Process Information Model for Sheet Metal Operations	11th International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2014, Yokohama, Japon www.plm-conference.org
2014 Juil.	M.A. Dhuieb, F. Belkadi, F. Laroche, A. Bernard	Interoperability framework for supporting information-based assistance in the factory	11th International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2014, Yokohama, Japon www.plm-conference.org
2014 Juil.	R. Kumar Gupta, P. Sreenu, A. Bernard, F. Laroche	Process Information Model for Sheet Metal Operations	11th International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2014, Yokohama, Japon www.plm-conference.org
2014 Sept.	B. Hervy, F. Laroche, J.-L. Kerouanton, A. Bernard, C. Courtin	Augmented historical scale model for museums: from curation to multi-modal promotion	Laval Virtual VRIC 14, Apr 2014, Laval, France
2014 Avril	M.-I. Ouamer-Ali, F. Laroche, A. Bernard, S. Remy	Toward a methodological knowledge based approach for partial automation of reverse engineering	24th CIRP Design conference, Milan, Italie, 6 p
2014 Mars	M.A. Dhuieb, F. Belkadi, F. Laroche, A. Bernard	An Info*Engine based architecture to support interoperability with Windchill system	I-ESA conference, 7th International Conference on Interoperability for Enterprises Sytems and Applications. Workshop Standardisation Developments for Enterprise Interoperability and the Manufacturing Service Domain, Albi, France
2013 Déc.	M.A Dhuieb, F. Laroche, A. Bernard	Toward a cognitive based approach for knowledge structuring	IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), pp.407-412 ISBN : 978-1-4799-1-1543-9
2013 Nov.	N. Ma, F. Laroche, B. Hervy, J.-L. Kerouanton	Virtual conservation and interaction with our cultural heritage: Framework for multi-dimension model based interface	Digital Heritage International Congress, Marseille, pp.323 – 330, DOI: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743756
2013 Oct.	M.A. Dhuieb, F. Laroche, A. Bernard	Multi-scale structuring of enterprise's knowledge: Towards an ubiquitous virtual assistant	9th International Conference on Integrated Design and Production, CPI'13. Tlemcen, Algérie ISBN : 978-9931-9117-0-8
2013 Juil.	B. Hervy, F. Laroche, A. Bernard	Co-working for knowledge management in cultural heritage: towards a PLM for museum	10th International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2013, Nantes, France. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol.409, Editions Springer Berlin Heidelberg DOI : 10.1007/978-3-642-41501-2 www.plm-conference.org
2013 Juil.	M.A. Dhuieb, F. Laroche, A. Bernard	Digital Factory Assistant: Conceptual Framework and Research Propositions	10th International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2013, Nantes, France. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol.409, Editions Springer Berlin Heidelberg DOI : 10.1007/978-3-642-41501-2 www.plm-conference.org
2013 Juin	F. Le Pavic, F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Vers une extension de la modélisation d'entreprise pour la rétro-conception de sites industriels disparus : cas d'étude de l'Arsenal de la Marine de Lorient	10ème Congrès International de Génie Industriel, La Rochelle, 8 p.

2012 Déc.	B. Hervy, F. Laroche, J.-L. Kerouanton, A. Bernard	Advanced virtual reality visualization systems based on a meta-model dedicated to historical knowledge	3rd IEEE International Conference on Cognitive Info communications - December 2-5, 2012, Kosice, Slovakia, pp.225-230, DOI : 10.1109/CogInfoCom.2012.6421984
2012 Nov.	B. Hervy, R. Billen, F. Laroche, C. Carré, M. Servieres, M. Van Ruymbeke, V. Tourre, V. Delfosse, J.-L. Kerouanton	A generalized approach for historical mock-up acquisition and date modelling: towards historically enriched 3D city models	3U3D conference, utility of 3D city models, EDP Sciences, pp.02-09, France
2012 Août	R. Billen, C. Carré, V. Delfosse, B. Hervy, F. Laroche, D. Lefevre, M. Servieres, M. Van Ruymbeke	3D historical models: the case studies of Liege and Nantes	European COST action TU801, workshop on Semantic Enrichment of 3D city models for sustainable urban development
2012 Juil.	B. Hervy, F. Laroche, A. Bernard	An information system for driving the future PLM for museum: the DHRM, digital heritage reference model	ASME, 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis, July 2-4, 2012, Nantes, France www.asmeconferences.org/ESDA2012
2012 Juil.	F. Laroche, D. Lefèvre, M. Servières, B. Hervy, A. Bernard	Intelligent reverse-engineering segmentation: automatic semantic recognition of large 3D digitalized cloud of points dedicated to heritage objects	ASME, 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis, July 2-4, 2012, Nantes, France www.asmeconferences.org/ESDA2012
2011 Nov.	M. Cotte, F. Laroche	Le patrimoine technoscientifique et les nouvelles techniques d'ingénierie : des perspectives de développement et des métiers nouveaux	17ème symposium scientifique de l'ICOMOS, siège de l'UNESCO, Paris
2011 Oct.	F. Laroche, M. Servieres, D. Lefevre, J.-L. Kerouanton	Where Virtual Enhances Physical Mock-Up: A Way to Understand our Heritage	10th IEEE international symposium on mixed and augmented reality, ISMAR, Basel, Suisse, 6 p., nominé pour les best paper award
2011 Nov.	J. Daaboul, C. Da Cunha, F. Laroche, A. Bernard	Value of personalized products: modelling the customer perception	World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC), USA
2010 Nov.	J.-L. Kerouanton, F. Laroche	History promotes technical culture thanks to pedagogical project: An inter-disciplinary team dedicated to virtual reality development. A case study with DCNS Indret	3ème conférence internationale History of Science in Education and training in Europe, Barcelone , Espagne http://4eshs.iec.cat/entrada.asp?epigraf_contingut=5
2010 Oct.	R. Chenouard, C. Da Cunha, F. Laroche, A. Bernard	Model-based design of exploitation guidelines	Proceedings of IDMME - Virtual Concept 2010
2010 Août	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Advanced Industrial Archaeology and Virtual Museography	Colloque international ICOTECH – TICCIH "Reusing the industrial past", session "Digital uses for museology: a new way to describe technical and industrial heritage", Tampere, Finlande
2010 Juil.	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	PLM Requirements for Mass Customization	7th International Conference on Product Lifecycle Management, Jul 2010, Bremem, Allemagne www.plm-conference.org
2010 Juin	J. Daaboul, F. Laroche, A. Bernard	Determining the CODP Position by Value Network Modelling and Simulation	conférence ICE 2010, Lugano, Suisse, 8 p. - www.ice-conference.org
2010 Juin	N. Jufer, J. Daaboul, J. Bathelt, F. Laroche, D. Politze, A. Kunz, A. Bernard	Performance Factory in the context of Mass Customization	conférence ICE 2010, Lugano, Suisse, 8 p. - www.ice-conference.org

2010 Avril	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Creating interactivity of our heritage stored in Museums : Experimentation with Château des Ducs de Bretagne History Museum of Nantes	Conférence scientifique VRIC, Salon Laval Virtual, Laval, France ISBN 2-9515730-9-X www.laval-virtual.org
2010 Avril	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Knowledge Management for Mass Customization	20th International CIRP Design conference, Apr 2010, Nantes, France
2010 Mars	J.-L. Kerouanton, F. Laroche	Technical History, virtual reality development, and pedagogical assessment: an inter disciplinary team for the "Nantes1900" project	Workshop européen "History of Science and Technology (HST), ICT Resources and Methods for Inquiry Based Science Teaching (IBST)" organisé dans le cadre du projet FP7 "Mind the gap", Brest http://pahst.bretagne.iufm.fr/?p=84
2009 Oct.	A. Bernard, F. Laroche, C. Da Cunha	Models and methods for knowledge formalisation in a PLM context	Keynote paper, 3rd International Congress design and Modelling of Mechanical Systems (CMCS), Hammamet, Tunisie
2009 Oct.	F. Laroche, A. Bernard	How to inject ancient know-how for future design: using advanced industrial archaeology during pedagogical projects	Conférence Designing Pleasurable Products and Interfaces (DPPI), Compiègne, France, 8 p.
2009 Sept.	A. Bernard, F. Laroche, S. Remy	New digital engineering methods for virtual and rapid product development	Keynote paper, VR@P conference, Leiria, Portugal
2009 Oct.	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Implementing mass customization: literature review	Conférence internationale MCPC, Helsinki, Finlande
2009 Juin	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Knowledge Management, Value Chain Modelling and Simulation as Primary Tools for Mass Customization	Conférence ICE, Leiben, Pays-Bas, 7 p. www.ice-conference.org
2009 Fév.	F. Laroche	Vers un nouveau mode de représentations de notre patrimoine industriel : l'apport du virtuel par l'Archéologie Industrielle Avancée	Symposium sur la Gestion et la mise en public des collections universitaires, Strasbourg - organisé dans le cadre d'une collaboration franco-québécoise Vidéo des actes : www.canalc2.tv
2008 Avril	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Virtualization of ancient technical objects: a new design process and its inter-disciplinary team	Conférence CIRP Design Seminar, Twente University, Pays-Bas, 6 p. www.cirp.net
2007 Juin	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Alphonse Duvergier: its life, its company and its famous Steam Engine	Conférence IFToMM, Besancon, France, 8 p. - www.iftomm2007.com
2007 Mai	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Reverse engineering for industrial heritage: 3D digitalization	Conférence ICMA, Singapour, 18 p. www.icma07.org
2006 Juil.	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte, S. Deniaud	A new methodology for a new life of old technical machines	Conférence CIRP Design Seminar, Alberta, Canada, 12 p. - www.cirp.net
2006 Avril	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	A new approach for preserving the technical heritage	Conférence scientifique VRIC, Salon Laval Virtual, Laval, France, 11 p. ISBN 2-9515730-5-7 www.laval-virtual.org
2005 Nov.	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Méthode de construction de situations d'usages virtuelles de systèmes techniques anciens	Conférence CPI 2005, Casa Blanca, Maroc, 19 p. - www.supmeca.fr
2005 Sept.	O. Rochard, F. Laroche	Development of a Virtual Reality Interface coupled to a Knowledge database: An interactive application aimed to museum's public	Conférence ICHIM 2005, Paris, 15 p. - www.ichim.org

3.2.7 Conférences nationales avec comité de lecture et actes

2017 Avril	M. Quantin, F. Laroche, N. André, F. Villedieu	Numérisation, modélisation et impression 3D pour la recherche historique et la muséographie. Cas d'étude sur la salle à manger de Néron	6ème congrès de la SFHST, Strasbourg http://sfhststras2017.sciencesconf.org
2017 Avril	N. Bourgeois, M. Cotte, F. Laroche	L'intérêt patrimonial d'une restitution 3D chronologique du Pic-du-Midi	6ème congrès de la SFHST, Strasbourg http://sfhststras2017.sciencesconf.org
2017 Avril	C. Degrigny, R. Jeanneret, G. Köhler, F. Laroche, C. Baudin	SCHEMATEC : une méthodologie utilisant des outils basés sur le virtuel et une base de données au service de la conservation-restauration des objets scientifiques et techniques patrimoniaux	6ème congrès de la SFHST, Strasbourg http://sfhststras2017.sciencesconf.org
2017 Avril	A. Chandrakar, Y. Zhang, F. Laroche, A. Bernard	Development of an Integrated Method for Reassembly Fragmented	15ème colloque national AIP Primeca, La Plagne, 6 p. - www.aip-primeca.net
2017 Avril	M. Quantin, F. Laroche, N. Andre, F. Villedieu	Rétroconception et maquettage d'un bâtiment mécanique de la Rome antique	15ème colloque national AIP Primeca, La Plagne, 6 p. - www.aip-primeca.net
2017 Avril	M.-I. Ouamer-Ali, F. Laroche, S. Remy, A. Bernard	Ki4D : Nouvelle méthodologie de rétro-conception intégrée	15ème colloque national AIP Primeca, La Plagne, 6 p. - www.aip-primeca.net
2016 Juin	A. Chandrakar, Y. Zhang, F. Laroche, A. Bernard	Development of an integrated method to support the reassembly of fragmented objects	Journées annuelles de l'Association Européenne de Prototypage Rapide, Paris
2016 Mai	M. Quantin, B. Hervy, J.–L. Kerouanton, F. Laroche	Haruspex, outil de gestion de connaissances non structurées	*7ème Journées d'Informatique et Archéologie de Paris - JIAP*
2015 Juil.	B. Hervy, M. Quantin, F. Laroche, A. Bernard, J.-L. Kerouanton	Gestion de connaissances pour l'acquisition, le traitement et la valorisation des connaissances du patrimoine technique	26ème Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, Rennes, 12 p.
2015 Mars	M.-I. Ouamer-Ali, F. Laroche, S. Remy, A. Bernard	Structuration de la connaissance dans le cadre de la rétro-conception de systèmes mécaniques	14ème colloque national AIP Primeca, La Plagne, 6 p. - www.aip-primeca.net
2013 Oct.	M. A. Dhuieb, F. Laroche, F. Belkadi, A. Bernard	Vers un système ubiquitaire d'aide à la décision in-vivo dédié au Manufacturing	Conférence SCIGRAD 2013, Systèmes Complexes d'Information et de Gestion des Risques pour l'Aide à la Décision, Brest
2013 Août	M. A. Dhuieb, F. Laroche, A. Bernard	Un compagnon virtuel d'aide à la décision : une structuration d'informations multi-échelle de la connaissance in-extenso d'entreprise	22ème congrès de l'AFM, Bordeaux - www.afm.asso.fr
2012 Juin	B. Hervy, F. Laroche, J.-L. Kerouanton, A. Bernard	Projet Nantes1900 : les nouvelles technologies au service de la capitalisation des connaissances et de la valorisation du patrimoine historique	Colloque «patrimoines et humanités numériques : quelles formations? », Archives Nationales, LIT Verlag, pp.243-256, Paris, 13 p.
2011 Sept.	F. Laroche, C. Michel, J.-M. Martelle, P. Depincé	De la pédagogie active en Génie Industriel : une nouvelle forme de compagnonnage	20ème congrès de l'AFM, Bordeaux - www.afm.asso.fr
2011 Sept.	F. Laroche, J.-L. Kerouanton, M. Serviere	La reconversion de notre patrimoine technique et industriel : comment l'utiliser comme support aux projets pédagogiques	20ème congrès de l'AFM, Bordeaux - www.afm.asso.fr
2011 Mai	F. Laroche	Entre procédés industriels et histoire des techniques : un outil méthodologique pour comprendre et modéliser les modes de fonctionnement anciens. Cas d'étude de l'usine d'Indret de DCNS	132ème Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Nantes - www.cths.fr

2011 Avril	F. Laroche, J.-L. Kerouanton, M. Servière, A. Bernard	Un renouveau des pratiques muséographiques grâce au virtuel : un support à des applications pluridisciplinaire en pédagogie active	12ème colloque national AIP Primeca, Mont-Dore , 11 p. www.aip-primeca.net
2010 Nov.	F. Laroche, D. Pasturel, J.-L. Kerouanton, M.-E. Lecoq	Quand les NTIC rassemblent didactique et patrimoine	3ème journées démonstrateurs, club EEA, Angers, 10 p. - www.clubeea.org
2010 Sept.	F. Laroche, J.-L. Kerouanton, D. Serveille	Bézier s'invite dans la sauvegarde virtuelle de notre patrimoine industriel	Colloque International : Pierre Bézier et les machines-outils, Paris - http://www.univ-evry.fr/colloque-pierre-bezier – conférence invitée
2010 Avril	J.-L. Kerouanton, F. Laroche	Modélisation numérique et interprétation d'un paysage portuaire : les réseaux du port de Nantes au début du XXe siècle	135ème Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Neuchâtel - www.cths.fr
2010 Juin	F. Laroche, S. Le Loch, M. Cotte, J.-L. Kerouanton, A. Bernard	L'histoire, un medium de didactique aux Nouvelles Technologies	3ème journées nationales inter-IUFM sur la Recherche et la Formation des enseignants en épistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques (groupe de recherche ReForeHST), Caen, France, 6 p.
2009 Avril	J. Daaboul, Y. Xu, V. Vergara, J. Le Duigou, B. Chevallereau, P. Rauffet, F. Laroche, C. da Cunha, A. Bernard	Amélioration de la performance industrielle par l'ingénierie numérique	11ème colloque national AIP Primeca, La Plagne , 11 p. www.aip-primeca.net
2007 Mai	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	Un nouveau processus coopératif d'ingénierie et ses modes de représentations intermédiaires : les objets patrimoniaux à caractère industriel	Workshop du GT C2EI, GDR-MACS du CNRS, UTBM Belfort, 9 p.
2007 Avril	F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte	De l'objet à l'idée : entre reverse-engineering et archéologie industrielle ou comment refaire vivre le patrimoine industriel	10ème colloque national AIP Primeca, La Plagne , 12 p. ISBN 978-2-86272-451-5 www.aip-primeca.net
2007 Avril	S. Le Loch, F. Laroche	Maquettes numériques de machines patrimoniales pour l'enseignement de la CAO en projet tuteuré	10ème colloque national AIP Primeca, La Plagne , 11 p. ISBN 978-2-86272-451-5 www.aip-primeca.net
2004 Juil.	F. Laroche, C. Coppens, M. Le Coq	La connaissance au service de l'innovation	Conférence CONFERE 2004, Nantes, 15 p.

3.2.8 Conférences sans acte et communications invitées

2017 Juil.	F. Laroche	Vers une co-conception des applications digitales pour les Musées	Ecole d'été UDPN, Athènes, Grèce http://www.udpn.fr
2017 Juin	F. Laroche, A. Bernard, M.A. Dhuieb	Fondements d'un assistant ubiquitaire pour l'usine du futur par la structuration des connaissances in-extenso d'entreprise	Journées Scientifiques de l'Université de Nantes, colloque *Usine du futur - Smart Factories,* Nantes
2017 Juin	M. Quantin, F. Laroche	Hypothèse archéologique et restitution par impression 3D de la salle à manger de Néron	Séminaire interne, Laboratoire Arc'Antique, Nantes
2017 Mai	M. Quantin, B. Hervy, J.–L. Kerouanton, F. Laroche	Extraction d'expressions et mise en réseau d'un corpus	ADOC EDA2017, GDR-Madics, Lyon
2017 Fév.	G. Vidal, F. Laroche	Acteurs de la numérisation du patrimoine et usagers des patrimoines numérisés : conservation, médiation, éducation, création et recherche	Animation de la journée d'étude UDPN, 5 intervenants, Pompidou, Paris http://www.udpn.fr/www/spip.php?article179

2016 Sept.	F. Laroche, E. Peillard	Vers un patrimoine numérique des connaissances historiques : le projet Nantes1900	Digital Week, Nantes, France - http://www.nantesdigitalweek.com
2016 Sept.	F. Laroche	L'utilisation du numérique pour la conservation et la valorisation du patrimoine	Atelier numérisation 3D, Plateforme régionale d'innovation IDEV, Angers http://www.pri-idev.fr
2016 Juil.	F. Laroche	Structuration et visualisation des données patrimoniales	Ecole d'été UDPN, Florence, Italie
2016 Juin	G. Vidal, F. Laroche	Modélisation du patrimoine : usages et enjeux des applications numériques	9ème Journées d'études TIC.IS - **TIC Information et stratégies**, Jun 2016, Bruxelles, Belgique
2016 Juin	A. Chandrakar, Y. Zhang, F. Laroche, A. Bernard	Development of an integrated method to support the reassembly of fragmented objects	Assises annuelles de l'AFPR et de l'AEPR, Ecole Centrale Paris
2016 Juin	F. Laroche	De la maquette réelle à la maquette virtuelle : quelle représentation ? Quels usages ? Quelle véracité ? Une déontologie à affirmer...	Workshop annuel Université d'Evry - *La reconstitution - processus heuristique et/ou objet de médiation ?,* Paris
2016 Juin	F. Laroche, G. Vidal	Politique numérique et applications "durables" des institutions patrimoniales : usages et modélisation	Animation de la journée d'étude UDPN, 12 intervenants, Nantes http://www.udpn.fr/www/spip.php?article159
2016 Mars	F. Laroche	Le numérique au service du patrimoine historique et culturel	Journée numérique, organisée par Audencia Nantes
2016 Janv.	F. Laroche	Digital Humanities : Nantes1900, un projet entre musée, patrimoine et numérique	Conférence LU, Lieu Unique, Nantes
2015 Nov.	F. Laroche	Gestion des connaissances patrimoniales : Une expansion des Digital Humanities pour le patrimoine industriel	Journée d'étude : Formalisation des Connaissances & Intelligence Artificielle, Association Française d'Intelligence Artificielle, Paris
2015 Nov.	F. Laroche	La modélisation 3D du patrimoine	Conférence générale grand public, Direction des Affaires Culturelles de la Mairie de Nantes
2015 Nov.	F. Laroche, J.-L. Kerouanton, M. Quantin, B. Hervy, E. Bousquet	De Nantes1900 aux Salons Mauduit : interdisciplinarité, modélisation numérique - modélisation muséographique	Journée d'étude « Musée du futur », Museum d'Histoire Naturelle de Nantes – *actes à paraître*
2015 Oct.	M. Quantin, F. Laroche	Salons Mauduit : Proposition d'intégration des connaissances historiques et interaction	Séminaire d'histoire de l'art [Tours-Nantes]
2015 Sept.	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Numérisation du patrimoine, un état des lieux	Digital Week, Nantes, France http://www.nantesdigitalweek.com
2015 Sept.	F. Laroche	La 3D au service du patrimoine, invitation par l'association Arts Mathematica	Journées du patrimoine, Asnières-sur-Seine, France - http://www.arsmathematica.org
2015 Juil.	M.-A. Dhuieb, F. Laroche, A. Bernard	Multi-scale enterprise knowledge structuring: towards context-aware assistant system	Workshop PALM 2015, UTBM, Sochaux
2015 Juin	B. Hervy, F. Laroche, G. Vidal	Gestion de connaissances pour la muséologie	Journée d'étude : Archive(s) Numérisée(s) Nouvelles représentations, nouveaux usages, Paris
2015 Mai	F. Laroche	Un usage raisonné de la 3D pour l'histoire : vers une modélisation et une simulation numérique de sites industriels maritimes anciens	Journées d'histoire navale : *Mer, marins, innovations*, Ecole de la Marine Marchande, Nantes

2014 Déc.	F. Laroche	De l'objet patrimonial à l'application en réalité virtuelle	Ateliers 3D et Archéologie, DRAC 44, Nantes
2014 Oct.	F. Laroche, S. Rouquet	Digitalisation du patrimoine industriel : La poudrerie royale de St Chamas	Mairie de St Chamas, France
2014 Sept.	J.-L. Kerouanton, F. Laroche	Numérique, 3D, modélisation et représentations de l'histoire : cas du patrimoine industriel et technique	ANF, séminaire annuel de formation du CNRS, Fréjus
2014 Sept.	F. Laroche	**Digitalisation du patrimoine industriel : 2D, 3D, 4D...?**	Journées du patrimoine, invitation par la Maison Régionale de l'Architecture des Pays de Loire, Chantenay
2014 Juil.	M.-A. Dhuieb, F. Laroche, F. Belkadi, A. Bernard	Multi-scale enterprise knowledge structuring for context-aware knowledge restitution	Doctorial workshop of the 11th IFIP Int. Conf. on **Product Lifecycle Management**. Tokyo (Japan) July 07-09, 2014
2014 Juin	F. Laroche	La 3D comme source et approche de substitution ?	Journée d'études et d'échanges sur le **patrimoine maritime Nantes VS Marseille** http://jepatrimoineportuaire.blogspot.fr
2014 Mars	M. Simonnin, F. Laroche	De l'objet à l'image et de l'image à l'objet – Stratégies de valorisation patrimoniales : La laverie à sel du Musée des marais salants à Batz-sur-Mer (44)	Journée d'études PRI Innovation & Design d'Expériences de Visites, Fontevraud - http://www.pri-idev.fr
2013 Déc.	F. Laroche	Digitalisation de sources historiques hétérogènes pour la compréhension et la conservation du patrimoine industriel - Cas d'études : Nantes1900 et les forges de Paimpont	Ateliers 3D et Archéologie, DRAC 44, Nantes
2013 Août	F. Laroche	Modeling and driving industry by ancient design knowledge - Perspectives of development and new trades of merging industrial heritage and virtual tools	CIRP General Assembly, Copenhague, Pays-Bas
2013 Mars	F. Laroche, B. Hervy, C. Courtin, J.-L. Kerouanton, B. Guillet, A. Bernard	From heritage knowledge capitalization to cultural mediation thanks to augmented digital technologies: experimentation at the Museum of Nantes History	15th International Conference and Exhibition on Virtual Reality & Converging Technologies, Mar 2013, Laval
2013 Fév.	J.-K. Kerouanton, F. Laroche	Numérique, 3D, modélisation représentations de l'histoire	Séminaire Numérique, **CultureS et SociétéS**, Quartier de la Création, Nantes
2013 Janv.	C. Courtin, J.-K. Kerouanton, F. Laroche, B. Hervy	Comment associer exigence scientifique et dispositifs innovants dans la médiation culturelle ?	Keynote invité en plénière, SIME SITEM, Carroussel du Louvre, Paris
2012 Nov.	F. Laroche, A. Jeanjean	Le paradigme de l'ingénieur dans un imaginaire ubiquitaire : Rencontre entre un chercheur en Génie Industriel et un ingénieur de la Compagnie La Machine	Keynote invité en plénière, conférence Jules Verne 2012 & Journée AGILE Tour
2012 Janv.	J.-K. Kerouanton, F. Laroche	La modélisation 3D en histoire des techniques, contextes et usages	Séminaire Représenter le port et ses éléments en tant que macro-système technique : du modèle analogique au modèle numérique, CFV, Brest
2011 Nov.	F. Laroche	Créativité & technique – design industriel, architecture	Animateur de la table ronde, Forum Atlantique, Nantes
2011 Nov.	F. Laroche, M. Cotte	Comprendre les technologies du passé grâce aux outils des ingénieurs d'aujourd'hui : l'Archéologie industrielle Avancée	Fête de la science, Tournon, Ardèche

2011 Oct.	F. Laroche	L'Archéologie Industrielle Avancée : un nouveau métier entre Histoire et Ingénierie	Séminaire M3M, UTBM, Belfort
2011 Fév.	F. Laroche	Le patrimoine industriel est-il une famille d'objets ? Un éclairage sur le savoir-faire de l'Homme	Conférence invitée avec le plasturgiste Claude Haegel *Poser un regard sur un objet technique, c'est poser un regard sur l'homme*, L'Usine à Belfort, Techn'hom, Belfort
2011 Janv.	F. Laroche	Entre procédés industriels et histoire des techniques, vers une modélisation des modes de fonctionnement anciens	Séminaire mensuel du Centre d'histoire des techniques François Viète, Université de Nantes – conférence invitée
2010 Sept.	F. Laroche	History, heritage, a way for new interdisciplinary projects	Journée d'étude dans le cadre d'un échange France-Japon avec l'Université de Kumamoto *"France-Japon : étude interdisciplinaire et valorisation du patrimoine technique, approches croisées"*, Centre Viète, Fac de Sciences de Nantes – conférence invitée
2010 Juin	F. Laroche	L'apport des outils de la numérisation 3D et des méthodes de Gestion des connaissances pour les pratiques muséographiques : La question de la reconstitution de la laverie de sel de Batz-sur-Mer	Assises annuelles de l'AFPR et de l'AEPR, Ecole Centrale Paris
2010 Mars	F. Laroche, Y. Graton, J.-P. Martelle	Des espaces de travail collaboratif en pédagogie ? retour d'expériences à Centrale Nantes	Journée thématique « *Les outils de la conception collaborative : nouveaux développements, nouveaux apprentissages* » organisé par le pôle AIP Primeca Dauphiné Savoie, Grenoble - www.aip-primeca-ds.net/Journee-thematique-AIP-PRIMECA.html
2010 Fév.	J.-L. Kerouanton, F. Laroche	Innovation technologique et valorisation patrimoniale : valorisation de la maquette 1900 du port de Nantes exposé au Château de Nantes à partir d'un système informatique en 3D	Journée d'étude NEOPAT, programme de recherche régional, Angers
2009 Oct.	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	Nouveau Business Model et Nouvelles Stratégies Industrielles pour la Production Personnalisée	2ème journée du pole GSO interop-VLab, « *l'interopérabilité des applications d'entreprise* », ENI, Tarbes
2009 Oct.	J. Daaboul, A. Bernard, F. Laroche	L'influence de la Personnalisation du Produit sur la Performance de L'Entreprise Etendue	Journées des GDR du CNRS, groupe MACS, Polytech'Savoie, Annecy
2009 Juin	F. Laroche, C. Courtin	La maquette du port de Nantes : modélisation d'un territoire technique	Journée d'étude OSTIC, Château des Ducs de Bretagne, Nantes
2009 Juin	G. Buron, M. Simonnin, F. Laroche	La question de la reconstitution de la laverie de sel de Batz-sur-Mer	Journée d'étude OSTIC, Château des Ducs de Bretagne, Nantes
2009 Juin	F. Laroche	Participation à la table ronde Attention, savoirs en danger ; expériences pédagogiques	Forum « A toute vapeur », organisé par l'IUT Bordeaux 1 en collaboration avec Cap Sciences, Bordeaux
2008 Nov.	F. Laroche	L'Archéologie Industrielle Avancée ou comment refaire vivre le patrimoine industriel	Colloque 3D, Science et Patrimoine, ENSAM de Metz
2008 Juin	F. Laroche	Présentation des travaux de recherche sur le patrimoine numérique	Journée scientifique de l'Université de Nantes, Cité des Congrès, Nantes

2008 Mars	F. Laroche	Retour sur une nouvelle discipline : l'Archéologie Industrielle Avancée	Journées des GDR du CNRS, groupe MACS, GT IS3C et GT C2EI, Université de Roanne
2008 Mars	F. Laroche	Vers une première approche de l'Archéologie Industrielle Avancée	Colloque annuel du Laboratoire Epistémé, Université de Bordeaux – conférence invitée
2008 Janv.	F. Laroche	Le lavage du sel en pays Guérandais du XXème siècle : entre un mode artisanal et une tentative d'industrialisation / Une étude patrimoniale complexe menée grâce à l'archéologie industrielle avancée	Colloque annuel du Centre d'histoire des techniques François Viète, Université de Nantes
2007 Oct.	F. Laroche	Renaissance virtuelle d'un canot à vapeur d'Indret de 1861	Conférence d'intérêt général, DCNS, La Montagne (44) www.dcnsgroup.com
2007 Sept.	F. Laroche	Vulgarisation de machines anciennes	Nuit européenne des chercheurs www.nuitdeschercheurs-france.eu
2007 Mai	F. Laroche	Vers une muséologie numérique : méthodologie générale pour conserver et valoriser le patrimoine technique et industriel	4ème journée d'étude IHT, Nantes, *ouvrage à paraître*
2007 Avril	M. Cotte, F. Laroche, A. Bernard, S. Deniaud, S. Le Loch	Les maquettes numériques de patrimoine technique et industriel, exemples et enjeux muséographiques	Festival National d'Archéologie, Privas
2007 Mars	F. Laroche	Etat des lieux de la thèse : Contribution à l'amélioration des modèles de situation dynamique d'usage. Application à la muséographie numérique du patrimoine technique et industriel	Journées des GDR du CNRS, groupe MACS, GT IS3C, EIGSI, La Rochelle
2006 Oct.	F. Laroche	Les maquettes virtuelles dynamiques de machines anciennes : état de l'art et état des lieux des recherches menées	Workshop, Musée des Arts-et-Métiers, Paris
2006 Mai	F. Laroche	Le patrimoine technique et industriel : Comment allier Histoire et Ingénierie ?	12ème Colloque de la Recherche de l'Intergroupe des Écoles Centrales, CRIEC, Ecole Centrale de Paris
2006 Mai	F. Laroche	Etat des lieux de la thèse : Contribution à l'amélioration des modèles de situation dynamique d'usage. Application à la muséographie numérique du patrimoine technique et industriel	Journée de l'Ecole Doctorale Mécanique Thermique et Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes
2006 Avril	M. Cotte, J.-L. Kerouanton, F. Laroche, A. Bernard	Objet, société, technologies de l'information et de la communication : l'apport du patrimoine et de l'histoire des techniques dans la capitalisation des connaissances, la valorisation et les approches méthodologiques de l'ingénieur	131ème Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Grenoble - www.cths.fr
2005 Nov.	F. Laroche	Comment pérenniser la connaissance des objets du passé ?	Séminaire mensuel du Centre d'histoire des techniques François Viète, Université de Nantes
2005 Oct.	F. Laroche	Exposition muséographique et démonstration en Réalité Virtuelle de machines anciennes	Fête de la science www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fete/2005
2005 Sept.	F. Laroche, J.-L. Kerouanton	Le patrimoine : quel domaine d'application pour quel champ d'application ?	3ème journée d'étude IHT, Nantes

2005 Sept.	S. Le Loch, F. Laroche	Une démarche pédagogique pour l'apprentissage de la CAO par l'étude de machines anciennes : cas d'une presse à platine du Musée de l'imprimerie de Nantes	3ème journée d'étude IHT, Nantes
2005 Sept.	G. Buron, M. Simonnin, F. Laroche	Un objet industriel patrimonial voué à disparaître sauvé par le numérique : exemple de la machine à laver le sel de Batz-sur-Mer	3ème journée d'étude IHT, Nantes
2005 Juin	F. Laroche	Etat des lieux de la thèse : Contribution à l'amélioration des modèles de situation dynamique d'usage. Application à la muséographie numérique du patrimoine technique et industriel	Colloque annuel du Centre d'histoire des techniques François Viète, Université de Nantes
2005 Fév.	M. Cotte, F. Laroche	Une approche du patrimoine technique et industriel	Journée de l'Ecole Doctorale CLC, Nantes

3.3 Copie des publications scientifiques majeures

n°	Type	Année	Mots clés / thème	Référence
1	Ouvrage (direction, co-auteur)	2015	Bijection Projet/Objet Projet Nantes1900	Bertrand Guillet, Christophe Courtin, **Florent Laroche**, Jean-Louis Kerouanton **Nantes1900 - la maquette du port** Musée d'histoire de Nantes. Nantes, France. 88 p., 2015 ISBN : 978-2-906519-49-7
2	Ouvrage (auteur contributeur)	2017	Histoire des techniques industrielles	Maryse Lassalle, Corinne Arvieu, **Florent Laroche** **Le mariage du cuivre et de la vapeur, au cœur de la première révolution industrielle** Ouvrage collectif **Quatre mille ans d'histoire du cuivre - Fragments d'une suite de rebonds**, sous la direction de Michel Pernot, THEA, Ausonius éditions / Presses Universitaires de Bordeaux, pp.209-239 ISBN 979-10-300-0164-8
3	Ouvrage (auteur contributeur)	2011	Techniques de l'Ingénieur	Sébastien Remy, **Florent Laroche**, Alain Bernard **Numérisation 3D et prototypage rapide – exemples d'industrialisation de produits** Les Techniques de l'ingénieur, AG 3 404, 11 p.
4	Ouvrage (auteur contributeur)	2008	Méthode de gestion des Connaissances patrimoniales	**Florent Laroche**, Alain Bernard, Michel Cotte **Knowledge management for industrial heritage** Ouvrage collectif **Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management**, Editions Springer, pp.307-330 ISBN 978-3-540-78430-2, DOI 10.1007/978-3-540-78431-9
5	Revue	2017	Framework du SI patrimonial	Benjamin Hervy, **Florent Laroche**, Alain Bernard **Framework for historical knowledge management in museology** Int. J. Product Lifecycle Management, Inderscience, 2017, vol. 10 (1), pp.44-68
6	Revue	2016	Modèle de contexte Ubiquité informatique	**Florent Laroche**, Mohamed Anis Dhuieb, Farouk Belkadi, Alain Bernard **Accessing enterprise knowledge: a context-based approach** CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, 2016, 4p. DOI : 10.1016/j.cirp.2016.04.136
7	Revue	2008	Numérisation 3D Projet Batz-sur-Mer	**Florent Laroche**, Alain Bernard, Michel Cotte **Advanced Industrial Archaeology: A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects** Journal Virtual and Physical Prototyping, Vol. 3, n°2 – Effective Reverse-Engineering Issues, Taylor & Francis ISSN 1745-2759, pp.105-122
8	Conférence	2017	Démarche 4D	Mohamed-Islem Ouamer-Ali, **Florent Laroche**, Sébastien Remy, Alain Bernard **Ki4D : Nouvelle méthodologie de rétro- conception intégrée** 15ème colloque national AIP Primeca, La Plagne, 7 p.
9	Conférence	2016	Analyse sémantique semi-automatique de corpus	Matthieu Quantin, Benjamin Hervy, **Florent Laroche**, Alain Bernard **Supervised Process of Un-structured Data Analysis for Knowledge Chaining** 26th CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 6 p.
10	Conférence	2012	Reconnaissance sémantique automatique de nuages de points 3D	**Florent Laroche**, Daniel Lefevre, Myriam Servières, Benjamin Hervy, Alain Bernard **Intelligent Reverse-Engineering Segmentation: Automatic Semantic Recognition of Large 3D Digitalized Cloud of Points Dedicated to Heritage Objects** ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Jul 2012, Nantes, France