

# 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 provisoire d'Habilitation à Diriger des Recherches - Version Septembre 2017  
Soutenance 8 décembre 2017

Florent LAROCHE, Maître de conférences  
Laboratoire LS2N, Ecole Centrale de Nantes  
[florent.laroche@ec-nantes.fr](mailto:florent.laroche@ec-nantes.fr)

*Copie des 10 publications scientifiques majeures*





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 perspectives 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
- 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 futures recherches.

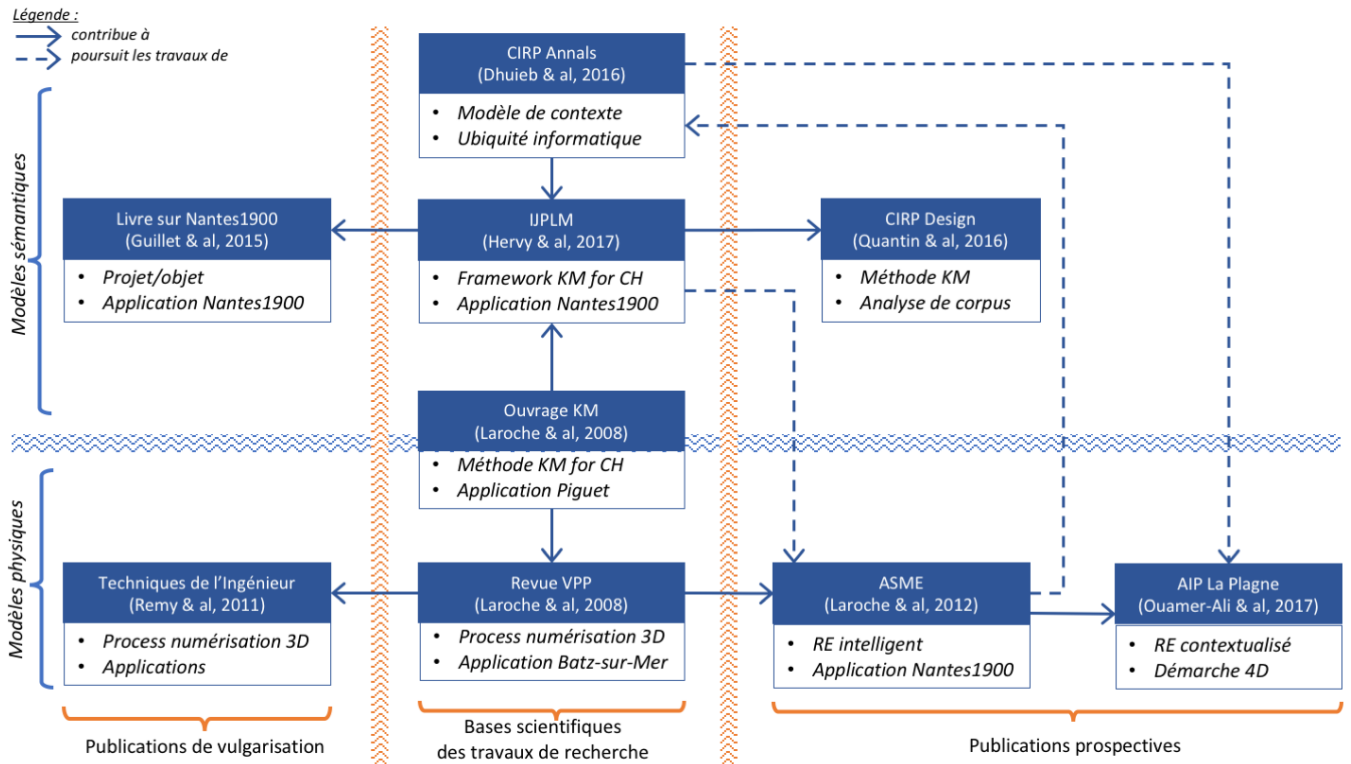


Figure 6 - Schéma synoptique des évolutions des publications majeures

n°	Type	Année	Mots clés / thème	Référence
1	Conférence	2017	Démarche 4D	Mohamed-Islem Ouamer-Ali, <b>Florent Laroche</b> , Sébastien Remy, Alain Bernard <b>Ki4D : Nouvelle méthodologie de rétro- conception intégrée</b> 15 <sup>ème</sup> colloque national AIP Primeca, La Plagne, 7 p.
2	Conférence	2016	Analyse sémantique semi-automatique de corpus	Matthieu Quantin, Benjamin Hervy, <b>Florent Laroche</b> , Alain Bernard <b>Supervised Process of Un-structured Data Analysis for Knowledge Chaining</b> 26 <sup>th</sup> CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 6 p.
3	Conférence	2012	Reconnaissance sémantique automatique de nuages de points 3D	<b>Florent Laroche</b> , Daniel Lefevre, Myriam Servières, Benjamin Hervy, Alain Bernard <b>Intelligent Reverse-Engineering Segmentation: Automatic Semantic Recognition of Large 3D Digitalized Cloud of Points Dedicated to Heritage Objects</b> ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Jul 2012, Nantes, France
4	Revue	2017	Framework du SI patrimonial	Benjamin Hervy, <b>Florent Laroche</b> , Alain Bernard <b>Framework for historical knowledge management in museology</b> Int. J. Product Lifecycle Management, Inderscience, 2017, vol. 10 (1), pp.44-68
5	Revue	2016	Modèle de contexte Ubiquité informatique	<b>Florent Laroche</b> , Mohamed Anis Dhuieb, Farouk Belkadi, Alain Bernard <b>Accessing enterprise knowledge: a context-based approach</b> CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, 2016, 4p. DOI : 10.1016/j.cirp.2016.04.136
6	Revue	2008	Numérisation 3D Projet Batz-sur-Mer	<b>Florent Laroche</b> , Alain Bernard, Michel Cotte <b>Advanced Industrial Archaeology: A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects</b> Journal Virtual and Physical Prototyping, Vol. 3, n°2 – Effective Reverse-Engineering Issues, Taylor & Francis ISSN 1745-2759, pp.105-122
7	Ouvrage (auteur contributeur)	2011	Techniques de l'Ingénieur	Sébastien Remy, <b>Florent Laroche</b> , Alain Bernard <b>Numérisation 3D et prototypage rapide – exemples d'industrialisation de produits</b> Les Techniques de l'ingénieur, AG 3 404, 11 p.
8	Ouvrage (auteur contributeur)	2008	Méthode de gestion des Connaissances patrimoniales	<b>Florent Laroche</b> , Alain Bernard, Michel Cotte <b>Knowledge management for industrial heritage</b> Ouvrage collectif <b>Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management</b> , Editions Springer, pp.307-330 ISBN 978-3-540-78430-2, DOI 10.1007/978-3-540-78431-9
9	Ouvrage (auteur contributeur)	2017	Histoire des techniques industrielles	Maryse Lassalle, Corinne Arvieu, <b>Florent Laroche</b> <b>Le mariage du cuivre et de la vapeur, au cœur de la première révolution industrielle</b> Ouvrage collectif <b>Quatre mille ans d'histoire du cuivre - Fragments d'une suite de rebonds</b> , sous la direction de Michel Pernot, THEA, Ausonius éditions / Presses Universitaires de Bordeaux, pp.209-239 ISBN 979-10-300-0164-8
10	Ouvrage (direction, co-auteur)	2015	Bijection Projet/Objet Projet Nantes1900	Bertrand Guillet, Christophe Courtin, <b>Florent Laroche</b> , Jean-Louis Kerouanton <b>Nantes1900 - la maquette du port</b> Musée d'histoire de Nantes. Nantes, France. 88 p., 2015 ISBN : 978-2-906519-49-7

# Ki4D : Nouvelle méthodologie de rétro-conception intégrée

Mohamed Islem OUAMER ALI  
LS2N – Ecole Centrale de Nantes  
1, rue de la Noë – S221  
44321 – Nantes – France  
m.ouamerali@gmail.com

Sébastien REMY  
ICD - LASMIS  
12, rue Marie Curie  
BP2060 – Troyes Cedex – Nantes  
Sebastien.remy@utt.fr

Florent LAROCHE  
LS2N – Ecole Centrale de Nantes  
1, rue de la Noë – S410  
44321 – Nantes – France  
Florent.laroche@ls2n.fr

Alain BERNARD  
LS2N – Ecole Centrale de Nantes  
1, rue de la Noë – S503  
44321 – Nantes – France  
Alain.bernard@ls2n.fr

*Résumé – La rétro-conception est une activité qui est utilisée dans l'industrie manufacturière dans le but de générer des modèles 3D d'artéfacts analysés, qui sont généralement utilisés pour la refabrication. Pour cela, la rétro-conception se base sur l'utilisation d'informations relatives à la forme du produit (géométrie) récupérées à travers la digitalisation de sa géométrie en utilisant des technologies de scan 3D, de palpation, ou autres [1]. Cependant, un artéfact ne se limite pas qu'à son enveloppe externe. En effet, plusieurs aspects peuvent être utilisés pour décrire le produit.*

*Dans notre vision, la rétro-conception est plutôt globale et permet d'analyser le produit sur tous ses aspects (formes, fonctions, comportements, etc.). Pour cela, nous avons développé la méthodologie Ki4D<sup>1</sup> pour la rétro-conception qui prend en compte différents aspects du produit d'une part en utilisant un modèle-produit, et d'une autre, l'intégration de données hétérogènes. Cette nouvelle méthodologie permet alors de créer des représentations du produit qui sont plus détaillées, et qui peuvent être utilisées pour des finalités autres que celle de la refabrication.*

*Mots-clés – Rétro-conception, intégration de données hétérogènes, modèle produit, gestion des connaissances*

## I. INTRODUCTION

La rétro-conception est généralement définie comme étant l'activité qui permet d'analyser un objet physique afin de produire un modèle de celui-ci [2]. Dans l'industrie manufacturière, cette activité est généralement utilisée pour la refabrication de produits en se basant sur les informations de formes notamment la géométrie. Le champ d'action de la rétro-conception se trouve alors très souvent limité à la refabrication de produits à l'aide d'informations géométriques.

Cependant, la rétro-conception peut être utilisée dans des contextes autres que celui de la refabrication. En ayant une vision analytique globale sur l'objet, plutôt que locale sur la géométrie, il serait possible de construire des représentations de l'objet en prenant en compte plusieurs aspects, tels que les fonctions ou les contraintes. De cette façon, on pourra utiliser différentes représentations selon le besoin. On pourra alors faire de la reconception, du reengineering, ou de la refabrication selon la finalité. Pour cela, nous suggérons l'amélioration de la rétro-conception à travers la prise en compte de ces différents aspects du produit, ainsi que les différentes finalités.

C'est à travers le projet ANR-METIS que cette étude a été réalisée. Ce projet avait pour objectif de créer un système d'aide à la rétro-conception en se basant sur l'intégration de données hétérogènes.

La méthodologie Ki4D a été développée dans l'optique d'intégration de données hétérogènes. 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, etc.

En se basant sur plusieurs algorithmes d'extraction d'informations à partir de celles-ci, les différentes informations pertinentes à intégrer sont extraites, et structurées selon un modèle-produit développé pour la rétro-conception. Elles sont ensuite soit utilisées comme tel, soit utilisées pour rechercher des produits similaires dans une base de données de produit. Nous partons du principe qu'un produit peut être un composant simple, ou un système.

Dans ce qui suit, nous présenterons dans un premier temps les différents travaux issus de l'état de l'art sur la rétro-

---

<sup>1</sup> « Knowledge integration in 4 dimensions »

conception, ainsi que différents concepts issus de l'ingénierie des connaissances qui sont pertinents dans notre travail. Nous présenterons ensuite la méthodologie Ki4D ainsi que son implémentation. Nous finirons par un cas d'étude qui illustrera la méthodologie.

## II. LA RETRO-CONCEPTION

### A. Définition

Plusieurs travaux existent dans l'état de l'art sur la rétro-conception plus spécialement dans l'industrie manufacturière, où on définit celle-ci comme étant une activité d'analyse de forme [3], de reproduction du modèle d'un objet [4], de reproduction d'une copie d'un objet [5], ou de la refabrication d'un produit [6]. Dans le domaine de l'informatique, la rétro-conception est vue comme étant une activité d'analyse dans le but de construire des représentations abstraites d'un artéfact [7].

Les différentes définitions relatives à l'industrie manufacturière tendent vers une définition de la rétro-conception orientée géométrie, sans prendre en compte les différents autres aspects du produit. C'est ce qui nous a poussé à formuler une nouvelle définition de la rétro-conception qui serait plus adéquate avec l'intégration d'autres aspects du produit que celui de la forme.

De notre point de vue, la rétro-conception est un processus d'analyse d'un artéfact qui permet d'identifier les différentes informations et connaissances relatives à celui-ci à travers une analyse des données de différents aspects. Il permet aussi d'élaborer des représentations de hauts niveaux d'abstraction qui permettent de remettre l'artéfact dans son contexte de conception initial selon la phase de vie voulue.

### B. La rétro-conception conventionnelle

Nous utilisons le terme de « rétro-conception conventionnelle » pour démarquer la rétro-conception classique de notre nouvelle méthodologie globale de rétro-conception.

La rétro-conception conventionnelle est composée de quatre parties distinctes [8] :

- Digitalisation et acquisition des données géométriques.
- Reconstruction surfacique.
- Segmentation et ajustement des surfaces.
- Création du modèle 3D final.

Dans la figure 1 nous pouvons voir l'intégration de la rétro-conception conventionnelle avec les quatre étapes par rapport au cycle de vie du produit. Cette intégration est faite au niveau de la conception détaillée, et est relative à la refabrication, ce qui revient à dire que de manière conventionnelle, la rétro-conception conduit à la construction d'une seule représentation du produit qui sera utilisée pour la refabrication.

Considérant que la rétro-conception est un processus d'analyse, il est alors possible de produire plusieurs représentations possibles, et les intégrer à différentes phases du cycle de vie du produit : l'intégration à la phase d'identification du produit permettra de réaliser un reengineering (redéfinition technique du produit), tandis qu'une intégration au niveau du concept avec la

spécification fonctionnelle permettra de réaliser une reconception (redéfinition fonctionnelle du produit).

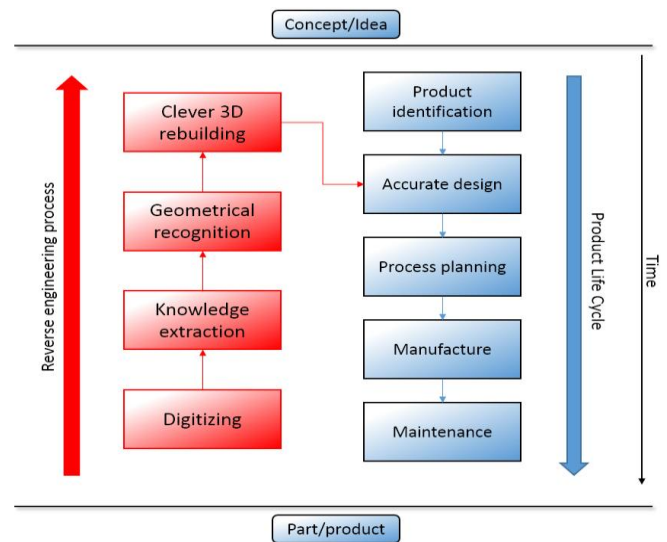


FIGURE 1. LE LIEN ENTRE LE CYCLE DE DEVELOPPEMENT DE PRODUITS ET LE PROCESSUS DE RETRO-CONCEPTION [8]

Nous pouvons donc constater que la rétro-conception conventionnelle restreint l'analyse d'un produit du fait de la restriction faite sur l'aspect analysé. Elle reste néanmoins intéressante puisque les différentes techniques et méthodes utilisées peuvent être réutilisées dans un contexte plus global. Il faudra alors travailler sur son intégration au niveau global.

### C. Méthodologies de rétro-conception

Plusieurs travaux ont été réalisés dans le but de formaliser des méthodologies de rétro-conception. Nous trouvons en premier lieu le projet REFAB [9] qui avait pour objectif de réaliser la rétro-conception d'objets à l'aide d'entités de fabrication. A partir d'un nuage de points issu de la digitalisation de l'objet, on faisait correspondre des entités de fabrication (telles que des trous borgnes, traversant, etc.) qui permettait de reconstruire un modèle 3D de l'objet. On a alors une première utilisation de la notion de connaissance avec les entités de fabrication.

Le projet MERGE [10], qui est la continuité du projet REFAB quant à lui, propose un système interactif de rétro-conception utilisant des agents pour l'extraction d'informations à partir de plans 2D et de modèles 3D. On commence alors à rendre hétérogènes les types de données analysées dans le cadre d'une rétro-conception.

Le projet VPERI [6], avait pour but de refabriquer des pièces de systèmes à longs cycles de vie dont les informations de conception et de fabrication sont manquantes ou inexistantes. Dans ce projet, ont été développés trois processus différents pour la réalisation finale de ces pièces : la rétro-conception, la reconception, et le reengineering. La rétro-conception est identifiée comme étant la refabrication de produits à l'identique, tandis que la reconception visait à réutiliser les mêmes spécifications techniques que la pièce analysée pour ensuite l'améliorer du point de vue fonctionnel tout en l'adaptant à son contexte d'utilisation global (dans le système). Finalement, le reengineering visait à réutiliser la conception détaillée de la pièce afin de mettre à jour ou de modifier des détails technologiques tels que l'utilisation de

nouveaux matériaux, ou de nouvelles techniques de fabrication, etc. Ce projet est l'un des premiers à avoir tenté d'élargir le champ d'action de la rétro-conception grâce à la prise en compte d'autres finalités d'utilisation.

Dans [11], l'auteur étudie les objets industriels à caractère patrimonial, et propose d'utiliser la rétro-conception afin de capitaliser les connaissances relatives à ces objets. Il propose ainsi le modèle DHRM qui a pour but de capitaliser les connaissances d'un objet dans la rétro-conception, et de fournir une représentation de cet objet. On commence alors à utiliser des modèles de capitalisation des connaissances pour représenter un objet.

Le projet PHENIX [8] avait pour but de proposer une méthodologie de rétro-conception basée sur la connaissance géométrique du produit. A partir d'un nuage de points, on identifie des entités de fabrication ou de conception qui vont permettre de reconstruire l'objet analysé. Il est alors possible de trouver plusieurs alternatives pour représenter l'objet à partir de ces entités. On propose alors d'utiliser une extension du modèle-produit CPM<sup>1</sup> pour représenter le produit, et prendre en compte les différentes alternatives de rétro-conception de celui-ci.

Finalement, dans les différentes propositions, nous pouvons constater les différents points d'amélioration de la rétro-conception en cherchant à élargir son périmètre d'action. On a utilisé des connaissances pour représenter le produit, structurer les informations à l'aide de modèles-produit, et identifié (implicitement) plusieurs finalités possibles de la rétro-conception. Cependant, il n'y a pas une méthodologie qui prend en compte tous ces points d'amélioration.

*D. Concepts et outils utiles pour la rétro-conception : Ingénierie des connaissances*

Nous avons clairement identifié deux points d'amélioration de la rétro-conception :

- Utilisation d'un modèle-produit pour la structuration des connaissances et la représentation du produit.
- Intégration de données hétérogènes.

Nous proposons d'explorer ces deux points à travers l'état de l'art relatif à l'ingénierie des connaissances.

*Modèles-produit*

Nous pouvons trouver dans l'état de l'art relatif à l'ingénierie des connaissances, plusieurs travaux sur les modèles-produit. Il est alors pertinent de prendre en compte ces différents travaux dans le but d'intégrer un modèle-produit à notre méthodologie de rétro-conception. Il est à noter que les concepts de données, informations, et connaissances seront utilisés pour expliquer cette partie. Plusieurs travaux ont traité ces concepts et leurs différences. Nous nous baserons sur la définition données dans [23].

Le modèle FBS [12] permet de caractériser le produit selon trois aspects (fonctionnel, structurel, et comportemental). Le modèle CPM [13] est un support générique extensible pour représenter le produit dans le PLM<sup>2</sup>. Le modèle holonique [14] permet de relier les parties physiques d'un produit à ses

<sup>1</sup> « Core Product Model » [14]  
<sup>2</sup> « Product Lifecycle Management » - Gestion du cycle de vie du produit

informations dans un contexte PLM. Le modèle FBS-PPRE [15] est plus générique, et permet d'étendre le modèle FBS pour décrire un ensemble d'artéfacts d'entreprise (qui englobe le produit). Le modèle PPO [16] a émergé dans le but de créer un espace d'échange entre différents modèles (modèle produit, modèle de processus, modèle organisationnel). La méthodologie MOKA [17] est une méthodologie de capitalisation des connaissances découpée en deux parties distinctes : une première partie informelle qui permet de capitaliser les connaissances (ICARE), et une partie formelle qui permet de modéliser les différentes connaissances d'un produit à travers un modèle-produit.

Tous ces modèles ont été développés dans des contextes de conception / développement de produit, ou dans le cadre du PLM. Afin de pouvoir les utiliser, il nous faudra les adapter à notre contexte : la rétro-conception.

*Formes de représentation de la connaissance*

L'intégration des données hétérogènes suppose l'extraction d'informations à partir de ces données. Il nous faudra alors cibler les informations dans ces données les extraire, et les faire correspondre à la structure d'information correspondante (fonction, géométrie, contrainte, etc.). Dans le but d'effectuer cette extraction, il nous faudra traiter chaque donnée hétérogène selon sa forme.

Dans [18] on propose le concept de forme de représentation, qui décrit cinq formes principales que peuvent prendre les connaissances : picturale, symbolique, linguistique, virtuelle, et algorithmique.

Dans la figure 2, on peut constater qu'une classification de livrables peut être faite grâce à ces formes de représentations. Mais il reste possible de classer un livrable sous plusieurs formes à la fois. Il est alors pertinent de décomposer chaque document, livrable, ou donnée hétérogènes en formes élémentaires (représentées par des informations élémentaires) pour pouvoir ensuite les classer.

Pictorial	Symbolic	Linguistic	Virtual	Algorithmic
Sketches Detailed drawings	Decision tables Production rules	Customer Requirements Design Rules, constraints	CAD Models CAE Simulations	Mathematical Equations
Charts Photographs	Flow charts FMEA diagram	Analogies Customer feedback	Virtual Reality simulations Virtual prototypes	Parametrizations Constraint Solvers
CAD model views	Assembly tree Fishbone diagrams Ontologies	Verbal communication	Animations Multimedia	Computer Algorithms Design/operational procedures

FIGURE 2. LIVRABLES CLASSES SELON LES FORMES DE REPRESENTATION DES CONNAISSANCES [19]

La prise en compte des formes de représentations des connaissances nous permettra alors d'identifier les différentes informations élémentaires pertinentes dans les données hétérogènes.

III. METHODOLOGIE K14D POUR LA RETRO-CONCEPTION

A. Evolution de la rétro-conception

Dans l'état de l'art, nous avons pu voir que les différents travaux sur la rétro-conception étaient concentrés sur l'aspect géométrique.

Nous proposons alors une nouvelle vision de la rétro-conception qui regroupe un ensemble d'améliorations :

- Le traitement des données hétérogènes et intégration des informations pertinentes qu'elles contiennent.



- La gestion des connaissances à travers un modèle-produit.

Le traitement des données hétérogènes suppose l'extraction d'informations pertinentes en vue de les utiliser pour construire des représentations du produit. Nous émettons alors l'hypothèse que des algorithmes d'extraction existent.

La méthodologie Ki4D que nous proposons permet d'améliorer la rétro-conception à travers l'intégration des données hétérogènes, la structuration des informations issues des données hétérogènes à travers l'utilisation d'un modèle-produit, et l'organisation du processus de rétro-conception à travers un modèle de processus.

La méthodologie Ki4D est définie à deux niveaux différents. Un niveau produit : permet de caractériser le processus de rétro-conception de manière statique, et identifie les différentes données d'entrée et sortie du processus. Un niveau processus : permet de caractériser le processus de manière dynamique, et identifie les différentes transitions opérées dans le processus.

### B. Présentation de la méthodologie

La méthodologie se base sur un espace en quatre dimensions (figure 3) défini par les axes principaux de l'espace :

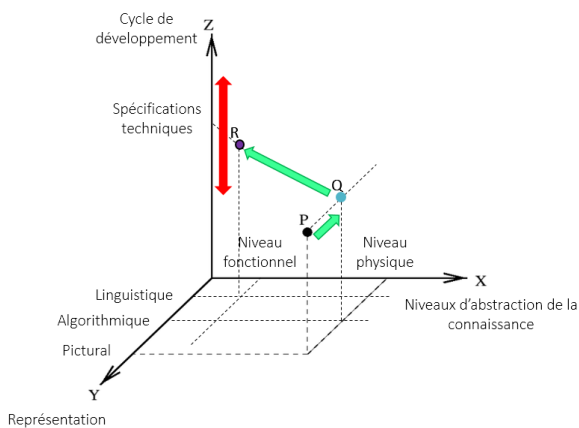


FIGURE 3. ESPACE KI4D SIMPLIFIE [20]

#### Les niveaux d'abstraction

Le premier axe permet d'identifier les différentes entités d'informations qu'on retrouve dans la description du produit (modèle-produit).

#### Les formes de représentation

Le deuxième axe permet d'identifier les formes dans lesquelles sont communiquées les informations.

#### La décomposition systématique

Le troisième axe permet de cibler les composants sujets à la rétro-conception dans le système global dans le cas où une partie du système est analysée.

#### Le cycle de vie

Le quatrième axe permet de fournir une échelle temporelle avec les différentes phases de vie du produit.

Ces quatre axes permettent alors de définir le processus de rétro-conception 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.

Alors le processus de rétro-conception est modulaire puisqu'on pourra construire des workflows de rétro-conception selon le contexte : en fonction des informations issues des données hétérogènes (états / points d'entrée), plusieurs sous-processus peuvent intervenir (transitions / vecteurs). Il est alors possible de construire un moteur de workflow en se basant sur la méthodologie Ki4D qui générera selon le contexte un workflow adéquat.

Il est à noter que l'espace Ki4D n'est pas un espace Euclidien où il peut y avoir des opérations entre vecteurs et points. L'espace est utilisé à des fins de schématisation puisque le processus de rétro-conception est défini dynamiquement à l'utilisation, et nous allons voir dans ce qui suit comment cela est-il fait.

### C. Utilisation de la méthodologie Ki4D

La figure 4 illustre le processus global de la méthodologie Ki4D pour réaliser la rétro-conception.

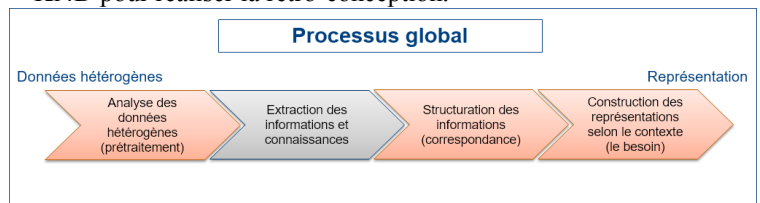


FIGURE 4. PROCESSUS GLOBAL DE LA METHODOLOGIE KI4D POUR LA RETRO-CONCEPTION

Le processus est décomposé comme suit :

#### Analyse des données hétérogènes

Le processus de rétro-conception commence avec l'identification des différentes données hétérogènes qui seront utilisées dans le processus.

Les différentes données hétérogènes sont sous formes composées. Il nous faudra donc les décomposer pour pouvoir extraire les informations à partir de formes élémentaires. Pour cela, les données hétérogènes sont alors prétraitées. L'étape de prétraitement consiste en la décomposition de chaque donnée hétérogène en formes élémentaires pour préparer l'extraction des informations à l'aide d'algorithmes d'extraction.

Dans l'espace Ki4D cela revient à identifier les points d'entrée relatifs à chaque donnée hétérogène. La figure 5 illustre le cas d'un fichier PDF.

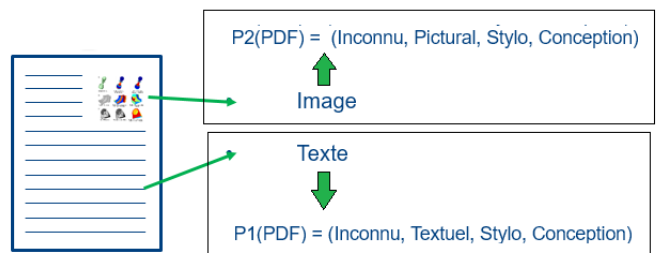


FIGURE 5. ANALYSE ET PRETRAITEMENT D'UN FICHIER PDF

#### Extraction des informations et connaissances

Dans cette partie, on utilise les algorithmes d'extraction des informations et connaissances afin d'analyser les données prétraitées, et d'extraire les informations qui nous intéressent dans le processus de rétro-conception.

La méthodologie Ki4D permet alors d'identifier les différents algorithmes d'extraction grâce aux différents points d'entrées identifiés dans l'étape précédente. Chacun de ces points d'entrée représente l'état initial de l'activité d'extraction. Il nous faut alors un état final (sortie) pour pouvoir définir l'algorithme. Pour cela, l'utilisateur choisi quelles sont les entités d'informations qu'il recherche en sortie, ce qui permettra de définir les coordonnées des points en sortie.

Avec l'identification des points de sortie, l'algorithme d'extraction qu'il faudra utiliser est alors reconnu et utilisé, et on procède avec l'extraction des informations.

### Structuration des informations

Dans cette partie, les différentes informations extraites à partir des données hétérogènes sont utilisées dans le but de construire une représentation du produit analysé.

C'est dans cette partie qu'intervient le modèle-produit, qui permettra d'agir comme une structure d'informations et regrouper les informations extraites dans les entités d'informations qui leurs correspondent.

### Construction des représentations

La méthode Ki4D permet de construire des représentations du produit selon le besoin. Ainsi, en sortie du processus de rétro-conception, il est possible d'avoir des représentations du produit selon le besoin exprimé par l'utilisateur à travers le concept de facettes [21]. Nous ne détaillerons pas cette opération dans cet article.

### D. Modèle Ki4D pour la gestion du processus de rétro-conception

Afin d'implémenter le modèle Ki4D dans un système d'information pour la rétro-conception, nous proposons le modèle de processus de la méthodologie Ki4D afin de gérer les différentes activités remplies par celle-ci.

Dans la figure 6 est représenté le modèle de processus de la méthodologie Ki4D. La classe « RcProcess » permet de gérer les différents processus de rétro-conception dans un projet. C'est la classe « RcActivity » qui prend en compte la gestion des activités de prétraitement, d'extraction d'informations ainsi que de construction des représentations à travers la classe « Facet » qui englobe le modèle-produit pour cela.

## IV. CAS D'ETUDE

Afin d'illustrer la méthodologie Ki4D nous proposons un cas d'étude issu du projet ANR-METIS : l'attelage mobile d'un moteur monocylindre diesel (figure 7).

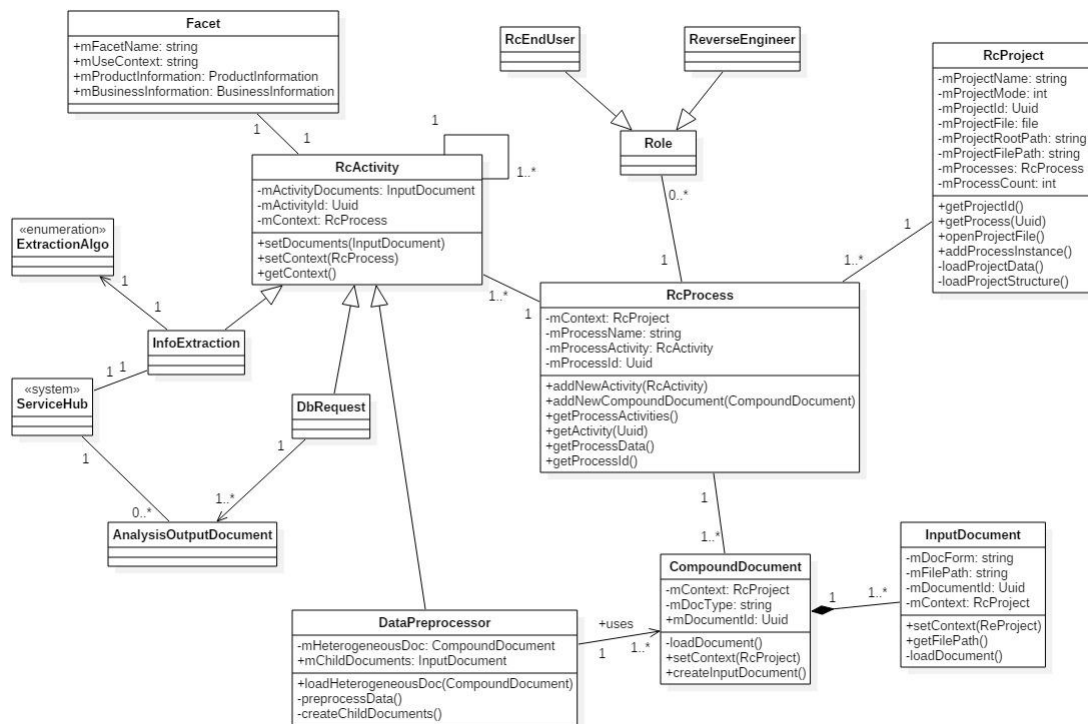


FIGURE 6. MODELE DE PROCESSUS DE LA METHODOLOGIE KI4D

Dans ce cas d'étude, l'objectif est de construire une représentation qui regroupe l'ensemble des informations structurelles du produit dans le but de réaliser un reengineering d'une partie du système. Pour cela, nous aurons besoin de la structure du produit.

Données hétérogènes

Nous nous baserons sur les différentes données hétérogènes fournies par un des partenaires du projet ANR-METIS : des nuages de points issus de scans des pièces du Images prises des différents composants du système et un fichier texte représentant la fiche technique du système.

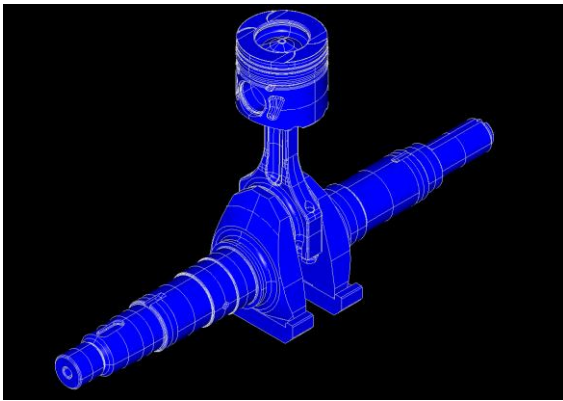


FIGURE 7. ATTELAGE MOBILE D'UN MOTEUR MONOCYLINDRE DIESEL

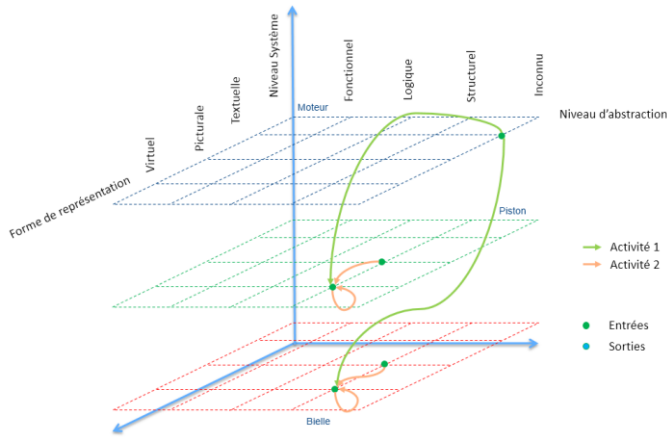


FIGURE 8. SCHEMA DE L'ESPACE Ki4D POUR LE CAS DU MONOCYLINDRE

La méthodologie de rétro-conception générera alors deux activités distinctes relatives aux données hétérogènes en entrée, et la représentation en sortie (figure 7).

Chacune des données hétérogènes génère un point dans l'espace Ki4D comme suit :

- P1(STL) = (Structure, Virtuel, Bielle, Conception)
- P2(STL) = (Structure, Virtuel, Piston, Conception)
- P3(JPEG) = (Structure, Pictural, Bielle, Conception)
- P4(JPEG) = (Structure, Pictural, Piston, Conception)
- P5(PDF) = (Structure, Textuel, Moteur, Conception)

Les informations relatives à la représentation en sortie permettent de générer les points de sortie suivants :

- P6(sortie) = (Structure, Virtuel, Piston, Conception)
- P7(sortie) = (Structure, Virtuel, Bielle, Conception)

La réalisation des deux activités de rétro-conception dans ce cas permet d'avoir en sortie, les informations structurelles du produit comme illustrées dans la figure 9.

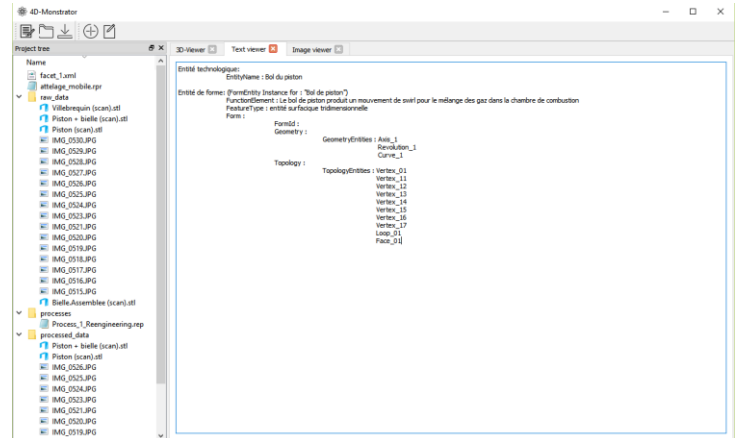
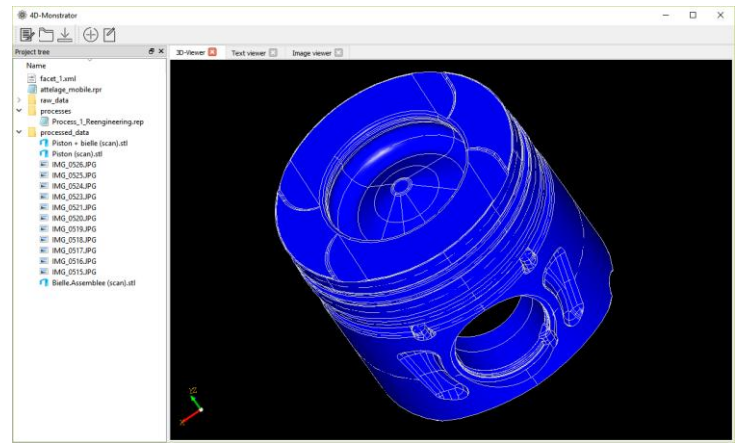


FIGURE 9. RESULTATS DE LA RETRO-CONCEPTION DU MONOCYLINDRE

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### A. Conclusion

Dans le but d'améliorer le processus de rétro-conception, nous avons proposé la méthodologie Ki4D.

Cette méthodologie permet d'aborder la rétro-conception d'un produit de plusieurs points de vue différents relatifs aux aspects du produit autres que celui de la géométrie.

Pour cela, la rétro-conception prend en compte différentes données hétérogènes afin de les intégrer dans un modèle-produit qui constituera alors la représentation de celui-ci.

La méthodologie Ki4D a été développée comme étant une approche modulaire et permet de formaliser la rétro-conception pour différents objectifs : reconception, reengineering, refabrication.

### B. Perspectives

La méthodologie Ki4D doit implémenter les différents algorithmes d'extraction qui représentent les transitions entre les points relatifs aux états du processus. Nous pouvons pour cela utiliser 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 [22], et la vision d'ordinateur pour les données picturales.



Nous avons défini l'état du processus à travers 4 axes principaux. Il est possible que la définition change avec l'intégration d'un nouvel axe, ce qui engendrera l'évolution de la méthodologie et de l'espace.

## VI. REFERENCES

- [1] [Kumar & al. 13] Kumar, A., Jain, P. K., & Pathak, P. M. (2013). REVERSE ENGINEERING IN PRODUCT MANUFACTURING: AN OVERVIEW. *DAAAM International Scientific Book*, 665-679.
- [2] [Ye & al. 08] Ye, X., Liu, H., Chen, L., Chen, Z., Pan, X., & Zhang, S. (2008). Reverse innovative design—an integrated product design methodology. *Computer-aided design*, 40(7), 812-827.
- [3] [Sokovic & al. 06] Sokovic, M., & Kopac, J. (2006). RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1), 398-403.
- [4] [Urbanic & al. 06] Urbanic, R. J., ElMaraghy, H. A., & ElMaraghy, W. H. (2008). A reverse engineering methodology for rotary components from point cloud data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(11-12), 1146-1167.
- [5] [Bernard & al. 09] Bernard, A., Laroche, F., Sébastien, R., & Durupt, A. (2010). New trends in Reverse-Engineering: Augmented-Semantic models for redesign of existing objects. *Ouvrage collectif Reverse-Engineering*, 27-pages.
- [6] [VPERI, 03] Army research office. Virtual parts engineering research initiative, <http://www.cs.utah.edu/gdc/Viper/Collaborations/VPERI-Final-Report.pdf>.
- [7] [Chikofsky & al. 91] Chikofsky, E. J., & Cross, J. H. (1990). Reverse engineering and design recovery: A taxonomy. *IEEE software*, 7(1), 13-17.
- [8] [Durupt, 10] Durupt, A. (2010). Définition d'un processus de rétro-conception de produit par intégration des connaissances de son style de vie (Doctoral dissertation, Troyes).
- [9] [Thompson & al. 99] Thompson, W. B., Owen, J. C., Germain, H. D. S., Stark, S. R., & Henderson, T. C. (1999). Feature-based reverse engineering of mechanical parts. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 15(1), 57-66.
- [10] [Musuvathy & al. 05] Musuvathy, S. R., Johnson, D. E., Germain, H. J. D. S., Cohen, E., Xu, C., Riesenfeld, R. F., & Henderson, T. C. (2005, January). Integrating multiple engineering resources in a virtual environment for reverse engineering legacy mechanical parts. In *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (pp. 1149-1158).
- [11] [Laroche, 07] 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, Ecole Centrale de Nantes (ECN); Université de Nantes).
- [12] [Gero, 90] Gero, J. S. (1990). Design prototypes: a knowledge representation schema for design. *AI magazine*, 11(4), 26.
- [13] [Fenves & al. 04] Fenves, S. J. (2001). *Core Product Model for Representing Design Information*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- [14] [Terzi & al.05] Terzi, S., Cassina, J., & Panetto, H. (2006). Development of a metamodel to foster interoperability along the product lifecycle traceability. In *Interoperability of Enterprise Software and Applications* (pp. 1-11). Springer London.
- [15] [Labrousse, 08] Labrousse, M., & Bernard, A. (2008). FBS-PPRE, an enterprise knowledge lifecycle model. In *Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management* (pp. 285-305). Springer Berlin Heidelberg.
- [16] [Noël & al. 08] 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*, 21(2), 139-145.
- [17] [MOKA, 01] Managing Engineering Knowledge, MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Application, Edited by Melody Stokes for the MOKA Consortium, 2001.
- [18] [Horváth & al. 02] Owen, R., & Horváth, I. (2002, April). Towards product-related knowledge asset warehousing in enterprises. In *Proceedings of the 4th international symposium on tools and methods of competitive engineering, TMCE* (Vol. 2002, pp. 155-70).
- [19] [Chandrasegaran & al. 12] 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*, 45(2), 204-228.
- [20] [Ouamer-Ali & al. 15] Ali, M. I. O., Laroche, F., Remy, S., & Bernard, A. (2015, March). Structuration de la connaissance dans le cadre de la rétro-conception de systèmes mécaniques. In *Colloque de l'AIP PRIMECA-Avril 2015-La Plagne*.
- [21] [Ouamer-Ali & al. 17] Facet Based Approach for the Management of Information multi points-of-view in product modelling (CAD&App) – Accepted, under publication.
- [22] [Bruneau & al. 16] Bruneau, M., Durupt, A., Vallet, L., Roucoules, L., & Pernot, J. P. (2016). A THREE-LEVEL SIGNATURE BY GRAPH FOR REVERSE ENGINEERING OF MECHANICAL ASSEMBLIES.
- [23] [Bernard & al. 08] Bernard, A., & Tichkiewitch, S. (Eds.). (2008). *Methods and tools for effective knowledge life-cycle-management* (Vol. 11). Berlin: Springer.



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SciVerse ScienceDirect

Procedia CIRP 00 (2016) 000–000



[www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia)

26th CIRP Design Conference

# Supervised Process of Un-structured Data Analysis for Knowledge Chaining

Matthieu Quantin<sup>a,b,\*</sup>, Benjamin Hervy<sup>a</sup>, Florent Laroche<sup>a</sup>, Alain Bernard<sup>a</sup>

<sup>a</sup>École Centrale de Nantes, IRCCyN UMR-CNRS\_6597, Nantes, France

<sup>b</sup>Université de Nantes, CFV EA\_1161, Nantes, France

\* Corresponding Author Tel.: +33-2-40-37-69-51 E-mail address: [matthieu.quantin@ircsyn.ec-nantes.fr](mailto:matthieu.quantin@ircsyn.ec-nantes.fr)

## Abstract

Along the product life-cycle, industrial processes generate massive digital assets containing precious information. Besides structured databases, written reports hold unstructured information hardly exploitable due to the lack of vocabulary and syntax standardization. In this paper we present a methodology and natural language processing approach to exploit these documents. Our method consists in providing connections based on supervised retrieval of domain-specific expressions. No prior document analysis are required to drive the algorithm. It underlines a scale of specificity in pattern visualization. This allows relevant and specific information extraction for feedback (e.g. design stage, after-sales service).

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Selection and peer-review under responsibility of Professor Lihui Wang.

**Keywords:** Knowledge Management; unstructured data; design know-how; semantic information network; Natural Language Processing

## 1. Introduction

### 1.1. Context

Knowledge management during industrial processes implies massive digital documents and assets through information systems among the product lifecycle. These documents contain precious information for research and development improvements. Big data techniques are already used for knowledge discovery in order to tackle this issue on structured databases [1]. Besides structured databases of product or process data, there is also unstructured information. An estimate range between 50% and 80% of all the company's data is unstructured [2].

“There is an urgent need for a new generation of computational theories and tools to assist humans in extracting useful information (knowledge) from the rapidly growing volumes of digital data”. [3]

In this paper we focus on textual analysis of written information rather than massive and structured input data. Therefore, we deal with technical reports, testimonies, and any other written document or collection of documents. Then, we aim to work on knowledge management by chaining knowledge elements rather than data classification and knowledge discovery. The specificity of our work mainly lies on the nature of processed information: contrary to sensors or logs, human actors imply a strong variability in provided information.

### 1.2. Goals

Over a first phase, the main issue in the process of analyzing unstructured data for knowledge chaining is the domain specificity without any prior information. The process deals with documents that are not conforming to any vocabulary or syntax rules (such as customer reviews or technical notes for example). It underlines a domain-specific vocabulary without labeling or any pre-processing from the document's author. In addition, the process is mainly supervised. Thus, it keeps the results as close as possible from the author work habits and methods.

Over a second phase, our process aims at providing hyper-navigation in corpora based on extracted information. It leads to two main outlines, and a third minor one:

1. Enabling different readings of the same corpus. New levels of reading are based on generic/specific keywords and expressions retrieved by the algorithm.
2. Providing understanding facilities through a located high precision decision-support analytic for unstructured textual corpora. The original text linearity of a single file, or the discontinuity of a corpus is outplayed by networking pieces of extracted information.
3. (minor outline) Offering a massive indexing system on server: anyone could upload a production, that is tagged and linked to other productions or any (other than text) tagged entity.

### 1.3. Usecase

Based on natural language processing techniques, we aim to demonstrate our proposition through a specific domain: technical history. Our work is inspired by the historians challenges.

Historical production, definitely human centered, discontinuous and multi-scaled is a perfect experimental field for raw text processing and knowledge chaining. For this article we also used a special corpus, the one from the CIRP paper annals, providing a tangible example for the CIRP community. We will discuss in the last part of this paper the interest of such work for industrial engineering community and how our proposal can be extended to other productions than of the provided use cases.

Thereafter, the term “corpus” will refer to the raw material input: a collection of written documents or a single one, that may contain internal and external references (pictures, quotation, links, etc).

## 2. Natural language processing for knowledge management

In research and industrial processes as in historical field, only external supports (mainly written) can capitalize the explicit information humans produce. This type of information is unstructured, and differs from any sensor’s data output. In a classical conception of the DIKW<sup>1</sup> hierarchy [4], humans cannot produce “pure” data. As History is purely human produced, we have to deal with higher level agency: information to knowledge chaining, not data.

A piece of information is never independent, so the relationship that links to pieces is essential and is part of the knowledge. The aim of our work is to support the importance of these connections. This arise the ethical question, that won’t be further discussed here, of the computer influence in (historical) knowledge establishment.

Three assumptions distinguish our work from other Text Mining tools for Knowledge Management:

1. Our work should not depend on any (human or not) data pre-processing step. Raw texts are our only reliable and expectable source of information. We aim to focus on unstructured data, massively produced in every business. This take us away from pure big data issue for decision making as described by the McKinsey Global Institute [5]. It also differs from text analytic oriented projects such as TXM [6] in french, or big data project with clustering for hierarchical structuring [7] in the same field of experiments.
2. Our previous works with historians taught us that information cannot be *a priori* compartmentalized in stringent entities [8]. Unlike biological [9] or manufacturing data-mining, no exhaustive data classes exist. Our goal is not to “turn low level data into high-level and useful knowledge” [10], but to process already “compiled” data, i.e. information.

A framework for text processing in (human) knowledge management should not be first semantically defined. Previously defined topics are at least narrowing and even irrelevant to a text. A POS-tagging or shallow parsing would not allow to match high pattern specificity, nor a core business vocabulary. So we aim to *extract* characteristic entities from a raw text and not to *recognize* already known

ones. In this sense we deeply differ from “Named Entity Recognition for Classification” (NERC) processes such as [11] seeking to fill “the lack of publicly available labelled datasets” in french. In the same field of experiments, other works are focused on NERC and neglect the specificity of the input material [12]. Interpretation should be left for the human reading, this work try to stay as close as possible to the text.

3. The black box effect should be avoided. A fully supervised process is necessary for high quality results. We assume that 10 or 20% of mismatch is often not acceptable. Purely manual tagging is a laborious common practice, that hardly reach completeness, but builds high-quality tags. Our supervised process tries to get the best from the machine (completeness) and from the human (high-quality keywords). Moreover, this supervised step balances the machine responsibility (ethical).

Once again we differ from a classical conception of supervision in NERC: “The main problem with Supervised Learning techniques is that a large amount of tagged data is needed to implement an effective system”[13], because in our case no training set is needed.

Regarding theses existing frameworks and tools, we state that our approach is complementary though significantly different. Complementary with the human “classical” approach of historians, but also with some other text mining tools. This option will be broached as a perspective in section 4.4.

## 3. Haruspex: a supervised process for knowledge discovery in un-structured data

To achieve our goal of compiling information produced under the form of written documents, we have designed a process based on natural language processing techniques. This process is implemented with Python3 programming language, with a basic GUI for end users. It takes the form of a simple software called Haruspex that takes a corpus as input and produces an undirected graph as output. The output graph is composed of documents or part of documents as nodes (with their metadata) and weighted keywords based relationships as edges. Users can supervise the entire process and have access to internal mechanisms such as the keyword extraction context.

### 3.1. Overview of the global process

The global process (see fig. 1) is composed of 4 main steps :

1. first step consists in processing input data files : format conversion, files concatenation, splitting, construction of “unit pages” that consists of file or part of file content.
2. second step runs Automatic Natural Acquisition of a Terminology [14] on the previously prepared pages.
3. third step maps the list of keywords from step 2 with their location in the different “pages” from step 1.
4. forth step builds weighted links between the related pages based on tf-idf (term frequency / inverse document frequency) indicator for each keyword.

Those four steps are detailed in the following sections.

<sup>1</sup>Data Information Knowledge Wisdom

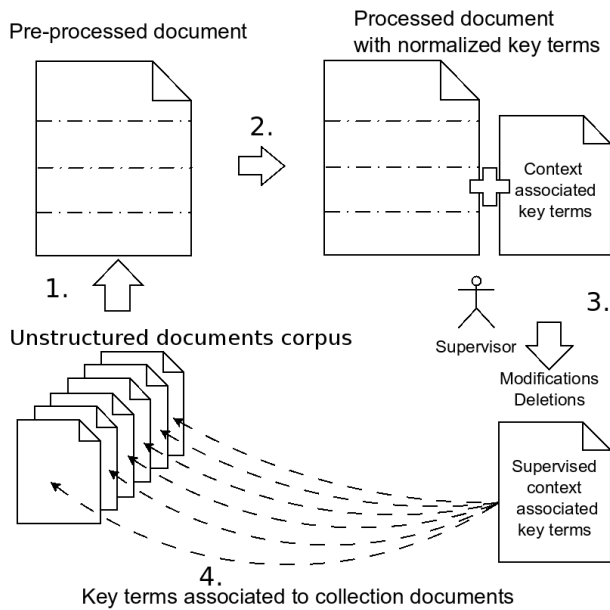


Fig. 1. Simplified view of Haruspex process

### 3.2. Input and pre-processing

As our program deals with both unique documents and group of documents, the way the corpus is structured depends on the user choices: this step aims to build “pages”. A “page” is a meaningful and coherent part of text and the depth of this document structuring is configurable: paragraph, chapter, file, or the concatenation of multiple files. This step is about corpus management.

At the end of this step, we have a text file and an instance of a graph oriented database (using Neo4j). The text file is the concatenation of all the contents with markers to record the original corpus structure. Actually the markers are simple ids written (i.e.: #23\_3.6\_0) in the concatenated text file to be able to retrieve the section number of the original file (file 23, section 3, subsection 6). The database is a set of nodes, representing the pages by its id, mapped with the original file thanks to the markers. Each node is related to other node types: pictures and external references (bibliography, links, footnotes...) from the original content. There is yet no edge linking the pages among themselves.

Some additional features are provided on demand such as automatic conversion from OpenDocument or pdf, citations and figures management, automatic corpus structuring.

### 3.3. Automatic Natural Acquisition of a terminology

The concatenated file produced in step 1 is processed here. This step is a new and improved implementation of Natural Language Processing algorithm called ANA<sup>2</sup> [14], dedicated to keywords and expressions extraction without tagging nor training. This algorithm operates on a local level by using syntax and semantic analysis. This is similar to the relation extraction process [15], but does not aim to analyze this relation. The extracted terms are connected to the original corpus thanks to the markers. This step is either highly configurable by the user

(thresholds, loops, semantic closeness) or fully automatic with predefined parameters. The output of this step is a list of extracted keywords located in their context. The number of extracted terms is unknown before the end of the process: the main limitation is based on the threshold for occurrences.

### 3.4. Acquisition post-processing

The output of the previous step (keywords and expressions in their context) is displayed to the supervisor who can remove, modify or add some terms. The user also choose a shape building method for the keywords: shortest shape, most occurring shape, ... This user supervision is critical to keep the control on the content and to reach very high quality extraction (however it may be skipped). A last loop on the text is necessary to spot the new keywords. The output of this step upload the supervised results on the previously created nodes of the database. Each node, representing a page, contains now its own descriptors: the extracted and validated keywords.

### 3.5. Knowledge chaining

This step consists in creating connections between the nodes (i.e. the pages of step 1) by calculating an value of semantic closeness based on the nodes’ keywords. This value is based on the TF-IDF algorithm [16]. The calculated value distinguishes generic links (this connects almost any node to any other) from specific ones (this connect truly some few nodes). All relations between nodes are undirected and have a type: the shared keyword; and a weight: the semantic closeness indicator. Theses links are stored in the database which leads to the construction of a network (see fig.2). So one can request database based on relations properties. This drives us to define the three outlines mentioned in Introduction.

## 4. Results and perspectives

The quality of the results depends on the way the process is supervised.

On one hand, for general topic spotting the results does not replace a NERC algorithm, on the other hand we extract and build very specific patterns, that no keyword recognition tool provides. Actually, patterns with high relevance and discriminant function are spotted like “*turbine à réducteur à engrenages*” (speed reduction geared turbine), “*chambre syndicale des constructeurs de navires*” (ship builders trade union committee) or “*maçonnerie de moellons hourdés de chaux*” (limewashed rubblestone masonry).

Even if Neo4J database provides the ability to visualize nodes and relations through a web interface, some additional post processing may be rewarding/necessary: the requested content can be dropped on a network visualization software. Using Gephi [17] for example, macro-patterns that could not be observed at a smaller scale are highlighted: lack of information, unlinked sections, or strongly linked sections throughout several original files. Further analysis should be done with experts to discuss these results as new research material.

<sup>2</sup>Acquisition Naturelle Automatique

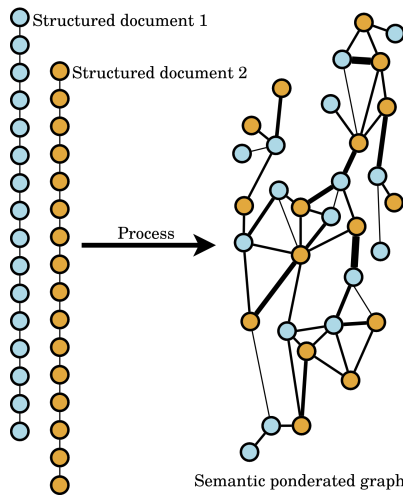


Fig. 2. Networking pieces of semi-structured documents

#### 4.1. Results on a single semi-structured document

We call semi-structured document any text containing basic structure elements like sections and external references. For example this article  $\LaTeX$  file is a semi-structured document, as many webpages, e-mails, thesis or MS word files. The operating process have been proved on some master thesis, with good results according to the authors.

Under a fully automatic mode, we extract approximately 350 distinct normalized keywords or expressions from a 22k words long corpus with approximately 80% of precision and 98% of recall<sup>3</sup>, so the F1 score is around 0.88. That score can be highly increased including the supervision process.

In this case, the main results is to outplay the linearity, displaying a network of related contents. Theses two representations of the knowledge are complementary, and can be combined in a hypertext navigation. As the links are weighted, generic topics are emphasized; as the links are also keyword based, it is possible to follow a narrower topic as a Ariadne's thread.

#### 4.2. Results on a semi-structured corpus

Compared to the previous use case, the extraction quality is mostly the same with additional documents (F1 score: 0.83). The network is changed into a cross navigation. Highlighting the connected parts across the whole corpus is an interesting feature. The most connected content to a section is not necessary the next section of that same document (see fig.2).

In most cases, low-weighted keywords are more generic and used as inter-document (external) links. But some highly specific cross-document connections are also created. This contributes to a serendipity-based reading. An other benefit comes from the identification of lack of information, and the isolated parts of knowledge, weakly or even not connected to other topics at all.

#### 4.3. Results on unstructured corpus

We used Haruspex to process a corpus a compiled pdf documents, these pdf are all papers from the *CIRP Annals - Man-*

*ufacturing Technology* between beginning of 2008 and end of 2015, we didn't get the internal structure of each pdf file but only the raw text content. This corpus is composed of 109 documents. The date the title and the author of each paper have been recorded in the nodes. Then we extracted around 2300 unique key terms with the expected behavior: very good recall, good precision. Supervision helped to get high quality results. The graph database, binding the pages (articles) among themselves with weighted and keyword based links, enables us to query the corpus. For examples these queries are possible:

- Which are the semantically closest article to a given one?
- How (quantified strength) is evolving the link between virtual and mechanical fields between 2008 and 2015?
- How strong is the link between the medical field, the economical field and the eco-conception field?
- How big is the community speaking about both virtual reality and reverse engineering? Who are these people? What are their non-shared fields of study?

As we are not expert in analyzing this corpus, the aims and the comments of the fig.3 are very basics.

The first graph on the left shows that only one paper mentions "ecodesign" and "economics" (written by Yasushi Umeda), also the papers in the medical field constitute a disjoint set from economics and eco-design.

The second graph in the center shows the hard core of the mechanical field, much more important than the virtual field's one. However many papers mention both of these fields, which are related.

The third graph is about the different streams in the virtual field of studies and their link with the medical one. Biomedical does never refer to the virtual, on the right opposite, the virtual prototyping never concerns the medical field. Also, we notice that one paper is central in this graph, linking medical and virtual fields: the one of S. Ha in 2009.

Note: with large unstructured corpus, the content heterogeneity tends to increase the misconception of keywords, matching homographs. Actually, the algorithm matches shapes and syntactic structures, independently of their context of use, nonetheless this can be manually checked by supervision.

On such large document sets, we identify two main benefits from Haruspex:

- the ability to overcome the challenge of indexing large corpus. This is something usual in research projects that involve historical archives analysis and data management plan for interoperability and preservation of data. Therefore, it is often a lot of hard work with few efficiency. Haruspex provides a complementary and semi-automatic indexing with keywords and key terms coming from the documents themselves.
- on a research point of view, Haruspex highlights some extremely specific expressions, thus underlining points of interest for the understanding of large corpus. It provides potential tracks for further research.

As far as knowledge management in design is concerned, Haruspex can bring key ideas from massive sets of documents (users' feedback, interviews, reports and so on). Our process enables the continuous integration of information along the

<sup>3</sup>evaluated by the author of the original corpus and expert of the domain.



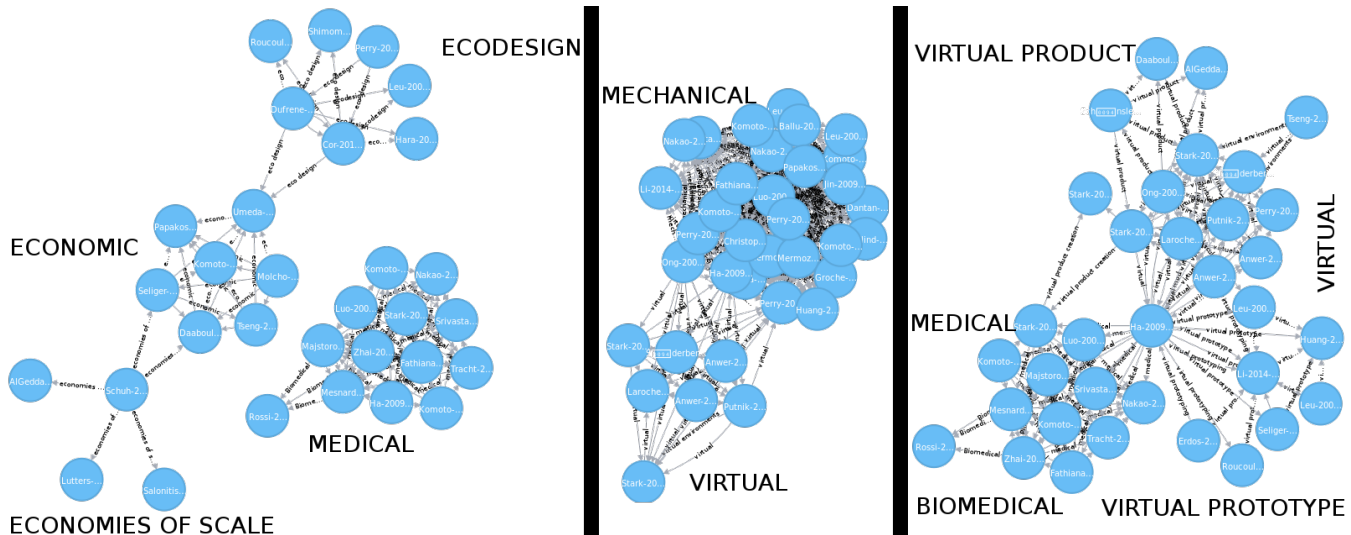


Fig. 3. Graphical representation of the results from querying the database on some relationships and nodes. The links are typed, weighted, despite this is not visible on the graphs above.

product life-cycle. For example with cultural heritage object in museum, we aim to expand its documentation with any new research result or contribution. This paper tends to demonstrate that these benefits can also be valuable for other communities than the heritage one. Our process can be applied on any similar use case, with massive unstructured information available under the format of text documents.

#### 4.4. Perspectives

The process avoid the use of controlled vocabulary, and keep it as a benefit for high precision tagging and corpus analysis. Having a basic controlled vocabulary would be interesting to explore the new documents without starting from scratch. This feature would enable us to extend an existing network with web of data connections. It would lead us to improve our last and still minor outline: the massive indexing system mentioned in Introduction. An external database is queried as reference [18]. This query checks a “normalized shape” for each extracted keywords in DBpedia. This does not overwrite the specific extracted term but provides an other shape for external referencing, and a semantic web compliant output. This step is also supervised. Some more features for the corpus management have to be developed, such as raw metadata management for the nodes, from author (handwritten) or external xml file reading.

This first perspective leads us to differentiating several keyword shapes depending on the use: business intelligence (specific) or massive indexing (standardized). Combining Haruspex with another keyword extracting engines augmented with a supervised layer [19] could be helpful in cases of a highly formalized field (such as medicine).

### 5. Conclusion

#### 5.1. Benefits

This paper is an attempt to present a supervised process for knowledge chaining based on unstructured data. Our results demonstrate the efficiency of this process. Despite the fact

that our algorithm only requires raw text as input, extraction score reach similar results as NERC algorithms. Supervision increases the quality of the algorithm results, avoiding false-positive and giving the ability of final tagging. This feature is appreciated by end users for the final step of knowledge chaining. It ensures compatibility and comprehension between the original text extracted terms and the expert vocabulary. At the end of the process, original texts or text parts are connected based on weighted keywords. The expert has access to different levels of details for further and complementary analysis. This process aims at providing decision aid, thus requiring high quality and controlled terms. Further analysis would suffer from false positive results or a lack of recall.

#### 5.2. Prospect : from knowledge chaining in cultural heritage to un-structured data management in design

As this tool is developed for unstructured and semi-structured text corpus processing without any controlled vocabulary in input, any pre-processing nor dependencies, we could have used it on any subject. Our experiments focus on historical field because we used to work on how technical history issues can help to go beyond industrial complexity. Therefore, we are involved with history research laboratory, providing experts, use cases and feedbacks for our research. Yet, as the design stage information is mainly unstructured [20], we are convinced that our work could be applied to Design with Product Life-Cycle issues in mind. Actually, the importance of such tool for Product Life-cycle Management and called “Product Life-Cycle Analytics” is mentioned in [21] as a reference architecture proposal<sup>4</sup>. Our proposal is in adequation with the unstructured ETL (Extract Transform Load) flow of this architecture. Indeed, we proposed a solution for processing market research documents, patents, internal blogs/wiki, error reports, specifications, feedbacks, memorandum. It would provide connections between all those documents, and give benefit from this amount of hardly reachable information.

<sup>4</sup>ApPLAUDING: An Architecture for Product Lifecycle Analytics with Unstructured Data INteGration.

## Acknowledgment

We would like to thank Eric Lutters, from the University of Twente, for his help and his attentions to our project, and overall for having provided us the CIRP corpus.

## References

- [1] Hey, T., Tansley, S., Tolle, K.. The fourth paradigm: data-intensive scientific discovery. Microsoft Research; 2009.
- [2] Russom, P. Bi search and text analytics. TDWI Best Practices Report 2007;URL: <http://alturl.com/in4mm>.
- [3] Usama, M.F., Gregory, P.s., Padhraic, S.. From data mining to knowledge discovery in databases. *AI Magazine* 1996;17:37–54. URL: <http://alturl.com/fihaz>. doi:10.1145/240455.240463.
- [4] Rowley, J.. The wisdom hierarchy: representations of the dikw hierarchy. *Journal of Information Science* 2007;33(2):163–180. URL: <http://alturl.com/7qike>. doi:10.1177/0165551506070706.
- [5] Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., et al. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity. 2011.
- [6] Heiden, S.. The txm platform: Building open-source textual analysis software compatible with the tei encoding scheme. 2010. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00549764>.
- [7] Wang, S., Isaac, A., Charles, V., Koopman, R., Agoropoulou, A., Werf, T.v.d.. Hierarchical structuring of cultural heritage objects within large aggregations. In: Aalberg, T., Papatheodorou, C., Dobreva, M., Tsakonas, G., Farrugia, C.J., editors. *Research and Advanced Technology for Digital Libraries*; vol. 8092 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg; 2013, p. 247–259. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-40501-3>. doi:10.1007/978-3-642-40501-3.
- [8] Laroche, F., Bernard, A., Cotte, M.. Knowledge management for industrial heritage. *Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management* 2007;;307–330doi:10.1007/978-3-540-78431-9.
- [9] Madeira, S.C., Oliveira, A.L.. Biclustering algorithms for biological data analysis: a survey. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics / IEEE, ACM* 2004;1(1):24–45. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17048406>. doi:10.1109/TCBB.2004.2.
- [10] Braha, D.. *Data Mining for Design and Manufacturing*. Springer; 2002.
- [11] Azpeitia, A., Cuadros, M., Rigau, G.. Nerc-fr: Supervised named entity recognition for french. In: *Text, Speech and Dialogue*; 17th International Conference, TSD. 17; 2014, p. 158–165.
- [12] Goerz, G., Scholz, M.. Adaptation of nlp techniques to cultural heritage research and documentation. *Journal of Computing and Information Technology* 2010;18(4):317. URL: <http://alturl.com/ebo4i>. doi:10.2498/cit.1001918.
- [13] Zelenko, D., Aone, C., Richardella, A.. Kernel methods for relation extraction. *The Journal of Machine Learning Research* 2003;3:1083–1106. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=944919.944964>.
- [14] Enguehard, C.. Acquisition de terminologie à partir de gros corpus. *Informatique & Langue Naturelle* 1993;;373–384URL: <http://alturl.com/zbmmq>.
- [15] Chan, Y.S., Roth, D.. Exploiting syntactico-semantic structures for relation extraction. In: *49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Association for Computational Linguistics; 2011, p. 551–560. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2002472.2002542>.
- [16] Salton, G., Yang, C.S., Yu, C.T.. Contribution to the theory of indexing. *Tech. Rep.*; 1973. URL: <http://bit.ly/1K7s5zY>.
- [17] Bastian, M., Heymann, S., Jacomy, M.. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. In: *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*; vol. 3. 2009, p. 361–362. URL: <http://bit.ly/1SVVbop>.
- [18] Muñoz-García, O., García-Silva, A., Corcho, O., Higuera Hernández, M.d.I., Navarro, C.. Identifying topics in social media posts using dbpedia. In: *The NEM summit*. Politecnico de Torino; 2011, p. 1–7. URL: [http://oa.upm.es/9024/1/Identifying\\_.pdf](http://oa.upm.es/9024/1/Identifying_.pdf).
- [19] Turian, J., Ratinov, L., Bengio, Y.. Word representations: a simple and general method for semi-supervised learning. In: *48th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Association for Computational Linguistics; 2010, p. 384–394. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1858681.1858721>.
- [20] Gero, J.S., Mc Neill, T.. An approach to the analysis of design protocols. *Design Studies* 1998;19(1):21–61. URL: <http://bit.ly/1Q4Q1TU>. doi:10.1016/S0142-694X(97)00015-X.
- [21] Kassner, L., Gröger, C., Mitschang, B., Westkämper, E.. Product life cycle analytics next generation data analytics on structured and unstructured data. *CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* 2014;33:35–40. URL: <http://goo.gl/LoJg7b>. doi:10.1016/j.procir.2015.06.008.

**ESDA2012-82824**

**INTELLIGENT REVERSE-ENGINEERING SEGMENTATION:  
AUTOMATIC SEMANTIC RECOGNITION OF LARGE 3D DIGITALIZED CLOUD OF  
POINTS DEDICATED TO HERITAGE OBJECTS**

**Florent Laroche**  
LUNAM Université,  
Ecole Centrale Nantes,  
IRCCYN UMR CNRS 6597,  
1, rue de la Noë, BP 92101,  
44321 Nantes Cedex 3, France

**Daniel Lefèvre**  
LUNAM Université,  
Ecole Centrale Nantes,  
1, rue de la Noë, BP 92101,  
44321 Nantes Cedex 3,  
France

**Myriam Servières**  
LUNAM Université,  
Ecole Centrale Nantes,  
CERMA-IRSTV UMR CNRS 1563,  
1, rue de la Noë, BP 92101,  
44321 Nantes Cedex 3, France

**Benjamin Hervy**  
LUNAM Université,  
Ecole Centrale Nantes,  
IRCCYN UMR CNRS 6597,  
1, rue de la Noë, BP 92101,  
44321 Nantes Cedex 3, France

**Alain Bernard**  
LUNAM Université,  
Ecole Centrale Nantes,  
IRCCYN UMR CNRS 6597,  
1, rue de la Noë, BP 92101,  
44321 Nantes Cedex 3, France

**ABSTRACT**

In this article we present a multidisciplinary experimentation realized between a mechanical laboratory, a computer scientist laboratory and a museum.

Our goal is to provide automatic tools for non-expert people who want to use 3D digitized elements. After scanning an objet, we obtain a huge amount of points. In order to manipulate it, it is necessary to decimate it. However, when doing this operation, we can optimize the algorithms for creating semantic topology; obviously we can do it automatically. Consequently, we are going to do what we name segmentation: we extract meaning from 3D points and meshes.

Our experimentation deals with a physical mock-up of Nantes city that have been designed in 1900. After digitalization, we have created a software that can:

1. use the whole 3D cloud of points as an input;
2. fill a knowledge database with an intelligent segmentation of the 3D virtual models: ground, walls, roofs...

This use case is the first step of our research. At the end, we aim to deploy our method to complex mechanical parts. Nowadays, when designing CAD parts we use as well as volume parts than surface parts or meshes. We know is it not necessary to reconstruct all the triangles. It is a lost of time and we can directly use cloud of points for CAD design. However, the design tree will not be updated. So, with our method,

imagine that one day we can digitalize a motor and a system could automatically create the 3D mock-up and the design tree.

**KEYWORDS**

Reverse-engineering, 3D digitalization, semantic recognition, museums, Advanced Industrial Archaeology.

**1. INTRODUCTION**

In Museum, many testimonies of our cultural heritage can be found. Nevertheless because of their high fragility, public cannot get too close to them. This communication will detail one experiment we are conducting with a French museum. The considered object is a physical mock-up of Nantes harbor; the mock-up has been built in 1899 and shown in 1900 during the World's Fair that took place in Paris, France [1]. But nowadays, this object is shown behind panes at the "Château des Ducs" museum in Nantes, France. The object has been digitized and one 3D model has been reconstructed. Thanks to a virtual system coupled to a touchscreen with semantic research modules and to a light pointer, it will allow the visitor to better understand the mock-up and the associated history. Moreover, the system will be user-centered: the visitor will interact directly with the digital mock-up and at the same time with all the knowledge brought by contextualization.



Our proposal consists of a new reverse-engineering method with automatic semantic recognition. From a technological point of view, there are several steps to go from cloud of points to 3D virtual mock-up. We aim to realize those operations automatically because of the large amount of triangles we have obtained with the 3D digitalization. Nowadays, there are no technologies that are able to load and visualize easily more than 250,000,000 points. So, first we get a huge cloud of points; but the acquisition is not perfect: there are some holes in the mesh. After filling them, instead of decimating manually the 3D cloud of points, we are going to decimate it automatically. This step allows cutting the 3D model into multiples parts that have semantic meaning. Indeed, it is what we called the vectorization step. It consists of a 3D model simplification keeping the topology of the 3D cloud of points. In order to do so, we spread the 3D vectorized mock-up into multiple semantic parts. We segment it into walls and roofs of buildings, grounds and other objects (boats) and zones (water of the river). The segmentation phase is important because it represents the beginning of creating an intelligent 3D mock-up. Consequently, it allows creating a semantic link between the 3D virtual mock-up and data into the knowledge database (like photos, maps and geographical coordinates). [19]

## 2. STATE OF THE ART

Nantes 1900 project is not the only one dealing with mock-up digitalization and 3D object simplification. We will start by introducing other mock-up digitalization projects then we will present some known algorithms used to simplify a high detailed mesh.

We can find in the literature few projects that propose to digitize a large heritage object and create a virtual model with many levels of details that are chosen by the users [2-6].

An experiment has been done by the “Musée des Maquettes” in France [3]. The mock-up representing the city of Toul was digitalized in 3D. Then, the clouds of points have been combined in order to obtain a parametric virtual model. In the 3D digitalization of a physical mock-up of the city of Prague designed by Langweil, data have been acquired by photographic systems [2]. Then, the clouds of points have been combined in order to obtain a parametric virtual model.

Rome Reborn is a project in the same field. It aims to rebuild the city of Rome between the years 1000 BC to 500 AD. This project required numerous plans but also historical documents to understand the physical mock-up [4-6].

Last experimentation known is the 3D digitalization of a physical mock-up of the city center of Liège where the acquisition was performed using an interferometric system [13]. This experimentation is probably the most advanced use case done in parallel with our project. Indeed, the multidisciplinary team also refuses to realize each step manually. We are currently comparing our methods in order to reach to common guidelines.

Every kind of digitization raised numerous problems. One of the most important is that it is impossible to visualize the enormous quantity of points acquired: files are so heavy. There are no software that can manipulate easily 200 millions of points. Consequently, digitized data were divided into several areas for being viewed independently and then simplified. We can find similar projects with art works digitization problem as The Digital Michelangelo Project [7]. However, this segmentation method does not fit with our heritage object due to the fact that dividing large-scale data into sub-regions will lead to lose some information. Indeed, during the digitalization phase, triangles and their orientations have been captured. If we cut the large-scale mesh and simplify small parts, it would be necessary to sew them if we want to obtain the whole mock-up.

Contrary to examples presented in this state of the art, the specificity of all those projects is that the work is done manually; nothing is automatic [10]. Few algorithms are presented but they only state the process followed [12]. Concerning our project named “Nantes1900 project”, it would be impossible to do it manually due to the amount of data: neither the 3D cloud of points, nor the historical documents that can help to enrich and understand the 3D mock-up [11]. Then we choose to simplify automatically the 3D mesh. In computer graphic domain, a lot of algorithms exist for segmenting and then simplifying meshes, for example to obtain a real time rendering of complexes scenes.

The mesh segmentation is a research field of its own and is the first step of the process before a mesh simplification. Interested reader can find surveys of these methods in [14] and [15]. Shamir has classified the possible approximate solutions for mesh segmentation according to the approaches as: region growing, hierarchical clustering, iterative clustering, spectral analysis and implicit methods [14]. Our method can be classified as an implicit one based on difference in normal of vertices and angles between faces, but it is much simpler than those described in [14] as explained in the PROCESS AND RESULTS section.

It exists several algorithms for simplifying meshes, some of them are created for mesh optimization, and others are point based rendering. We use meshes and not cloud of points because as triangles have been digitized we can use their orientation to compute better algorithms. The mesh simplification techniques optimize the display of objects made of a very large number of polygons in reducing their number. Those techniques are used when the viewed object is far from the camera and fine details of its geometry is not apparent or do not require to be displayed. Consequently, each simplified version of the global mock-up will display various levels of details. Those algorithms can produce meshes with a topology that is quasi-identical to the original one. It will depend on the simplification aim, get the fixed number of final meshes and/or minimize the error. [16] details the algorithms giving a discrete set of simplified versions of a given complex mesh. Other

algorithms, as progressive meshes [17], are using edges collapse to simplify the meshes.

Now it exists a technique to display a large number of acquisition point in real time, considering only point and not meshes [17]. This technique was based on multiresolution hierarchy [21] based on bounding spheres with a rendering system based on points and was developed for display purpose [20]. We did not follow it because our purpose was to analyze the data rather than display it. Indeed, the final step of the automatic segmentation we are developing is to create automatically the structure of a knowledge database.

### 3. PROCESS AND RESULTS

The general process can be synthesized in two steps as shown by figure 1 (steps A1 and A2 of the A0 diagram):

1. 3D acquisition and process
2. Semantic conversion.

The first process transforms the acquired physical mock-up into an unrefined mesh (A1). Nevertheless, this part takes the most time. The second one (A2) transforms these unrefined meshes into a simplified (nearly vectorized) mock-up with semantic information.

#### 3.1 3D ACQUISITION AND PROCESS

The first step is the 3D scan that converts the physical object into a digital object (process shown on figure 2). The physical mock-up was scanned with a VIUscan from the company Creaform. The scale of the obtained mesh is about

1/450. But it is not perfect: in our case, a lot of objects are not correctly scanned (little houses, courtyards, etc.). Moreover, the scan is divided into many pieces, and it need to be merged (see figure 3). This step is realized routinely because we have digitalized all the pieces in the same reference. As there are overlapping, the merge does not require human intervention.

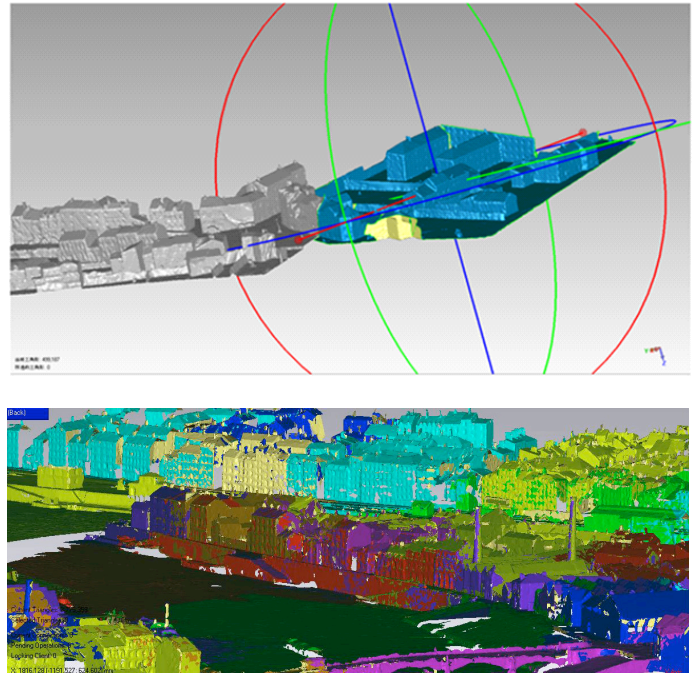


fig 3: Merging meshes

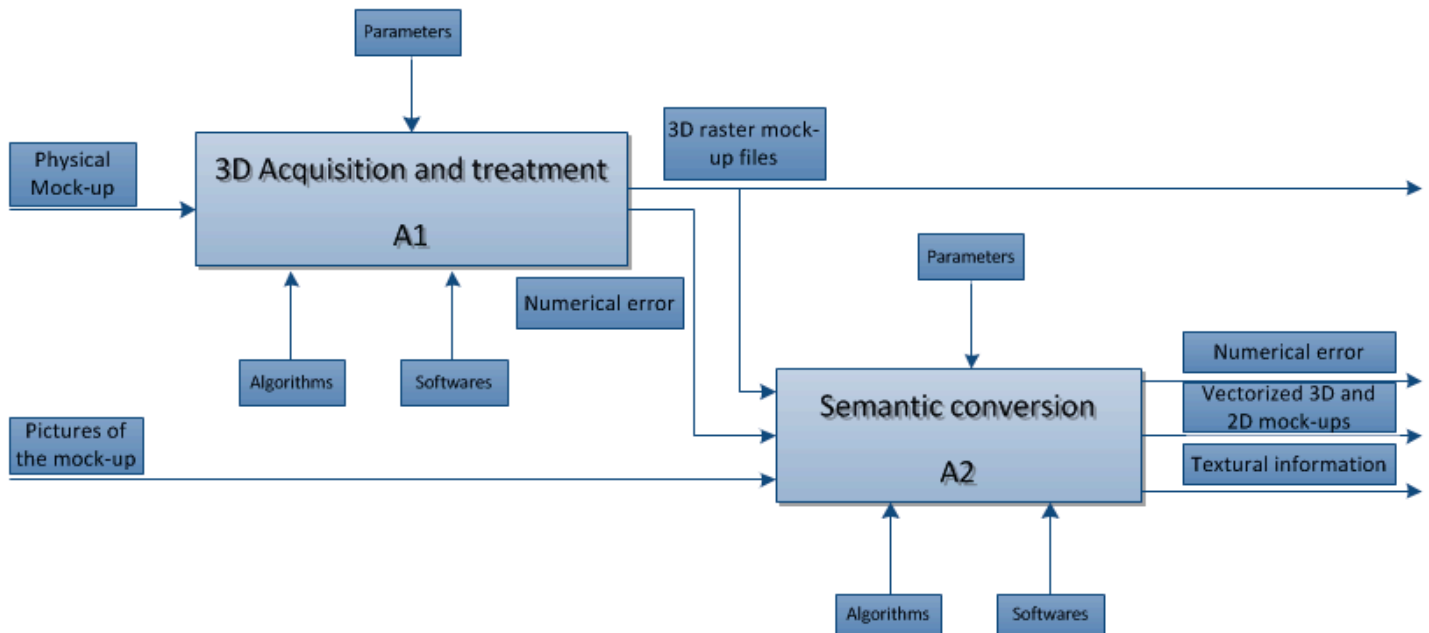


fig 1: SADT A0 diagram of our global process: the global method (A1 and A2)

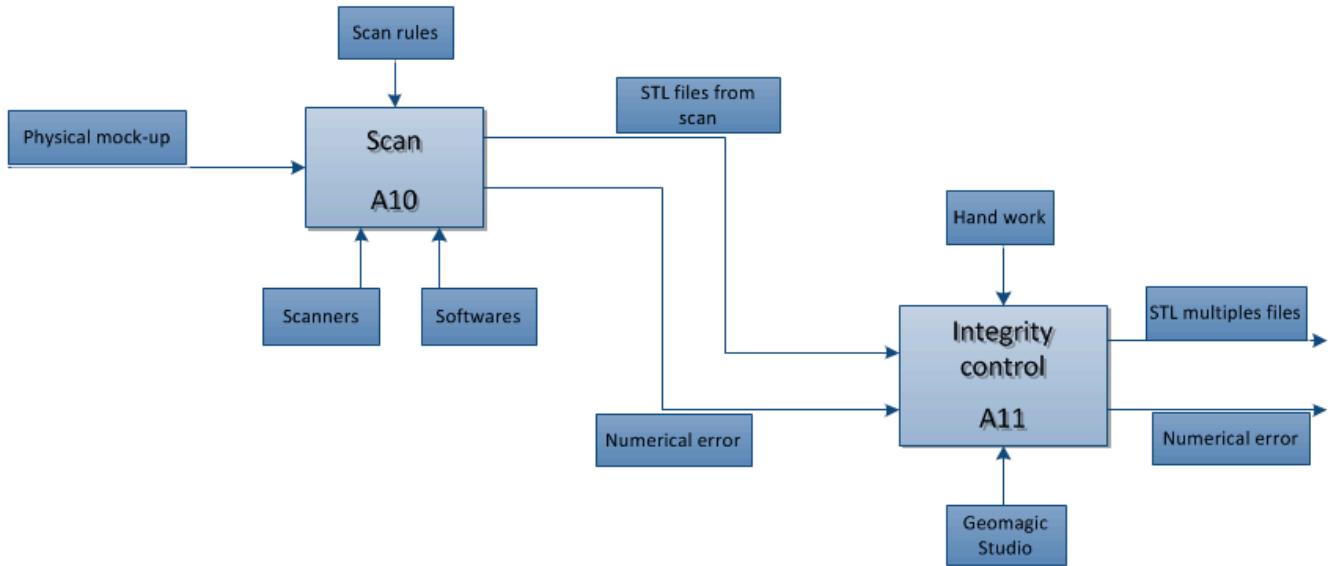


fig 2: SADT A1 diagram: 3D acquisition (A10) and integrity control (A11) method

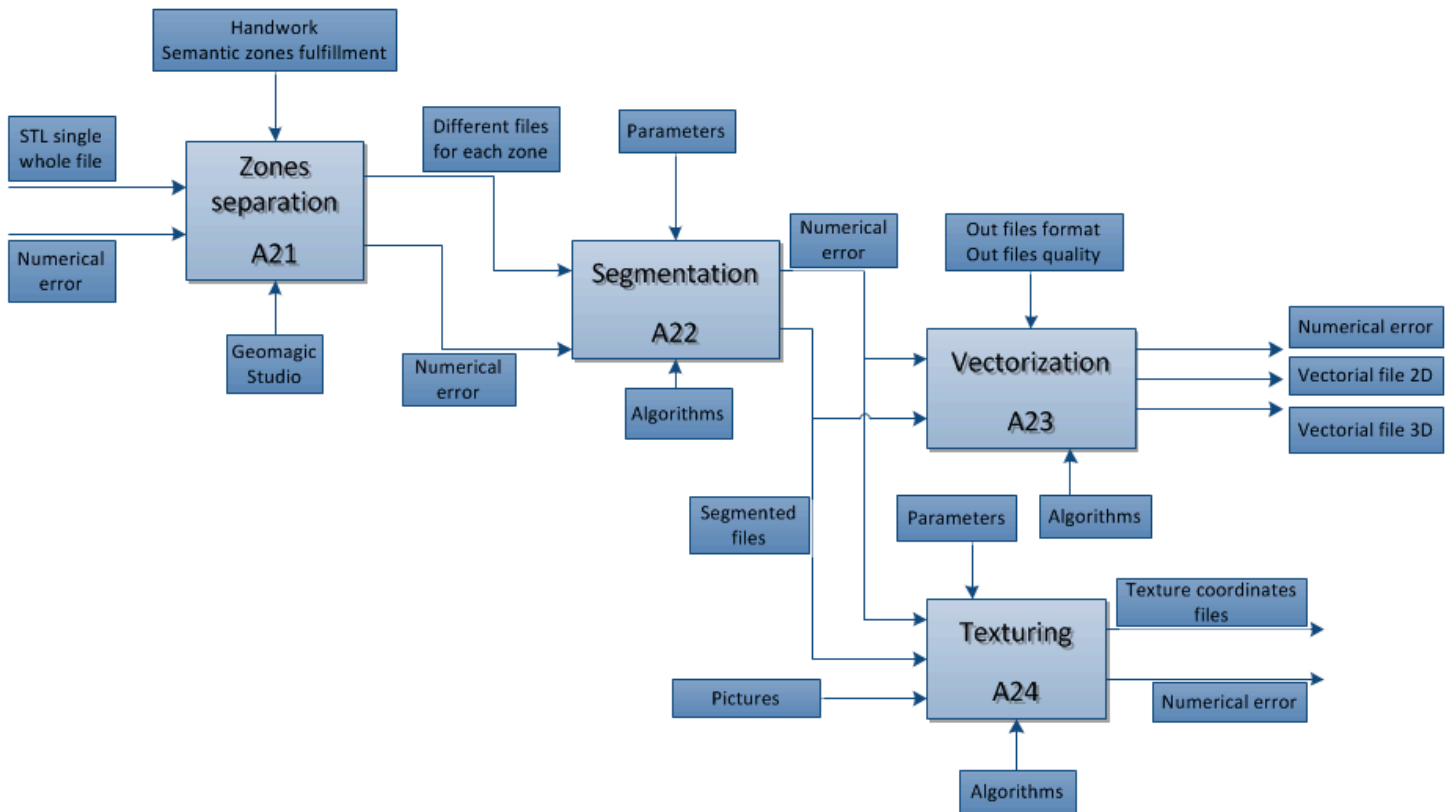
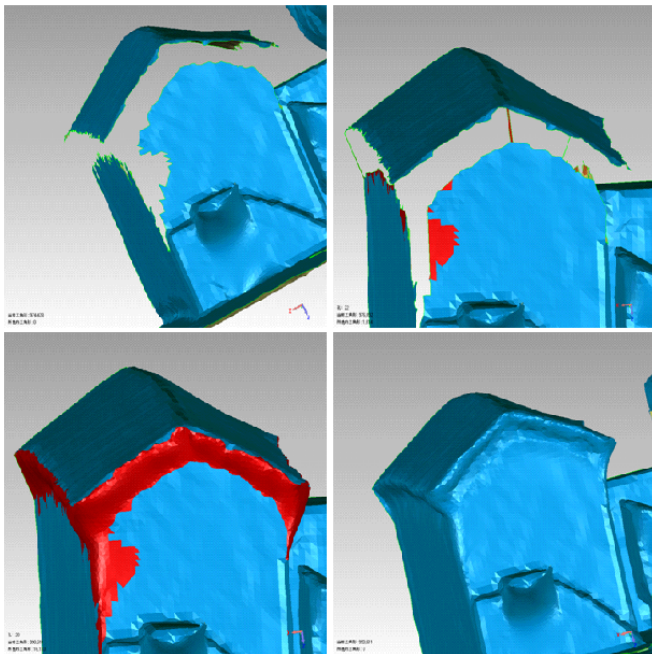


fig 5: SADT A2 diagram: zoning (A21), segmentation (A22) and vectorization (A23)

After merging, the mesh that is obtained needs to be corrected. This integrity control is the pre-processing part (see example in figure 4). This step consists in finding errors (mainly missing parts) and correcting them. Those errors can be:

- *Minor holes*: few triangles are missing and it can be easily completed using some software,
- *Middle holes*: it needs more time, but it can be completed, considering the topology of the building and the pictures from the physical mock-up,
- *Important holes*: entire buildings are missing. They are very time consuming and maybe require a new scan,
- *Cracks*: as the physical mock-up is older and cracked, two versions of the mock-up have to be design: one corresponding exactly to the historical object, with the cracks (similar to earthquakes), and one without, to have the correct mesh representing the town,
- *Little objects*: trees, cranes, tramways and other little objects have not been correctly scanned because of their small size. Now, they can be reconstituted and added to the mesh.

This pre-processing part is very long because of the number of problems in the mock-up and due to the fact it is done quasi-manually. Indeed, the process is the following: after having established a zone with common characteristics, a specific construction algorithm is applied. Remark that this step is crucial for the following process algorithms and we did it very carefully.



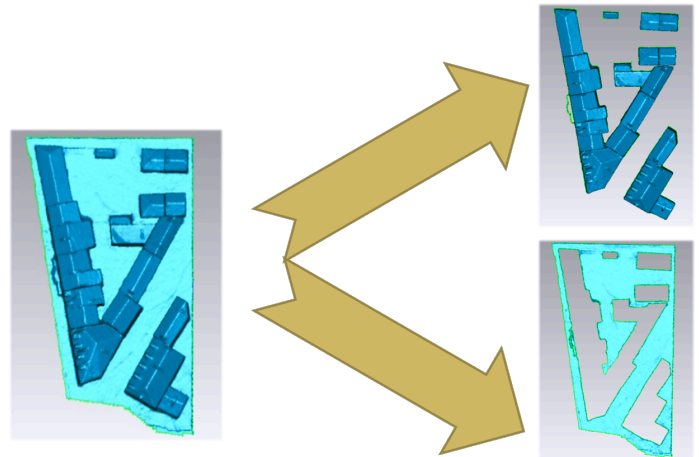
**fig 4: example of holes filling**

### 3.2 SEMANTIC CONVERSION

This step consists in adding information into the initial mesh, and, by the way, simplifying it in order to be able to manipulate it easily (see figure 5 for Semantic algorithm). We must remind that the initial mesh is composed of 250,000,000 triangles.

Processing the whole mock-up is not possible; first, digital object has to be split into semantic zone or islet. There are 5 possible zones: residential, industrial, grounds, aqueous and others. Indeed, in the future, we will be able to apply similar algorithms to the similar buildings or neighborhood. The second goal of this step is to have a reasonable size for the next step of the process. The size is about 500 000 triangles for one islet.

The main step of the semantic recognition consists of cutting the initial mesh. Indeed, if we pick two triangles in the mesh, we know everything about their location in 3D, but we have absolutely no idea of their common relations. Do they belong to the same wall? building?; or perhaps triangles are independents: do they belong to a roof? a door? a chimney?. Next objective consists in cutting this new mesh: algorithms have been created and developed using Java language. The principle lies to the use of the orientation and the location of the triangles.



**fig 6: Ground extraction result**

The first step consists in extracting the ground (see figure 6): the direction of the ground of the current islet is given. The first idea was to extract the triangles oriented in this direction using the normal of those triangles. But, of course, some mistakes happened: few top of some roofs were picked and few other horizontal roofs were mingled with grounds. Then two coefficients are added:

- a vertical one, each ground must be located lower than a percentage of the size of the building,
- a size one, each ground must contain at least X triangles.

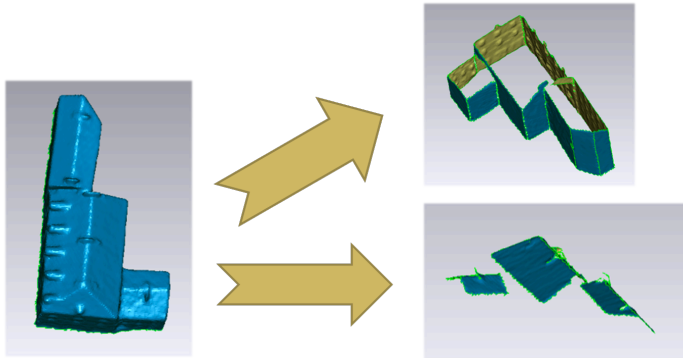
The algorithm is given in figure 7.

1. Select every triangle oriented as the ground with a small error;
2. Cut the obtained mesh in blocks:
  - Take a triangle;
  - Take its three neighbors, and recursively their three neighbors until we have all the triangles;
  - This is called a block: remove this block and save it in a list;
  - Begin again with another triangle until there is no more;
3. Keep only the blocks that are, on average, located lower than the vertical coefficient;
4. Keep only the blocks that are not too small, considering the size coefficient;
5. Select every triangles of the initial mesh oriented as the ground with a large error;
6. With those triangles, complete the previous blocks.

**Fig. 7: ground extraction algorithm**

After extracting the grounds, buildings remain. After cutting them into blocks, blocks are sorted and only the biggest ones are kept: others are considered as noise. Every block, which was not big enough to be a building, is now reconsidered: if it is neighbor of the ground, it is added to it.

Next, each building is cut into walls and roofs (figure 8). This extraction is based on the same principle as the ground extraction (details in algorithm figure 9).



**fig. 8: Wall-roof separation**

Once we have obtained the walls, we can remove them from the building mesh and identify the roofs. Noisy triangles are analyzed; in function of their orientations and their neighbors, they can be added to already extracted walls and roofs.

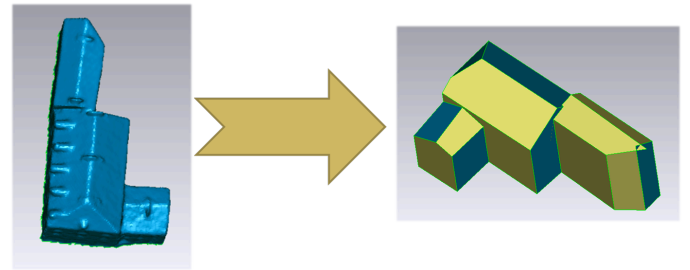
The last part is the mesh simplification (figure 10). The building contour simplification requires to know the neighbors of each triangles and the order linking them. By order, we mean that two surfaces that are consecutive in the list of neighbors are really neighbors in the mesh (they share a triangle edge). Then for every surface we found their neighbors and sorted them.

1. Take a triangle;
2. Take every triangle in the walls that have the same orientation (to an error by, this error being a coefficient of the algorithm);
3. Take the three neighbors of the triangle chosen and recursively take all of its neighbors: this will be a block;
4. Remove this block and add it to the list;
5. Begin this operation until there is no more triangles;
6. Keep only the blocks that have a bigger size than a coefficient (the wall-size-coefficient), put the others in a mesh called noise;
7. These will be the walls;

**fig. 9: mesh cut in walls algorithm**

Next, the building contour can be computed. The computation is simple: it takes the surface and two of its consecutive neighbors and then it finds the intersection edges.

We finally obtain a very simple representation of each islet that will be use in further work. Ground is not yet decimated.



**fig. 10: Mesh simplification step**

## 4. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this article we have presented an experience about intelligent reverse engineering. It is a first use case; 3D digitalized object is simple because it represents a mock-up of a city (with a square geometry). Semantic recognition divides the mesh into 3 elements: ground, walls and roof. Applying the same algorithm based on the orientation of the triangles, it would be possible to distinguish deeper elements as doors, windows... it is like a Russian dolls cycle; obviously we must precise that it is necessary to keep all the information we have acquired in order to optimize the semantic distinction (that means take into account the huge meshes).

Indeed, our method works at a multi-level: first applied to an islet and then to a building and then to a wall... It is a recursive algorithm that would learn how to work by itself. Due to the record of the parameters use each time, it will enrich the database and refine the parameters.

After developing the main concept of the algorithm, we have designed an open source prototype software in order to assist the user in the automatically process (figure 11).



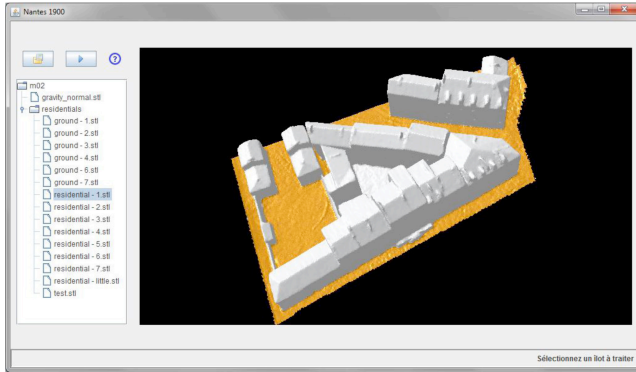


fig. 11: automatically ground selection in the software



fig. 12: automatic walls selection in the software

Moreover, in the future, we aim to use our method for complex mechanical parts. Thanks to our algorithm we demonstrate that it is possible to simplify a 3D mesh but also to add semantic information for characterizing each triangle or group of triangles; in the future we would like to use the same

concepts for mechanics. Now, we can link the results to a knowledge database that will contain the skeleton of the 3D object (the product conceptual model). Opening the whole 3D meshes object inside a CAD software will help the user to design new elements or to better understand a technical product. Figure 13 illustrates future process for intelligent reverse-engineering.

## PLURIDISCIPLINARITY AND ACKNOWLEDGMENTS

From the museum point of view, it represents a Research & Development aspect that is quite new in this field.

From an academic and scientific point of view, due to the fact that the project required various field of competences, it is very challenging for the researchers team to know and to choose the job required for each step of the process. Consequently, we have chosen to base Nantes1900 project upon student skills. It allows us to launch same steps with two different teams each time and at the end we compare the results and enrich our know-how.

Moreover, one of the best ways to enhance our heritage for young generation is that young people achieve the capitalization phase themselves. Until now, approximately 110 students and 10 researchers-teachers have worked on the Nantes 1900 project. Obviously it would be impossible to list all the authors in this paper so we simply would like to thanks them for their great jobs.

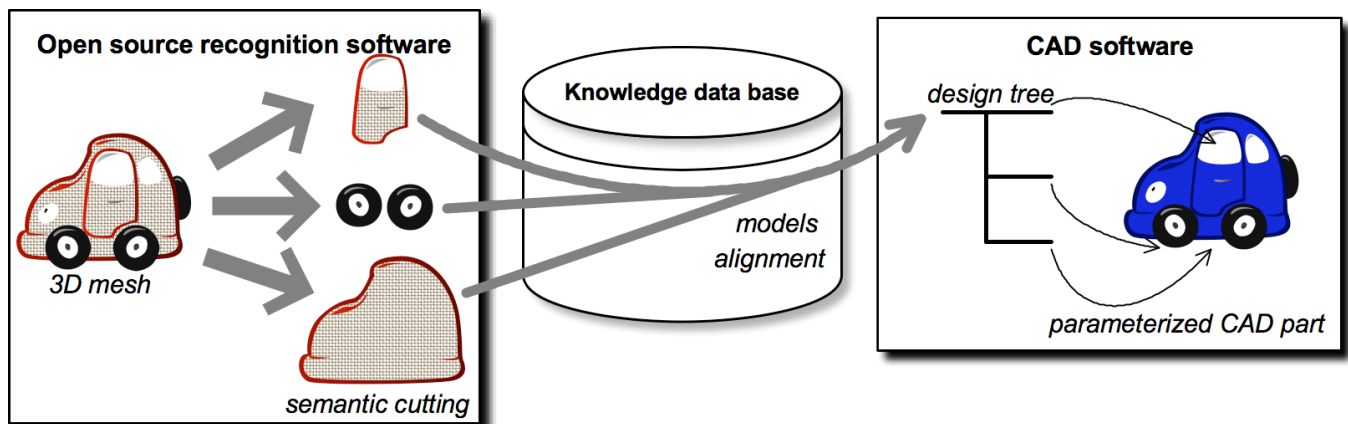


fig. 13: future process for intelligent reverse-engineering

## REFERENCES

- [1] B. Guillet, L. Huron, J.-L. Kerouanton, *La maquette du Port de Nantes*, French congress Des villes, des ports : la mer, les hommes (n° 124; 1999; Nantes), Paris, 2001,
- [2] D. Langweil, *Digitalization of Prague city, last step*, 2008, <http://www.praguemodels.cz/>
- [3] C. Chevrier, K. Jacquot, J.P. Perrin, *3D modelling of a town scale model*, EuroMed Conference, Limassol, Cyprus, 10 p., Nov 2010.
- [4] B. Frischer, *The Rome Reborn Project. How Technology is helping us to study history*, OpEd, November 10, 2008. University of Virginia, 2008. [<http://www.romereborn.virginia.edu/>]
- [5] G. Guidi, B. Frischer, et al., *Virtualizing Ancient Rome: 3D Acquisition and Modeling of a Large Plaster-of-Paris Model of Imperial Rome*, Videometrics VIII, edited by J.-Angelo Beraldin, Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen, James S. Walton, 18-20 January 2005, San Jose, California, USA, SPIE, vol. 5665, 119-133, 2005.
- [6] P. Fleury, *La rome antique sur l'internet*, Informatics and statistics review for human sciences, 1997.
- [7] The Digital Michelangelo Project. [<http://graphics.stanford.edu/projects/mich/>]
- [10] Z. Weiss, M. Pankowski, *Knowledge reengineering for reverse engineering purposes*, CIRP Design Seminar Conference, Berlin, Germany, pp.421-430, 2007 – ISBN 978-3-540-69819-7
- [11] W. Derigent, S. Remy, E. Chapotot, G. Ris, A. Bernard, *3D digitising strategy planning approach based on CAD model*, Transactions of the ASME, Journal of Computing and Information Science In Engineering, vol. 7, n°1, pp 10-19, 2007.
- [12] L. De Luca, P. Véron, M. Florenzano. *Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach*. Computers & Graphics. Volume 30, Issue 2, Pages 160-176 Elsevier, april 2006.
- [13] R. Billen, P. Blain, O. Donneau, S. Habraken, Y. Renotte, M. Van Ruymbeke. *Virtual model of the city of Liège in the eighteen century - "Virtual Leodium"*. Proceedings of 3D Stereo MEDIA 2009, International 3D Stereo Film and Technology Festival (3D Stereo MEDIA), Liège, Belgium, 1-3 Dec. 2009. [<http://hdl.handle.net/2268/34167>]
- [14] A. Shamir, *A survey on Mesh Segmentation Techniques*, COMPUTERGRAPHICS forum Volume 27 (2008), number 6 pp. 1539–1556
- [15] M. Attene, S. Katz, M. Mortara, G. Patanè, M. Spagnuolo, A. Tal, *Mesh segmentation - a comparative study*, In: SMI '06: Proceedings of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications 2006 (SMI'06), Washington, DC, USA, IEEE Computer Society (2006) 7
- [16] D. P. Luebke, *A developer's survey of polygonal simplification algorithms*, IEEE Computer Graphics and Applications, 21(3):24-35, 2001.
- [17] H. Hoppe, *Progressive meshes*, In Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 99-108. ACM Press, 1996.
- [18] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, *Qsplat: a multiresolution point rendering system for large meshes*, In Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 343-352. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.
- [19] M. Attene, F. Robbiano, M. Spagnuolo, B. Falcidieno, *Semantic Annotation of 3D Surface Meshes based on Feature Characterization*, SAMT conference proceedings, 2007, 14 p.
- [20] D. Porquet, *Rendu en temps réel de scènes complexes*, PhD thesis, Université de Limoges, 2004, 162 p.
- [21] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, *Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes*, Technical Report, 1995, 25 p.

---

## Framework for historical knowledge management in museology

---

Benjamin Hervy, Florent Laroche\* and  
Alain Bernard

École Centrale Nantes,  
IRCCyN UMR CNRS 6597, France  
Email: [orcid.org/0000-0002-5755-6478](https://orcid.org/0000-0002-5755-6478)  
Email: [florent.laroche@ec-nantes.fr](mailto:florent.laroche@ec-nantes.fr)  
Email: [alain.bernard@ec-nantes.fr](mailto:alain.bernard@ec-nantes.fr)  
\*Corresponding author

Jean-Louis Kerouanton

Université de Nantes,  
Centre François Viète, EA 1161, France  
Email: [jean-louis.kerouanton@univ-nantes.fr](mailto:jean-louis.kerouanton@univ-nantes.fr)

**Abstract:** Dealing with historical knowledge is a complex task as it involves specific approaches modelling and know-how. Heritage objects are historical witnesses with life cycles that are difficult to clearly identify. In this paper, we discuss the possibilities of managing such a heterogeneous content through a PLM system that concentrates on historical knowledge and museums. Based on previous research in the field of advanced industrial archaeology, we demonstrate our process through an industrial research and development project with a history museum.

**Keywords:** knowledge management; product lifecycle management; PLM; museology; cultural heritage; CH; information systems; reverse engineering.

**Reference** to this paper should be made as follows: Hervy, B., Laroche, F., Bernard, A. and Kerouanton, J-L. (2017) 'Framework for historical knowledge management in museology', *Int. J. Product Lifecycle Management*, Vol. 10, No. 1, pp.44–68.

**Biographical notes:** Benjamin Hervy holds an Engineering degree in Information Systems and Mechanical Engineering, and a PhD in Industrial Engineering from the Ecole Centrale Nantes, France in 2011 and 2014, respectively. His research area focuses on knowledge management for cultural/industrial heritage and museums.

Florent Laroche is an Assistant Professor at Ecole Centrale Nantes, France and a researcher in IRCCyN (UMR CNRS 6597). He is a doctor-engineer, working on the translation of past knowledge to contemporary knowledge for socio-technical systems. One objective of his research is to reuse technical heritage as a basis for innovation. His research topics are KM, PLM, information system, interoperability, enterprise modelling, virtual and reverse engineering.



Alain Bernard is graduated in 82, PhD in 89, was an Associate Professor from 90 to 96 in Centrale Paris. Since October 1, he has been a Professor at Centrale Nantes and Dean for Research from 7 to 12. He is a researcher in IRCCyN Laboratory (UMR CNRS 6597) in the Systems Engineering-Products-Performances-Perceptions team. His research topics are KM, PLM, information system modelling, interoperability, human safety modelling and evaluation, systems performance evaluation, virtual engineering, additive manufacturing, reverse engineering. He published more than 250 papers in refereed international journals, books and conferences. He is Vice-Chairman of WG5.1 of IFIP (Global Product Development for the whole product lifecycle) and Chairman of CIRP STC Design.

Jean-Louis Kerouanton is a former professional heritage at the French Ministry of Culture. He is a Professor at the University of Nantes since 2005. He is a Lecturer in History of Technology, and is also the Vice-President of the University of Nantes in charge of real estate assets. Around the industrial heritage and architecture and more generally history of technology, science and technical culture, his research areas are mainly related to harbour industry during 19th and 20th centuries.

---

## 1 Introduction

Museums of history and science contain many witnesses to human knowledge. These cultural and technical heritage objects represent a social and economic opportunity but one that is often neglected. Dealing with historical knowledge implies specific approaches. Conservation issues and management of historical points of view lead to complex processes. In addition, the heterogeneity of heritage objects and people's associated knowledge implies significant modelling issues. In addition to this complexity inherent to historical research methods, museums have to face mediation problems and conservation policies. For more than ten years, digital technologies have been used for conservation and promotion of cultural heritage (CH). They have a significant impact on the conservation and promotion issues related to CH. On the one hand, they bring new solutions to human science questions and, on the other hand, they create new means to explore and interact with our historical heritage (Roussou, 2002; Champion, 2011).

However, there is still a lack of methodology for the management of CH knowledge, from its identification to its promotion. This process covers the conservation stages but also the dissemination of historical knowledge. Much work has been done on the proposal of methodologies for artefact digitisation (3D or 2D) and promotion, especially in archaeology. In addition to the digitisation of CH artefacts, other work focuses on data management, especially related to Linked Data on the web such as the Europeana project (Doerr, 2003). The semantic web and the web of data improve the interoperability between data repositories but also between automated data processing. Such an approach focuses on data access and thus implies a consensus in the modelling process. As far as we know, there is no interdisciplinary method for the process of creating, modelling, visualising and capitalising historical knowledge. This is due to the complexity and the

diversity of CH artefacts, as well as the necessity of interdisciplinary approaches. There is, however, a need for this kind of methodology. It would assist the work of many actors: museums, historians, public administrations. Museums need to share information with different actors (curators, mediators, etc.) and in different forms (labels, mediator discourse, legal information for national inventory, etc.). From the acquisition to the promotion of CH testimonies, museums need to provide and master several information management processes for multiple access to information. *This paper provides an example of how PLM system can be used and customised for such a different approach.* Our contribution lies in the proposition of an operational framework that could be depicted as a PLM for museology<sup>1</sup> and how it could act as a new standard for CH documentation quality certification. Based on feedback from a five-year project with a history museum, our framework aims at defining best practices for museology. It also enables actors to share and disseminate scientific knowledge related to museum collection objects. Thanks to industrial engineering methods, we propose a way to model historical information, combine different points of view, promote highlighted knowledge and capitalise it. Contrary to the usual approaches in the field of museology, our approach enables museum professionals, historians and various contributors to interact on the same objects and share their knowledge.

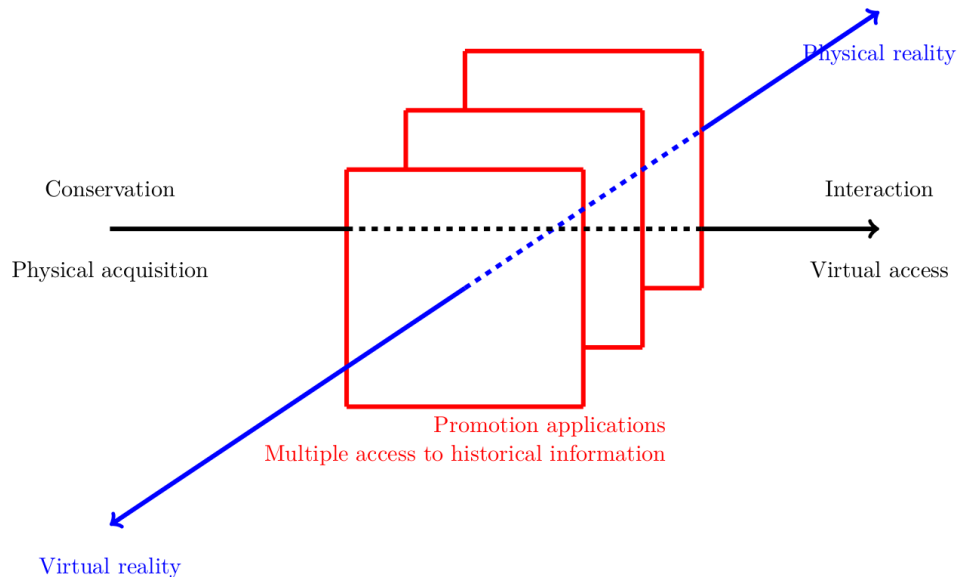
## **2 Industrial engineering as an inspiration for museum organisational issues**

### *2.1 Museum information management processes*

Museum processes can be seen as any other company processes. A systemic analysis would lead to different goals and organisations in comparison with industrial companies. The main difference comes from the nature of manipulated objects. The life cycle of products is remarkably different from those in the contemporary design process: the accumulation of knowledge is made retrospectively. It should be used to understand the life of the object, the influence it has had in a given space-time, and the influence of the space-time evolution of the object (Ermine et al., 2004). Therefore, the goal is not related to manufacturing process optimisation. Another significant difference comes from the multi-dimensionality of the knowledge. Reverse capitalisation of CH knowledge requires intersecting object lifecycles and links between multi-dimensional information.

Museums also have issues in common. They need to share information among different players (curators, mediators, etc.) and using different forms (labels, mediator discourse, legal information for national inventory, etc.). Figure 1 highlights the different processes that are challenging museums' organisation. It illustrates the starting point of our museum PLM system proposal. From the acquisition to the promotion of CH testimonies, museums need to carry out many information management processes in order to provide multiple access (red squares) to information (ICOM, 2016). The two-ways blue axis illustrates the need to combine tangible, physical information about CH objects with virtual information.

**Figure 1** Main processes and problems of museums: cultural heritage object management and access to various forms of available information (see online version for colours)



Museums therefore need to adapt their processes to social and technological trends. People's behaviour and habits regarding their CH change over time. Visitors do not want a simple list of objects and therefore. History museums have adapted their discourse. CH objects are displayed according to a coherent discourse designed by curators. Visitors also expect new ways of interaction with objects and contents. They want to take part in the process and express their feelings. Moreover, people change their technological background and expect new features such as recent multitouch displays or virtual, 3D exhibits. In addition to those social and technological issues, museums need to improve their different functioning processes. Besides being expensive, the creation of new promotion applications is a time and people consuming process. Due to the fast evolution of technology, museums need to optimise such process to make them reproducible. A reproducible method for capitalisation and modelling of historical knowledge would be the answer to many problems, e.g., it would enable the setting up of a reading grid for CH preservation as recommended by Cotte (2012) and UNESCO (2011).

Historical knowledge is based on a complex information management process. Historians need to question many heterogeneous sources which are usually incomplete. Moreover, they have to analyse several dimensions: geography, various time periods (machinery functioning cycles, technology evolution, etc.), and themes. Finally, they need to compare various pieces of information to provide the most accurate analysis.

[img-K]

This approach is crucial to contextualise CH objects; objects on their own do not reveal much about their transformations, lifecycle phases, related know-how and so on. Visualisation facilitates this appropriation of CH and provides the ability to combine role-playing while representing EPOCH dynamics, and object context. Passive visualisation, however, is not sufficient to provide a full experience of a CH context. This

can be overcome by advanced mixed reality techniques (Gaitatzes et al., 2001; Gillings, 2005; Gabellone, 2009).

Information and communication technologies (ICT) may have led to promotion interfaces improvement but the critical process (and the most expensive) is the creation of an historical content. This requires time-consuming research, source aggregation, analysis and validation processes. To avoid one-shot applications that include the historical content in the software part of the application, and prevent created knowledge from being re-used, dedicated databases are a good insight. The separation between knowledge organisation frameworks and knowledge retrieval systems gives the ability to design adaptive, scalable interfaces. It also brings more flexibility for knowledge management.

Some recent work has shown the potential of web ontologies and semantic web technologies to efficiently model historical and CH data (Sinclair et al., 2006; Eide et al., 2008; Janowicz, 2009; Isaksen, 2011; Nuessli and Kaplan, 2014). These technologies rely on domain ontologies such as the CIDOC-CRM (ISO 21127:2014, 2014). This approach combines formal models to define entities and their possible connections. It enables automatic data processing (text processing, text comparisons) and information system interoperability. The main objective of such work is to provide crossings among the different existing repositories and to make computers able to perform inferences. Nevertheless, the process of modelling data with ontologies does not suit the working methods of historians and curators. This approach needs weighty processes such as model alignment. Furthermore, it scarcely enables multiple points of view of the same information: an ontology is defined through a consensus among the authors of the model. It implies an a priori model of the subject area which every actor would agree on. Yet, the process of historical research implies an a posteriori interpretation. Thus, a knowledge management methodology should not impose a pre-defined model in the modelling process. Our goal is to enable experts to capitalise knowledge and define their own vision that will be instantiated later in the model. In addition, our methodology needs to handle CH issues such as conservation and promotion.

The management of museum collections is usually provided by particular software<sup>2</sup> (usually a specific Database Management System – DBMS – for museums) associated with a thesaurus. These DBMS often have a proprietary licence, that limits interoperability and implies specific skills. However, only people related to the administration of collections (museum curators, conservators, system administrators, research associates) work on the museum collection database. Although cultural mediators are the first link between visitors and collection objects, they cannot interact with the collection management system. The information contained in the database is also often codified in a well-specified and structured thesaurus. Knowledge of technical teams involved in the maintenance of cultural promotion systems are not taken into account in the system, except for some characteristics such as luminosity maximum rate. In the case of temporary exhibitions, whose aim is to exhibit heritage objects related to a particular theme, some objects are provided by donors. However, some of these objects are merely loaned whilst other objects are permanently left to the museum. It often happens that many museums work together and exchange objects from their own collections in order to create an interesting exhibition. However, only objects definitively bequeathed to the museum are then digitised and loaded into the collections management system (through an historical sheet). Even if the exhibition is stored in the database as an event and linked to exhibited objects, the whole process of the exhibit design and discourse is not capitalised.

## 2.2 *Industrial engineering inspiration*

Industrial engineering through its methods and tools has been proven useful in the CH field (Laroche, 2008; Hervy et al., 2013). They give access to the capitalisation of complex objects especially industrial artefacts.

Industrial companies' information management techniques such as product lifecycle management (PLM) operating systems provide efficient ways to capture information for co-working (Kiritsis et al., 2003; Terzi et al., 2010; Assouroko et al., 2012). They are based on a common product data model that can be specialised depending on the field of application. There is, however, a significant lack of information regarding the long-term evolution of objects and heritage objects are concerned by this issue. As we cannot imagine what will become of CH objects in the future, we have to identify and to link significant data and knowledge provided by experts (historians, museum curators, etc.). This will enable museums to organise the vast amount of knowledge they have so as to improve collection management. It will also improve cultural promotion and innovation thanks to digital projects. If we look at the number of such projects all over the world, they are increasing significantly.

Moreover, tools from engineering sciences can be used for the capitalisation and redesign of old physical objects (Weiss and Pankowski, 2007). Among others, we can cite 3D scanning methods and devices, reverse engineering of surfaces or any geometrical forms. Some other industrial engineering techniques usually used during the design stage of industrial objects can be useful. For example, virtual reality tools or any visualisation techniques can help to manage heterogeneous information and disseminate capitalised knowledge (Bernard and Ammar-Khodja, 2007). This can be of significant help in enriching existing knowledge related to an object. It can also be useful for companies to gain leverage from their archives such as lost know-how. According significant importance to people in the process of interacting with information and knowledge would help improve industrial information systems such as the visualisation issues of PLM systems (Allanic et al., 2014; Lutters et al., 2014). This aspect is discussed in more depth at the end of this paper.

One of the most crucial issues in CH is the curatorship process. It involves many kinds of information and various expertise skills (translators, archivists, historians, experts regarding the specificity of the object studied, etc.). This kind of problem is very similar to the PLM issues in industrial companies. Museums have to deal with both the management of CH object life cycle information and the sharing of this information among various actors. Nevertheless, each heritage object is unique, contrary to contemporary manufactured objects. Moreover, we have to manage incomplete, imprecise information. We need to capitalise the maximum amount of information so that we can further link it thanks to expert knowledge.

This is also the case for CH research communities in general, driven by recent London Charter and Seville principles (EPOCH, 2009; Collectif, 2013):

- acquisition: legal information about CH objects
- research: scientific historical approach
- integration in information system

- promotion of created knowledge: process of transforming information to adapt to the public

For each process, many actors are involved. Those actors have different and evolving expectations. In addition, they have different backgrounds, profiles and intervene in different contexts. Museums have to deal with a compromise between those expectations and their scientific objective, i.e., to conserve, study and promote CH objects.

In this context, a theoretical framework has already been proposed in the digital heritage reference model (DHRM) (Laroche et al., 2015). The DHRM focuses on industrial archaeology and provides a methodology to capitalise knowledge related to old technical artefacts. This is why the implementation of DHRM introduces a slightly different definition of the product life cycle as the one usually used in industry. Involved concepts and knowledge capitalisation contexts are different. Based on this conceptual model and methodology, this paper proposes a framework for the design of a PLM for a museum. The main goal of this PLM system specialised in museology is to share information of complex CH objects and let people interact with such information using multiple access. This presents a new problem, especially about knowledge extraction modes and historical information visualisation.

### **3 Research aim: managing heterogeneous historical information**

Accumulation of knowledge as explained in this paper would move towards a PLM system dedicated to museology, both for collections and museum's professionals. Moreover, interaction and multi-disciplinarity is evident in the museum world where skills are extremely varied and heterogeneous. However, they work towards a common goal: preservation and promotion of CH. It is therefore a source of knowledge that is waiting to be transmitted from generation to generation.

Three major issues are addressed in this paper:

- evolutive and adaptative end user application: decorrelation from technological developments
- sharing of knowledge for learning and connecting the museum's collection to available information
- provide multiple access to museum professionals to share and interact during the different processes.

There is a need to ensure that visualisation techniques will be driven by historical knowledge as in and not act as standalone applications as prescribed by De Luca et al. (2011). Our main motivation is to drive research related to the design of flexible conceptual models which are specialised in the design of such applications. Our approach proposes to obtain historical knowledge from different fields of expertise as in enterprise models. New trends in knowledge management appear to place humans as a critical factor. In the cultural industry, such an approach is more common, and leads to interesting results. We aim to provide a methodology, inspired by historians' research approach, which is very close to these methods. This means we have to deal with heterogeneous information and develop an approach mainly based on people's knowledge.

Capitalising historical knowledge involves working areas that do not usually communicate with each other. This leads to new processes of cooperation in the design of products and services:

- Products as implementation of cultural mediation devices, which in turn may become heritage objects.
- Services when creating new heritage preservation processes: 3D scanning, structuring documentary corpus, etc.

An overview of the skills needed has been given in the preceding sections of this document. However, a more in-depth study is shown below:

- Expertise on contemporary engineering tools. These tools will be used for the capitalisation of external data, but also for structuring information. The concepts involved may be different depending on the scope (archives, museums, libraries, industry, etc.). This kind of expertise includes mostly engineering skills: experts in modelling and 3D scanning and IT engineers.
- Expertise on the manipulated objects (mostly conservators)
- Expertise in the contemporary period of the object that leads to an understanding of its environment. This expertise comes mostly from historians, science and technology historians, and archivists for the corpus of documents. These skills are also required to translate the object's contemporary semantics into a current comprehensible language (contemporary to the heritage capitalisation stage). Here we see the importance of communication among businesses that usually do not communicate. In fact, each business adopts a vocabulary related to its own field of activity. From this point of view, we can assert that different occupations such as historians, engineers, conservators, computer engineers are able, under the banner of the common concern of preserving heritage, to communicate and work together. This can probably be explained by the common goal, but also by a shared passion that is a community's heritage. In fact, the heritage and history of a group (in the ethnological sense of the term) is a common root. This can also be seen through the passion that is observed among students working on a subject of history, and approaching it from many aspects (engineering schools, universities, etc.)
- Expertise on the development and dissemination of information. This includes occupations related to cultural mediation, ergonomists, psychologists, cognitive scientists, or all occupations related to science communication, and data visualisation. This field is therefore also involved in automation or computer programming.

## **4 Multi-dimension framework to support PLM for museums**

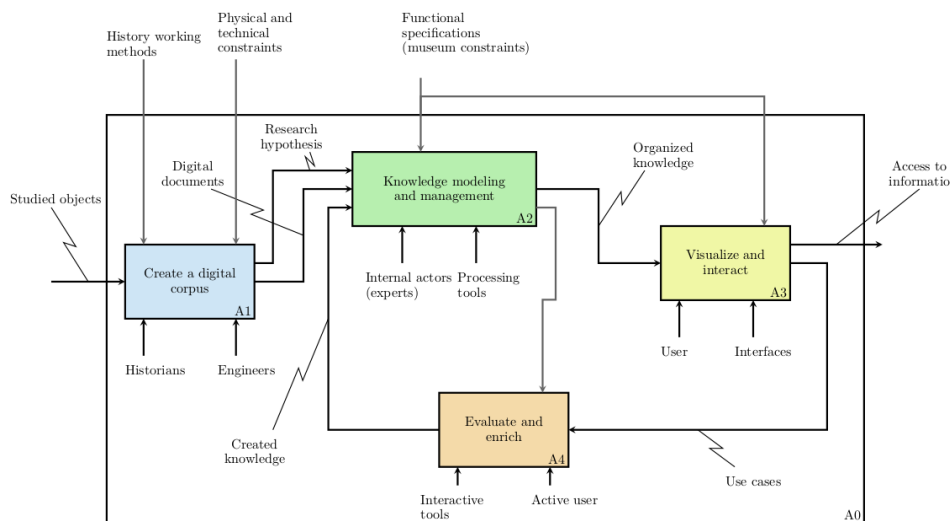
### *4.1 Methodology outline*

In this paper, we describe a reproducible methodology described in Figure 2 and based on industrial engineering concepts for historical knowledge management in museums. It basically consists in a product-process approach. The product meta-model can be

enriched and specialised through the different interfaces and different actor profiles in the system. Our methodology is integrative and collaborative. Actor profiles greatly influence data modelling and visualisation of information.

From an industrial point of view, our approach consists in generically solving the industrial problem in a museum; the design of mediation interfaces depends on the objects in the collection. We define here the different users and specifications required to implement a framework for the conservation and promotion of CH. This framework will be the core for the modelling, integration and dissemination of knowledge, specialising in historical heritage. We also show the various tasks and their level of automation.

**Figure 2** IDEF0 representation of the methodology for setting up the museum framework for historical knowledge management (see online version for colours)



The methodology focuses on the modelling and integrating processes of historical data and knowledge related to CH objects. The global process needs to be interoperable with the museum's collection management system to ensure conservation and promotion purposes. This paper presents a complementary framework for museum collection management issues. The link created between historical knowledge and promotion applications supports existing decision processes within museum activities (fund-raising, indexing, content creation and validation, etc.). It can also enable the creation of new activities: connecting collection objects together, creation of customised and thematic paths in the museum, complementary visits outside the museum walls.

In this way, our proposal acts as an innovative contribution to museum issues, providing methods and tools for the management of CH life cycles. Nevertheless, this proposition goes further than the usual definition of PLM as we deal with both the museum life cycle and the object's past life cycle.

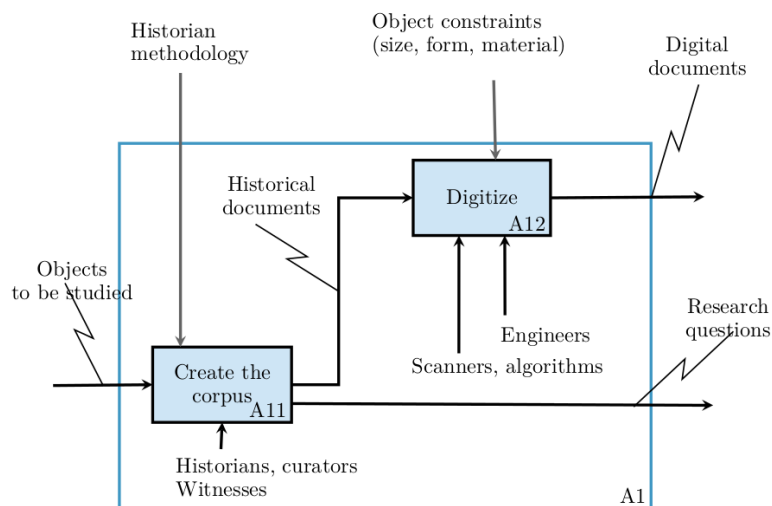


#### 4.2 Framework initialisation

The first step consists in establishing a corpus of historical sources (Activity A1 from Figure 2). This corpus is relevant to the studied object(s). This step involves different experts such as historians, museum curators when the object is already part of the museum collection, and experts for the decryption of historical sources (technical drawings, plans, CAD files, foreign languages, etc.). Therefore, a multidisciplinary approach has to be set up in order to understand both external and internal views of the object. This activity (Figure 3) can be split into three parts:

- 1 the choice of a set of research hypotheses and subjects
- 2 identification of related and relevant historical sources for the analysis of research hypotheses
- 3 digitisation of historical sources so that they can be processed into a digital form.

**Figure 3** Common historical process of source identification and corpus creation (see online version for colours)



Note: The digitisation step gives the ability to post-process data.

Part 1 consists in defining the needs and the historical context of the study (place, time, theme). These needs can evolve during the global process. This part will help to design the model of the framework which is related to historical knowledge (choice of class attributes, for example). Part 2 implies the identification of historical heterogeneous materials (photographs, written documents, archaeological evidence, etc.) from the archives. This inventory is mandatory to ensure the scientific validity of information. Part 3 helps to ensure the long-term preservation of documents, but also facilitates processing, promotion and dissemination of those documents.

As the framework needs to provide different levels of detail, it is important to capitalise the maximum amount of information during this first step. The idea is to start from existing and available information to let end user applications decide on the level of detail. One of our objectives is to highlight further research based on this collaborative and iterative knowledge construction. From an epistemological point of view, we provide new methods and tools for history and museology. The aggregation of expert knowledge leads to new research subjects that implies new knowledge, and so on.

This step is mainly carried out manually because it relies greatly on historical research methods. Using existing databases, supervised natural language processing techniques or reverse-engineering methods (form recognition, for example) could help with additional automation. Once again, our framework aims at providing complementary decision-support methods and tools for historical knowledge management.

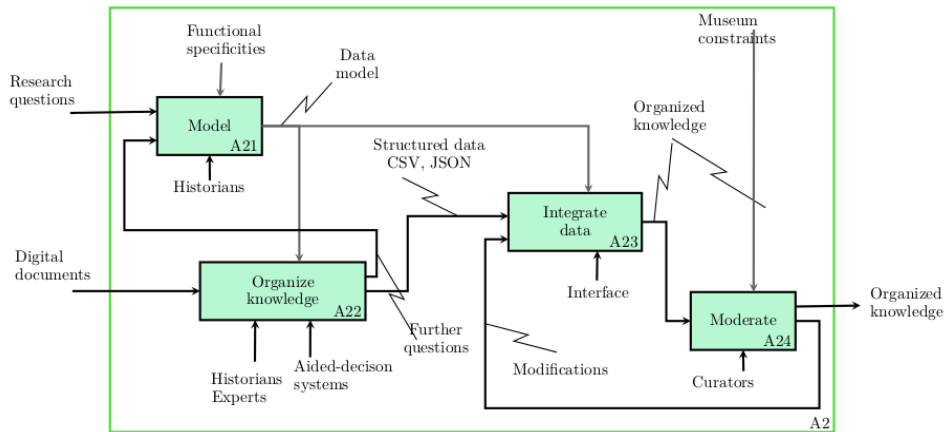
### *4.3 Knowledge organisation system*

The second step of our methodology consists in modelling and linking experts' knowledge with historical materials. Most processed materials are heterogeneous. Materials can be both physical objects and semantic information concerning these objects. Thus, this step deals with the complexity of historical information while being as close as possible to the working habits of the users of the system.

This activity (Figure 4) can be split into four parts:

- 1 First of all, we need to choose the conceptual model relevant to the studies' specificities based on the research hypotheses stated in step 1. This part is prior to the modelling of the experts' knowledge. The model can still be adapted with further developments and the multiplicity of users.
- 2 Secondly, we organise knowledge elements. In order to keep the process closer to the experts' working methods, knowledge elements are modelled as items in the form of simple note cards with few attributes. These cards are similar to historians' monographs and are related to the different items relevant for the understanding of the context of the objects studied. Those items are organised and connected in the knowledge organisation system which is the core of the framework.
- 3 The third part is related to the integration of knowledge elements and corresponding historical material in the knowledge organisation system.
- 4 Finally, experts can visualise and interact with their connected knowledge elements. In this way, they can modify and validate the organisation in an iterative process before disseminating it through the different access interfaces. This activity enables both content validation (museum constraint) and versioning of information. It guarantees the traceability of information which is crucial in historical research.

**Figure 4** Knowledge capitalisation approach for cultural heritage conservation and pro-motion (see online version for colours)



Typically, an involved expert can formalise his/her knowledge related to an item in the form of a note card that will be processed and organised among a network of many other items. Items can be of different types such as buildings, people, events, or even a specific historical subject. Then, the related note card can be modified or annotated.

As far as museum processes are concerned, and even if curators and historians can work in a collaborative way, they can also work separately. Historians' knowledge can then be adapted to the museum discourse in a separate and internal process within museum activities.

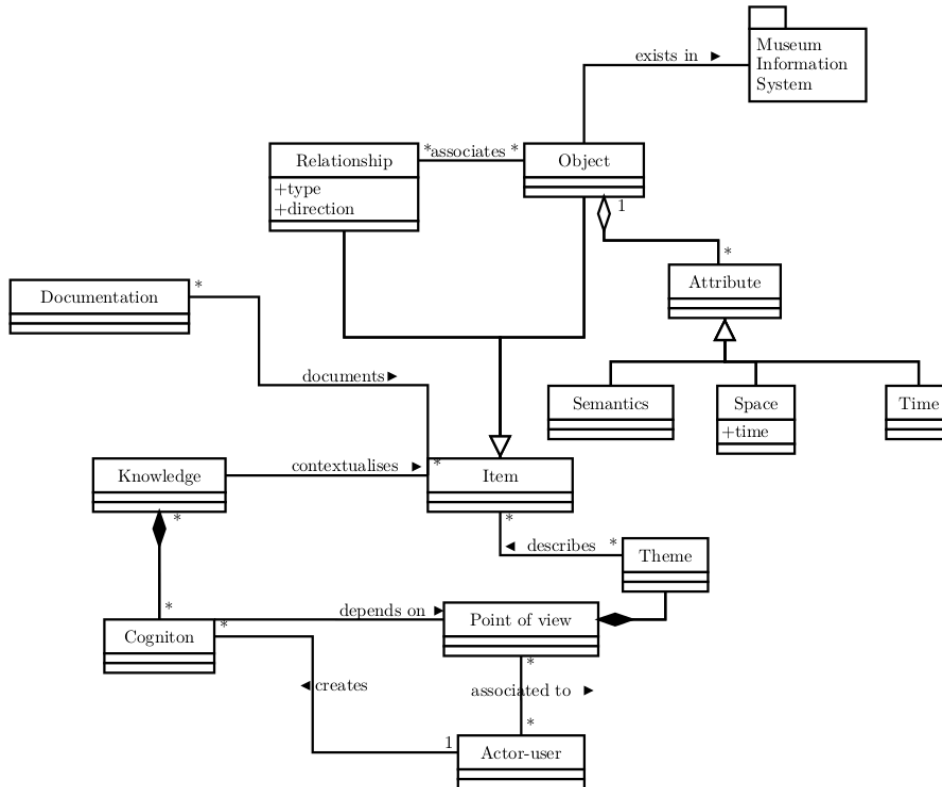
Regarding modelling, knowledge management implies a diversity of points of view from contributors especially when dealing with historical facts. Thanks to the framework they can both annotate any items to discuss or complete some parts but they are also able to specialise the item by adding other attributes.

Figure 5 represents the different classes involved in the process of organising historical knowledge related to a CH object. The resulting knowledge organisation system provides a way to understand the complex life cycle of such objects. It also provides access to different levels of detail depending on user research and available information.

- *Item* class is an abstract class specialising in the management of historical information heterogeneity. An item can be an *object* in the broadest meaning of the term: a physical object, a specific historical subject or a theme. This gives the possibility to represent, in the Knowledge Organisation System, the different aspects that are useful to the understanding of an object life cycle. But an item can also be a *relationship*. This particularity gives as much importance to a relationship as it gives to an object. The understanding of the context of an historical object relies on the understanding of the different relations between this object and its environment.
- *Knowledge* class contains the aggregation of *cognitons* related to a specific item and formalised in the form of note cards.
- *Cogniton* class is a conceptual class that differentiates the knowledge part provided by an expert or a group of experts and the aggregated knowledge for a specific item.

- *User-actor* illustrates the ability for a particular user to also interact and enrich the system.

**Figure 5** Meta-model of the framework's historical knowledge organisation system



To give a conceptual overview of how this model can be used to support the methodology discussed in this paper, section [sec:example] proposes an example of the different class from the conceptual model used by historians. This example highlights how the proposed system can serve as a decision support system for actors involved in the conservation and promotion of archives and especially CH objects. Finally, part [sec:result] describes the result of the implementation of the methodology supported by our knowledge organisation framework on a concrete museum project.

#### 4.4 Promotion and dissemination of knowledge

Promotion and dissemination of previously capitalised knowledge is the last step of the methodology. It enables museums to achieve their aim and also guarantees the possibility to enrich the system with further research and contributions. This step deals with the visualisation of connected items, associated knowledge and related historical documents (for experts). However, it also deals with the access and the understanding of information for external users (museum visitors).

Compared to the usual promoting applications, the framework provides the ability to drive interfaces by organised knowledge. Doing so, the interactive applications can be updated thanks to new contributions. This is one of the main issues shown in Section 2.1. Depending on contributors' profiles, information can be separately processed.

This promoting step is also a capitalising step and interacting with the system leads to the creation of new knowledge that can be integrated into the system. This is great added value for the process of conservation of CH objects by the versioning and the update of existing historical information. Moreover, it can help to identify any missing information and lead to further research. It can also integrate new levels of detail for a specific item. The next section provides a detailed example of an operational framework for a history museum and a dedicated knowledge-driven interactive interface to promote a 100 year old scale model of the harbour of Nantes, France.

#### 4.5 Historian working process example

To give the reader a proper view of the link with the model proposed in Figure 5, classes involved are highlight.

Historians have a significant role in the process of CH identification and understanding. Let us look at historians in the framework mentioned above. Which processes is he involved in? In which way does the framework help him to capitalise his knowledge and how does it impact the whole conservation and promotion process?

The historian is mainly involved ahead of the museum process of conservation and promotion of CH objects. He mostly takes part in the contextualisation of the object. His work leads to a retrospective analysis of the object life cycle. Based on his research (for example, the organisation of a territory to support industrial and shipping activities in our use case), he defines a set of directions and gathers relevant historical *documentation*. Those documents constitute the initial corpus defined in step 1 (activity *A1* in Figure 2).

Next, the framework's knowledge organisation system will assist the historian in designing a data model depending on his research questions (activity *A2* in Figure 2). For example, he can define keywords or descriptive *attributes* relevant to his research activity: a description of a technical system, a geographical area, a socio-economic analysis, a harbour environment, etc. Every significant piece of information is identified as an *item*. These *items* can be *objects* such as points of interest, or any of the subjects mentioned above. *Relations* between those *objects* are also integrated into the system because of their importance in the analysis of the historian's research questions. It is part his/her usual research approach.

He then formalises his knowledge as he would usually do in a free written form but this time, the framework acts as a decision-support system by capitalising this knowledge. Every historian or expert involved formalises his knowledge in a simple form: a *cogniton*. This *cogniton* is attached to a specific context including the related expert. The sum of the actors knowledge is connected to the system (class *knowledge*). Doing so gives the ability to keep a traceability of the information collected. This is important from an epistemological point of view.

The integration of this work in the system finally provides the means of interaction and navigation. Thanks to connections created by the framework based on similar keywords or characteristics, the system gives the ability to identify new research questions and to explore historical information through different dimensions. Historians

are eventually able to visualise their data (possibly linked to other works from other contributors) and interact: changing research hypotheses that would modify the model in activity A2, provide new pieces of information (under the form of annotation), add historical sources, etc. This part corresponds to activities A3 and A4 in Figure 2.

To sum up, historians can navigate among virtual and real world information, through dedicated interfaces in order to interact and so enrich the existing knowledge basis. This statement is also valid for any other actor, assuming that the corresponding interfaces exist. Thus, user context should be integrated into the framework. The meta-models partially described in Figure 5 act as a support for historical research activities. It assists the reverse-engineering of a CH object context. Historians intervene during A1 and A2 as an active contributor, and during A4 as a passive user but also possibly as an active contributor. The framework helps to execute those steps, especially during the modelling and the visualisation/interaction phases. Moreover, the framework supports collaborative activities and interactions that are mandatory to properly gather the maximum amount of knowledge for the contextualisation of CH objects. The framework also provides some automation in the process of knowledge capitalisation and so avoids additional and tedious work.

## 5 Results from the experimentation related to the promotion of a 100-year old scale model

### 5.1 Context of the project

In 2008, Nantes history museum started a research and development project on a wooden model, exhibited inside the museum. This scale model (Figure 6) designed in 1899 by Pierre-Auguste Duchesne for the World Fair in Paris in 1900, represents Nantes harbour at the very end of the 19th century. It is a great historical object, due to its size – 9.20 metres long and 1.85 metres wide, but also due to the geographical area (approximately 7 square kilometres). Until our project was achieved, museum visitors could not interact with the mock-up, nor get any historical information about it (except for information provided by the traditional ten-line text label).

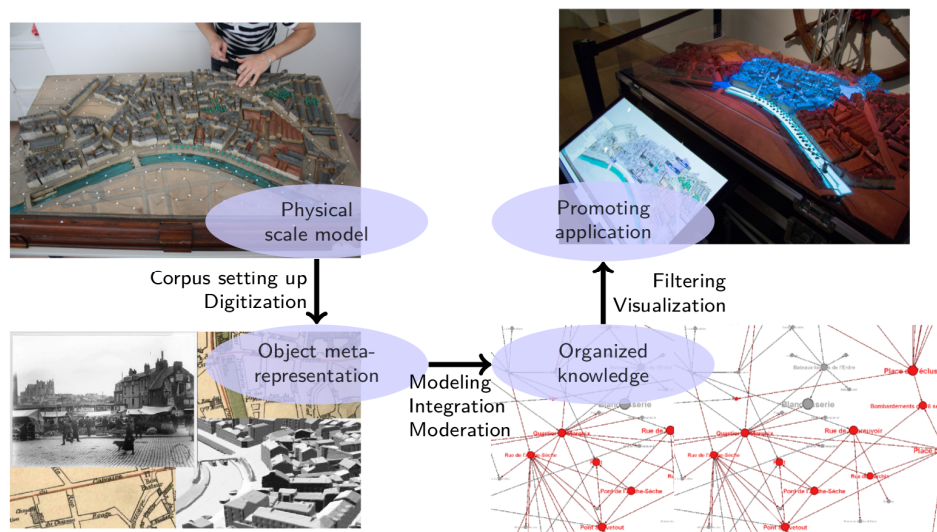
**Figure 6** Photo of the Nantes Harbour scale model exposed in room 21 of Nantes history museum (see online version for colours)



The goal of the project was to design an interactive system, connected to a database in order to provide information to visitors and to enable museum actors to interact with structured information. The database includes both contributions from the experts and material from the general public: photographs, postcards, etc. The usual way museums create such interactive systems is to embed the historical content within the end user application. Doing so, there is no possibility to overcome technological issues such as obsolescence nor to make use of the knowledge created to design the application. Figure 7 [img:methodo] gives an overview of the innovative aspect of our project. Based on the conceptual framework described in Section 3, we introduce two intermediates steps. The meta-model of the object to promote gives those involved the ability to interact and to capitalise their knowledge. Once the available historical documents are organised and connected to formalised knowledge, any kind of promoting application can be designed.

Finally, the end user applications are not dependent on the technology used, and various actors can interact with the framework. Through these interfaces, they can retrieve information depending on their use case context (museum visits, scientific purposes, real object advanced visualisation) or to capitalise new knowledge.

**Figure 7** Overview of the designed methodology applied to a museum collection object: 100 year old scale model of a district in Nantes, France (see online version for colours)



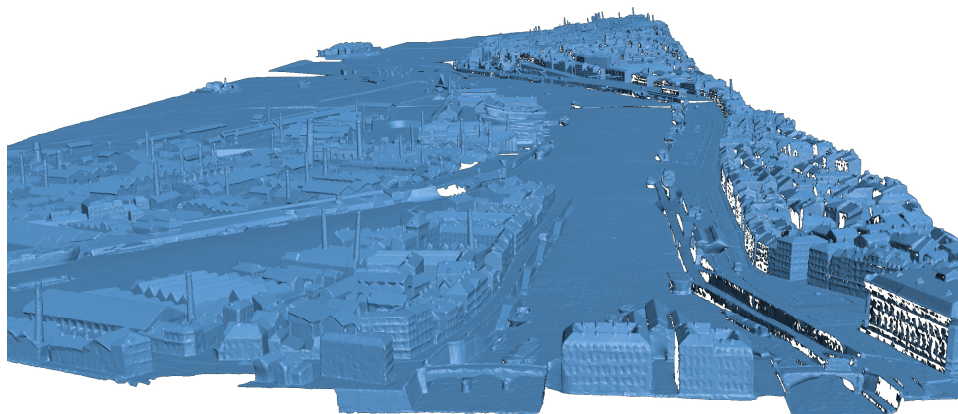
## 5.2 An historical information system dedicated to museum

We have designed an information system, based on the methodology and the meta-model described in Section 3. This will enable us to manage heterogeneous historical contents, and other materials coming from the process of ‘advanced industrial archaeology’. These documents can be classified into different types:



- 3D real objects such as the scale model itself.
- Virtual artefacts such as the 3D digitised model of the scale model (see Figure 8). The digitisation has been done thanks to 3D hand scanners. Another digitisation has been done with photogrammetry techniques to provide a suitable high-definition picture for the museum public and the interactive interface.
- Audiovisual historical material like photographs, paintings, archives video or audio samples, first hand accounts.
- Textual material like bibliographic references and archives. This also includes information produced using knowledge from historians and curators.

**Figure 8** 3D mesh coming from the digitisation of the Nantes harbour scale model (see online version for colours)



Note: The mesh is composed of 100 million points.

This information system can store both semantic and geometric data. We can therefore store the whole structure of an object (for example, a factory) from a macroscopic to a microscopic point of view. The system also provides links, or relationships that represent historians' knowledge. Visualisation of such knowledge is a complex task, from both the ergonomics and the computer programming points of view.

Thanks to this framework, actors involved in the conservation and promotion process of CH objects can expand the amount of available information. By capitalising their knowledge, actor-users of the system can facilitate museum conservation and promotion activities. Information related to CH objects can be easily managed by the different museum teams. Updates in the system are then transmitted to connected interfaces. As far as museum professionals are concerned, the methodology has facilitated the design of such frameworks, based on an open database. This approach gives them the ability to add, modify and validate historical content but also to reduce the cost of designing final promoting applications. The historical knowledge is digitally stored and it can be reused for further projects.

On a more operational level, the database and interactive interface rely on free software (Postgres and PostGIS for semantic and geographical data, Kivy for multitouch interface design). Using dedicated software for the management of historical information and graphical assets has many benefits. On one hand, it gives the ability to index pieces

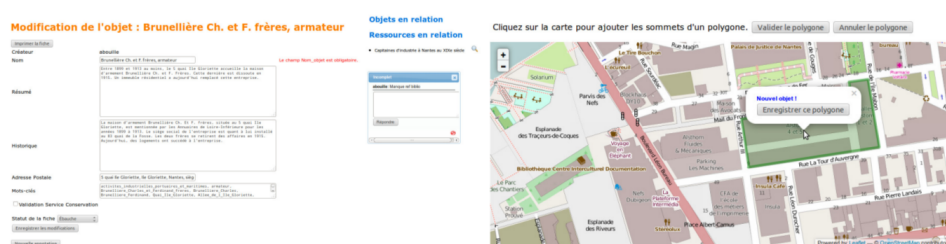
of information to expose metadata on the web using mappings with metadata schemas such as Dublin Core. Data could then be accessed through API requests or harvested through OAI-PMH protocol. On the other hand, the amount of assets and information and links between information can be extended. The 3D digitised model, for example, is one of the existing assets and is partly used for the visitors interface but can be of great help for a virtual reality experiment or for curation purposes. Every information or asset has possible interest and could be further linked under supervision to other elements.

In this project, we collected information and historical material about 500 *objects* related to the history of Nantes' harbour. Based on these 500 points of interest, historians have produced knowledge under the form of written description, connections between objects and related assets. They have also pointed out corresponding areas on the physical model, on 3D digitised model and on modern maps. It represents years of historian work to collect such data so it needed to be sustained. Filling out the database is done thanks to a web interface with private access.

Figure 9 gives an example of an administration web interface for the management of historical information related to museum objects. Connected and authorised users can access different functionalities:

- historians or curators can add new information based on their research or fund-raising. It can be added through different interfaces: a map-based interface, text-based interface, and various other forms depending on the information (iconography, bibliography, etc.). The content can be linked semi-automatically to existing data thanks to the identification of term co-occurrence;
- curators and museum mediators (learning officers) can discuss integrated information with annotation tool, modify and validate it. They provide an adapted version of information dedicated to museum visitors. Finally, they can validate it through an internal validation process. Once it has been validated, connected interactive interfaces (see [sec:interface]) are updated;
- anonymous visitors can access the validated information and propose a personal contribution (research or own documents, for example).

**Figure 9** Web-based interface for the administration of content (see online version for colours)



Notes: Different profiles can connect and have access to different actions. This interface is the principal access for the museum to manage information about the scale model.

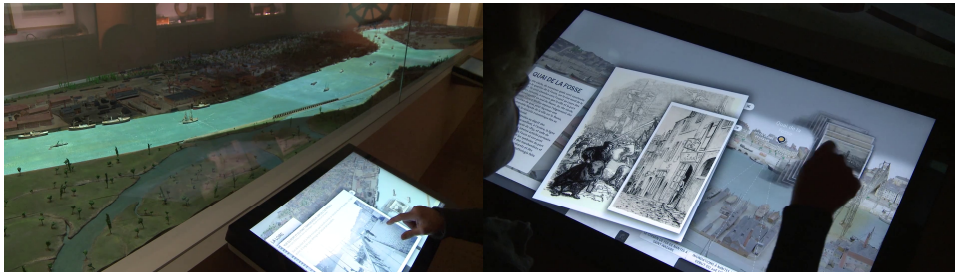
In addition to this main objective, our framework also acts as a decision-support system for historians. Once they are authenticated in the system, they can work on their own dataset. This dataset is a subset of the network created within the framework modelled in Figure 5. Based on this concept-knowledge space, we now want to identify the knowledge-mining modes of historians. This means identifying the ways the system will interact with historians whether they want to consult or to fill in information.

### 5.3 Knowledge-driven interface for interactive visualisation

The proposed interface for the promotion of the scale model within the museum walls is composed of a knowledge database, the historical object, and some visualisation devices: touch-screens and video-projectors (see Figure 11). In fact, due to the process we applied throughout the project, we can now imagine many other interactive applications: virtual worlds, augmented reality, web application, etc. One of our main objectives has been achieved. The knowledge organisation system is able to sustain the documentation about a CH object and can constitute the core of a PLM system for museum collections. Further documentation can be added and discussed among experts and every object in the museum collection can be managed in the same way this scale model is managed.

The system is scalable, and the historical material is free from technology evolution, contrary to most museum promoting systems. Scalability is provided by semi-automatic processes, whether it concerns 3D model acquisition and treatment (automatic semantic recognition algorithms) or content updates of visualisation applications.

**Figure 10** Overview of visitors interacting with the augmented reality interface (see online version for colours)



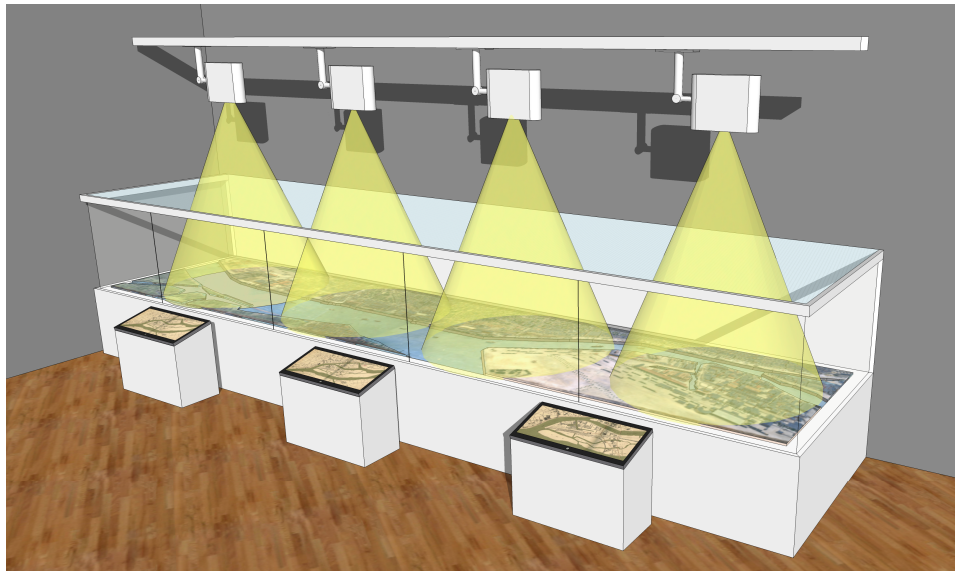
Notes: Users can manipulate historical documents related to their selected points of interest and a projection feedback highlights the area on the scale model. Suggestion links are also provided by historians based on semantic proximity between items.

The basic use case concerns a single visitor. He/she can navigate through the main interface by zooming, panning, and selecting a place (see Figure 10). First, user can touch any part of the 2D map related to the part of the scale model that is in front of him (Figure 11). The harbour has been divided into main parts (districts) and sub-parts (individual buildings or entities). Once the visitor has selected an area, the main part is highlighted with related content. Then, the sub-parts of the district are highlighted and can be selected. Once he selects an area, the system displays the available related content in a carousel (Figure 10 on the right) and videoprojection highlights it on the scale model

(see Figure 10 on the left photo). Graphical assets can be zoomed and the text can be re-sized depending on user abilities. Some related points of interest are also underlined to give some navigation clues for the visitor. Non-geographical elements are displayed at the bottom of the screen. They enable visitors who select a particular bridge or street to see all the bridges/streets on the physical scale model. This leads to serendipitous navigation based on our semantic network (Figure 12).

To face the impossibility of exhaustive knowledge regarding such CH object, we give the ability to visitors to contribute. If some areas are not documented or not well documented, visitors get a message on the touchscreen inviting them to let curators know if they have personal interesting documents.

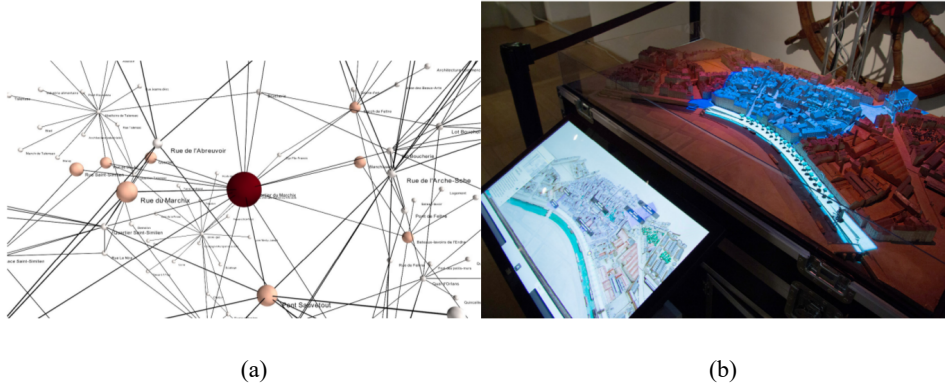
**Figure 11** Overview of the final interactive augmented reality interface for the museum scale model (see online version for colours)



The projection feedback is ensured by the 3D model: every information related to a specific area on the scale model is linked to geographical coordinates and 3D coordinates. Once some area is selected by the user, implemented software makes the calculation of the physical part of the model to highlight based on the related part in the 3D digitised model. Although visitors can actually only see a 2D map of the model on touchscreens,

To illustrate the modular aspect provided by our framework, a specific back-office has also been built next to the museum system to help the museum team in their guided tours. Museum guides can, in fact, choose the content to display in advance. In doing so, they will take control of the desired screens (possibly all of them) in front of the object thanks to a RFID badge. The RFID chip contains every ID previously selected by the museum staff. The system will then be able to display selected items on the screen to the group of visitors. It will help the guide illustrate his presentation.

**Figure 12** Museum interactive visualisation interface, (a) represented as the network (b) driven by knowledge organisation system (see online version for colours)



Notes: Thanks to our framework, the visitor interface can be enriched with additional content. The cultural heritage object can, in fact, be questioned using different themes.

In addition, the system can be enriched by experts and the general public as explained in the previous section. This is a significant aspect because we cannot ensure that the whole knowledge related to the object was capitalised in the first iteration. We thus allow the system to capitalise future knowledge. This is a major innovative aspect of our approach to the museum world.

The use of such promotion applications would generate new knowledge, for example, that the system has to take into account for its new knowledge reference basis. We also have in mind to improve the system so it can assist researchers in their work. For example, it may provide decision help while doing research on a particular historical subject.

This application has been evaluated with the support of the museum experts. Despite the first short learning phase, the evaluation shows that such a system significantly improves the understanding of the exhibited scale model. It brings new ways of interaction with CH objects and broadens the visit outside of the museum. Visitors interact with the object while expanding their knowledge. This learning is facilitated by our augmented reality system.

## 6 Discussion

In this paper, we have discussed museology issues when dealing with historical knowledge and how PLM approach can be customised for CH objects. From the modelling aspects to the dissemination of knowledge, many activities and actors are involved. Heterogeneity is one of the main characteristics as far as CH is concerned.

The main challenge is to provide multiple and more or less personalised access to CH. Museums are facing an important problem related to the wealth of CH and visitor expectations. Most of the applications are one-shot designed. The lack of generic

approaches to assist the process of knowledge creation and dissemination in the field of museology was the main reason for us to design our framework.

State of the art has shown plenty of existing CH digitisation and promotion projects. However, they focus either on the acquisition process (photogrammetry, 3D scanning techniques) or on the dissemination process (3D visualisation, virtual reality, semantic web access). Some recent works have shown the potential of web ontologies and semantic web technologies to efficiently model historical and CH data. The main objective of such work is to provide crossings between the different repositories and to make computers able to perform inferences. Nevertheless, the process of modelling data with ontologies does not suit the working methods of historians and curators. It implies an a priori model of the subject area agreed on by everybody. We designed our methodology by focusing on actors involved in their daily activities. By doing so, the dissemination of data, thanks to semantic web techniques, can be one of the final possibilities using model mapping techniques.

Two main issues in our approach can be underlined:

- 1 the connection of new information in the existing network.
- 2 the retrieval of information depending on the context.

For the first one, we have to deal with multiple actors having multiple points of view. This implies different writing methods and different vocabularies. We have answered this question with the ability to annotate the different items in the system. Furthermore, museums have the possibility to create a dedicated content for their purpose. But as far as historians' research is concerned, we should implement new mechanisms for indexing information. One of our ideas currently in progress is the integration of natural language processing techniques. By extracting terms in a new document, we are able to identify its characteristics and index it within the existing network based on co-occurrences. We could also implement automated processes based on inferences (other kinds of knowledge). But we need to ensure that such a process is supervised by experts. This would guarantee the robustness of the system when the model evolves.

For the second one, we need to manage different levels of detail. For now, we only deal with one geographical level of detail (city harbour) combined with multiple temporal levels of detail. We should be able to integrate further levels of detail, for example, on a specific object (building, company, people, etc.). One of the advantages provided by our system is that it enables historians and curators to identify such research leads. Visualisation techniques can highlight any lack of information (missing documents, untrusted sources, imprecise information) and point to further research questions. Finally, to display information properly during the research, the information retrieval process should take the context into account. By context, we mean user context (profile, knowledge, background, age, etc.) as proposed by, and situation context (research work, serendipity, etc.). For instance, only serendipity is considered as the user can explore available information as he wants. It is important to notice that this is a chosen objective. Our system is designed not only to provide expected information but also unexpected information.



## 7 Conclusions

The complexity of historical artefacts is different from contemporary manufacturing of industrial products. Models used by business enterprises, even if they are complex and sometimes difficult to implement, do not take into account the extended time of life-cycles and do not require as many viewpoints as historical objects.

This paper presents our scientific proposition to handle museology issues: a framework for knowledge management for CH. Our framework acts as a decision support system for museology. It is complementary to classical history working methods and museum activities. It helps to improve the conservation and promotion of CH objects.

This framework contributes to:

- Scalability of knowledge (temporal aspect)
- Heterogeneous and multi-dimensional relationships (affiliation, history relationships, geographical relationships)
- Interoperability of knowledge (multidisciplinary exchanges)
- Re-usability of the framework (independent of the nature of the project)

This proposition has been applied to a museum project for the promotion of a CH scale model. A proof of concept has been fully demonstrated and evaluated. It has proven its efficiency for both museum teams within their daily activities and the design of promoting applications for museum visitors. It helps to capitalise the context of a CH object, support experts during the conservation and promotion process and enhance the possibilities of promoting such a heritage. Based on our results, we can validate the reproducible aspect of the method to other museum objects. It can lead to a real and more complex network of information in order to create further semantic connections between objects throughout the visit in and outside the museum. Moreover it provides museum curators with the ability to drive end user interfaces using knowledge and to capitalise it. Furthermore, it can be used to provide more interaction for visitors. Many fields of application can be involved: museography, archives, urbanism, engineering (design and reverse-engineering, innovation), archaeology, historiography. Finally, it can help to foresee new ways of innovation in product design if historical knowledge is considered. If the capitalisation phase is done early in the product life-cycle, it will be much easier to anticipate the CH phase.

## References

- Allanic, M. et al. (2014) 'Towards an enhancement of relationships browsing in mature PLM systems', *IFIP WG5.1 11th International Conference on Product Lifecycle Management* [online] [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45937-9\\_34](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45937-9_34) (accessed 31 March 2015).
- Assouroko, I. et al. (2012) 'Semantic relationship based knowledge management and reuse in collaborative product development', in Rivest, L., Bouras, A. and Louhichi, B. (Eds.): *IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2012*, IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp.1–13 [online] [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-35758-9\\_1](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-35758-9_1) (accessed 19 August 2014).
- Bernard, A. and Ammar-Khodja, S. (2007) 'Virtual engineering based on knowledge integration', *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 2, No. 3, pp.137–154 [online]



- <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452750701677509> (accessed 15 November 2013).
- Champion, E. (2011) 'Playing with the past', *Playing with the Past. Human-Computer Interaction Series*, pp.129–155, Springer, London [online] [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84996-501-9\\_6](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84996-501-9_6) (accessed 27 September 2013).
- Collectif (2013) *Principles of Seville*.
- Cotte, M. (2012) 'World Heritage, concepts and criteria', in Douet, J. (Ed.): *Industrial Heritage Re-Tooled: The TICCIH Guide to Industrial Heritage Conservation*, pp.167–173, Carnegie Publishing.
- De Luca, L. et al. (2011) 'A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage', *Computers and Graphics*, Vol. 35, No. 2, pp.227–241 [online] <http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2010.11.009> (accessed 4 July 2013).
- Desvallées, A. and Mairesse, F. (2010) *Key Concepts of Museology*, 90pp, ICOM, Armand Colin, Paris, France, ISBN: 978-2-200-25398-1.
- Doerr, M. (2003) 'The CIDOC conceptual reference module: an ontological approach to semantic interoperability of metadata', *AI Magazine*, Vol. 24, No. 3, pp.75–92 [online] <http://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/viewArticle/1720> (accessed 16 March 2012).
- Eide, O. et al. (2008) 'Encoding cultural heritage information for the semantic web: procedures for data integration through CIDOC-CRM mapping', in Arnold et al., D. (Eds.): *EPOCH Conference on OpenDigital Cultural Heritage Systems*, pp.1–7.
- EPOCH (2009) *The London Charter*, Denard, H. (Ed.), 7 February 2009, 13pp, King's College London.
- Ermine, J. et al. (2004) 'Histoire et Ingénierie des Connaissances', *Conférence « Sources et ressources pour les Sciences Humaines »*, EHESS, Paris, France, 3–9 Décembre 2004.
- Gabellone, F. (2009) 'Ancient contexts and virtual reality: from reconstructive study to the construction of knowledge models', *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 10, pp.e112–e117 [online] <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2009.10.001> (accessed 12 March 2013).
- Gaitatzes, A., Christopoulos, D. and Roussou, M. (2001) 'Reviving the past: cultural heritage meets virtual reality', *VAST '01 Proceedings of the 2001 Conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage* [online] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=585011> (accessed 24 August 2013).
- Gillings, M. (2005) 'The real, the virtually real, and the hyperreal: the role of VR in archaeology', *Envisioning the Past: Archaeology and the Image* [online] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470774830.ch12/summary> (accessed 14 August 2014).
- Hervy, B. et al. (2013) 'Co-working for knowledge management in cultural heritage: towards a PLM for museum', *IFIP WG5.1 10th International Conference on Product Lifecycle Management*, Nantes, France, Springer, 409, p.317, DOI: 10.1007/978-3-642-41501-2.
- ICOM (2016) *International Council of Museums*, ICOM Statutes, 9th July 2016, 12pp.
- Isaksen, L. (2011) *Archaeology and the Semantic Web*, December, 260pp, Doctoral Thesis, University of Southampton.
- ISO 21127:2014 (2014) *Information and Documentation – A Reference Ontology for the Interchange of Cultural Heritage Information*, ISO 21127:2014.
- 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* [online] [http://ifgi.uni-muenster.de/~janowicz/chwy09\\_janowicz.pdf](http://ifgi.uni-muenster.de/~janowicz/chwy09_janowicz.pdf) (accessed 12 July 2013).
- Kiritsis, D., Bufardi, A. and Xirouchakis, P. (2003) 'Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems', *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 17, No. 3, pp.189–202 [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034604000187> (accessed 8 September 2014).

- Laroche, F. (2008) 'Advanced industrial archaeology and techno-museology: a new virtual life for industrial heritage', *TICCIH Bulletin*, Summer, No. 41, pp.3–4, ISSN 1605-6647.
- Laroche, F., Bernard, A. and Hervy, B. (2015) 'DHRM: a new model for PLM dedicated to product design heritage', *CIRP Annals – Manufacturing Technology* [online] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850615000359> (accessed 29 April 2015).
- Lutters, E. et al. (2014) 'Network based requirement specification', *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 1, pp.133–136.
- Nuessli, M-A. and Kaplan, F. (2014) 'Encoding metaknowledge for historical databases', *Digital Humanities 2014*, Lausanne.
- Roussou, M. (2002) 'Virtual heritage: from the research lab to the broad public', *Virtual Archaeology: Proceedings of the VAST Euroconference*, pp.93–100, Arezzo [online] [http://makebelieve.gr/mr/research/papers/VAST/VAST\\_00/mroussou\\_VAST00\\_press.pdf](http://makebelieve.gr/mr/research/papers/VAST/VAST_00/mroussou_VAST00_press.pdf) (accessed 18 April 2014).
- Sinclair, P. et al. (2006) 'Semantic Web integration of cultural heritage sources', *WWW 06 Proceedings of the 15th international conference on World Wide Web*, pp.1047–1048.
- Terzi, S. et al. (2010) 'Product lifecycle management – from its history to its new role', *International Journal of Product Lifecycle Management*, Vol. 4, No. 4, pp.360–389 [online] <http://inderscience.metapress.com/index/F5616744226710V2.pdf> (accessed 8 September 2014).
- UNESCO (2015) *Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention*, UNESCO [online] <http://whc.unesco.org/en/guidelines/> (accessed 22 December 2016).
- Weiss, Z. and Pankowski, M. (2007) 'Knowledge reengineering for reverse engineering purposes', *The Future of Product Development* [online] [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-69820-3\\_41](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-69820-3_41) (accessed 6 May 2015).

## Notes

- 1 Museology can be defined as “the study of a specific relationship between man and reality, a study in which museums, a phenomenon set in a specific time, are only one of the possible manifestations” extending the definition proposed by Georges-Henri Rivière in the ‘60s (Desvallées and Mairesse, 2010).
- 2 For example, ADLIB, ArtSystem, CUADRA, MDS. More complete list can be accessed at <http://www.rinascimento-digitale.it/documenti/collection-management-system.pdf>.



Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

## CIRP Annals - Manufacturing Technology

journal homepage: <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>



# Accessing enterprise knowledge: A context-based approach

Florent Laroche\*, Mohamed Anis Dhuieb, Farouk Belkadi, Alain Bernard (1)

IRCCyN – Ecole Centrale de Nantes, UMR CNRS 6597, 1 rue de la Noë, Nantes, France

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Knowledge management  
Knowledge based system  
Context-awareness

### ABSTRACT

This paper deals with the challenge of knowledge reuse and its adaptability to each activity context in the working environment. The scientific work focuses on the context idea as defined by the ubiquitous computing paradigm. The purpose of this approach consists of conceptual models design allowing knowledge structuration according to multiple completeness scales. The proposed approach allows the management of contextual information in a knowledge-based system. A prototype has been implemented to demonstrate the industrial feasibility and the contextual task assistance tool is called "Digital Factory Assistant". The Assistant is dedicated to production line workers and can also be applied in design context.

© 2016 CIRP.

## 1. Introduction

Complementary visions contribute to the Factory of the Future (FoF) initiative [1]. According to recent researches, the Factory of the Future requires holistic production systems with learning capabilities integrated within the entire product lifecycle: from design and initial configurations up to after-sales services [2]. Moreover, with the new FoF strategies, companies intend to use new organization for production networks so as to maintain their competitive position in the markets [3].

In particular, the smart factory will enhance the control and the optimization of factory processes based on advanced ICT (Information and Communication Technologies) tools.

Indeed there is a correlation between how the concept "factory of the future" is introduced in an enterprise and the place given for humans. Positioning human as a key driver for better factory performance has been pointed out by many visions and roadmaps about the Factory of the Future [4]. Specifically, Westkämper outlined that the next production systems will be more human-centred [5]:

*"Factories are the place of humans work. Humans generate and drive factories. Humans are the most flexible resource in the manufacturing system. [...] Humans can use computational intelligence to learn and overcome "oblivion" and taking advantages of computational knowledge. [...] Their motivation and their creativity as well as their experience are the driving forces for innovation, adaptation and optimization in manufacturing".*

The continuously and constantly changing landscape of today's factories leads their management to focus on new and more efficiency production systems. So as to succeed, new industrial practices are combined with the technological revolution from the new ICT trends.

In their book, Westkämper and Walter [5] demonstrate that, next generation of knowledge based systems to be used to support humans activity should contribute to this vision. The objective of maximizing the benefits of knowledge management in production environments is shared between both industrial and research communities. In order to help users during the business process, systems must integrate cognitive aspects and allow enhancing workers awareness within their virtual and physical working environment. Awareness of the collective situation can also improve the collaboration between actors [6] and reduce industrial accident and failures risk [7].

Nowadays, manufacturing knowledge is reaching a key factor for the success of the factory by contributing to the improvement of product quality and the development process.

How to combine new technologies and human being?

This paper deals with the challenge of knowledge reuse and its adaptability to each activity context in the working environment. The objective is to propose a new way for structuring knowledge and managing contextual information. We will demonstrate that worker knowledge depends on the context of use.

After introducing the main objective of the paper and the research questions, the second section details the proposed meta-model and the developed approach for context-knowledge adaptation. The third part of the paper explains how the knowledge can be formalized according to different completeness scales using conceptual graphs (CGs). In the fourth part of the paper, a guideline for implementing and using the knowledge structuring approach is presented. A synthesis and discussions conclude the paper.

## 2. Ubiquitous computing for Knowledge Management

21st century is quickly moving towards intelligent factory thanks to the development of many IT trends. One important concept is the Ubiquitous Computing (UC). UC is based on the principle that computers will be deeply incorporated in our daily life until they "disappear" [8,9].

\* Corresponding author. Tel.: +33 240376953.  
E-mail address: [florent.laroche@ircyn.ec-nantes.fr](mailto:florent.laroche@ircyn.ec-nantes.fr) (F. Laroche).

Even Weiser has set up the basis of ubiquitous computing [10] starting early 90s, UC applications is still up to date. Main reason is that contemporary technologies are more mature and consequently, the concept of UC can be applied.

Context-awareness is considered as a core feature of UC. Context-awareness is defined as: the capability of ubiquitous systems to adapt the provided services according to the instant user situation. Schilit was the first one to use the term “context-aware” in 1994 [11]. Since this discovery, a significant amount of prototypes and solutions has been developed. However, we can consider that ubiquitous computing is still not very well analyzed by the manufacturing research community.

A critical aspect to reach proper efficiency of such systems is the definition of robust models based on generic concepts covering a large variety of situations [12].

### 2.1. Proposed meta-model

For supporting the context-knowledge structuring approach, we have developed a conceptual model (Fig. 1). The model is built around a master object: the enterprise object.

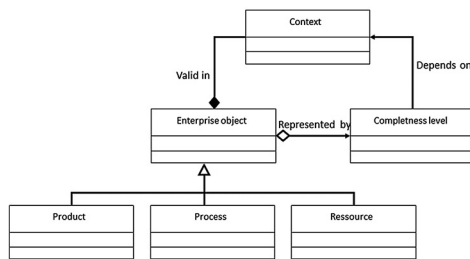


Fig. 1. Proposed context-knowledge meta-model.

An *enterprise object* is defined as “an entity of the enterprise manipulated by itself and associated to its own performance” [13].

The *completeness level* concept is based on the hypothesis that knowledge associated to each enterprise object can be decomposed with three levels as explained in part 2.2 of this communication.

Each level can translate a full *completeness level* of an activity domain in the factory. Therefore, Knowledge can be represented as a “book collection” encapsulating three knowledge parts: the product, the process and the resources used.

However, the *enterprise object* is realized in a particular specific *context* [14]. Consequently, the *knowledge completeness level* depends on the *context* where the *object* is requested/used.

### 2.2. Context-Knowledge adaptation process

In this section we detail the conceptual framework proposed to manage the ubiquitous knowledge reuse process. We called this framework “the context-knowledge adaptation engine” (Fig. 2). The main objective is to extract the knowledge and to give it to the right person, at the proper time and the suitable place; in other words: knowledge that fit with a given user situation context.

Context-awareness is achieved by different components. They support the management of context information. The *context data extractor* component is going to extract the context data from *context sensors* and different *existing IT systems*. Once the context data are gathered, the *context inference* process applies rules (previously established) in order to generate other additional context information of the current situation.

At the beginning of the process, the *context identifier* is empty (equals to zero in the context recognition). Then the process will compare different context elements: those that have been extracted and/or inferred with other situations previously stored in the *context repository*.

At the next step of the adaptation process, the *knowledge configuration extractor* will extract the relevant knowledge asset for the given context. Therefore, this component takes a situation as

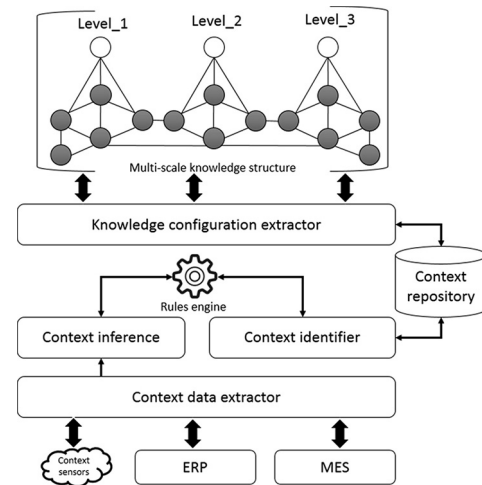


Fig. 2. Architecture of the context-knowledge adaptation process.

input and induces knowledge set configuration according to it as output.

According to ubiquitous computing paradigm, a computer technology can be considered as ubiquitous if it anticipates user's needs. It must operate proactively to provide the appropriate information or assistance regardless it is a standard or specific situation/action. Moreover, with respect to Weiser's definition [10] about ubiquitous computing, this adaptation process has to be invisible for the user.

Those principles add challenges for implementing the *Context-knowledge adaptation process*: forwarded knowledge has to be proactive as much as possible.

### 3. Knowledge formalization: a graph based approach

The scientific framework is implemented inside a multi-scaled knowledge database. This database stores and formalizes various forms of knowledge. It can include tacit knowledge (expert knowledge formalization) and explicit knowledge (such as enterprise technical documents). The scientific backbone of our proposal is that this multi-scaling can:

- enhance the learning process during working phases;
- help the workers to acquire more knowledge on the activity that he is performing usually as an implicit way.

This approach can also reduce the information overload by giving the workers the appropriate knowledge asset (worker being either beginner, intermediate or expert). The multi-scaled knowledge base is formalized using conceptual graphs [15]. In the following part, we will present a graph-based formalization of each *enterprise object* concept explained in Fig. 1.

#### 3.1. Product Knowledge

The decomposition of the product knowledge into multiple scales consists of decomposing the set of its views into three abstraction levels.

For each step of its lifecycle, the way of representing the product changes. Quantity of information and level of the product *knowledge completeness* also change at each step and are nearly never the same.

If we focalize at a determined state, the principle of multi-scale knowledge structuring is defined as the *multi-view model* [16].

For designing the multi-scale knowledge database we use a nested graph as presented in Fig. 3. The different views that a product may own can be represented by the graphs  $VP_i$ .  $VP_i$  includes sub-graphs that represent the different elements related to the views structuring the product.

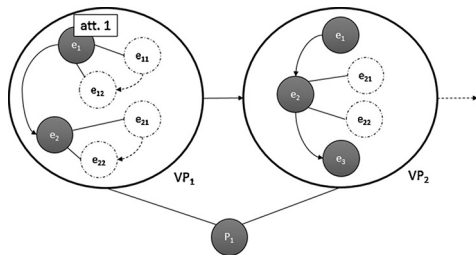


Fig. 3. Formalization of product related knowledge with nested graphs.

The sub-graphs are represented in three different levels including:

- The concepts  $e_i$  that constitutes the  $VP_i$ .
- The attributes associated to each concept ( $att_i$ )
- Relations between concepts.

### 3.2. Process Knowledge

Our scientific proposition for representing the knowledge related to a process requires to set up a special formalism. According to the level of need of the user and his/her competency, the knowledge-based system must allow to structure the process activities and tasks.

In real life, main hypothesis is that execution of some activities becomes over time more axiomatic. This hypothesis affects particularly repetitive tasks that do not require a lot of cognitive effort during their execution.

Using the nested graph formalism can help to solve this problematic: an activity can include some tasks that can be also decomposed in sub-tasks. For example in Fig. 4, an activity  $A_1$  is split into two tasks  $T_1$  and  $T_2$  that are also split into two sub-tasks.

According to this structuring approach, a beginner will have the tasks sequence represented by the vectors  $[T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}]$ .

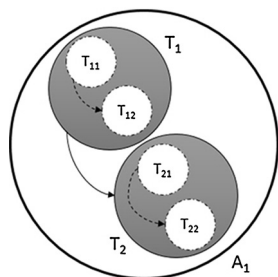


Fig. 4. Process related knowledge with nested graphs.

### 3.3. Resources Knowledge

In terms of multi-scale structuring, the knowledge related to the enterprise resources depends on the type of interaction between the resource and the worker. For example, an operator focuses on how to use a machine in order to execute his/her tasks when a maintenance agent focuses on how to maintain the machine. Both of them have different points of view and therefore different scales of *knowledge completeness* regarding the same resource.

However, from an informatics point of view, Knowledge related to the resources is only represented by a main graph; interactions between the users and the resources are included in the database all along the whole lifecycle (design, manufacturing, use, maintenance, etc.). Each interaction way  $MI_i$  is composed of other sub-concepts structured in three completeness levels as represented in Fig. 5.

The “in-extenso” knowledge structure combines many formalisms used for representing products, processes and resources. The global knowledge structure is formalized using a hypergraph gathering nested graphs (Fig. 6).

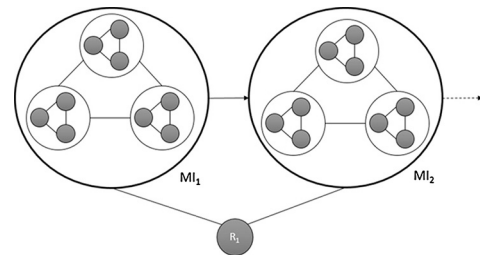


Fig. 5. Resource related knowledge with nested graphs.

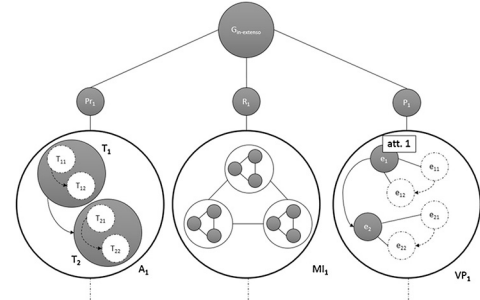


Fig. 6. The multi-scale knowledge structure with graph formalism.

If we consider that the PPR knowledge (Product|Process|Resource) represents respectively the graphs GP, GPr and GR, the global structure is formalized by the hypergraph:

$$G_{in-extenso} = \{GP \cup GPr \cup GR\}$$

The vertices of each graph are presented by the following sets:

$$\begin{aligned} GP &= \{CP1, CP2, CP3\} \\ GPr &= \{CPr1, CPr2, CPr3\} \\ GR &= \{CR1, CR2, CR3\} \end{aligned}$$

Each vertex of these graphs is connected to another nested graph representing a *completeness knowledge* scale. The  $G_{in-extenso}$  hypergraph is obtained by combining the concepts of each nested graph. The three *completeness levels* are represented by combining each scale of each *enterprise object*.

The hypergraph is represented by a set of concepts  $C$  and a set of edges  $E$ :

$$\begin{aligned} G_{in-extenso} &= (C, E), \\ C &= \{CP1, CP2, CP3, CPr1, CPr2, CPr3, CR1, CR2, CR3\}, \\ E &= \{e_1, e_2, e_3\} = \{\{CP1, CPr1, CR1\}, \{CP2, CPr2, CR2\}, \{CP3, CPr3, CR3\}\} \end{aligned}$$

Fig. 6 illustrates the hypergraph formalism obtained by combining the nested graphs of products, processes and resources.

## 4. Implementation

We present in this section the architecture and the workflow of an application prototype for demonstrating the concept “Digital Factory Assistant”.

First, a knowledge-based system has been developed. It contains the global approach for creating a contextual access to the knowledge enterprise. This “companion” consists of a dynamic web application allowing the management of business contexts and the related knowledge set.

The technical architecture operating for the companion has been programmed as shown in Fig. 7.

In order to implement the graph formalism presented in the previous section, we used a graph-oriented database:

- the structure of the database is represented by a set of nodes;
- each node represents concepts and edges;
- each concept/edge represents the relations between concepts.



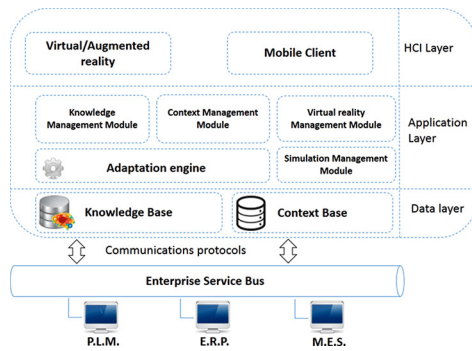


Fig. 7. Software architecture of the ubiquitous companion.

Other properties can be added to edges and nodes in order to describe with more details the semantic of the graph.

Fig. 8 is an extract of the knowledge database implemented with Neo4j database. The correlated concepts formalizing the knowledge are connected with a node representing the *completeness knowledge* level. Then, this set is divided into multiple related situations each one represented by a node (Situation\_101) in this example.

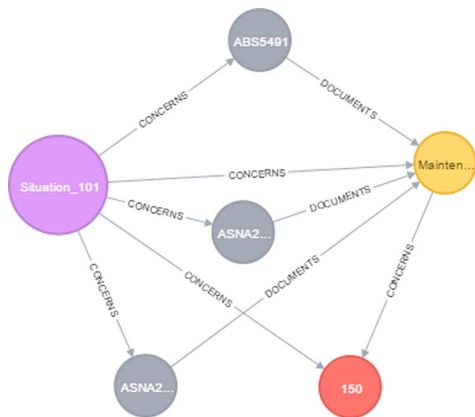


Fig. 8. Extract from the knowledge database.

For manipulating and extracting the knowledge, two solutions can be implemented:

1. a web interface where the worker will ask the “companion” for an help to take the right decision;
2. a total automation of the “companion” using Augmented Reality. For a working situation, system will capture in real time the product status and place, will compare with the virtual factory and could advise or help worker to choose the best solution.

Solution 2 is seriously studied by enterprises as it does not consider people but help to improve quality and delays.

Between those two interfaces, it is also possible to design a hybrid automatized that will provide good information at the right time and place but with, for example, a simple pad.

Indeed, as the system requires capturing and digitalizing the context of use, restitution is also totally transparent for the user. The “companion” fits requirement of ubiquitous concept as developed in part 2 of this paper.

The purpose of the paper is to explain how to capture and store knowledge by using intelligent management classification. Main purpose is to demonstrate that digitizing the context is required for a better knowledge management process. However, as our research use the ubiquitous basis, manipulation of knowledge is mixed with the capture phase.

## 5. Conclusion and discussion

The research proposal reported in this paper highlights the importance of context extraction and modelling when a user wants to have access to manufacturing knowledge.

A multi-scale based approach has been introduced to structure the manufacturing knowledge set according to different completeness levels. The scientific proposition meets the challenge of forwarding context-aware knowledge to factory stakeholders and reducing the global enterprise information overflow.

The structuring approach allows to provide the access to each actor in the factory the appropriate set of knowledge according to his/her expertise by giving the needed information (in the appropriate format) to the right person at the right time and place. Having access to this knowledge set depends not only of the expertise level but also on multiple parameters such as the activity, the role, etc. Those parameters should be presented explicitly and managed (captured, inferred, stored, etc.) separately from the knowledge base. Indeed this global capitalization challenge requires that all the process, all the product, all the users, all the documents. . . that enterprise manage are digitalized, modelled and indexed. Previously Fig. 2 has shown that the *context extractor* must be coupled to ERP, PLM, MES. . . however few enterprises are fully digitalized. Hopefully, they would be in the “factory of the future”.

In addition, we must highlight that we also face technological limits. We can use conceptual language to design database integrating time and space relations but what about informatics languages? Creating multi-scale knowledge database requires new technologies that do not exist yet.

Global enterprise knowledge capitalization and technological tool for designing database are the two main problems to be solved in the future. That is why it is so difficult to implement *context-knowledge adaptation process*: mind-set businesses are not ready.

## Acknowledgements

This work has been carried out within ARTUR research project supported by the region of “Pays de la Loire” in France. Many thanks addressed to our industrial partner.

## References

- [1] Tolio T, Ceglarek D, El Maraghy HA, Fischer A, Hu SJ, Laperriere L, Newman ST, Vancza J (2010) SPECIES—Co-evolution of Products, Processes and Production Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59(2):672–693.
- [2] Molcho G, Zipori Y, Schneor R, Osen O, Goldstein D, Shpitalni M (2013) Computer Aided Manufacturability Analysis: Closing the Knowledge Gap Between the Designer and the Manufacturer. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(1):153–158.
- [3] Vancza J, Monostori BL, Lutters BD, Kumara SR, Tseng M, Valckenaers P, Van Brussel H (2011) Cooperative and Responsive Manufacturing Enterprises. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60(2):797–820.
- [4] Manufacture, The Technology Platform on Future Manufacturing Technologies, <http://www.manufacture.org/>.
- [5] Westkämper E, Walter F (2014) *Towards the Re-industrialization of Europe*, Springer Berlin Heidelberg 978-3-642-38501-8.
- [6] Belkadi F, Bonjour E, Camargo M, Troussier N, Eynard B (2013) A Situation Model to Support Awareness in Collaborative Design. *International Journal of Human-Computer Studies* 71(1):110–129.
- [7] Bernard A, Hasan R (2002) Working Situation Model for Safety Integration During Design Phase. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51(1):119–122.
- [8] Dey AK (2001) Understanding and Using Context? *Personal and Ubiquitous Computing* 5(1):4–7.
- [9] Abowd GD, Dey AK, Brown PJ, Davies N, Smith M, Steggles P (1999) Towards a Better Understanding of Context and Context-awareness. *Handheld and Ubiquitous Computing*, Springer: 304–307.
- [10] Weiser M (1991) The Computer for the 21st Century. *Scientific American* 265(3):94–104.
- [11] Schilit B, Adams N, Want R (1994) Context-aware Computing Applications. *Mobile Computing Systems and Applications*, IEEE, 85–90.
- [12] Krummenacher R, Strang T (2007) Ontology-based Context Modelling. *Proceedings of the Third Workshop on Context-Aware Proactive Systems, CAPS 2007*, June, 22.
- [13] Labrousse M (2004) *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise. Proposition of a unified conceptual model for dynamic enterprise knowledge management*, PhD Thesis Ecole Centrale de Nantes.
- [14] 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* 3(Special Issue No. 2):105–122. 33, 50, 141.
- [15] Sowa JF (1983) *Conceptual Structures: Information Processing in Mind and Machine*.
- [16] Demoly F, Monticolo D, Eynard B, Rivest L, Gomes S (2010) Multiple Viewpoint Modelling Framework Enabling Integrated Product-process Design. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing* 4(4):269–280.

# Advanced Industrial Archaeology: A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects

F.Laroche<sup>1,2</sup>, A. Bernard<sup>1</sup>, M. Cotte<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research institute in Communications and Cybernetics of Nantes (IRCCyN), Ecole Centrale,  
Nantes, France

<sup>2</sup> Centre François Viète for science and technical history, University, Nantes, France

[florent.laroche@irccyn.ec-nantes.fr](mailto:florent.laroche@irccyn.ec-nantes.fr), [alain.bernard@irccyn.ec-nantes.fr](mailto:alain.bernard@irccyn.ec-nantes.fr), [michel.cotte@univ-nantes.fr](mailto:michel.cotte@univ-nantes.fr)

## Abstract

Since virtual engineering has been introduced inside industries, time processes have been reduced and products are more adapted to customer needs. Nowadays, the DMU is the centre point for all teams: design, manufacturing, communication etc. However, physical mock-ups and prototypes are sometimes requested. Consequently, a back-and-forth action between the real and the virtual worlds is necessary. Our research team has developed a reverse-engineering methodology for capturing technical characteristics of industrial objects but also for capitalizing knowledge and know-how which are required for contextualizing life cycles. More precisely, we work with ancient industrial machines. It is what we call Advanced Industrial Archaeology. Thanks to the coupling of different kinds of 3D digitalization technologies and CAD software, we are able to re-design old industrial objects and old processes. To illustrate our proposal, we will describe one of the experiments we have done with a salt-washing machine which is nearly 100 years old: from the global 3D digitalization of the plant to precise parts design, we have rediscovered the enterprise process and understand its integration in the economic context.

## Keywords

reverse-engineering, 3D digitalization, CAD, Advanced Industrial Archaeology, technical heritage

## 1 INTRODUCTION TO THE PROBLEMATIC

In a complex industrial context, where everything has to be done more and more quickly and must be more and more profitable, workers and industrial environments are transferred, transformed, etc. unused industrial machines are generally destroyed, or at best, stored. It is the technical knowledge of all humanity that disappears.

Today, Knowledge Management is a well-known application for enterprises. When we work on knowledge, two requirements have to be taken into consideration (Thevenot 1998):

- a clear identification of the knowledge involved and the capacity of its management;
- the necessity to build and to use an identified methodology and a formalized process for its management.

Dealing mainly with implicit job knowledge – the so called know-how – (Amidon 2002), few methods exist proposing capitalizing of all the knowledge involved: product knowledge, process knowledge etc. and thus, from the product idea up to its industrialization, including the design phase.

Nowadays, the situation of technical and industrial heritage raises many problems: How can we manage and develop it in the context of museums and sites? How can we ensure life prolongation for the technical information of the collections, archives and heritage sites? This technical information, testimony of the past, is ageing very quickly; like a puzzle where parts wear or disappear, the technical data disappear progressively with the time.

Conservation of technical heritage encounters several major difficulties coming mainly from:

- a zero sensitization of the industrial world regarding the value of their technical heritage and their interest in the possibilities of heritage backup;
- financial difficulties to conserve, maintain and ensure the transportation of large size objects;
- a human difficulty due to the lack and the loss of the user consciousness and/or the disappearance of the machine designers and manufacturers.



The protection of scientific, technical and industrial heritage is a rather recent idea. It was in Britain, in the Sixties, that the concept of what British people call "industrial archaeology" was first introduced. The first experiment on an object for the capitalization and the popularization of heritage was the Ironbridge (this one was the first iron bridge, built in 1779 and classified as a UNESCO world heritage site in 1986) (Rolland 2001).

Generally, we rescue objects that are easily transportable or aesthetically correct. But artefacts that seem too complicated to conserve or that are not aesthetically correct are rejected. Moreover, for 200 years, objects have become more and more complex. Consequently, for the protection of this technical heritage there are still questions about the methods, the tools and the competences that have to be employed for capitalizing and popularizing it. In fact, new methods and new tools have to be defined for this museology of the 3<sup>rd</sup> millennium for doing better than we have in today's museums as Paul Rasse describes it (Rasse 1991): "Nowadays, in museums, we are very far from the factory and the workshop, the noise and dust, tiredness and sweat, [ ] the violence of the social relationships contribute to the history of technologies".

Understanding an old technical machine can be easy to achieve for former workers but it can be difficult and highly delicate for museum curators or visitors of the museum.

Consequently, a new question appears: what can be done with the industrial knowledge heritage on a local scale, a national scale or an international scale? Could methods and tools used in industrial engineering provide an answer to this new need: from the knowledge capitalization to the object digitalization going through the dynamic mock up to a virtual show? It is a new reverse-engineering process we propose to transpose from Industrial Engineering to Heritage: it is what we have called Advanced Industrial Archaeology.

In this paper, we will explain the methodology we have developed:

- First, the global process is presented;
- The second part describes the first part dealing with knowledge management and physical object capture;
- Next, we will concentrate on the 3D digitalization and the decision tree we have established;
- Finally, an example will demonstrate our proposal: from global capture to 3D digitalization for details; design, modelling and context understanding.

## **2 HYPOTHESIS**

Considering that saving and maintaining physical objects is very costly for museums, and sometimes dismantling is nearly impossible as the machine crumbles to dust, our approach proposes a new kind of finality: we propose to preserve it as a numerical object. Consequently, engineers and industrial engineering tools and methods can give answers for the capitalization, conservation and popularization of old machines.

Our proposition consists in reversing the design time axis from end of lifetime back to the initial need. Thanks to a re-design by modelling of the technical machines and a contextualization in its environment, it can be possible to restore it for multiple finalities and more widely to restore the working situation of the socio-technical production system (Bernard & al 2002):

- control and measurement tools: from homemade measurement tools to laser scanning of the architects (systems with physical contacts, passive/active systems without physical contacts);
- design: from CAD tools to synthesis imagery;
- dynamic: technical machines with real kinematics with the representation of the flows, the fluids, the workers and the manufacturing environment;
- virtual visualization: from Web visualization to virtual reality;
- physical visualization: from the intermediate representation models of objects (Bouge & al 2002) thanks to rapid prototyping to a realistic and/or functional reconstruction of the machine.

Introducing new technology can be a real benefit for both museums and visitors. Usually, old machines do not operate or cannot be exhibited in a museum, so it could be a real and realistic new solution for

capitalizing heritage. Globally, there is always the problem of cost and security to preserve the machine functionalities: components wear, the need of a machine driver etc. Consequently, using virtual technologies can be a real benefit for visitors and curators: Virtual Reality is a new mediation tool. Contrary to videos and thanks to interactivity, it is easier to understand the operating situation: the visitor is no longer a spectator but an actor. As he is immersed in the system, he can test the virtual machine to its limits. Moreover, the mediation-tool detail level can be adapted by the curators to the targeted public and thus make the machines come alive.

Figure 1 details the global overview process proposed. It demonstrates the interoperability possibilities between social sciences and engineer sciences. Two main steps can be deployed:

1. *Advanced Industrial Archaeology* → object and knowledge capture,
2. *Techno-museology* → popularization of the knowledge.

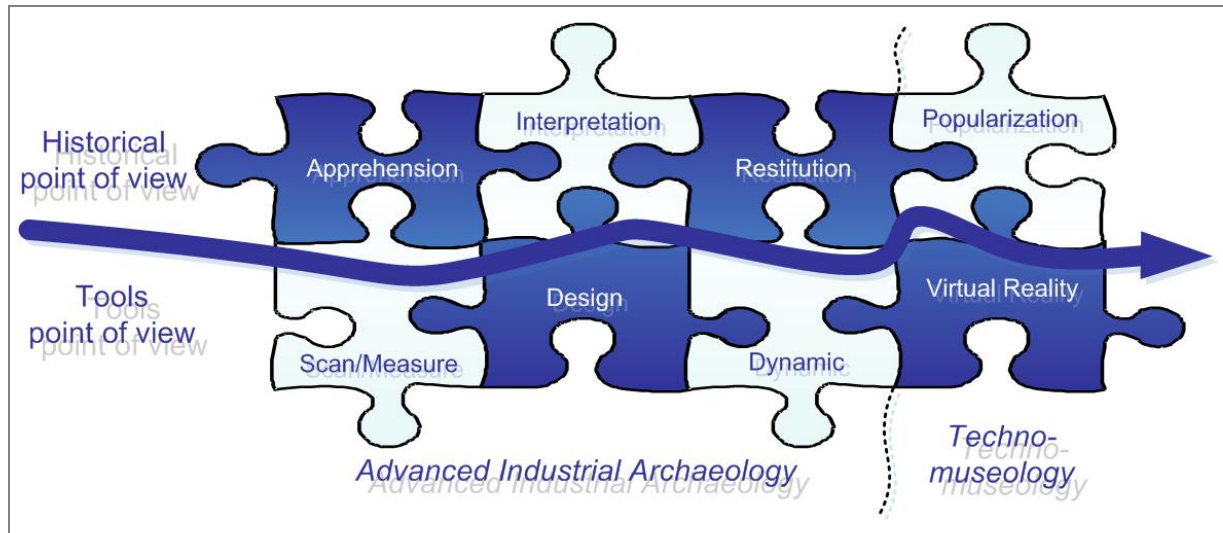


Figure 1: Global process methodology

The need is defined by the action chain resulting from technical history:

*Apprehension → Interpretation → Restitution → Popularization*

Apprehension is defined by the action of understanding, of grasping by perception, imagination, memory... Interpretation is defined by the action of giving an explanation or a meaning. Restitution is the fact of giving back something. Popularization consists in emphasizing. Popularization is a subclass of popularization: when popularizing, we allow everybody to have access to the object and its associated knowledge.

Tools and methods are defined by the digital chain from industrial engineering:

*Information Capture (physical and textual) → 3D design → dynamic simulations (mechanical and Situations of use) → Virtual Reality applications*

### 3 REVERSE-ENGINEERING PHASE

The purpose of this communication consists in establishing the basis of *Advanced Industrial Archaeology*. Consequently, we will focus on the first step of the process: the reverse-engineering phase. Figure 2 details the main steps that must be followed for virtualizing a physical object and associated knowledge.

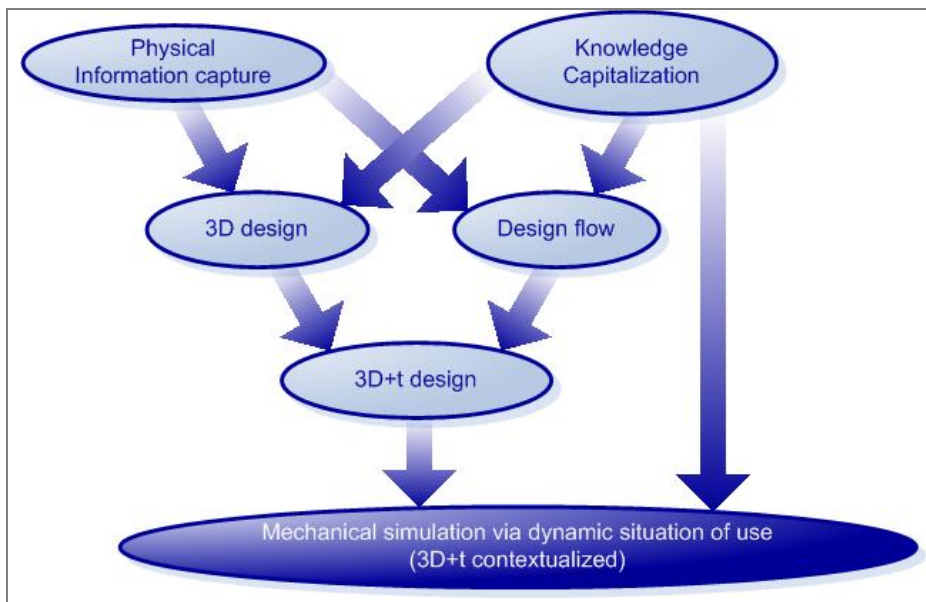


Figure 2: Reverse-engineering methodology

### 3.1 Definition of objects and knowledge involved

Before capitalizing knowledge (material or immaterial), it is necessary to identify the knowledge concerned. In this part of the paper, we will define what we call the material knowledge characterized by the real object of the industrial physical and the material and immaterial knowledge associated to it. As per terms of the APTE method related to the external functional analysis, this external knowledge can be defined as: the external environment of the object in its common use context.

The object taken in its intrinsic character, from a geometrical viewpoint, is a finite element which is fixed and limited. But the object relocated in its context cannot be considered as a finite and determined element, such as the intermediate object theory (Jeantet 1998), the object is a part of a dynamic, of a process where it can be:

- a raw material;
- a manufacturer;
- an intermediate component or a final component.

Within an epistemological framework, the object is defined as an artefact. According to the biologist Jacques Monod: "Any artefact is the product of a human being who expresses in a real obvious way one of the fundamental properties characterizing all the human beings: they are part of a project and they are representing within their structures and their performance achievement (for example, the creation of artefacts)." (Monod 1970)

Human industry can also be qualified as a production. The created artefact or the created object is qualified and quantified. It is part of the real world and presents a physical structure and a function (often associated with the performance concept). The object can be designed either from the structure towards the function or from the function towards the structure (FBS-PPRE model from Michel Labrousse (Labrousse 2004)). Consequently, humans will combine the two characteristics of the artefact by creating a functional physical structure. Following this definition, the artefact can be characterized by:

- its geometrical features related to the physical structure (points, lines, curves, surfaces and 3 dimensional volumes);
- its geometrical characteristics related to the function (points, lines, curves, surfaces and 3 dimensional volumes);
- its design features related to the function and the structure (we are speaking about internal mechanisms; for example, characterization of the physical properties and the chemical properties or even the colour which can also be associated with the chemical properties if it is one of the bases of the material);
- its aesthetic features (they do not interfere with the geometrical and technical definitions but aesthetic features complete these definitions; aesthetic features can be at a geometrical level or at a technical level; they can be selected without raw material justification).

Conserving technical machines means that the object but also its operating mechanism has to be capitalized by taking into account its technical and social context. Mechanically, operating is defined by functions and associated kinematics but also by processes and situations of use. Consequently, an object is considered as a technical and industrial one if it can be set in a socio-technical system. According to an epistemological point of view of the technical historian, an object must be contextualized so as to determine its value and to understand how it operates.

As in archaeology (we think about excavations of archaeological sites) the object can be represented by three aspects: a genesis, a life and a place, and this, within a double approach: material and intellectual (Reflexion 2006). Conserving only the physical object is not enough. This means that the object has to be contextualized by capitalizing the information, data, notes and know-how:

- at a technological and industrial level: in order to understand its operation and its insertion in industrial plants;
- at a social and economical level: so as to contextualize the object in order to determine the technological developments.

In his book "the life of objects", the anthropologist Thierry Bonnot states that "an object takes a meaning only in a human context" (Bonnot 2002). A machine or a system is significant only if it can relate to a social act and if it can help to conserve all the aspects of a technical culture, i.e. the physical objects but also the vestiges it contains: gestures, know-how, social relations etc. The object studied cannot be dissociated from its context (know-how, political context, social context, economic context etc.). Just like the photocopy gives back the object within its framework, the sound track on which has been recorded critical information for a better understanding of the object, or the written report where the human context has been consigned, all those elements enable the recontextualisation of the object (Rolland 2001). Consequently, depending on the desired finalities of the popularization, it will be advisable to capitalize all the necessary knowledge for achieving this goal.

Indeed, understanding and studying an old technical object requires large contextualization. Consequently, we will have to consider many various sources (Laroche & al 2006). Here are some examples of sources:

- machine drawings published by manufacturers;
- plant layout, cartography of the factory, physical mock-up;
- catalogues, patents, general documents of the manufacturer;
- handbooks, specialized reviews, World Fair reports;
- private industrial files or public funds (J series of the French departmental records);
- technical and industrial public files (M and S series of the French departmental records, public records);
- interviews, anthropological and sociological investigations;
- 

Sometimes, the physical object is in such an advanced state of deterioration that digitalization would be without interest or impossible as the object no longer exists in the industrial plant. That is why, if additional capitalized knowledge is sufficient, it will be possible to carry out an extrapolated virtual reconstitution, that will be more authentic.

### **3.2 Description of the methodology**

According to figure 2, to create a digital model of an old technical object, several phases are required. The process consists in digitizing the object in order to immortalize it and to produce data that will be coherent, readable and transmissible to future generations.

#### *Determining the state of the object*

At the beginning of the study, the object life period that has to be represented in the digitalization process and the modeling process must be determined and detailed:

- "new" object, in its initial state of first use;
- object in use with possibilities of including adaptations and innovations;
- object at the end of lifetime;
- object in its archaeological state of discovery or when it was decided to preserve it;
- object partially extrapolated according to the gaps of State A.

### Digitalization

If the object exists partially or entirely at the time of the study, it is possible to digitize it directly in three dimensions in order to collect its geometry. Several solutions of digitalization exist: laser scanning, photogrammetry, measurement systems with contacts etc. According to the size of the object, its material nature and its state of deterioration, the technologies used may be different. In the next part of this paper, we will develop the digitalization methodology we have set up.

It should be noted that if the object no longer exists, it will be possible to design an extrapolated model thanks to external documents and knowledge, (see paragraph before).

### Re-designing: static components

The digitalized dots obtained have to be treated in order to be able to design the various components of the object. Taking into account the file size and the wish to create a realistic model, we would prefer solid design instead of surfacing.

Moreover, as modelling is costly in terms of time and money, it is necessary to specify the model accuracy level expected: screws, chamfers, precision for moulding parts etc. It is the same problem as has been encountered with over-quality in manufacturing processes.

### Re-designing: dynamic functions

As used objects are not inert, they are animated by mechanisms that have to be virtually restored and simulated in order to validate operating (Houten & al 2000). In the first step of the process A-B, it is essential to produce a functional virtual model that is mechanically realistic and as accurate as possible. That is why using CAD programs is better than using CG (Computer Graphics) programmes. CG programmes are usually used for creating animated pictures, movies etc. With CG programmes, simulations and dynamics are not realistic as a "world" is created in which one the objects will move but this world does not have the properties of the terrestrial physical laws such as the fundamental principles of mechanics (examples: gravity, stress, speed, acceleration). The digital mock-up will be realistic and not real; but as realistic as it can be (Eversheim & al 2000). Obviously, digital files will never replace physical objects: there is only one way to represent reality.

Many experiments we have done on technical heritage have led us to the model shown in figure 3 (Laroche & al 2005).

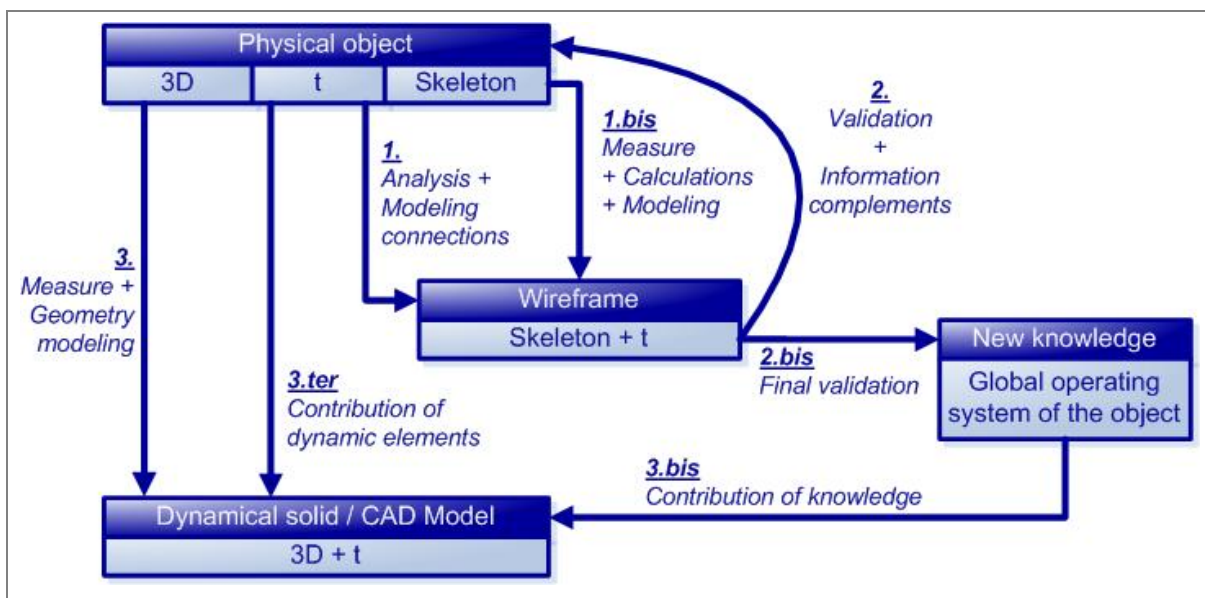


Figure 3: Method for modelling old systems

The physical object is separated into its 3D components, its skeleton and the "time" concept. Time "t" will create the dynamic situation.

Methodology associated to figure 3 is:

1. *an object skeleton has to be designed;*
2. *adding the concept of time, it will produce a kinematic sketch; drawn in 3D space, it will produce a wireframe that has to move back-and-forth with the physical object in order to validate it and to fix the dynamic;*
3. *the last step will produce new knowledge maturation: the mechanism understanding;*
4. *next the dynamic digital model is created by anchoring solids on the skeleton.*

#### *Environment and other dynamic flows*

Except for kinematics, simulations are carried out in post-processing and without direct visualization. For example, this is a problem for modelling fluids: in the case of a steam engine, it is actually very difficult to visualize the steam exchanges inside CAD software. However, such visualization is essential for curators and all non-expert people.

It will also be necessary to consider the need of environmental restitution of the machine: actuators and motors, the nearest machines, the industrial plant, etc. Do they have to be digitized and modelled?

#### *Materials and other aspects*

An object is defined by its geometrical characteristics ("3D") and its kinematic functional properties ("3D+t"). But functionalities could also be due to the material properties used: it is necessary to carry out a virtualisation of materials.

In the same way, materials or paintings are design information that could be essential for a future restitution and that must be taken into account during the digitalization step.

Where are the limits of the external appearances in relation to the concept of authenticity? Is it necessary to restore false colours to prove virtuality?

With regard to design, an object can be characterized by its colourimetric but also by auditive and olfactive perceptions: how to capitalize on sounds and odours in digital form? Notice that this information has sometimes disappeared with the dismantling or the non-possibility of operating the machine.

## **4 3D DIGITALIZATION**

In order to resolve the problem of patrimonial object conservation, we have to capture physical data if it exists. The first basic tools are: decametres, slide callipers, micrometer callipers. However, in order to optimize cost and time, for measuring complex machines, 3D digitalization can be employed: TMM laser radar, X-ray, 3D scanner laser with topographical reconstruction in real-time.

Firstly, in this part, we will give the state-of-the-art of the different technologies that can be found on the market or new technologies resulting from fundamental research that will emerge in the near future and that will answer the problems of 3D digitalization of patrimonial objects. We distinguish between active systems and passive systems: the main difference is due to the technology used as it emits a light beam or not.

Moreover, as we usually work with old objects, contact can be sometimes impossible or even forbidden. The best solution has to be identified clearly and the choice must take into account external constraints from environmental surroundings. The last paragraph of this part will explain the methodology we have developed for choosing the best tool.

### **4.1 Systems with physical contacts**

The following are the basic measuring instruments that have been used for a long time:

- decametre,
- slide calliper,
- micrometer calliper, etc.

There are also many mechanical palpation systems that are almost automatic and are usually combined with a canned jib controlled by a computer. Some of them are named TMM for Three-dimensional Measurement Machines. But the most important difficulty is that the object to measure has to be brought into the laboratory, as those measurement systems are usually not movable. Moreover, they need many settings in order to be efficient and measuring is very slow. However, they can be effective on large objects: from 0.5 m<sup>3</sup> to 115 m<sup>3</sup>.

## 4.2 Passive systems without contact

Usually used for graphic design, these systems are passive without contact since they capture information with photographic systems or stereoscopic systems. The acquisition tools are cameras and movie cameras.

Photographic systems enable 3D models to be built rapidly thanks to high definition digital photos. The associated process is:

1. *detecting common points between photographs,*
2. *automatic distance calculations and 3D wireframe design,*
3. *textures application using photographic definition,*
4. *automatic virtual camera or virtual video camera positioning.*

It is necessary to state for the model precision that depends of the camera definition: the more accurate the camera is, the more the model will be accurate.

## 4.3 Active systems without contact

Active systems without contact are technologies that generate short waves for measuring; for example: the laser. According to the object size to be digitized, there are various solutions:

- “desktop” laser scan: box containing the scanner. Accuracy = 0.1 mm. It is suitable for only small size objects,
- TMM laser radar. High speed, high accuracy,
- 3D scanner laser. For example from Minolta. They are the most popular and are used for medicine, industrial engineering, archaeology, etc.
- X-ray tomography systems,
- Interferometer with optic fibres,
- Optic measuring system

## 4.4 Classification

The technology that will be used depends on the dimensions to be acquired ( $\dots < 1\text{m}^3 < \dots < 10\text{m}^3 < \dots < 60\text{m}^3 < \dots$ ), and on the desired accuracy, the acquisition time available and the possibility to handle/move the object. Consequently, dealing with the digitalization of patrimonial objects, it would be advisable to combine the technologies (active/passive systems with/without contact) in order to optimize the acquisition chain (e.g. without contact due to serious state of deterioration).

Moreover, our classification takes into account the numbers of handling actions that have to be done in order to get the whole 3D model. If only one angle is considered, it will return only a stereographic view. Consequently, it is necessary to combine various views and/or various kinds of scanners. For instance, during the Computer Aided-Design-Manufacturing & Measurement Integration conference, Boeing presented a multiple-scanner digitalization system that is used for controlling wing dimensions (Richey & al 2001).

In order to use it within its context, i.e. taking into consideration the object conditions and what can be done or not with the patrimonial object, we have established a decision tree (figure 5). Based on criteria, it helps to find the best solution for digitalizing the object within the time available, the precision needed... They are two kinds of criteria:

- The operability factors that result from the technology to be used (figure 4),
- The data related to the object state (figure 5).



Relevance of measurements?	Firstly, it is necessary to decide the necessity, or otherwise, of digitizing the whole object. For example, in the case of a crane, it would be a waste of time capturing all the girders since they are identical.
Object full-scale?	If the object is incomplete or does not exist, missing parts can be designed according to the designer's knowledge, the external knowledge and know-how.
Palpation?	Possibility of palpation of the object.
Relocating?	Possibility of relocating the object.
Radiations?	Possibility of exposure to radiation: technologies using various wave-lengths (infra-red, visible, X-ray...); sometimes, due to its state of deterioration, the object would not be able to tolerate certain wave-lengths.

Figure 4: The main factors related to operability

The material	Define the object material.
Accessibility	Sometimes measurements have to be made from vision angles that are not accessible or even those that are inside the object.
Size/volume	The size of the object and the volume that has to be digitized.
Kinematic digitization	The desire to capture its state at work.
Time taken for digitization	When many points have to be captured, some methods have to be eliminated.
Accuracy	It interacts directly with the digitization time and the results of the digitization.
Handcrafted or industrial object	An object coming from a domestic system needs the definition of more points, as not all the parts are the same.

Figure 5: The initial data from the characterization of the object itself

For example, linking various factors like digitalization time, size, craftsmanship... if we want to digitalize a chair, is it necessary to reflect upon the relevance of capturing the entire geometric definition of the chair? Only major points have to be considered: lines can then be drawn between those points and the adjoining surfaces and volumes can be designed. See figure 6.

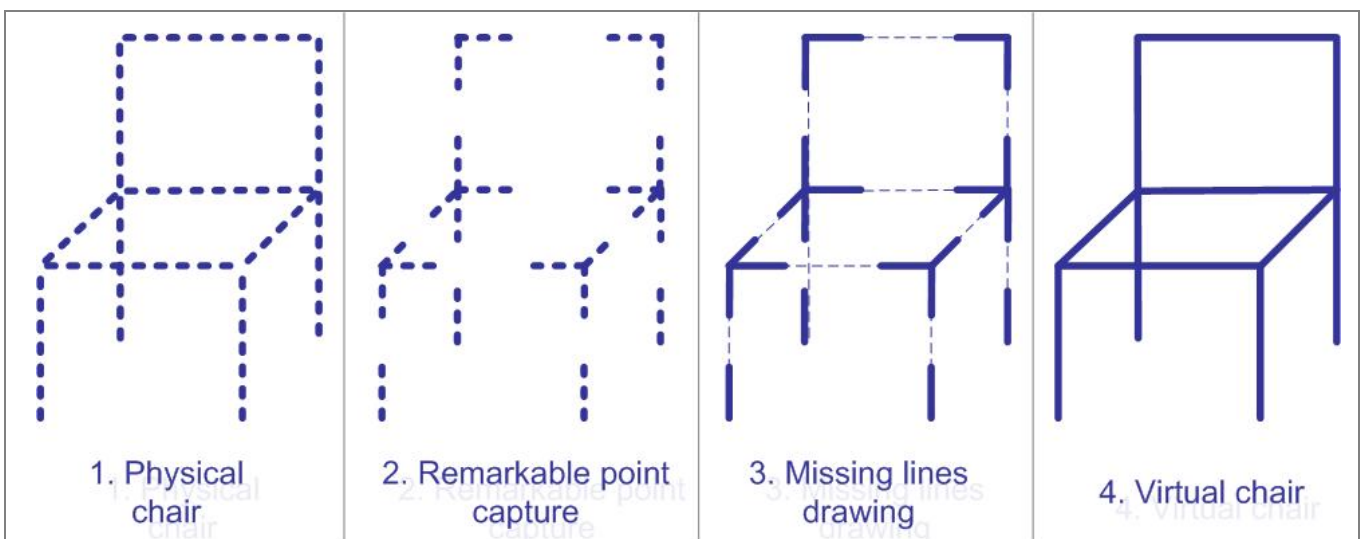


Figure 6: Chair design using a cloud of points

The following figure 7 sums up tools explained previously and the way to choose the optimum technology. All digitalization tools explained or developed previously are not mentioned but the main solutions are proposed. The nodes represent questions that must be asked. However, please note that the method found by the decision tree may not be the only one but it is probably the best one to use. If another strategy is chosen, it will be more costly and will impact accuracy, efficiency or acquisition speed.

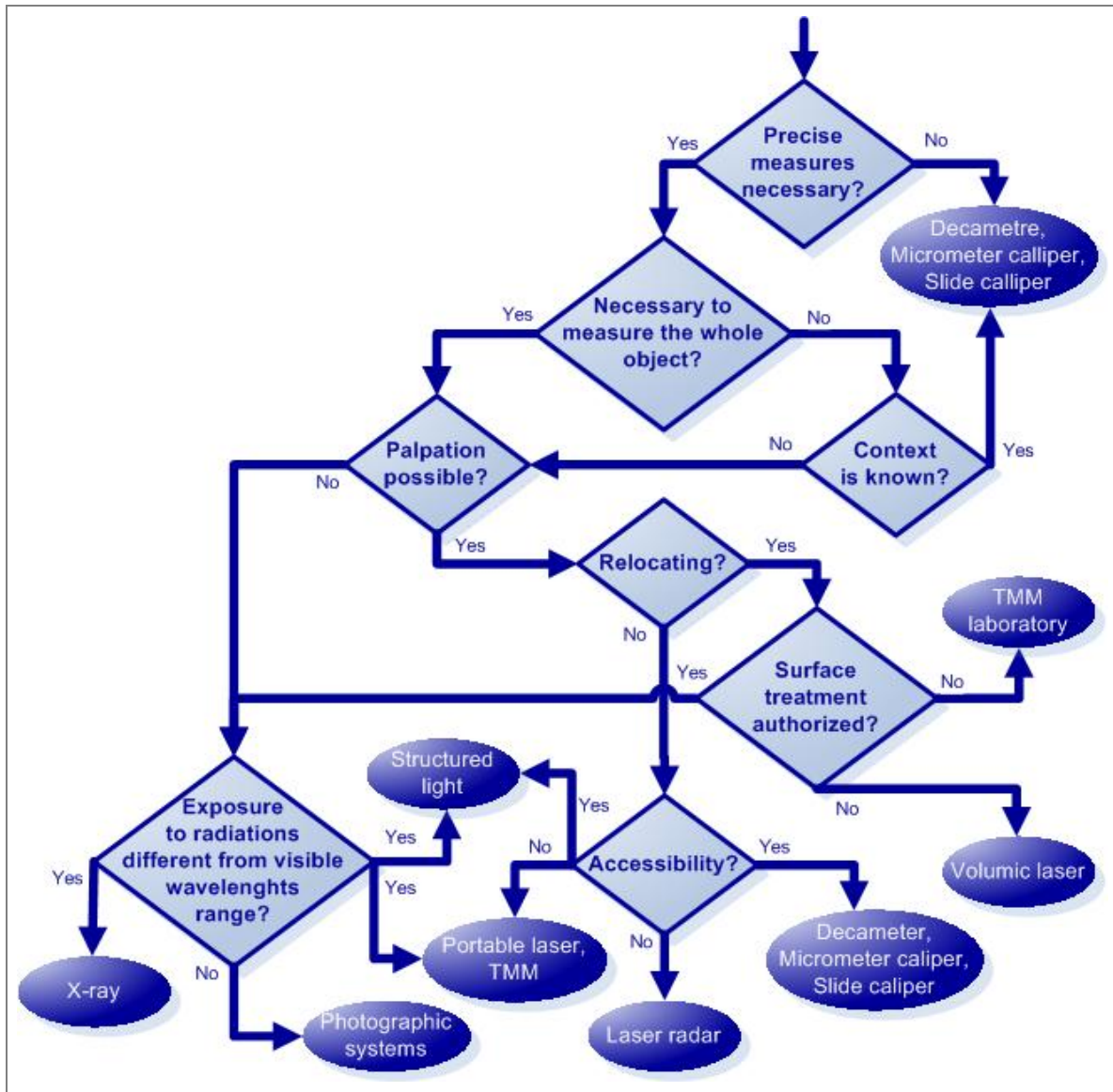


Figure 7: The decision tree for choosing the best digitalization practice

## 5 SALT-WASHING MACHINE: FROM 3D DIGITALIZATION TO TECHNICAL AND HISTORICAL STUDIES

The experience detailed in this part is a study that began 20 years ago and which is the result of a meeting with an industrial technical object: a handcrafted machine of the 20<sup>th</sup> century. Thus, through the study of the Bertrand family business from its social origins to its production system, its management and its marketing of salt, our investigations led us to define the global Technical System that has nowadays become a Patrimonial System: it is much more than an industrial machine that must be considered, it is a site, a region, a complex economy that explains its unique place in France. We have to state that this salt store which is 130 years old and has a surface area of more than 400 m<sup>2</sup> is soon to become the new Salt Marsh's Museum of Bretagne, which has recently been recognized as a Musée de France (Godin 2006).

## 5.1 Background

In 1984, the Salt Marsh Museum opened in Batz-sur-Mer in Loire-Atlantique in France (44). It is the successor to the Museum of Ancient Costumes, one of the first Civilization Museums in the west of France, founded in 1887 in Batz.

The museum offers a permanent exhibition on 250 m<sup>2</sup> which combines history and memory to interest all kind of public. Ethnographic collections, documentaries and Fine Arts recount the technical and human adventure of salt panning, from its origins to the present day, and presents the discovery of the rich heritage of this area shaped by 2000 years of salt history. This collection presents:

- Furniture, costumes, ceramics, household items, engravings, paintings, postcards all a testimony to the past,
- Tools used in the past for the salt work, but also physical models for informing the visitor about the traditional techniques of human workers of yesterday and today.

With a surface area of 400 m<sup>2</sup>, the museum receives about 30000 visitors annually. But, at the opening of the new museum, there was a problem of storage space for the non-exhibited collections or those acquired by donations, as well as the lack of a place for temporary exhibitions.

In 1987, faced with this lack of space, the Museum curators were looking for new buildings. They found an architectural unit of 2 900 m<sup>2</sup>. Built in granite of the region with a wooden floor and a slate roof, the industrial building had been used for storing salt.



Figure 8: Photo of Bertrand storehouse (2007)

Inside the main building, there was a machine made of wood and metal (latitude 47°16'44.37" north and longitude 2°28'41.33" west). First analyses indicated that it was dealing with a product that had caused the machine to deteriorate over time: salt. A conservation and investigation phase began to study this object and to understand its integration into its complex techno-industrial system.

The sight of this machine in a state of ruin at an advanced stage created a special atmosphere and those involved in this project immediately fell *in love* with it. Many questions were raised and many hypotheses put forward about its operations, its construction, its uses : *Why a salt-washing machine? Why salt? How does salt washing operate? What is it for? Why did this machine stop operating? Why are there no more salt machines?*

## 5.2 Object discovery and first representations

A primary health status has revealed that the object disintegration is inexorable. Thus, as it deteriorates very quickly, the machine first has to be immortalized. To do this, numerous photographs have been taken by the Museum curators.

Notice that the object dimensions are big: the base covers about 20 m<sup>2</sup> and the height is 3.25 meters.





Figure 9: Photograph of the salt-washing machine (2007)

To complete this first photograph collection and to help to understand the technical process, freehand drawings are done (Buron 2004). But we have to point out that they are not technical drawings: some details are extrapolated and may not be technologically feasible.

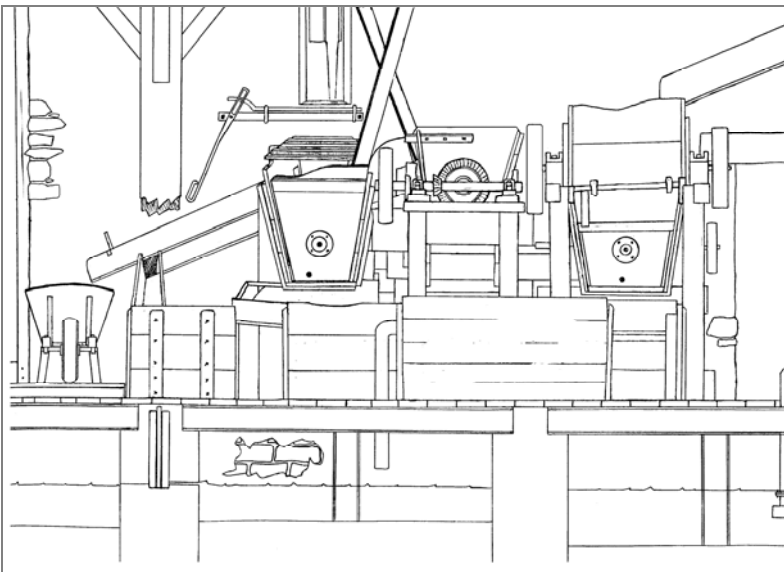


Figure 10: Architectural drawings of the salt-washing machine

### 5.3 Technical drawings and 3D digitalization

We then had to understand how the machine operates and how it was built 90 years ago. To do this, other technical intermediary sketches were done (Derouene 2005).

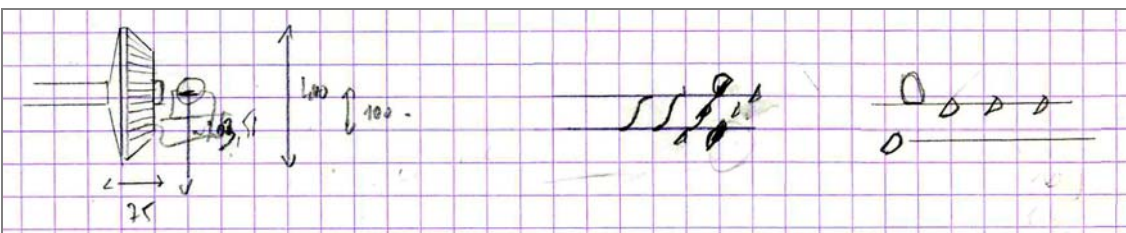


Figure 11: Mechanical freehand drawings

Moreover, in order to contextualize the machine in its architectural framework at a precise date, a second project produced a 3-dimensional photograph. According to the methodology proposed and explained previously in this paper, we have defined the 3D digitalization technology that has to be used.

Main factors	
Relevance of measurements?	Capital for immortalizing the object as it destroys itself more and more everyday.
Object full-scale?	Yes
Palpation?	Impossible
Relocating?	Impossible
Radiations?	All wavelengths that do not destroy wood.

Object datas	
The material	Not reflecting but not in bad conditions.
Accessibility	Some components hidden by other ones; moreover, walls prevent seeing some views.
Size/volume	approximately 120 m <sup>3</sup>
Kinematic digitization	No
Time taken for digitization	Unlimited in a short time but digitalisation has to be done quickly (machine deteriorates more every day).
Accuracy	linked with the handicraft status of the object
Handcrafted or industrial object	Handcrafted, impossible to copy and paste components, the global machine has to be digitalized.

Figure 12: Defining the 3D digitalization technology for the global capture

Consequently, following the decision tree of figure 7, a portable laser was chosen. The global digitalization was carried out by the Architectural firm, Morel Mapping Workshop. The scanner laser is a Leica Cyrax 2500. It is possible to obtain 1 point every 1 mm from a distance of 100 meters. However, in our project, a better precision was obtained as the scanner was at a maximum of 10 meters from the machine.

Figure 13 presents the cloud of points obtained. The accuracy is 0.3 cm for 10 039 374 points scanned.

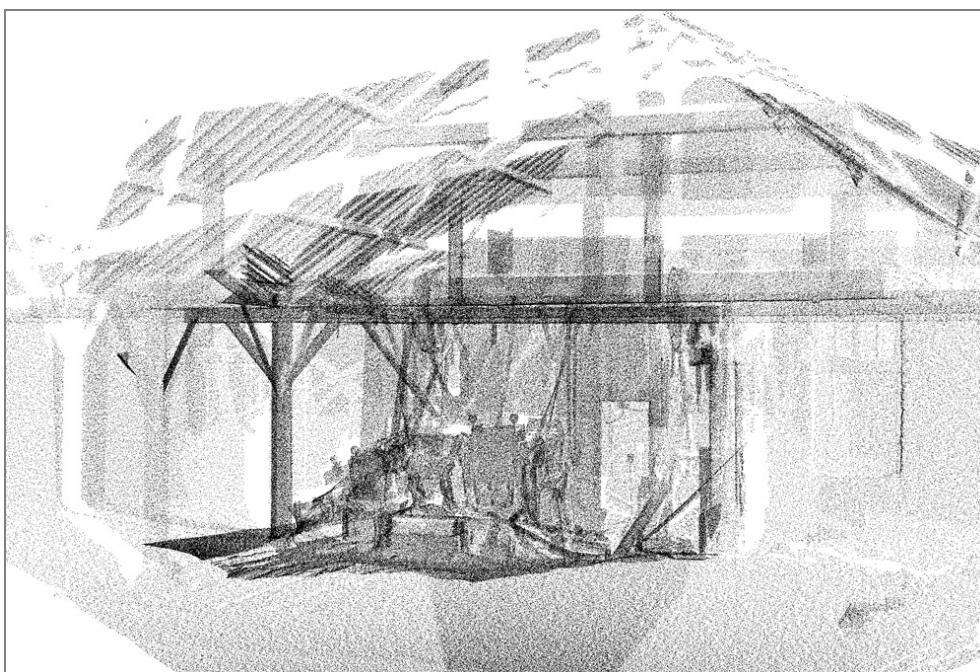


Figure 13: Cloud of points



#### 5.4 Mechanical design study

Once the cloud of points has been obtained, several solutions exist for using data: export the points to a CAD software, point-to-point direct measurement, automatic geometry rebuilding. Rebuilding the geometry can be carried out automatically by pattern recognition. This solution is particularly adapted to standard elements such as cubes, tubes or simple surfaces (car wings, etc.) However, in the case of the salt-washing machine, this solution was not possible due to the advanced state of deterioration of the object, which would have distorted the automatic form recognition.

Consequently, we have manually designed the machine using the clouds of points. Finally, there are more than 550 components.

From a technical point of view, we have divided the object into five functional parts corresponding to a step sequence describing the operating process of the machine. Each element will act upon one or several flows. Like a nuclear power plant, there are three flows:

1. *The primary flow: the salt;*
2. *The secondary flow used as a moderator to deal with the primary flow: the brine;*
3. *The tertiary flow for supplying the power force of the machine.*

The salt goes first into the bucket chain and then into the hopper. It finishes its treatment inside the trays. The entire process is performed thanks to a second solution: the brine, an aqueous solution which is salt saturated. Mechanical machineries are powered by an energy source which is a rotation movement. The following table 14 correlates these flows with the major components of the machine located in figure 15:

1. *The engine and the main shaft;*
2. *The bucket chain;*
3. *The hopper;*
4. *The washing trays;*
5. *The circulation system of the brine.*

Generated flow	Flow description	Parts / components involved	Function
Primary flow	Salt	Bucket chain	Feeding the machine with raw materials <b>2</b>
		Hopper	Salt crushing <b>3</b>
		Trays	Treatment <b>4</b>
Secondary flow	Brine	Tank	Circulation system <b>5</b>
Tertiary flow	Energy force	Motor	Powering the machineries of the primary and secondary flows <b>1</b>
		Main shaft	
		Secondary shaft	
		Pump	

Figure 14: Flow description and major components of the salt-washing machine of Batz-sur-Mer

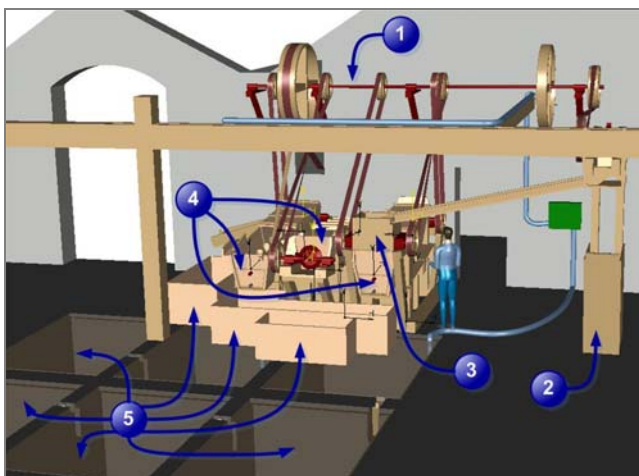


Figure 15: CAD model, overview of the machine

### ❶ The engine and the main shaft

The engine manufactured by Cardner is housed in the boiler room near the main building. It provides energy required for all the mechanisms of the machine. At first, a belt coming from the engine distributes a rotation movement to the main shaft. On this shaft, other belts are rolled up to a wooden pulley and are connected to the numerous mechanical components of the machine. Belts are very thick, made of linen and looped by metal staples. To prevent them from slipping on the pulleys, they are regularly coated with resin.

Initially, the engine must be a gas engine. Next, the energy power is replaced by an electric motor manufactured by AO. The engine is still in an archaeological state.

### ❷ The bucket chain

At the beginning of the process, the salt is shovelled into the well filled with brine. In the same well, the chain - equipped with buckets - leaves the pit vertically. The salt rises in a liquid state (figure 16). Arriving at the highest point, the solution is poured into a gutter and finally drops into in the hopper positioned above the first tray.

The chain and the buckets come from an English patent based on a system called Ewart. Figure 17 is an extract from the elevator catalogue of the Burton Son factory that proposed this kind of technology. It is dated August 1893 (Burton Son 1893).



Figure 16: Photograph, Bucket chain (2007)

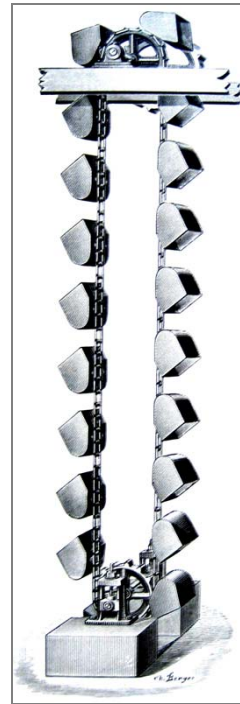


Figure 17: Burton Son catalogue, Ewart chain (1893)

### ❸ The hopper

The liquid solution flowing down from the gutter goes inside the hopper. The hopper has two metal cylinders rotating in opposite directions: the salt is crushed into numerous fragments.

### ❹ The washing trays

The central part of the machine consists of three trays placed in series. They are inclined at 6° from the horizontal and are positioned in opposition.

Each one is crossed by an axis on which blades are inserted. The axis and blades create a group similar to an Archimedes screw as used for purging water in mines. The liquid solution passing through the hopper falls into the lower position of the first tray. Blades push the solution up to the other end of the tray, in the upper position. Next, a small gutter carries the solution into the next tray, in the lower position. Finally, the saline solution is collected at the end of the 3<sup>rd</sup> tray thanks to a final gutter larger than the other ones. It has a double floor: the higher one is made of linen and allows the salt solution to drain out at the end of the washing process.



Figure 18 sets up the overall process and the front view emphasises the double floor of the final gutter. It should be noticed that today, this gutter and the hopper gutter have collapsed.

Each tree is driven by bevel gears which are operated by a belt connected to the main shaft. The amount of salt accumulated on the metal elements as well as the action of salt over time have considerably damaged the gears.

However, to achieve our research in Advanced Industrial Archaeology, historical documents were an important resource. It is interesting to note that in its 1893 catalogue the French manufacturer, Burton Son, sold these mechanisms that are called angle wheels.

Consequently, it is possible that the inventors of the salt-washing machine bought buckets, chains and bevel gears from the same supplier.

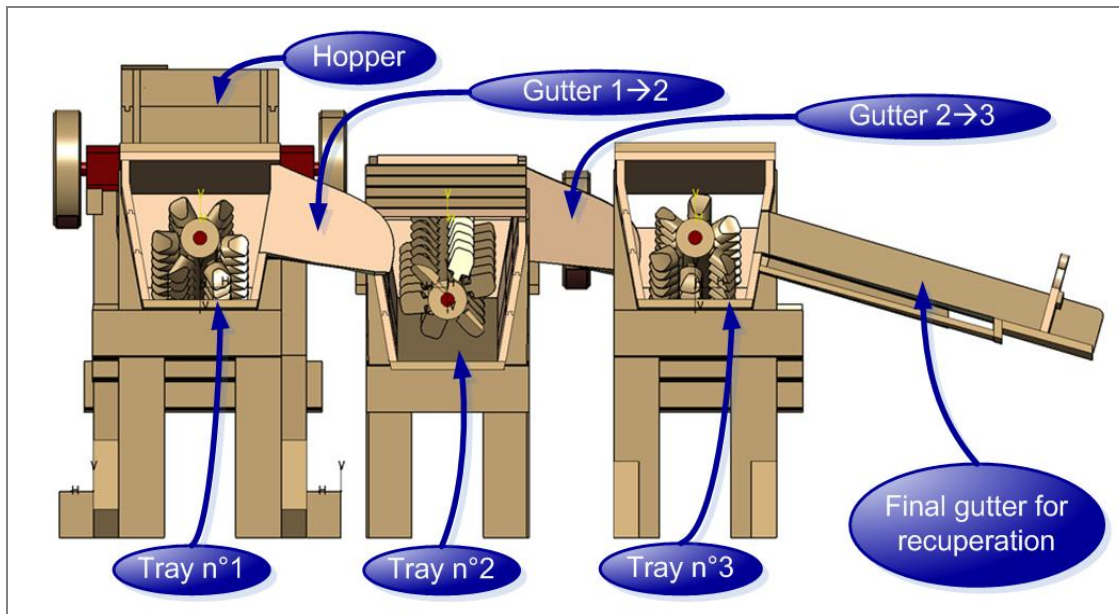


Figure 18: Front cross section view of the 3 trays and the final gutter

### ⑤ System circulation of the brine

The second and the third trays receive brine from an air pipe system. After use, the brine is recycled. It is decanted into 3 small tanks located a few centimetres lower than the level of the machine. After that, it falls into 6 successive underground tanks where it terminates its purification phase. At the exit of the last tank, the brine is pumped and then injected again thanks to the pipe system (figure 19).

Tanks form rectangles of 3x2 meters and are 1.70 meters deep. To allow free movement of employees inside the building, the tanks are covered by wood and metal mobile plates. The tanks are connected by a system of gates. These openings are roughly 15 cm wide and 50 cm high. Sediment traces currently residing in the tank reach a thickness of 50 to 70 cm. Consequently, we can suppose there were many maintenance problems to ensure regular removal of the sludge.

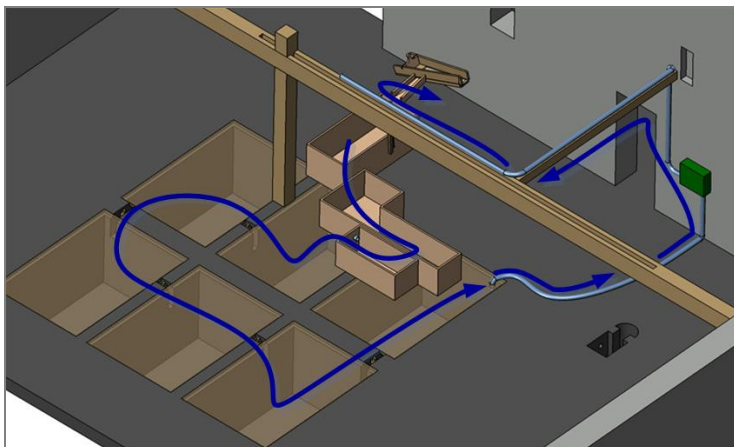


Figure 19: CAD model of the circulation system of the brine

### 5.5 A perpetually deteriorating craftsmanship machine?

At the end of this first mechanical study and thanks to the dynamic 3D modelling, we have validated the historical hypothesis suggesting it is a handcrafted machine. If the trays seem to be similar, each one is different. The virtual model takes into account this mainframe and authenticity; otherwise the CAD software cannot operate the machine virtually.

In addition, some elements exist nowadays only as wreckage lying on the ground around the machine. These elements have been designed virtually, taking into account the form of components with which they were in contact, but also thanks to the mechanism study.

Moreover, we have to notice that, the machine has had sealing problems as the numerous salt piles show it. Small repairs have surely been done. That is why a few parts have been:

- reinforced by a doubling of wooden plates;
- or replaced: for a same component, the quality of the wood plate can be different from the nearby plate.

As a testimony to this craft industry, the building housing the engine still contains two very old pieces of furniture: a storage unit (used as spare parts store) and a workbench (carpenter shop).

In the same way, during the engine study, ground excavations revealed a mechanical object that could not be linked to the electric motor or its predecessor. It is a bearing that holds the gear axes, the pulleys or the hopper cylinders.

This bearing is less deteriorated than other ones still positioned on the machine; we can think about the possibility of spare parts (figure 20). Nevertheless, it has many blisters on the surface; it confirms the hypothesis that long-term exposure to a saline and moist atmosphere has attacked the cast iron inside. The interior diameter of a new bearing measures 40 mm while gear axes and pulleys axes measure 80 mm. These elements demonstrate that salt action has led to metal deterioration, either since the machine was built or since operations were stopped. This deterioration can be described as extreme (figure 21).



Figure 20: Photograph of unused bearing (2007)



Figure 21: Photograph of bearing and distorted axes (2007)

### 5.6 Mechanical study assessment

Once the operating of the machine was understood, a kinematics sketch of the machine was realized into CATIA V5 software (distributed by Dassault Systemes).

After having created the skeleton and the connections, a check was carried out to see whether the virtual model had been simulated therefore functional. Then volumes were added to the skeleton in order to obtain a full-scale and realistic model. Volumes were obtained thanks to the cloud of points.

Finally, the virtual model of this machine is composed of more than 550 parts and 30 kinematic link-ups.

Thanks to all the elements explained previously about the internal study of the machine, we are now able to validate the objective of this industrial artefact: "Washing the salt by dissolving it in a saturated saline solution."

But there are still some problems to evaluate the machine production as there are uncertainties about the engine: no speed, no information about the provided torque, etc. That is why we have conducted excavations with a 3D scanner and external studies about the socio-economic and ethnological environment of the machine to identify the human context surrounding the Bertrand enterprise, trader in sea salt.

### 5.7 Detailed characterization of the salt-washing machine components using archaeological excavations and 3D digitalization

Some parts essential for the machine to operate could not be scanned by the Leica scanner:

- the worm blades of the trays because they are inside the machine;
- the salt production flow: the links and the buckets.

Both elements are currently in an advanced state of deterioration. However, the geometric and structural characteristics of these components are essential when determining the production capacity of the salt-washing machine.

The bucket chain has nearly been completely destroyed by the salt: it is not yet suspended and its components form a pile of rusty material that we have investigated. Unable to be measured with modern tools as it would have caused too much damage, those new measures have been carried out thanks to a new 3D technology. However, parts may not be removed from the wetness-saturated atmosphere. The reaction caused by a hydrometric change would be so great that the parts would have deteriorated even faster. So, we chose to digitize the parts under optimal conditions for their preservation but extreme conditions for the 3D sensor. Application of the decision tree based on the initial data of the object and the main factors as shown in table 22, the solution used is a portable scanner which is more precise than the Leica scanner: the Handyscan is distributed by Creaform ([www.handyscan3d.com](http://www.handyscan3d.com)).

Based on a Canadian patent, the scanner is self-positioned in 3D space using reflecting targets. It is possible to scan the same point many times to optimise its position. The accuracy is of about 0.2 mm, but it mainly depends on the volume of the object that has to be digitalized.

Main factors	
Relevance of measurements?	Required for getting the exact characterization.
Object full-scale?	Worn or damaged
Palpation?	Impossible
Relocating?	Yes if no destructive
Radiations?	Possible if staying in an atmosphere with the same hydrometric rate.

Object datas	
The material	Not reflecting but not in bad condition.
Accessibility	Some components are inside the machine but can be dislodged.
Size/volume	Maximum: cube of 200 mm side
Kinematic digitization	No because unitary part
Time taken for digitization	Unlimited in a short time but digitalization has to be done quickly (machine deteriorates more every day).
Accuracy	More precision possible for obtaining exact geometric characterization
Handcrafted or industrial object	Handcrafted for the blades / Industrially made for the links and the buckets.

Figure 22: Defining the 3D digitalization technology for detail capture

As the links are completely rusty and no more complete buckets exist, 3D scanning has enabled us to obtain multiple virtual representations (figure 23). By average iterations over all scans, the generic dimensions were calculated. Then, we compared this information with the data from the 1893 Ewart catalogue. It is a vertical elevator with a device for adjusting the chain tension. It is composed of quick-links and special links with two ears for connecting the buckets. They are manufactured by stamping and are usually recommended for flour. The average volumetric capacity of a bucket is 1.5 litres. The



standard operating range for the Ewart links is 36 Newton with a yield point of 90 Newton and a tear resistance lower than 180 Newton. It should be noted that this kind of chain is still used in contemporary industrial workplaces, but its patent has fallen into the public domain.

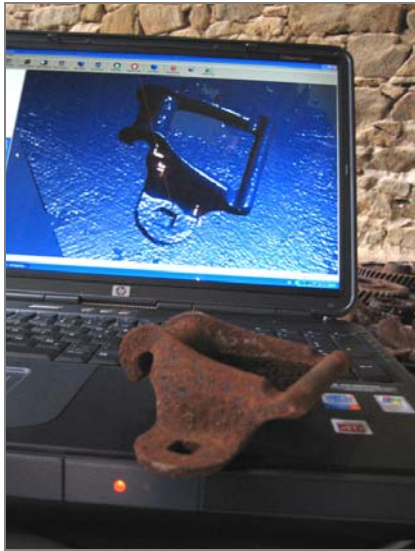


Figure 23: Links with ears: a physical and virtual object made of cloud of points

In addition, other detailed studies have helped us to refine our advanced industrial archaeology studies. Thus, hidden under a pile of sand, salt and dust, we found blades inside holes of the workbench (figure 24). These blades have sharp edges and the presence of a file on the workbench confirm that they were being manufactured and that minor repairs on the salt-washing machine took place directly on site, probably by the workers themselves. Bigger repairs were carried out by the town carpenter.



Figure 24: Photograph showing blades manufactured on the workbench (2007)

We have also scanned those original components and have compared them with those installed on the machine. We were thus able to validate their original dimensions while the machine was operating. In figure 25, it is possible to distinguish saw lines captured by the Handyscan. The digital file is made of a mesh of 112 815 points.

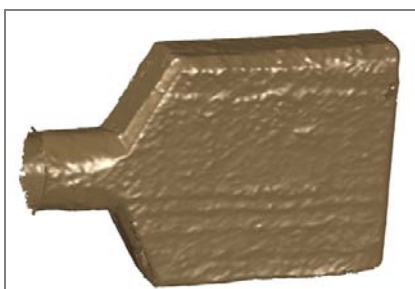


Figure 25: Cloud of points of an original blade

## 5.8 Experimentation assessment

The industrial heritage study undertaken thanks to archaeological excavations has demonstrated the potential of the methodology of advanced industrial archaeology. It shows the importance of making interactions between the object and its background for refining the internal studies integrating external knowledge. The approach developed in this example illustrates the funnel effect: a progressive un-zoom is applied to understand the subject and the outcome is the definition of the global Technical System.

A classical study would have only concentrated on research on the salt-washing machine and would have introduced a dichotomy between internal and external uses. However, we have analyzed the object in its multi-dimensional and multi-temporal aspects. It can be summarized by two main points:

- A product: the salt;
- A process: the collecting and the salt treatment.

We can validate the *raison d'être* of the salt-washing machine and the environment in which it operates: "In order to be able to respond to the demands of the hygienist clientele of the 19<sup>th</sup> century and to defend itself faced with increasingly fierce competition, traders had to refine salt. All local enterprises built salt-washing machinery that could be considered as personal inventions. Occupying about twenty square meters, the Bertrand salt-washing machine was made of wood and metal; it is currently in an advanced state of deterioration. It was operating from 1914 to 1966, the year the company closed. The aim of washing sea salt is to eliminate soil particles and then, by mixing it with a saturated solution of salt, the saturated solution absorbs the particles separating them from the "good" salt. "

In terms of the efficiency of the Bertrand production site, coupling mechanical analysis and historical data enable us to validate the capabilities of the production steps (figure 26).

Salt pans	Buckets	First gutter	Hopper	Trays	Wheelbarrow / Final gutter	Storage	Transport to the station
3000 tons min. / year	-	-	-	-	9000 tons / year	6000 tons maximum	7000 tons maximum
-	12 m <sup>3</sup> /min	19.2 m <sup>3</sup> /min	1.6 m <sup>3</sup> /min	1.7 m <sup>3</sup> /min	-	-	-

Figure 26: Monitoring the salt production flow of Bertrand Enterprise in Batz-sur-Mer

In the salt marshes of Batz-sur-Mer, there were approximately 20 salt-washing machines; however, only one remains: the one preserved in the Bertrand enterprise. Surveys conducted by the Museum curators show that in 1941 only two machines were still in operation.

## 6 CONCLUSION

In this paper, we give details of our research subject dealing with the conservation of scientific and technical heritage. Focusing upon old objects such as industrial machines, our proposal is to virtualize them for a better understanding of its knowledge.

Several finalities are possible; for example:

- virtual thesaurus (digital archives),
- safeguards in industrial archaeology,
- didactic use for experts or students,
- reconstruction,
- museum popularization for any kind of public.

For the last application case, thanks to the exponential growth of Virtual Reality technologies, several approaches can be developed and could bring new hope for museums.

At the beginning of the process, knowledge capitalization is necessary: the context and obviously the artefact itself: it is a contextualized reverse-engineering process. In order to respect the patrimony, 3D scanning technologies have to be selected and manipulated carefully. The decision tree can help us to choose the best solution.

Nowadays, knowledge developed by enterprise belongs to explicit or implicit know-how and are orientated for design or process; however, daily innovations remain at a local level. Breaking innovation is much more difficult to accomplish and requires new tools and new methods with various kinds of knowledge and competences. Using old technical knowledge can be a solution for creating new

products. It is in this way of "thinking the future" that our team performs its research. However, instead of working on present objects, the starting point is technical objects belonging to the past.

## 7 ACKNOWLEDGMENTS

The study presented in this paper is an inter-disciplinary collaboration. We would like to thank the Batz-sur-Mer project team and particularly:

- Michaële Simonnin and Gildas Buron, the museum curators of Batz-sur-Mer;
- Laurent Derouene, student engineer, University of Technology of Belfort-Montbéliard;
- Didier Morel, Architect, Morel Mapping Workshop Society;
- Philippe Lhériveau, student architect, Architecture School of Nantes.

## 8 REFERENCES

- Amidon D. M., 2002, *Innovation et management des connaissances*, Editions d'organisation, 226 p.
- Bernard A., Hasan R., 2002, *Working situation model as the base of life-cycle modelling of socio-technical production systems*, CIRP Design Seminar, conference proceedings
- Bonnot T., 2002, *La vie des objets – d'ustensiles banals à objets de collection*, Editions MSH, 244 p., ISBN 2735109348
- Bougé P., Champin P.-A., 2002, *Une représentation épisodique des connaissances pour l'assistance à la réutilisation en CAO*, 13<sup>th</sup> French Knowledge Engineering Workshop, conference proceedings, 175-183
- Buron G., 2004, *Petite histoire des magasins de la Croix de Paix et de l'entreprise Bertrand de négoce de sel / Little story of the storehouse Croix de Paix and the salt enterprise Bertrand*, 19 p.
- Burton Son, 1893, *Catalogue of elevators, conveying apparatus and transmission*, Paris, France, 31 p.
- Derouene L., 2005, *Realisation of a dynamic CAD model: the washing machine of Guérande*, Engineer training period report, UTBM, Belfort, France, 45 p.
- Eversheim W., Schenke F.-B., Weber P., 2000, *Virtual engineering for an integrated product and process development*, CIRP Design Seminar, conference proceedings, 111-116
- Godin, M., 2006, *Salt March's museum: a social dimension*, Ouest France Journal, 25 april 2006, 1 p.
- Jeanet A., 1998, *Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception*, Sociologie du Travail, pp. 291-316
- Labrousse M., 2004, *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*, PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France
- Laroche F., Bernard A., Cotte M., 2006, *Methodology for simulating ancient technical systems*, International Review of Numerical Engineering, 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
- Laroche F., Le Loch S., 2005, *Culture technique et CAO par les machines anciennes*, CETSIS, conference proceedings, 6 p.
- Monod J., 1970, *Le Hasard et la nécessité*, Éditions du Seuil, Paris, France, p.25
- Rasse P., 1991, *Communication et muséologie des techniques*, REMUS, conference proceedings, ISBN 2-11-08753218-23
- Reflexion, 2006, [www.archeologia.be](http://www.archeologia.be), web site seen the 01/05/2006
- Richey M.C., McIvor R.S., Sandwith S.C., 2001, *Computer Aided-Design-Manufacturing & Measurement Integration*, Proceedings of Coordinate Measurement System Committee, Albuquerque, Mexico, 7 p.
- Rolland-Villemot B., 2001, *Le traitement des collections industrielles et techniques, de la connaissance à la diffusion*, OCIM letter n°73, pp.13-18
- Thevenot D., 1998, *Le partage des connaissances : une mémoire interactive pour la compétitivité de l'entreprise*, Editions Tec & Doc, Lavoisier, 136 p.
- Van Houten F.J.A.M., Kimura F., 2000, *The virtual maintenance system: a computer-based support tool for robust design, product monitoring, fault diagnosis and maintenance planning*, Manufacturing Technology, CIRP Annals, 49/1, 91-94

# Numérisation 3D et prototypage rapide

## Exemples d'industrialisation de produits

par **Sébastien REMY**

*Dr et Maître de conférences à l'université de Technologie de Troyes*

**Florent LAROCHE**

*Dr et Maître de conférences à l'École centrale de Nantes*

et **Alain BERNARD**

*Professeur des universités à l'École centrale de Nantes*

<b>1. Applications sur produits manufacturés</b> .....	AG 3 404 - 2
<b>2. Cycle de vie du produit – De l'objet à l'objet</b> .....	– 3
2.1 Lien entre numérisation 3D et prototypage rapide .....	– 3
2.2 Intégration dans le processus de développement rapide de produit .....	– 3
2.3 Synthèse sur l'intégration d'un modèle virtuel .....	– 5
<b>3. Incontournables de la numérisation 3D et du prototypage rapide</b> .....	– 6
3.1 Insuffisance du prototypage virtuel .....	– 6
3.2 Customisation .....	– 6
3.3 Maintenance de produits à longue durée de vie .....	– 7
<b>4. Conclusion</b> .....	– 8
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. AG 3 404

**L**a numérisation 3D et le prototypage rapide sont, de nos jours, largement utilisés tout au long du cycle de vie du produit, par de nombreux et différents acteurs. Le domaine de la conception/industrialisation/fabrication de produits mécaniques n'est plus le seul cœur de métier utilisant ces principes. Désormais, la mesure d'objets en 2D et **a fortiori** en 3D, est devenue un outil indispensable dans de multiples domaines connexes :

- biens de consommation courante ;
- automobile ;
- aéronautique ;
- électronique ;
- médical ;
- luxe ;
- architecture ;
- militaire...

Ainsi, avec l'évolution des outils de graphisme technique, modéliser l'objet réel, un prototype, ou toute autre représentation intermédiaire réalisée durant son cycle de vie, n'est plus un gadget numérique, c'est une phase indispensable pour intégrer au mieux les besoins de la réalité dans le monde virtuel.

Au même titre que le scanner 2D à plat s'est démocratisé, peut-être que très bientôt le **reverse engineering** trouvera des applications un peu plus vulgarisées avec l'arrivée sur le marché « grand public » d'appareils photo 3D, par exemple.



# 1. Applications sur produits manufacturés

■ Dans l'**industrie mécanique**, outre les classiques applications des maquettistes et des outilleurs, les applications de marketing et de maintenance sont de plus en plus courantes grâce aux technologies de prototypage rapide qui permettent d'obtenir un produit en vraie matière (voir les modèles de capteurs de la figure 1). On parle surtout de « fabrication rapide » ou de « fabrication directe ».

D'autres exemples d'application, comme la numérisation de produits mécaniques « faits main », pour des besoins de calculs par éléments finis, sont aussi rendus possibles (voir figure 2).

■ Dans les **domaines médicaux et artisanaux**, les applications se multiplient également ; aussi différentes que la fabrication de prothèses auditives « sur mesure », ou encore la valorisation du patrimoine avec la création de miniatures de statues du XVI<sup>e</sup> siècle. Certains musées ont même recours à ces techniques de prototy-

page rapide, par moulage en plâtre ou impression 3D en stéréolithographie, pour créer des copies de leurs objets de collections les plus fragiles ou d'objets incomplets non exposables en l'état au public.

Au fil des années, le couple numérisation 3D – prototypage rapide a su séduire de plus en plus d'utilisateurs dans le cadre d'un processus global de développement rapide de produit, permettant le passage rapide du monde réel à une représentation numérique dite « virtuelle ». La souplesse et la facilité d'utilisation des nouveaux dispositifs de numérisation (plus particulièrement les capteurs laser portables, les bras de mesure et les systèmes de stéréovision, voir figure 1) ainsi que des solutions de prototypage rapide plus abordables, à la fois en coût et en facilité d'utilisation, permettent à de nombreux projets de voir le jour.

■ Dans le **domaine de la valorisation du patrimoine**, par exemple, la copie miniature d'une statue, obtenue grâce au couple numérisation 3D – prototypage rapide, peut être proposée, dans un matériau de grande qualité, à environ 100 € prix client. Alors qu'il y a quelques années, une telle miniature aurait été hors de prix (voir figure 3).



Figure 1 – Quelques capteurs parmi les plus utilisés à ce jour (Crédits Romer, Creaform 3D, Minolta)

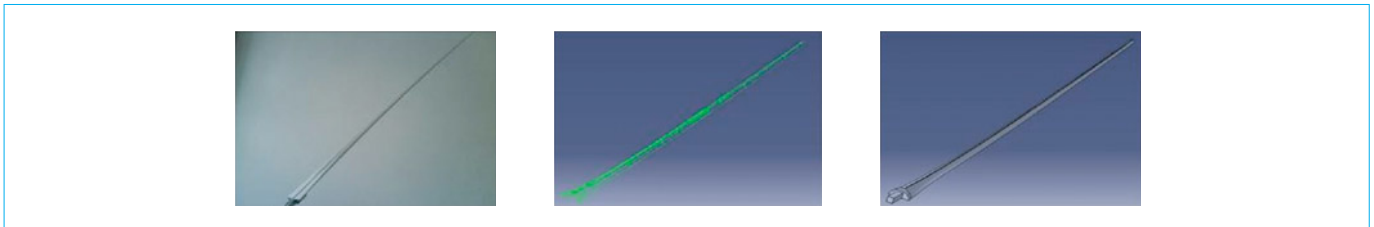


Figure 2 – Exemple de la retro-conception d'une épée olympique pour des besoins de calculs par éléments finis (Crédits UTT)



Figure 3 – Numérisation de « St Joseph et l'enfant Jésus » par Dominique Florentin, Église St Jean de Troyes, 2009 (Crédits UTT)

## 2. Cycle de vie du produit – De l’objet à l’objet

Si nous considérons le domaine originel du développement de produits manufacturés, déjà abordé, là aussi les applications se sont multipliées. Du prototype de présentation pour les services de communication ou de marketing à la maintenance des produits par ré-industrialisation rapide de pièces de rechange, en passant par l’outillage rapide, la customisation..., tous les services de l’entreprise peuvent maintenant être susceptibles d’utiliser le couple numérisation 3D – prototypage rapide, et plus avant le développement rapide de produit.

Dans tout ce cycle de vie du produit, **l’importance est donnée aux outils numériques** qui permettent de faire le lien entre la numérisation 3D et les technologies de prototypage rapide. L’utilisateur doit en effet prendre en compte sa position dans le cycle de vie du produit, ainsi que les besoins des autres acteurs du développement impliqués.

Dans ce cadre, nous pouvons envisager deux grands cas d’utilisation, illustrés par la figure 4 :

- lien direct entre numérisation 3D et prototypage rapide ;
- numérisation 3D et prototypage rapide intégrés dans l’ensemble du processus de développement rapide de produit.

### 2.1 Lien entre numérisation 3D et prototypage rapide

■ Dans un premier temps, nous pouvons considérer que **le lien entre la numérisation 3D et le prototypage rapide est direct**. Dans ce cas, il y a très peu d’outil numérique mis en œuvre puisqu’il suffit de trianguler le nuage de points, issu de la numérisation, pour en faire un modèle STL. Celui-ci sera directement utilisé pour fabriquer le prototype (prototypage rapide), ou l’outillage nécessaire à la fabrication du produit (outillage rapide).

■ Dans le domaine du **développement de produits manufacturés**, ce cas d’utilisation est choisi quand il s’agit de fabriquer à l’identique une pièce réputée « bonne ».

Une pièce est jugée « bonne » quand il n’y a pas lieu de la modifier et que le nuage de points issu de sa numérisation représente déjà la bonne géométrie. Cela veut dire que la pièce originelle ne souffre d’aucun défaut (qu’elle n’est pas cassée ou pliée, et qu’il ne faille pas modifier sa structure pour améliorer sa résistance...).

■ Dans le cas d’un lien direct entre la numérisation 3D et le prototypage rapide, nous avons dit que l’obtention d’un modèle STL suffisait. Il existe une **multitude de solutions logicielles** qui permettent cette opération. Certaines sont vendues directement par les fabricants de capteurs 3D et sont très efficaces..

Nous pouvons citer ici, à titre d’**exemples** :

- les logiciels Paraform (vendu avec les capteurs Metris) ;
- 3D Reshaper (vendu avec les capteurs et bras Romer) ;
- Raindrop Geomagic (vendu par, entre autres, Creaform3D et Faro).

■ Un **modèle STL** est un fichier géométrique où la surface de l’objet est discrétisée sous la forme d’un maillage surfacique triangulaire. Ce format a été introduit par 3D Systems, un fabricant de machine de prototypage rapide telle que la stéréophotographie. C’est, au fil du temps, devenu un standard dans le domaine du prototypage rapide du fait de sa compatibilité méthodologique avec les procédés de fabrication rapide par couche. En effet, la représentation STL étant un maillage surfacique triangulaire, le calcul d’une couche consiste à calculer l’intersection entre un plan et des triangles (donc des intersections plan/plan).

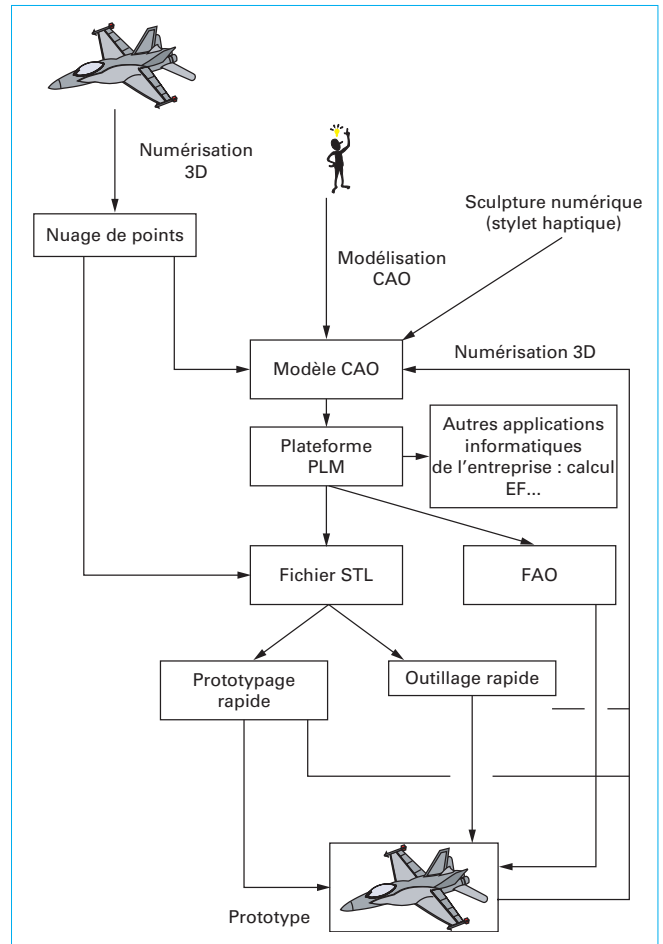


Figure 4 – De l’objet à l’objet

Dans le cas d’un lien direct entre la numérisation 3D et le prototypage rapide, il y a donc très peu d’intervention utilisateur et la chaîne numérique est presque entièrement automatisée (en fonction des différents éditeurs logiciels et fabricants de machines). La procédure est donc simple, rapide et efficace.

■ Comme déjà énoncé, dans le cas où il s’agit de **refabriquer une pièce à l’identique**, le passage direct du nuage de points vers un modèle STL est suffisant. Par contre, s’il faut réétudier la pièce, ou la modifier, le modèle STL est insuffisant. En effet, celui-ci est un maillage surfacique, il ne porte pas assez d’informations pour permettre une re-conception approfondie..

Par **exemple**, si un cylindre est numérisé, le maillage STL correspondant ne permettra pas d’obtenir facilement son axe, sa longueur ou son diamètre.

Pour obtenir ces données, le cylindre devra être reconstruit comme un cylindre, et non comme un maillage. Les techniques plus avancées nécessaires à cet autre type de reconstruction géométrique sont décrites dans la section suivante.

### 2.2 Intégration dans le processus global de développement rapide de produit

Dans un second temps, nous nous trouvons dans le cas plus général où la représentation numérique du produit que l’on digita-

lise va intégrer le processus de développement de produit (à la manière d'un modèle CAO originel). Ici cette représentation numérique va être partagée entre les différents acteurs de ce processus de développement de produit et, le cas échéant, être modifiée en raison des résultats de ce même processus, avant de pouvoir servir à la fabrication du produit par prototypage rapide.

Une triangulation en vue de l'obtention d'un modèle STL sera, par conséquent, insuffisante car il faudra considérer la nature du modèle utilisé par les autres acteurs concernés.

Par **exemple**, une modification de la structure du produit ne pourra s'effectuer que sur un modèle solide paramétrable et un calcul de structure nécessitera un maillage volumique (qui n'est pas toujours possible d'extrapoler d'un maillage surfacique de type STL).

■ Considérant ce cas général, pour bon nombre d'entreprises, il s'agit, en fait, d'**obtenir, à partir du nuage de points, un modèle numérique** duquel on pourra extraire les données produit qui vont être partagées avec les autres acteurs du processus de développement de produit à travers une plateforme PLM, telle que :

- enovia (Dassault Système) ;
- teamcenter (Siemens) ;
- windchill (PTC).

Pour ne citer que les 3 leaders du marché.

Les Techniques de l'Ingénieur offrent déjà plusieurs articles sur le thème du PLM (*Product Lifecycle Management*) ([BM 5 019], [AG 2 521] et [TR 120]...).

Ici, nous nous contenterons de rappeler qu'une plateforme PLM est un environnement numérique de travail (progiciel) qui permet de gérer les données relatives à un produit, ou à un projet de développement de produit et ce, tout au long du cycle de vie du produit.

■ Afin de **reconstruire un modèle numérique susceptible de réintégrer une plateforme PLM de manière pertinente**, et donc de partager un maximum de données sur le produit, il faut que ce modèle soit reconstruit avec soins. Il faut, dans la mesure du possible, préférer les solutions informatiques qui s'appuient sur des applications CAO. Dans ce cadre existent des applications comme Pro-Engineer Wildfire 4.0, CATIA V5, ou encore RAPIDFORM XOR qui proposent des boîtes à outils de reconstruction de surfaces et de volumes basées sur des noyaux géométriques reconnus (Parasolid, par exemple).

Les boîtes à outils proposées par ce type de logiciels sont très efficaces. Il faut cependant faire preuve d'une certaine méthodologie afin d'obtenir un véritable modèle CAO apte à intégrer un projet de développement rapide de produit *via* une plateforme PLM.

Considérons l'**exemple** de la figure suivante (figure 5), représentant la reconstruction d'un bouchon de radiateur d'une Delahaye 135 de 1935.

C'est un exercice pédagogique sur CATIA V5 réalisé grâce à une numérisation 3D effectuée par le pôle AIP-Primeca de Lorraine.

Le résultat de l'opération de reconstruction, effectuée, par exemple, avec CATIA V5 est un modèle solide parfaitement correct. Cependant, si nous portons une attention particulière à son arbre de conception, nous obtenons le modèle de la figure 6.

Nous remarquons que cet arbre est principalement composé de géométrie. Il y a des courbes, des surfaces... La surface du modèle est un patchwork de carreaux de surfaces canoniques et gauches. Chacun de ces carreaux est limité par des courbes, ou par un autre carreau qui l'intersecte.

Cependant, il est très rare de trouver un modèle CAO purement géométrique.

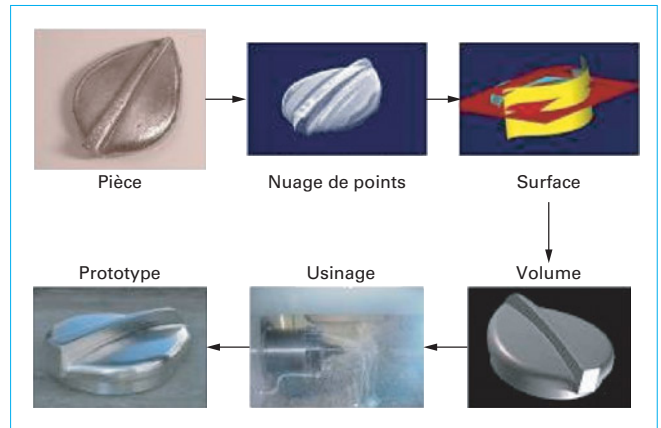


Figure 5 - Reconstitution d'un bouchon de radiateur d'une voiture de collection (Crédits AIPL, Nancy)

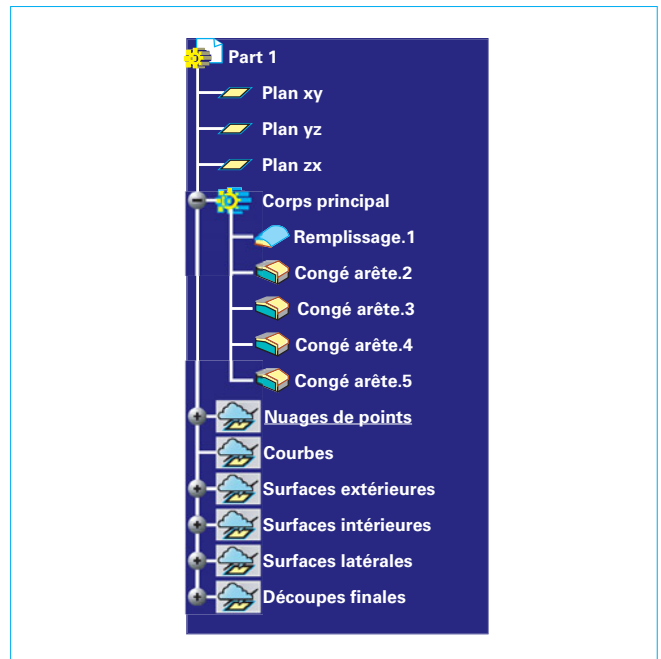


Figure 6 - Arbre de conception CATIA V5 uniquement géométrique

Comme le montre la figure 7, un modèle CAO porte beaucoup plus d'information que la simple géométrie.

L'**exemple** de la figure 7 nous montre un arbre de conception type du logiciel CATIA V5, mais les arbres de conception générés par les autres grands noms de la CAO (ProEngineer, SolidWorks, Inventor, SolidEdge...) sont du même type.

■ Dans ces arbres, il est question des **paramètres qui pilotent la forme de la pièce**, ainsi que les relations qui les lient. On a donc une vue de l'intention de conception de la part du concepteur. De plus, la géométrie n'est pas décrite directement. Mais, comme le résultat de fonctions de création (extrusion, révolution, balayage...) et d'habillage (chanfrein, congé...) qui traduisent certaines intentions de la part du concepteur. Une dépouille, par exemple, donne des informations sur le futur moyen de fabrication.

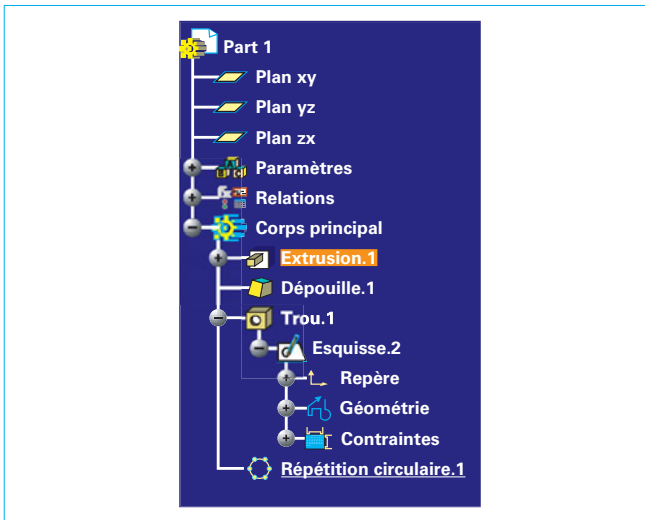


Figure 7 – Arbre de conception CATIA V5 basé sur des fonctions

■ Dans le cas où le modèle reconstruit à partir de la numérisation intègre le processus de développement de produit via une plateforme PLM, ou via des échanges avec d'autres acteurs de la conception, il faut donc le reconstruire avec soin. En considérant les besoins des autres acteurs en matière de format de données. Pour obtenir un modèle CAO, porteur du maximum d'informations (c'est-à-dire que le modèle reconstruit ait un arbre de conception le plus proche possible de l'arbre qu'aurait obtenu le concepteur originel de la pièce), il faudra que la reconstruction se fasse en prenant en compte deux aspects principaux :

- la fonction de la pièce numérisée ;
- les moyens de fabrications utilisés pour la produire.
- La prise en compte de la fonction de la pièce pourra donner énormément d'indices.

Par exemple, si la pièce est en liaison pivot avec une autre pièce, et que cette liaison est réalisée par deux arbres, il y a fort à parier que ces deux arbres devraient être coaxiaux.

Le modèle CAO reconstruit devra mettre en évidence ce fait.

- La prise en compte du procédé de fabrication, lui aussi, pourra donner quelques indices sur la façon de paramétrer le modèle CAO. Comme déjà évoqué, si la pièce est visiblement une pièce forgée (ou issue d'un brute de forge), il serait judicieux de créer les surfaces de dépouille et de faire le paramètre « angle de dépouille » sur le modèle CAO. L'avantage d'une telle reconstruction est de permettre l'annulation de cet angle de dépouille si le nouveau procédé de fabrication qui sera choisi ne nécessite pas un tel angle.

Ce dernier exemple montre que, si le procédé de fabrication est considéré pendant la phase de reconstruction du modèle CAO, celui-ci peut permettre une plus grande souplesse lors du choix des procédés en vue de l'industrialisation (ou de la ré-industrialisation) de la pièce.

### 2.3 Synthèse sur l'intégration d'un modèle virtuel

Tout comme Philippe Fuchs et Simon Richir proposent d'intégrer la notion de Conception Assistée par la Réalité Virtuelle CARV [AG 2 521], le principe même du *Reverse Engineering* se

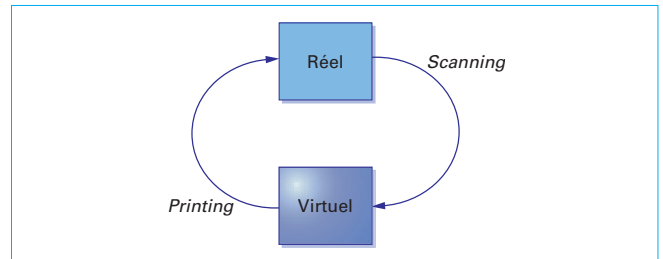


Figure 8 – Entre réalité et virtualité : numérisation et impression 3D

propose de boucler le couple technologique numérisation 3D/prototypage rapide au cœur du processus de développement rapide de produit.

Désormais, dans un monde où la maquette numérique est devenue un élément incontournable référant de la production industrielle, nous avons vu précédemment que le PLM devient un axe de travail majeur permettant à toute l'entreprise de s'organiser, depuis la R&D jusqu'à la maintenance, en passant par la conception, les essais, la fabrication, le marketing...

Toujours soucieux de faire au mieux, dans les délais les plus courts et à moindre coût, la simulation numérique s'est généralisée et le virtuel prend sa place dans le processus industriel global. C'est une nouvelle forme de prototypage rapide : le prototypage virtuel. Mais l'utilisation du virtuel permet d'aller plus loin qu'une simple visualisation graphique. Grâce aux modèles numériques affinés et possédant désormais un maillage fermé, il est possible d'imprimer directement l'objet en 3D.

Comme illustré par la figure 8, le passage du réel au virtuel peut être bouclé et servir de validation à la phase de virtualisation.

C'est ainsi que le designer américain Michael Berman (Vice-Président du *Art Center College of Design* aux États-Unis), insiste sur la nécessité de réinjecter le modèle virtuel dans la réalité afin de mieux le valoriser.

D'un point de vue technologique, il propose d'enchaîner le *scanning* avec le *printing* en réalisant une impression 3D à l'aide des technologies de prototypage rapide (par stéréolithographie, frittage de poudre...).

■ Quel que soit le domaine d'appartenance de l'objet d'étude subissant le *Reverse-Engineering*, il convient de faire attention à l'intégrité du modèle. En effet, une perte d'information inhérente à chaque rebouclage démontre qu'aucun processus formalisé ne peut exister : les domaines d'applications et les formes des objets sont bien trop divers.

Aussi, avant de formaliser un processus adapté au besoin de *Reverse-Engineering* (au cas par cas), il conviendra d'identifier les connaissances mises en jeu (qu'elles soient matérielles ou immatérielles). La figure 9 propose une vision macroscopique de ce processus. C'est donc bien plus que du simple *Reverse-Engineering*. Il s'agit de *Reverse-Engineering* contextualisé. Une analogie peut être effectuée avec l'analyse fonctionnelle externe de la méthode APTÉ [A 5 090]. Dans ce cas, il s'agit des milieux extérieurs des contextes d'utilisation.

Ainsi, à partir des informations physiques numérisées via la prise de mesure classique (pied à coulisse, palmer...) ou la numérisation 3D, il sera possible d'obtenir une première modélisation 3D. À l'aide de l'ensemble des connaissances extérieures capitalisées, cela peut faire évoluer l'objet virtuel.

La détermination des flux de conception (comme les liaisons cinématiques par exemple) permettra d'en définir un nouveau modèle dit « 3D + t ». Mais une belle « animation » n'est pas suffisante pour expliquer l'objet dans son contexte intrinsèque.



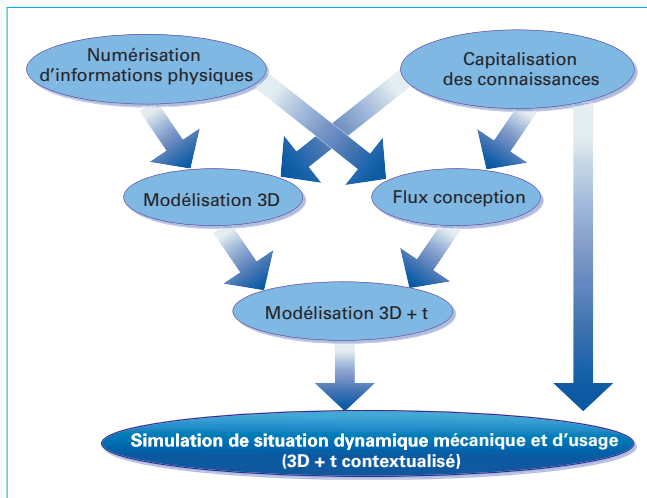


Figure 9 – Reverse-Engineering contextualisé. Éléments méthodologiques

■ Aussi, la nouvelle interprétation des éléments contextuels à l'utilisation de l'objet vont permettre d'en définir un **nouveau modèle virtuel représentatif d'un usage dédié** (par exemple, l'utilisation d'une machine outil par un avatar virtuel dans un atelier). C'est pourquoi nous parlons alors de « **situation dynamique d'usage** » ou de « **3D + t contextualisé** ».

■ D'une façon générale, tout ingénieur appelé à dérouler un processus de *Reverse-Engineering* devra, **en préliminaire de toute action**, se poser les questions suivantes :

- identifier la(les) matière(s) première(s), le fabricant de l'objet ;
- savoir s'il s'agit d'un composant intermédiaire ou final ;
- déterminer sa structure physique et ses fonctions (souvent associée à la notion de performance) ;
- identifier ses caractéristiques techniques, ainsi que celles dites « esthétiques » (pouvant justifier, ou non, l'utilisation de certaines formes ou de certains matériaux).

Enfin, pour aller plus loin, l'étude d'un objet est parfois inséparable de celle de son milieu (savoir-faire, contexte politique, contexte social, contexte économique...). Ces éléments peuvent être retrouvés grâce, entre autres, aux **méthodes de capitalisation des connaissances, autrement appelées Knowledge Management**.

Il s'agit là du système socio-technique de l'objet permettant de justifier les choix du couple numérisation 3D/prototypage rapide.

Le paragraphe 3 illustre, grâce à des exemples incontournables du domaine, cette multitude de contextes et les quelques points clés méthodologiques qui y sont associés.

### 3. Incontournables de la numérisation 3D et du prototypage rapide

#### 3.1 Insuffisance du prototypage virtuel

Le prototypage rapide permet la vérification physique de la géométrie de la pièce. Il s'agit principalement de disposer de l'objet

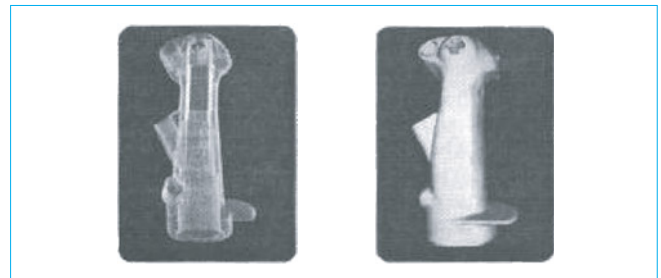


Figure 10 – Nuage de points et maillage STL d'un manche d'avion (Crédits CGI)

pour des besoins divers qui peuvent être ergonomiques, ou encore esthétiques par exemple. Pour de tels besoins, un modèle numérique dans un environnement virtuel ne suffit pas.

Généralement, le modèle STL est utilisé directement pour obtenir une copie conforme de l'objet étudié. C'est un exemple courant. L'objet étudié est un prototype fait main, comme un manche de contrôle de commandes d'un avion (figure 10). Ce prototype fait main est alors numérisé en 3D afin de fabriquer les moules qui vont servir à fabriquer l'objet final.

Dans ce domaine, l'ergonomie est un critère important qu'une infime différence de géométrie peut modifier.

Pour valider la CAO reconstruite depuis le nuage de points issu de la numérisation 3D du prototype originel du manche, on va fabriquer le modèle correspondant à cette CAO grâce à un procédé de prototypage rapide. De ce fait, un pilote d'essai pourra comparer l'ergonomie du prototype issu de la CAO avec celle du prototype originel et donc, valider la CAO qui servira à lancer la fabrication des manches.

Ici, le lien est direct entre la numérisation et le prototypage rapide. Il suffit juste de générer un modèle STL à partir du nuage de points qui servira à la fabrication d'un prototype grâce à des procédés de prototypage rapide.

La même approche sera utilisée dans le domaine du luxe, de la joaillerie, du sport...

#### 3.2 Customisation

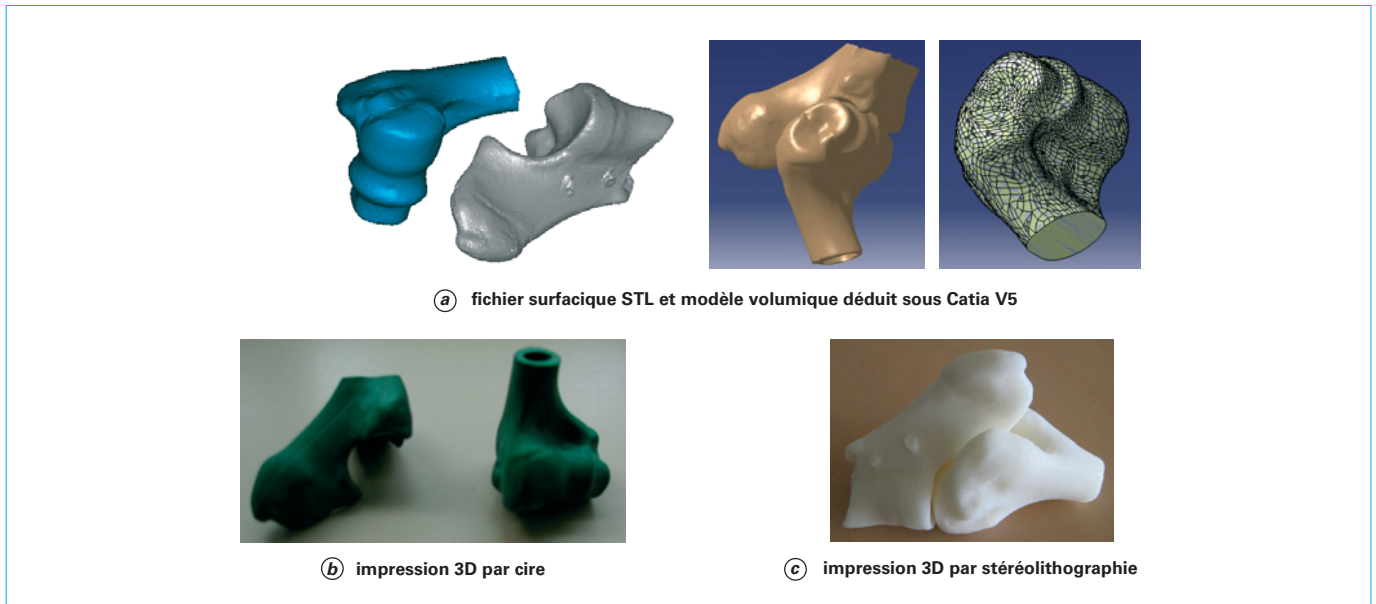
La customisation d'objet nécessite de plus en plus l'utilisation du couple technologique : numérisation 3D/prototypage rapide.

Ici, il s'agit d'adapter tout ou partie d'un objet à un client/utilisateur, ou à un produit donné.

**Exemples :** • Considérons un produit qu'il faut adapter à une morphologie. La coque d'un appareil auditif peut être faite sur mesure et s'adapter parfaitement au conduit auditif d'un client donné. Dans ce cas, l'électronique et son support sont « standards » et ils sont intégrés dans une coque qui sera faite sur mesure grâce à la numérisation de l'empreinte en silicone du conduit auditif du patient.

Le modèle numérique reconstruit dépendra fortement du niveau d'intégration de la partie customisée de l'objet. Dans le cas de la prothèse auditive, l'électronique embarquée est si petite, qu'elle sera insérée sans problème dans la coque. La coque pourra donc être faite directement, en vraie matière, avec un procédé de prototypage rapide. Un STL sera donc suffisant.

• Un autre exemple peut être tiré du monde médical. Il s'agit de numériser un os de bœuf (figure 11) sur un sujet décédé et de le modifier, le customiser, afin de pouvoir réaliser une prothèse de genou pour un sujet vivant. C'est une approche courante dans le monde médical et qui s'applique aussi à l'homme.



**Figure 11 – Numérisation de l’articulation d’un genou de bœuf** (Crédits : École Centrale de Nantes, Arts-et-Métiers ParisTech CER Angers et AIP Primeca Pays de Loire)

Dans le cas du genou de bœuf, la prise de mesure sur l’animal vivant étant impossible, c’est un os d’animal décédé qui a été numérisé. Comme la morphologie de chaque animal est différente, il faut modifier la géométrie de l’os (grâce à des indices pris sur des radios par exemple) pour qu’elle corresponde à celle de l’animal vivant et servir de référence à la conception de la prothèse.

Dans ce cas, il y a modification. Le modèle STL est donc insuffisant et il faut donner plus de soins à la reconstruction du modèle numérique d’objet. Comme évoqué plus tôt dans cet article, un STL est trop limité pour permettre une modification pertinente du modèle numérique. L’os de genou doit donc être reconstruit à l’aide de surfaces et de volumes.

### 3.3 Maintenance de produits à longue durée de vie

La maintenance de produits à très longue durée de vie est une application pertinente du couple technologique numérisation 3D, prototypage rapide. Dans ce cas, le modèle STL est rarement suffisant car il faut souvent retravailler le modèle numérique pour faire apparaître des données « métier » telles que décrites dans le paragraphe 2.

Cette nécessité de faire apparaître ces données « métier » est illustrée au travers de trois exemples.

#### Exemples

- Cas de **rétro-conception d’outillage de forge** (figure 12) réalisée sur une pièce de Manoir Industrie à Bar sur Aube (10). Après avoir numérisé la pièce en elle-même, il faut concevoir l’outillage de forge, lequel a des paramètres « métier » bien particuliers, tels que le rayon d’entrée de matrice et les angles de dépouille. Ces paramètres ne peuvent pas apparaître, ni dans un fichier STL, ni dans un fichier de type surfacique (figure 6).

Ce cas est donc l’archétype de la situation où il faut obtenir un modèle CAO possédant un arbre de conception ressemblant à celui de la figure 7. Pour ce faire, il faut utiliser un véritable modelleur CAO (voir § 2) et demander à un expert « métier » (ici un forgeron) où sont les entités « métier » à faire apparaître.

Une fois ces renseignements pris, il faut faire apparaître ces entités avec leurs paramètres dans le modèle reconstruit. Il ne faut donc surtout pas essayer d’obtenir un modèle surfacique en appliquant des surfaces gauches ou un maillage sur le nuage de points. Il faut, au contraire, se mettre dans la peau du concepteur original et, avec l’aide de l’expert forgeron, s’appuyer sur le nuage de points pour modéliser la pièce.

- Numérisation d’une maquette de navire à l’échelle 1/10** (figure 13) et comparaison topographique du modèle CAO « parfait » avec le nuage de points obtenus (figure 14). Ainsi, il a été possible d’effectuer des simulations hydrodynamiques virtuelles afin de corréler les rapports d’essais physiques avec les essais numériques.

- Numérisation 3D d’un objet patrimonial**, une laverie de sel, (figure 15) faite de bois et de métal, attaquée par le sel, afin de la conserver dans un musée virtuel (figure 16), puis de la faire reconstruire à l’échelle 1:1. Le prototype devra être fonctionnel et construit par des artisans menuisier et ferronnier (objet de 20 m<sup>3</sup> environ). Il faudra donc que le modèle numérique reconstruit après numérisation 3D permette une mise en plan (figure 17) et permette une simulation cinématique de son fonctionnement. Ici encore, la reconstruction du modèle numérique devra s’appuyer sur les caractéristiques métier des menuisiers et des ferronniers. C’est là aussi un long processus itératif basé sur un véritable modelleur CAO et non une simple reconstruction surfacique ou un maillage STL.

**Remarquons** que ce dernier exemple permet d’introduire un élément important de la numérisation 3D : la prise en compte du contexte pour permettre une reconstitution et/ou reconstruction au plus juste. En effet, cet objet mobilier, fait de métal et de bois, est fortement détérioré par le sel.

Plusieurs étapes ont été nécessaires : photographies, croquis, dessins d’architectes, numérisation globale par théodolite à balayage laser et enfin, complétude de la reconception par l’utilisation de scanner 3D portable pour les zones de détails non accessibles avec les autres technologies.

Le résultat de cette expérience est la réalisation, cent ans plus tard, d’un prototype fonctionnel permettant la sauvegarde du patrimoine technologique (figure 18).

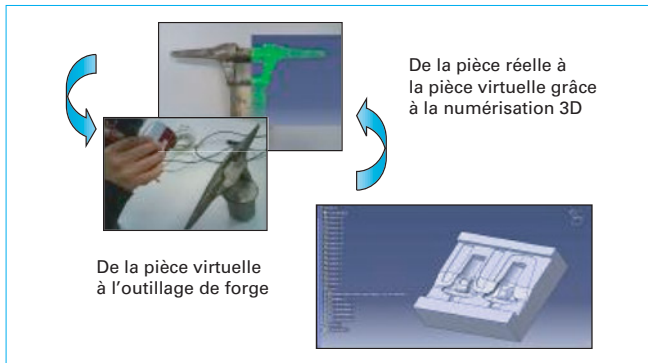


Figure 12 – Rétro-conception d'un outillage de forge (Crédits UTT)

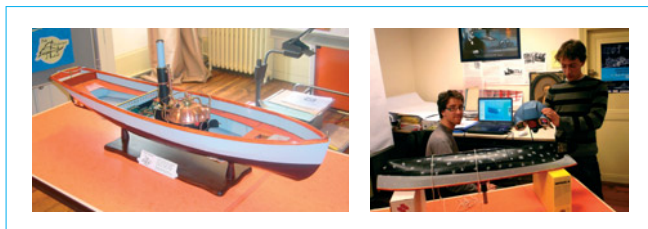


Figure 13 – Numérisation de la maquette (Crédits ECN et DCNS)



Figure 14 – Maquette numérique et comparaison avec le nuage de points (Crédits École Centrale de Nantes)

## 4. Conclusion

Le couplage entre numérisation 3D et prototypage rapide s'inscrit maintenant de manière durable dans ce que l'on appelle « les processus de développement rapide de produit ». Avec le prototypage rapide, on évolue résolument vers une volonté de réduire les étapes intermédiaires permettant d'obtenir des objets fonctionnels, ou presque fonctionnels.

L'évolution conjointe des capteurs de numérisation et des logiciels de modélisation a permis de mettre en place des approches intégrées donnant un cadre à un **nouveau mode de production que l'on appelle la *Mass Customisation***.

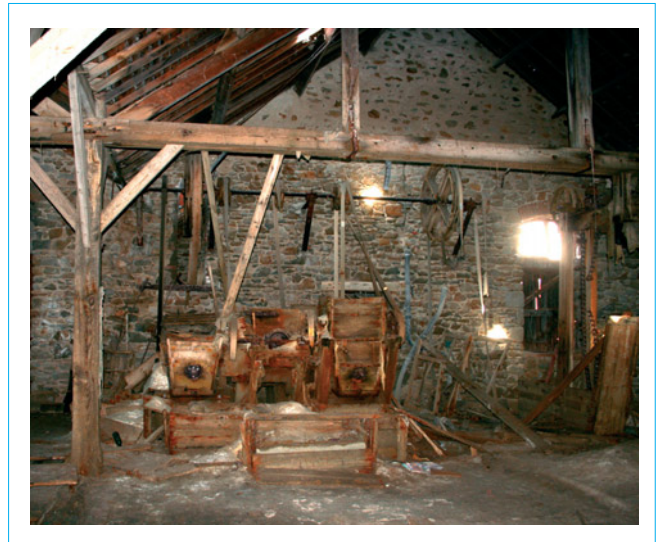


Figure 15 – Laverie de sel (Crédits École Centrale de Nantes)

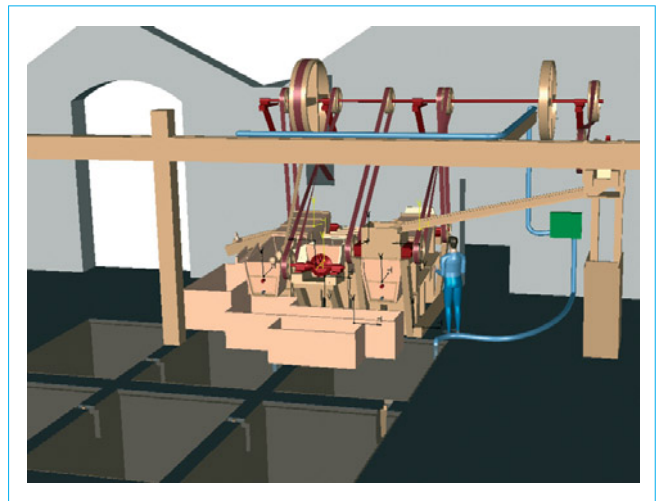


Figure 16 – Maquette numérique (Crédits École Centrale de Nantes/Cap Atlantique)

La notion d'unicité de l'objet fabriqué est devenue capitale et le contexte méthodologique ainsi que le modèle d'information doivent prendre en compte ces évolutions.

Au lieu de marginaliser les techniques de fabrication additives, elles sont devenues, à la fois, rapides et agiles, et cela pour de nombreux matériaux.

Reste à établir une vraie démarche de standardisation qui permette une véritable reconnaissance des technologies de fabrication rapides additives, couche par couche, au sein des processus de développement de produit.

Le passage efficace du monde réel à un modèle numérique reste une clef des processus créatifs et innovants que les sociétés ont besoin de développer et de s'approprier.



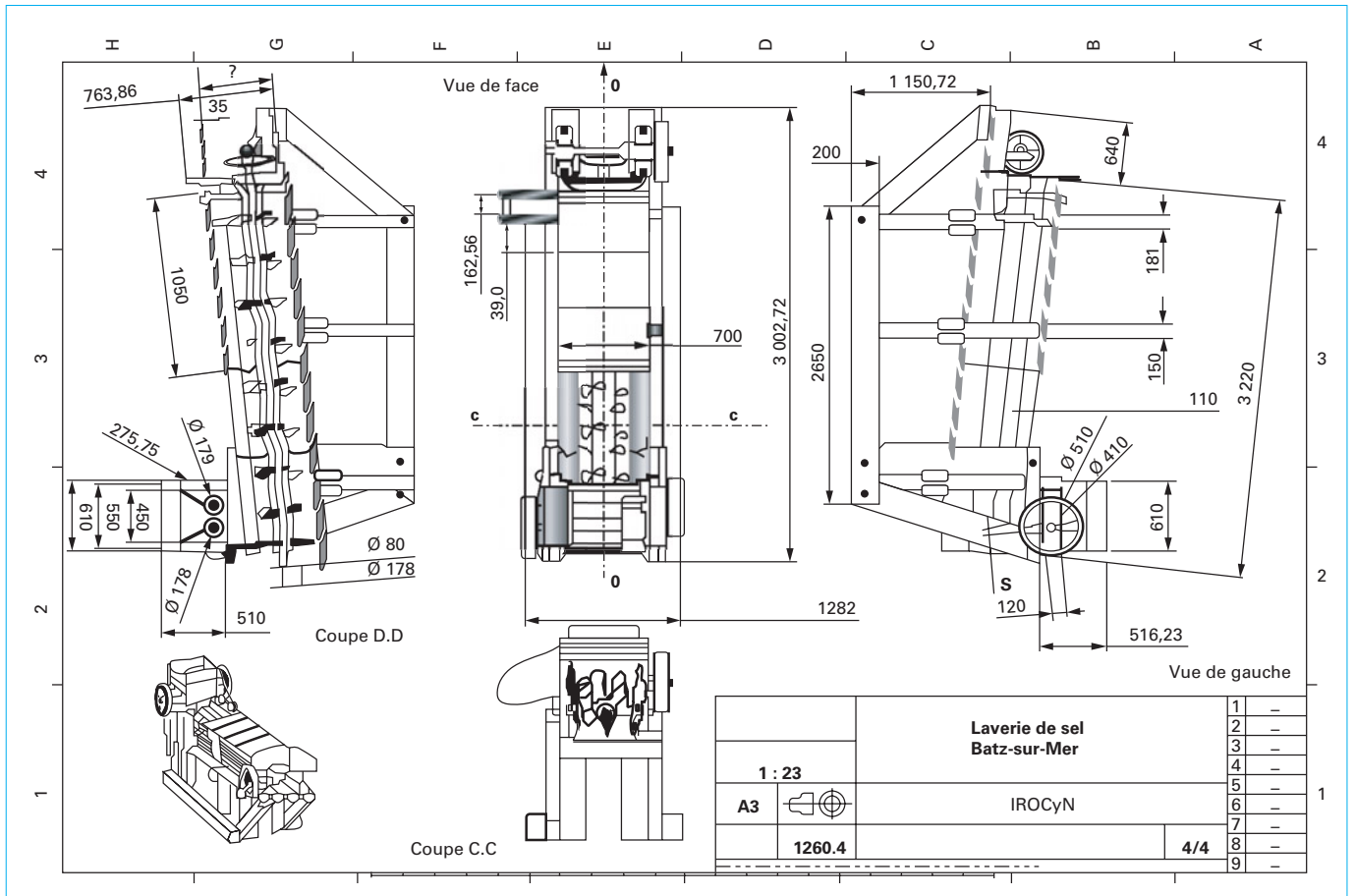


Figure 17 – Mise en plan pour l’artisan menuisier (extrait) (Crédits École Centrale de Nantes/Cap Atlantique)



Figure 18 – Confrontation des deux machines : cent ans les séparent ! (Crédits Ecole Centrale de Nantes/Cap Atlantique)

# Numérisation 3D et prototypage rapide

## Exemples d'industrialisation de produits

par **Sébastien REMY**

*Dr et Maître de conférences à l'université de Technologie de Troyes*

**Florent LAROCHE**

*Dr et Maître de conférences à l'École Centrale de Nantes*

et **Alain BERNARD**

*Professeur des universités à l'École Centrale de Nantes*

### Sources bibliographiques

REMY (S.). – *Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy (2004).

LAROCHE (F.). – *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, École Centrale de Nantes (2007).

BERNARD (A.) et TAILLANDIER (G.). – *Le prototypage rapide*. ISBN : 2-86601-673-4 aux éditions Hermès (1998).

LAROCHE (F.), BERNARD (A.) et COTTE (M.). – *Knowledge management for industrial heritage*. In *Methods and tools for effective knowledge live-cycle-management*, BERNARD (A.) et TICHKIEWITCH (S.) (Éds.), Éd. Springer, ISBN : 978-3-540-78430-2, p. 307-330 (2008).

BERNARD (A.), NARTZ (O.), REMY (S.), RIS (G.), ZHANG (Y.F.), LOH (H.T.) et WONG (Y.S.). – *Reverse engineering and rapid prototyping*. Software solutions for rapid prototyping, chap. 9, Coordinator : GIBSON (I.), ISBN : 1-86058-360-1, publishing Ed., UK, p. 283-339 (2002).

LAROCHE (F.), BERNARD (A.) et COTTE (M.). – *Advanced industrial archaeology : a new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects*. Virtual and Physical Prototyping, vol. 3, n° 2, Taylor and Francis, ISSN : 1745-2759, p. 105-122 (2008).

DURUPT (A.), REMY (S.), DUCELLIER (G.) et EYNARD (B.). – *From a 3D point cloud to an engineering CAD model : a knowledge-product-based approach for reverse engineering*. Virtual and physical prototyping, 3(2), p. 51-59 (2008).

REMY (S.), DUCELLIER (G.), CHARLES (S.) et EYNARD (B.). – *Advanced STEP parameterized and constrained features for reverse engineering*. International Journal of Computer Applications in Technology, 32(1), p. 1-11 (2008).

BERNARD (A.) et TAILLANDIER (G.). – *Du prototypage rapide à la fabrication rapide : une chaîne*

*complète*. Technologies internationales, ISSN : 1165-8568, n° 62, p. 41-44 (2000).

DURUPT (A.), REMY (S.), DUCELLIER (G.) et GUYOT (E.). – *Proposition d'un processus de rétro-conception par extraction des connaissances et techniques de reconnaissances géométriques*. 11<sup>e</sup> colloque National AIP Primeca, La Plagne, 12 p., 22-24 (2009).

BERNARD (A.) et FISCHER (A.). – *New trends on rapid product development*. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Keynote du Scientific and Technical Committee « Design », vol. 51, p. 635-652 (2002).

BERNARD (A.), LAROCHE (F.), AMMAR-KHODJA (S.) et PERRY (N.). – *Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems*. CIRP Annals, Manufacturing Technology, vol. 56, ISSN : 0007-8506, p. 143-14 (2007).

BERNARD (A.). – *Effective reverse engineering issues*. Virtual and Physical Prototyping, vol. 3, Issue 2, p. 49 (2008).

### À lire également dans nos bases

DUBOIS (P.), DUCHAMP (R.) et AOUSSAT (A.). – *Prototypage rapide – Généralités*. [BM 7 017] (2000).

MORENTON (P.). – *CAO : logiciel CATT*. [BM 5 019] (2006).

FUCHS (P.) et RICHIR (S.). – *Réalité virtuelle et conception – Méthodes*. [AG 2 521] (2003).

BEOROHIA (F.X.). – *Gestion de la traçabilité des productions manufacturières – État de l'art, solutions et perspectives*. [TR 120] (2009).

### Outils logiciels

- **CATIA V5** – Dassault Système
- **ProEngineer Wildfire 4.0** – PTC
- **RapidForm XOR** – INUS Technology

- **3D reshaper** – Technodigit
- **Geomagic Studio** – Geomagic

## Sites Internet

- **Romer**  
<http://www.romer.com>
- **Creaform**  
<http://www.creaform3d.com>
- **Kréon**  
<http://www.kreon3d.com>
- **Metris**  
<http://www.metris.com>
- **Faro**  
<http://www.faro.com>

## Événements

Assises européenne du Prototypage rapide

## Annuaire

**Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs** (liste non exhaustive)

**Organismes – Fédérations – Associations** (liste non exhaustive)

- **Association Française de Prototypage Rapide (AFPR)**
- **Global Alliance for Rapid Prototyping Associations (GARPA)**

**Documentation – Formation – Séminaires** (liste non exhaustive)

**Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche** (liste non exhaustive)

- **Les universités de technologie (UTBM, UTC, UTT)**
  - **École Centrale de Nantes (ECN)**
  - **Institut de formation aux techniques supérieures (IFTS)**
  - **Écoles des mines de Nancy (CIRTES)**
  - **École normale supérieure de Cachan**
-

Alain Bernard · Serge Tichkiewitch  
Editors

# Methods and Tools for Effective Knowledge Life-Cycle-Management

 Springer

Professor Alain Bernard  
Ecole Centrale de Nantes  
IRCCyN, CNRS, UMR 6597  
1 rue de la Noë  
44321 Nantes Cedex 03  
France  
alain.bernard@ec-nantes.fr

Professor Serge Tichkiewitch  
Grenoble Institute of Technology  
Laboratoire G-SCOP  
46 Avenue Félix Viallet  
38031 Grenoble Cedex 1  
France  
serge.tichkiewitch@inpg.fr

ISBN 978-3-540-78430-2

e-ISBN 978-3-540-78431-9

DOI 10.1007/978-3-540-78431-9

Library of Congress Control Number: 20089222196

© 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, reuse of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilm or in any other way, and storage in data banks. Duplication of this publication or parts thereof is permitted only under the provisions of the German Copyright Law of September 9, 1965, in its current version, and permissions for use must always be obtained from Springer. Violations are liable to prosecution under the German Copyright Law.

The use of general descriptive names, registered names, trademarks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

*Cover design:* F. Steinen-Broo, eStudio Calamar, Spain

Printed on acid-free paper

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

# Preface

Knowledge Management is a wide, critical and strategic issue for all the companies, from the SMEs to the most complex organizations. The key of competitiveness is knowledge, because of the necessity of reactivity, flexibility, agility and innovation capacities. Knowledge is difficult to measure itself but what is visible, this is the way of improving products, technologies and enterprise organizations.

During the last four years, based on the experience of most of the best experts around the World, CIRP (The International Academy for Production Engineering) has decided to prepare and structure a Network of Excellence (NoE) proposal. The European Community accepted to found the VRL-KCiP (Virtual Research Laboratory – Knowledge Community in Production). As its name indicates it, the aim of this NoE was really to build a «Knowledge Community in Production». This was possible and realistic because the partners were representative of the most important universities in Europe and also because of strong partnerships with laboratories far from Europe (Japan, Australia, South Africa, USA, etc...).

Based on such powerful partnership, the main issue was to help European manufacturing industry to define and structure the strategic knowledge in order to face the strategic worldwide challenges.

Manufacturing in Europe currently has two essential aspects:

1. It has to be knowledge intensive given the European demands for high-tech products and services (e.g. electronics, medicines).
2. Given the relatively high labor costs compared to developing countries, manufacturing processes in Europe require high levels of expertise to realize innovation with a very high productivity.

Consequently in Europe, knowledge management (KM) and more widely Knowledge Life-cycle Management (KLCM) has become a major issue in academia and industry in the last 30 years, and it is recognized that the knowledge issue is important for a firm's manager as well as for an operational work.

This book helps to understand what is knowledge, why knowledge is one of the most strategic issues of the future manufacturing competitiveness, mainly based

on high level technologies and very innovative products and how to capitalize knowledge.

The collective experience that contributed to the elaboration of this book is unique because it is based on 34 contributions, very complementary, very representative of Knowledge Life-Cycle Management state and issues.

The knowledge map of the consortium has been built and is the base of an efficient collaboration within the NoE. The use of conceptual maps for competencies mapping and knowledge formalization in a Virtual Lab is also one of the contributions of the book. The fundamental knowledge and knowledge management concepts are described. In particular, the benefit of networks of expertise is highlighted and mainly knowledge sharing between multi-cultural communities. Ontology constitutes the base of knowledge formalization and mapping with respect to the different points of view. Knowledge integration mechanisms within the extended enterprise and more over the value chain, depending on context characteristics, are also described and illustrated, through methods, tools and experiences. Concrete experiences are described and commented, mainly for product, process and resource description and management along the life-cycle of mechanical systems. The role of knowledge life-cycle management and of documents in supporting a radical innovation project is also highlighted. Experience feedbacks are described about knowledge engineering approaches for design, manufacturing, and more generally for enterprise engineering. Several case studies are also provided in design and manufacturing fields, and also related to European level manufacturing knowledge sharing.

The specific context given by the VRL-KCiP NoE community involved in the realization of this book constitutes the main original value-added of this book. This means that this book is unique because it is based on a theoretical and practical experience of the authors who are for most of them members of the CIRP, the best referenced International Academy in Production Engineering.

We hope that you will enjoy this book and have a maximum benefit of it.

The co-editors,  
Alain BERNARD, Serge TICHKIEWITCH



# Content

## Part 1 KM Needs and Concepts

### 1.1 What Is Knowledge?

#### 1.1.1 From Data to Knowledge

An Overview on Knowledge Management ..... 3  
*S. Ammar-Khodja, A. Bernard*

#### 1.1.2 What is Knowledge Management

Manufacturing Knowledge Work: The European Perspective ..... 23  
*F. Wijnhoven*

### 1.2 Networks of Expertise

#### 1.2.1 Knowledge Sharing

*Social Needs for Knowledge Sharing*

Building a Knowledge Share Culture in a Virtual Organization.  
Case Study for VRL-KCiP NoE..... 45  
*A. Draghici, G. Draghici*

Influence of Multi-Culturality in Virtual Teams ..... 61  
*A. Draghici*

#### 1.2.2 Knowledge Integration

*Web Tools for Knowledge Integration*

A Web and Virtual Reality Based Paradigm  
for Collaborative Management and Verification  
of Design Knowledge..... 91  
*G. Chryssolouris, D. Mavrikios, M. Pappas*

Knowledge Management in the Virtual Enterprise:  
Web Based Systems for Electronic Manufacturing ..... 107  
*G. Chryssolouris, S. Makris, D. Mourtzis, N. Papakostas*

EDEN™ .....	127
<i>D. Kotze, W. Uys, N. Du Preez</i>	
<i>Contextual issue of knowledge integration</i>	
Misunderstandings in Global Virtual Engineering Teams: Definitions, Causes, and Guidelines for Knowledge Sharing and Interaction .....	145
<i>M. Lewkowicz, F. Wijnhoven, A. Draghici</i>	
A Knowledge Network Approach Supporting the Value Chain.....	159
<i>N. Du Preez, L. Louw, E. Lutters</i>	
<i>Knowledge Mapping</i>	
Formulating an Expertise Map in the VRL-KCiP .....	169
<i>G. Molcho</i>	
Representation and Navigation Techniques for Semi-Structured Knowledge in Collaborating Communities .....	185
<i>Z. Kemény, G. Erdős, J. Váncza</i>	
The Use of Conceptual Maps for Competencies Mapping and Knowledge Formalization in a Virtual Lab .....	213
<i>G. Chryssoulouris, D. Mavrikios, S. Xeromerites, K. Georgoulis</i>	
Production Paradigms Ontology (PPO): a Response to the Need of Managing Knowledge in High-Tech Manufacturing.....	227
<i>A. M. Paci, M. S. Chiacchio, C. Lalle</i>	
<b>Part 2 KM Models, Methods and Tools</b>	
<b>2.1 Design Product Oriented Models</b>	
Compatibility Knowledge in Fuzzy Front End.....	243
<i>J. Hohenegger, A. Bufardi, P. Xirouchakis</i>	
Development of a Conceptual Reference Framework to Manage Manufacturing Knowledge Related to Products, Processes and Production Systems .....	259
<i>M. Colledani, W. Terkaj, T. Tolio, M. Tomasella</i>	
FBS-PPRE, an Enterprise Knowledge Lifecycle Model .....	285
<i>M. Labrousse, A. Bernard</i>	
Knowledge Management for Industrial Heritage.....	307
<i>F. Laroche, A. Bernard, M. Cotte</i>	
<b>2.2 Design Process Oriented Models</b>	
The Role of Knowledge Management in Supporting a Radical Innovation Project.....	331
<i>B. Katz, N. Du Preez</i>	

Improved Utilisation of Organisational Documents  
 Using a Conceptual Framework ..... 347  
*W. Uys, E. Uys, E. Lutters, N. Du Preez*

Applications of Knowledge Engineering Approaches for Design..... 363  
*N. Matta, L. Zaher*

Generation of Design Knowledge from Product Life Cycle Data..... 375  
*A. Bufardi, D. Kiritsis, P. Xirouchakis*

Reference Architectures as Knowledge Management Tools Guiding  
 and Supporting Enterprise Engineering..... 391  
*N. Du Preez, L. Louw, H. Essmann, C. Grové, L. van der Walt*

Knowledge Networks, Methods and Tools Analysis  
 for Information Validity: Case Study Feed Back ..... 415  
*N. Perry, A. Candlot*

**Part 3 Case in Manufacturing Knowledge Management**

**3.1 Case Studies in Design**

Knowledge Management in a Virtual Lab  
 Collaborative Training Project:  
 A Mini-Formula Student Car Design ..... 435  
*G. Chryssolouris, D. Mourtzis, P. Stavropoulos, D. Mavrikios,  
 J. Pandremenos*

Case Study in Design: Generation of Design Knowledge  
 for Vehicle Sub-frames  
 Based on Finite Element Simulation ..... 447  
*H. Long, A. Fanourakis, P. Oliver*

A Pragmatic Approach to Knowledge Management  
 in an Engineering Design SME ..... 463  
*C. Beylier, F. Pourroy, F. Villeneuve*

Capitalization and Reuse of Forging Knowledge  
 in Integrated Design ..... 479  
*S. Tichkiewitch*

**3.2 Case Studies in Manufacturing**

Case Study, USIQUICK Project: Methods to Capitalise  
 and Reuse Knowledge in Process Planning..... 487  
*A. Candlot, N. Perry, A. Bernard, S. Ammar-Khodja*

Knowledge Management in Manufacturing Process Modeling:  
 Case Studies in Selected Manufacturing Processes..... 507  
*G. Chryssolouris, N. Papakostas, D. Mourtzis, S. Makris*

	Knowledge Management Paradigms in Selected Manufacturing Case Studies .....	521
	<i>G. Chryssolouris, D. Mourtzis, N. Papakostas, Z. Papachatzakis, S. Xeromerites</i>	
<b>3.3</b>	<b>The VRL-KCiP: Cases in European-Level Manufacturing Knowledge Sharing</b>	
	Process Design Theory for Digital Information Services.....	533
	<i>F. Wijnhoven</i>	
	The VRL-KCiP Software Demonstration and Exchange Platform – An Example for Web-Based Knowledge Management and Representation .....	547
	<i>L. Aldinger, J. Westermann, E. Westkämper</i>	
	A Basic Knowledge Management System for the VRL-KCiP.....	559
	<i>G. Molcho, R. Schneor, D. Bossin</i>	
	Contacts and Appointments Manager: VRLshepherd .....	579
	<i>C. Kind, O. Arpinar, A. Finnah, B. Schmidt</i>	

# Knowledge Management for Industrial Heritage

Florent Laroche<sup>1</sup>, Alain Bernard<sup>2</sup>, Michel Cotte<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IRCCyN UMR CNRS, Ecole Centrale de Nantes; Centre François Viète for science and technical history, University, Nantes, France  
florent.laroche@ircryn.ec-nantes.fr

<sup>2</sup>IRCCyN UMR CNRS, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France  
alain.bernard@ircryn.ec-nantes.fr

<sup>3</sup>Centre François Viète for science and technical history, University, Nantes, France  
michel.cotte@univ-nantes.fr

**Abstract** All along history, humans have always invented, created to improve their standard of living. Many machines have been built, sometimes simple and others very complex.

In order to achieve the best results for customers, machines, industrial plants and humans are moved, displaced and replaced. It is the global humanity technical knowledge that disappears.

Indeed, there is a lack in the actually conservation methods: sciences and technologies have to be considered and not only architecture. Our heritage research focuses on the mechanical and technical point of view. For instance, in a factory, there is the building but also actuators, motors and machines that produce product: taking into account the technical point of view can reach to a better understanding of the past.

That's why preserving the national technical patrimony has now become the priority of governments and world organizations. Our approach proposes a new kind of finality: as saving and maintaining physical object cost a lot for museums, and sometimes dismantling is impossible as the machine falls in ruin, we propose to preserve it as a numerical object.

The aim of this research is to define the global process and technologies used for implementing a numerical model of old machines. The final aim is to constitute a new reference for museologic actors, using actual techniques and methods for putting old machines and technical means in "virtual use", taking into account the working situation including human being at work.

This process is illustrated by an example we performed: a steam engine.

**Keywords:** Knowledge Management; Reverse Engineering; Technical Heritage; Industrial archaeology

# 1 Introduction

All along past centuries, humans have always invented, created so as to improve their standard of living. Many machines have been built, from the very simple ones up to very complex ones.

In order to achieve the best results for customers, machines, industrial plants and humans are moved, upgraded and replaced. When out of operation, industrial machines are generally destroyed and sometimes, they are stored and collected by Museums.

Nevertheless, preserving the national technical heritage is now becoming a priority for governments and world organization. We will explain this point of view in the Sect. 2.1.

This knowledge, testimony of the past, raises questions regarding its management and the valorization of the museums and the industrial plants: how to preserve the technical information contained in the collections, the files and the heritage plants [1]?

More and more, Knowledge Management is applied by enterprises in a nearly systematic way:

- tools and methods exist but questions still exist for technical history?
- which methods for capitalizing this knowledge?
- what kind of old technical should we have to conserve?

Understanding an old technical machine can be easy to achieve for former workers or for a museum conservative but at the opposite its popularization can be difficult and highly delicate.

Considering that saving and maintaining physical objects is very costly for museums, and sometimes dismantling is nearly impossible as the machine crumbles to dust, our approach proposes a new kind of finality: we propose to preserve it as a numerical object.

In the first part of this communication, the research context is explained. It demonstrates how two scientific domains can merge: Engineering science & Social science; thus, for one side according to Industrial Manufacturing & Design and on

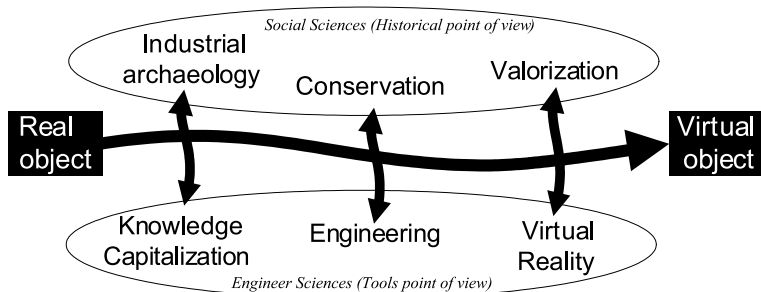


Fig. 1 Methodology macroscopic model



the other side Technical history. Next, the methodology developed for virtualizing technical machine and its environment is detailed. As shown by Fig. 1 which is a macroscopic overview, the final step of the methodology consists in conserving and vulgarizing the numerical model. All along the methodology description, an example is used so as to illustrate the global process.

## 2 Background

Before explaining the methodology, it is essential to consider the background of the research project and the way it was born. After identifying the conservation need, we try to point out why there is a lack in the actually conservation methods: sciences and technologies have to be considered and not only architecture. For instance, in a factory, there is the building but also actuators, motors and machines that produce product: taking into account the technical point of view can reach to a better understanding of the past. More, experiences individually done do not emphasize dynamic concepts of old machines: manufacturing a product means there are mechanical kinematics and processes. That's why merging engineering sciences and social sciences can be profitable for each one.

### 2.1 *The Idea Birth*

The protection of scientific, technical and industrial heritage is a relatively recent idea. It is in England, in the Sixties, that was born what British people call the "industrial archaeology".

The first experimentation object for the capitalization and the valorization of the heritage was the Ironbridge (this one was the first iron bridge, built in 1779 and classified to the world heritage of UNESCO in 1986 [2]). In his PhD related to the Seguin family history, Michel Cotte, technical history professor, introduced the concept of systemic objects for modeling processes ... [3]. This approach, already strongly exploited in the Engineer Sciences, is not yet anthropocentered as it would be in Social sciences. Consequently, merging the two communities can enrich semantic and can create new methodologies.

For example, coming from the Social sciences, the methodology called "systemic" applied to old technical objects demonstrates the genetic of an object: who are the parents and the children, reasoning in term of technology? This approach is the same one called MKSM method based on the historical model, the lines model and the antagonists model [4]; MKSM was developed by Engineering sciences and is used as a method for capitalizing knowledge.

It is in this context that the subject of this research was born. After several experiments on old industrial objects, it has appeared that the conservation of the technical heritage encounters several major difficulties issued mainly from:

- a no-sensitizing of industrial world regarding the value of their technical heritage and the interest about the possibilities of heritage backup;
- financial difficulties to conserve, to maintain and to ensure the transportation of large size objects;
- a human difficulty due to the lack and the loss of the users consciousness and/or the disappearance of the machine manufacturers.

## ***2.2 The World Heritage Conservation: What About Sciences and Technologies?***

According to what is said in the previous section, there is a real problem for capitalizing knowledge related to local heritage, national heritage, and more widely ... international heritage. For a part, it was the mission given up to UNESCO in 1972 which convention clearly states three categories of knowledge considered as cultural heritage [5]:

- monuments: architectural works, monumental sculpture and painting, elements or structures of an archaeological nature, inscriptions, cave dwellings and features combinations, which are of outstanding universal value from an historic point of view, art or science;
- groups of buildings: groups of separate or connected buildings which, due to their architecture, their homogeneity or their place in the landscape, are of outstanding universal value from the point of view of history, art or science;
- sites: works of men or the combined works of nature and men, and areas including archaeological sites which are of outstanding universal value from the historical, aesthetic, ethnological or anthropological point of view.

In 2003, at the ICHIM conference, Jean-Pierre Dalbéra from the French culture and communication Ministry laid the stress of the need for a capitalization and a valorization of the French heritage [6]. Since this communication, many research programs have been started in France; among them, we can quote:

- GALLICA, digitalization and diffusion on the Web of books coming from the French National Library “François Mitterand”;
- CNUM, digitalization and diffusion on the Web of books coming from the French National Science and Technology Academy “Musée des Arts et Métiers”

However, they are focused on historical documents, images, art objects or architectural monuments ... The technical industrial heritage has not been targeted as a priority for conservation. Some attempts are carried out independently by conservatives and by the “Musée des Arts et Métiers”. At the “Arts-et-Métiers” museum, valorization of the technical and scientist heritage is the priority since the law of 1792 related to the French heritage conservation.

Although other experiences in other domains usually use those tools (for example archaeology [7]); the proposed approach focuses upon science and technology.

All the studied objects (and their context) come from industrial plants. Moreover, studies are focused on the technical and mechanical point of view.

Jocelyn de Noblet proposes to classify the technical objects, scientific objects and/or industrial objects according to three categories [8]:

- objects of daily life that we own;
- objects of daily life that we use but we do not own;
- objects we do not use and do not own but that are necessary for manufacturing and/or using for objects of everyday life.

Our research belongs to the third category: objects we do not use and do not own but that are necessary for manufacturing and/or using for objects of everyday life. Objects considered are testimonies of the past and that could have become leaders of an old star technology. Discovering old machines allow discovering old technical cultures.

### ***2.3 The Heritage Valorization: What About Dynamic?***

Initiated in 1992 by the French culture and communication Ministry, the French research and technology Ministry and the French Education Ministry, the REMUS project was the first one that had developed interdisciplinary teams in order to find new solutions for the museology of sciences and technology. Several works and studies were finalized: the main point was to advise for using audio-visual technologies [9].

Many case studies have already been carried out but only in static situation: “3D”. Taking into account time concept “t” will give kinematics that is necessary for creating dynamic situations. Modeling and re-designing “3D+t” models will constitute a new step for museology (see part 3.2).

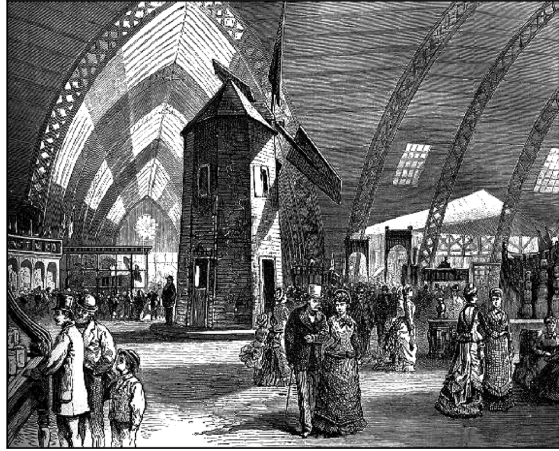
But videos can not be as realistic as immersion system used for example in Virtual Reality Center. Consequently, more have to be done about simulations of mechanical kinematics, product flows, fluids ... in order to re-create working situations.

Moreover, setting up a virtual dynamic situation can go further. The World fair of the 19th century has been a real progress star. It has been the place for theatre representations playing with restored machines, brushed machines, smoothed machines, nice machines, in the silence and the light of the big showrooms (see Fig. 2 and 3).

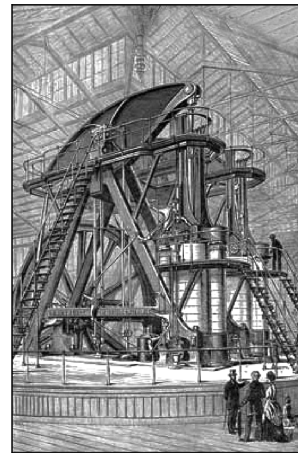
Nowadays, in Museums, “we are very far from the factory and the workshop, the noise and dust, tiredness and sweat, [...] the violence of the social relationship which however contribute to the technologies history” as Paul Rasse said [10].

Conserving technical machines necessary means that the object has to be capitalized but also its mechanism operating by taking into account its technical and social context. Mechanically, operating is defined by functions and associated kinematics but also with process and used situation. Consequently, historical knowledge just like historical tools and methods are not enough for a complete understanding. Other knowledge has to be brought out.

**Fig. 2** 1876 Philadelphia World exposition



**Fig. 3** 1876 Philadelphia World exposition – The Corliss engine



## ***2.4 The Contributions of Mechanical Engineering and Digital Tools for Museums: a New Way for the Heritage Valorization***

Consequently, engineers and industrial engineering tools and methods can bring answers for capitalization, conservation and valorization of old machines.

Our proposition consists in reversing the design time axis from end of lifetime back to the initial need. Thanks to a re-design by modeling of the technical machines and a contextualization in its environment, then, it can be possible to restore it for multiple finalities and more widely to restore the working situation of the socio-technical production system [11]:

- control and measurement tools: from homemade measurement tools to laser scanning of the architects (systems with physical contacts, passive/active systems without physical contacts);
- design: from CAD tools to synthesis imagery;
- dynamic: technical machines with real kinematics with the representation of the flows, the fluids, the workers and the manufacturing environment;
- virtual visualization: from Web visualization to virtual reality;
- physical visualization: from the intermediate representation models of objects [12] thanks to rapid prototyping to a realistic and/or functional reconstruction of the machine.

Indeed, in France and all over the world, vulgarization experiences performed in Museums related to sciences and techniques usually refers to architecture plants or archaeological plants. The virtual technologies are used so as to create an imaginary world where the visitor can walk. The main objective is to give tools for a better understanding of the past: that's why colours are beautiful, and rendering is realistic ... Although the virtual system creates interactions with the visitor, it presents only buildings and static old machines [13].

However, some Museums propose a new kind of use for virtual technologies: the "Virtual Visit". Nowadays, the most advanced country in the world that has virtualized all the museums is Canada. Using internet, it is possible to visit each Canadian museums. Moreover, all the sites are interconnected and switching from one museum to an other one can be done being at home. In 2004, the Canadian Heritage Information Network made a survey in order to know if the museum virtualization is useful [14]. The results demonstrate that it allows everybody to have access to knowledge. Among all the positive elements, we can notice that:

- it reduces the distance and allows people far away from Canada to visit Museums,
- it is accessible for handicapped,
- families can, at home, prepare their visit and their cultural holidays.

It is a new kind of publicity: communication is knowledge oriented. However, although web sites can interact with visitors, shown objects remain static.

Introducing new technology can be a real benefit both for visitors and for Museums. As usually, old machines do not operate or can not be exposed in the Museum, it can be a real and realistic new solution for capitalizing heritage. Globally, the problem of cost and security remains for preserving the machine functionalities: components wearing, the need of a machine driver ... Consequently, using virtual technologies can be a real benefit for visitors and conservatives: Virtual Reality is a new mediation tool. On the opposite to videos and thanks to interactivity, it is easier to understand the operating situation: the visitor is no longer a spectator but an actor. As he is immersed in the system, he drives himself the virtual machine up to the possibilities to test the machine limits. Moreover, the mediation-tool detail level can be adapted by the conservatives to the targeted public.

## 2.5 Case Studies and Interest

The proposed model (see Fig. 5 in part 3) has been built thanks to experiences carried out during four years by French researchers. The first two studies began at the University of Technology of Belfort-Montbéliard (France), on a steam engine and a press.

Next, experiences were made up with students of the IUT de Nantes (France): in order to learn the use of CAO programs, it was decided to take as studied object an old printing machine coming from a museum (see Fig. 4) [15].

Nowadays, the team has accumulated other experiences that permit building the global process that will be used for capitalizing, digitalizing, modeling, conserving and valorizing old machines and associated knowledge in dynamic situation of use.

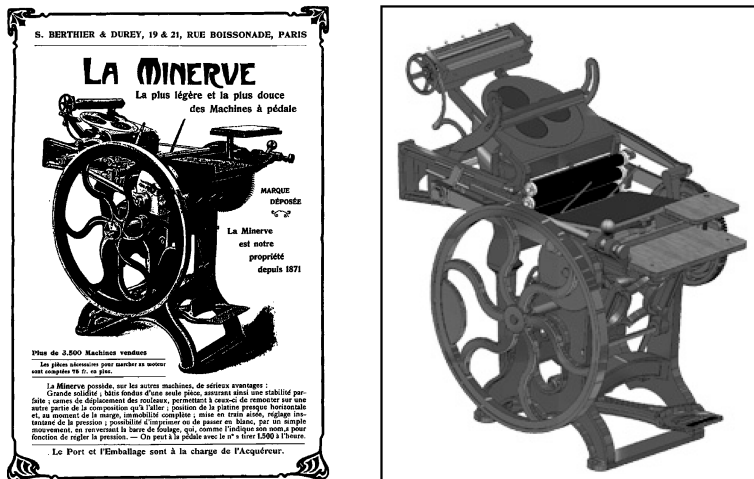


Fig. 4 Printing press “La Minerve”: manufacturer catalogue drawing & CAD model.

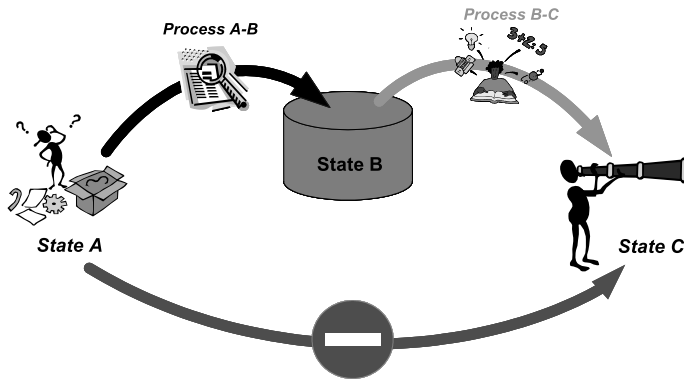
## 3 Process for a Numerical Heritage

### 3.1 Overview

Figure 5 presents the model we propose.

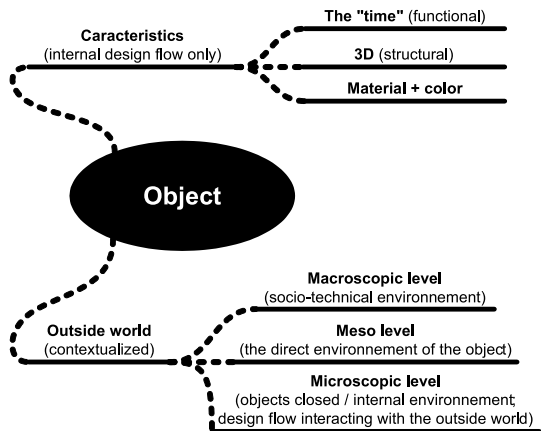
State A is the starting point of the global process. It gives the statement of the object and its environment at the beginning of the conservation study. State A characterizes the object with its physical properties and the “outside world” as shown by Fig. 6 as explained later in Sect. 3.2 and 3.3.





**Fig. 5** The global process for capitalizing and virtualizing old machines and associated knowledge

**Fig. 6** Physical object definition [16]



State C gives the various finalities of the valorization and conservation project. State B is the necessary intermediate way for realizing State C. Whereas the direct way since the existing material data (State A) is not strongly advised as it will produce a non complete and realistic model of the object.

Then, State B is an essential intermediary step for a rigorous conservation method. For example, in case of museographic presentation of State C, if we intent to present virtually the object to public, only one part of the contents of the State B is used. In the same way, if it is used for a reconstruction of the object (that's means to recreate the machine), it will be another part of State B that will be taken into account.

To conclude, it is necessary to have the more complete and detailed State B since at the beginning of the process we generally do not know what kind of finalities (State C) it will be used for.

### 3.2 State A and Process A-B: the Object Itself

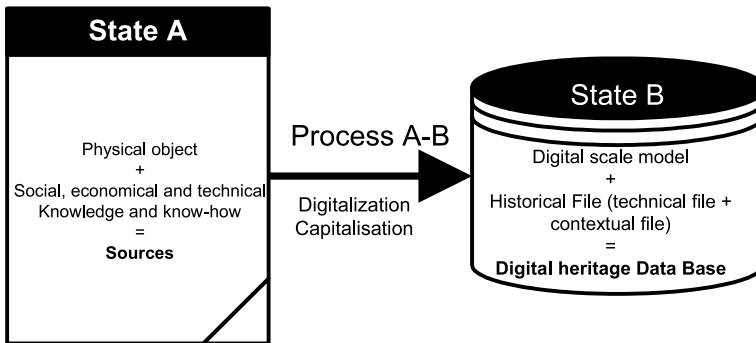


Fig. 7 First step of the process: A to B

#### Determining the state of the object

The conservation method suggested will not consist first for restoring the object (see part 3.4, one possibility of the finalities). Process A-B consists in digitizing the object in order to immortalize it and to produce data that will be coherent, readable and transmissible to future generations.

At the beginning of the study, it must be determined and precise the object life period that has to be represented in the digitalization process and the modeling process:

- “new” object, in its initial state of first use;
- object in use with possibilities of including adaptations and innovations;
- object at the end of lifetime;
- object in its archaeological state of discovery or when it was decided to preserve it;
- object partially extrapolated according to the gaps of State A.

#### Digitalization

If the object exists partially or entirely at the time of the study, it is possible to digitize it directly in three dimensions in order to collect its geometry. Several solutions of digitalization exist: laser scanning, photogrammetry, measurement systems with contacts ...

According to the size of the object, its materials nature and its degradation state, technologies used may be different.

If the object does not exist any more, thanks to external documents and knowledge, it will be possible to design an extrapolated model (see part 3.3).

#### Re-designing: static components

The digitalized dots obtained have to be treated in order to be able to design the various components of the object. Taking into account the file size and the wish to

The methodology associated to Fig. 8 is:

1. an object skeleton has to be designed;
2. adding the concept of time, it will produce a kinematic sketch; drawn in 3D space, it will produce a wireframe that has to be iterated with the physical object in order to validate it and to fix the dynamic;
3. the last step will produce new knowledge maturation: the mechanism understanding;
4. next the dynamical digital model is created by anchoring solids on the skeleton.

### **Environment and other dynamic flows**

Except for kinematics, simulations are carried out in post-processing and without direct visualization. For example, this is a problem for modeling fluids: in the case of a steam engine, it is actually very difficult to visualize the exchanges of vapor. However, such visualization is essential for conservatives and all non-expert people.

It will also be necessary to consider the need of environment restitution: actuators and motors, the nearest machines, the industrial plant ... do they have to be digitized, modeled?

### **Materials and other feelings**

As seen before, an object is defined by its geometrical characteristics ("3D") and its kinematic functional properties ("3D+t"). But functionalities could also be due to the material properties used: then, it is necessary to carry out a virtualisation of materials.

In the same way, materials or paintings are design information that could be essential for a future restitution and that must be taken into account during the digitalization step.

Where are the limits of the external appearances in relation to the concept of authenticity? Is it necessary to restore false colors to prove the virtuality?

Speaking about design, an object can be characterized by its colorimetric but also by auditive and olfactive perceptions: how to capitalize sounds and odors in numerical form? Notice that those information's have sometimes disappeared with the dismantling or the non possibility of handing-over under operation of the machine.

## ***3.3 State A and Process A-B: the Object and its Context***

As in archaeology (we think about excavations of archeological sites) the object gathers three ways: a genesis, a life and a place, and this, within a double approach: material and intellectual [19]. State A can not only be conserved by the physical object. That means that the object has to be contextualized by capitalizing the information, data, notes and know-how:

- at a technological and industrial level: in order to understand its operation and its insertion in the industrial plants;
- at a social and economic level: so as to contextualize the object in order to determine the technological developments.

This first step of taking into account the environment knowledge requires:

- the technologist know-how which knowledge capitalization methods are fully rising in industries;
- however, it is important to notice that it does not exist yet methods nor tools for capitalizing the environment of patrimonial objects;
- the competences of archaeologists and technical historians;
- however, it is also important to notice that a systematic method within a technical study framework does not exist.

Indeed, understanding and studying an old technical object requires a multiple jobs crossing and a large contextualisation. Consequently, we will have to consider many various sources. Here are some examples of sources:

- machine drawings published by manufacturers;
- plant layout, cartography of the factory, physical mock-up;
- catalogues, patents, general documents of the manufacturer;
- handbooks, specialized reviews, World Fair reports;
- private industrial files or public funds (J series of the French departmental records);
- technical and industrial public files (M and S series of the French departmental records, public records);
- interviews, anthropological and sociological investigations;
- ...

Sometimes, the physical object is in a so advanced degradation state that digitalization will be without interest or impossible as the object does not exist any more in the industrial plant. That's why, if additional capitalized knowledge is sufficient, it will be possible to carry out an extrapolated virtual reconstitution but sure that will not be authentic.

### ***3.4 State B: the Digital Heritage Reference Model***

If the object could have been modeled in a virtual form, the mock-up becomes a new object we can call: "reference model". Moreover, if environmental and associated knowledge are capitalized, then State B constitutes a new kind of file for conservatives: the "technical heritage work file" (in French, we would prefer the wording "dossier d'œuvre patrimonial technique"; indeed, the French word "œuvre" gives more authenticity and value than the English word "work"). Centered on

the virtual reference model, this file combines complementary technical data of the object, environmental data and also the social and economical context.

The Digital Heritage Reference Model is a new conceptual idea introduced by our team in order to sensitize to the add-in it provides.

Then, in order to be as functional as possible, this new patrimonial file will have to be on a digital and virtual form. But we mention that nowadays there are no recommendations for this kind of document that combine textual information, videos, 2D images, 3D mock-up, dynamic simulations, sounds, odors ...

Moreover, multiple computational formats exist for constituting knowledge bases but few, even none, can integrate such different nature of data with hyper-text. This format must be interoperable and easy to handle by any today systems and especially must be able to be preserved and understandable for the future generations.

### 3.5 Process B-C and State C

Once the Digital Heritage Reference Model made up, it is possible to consider various finalities for the virtual object among which, we can distinguish:

- a patrimonial record;
- a restoration/a reconstruction;
- a didactic engineering use for students or by experts in order to use it as spring-board for innovation;
- a museologic and scenographic valorization in a virtual form as 3D Web which can be assisted by Virtual Reality technologies in order to immerse the visitor in the system.

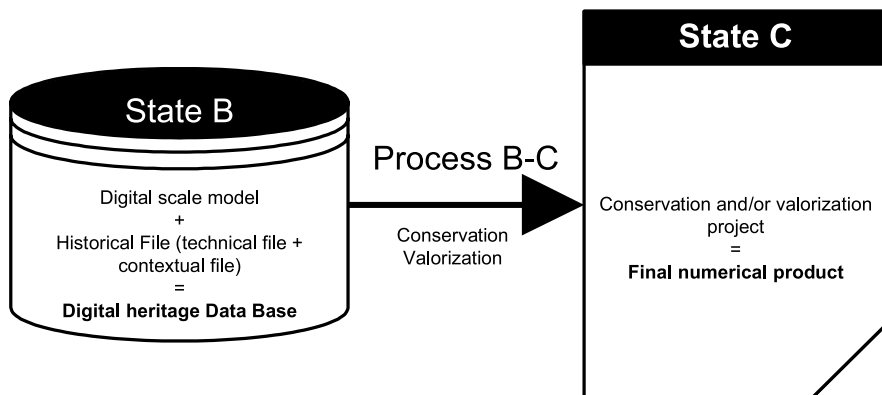


Fig. 9 Second step of the process: B to C

create a realistic model, we would prefer solid design instead of surfacing as we are speaking about mechanical parts.

Moreover, as modeling is costing a lot of time and money, it is necessary to specify the model accuracy level expected: screws, chamfers, precision for foundry parts ... It is the same problem as encountered with over-quality in manufacturing processes.

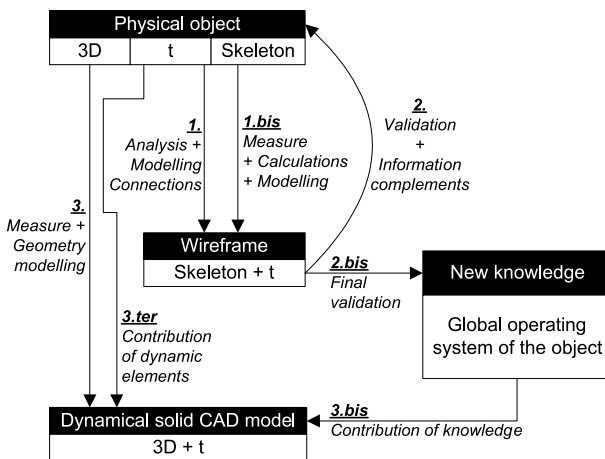
**Re-designing: dynamic functions**

As used objects are not inert, they are animated by mechanisms that have to be virtually restored and simulated in order to validate operating [17].

In the first step of the process A-B, it is essential to produce a functional virtual model that is mechanically realistic and as accurate as possible. That’s why using CAD programs is better than using CG programs (Computer Graphical). CG programs are usually used for creating animated pictures, movies ... Indeed with CG programs, simulations and dynamic are not realistic as a “world” is created in which one the objects will move but this world does not have the properties of the terrestrial physical laws such as the fundamental principles of mechanics (the gravity for example). Indeed, the numerical mock-up will be realistic and not realist; but as realist as it can be [18]. Obviously, numerical files will never replace physical objects: it is only one way to represent reality.

Many experiences we did upon technical heritage have led us to the model shown on Fig. 8.

The physical object is separated into its 3D components, its skeleton and the concept “time”. Time “t” will create the dynamic situation.



**Fig. 8** Method for modeling old systems



For last case, for instance in a valorization for Museums, several approaches can be developed. They can consequently fix objectives of State C:

- 3D+t modeling and/or knowledge management access;
- visualization in 3D Web;
- immersion in a system of Virtual Reality.

3D Web allows user to visualize 3D and 3D+t models of virtual objects on a standalone computer in Museum or at home.

One of the most thinkable purposes consists in transferring model in an immersion system intended for didactic finalities or Museums. Virtual Reality technologies are fully increasing and numerous solutions nowadays exist as well at a commercial level and at an experimental level. Many interfaces exist among which there are:

- forced feedback, pressure feedback;
- eyes tracking;
- stereoscopic vision;
- ...

It is important to notice that once the final state C is defined, it is necessary to iterate with state A in order to take into account documents needed. Indeed, determining the State A document package is difficult as we do not know how the object and its context will be exploited. Consequently, the amount of work and the way of capitalizing and digitalizing knowledge will be a little bit different.

## **4 Example: the Creusot Steam Engine**

Here is sum up one experimentation we did. The global process is not complete as long as we are regularly iterating with conservative needs.

However, it gives a preview of what can be done merging two communities: history and mechanical engineering.

The Fig. 10 on the next full page shows the global process followed according to the points explained in part 3 of this communication.

### **4.1 Background**

In 2000, the history of a steam engine currently “stored” in the warehouses of the Ecomusée du Creusot had begun. Its life was recalled and also its memberships, its functions ...

In order to complete the steam engine know-how and as the machine cannot any longer operates and that all components are dismantled, a modeling of the steam engine operation had begun in 2003. It resulted in its kinematic diagram for

illustrating its basic operation (piston engine, rod, and wheel) and it produced a numerical model at scale 1:1 of the steam engine. The dead machine was operating again but without dust!

Nowadays, we are working upon a didactic presentation for the Museum.

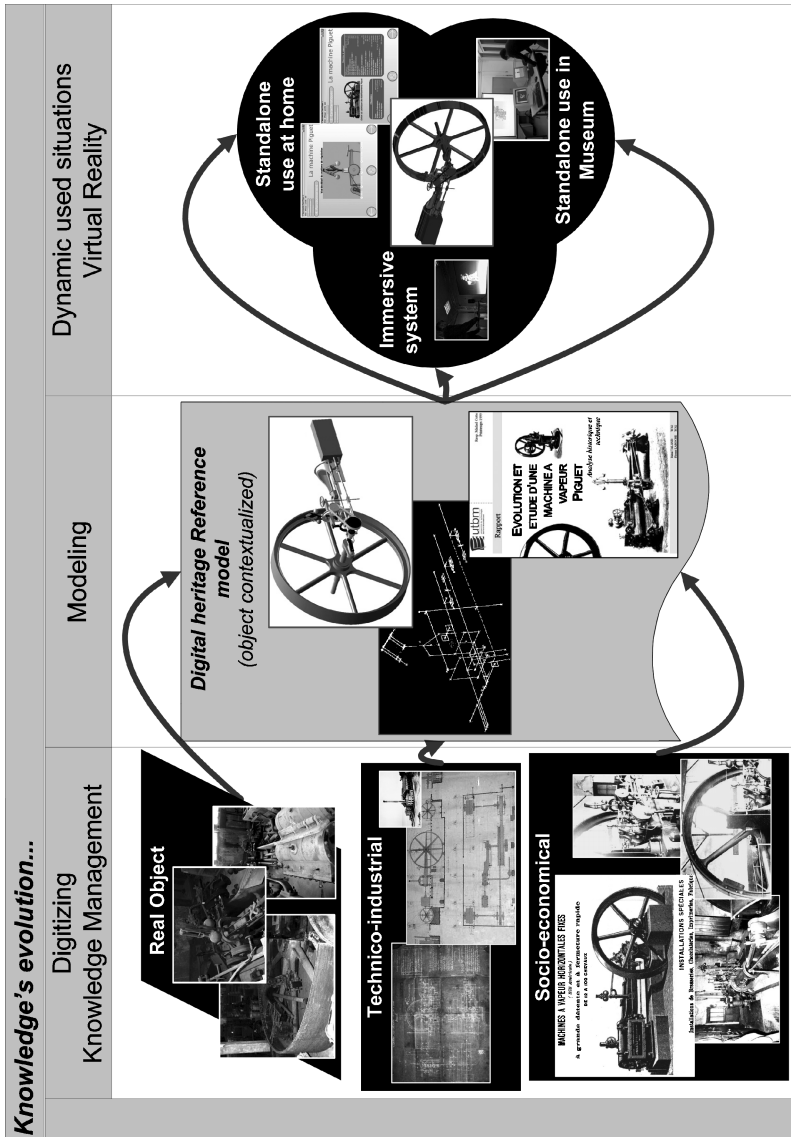


Fig. 10 The global methodology used for the Piguet steam engine

## 4.2 *Knowledge Capitalized*

This steam engine was originally built by the Piguet Company located in Lyon, France.

In 1898, the machine was installed with four other similar steam engines in the factory of Fontvieille at Monaco (Fig. 11). Coupled to dynamos, they produced electricity for the “Monegasque Company of Electricity”. The power station plant capacity was 1680 kW, the team for the electrical department included 40 employees and the price of kWh was 1.70 gold francs.

But the maintenance of the steam engines was expensive and the boilers required large quantity of raw fuel, it was necessary to renovate the Fontvieille station with more efficient generators. Also considered as highly polluting for the landscape of Monaco bay, the four steam engines were replaced in 1917.

One of them was moved to France, in Moulins. It was used as a generator for a mechanical sawmill. It remained 13 years there. In 1930, the steam engine was again repurchased by another sawmill and it is at La Roche-en-Brénil that the machine will finish its life where it provided mechanical energy for five saws.

But the low cost of electricity and the high cost of the steam engine maintenance brought its stop in 1972.

In 1977, the Ecomusée du Creusot decided to purchase it in order to preserve it. But since the factory was built when the steam engine was installed, it was impossible to dismount and move the machine without destroying the building itself. For economical reasons, the steam engine was condemned to spend its entire life in the sawmill.

But, in 1994, the sawmill decided to destroy the steam engine building; then, the museum dismounted the machine and stored it dismounted in its store (Fig. 12).

**Fig. 11** The Fontvieille power plant



**Fig. 12** The machine in the Museum reserve



### **4.3** *Characteristics of the Studied Machine*

This machine is a steam engine from the French manufacturer Piguet. Its specifications are:

- horizontal machine;
- right-hand machine;
- plane drawers;
- one cylinder;
- condensation type and variable relaxation.

As seen before, the steam engine had been in operation from 1898 up to 1975. As the machine is nowadays dismantled, only the catalogue of the Piguet Company gives its dimensions: including rod, crank, piston, inertia wheel, it measures 4.40 meters width, 6.40 meters length and 4.20 meters height (Fig. 13). The piston engine measures 400 mm length for a stroke of 800 mm. That's why its official reference is 40×80 TP. Its first function was the energy production (mechanical and electrical).

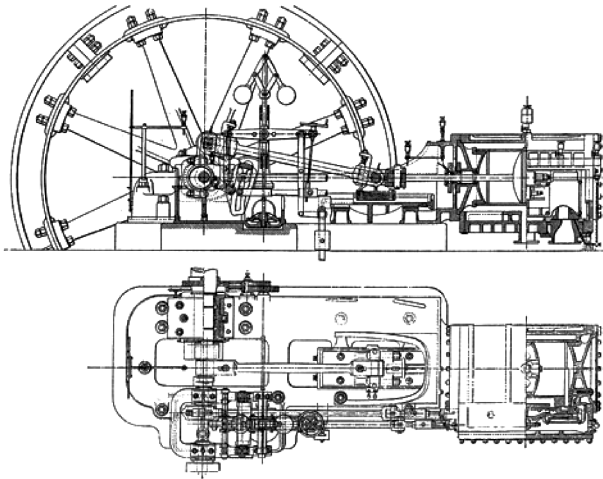


Fig. 13 1886: Steam engine from Piguet catalogue.

#### 4.4 Modeling

As specified in the global process description, the first step is to study the movements and the kinematics. Three groups were identified:

- the power group;
- the regulator group;
- the control group.

After measuring minimal technical dimensioning, it was possible to reconstitute kinematics in a wireframe numerical model (Fig. 14). All modeling were done with the program Catia V5R8 from Dassault System.

After validation of the model, the components were modeled in 3 dimensions (Fig. 15).

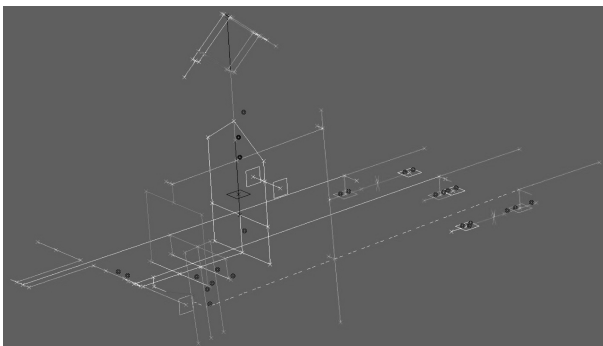
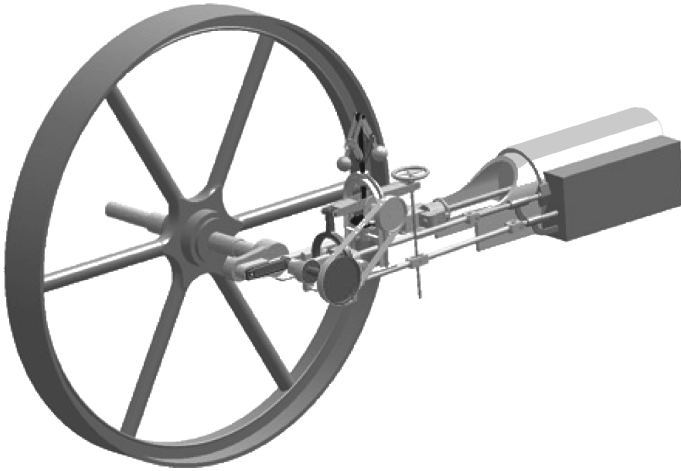


Fig. 14 Kinematic skeleton model



**Fig. 15** Steam engine with functional colors

## 4.5 Valorization

For operating a steam engine, hot steam is necessary; to produce such quantity of steam at high pressure, a boiler is required. In the past, there were many accidents with boiler explosions. As using steam engine and all the adding components is dangerous for public, the digital mock-up simulations have to take their place in Museum. In this spirit, it has been projected to create a steam engine Museum with, of course, mainly virtual machines.

Nowadays, the museum project is not yet a main objective and at first, a didactic presentation of the Piguet steam engine has to be produced. It can be used in standalone inside the Museum by every kind of public (Fig. 16). It:

- presents the project background;
- describes the machine history;
- explains the system operation.

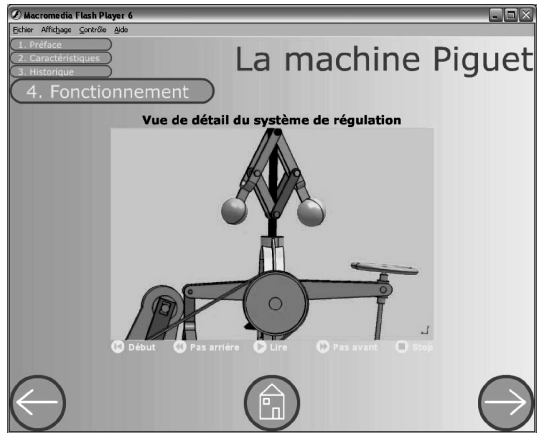
Moreover, we made experimentations in museum conditions but at the laboratory using a virtual reality room. Among a non-technical public, we have immersed them in the initial dynamic situation of use in order to determine how they fill the use of virtual reality technologies upon old machines.

In order to compare the added value of virtuality upon reality, the experience is a compound of:

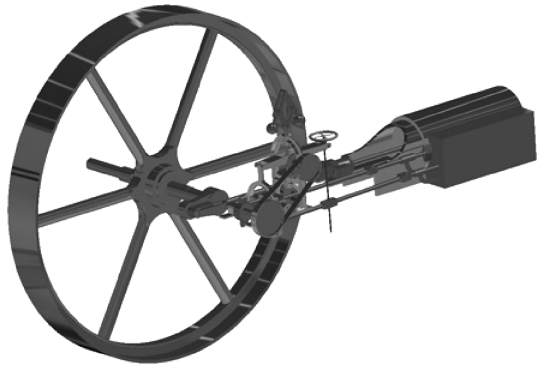
- a classical exposition with images, videos, textual explanations and a machine physically stored but not operating (for security reason),
- and a virtual room. Here, the same machine is presented but only virtually (Fig. 17). It is simulated by Catia V5 in real time with passive 3D vision. Visitors can manipulate the simulation in the space thanks to a 3D mouse.



**Fig. 16** Didactic Flash application of the steam engine



**Fig. 17** Steam engine with nearly true colors



The sample is between 10 to 70 years old. A real difference appears between young visitors and others regarding their feeling and their ability to use virtual reality technology: obviously, children feel it easy with the use of virtual interface as the 3D mouse. Globally, everybody agree to consider that the virtual can not replace physical machines. However, instead of a “dead” machine, manipulating a virtual simulated model can help:

- for the visitor to take the role of a worker on the machine,
- to understand the machine in operation as its components are moving,
- to see the complete plant,
- to go above, below and throughout the walls; which means view points that are not in the habit,
- to see part details by zooming; for example very small elements or normally hidden ones,
- to change colours, or make transparency or cross sections so as to highlight the different components.

However, virtuality is not ideal and some major issues remain: need avatars, can not be touched ...

#### 4.6 Knowledge Complements and Future Works

In this example, the Piguet steam engine history has been studied: it rules on it from its first use in 1898 until its dismantling and its storage in the Eco-Musée du Creusot-Montceau in 1994. Moreover, thanks to CAD software, a mechanical approach of the system has been designed and simulated.

However, next works will consist in contextualizing more precisely the machine over its multiple lives. A machine is designed, build and used for a determined goal; it is settled in a workshop and put in correlation with other machines in the factory (see Fig. 18). Studying this setting up and the links between machines and humans can reach to a restitution of the working situation model.

Later, thanks to virtual technologies, the global environment could be designed in order to analyze, simulate and correlate it with the historical hypothesis. Moreover, in the virtual model, it could be possible to attach knowledge & information by using the hypertext links: machine drawings, manufactory drawings, patents, images, sounds, videos ... The objective is to create and to structure data in

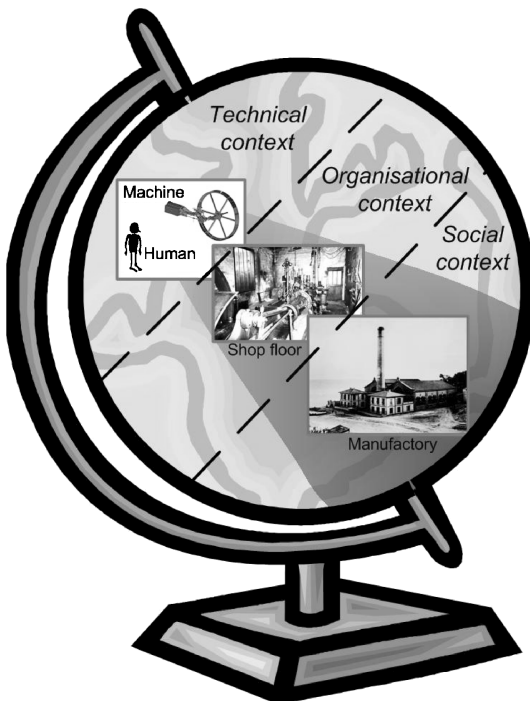


Fig. 18 The industrial plant fitting

an informational model that would be a representation of the machine in one or several considered periods. Obviously, all the informational levels described by Fig. 18 must be inquired and put in correlation together.

## 5 Conclusion

The global process given in this communication is the first one that merges two communities: Mechanical Engineering and Social Sciences. Actually, it represents a new investigation way for technical and scientific museums; it gives a new dimension for heritage allowing the use of Virtual Reality tools for other application cases than architecture ... The main and strong advantage of the method is that it gives a scientific accuracy to the produced images.

But, finding common vocabulary is not so easy and in addition, culture and heritage, practices differ from one country to another.

However, France would like to continue in this way: the idea of using engineer tools and methods for technical heritage and the proposal method have been found with open arms by few international scientific Museums.

The example given previously can be considered as a simple experimentation as the Ecomusée du Creusot is the French national site for old files and reports about steam engines and boilers. Indeed, the city of Le Creusot was the heart of the metallurgic industrial revolution during the two last centuries with the famous Schneider Company.

Recently, we made one other experimentation with a salt washing machine with firstly a laser digitalization. Moreover, instead of having 25 CAD components as for the Piguet steam engine, the machine includes approximately 550 CAD components and was a fully homemade machine leading to mechanism understanding but inducing a more difficult modeling.

Although it was not at all foreseen, the team noticed that all the analysed examples were from the 19th and 20th centuries. In fact, there is a real divergence and barrier when comparing the conservation and valorization methods before and after the 2nd industrial revolution. The question is what were the mechanisms used before the 19th century? It must be reminded that in the past, only natural energy was used such as water, wind, animals or humans; but nowadays, controlled energy is the basic with nuclear, gas, fuel, or even coal ... The transition corresponds to the period when industries have widely mechanized the factories; moreover, it must be noticed also that it is the time when the world fairs appeared. Concerning industrial heritage, capitalization tools have also to be customized to the knowledge and the concerned machines. Consequently, methods and tools commonly used in modern sciences and techniques must ensure their own role.

Thus, it is necessary to review the understanding methods for old technical objects as Jocelyn Jocelyn de Noblet illustrates it: "We are in 1910, a 70 years old engineer is visiting the Eiffel Tower in Paris with his young son. Taking into account the monument as an example, he explains him what is the material resistance, a mesh ...

Nowadays, the same engineer with his young son are visiting the Millau Bridge in France, but the engineer says to him: I would explain it to you when you will be older as it is a little bit complicated.” [8]

Knowledge Management is become a necessity for future generation ...

## References

1. Cotte M., Deniaud S. (2005) Possibilités offertes par les maquettes numériques aux actions de patrimoine scientifiques et techniques, *Revue Archéologie Industrielle en France*, n°46, 33–38
2. Rolland-Villemot B. (2001) Le traitement des collections industrielles et techniques, de la connaissance à la diffusion, *La lettre de l’OCIM* n°73, 13–18
3. Cotte M. (1995) Le fonds d’archives Seguin: aux origines de la révolution industrielle en France, PhD thesis, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
4. Ermine J.-L., Chaillot M., Bigeon P., Charreton B., Malavieille D. (1996) MKSM: Méthode pour la gestion des connaissances Ingénierie des systèmes d’information, AFCET, Editions Hermès, Vol. 4, n° 4, 236 p.
5. UNESCO (1972) Convention concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage, adopted by the General Conference at its seventeenth session, 15 p.
6. Dalbéra J.-P., Foulonneau M. (2003) Recherche et numérisation du patrimoine culturel, ICHIM, conference proceedings, 23 p.
7. Pillon D. (2005) Des hypothèses archéologiques, au travail d’archives e à la mise en scène virtuelle: la ville de Laval au Moyen-Age, OSTIC workshop, Institut de l’Homme et de la Technologie, France
8. de Noblet J. (2005) Patrimoine et avant-garde scientifique et technique au XXIème siècle, OSTIC workshop, Institut de l’Homme et de la Technologie, France
9. REMUS (1991) La muséologie des sciences et des techniques, REMUS, conference proceedings, ISBN 2-11-08753218-23
10. Rasse P. (1991) Communication et muséologie des techniques, REMUS, conference proceedings, ISBN 2-11-08753218-23
11. Bernard A., Hasan R. (2002) Working situation model as the base of life-cycle modeling of socio-technical production systems, CIRP Design Seminar, conference proceedings
12. Bougé P., Champin P.-A. (2002) Une représentation épisodique des connaissances pour l’assistance à la réutilisation en CAO, 13th French Knowledge Engineering Workshop, conference proceedings, 175–183
13. Flon E. (2005) Musée archéologique, paysage et contextualisation: la mise en scène des sites archéologiques, PhD thesis
14. Canadian Heritage Information Network (2004) Report Survey, [http://www.rcip.gc.ca/Francais/Membres/Rapports/MVC\\_Sondage\\_Visiteur\\_2004.pdf](http://www.rcip.gc.ca/Francais/Membres/Rapports/MVC_Sondage_Visiteur_2004.pdf)
15. Laroche F., Le Loch S. (2005) Culture technique et CAO par les machines anciennes, CETSIS, conference proceedings, 6 p.
16. Laroche F., Bernard A., Cotte M. (2006) Methodology for simulating ancient technical systems, *International Review of Numerical Engineering, 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
17. Van Houten F.J.A.M., Kimura F. (2000) The virtual maintenance system: a computer-based support tool for robust design, product monitoring, fault diagnosis and maintenance planning, *Manufacturing Technology, Annals of the CIRP*, 49/1, 91–94
18. Eversheim W., Schenke F.-B., Weber P. (2000) Virtual engineering for an integrated product and process development, CIRP Design Seminar, conference proceedings, 111–116
19. Réflexion, [www.archeologia.be](http://www.archeologia.be), web site seen the 01/05/2006



## LE MARIAGE DU CUIVRE ET DE LA VAPEUR, AU CŒUR DE LA PREMIÈRE RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

Maryse LASSALLE  
Corinne ARVIEU  
Florent LAROCHE

Le cuivre et la chaleur sont, par une relation aux débuts empiriques, unis de longue date. La cuisson dans des récipients en cuivre, ou le plus souvent en un alliage à base de cuivre, est d'usage dès l'âge du Bronze ; le développement de cette pratique est montré par l'abondance des représentations de chaudrons au Moyen Âge. Plus tard, entre la fin du XVIII<sup>e</sup> et le début du XIX<sup>e</sup> s., vont se construire les premières machines à vapeur: Ici le rôle de la chaudière est primordial : elle produit la vapeur sous pression nécessaire à la mise en mouvement du piston. Si les premières chaudières sont à faible pression, petit à petit les progrès technologiques sur les matériaux, les formes et les techniques d'assemblage permettent d'augmenter considérablement la force disponible résultant de l'utilisation de la vapeur à haute pression. Les machines développent des puissances sans cesse croissantes et bouleversent la vie de l'homme dans de nombreux domaines : transports, machines fixes pour l'industrie, à tel point que cette époque peut prendre le nom de révolution industrielle. Celle-ci se développe en parallèle dans plusieurs pays, principalement en Angleterre, en Amérique du Nord et en France. Nous présenterons ici des exemples de chaudières pour la plupart en France dans l'objectif d'étudier les relations entre cuivre et vapeur au XIX<sup>e</sup> s. Une partie de ces exemples sera traitée à travers les collections du musée des Arts et Métiers à Paris, d'autres à partir d'archives privées ou militaires. Avec un regard à la fois historique et technique, nous étudierons l'évolution des chaudières ainsi que celle de quelques techniques de mise en forme du cuivre et de ses alliages durant tout le XIX<sup>e</sup> s.

## LES PRÉMICES DE LA VAPEUR

### LA VAPEUR AU MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS

Découvrons tout d'abord l'histoire du musée des techniques situé dans le centre de Paris. Qui dit évolution des techniques dit bien sûr communication et transmission des informations. À l'automne 1794 l'abbé Henri Grégoire soumet à la Convention nationale un projet de grande envergure : "Il sera formé à Paris, sous le nom de Conservatoire des Arts et Métiers, [...] un dépôt de machines, modèles, outils, dessins, descriptions et livres dans tous les genres d'arts et métier". Quels sont les objectifs de cette institution nouvelle ? Fédérer les savoirs techniques pour "perfectionner l'industrie nationale" ; réunir une encyclopédie en trois dimensions qui servira de modèle, de référence et d'incitation aux inventeurs, chercheurs et citoyens curieux. Le futur établissement, selon le vœu de Grégoire, "sera le réservoir dont les canaux fertiliseront toute l'étendue de la France" (Mercier 2011). En mai 1802, les galeries des Arts et Métiers ouvrent enfin leurs portes, et le musée permet de découvrir une pièce maîtresse : la voiture à vapeur de Cugnot de 1770, équipée d'une chaudière rudimentaire en cuivre. Le musée comporte aussi des démonstrateurs et des maquettes qui expliquent aux visiteurs le fonctionnement des machines.

Puis l'institution s'ouvre plus largement à l'Europe, et l'église localisée dans le musée devient une véritable *église à vapeur*. À la fin du XIX<sup>e</sup> s., une autre pièce maîtresse est l'avion à vapeur de Clément Ader, équipé d'une chaudière comprenant de milliers de tubes à eau très fins. Que de changements en un siècle ! C'est à ce moment-là que la scénographie du musée est revue, et les pièces non exposées sont réunies dans les réserves situées en banlieue parisienne à Saint-Denis. Au XIX<sup>e</sup> s., le souci pédagogique du musée pour former des ingénieurs se traduit aussi par la formation d'un fonds de dessins techniques, appelé *Portefeuilles industriels*. Mais ces derniers précisent rarement la nature des matériaux utilisés. De plus, les nombreuses maquettes de chaudières conservées au musée des Arts et Métiers ne respectent pas toujours les matériaux de la machine originale. Avant de parcourir la période considérée, regardons rapidement quelques récipients à vapeur qui l'ont précédé, à travers le monde, représentés dans des originaux ou maquettes du musée.

### DE L'ANTIQUITÉ AU XVIII<sup>e</sup> S.

Le mathématicien grec Héron d'Alexandrie décrit une sphère contenant de la vapeur d'eau et pouvant tourner sur deux pivots grâce à deux tuyaux d'échappement coudés, connue aujourd'hui sous le nom d'*éolipyle* (fig. 57). Cet objet ne peut être exploité autrement que comme curiosité. Quinze siècles plus tard, un ingénieur français, Denis Papin (1647-1712), mène d'importantes recherches sur les pressions. Après des machines à faire le vide, Papin invente en 1679 le *digesteur* sorte d'autocuiseur

cylindrique à vapeur (fig. 58). La nouveauté est l'utilisation d'une soupape, en fonte, qui permet de contrôler la pression maximale. En 1690, il met au point une machine à vapeur, avec cylindre et piston, qui pourrait servir par exemple pour épuiser l'eau d'infiltration des mines (fig. 59). La vapeur est produite dans "une grosse vessie de cuivre que j'appelle retorte, à cause de la conformité avec l'instrument de chimie du même nom : elle a de 20 à 21 pouces de diamètre dans sa plus grande largeur et 26 pouces en sa hauteur" (Papin 1682).

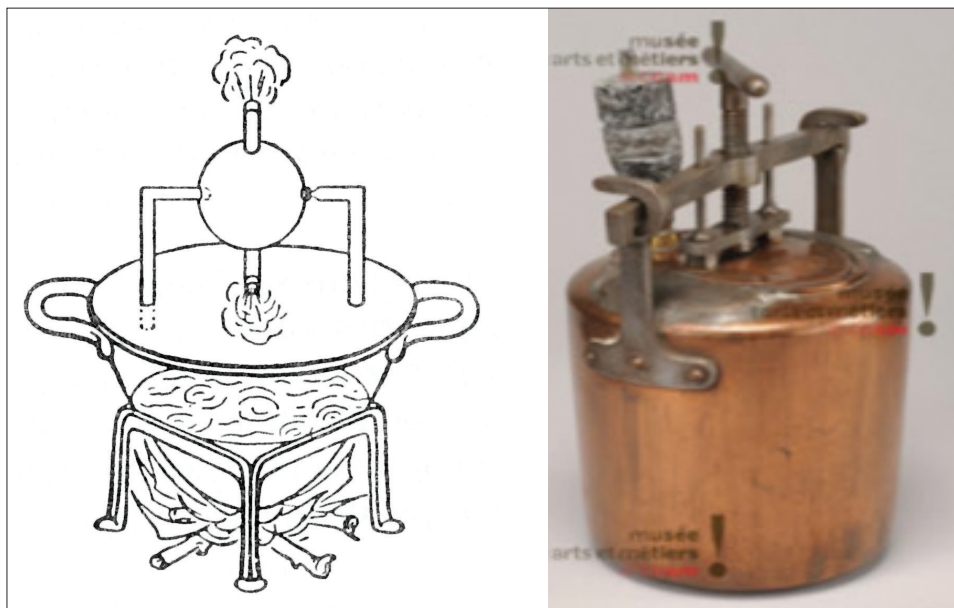


Fig. 57. Proposition de restitution de l'*éolipyle* de Héron d'Alexandrie, 1<sup>er</sup> s. p.C.  
(d'après : Lloyd 1974, 298).

Fig. 58. Le digesteur, avec une soupape de sécurité, de Denis Papin, 1679  
(cl. musée des Arts et Métiers).

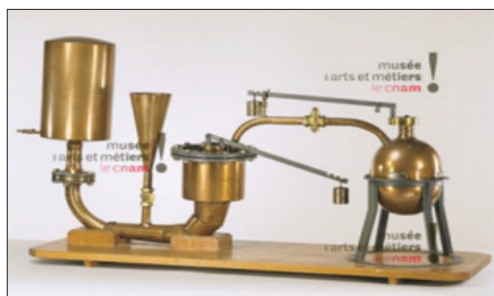


Fig. 59. Machine à pomper l'eau de Denis Papin, dont la chaudière est en cuivre, 1690  
(cl. musée des Arts et Métiers).



Venons-en à une pièce maîtresse du musée : le chariot à feu de Nicolas-Joseph Cugnot (1725-1804), précurseur du transport routier automobile. Premier véhicule terrestre motorisé, il est à vapeur, équipé d'une chaudière en cuivre martelé et riveté (fig. 60). Cette chaudière semble élémentaire : un simple récipient en cuivre contenant l'eau surmonte le foyer. Mais une innovation importante est l'utilisation d'une double enveloppe, permettant aux fumées de chauffer l'eau latéralement, ce qui augmente la surface de chauffe. On a ainsi un modèle précurseur des chaudières à tubes d'eau. Une description technique, reprise depuis le XVIII<sup>e</sup> s. d'ouvrages en ouvrages, témoigne de cette chaudière en *cuivre rouge* à double enveloppe : "À l'avant sont placés le foyer et la chaudière, suspendus au-dessus du sol par une forte ferrure dont l'extrémité de chaque bras épouse la forme du foyer. Celui-ci a la forme d'un tronc de cône à la partie inférieure et celle d'une calotte sphérique à la partie supérieure : il est en cuivre rouge. La chaudière, en forme de sphéroïde aplati est comprise entre le couvercle et le fond du foyer ; la flamme et les gaz circulent librement dans l'intervalle qui les sépare et s'échappent par deux petites cheminées rectangulaires. Un tuyau courbe part du sommet de la chaudière et conduit la vapeur au dispositif de distribution." (Dossier Cugnot 1956).



Fig. 60. Le Fardier de Nicolas Cugnot, 1771. La chaudière est une sphère à double enveloppe en tôles de cuivre rivetées (cl. musée des Arts et Métiers).

Par ailleurs, cette chaudière est encore de nos jours l'objet d'études. Pour bien connaître le modèle original, on se heurte à un double problème : les documents sources sont rares et incomplets et des restaurations successives ont modifié certaines parties. On notera entre autres une restauration technique très complète et nécessaire réalisée par des étudiants de l'Université de Technologie de Compiègne dans les années 1990. Aujourd'hui, on s'interroge par exemple sur la présence de traces d'argile à l'intérieur permettant peut-être une meilleure isolation thermique.

## LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

Tant les concepts que certains des moyens de fabrication mis en œuvre étaient insuffisants pour que les inventions présentées ci-dessus, de celle décrite par Héron d'Alexandrie à celle de Cugnot, puissent passer au stade de l'innovation, c'est-à-dire soient développées et prises en main dans le système technique de leur époque. Celui-ci est défini comme l'ensemble des cohérences qui existent à un moment donné entre les différentes techniques (Gille 1978, 25). Par contre, à partir de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> s., les compétences technologiques vont permettre d'exploiter les inventions liées à la vapeur et au cuivre. En Angleterre, une machine atmosphérique destinée également à l'exhaure (évacuation de l'eau) des mines, est construite par Thomas Newcomen en 1712. Un jet d'eau est envoyé dans le cylindre pour condenser la vapeur, ce qui crée une dépression sous le piston et contribue à sa descente. La voûte des chaudières employées par Newcomen était ordinairement faite de plomb et les parties inférieures en cuivre. Mais ces machines consomment beaucoup de charbon et endettent les mines qui les utilisent. En 1769, James Watt révolutionne les machines à vapeur avec l'usage d'un condenseur extérieur au cylindre, ceci permettant une baisse importante dans la consommation de combustible. Nous n'avons pas trouvé de renseignements sur les matériaux utilisés. Watt invente l'unité *cheval-vapeur* (correspondant aujourd'hui à 735,5 Watts et symbolisée par *Ch*) qui lui permet de convaincre les industriels et de commercialiser ses machines.

## LE CONTEXTE TECHNOLOGIQUE

Au cours de la première moitié du XIX<sup>e</sup> s., une industrie mécanique florissante se met en place ; de nouveaux moyens de fabrication se développent qui nécessitent la production de vapeur : le marteau-pilon par exemple. Les chaudières ont besoin de métaux, et pour extraire les minerais ou produire ces métaux à partir des minerais, on utilise aussi des machines à vapeur équipées de chaudières : "On peut affirmer que l'extraction de la houille a décuplé en Angleterre depuis l'invention des machines à feu. Il en est à peu près de même de l'extraction du cuivre, de l'étain et du fer" (Carnot 1824, 3, note 1).

Les recherches se structurent, avec trois objectifs constants : les inventeurs recherchent des améliorations permettant une augmentation de la puissance produite, avec des économies d'énergie et plus de sécurité. Une idée essentielle est de sortir du simple chaudron en ajoutant des tubes à l'intérieur; ce qui augmente la surface d'échange thermique et permet d'améliorer le rendement et ainsi d'économiser le combustible. La forme sphérique de l'enveloppe laisse alors la place au parallélépipède, puis au cylindre. Deux solutions sont privilégiées : des tubes à eau type serpentin ou un faisceau dans le foyer, ou bien des tubes de fumée plongés dans l'eau. De nouvelles technologies apparaissent, certaines mettront de nombreuses années à être adoptées et diffusées ; en 1790, l'américain Nathan Read a breveté un concept de chaudière tubulaire mais son

idée n'a pas été développée. On distingue les chaudières embarquées sur des véhicules par rapport aux chaudières fixes où le poids n'a pas de limite. Pour ces dernières, se développent des techniques de préchauffage à l'aide de bouilleurs (fig. 61) ; ceux-ci utilisent mieux la chaleur du foyer et préservent la chaudière des dépôts de *tartre* et des variations de température, permettant d'augmenter la puissance de vaporisation sans changer les dimensions de la chaudière (Bertin 1896). Une optimisation peut aussi être faite en sortie du cylindre : la vapeur, après un premier travail, est alors réutilisée dans d'autres cylindres à une pression inférieure.

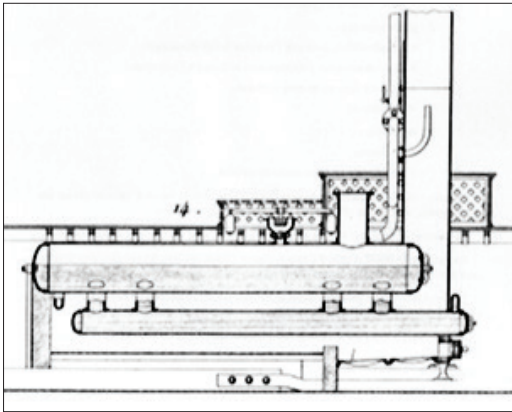


Fig. 61. Exemple de chaudière à bouilleur  
(d'après : Brisou 2003, t. 1, 320).

Pour fabriquer des chaudières, on utilise deux types de procédés : le moulage ou la chaudronnerie. Le corps peut être en fonte moulée, ou bien en tôles, de fer ou de cuivre, rivetées. L'utilisation de la fonte donne des générateurs lourds, ce qui constitue un handicap pour les machines mobiles. Se pose aussi le problème des explosions. À certaines époques, l'usage des chaudières et bouilleurs en fonte est interdit, car leur explosion "fait l'effet d'une bombe". Cette fonte moulée est décrite comme étant plus homogène que les tôles assemblées par des rivets. En cas de surpression, ces dernières peuvent être l'objet de déchirures progressives, ce qui évite l'éclatement brutal.

On choisit les matériaux pour leur compatibilité avec le milieu : par exemple, pour les chaudières des vaisseaux, le cuivre est préféré au fer pour ses qualités de résistance à la corrosion. En effet, la corrosion très rapide par oxydation des chaudières en fer conduit à d'importantes fuites, en particulier aux joints de couture et aux trous des rivets. Cela peut être évité en épaississant au préalable les zones sensibles à la *piqûration* (corrosion perforante), ou en changeant de matériau. Il ne fait nul doute que les très grands progrès de la navigation à vapeur n'auraient pas pu avoir lieu sans ceux de la métallurgie et de la conception. Dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> s., de nombreuses alternances dans les choix technologiques s'observent. Le fer, en général plus utilisé car moins cher, est aussi bien moins résistant et les chaudières doivent régulièrement

être changées. Cependant, la chaudière est souvent constituée de plusieurs types de matériaux : dans l'exemple de la locomotive Jackson (Armengaud & Armengaud 1839), la chaudière est un cylindre en fer, et les tubes de fumée initialement en cuivre ont été ensuite réalisés en laiton, puis en bronze.

Pour appréhender les évolutions, on peut se référer à l'ouvrage sur les métaux publié à la suite de l'*Exposition universelle* de 1878 qui contient des informations sur la fabrication et sur les alliages (Lebasteur 1878, 266-284). Les procédés de fabrication varient selon les usines à cuivre, et la supériorité des tubes les uns par rapport aux autres réside surtout dans la parfaite homogénéité de l'épaisseur du tube, et dans l'absence complète de *pailles* (inclusions non métalliques, d'oxyde de cuivre par exemple) ou tout autre défaut de surface, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur des tubes. C'est par des soins tout particuliers apportés à la fabrication que l'on arrive à réaliser ces conditions. En parallèle, les critères de classement des alliages de cuivre évoluent et se diversifient. Par exemple, M. Daix, fondeur à Saint-Quentin dans l'Aisne, classe les bronzes en catégories selon leur usage. Ainsi les classes 1 et 2 correspondent aux bronzes devant résister respectivement à la vapeur et à la pression. Simultanément, des travaux sur les compositions des alliages à base de cuivre sont développés, par exemple par ajout de phosphore ou de manganèse. Plusieurs années auparavant, le bronze phosphoreux avait déjà été présenté par M. de Ruoltz et de Fontenay, puis par la société Montefiore-Lévy et Compagnie, comme apte à être employé pour la fabrication des canons. Depuis, des sociétés se sont développées dans divers pays. Parmi elles, la *Phosphor-bronze Company* de Londres présente, à l'Exposition universelle de 1878, un nouvel alliage aux propriétés adaptables à son usage : "plus ductile que le cuivre, malléable comme le fer forgé ou encore dur comme l'acier". Ainsi, sa ductilité permet de réduire des plaques au cinquième de leur épaisseur par une seule passe de laminage à froid sans induire la moindre crique (amorce de fissure) sur les bords. Les propriétés de ces nouveaux alliages sont attribuées à la substitution partielle de l'étain par le zinc, en plus forte proportion.

Les techniques de transformation du fer et du cuivre et de ses alliages ne présentent pas la même évolution. Au xviii<sup>e</sup> s., on sait forger au martinet des tôles en fer, mais de la taille d'un mouchoir. L'usage du laminoir, qui a d'abord permis la production de feuilles de plomb, se développe à partir du xvii<sup>e</sup> s. Deux autres inventions vont permettre le développement de cette technique : le puddlage, procédé d'affinage de la fonte inventé en 1784 par Henry Cort, et la machine à vapeur pour obtenir plus de puissance. Equipés de cylindres, les laminoirs produiront alors différents profils : ronds, plats, cornières, profils en T, rails de chemins de fer... Avec des tôles issues du laminage, l'assemblage des chaudières devient plus aisé et permet des constructions robustes autorisant une augmentation de la pression de vapeur. Mais ce n'est que vers 1830 que les forges produisent des tôles de fer dont la surface est en rapport avec les exigences des chaudronniers. Œuvre de Brunel, le navire en fer *Great Britain*, long de 100 m est lancé en 1840 ; sa chaudière est fabriquée en tôles de fer : 3,2 m de long pour 0,85 m de large (Gay 1993). D'une fabrication délicate, le cylindre en fer est obtenu à partir de tôles roulées et biseautées sur les bords à joindre puis chauffées à blanc et soudées par forgeage à chaud. Des ateliers de chaudronnerie sont créés pour construire ces



nouvelles chaudières qui sont réalisées dans des tôles de 8 à 12 mm d'épaisseur. Le cintrage à l'aide d'une machine apparaît également, faisant passer la tôle entre trois cylindres pour ensuite riveter les bords entre eux. Puis l'acier Bessemer, obtenu par affinage de la fonte brute en 1855, change les habitudes des métallurgistes, exigeant de la fonte de qualité et de nouveaux savoirs. L'acier, plus résistant, permet de diminuer l'épaisseur des tôles, ce qui améliore le transfert de chaleur. Mais la tenue à la corrosion, essentielle, est mal connue pour les premiers aciers.

Venons-en aux technologies associées au cuivre. À la fin du XVIII<sup>e</sup> s., se sont développées les techniques de laminage, pour la production des plaques en cuivre utilisées pour le doublage des coques en bois des navires ; c'est le seul métal existant en feuilles suffisamment grandes pour permettre de réaliser des cuves de chaudières avec un minimum de joints, afin de limiter les risques de fuites. Citons la chaudière en cuivre du bateau américain *North River Steam Boat* construit par Fulton en 1803, plus communément appelé *Clermont*, qui comporte quatre gros tubes de fumée au sein de la masse d'eau et mesure 6 m de long, 2 m de large et 2,4 m de haut (Figuier 1867). D'autres constructeurs préfèrent pour les tubes des chaudières des alliages à base de cuivre comme le laiton. Ce dernier présente une meilleure résistance mécanique tout en conservant de bonnes propriétés de conductivité thermique. Lors du chômage des chaudières, il ne montre ni piqûre ni perçage, contrairement au fer ou à l'acier. On le trouve en fin de XIX<sup>e</sup> s. dans les Avions de Clément Ader, dans des bâtiments de guerre et dans les locomotives, pour les tubes de fumée.

Lors de la fabrication des chaudières, l'assemblage des pièces métalliques est essentiel. Parmi les différentes techniques utilisées, nous avons choisi d'insister sur deux exemples : le rivetage, pour l'assemblage des tôles ; le *dudgeonnage*, pour l'assemblage des tubes au corps de la chaudière.

#### ZOOM SUR DEUX TECHNIQUES D'ASSEMBLAGE

Le développement d'une ancienne technique va permettre aux chaudières de gagner en fiabilité et sécurité : c'est l'assemblage des tôles par rivetage (Jacomy 1990, 279-293). Le rivet, avec un corps cylindrique et une seule tête avant la frappe qui forme la seconde tête, est un objet déjà utilisé par les cultures de l'âge du Bronze. Ce procédé était employé par divers artisans pour l'assemblage de pièces dont les dimensions ne dépassaient pas quelques dizaines de centimètres. Cette technique prend un essor considérable ; elle est utilisée comme mode d'assemblage quasi unique durant le XIX<sup>e</sup> s. et une partie du XX<sup>e</sup> s. pour le chemin de fer, l'architecture métallique, la construction navale et les machines à vapeur. Elle se décline en différents modes, comme l'assemblage à clin (recouvrement) ou l'assemblage à couvre joint (bords jointifs). À partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> s., et au cours du XIX<sup>e</sup> s., la fabrication, le dimensionnement et les techniques de pose des rivets évoluent. La chaudronnerie lourde, en fer et en cuivre, joue un rôle capital.

Avec l'expansion de l'usage de machines à vapeur, les dimensions des rivets augmentent parallèlement au *timbre* des chaudières (la pression maximale autorisée), l'étanchéité étant, bien sûr, un impératif critique. Les nombreuses explosions de chaudières ont largement motivé les recherches sur les rivets et les techniques de rivetage. Le rivetage à chaud passe de l'atelier artisanal à la grande industrie. Les riveurs, nouvelle catégorie d'ouvriers, utilisent la même technique de rivetage au marteau à main que les artisans. L'opération de rivetage nécessite une équipe de 3 ouvriers : le chauffeur de rivet, le teneur de tas qui place et maintient le rivet dans le trou préparé, et le riveur, le plus expérimenté, qui frappe sur l'extrémité libre du rivet ainsi maintenu. Durant le XIX<sup>e</sup> s., l'accroissement de la puissance des machines à vapeur et le développement des fabrications en série vont entraîner la mécanisation de cette tâche répétitive.

Avec sa première machine mécanique à riveter, conçue en 1838 et améliorée en 1843, l'ingénieur William Fairbairn permet de découpler le nombre de rivets posés par rapport au rivetage manuel. En parallèle, les moyens de diffuser les connaissances scientifiques et techniques se multiplient. À l'*Exposition universelle* de Paris de 1844, les frères Schneider, du Creusot, présentent une riveteuse à vapeur. L'écrasement est commandé par l'ouvrier qui impose son rythme à la machine. À la même exposition, Lemaître présente une troisième machine. Bien qu'améliorées dans les années qui suivent, ces machines sont fixes et encombrantes et consomment beaucoup de vapeur. L'ingénieur anglais Tweddel permet de franchir une nouvelle étape en inventant en 1865 la riveuse hydraulique à accumulateur pour laquelle la vapeur est remplacée par de l'eau sous pression. La machine portable est née, maniable, adaptée aux besoins de l'époque, par exemple la construction de ponts. Les améliorations de la qualité des métaux permettent de développer des machines plus petites et plus maniables, souvent adaptées à un type d'assemblage, certaines étant spécialisées dans le rivetage des boîtes à fumée destinées aux chaudières. Le rivetage manuel opère par percussion alors que la machine à rivet entraîne un écrasement de la matière par pression, plus satisfaisante d'un point de vue métallurgique car la vitesse de déformation est moindre ; la riveuse hydraulique permet en outre d'atteindre des cadences allant jusqu'à 1200 rivets par heure, soit un toutes les 3 secondes.

Regardons maintenant un autre problème fondamental pour la chaudière : celui de l'assemblage des tubes avec les parois. Les tubes de fumée sont assemblés d'une part avec la paroi de la caisse à feu, d'autre part avec une plaque de tôle forte, formant le corps de la chaudière du côté de la boîte à fumée. Cet assemblage est réalisé au moyen de viroles pleines ou à clavettes (Jullien & Valerio 1872, 242-243). L'emmanchement des tubes dans les plaques de tôle constitue une des opérations les plus délicates de l'assemblage. En effet, il doit assurer une bonne tenue des tubes de chaudière, évitant des fuites préjudiciables, en particulier dans le cas de production de vapeur par un tirage à air forcé. De plus, les tubes souvent encrassés ou attaqués par des dépôts doivent être facilement démontables afin d'être nettoyés, puis repositionnables (*Le Génie Industriel* 1869 ; Jullien & Valerio 1872, 242).

Un autre exemple de fixation est le *dudgeonnage*, qui utilise un fixateur à rouleaux appelé *dudgeon*, inventé vers 1860 par un constructeur anglais, Richard Dudgeon (fig. 62). Cet outil permet d'assujettir la bague et le tube grâce à une forme réalisée dans la plaque du foyer. Par pression graduée, le *dudgeon* (mandrin conique) crée une expansion radiale du tube ; il élargit et fixe l'extrémité du tube dans le trou de la plaque, entraînant ainsi la déformation plastique du tube (Le Génie Industriel 1869). La présence de contraintes résiduelles permet le maintien d'une pression de contact entre le tube et la plaque, permettant ainsi d'assurer la liaison mécanique. Dans le cas de tubes en fer, une virole en *cuivre rouge* est placée entre l'extrémité des tubes et la plaque afin d'assurer l'étanchéité et la solidité des joints, lors du *dudgeonnage*, par la formation d'un bourrelet annulaire (Portefeuille économique des machines 1887). Depuis 1883, la Société des Forges et Chantiers de la Méditerranée emploie, à l'instigation de l'ingénieur Dupuy de Lôme, le *double dudgeonnage* : une double fraisure est réalisée intérieurement et extérieurement dans la plaque du foyer ; la bague ainsi que le tube sont emboutis suivant cette forme à l'aide du *dudgeon*. (Portefeuille économique des machines 1886). La direction du matériel de marine rend obligatoire cette technique pour les chaudières des torpilleurs, navires dont la marche nécessite des chauffes à grande puissance.

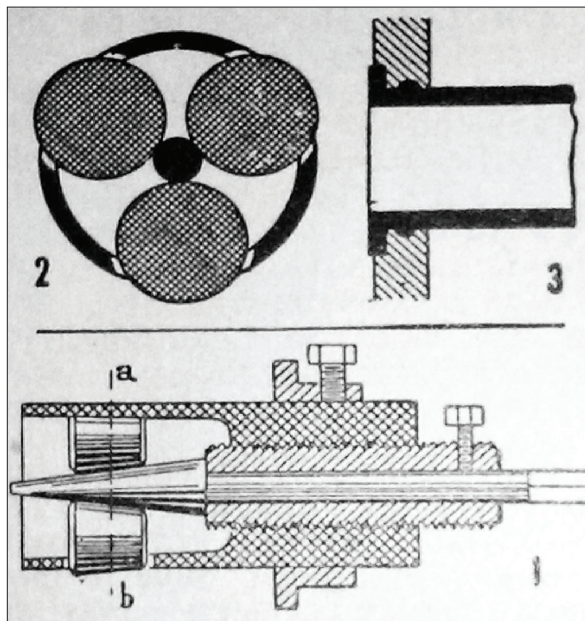


Fig. 62. Schéma de principe du *dudgeonnage*, technique d'assemblage inventée vers 1860 :

- 1 - coupe transversale du *dudgeon* : la broche conique agit sur des galets qui refoulent le métal du tube ;
- 2 - coupe suivant a-b des galets coniques ;
- 3 - résultat vue en coupe : le métal du tube a été refoulé dans les gorges de la plaque  
(Larousse du xx<sup>e</sup> siècle 1929, vol. 2, 986).



Le joint étanche est obtenu si le tube se déforme facilement mais il faut que la plaque soit suffisamment dure pour ne pas trop se déformer. Les propriétés du cuivre doivent donc être adaptées à l'assemblage par *dudgeonnage*. Des expériences sont alors menées sur le durcissement du cuivre par écrouissage. Ainsi Bullot, directeur de l'usine de Laveissière à Saint-Denis, montre que lorsque l'on écrouit au marteau la surface d'une plaque en cuivre, le durcissement se propage dans toute l'épaisseur du métal. D'autre part, contrairement aux idées admises à l'époque, il comprend que l'efficacité de l'écrouissage n'est pas simplement liée à l'intensité du martelage, c'est-à-dire que le durcissement du métal peut être suffisant, et plus homogène, avec un taux de déformation (réduction d'épaisseur) relativement faible (Lebasteur 1878, 266-284).

Le *mandrin Dudgeon* subit plusieurs perfectionnements par la suite, qui rendent son usage plus facile et plus rapide. Citons ceux de Caraman dont l'outil, qui porte des galets cylindriques disposés obliquement sur l'axe du trou, avance automatiquement durant le travail. De plus, dans l'épaisseur de la plaque, on réalise deux rainures circulaires dans lesquelles sont insérés deux anneaux en fil de laiton ou de maillechort, que le mandrinage incruste dans le métal du tube. Le *raboutage* en cuivre devient alors inutile (Bertin 1896, 185). Par ailleurs, Varall, Elwell et Poulot, concessionnaires du brevet de Dudgeon en France ont fileté la tête de la broche pour l'équiper d'un écrou grâce auquel, en se servant de deux clés, la broche pénètre sans frapper. La pose des tubes est alors possible rapidement et sans chocs, ce qui supprime le risque de fissures accidentelles. Les tubes peuvent aussi être réparés, même pour un navire en marche, et sans risque d'ébranlement pour les tubes voisins (Le Génie Industriel 1869).

Le cahier des charges pour la fabrication d'une chaudière dépend de son futur usage, or la vapeur va entrer dans de très nombreuses activités, et créer une révolution dans les transports et l'industrie. Quelques exemples vont maintenant nous donner un aperçu de cette période si riche en inventions.

#### TOUR D'HORIZON DES APPLICATIONS DE LA VAPEUR

Dans les années 1820, l'usage de la machine à vapeur se répand largement en France. Nous avons déjà cité des exemples de chaudières embarquées sur des navires. C'est ce domaine qui favorisera des innovations technologiques les plus importantes. Les machines marines sont le plus souvent fournies par l'Angleterre, et ceci poussera les Français à améliorer leurs savoir-faire pour éliminer cette contrainte et développer leurs propres matériels. Ces machines sont destinées à la navigation, sur les fleuves ou en Méditerranée, pour assurer par exemple la liaison entre la Corse et Toulon. Le chemin de fer, quant à lui, n'en est alors qu'à ses débuts. Schneider va ensuite révolutionner la vapeur sur rails en France en créant des machines capables d'assurer le transport par voies ferrées, avec les lignes Paris-Lyon-Marseille dès 1857. Dans le domaine des transports terrestres, les voitures à vapeur sont encore expérimentales : on notera, bien après le Fardier de Cugnot, l'importation de Bruxelles d'une voiture à vapeur qui sera essayée à Paris en 1834 (De Place 1981, 203-206). Pour les déplacements aériens, seuls

existent les aérostats, ballons libres naviguant au gré du vent. Un des rares engins volants motorisés est le dirigeable d'Henri Giffard, équipé d'une chaudière en fer : "Je n'emploie pour matériaux que la tôle ou le fer ; cependant les tubes et le foyer pourront être construits en cuivre ; je n'admets comme forme que le cylindre, le cône ou la sphère" (Giffard 1851, 15).

Aucun domaine n'est épargné par le souffle de la vapeur qui se propage à travers le siècle, et permet d'augmenter la productivité en minimisant la main d'œuvre. Dans les domaines agricoles et forestiers, de puissantes et massives locomobiles permettent divers travaux, produisant sur place l'énergie nécessaire par exemple pour le battage des céréales ou le sciage des bois en forêt. Dans le secteur de l'industrie, les machines à vapeur fixes sont destinées à équiper des unités de production très diverses : filatures, opérations sidérurgiques, sucreries, huileries, machines de découpe des marbres, compresseurs de réfrigération... La métallurgie se transforme, notamment avec l'usage de marteaux pilons à vapeur. En 1841 François Bourdon démontre l'utilité de ces puissants engins de forgeage au Creusot dans la fonderie Schneider. C'est la force de la vapeur qui, agissant sur le piston, soulève le marteau. En laissant la vapeur s'échapper, l'ensemble piston et marteau retombe et frappe la pièce avec une grande force. Trente-cinq ans plus tard, l'usine du Creusot construit un marteau-pilon de 80 tonnes, porté ensuite à 100 tonnes, qui joue aujourd'hui le rôle d'emblème pour la ville. L'énergie hydraulique qui met en action le martinet est remplacée par celle de la vapeur, ce qui décuple la puissance utilisable.

Dans la législation de la première moitié du XIX<sup>e</sup> s., les machines à vapeur étaient réparties en deux catégories : celle des bateaux, et celle regroupant machines fixes et premières locomotives. C'est cette répartition que nous utilisons pour la suite de ce texte qui va explorer les contributions de la vapeur à la *révolution industrielle* selon les différents domaines réclamant de l'énergie.

## LA VAPEUR POUR NAVIGUER

### PREMIERS BATEAUX À VAPEUR

Claude François Dorothée de Jouffroy d'Abbans, architecte naval, ingénieur, fait partie de ces inventeurs qui ont su rêver et consacrer leur vie à leur œuvre. Lieutenant au régiment de Bourbon-Infanterie, il est conduit, à la suite d'une altercation avec son colonel en 1772, au cachot des îles de Lérins. Depuis la lucarne de sa prison, un spectacle le frappe : des misérables condamnés rament péniblement sur les galères de guerre. Cette vision lui suggère l'idée de remplacer les forces humaines par un puissant moteur à vapeur. Libéré en 1774, il conçoit une machine atmosphérique à simple effet dont il équipe un bateau de 13 m de long. Mais sa mécanique est trop fragile. En 1782, il fait construire à Lyon un bateau long de 45,5 m, le *Pyroscaphe*, équipé d'une

machine à vapeur. Celui-ci navigue sur la Saône le 15 juillet 1783 durant 15 minutes (Michéa 2002). Malgré la foule réunie pour l'occasion, l'Académie des Sciences juge ce résultat insuffisant et aucun subside n'est accordé à Jouffroy d'Abbans, qui, par la suite, tentera de nombreuses expériences non fructueuses et mourra pauvre et ignoré. Son fils Achille François a cependant poursuivi ces recherches (de Jouffroy d'Abbans 1841).

Puis la navigation à vapeur se développe. Chacun y va de sa propre expérience dans le choix de la technologie des chaudières qui sont installées sur les navires. Même les capitaines de navire ont leur mot à dire. Les ordonnances et prescriptions des entreprises de fabrication ne donnent pas toutes la même *bonne ligne de conduite* à tenir (Rivet 1962). Les Américains possèdent déjà une forte expérience dans le domaine, comme en témoigne en 1820 l'ingénieur Marestier alors en mission d'information en Amérique pour le ministre de la Marine française : "Depuis plusieurs années, presque toutes les chaudières des bateaux destinés à naviguer dans des eaux salées ont été exécutées en cuivre. Il paroît prouvé que l'inconvénient d'une plus grande dépense et d'un plus grand poids est compensé par une plus grande durée et une plus grande sécurité. Le cuivre est, en général, plus ductile que le fer et moins susceptible de gerçures : le dépôt des eaux adhère peu au cuivre, tandis que, par son union à la rouille, il occasionne, en quelques années, la destruction des chaudières en fer" (Marestier 1824).

La pression des chaudières est le plus souvent de 1,3 à 1,7 atm. Certaines, alimentées en eau douce, fonctionnent à 10 atm, et sont considérées alors comme à haute pression. Elles sont formées de 1 à 4 cylindres en feuilles de cuivre rivées, de 1 m de diamètre et longs de plusieurs mètres, terminés par des fonds en bronze. Marestier dessine par exemple la chaudière du bateau *Le Fulton*, comprenant 4 tubes de fumée en cuivre au sein de la masse d'eau (fig. 63). Cette navigation à vapeur est utilisée à des fins privées pour divers transports, mais aussi pour des applications militaires (Gay 1999).

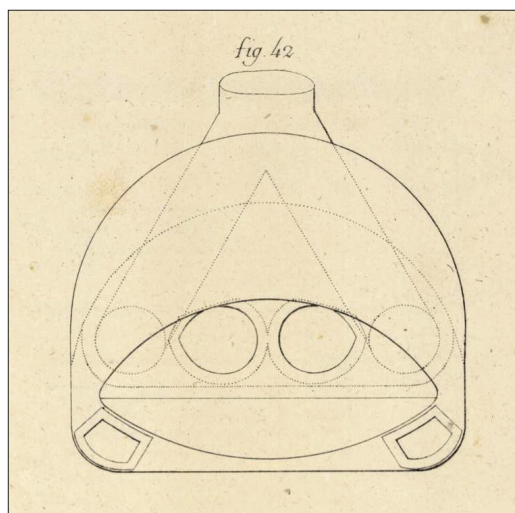


Fig. 63. Coupe de la chaudière du bateau à vapeur américain *Le Fulton*, 1822. Les 4 tubes de fumée en cuivre sont au sein de la masse d'eau (L : 6,1 m ; l : 2,7 m ; h : 2,4 m) (d'après : Marestier 1824, pl. IX, fig. 42).

LES CHAUDIÈRES DANS LA MARINE MILITAIRE FRANÇAISE AU XIX<sup>e</sup> S.

Traverser les océans implique de nouvelles contraintes, en particulier pour les chaudières qui peuvent utiliser de l'eau de mer. C'est ainsi que la Marine militaire française va lancer de nombreuses commandes auprès de différents fabricants pour l'amélioration des navires de guerre équipés de moteurs à vapeur. Le musée des Arts et Métiers possède de nombreuses maquettes, des bâtiments ou de leurs chaudières, en exposition ou dans les réserves. Citons celle du *D'Assas*, navire équipé de 20 canons, qui part de Brest le 20 janvier 1834 pour se rendre aux États-Unis d'Amérique. Entre les chaudières du type Fardier, celles des locomotives et celles de 15 tonnes des navires de la Marine, il y a bien sûr un changement d'échelle important, qui concerne aussi bien la taille et la puissance recherchée, que les investissements possibles dans les prototypes et essais, et la confidentialité des résultats.

Ces secrets sont maintenant accessibles dans les *Services Historiques de la Défense*, notamment à Lorient, Vincennes et Toulon. On y trouve des informations sur des chaudières de deux types : embarquées, pour les navires, ou fixes, pour actionner les outils des arsenaux (Brisou 2003). En 1818, deux navires à vapeur sont équipés de chaudières en fer. Mais celles-ci sont très vite dégradées et remplacées, dès 1822, par des chaudières en cuivre. L'année suivante, la Marine passe un marché avec le fabricant *Aitken et Steel*, dont l'usine est située à Ivry, pour deux générateurs de vapeur destinés à équiper des bateaux de la flottille du Sénégal (Delattre 1972). Ils sont composés de parties en cuivre et d'autres en fer, dont la cheminée. Le cuivre y occupe une part importante : 70 % de la masse totale des chaudières, qui avoisine 16 tonnes. Cette proportion augmente le prix des navires, donnant des chaudières trois fois plus chères que les générateurs en fer, ce qui est source de débat sur la nature du métal utilisé. Cependant, le ministre choisit le cuivre pour deux raisons : la durée de vie des appareils est trois fois plus élevée que celle des appareils en fer ; de plus, un des avantages du cuivre est qu'il conserve une valeur marchande élevée.

Les fabrications de chaudières se succèdent : en 1824, on utilise du cuivre laminé de 7 mm d'épaisseur, puis, pour avoir une production de vapeur suffisante, on multiplie les corps de chaudières dans lesquels des réseaux de tubes d'eau doivent supporter des pressions sans cesse en augmentation. Des accidents répétés dans les moyennes et hautes pressions font revenir à des chaudières à basse pression. En 1836, la question du choix du métal revient pour les bâtiments de la Marine française, et il est décidé que toutes les chaudières seront fabriquées en tôle de fer. Mais quatre ans plus tard un capitaine de vaisseau demande le retour au cuivre car la durée de vie du fer oblige à des changements plus fréquents. Il est alors décidé par le Ministre que les arsenaux de la Marine d'Indret, près de Nantes, fabriqueront des chaudières en cuivre.

Les puissances visées pour les moteurs animant les hélices des navires augmentent. Pour 160 Ch, un document précise un nombre de feuilles de cuivre à utiliser et on cherche des formes économisant le matériau, à cause de son coût. À titre d'exemple, en 1840 le bâtiment *Le Monge* a besoin d'une puissance de 440 Ch, et, pour



cela, est équipé de deux machines de 220 Ch. Des recherches sont également menées pour se prémunir de la corrosion galvanique (formation d'une pile par le contact de deux métaux ou alliages différents). Aux archives de la Marine à Toulon, une ordonnance ministérielle de 1845 précise que les chaudières doivent à nouveau être construites en fer, car elles coûtent moins cher que les chaudières en cuivre.

Mais cette fabrication en fer place les industriels français en concurrence avec les britanniques ; une lettre au préfet lui demande d'intervenir auprès des maîtres de forges pour accroître leurs compétences et moyens de production (SHMT-IGI-26). Cette démarche aboutit à une meilleure maîtrise de la conception industrielle, mise en œuvre notamment à Indret dès 1848 (Gay 1993). On constate une alternance des usages du fer, du cuivre et du laiton pour les tubes, chaque matériau présentant des avantages et inconvénients spécifiques. Par souci d'économie, mais en augmentant peut-être des risques, les épaisseurs sont fixées à 3,5 mm pour les tubes en fer de 70 à 90 mm de diamètre, et à 2,4 mm pour les mêmes en cuivre. Les durées de vie sont souvent jugées insuffisantes (SHMV-BB8-1130) ; un rapport de 1865 demande une étude à tous les ports. En moyenne, en quinze ans, un navire usait 2,5 jeux de chaudières, ce qui est considérable (SHMV-6DD1-17).

Regardons les choix faits plus tard, à la fin de XIX<sup>e</sup> s. (Bertin 1896). Dans les chaudières tubulaires, les tubes reçoivent les gaz chauds en sortie de la boîte à feu. Ils sont de petit diamètre, soit de 50 à 80 mm, et de grande longueur (plusieurs mètres). La nature du métal dépend aussi de l'utilisation de la chaudière. On rencontre plusieurs cas dans la marine. Pour les paquebots, ils peuvent être en cuivre mais sont généralement en fer, de 2,5 mm d'épaisseur, ou en acier, plus dur et plus raide, offrant la possibilité de les enlever lors d'un changement de machine et de réutiliser ceux qui sont encore en bon état. Il y a de grandes hésitations concernant les matériaux pour les tubes de chaudières des bâtiments de guerre, entre 1880 et 1893. À titre d'illustration, *Hoche* et *Marceau* ont des tubes en acier ; ceux de *Davoul*, *Cecille* et *Wattignier* sont en acier *raboté* de cuivre ; ceux d'*Isly* sont en laiton.

#### PETIT DÉTOUR PAR UNE EXPÉRIENCE MILITAIRE : LE CANOT D'INDRET (1861)

En 1631, Richelieu, alors ministre de Louis XIII, avait souhaité doter la France d'une puissance maritime capable de rivaliser avec celle de l'Angleterre. C'est ainsi, qu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> s. la France devint également une grande puissance navale, grâce à des arsenaux construits sur les ports de la Manche, de l'Atlantique et de la Méditerranée, ou sur des sites non côtiers tel celui de Nantes-Indret. Au cours des décennies suivantes, les différents choix stratégiques et politiques menés par les gouvernements successifs ont fait évoluer les choses<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Détachés de la Marine, les arsenaux sont aujourd'hui rattachés au ministère de la Défense ; ils sont devenus la société de droit privé DCNS (*Direction des Constructions Navales et Services*).

C'est sur ce site qu'a été créé en 2002 le *Pôle historique d'Indret*, avec pour mission de sauvegarder le patrimoine historique, industriel et bâti. L'ensemble de ces fonds est placé sous le contrôle du Conservateur des archives de la Marine de Lorient.

On trouve dans ces archives un ancien plan de grand format, à l'échelle 1:10, non daté, et sans indication des matériaux (fig. 64). Il s'agit du projet d'un canot à vapeur, de 10 m de long, destiné à la Marine française, comme en témoigne la dépêche ministérielle du 9 décembre 1860. On y trouve aussi le rapport de la commission du 28 août 1862, chargée des essais du canot ; ce bateau aurait donc été effectivement construit en 1861 ou 1862 et testé sur la Loire à titre de prototype. La chaudière, positionnée en son milieu, "...est formée de deux calottes surbaissées en tôle emboutie, réunies par des cornières rivées à plat ; sa forme est celle d'une lentille ; elle est posée sur un tirant en maçonnerie et n'a aucun tirant à l'intérieur. Un petit coffre à vapeur en bronze, est boulonné sur son ciel, et sert de porte de visite." (Pôle historique d'Indret 2008, 33). La sortie du foyer est connectée directement à la cheminée.

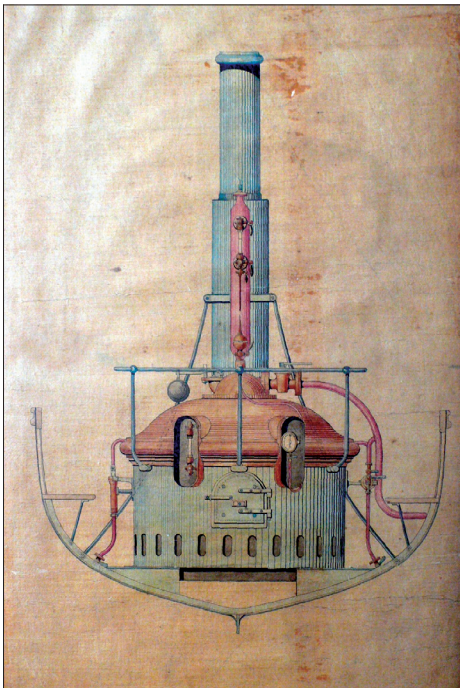


Fig. 64. Dessin du canot à vapeur *Indret*, 1861. La chaudière, d'un type ancien, est à bouilleur simple (d'après : Pôle Historique Indret 2008).

Mais, à la vue des croquis, des interrogations et des particularités peu communes pour une conception du XIX<sup>e</sup> s. apparaissent. C'est, entre autres, l'utilisation d'une chaudière de type bouilleur simple, c'est-à-dire sans tube intérieur, comme en témoigne la dépêche du 15 mai 1861 du ministre de la Marine approuvant les plans

de fabrication : "Bien que la chaudière proposée dans ce projet ait une forme inusitée, j'ai approuvé, à titre d'essai, le plan de M. Joëssel" (Joëssel 1862). Cette technologie n'est plus que brièvement évoquée dans les textes de l'époque. À cette période, les chaudières tubulaires sont préférées car plus performantes et surtout mieux sécurisées. De plus, le cartouche du plan fait mention d'une vitesse de rotation de l'hélice de 420 tours/minute ; valeur qui, considérant le profil de l'hélice dessinée, met en doute la réelle efficacité du bateau. En effet, une étude scientifique contemporaine d'archéologie industrielle a permis de modéliser les échanges thermiques et la machine à vapeur ; une maquette numérique du canot a été réalisée afin de valider les hypothèses (Laroche 2007). La présence de cette chaudière, simple et désuète pour son époque, semble une régression qui laisse penser que l'objectif de ce projet de canot était centré sur d'autres organes, dont l'hélice, et que la chaudière n'avait pas suscité de recherches et d'innovations particulières.

## INDUSTRIE ET AUTRES TRANSPORTS

### VAPEUR ET INDUSTRIE

Nous avons déjà évoqué le site de Nantes-Indret à deux reprises dans les paragraphes précédents. Faisons un tour d'horizon de l'histoire de cet établissement, pour nous intéresser aux diverses unités de production et à la révolution apportée par la vapeur.

Sur ce site, initialement dédié à la fabrication des navires essentiellement en bois, Antoine de Sardine, alors ministre de la Marine de Louis XVI, décide d'implanter en 1777, une fonderie royale de canons en fonte destinés à armer les navires. Située sur une île de la Loire, l'établissement utilisait un moulin à marée pour l'énergie nécessaire à la fabrication navale et en particulier pour l'alésage de canons ; il est bien évident que la maîtrise de la puissance fournie par le dispositif est fort délicate. En 1791 est installée une première machine à vapeur fixe pour les opérations d'usinage sur les canons : le temps de travail est alors divisé par trois. La fonderie est remplacée en 1827 par une manufacture de machines à vapeur, préalablement achetées aux anglais, alors beaucoup plus performants que les fabricants français. En 1840, un marteau pilon à vapeur de 1200 kg est installé (Pôle historique d'Indret 2008, 26). Les chaudières fabriquées sont de plus en plus perfectionnées, le plus souvent tubulaires.

Quittons Indret pour d'autres utilisations industrielles de la vapeur. Les évolutions technologiques, dictées par les besoins, permettent de faire varier la pression de la vapeur produite par la chaudière. L'utilisation des machines à vapeur se diversifie : métallurgie de transformation, mais aussi en amont, assèchement ou outils d'extraction dans les mines. On peut citer l'exemple des mines de cuivre en Cornouaille, où trois machines sont chacune alimentées en vapeur par six chaudières (*Bulletin de la Société*



*d'encouragement pour l'industrie nationale* 1823). En ce qui concerne les forges/fonderies, les machines à vapeur servent à animer les dispositifs de ventilation des fours pour activer la combustion, ainsi que les différents outils du type marteau-pilon. Une étude faite sur les chaudières (Percy 1867, 350-353) précise une spécificité : la chaleur des fours métallurgiques est en partie récupérée pour les chaudières. On y trouve l'exemple des 150 chaudières installées pour la nouvelle forge du Creusot. Parmi elles, une chaudière verticale, d'une hauteur de 13 m et de 1 m de diamètre, comportant deux tubes en cuivre, timbrée à 5 atm, dont la surface de chauffe est de 26,7 m<sup>2</sup> avec les gaz qui échappent entre 300 et 500°C, peut fournir la vapeur à une machine de 15 Ch ; cette valeur peut être doublée en portant la surface de chauffe à 40 m<sup>2</sup>. À Haut-Pré en Belgique, deux fours à réchauffer dont les chaudières ont une surface de 50 m<sup>2</sup> sont capables de fournir la vapeur à une machine de 140 Ch pour animer le laminoir.

#### LES PREMIÈRES LOCOMOTIVES

À la fin du XIX<sup>e</sup> s., les transports terrestres sur rails quadrillent les territoires par leurs voies ferrées où circulent des locomotives à vapeur chauffées principalement au charbon. En France, autour de 1825, les frères Seguin mettent au point plusieurs machines à chaudières tubulaires. Au musée des Arts et Métiers, à côté du Fardier de Cugnot, est exposée une maquette de la locomotive de 1829 qui exploite l'invention de la chaudière à tubes de fumées de Marc Seguin (Cotte 1996 et 1997). L'inventeur fait partie d'une famille, illustre par ses innovations techniques – il est le neveu de Joseph de Montgolfier – et la plupart des recherches sont menées dans la propriété familiale à Annonay dans l'Ardèche, avec ses frères, particulièrement avec son frère Paul. Marc et Paul Seguin étudient les machines à vapeur pour l'industrie et pour les transports fluviaux ou terrestres (fig. 65). Ils travaillent avec des artisans locaux ou anglais qui fournissent chaudières et machines, et expérimentent une machine de halage et un bateau. Mais ces chaudières à tubes de fumée sont en fonte, trop lourdes et encombrantes. Aussi les frères Seguin se lancent dans des recherches sur cet organe essentiel qu'est le générateur de vapeur. De nouveaux ateliers sont construits à Perrache, quartier de la ville de Lyon, et les essais de chaudière tubulaire en cuivre y ont lieu dès 1827 (fig. 66).

Intéressons-nous aux choix techniques des frères Seguin. Tout d'abord, le choix entre les deux systèmes, tubes à eau ou tubes de fumée, est guidé par le type d'application de la machine, et les pressions absolues recherchées. Les pressions de 3 à 4 atm sont appelées haute pression tandis que la machine de Watt classique, dite à basse pression, ne délivre pas plus de 1,5 atm. Les chaudières à tubes d'eau présentent des avantages et des inconvénients : elles sont de faible encombrement, plus légères, leur mise en pression est rapide et elles ont une bonne tolérance aux hautes pressions. Mais les tubes d'eau qu'elles contiennent gênent pour l'entretien du foyer. Leur masse relativement froide au sein de l'échappement des gaz de la combustion est une des causes de mauvais tirage. Concernant les matériaux pour les tubes des deux systèmes, les expériences menées dans différents pays montrent que le choix entre le fer et



Fig. 65. Locomotive à tender des frères Seguin, 1829 (cl. musée des Arts et Métiers).

Fig. 66. Chaudière des frères Seguin, 1827. Les 40 tubes à eau en laiton, brasés à l'étain, placés entre deux plaques de *cuivre rouge* représentent une surface de chauffe de 14 m<sup>2</sup> (cl. musée des Arts et Métiers).

le cuivre dépend non seulement de considérations techniques mais aussi – comme toujours – des savoir-faire locaux. Si les fabricants anglais ont de hautes compétences dans le travail du fer, c'est plutôt le cuivre qui paraît accessible aux frères Seguin car les procédés de transformation de ce matériau sont bien maîtrisés dans la vallée du Rhône. Le cuivre est cher mais la réalisation des tubes de faible diamètre en fer est plus difficile, ce qui favorise l'utilisation du cuivre. De plus ses qualités thermiques sont avantageuses pour une chaudière.

Plusieurs projets des frères Seguin alternent tubes à eau ou tubes de fumée, en cuivre ou en fer. Ils font tout d'abord réaliser une petite chaudière expérimentale à tubes d'eau par les artisans lyonnais Butillon et Forest, durant l'automne 1827. Le réservoir est cylindrique et traversé dans sa longueur par quarante petits tubes droits, parallèles et horizontaux (fig. 66). Ces tubes sont en laiton et fermés par une brasure à l'étain, puis montés entre deux plaques verticales circulaires, en cuivre épais, formant les fonds de la chaudière. Ils présentent une surface de chauffe d'environ 14 m<sup>2</sup>. Le poids de la chaudière est de 600 kg, pour une contenance d'environ 400 litres d'eau. Pour la locomotive de 1828 dont la maquette est au musée des Arts et Métiers, les frères Seguin reviennent au système de tubes de fumée mais plus nombreux et plus fins que ceux des chaudières initiales. Un système innovant permet le retour des gaz chauds de la combustion, grâce à un carter en tôle qui les fait tourner de 180° pour entrer dans les tubulures. Ceci permet d'éloigner des tubes les flammes du foyer et en éviter les coups de chaud si préjudiciables pour les brasures.

Les progrès sur les locomotives s'accroissent, notamment grâce à l'étude des machines de divers pays, par exemple les machines anglaises, étudiées par un ingénieur français (Armengaud & Armengaud 1839). Il cite le laiton et le bronze comme matériaux pour les tubes initialement réalisés en cuivre. Les tubes en bronze durent 5 à 6 fois plus longtemps que ceux en cuivre et sont employés de préférence pour les locomotives ; ils sont cependant plus onéreux encore car l'étain coûte toujours bien plus cher que le cuivre et le zinc.

## LES LOCOMOTIVES À L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1878

Quarante ans plus tard, le chemin de fer et son industrie ont tissé leurs réseaux dans toutes les régions et connaissent des développements considérables. L'*Exposition universelle* de 1878 nous apprend que le cuivre et ses alliages sont principalement utilisés pour la construction des foyers de locomotives. Le cuivre dit *rouge* constitue les plaques de foyers et les entretoises qui joignent les foyers aux enveloppes. Il est aussi utilisé pour le tuyautage des machines et la couverture des voitures de première classe. Le laiton est choisi pour les tubes à fumée des locomotives et les garnitures de voitures. Le bronze est employé pour différentes pièces de robinetterie et des coussinets ; ceci car ces pièces sont produites par fonderie et, de plus, les alliages des coussinets sont en général des alliages ternaires, des bronzes chargés en plomb et donc non déformables (Lebasteur 1878, 266).

Depuis les locomotives à grande vitesse, avec leurs longs foyers, les dimensions des plaques de cuivre pour le foyer ont fortement augmenté, en particulier celles de la plaque d'enveloppe. Les difficultés de laminage sont accrues, les surfaces devant être bien lisses, sans paille, soufflure ou défaut qui seraient des points faibles pour la résistance mécanique et le lieu d'une oxydation prématurée ; cependant, la société Laveissière lamine couramment des plaques de 3,30 m de largeur. Le cahier des charges de la Compagnie des Chemins de fer Paris-Lyon-Méditerranée (PLM) exige notamment que la croûte superficielle des lingots, due au retrait de leur surface libre, soit éliminée avant laminage ; cette opération d'*écrouissage* est désormais banale (Lebasteur 1878, 268). Pour les plaques de foyer qui assujettissent les tubes, les propriétés du cuivre sont bien adaptées à l'assemblage par *dudgeonnage*, présenté précédemment.

En cette fin de XIX<sup>e</sup> s., la fabrication pour les locomotives des tuyaux en cuivre ou en laiton est alors parfaitement maîtrisée, par des passes d'extrusion successives à la presse hydraulique. Citons la *Broughton Copper Company* de Manchester qui a développé un procédé de production de lingots très homogènes, par compression du cuivre fluide, permettant par la suite, après transformation, d'obtenir des tuyaux d'une homogénéité remarquable. Les tubes de fumée en laiton titrent généralement 30 % de zinc. Leur fabrication ne pose pas de réelle difficulté, mais nécessite un soin particulier pour obtenir une parfaite homogénéité de l'épaisseur du tube. Il existe cependant des tubes d'épaisseur variable : celle-ci est augmentée aux deux extrémités afin de favoriser l'étanchéité des joints lors de l'emmanchement dans les plaques tubulaires ; l'épaisseur plus faible dans le reste du tube conduit à des gains de poids et de coût. La fabrication de barres rondes pour entretoises présente aussi des difficultés. Là encore, la barre, qui sera ensuite filetée doit être homogène. Cela nécessite, outre des précautions relatives à la coulée du lingot, des précautions particulières lors des opérations de laminage à chaud puis d'étirage à froid pour la fabrication de la barre, notamment sur la réduction du diamètre (Lebasteur 1878, 272).

## LA VAPEUR POUR VOLER

Le musée des Arts et Métiers expose une pièce maîtresse : l'*Avion 3* de Clément Ader de 1897 (fig. 67). La prouesse technologique – un moteur à vapeur avec de l'eau, chauffée par la combustion d'alcool, est en circuit fermé – ne sera pas reprise sur d'autres *Avions* de ce type, car les moteurs à combustion interne vont très rapidement supplanter les moteurs à vapeur.

Auparavant, à partir de 1850, les recherches sur les machines pour voler se sont multipliées, et commence alors la concurrence entre deux systèmes : les aérostats, ou *plus légers que l'air*, et les aérodynes *plus lourds que l'air*. L'ingénieur Henri Giffard conçoit en 1852 un premier dirigeable motorisé, avec un moteur à vapeur de 3 Ch. La chaudière comporte un tube de fumée central, en fer de 2 mm d'épaisseur, mais les tuyaux amenant la vapeur sont en cuivre (Giffard 1851). Un premier aéroplane à vapeur est présenté par l'anglais William Henson.

En France, dix ans plus tard, Félix du Temple fabrique un modèle réduit d'aéroplane à vapeur et à hélice de 700 g, puis il se lance dans des recherches pour un avion à l'échelle 1. Il faut alléger considérablement le poids de la chaudière pour parvenir à embarquer une machine à vapeur. Le 28 avril 1876, soit près de vingt ans après son premier brevet de 1857, il récidive en déposant "une demande pour une chaudière à vapeur à circulation rapide donnant la plus grande surface de chauffe possible sous le plus petit volume et le moindre poids" (*Reflets de Tourlaville* 2005). Cet inventeur est à l'origine du système qu'adoptera Ader et qui s'approche des générateurs à vaporisation instantanée : une chaudière légère, de faible encombrement, constituée de tubes à eau très fins, de 6 mm de diamètre extérieur, en cuivre ou en alliage à base de cuivre, pouvant tenir des pressions de plusieurs dizaines d'atmosphères. Ses recherches finissent par un prototype de 12 m d'envergure : si cet avion n'a pas de succès, la chaudière est par contre commercialisée notamment auprès de la Marine française.

Ce sont aussi des recherches nouvelles dans le domaine militaire. L'Armée française finance les projets de Clément Ader qui conçoit des avions à vapeur aux chaudières légères, multi-tubulaires, utilisant comme combustible de l'alcool vaporisé. Chacun des 44 panneaux d'échange thermique est composé d'une double rangée de 62 tubes à eau séparés par une feuille de cuivre ondulée sur lequel les tubes sont ligaturés. Ces tubes mesurent 1,8 mm de diamètre extérieur et environ 1 mm de diamètre intérieur. L'épaisseur de leur paroi est donc de 3 à 4 dixièmes de millimètre. Ils sont brasés à leurs extrémités sur des tubes collecteurs intermédiaires, eux-mêmes raccordés à deux plus gros collecteurs, un inférieur et un supérieur. La surface de chauffe est de 17 m<sup>2</sup>, composée au total de 5456 tubes pouvant supporter une pression de 100 atm. À l'origine d'une commande spécifique de l'armée française, l'*Avion 3* vole en 1897. Il peut embarquer deux passagers et 400 kg de matériel. Avec ses deux moteurs de 40 Ch tournant à 400 tours par minute, Clément Ader a réalisé de réelles innovations pour l'époque : utilisation d'un fluide caloporteur, d'un condenseur de taille conséquente, soit deux fois plus petit que la chaudière, en maillechort (alliage de cuivre, de zinc et



de nickel). Pour mémoire, on se souviendra que cent ans après, la *Direction Générale de l'Armement (DGA)* a fait remettre en fonctionnement le moteur à vapeur de l'*Avion 3*. Les essais ont alors permis de valider l'hypothèse de Clément Ader : une puissance de 20 Ch est obtenue avec une vitesse de rotation de 250 tours/minute et une pression de vapeur d'entrée machine de 11,75 atm (Lissarague 1990).

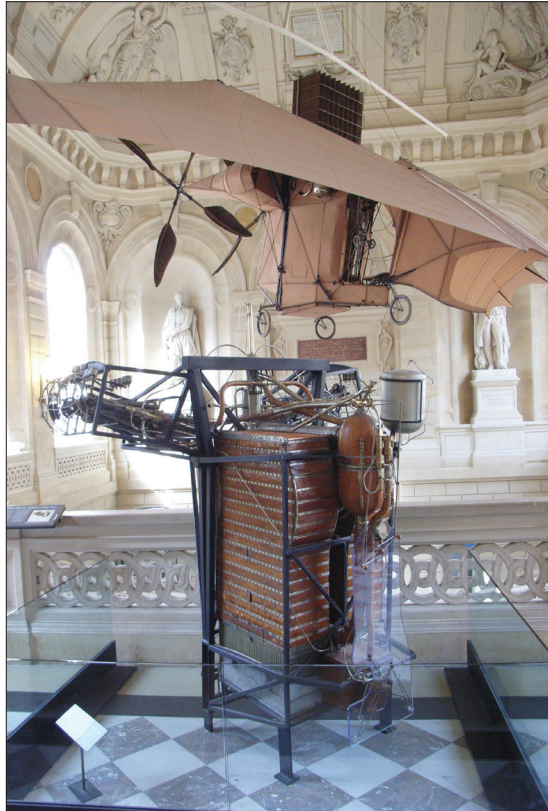


Fig. 67. L'Avion 3 de Clément Ader, 1897. Au premier plan la chaudière avec 5456 tubes en alliage à base de cuivre. Le diamètre extérieur des tubes est de 1,8 mm (pour une épaisseur de 0,3 à 0,4 mm) conduit à une surface de chauffe de 17 m<sup>2</sup> (modèle original du musée des Arts et Métiers ; cl. M. Lassalle).

Tous ces progrès technologiques dans les différentes applications de la vapeur ne se sont pas faits sans de nombreux essais, et parfois des accidents. La sécurité est un maillon primordial de la Révolution industrielle, et passe par la nécessité de contrôles par l'État ou par des organismes privés, le tout encadré par une législation qui évolue selon les époques.

## RISQUES ET SÉCURITÉ

Les explosions de chaudières font partie de l'histoire des techniques. Grâce à la méthode *essais-erreurs* il a été possible de comprendre le fonctionnement de la vapeur et d'apprendre à la maîtriser. Cependant les accidents se multiplient, et apparaît la nécessité de mettre des normes et de contrôler les machines. Les premiers ont de multiples causes : la mauvaise qualité des matériaux utilisés, les défauts de fabrication dus à une construction peu soignée ou des négligences en service. Pourtant, il est possible de limiter ces accidents : Denis Papin avait inventé – dès 1707 – la soupape de sûreté qui s'ouvre en cas de surpression.

### EXEMPLES D'EXPLOSIONS ET ÉVOLUTION DES ACCIDENTS

Voici deux cas d'explosion survenus dans le port de Cherbourg. Tout d'abord un accident en 1833 sur un remorqueur. Un des petits bouilleurs explosa et projeta subitement toute l'eau des chaudières dans l'intérieur du bateau. Bien heureusement, les mécaniciens eurent assez de présence d'esprit pour descendre dans la chambre de la machine et vider les foyers de tout le charbon enflammé qu'ils contenaient encore. La cause de l'accident venait du petit bouilleur du foyer de tribord qui avait été détérioré par la corrosion d'une bride en fer forgé en contact avec une pièce en cuivre (*Archives du port de Cherbourg* 1K2-15). Ainsi dans le rapport, la machine de ce bateau est considérée comme efficace, en revanche un manque de qualité est reproché. Les accidents survenaient aussi aux chaudières fixes. Citons l'exemple d'une autre explosion en 1843 ; celle d'une chaudière en cuivre, l'une des quatre affectées aux deux machines de 12 Ch construites par Cavé (*Archives du port de Cherbourg* BB8-1117). Celles-ci étaient utilisées depuis six mois pour divers travaux dont l'épuisement de ce bassin et l'élévation des déblais. On avait alimenté la chaudière pendant quinze jours avec de l'eau salée.

Vers la fin du XIX<sup>e</sup> s., les progrès techniques et l'évolution des réglementations font que le nombre de morts dus à la vapeur diminue très sensiblement. Le ministère des Travaux publics publie le nombre moyen de personnes tuées dans les accidents d'appareils à vapeur (tabl. 7). Ce risque devient inférieur à celui d'un grand nombre d'autres travaux industriels mais il aura fallu près d'un siècle pour parvenir à un contrôle satisfaisant.

Années	1881-1885	1886-1890	1891-1895	1896-1900
Nombre de morts	3,7	2,6	1,9	1,6

Tabl. 7. Nombre des morts par accident, par an, pour 10 000 appareils à vapeur (source : *Exposition universelle de 1900* 1906).



## PREMIÈRES RÈGLEMENTATIONS

Au début du XIX<sup>e</sup> s., la *révolution industrielle* se poursuit, avec la multiplication d'établissements apportant de nouvelles nuisances : en plus d'émanations d'odeurs, les dangers de feu ou d'explosions augmentent. La vapeur, au départ limitée aux pompes à eau dans les mines, apparaît comme vecteur d'énergie pour animer des machines ; elle est produite dans des chaudières à bois ou plus souvent à charbon. La fumée des cheminées noircit le ciel, des accidents endeuillent le milieu ouvrier mais aussi les habitations proches. C'est sous Napoléon I<sup>er</sup> que l'État commence à réglementer ces utilisations ; un décret impérial du 15 octobre 1810, sur les établissements et leur insalubrité, les répartit en trois classes, de la moins à la plus contraignante. Ce décret très important précise différents points : demande d'autorisation pour création, contraintes d'emplacement, instauration de contrôles. La liste précisant les établissements de 2<sup>e</sup> classe contient le terme *pompes à feu*, qui désigne de façon encore archaïque les nouvelles machines à vapeur et leurs chaudières. Puis la France connaît un virage politique avec la paix revenue et la *Restauration* : le roi Louis XVIII signe le 14 janvier 1815 un nouveau décret pour mieux contrôler le développement industriel.

Des précisions importantes apparaissent ensuite dans l'ordonnance du 25 mai 1828 (*Bulletin des lois* 1828), concernant les *machines à haute pression*, c'est-à-dire où la vapeur est à plus de 2 atm. Les chaudières doivent subir une épreuve sous une pression égale à 5 fois celle qui sera habituelle et déclarée par le propriétaire dans la demande d'installation. Elles devront être équipées de deux soupapes, et deux rondelles fusibles en un alliage choisi selon la température voulue pour la fusion. En ce qui concerne les matériaux utilisés, un contrôle de l'épaisseur des tôles est rendu obligatoire, selon le diamètre de la chaudière, entre 50 et 100 cm, et la pression de la vapeur, entre 2 et 8 atm (tabl. 8). Le mot *tôle* désigne deux métaux : le fer ou le cuivre ; la consigne est la même !

Diamètre (cm)	Pression (atm)	Épaisseur (mm)
50	2	3,9
50	8	9,3
100	2	4,8
100	8	15,6

Tabl. 8. Prescriptions extraites de l'ordonnance du 25 mai 1828 (*Bulletin des lois* 1828).

Ces valeurs sont issues de nombreuses expériences, de même que celles inscrites dans un autre tableau reliant la pression et la température de la vapeur. Les recherches sur les machines à vapeur, pour la sécurité et le rendement, font progresser des sciences, dont la thermodynamique et l'étude de la résistance des matériaux.

## ORDONNANCES ET ACCIDENTS

D'autres ordonnances se succèdent (1829, 1830, 1837, 1842) précisant les mesures spécifiques selon le type de chaudière à basse ou haute pression, en fonte ou en tôle, et la nécessité d'un contrôle avant l'installation (*Annales maritimes et coloniales* 1843 ; *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* 1844). Les décrets français sont repris à l'étranger, et parfois annotés. C'est le cas d'une ordonnance ministérielle belge du 24 juin 1838 qui précise les contraintes selon les matériaux. Il est regretté que la table française donnant les épaisseurs des tôles ne fasse pas de distinction entre les épaisseurs à donner aux chaudières en tôle de fer, ou en tôle de cuivre. La résistance mécanique du laiton, alors appelé *cuivre jaune*, est jugée inférieure d'au moins un tiers à celle de la tôle en fer, et celle du cuivre est estimée à la moitié de celle du fer. Aussi, malgré la marge assez large respectée pour établir cette table, son application pour le cuivre paraît incertaine au niveau sécurité (Tack 1839, 19).

Les accidents ainsi que les machines se multiplient ; les données des procès-verbaux sont regroupées dans des tableaux dans les *Annales des Mines* (1823-1828). À partir d'une étude analysant les 41 accidents de chaudières terrestres survenus entre 1827 et 1848 (Fressoz 2009, 542), on peut noter que trois sont en fonte, une en cuivre, les autres en tôle d'un matériau non précisé. Dans les causes, il est souvent question de problèmes liés aux métaux employés, comme une épaisseur insuffisante ou la propagation de fissures. L'ordonnance du 22 mai 1843 apporte d'autres précisions et contraintes, distinguant les machines hors bateaux de celles amenées à naviguer. On y découvre tous les détails des contrôles : qui les fait, quand et comment. Un *timbre* est posé sur la chaudière vérifiée, plaque de cuivre précisant le nombre d'atmosphères de la pression habituelle de la vapeur qui y sera produite.

L'épaisseur maximale autorisée pour les tôles est fixée à 15 mm. Pour garder une production de vapeur élevée, le constructeur devra fournir plusieurs chaudières. Est également précisé le facteur de sécurité pour la pression d'épreuve selon type de chaudière : en général c'est 3 fois la pression habituelle, mais 2 fois pour les chaudières tubulaires avec un très grand nombre de tubes de petit diamètre type locomotive et locomobile, et 5 fois pour les chaudières en fonte. Toutes ces contraintes entraînent plus de sécurité et moins d'accidents, mais ne font pas le bonheur des industriels, et ce règlement devra s'assouplir sous leur... pression.

## L'ASSOULISSEMENT DES RÈGLES

Le 25 janvier 1865, un nouveau décret révisé les textes en vigueur depuis plus de vingt ans, dans le but de "dégager l'industrie d'entraves devenues inutiles". C'est l'abolition des règles qui servaient à déterminer les épaisseurs de tôles des chaudières en fonction de leur diamètre et de leur pression. Une concurrence entre fabricants se développe et ceux-ci réduisent les épaisseurs à l'extrême. Les explosions augmentent de nouveau, et, quinze ans plus tard, c'est un retour à plus de contraintes avec le décret

du 30 avril 1880. On y note par exemple que les récipients à vapeur de 100 litres, précédemment omis, sont maintenant à contrôler. Tous ces contrôles demandent beaucoup de personnels, particulièrement des ingénieurs des mines, et le gouvernement va progressivement donner cette responsabilité à des associations d'industriels. Le décret de 1880 prend en compte des APAV – *Associations de Propriétaires d'Appareils à Vapeur* – rapidement reconnues d'utilité publique dans le nord de la France. Nous allons maintenant nous intéresser à ces structures régionales.

#### LES ASSOCIATIONS DE PROPRIÉTAIRES D'APPAREILS À VAPEUR

Les associations françaises se sont créées en parallèle à celles d'autres pays (*Exposition universelle de 1900* 1906). Les industriels anglais se regroupent dans la *Manchester Steam Users Association* en 1855, puis la *Boiler Insurance and Team Power C°* en 1859. Les Italiens et les Autrichiens s'organisent eux aussi dans cette recherche d'une maîtrise de la technologie vapeur. Puis la réglementation des différents pays s'uniformisera petit à petit. En 1901, l'*Association des ingénieurs allemands* établit les règles internationales de Wurtzbourg, pour le choix des matériaux dans la fabrication des chaudières.

En France, ce sont des industriels de Mulhouse qui créent la première association d'usagers chargée d'assurer la sécurité des appareils à vapeur, association reconnue d'utilité publique par une ordonnance dès 1832. À noter que celle-ci a contrôlé des chaudières fabriquées par Seguin (Saint-Marc 1999, 12). Au niveau national, il est question de plusieurs bureaux locaux indépendants les uns des autres, premiers organismes patronaux de lutte contre les accidents dans les entreprises industrielles, qui constituent un réseau national puis européen. Ainsi, en 1876, est créé dans la région lyonnaise une association similaire ayant pour intitulé : *Association Lyonnaise des Propriétaires d'Appareils à Vapeur* ; c'est une association à but non lucratif qui est reconnue d'utilité publique en mai 1886. Le rayon d'action de l'*Association Lyonnaise* s'étend à plus de 20 départements : de la Savoie à la Haute-Loire en passant par le Puy-de-Dôme et la Côte-d'Or. Elle est composée de neuf membres permanents. Entre 1867 et 1892, sont créées 11 APAV recouvrant le territoire français, leur rôle étant de prévenir les accidents mais aussi de faire réaliser des économies de combustibles, essentiellement du charbon, donc de mieux produire et utiliser la vapeur. Ces mêmes associations, en 1922, regroupent environ 8 600 adhérents et 45 000 machines à vapeur (Saint-Marc 1999).

## VAPEUR ET ÉLECTRICITÉ AU XX<sup>e</sup> S.

### DES APAV À L'APAVE

À partir des années 1880, la production et l'usage de l'électricité commencent à se répandre. La production se fait localement, avec des machines à vapeur. Citons par exemple l'adhésion de la *Société d'éclairage par le gaz et l'électricité de Biarritz*, qui adhère à l'APAV du Sud-Ouest le 25 février 1895 pour les deux chaudières de la station centrale d'électricité de Biarritz (Saint-Marc 1999). La *fée électrique* éclaire les villes – en utilisant beaucoup de cuivre – mais présente de nouveaux dangers. En 1896, l'APAV lyonnaise se dote d'un service électrique, car cette région produit de l'électricité par la force de l'eau des montagnes. Pour l'APAV du Sud-Ouest, c'est en 1910 qu'est créé un nouveau service, indépendant de celui de la vapeur, pour le *contrôle électrique*. C'est la naissance des APAVE, *Associations des Propriétaires d'Appareils à Vapeur et Électriques*, encore existantes aujourd'hui.

Garantes du bon fonctionnement des infrastructures industrielles, les APAVE possèdent deux services : un service vapeur et un service électrique. Le service vapeur de l'association a pour but de prévenir des accidents et des explosions d'appareils à vapeur et de promouvoir la réalisation d'économies dans la production et l'emploi de la vapeur. Ainsi, depuis 1927, ces associations sont agréées pour effectuer les visites et les épreuves réglementaires d'appareils à vapeur à la place de l'administration des Mines. Par ses contrôles, le service électrique a pour but d'éviter les risques graves d'incendie et les accidents de personne. Il informe et assure un suivi de la mise aux normes électriques des installations industrielles en conformité avec la réglementation. Les industriels adhérant à l'association s'assurent ainsi d'un suivi régulier de leurs infrastructures électriques et de vapeur. De plus, en cas d'accident, l'association se portera garante en faveur de l'industriel si les règles ont été respectées ; d'autres avantages sont accordés comme la dispense d'épreuves sur les chaudières, la formation des personnels par des leçons et des conseils sur l'utilisation et l'entretien des machines...

### L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1900 À PARIS

En 1900 s'est tenue la première *Exposition universelle* où les machines à vapeur occupent une *classe* entière, à savoir la *classe 19*. Pourtant, celle de 1855 comportait déjà une galerie des machines mobiles actionnées par la vapeur, grâce à un *arbre de couche* et des courroies, animées à 100 tours/minute (*Les Grands Dossiers de l'Illustration* 1987). Des milliers d'appareils tels que bateaux, pompes, grues, marteaux permettaient aux visiteurs de l'exposition de se plonger dans cet aspect de la Révolution industrielle, et ces appareils nécessitaient une puissance de 320 Ch. La vapeur nécessaire était fournie par sept chaudières. Cette puissance passe à 635 Ch en 1867, puis à 2500 Ch en 1878. L'exposition de 1878 voit l'avènement de l'électricité, mais seulement pour

l'éclairage d'un phare. C'est ensuite celle de 1889, avec la construction de la Tour Eiffel, qui donne un grand essor à l'éclairage électrique, même s'il est en concurrence avec ceux au gaz ou à l'acétylène. Elle comporte cinq stations d'électricité, dont une de la *Société de transmission de force par l'électricité*. La force motrice utilisée sur le site est de 5500 Ch. En 1900, la Tour Eiffel est entourée de nombreux bâtiments, dont la galerie des machines et le nouveau *Palais de l'Électricité*. Les chaudières forment deux groupes : l'usine La Bourdonnais composées des chaudières françaises, l'usine Suffren des chaudières étrangères. La force motrice est de 20 000 Ch dont 5 000 pour actionner les machines et les 15 000 autres pour l'éclairage. La concurrence avec le gaz s'est renforcée, et l'électricité le supplante, selon la formule "Le gaz éclaire, l'électricité illumine". Les chaudières doivent produire une vapeur à 11 atm. La plupart sont à tubes d'eau, pour diverses raisons dont un gain de place par rapport aux tubes de fumée. Une autre raison est la sécurité, qui pousse à minimiser le volume d'eau présent momentanément (*Les Grands Dossiers de l'Illustration* 1987).

#### TRADITIONS ET NOUVEAUTÉS

En ce début de xx<sup>e</sup> s., la vapeur est souvent surchauffée, car elle peut être utilisée non plus pour animer des moteurs à pistons mais des turbines, ce qui demande pressions et températures plus élevées. Les connaissances sur les matériaux et leur mise en œuvre ont bien progressé, et la plupart des générateurs sont en acier doux, ou parfois encore en tôle de fer. Le cuivre reste encore utilisé, par exemple à la centrale thermoélectrique *Giovanni Montemartini* à Rome. Ce fut la première centrale électrique publique propriété de la ville, inaugurée en 1912, qui devait produire une puissance moyenne de 7 500 kW. On y trouve encore une chaudière *Tosi-Steinmüller*, datant de 1950, à tubes à eau en cuivre, pour la génération de vapeur à haute pression. Les caractéristiques de cette chaudière sont les suivantes : 60 t/h de vapeur à 435°C et 45 atm avec 700 m<sup>2</sup> de surface de chauffe (Fiore 2006). Cette centrale est maintenant un musée, où se mélangent l'archéologie classique et l'archéologie industrielle, présentant des œuvres d'art grecques et romaines, issues des collections du musée du Capitole, dans les salles des machines et de la chaudière.

On vient de voir les relations étroites dans les développements des sciences et des techniques : les chaudières ont bénéficié des progrès des connaissances sur le cuivre, inversement elles ont suscité des recherches sur le matériau. Le contexte varie selon époque et pays, réglementation et savoir-faire. Mais on retrouve à chaque époque des constantes : le cuivre est cher mais présente de nombreuses qualités.

Si pour l'usager la vapeur semble avoir disparu, les deux systèmes vapeur et électricité étant souvent présentés comme s'étant succédés, la vapeur est pourtant encore très présente dans l'industrie, ne serait-ce que dans les chaudières des centrales nucléaires. De par ses propriétés mécaniques et thermiques, le cuivre reste encore présent, dans les tubes des chaudières ou dans certains éléments, également sous forme de fils électriques.

## REMERCIEMENTS

À Dominique BRISOU, Michel COTTE et François MATHIAS, pour leur disponibilité qui a permis de fructueux échanges et la transmission de documents.

## RÉFÉRENCES

### ARCHIVES

#### SERVICE HISTORIQUE DE LA MARINE

SHMVincennes -BB8-1130 : 3 janvier 1852.

SHMVincennes -6DD1-17 : Études sur la durée des chaudières.

SHMToulon -IG1-26

#### ARCHIVES DU PORT DE CHERBOURG

IK2-15 : *Rapport sur l'accident survenu le 5 juillet 1833 à bord du Rameur.*

BB8-1117 : *Rapport sur l'explosion d'une chaudière à vapeur à Cherbourg (arrière-bassin), 22 juin 1843.*

#### PÔLE HISTORIQUE D'INDRET - DCNS

Joëssel, J. (1862) : *Essais d'un canot à hélice*, Mémorial du Génie maritime, septembre 1862.

#### CNAM

Dossier Cugnot (1956) : *La voiture à vapeur de Cugnot 1770*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, Inv. 106.



## SOURCES ANCIENNES - OUVRAGES

Armengaud, J. E. et C. Armengaud (1839) : *L'industrie des chemins de fer*, Librairie scientifique et industrielle Mathias, Paris.

Bertin, E. (1896) : *Chaudières marines*, E. Bernard, Paris.

Carnot, S. (1824) : *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier, Paris.

*Exposition universelle de 1900 à Paris (1906) : Rapports du jury international. Groupe IV. Matériel et procédés généraux de la mécanique. Première partie. Classe 19 Machines à vapeur*, Ministère du commerce, de l'industrie, des postes et des télégraphes, imprimerie nationale, Paris.

Figuiet, L. (1867) : *Les Merveilles de la science*, vol. 1, Jouvett et c., éd., Paris.

Giffard, H. (1851) : *Application de la vapeur à la navigation aérienne*, Imprimerie de Pollet, Paris. - Brevet n° 1226.

de Jouffroy d'Abbans, A. ((1841) : *Des Bateaux à vapeur*, Mémoire lu par l'auteur à l'Académie des Sciences le 18 novembre 1839, Mathias Augustin, Paris, 108 p.

Jullien, C. E. et O. Valerio (1872) : *Nouveau manuel complet du chaudronnier comprenant les opérations et l'outillage de la petite et de la grosse chaudronnerie du cuivre et du fer*, Manuels-Roret, Librairie encyclopédique de Roret, Paris.

Lebasteur, H. (1878) : *Les métaux à l'Exposition universelle de 1878*, Dunod, Paris.

Marestier, J.-B. (1824) : *Mémoire sur les bateaux à vapeur des Etats-Unis d'Amérique*, Imprimerie royale, Paris.

Papin, D. (1682) : "La Manière d'amollir les os & de faire cuire toutes sortes de viandes en fort peu de temps & à peu de frais ; avec une description de la machine dont il faut se servir pour cet effet", in : *Acta eruditorum de Leipzig*.

Percy, J. (1867) : *Traité complet de métallurgie*, vol. 4, Paris et Liège.

Tack, D. (1839) : *La police et la surveillance des machines à vapeur en Belgique*, Delvingne et Callewaert, Bruxelles.

## SOURCES ANCIENNES - PÉRIODIQUES

*Annales des Mines* (1823-1828).

*Annales maritimes et coloniales* (1843) : "Ordonnance du roi relative aux machines et chaudières à vapeur autres que celles qui sont placées sur des bateaux", 22 mai 1843, t. 80, 932, Imprimerie royale, Paris.

*Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (1823) : mars, n°225, 67.

*Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (1844) : "Instruction pour l'exécution de l'ordonnance royale du 22 mai 1843, relative aux machines et chaudières à vapeur autres que celles qui sont placées sur des bateaux", 128.

*Bulletin des lois* (1824) : février 1824, *Ordonnance du 29 octobre 1823*, 7<sup>e</sup> série, t. 17, 308.

*Bulletin des lois* (1828) : juillet 1828, *Ordonnance du 25 mai 1828*, 8<sup>e</sup> série, t. 8, 497.

*Le Génie Industriel, Revue des inventions françaises et étrangère* (1869) : mars 1869, t. 37, 147.

*Portefeuille économique des machines, de l'outillage et du matériel* (1886) : juin 1886, t. XI, n° 366, 103.

*Portefeuille économique des machines, de l'outillage et du matériel* (1887) : juillet 1887, t. XII, n° 379, 101.

#### PUBLICATIONS RÉCENTES

Bertoletti, M., E.Talamo et M. Cima (2006) : *Sculture di Roma antica*, Rome.

Brisou, D. (2003) : *Accueil, introduction et développement de l'énergie vapeur dans la Marine militaire française au XIX<sup>e</sup> siècle*, Service Historique de la Marine, Paris.

Cotte, M. (1996) : "La genèse de la chaudière tubulaire chez Marc Seguin (1825-1830)", *Revue d'histoire des chemins de fer*, n°14, 23-41.

Cotte, M. (1997) : *Les fonds d'archives Seguin - Aux origines de la révolution industrielle en France, 1790-1860*, Archives départementales de l'Ardèche, Privas.

Delattre, G. (1972) : *Annales inédites de la flottille du fleuve Sénégal de 1819 à 1854 d'après les documents manuscrits de l'époque. Première partie (de 1819 à 1835)*, Archives du Gouvernement Général de l'AOF, Dakar, 432 p., plans, reproductions phot. et cartes.

Fiore, A. D. (2006) "La Centrale Termoelettrica Giovanni Montemartini", in : Bertoletti et al. 2006, 53-64.

Fressoz, J.-B. (2009) : *La fin du monde par la science*, thèse de l'EHESS.

Gay, J. (1993) : "La Vapeur", *Neptunia*, 192, 40-45.

Gay, J. (1999) : "Les Premières machines à vapeur et leurs implications matérielles et humaines", *Marteau pilon*, 11, 29-44.

Gille, B., dir. (1978) : *Histoire des techniques*, Encyclopédie de La Pléiade, Paris.

Jacomy, B. (1990) : *Une histoire des techniques*, Paris.

Laroche, F. (2007) : *Contribution à la sauvegarde des objets techniques anciens par l'archéologie industrielle avancée*, thèse de l'École Centrale et Université de Nantes.

*Les Grands Dossiers de l'illustration* (1987) : *Les Expositions universelles*, Paris.

Lissarague, P. (1990) : *Clément Ader inventeur d'avions*, Toulouse.

Lloyd, G. E. R. (1974) : *Une histoire de la science grecque*, éd. française 1990, Paris.

Mercier, A. (2011) : "Un Conservatoire pour les Arts et Métiers : les origines d'une grande idée", *La Revue pour l'histoire du CNRS*, 27-28, 15-19.

Michéa, H. (2002) : "Une pièce unique du Musée de la Marine : le modèle de Jouffroy d'Abbans 23 MG I, anciennement 1012", *Chronique d'histoire maritime*, 47, 53-61.

De Place, D. (1981) : *L'incitation au progrès technique et industriel en France, 1783 à 1819, d'après les archives du conservatoire des Arts et Métiers*, mémoire EHESS.

Pôle historique d'Indret (2008) : *Des canons du roi à la propulsion nucléaire*, éd. DCNS.

*Reflets de Turlaville* (2005) : "Félix Du Temple, un général inventeur", *Bulletin municipal d'information*, 96 février 2005, 13-15.

Rivet, F. (1962) : *La Navigation à vapeur sur la Saône et le Rhône (1783-1863)*, Paris.

Saint-Marc, J.-B. (1999) : *Génèse des Apave*, Mémoire de maîtrise d'histoire, Université Bordeaux 3, inédit.



LES  
ÉDITIONS

CHÂTEAU  
DES DUCS DE  
BRETAGNE

# NANTES 1900

## — LA MAQUETTE DU PORT

Une valorisation scientifique et muséographique innovante











© Château des ducs de Bretagne — Musée d'histoire de Nantes  
isbn 978-2-906 519-49-7

# **NANTES 1900**

## **– LA MAQUETTE DU PORT**

Une valorisation scientifique et muséographique innovante

Sous la direction de \_\_\_\_\_  
Christophe Courtin, Bertrand Guillet, Jean-Louis Kerouanton et Florent Laroche

## Préface

Lors de l'Exposition universelle de 1900 à Paris, la chambre de commerce de Nantes commanda le plan-relief du port pour le pavillon qui célébrait la modernité et le dynamisme des ports de France. Après un usage promotionnel durant plus de deux décennies, la maquette devint, en 1927, par son entrée au musée, un objet patrimonial témoignant d'un passé proche mais déjà révolu. Ce fut le sens du discours du président de la chambre lors de la donation officielle à la ville de Nantes. L'objet avait pleinement rempli son rôle : à savoir instruire les visiteurs et convaincre les partenaires de l'excellence du port de Nantes, de la qualité de ses aménagements et de la modernité de ses infrastructures au lendemain d'un demi-siècle synonyme de déclin, en raison notamment de l'ensablement chronique du lit de la Loire.

Au début des années 1920, les profondes modifications du territoire portuaire ainsi que de la Loire et de ses îles rendirent caduque l'entreprise de mise à jour du plan-relief, malgré une série d'actualisations entre 1900 et la veille de la Première Guerre

mondiale. Dès lors il put intégrer les collections d'un musée, et fut ainsi présenté aux Nantais durant plus de soixante ans — sans information sur les origines de sa création — d'abord au musée de Nantes par l'image (établi à la porte Saint-Pierre), puis au musée des Salorges après son installation au château des ducs de Bretagne en 1956.

Son insertion dans le parcours scénographique du nouveau musée d'histoire de Nantes, inauguré en 2007, nous amena à porter un nouveau regard sur ce plan-relief et à le questionner — Pourquoi avait-il été créé ? Qui en était l'auteur ? À quelle fin ? —, mais aussi à imaginer une médiation pour permettre à nos visiteurs de comprendre cet objet, si riche d'informations et tellement peu bavard. Cette médiation fut ébauchée avec rêverie entre un conservateur de musée et un historien des sciences industrielles lors d'un colloque qui eut lieu en 1999, et mise en œuvre dix ans plus tard quand les moyens technologiques furent enfin appréhendables. « Faire parler la maquette », amener

le public à saisir le territoire représenté, tel fut le leitmotiv de notre démarche et de la création du nouvel outil numérique que nous présentons dès à présent en salle 21. La seconde ambition fut de montrer comment la lecture d'un territoire âgé de plus de cent ans pouvait être source d'enseignement et de compréhension du territoire actuel. Enfin, la méthodologie appliquée et le dispositif numérique, innovant, devaient aussi questionner notre processus d'écriture de l'histoire au sein du musée: un processus rendu collaboratif et enrichissable.

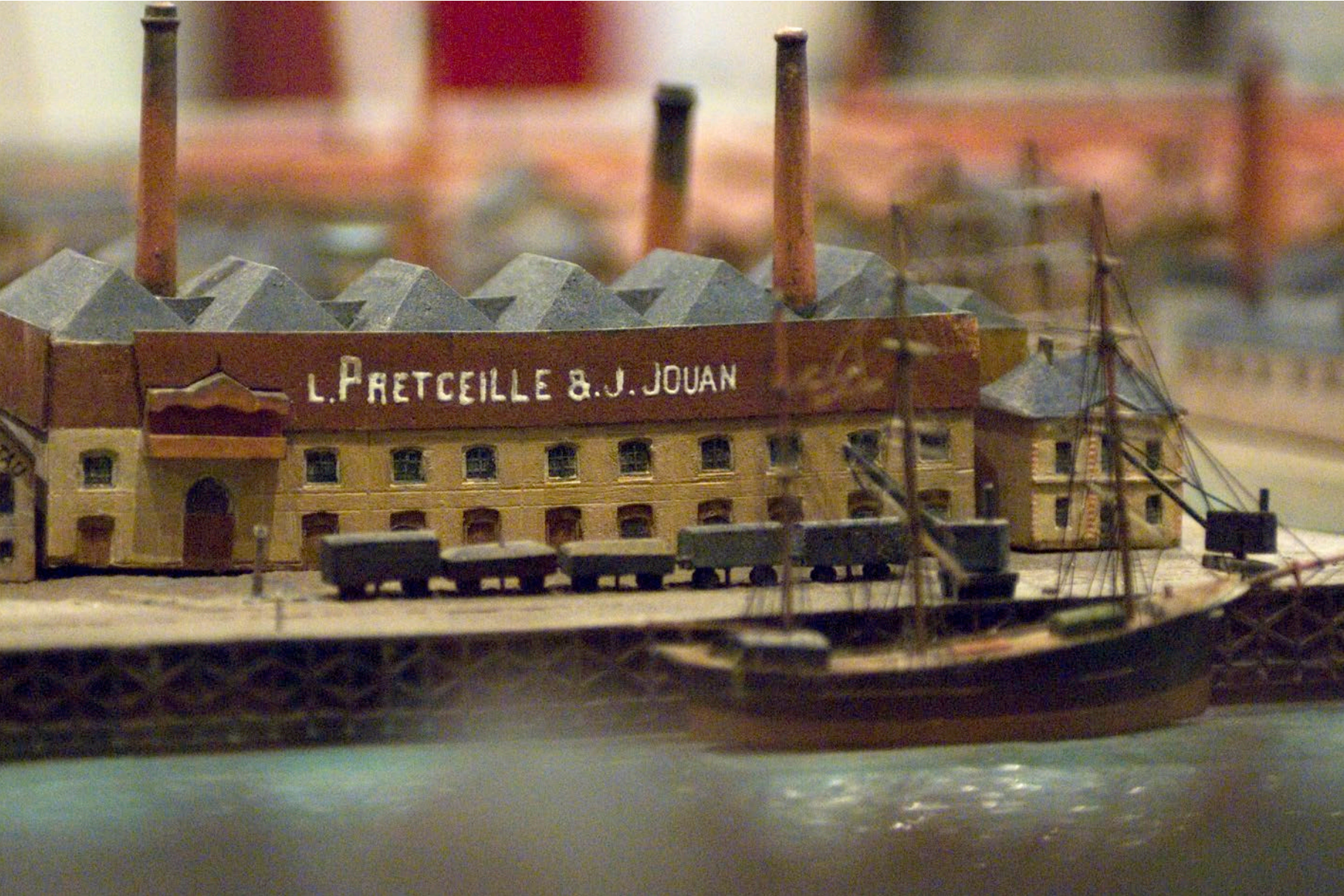
Cette démarche fut originale (plus de quatre-vingts élèves accompagnés de leurs professeurs ont collaboré à ce projet), empirique (la définition de l'outil fut faite au fil du temps en fonction des résultats de la recherche), expérimentale (de nombreuses voies furent ouvertes, testées, oubliées ou retenues), et interdisciplinaire. Initié par le musée, ce travail fut nourri par la collaboration avec l'université de Nantes (Centre François Viète, UFR histoire et histoire de l'art, Centre de recherches en

histoire internationale et atlantique, école Polytech'Nantes) et l'École Centrale de Nantes, en lien avec les laboratoires IRCCyN et LINA. Plusieurs pistes furent élaborées, de la 3D à la base de données, de l'interface avec l'objet à l'industrialisation de l'outil. Des contributions issues de champs de recherche variés furent apportées, ce dont témoigne modestement le présent ouvrage.

Le plan-relief du port de Nantes en 1900 est un objet exceptionnel. Désormais, par l'outil numérique mis à la disposition du public, il devient, au-delà d'un précieux indicateur de l'histoire de l'architecture industrielle et des paysages nantais du début du xx<sup>e</sup> siècle, un support dynamique à la compréhension du territoire actuel, au cœur de la réflexion sur le devenir de Nantes et de son rapport à la Loire.

**Bertrand Guillet**

Directeur du musée d'histoire de Nantes



L. PRETCEILLE & J. JOUAN



# Sommaire

## **Le plan-relief du port de Nantes en 1900. Un objet de collection** p. 11

Histoire de la création du plan-relief p. 16

De l'usage du plan-relief p. 34

La maquette, un objet patrimonial p. 36

## **La valorisation scientifique de la maquette. Un objet de médiation** p. 47

Les bases du projet p. 50

Les objectifs du projet Nantes 1900 p. 60





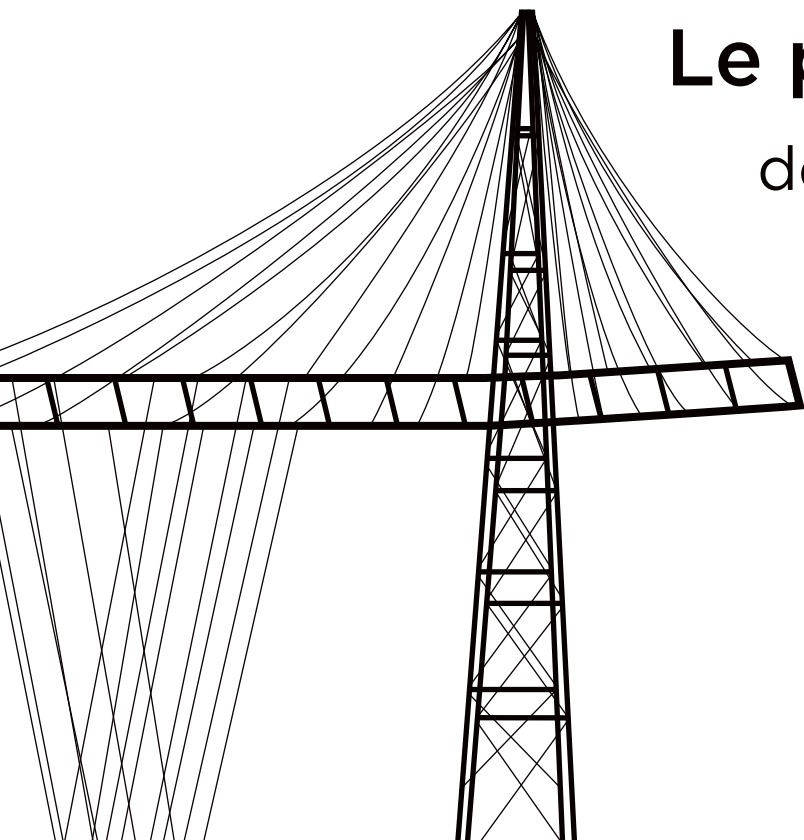




L'île Gloriette  
La Prairie-au-Duc



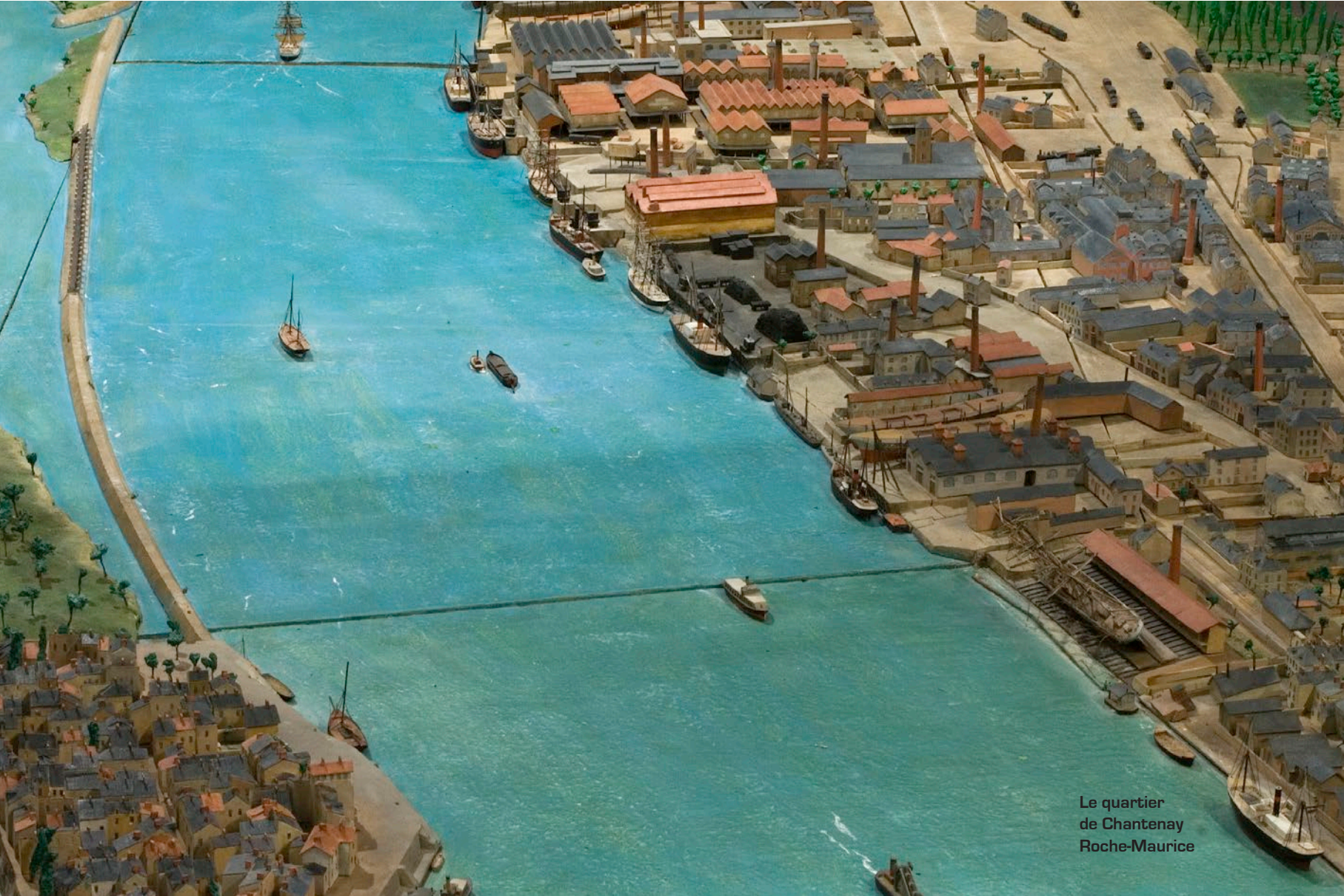




# Le plan-relief du port de Nantes en 1900

Un objet de collection





Le quartier  
de Chantenay  
Roche-Maurice

Constitué de seize morceaux assemblés en joints apparents, le plan-relief du port de Nantes mesure 9,20 mètres de long sur 1,85 mètre de large. Construit essentiellement en bois, il comporte quelques éléments de finition en métal, fibres végétales, papier et verre. L'échelle est d'environ 1/450 (pour une comparaison de référence : les lampadaires des rues ont un diamètre d'un millimètre sur la maquette). La maquette entière couvre plus de 60 hectares du port industriel et de la ville de Nantes. Le plan est signé et daté à deux endroits différents, sur une plaque en cuivre et par une inscription manuscrite à l'envers de l'un des morceaux, « Pierre Auguste Duchesne, 1899 ».









La Prairie-au-Duc  
Le pont transbordeur

## Histoire de la création du plan-relief

### Participer à l'Exposition universelle

L'idée de la réalisation d'un plan en relief du port de Nantes avec l'ensemble de ses infrastructures modernes prit corps pour l'Exposition universelle de Paris en 1900. Cet objet devait intégrer l'exposition collective des chambres de commerce des ports de France. La participation de la chambre de commerce à ce type d'exposition n'était pas nouvelle. En effet, dès 1878, lors de l'Exposition universelle de Paris, elle avait présenté une exposition des marchandises d'exportation de son port dans une scénographie faite d'un mât orné de trophées maritimes. En 1889, lors de l'Exposition universelle suivante, le projet fut plus ambitieux. Désirant communiquer sur les travaux en cours de réalisation dans l'estuaire de la Loire, à savoir le creusement du canal de la Martinière, la chambre de commerce de Nantes présenta un plan panoramique aquarellé signé Émile Libaudière, représentant la totalité du canal maritime, accompagné de photographies du chantier réalisées par Étienne Pinard. Un plan du port maritime ainsi que des photographies des installations portuaires complétaient cet ensemble. La participation de la chambre de commerce de Nantes fut de nouveau d'actualité pour l'Exposition universelle de 1900. Sollicité en juillet 1898 par le groupement des chambres de commerce des ports, le président de la chambre de Nantes, Jean-Baptiste Rivron, accepta l'idée de collaborer à la réalisation d'un pavillon collectif qui serait situé « quai Debilly, entre la passerelle du Vieux-Paris et le pont d'Iéna ». > p. 22





**La construction  
du canal de la Martinière**

Étienne Pinard

Fin du XIX<sup>e</sup> siècle, photographie

Archives départementales  
de Loire-Atlantique

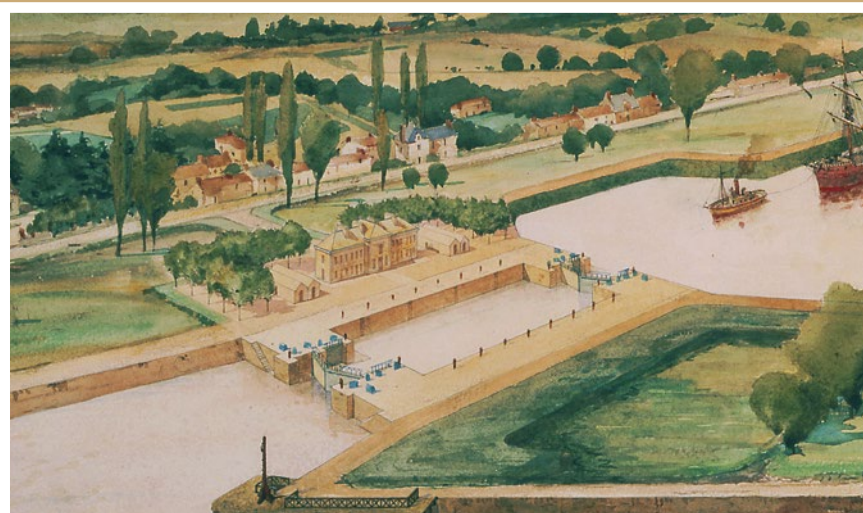
## Le canal de la Martinière

Le canal maritime de la Basse-Loire, plus communément appelé canal de la Martinière, du nom d'un lieu-dit du Pellerin, est un ouvrage d'art situé sur les communes de Frossay et du Pellerin. Son ambition d'origine, portée par la chambre de commerce, mais aussi son échec trop rapide, en font le symbole de tous les questionnements nantais en termes portuaires.

Durant la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, l'augmentation du tonnage des navires rendait de plus en plus difficile l'accès au port de Nantes, du fait de la profondeur réduite du lit de la Loire dans la partie centrale de l'estuaire. La chambre de commerce de Nantes proposa le creusement d'un canal pour maintenir la ville comme principal port de Basse-Loire face à celui de Saint-Nazaire, réaménagé au milieu

du siècle pour accueillir la « grande navigation ». Ce projet soutenu par l'État fut achevé en 1892 après dix ans de travaux et moyennant un coût final estimé à près de 27 millions de francs.

Long de 15 kilomètres, il fut creusé dans les anciens bras de la Loire et les prairies des Champs-Neufs. D'une largeur de 55 mètres et disposant d'un mouillage de 6 mètres à 7,5 mètres, il possédait un système d'écluses à sas à l'ouverture et la fermeture rapides. D'un point de vue technique, il bénéficia



### Le canal de la Martinière

Émile Libaudière

1889, aquarelle sur papier

Musée d'histoire de Nantes

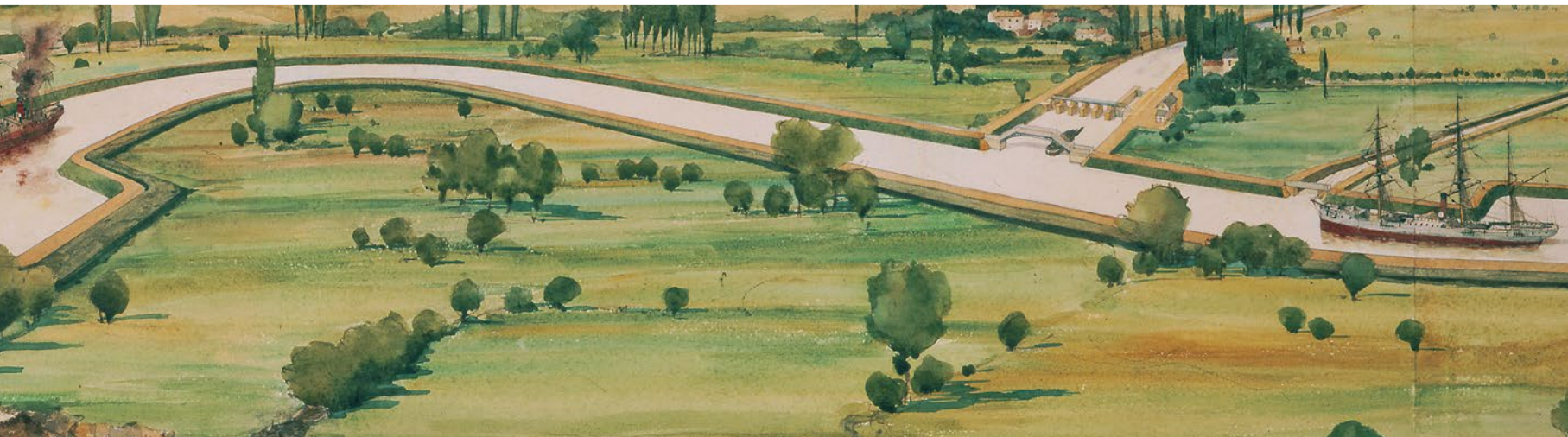


des avancées réalisées lors de la construction du canal de Suez deux décennies plus tôt.

L'augmentation continue du tonnage des navires dans les années qui suivirent son ouverture et le fait qu'en 1903 l'administration des Ponts et Chaussées choisit de draguer la Loire rendirent très vite l'ouvrage obsolète. La chute du trafic fut telle que dès 1913 le canal cessa de servir à la navigation maritime. Il fut ensuite utilisé comme garage et lieu de désarmement pour les navires, ce qui lui

donna l'image d'un « cimetière des grands voiliers » dans l'imaginaire des Nantais. Endommagé par les Allemands lors de la guerre, le canal fut officiellement déclassé en 1959 et perdit son statut de voie maritime. Trois ans plus tard il fut racheté en grande partie par l'Union des syndicats des marais du Sud-Loire et servit dès lors à stocker l'eau de la Loire pour l'usage agricole et industriel.

A. P.



## La chambre de commerce et d'industrie aux Expositions universelles de 1878 et 1889

Avant celle de 1900, la chambre de commerce et d'industrie de Nantes avait participé aux précédentes Expositions universelles qui s'étaient déroulées à Paris.

La chambre de Nantes répond favorablement en 1877 à l'appel lancé à l'ensemble des chambres de commerce françaises par le ministre de l'Agriculture de l'époque, M. Teisserenc de Bort, et participe à l'Exposition de 1878 malgré le lourd investissement humain et financier qu'une telle manifestation implique. Elle engage pour l'occasion 15 000 francs sur ses fonds propres et s'associe à un grand nombre de négociants nantais. Déjà elle fait le choix d'exposer de grands plans de Nantes et de la Loire. La présentation de la chambre de commerce lors de cet événement international est un succès et est saluée par une mention honorable décernée par le jury de l'Exposition universelle

Malgré la belle réussite de 1878, la participation à l'Exposition universelle de 1889, dédiée à la célébration du centenaire de la Révolution française, s'avère plus compliquée. Bien que le ministère de l'Industrie implique les chambres de commerce françaises dès 1886 dans le cadre de l'organisation de la manifestation, celle de Nantes s'engage tardivement pour des raisons financières. Par conséquent, elle se retrouve exclue de l'organisation du congrès industriel et commercial qui a lieu pendant l'Exposition universelle, alors que tous les autres grands ports y sont présents. Elle réussit néanmoins à participer à une exposition collective organisée par les ports maritimes dans un pavillon spécialement créé pour l'occasion en bord de Seine. C'est dans ce cadre qu'elle se voit attribuer une médaille d'or pour la qualité des documents présentés.

A. P.

Le quartier Sainte-Anne  
La chambre de commerce







## Réaliser un plan-relief

Située au fond de l'estuaire de la Loire, Nantes est depuis plusieurs siècles un important port maritime et fluvial de la façade atlantique, possédant une longue tradition de construction navale. Au <sup>xix</sup><sup>e</sup> siècle, la ville connaît un formidable essor industriel centré autour des activités mécaniques, métallurgiques, chimiques et agroalimentaires. À la fin du siècle, au moment où les possibilités de navigation en Loire paraissent confortées grâce au canal maritime, la chambre de commerce de la ville évoque, pour l'Exposition de 1900, la réalisation d'un objet vantant les qualités et le dynamisme du port.

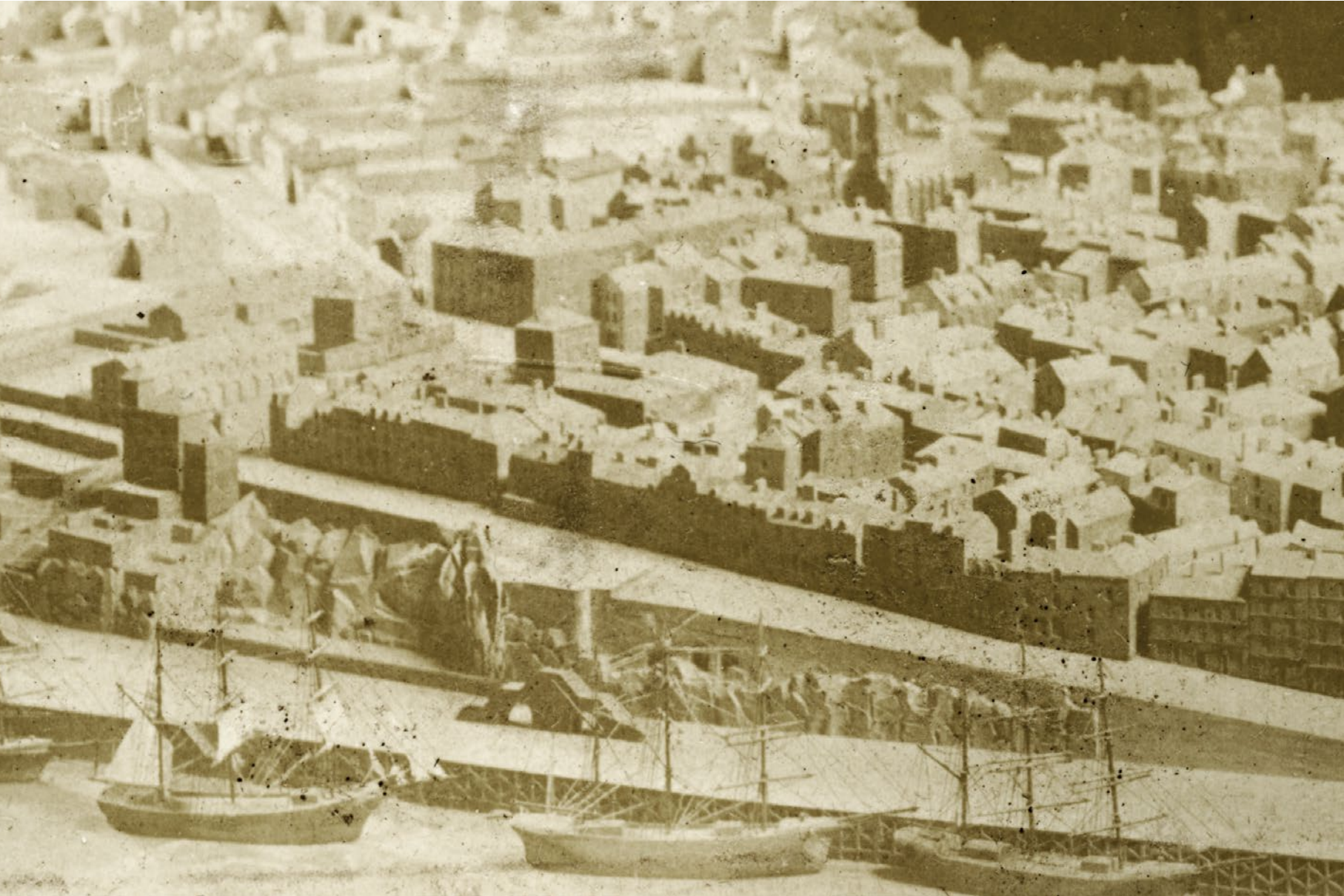
**La maquette  
dans l'atelier  
de P. A. Duchesne,  
pendant sa fabrication  
(détail)**

1899, photographie  
Coll. part.  
(ci-dessus  
et pages suivantes)

L'idée du plan en relief du port semble être le fruit d'une décision collégiale de l'ensemble des dix-sept chambres de commerce ayant adhéré à l'exposition collective, chaque chambre devant produire un plan-relief. Le choix du plan-relief fut privilégié, au détriment de documents présentant des travaux d'ingénieurs, pour son accessibilité et la qualité de lecture qu'il offrait pour le grand public. Faut-il voir dans ce projet une réponse à la présentation trop technicienne de 1889 ? C'est probable. La chambre de Nantes désigna une commission en son sein afin de réfléchir aux modalités d'exécution et de réalisation de cet objet ambitieux. Les membres de la commission proposèrent de ne pas trop caractériser la maquette par la seule présence portuaire, mais d'illustrer la relation à la ville en intégrant celle-ci au territoire du plan-relief. La chambre, dans cette optique, espérait une collaboration financière de la ville pour les frais de réalisation du plan, estimés à 20 000 francs, avec une participation évaluée à la moitié de la somme. À la suite des premières études, le devis fut établi pour 14 000 francs, le plan mesurant 7 mètres de longueur sur 3 ou 4 mètres de profondeur. Ce montant constituait un investissement important pour la chambre. À titre d'exemple, celle-ci commanda, à la même époque et pour la même somme, aux constructeurs-mécaniciens Brissonneau fils et A. Lotz, une grue à vapeur pour la rive gauche du port.









## Le territoire du plan-relief

Lors de la séance du mardi 14 mars 1899, plusieurs membres de la chambre de commerce émirent le souhait d'une extension du plan-relief intégrant les établissements situés en aval du *slipway* (cale de lancement), dans la partie s'étendant jusqu'à Roche-Maurice. Il s'agissait des nouveaux terrains annexés sur la Loire et aménagés récemment par les industriels. Ce désir d'agrandissement émanait bien entendu de ces mêmes industriels désireux de voir représenter leurs usines sur le plan-relief. Jean-Baptiste Rivron fit remarquer que cette extension obligerait à réduire considérablement l'échelle du plan et ainsi à renoncer à y comprendre la plus grande partie de la ville, celle en amont du port et des industries. Ce renoncement ne serait évidemment pas admis par les élus de la ville de Nantes. Deux visions du projet se confrontaient alors : celle des industriels attachés à la représentation du seul territoire portuaire et celle émise par le président de la chambre, soucieux de l'économie du projet et sensible à la perception de l'objet par le grand public plus habitué aux visions urbaines qu'à celles des zones industrielles. L'option du président tendait également à souligner la subtile imbrication du site portuaire et industriel au sein de la ville.

La réponse à ces deux options allait être donnée par la ville. Le 25 mars 1899, le maire de Nantes fit connaître la décision du conseil municipal concernant le montant du subsidé alloué au projet du plan-relief : 4 000 francs, montant accompagné d'une clause, le don du plan à la ville au terme de l'Exposition universelle.



**Plan de Nantes dressé par Jouanne,  
continué par Veloppé**  
1914  
Archives municipales de Nantes









La proposition de la ville fut unanimement rejetée, la chambre étant en désaccord sur la hauteur de la participation (un quart de la dépense), jugée bien trop faible, et sur la condition du don. Le projet fut alors repensé. D'emblée, le président s'interrogea pour savoir si un plan ne comprenant que le port maritime pouvait donner « matière à une exposition intéressante », émettant un fort doute sur l'intérêt de la partie située en aval du quai Saint-Louis jusqu'à Roche-Maurice. La décision fut alors prise de ne représenter que « le cours du fleuve et les façades des quais, usines, chantiers de construction... et prenant en longueur depuis le pont de la Bourse jusqu'à l'extrémité de Chantenay sur une largeur de 800 mètres maxima ». La chambre décida de maintenir un crédit de 12 000 francs pour la réalisation du plan-relief. > p. 32

**Détail du plan de Nantes  
par Jouanne et Veloppé**

[correspondant à l'emprise  
de la maquette, p. 44-45]



**L'ancien quartier de la gare  
et l'usine Lefèvre-Utile**

P. A. Duchesne  
1900-1925, plan-relief  
Musée d'histoire de Nantes

## Le choix du maquettiste

Les délais étaient désormais très courts. Malgré un premier contact avec un important modéliste parisien, M. Régnard, le choix du modéleur se porta sur le maquettiste nantais Pierre Auguste Duchesne et sa proposition d'un montant de 14 000 francs.

Nous connaissons aujourd'hui Pierre Auguste Duchesne (né à Nantes le 20 février 1841 et mort le 3 juillet 1933 à Sucé-sur-Erdre) par les réalisations qu'il nous a laissées et qui sont conservées en partie dans les collections du musée d'histoire de Nantes. Pierre Auguste Duchesne reçut deux autres commandes pour l'Exposition universelle, la maquette de l'usine LU de Nantes et celle du port de Saint-Nazaire. Cette dernière fut également conçue pour participer à l'exposition des chambres de commerce. Duchesne devait se voir confier également le plan du quartier Saint-Similien pour le service des eaux et celui du quartier des Salorges en 1830. Celui-ci, réalisé en 1894, était une commande des frères Amieux, industriels de la conserve et fondateurs du musée des Salorges. Pierre Auguste Duchesne appartenait à une famille du monde industriel, son père était imprimeur. Il était lui-même modeleur, mais ce n'est qu'en retraite qu'il semble s'être adonné au modélisme et à la réalisation de plans-reliefs.

**B. G.**

**Pierre Auguste Duchesne**

Fin du XIX<sup>e</sup> siècle, photographie  
Coll. part.





## La présentation à l'Exposition universelle

Commandé le 25 avril 1899, le plan fut achevé le 13 février 1900, après plus de neuf mois de travaux. Nous n'avons que peu d'éléments sur le processus de fabrication du plan, la tradition familiale rapportant que Pierre Auguste Duchesne se déplaça beaucoup à bord d'une chaloupe qu'il avait fait spécialement construire. Cette source nous incite à penser que Duchesne devait réaliser ainsi des croquis préparatoires sur le vif. Autre hypothèse, sa documentation, malheureusement aujourd'hui perdue, devait être également constituée d'une riche collection de photographies du territoire.

Au début du mois d'avril, le plan fut expédié à Paris. Duchesne contrôla son montage, ainsi que l'installation des plans de la Loire navigable qui devaient l'encadrer. Le plan fut unanimement salué par la critique et le jury de l'Exposition pour son « exactitude parfaite » et reçut un Grand Prix. Une notice sur la situation générale du port fut également distribuée. Elle mettait en avant les progrès réalisés depuis l'ouverture du canal maritime de la Martinière en 1892. Ainsi, la maquette avait donc bien été conçue comme un faire-valoir de la nouvelle situation du port après l'achèvement des travaux d'aménagement de l'estuaire, et sa présentation à l'Exposition universelle s'inscrivait logiquement dans le droit fil de celle de 1889, consacrée à la célébration du canal maritime de la Martinière, ouvrage d'art construit pour le salut commercial du port de Nantes.



**La maquette  
dans l'atelier  
de P. A. Duchesne,  
pendant sa fabrication**

1899, photographie  
Coll. part.



## De l'usage du plan-relief

Le plan fut montré lors de diverses expositions internationales, notamment à Liège en 1905 et à Londres en 1907, mais sa vocation première était d'orner la grande salle de la Bourse de commerce.

La restauration du plan en 1996 a mis en lumière plusieurs indices permettant une meilleure compréhension de sa fabrication et de son usage. Si l'agencement des différents morceaux composant le plan a été profondément modifié durant le xx<sup>e</sup> siècle, la restauration a révélé que la construction d'origine permettait une exposition modulée en fonction du lieu. Mais elle a surtout montré que le plan avait subi, durant sa période d'emploi, de nombreuses adaptations liées à l'évolution du site, la principale étant la réalisation de l'extension souhaitée dès 1899 vers l'aval. Si l'on ne connaît pas précisément la date de cet agrandissement, sans doute très rapidement, vers 1905, le plan-relief a connu ensuite des évolutions régulières jusqu'à la veille de la Première Guerre mondiale. La maquette accompagne ainsi la transformation du site naturel ou urbain en site industriel; l'aménagement de la pointe aval de la Prairie-au-Duc avec l'achèvement du quai des Antilles avant 1905, le quai sud appelé plus tard quai Wilson, le pont transbordeur édifié en 1903, la grue portique de 30 tonnes installée sur le quai des Antilles en 1909... Les comblements des canaux sont également visibles: l'ancien canal Pelloutier est désormais caché sous une langue de bois présentant le nouveau boulevard Babin-Chevaye. Le plan, dans son actualisation, reflète ainsi la transformation et la modernisation du port. Ce souci d'être au plus près de la réalité portuaire était



**Ci-contre:**

P. A. Duchesne a actualisé  
la maquette, notamment  
le quai des Antilles  
sur la Prairie-au-Duc.



bien entendu une aspiration des dirigeants de la chambre de commerce, afin que cet outil de communication puisse servir les intérêts du port et de la ville.

### **La maquette, un objet patrimonial**

Le 11 mai 1928, le maire de Nantes, Paul Bellamy, en séance du conseil municipal, annonça à son assemblée, par la lecture d'une lettre, la décision de la chambre de commerce de se dessaisir de son plan-relief représentant le port et ses aménagements. Cette lettre, adressée par le président Delafoy, exposait les principales raisons du renoncement de la chambre à poursuivre l'exposition de cet objet dans la grande salle de la Bourse. Ayant « servi à documenter utilement les étrangers visitant la chambre de commerce », ce plan « ne présente plus le même intérêt d'actualité par suite de l'augmentation successive des quais et de la modification profonde que le comblement des bras nord va apporter au centre de la ville ».

En effet, par la mise en œuvre, dès 1913, du programme Baudin visant la modernisation du port en aval de Nantes, les travaux de dragage du cours de la Loire et les comblements des bras du fleuve, aux abords et à l'intérieur de la ville, modifiaient considérablement la configuration du site portuaire.

Ces profondes transformations, réalisées en quelques années, bouleversaient le rôle traditionnellement donné au plan-relief comme outil de communication et de valorisation et le transformaient en un objet caduc ne pouvant plus répondre à sa mission.

Le plan avait subi quelques adaptations au cours de son histoire pour suivre l'évolution du port, mais face aux nouveaux développements portuaires, son seuil d'adaptabilité était irrémédiablement dépassé. Poursuivant son exposé, le président Delafoy mit en avant le fait que le plan du port constituait une pièce de musée qui présenterait pour les générations futures un grand intérêt et que celui-ci pouvait donc être offert au musée de la ville.

**La maquette  
dans l'atelier  
de P. A. Duchesne,  
pendant sa fabrication**

1899, photographie  
Coll. part.





Le quartier de Chantenay  
L'église Sainte-Anne







Le quartier de Chantenay  
Le chantier naval Blasse



Le plan en relief fut ensuite présenté au deuxième étage du musée de Nantes par l'image, situé porte Saint-Pierre. Ce musée, dont la vocation était de témoigner de la disparition du vieux Nantes, conserva le plan jusqu'à sa fermeture à la fin des années soixante. Lorsqu'il fut remonté en 1974 au sein du musée des Salorges, au château des ducs de Bretagne, sa présentation différait légèrement de la précédente. En effet, il n'était plus possible pour le visiteur d'accéder aux différents points de vue que pouvait proposer le plan en relief, car celui-ci était dorénavant présenté le long d'un mur. Il fut de nouveau démonté en 1994, lors de la fermeture de ce musée dans le cadre de la restructuration du château et de la constitution du futur musée d'histoire de la ville de Nantes. En attendant son installation définitive dans le musée d'histoire, le plan fut exposé fidèlement à sa présentation d'origine durant l'exposition « Estuaire, de Nantes à Saint-Nazaire, histoire d'un port », en 1997. Depuis la réouverture du musée en février 2007, la maquette est placée sous vitrine dans la salle dédiée au port et à ses équipements à la fin du <sup>xix</sup><sup>e</sup> et au début du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle.

Un grand plan-relief reste toujours un objet fascinant pour le visiteur. Objet patrimonial par excellence, il est bien plus qu'une exceptionnelle pièce de musée. Car s'il témoigne de la vitalité de la chambre de commerce de Nantes au début du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle, il est désormais l'un des plus précieux indicateurs de l'histoire de l'architecture et des paysages nantais au début du <sup>xx</sup><sup>e</sup> siècle, à l'heure où le territoire de Nantes allait irrémédiablement basculer dans d'importantes transformations.

**B. G., K. G.**



Scénographie de  
l'exposition « Estuaire,  
de Nantes à Saint-Nazaire,  
histoire d'un port »

1997

photo Alain Guillard



Le quartier de Chantenay  
Le chantier naval Dubigeon







Le quartier de Chantenay  
Roche-Maurice  
La papeterie Gouraud



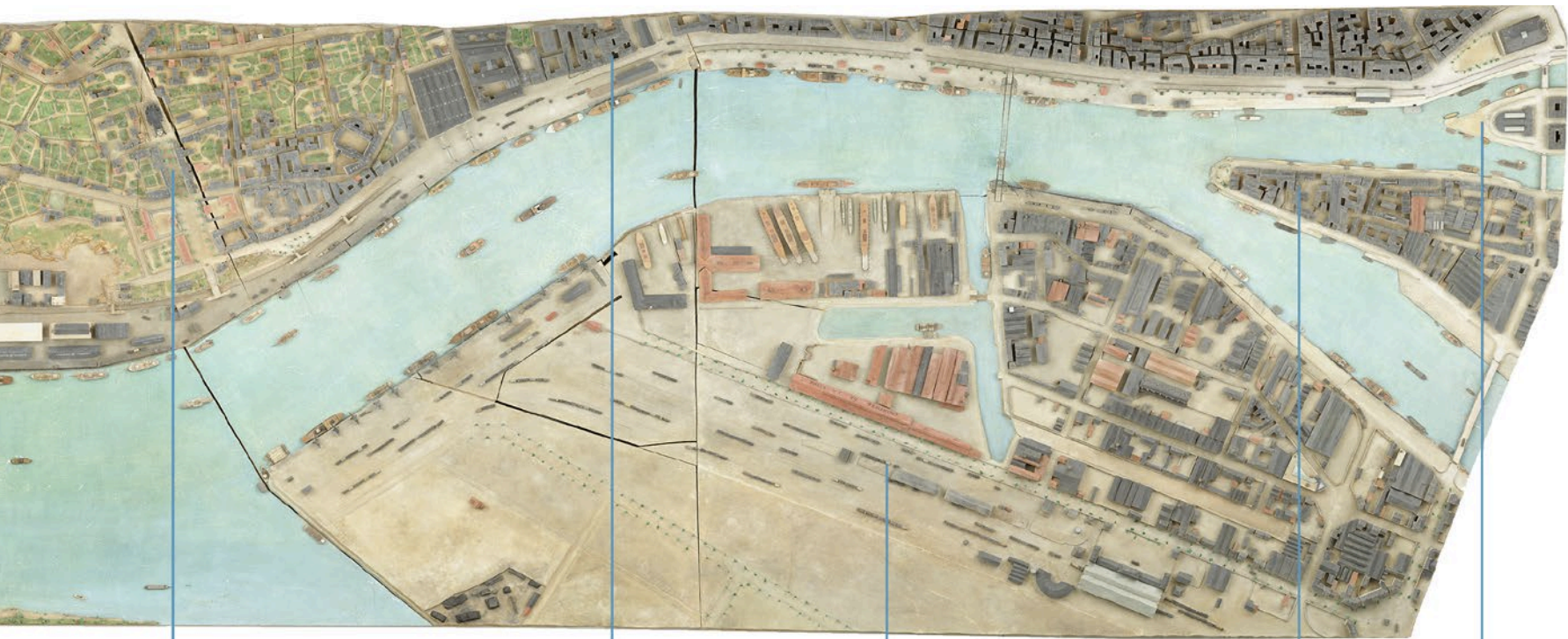


Roche Maurice

Bas Chantenay

Chantenay

Trentemoult



Sainte-Anne

Salorges

Prairie-au-Duc

Île Gloriette

Île Feydeau







# La valorisation scientifique de la maquette

Un objet de médiation





Les entrepôts  
de la chambre de commerce  
Les Grands Moulins  
La brasserie Burgelin

**L**e musée d'histoire de Nantes a souhaité développer un dispositif de médiation autour de la maquette du port de Nantes. Pour le réaliser, il a choisi de lancer un programme de recherche et développement en 2008. La nature de ce projet en a fait un des programmes phares du musée. Par ses spécificités, il constitue un modèle dans le paysage de la recherche pour le patrimoine mais également en sciences dures. Ce projet voit sa concrétisation en 2015 avec l'ouverture au public du dispositif « Nantes 1900 », dans la salle 21 du musée.

## Les bases du projet

En 2009, la maquette du port de Nantes est numérisée, le modèle 3D obtenu permet alors de faire le lien entre les connaissances historiques et la maquette, ainsi que de réaliser des traitements de géo-référencement. Cette phase de numérisation est accompagnée de recherches poussées parmi les fonds de collections des différentes institutions concernées (archives municipales de Nantes, archives départementales de Loire-Atlantique, Château des ducs de Bretagne), effectuées par l'équipe « histoire » du projet. Cela a abouti à la rédaction de notices historiques liées à des points d'intérêt de la maquette (bâtiments, espaces urbains, thématiques, personnages historiques, etc.). La nature hétérogène des données et l'objectif évolutif du projet ont induit de nombreuses contraintes, et plusieurs années ont été nécessaires à la conception de cette base de données informatique. Parallèlement à ces travaux de recherche, des problématiques fortes en termes de visualisation d'informations sont apparues, le projet muséographique à destination du public se devant de respecter des contraintes d'accessibilité et d'interface utilisateur adaptées à l'ensemble des publics.

Un prototype du dispositif a été conçu en 2011 à partir d'une maquette du quartier Saint-Similien à Nantes, réalisée par le même maquettiste à la même époque, mais d'une taille plus modeste (130 cm x 70 cm). Le prototype a été mis à disposition du public dans une salle du musée, ce qui a permis d'effectuer une évaluation fine des usages et de valider certaines hypothèses de travail.





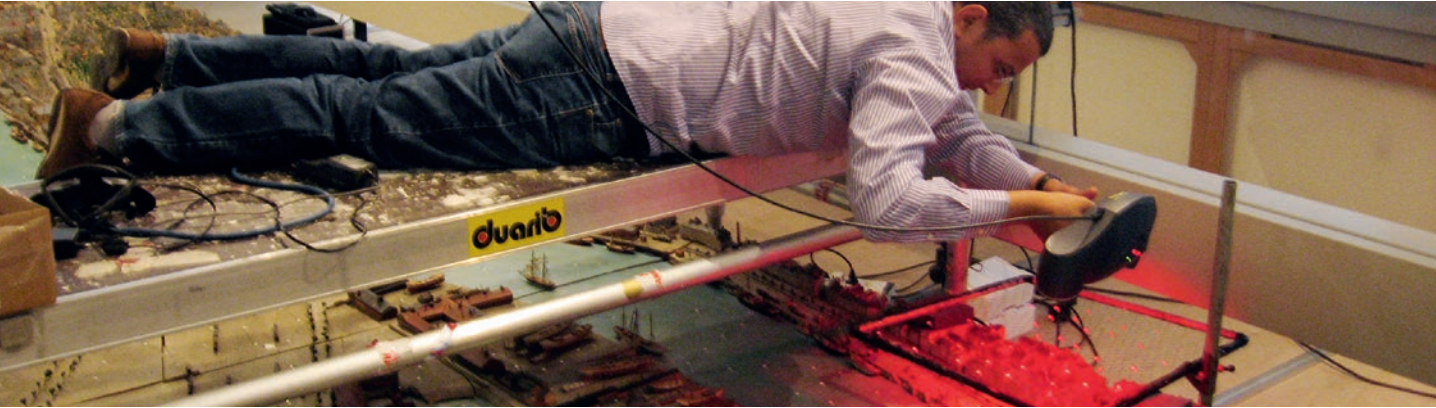
Le quartier  
de l'île Gloriette



Numérisation de la maquette  
du quartier Saint-Similien

cl. J.-L. Kerouanton





## Numérisation 3D de la maquette

cl. F. Laroche

### Un projet pionnier et empirique

Le projet « Nantes 1900 » est marqué par un caractère très empirique, du fait de la démarche utilisée elle-même et en raison de son double statut. Ce projet de valorisation d'un objet patrimonial et muséographique au moyen d'un traitement numérique et qui est donc un objet d'étude devient simultanément un outil de cette recherche.

La démarche employée durant le projet peut s'apparenter à la méthode essais-erreurs d'un projet de recherche et développement. En effet, l'état de l'art dans ce domaine a mis en lumière le manque de processus pérennes concernant la capitalisation et la valorisation des connaissances autour des objets du patrimoine. Notre méthodologie s'appuie d'ailleurs sur des travaux de recherche, initiés par le concept d'archéologie industrielle avancée proposé dans la thèse de Florent Laroche en 2007. > p. 56

## Archéologie industrielle avancée. Un outil pour la recherche historique

Comment faire une étude complète pour établir un modèle qui sera une base de recherche du point de vue documentaire et une base de valorisation pour le public du musée ? Il s'agit de parler des relations du port à la ville et au fleuve, tant du point de vue de l'urbanisme, de l'architecture, de l'étude formelle, que du point de vue des techniques et des réseaux. Les objets et les échelles sont en effet multiples : usines, ateliers, lieux de production pour ce qui serait du « monographique », mais aussi, de manière plus ambitieuse, compréhension et explication des circulations et des réseaux, du point de vue plus large du « territoire » et de l'histoire des « paysages ».

Le projet « Nantes 1900 » est une des initiatives collectives menées par les équipes de recherche dans la continuité d'un travail conduit depuis plusieurs années en vue de renouveler les approches en histoire des techniques, en particulier autour du patrimoine industriel et de sa valorisation. Partie à l'origine de machines anciennes et de leur « rétro-

conception », elle débouche ici sur une problématique spatiale plus large à l'échelle d'un territoire de ville, centré sur ce paysage technique constitué par le port.

La modélisation numérique de la maquette permet l'analyse historique de la situation industrielle et portuaire du début du xx<sup>e</sup> siècle en prolongement de la ville ancienne. Au-delà d'une simple « photographie » en trois dimensions, il s'agit de réaliser la conjugaison informatique des données topographiques et documentaires qui autorisera à terme l'interprétation des grandes unités du paysage industriel, portuaire et maritime dans leurs logiques de circulation et d'échange.

Du point de vue de la méthodologie globale, avant même de définir la finalité muséographique du dispositif, il s'agit d'établir une base de données documentée. C'est le dossier d'œuvre patrimonial numérique ; il permet d'envisager de multiples finalités (public du musée, experts, scolaires,

internet...) Un des aspects importants de ce projet concerne ainsi la création du modèle de référence de ce dossier d'œuvre numérique (Digital Heritage Reference Model ou DHRM) qui supporte la connaissance, pouvant inclure un modèle 3D scanné et une compilation des connaissances diverses.

Le système de gestion des données supportera leur hétérogénéité (texte, image, son, vidéo, etc.) et en proposera une indexation propice à la recherche « sémantique ». Le projet est en effet de créer une maquette virtuelle dynamique signifiante, pas simplement une belle animation. Afin d'y parvenir, les outils de conception et de simulation de l'ingénierie sont détournés du monde de l'industrie à des fins, cette fois-ci, patrimoniales. L'idée principale développée est donc de traiter l'utilisation des technologies virtuelles pour conserver et valoriser l'héritage patrimonial. Cette méthodologie globale est appelée « archéologie industrielle avancée ».

La méthodologie pour valoriser un vieil objet technique a été validée et expérimentée par plusieurs cas d'études. Dans le cadre de tels projets, il s'agit de démontrer que cette approche peut

être utilisée pour étudier les machines anciennes, les sites industriels ou les complexes techniques à grande échelle, comme ici le port de Nantes.

Le processus global est le suivant: la première étape est la numérisation de l'objet physique et la capitalisation des connaissances relatives à la machine ou, ici, la maquette étudiée. Puis, à l'aide des technologies de réalité virtuelle, on procède à la valorisation de connaissances.

Les possibilités du produit numérique final comme thesaurus virtuel utilisé pour l'enseignement ou les experts académiques, la reconstruction, la valorisation du musée... sont nombreuses. Il est donc nécessaire de rassembler et d'organiser un maximum de connaissances au commencement du projet, ce qui exige une structure intermédiaire contenant toute l'information. C'est un nouveau document virtuel qui informe l'objet patrimonial. Il est constitué d'une base de données virtuelle permettant d'organiser les connaissances impliquées.

Le modèle de référence patrimonial numérique (DHRM) est plus qu'une simple base de données.

Il doit être capable de supporter l'information passée d'un objet spécifique, l'information contemporaine du même objet et les relations entre ces deux types d'informations passées et présentes.

L'ensemble de la démarche implique une collaboration forte entre les acteurs issus de formations différentes. Chaque discipline apporte son expertise et bénéficie des fruits de cette méthodologie pour ses besoins spécifiques. Historiens, ingénieurs (de tous domaines), conservateurs et autres professionnels apportent ainsi leur contribu-

tion au service d'un outil de capitalisation commun du patrimoine culturel.

F. L.

Cette expérience pluridisciplinaire et transversale a fait appel aux compétences en histoire des techniques et patrimoine industriel du Centre François Viète (EA 1161), à celles de l'UFR histoire et histoire de l'art de l'université de Nantes et du CRHIA (Centre de recherches en histoire internationale et atlantique — EA CNRS 1163), au point de vue de l'étude historique et documentaire. Elle mobilise aussi des compétences techniques issues des sciences pour l'ingénieur de l'École Centrale de Nantes et de l'école Polytech'Nantes à l'université, en lien avec les laboratoires IRCCyN (Institut de recherches en communications et cybernétique de Nantes — UMR CNRS 6597) et LINA (Laboratoire d'informatique de Nantes Atlantique — UMR CNRS 6241), au point de vue de la numérisation, de l'informatique, de la réalité virtuelle...





## Un projet étudiant et interdisciplinaire

Il s'agit d'un projet réalisé essentiellement par des étudiants répartis en plusieurs groupes de travail, sous le contrôle scientifique et pédagogique de enseignants-chercheurs de chaque spécialité et avec l'intervention de professionnels. Le projet a ainsi mobilisé plus de cent vingt personnes dans une grande interdisciplinarité. Une grande partie des travaux effectués, qu'ils soient dans les domaines de la mécanique, la mécatronique, l'automatisme, l'informatique, les mathématiques, l'histoire ou le patrimoine a été réalisée dans le cadre de projets étudiants. Il s'agit là d'une nouvelle forme d'appréhension de notre histoire par les nouvelles générations, où elles ne sont plus passives dans un musée mais réellement actrices de la vie de nos objets patrimoniaux. Ainsi, elles acquièrent une culture sociale, économique, technique et scientifique qu'aucun enseignement n'arriverait à leur transmettre. Cette pratique d'ingénierie à base de pédagogie active est la force de ce type de projets patrimoniaux interdisciplinaires.

Les domaines de compétences mis en jeu dans le cadre de ce projet nécessitent une collaboration forte entre des équipes pluridisciplinaires : le génie mécanique (numérisation 3D); l'informatique appliquée (traitement des modèles 3D, bases de données); la géomatique (géo-référencement); l'histoire des sciences et techniques (recherches d'archives, validité scientifique); l'ergonomie et le graphisme (visualisation d'informations); la conservation des œuvres.

Chacun apporte les méthodes et les pratiques de son expertise et de sa connaissance spécifique. L'interdisciplinarité s'est donc imposée à double titre dans ce projet. D'une part, en tant qu'objet, le projet mobilise des chercheurs et des professionnels de domaines d'expertise suffisamment distincts pour que la mise en œuvre de l'interdisciplinarité constitue le fond même du projet; il est donc nécessaire d'identifier et d'analyser les modalités de l'interdisciplinarité et de la transversalité qui exercent une fonction fondamentale dans la structuration de l'ensemble des méthodes développées au sein de ce projet pluridisciplinaire. Par ailleurs, en tant qu'outil, l'aspect novateur d'un tel projet pluridisciplinaire et transdisciplinaire, tant dans la démarche globale que dans les résultats obtenus, constitue l'une des principales particularités; il a en effet pour ambition d'entraîner dans cette démarche analytique les enseignants, les chercheurs et les étudiants en sciences de l'ingénieur du campus nantais aux côtés des sciences humaines et sociales, des professionnels de la muséographie et de la valorisation du patrimoine scientifique et technique.

Un projet collaboratif, évolutif, ouvert

L'un des enjeux majeurs du projet concerne les possibilités d'évolution du dispositif. En effet l'approche retenue, basée sur les contenus, offre deux avantages. Elle permet de s'abstraire des avancées technologiques, même si le dispositif de médiation envisagé doit rester opérationnel durant plusieurs années, et favorise une évolutivité collaborative dans l'esprit des données ouvertes, afin d'assurer l'appropriation du

patrimoine par tous. Ainsi l'approche résolument ouverte du projet, aussi bien en termes de contenu que de technologies, vise à encourager les nouvelles formes de relation avec le patrimoine. Ce dispositif permet une collecte numérique d'informations, d'images, de témoignages, qui l'enrichira après validation scientifique.

La conception de base du dispositif, séparant résolument la base de connaissances de l'interface de consultation, a deux objectifs : assurer l'évolution des contenus du dispositif en fonction des recherches et de connaissances nouvelles, ainsi que la possibilité de développement d'autres interfaces (mobiles, géo-localisées, de réalité augmentée, etc.) ayant recours à la même base de connaissances.

Le but du projet s'articule également autour des technologies mises au service du patrimoine. La numérisation en 3D de la maquette du port de Nantes en 1900 participera à sa valorisation ultérieure. En effet, un tel projet ne sera jamais « terminé » et pourra par la suite proposer par exemple les intérieurs reconstitués de certaines entreprises, des machines en fonctionnement... Dans cette perspective, la base de données conçue sera immense et constituera une référence pour les chercheurs. Ces outils technologiques sont utilisés pour valoriser la maquette, du point de vue de sa visibilité et de sa compréhension par le public.

La réflexion doit maintenant se poursuivre sur les thèmes transversaux (comme la fabrication du biscuit BN, le lancement d'un navire, le recensement des salariés des A.C.B., les dommages de la crue de 1910, la création du plan-relief par Duchesne, etc.).

Une réflexion importante doit également porter sur l'utilisation des nouvelles technologies et du modèle 3D au sein du dispositif mis en place, pour valoriser cet objet.

**Le dispositif  
numérique en salle 21**





## Les objectifs du projet Nantes 1900

Dès le départ, le projet Nantes 1900 s'est fixé un certain nombre d'objectifs : concevoir une interface de visualisation de données en relation avec le territoire couvert par la maquette qui soit simple d'utilisation, innovante, ludique et qui réponde aux objectifs de médiation du musée ; approfondir et capitaliser les connaissances sur l'objet et le territoire dans la période 1900-1920 ; pérenniser ce travail de recherche en rendant la méthodologie réutilisable sur d'autres projets de nature différente. Il fallait aussi permettre l'exploitation des connaissances sur d'autres interfaces hors du musée, rendre cette application facilement adaptable à d'autres objets patrimoniaux, notamment dans le musée, et faciliter la consultation des données sur d'autres interfaces, notamment mobiles.

Il s'agissait de créer un dispositif muséographique destiné à la valorisation et à la médiation culturelle. Le musée a choisi d'enrichir la présentation de la maquette du port de Nantes en 1900 à l'aide d'outils interactifs, pédagogiques et technologiques. Le dispositif permet de mieux comprendre la maquette, en croisant les données historiques avec un outil multimédia. Le musée met à disposition des visiteurs de grands écrans tactiles situés devant la maquette, permettant, au moyen d'une interface spécifique, de naviguer de façon intuitive au sein d'un corpus de documents. Le système fournira par ailleurs un retour lumineux sur la maquette, dépendant des actions de l'utilisateur.

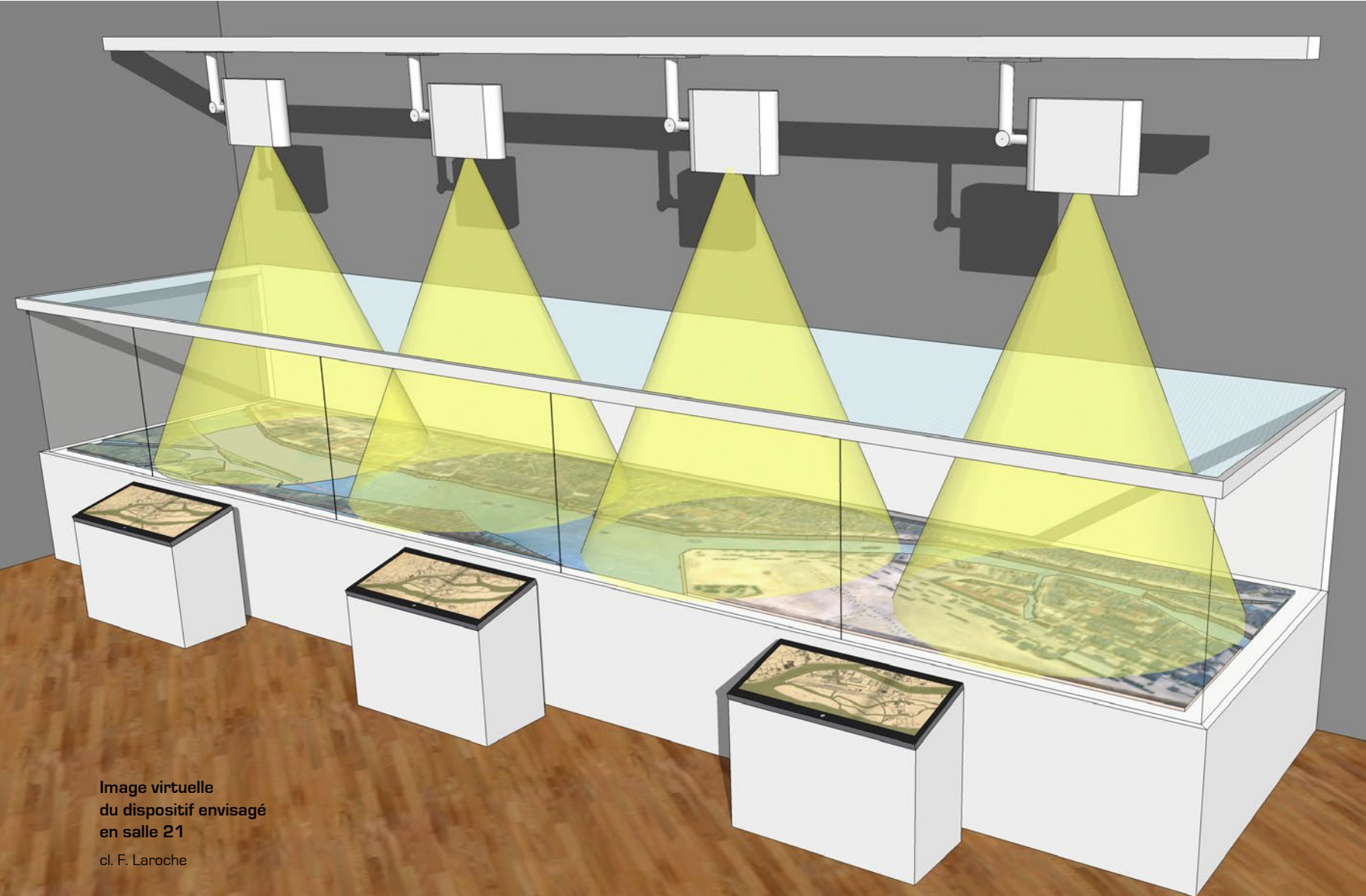


Image virtuelle  
du dispositif envisagé  
en salle 21

cl. F. Laroche

Une grande partie du projet a notamment été consacrée à la définition des modes de navigation et de manipulation des données (niveaux sémantiques d'information). L'application permet à l'utilisateur d'accéder à des niveaux d'information différents selon la zone sélectionnée (bâtiment, groupe de bâtiments ou zone géographique étendue). Mais pour le visiteur, ces niveaux d'information sont accessibles de manière totalement intuitive, sans requête complexe à formuler. Il lui suffit de toucher une zone sur l'écran pour faire apparaître les données (textes, photos et ressources diverses).

Des scénarios de visualisation spécifiques ont été programmés par l'équipe de médiation du musée, dans l'optique d'appuyer le discours du médiateur autour de thèmes spécifiques lors des visites guidées. Ces scénarios sont accessibles à l'aide d'un simple badge RFID.

Toutes ces problématiques ont vocation à créer une expérience innovante pour le visiteur et ainsi apporter une réelle valeur ajoutée à l'objectif de médiation du musée. Il s'agit en effet de penser de nouvelles formes de visualisation des connaissances autour du patrimoine, dans un souci de mémorisation des informations par le public.

Du point de vue muséographique, le cahier des charges du système s'articule autour de plusieurs contraintes générales définies par le musée. L'interface entre l'utilisateur et le dispositif doit être simple, pratique, intuitive et attractive; d'un point de vue ergonomique, la prise en main et l'accessibilité doivent être simplifiées pour tous les visiteurs du musée. Un lien fort entre l'objet réel et sa représentation sur les écrans

doit être maintenu ; l'objet reste au centre du projet de médiation. Le dispositif ne doit pas nécessiter l'utilisation de périphériques comme des casques, une télécommande ou des lunettes de vision en 3D par exemple. Le système doit pouvoir être utilisé par plusieurs personnes à la fois et, en raison de l'encombrement éventuel de la salle où se trouve la maquette au musée, les données doivent être visibles par les visiteurs ne le manipulant pas. L'ensemble du système doit être évolutif : le visiteur peut également interroger une base de données qui s'enrichit au fur et à mesure des programmes de recherche et des contributions des internautes. Le système doit être particulièrement fiable : dans un musée accueillant environ 200 000 visiteurs par an, il doit être résistant pour être opérationnel à long terme. > p. 66

## BISCUITERIE NANTAISE (BN)

L'aventure de la Biscuiterie Nantaise débute en 1896. Fondée par un groupe de négociants locaux, les débuts de l'entreprise sont difficiles, marqués par plusieurs incendies. Cependant, l'entreprise se relève et se développe avec, à sa tête, P. Cossé et A. Lotz. Construite en béton moderne, l'usine est l'une des premières de ce genre dans la région nantaise. Encore visible actuellement, la façade en briques date de cette époque.

L'usine n'a alors cessé de se développer, accumulant les médailles d'honneur dans les différentes expositions auxquelles elle participe.

En forme de triangle composé de deux étages, le bâtiment principal abrite les ateliers de fabrication au rez-de-chaussée et au premier étage, tandis que l'expédition et les stocks sont installés au second. À partir de 1910, les étages sont reliés entre eux par une grue électrique, deux



Visualisation de la notice « Biscuiterie Nantaise » sur une dalle tactile du dispositif

(voir p. 68-69)



## Évaluation des publics

Les dispositifs interactifs sont souvent développés par des ingénieurs, des scientifiques, puis testés auprès du public. Une dynamique très intéressante dans les musées est d'engager des évaluations d'usages lors de tests pendant la conception. De même, il est conseillé de consacrer quelques semaines avant le bouclage aux rectifications et aux réajustements nécessaires sur le dispositif. Cela permet de repérer des détails fonctionnels ou non et d'apporter des modifications très utiles.

Dans le cadre de l'évaluation des publics, il faut faire attention aux interactions de pratiques, que ce soient des pratiques culturelles, des pratiques de communication, des pratiques informatiques. Ce sont des éléments importants dès lors que l'on s'intéresse aux usages du public. Il faut aussi prendre en compte le fait que les utilisateurs n'ont pas toujours envie de faire des efforts et que leur temps de visite peut être plus ou moins limité. La question du parcours du visiteur est donc importante à prendre en compte.

L'observation des interactions dans les groupes de visiteurs est aussi fondamentale. Toutes ces observations vont permettre de faire en sorte qu'un dialogue s'engage entre le public et le musée. Cela permet également une communication entre l'extérieur et l'intérieur, grâce aux dispositifs personnels des visiteurs, ce qui est un atout pour toucher ceux qui ne viennent pas au musée, ceux qu'on appelle le « non-public ».

La médiation numérique permet de les engager dans la vie du musée sans les faire venir directement sur place. L'usage de l'internet améliore l'accessibilité du musée à ce public en créant une relation avec lui via le web, qui introduit une forme de familiarité le rendant plus accessible. Cela aide ce public à dépasser ses représentations du musée, du patrimoine, de l'histoire, parce qu'il y a des amateurs profanes, éclairés, des experts, des amateurs experts qui sont passionnés d'histoire, ou d'art, ou de science, de sciences et techniques. Il faut prendre tout cela en compte lorsque l'on

crée un dispositif avec un accès Internet. Il y a une intelligence d'être public, d'être visiteur et d'être utilisateur, car il y a dans certains cas cette disposition à être engagé dans l'innovation, avec le musée. Quand on est dans ce contexte-là et qu'on est à l'extérieur, on porte avec nos usages une certaine représentation du patrimoine, du musée dans la société, même si on est « non-public ». Les publics, peu importe leur type, deviennent des partenaires du musée, ils peuvent contribuer ou non.

Les publics vont chercher à éviter les efforts, la surcharge cognitive, ils demandent des interfaces intuitives, tout en recherchant des repères et en exigeant une autonomie d'usages. « Je veux être libre, pas m'imposer, mais il faut m'accompagner, là, je ne comprends pas. » Cette ambivalence des usages est passionnante et les musées doivent composer avec cela. Les publics peuvent donner l'impression de vouloir tout et son contraire car chacun va puiser dans son expérience, dans sa pratique de la technologie ou du culturel. Dans l'interaction immédiate des usages à l'extérieur ou à l'intérieur du musée, ils vont avancer en cherchant des repères et en les discutant.

En réalité les différents publics ont aussi une posture très réflexive à l'égard de leurs propres usages. Le musée doit donc être à l'écoute pour pouvoir en tirer profit et enseignement, puis faire évoluer ses dispositifs, si nécessaire.

Plutôt qu'une totale collaboration entre musée et publics, le dialogue peut s'établir en termes d'interprescription. Les médiations numériques sont importantes pour subtilement suggérer, faire avancer et proposer des récits évolutifs en fonction des expériences, des parcours, des interactions, du sens.

**G. V.**



## Capitaliser des connaissances

Une base de données informatique a été mise en place afin de pouvoir capitaliser l'ensemble des connaissances historiques relatives au territoire représenté par la maquette. Ces connaissances s'appuient sur un corpus documentaire établi par l'équipe du Centre François Viète de l'université de Nantes sous le contrôle scientifique du musée et contenant notamment plusieurs centaines de sources iconographiques (cartes postales, photographies, estampes...) La constitution de cette base de données a permis de développer les connaissances sur la maquette du port de Nantes en 1900. L'équipe s'intéresse aussi aux travaux sur les fabricants locaux, l'introduction des techniques et celle des gestes professionnels, tout comme à la question des archives orales et des gestes scientifiques, etc.

La base de connaissances mise en œuvre exploite des technologies informatiques de type base de données (Postgres, PostGIS — outils libres respectivement sous licence de type BSD et GPL), ainsi que des recherches fondamentales dans le domaine de l'ingénierie des connaissances (ontologies).

Cette base de données a été conçue en collaboration avec des établissements d'enseignement supérieur de la région nantaise — Polytech'Nantes (université), École Centrale de Nantes — pour répondre à ce besoin d'un modèle de connaissances participatif et évolutif. Les données de la base peuvent être sous différentes formes:

des données « objet » symbolisant des entités géo-référencées présentes sur la maquette physique, ou des entités conceptuelles liées aux entités géo-référencées, ainsi que des données « ressources » (textuelles ou graphiques).

Chaque objet ou ressource est présent dans la base de données sous la forme d'une « notice »\* dont la structure ne varie que pour les différentes ressources et entre les objets et les ressources. Ces données sont liées entre elles par des « relations », c'est-à-dire que chaque objet ou ressource est lié à différents autres éléments par des relations spécifiques (relation directe — entre deux entités physiques — ou indirecte — entre une entité physique et une entité conceptuelle) permettant de développer le discours au moyen de liens thématiques, géographiques, temporels.

Un des objectifs majeurs du projet est d'assurer une évolution dynamique du contenu, via la participation de publics experts (recherches d'archives) ou non-experts, permettant ainsi de compléter les connaissances disponibles autour de cette maquette historique. C'est pourquoi la structure du modèle de cette base de connaissances autorise l'ajout de données hétérogènes, sous la forme de notices, par le biais d'une interface web. L'objectif, à terme, est de rendre cette base accessible sur le web, permettant à tout un chacun d'ajouter de l'information sous contrôle d'experts historiques. Cet enrichissement permettra ainsi de capitaliser l'ensemble des connaissances existantes sur l'objet et les thématiques qu'il aborde, d'étoffer le dispositif muséologique, et d'agir comme un vecteur de diffusion et de participation collective autour de notre histoire. > p. 72

\* Voir deux exemples p. 68-71.







## Les notices, deux exemples

### La Biscuiterie Nantaise

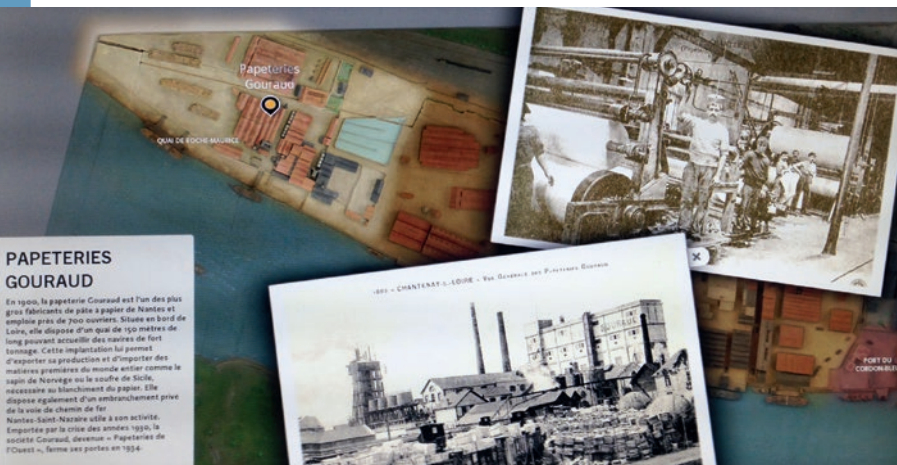
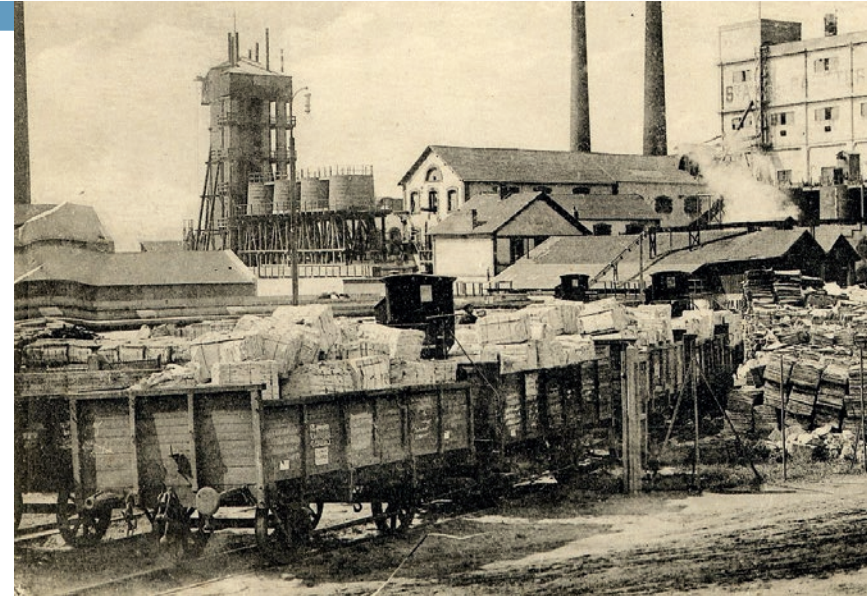
L'aventure de la Biscuiterie Nantaise débute en 1896. Fondée par un groupe de négociants locaux, les débuts de l'entreprise sont difficiles, marqués par plusieurs incendies. Cependant, l'entreprise se relève et se développe avec, à sa tête, P. Cossé et A. Lotz. Construite en béton moderne, l'usine est l'une des premières de ce genre dans la région nantaise. Encore visible actuellement, la façade en briques date de cette époque. L'usine n'a alors cessé de se développer, accumulant les médailles d'honneur dans les différentes

expositions auxquelles elle participe. En forme de triangle composé de deux étages, le bâtiment principal abrite des ateliers de fabrication au rez-de-chaussée et au premier étage, tandis que l'expédition et les stocks sont installés au second. À partir de 1910, les étages sont reliés entre eux par une grue électrique, deux ascenseurs électriques et deux monte-charge. Un étage supplémentaire sera rapidement construit, avec de larges ouvertures horizontales, afin de répondre aux besoins de la production. Quant à l'annexe, elle sert d'écurie, de remise, mais aussi d'atelier de réparation. Les industries alimentaires, et les biscuiteries en particulier, emploient essentiellement une main-d'œuvre féminine, issue des campagnes environnantes. À la veille du premier conflit mondial, l'usine emploie 320 personnes et connaît une grande prospérité. Dans les années 1920-1930, elle fabrique des biscuits populaires à destination d'une clientèle modeste: le Casse-Croûte BN, créé en 1922, puis Choco cas'croûte en 1933, futur Choco BN. Durant les deux guerres mondiales, elle est réquisitionnée pour produire du pain de guerre pour les armées, le « *hard bread* ». Dans les années 1960, une nouvelle entité de production est construite à Vertou. L'usine de la place François II, fermée en 1981, est remplacée par des logements et un bâtiment de la poste. Depuis 1988, la BN appartient au groupe United Biscuits.



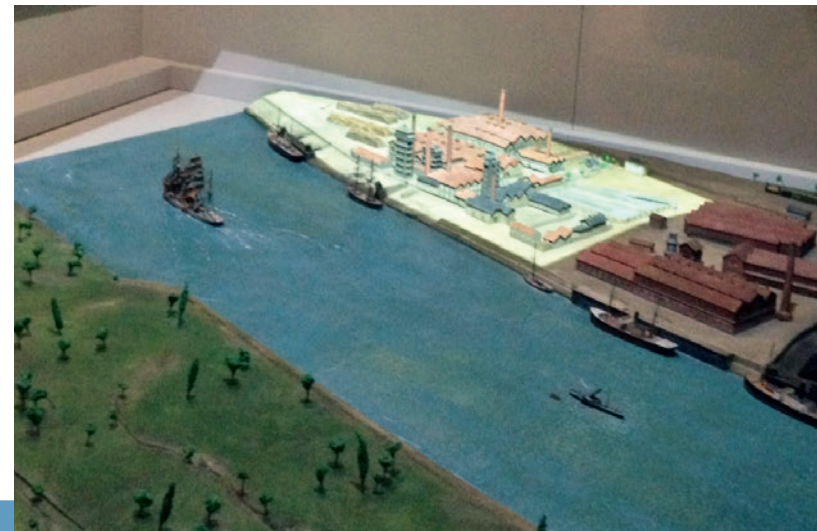
## La papeterie Gouraud

En 1900, la papeterie Gouraud est l'un des plus gros fabricants de pâte à papier de Nantes et emploie près de 700 ouvriers. Située en bord de Loire, elle dispose d'un quai de 150 mètres de long pouvant accueillir des navires de fort tonnage. Cette implantation lui permet d'exporter sa production et d'importer des matières premières du monde entier comme le sapin de Norvège ou le soufre de Sicile, nécessaire au blanchiment du papier. Elle dispose également d'un embranchement privé de la voie de chemin de fer Nantes Saint-Nazaire utile à son activité. Emportée par la crise des années 1930, la société Gouraud, devenue « Papeterie de l'Ouest », ferme ses portes en 1934.



### PAPETERIES GOURAUD

En 1900, la papeterie Gouraud est l'un des plus gros fabricants de pâte à papier de Nantes et emploie près de 700 ouvriers. Située en bord de Loire, elle dispose d'un quai de 150 mètres de long pouvant accueillir des navires de fort tonnage. Cette implantation lui permet d'exporter sa production et d'importer des matières premières du monde entier comme le sapin de Norvège ou le soufre de Sicile, nécessaire au blanchiment du papier. Elle dispose également d'un embranchement privé de la voie de chemin de fer Nantes-Saint-Nazaire utile à son activité. Emportée par la crise des années 1930, la société Gouraud, devenue « Papeterie de l'Ouest », ferme ses portes en 1934.







Phot. G. VASSELLIER, Nante.





## Élaborer une nouvelle méthodologie transdisciplinaire

Le projet Nantes 1900 vise aussi, outre la conception d'un dispositif muséographique destiné à la médiation culturelle, à concevoir une méthodologie structurée et reproductible dédiée à la valorisation scientifique d'objets patrimoniaux.

Le projet a pour ambition d'analyser le rôle d'un tel traitement dans la construction d'un savoir commun entre le domaine scientifique des ingénieurs et la connaissance empirique d'une expérimentation appliquée d'un point de vue de la valorisation muséographique. L'intention est d'entraîner dans cette démarche analytique les enseignants-chercheurs et les étudiants dans les domaines des sciences humaines et des sciences de l'ingénieur, ainsi que les professionnels du patrimoine et de la valorisation muséographique. Il s'agit donc d'identifier et d'analyser les modalités spécifiques et complexes des transferts et des constructions de représentations communes entre la communauté scientifique des ingénieurs, des historiens et des professionnels en muséographie. Le réseau élaboré dans le cas de ce projet constitue un cadre privilégié pour étudier les relations complexes entre science et technique, du point de vue du rôle des méthodes, des connaissances formelles et des pratiques expérimentales, mais aussi des modèles et des outils utilisés chez les techniciens et les ingénieurs. > p. 76



Le quartier  
du Bas-Chantenay  
Les charbons Blanzay  
La rizerie Levesque

## Humanités numériques et patrimoine

Le projet Nantes 1900 s'inscrit dans une démarche scientifique interdisciplinaire renouvelée. Il se situe au cœur des évolutions contemporaines du numérique et participe ainsi, entre les sciences humaines et sociales et les sciences pour l'ingénieur, à un ensemble nouveau d'objets de recherche.

Les humanités numériques sont un champ de la connaissance qui s'est ouvert depuis le milieu des années 2000 dans le domaine des sciences humaines et sociales et qui concerne toutes les disciplines. Il s'agit bien d'un mouvement d'ensemble, même si certaines disciplines ont été plus précurseurs que d'autres sur les usages informatiques : l'histoire par exemple a commencé relativement tôt à se mettre en marche, en particulier avec l'utilisation déjà ancienne des statistiques complexes. C'est une sorte de réaction épistémologique, c'est-à-dire une évolution de la réflexion sur les méthodes et les objets de la démarche scientifique, face à la numérisation des données et à l'informatisation.

La base des humanités numériques, c'est le contrat qui se joue entre les sciences humaines et sociales (SHS) et l'ingénierie. Il s'agit d'un rapport basé sur l'interdisciplinarité et un enrichissement de réciprocité. Chacun avance avec ses questions, ses problématiques ; il y a des traductions en termes d'ingénierie, tandis que des questions sont reformulées du côté des SHS. C'est ce qui en fait la caractéristique, l'intérêt mais aussi toute la complexité.

Interdisciplinarité. Des questions se posent encore. Il s'agit d'une communauté encore très floue et plurielle. Les chercheurs essaient actuellement de se structurer et de s'organiser, de nombreux séminaires sur les humanités numériques sont mis en place, à l'échelle des régions Bretagne et Pays-de-la-Loire, comme au niveau national.

Un des axes fondamentaux de la réflexion réside dans la spécificité de cette démarche nouvelle : quels sont les critères qui différencient un projet



d'humanités numériques de ceux qui sont simplement de l'ordre de l'usage « simple » de l'outil informatique ? Par exemple, l'usage désormais généralisé du traitement de texte n'a pas renouvelé la procédure de mise en récit qui est celle de l'historien ou du conservateur de musée.

Le projet Nantes 1900 apporte quelques réponses. C'est une nouvelle chaîne de coopération qui s'est mise en place entre les différents chercheurs en ingénierie, en histoire ou en muséographie. Leur objectif est le même, mais chacun dans son domaine d'expertise : faire parler l'objet, rassembler et ordonner les informations pour construire le savoir et arriver à la valorisation finale. Ces opérations dans le champ des humanités numériques sont assez claires et symptomatiques. On commence par la numérisation. On classe les objets et on les décrit. Puis on crée des métadonnées pour pouvoir les organiser. Une des problématiques à résoudre consiste dans la navigation à l'intérieur de ces données et leurs croisements.

On aboutit ainsi à un cadre cognitif, mais aussi expérimental. La culture et la connaissance passent en effet par l'expérience, que ce soit pour le chercheur ou pour l'utilisateur dans le cadre d'un dispositif muséographique comme celui qui est proposé ici pour Nantes 1900. C'est une nouvelle forme de rapport au savoir qui est née grâce à une nouvelle conception expérimentale.

Les humanités numériques posent ainsi plus de questions qu'elles n'apportent de réponses. Il y a une accumulation de documents qui ont été travaillés par des chercheurs, des scientifiques, mais cette accumulation de documents ne construit pas l'histoire. Désormais les recherches s'orientent donc vers la question des modalités de parcours d'exploration et d'organisation des connaissances, pour se donner les moyens de créer un récit historique « augmenté » à partir d'éléments rassemblés et organisés.

**J.-L. K.**



## Perspectives...

Dans la mesure où la base de connaissances est distincte de l'interface de consultation, et où les choix technologiques ont privilégié le modèle Open Source, il sera aisé de mettre en place ce dispositif sur d'autres maquettes présentes dans le musée, voire de « détourner » l'application pour l'utiliser dans l'exploration d'autres objets qu'une maquette. Il suffira dans ce cas de placer une image et d'associer à certaines zones de cette image des notices issues de la base de connaissances. Cette possibilité permet au musée de réfléchir au déploiement de dispositifs pérennes et évolutifs plutôt que d'investir dans des applications figées qui se retrouvent obsolètes après quelques années.

Par ailleurs, le principe de séparation entre les données et leur interface de visualisation ouvre un autre champ de possibles pour la consultation des données en dehors du musée. La base de connaissances est consultable sur internet, mais d'autres interfaces de visualisation des données sont envisageables : applications mobiles géo-localisées ou non, intégration dans d'autres bases de données, etc.

Le projet Nantes 1900 ouvre ainsi la perspective de développements ultérieurs, puisque l'application est réutilisable sur d'autres objets patrimoniaux et que les connaissances seront exploitables sur d'autres interfaces hors du musée.

**C. C., L. D'h., B. H., J.-L. K., F. L.**



Le quartier  
de l'île Gloriette  
Les Magasins généraux





La Prairie-au-Duc  
La gare de l'État  
Les usines chimiques et métallurgiques



Façades d'un quai  
de l'île Gloriette





Le quartier de Chantenay  
L'entreprise Amieux Frères







Le quartier de Chantenay  
La carrière de Miséry  
Les entrepôts de  
la chambre de commerce





**Ont collaboré à ce projet :**

### **OUVRAGE**

#### **> TEXTES :**

Christophe Courtin, Laurence D'haene, Krystel Gualdé, Bertrand Guillet, Benjamin Hervy, Jean-Louis Kerouanton, Florent Laroche, Antoine Pouponneau, Geneviève Vidal

#### **> CRÉDITS IMAGES :**

Château des ducs de Bretagne — Musée d'histoire de Nantes Archives municipales de Nantes Collections particulières (Le détail des crédits attachés à chaque image figure dans la base de données du projet Nantes 1900.)

### **PROJET NANTES 1900**

Le projet Nantes 1900 a été initié par le Château des ducs de Bretagne — Musée d'histoire de Nantes en collaboration avec le Centre François Viète d'épistémologie, histoire des sciences et des techniques (université de Nantes) et l'IRCCyN (équipe IS3P, École Centrale de Nantes). Il n'aurait pas été possible sans le soutien de Capacités SAS, filiale de l'université de Nantes, ni la participation des différentes équipes pédagogiques des composantes de l'université (UFR Histoire, histoire de l'art et archéologie, Polytech'Nantes, UFR Sciences et techniques) ainsi que de celles de l'École Centrale de Nantes.

#### **> COMITÉ DE PILOTAGE :**

Christophe Courtin, Aurélie De Decker, Laurence D'haene, Krystel Gualdé, Bertrand Guillet, Jean-Louis Kerouanton, Florent Laroche

#### **> CO-CONCEPTION — DÉVELOPPEMENT :**

Dev'O Cité - Arnaud Wael  
Orthophotographie maquette : Gauthier Havet

#### **> INTÉGRATION :**

XNS : Xavier Nicolas  
Mobilier : Qualispace  
Intégration matériel : Axians

#### **> REMERCIEMENTS :**

François Duchesne, Olivier Ménard, Nicolas Quellec

#### **> ÉTUDIANTS :**

Peter Adib, Elsa Arrou-Vignod, Maëlle Autret, Clémence Beaufretton, Felipe Benincasa, Éric Berthe, Arthur Bonnet, Jérémy Boschel, Mehdi Bouayad, Victor Bouhot, Nicolas Bouillon, Camille Bouquet, Capucine Bracq, Sébastien Bro, Céline Brulé, Oliver Catry, Charles Croz, Henri Der Sarkissian, Halvard Douaud, Julie Dutto, Younes Ennajjar, Tayib Faraj, Maud Ferrer, Antoine Filhol, Charlène Fleury, Julsonne Gandon, Clément Gashet, Antoine Gersant, Guillaume Goguelin, Anne Guiguin, Maxime Hannedouche, Benoit Hervé, Mengjia Hu, Luc Jallerat, Natacha Javalet, Feifei Jing, Antoine Josnin, Marie Kerouanton, Boris Lam, Ellena Le Breton, Thibaut Le Calloch, Marie-Élise Lecoq, Daniel Lefèvre, Quentin Lemée, Paul-Yves Lucas, Sébastien Malkowiak, Clotilde Marie d'Avigneau, Edgar Medina Lara, Vincent Meunier, Omar Mimet, Amélie Mollereau, Vincent Monier, Dimitri Moreau, Pierre-Alexandre Nativel, Grégoire Onillon, Gaël Paillard, Dorian Pasturel, Étienne Peillard, François Pérez, Antoine Pouponneau, Hannah Rawcliffe, Pierre Reverdy, Valentin Roger, François Sarrazin, Coralie Sauvaget, Didier Serveille, Aurore Tarisse, Cédric Télégonne, Lucie Thourault, Marc Tremsal, Nicolas Vaucelin, Siji Wu, Imad Zidane

#### **> DOCTORANTS — POSTDOCTORANTS :**

Benjamin Hervy (thèse CIFRE)  
Sophie Jourdin

#### **> ENSEIGNANTS-CHERCHEURS :**

Alain Bernard, Cyril Carré, Éric Friot, Vincent Gouret, Yannick Graton, Jean-Louis Kerouanton, Florent Laroche, Guillaume Moreau, Jean-Marie Normand, Fabien Picarougne, Guillaume Raschia, Myriam Servières, Vincent Tourre

#### **> MUSÉE D'HISTOIRE DE NANTES — LE VOYAGE À NANTES**

Élodie Allard, Aurélien Armide, Candice Assouad, Marie Baranger, Aude Beltzung, Séverine Billon, Anne Bouillé, Capucine Bracq, Jean-Yves Calbo, Claire Cauchy, Aurore Clément, Gaëlle Corbin, Christophe Courtin, Aurélie De Decker, Michel Del Pino, Dominique Denis, Laurence D'haene, Philippe Dugué, Gwénaél Evenou, Steven Gallais, Karine Garcia-Lebailly, Krystel Gualdé, Alain Guillard, Bertrand Guillet, Angélique Hambleton, Fabien Laidin, Évelyne Le Magadure, Amélie Mollereau, Adeline Morais Pereira, Manuel Petiteau, Antoine Pouponneau, Didier Ricordeau, Alvaro Salinas, Aurélien Tessier



**Coordination éditoriale**

Évelyne Le Magadure et Aurélien Armide, musée d'histoire de Nantes

**Supervision graphique et fabrication**

Aurélien Armide, musée d'histoire de Nantes

**Maquette, création et exécution**

Marie Kerbrat, L'École de Design Nantes Atlantique

**Photogravure**

Fabrice Nault, Pixelfab

**Impression**

Édicolor Print et Numérique, Bain-de-Bretagne

Le livre a été imprimé sur des papiers Antalis — couché demi-mat et Plike blanc —  
et composé en Eurostile et Gotham.

Sauf mention contraire, toutes les photographies de la maquette  
(vues générales et macrophotographies) ont été réalisées par Alain Guillard.

© Château des ducs de Bretagne — Musée d'histoire de Nantes



Le plan-relief du port de Nantes, présenté à l'Exposition universelle de 1900 à Paris, intègre à la fin des années 1920 les collections des musées nantais: objet promotionnel pendant deux décennies au service de l'excellence des aménagements portuaires, Il devient dès lors un objet patrimonial d'exception. Son insertion dans le parcours scénographique du musée d'histoire de Nantes amène rapidement les équipes de la conservation à porter un nouveau regard sur cette maquette, à la questionner et à imaginer une médiation pour « la faire parler ». Très vite, une collaboration entre l'université, l'École Centrale de Nantes et le musée voit le jour afin de mettre en place un outil numérique issu de champs de recherches variés. Désormais, par ce dispositif innovant mis à la disposition du public, le plan-relief devient, au-delà d'un précieux indicateur de l'histoire de l'architecture industrielle et des paysages nantais du début du xx<sup>e</sup> siècle, un support dynamique à la compréhension du territoire actuel, au cœur de la réflexion sur le devenir de Nantes et de son rapport à la Loire.

