Université catholique de Louvain (UCLouvain)
Institut de Recherche de Louvain
pour le Territoire, l'Architecture, l'Environnement Construit (LAB)
Laboratoire Théorie des systèmes en architecture (tsa-lab)
+
Université de Carthage (UCAR)
École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU)
Laboratoire de gouvernance, ambiance, et développement des villes (GADEV)
Équipe de recherche Systémique et Science de Conception (ASC)

Rétroconception paramétrique assistée par intelligence artificielle. Cas des thermes impériaux romains en Afrique du Nord

Thèse présentée par

Zaineb Naifer

en vue de l'obtention du grade de docteur
en art de bâtir et urbanisme

Bruxelles
Novembre 2025

UCLouvain

Thèse réalisée pour une part avec le soutien d'une bourse d'alternance du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique en Tunisie et pour une autre part en fonds propres.

© Presses universitaires de Louvain, 2025
http://pul.uclouvain.be
Dépôt légal : D/2025/9964/51
ISBN : 978-2-39061-652-8
ISBN pour la version numérique (pdf DIAL) : 978-2-39061-653-5
Imprimé en Belgique par CIACO scrl - n° d'imprimeur : 109525

Tous droits de reproduction, d'adaptation ou de traduction, par quelque procédé que ce soit, réservés pour tous pays, sauf autorisation de l'éditeur ou de ses ayants droits.

www.i6doc.com, l'édition universitaire en ligne

Distribution :

Diffusion universitaire CIACO (DUC)
Grand-Rue, 2/14
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique
Tél. 32 10 45 30 97
duc@ciaco.com

Université catholique de Louvain (UCLouvain)
Institut de Recherche de Louvain
pour le Territoire, l'Architecture, l'Environnement Construit (LAB)
Laboratoire Théorie des systèmes en architecture (tsa-lab)
+
Université de Carthage (UCAR)
École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU)
Laboratoire de gouvernance, ambiance, et développement des villes (GADEV)
Équipe de recherche Systémique et Science de Conception (ASC)

Rétroconception paramétrique assistée par intelligence artificielle. Cas des thermes impériaux romains en Afrique du Nord

Thèse présentée par

Zaineb Naifer

en vue de l'obtention du grade de docteur
en art de bâtir et urbanisme

Membres du jury :

Prof. Renaud Pleitinx (UCLouvain), président de jury
Prof. Damien Claeys (UCLouvain), promoteur et secrétaire du jury
Prof. Mounir Dhouib (ENAU), directeur de thèse
Prof. Nizar Ben Slimene (FSHST), membre du comité d'encadrement
Maître-assistant. Karim Bouaita (ENAU), membre du comité d'encadrement
Prof. Samia Ben Rajeb (ULB), membre extérieur
Prof. Samira Sehili (FLAHM, UMA), membre extérieur

Bruxelles
Novembre 2025

Dédicaces

Je dédie cette thèse à
mes parents, Abdel Raouf et Naila, pour leur amour inconditionnel et leur soutien constant, source de force dans chaque étape de mon parcours.
À Hassen, mon mari et mon pilier au quotidien, pour ta présence indéfectible, ton écoute et ton encouragement dans les moments difficiles.
À Zaineb, ma douce fille, dont le sourire m'a portée dans les épreuves.
Que ce travail t'inspire un jour à poursuivre tes rêves.
À mes sœurs Saida et Amina, et à mon frère Mahmoud, merci pour votre affection et votre confiance qui m'ont tant soutenue.
À mon beau-père Lotfi, dont la sagesse continue de m'accompagner.
À ma belle-mère Khiriya, pour m'avoir accueillie avec tant de chaleur.
À Zied et Majed, mes petits neveux, ainsi qu'à mes beaux-frères Habib, Nader et Tarek, merci pour la joie et la solidarité partagées.
À Khalil et Hamdi, mes cousins et amis fidèles.
À ma deuxième famille : Mariem, Malek, Hamouda, Fehmi, Awatef, Donia — pour votre générosité et votre affection.
À ma grand-mère Khira et à ma tante Najet, que Dieu vous garde.
À la mémoire de mes grands-parents, de ma tante Radhia et de Fejra.
Je remercie la famille de Noureddine et Sabiha, qui a ouvert ses portes pour moi dans une période difficile, loin de mon pays.
À Said Soula, pour sa confiance et son soutien professionnel décisif.
À mes oncles, tantes, cousins, amis chers — Kamar, Rania, Mouna, Khansa, Ons, Zayneb, Khouloud, Nawel, Nesrine.K, Samar, Cyrine, Islem, Asma, Fatou, Delal, Omar, Achref, Haythem, Anwar, Adel, Ahmed, Wassim —
et à tous ceux qui m'aiment.

Remerciements

Il m'est difficile de traduire en quelques lignes l'ampleur de ma reconnaissance. Tout au long de cette thèse, j'ai bénéficié d'un accompagnement généreux, de conseils éclairés et d'un soutien constant qui ont largement dépassé les mots.

Je remercie sincèrement mes directeurs de thèse, Damien Claeys, professeur à l'Université catholique de Louvain (UCLouvain), et Mounir Dhouib, professeur à l'École nationale d'architecture et d'urbanisme (ENAU), pour la confiance qu'ils m'ont accordée, la rigueur de leur encadrement et la richesse de leurs orientations scientifiques.

Ma profonde gratitude va également à Karim Bouaita, maître-assistant à l'ENAU, dont le soutien constant m'a accompagnée tout au long de ce parcours exigeant. Je remercie Nizar Ben Slimene, docteur à la Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis (FSHST) et chargé des recherches à l'Institut national du patrimoine (INP), pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée. Louis Roobaert, architecte et doctorant à l'UCLouvain, a également contribué de manière déterminante à ce travail, et je lui en suis très reconnaissante.

Je tiens à adresser mes remerciements chaleureux aux enseignants qui m'ont soutenue dans les moments les plus complexes, qu'ils soient scientifiques ou administratifs, en particulier Fakher Kharrat, Feten Houssein, Hayat Badrani, Hind Karoui, Alia Ben Ayed et Mouna Chairi.

Enfin, je remercie le professeur Renaud Pleitinx d'avoir accepté la présidence du jury, ainsi que les professeures Samia Ben Rajeb et Samira Sehili pour leur participation à l'évaluation de ce travail.

Table des matières

Dédicaces **5**

Remerciements **6**

Table des matières **vii**

INTRODUCTION. ÉLÉMENTS DE LA PROBLÉMATIQUE **xi**
Thématique : rétroconception des thermes impériaux romains xi
Choix de sujet : contextualisation de thématique xiii
Constats xv
Questions de la recherche xv
Hypothèses xvi
Objectifs xvi
Méthodologie : une approche innovante entre *paramétrisme* et intelligence artificielle pour une rétroconception des thermes romains xvii
Apport de la thèse xix
Plan de la thèse xx

1 PROCESSUS DE RÉTROCONCEPTION PATRIMONIALE **23**
1.1 La rétroconception architecturale face aux notions patrimoniales 23
1.2 Analyse épistémologique de la rétroconception 25
1.3 Histoire de méthodes de rétroconception 28
1.3.1 Modèles classiques 28
1.3.2 Modularités rationnelles 30
1.3.3 Processus typologiques 32
1.3.4 Topologies paramétriques 35
1.4 Positionnement par rapport à la rétroconception 38
1.5 Des antécédents théoriques à l'implantation méthodologique 41

2 MÉTHODE ANALYTIQUE DE DÉCOMPOSITION **42**
2.1 Explication de la méthode analytique 42
2.2 Le « modèle topologique cognitif » 46
2.2.1 Les paradigmes du « modèle topologique cognitif » 47
2.2.1.1 Présentation de trois paradigmes 47
2.2.1.2 Les outils du paradigme structural analytique 48
2.2.2 Les postulats du « modèle topologique cognitif » 52
2.2.3 Applications du « modèle topologique cognitif » sur les thermes 56
2.3 Transposition à la rétroconception architecturale 58

2.4 De la compréhension du modèle topologique cognitif à son intégration dans la rétroconception 62

3 *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* (AI) 63
3.1 Fondements et domaines de l'AI 63
3.2 Définition et terminologies liés à l'AI 66
3.3 Positionnement par rapport à l'AI 68
3.4 Vers une AI explicite et supervisée pour le patrimoine 70

4 HISTOIRE ET MODALITÉS DE CONSTRUCTION ROMAINE 72
4.1 Les périodes historiques clés de l'empire romain 72
4.2 Études de modalités de construction chez les romains 77
4.2.1 Origines et influences de l'art de bâtir romain 77
4.2.2 Le cycle des matériaux dans la construction romaine 79
4.2.2.1 Les mesures prises en considération lors de la construction romaine 79
4.2.2.2 Les carrières et les lieux d'extraction des matériaux 80
4.2.2.3 Les travaux faits après l'extraction 82
4.2.2.4 Les matériaux utilisés dans la construction romaine 89
4.2.3 Les types d'*appareillage* de construction : éléments verticaux 96
4.2.3.1 Construction homogène 99
4.2.3.2 Construction hétérogène 107
4.3 Schéma relationnel des éléments constructifs 109
4.4 Articuler dynamiques historiques et matérialité constructive dans une perspective de modélisation 113

5 CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNÉES DU CORPUS 114
5.1 Typologie et principes de classification des thermes romains 114
5.2 Approche taxonomique pour la sélection du corpus 119
5.2.1 L'universalité romaine et la singularité Nord-africaine 119
5.2.2 Choix du corpus 124
5.2.3 Description et justification du choix du corpus 128
5.3 Inventaire du corpus : une transposition numérique des sources archéologiques 129
5.3.1 Corpus d'étude : Afrique du Nord 134
5.3.1.1 En Tunisie 135
5.3.1.2 En Algérie 138
5.3.1.3 En Libye 141
5.3.2 Corpus de référence : Rome 143
5.3.3 Mise en forme de l'ensemble du corpus 145
5.4 De la classification des plans à la structuration d'une base de données 147

6 GESTION DE DONNÉES DANS LE CADRE DE LA RÉTROCONCEPTION 149
6.1 La notion de donnée 149
6.2 Processus de gestion de données 151

6.2.1 Collecte des données 152
6.2.1.1 Documentation 153
6.2.1.2 Nouveaux outils d'acquisition de données 154
6.2.2 Traitement et analyse 156
6.2.3 Modélisation et traduction des données 159
6.2.3.1 Présentation de « jumeau numérique » comme outil de modélisation 159
6.2.3.2 Un système inspiré du jumeau numérique pour la rétroconception 162
6.3 Environnement numérique pour la rétroconception 163
6.4 D'une donnée brute à un environnement numérique 170

7 DÉCOMPOSITION DES THERMES 171
7.1 Principes de décomposition 171
7.2 Mise à l'épreuve de deux hypothèses génératives de l'espace 176
7.2.1 Hypothèse 1 : du plein au vide 178
7.2.2 Hypothèse 2 : du vide au plein 180
7.2.3 Évaluation croisée de deux hypothèses 182
7.3 Identification, sélection et préparation de jeu de données 184
7.3.1 Jeu de données graphiques : plan architectural 184
7.3.1.1 Classification et sélection des plans thermaux 184
7.3.1.2 Nettoyage et décomposition des plans 204
7.3.2 Inventaire de jeu de données de calcul : attribut 206
7.4 De la segmentation analytique des plans thermaux à la préparation des modèles PDSM et AICM 210

8 *PARAMETRIC DATASET MODEL* (PDSM) 212
8.1 Méthode et processus de la construction du modèle PDSM 212
8.2 Implémentation de jeux de données graphiques et des calculs numériques 213
8.2.1 Implémentation des plans dans l'environnement numérique 213
8.2.2 Conversion des données en attributs paramétriques : extraction des *features* 218
8.3 Structuration du PDSM 238
8.3.1 Un aperçu des différents types d'arborescence des données et de leurs applications 238
8.3.2 Structuration du PDSM avec les données brutes 242
8.4 D'une base de données au référentiel paramétrique 255

9 *ARTIFICIAL INTELLIGENCE COMPLETION MODEL* (*AICM*) 256
9.1 Principes de la recomposition patrimoniale 256
9.2 Algorithme général du modèle AICM 258
9.3 Processus de la construction du modèle AICM 261
9.4 Enchainement des quatre phases du processus *intelligent* 269
9.4.1 Phase A : analyse des données 270

9.4.1.1 Choix et prétraitement des données extraites du PDSM 270
9.4.1.2 Enrichissement des données d'entrainement 275
9.4.1.3 Structuration méthodologique de la phase A 276
9.4.2 Phase B : développement du modèle AICM 279
9.4.2.1 Choix de l'environnement 279
9.4.2.2 Choix de l'algorithme des modèles d'apprentissage 281
9.4.2.3 Structuration méthodologique de la phase B 286
9.4.3 Phase C : prise de décision 289
9.4.3.1 Matrice de confusion (*confusion matrix*) 290
9.4.3.2 Courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) 293
9.4.3.3 Structuration méthodologique de la phase C 294
9.4.4 Phase D : inférence causale 297
9.4.4.1 Structuration méthodologique de la phase D 298
9.5 De l'entrainement supervisé à la recomposition patrimoniale 299

CONCLUSION GÉNÉRALE 301
Démarche globale de la rétroconception 301
Principes de décomposition 302
Structuration d'un système à double modèle 305
Préparation de jeu de données 307
Examen des hypothèses 308
Entre intelligence artificielle et expertise archéologique 309
Limites identifiées 310
Perspectives et prolongements possibles 311

BIBLIOGRAPHIE 313

TABLE DES FIGURES ET DES ILLUSTRATIONS 323

TABLE DES TABLES 338

ANNEXES 342
Fiches d'enregistrement 343
Plans restitués dans la littérature scientifique 372
Fiches comparatives des thermes impériaux romains 381
Fiches d'algorithme sur Grasshopper et visualisation sur Rhinoceros3D 403

INTRODUCTION.
ÉLÉMENTS DE LA PROBLÉMATIQUE

Le chapitre introductif expose les éléments de la problématique de recherche. Il présente d'abord la thématique générale de la rétroconception appliquée aux thermes impériaux romains dans le contexte numérique. Il justifie ensuite le choix du sujet à travers une contextualisation historique et méthodologique. La réflexion se poursuit par l'énoncé des constats, des questions, des hypothèses et des objectifs qui structurent l'ensemble du travail. La méthode adoptée est ensuite décrite, en insistant sur l'articulation entre modélisation paramétrique et intelligence artificielle. Le chapitre se conclut par la présentation des apports de la thèse et de son organisation générale.

Thématique : rétroconception des thermes impériaux romains

L'histoire récente des technologies numériques témoigne d'une transformation des rapports entre l'homme, la machine et le monde, à travers la digitalisation croissante des données issues du réel. Cette mutation s'organise en plusieurs phases (Clavert & Noiret, 2013) (*cf*. Fig. 1) : (1) dans les années 1950 le développement de l'informatique s'est appuyé sur l'émergence de méthodes quantitatives et statistiques destinées à l'acquisition de données hétérogènes ; (2) à partir des années 1980, l'évolution des technologies de l'information et de la communication a élargi le champ d'application du numérique, en accompagnant la structuration de disciplines transversales telles que les nanotechnologies, les biotechnologies, l'informatique et les sciences cognitives (NBIC) ; (3) au début des années 2000, la diffusion généralisée d'internet et des dispositifs de mise en réseau a contribué à l'établissement d'une infrastructure mondiale de circulation des connaissances ; (4) aujourd'hui, la production massive de données numériques constitue l'un des principaux catalyseurs du développement de l'intelligence artificielle (*Artificial Intelligence* [AI]), souvent comparée à l'exploitation énergétique du pétrole durant l'ère industrielle. Cette transition a modifié en profondeur les méthodes de conception architecturale. Les expérimentations virtuelles menées dans les années 1990 ont progressivement cédé la place à des environnements numériques capables d'intégrer la complexité géométrique et constructive d'un projet. De nombreux édifices contemporains n'auraient pu être réalisés sans ces dispositifs computationnels. Une *culture numérique* propre à l'architecture s'est consolidée dans ce contexte, en reconfigurant la manière dont les projets sont générés, représentés et fabriqués (Benedikt, 1991; Picon, 2010; Carpo, 2013; Oxman & Oxman, 2014; Carpo, 2017; Hovestadt, 2020; Claeys, 2021a).

En parallèle de la transformation des outils de modélisation, les démarches de restauration, de valorisation et de restitution du patrimoine ont connu une évolution méthodologique. Intervenir sur un édifice ancien suppose l'exploitation structurée de connaissances multiples, issues de sources variées, souvent fragmentaires. Les méthodes numériques ne se substituent pas aux approches traditionnelles, mais les prolongent en offrant de nouveaux moyens pour enrichir les hypothèses, réinterpréter des projets inachevés, ou transférer des principes architecturaux d'un cas à un autre. L'acquisition de ces connaissances repose sur une démarche de rétroconception, apparentée au concept de *reverse engineering* [ingénierie inverse] développé dans le champ informatique pour analyser les cycles de vie des programmes (Chikofsky & Cross, 1990). Employé en ingénierie et plus particulièrement en mécanique, cette méthode consiste à « l'analyse de la structure d'un objet préexistant, pour redécouvrir les techniques d'élaboration et de fabrication ayant permis de le construire, ou dans le but d'en dévoiler les secrets, afin de l'exploiter » (Claeys & Naifer, 2022). Le préfixe *retro-* renvoie à un mouvement d'analyse orienté vers les origines d'un processus. Si le terme est récent, la pratique est ancienne : Polybe, historien grec du II^{e} siècle av. J.-C., explique l'épisode de la birème phénicienne capturée par les romains, dont la structure fut étudiée afin de reproduire et améliorer les techniques navales ennemies (Polybe, 1729). La rétroconception appliquée à l'analyse architecturale vise à retracer, de manière rétroactive, la succession d'états pour approfondir la compréhension du processus de conception ayant conduit à la réalisation d'un édifice, dont seuls des éléments partiels sont accessibles aujourd'hui (Claeys, 2023).

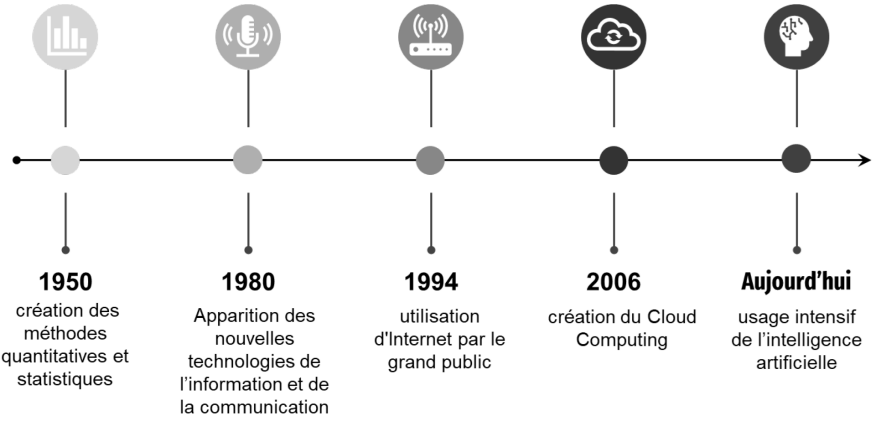


Fig. 1 – Histoire des outils numériques. (établie par l'auteure)

Le corpus architectural des thermes impériaux romains d'Afrique du Nord constitue le champ d'application de la méthode de rétroconception. Ces édifices se trouvent aujourd'hui dans des états de conservation allant de structures presque intactes à des fragments difficilement lisibles. L'altération du bâti, sous l'effet conjugué du temps, des aléas naturels et des interventions humaines, a laissé des vestiges partiels

qui ne permettent pas de « retrouver complètement l'histoire » ; cette lacune documentaire ne constitue pas un état initial, mais bien « la conséquence de tous ces dommages » (Golvin, 2005, p. 17). Leur architecture, en constante évolution entre le IIe et le IVe siècle ap. J.-C., a donné lieu à des formes complexes, difficilement saisissables à travers les sources écrites de la période antérieure (Kretzschmer, Breuer, & Ulrix, 1966). Yvon Thébert (2003) souligne la difficulté de recourir aux textes de Vitruve (1996, 2015) du Ier siècle ap. J.-C. pour analyser les thermes, les écarts chronologiques et typologiques rendant souvent ces lectures inopérantes.

En réponse aux difficultés de conservation, plusieurs initiatives ont été engagées pour stabiliser les vestiges des thermes et freiner leur dégradation. Ces efforts, portés à la fois par des institutions internationales telles que l'UNESCO et par des organismes nationaux comme l'institut national du patrimoine tunisien (INP), ont donné lieu à des projets de sauvegarde (Vérité, 1998). Malgré ces actions, l'hétérogénéité des états de préservation continue de poser un problème méthodologique et conduit à s'interroger : selon quels principes retracer l'organisation complète d'un plan thermal à partir de vestiges partiels ?

L'adoption de technologies contemporaines constitue une piste de réponse aux difficultés liées à la restitution des édifices fragmentaires. L'essor de la conception paramétrique et des méthodes issues de l'AI ouvrent de nouvelles voies pour l'archéologie et la conservation du patrimoine. Ces dispositifs permettent d'enrichir les démarches de rétroconception en facilitant le traitement de corpus et en détectant des régularités difficilement perceptibles par une approche manuelle. La démarche consiste à analyser un objet existant, souvent fragmentaire ou incomplet, afin d'en comprendre la logique de conception et d'en reconstruire le fonctionnement ou la forme initiale.

L'intégration de ces outils à des méthodologies traditionnelles ne se limite pas à un changement d'échelle ou de vitesse d'analyse : elle modifie la manière d'aborder la genèse architecturale, en introduisant une lecture *inductive* fondée sur les données. L'application de cette démarche ne se restreint pas aux thermes romains ; elle peut également être transposée à d'autres types d'édifices archéologiques, dans une perspective plus large de rétroconception.

Choix de sujet : contextualisation de thématique

Les thermes romains ont suscité un intérêt soutenu de la part des archéologues et des historiens de l'art, qui ont produit de nombreuses études sur leur typologie, leur organisation et leur rôle dans la vie urbaine antique. Comme le souligne Hélène Jouffroy, « la précision et le nombre des renseignements conservés par les inscriptions sont aussi un signe de l'importance accordée à ces travaux » (1986, p. 129). Malgré cette attention, les tentatives de reconstitution demeurent souvent incomplètes ou controversées, en raison de l'hétérogénéité des données disponibles.

Le choix de consacrer ce travail aux thermes impériaux romains résulte à la fois d'un intérêt personnel et d'un besoin méthodologique identifié dans la littérature. La diversité des états de conservation, allant des édifices bien préservés à des ruines

fragmentaires, constitue une opportunité pour expérimenter des approches associant connaissances historiques et modélisation algorithmique. Même les édifices partiellement conservés participent à l'élaboration de règles d'inférence spatiale, fondées sur les principes dégagés par la rétroconception des plans complets, et permettent ainsi de valider les hypothèses formulées.

L'étude a été initialement centrée sur un ensemble de thermes impériaux romains en Tunisie, région riche en édifices de ce type, dont l'état de conservation est toutefois hétérogène. Afin de garantir la fiabilité des observations et de limiter les *biais* liés aux lacunes documentaires, le corpus est élargi à l'ensemble de l'Afrique du Nord. Ce choix repose sur la nécessité de constituer un ensemble cohérent de plans des thermes, sélectionnés selon des critères de conservation relativement homogène et de disponibilité documentaire suffisante pour permettre une modélisation fiable.

Le choix de sujet s'inscrit dans la continuité des recherches développées au sein de l'École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis (ENAU), notamment dans le cadre d'une réflexion théorique sur l'« architecturologie systémique ». Mounir Dhouib (2004) a proposé « un modèle topologique cognitif », destiné à comprendre l'architecture à travers l'articulation de trois perspectives interprétatives : (1) le « paradigme structural » renvoie aux dimensions rationnelles et scientifiques du réel, structurées autour des pôles *analyse* et *synthèse*, selon le mouvement *décomposer/recomposer* ; (2) le « paradigme imaginal » se rattache aux domaines du symbolique et du spirituel, en opposant *matériel* et *immatériel*, par le mouvement *s'élever/descendre* ; (3) le « paradigme historique » : met en tension les notions d'*antécédent* et de *survenant*, dans un rapport dynamique d'*imitation* ou d'*innovation*. À partir de cette lecture tripartite, Dhouib (2004) formule l'hypothèse qu'un « lieu » architectural (Rénier, 1989), résulte de l'interaction entre deux composants fondamentaux : un « milieu fluide habitable » (MFH), assimilable au vide, et un « dispositif de solide d'englobement » (DSE), correspondant au plein. L'interface entre ces deux éléments engendre un espace d'équilibration des différentes parties dans un tout, désigné comme « volume virtuel en creux » (VVEC). L'explication de ces notions est reprise plus en détail ultérieurement (*cf*. chapitre 2, p.42). Le modèle topologique cognitif a ensuite été mis à l'épreuve par Karim Bouaita (2015), à travers une application à un corpus de thermes impériaux localisés entre Rome et la Tunisie. L'objectif consiste à reconstituer, à rebours, le processus de conception architecturale, en identifiant les régularités sous-jacentes à l'organisation des plans. Dans une perspective complémentaire, Imen Soussi (2019) a poursuivi ces recherches en recentrant l'analyse sur la notion de vide, abordée à partir de composants élémentaires. À l'aide d'un traitement statistique (SPSS) et d'une modélisation paramétrique associant Rhinoceros3D et Grasshopper, elle a cherché à déduire la forme de couverture de chaque espace architectural à partir de sa trace au sol.

Dans la continuité des travaux précédemment menés, cette recherche prolonge l'exploration des processus de rétroconception, assistée par l'AI, en se concentrant l'étude principalement sur le DSE, notamment les parois, tandis que le MFH, assimilé au vide, demeure un objet d'analyse secondaire. Cette orientation méthodologique

s'accompagne d'un recentrage sur le *paradigme structural*, abordé de manière explicite, contrairement aux paradigmes *imaginal* et *historique*, mobilisés de façon indirecte dans la lecture des édifices. La rétroconception architecturale est appliquée à un corpus composé de vingt-trois thermes impériaux localisés en Afrique du Nord et de six situés à Rome. La sélection de ces cas s'est appuyée sur des critères de *complétude* documentaire ainsi que *similitude* typologique, en vue de constituer une grille de choix raisonné.

Constats

Malgré les nombreuses études consacrées aux thermes impériaux romains, l'exploitation scientifique de ces édifices se heurte à plusieurs limites :

(1) d'un point de vue documentaire, les sources disponibles présentent un degré de complétude variable, allant de relevés détaillés à des esquisses imprécises ou fragmentaires, souvent issues de fouilles anciennes dont les données n'ont pas été intégralement publiées ;

(2) sur le plan méthodologique, les approches classiques, fondées sur la lecture descriptive, peinent à restituer la logique d'ensemble d'édifices dont seule une portion est conservée ;

(3) sur le plan technologique, les outils traditionnels de l'analyse architecturale ne permettent pas de simuler ni de valider des hypothèses sur la base de fragments, ce qui restreint la portée des restitutions proposées.

Ces constats appellent à un renouvellement méthodologique intégrant des techniques capables de traiter des données lacunaires de manière structurée, en mobilisant à la fois les apports de la modélisation paramétrique et les capacités propres à l'AI.

Questions de la recherche

Ce travail s'organise autour de trois questions principales qui structurent l'ensemble de la démarche :

(1) la première concerne la structuration du corpus : comment organiser et enrichir un ensemble de plans thermaux fragmentaires de manière à le rendre exploitable dans un processus de modélisation architecturale fondée sur la donnée ? ;

(2) la deuxième question porte sur l'inférence architecturale à partir d'éléments partiels : selon quelles logiques est-il possible de déduire l'organisation globale d'un édifice thermal à partir d'un fragment ? ;

(3) enfin, une troisième question engage la mobilisation des outils issus de l'AI : comment intégrer l'apprentissage automatique (*Machine Learning* [ML]) dans une démarche de rétroconception architecturale appliquée à des données patrimoniales lacunaires, afin de prédire des complétions ?

Hypothèses

Trois hypothèses structurent la démarche de recherche :

(1) un corpus de plans thermaux fragmentaires peut être structuré selon une logique paramétrique, à condition que les données soient préalablement normalisées, encodées de manière homogène et enrichies par des métadonnées spatiales ;

(2) les fragments conservés d'un édifice thermal contiennent, sous certaines conditions, des indices suffisants pour inférer le schéma d'ensemble ;

(3) les techniques de ML, appliquées à un corpus cohérent de plans complets, peuvent permettre la construction d'un modèle *prédictif* capable d'assister la rétroconception architecturale.

Objectifs

L'objectif général de cette recherche est de développer une méthode de rétroconception (*cf*. Fig. 2) à la fois architecturale et patrimoniale fondée sur le *paramétrisme* et l'AI, afin de compléter virtuellement des plans thermaux lacunaires à partir d'un fragment.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs finalités sont définies :

(1) constituer un corpus *numérique* de plans thermaux impériaux, intégrant des données géométriques, typologiques, fonctionnelles..., normalisées et codées pour un traitement algorithmique afin de construire et *inventer* un modèle de jeu de données paramétriques (le *Parametric DataSet Model* [PDSM])[1] ;

(2) formaliser des régularités spatiales à partir des données extraites des plans complets, en identifiant, entre autres, des relations d'adjacence entre fonctions, des logiques d'organisation internes aux édifices... Une cartographie de choix *raisonné* du corpus est ensuite réalisée, servant au processus de la construction de deux modèles *paramétrique* et *prédictif* ;

(3) développer méthodologiquement un ensemble de sous-modèles de ML supervisé, dans l'intention de construire un modèle artificiellement intelligent de complétion (*Artificial Intelligence Completion Model* [AICM])[2], capables de prédire la fonction d'un espace, de détecter les éléments manquants dans un fragment,

[1] L'auteure a créé le modèle de jeu de données paramétrique (*Parametric Data Set Model* [PDSM]). Ce modèle sera construit au cours de la thèse pour servir de données d'entrée (*input*) au modèle prédictif à des fins d'entrainement *intelligent*. En établissant une rétroconception des thermes impériaux romains appartenant à la collection, un ensemble de données ainsi que des règles de composition seront collectés. Cet ensemble sera ensuite implémenté et converti en données paramétriques à l'aide du logiciel Rhinoceros3D et son plugin Grasshopper, dans différents *clusters* organisés selon les types de paramètres (dimensionnels, graphiques, vectoriels…).

[2] L'*Artificial Intelligent Completion Model* (AICM) désigne un modèle d'apprentissage automatique conçu dans le cadre de la présente étude pour prédire l'image complète d'un plan après un entraînement sur un ensemble de données préexistantes et prétraitées. Ce modèle automatise et optimise le processus de rétroconception des thermes romains. Il constitue un outil *artificiellement intelligent* pour redessiner virtuellement des thermes partiellement conservés ou documentés.

d'estimer des organisations possibles et de proposer des prédictions cohérentes du plan en complétant l'emprise au sol à partir des configurations partielles ;

(4) proposer un système à double modèle susceptible d'être généralisé à d'autres typologies architecturales patrimoniales.

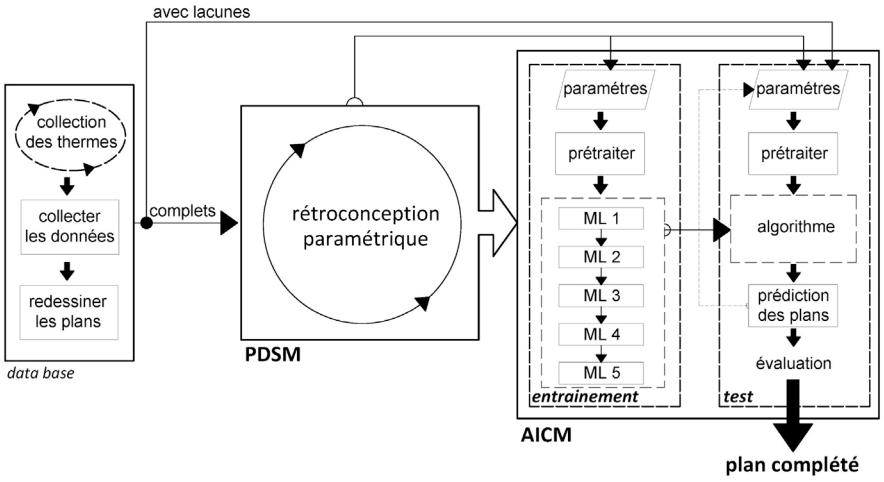


Fig. 2 – Canevas de méthode paramétrique et *intelligente* pour une rétroconception architecturale. (Naifer, Claeys, Bouaita, & Roobaert, 2024)

Méthodologie : une approche innovante entre *paramétrisme* et intelligence artificielle pour une rétroconception des thermes romains

L'objectif de cette recherche consiste à développer un AICM, capable d'assurer la complétion de plans fragmentaires de thermes romains tout en réduisant le plus possible les interventions manuelles. La réflexion s'inscrit dans la continuité de la problématique posée par Jean-Claude Golvin (2005) : non pas dans la légitimité de reconstituer un édifice disparu, mais dans la méthode employée pour y parvenir. L'objectif est de dépasser l'incomplétude matérielle des vestiges afin de reconstruire une organisation spatiale cohérente, fondée sur des logiques spatiales *mesurables*. La structuration des données intervient dès les premières phases de la recherche. Le corpus est traduit en un PDSM, qui formalise chaque édifice à travers une série d'attributs.

Deux modèles complémentaires structurent la méthode (*cf*. Fig. 3) : le PDSM, chargé d'organiser les données issues de plans complets, et l'AICM, conçu pour prédire des hypothèses de complétion après un entrainement sur ces données. Ce double dispositif, de l'ensemble de la rétroconception, s'appuie également sur deux opérations complémentaires : *décomposition* et *recomposition* (Dhouib, 2004).

1. Décomposer : chaque plan est d'abord décomposé en composants élémentaires à l'aide des logiciels de DAO, principalement AutoCAD et Rhinoceros3D. Les

entités spatiales obtenus sont ensuite traduites en attributs paramétriques exploitables dans Grasshopper, à travers des scripts algorithmiques fondés sur plusieurs *plugins*, afin d'extraire à la fois des données quantitatives et qualitatives. La sélection initiale des attributs repose sur la « méthode générative analytique » (Dhouib, 2004), mobilisant les outils du « paradigme structural » (matrice d'incidence, fréquence des composants, niveau géométrique d'ordonnancement et niveau physique de matérialité). Une décomposition plus fine, conçue comme une dissociation des « parties qui formaient habituellement un tout » (Lucan, 2009, p. 492), enrichit la base de données par des attributs supplémentaires, dont certains s'inspirent des besoins, en matière d'entrainement, des sous-modèles. Les attributs sont organisés et partiellement nettoyés, mais volontairement conservés à l'état brut pour permettre une flexibilité dans leur exploitation. Le PDSM ainsi constitué fonctionne comme une archive numérique dynamique, capable d'intégrer de nouveaux plans et d'organiser les données à double niveaux : d'une part à l'échelle des composants élémentaires, d'autre part à celle du plan d'ensemble.

2. Recomposer : le processus est piloté par une chaîne de cinq sous-modèles interdépendants, chacun alimenté par les données issues du PDSM et des prédictions produites aux étapes précédentes : ML1 : prédiction de la fonction des espaces à partir de ses attributs dans un fragment donné ; ML2 : détection des fonctions manquantes dans le fragment ; ML3 : modélisation des relations typologiques entre fonctions (voisinage, organisation…) ; ML4 : estimation des gabarits géométriques plausibles pour les espaces manquants ; ML5 : déduction du contour global de l'édifice.

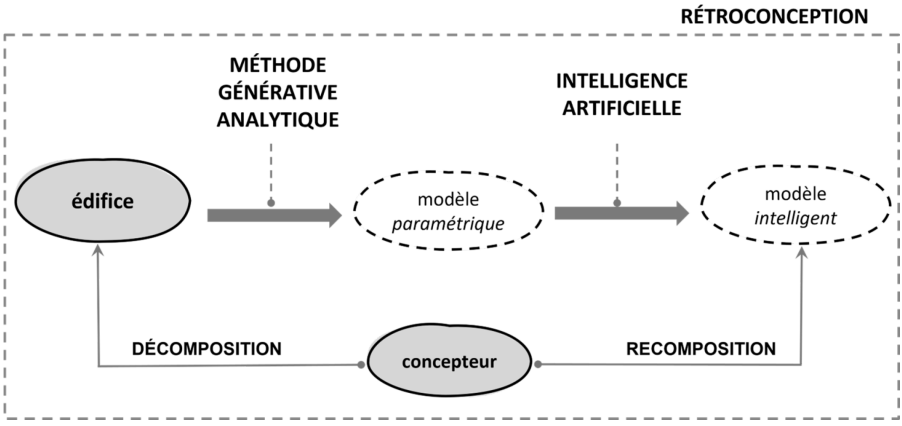


Fig. 3 – Du bâti au modèle intelligent : un passage par la décomposition et la recomposition. (établie par l'auteure)

La rétroconception, au cœur de cette démarche, s'applique à un corpus de thermes impériaux romains à Rome et en Afrique du Nord, sélectionné pour la variété de ses formes architecturales et pour son adéquation aux principes de conception romains, fondés sur la symétrie, l'axialité, la distribution fonctionnelle des espaces...

La notion de « modèle » sous-tend l'ensemble de la démarche. Historiquement, le modèle désignait une « référence à imiter ou à (re)produire ». Cette définition a évolué vers une acception plus abstraite, assimilant le modèle à « une (re)présentation » dynamique d'un phénomène complexe à comprendre ou à expliquer. Dans ce contexte, modéliser revient à « construire un système de (re)présentation qui facilite l'identification et la définition des problèmes » (Claeys, 2013, p. 75-76), ou encore une « image mentale à un instant donné du projet d'architecture en cours de conception » (Claeys, 2015, 2021b). Golvin (2005, p. 24) insiste sur la dimension heuristique du modèle : « l'objet mental ressemble à l'objet réel, il est en quelque sorte son reflet », ainsi, il est « la structure (signifiante) la plus complexe et la plus riche qui contient toute la connaissance accumulée sur l'objet » (Golvin, 2005, p. 26). Dans le domaine des sciences, quatre formes de modèles sont distingués (Achinstein, 1968; Nadeau, 1999; Claeys, 2013) : (1) modèle *représentationnel* : cherche à illustrer de manière précise les phénomènes observés, utilisant souvent des symboles ou des formules mathématiques ; (2) modèle *analogique* : établit une correspondance entre le phénomène étudié et un autre plus connu, facilitant la compréhension par analogie ; (3) modèle *théorique* : repose sur un cadre explicatif abstrait, visant à formuler les relations causales sous-jacentes aux observations ; (4) modèle *imaginaire* : mobilise la conceptualisation et l'intuition pour explorer des idées encore indéterminées ou trop complexes pour être formalisées.

Ces catégories offrent autant de cadres pour structurer une pensée, explorer une hypothèse ou produire une représentation intermédiaire. L'approche ici rejoint la *dualité* du « modèle analytico-systémique » (Claeys, 2013), et s'enrichit des potentialités du « modèle topologique cognitif » développé par Dhouib (2004) et exploré dans la thèse de Bouaita (2015). Dans cette optique, le modèle ne constitue pas une simple restitution graphique, mais un dispositif conceptuel apte à faire émerger des réponses cohérentes face aux exigences architecturales. L'articulation du PDSM, en tant que modèle « pertinent », avec l'AICM, pensé comme forme « signifiante » permet d'aboutir à une représentation « complète » et cohérente des édifices fragmentaires, conformément à la démarche défendue par Golvin (2005, p. 17).

Apport de la thèse

L'apport principal réside dans le développement d'une méthode de rétroconception architecturale, fondée sur la combinaison d'un PDSM et d'un AICM, conçus pour traiter des plans thermaux fragmentaires. En croisant des outils issus de l'analyse *topologique cognitive*, de la modélisation paramétrique et de ML, la recherche propose une alternative aux approches descriptives traditionnelles, souvent limitées à des reconstitutions formelles fondées sur des analogies visuelles.

Plusieurs contributions supplémentaires se dégagent : (1) formaliser un protocole de décomposition et de structuration des données patrimoniales, permettant de créer un PDSM, conçu comme une archive dynamique capable de traiter, enrichir et actualiser les plans ; (2) concevoir un AICM, articulant plusieurs sous-modèles spécialisés dans la prédiction de fonctions, d'espaces manquants, de gabarits géométri-

ques et d'enveloppes architecturales. Ce système permet de produire des hypothèses de complétion plausibles, guidées par des régularités extraites du corpus, tout en garantissant une traçabilité des inférences produites ; (3) valider la valeur heuristique du modèle, envisagé comme un outil de compréhension et de production de connaissances architecturales ; (4) proposer un cadre généralisable susceptible d'être transposé à d'autres édifices patrimoniaux partiellement conservés. Le système développé peut ainsi offrir un outil d'aide à la décision pour les chercheurs, les historiens et les acteurs de la conservation, en fournissant des hypothèses sur l'organisation d'édifices dont la documentation est incomplète.

Plan de la thèse

Outre l'introduction, le développement de cette thèse s'organise en quatre parties et neuf chapitres articulées autour de la mise en œuvre d'un processus de rétroconception architecturale appliqué aux thermes impériaux romains. Chaque partie correspond à un niveau distinct de la démarche, depuis les fondements théoriques jusqu'à la présentation de la méthode.

La première partie établit le socle méthodologique de la recherche. Elle explore d'abord les fondements de la rétroconception dans le contexte patrimonial, en analysant ses origines, ses outils et ses déclinaisons. Cette réflexion est ensuite prolongée par l'examen du « modèle topologique cognitif » (Dhouib, 2004) et de ses paradigmes, qui orientent la méthode analytique de décomposition appliquée aux plans thermaux. Enfin, cette partie introduit les notions fondamentales liées à l'AI, afin d'ancrer l'usage des modèles d'apprentissage dans une perspective épistémologiquement cohérente.

La deuxième partie est consacrée à la constitution du corpus d'étude. Elle retrace les grands jalons historiques de l'architecture romaine et les modalités techniques de sa mise en œuvre, en insistant sur la logique constructive verticale des thermes, notamment les parois. Elle présente par la suite les différentes typologies ainsi que le processus ayant conduit au choix du corpus. L'ensemble des exemplaires retenus est ensuite redessiné, numérisé et organisé.

La troisième partie décrit les outils, les ressources et les paramètres mobilisés dans le cadre de la rétroconception. Elle introduit les principes de gestion des données patrimoniales, en détaillant les étapes de collecte, de traitement, de traduction paramétrique et de modélisation numérique. Cette partie engage également une réflexion sur deux hypothèses *génératives* de l'espace thermal, partir du *plein* ou du *vide*, et aboutit à la préparation des jeux de données nécessaires à l'élaboration des modèles.

La quatrième et dernière partie présente la mise en œuvre de la rétroconception, à travers la construction d'un système à double modèle. Le PDSM est développé à partir des données graphiques extraites du corpus, converties en attributs *mesurables* structurés dans un environnement numérique dédié. Ce modèle constitue la base sur laquelle repose la construction du second modèle AICM, qui est structuré en cinq sous-modèles, chacun dédié à une tâche de complétion. À ce stade, l'AICM

est présenté sous forme théorique : sa construction repose sur une simulation méthodologique appliquée à la première tâche de prédiction (ML1), permettant de formaliser l'ensemble des étapes nécessaires à son développement futur. Depuis le choix des données d'entrée jusqu'aux critères d'évaluation, chaque phase est décrite selon une logique transférable à l'ensemble du dispositif.

L'ensemble de la thèse s'achève sur une conclusion générale, qui rassemble la synthèse des résultats, les limites de la méthode et les perspectives qu'elle ouvre pour les champs croisés de l'architecture, du patrimoine et des dispositifs numériques.

PARTIE I.
MÉTHODES DE LA RECHERCHE

1 PROCESSUS DE RÉTROCONCEPTION PATRIMONIALE

Le premier chapitre de la thèse approfondit le processus de rétroconception, en l'inscrivant dans le cadre plus vaste des recherches théoriques sur les processus de conception architecturale (Claeys, 2013). Trois dynamiques interdépendantes sont au cœur de cette exploration : les tentatives de *rétroconceptions*, qui s'appuient sur les états antérieurs du projet ; les *reconceptions* successives, qui ajustent continuellement l'image mentale du projet en cours ; et les *préconceptions*, qui anticipent ses évolutions futures (Claeys & Naifer, 2022). Ces processus sont activés par le concepteur[3] lorsqu'il mobilise des connaissances issues d'autres projets, qu'ils soient réels ou imaginaires, pour orienter le développement de sa propre proposition architecturale. Les références utilisées peuvent concerner des œuvres architecturales passées ou contemporaines, qu'elles proviennent des travaux propres au concepteur lui-même ou de ceux d'autres concepteurs. La question centrale porte sur l'existence et l'usage de méthodes visant à amplifier volontairement ces trois processus. Les concepteurs emploient une diversité de stratégies pour renforcer l'efficacité de ces dynamiques, qui peuvent être analysées à travers quatre notions fondamentales en théorie architecturale : le *modèle*, le *module*, le *type*, et le *paramètre*.

Le chapitre s'articule en quatre parties principales.

(1) Une distinction dans la définition de la rétroconception et des termes liés au patrimoine permet de clarifier les spécificités propres à chaque concept.

(2) Une analyse épistémologique qui définit les concepts de rétroconception et de préconception dans le contexte de l'architecture, en soulignant leur rôle dans la reconception dynamique d'un projet en cours.

(3) Une série de quatre exemples historiques, illustrant diverses méthodes employées par des architectes pour concrétiser ces dynamiques conceptuelles.

(4) Une analyse des pratiques contemporaines révèle que tout concepteur, de manière inhérente, mobilise simultanément des processus de rétroconception et de préconception afin d'enrichir et d'amplifier les potentialités de son projet.

1.1 La rétroconception architecturale face aux notions patrimoniales

Avant de définir la rétroconception, il importe de préciser plusieurs notions voisines. Employées dans les domaines de l'archéologie et de l'histoire, notamment

[3] Avertissement : pour la clarté de l'expression écrite, nous utilisons ici le mot *concepteur* au masculin et au singulier. Mais ce mot recouvre un sens large, il peut désigner une femme ou un homme, mais également une machine dotée d'intelligence artificielle ou toute hybridation entre ces différents êtres. Plus particulièrement, il peut désigner un acteur unique ou un groupe d'acteurs impliqués dans un processus de co-conception (Claeys & Naifer, 2022).

dans le cadre de la modélisation du patrimoine architectural, elles sont souvent confondues. Les distinguer permet de clarifier le champ conceptuel et d'éviter les ambiguïtés liées à des définitions trop proches. L'analyse repose sur des définitions issues de dictionnaires généraux et spécialisés, ainsi que sur les interprétations proposées par les chercheurs du domaine.

(1) La *restitution* : renvoie fondamentalement à l'idée de « rendre », une action visant à « redonner » l'aspect présumé d'un monument ou d'un site ancien, tel qu'il pouvait apparaître à « un moment ou à un autre de leur histoire ». Les définitions dégagées par Jean-Claude Golvin, issues des dictionnaires généraux (Littré, Larousse, Robert), décrivent la restitution comme l'action de « remettre une chose » dans son état d'origine, ou de représenter « un monument en ruine à partir de documents imparfaits » (Golvin, 2003). Jean Marie Pérouse de Montclos (1972) enrichit cette définition en y ajoutant une dimension graphique ou « maquette », où la restitution peut être interprétée comme une représentation « hypothétique », souvent construite à partir d'un édifice ou d'« une partie d'édifice disparu » ou d'« un parti (architectural) primitif présumé ». Cependant, la restitution dépasse la simple reconstitution d'une forme matérielle : elle englobe « le contexte complet historique et urbain » dans lequel le monument existait. Ainsi, restituer consiste à rendre une image et une idée, deux notions indissociables selon le sens générique d'*image* qu'Aristote (1846 [IV^{e} siècle av. J.-C.]) avait lui-même décrit : « l'âme ne pense jamais sans image ». La restitution devient donc un outil essentiel pour offrir une vision crédible et évocatrice d'un monument « tel qu'il était à l'origine ou à telle et telle période de son histoire » (Golvin, 2003, 2005, p. 2-3).

(2) La *reconstitution* : est l'action de « constituer de nouveau », « former un tout en associant des éléments ». Elle implique le « réassemblage ou le remembrement » d'un monument, qu'il soit partiel ou complet, dans l'objectif de lui redonner « une substance et une structure ». Jean Marie Pérouse de Montclos (1972) précise que la reconstitution consiste à regrouper des éléments authentiques dispersés et à remonter un édifice ou une partie de celui-ci. La reconstitution peut prendre la forme d'un travail graphique « d'une action concrète sur le terrain », comme elle repose sur une idée d'« authenticité » et de « concret », dépassant ainsi le simple sens de *reconstruction* ou déboucher sur une action matérielle, comme dans une opération de restauration. La reconstitution se distingue de la restitution, car son objectif principal n'est pas de restituer une image mentale cohérente mais de recréer physiquement un monument, a donc un « caractère concret » (Golvin, 2003, 2005).

(3) La *restauration* : ne vise pas à « rétablir l'image ou l'état ancien d'un monument », distinction essentielle pour éviter de la confondre avec la reconstitution (Golvin, 2005, p. 4-5). Au contraire, elle s'attache à préserver l'état physique de l'œuvre en intervenant sur ses éléments dégradés. Golvin (2005, p. 4-5) explique que la restauration consiste à « remplacer les blocs défectueux, consolider les structures » et éliminer les causes d'altération, tout en veillant à respecter l'authenticité du monument. Ainsi, la restauration répond à un double objectif : garantir la pérennité de l'édifice et faciliter sa compréhension pour le public contemporain. Cette approche, toutefois, n'est jamais neutre. Toute intervention de restauration entraîne

une modification de l'état historique du monument, faisant de celui-ci « un nouvel objet », indépendamment de l'intention initiale. Par ailleurs, la restauration est aujourd'hui encadrée par des règles strictes qui visent à limiter son impact et à assurer sa réversibilité, réduisant ainsi les risques d'interventions irréversibles ou inappropriées (Golvin, 2003).

(4) La *rétroconception* : bien qu'elle croise certaines préoccupations des approches patrimoniales classiques, telles que la restitution ou la reconstitution, s'en écarte par son orientation méthodologique. Plutôt que de viser la reproduction matérielle des édifices, elle s'attache à analyser les logiques de conception qui ont présidé à leur organisation. En cela, elle se rapproche des principes *architecturologiques*, en explorant la manière dont les formes spatiales traduisent des intentions géométriques ou fonctionnelles. Cette approche, centrée sur les processus plutôt que sur les objets, se révèle particulièrement adaptée aux contextes où les données physiques sont fragmentaires, comme dans le cas des plans thermaux étudiés.

1.2 Analyse épistémologique de la rétroconception[4]

Si le terme *processus* traduit une progression par étapes vers un objectif précis, et que la *conception* reflète un effort cognitif visant à rassembler et structurer des éléments par la pensée, alors tout *concepteur* engagé dans un processus de conception s'inscrit dans la complexité inhérente au projet architectural. Ce processus s'appuie sur une succession d'états du modèle mental associé, constamment révisés et enrichis. Ainsi, la conception architecturale peut être définie comme une élaboration mentale dynamique, combinant le traitement d'informations et le croisement de données. Elle débute à partir d'un socle de connaissances existantes, s'oriente vers une finalité *projective*, et aboutit à la production de nouvelle *connaissance*.

L'effort cognitif nécessaire pour rassembler des éléments par la *pensée* devient encore plus exigeant dans le cadre des tentatives de *rétroconception*, qui consistent à modéliser des processus de conception réalisés par d'autres concepteurs. Tout processus de conception, inscrit dans un intervalle de temps donné, est toujours lié à un contexte d'élaboration *unique*. Toutefois, comprendre pleinement ce processus dans un contexte différent, qu'il soit contemporain ou postérieur, est *impossible* pour au moins trois raisons.

(1) L'impossibilité de reconstituer l'état initial des connaissances du concepteur. Le contexte dans lequel le processus de conception a débuté correspond à un moment précis de l'espace-temps qui n'existe plus. Ainsi, au départ de toute rétroconception, les informations disponibles sur le contexte initial d'élaboration du projet restent incomplètes, à l'image des lacunes observées dans les monuments archéologiques.

(2) L'impossibilité de reproduire le cheminement de pensée du concepteur. Revivre fidèlement la succession des états cognitifs du concepteur est utopique, car cela supposerait de décrire toutes ses stratégies et ses biais cognitifs. De plus, il

[4] La section 1.2 est totalement reprise de l'article (Claeys & Naifer, 2022)

faudrait utiliser exactement les mêmes outils de conception et de représentation, ainsi que disposer de l'ensemble des productions graphiques ayant accompagné le processus. Cependant, se placer dans la conscience d'un autre est impossible, les outils de conception évoluent ou disparaissent, et l'acquisition complète des productions graphiques reste incertaine.

(3) L'impossibilité de déterminer la finalité projective du concepteur. Toute tentative d'attribuer une finalité au projet ou d'imaginer son évolution comme l'aurait fait le concepteur original est biaisée par un contexte présent, postérieur au contexte d'élaboration. Le concepteur actuel projette ses propres finalités sur celles du passé, supposant à tort une situation réflexive inspirante chez le concepteur initial. Même en se basant sur l'observation de l'édifice final, celui-ci s'altère avec le temps et ne conserve pas la mémoire complète des motivations et des raisons ayant guidé sa création.

Malgré ses limites évidentes, la rétroconception est une méthode appliquée dans de nombreux cas liés au champ de l'architecture.

(1) Compléter la connaissance d'un édifice ayant des lacunes archéologiques. Par exemple, une méthode spéculative de restitution fondée sur l'observation physique du monument, de cas d'édifices similaires, ainsi que l'analyse de récits anciens pour améliorer la connaissance du monument et des techniques de construction anciennes (Bouaita, 2015), ou la reconstitution paramétrique d'édifices par des analyses statistiques (Soussi, 2019).

(2) Terminer un édifice inachevé à partir de la redécouverte de principes du projet originel. Par exemple, après la mort accidentelle d'Antoni Gaudí en 1926 et l'incendie de la quasi-totalité de son atelier pendant la guerre civile espagnole des années 1930, d'autres architectes ont poursuivi la construction de la *Sagrada Familia* à l'aide de techniques computationnelles et d'impression 3D pour révéler partiellement les secrets du processus de conception et continuer la construction de l'édifice (Burry, 1996).

(3) Compléter la connaissance d'un élément manquant dans un édifice. Par exemple, avec une ambition écologique, des techniques de recyclage d'objets ou d'impression 3D sont utilisées pour donner une seconde vie à des édifices qui, sans l'élément architectonique manquant, ne pourraient plus assurer leurs fonctions.

(4) La redécouverte de principes d'un projet originel pour les appliquer à d'autres projets. Par exemple, « le fait de proposer des théories analytiques sur les principes géométriques à la base de la genèse d'un objet architectural, et d'exprimer ces hypothèses exclusivement avec des moyens graphiques » (Derycke *et al.*, 2015, p.172), revisiter une méthode de composition avec d'autres outils de conception (Rippinger, 2018), ou restituer les techniques constructives et combinatoires de projets expérimentaux de papier (Ramondenc & Marin, 2020).

Ces nombreux exemples montrent que la rétroconception est une méthode d'analyse largement considérée en architecture. Mais un rapport de proximité entre elle et deux autres concepts mérite d'être investigué.

Bien que toute analogie entre des concepts appartenant à des domaines de connaissances différents doit être menée avec précaution, par transposition de l'ingé-

nierie à l'architecture, les deux processus liés à la reconception – la rétroconception et la préconception – peuvent être considérées *comme* analogues aux deux concepts de la *reengineering* [réingénierie] – la *reverse engineering* [*ingénierie inverse*] et la *forward engineering* [ingénierie prospective]. Ces trois concepts d'ingénierie ont été clairement distingués par Elliot J. Chikofsky et James H. Cross II (1990) dans le cadre de l'étude de cycles de vie des programmes informatiques.

Par extension, de la conception informatique à d'autres domaines de l'ingénierie, la *rétro-ingénierie* est l'analyse de la structure d'un objet préexistant, pour *redécouvrir* les techniques d'élaboration et de fabrication ayant permis de le construire, ou dans le but d'en dévoiler les secrets, afin de l'exploiter. Tandis que l'*ingénierie prospective* est l'analyse de la structure souhaitée d'un objet pour *implémenter* sa production. Enfin, la *réingénierie* est l'analyse d'un objet existant pour *renouveler* sa conception en réanalysant, à la fois, les techniques éprouvées de conception de l'objet *et* son implémentation espérée.

Mais que recouvrent ces trois types de processus en architecture ?

D'un état à un autre du modèle mental associé à un projet en cours de conception, la rétroconception consiste en l'analyse des états passés, tandis que la préconception[5] se focalise sur l'anticipation des états désirés de ce projet ou d'un autre. Ainsi, la reconception peut être définie comme une analyse globale du modèle mental, visant à renouveler la conception du projet en intégrant, entre autres, les résultats issus de la rétroconception et de la préconception (*cf*. Fig. 4). Ces deux processus apparaissent donc comme des formes spécifiques et limitées de reconception.

De manière générale, essayer de comprendre comment des édifices du passé pouvaient être conçus par d'autres ou comment des édifices du futur peuvent être préconçus est une pratique humaine immémorable et intuitive. En architecture vernaculaire, elle est utilisée lorsqu'il faut reconstruire des bâtiments, parce qu'ils sont usés par le temps ou détruits par les aléas de l'histoire, lorsqu'une nouvelle configuration doit leurs être donnée, parce que l'usage des espaces a changé, ou lorsqu'un bâtisseur désire s'inspirer d'un bâtiment existant pour en édifier un autre. Plus particulièrement, parallèlement au développement historique de la profession, des êtres humains se sont spécialisés pour concevoir les habitats d'autres êtres humains. Des architectes ont défini des méthodes disciplinaires variées pour opérer de manière raisonnée des reconceptions architecturales. Les architectes identifient des éléments de base du projet et ils les mettent mentalement en relation de manière répétée pour créer des représentations sous la forme d'un projet d'architecture. Chaque contexte de conception étant unique, la méthode mentale de reconception adoptée par les concepteurs varie en fonction de plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci figurent le type de représentation utilisé pour le projet (outil de représentation, support, cadrage, niveau de détail, fréquence), la définition des éléments mobilisés

[5] Constitué du préfixe *pré* (avant, qui précède) et du mot *conception* (prendre ensemble par la pensée), le mot *préconception* ne décrit pas ici une forme négative de préjugé ou d'idée préconçue, mais plutôt l'établissement d'une assertion à laquelle le concepteur croit, fondée sur une intuition ou sur des probabilités, qui devra être confirmée/infirmée plus tard, mais qui met en mouvement le processus de conception de manière prospective.

(modèles, modules, types, paramètres), ainsi que les règles permettant d'établir des relations entre ces éléments. À travers les représentations qu'il génère, le concepteur cherche à extraire, de l'observation de projets passés ou de la projection de projets futurs, des éléments fondamentaux pour la modélisation et des règles relationnelles objectivées.

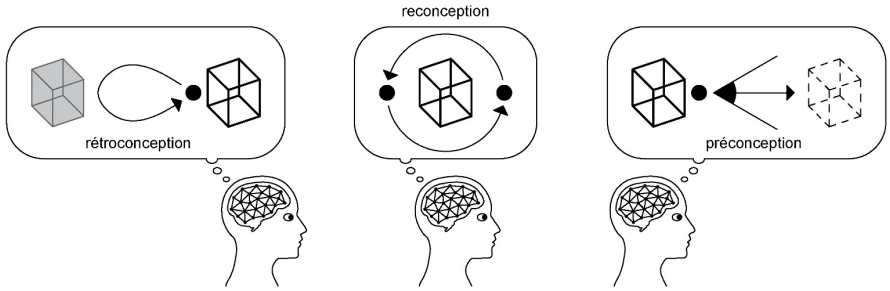


Fig. 4 – Processus de reconception et deux de ses sous-processus : la rétroconception et la préconception. (Claeys & Naifer, 2022)

1.3 Histoire de méthodes de rétroconception[6]

La section suivante décrit quatre moments clés de l'histoire de l'architecture, où peuvent être identifiées quatre méthodes de reconception.

1.3.1 Modèles classiques

À l'époque où la protection de monuments est encouragée par des manœuvres politiques de valorisation culturelle, des architectes tentent de comprendre les règles de composition ayant présidé à l'élaboration d'édifices jugés remarquables pour construire de nouveaux édifices inspirés de styles architecturaux plus anciens (rapports harmoniques, tracés régulateurs, ordres architecturaux…).

Ainsi, Andréa Palladio s'appuie sur la lecture du traité de Vitruve (2015) et sur des analyses in situ de vestiges antiques pour restituer des édifices romains par le dessin. Les restitutions proposées ne respectent pas totalement les protocoles de recherche archéologiques tels que nous les concevrions aujourd'hui. Elles sont partiellement fondées sur une interprétation libre, elles illustrent le point de vue créatif d'un architecte au service d'une doctrine architecturale personnelle (Palladio, 1570). Alors qu'il avait déjà financé la publication en trois volumes du *Vitruvius Britannicus* de Colin Campbell (1715-1725), Richard Boyle – nommé Lord Burlington – rencontre les héritiers de Palladio au cours de son second Grand Tour (1719)[7]. Il acquiert l'ensemble des dessins de thermes antiques produits par l'architecte vénitien avant de

[6] La section 1.3 est totalement reprise de l'article (Claeys & Naifer, 2022).

[7] En 1714-1715, il avait réalisé un premier voyage éducatif en France et en Italie, ce qui aurait lancé la mode du Grand Tour pour les jeunes aristocrates britanniques pendant plus d'un siècle.

les publier de manière posthume (Palladio, 1730). La première édition de l'ouvrage est incomplète, des illustrations doivent encore être terminées et le texte original du maître les accompagnant à l'origine n'a pas encore été retrouvé. En attendant, l'ouvrage est progressivement complété jusqu'en 1735, au rythme des copies données par Burlington à ses amis. En 1785, Ottavio Bertotti Scamozzi – ayant également étudié et valorisé les œuvres de Palladio – recopie les planches et crée une édition accompagnée d'un texte en italien et en français (Palladio, 1785). De copies en copies, la représentation approximative d'édifices partiellement disparus acquiert une forme de légitimité.

De nombreuses autres restitutions fantaisistes existent et elles nous apprennent autant sur le rapport subjectif au patrimoine des architectes de l'époque que sur l'observation précise du patrimoine lui-même. Les exemples les plus célèbres sont les *vedute* de Canaletto et surtout les *capricci* de Piranèse (*cf*. Fig. 5). En créant un univers fantastique par la puissance de sa créativité, Piranèse (1756, 1749) associe subjectivement les points de vue de l'artiste imaginant ce qui n'est plus perceptible et du scientifique analysant des vestiges archéologiques.



Fig. 5 – Giovanni Battista Piranesi, « Veduta di Campo Vaccino (Forum Romanum) », série des *Vues de Rome*, 1757.

Une première méthode de reconception repose sur une tentative de rétroconception, en opérant une relecture de traités et en observant des édifices ou leurs vestiges. Autrement dit, les architectes construisent subjectivement des *modèles* à imiter permettant l'établissement de préconceptions. La reconception dépend fortement de l'existence, du nombre et de l'état des sources écrites et construites disponibles, mais elle peut également être assujettie à des règles académiques de composition ou à l'usage d'ordres architecturaux. Cette méthode est sous-tendue – au

moins en apparence – par une forme de nostalgie, une conception romantique du patrimoine, une tentative de renouer avec un imaginaire construit par la mythification de projets du passé.

1.3.2 Modularités rationnelles

Alors que certains développent leur imagination en lisant des traités classiques et en mesurant des vestiges archéologiques, d'autres architectes tentent d'établir par la *raison* des correspondances abstraites entre des édifices existants en définissant des *modules*.

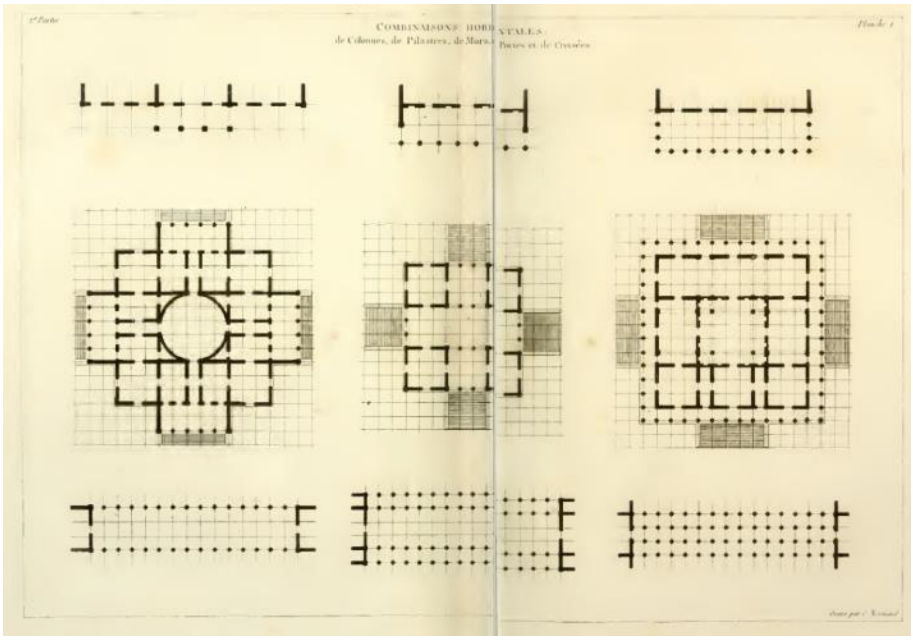


Fig. 6 – Jean-Nicolas-Louis Durand, « Compositions horizontales de colonnes, de pilastres, de murs, de portes et de croisées », *Précis des leçons d'architecture données à l'École polytechnique*, 2e partie, planche 1, 1802.

Alors que la modulation géométrique permet la *composition* esthétique des édifices, le recours à la modularité est lié à la rationalisation progressive de la discipline depuis le développement des sciences modernes au XVIIe siècle, en passant par les deux premières révolutions industrielles, jusqu'au modernisme du XXe siècle. Le remplacement de l'artisanat par la mécanisation de la production, la création de matériaux, de techniques et de programmes architecturaux nouveaux, ainsi que le développement de la profession d'ingénieur requiert une alternative à l'académisme figé des écoles des Beaux-Arts.

Au début du XIXe siècle, Jean-Nicolas-Louis Durand – architecte chargé de cours à l'École polytechnique – établit une forme de répertoire ordonné d'éléments architectoniques (*cf*. Fig. 6).

Selon lui, l'architecte aurait pour mission de les combiner pour générer des entités plus complexes, elles-mêmes assemblées en un édifice complet : « La disposition est la seule chose à laquelle doive s'attacher l'architecte […]. Mais avant de disposer un édifice, c'est-à-dire, d'en combiner et d'en assembler les parties, il faut les connaître. Or, celles-ci sont, elles-mêmes, une combinaison d'autres parties que l'on peut appeler les éléments des édifices, tels que les murs, les ouvertures qu'on y pratique, les soutiens engagés et isolés, le sol exhaussé, les planchers, les voûtes, les couvertures… Ainsi, avant tout, il faut connaître ces éléments » (Durand, 1802, p. 24). L'objectif de la taxonomie des éléments est de déterminer le composant de base, combinable pour « disposer » tous les projets possibles, puisque : « l'architecture n'est pas l'art de faire un certain nombre de projets ; c'est l'art de faire tous les projets d'édifices possibles, soit publics, soit particuliers, et encore de les faire dans toutes les circonstances qui peuvent les modifier » (Durand, 1821, p. 24).

Au début du XXe siècle, la méthode de Durand est réinterprétée à travers la modularité prônée par les modernistes, confrontés à la nécessité de reconstruire en masse après les deux Guerres mondiales : « La guerre a secoué les torpeurs ; on a parlé de taylorisme ; on en a fait. » (Le Corbusier, 1923, p. 193). Ils doivent produire l'architecture en série, plus simplement et à moindre coût : « Si l'on arrache du cœur et de l'esprit les concepts immobiles de la maison, et qu'on envisage la question d'un point de vue critique et objectif, on arrivera à la maison-outil, maison en série accessible à tous, saine, incomparablement plus que l'ancienne (et moralement aussi) et belle de l'esthétique des outils de travail qui accompagnent notre existence. » (Le Corbusier, 1923, p. 193-194). De très nombreux exemples de modules sont développés, avec des règles d'assemblage prédéfinies, applicables à différentes échelles spatiales, de l'habitation individuelle à la structure à l'enjambée des années 1960. Par exemple, la maison standardisée *DomIno* (1914) et le *Modulor* (1946) de Le Corbusier, le *Baukasten* (1923) de Walter Gropius, la *Dymaxion House* (1933) de Richard Buckminster Fuller, l'*Habitat 67* (1967) de Moshe Safdie, le projet *Plugin City* (1964) d'Archigram…

La modularité serait alors « le point de départ d'une certaine systématisation de la conception architecturale » au XXe siècle (Chaillou, 2021, p. 20), à partir de laquelle les architectes cherchent à prévoir complètement l'édification. Une attitude prolongée par l'usage des outils numériques de conception favorisant la rationalisation de la conception architecturale.

La condition moderne est caractérisée par la volonté d'un éternel présent, d'une éternelle rupture avec le passé, ce qui présuppose néanmoins l'existence du passé. Ce n'est plus l'imitation rétrospective des modèles du passé qui importe le plus, mais la conception prospective du futur : « Faire un plan, c'est préciser, fixer les idées. C'est avoir eu des idées. C'est ordonner ces idées pour qu'elles deviennent intelligibles, exécutables et transmissibles. […] le plan est le générateur » (Le Corbusier, 1923, p. 145).

Une deuxième méthode de reconception repose sur une volonté de préconception, en déterminant subjectivement un module à combiner pour composer tous les projets possibles. Lorsque la rétroconception est utilisée, elle sert à justifier l'établissement du module de base. Cette posture est sous-tendue par le mythe de la rationalité et du progrès, par une confiance parfois aveugle dans les sciences modernes initiée par la méthode analytique (Descartes, 1637), et développée par les encyclopédistes du siècle des Lumières. En idéalisant l'édifice de la science, les architectes croient en la possibilité de l'existence d'un nombre réduit d'équations mathématiques à partir desquelles décrire exhaustivement l'univers, voire même de prédire toutes ses évolutions futures.

1.3.3 Processus typologiques

Sans pour autant abandonner la raison, une autre méthode de reconception se déploie autour de Mai 1968 pour donner une première alternative à l'usage généralisé de méthodes majoritairement quantitatives fondées sur la modularité. Avec une pointe de nostalgie mêlée d'ironie, au moment d'un tournant marxiste et linguistique, la typomorphologie postmoderne essaye de renouer avec l'histoire, la société et la contextualisation des projets contre la *tabula rasa* des modernistes.
Au début du XIXe siècle, Antoine Quatremère de Quincy (1832, p. 629-630) donne une définition du concept de *type* en le distinguant clairement de celui de *modèle* : « Le mot *type* présente moins l'image d'une chose à copier ou à imiter complètement, que l'idée d'un élément qui doit lui-même servir de règle au modèle. […] Le modèle, entendu dans l'exécution pratique de l'art, est un objet qu'on doit répéter tel qu'il est ; le *type* est, au contraire, un objet d'après lequel chacun peut concevoir des ouvrages qui ne se ressemblent pas entre eux. Tout est précis et donné dans le modèle ; tout est plus ou moins vague dans le *type*. » De plus, il montre l'importance de tenir compte d'un « germe préexistant » à partir duquel développer des variations formelles à l'image des méthodes génératives actuelles : « En tout pays, l'art de bâtir régulier est né d'un germe préexistant. Il faut un antécédent à tout ; rien, en aucun genre, ne vient de rien ; et cela ne peut pas ne point s'appliquer à toutes les inventions des hommes. […] C'est comme une sorte de noyau duquel se sont agrégés, et auquel se sont coordonnés par la suite les développements et les variations de formes dont l'objet était susceptible. »

Les architectes postmodernes accusent les modernistes d'avoir imposé une rupture historique illusoire, alors que lorsque des formes architecturales évoluent, de nouvelles configurations sont fondées à partir des précédentes et modifiées pour les adapter à l'évolution de leur contexte d'implantation (*cf*. Fig. 7).

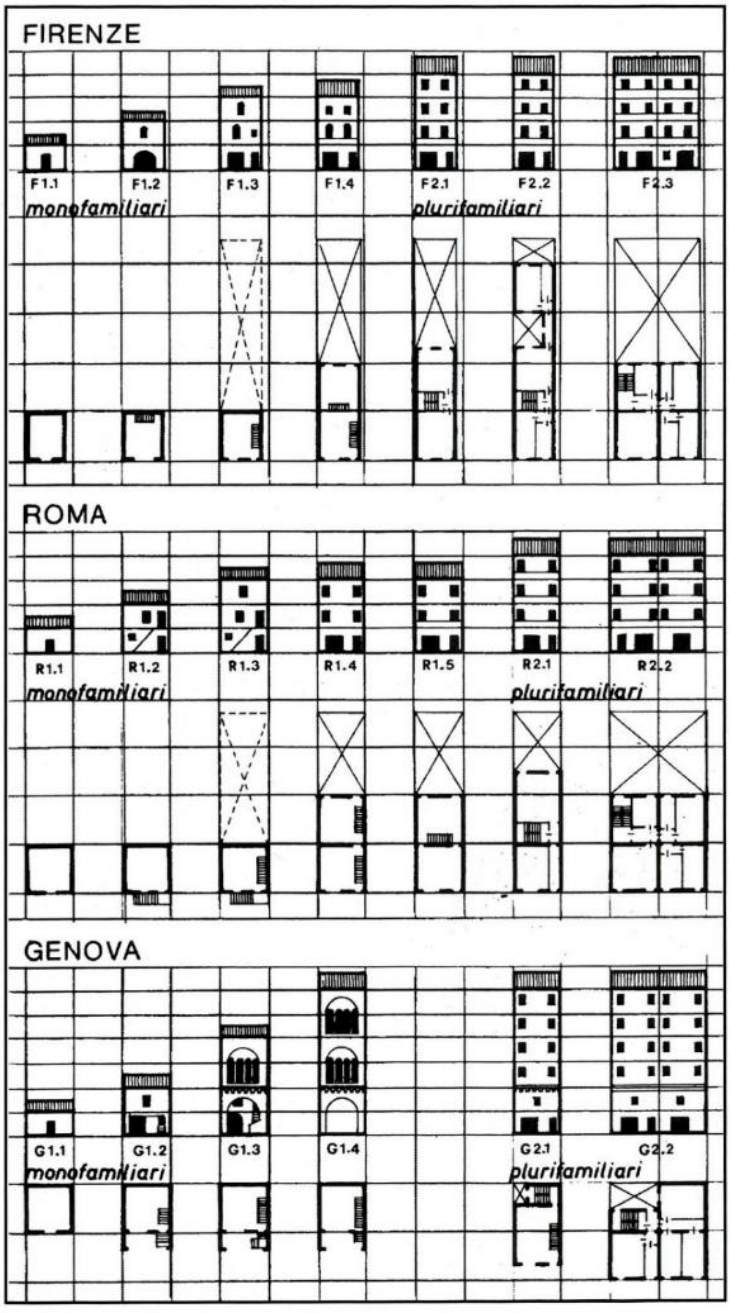


Fig. 7 – Gianfranco Caniggia & Gian Luigi Maffei, « Analyse comparée des principales mutations diachroniques conduisant du type de base monocellulaire à l'immeuble d'appartements urbains en passant par la maison mitoyenne médiévale monofamiliale », *Composizione architettonica e tipologia edilizia*, 1979.

En arguant qu'un type ne peut pas être compris sans l'analyse de l'historicité de son contexte, ils intègrent le concept de « *storia operante* » (Muratori, 1959), le type étant conçu comme une « information opératoire enracinée dans une tradition expérimentale » (Malfroy, 1986). La structure actuelle de l'environnement construit est donc considérée comme le produit d'une succession de réalisations, depuis le *germe* de l'architecture vernaculaire jusqu'à l'époque contemporaine. De plus, ils accusent également le modernisme d'avoir réduit « l'idée du type » à une « simple abstraction géométrique », alors que le type est « lié intimement à la réalité » avec « une vaste hiérarchie d'intérêts allant de l'activité sociale jusqu'à la construction » (Moneo, 1978, p. 24). À première vue, le recours systématique à des types liés à des formes anciennes semble empêcher toute production architecturale nouvelle, pourtant le type doit être compris comme le « cadre dans lequel le changement s'opère, un terme nécessaire à la dialectique continue requise par l'histoire ». De là, il n'est pas un « mécanisme figé », il « devient un moyen de rejeter le passé autant qu'un moyen de regarder vers l'avenir » (Moneo, 1978, p. 27). Le concepteur est au début du processus de conception « prisonnier du type parce que c'est de cette façon qu'il appréhende les choses », mais par la suite « il peut intervenir, il peut le détruire, le transformer, le respecter ». Si bien que l'architecture, « n'est pas seulement *décrite* par des types, elle est également produite à travers eux. » (Moneo, 1978, p. 23). Le type est donc une structure sous-jacente provisoire et évolutive à l'habitat dont les mises en relations sont multidimensionnelles, ce qui est différent de l'imitation de *modèles* figés ou de la combinatoire de *modules* abstraits.

À la suite de la méthode initiée par Saverio Muratori, l'approche typologique est marquée par la combinaison d'une phase d'*analyse* (la lecture) et d'une phase de *projet* (l'écriture). La première rendant possible la seconde et la seconde confirmant/infirmant la première. La relation entre analyse et projet s'exprime également dans la distinction entre les types *a priori* et *a posteriori* : « le type n'est pas une invention logique ; il existe et il est un produit de la conscience spontanée », autrement dit « il doit inéluctablement son existence au fait d'être 'synthèse a priori' » dans la tête de l'architecte. Le type contient « la réalité entière de la maison avant que celle-ci n'existe physiquement », mais il « peut avoir une formulation critique, déduite au moyen d'une analyse a posteriori » (Caniggia & Maffei, 1979). En effet, le type « permet de se représenter *a priori* le résultat global qu'on se propose d'atteindre, correspondant à une sorte de *projet mental* », mais puisqu' « il est un ensemble de connaissances appliquées et de *solutions* constructives, il doit être reconnaissable aussi *a posteriori* sous la forme concrète des objets qu'il sert à produire ».

D'un côté, bien que souvent « intuitif », le « type a priori » est une « somme d'informations organisées » formulant un « principe explicatif », dont l'existence est postulée pour « comprendre comment les interventions individuelles parviennent à une cohérence d'ensemble et pourquoi celle-ci est capable de durer ». De l'autre, le « type a posteriori » est une « *construction* scientifique issue d'une analyse, et qui s'efforce de décrire *systématiquement* le contenu du type a priori […] Étant une interprétation, le type a posteriori est forcément provisoire et dépendant de l'avancement des connaissances » (Malfroy, 1986, p. 194).

Une troisième méthode de reconception consiste à déterminer des types évolutifs capables de prendre en compte des rapports qualitatifs pour actualiser l'histoire. Les architectes postmodernes partent du passé pour travailler dans le présent, le développement passé s'actualise dans le présent. À chaque état du processus, le concepteur opère une lecture *a posteriori* de la structure du type utilisé (la rétroconception par l'analyse) et propose de manière spontanée une écriture *a priori* de l'évolution potentielle de ce type (la préconception par le projet) en vue d'accomplir le processus historique identifié dans le présent (la reconception du projet).

1.3.4 Topologies paramétriques

Outre l'étude des processus typologiques renouant avec l'historicité de l'environnement construit, une seconde alternative aux méthodes de conception modernistes est proposée en tirant parti de l'intégration des outils numériques de conception, de modélisation et de fabrication, elle est centrée autour du concept de *paramètre*.

Des précédents existent notamment à partir de l'influence sur la discipline de la cybernétique tentant de modéliser avec les mêmes concepts les humains, les animaux et les machines (Wiener, 1948). Des installations artistiques et architecturales caractérisées par l'interactivité humain-machine qu'elles développent grâce à l'intégration de capteurs et de processus de rétroaction. Par exemple, la *Tour spatiodynamique* (1955) et la *CYSP 1* (1956) de Nicolas Schöffer, ou le *Colloquy of Mobiles* (1968) de Gordon Pask et le projet du *Fun Palace* (1960-1966) de Joan Littlewood, Cedric Price et Gordon Pask… Par ailleurs, Gordon Pask (1969, p. 496) insiste déjà sur la « pertinence » de la « théorique cybernétique » en architecture parce qu'elle propose un « métalangage » pour en parler, mais surtout pour son *« appreciable predictive power »*.

Suite à la troisième révolution industrielle des années 1970 ayant rendu plus accessibles les outils numériques, l'expression de contradictions à partir de brisures issues des collages des déconstructivistes des années 1980 est progressivement remplacée par celle de continuités à l'aide de courbes. Dans les années 1990, des architectes élargissent le répertoire classique des formes architecturales en explorant les conditions inédites des modélisations de projets d'architecture dans le « cyberespace » (Gibson, 1984), en investiguant des architectures liquides (Novak, 1991), des architectures pliées (Lynn, 1993), des blobs (Lynn & Folds, 1995), ou des programmes d'animation (Lynn, 1999). En remettant en question le rapport traditionnel « forme-matière », ils expérimentent le concept d'« objectile » (Deleuze, 1988, p. 26), définissant un type d'objets inscrits dans une forme de continuum, évoluant continuellement au grés des variations continues de la valeur des paramètres qui les définissent : « une modulation temporelle qui implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme ».

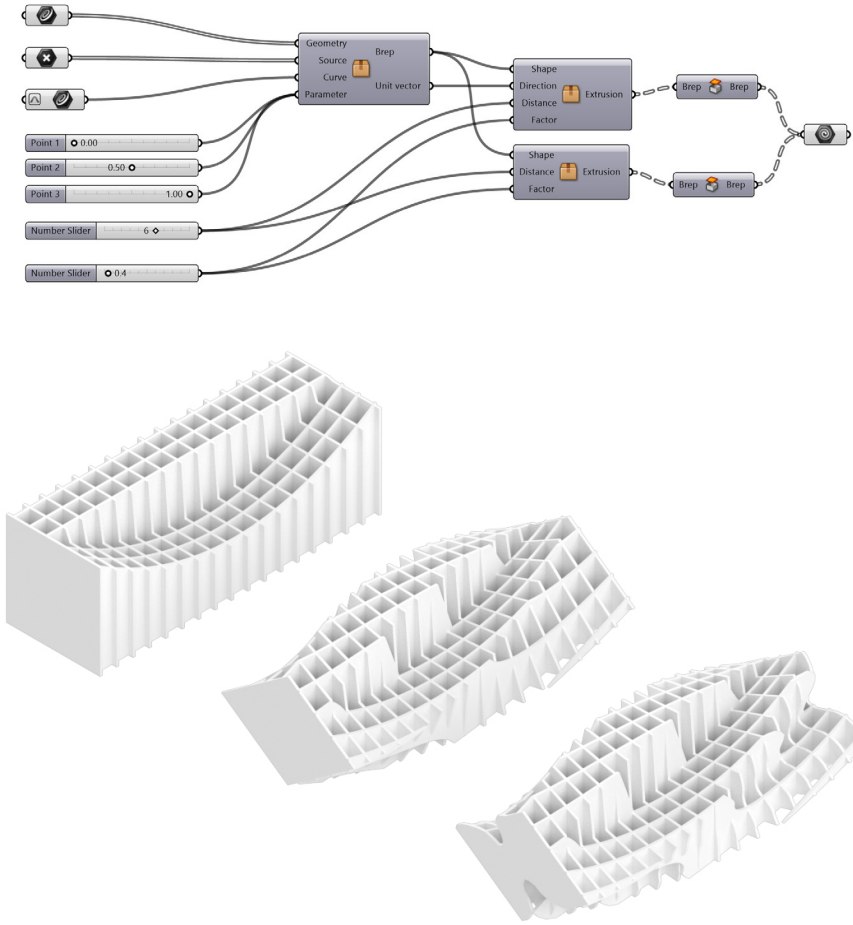


Fig. 8 – Un algorithme graphique pour créer un banc et trois occurrences générées sous la forme de modèles 3D. Développé avec Rhino7/Grasshopper dans le cadre du module « Modélisation & conception numérique », LOCI, UCLouvain, 2021 (enseignants : Damien Claeys, Sheldon Cleven, Jesus Manuel Perez Perez, Louis Roobaert). (Claeys & Naifer, 2022)

Après avoir dépassé la séduction des chimères virtuelles, les architectes ont lié leur expérience des outils numériques avec une approche plus concrète. Après la DAO/CAO traditionnelles, ils ont développé des logiciels paramétriques et le BIM. La visibilité de l'usage des paramètres en architecture s'est accrue notamment lorsque David Rutten a implémenté le logiciel Grasshopper dans les années 2000. Ce logiciel est conçu comme une interface de programmation visuelle, montrant clairement les différents paramètres intégrés dans le projet, et permettant d'ajuster de manière itérative leurs valeurs, tout en visualisant les effets de ces ajustements sur le modèle tridimensionnel du projet (*cf*. Fig. 8).

En associant le principe du continuum conception-fabrication mis en avant par l'« architecture associative » (Cache & Beaucé, 2003) ou *« file to factory »* (Cache, 1997), ainsi que par les « architectures non standard » et l'idée de « l'instauration d'un champ informationnel continu et homogène » (Migayrou, 2003, p. 13), les architectes articulent conception paramétrique et fabrication numérique en opérant une rencontre entre *« mass customization »* et *« design democratization »* (Kolarevic & Duarte, 2018). La combinaison de logiciels paramétriques de modélisation (Woodbury, 2010), de maquettes numériques pour le partage de données (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2008), des interfaces de scripting (Burry, 2011), des outils de recherche formelle et structurelle (Balmond, 2002), d'automates cellulaires (Batty, 2007), et de réseaux de neurones artificiels (Huang & Zheng, 2018), permet l'élaboration de nouveaux acteurs donnant vie à un véritable écosystème de coconcepteurs humains et artificiels (Ben Rajeb, 2012). Depuis les années 2010, « la paramétrisation de la conception architecturale semble avoir atteint un plateau, à la fois technique et conceptuel » (Chaillou, 2021, p. 36-37). Plus récemment, les architectes utilisent l'intelligence artificielle pour tenter de corriger les *faiblesses* du paramétrisme, à l'aide d'AI capables d'apprentissage et de « distribution statistiques » des données.

Alors qu'une *« ecology of the artificial »* (Manzini & Cullars, 1992) émerge pour associer l'architecture numérique avec une visée soutenable intégrant les services écosystémiques, une attention particulière aux processus sociaux semble encourager l'usage de techniques paramétriques en conception architecturale. En affirmant que la standardisation de l'architecture par le modernisme aurait été la réponse donnée à la normalisation sociale promue par l'âge mécanique (fordisme), Patrik Schumacher (2008, 2009) affirme que le *« parametricism »* serait la réponse de l'architecture à la diversité, la densité et l'interconnexion des processus sociaux de l'âge de l'information (post-fordisme). En s'inspirant de Niklas Luhmann (1984), il pense que l'architecture et l'urbanisme ont pour objectif l'« organisation spatiale des processus sociaux » (Schumacher, 2016) et que les processus de vie contemporains requièrent des configurations spatiales complexes, capables de fournir aux usagers des potentialités spatiales de proximité et d'interconnexion.

À la différence du modernisme, fondé sur un espace vide et universel, rempli de solides platoniques et de normalisations quantitatives, la topologie paramétrique met en valeur les qualités locales d'une multitude de lieux qualitatifs. La conception de l'environnement construit repose sur la régulation de *champs* de données, des flux de matière, d'êtres vivants et d'informations continuellement en mouvement. Cette topologie évite la répétition et la juxtaposition d'éléments indépendants pour considérer des formes paramétrables, changeantes et interactives, avec pour objectif l'intensification des relations internes aux édifices et des continuités externes aux espaces.

Une quatrième méthode de reconception consiste à pratiquer la préconception en déterminant des paramètres à partir desquels simuler l'évolution de projets, en utilisant la puissance de calcul d'outils analogiques et/ou de *machines numériques* pour générer une population d'occurrences. Si l'architecte postmoderne analyse le

passé pour déterminer ce qu'il va faire dans le présent, le concepteur paramétrique modélise le présent pour simuler le futur. Alors que les premiers croient que la stabilité historique des structures est reflétée par la continuité de leurs interprétations typologiques du bâti existant, les seconds sont convaincus que la qualité des échanges sociaux est supportée par le continuum interactif des environnements construits qu'ils modélisent.

1.4 Positionnement par rapport à la rétroconception[8]

La description chronologique de quatre exemples de méthodes de reconception pourrait être assimilée à la volonté d'établir une succession historique *parfaite*, allant du classicisme au modernisme, avant d'aboutir aux alternatives du postmodernisme et du *paramétrisme*. Ce qui correspondrait à une évolution linéaire, au cours de laquelle chaque méthode complèterait ou dépasserait la précédente, ou encore, à une adhésion plus marquée à l'une, plutôt qu'aux autres. Mais il n'en est rien ! Bien que le choix porte ici sur un nombre limité de quatre discours doctrinaux retenus par l'histoire, accompagnés d'illustrations devenues emblématiques de ces postures, une multitude d'hybridations de ces méthodes existent.

Alors que les théoriciens de l'architecture débattent depuis des siècles pour savoir s'il faut utiliser des modèles, des modules, des types ou des paramètres, l'hypothèse défendue ici est qu'ils cherchent des méthodes rationnelles pour construire les reconceptions qu'ils mènent. En effet, les concepteurs mobilisent la capacité *naturelle* de l'être humain à enrichir ses expériences actuelles avec celles du passé, tout en se projetant dans celles qui pourraient advenir. Autrement dit, ils utilisent professionnellement une capacité cognitive plutôt élémentaire, celle de produire des inférences en conciliant les données de la situation, un passé réinterprété et un futur espéré.

Au cours de tout processus de conception architecturale, le modèle mental du projet évolue, il est le résultat d'une succession de reconceptions d'un état *0* à un état *n* (*cf*. Fig. 9). À chaque instant, pour opérer sur son modèle, à l'image d'un *statisticien*, le concepteur équilibre le mouvement « descendant » des données de la *mémoire* et le mouvement « ascendant » des données de la *perception* (Claeys, 2017).

À moins que les données perçues remettent fondamentalement en question la conception du monde du concepteur, les informations de la mémoire ont toujours un poids beaucoup plus important lorsqu'une décision doit être prise. À chaque état *k* du processus de *projettation*, le concepteur réactualise l'image mentale du projet – il opère une reconception – à partir de trois processus (Claeys & Naifer, 2022) :

(1) la référence à un état antérieur du modèle à partir de rétroconceptions, puisque le projet actuel possède un ancrage, en tout ou en partie, dû aux données mémorisées à l'état *k-1* ;

[8] La section 1.3 est partiellement reprise de l'article (Claeys & Naifer, 2022).

(2) la remise en cause du modèle actuel, en tout ou en partie, en fonction de nouvelles données de la perception à l'état *k* (extraction de données par le retour perceptif de l'action dans l'environnement) ;

(3) la volonté d'atteindre un état postérieur du modèle en établissant des préconceptions, en fonction des données pressenties du projet imaginé à l'état *k+1*.

Lorsqu'il fait référence à des états précédents du modèle, le concepteur ne peut éviter une dégradation progressive de l'image initiale du projet, parce que la mémoire est elle-même un réseau évolutif de données, dont certaines peuvent apparaître, s'associer ou disparaître. De la même manière, les données perceptives sont réinterprétées, tandis que l'image mentale du futur projet est partiellement floue. Néanmoins, ces altérations laissent place à l'émergence de nouvelles organisations inédites du projet.

Alors qu'il opère des reconceptions successives, le concepteur effectue constamment des rétroconceptions locales en mobilisant sa mémoire et, après un arbitrage avec les données fournies par ses organes perceptifs, il établit régulièrement des préconceptions momentanées, à partir desquelles il peut envisager chacune des reconceptions suivantes. En avançant *de pas à pas* dans un processus sinueux, le concepteur opère une synthèse originale à chaque pas, en prenant appui sur les pas précédents, en évaluant le pas en cours et en imaginant ce qu'il pourrait obtenir des pas suivants.

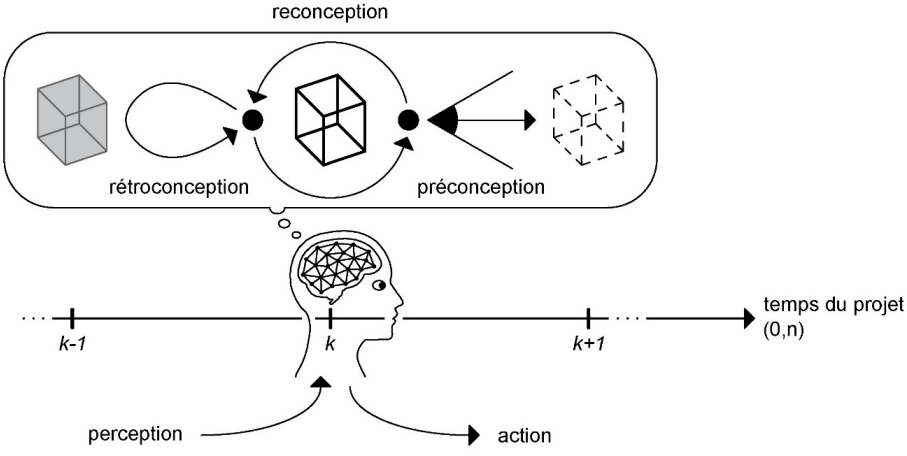


Fig. 9 – Succession de reconceptions du modèle mental d'un projet d'architecture, entre rétroconceptions des données mémorisées, analyse des données perceptives et établissement de préconceptions pour déclencher des actions. (Claeys & Naifer, 2022)

Ce processus de reconception est le résultat de la « conversation réflexive avec la situation » opérée par le concepteur, le rendant capable de « réflexion-dans-l'action » (Schön, 1983). La conversation permet un passage continu entre une démarche descendante et déductive rendue possible par une succession de décompositions analytiques à partir d'un problème mal-défini (Simon, 1973) et une démarche

ascendante et inductive intégrant les données issues de la situation. Le passage reflète la démarche « opportuniste » du concepteur caractérisée par des retours en arrière, des anticipations et des reports (Hayes-Roth & Hayes-Roth, 1979). En effet, en tant que « praticien », il agit dans « un contexte d'incertitude et d'instabilité » et ses compétences lui permettent d'apprécier « des situations en cours de route » (Estevez, 2015, p. 20), ce qui peut le mener à improviser, voire même à « bricoler » (Léglise, 2020).

Bien que toutes les méthodes de reconception présentées ici produisent, chacune à leur manière, des connaissances utiles pour la discipline architecturale, elles diffèrent par le *poids relatif* accordé à la valeur de la mémoire ou à l'attrait de la scénarisation prospective. Ainsi, du point de vue des reconceptions qu'ils servent, les discours mis en évidence sous-tendent quatre *pondérations* :

(1) dans une logique plastique, les modèles classiques à imiter reposent sur le recours à une mémoire idéalisée justifiant un présent décisionnel destiné à marquer les esprits de manière pérenne (pondération : très forte en rétroconception, très faible en préconception ; résultat espéré : une très faible reconception) ;

(2) dans une logique quantitative fondée par une rationalité idéalisée, les modules modernes à combiner valorisent un éternel présent décisionnel, en rupture annoncée avec toute forme de mémoire (pondération : très faible en rétroconception, forte en préconception ; résultat annoncé : une forte reconception) ;

(3) dans une logique historique, les processus typologiques actualisent des logiques évolutives du passé dans le présent, en justifiant les prises de décision postmodernes par une continuité historique illusoire (pondération : forte en rétroconception et faible en préconception ; résultat obtenu : une reconception moyenne) ;

(4) dans une logique algorithmique, les topographies paramétriques modélisent finement différents futurs possibles, pour proposer une hypothétique famille de solutions, personnalisées en masse ou optimisées, en vue d'atteindre un futur espéré (pondération : très faible en rétroconception et très forte en préconception ; résultat prédit : une très forte reconception).

La rétroconception est une méthode qui permet au concepteur de comprendre un projet réalisé dans le passé, en redécouvrant les processus et outils utilisés. Cette compréhension ne vise pas à reproduire exactement le même processus, mais plutôt à appliquer les connaissances acquises à de nouveaux projets pour les enrichir. Dans le domaine du patrimoine, la rétroconception prend une dimension particulière : elle vise à reproduire ou *compléter un projet existant*. Par exemple, un concepteur peut analyser plusieurs projets de logements anciens pour appliquer les méthodes découvertes à son propre projet, même s'il n'a pas accès aux données originelles ou n'a jamais rencontré les architectes de l'époque. Lorsque les projets sont incomplets, le concepteur « tel un inspecteur de police, à l'issue d'une enquête minutieuse » (Golvin, 2003), essaye de compléter l'existant, sans créer un projet entièrement nouveau. La rétroconception offre alors un outil capable de prédire plusieurs plans possibles, « quelque chose qui puisse ressembler le plus possible à l'objet de la recherche grâce à l'exploitation des indices connus et à la vraisemblance » (Golvin, 2003). Cela permet de créer un projet qui, non seulement, respecte l'œuvre origine-

lle, mais également, qui est enrichi par les nouvelles connaissances. En conclusion, la rétroconception permet d'appliquer des processus historiques à des projets modernes, et, dans un contexte patrimonial, de compléter et de reproduire de manière *fidèle* ou « pertinente » des projets existants (Golvin, 2003).

La méthode de la rétroconception se divise en deux sous-phases : initialement, une déduction des principes de construction, suivie d'une prédiction[9] du plan entier à partir de fragments[10] des thermes. La démarche s'appuie sur l'analyse de documents graphiques, tels que les plans et les coupes existants, ainsi que sur la prise en compte des traités d'architecture et des règles de composition des thermes romains. Afin de permettre une meilleure compréhension des édifices étudiés, une modélisation paramétrique de leurs caractéristiques architecturales est effectuée dans un modèle numérique, désigné sous le nom de *Parametric DataSet Model* (PDSM). En ce qui concerne la prédiction, l'intégration de l'intelligence artificielle (*Artifcial Intelligence* [AI]), visant à pallier les faiblesses du *paramétrisme*, facilite la rétroconception des plans d'un édifice thermal de la collection, malgré les lacunes présentes.

1.5 Des antécédents théoriques à l'implantation méthodologique

L'examen du rapport entre rétroconception et patrimoine met en évidence la spécificité de la démarche par rapport aux notions voisines de restitution, de reconstitution ou de restauration. Alors que celles-ci privilégient l'apparence matérielle et la continuité formelle des édifices, la rétroconception se définit comme une méthode analytique centrée sur la compréhension et la formalisation des logiques spatiales.

L'analyse épistémologique confirme que l'inscription de la démarche dans un cadre conceptuel hybride, à l'articulation de l'archéologie, de l'histoire de l'architecture et des sciences du numérique. Elle mobilise des outils d'abstraction pour transformer les vestiges en données structurées, ouvrant la voie à des raisonnements déductifs sur l'organisation des espaces et leurs régularités.

La mise en perspective historique des méthodes de rétroconception permet d'identifier une succession de modèles. Les approches classiques ont posé les bases descriptives, tandis que les modularités rationnelles ont introduit une logique de décomposition. Les processus typologiques ont ensuite enrichi l'analyse par des comparaisons, avant que les topologies paramétriques ne proposent une formalisation plus souple, adaptée aux environnements numériques et à la variabilité des édifices.

---

[9] La prédiction permet d'anticiper les différentes possibilités dans la manière de construire les thermes par les romains, offrant également la capacité de redessiner les parties manquantes du passé. Ce processus fournit des hypothèses éclairées sur la forme et la fonction des éléments perdus ou endommagés.

[10] Un fragment est défini comme « ce qui subsiste d'une pièce ou d'un élément unitaire qui a été brisé ». Par nature, un fragment est « toujours épars ». La partie demeurée sur place est qualifiée de « partie subsistante », tandis que celle qui n'a pas été retrouvée est désignée comme « partie perdue » (Golvin, 2005, p. 28).

2 MÉTHODE ANALYTIQUE DE DÉCOMPOSITION

Le deuxième chapitre explore « la méthode générative » développée par Mounir Dhouib et approfondie dans la thèse de Karim Bouaita (2015). Elle constitue la base méthodologique pour la phase préliminaire du processus de rétroconception : la décomposition. Le chapitre s'organise en trois sections principales. La première retrace les origines de la méthode générative et en expose les fondements théoriques. La deuxième présente le *modèle topologique cognitif* (Dhouib, 2004, 2014, 2022), ses trois paradigmes constitutifs (structural, imaginal et historique), sa traçabilité et ses diverses applications dans des recherches antérieures. Enfin, la dernière section s'attache à la transposition de cette méthode à la rétroconception des édifices thermaux étudiés.

2.1 Explication de la méthode analytique

Deux grands ensembles de références sont mobilisés afin d'expliciter les deux axes de la méthode adoptée : l'un relatif à la notion de *sphère* dans le monde romain, l'autre à l'*imaginal* issu de la philosophie islamique.

L'étude de l'histoire de la civilisation romaine ne constitue pas l'objet central de ce chapitre. L'analyse proposée se limite délibérément à une présentation synthétique de la vision du monde romaine (*Weltanschauung* ou conception du monde). Comme le monde « ne peut advenir que par la séparation, et ne peut exister que dans la relation entre ce qui est séparé » (Thomas, 2006), une *dualité* inscrite dans la philosophie, la religion et l'architecture gréco-romaine, traduisant une conception d'un « monde visible et tangible » (Platon, 1992, p. 121 [VI^{e} siècle av. J.-C.]) autour de forces opposées mais complémentaires : *esprit* et *corps*, *ciel* et *terre*, *dieux* et *hommes,* ou encore *eau* et *feu* (Bachelard, 1942, 1943, 1948, 1949).

Héritée de la tradition pythagoricienne et platonicienne, la sphère géométrique incarne l'ordre, l'harmonie et la clôture du monde (Platon, 1992, p. 39 [VI^{e} siècle av. J.-C.]). Dans la cosmologie romaine, elle traduit la représentation d'un univers fini, centré et hiérarchisé, où chaque niveau de réalité trouve sa place dans un tout organisé (Thomas, 2006, p. 218). Les volumes sphériques ou semi-sphériques, tels que les coupoles ou les absides, matérialisent cette vision d'un ordre cosmique projeté dans l'espace construit (Jones & Sidwell, 1997).

L'architecture romaine intègre des éléments médiateurs qui articulent les oppositions. L'*âme*, l'*empereur*, la *cité* et l'*architecture* assurent cette fonction de liaison entre les différents niveaux de l'existence. La hiérarchie qui en découle, inscrite dans la cosmologie romaine, relie domaines célestes (habités par les dieux) à la terre (réservée aux humains) et au monde souterrain (les enfers). Les temples, souvent

construits en hauteur, et l'organisation des villes, où forums et centres religieux occupent des emplacements soigneusement choisis, traduisent cet ordre cosmique vertical (Jones & Sidwell, 1997).

L'axe vertical ne se limite pas à une lecture propre à l'architecture romaine ; il trouve également un écho dans la philosophie islamique, à travers les travaux de Henry Corbin (1964, 1969, 1980), philosophe et orientaliste français, qui a développé une interprétation de cette tradition. Le concept des quatre éléments fondamentaux y est présenté sous un angle symbolique et fonctionnel (Corbin, 1980, p. 225). Dans le monde physique, l'élément *eau* procède d'une dimension reliant *imaginalement* la nature à l'intelligence ; la ligne verticale, inscrite dans la forme cubique du temple, la *Kaʿbah* (*cf*. Fig. 10), en exprime cette relation. Le terme arabe *rukn* (pl. *arkan*), désignant à la fois pierre, colonne ou pilier, incarne cette symbolique, chaque élément s'intégrant à une architecture à la fois sacrée et structurante.

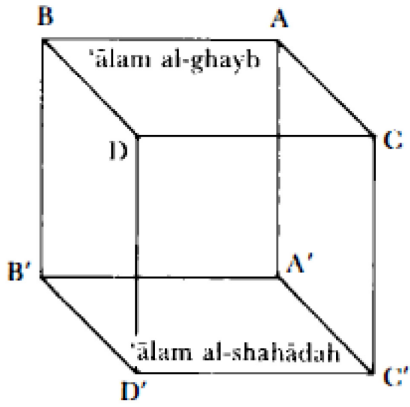


Fig. 10 – Le cube. (Corbin, 1980, p. 219)

Une cosmologie est « une représentation cohérente et rigoureuse de l'univers physique, qui se fonde sur un ensemble limité de présupposés axiomatiques » (Platon, 1992, p. 13 [VI^e^ siècle av. J.-C.]), dans laquelle les dimensions universelles de l'être s'organisent, selon Corbin (1980, p. 226), autour de quatre archétypes divins : *intelligence universelle*, *âme universelle*, *nature universelle* et *matière universelle* (*cf*. Fig. 12). Ces dimensions des « lumières supérieures » ne se réduisent pas au monde physique. La matière *universelle*, par exemple, ne correspond pas à la matière tangible, mais à une « *materia prima* » englobant l'ensemble des états subtils et spirituels. Lorsque ces lumières se reflètent sur la terre « de la réceptivité (*arz al-qâbilîya*) », elles entrent dans un processus de manifestation (*zuhūr*) qui leur confère une forme physique ordonnée.

Cette dynamique se traduit de manière symbolique dans des structures telles que la *Kaʿba* terrestre, conçue comme la métaphore de l'incarnation des réalités *archétypales* (*cf*. Fig. 11) célestes dans le monde terrestre. Parmi ces *archétypes*, Corbin (1980, p. 226-227) accorde une importance à *l'intelligence universelle* et à l'*âme universelle*, qu'il désigne comme « *haqa'iq muta'assilah ilahiyah* ». L'intelligence univer-

selle constitue la source première de la connaissance et de l'organisation cosmique, tandis que l'âme universelle agit comme médiatrice, reliant les dimensions intelligibles supérieures aux dimensions naturelles et matérielles inférieures.

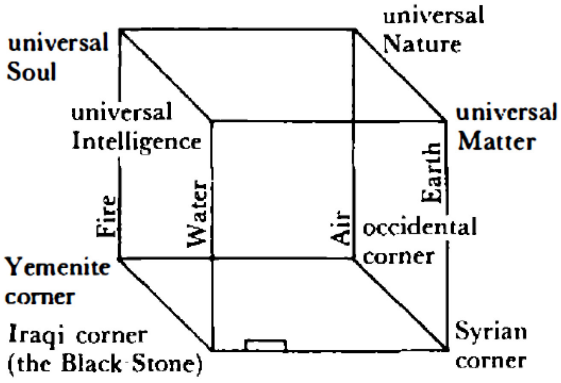


Fig. 11 – Correspondance du plan de la Ka'ba avec le plan des Réalités-archétypes. (Corbin, 1980, p. 229)

L'idée d'un axe vertical se comprend comme la métaphore d'un chemin spirituel reliant l'immanence terrestre à la transcendance divine (Sloterdijk, 2011). Ce concept, inspiré des enseignements de penseurs tels qu'Avicenne [Ibn Sina] et Sohrawardi, repose sur une progression hiérarchisée de la connaissance et de l'illumination spirituelle, chaque étape marquant une transformation intérieure.

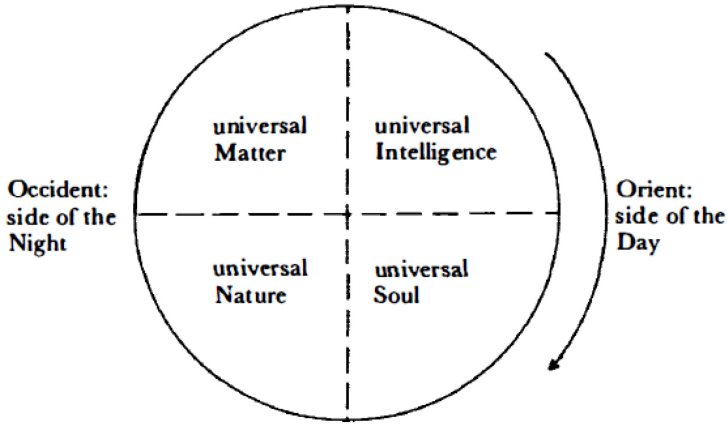


Fig. 12 – Le *nycthémère* de la cosmogonie. (Corbin, 1980, p. 228)

Pour Avicenne, cet axe ne relève pas uniquement de l'ordre *métaphysique*, il constitue également un chemin de *connaissance*. L'ascension le long de cet axe engage une série de transformations de l'âme, qui se purifie et se prépare à recevoir les vérités divines. Cette ascension est « graduelle et le passage de la terre au ciel se

fait par une succession d'échelons hiérarchisés (états spirituels, initiatiques, de sagesse ou de connaissance) » (Claeys, 2018) et souvent décrite comme un voyage de l'âme, une quête progressive qui reflète les étapes de la connaissance et de l'illumination spirituelle. L'idée selon laquelle la hiérarchie repose sur une logique de relation, et non de simple juxtaposition des éléments, met en évidence « deux moteurs puissants de l'imaginaire antique, dans la mise en forme de ses dynamismes organisateurs » : les « contraires » et la « relation » (Thomas, 2006, p. 23).

Bien que les romains n'aient pas conceptualisé l'idée d'un *axe vertical* avec la même terminologie ou précision philosophique que celle trouvée dans la pensée *islamique* ou *néoplatonicienne* (Corbin, 1980), les deux domaines abordent des thèmes de la transcendance, de la hiérarchie spirituelle et de l'ascension.

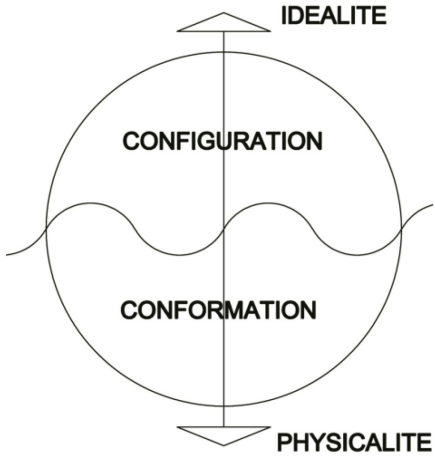


Fig. 13 – La dialogique Configuration/Conformation. (Dhouib, 2014; Bouaita, 2015, p. 124; Dhouib, 2022)

L'*axe vertical* « symbolise pour le voyageur qui l'emprunte une montée et/ou une descente verticale qualitative entre différents niveaux logiques pour maintenir un contact primordial – anciennement rompu – entre la terre et le ciel, entre perception des sens et pleine conscience » (Claeys, 2018). Du même, Corbin (1980, p. 69-70) met en avant l'idée que la connaissance analogique, au cœur de cette science des correspondances, est décrite comme une élévation spirituelle ou un chemin *analogique* qui « suit essentiellement le sens anagogique (qui conduit en haut) », menant l'âme à travers les différents degrés de cette hiérarchie. En somme, il défend une vision intégrale de l'être et de la connaissance, où *visible* et *invisible* se complètent pour révéler une compréhension transcendante de l'existence. Il symbolise un parcours spirituel et intellectuel profond, mettant en lumière la richesse et la complexité qui apparaît alors comme « un pont entre dualité et unité » (Thomas, 2006, p. 18). Cette idée continue d'inspirer ceux qui s'intéressent aux dimensions transcendantes de l'existence et aux voies de la connaissance qui y mènent.

La « méthode générative », une méthode *architecturologique* développée par Mounir Dhouib (2014; 2015; 2022) repose une vision *duale* (*cf*. Fig. 14) selon laquelle

le système de l'architecture répond à deux dimensions complémentaires. D'une part, la conformation représente la matérialité, suggérant une certaine *physicalité* tangible ; d'autre part, la configuration immatérielle traduit une idéalité conceptuelle (*cf*. Fig. 13).

Principalement inspirée par l'approche systémique (Koestler, 1968; Simon, 1969; Le Moigne, 1977, 1990; Simon, 1991), la méthode prend en charge la complexité de l'architecture. La *matière*, le *physique*, le *palpable* tendent à exprimer une *idée*, un *idéal* immatériel. La matière évolue selon un axe vertical orienté du bas vers le haut, de la conformation physique vers la configuration immatérielle.

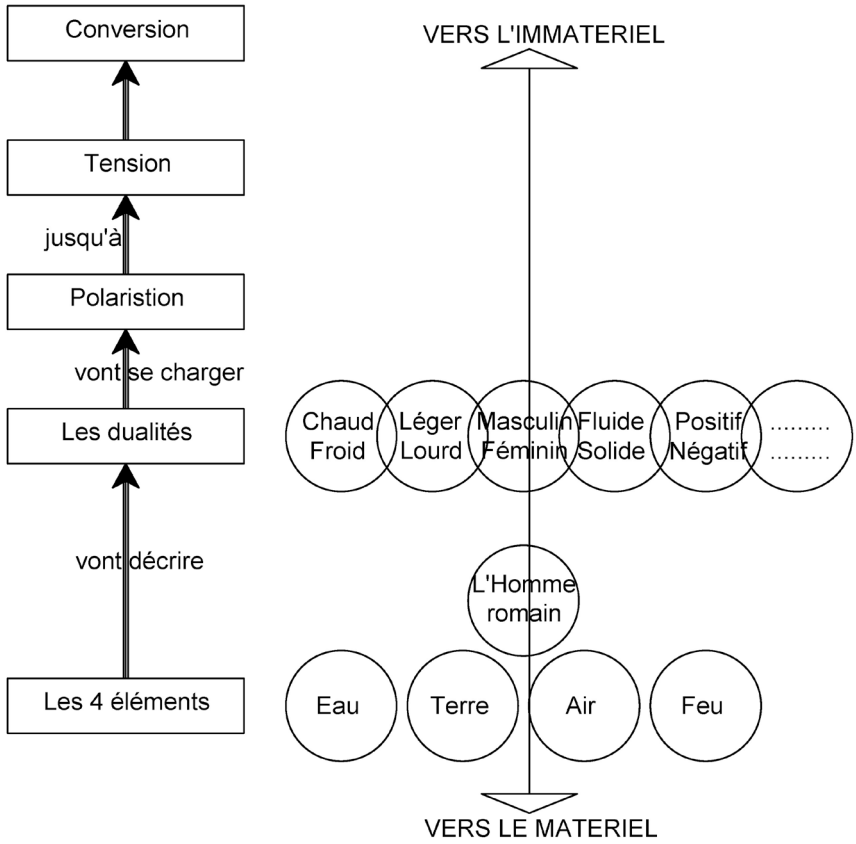


Fig. 14 – La dialogie de conversion. (Bouaita, 2015, p. 122; Dhouib, 2014, 2022)

2.2 Le « modèle topologique cognitif »

Le « modèle topologique et cognitif » développé par Mounir Dhouib (2014, 2022) et approfondie dans la thèse de Karim Bouaita (2015), utilisant la « méthode généra-

tive », facilite la compréhension d'un édifice dans sa totalité comme celui des thermes. Le modèle s'inspire du savoir des romains, qui se divisent en deux types principaux.

(1) un premier savoir rationnel scientifique en rapport avec les connaissances en géométrie, en techniques de construction…

(2) un second type de savoir, de nature mythique, est associé aux croyances romaines ainsi qu'à leur conception du monde et de l'univers. Ce savoir illustre comment les divinités et les forces surnaturelles exercent leur influence sur le monde naturel et humain, reflétant ainsi les dimensions mythiques de la culture romaine.

2.2.1 Les paradigmes du « modèle topologique cognitif »

2.2.1.1 Présentation de trois paradigmes

Ce « modèle topologique et cognitif » englobe non seulement le savoir scientifique et mythique, comme ceux chez les romains, mais également l'aspect historique.

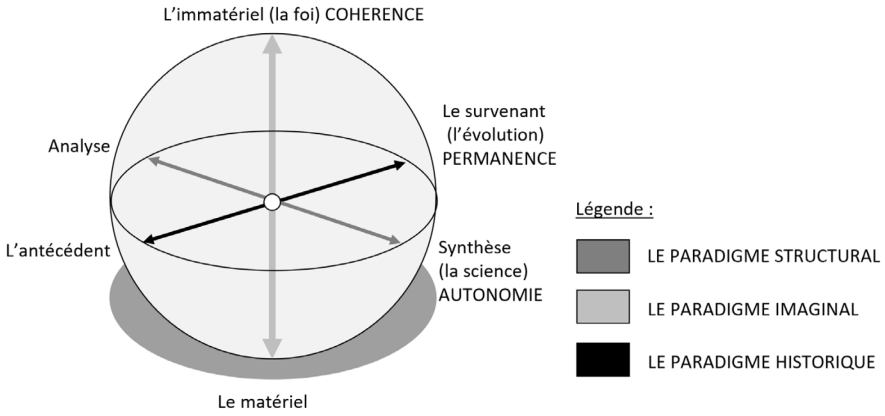


Fig. 15 – Le modèle topologique et cognitif. Adaptation selon la thèse de Karim Bouaita (2015, p. 160)

Donc il intègre l'étude de trois paradigmes (Bouaita, 2015, p. 160) (*cf*. Fig. 15) :

1. Le paradigme structural analytique (en rouge) : repose sur des principes scientifiques, rationnels et ancrés dans la réalité tangible. Ses pôles sont : « l'analyse/la synthèse ». Ses mouvements sont : « décomposer/recomposer ». Il admet « l'horizontalité » comme dimension reflétant l'autonomie du tout et des parties. Ce paradigme met en avant une approche méthodique et analytique, s'appuyant sur l'observation et la manipulation des éléments constitutifs d'un système pour comprendre leur structure et leur interaction ;
2. Le paradigme imaginal (en vert) : ancré dans des dimensions plus subjectives et spirituelles, il se manifeste à travers la foi, le poétique et le symbolique. Ses

pôles sont : « le matériel/l'immatériel ». Ses mouvements sont : « s'élever/descendre ». Il admet « la verticalité » comme dimension représentant l'unité dans pluralité et la cohérence des éléments. Ce paradigme explore la relation entre le concret et l'abstrait, en tenant compte des significations symboliques et des interprétations poétiques ou spirituelles des espaces ;

3. Le paradigme historique (en bleu) : s'inscrit dans le temps et se manifeste à travers l'évolution et la mémoire. Ses pôles sont : « l'antécédent/le survenant ». Ses mouvements sont : « Innover/imiter ». Il admet « la profondeur » comme dimension symbolisant la permanence et l'idée d'évolution. Il met en lumière les transformations progressives et les continuités historiques, tout en explorant la manière dont le passé influence le présent et le futur.

Les trois paradigmes mobilisés permettent d'aborder les thermes à la fois comme structures matérielles et comme espaces porteurs de significations culturelles et historiques. Dans les traditions de l'école nationale d'architecture et d'urbanisme (ENAU), la méthode de rétroconception a été initié par Mounir Dhouib, puis appliquée pour la première fois dans le cadre du mastère de Karim Bouaita (2008). Fondée en partie, sur le paradigme *structural*, cette approche se concentre sur la conformation matérielle des édifices. Les paradigmes *historique* et *imaginal* sont introduits de manière ponctuelle dans différents chapitres, afin d'enrichir l'analyse sans rompre la cohérence du cadre structural initial.

2.2.1.2 Les outils du paradigme structural analytique

Le *paradigme structural*, appliqué à l'analyse architecturale, constitue une approche méthodique visant à examiner les schémas spatiaux, notamment celles des thermes ou d'autres constructions analogues, c'est-à-dire « le corps de l'édifice » (Bouaita, 2015, p. 161). L'objectif principal de cette démarche est de décomposer les faits spatiaux pour les *recomposer* ensuite, afin de révéler les configurations internes et les relations qui les sous-tendent. Les outils spécifiques au *paradigme structural* (*cf*. Fig. 16) sont utilisés pour identifier les principaux types d'attributs propres aux données collectées sur les thermes. L'analyse débute à partir du premier niveau de connaissance, celui du monde phénoménal, où les thermes sont considérés comme des « édifices-objets ». Pour répondre aux exigences méthodologiques, l'attention est portée sur les quatre premiers outils du paradigme structural, permettant d'initier le traitement des données. Ces données sont, par la suite, enrichies par l'intégration d'autres types d'outils et d'attributs afin d'affiner la décomposition.

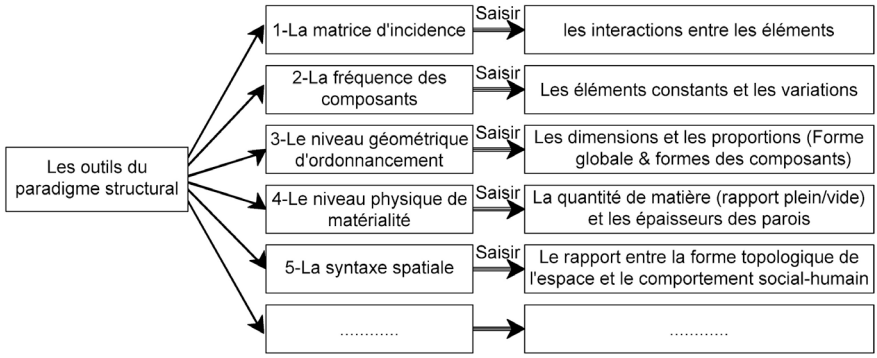


Fig. 16 – Les outils du paradigme structural et leurs champs d'action (Bouaita, 2015, p. 172)

(1) La matrice d'incidence ou matrice quasi décomposable : est un mécanisme de décomposition inventé par H.A. Simon (1969), issu de la théorie des *holarchies*. Elle repose sur la mesure des échanges entre les éléments d'un système, en l'occurrence, les salles et les espaces, autrement dit, entre le plein et le vide. L'intensité des échanges est significative de l'agrégation, de l'intégration, donc de la constitution des *holons*. Dhouib (2004, 2014, 2022) a proposé l'application de la matrice d'incidence à l'espace architectural (*cf*. Fig. 18), ce qui permet de décomposer les thermes en se basant principalement sur les inégalités des interactions entre les composants.

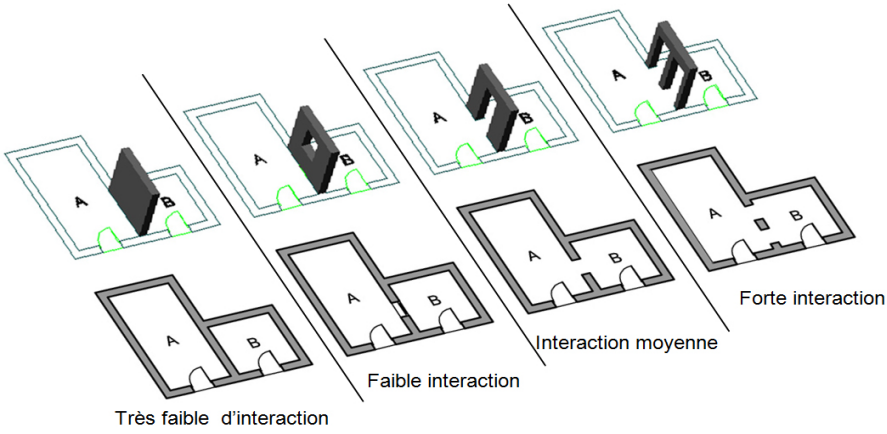
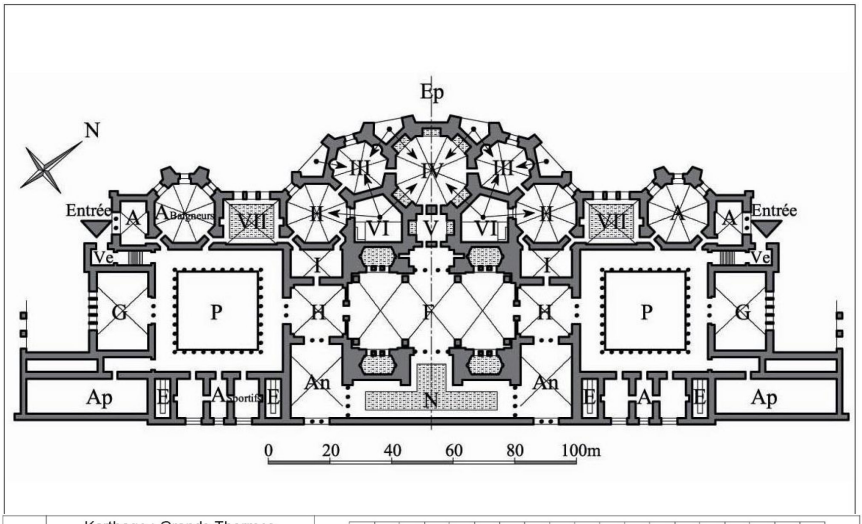


Fig. 17 – Qualification de l'interaction entre A et B selon la quantité de baie. Par l'équivalence : quantité d'échange = quantité de baie. (Bouaita, 2015, p. 172)

En établissant une correspondance entre « la quantité d'échange » et « la quantité de baie » (*cf*. Fig. 17), la matrice d'incidence permet de qualifier la relation entre

deux composants élémentaires[11], A et B, selon les catégories présentées dans le tableau (*cf*. Table 1).



T2 Karthago : Grands Thermes d'Antonin à Carthage

Code	Composant élémentaire	Nombre de composants	Nombre de relations par composant
I	Tepidarium d'entrée	2	3
II	Destrictarium	2	4
III	Sudatorium/Laconicum	2	3
IV	Caldarium	1	5
V	Tepidarium de sortie	1	2
VI	Praefurnium	2	3
VII	Piscine chauffée	2	4
Ve	Vestibule d'entrée	2	1
A	Apodyterium(baigneurs)	2	2
A'	Apodyterium(sportifs)	2	1
F	Frigidarium	1	4
P	Palestre	2	8
G	Gymnasium	2	1
N	Natatio	1	3
H	Hall de distribution	2	4
E	Escaliers	4	1
Ap	Annexe (palestre)	2	1
An	Annexe (natatio)	2	2

Tableau dressé par l'auteur

	I	II	III	IV	V	VI	VII	Ve	A	A'	F	P	G	N	H	E	Ap	An
I	x	F	-	-	-	-	M	-	-	-	-	-	-	-	M	-	-	-
II	F	x	M	-	-	f	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
III	-	M	x	M	-	f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	-	-	M	x	F	f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V	-	-	-	F	x	-	-	-	-	-	F	-	-	-	-	-	-	-
VI	-	f	f	f	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VII	M	M	-	-	-	-	x	-	M	-	-	M	-	-	-	-	-	-
Ve	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	M	-	-	-	-	-	-
A	-	-	-	-	-	-	M	-	x	-	-	F	-	-	-	-	-	-
A'	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	F	-	-	-	-	-	-
F	-	-	-	-	F	-	-	-	-	-	x	-	-	F	M	-	-	-
P	-	-	-	-	-	-	M	M	F	F	-	x	F	-	F	M	M	-
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F	x	-	-	-	-	-
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F	-	-	x	-	-	-	F
H	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	M	F	-	-	x	-	-	F
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	M	-	-	-	x	-	-
Ap	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	M	-	-	-	-	x	-
An	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F	F	-	-	x

Fig. 18 – La matrice d'incidence appliquée aux thermes de Carthage. (Bouaita, 2015, p. 189-190)

[11] Dans ce contexte, les composants élémentaires sont définis comme les éléments de base. Comme l'a mentionné Dhouib à travers la thèse de Karim Bouaita (2015), en adoptant une approche systémique, les thermes peuvent être supposés former un système arborescent, c'est-à-dire qu'ils peuvent être décomposés hiérarchiquement en unités : le secteur froid et le secteur chauffé. Chaque unité sera constituée à son tour de sous-unités et de composants élémentaires (*frigidarium*, *tepidarium*, *caldarium*, *apodyterium*…).

Table 1 – Qualification des relations entre deux composants élémentaires. Adaptation selon Karim Bouaita (2015, p. 173)

relation spatiale entre deux composants élémentaires A et B	nature d'interaction	symbole schématique
lorsque les deux composants A et B sont étroitement liés, ils communiquent entre eux par le biais de deux ouvertures ou plus	interaction forte	F
lorsque les deux composants élémentaires A et B sont reliés par une seule porte, leur connexion est limitée	interaction modérée	M
lorsque les deux composants A et B entretiennent des relations limitées, leur connexion est minimale, comme dans le cas où ils ne sont reliés que par une fenêtre	interaction faible	f
lorsque les deux composants A et B n'entretiennent aucune relation entre eux, ils sont totalement indépendants et ne présentent aucune continuité ou connexion spatiale, n'étant pas contigus	très faible interaction ou presque absente (sans tenir compte des échanges thermiques, sonores, d'énergies ou d'informations)	-

(2) La fréquence d'apparition des composants élémentaires : vise à distinguer les éléments constants des éléments de variation au sein d'un système. Un « élément constant » désigne un composant fondamental, essentiel au fonctionnement et à l'identité du système. Ce type d'élément apparaît fréquemment dans le corpus étudié et joue un rôle structurant. En revanche, un « élément de variation » correspond à un composant optionnel, non indispensable. Bien que ce dernier puisse améliorer le fonctionnement global du système, son absence n'altère pas de manière significative son intégrité ou sa fonctionnalité. La relation entre la fréquence d'apparition (F) et la probabilité (P) d'un élément est proportionnelle : plus un élément apparait fréquemment dans le corpus, plus il est probable qu'il appartienne à la catégorie des éléments constants. À l'inverse, une faible fréquence d'apparition indique qu'il s'agit probablement d'un élément de variation.

(3) Le niveau géométrique d'ordonnancement : se concentre sur l'étude de la géométrie de l'espace habitable, en examinant ses dimensions et ses échelles. Cette analyse s'attache tout d'abord aux formes tridimensionnelles, telles que les cubes, les cylindres, les voûtes, ou d'autres volumes architecturaux. Ensuite, elle intègre l'étude des dimensions, incluant la longueur, la largeur et la hauteur des espaces, ainsi que les proportions qui en résultent. Enfin, l'analyse prend en compte les orientations des éléments architecturaux. Cette étude géométrique s'effectue à différentes échelles, allant de l'échelle urbaine à celle des détails décoratifs. Dans le cadre de la thèse, l'attention est particulièrement portée sur l'échelle de l'édifice et de ses composants élémentaires (*cf*. Fig. 19).

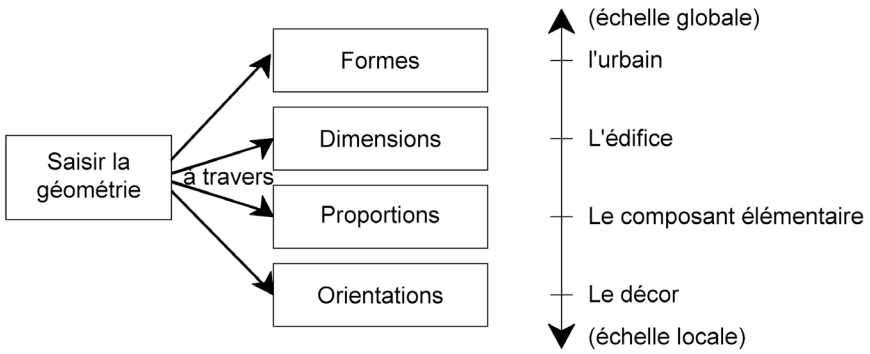


Fig. 19 – Le niveau géométrique d'ordonnancement. (Bouaita, 2015, p. 175)

(4) Le niveau physique de matérialité : se concentre sur l'analyse de la dimension physique du « dispositif du solide d'englobement » donc de l'étude des pleins (DSE), avec un accent particulier sur la matière elle-même. Cette analyse porte tout d'abord sur le rapport plein/vide, qui examine la répartition des quantités de matière dans l'espace et leur contribution à l'organisation spatiale. En outre, ce niveau intègre l'étude des épaisseurs des murs, en analysant leurs variations au sein des différents composants élémentaires de l'édifice.

2.2.2 Les postulats du « modèle topologique cognitif »

Pour approfondir la compréhension d'un édifice et choisir un objet d'étude lors d'un processus de modélisation, Dhouib (2004) a établi une série de postulats, qui sont approfondis à travers la thèse de Karim Bouaita (2015), servant de fondement à la construction du « modèle topologique et cognitif ».

(1) Le postulat épistémologique : repose sur l'idée que la connaissance progresse d'un niveau concret vers des dimensions conceptuelles. Le premier niveau se concentre sur les faits réels, tels que les objets et les édifices, constituant le point de départ de l'étude de l'*objet* (thermes). Le deuxième niveau intègre les connaissances implicites, notamment les savoir-faire pratiques encore présents dans l'architecture. Ces connaissances, souvent non formalisées, sont structurées et enrichies par la modélisation, qui les élève au troisième niveau, celui des théories formalisées. Enfin, le dernier niveau correspond à l'épistémologie, où la réflexion porte sur la théorie de la connaissance elle-même, analysant les mécanismes par lesquels le savoir est constitué. La progression de la connaissance, allant du concret à l'abstrait, permet de transformer les observations empiriques en théories solides, renforçant ainsi la compréhension scientifique des thermes (*cf*. Fig. 20).

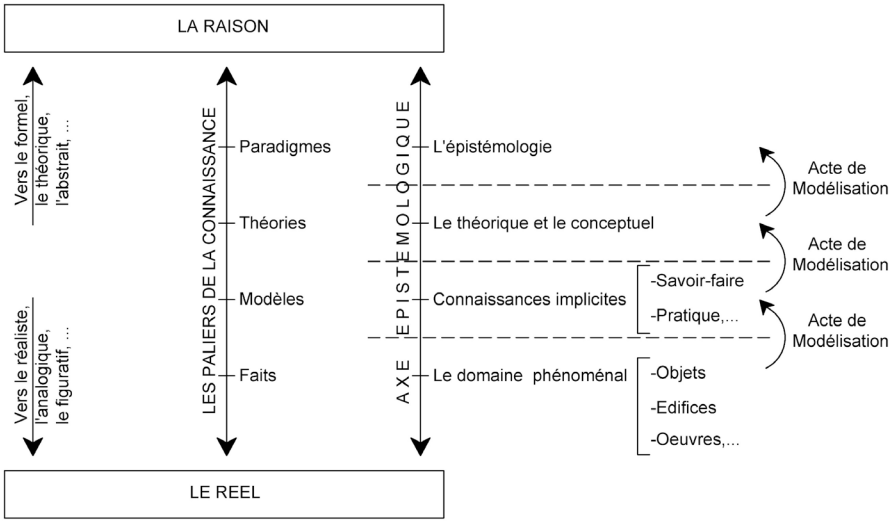


Fig. 20 – Le postulat épistémologique. (Dhouib, 2004, p. 47)

(2) Le postulat du système architectural global : s'inscrit dans une vision systémique qui envisage l'architecture comme un ensemble universel, englobant toutes ses formes, qu'elles soient romaines, grecques, de la renaissance, modernes ou issues d'autres époques. Ce système ne procède à aucune exclusion, indépendamment de la nature, de la localisation géographique ou de la temporalité des architectures. Défini comme un système complexe, conformément à la description de H.A Simon (1991), il est constitué d'un ensemble d'éléments nombreux interagissant de manière complexe. Ce système se caractérise par plusieurs propriétés : (1) la *hiérarchie*, qui organise les éléments en niveaux ou couches en fonction de leur importance ou de leurs rôles fonctionnels ; (2) l'*évolution*, reflétant la capacité du système à se transformer et à s'adapter au fil du temps ; (3) la *quasi-décomposabilité*, permettant d'analyser le système en le divisant en sous-systèmes plus simples, tout en considérant leurs interactions. L'interconnexion de toutes les formes d'architecture met en évidence l'importance de considérer chaque édifice comme une partie d'un ensemble plus vaste. Cette perspective systémique révèle des principes universels qui transcendent la diversité des formes architecturales.

(3) Le postulat holographique : s'appuie sur le concept de « Holon » (Koestler, 1968), qui désigne « la partie et le tout » autrement dit une entité à double nature : à la fois une partie individuelle autonome et un composant intégré dans un système plus vaste. Chaque *Holon* conserve son autonomie tout en participant à un ensemble global, qu'il soit déjà constitué ou en cours de formation. Karim Bouaita (2015) cite en exemple le système architectural romain, qui fonctionne à la fois comme un sous-système local d'un système architectural global et comme un ensemble complexe autonome.

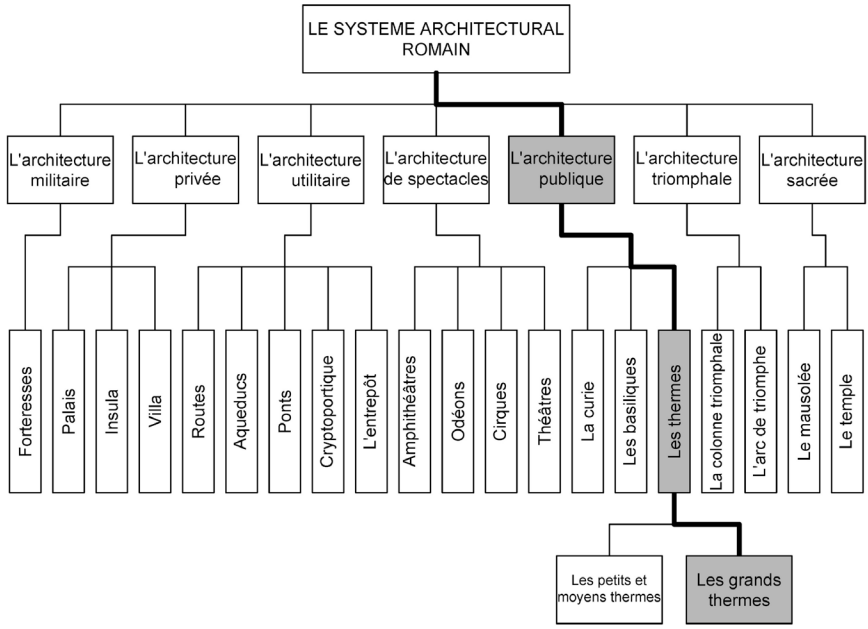


Fig. 21 – Taxinomie des édifices romains selon leur programme. (Bouaita, 2015, p. 167)

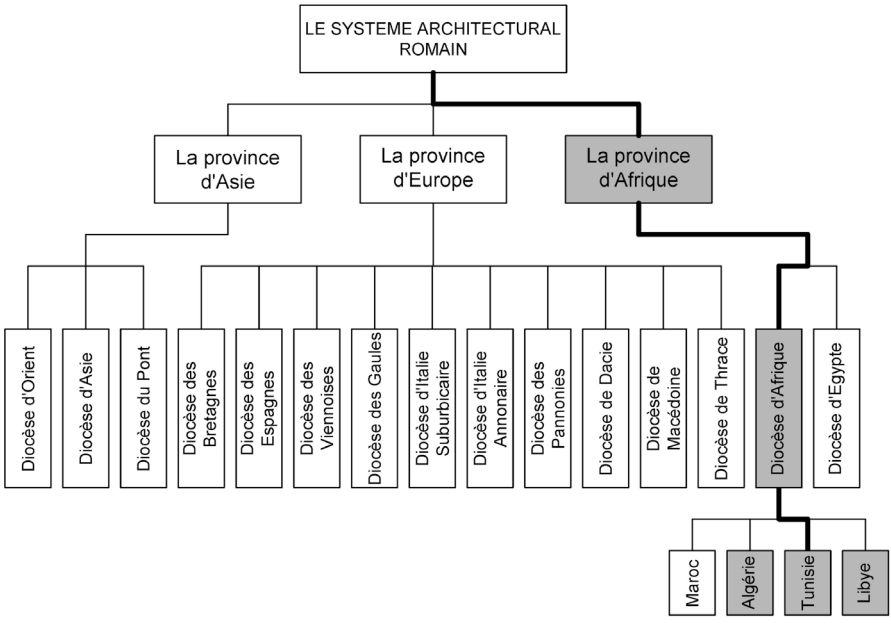


Fig. 22 – Taxinomie selon les provinces romaines. (Bouaita, 2015, p. 167)

Ce système se prête à plusieurs modes de classification : (1) une classification fonctionnelle, basée sur la fonction des édifices, regroupant par exemple l'architecture militaire, publique, privée ou de spectacle ; (2) une classification géographique, organisant les édifices en fonction des provinces de l'empire romain, comme celles d'Europe, d'Asie ou d'Afrique. Chaque édifice ou système architectural agit comme une entité autonome tout en contribuant à un tout, offrant une perspective systémique qui relie le local au global (*cf*. Fig. 21, Fig. 22).

(4) Le postulat du lieu architectural : établit que tout lieu architectural repose sur l'interaction de deux éléments fondamentaux, dont l'interaction définit la nature de l'espace : (1) un « dispositif du solide d'englobement » (DSE) ; (2) un « milieu fluide habitable » (MFH) (*cf*. Fig. 23). Le DSE, représente « le plein » défini par les parois et les toitures. Par sa conformation physique, il produit un espace englobé ou, inversement, est façonné par cet espace. « Il y aurait une double réalité constitutive du fait architectural et urbain, c'est un solide d'englobement qui engendre un espace englobé. Si ce n'est le contraire qui est vrai : c'est un milieu habitable support des pratiques, qui engendre les parois, et les enveloppes adéquates et adaptées au bon déroulement de l'habiter » (Dhouib, 2004, p. 84).

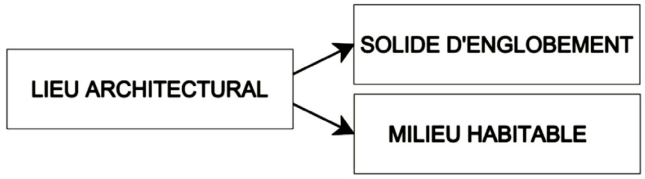


Fig. 23 – Le postulat du lieu architectural. (Dhouib, 2004, p. 82)

À l'échelle architectural de l'édifice, « le milieu est à l'intérieur de l'enveloppe physique, constituée par le solide d'englobement. L'espace intérieur est un volume en creux rempli d'air et conditionné pour recevoir les pratiques et les usages de l'habiter » (Dhouib, 2004, p. 82). Le DSE se distingue par sa forme plastique et sa structure constructive, tandis que le MFH est défini par des critères d'usage, de confort, et d'ambiance. Les caractéristiques des murs séparant deux espaces, telles que leur épaisseur, le nombre et la taille des ouvertures, définissent les interfaces entre ces espaces. Ces éléments fournissent des indications sur les échanges et les interactions qui s'y déroulent, tant en termes de nature que de quantité. En somme, un lieu architectural émerge de l'interaction équilibrée entre le DSE et le MFH. L'interface, appelé « volume virtuel en creux » (VVEC) (Dhouib, 2004), agit comme un régulateur unifiant les différentes parties dans un tout cohérent (*cf*. Fig. 24). Ce concept souligne la complémentarité entre la matérialité de l'architecture et les pratiques humaines qu'elle abrite.

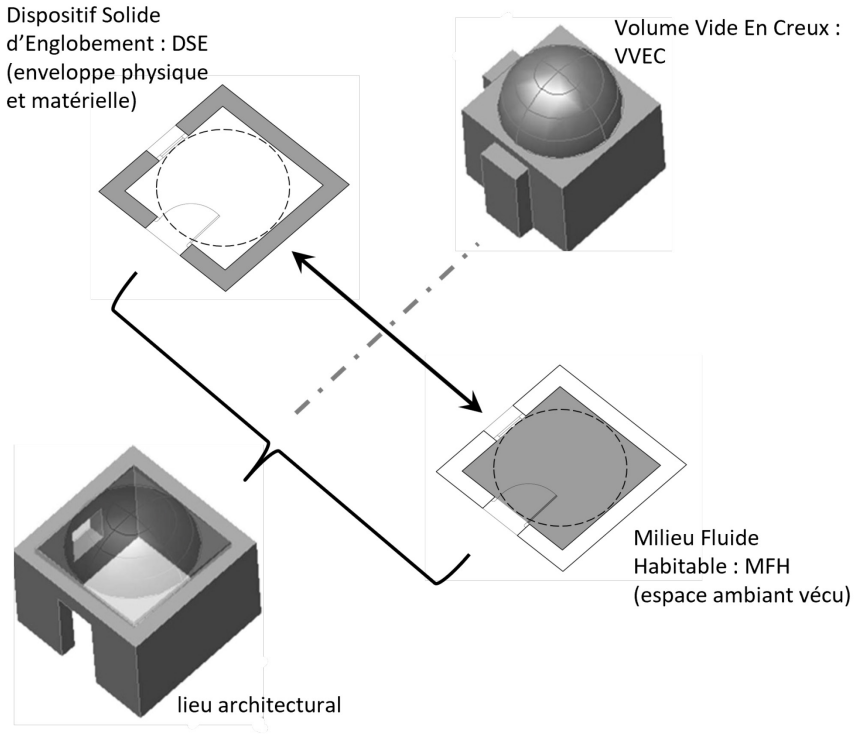


Fig. 24 – Le dispositif du solide d'englobement (DSE) et le milieu fluide habitable (MFH). Adaptée et actualisée d'après la thèse de Karim Bouaita (2015, p. 170)

2.2.3 Applications du « modèle topologique cognitif » sur les thermes

La production de connaissances suit une progression académique méthodique (*cf*. Table 2). « Le modèle topologique et cognitif », testé par plusieurs chercheurs de l'équipe ERAMC dirigée par Mounir Dhouib, a été appliqué à un corpus de thermes, démontrant ainsi sa pertinence dans l'analyse et la compréhension de ces édifices.

(1) Inès Bouraoui (2005) a constaté que la description classique de l'architecture ne permettait pas d'acquérir une connaissance approfondie des édifices. Pour remédier à cette limitation, elle a utilisé « le modèle topologique et cognitif », pour décrire, représenter, analyser et comparer. Ce modèle a été appliqué aux bains collectifs situés dans le bassin méditerranéen et le monde musulman (Orient), avec un focus sur la Tunisie. En se basant sur les paradigmes structural et historique, elle a identifié les types d'art de bâtir spécifiques à chaque civilisation en Tunisie, depuis l'époque punique jusqu'aux périodes romaine, byzantine et musulmane. Grâce aux outils du paradigme structural, elle a procédé à une classification méthodique des édifices balnéaires, distinguant quatre classes de thermes et quatre classes de hammams, enrichissant ainsi la compréhension des évolutions architecturales et culturelles de ces espaces à travers les âges.

Table 2 – Liste des travaux sur l'architecture thermale. (Naifer, Bouaita, & Dhouib, 2025)

nature	titre	in/dirigé par	auteurs, date	lieu
article + communication	*« Cadre méthodologique pour la rétroconception paramétrique assistée par IA »*	SCAN'24 - 11e Séminaire de Conception Architecturale Numérique IA & Architecture	(Naifer et al., 2024)	Université Ibn Khaldoun, Tunis
thèse de doctorat	*« Rétroconception paramétrique des thermes impériaux de Rome »*	dirigée par Mounir Dhouib	(Soussi, 2019)	ENAU, Tunis
thèse de doctorat	*« Rétro-Conception Architecturale : Le Modèle Des Thermes Impériaux Romains de Tunisie »*	dirigée par Mounir Dhouib	(Bouaita, 2015)	ENAU, Tunis
article	*« Modélisation Architecturologique des Thermes impériaux romains de Tunisie »*	revue algérienne « *Courrier du savoir scientifique & technique*»,N°13, pp.141-152	(Lichiheb, Bouaita, & Dhouib, 2012)	Université Mohamed Khider Biskra - Algérie
article + communication	*« Virtual and Cognitive Reconstruction of Roman Baths in Tunisia »*	colloque «*History Colloquium-4 Mediterranean Cities: Antiquity as Future?* » day 2, 4th session.	(Dhouib & Lichiheb, 2011)	Mersin University, Turquie
mémoire de mastère	*« Reconstruction virtuelle et cognitive des thermes impériaux romains de Caracalla à Dougga »*	encadré par Mounir Dhouib	(Lichiheb, 2011)	ENAU, Tunis
mémoire de mastère	*« Le système de l'architecture des bains collectifs ifriquiens, Analyse comparative et modélisation des thermes et des hammams »*	encadré par Mounir Dhouib	(Bouraoui, 2005)	ENAU, Tunis

(2) Houda Lichiheb (2011) a conduit une analyse approfondie des thermes impériaux romains en Tunisie afin d'identifier un ensemble de règles physiques et géométriques sous-jacentes. En s'appuyant sur le paradigme structural, elle a procédé à la reconstruction architecturologique des thermes de Caracalla à Dougga et à la modélisation d'une maquette virtuelle. Cette maquette a ensuite été utilisée pour tester le fonctionnement des thermes, en appliquant et expérimentant les principes identifiés, ce qui a permis de valider les hypothèses et d'affiner la compréhension de ces édifices emblématiques.

(3) Karim Bouaita (2015) a appliqué le modèle topologique et cognitif à une collection de dix-sept thermes impériaux romains (11 en Tunisie et 6 à Rome). Son objectif était d'analyser et de décomposer ce corpus afin de remonter au processus de conception architecturale et de retrouver les règles régissant ces édifices. Pour aborder la rétroconception architecturale, il a utilisé deux paradigmes principaux : le

paradigme structural, axé sur la conformation matérielle et constructive, et le paradigme imaginal, lié aux dimensions symboliques et poétiques des espaces. Par ailleurs, il a adopté une approche temporelle précise en s'appuyant sur l'axe des paradigmes historiques, permettant d'inscrire son analyse dans un contexte chronologique. Cette méthodologie a permis de révéler des principes architecturaux qui sous-tendent ces édifices, tout en explorant leurs aspects fonctionnels et symboliques. La dernière étape consiste à exploiter le modèle génératif pour proposer une reconstitution architecturale complète d'un édifice thermal à partir d'une portion ou d'un fragment existant. Par ailleurs, il a exploré la possibilité de concevoir de nouveaux thermes impériaux en fonction d'une surface déterminée, tout en respectant les principes et la cohérence interne caractéristiques du système architectural romain.

(4) Imen Soussi (2019) a introduit l'architecture paramétrique dans le cadre de la modélisation des thermes en développant un script sur Rhinoceros3D/Grasshopper. Ce script permet de déduire la forme de la toiture d'un composant élémentaire à partir de sa trace au sol, offrant une approche qui permet de reconstituer les volumes architecturaux. Son travail s'est focalisé sur le concept de volume virtuel en creux (VVEC), en s'appuyant exclusivement sur le paradigme structural pour explorer et modéliser les relations géométriques et physiques des édifices. Cette méthode a permis d'approfondir la compréhension des espaces en trois dimensions à partir de données bidimensionnelles, tout en démontrant l'efficacité des outils paramétriques dans le domaine de la rétroconception architecturale.

2.3 Transposition à la rétroconception architecturale

La systémique est une méthode de pensée interdisciplinaire à visée transdisciplinaire (Koestler, 1968; Simon, 1969; Le Moigne, 1977, 1990; Simon, 1991; Dhouib, 2004; Claeys, 2010, 2013, 2020) conçu pour comprendre et modéliser les phénomènes complexes en adoptant une vision globale et holistique. Ces auteurs analysent les concepts fondamentaux de la pensée systémique, ses principes méthodologiques, ainsi que ses nombreuses applications dans l'étude des systèmes complexes. Ils démontrent comment cette approche permet de modéliser des systèmes en intégrant leurs interactions dynamiques, leur organisation globale et leur capacité d'autorégulation. « Le développement de la systémique se poursuit aujourd'hui et elle s'enrichit des multiples expériences de la modélisation des systèmes complexes » (Claeys, 2013, p. 60), permettant de concevoir un projet comme un système dynamique, où chaque élément interagit avec l'ensemble pour contribuer à une solution globale et cohérente.

L'approche adoptée (*cf*. Fig. 26) s'inscrit dans une perspective systémique en mobilisant essentiellement le paradigme *structural*, qui fournit des outils méthodologiques pour analyser la décomposition des thermes via une approche de rétroconception. Ces outils fournissent une première sélection des types d'attributs, chacun étant associé à plusieurs caractéristiques (*features*). Une analyse qui est combinée avec les principes de composition des thermes en Tunisie et à Rome, extraits par rétroconception spatiale cognitive, comme l'a démontré Karim Bouaita (2015) dans

sa thèse. En s'appuyant sur les objectifs du modèle final dit *intelligent*, une décomposition plus approfondie des thermes révèle des attributs supplémentaires, qui enrichissent les données initiales. Les informations obtenues sont consolidées dans un inventaire exhaustif des règles de composition, destiné à fournir une compréhension détaillée et une modélisation rigoureuse des caractéristiques architecturales des thermes. Dans ce cadre, l'intégration de l'apprentissage automatique (*Machine Learning* [ML]) mobilise des savoirs scientifiques, pour tester le modèle sur un ensemble limité de données.

La méthode, fondée sur l'étude des fragments (*matière*), vise à atteindre une compréhension intellectuelle et conceptuelle de l'édifice étudié (*intelligence*). Ce processus s'apparente à une ascension méthodologique où les indices tangibles et les données fragmentaires servent de point de départ pour *rétroconcevoir* mentalement l'architecture originelle. L'axe vertical devient ainsi une métaphore du passage entre le concret et l'abstrait, entre l'analyse des vestiges et la synthèse conceptuelle.

L'analyse menée porte sur les conformations physiques des thermes. Ces dernières ne se limitent pas à une organisation formelle ; elles incorporent des configurations spatio-temporelles. L'approche adoptée repose sur une logique relie « l'analyse à la synthèse créant des passerelles pour une transition entre la décomposition et la recomposition » (Dhouib, 2004, p. 416). Ce processus permet d'interroger l'organisation structurale des ensembles étudiés et d'expliciter les mécanismes de formation et de transformation à l'origine des éléments constitutifs.

Cette dynamique de décomposition-recomposition s'inscrit dans une démarche de reproduction et de réinterprétation des architectures thermales, à partir de leur description et de leur analyse, assistées par les outils de l'intelligence artificielle (*Artificial Intelligence* [AI]). Conformément à l'hypothèse formulée par H.A Simon – selon laquelle une description suffisamment complète d'un objet ou d'un phénomène rend possible sa reproduction –, il devient envisageable de compléter les thermes fragmentaires. Un tel *redessin* engage un processus de *reformation*, de transformation et d'interprétation, activé par l'élaboration progressive d'un modèle structurant.

L'hypothèse directrice de cette recherche postule que la connaissance approfondie du processus de structuration conditionne la capacité à déclencher la reformation de ces édifices. Cette perspective s'inscrit dans une approche holistique, selon laquelle un modèle ne saurait se limiter à un exemplaire isolé. Plus la collection étudiée est étendue, plus la reproduction devient opératoire. L'architecture romaine constitue un système global, incluant à la fois les structures réalisées et les configurations virtuelles demeurées non actualisées.

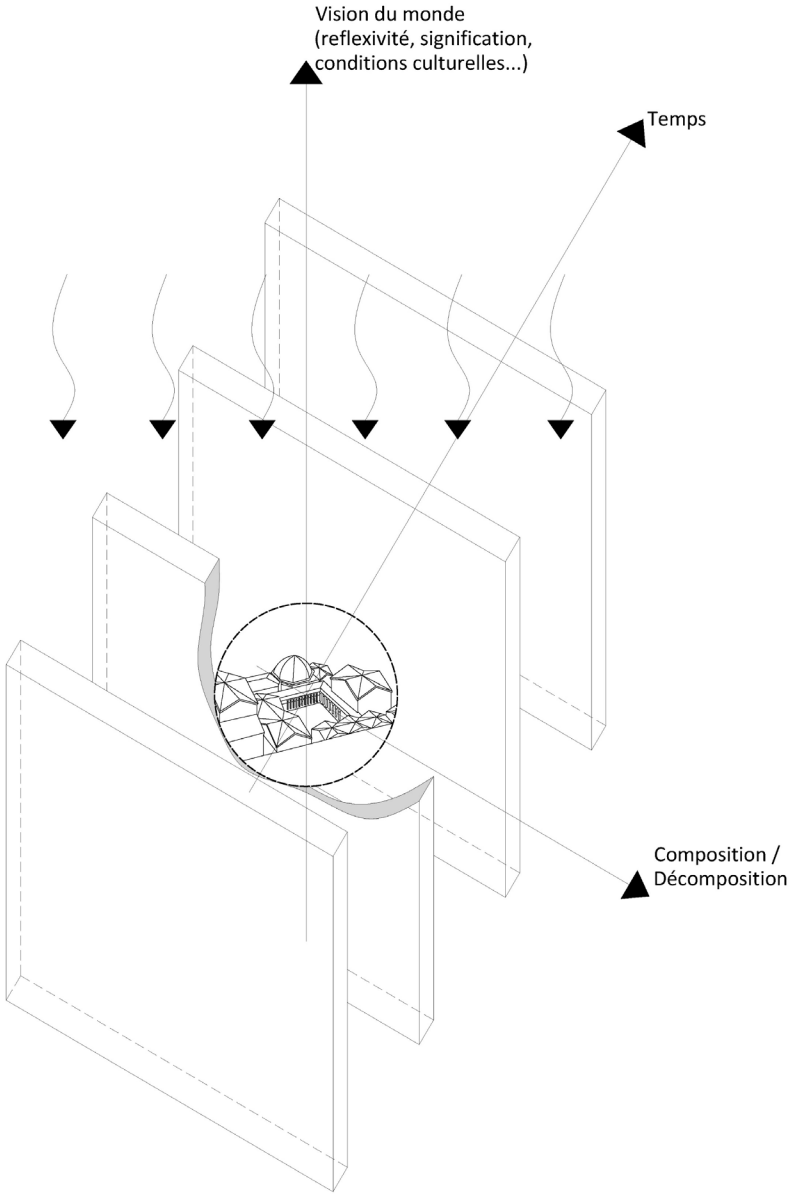


Fig. 25 – L'objet à travers les trois paradigmes du modèle topologique cognitif. Une transposition du travail réalisé par Mounir Dhouib (2004, 2014, 2022). L'image représentée par l'auteure d'après la visualisation (appelée restitution) réalisée par Jean-Claude Golvin (Golvin, 2025). (établie par l'auteure)

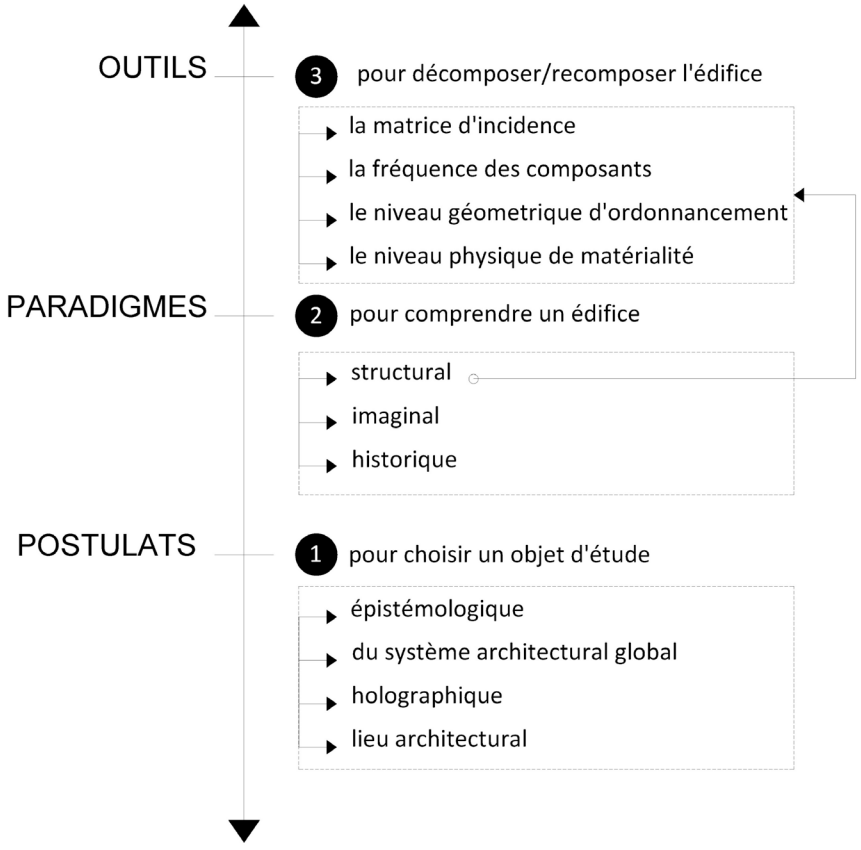


Fig. 26 – Schéma récapitulatif du modèle topologique cognitif à travers les postulats, les paradigmes et les outils. Une transposition du travail réalisé par Mounir Dhouib (2004, 2014, 2022).
(établie par l'auteure)

Le présent travail se concentre sur une composante spécifique de ce système global : l'architecture thermale romaine, et plus précisément les thermes impériaux d'Afrique du Nord. L'un des postulats fondamentaux est que la connaissance du système global facilite la rétroconception de ses déclinaisons locales. C'est également le principe de l'*architecturologie* systémique : plus la compréhension du système global est fine, plus il devient possible d'actualiser n'importe quelle configuration architecturale potentielle. En élargissant la base de données à partir d'un corpus cohérent de thermes impériaux, il devient possible d'enrichir les descriptions morphologiques et spatiales. Cette densification informationnelle favorise la complétion des édifices partiels ou lacunaires. C'est sur cette logique que repose l'hypothèse d'une intelli-

gence artificielle (*artificial intelligence* [AI]) spécialisée : plus les données accumulées sont nombreuses et précises, plus les prédictions générées sont pertinentes.

Par ailleurs, une tendance morphologique se dégage au sein des thermes impériaux : plus leur configuration se rapproche de la sphère – par leur géométrie, leur symétrie et leur organisation axiale –, plus ils semblent figurer une forme d'*idéalité* architecturale. L'analyse systémique et la classification typologique des bains impériaux permettent de produire une connaissance spécialisée de l'architecture thermale, rendant possible l'interprétation et la complétion des édifices incomplets.

L'édifice devient ainsi un système de représentations dont la compréhension exige une mise en relation avec ses contextes structural, imaginal et historique. Par une analyse systémique et une structuration raisonnée de connaissances issues de ces registres, il devient possible d'engager un processus de *génération* partiellement autonome de l'objet architectural, relevant d'une dynamique d'autoproduction fondée sur la logique interne de l'édifice lui-même (*cf*. Fig. 25).

2.4 De la compréhension du modèle topologique cognitif à son intégration dans la rétroconception

L'examen des fondements épistémologiques a montré que la décomposition analytique constitue une étape indispensable pour comprendre les logiques de formation et de transformation des thermes romains. L'étude de la cosmologie et des traditions philosophiques a permis de situer la méthode adoptée dans une perspective qui relie matérialité, symbolique et organisation conceptuelle, en soulignant le rôle de la verticalité comme principe structurant.

Le modèle topologique cognitif fournit les instruments nécessaires pour prolonger cette analyse. Par ses paradigmes structural, imaginal et historique, il associe observation rationnelle, interprétation culturelle et inscription temporelle, tandis que ses postulats établissent un cadre systémique où chaque édifice est pensé à la fois comme entité autonome et comme partie d'un ensemble plus vaste. Les outils du paradigme structural, appliqués aux thermes, permettent d'identifier constantes, variations et relations spatiales, en révélant les mécanismes internes de leur organisation.

La transposition de cette méthode à la rétroconception architecturale ouvre un champ d'application opérationnel. En articulant décomposition et recomposition, elle transforme l'analyse des fragments en processus génératif, où les données accumulées alimentent une modélisation capable de compléter et d'interpréter les édifices lacunaires. Cette perspective met en lumière le rôle de la systémique et des approches numériques dans la constitution d'un cadre interprétatif, condition préalable à l'intégration des techniques paramétriques et de l'AI dans la suite de la recherche.

3 *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* (AI)

Le troisième chapitre explore l'intégration de techniques d'intelligence artificielle (*Artificial Intelligence* [AI]) dans le champ de la rétroconception architecturale, en s'interrogeant sur leur capacité à résoudre des problèmes spécifiques ou à combler des lacunes dans la connaissance d'un édifice. Si les dispositifs intelligents issus de l'AI sont mobilisés ponctuellement dans différents chapitres de la thèse selon les besoins analytiques, ce chapitre adopte une approche générale, visant à en poser les fondements. Son organisation repose sur trois sections. La première présente les origines de l'AI ainsi que ses principaux domaines d'application. La seconde propose une définition synthétique, accompagnée d'un éclairage terminologique sur les notions techniques les plus récurrentes. La troisième s'attache à positionner le processus de *complétion* par rapport aux disciplines convergents de l'AI.

3.1 Fondements et domaines de l'AI

L'AI ne résulte pas d'un événement unique, mais d'un processus historique complexe, marqué par une succession de jalons. En prenant appui sur la relecture historique de l'AI proposée par Damien Claeys et Louis Roobaert (2022), et plus particulièrement sur la transition épistémologique opérée entre la cybernétique et l'internet des objets, l'analyse intègre une mise en perspective des concepts techniques fondateurs avec leurs prolongements contemporains dans les modèles génératifs, afin de structurer les fondements théoriques du chapitre méthodologique et de situer les outils mobilisés dans la rétroconception architecturale.

Les premières tentatives de simuler un comportement autonome remontent à l'antiquité. Les automates d'Héron d'Alexandre du I^er^ siècle après J.-C., tels que décrits dans les ouvrages compilés par Thomas Henri Martin (1854), témoignent déjà d'une volonté de représenter mécaniquement des actions humaines. Plus tard, au XIII^e^ siècle, Ismail Al-Jazari (1181), que son ouvrage était traduit en anglais (Al-Jazarī, 1973), conçoit des dispositifs hydrauliques, comme l'horloge éléphantine, combinant mouvement, temporalité et fonction symbolique, le canard de Vaucanson (Jacques de Vaucanson, 1738) pousse cette logique plus loin en imitant des fonctions biologiques, dans la lignée de la théorie cartésienne de l'« animal-machine » (Descartes, 1637).

En parallèle de ces développements mécaniques, des tentatives de formalisation du raisonnement émergent. Ramon Llul (1596), conçoit une logique combinatoire visant à reproduire les mécanismes de la pensée humaine, comme l'a rappelé Ernesto Priani (2025). Cette volonté d'automatiser le raisonnement s'intensifie au

XX^{e} siècle avec l'apparition de la cybernétique, conceptualisée par Norbert Wiener, qui s'appuie sur la régulation par rétroaction et modélise les comportements adaptatifs, tant biologiques que machinaux, à partir d'interactions dynamiques entre une entité et son environnement. Le projet *Anti-Aircraft Predictor* (Wiener, 1942), développé avec Julian Bigelow, associe capteurs, calcul prédictif et ajustement en temps réel. Ces principes sont ensuite généralisés aux systèmes biologiques en collaboration avec Arturo Rosenblueth, amorçant l'analogie entre machine et organisme vivant, fondée sur l'autorégulation (Rosenblueth, Wiener, & Bigelow, 1943).

C'est dans ce contexte que Alan Turing propose un modèle computationnel universel, la *machine de Turing* (Turing, 1936), avant de formuler le *jeu de l'imitation*, plus connu sous le nom de *test de Turing* (Turing, 1950), définissant l'AI comme la capacité d'une machine à simuler une interaction humaine de manière imperceptible. Ce tournant théorique est institutionnalisé par la conférence de Dartmouth (McCarthy, Minsky, Rochester, & Shannon, 2006 [1956]), qui est habituellement citée comme point de départ de l'instauration de l'AI en tant que champ autonome.

Deux grandes approches y prennent forme :

(1) l'approche symbolique, dominant jusqu'aux années 1980, repose sur la manipulation de règles logiques explicites. Des programmes, illustrent cette orientation, centrée sur le raisonnement formel, mais limitée face à la complexité du monde réel comme *Eliza* (Weizenbaum, 1966), simulent des conversations thérapeutiques, tandis que *Logic Theorist* (Newell & Simon, 1956) démontre des théorèmes mathématiques ;

(2) l'approche connexionniste, amorcée avec le « neurone artificiel » (McCulloch & Pitts, 1943), et développée par Donald O. Hebb (1949), s'inspire du fonctionnement cérébral. Le programme d'apprentissage de jeu de dames (Samuel, 1959b) introduit le principe d'apprentissage par renforcement, ouvrant la voie à des algorithmes capable d'apprendre de l'expérience. Ces recherches se poursuivent avec le *Perceptron* (Rosenblatt, 1958), une *machine neuronale universelle* en proposant différentes structures de réseaux de neurones artificiels (ANN) : *récurrents* (Hopfield, 1982), *parallèles* (Rumelhart, E., Mcclelland, & L., 1986), *bayésiens* (Pearl, 1988), ou encore plus tard, *multicouches* dans le cas du l'apprentissage profond (*Deep Learning* [DL]) (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015).

À partir de la fin des années 1990, les avancées technologiques, l'essor du *Web 2.0*, un terme inventé par Darcy DiNucci (1999) et popularisé comme concept par Tim O'Reilly et Dalle Dougherty lors de la première conférence organisée en 2005 par O'Reilly Media (O'Reilly, 2005) qui est puis retourné après cinq ans pour répondre à la question de quoi après web 0.2 (O'Reilly & Battelle, 2009), ainsi que l'augmentation massive des données disponibles (*big data*) accélèrent le développement de l'AI. Le *big data* est un concept, expliqué à travers le modèle des « 3V » (Volume, Vélocité et Variété) (Laney, 2001), a été étendu pour inclure d'autres dimensions, portant le nombre « V » à 5, 6, voire plus (Amir-Aslani & Bhajun, 2015). Ces extensions reflètent l'évolution des défis et des considérations liés à la gestion des données massives dans divers domaines. En 2012, le réseau *AlexNet* (Krizhevsky, Sutskever, & Hinton, 2012), entrainé sur GPU, révolutionne la reconnaissance d'ima-

ges. Le *deep learning* entre alors dans une phase d'expansion rapide, consacrée par le prix *Turing* décerné en 2018[12] à Yoshua Bengio, Geoffrey Hinton, and Yann LeCun (2015). Des systèmes tels que DALL-E 2 (Ramesh, Dhariwal, Nichol, Chu, & Chen, 2022), mis à disposition par OpenAI en 2022 (Brockman, Sutskever, & OpenAI, 2015), ainsi que Midjourney, développé par David Holz, qui a expliqué, lors d'un entretien, comment Midjourney influence l'art et l'économie créative (Salkowitz, 2022), permettent la génération d'images à partir de descriptions textuelles.

Ce changement de paradigme influence directement les champs de l'architecture et du patrimoine. L'archéologie virtuelle, introduite par Paul Reilly (Reilly, 1990, p. 133), repose sur la modélisation 3D qui permet aujourd'hui de documenter des modèles 3D et vérifier les étapes de fouilles archéologiques. Aujourd'hui, l'AI permet de générer des reconstructions à partir de descriptions textuelles, pour reconstruire des sites patrimoniaux endommagés en s'appuyant sur des descriptions et des données historiques (Arzomand, Rustell, & Kalganova, 2024). Par exemple, l'évaluation des images générées par AI, à l'aide d'indicateurs de performance tels que le *Structural Similarity Index Measure* (SSIM), le *Mean Squared Error* (MSE), et le *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR), a montré que l'AI est capable de fournir des reconstructions très précises, bien que la qualité des résultats dépende de celle des données d'entrée. L'utilisation des réseaux de neurones pour la reconstruction virtuelle du patrimoine architectural illustre également la capacité de l'AI à identifier des motifs cachés et à générer plusieurs solutions (Delgado-Martos et al., 2024).

Plus récemment, ces techniques ont été mises à profit dans le champ architectural, le DL propose déjà de nombreuses applications en architecture et en patrimoine, notamment par la mise en œuvre de *réseaux antagonistes génératifs* (GANs) (Goodfellow et al., 2014) associant deux ANNs (un générateur qui créé des données et un discriminateur qui évalue si les données sont réelles ou fausses (ces deux réseaux de neurones profonds sont en compétition l'un avec l'autre). Ainsi, Xavier Marsault (2012) propose « une génération automatique des voiries, des places et d'éléments de décor urbain à partir des empreintes au sol et de la hauteur des bâtiments (provenant du monde réel ou de calcul) », par « l'application d'un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis », et il teste comment mettre à profit des GANs pour l'aide à la conception en phase d'idéation (Marsault & Nguyen, 2022). De même, à partir d'un GAN, Weixin Huang et Hao Zheng (2018) appliquent *pix2pixHD*, permettant la traduction d'image à image, pour reconnaître et générer des dessins architecturaux et des plans d'appartements. Enfin, en mettant plusieurs GANs en réseau, Stanislas Chaillou (2021) propose un outil *ArchiGAN* de génération de plans capable d'améliorer ses résultats à partir des inputs successifs des utilisateurs, boucle entre la machine et le concepteur, et décomposant le processus en trois étapes réalisées par des réseaux indépendants : l'empreinte, la définition du programme et l'ameublement (Chaillou, 2019). Ainsi, de nombreuses approches ont déjà été explorées, pour la génération des plans, faisant souvent appel au DL, via l'usage de GANs (Razavi-Far, Ruiz-Garcia, Palade, & Schmidhuber, 2022).

[12] 2018 Turing Award

3.2 Définition et terminologies liés à l'AI

Définir l'AI constitue un exercice complexe, en raison de la diversité de ses domaines d'application et de l'évolution rapide des technologies qui la soutiennent.

Dans les approches actuelles, l'AI repose en grande partie sur l'apprentissage automatique (*Machine Learning* [ML]), défini comme « la capacité des systèmes à apprendre sans être explicitement programmés » (Han & Kamber, 2012, p. 24; Samuel, 1959a). Pirmin Lemberger et al. (2015, p. 110) précisent qu'il s'agit d'« un ensemble d'outils statistiques ou géométriques et d'algorithmes informatiques qui permettent d'automatiser la construction d'une fonction de prédiction *f* à partir d'un ensemble d'observations que l'on appelle l'ensemble d'apprentissage ». À partir de cette logique, les machines peuvent réaliser des tâches variées, comme « reconnaître une image, de transcrire la voix d'une langue à une autre, de traduire un texte, d'automatiser la conduite d'une voiture ou le pilotage d'un procédé industriel ». Il convient toutefois de distinguer le ML de DL, un sous-domaine dans lequel des réseaux de neurones permettent d'apprendre des tâches complexes à partir de très grands volumes de données (LeCun, 2019, p. 5).

Table 3 - Quelques définitions de l'intelligence artificielle, classées en quatre catégories. (adaptation selon Stuart J. Russel et Peter Norvig (1995, p. 5))

Thinking Humanly	**Thinking Rationally**
« The exciting new effort to make computers think . . . machines with minds, in the full and literal sense. » (Haugeland, 1985) « [The automation of] activities that we associate with human thinking, activities such as decision making, problem solving, learning ... » (Bellman, 1978)	« The study of mental faculties through the use of computational models. » (Charniak and McDermott, 1985) « The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act. » (Winston, 1992)
Acting Humanly	**Acting Rationally**
"The art of creating machines that perform functions that require intelligence when performed by people." (Kurzweil, 1990) « The study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better. » (Rich and Knight, 1991)	"A field of study that seeks to explain and emulate intelligent behavior in terms of computational processes" (Schalkoff, 1990) "The branch of computer science that is concerned with the automation of intelligent behavior" (Luger and Stubblefield, 1993)

Plus généralement, l'AI désigne un champ de l'informatique qui vise à concevoir des systèmes capables de reproduire certains processus cognitifs humains, tels que l'apprentissage, la reconnaissance de formes, la prise de décision ou la résolution de problèmes. Dans une approche systémique, elle se définit également comme la conception d'agents intelligents, c'est-à-dire des entités capables de percevoir leur environnement et d'agir de manière à maximiser la probabilité d'atteindre un objectif (Russell & Norvig, 1995). L'AI selon Stuart J. Russel et Peter Norvig (1995), s'articule autour de deux axes principaux : la réflexion et le comportement (*cf*. Table 3). Elle peut être évaluée soit par sa capacité à simuler des raisonnements humains, soit par son aptitude à produire des actions rationnelles, c'est-à-dire optimales au regard des

informations disponibles. Les approches mobilisées peuvent ainsi s'inspirer des mécanismes humains ou reposer sur des modèles mathématiques et computationnels pour atteindre des performances déterminées.

Un processus intelligent repose sur un vocabulaire technique, dont la maîtrise constitue un préalable à toute modélisation. Ron Kohavi et Foster Provost (1998) proposent à cet égard un cadre terminologique de définitions claires et cohérentes. Dans le cadre de la méthode mise en œuvre, certains termes apparaissent de manière récurrente ; ils sont expliqués, puis synthétisés dans un tableau accompagné de leur équivalent anglais (*cf*. Table 4).

1. Un attribut correspond à une variable d'entrée caractérisant un élément observé. Son domaine définit l'ensemble des valeurs possibles, généralement répartis en deux grandes catégories : (1) *catégoriel* : ensemble fini de valeurs discrètes. Le type nominal correspond à une absence d'ordre entre les modalités (ex. : couleurs), tandis que le type ordinal implique une hiérarchie (ex. : faible, moyen, élevé) ; (2) *continu* : sous-ensemble des réels, utilisé pour représenter des valeurs mesurables. Les entiers, bien que discrets, sont souvent traités comme des variables continues dans la pratique.

2. Une caractéristique résulte de l'association entre un attribut et l'une de ses valeurs, comme dans l'exemple : l'attribut « couleur » associé à la valeur « bleu ». Par extension, ce terme désigne également toute variable dérivée ou transformée à partir d'un attribut brut, dans le cadre de la préparation des données en vue de l'entraînement. Ainsi, l'attribut « âge » peut être reconfiguré en « tranche d'âge », de sorte que la caractéristique extraite soit plus adaptée au modèle. Tandis que l'attribut conserve une fonction purement descriptive, la caractéristique représente sa version optimisée et structurée, utilisée comme variable explicative dans le processus de modélisation.

3. Une étiquette désigne la valeur cible à prédire, utilisée pour superviser l'entraînement d'un modèle. Elle correspond à l'information que le modèle cherche à estimer, qu'il s'agisse d'une classe dans un problème de classification ou d'une valeur continue dans un cas de régression.

4. Un ensemble de données se compose d'éléments structurés selon un schéma commun. Chacune des entrées respecte cette structure, souvent présentée sous forme tabulaire. L'ordre des lignes n'a généralement pas d'impact sur le traitement algorithmique.

5. Une valeur manquante traduit l'absence d'information pour un attribut donné. Ce vide peut résulter d'un défaut de mesure, d'une non-applicabilité contextuelle ou d'une omission. Certains algorithmes y sont sensibles et nécessitent des stratégies de traitement.

6. Un modèle représente une abstraction ou une formalisation inductive construite à partir des données. Il peut servir à classifier de nouvelles observations, à formuler des prévisions ou à détecter des structures récurrentes dans l'ensemble étudié.

7. Un langage fait référence à l'environnement syntaxique utilisé pour concevoir les programmes, comme Python, largement adopté dans le domaine de l'AI pour sa lisibilité et l'abondance de ses bibliothèques spécialisées.

8. Un algorithme désigne une suite finie d'instructions définissant une méthode de traitement. Dans le cadre de ML, il apprend à partir des données pour produire un modèle capable de généraliser les connaissances acquises à de nouveaux cas.

Table 4 – Traduction des termes lié à l'AI en anglais. (établie par l'auteure)

termes liés à l'AI en français	traduction des termes en anglais
donnée	*data*
entrée	*input*
sortie	*output*
attribut	*attribute*
caractéristique	*feature*
champ	*field*
variable	*variable*
étiquette	*label*
résultat attendue	*target*
ensemble de données	*data set*
base de données	*data base*
valeur manquante	*missing value*
modèle	*model*
échantillon	*sample*

3.3 Positionnement par rapport à l'AI

L'approche développé par Louis Roobaert et Damien Claeys (2024a, 2024b) propose une cartographie claire des domaines constitutifs de l'AI (*cf*. Fig. 27), en distinguant deux grandes branches : le ML et le DL, ce dernier étant considéré comme une sous-catégorie du premier (*cf*. Fig. 28).

Bien que ces deux approches relèvent du même champ, la méthode adoptée s'en écarte délibérément. La stratégie mise en œuvre repose sur un système articulé de sous-modèles de ML, organisé en étapes successives, et conçu pour compléter des plans thermaux fragmentaires. Cette segmentation permet d'intervenir à chaque phase du processus, assurant une meilleure maîtrise des dépendances spatiales et typologiques entre les composants élémentaires.

Contrairement aux modèles de type GAN, fréquemment mobilisées dans les travaux de génération automatique d'images ou de plans, le dispositif retenu repose sur des relations explicites entre les données. L'opacité inhérente aux GANs, où les étapes internes échappent souvent à l'interprétation, compromet la transparence exigée par toute démarche scientifique fondée sur des corpus patrimoniaux. Dans ce contexte, l'utilisation de modèles supervisés garantit une meilleure traçabilité des inférences, tout en préservant les schémas relationnels construits en amont dans le PDSM. En ce sens, la méthodologie développée se distingue comme une alternative

originale, capable de combiner l'efficacité algorithmique à une rigueur interprétative.

Cette orientation rejoint l'analyse de Jean-Claude Golvin (2005, p. 17), pour qui la restitution a connu deux tournants majeurs : d'abord, grâce à l'institutionnalisation des méthodes archéologiques, puis par l'intégration progressive de l'outil informatique. Cette « nouvelle jeunesse » de la restitution, rendue possible par les potentialités du numérique, ouvre la voie à des approches hybrides où la représentation visuelle est enrichie par des logiques d'analyse et de prédiction, fondées sur une lecture structurée des données architecturales.

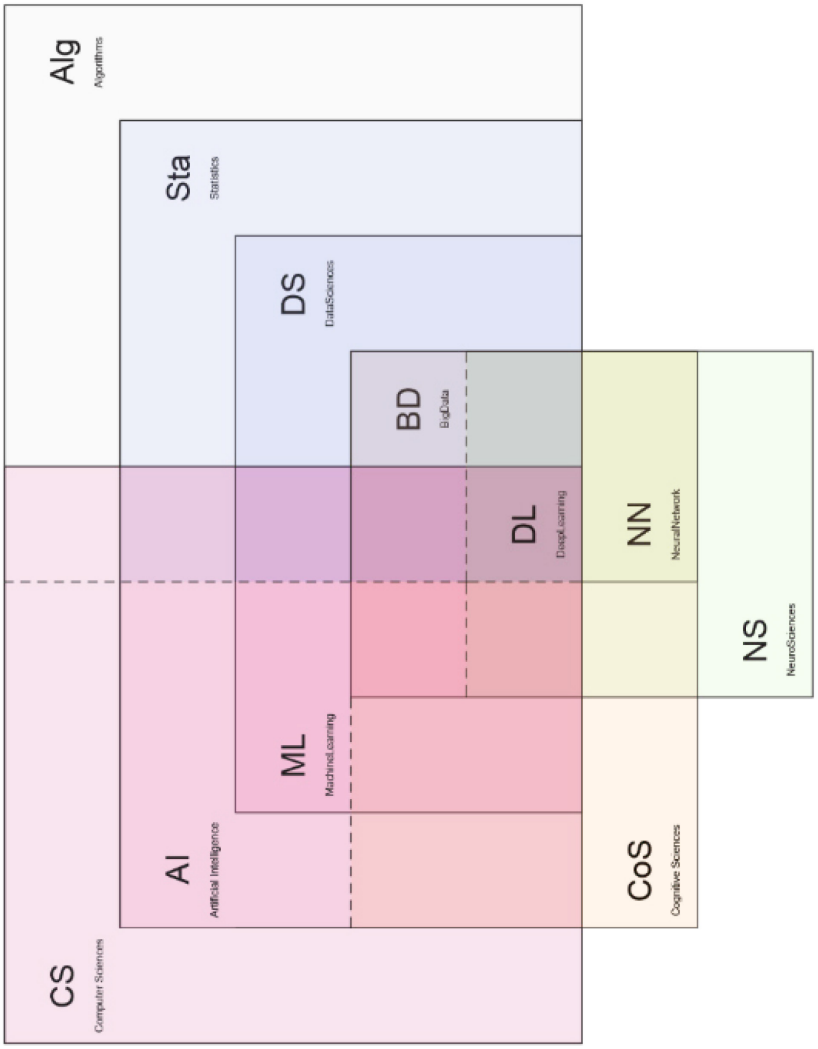


Fig. 27 – La discipline de l'intelligence artificielle et ses grandes sous-parties. (Roobaert, 2024)

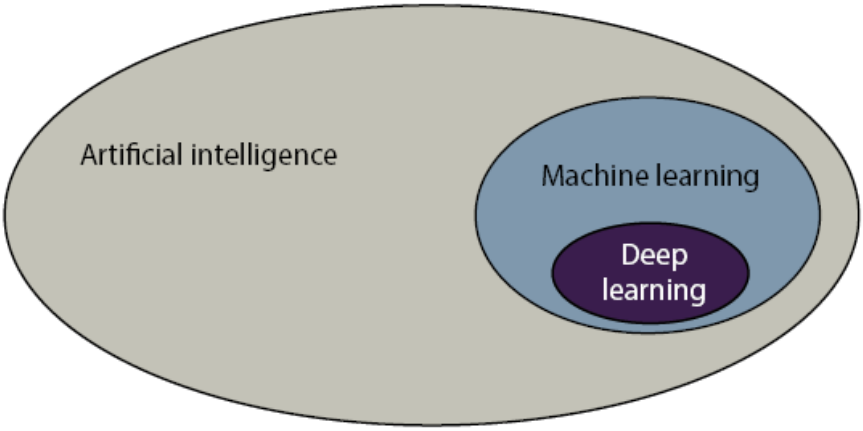


Fig. 28 – Emboitement des AI, ML, DL. (Serrano, 2021, p. 4)

3.4 Vers une AI explicite et supervisée pour le patrimoine

L'exploration des fondements et des évolutions de l'AI a montré que ce champ résulte d'une succession de jalons techniques et théoriques, allant des premières tentatives mécaniques d'automatisation jusqu'aux approches contemporaines du ML et du DL. L'AI se présente ainsi comme un domaine hybride, où coexistent formalisation logique et développements computationnels, chacun contribuant à la constitution d'outils capables de traiter des ensembles complexes de données.

La clarification des terminologies et des notions récurrentes a permis de poser un vocabulaire technique unifié, indispensable pour transposer les méthodes de l'AI dans l'étude architecturale. Les distinctions entre attributs, caractéristiques, étiquettes ou ensembles de données structurent la préparation des informations en vue de l'apprentissage supervisé, garantissant la cohérence et la reproductibilité du processus.

Le positionnement adopté par cette recherche privilégie une approche explicite fondée sur des sous-modèles supervisés, en rupture avec les générateurs automatiques tels que les GANs, dont l'opacité méthodologique limite l'interprétation scientifique. Cette orientation, articulée au PDSM, assure une traçabilité des inférences et une compatibilité avec les exigences de l'archéologie du bâti. Elle inscrit la rétroconception architecturale dans un cadre interprétatif, où la puissance des algorithmes sert non à produire des images autonomes, mais à compléter des plans fragmentaires selon des logiques spatiales et typologiques vérifiables.

PARTIE II.
CAS D'ÉTUDE : LES THERMES IMPÉRIAUX ROMAINS

4 HISTOIRE ET MODALITÉS DE CONSTRUCTION ROMAINE

Le quatrième chapitre propose une analyse synthétique de l'évolution architecturale des thermes romains à l'échelle de l'empire, associée à une étude des principes de construction propres aux romains. Organisé en trois sections, il s'ouvre sur une exploration des grandes périodes historiques ayant influencé la transformation des thermes, en mettant en évidence l'impact des évolutions politiques et sociales. Ensuite, il se concentre sur les techniques et les matériaux employés, en cartographiant les différents appareillages. Enfin, un schéma récapitulatif des éléments constructifs est présenté sous la forme d'une carte mentale, établissant les relations entre les différentes composantes d'un lieu architectural et soulignant la manière dont l'étude de la matérialité peut être intégrée au modèle paramétrique.

4.1 Les périodes historiques clés de l'empire romain

La démarche ne relève pas d'une écriture de l'histoire, dans la mesure où elle ne vise ni à retracer de manière exhaustive l'évolution des sociétés ni à produire une synthèse historiographique, déjà largement développés par des travaux spécialisés. Ce choix s'explique par la nature même de la recherche, qui privilégie une approche méthodologique et expérimentale : l'objectif est de tester un protocole de structuration et de complétion algorithmique à partir de données archéologiques, et non de proposer une relecture globale des contextes historiques.

L'histoire des provinces romaines, et en particulier de l'Afrique du Nord, est donc évoquée de manière sommaire afin de fournir le cadre nécessaire à la compréhension des édifices étudiés.

Tout en prenant les édifices de Rome comme références, l'analyse des thermes impériaux romains en Afrique du Nord, nécessite une exploration des différentes périodes historiques (*cf*. Fig. 29 et Fig. 30) qui ont marqué l'expansion et la consolidation de l'empire romain. Cette approche met en évidence l'évolution architecturale et culturelle qui a permis à ces édifices de devenir, bien plus que de simples centres de baignade, de détente et de loisir (Sear, 1982). Aussi bien à Rome qu'en Afrique du Nord, les thermes sont des lieux où les citoyens se retrouvent, échangent des idées, réalisent des visites et participent à des activités physiques (Kretzschmer et al., 1966).

Au départ, le monde romain s'est limité à des pratiques *balnéaires*[13] primitives, centrées sur le simple « bain », ou « *balneum* », une utilisation élémentaire de l'eau pour le nettoyage corporel. À l'origine, le terme *bain* désignait un édifice public permettant de « se laver dans les meilleures conditions » (Ginouvès, 1998, p. 100). Avec le temps, les infrastructures primitives ont progressivement évolué vers des bâtiments complexes, « d'une certaine importance » (Ginouvès, 1998, p. 102), intégrant des avancées dans les pratiques balnéaires, dans les techniques de construction, tels que le chauffage par hypocauste, les canalisations d'acheminement de l'eau, et les bassins adaptés à différentes températures, la gestion de l'eau, et l'organisation des espaces thermaux (Yegül, 1992). Le mot [*thermes*] désigne « un établissement de bains qui s'est acquis un certain nombre de fonctions de la palestre pour les soins du corps et aussi de l'esprit, et qui a ainsi joué dans le monde romain un rôle dépassant très largement celui qui concerne la simple propreté corporelle » (Ginouvès, 1998, p. 102). Le professeur d'histoire ancienne français Paul Petit, examine cette évolution en la divisant en trois périodes : (1) le « haut-empire (27 av. J.-C. - 161 ap. J.-C.) » (1974a) ; (2) la « crise de l'empire » (161 - 284) (1974b) ; (3) le « bas-empire » (284 - 395) (1974c). Pour cette étude, ces trois périodes sont complétées par une quatrième afin d'examiner les premières innovations architecturales et les influences culturelles qui ont préparé le développement du modèle thermal romain sous l'empire. cette quatrième période est la plus ancienne et elle correspond à la période de la fin de la république romaine (Jouffroy, 1986) (IIe – Ier siècle av. J.-C.).

(1) Vers la fin de la république romaine (IIe – Ier siècle av. J.-C.) : l'art et l'architecture romains trouvent leur origine dans un mélange des traditions étrusques et des influences grecques coloniales. À partir du II e siècle av. J.-C., l'assimilation directe des apports de la Grèce métropolitaine enrichit ce socle culturel. Les conquêtes d'Alexandre le Grand, combinées aux enseignements d'Aristote, introduisent de nouvelles perspectives dans le bassin méditerranéen, favorisant la diffusion d'idées grecques qui influencent les cadres intellectuels et esthétiques de Rome (Wheeler, 1964). L'expansion territoriale accompagne également ces évolutions culturelles. En Afrique du Nord, « la destruction de Carthage en 146 av. J.-C. » et l'intégration de son territoire en province engagent l'introduction de modèles romains dans la région. Cependant, l'implantation urbaine reste limitée avant 46 av. J.-C. et les constructions de thermes « sont rares » (Jouffroy, 1986, p. 401) en raison de contextes locaux encore peu propices à une organisation durable (Jouffroy, 1986, p. 175). Parallèlement, un changement se produit dans les pratiques balnéaires, où la prise de conscience des enjeux sanitaires inspire des innovations architecturales. Ainsi, la « cuve plate » est conçue pour permettre le bain en position assise avec une immersion partielle du corps. Ce dispositif favorise un nettoyage par affusion, réduisant les risques liés à l'utilisation d'une eau de qualité incertaine, tout en introduisant une séparation claire entre les étapes de nettoyage et de détente (Thébert, 2003, p.

[13] Le terme *balnéaire* provient du mot *balanéion* qui était employé pour désigner les établissements de bains (Thébert, 2003), l'adjectif lié aux bains publics est un indicateur de leur rôle social et non de leur structure de propriété.

46-47). Bien que les thermes, restent modestes durant cette période, leur développement amorce une transformation significative. Yvon Thébert (2003, p. 11) évoque une époque où « un nouvel art du bain » émerge, annonçant « l'explosion thermale » propre à la civilisation d'époque romaine. Cette évolution, qui dépasse les simples techniques, prépare une réorganisation des espaces et des pratiques qui atteindront leur plein épanouissement dans les siècles suivants.

(2) Haut-empire romain (Ier siècle av. J.-C. – IIe siècle ap. J.-C.) : bien qu'initialement inspirés des modèles grecs, les thermes sont transformés par les romains pour devenir des éléments essentiels de l'aménagement urbain. Dès le règne d'Auguste (27 av. J.-C.), ces édifices s'intègrent dans le quotidien des villes et se multiplient à travers l'empire, y compris dans les localités les plus modestes. En Italie, « les témoignages archéologiques ou épigraphiques sur la construction de thermes publics sont concentrés, à cette époque » (Jouffroy, 1986, p. 52). La période julio-claudienne et flavienne (27 av. J.-C. – 68 ap. J.-C.) se caractérise par des financements conséquents destinés aux constructions publiques. Des thermes, comme ceux de Bologne, sont construits à l'initiative « des premiers empereurs », « principalement d'Auguste » ou « un membre de la famille impériale » (Jouffroy, 1986, p. 105). Dans les provinces, l'expansion des thermes progresse « lentement ». En Afrique du Nord, l'urbanisation reste restreinte « sur un territoire encore limité » (Jouffroy, 1986, p. 175). Toutefois, au IIe siècle, sous les Antonins, l'empire atteint « l'époque de la plus grande puissance », marquée par un « développement urbain et de la prospérité économique » (Jouffroy, 1986, p. 109). Certains thermes apparaissent, comme ceux d'Uthina T8, Utique T9, Calama T20, thermes d'Antonin T2, Cuicul T13 et T14… (Jouffroy, 1986, p. 227-229). Un moment décrit comme « période de l'apogée », pour « la plupart des provinces, notamment en Afrique » (Jouffroy, 1986, p. 109), qui ne s'étend pas « au-delà du règne d'Antonin » (Petit, 1974a, p. 163). Malgré les disparités régionales, la construction des thermes demeure dynamique et continue de jouir « d'une grande faveur au IIe siècle, et jusqu'à la fin du siècle » (Jouffroy, 1986, p. 129). Cette période est décrite comme *l'âge de la maturité* de l'architecture romaine, (« the coming of age of Roman architecture ») (Sear, 1982, p. 86).

(3) La crise de l'empire (IIe – IIIe siècle ap. J.-C.) : une période débute avec « la crise de l'Italie » (Petit, 1974a, p. 144) , « voit sa situation se détériorer » (Jouffroy, 1986, p. 109). Une crise qui est marqué par un ralentissement significatif de l'activité de construction dans les villes. En Italie, la construction des thermes sont d'« achèvement très lent » (Petit, 1974b, p. 25). Ces obstacles sont liés à des contraintes techniques, notamment l'« adductions d'eau que beaucoup de villes n'ont été capables de réaliser qu'avec l'essor du IIe siècle » (Jouffroy, 1986, p. 401). Cependant, à Rome, Septième Sévère, un empereur romain qui règne de 193 à 211 ap. J-C. (Petit, 1974b, p. 54), a « beaucoup construit, et également reconstruit » (Petit, 1974b, p. 131) contribuant ainsi à dynamiser l'urbanisme de la capitale. C'est à « l'époque sévérienne principalement et à celle de Gallien qu'appartiennent les nouvelles constructions thermales de ce siècle » (Jouffroy, 1986, p. 402). Les thermes deviennent une des « catégories de constructions le mieux représentées au IIe siècle, et pour laquelle l'empereur, ou plus souvent des citoyens, ont donné des sommes très

importantes ». Si le nombre reste limité sous le règne de *Trajan*, leur densité augmente sous *Hadrien* pour culminer sous *Antonin*. Plusieurs « nouveaux thermes furent élevés au début du règne de Marc-Aurèle » (Jouffroy, 1986, p. 125). Entre IIe siècle et le IIIe siècle, en Afrique du Nord, « des vestiges de thermes publics », « ornés de mosaïques » et souvent soignés dans leur conception, « ont été reconnus dans 22 villes » (Jouffroy, 1986, p. 227) et de nombreux « thermes impériaux à plan symétrique » apparaissent. Parmi lesquels figurent ceux de Lambèse T16, Timgad (les grands thermes du Nord T19), Bulla regia T10, Mactar les grands thermes de l'Est T3, Lepcis Magna T22 et T23, Thugga T7 (Jouffroy, 1986, p. 275). Ces constructions traduisent une adaptation des modèles romains aux spécificités locales, tout en conservant une cohérence architecturale propre à l'empire.

(4) Bas-Empire romain (IIIe – IVe siècle ap. J.-C.) : la fin de la « règne des Sévères » et « la chute de leur dynastie » inaugurent une phase de « troubles à l'intérieur de l'Empire » (Jouffroy, 1986, p. 141), aggravée par des divisions politiques et des invasions. L'instabilité militaire, qualifiée d'« anarchie », s'accompagne d'une « instabilité du pouvoir impérial », modifiant l'organisation de l'empire. Les « réformes administratives de Dioclétien » redéfinissent « la place de l'Italie dans l'Empire et les relations des villes avec le pouvoir » (Jouffroy, 1986, p. 141). Malgré un contexte marqué par des transformations politiques et économiques, l'Italie échappe aux « destructions massives ». Certains projets de construction se poursuivent, notamment ceux liés aux thermes, qui sont encore relativement importants. Les thermes de Caracalla T27 et de Dioclétien T28, édifiés respectivement au début du IIIe siècle et au début du IVe siècle apr. J.-C., représentent l'apogée de l'architecture thermale romaine. À la fin du IVe siècle, « le pouvoir impérial est absolu et s'exerce en tous domaines dans sa plénitude » (Petit, 1974c, p. 192). En Italie, certains travaux de restaurations de thermes étant « financés par les citoyens ». Par exemple, « les *thermae*[14] *hiemales* furent restaurés en 341 par deux citoyens » (Jouffroy, 1986, p. 167), servant de lieux de socialisation, de détente, et reflétant la persistance de la culture romaine malgré les troubles.

Malgré le passage sous domination vandale au Ve siècle, les provinces africaines conservent de nombreuses structures administratives, économiques et urbaines héritées de Rome. À Carthage, les élites locales continuent de prospérer dans un cadre marqué par la permanence des institutions, et les classes dominantes conservent un mode de vie raffiné, souvent décrit comme ostentatoire (O'Donnell, 2009, p. 251). La ville conserve son rôle central dans le commerce méditerranéen, même si le volume global d'échanges diminue.

[14] « Dans les inscriptions d'époque impériale, *balneum*/*balineum* continue à être utilisé à côté de *thermae*, mais ce dernier terme est parfois employé, par opposition au premier, pour désigner une construction plus importante » (Jouffroy, 1986, p. 324).

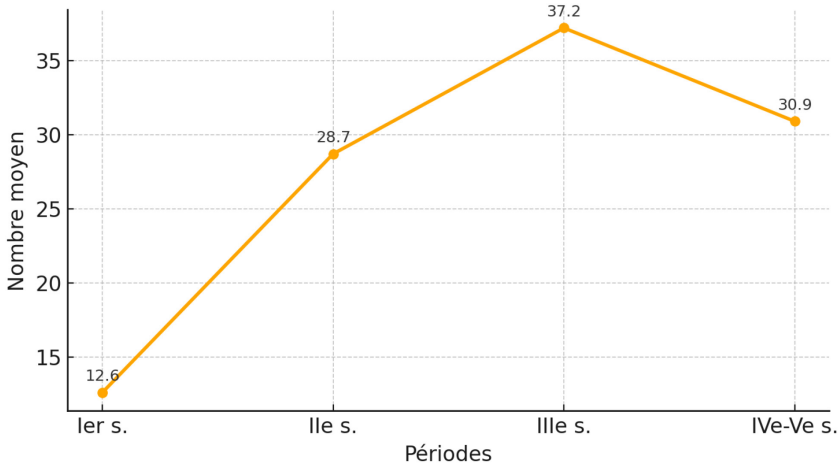


Fig. 29 – Répartition chronologique de thermes d'Afrique du Nord, en pourcentage de la totalité des exemples datés. Adaptation selon Hélène Jouffroy (1986, p. 404)

Les contrastes territoriaux hérités de l'organisation impériale structurent les dynamiques de la conquête. Les provinces orientales, mieux peuplées et dotées de défenses solides, concentrent les dispositifs de contrôle et les interactions avec les confins sahariens, tandis que les régions occidentales, vers l'actuelle Alger, apparaissent plus marginalisées. C'est dans ces zones que les Vandales parviennent à s'implanter progressivement, en exploitant les fragilités militaires et les tensions internes. Leur avancée, amorcée en 429, aboutit à la prise de Carthage en 439, au terme d'une séquence où ils contournent, puis affaiblissent les garnisons romaines (O'Donnell, 2009, p. 90-91). La domination qui s'installe ensuite repose sur des continuités fortes avec les structures impériales, assurant près d'un siècle de stabilité relative.

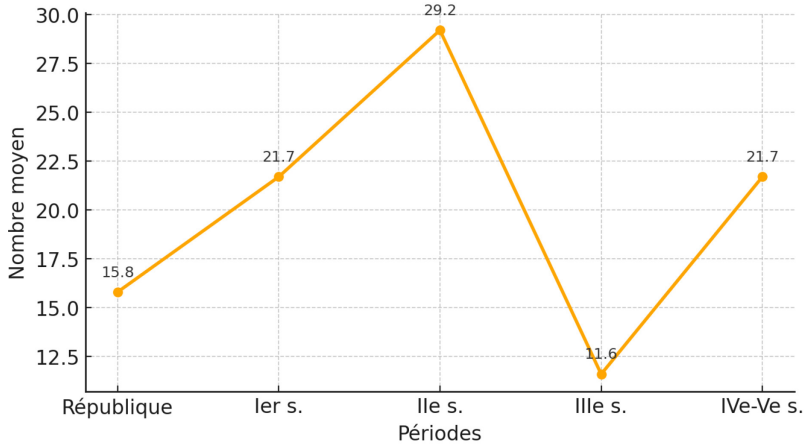


Fig. 30 – Répartition chronologique de thermes en Italie, en pourcentage de la totalité des exemples datés. Adaptation selon Hélène Jouffroy (1986, p. 327)

4.2 Études de modalités de construction chez les romains

La phase d'étude de la matérialité des ruines, suivie de la création d'un catalogue vise à établir une base de données fiable pour faciliter la rétroconception des vestiges. Une démarche qui se base sur une analyse approfondie d'ouvrages de référence, notamment ceux de Gius'eppe Lugli (1957), Jean-Pierre Adam (1984), Roberto Marta (1986, 1990), Yvon thébert (2003) et Nizar Ben Slimene (2017), prépare à l'intégration d'un algorithme capable de produire une modélisation, en trois dimensions, détaillée des murs, en tenant compte de la répartition des matériaux. L'analyse des techniques de construction des thermes romains sera entreprise pour répondre à deux objectifs principaux :

(1) approfondir la connaissance du *plein*, en limitant l'étude dans un premier temps aux murs, dans le cadre d'une modélisation ;

(2) identifier les typologies des murs utilisés à l'époque romaine, en établissant une liste non exhaustive des différents types de parois employés, principalement à partir de l'étude de leurs appareillages.

4.2.1 Origines et influences de l'art de bâtir romain

À la transition entre la fin de la république romaine et le début de l'empire, l'architecture romaine, se construit à partir d'un assemblage de traditions issues de diverses cultures, principalement grecques et étrusques. L'héritage étrusque se reflète dans l'usage de la terre cuite pour la décoration, particulièrement dans les temples, ainsi que dans leur organisation spatiale. Frank Sear (1982, p. 35) décrit cette disposition par podium élevé, trois *cellae* et un *pronaos* tétrastyle profond, une configuration que les romains adoptent et transforment dans leurs propres édifices.

Le temple de Jupiter de Baalbek (*cf*. Fig. 31), dont la construction débute sous le règne de *Néron*, illustre les différences entre l'architecture du monde hellénistique et celles développée à l'époque romaine. D'un point de vue structurel, les principes employés à Baalbek auraient pu être mis en œuvre dans le contexte hellénistique, certains temples grecs présentant même des plans plus vastes. Toutefois, l'ensemble monumental repose sur une approche conceptuelle distincte qui inscrit pleinement cette réalisation dans le cadre architectural romain (Sear, 1982). Au-delà des similitudes techniques et dimensionnelles avec les structures grecques, la conception et l'intention qui sous-tendent des projets comme Baalbek traduisent une rupture dans la manière de penser l'architecture (Wheeler, 1964), Ce que Frank Sear (1982, p. 161) qualifie de « *Roman architectural revolution* ».

Des architectes hellénistiques, sont « les grands inspirateurs de l'architecture et de l'urbanisme romain », comme *Hermodoros*, qui « viennent s'installer à Rome au IIe siècle av. J.-C., » pour édifier des monuments capables d'affirmer la préexcellence artistique de la cité (Adam, 1984, p. 114). Aussi, inspirés par les théâtres, les romains ont développé leurs propres versions, adaptant la structure à leurs besoins de spectacles et à leur urbanisme. De même, les amphithéâtres, comme le Colisée, bien que relevant d'une invention proprement romaine, reprennent la forme circulaire des

théâtres grecs tout en étant conçus pour des jeux de gladiateurs. Loin de se limiter à l'adoption de formes préexistantes, les romains perfectionnent les techniques de construction grecques, notamment dans l'usage de la pierre et du marbre, tout en introduisant l'emploi du béton (« the art of making concrete ») (Sear, 1982, p. 38), ouvrant ainsi la voie à des formes architecturales plus audacieuses et à des structures monumentales inédites, telles que les dômes et les voûtes. L'ingénierie hydraulique se développe avec la construction d'aqueducs destinés à l'alimentation des villes en eau, indispensable au fonctionnement des fontaines publiques et des habitations.



Fig. 31 – Baalbek, vue du Temple de Jupiter, premier siècle après J.-C., avec le Temple de Bacchus, deuxième siècle après J.-C., au premier plan. (By courtesy of Fototeca Unione, Rome). (Sear, 1982, p. 401)

Parmi les édifices exploitant ces infrastructures, « les établissements de bains occupent une place particulière » (Ginouvès, 1998, p. 100). À l'époque impériale, la construction des grands thermes est, « sans conteste, la prestation technique la plus parfaite de l'Antiquité ». Elle repose sur des avancées techniques notamment « le verre à vitres, la tubulature et la connaissance des propriétés réfractaires des briques » (Kretzschmer et al., 1966, p. 67). Jean-Pierre Adam (1984, p. 115) souligne que les romains, loin de suivre un « modèle » figé, catalysent et renforcent un art de bâtir qui leur est propre, façonné par des emprunts extérieurs mais développent une cohérence et une originalité propres pour créer une identité architecturale unique.

4.2.2 Le cycle des matériaux dans la construction romaine

L'étude des dispositifs constructifs implique nécessairement une analyse des principes de mesure employés par les romains, ces derniers conditionnant la précision et l'organisation des assemblages. L'analyse se structure autour du cycle de la pierre, depuis son extraction jusqu'à son intégration dans l'édifice, en passant par les étapes de taille, de levage, de transport (bardage), ainsi que les techniques de calage et de scellement. L'assemblage des matériaux aboutit à la définition de divers *appareillages*, qui seront classés selon leurs caractéristiques structurelles et fonctionnelles. Au-delà d'un simple inventaire des techniques antiques, cette approche vise à approfondir la compréhension des principes constructifs en vue de leur intégration dans un modèle paramétrique, favorisant ainsi leur archivage et leur exploitation dans un environnement numérique.

4.2.2.1 Les mesures prises en considération lors de la construction romaine

À chaque étape du travail de la pierre, qu'il s'agisse de « dégrossissage », d'« épannelage » et de « finition », le tailleur utilise différents instruments (*cf*. Table 5) permettant d'assurer la mise en forme correcte du matériau (Adam, 1984, p. 42).

Table 5 – Outils de mesure chez les romains. Adaptation d'après Jean Pierre Adam (1984, p. 42-44). (établie par l'auteure)

outils de mesure	règle graduée (regula)	équerres (normae)	fil de plomb (perpendiculum)	compas (circinus)
description	règle droite marquée de graduations, utilisée pour mesurer les longueurs	instrument en forme de *L* ou de triangle servant à mesurer les angles	outil composé d'un fil et d'un poids conique, permettant de vérifier la verticalité	instrument à deux branches articulées, utilisé pour mesurer des distances et tracer des cercles

Ces outils ne modifient pas directement la pierre, mais garantissent la précision des ajustements grâce à des mesures et des contrôles réguliers (*cf*. Table 6) (Adam, 1984, p. 42).

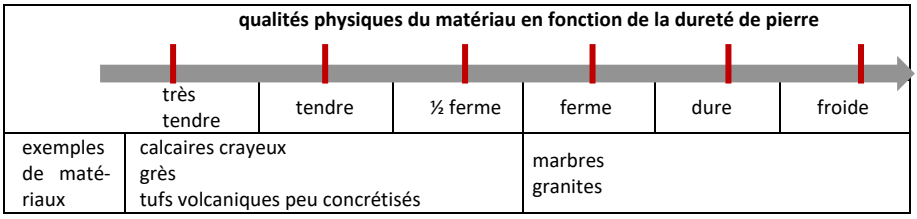
Table 6 – Les valeurs de pieds et ses multiples à l'époque impériale. Adaptation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 43). (établie par l'auteure)

unité	en pied	en cm
doigt (*digitus*)	1/16	1,848
paume ou palme (*palmus*)	1/4	7,392
pied (*pes*)	1	29,57
palme-pied (*palmipes*)	1, 1/4	36,96
coudée (*cubitus*)	1, 1/2	44,355
pas (*gradus*)	2, 1/2	73,925
double-pas (*passus*)	5	147,80
sillon (*actus*)	120	3 548,00
mille (*mille passus*)	5 000	147 850,00

4.2.2.2 Les carrières et les lieux d'extraction des matériaux

L'usage du terme « carrière » dans son acception actuelle résulte d'un glissement sémantique. À l'origine, il désigne une « voie carrossable », une signification probablement liée à l'emploi de lourds chariots pour le transport des blocs extraits (Adam, 1984, p. 23). Dans la construction romaine, le choix des pierres repose sur des critères à la fois mécaniques et esthétiques. Lorsque les ressources locales offrent une diversité de matériaux, les bâtisseurs disposent d'une plus grande liberté dans leur sélection. Toutefois, certaines exigences structurelles imposent parfois l'importation de pierres provenant de régions éloignées afin de garantir la résistance nécessaire aux édifices. L'évaluation des propriétés physiques des matériaux se fait de manière empirique, principalement à partir de leur dureté au travail. La classification traditionnelle distingue six catégories : très tendre, tendre, demi-ferme, ferme, dur et froide (*cf*. Table 7). Par exemple, les calcaires crayeux, les grès et certains tufs volcaniques peu consolidés appartiennent à la première catégorie, caractérisée par une texture particulièrement friable.

Table 7 – Qualités physiques du matériau en fonction de la dureté de pierre. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 23-24). (établie par l'auteure)



L'architecture romaine repose prioritairement sur l'exploitation des ressources locales, notamment dans la construction des structures principales, où la « maçonnerie de moellons » domine (Adam, 1984, p. 23-24). Dans de nombreuses villes, un seul type de pierre est accessible, facilitant l'identification des matériaux employés

en fonction de la géologie locale. Certaines agglomérations disposent cependant d'un sous-sol plus varié, comme Uthina (*cf*. Fig. 32), qui offre plusieurs gisements exploitables, ou Rome, où sept types de tuf volcanique sont distingués : « Aniene, Campidoglio, Cappellaccio, Fidene, Grotta Oscura, Monteverde et Peperino ». À Pompéi, les bâtisseurs utilisaient également un éventail de ressources régionales, comprenant des « laves dures, des laves alvéolaires ou scories », divers « tufs volcaniques (Nocera, Pappamonte, Giallo…) » ainsi que du « tuf calcaire » (Adam, 1984, p. 24).

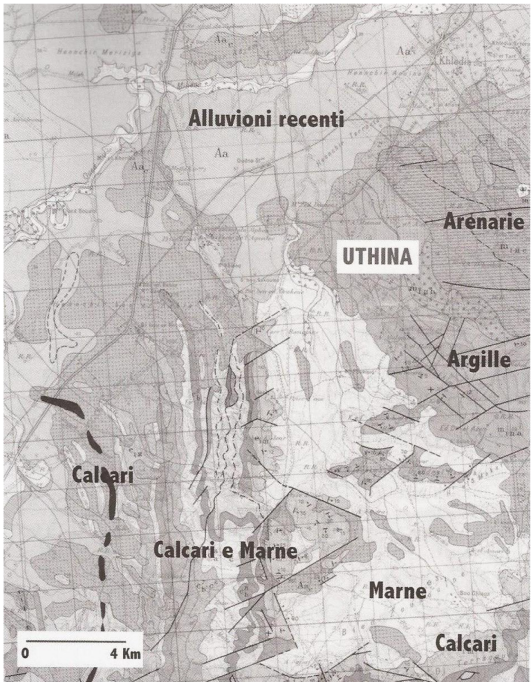


Fig. 32 – Carte géologique de la région d'Uthina : gisements de calcaire, de grès, d'argile et de marne (d'après S. Cara, G. Carcangiu et M. Tamanini, 2002, Fig. 1, p. 92). (Ben Slimene, 2017, p. 101)

Lorsque ces ressources locales ne suffisent pas à répondre aux exigences techniques ou esthétiques, les constructeurs ont recours à des matériaux importés. Ceux-ci restent en général réservés aux « parties nobles et décorées (éléments d'ordres) ou aux parements » (Adam, 1984, p. 23-24). Cette pratique se généralise à l'époque impériale, dans un contexte de monumentalisation accrue. L'exploitation de carrières éloignées s'effectue en tenant compte de la logistique : proximité des voies de transport terrestres, fluviales ou maritimes, ou aménagement de chemins pour accéder à des reliefs difficiles, comme aux « carrières de marbre du *Pentélique* et de *Carrare* ». Les différentes variétés de marbre (*cf*. Table 8) ainsi introduites illustrent l'existence de circuits d'approvisionnement organisés, témoignant d'échanges *systématiques* à grande échelle (Adam, 1984, p. 29).

Table 8 – Les différents types de marbre exploités et leurs provenances. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 24). (établie par l'auteure)

types de marbre	caractéristique : couleur	provenance
marbre de chemtou	veiné jaune	Tunisie
marbre de chio	gris bleu	Ile de chio
marbre de filfila	blanc	Cap de Garde, Algérie
marbre de lesbos	blanc-jaune	Ile de Lesbos
marbre de paros	blanc, intense	Ile de Paros
marbre de pentélique	blanc	Mont Pentélique, Attique
marbre de porta santa	veiné polychrome, rouge bleu, violet, noir, blanc	Lassos
marbre de proconèse	blanc et veiné blanc-noir	Ile de Proconèse
marbre des pyrénées	blanc	Saint Beat
marbre rouge « rosso antico »	rouge profond et intense	Cap Matapan, Péloponèse
marbre de thasos	blanc, gros grains	Ile de Thasos
marbre serpentin	vert	Thèbes, Egypte
marbre de carrare	lunense : blanc	Italie (exploitation privilège impérial sous Tibère)
	luna : gris-bleu	
travertin romain	de beige clair à beige foncé	extrait des carrières de Tivoli

4.2.2.3 Les travaux faits après l'extraction

4.2.2.3.1 La Taille : la percussion

L'optimisation du transport et du levage des pierres passe par un travail préparatoire directement en carrière. Dès l'extraction, les blocs sont taillés (*cf*. Fig. 33) de manière à se rapprocher autant que possible de leur forme définitive. Cette approche permet de limiter leur masse et de faciliter leur manipulation sur le chantier. En règle générale, les blocs extraits adoptent une forme parallélépipédique, souvent de dimensions supérieures à celles utilisées dans les *assises courantes*. Toutefois, ils restent conçus pour être fractionnés en éléments plus petits si nécessaire, offrant ainsi une flexibilité aux constructeurs. Le façonnage s'effectue par étapes, mobilisant des outils spécifiques selon la nature du travail à réaliser. Le travail débute avec des outils destinés à l'ébauche, comme le *poinçon*, qui sert à *dégrossir* la pierre et à lui donner une première forme. Progressivement, des outils plus précis prennent le relais, notamment les *gradines fines* et les *ciseaux étroits*, permettant d'affiner la surface et d'ajouter les détails nécessaires. Chaque outil est choisi en fonction de la phase de taille, garantissant un traitement homogène et progressif du matériau (Adam, 1984).

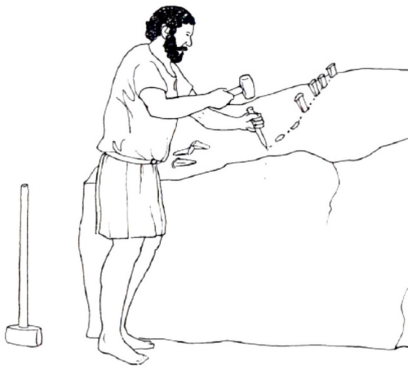


Fig. 33 – Fente d'un bloc à l'aide de coins. Restitution JPA. (Adam, 2017, p. 33)

4.2.2.3.2 Le levage et le bardage

Une fois les blocs de grand appareil taillés et prêts à l'emploi, ils doivent être acheminés jusqu'au site de construction, une opération désignée sous le terme de « bardage » (Adam, 1984, p. 44), mobilisant des techniques et des équipements spécifiques pour garantir un déplacement efficace et sécurisé des pierres massives (*cf*. Table 9). Selon la nature du terrain et la distance à parcourir, les blocs sont acheminés à l'aide de *chariots* robustes, de « rouleaux de bois » (Adam, 1984, p. 45) ou de « traîneaux » (Adam, 1984, p. 30) tirés par des attelages d'animaux ou par des équipes d'ouvriers.

Table 9 – Deux types de bardages. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure)

mode de dépôt du bloc	cas d'application	préparations préalables	raison de préparation
bardage manuel	bloc de dimension modeste	aucune préparation nécessaire	
utilisation de pesées de levier	principalement pour les blocs de grande taille	création de cavités (trous de pinces)	permet à l'outil de s'appuyer pour faciliter la manœuvre

Les romains veillent à sélectionner les moyens de transport les mieux adaptés aux dimensions et au poids des matériaux, optimisant ainsi chaque étape du déplacement. Cette attention aux détails garantissait que les équipements utilisés étaient capables de supporter et de manipuler efficacement les blocs de pierre de tailles variées. L'élévation des blocs (*cf*. Table 9) sur le chantier repose sur des dispositifs de levage sophistiqués, connus sous le nom de « *machinae tractores* » (Adam, 1984, p. 45) (*cf*. Fig. 34).

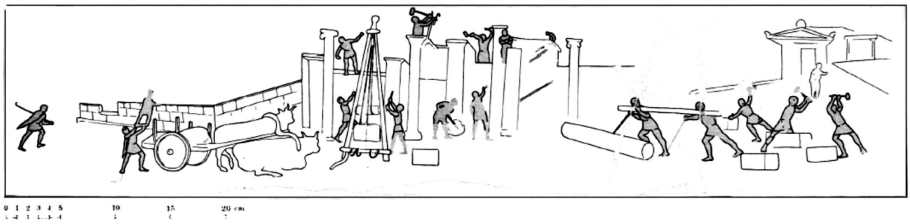


Fig. 34 – Scène de chantier. Peinture du *caldarium* de la villa de San Marco à Stabies Museo archeologico di Castellamare, n° 282. JPA et P.Varène. (Adam, 1984, p. 46)

Table 9 – Les procédés de la préhension des blocs par l'engin de levage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (Adam, 1984, p. 50). (établie par l'auteure)

méthode d'attache	description	avantage / limitation
élingues	cordes avec une boucle à chaque extrémité	* avantage : ne nécessite pas de préparation préalable de la pierre * limitation : - nécessite l'intervention de leviers pour dégager les pierres des cordes après la pose - poids des pierres limité, sauf pour les architraves
brayers	cordes formant une boucle fermée, entourant la pierre et fixées au crochet de la machine	

Face aux contraintes liées aux procédés de levage, les constructeurs grecs et romains ont cherché à perfectionner leurs techniques pour optimiser la manipulation des blocs de pierre. L'amélioration des dispositifs existants repose sur l'adaptation des systèmes de préhension et l'optimisation des engins de levage, garantissant une meilleure répartition des charges et une réduction des risques lors des manœuvres (*cf*. Table 10, Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37).

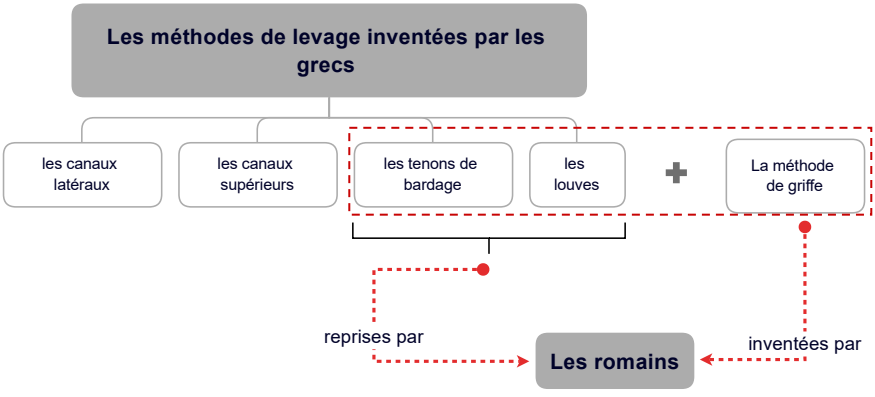
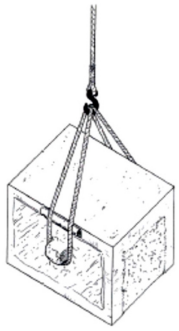
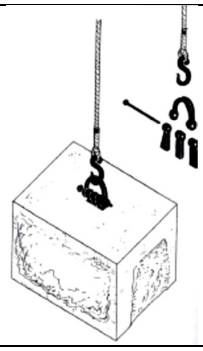
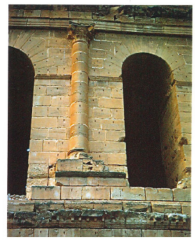


Fig. 35 – Les méthodes de levage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure)

Table 10 – Trois méthodes de levage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). Les schémas sont tirés de Jean-Pierre Adam (2017, p. 50-52). (établie par l'auteure)

méthode de levage	tenons (*ancones*)	louves	griffes (*ferrei forfices*)
description	saillies de pierre laissées symétriquement sur la face de parement et sur la face arrière	méthode privilégiée par les romains, constituée d'éléments métalliques assemblés pour saisir la pierre	pince auto-serrante nécessitant peu de travaux de préparation
schéma explicatif de la méthode			
position	placés dans l'axe et uniques sur chaque face pour assurer l'équilibre, ils peuvent parfois présenter plusieurs saillies sur les blocs lourds, bien que cela reste rare	création de perforations dans la face supérieure de chaque bloc pour la fixation d'un crochet. Les dimensions des orifices varient en fonction du volume de la pierre à lever, mais elles sont généralement proches de 10 cm de long, 2 cm de large et 10 cm de profondeur	réalisation de petites cavités symétriques dans deux faces verticales afin d'assurer la prise des deux pointes en croc par la pince
avantages / limitation	- facilité de montage - alignement précis et connexion solide entre les blocs de pierres	- rapidité de préparation. - bonne préhension	limitation : - levage limité aux blocs de petites et moyennes dimensions - risque de glissement le long du bloc - ouverture des mâchoires de la pince restreinte
utilisation à l'époque romaine	les romains ont abandonné cette méthode au profit de la louve	méthode largement répandue dans tout l'empire, sauf pour les pierres dont la surface devait rester visible (dalles et stylobates) afin de préserver leur parement	méthode évitée pour les pierres dont les surfaces devaient demeurer visibles

méthode de levage	tenons (*ancones*)	louves	griffes (*ferrei forfices*)
schéma explicatif			

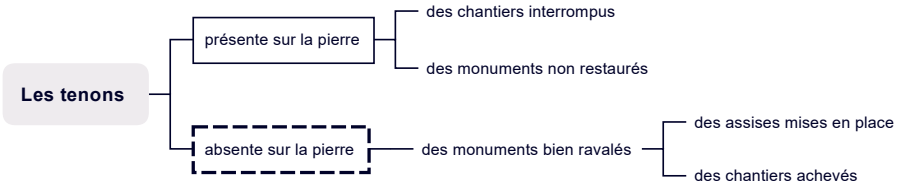


Fig. 36 – Caractéristiques des tenons. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure)

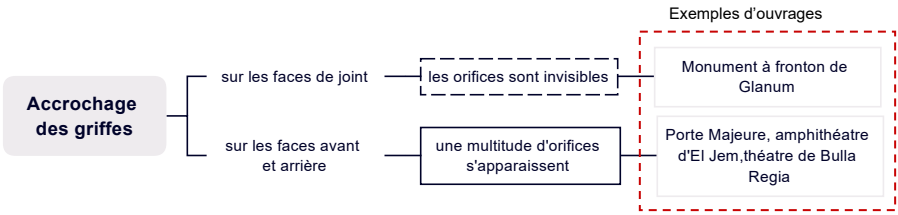


Fig. 37 – Accrochage des griffes. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure)

4.2.2.3.3 Le calage et les scellements

Le calage et le scellement précèdent la mise en œuvre des pierres, garantissant leur stabilité et leur bonne intégration dans la structure. Ces opérations permettent d'orienter les blocs en fonction des contraintes structurelles et des exigences du bardage et du levage. Chaque face de la pierre (*cf*. Fig. 38) reçoit une désignation en fonction de son rôle dans l'assemblage. La « face de parement », visible une fois la construction achevée, fait ainsi l'objet d'un soin particulier afin d'assurer une finition soignée et homogène (Adam, 1984, p. 53).

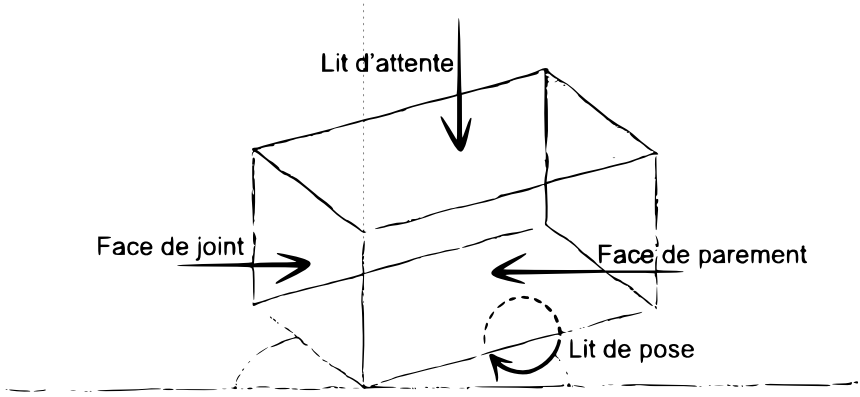


Fig. 38 – Les faces de la pierre d'après les romains. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 53). (établie par l'auteure)

Le marquage des blocs de pierre (*cf*. Table 11), une pratique courante dans l'antiquité, remplit plusieurs fonctions. Il permet non seulement de comptabiliser le travail réalisé, en suivant précisément les pierres extraites et taillées, mais aussi d'indiquer leur destination et leur emplacement exact dans l'édifice. Lorsque les blocs étaient taillés à distance du site de construction, des repères de positionnement étaient souvent nécessaires pour garantir le respect du plan d'assemblage et assurer une mise en place conforme à la conception initiale du monument.

Table 11 – Caractéristiques des faces d'une pierre. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 53). (établie par l'auteure)

type de face	traitement de la surface
face de parement	subit un traitement spécifique : elle peut être finement ravalée ou conserver un bossage plus ou moins accentué
face inférieure (lit de pose)	doit être rigoureusement plane afin d'assurer une répartition optimale des pressions
face supérieure (lit d'attente)	
faces latérales (faces de joint)	ne transmettent aucune pression et ne nécessitent pas un traitement général de leur surface

En parallèle de cette technique, les romains, influencés par les grecs, assurent la cohésion des blocs en intégrant des « pièces d'accrochage en bois ou en métal » (cf. Table 12, Table 13 , Table 14), renforçant ainsi la stabilité de leurs constructions. Ces dispositifs avaient pour fonction de limiter l'ouverture des joints, pouvant résulter de tassements différenciés des fondations ou d'activités sismiques, fréquentes dans certaines régions de l'empire. Ces scellements, bien que très efficaces pour lier les blocs de pierre, ont progressivement disparu, sauf dans certains grands monuments de l'époque augustéenne (Adam, 1984, p. 56).

Table 12 – Différents outils d'accrochage. Figure (a) : crampons en double té sur une fontaine pompéienne. JPA ; figure (b) : crampons en Pile profil le plus répondu, au temple de Vénus à Pompéi. JPA. Adaptation selon l'étude de Jean-Pierre Adam (1984, p. 55-60) ; figure (c) : surface d'attente d'un bloc de soubassement du temple romain d'Euromos (Carie). On y remarque, de gauche à droite ; le crampon de scellement, trois logements de goujons verticaux avec canal de coulée et deux trous de pinces ayant permis le serrage du joint du bloc supérieur. JPA. Les schémas sont tirés de Jean-Pierre Adam (1984, p. 55-57). (établie par l'auteure)

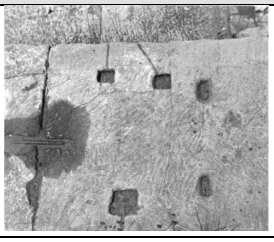
outil d'accrochage	description	schéma explicatif
liaison horizontale		
crampons en double té	plus fréquemment utilisés par les grecs que par les romains	 (a)
crampons en pi	principalement employés comme élément de scellement dans l'architecture romaine de grand appareil	 (b)
liaison verticale		
goujons métalliques	utilisés plus fréquemment par les grecs que par les romains	 (c)

Table 13 – Caractéristiques du crampon de pi. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 56-60). (établie par l'auteure)

	les crampons en pi
avantages	- rapidité d'exécution - ne nécessite pas une précision de taille - assure la solidité des pierres d'une assise

Table 14 – Caractéristiques du Goujon métallique. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 56-60). (établie par l'auteure)

	goujons métalliques
mise en place	- scellés dans la face d'attente de l'assise inférieure - introduits dans une cavité sur la face de pose de l'assise supérieure
rôle	assurer la stabilité des tambours de colonne
combinaison	- unique pour les colonnes de faible diamètre - deux, trois ou quatre éléments en fonctions de l'augmentation de la surface de contact
assemblage	l'ajout de plomb assure un ajustement précis et renforce la cohésion structurelle

Le scellement des pierres, assurant leur fixation durable, se renforce par l'usage de mortiers (*cf*. Table 15). Dans la construction romaine, le parement en grand appareil, constitué de blocs taillés selon des dimensions précises, s'associe fréquemment à un noyau interne en *opus caementicium*, un mélange de moellons consolidé par du mortier de chaux. Le contact direct entre ces blocs et le mortier intérieur contribue à la cohésion structurelle, renforçant la stabilité de l'édifice (Adam, 1984).

Table 15 – Caractéristiques du mortier. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 59). (établie par l'auteure)

	mortier
raison d'utilisation	utilisé comme colle de liaison
utilisation dans les grands appareils	limitée : - permet d'assurer la finesse des joints, avec ou sans les crampons - exige une taille des faces de qualité
le mortier de chaux : éléments concernés	présent dans les monuments construits avec des blocs de grand appareil taillés dans un matériau de médiocre aspect, parfois destinés à recevoir un enduit de parement
rôle	- assure une répartition homogène des pressions entre chaque assise - garantit l'étanchéité des structures transportant ou contenant de l'eau, telles que les aqueducs et les fontaines

4.2.2.4 Les matériaux utilisés dans la construction romaine

4.2.2.4.1 Pierre

Les matériaux de construction employés par les romains proviennent de sources variées, sélectionnées en fonction de leurs propriétés et de leur adéquation aux exigences des constructions. Deux types principaux de pierres sont exploités (Adam, 1984, p. 23) :

1. les pierres *sèches*, naturellement collectées à la surface du sol, se caractérisent par des dimensions irrégulières. Leur utilisation dans la construction de murs en pierre sèche repose sur un agencement où les blocs les plus volumineux et réguliers composent les parements, tandis que l'espace interne est rempli de frag-

ments plus petits (*blocaille*). Cette disposition assure la stabilité de l'ensemble sans recours à un liant ;

2. les pierres d'origine *marine* ou *fluviatile*, extraites des lits des rivières ou des zones côtières, possèdent des propriétés influençant leur usage en construction.

4.2.2.4.2 Argile

L'argile, matériau plastique à l'état humide et résistant après cuisson, a été largement utilisée en Mésopotamie, notamment pour les constructions étanches et les éléments vulnérables des édifices (*cf*. Table 16). Selon sa composition, elle se distingue en argiles grasses et maigres, chacune présentant des propriétés mécaniques spécifiques (*cf*. Table 17). L'ajout d'un dégraissant permet de limiter les fissurations liées au retrait lors du séchage (*cf*. Fig. 39).

Table 16 – Caractéristiques de l'argile. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure)

	argile
aspect général	matériau offrant une efficacité suffisante
qualités mécaniques	Plastique et malléable lorsqu'imbibée d'eau
propriétés naturelles	Prend facilement la forme de la main
après cuisson	devient un corps solide et résistant aux intempéries hydrauliques
transformation	cuite sous forme de briques
régions d'usage fréquent	climat chaud et sec, notamment en Mésopotamie
utilisation	- constructions étanches : bassins, canalisations - parties vulnérables des édifices : encadrements de baies, revêtements des grands monuments
période d'évolution de la cuisson de l'argile	jusqu'au I^{er} siècle. av. J.-C.

Table 17 – Types et caractéristiques d'argile. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteur)

type d'argile	argile grasse	argiles maigres
composition	argile + eau	argile + sable
qualité mécanique	se fissure rapidement en séchant	- moins plastique - phénomène de retrait à la dessiccation plus faible
solutions	intégrer un *dégraissant*[15] pour limiter les effets de retrait et fissuration de l'argile	

[15] Dégraisser l'argile signifie donc l'appauvrir par l'adjonction d'un corps qualifié alors de *dégraissant.*

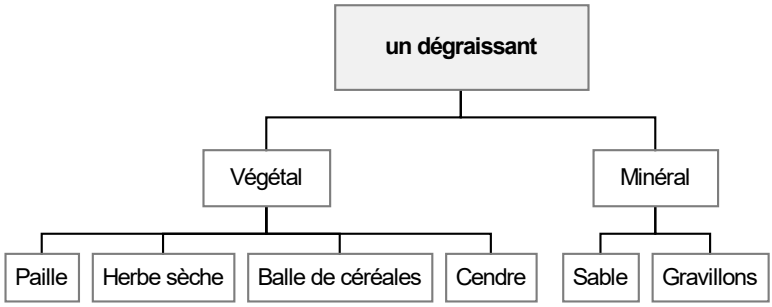


Fig. 39 – Types de dégraissant. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68).
(établie par l'auteure)

L'argile, employée à l'état cru, se prête à diverses techniques de construction encore utilisées dans plusieurs régions méditerranéennes et orientales. Parmi les méthodes les plus courantes figurent (*cf*. Table 18) (Adam, 1984, p. 62) :

1. *pisé* : cette technique repose sur le compactage de l'argile humide entre des coffrages, formant des parois denses et résistantes une fois séchées ;

2. *torchis* : mélange d'argile, de paille et d'autres fibres végétales appliqué sur une ossature en bois. Cette méthode permet d'obtenir des parois flexibles, adaptées aux variations climatiques ;

3. briques crues : moulées à partir d'argile non cuite, ces briques sont séchées à l'air libre avant d'être employées dans la construction de murs et d'autres structures.

Table 18 – Plusieurs présentations d'argile. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68).
(établie par l'auteure)

présentation d'argile	*pisé*	*torchis*	briques crues
description	- dégraissé avec des minéraux (argiles maigres additionnées de sable). - dégraissé avec les végétaux (*torchis-pisé*)	argile dégraissée avec de la paille (recommandé par Vitruve)	argile dégraissée et séchée au soleil sous forme de parallélépipèdes, assemblées avec de l'argile humide

Le processus de fabrication de la brique crue (*cf*. Fig. 40) suit une chaîne simple et reproductible : préparation d'un mélange d'argile dégraissée et humidifiée, coulage dans des moules sans fond, puis démoulage après un séchage partiel à l'air libre. Ce procédé standardisé permet la production de briques de formats variés, comme la *lydienne*, la *tétradoron* ou la *pentadoron* (*cf*. Table 19).

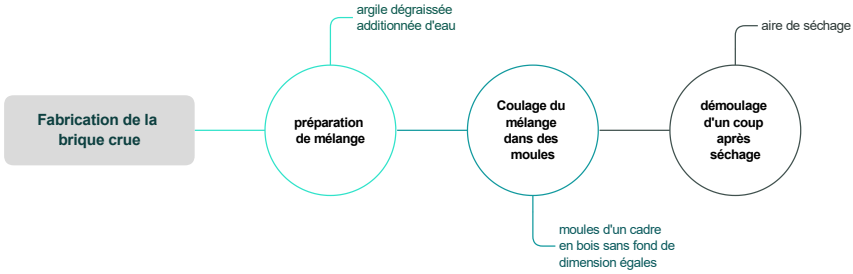


Fig. 40 – Processus de fabrication de brique crue. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure)

Dans la fabrication de l'argile cuite, les romains privilégient l'utilisation de dégraissants minéraux, comme le sable, afin d'améliorer la cohésion et la résistance du matériau après cuisson. Contrairement aux dégraissants d'origine végétale, exclus du processus en raison de leur élimination sous l'effet de la chaleur intense, cette maîtrise des composants assure une stabilité des éléments architecturaux en terre cuite. Un exemple de four présentant des similitudes avec ceux employés dans l'antiquité se trouve à « Kairouan », en Tunisie (*cf*. Table 20), illustrant la persistance de ces techniques dans certaines traditions artisanales (Adam, 1984, p. 66).

Table 19 – Types de briques. Interprétation selon Vitruve (1996) et L'ancien Pline (1986). (établie par l'auteure)

type	*lydienne*	*tetradoron*	*pentadoron*
dimensions en pied romain	longueur : 1 pied largeur : ½ pied	*quatre-palmes* : 1 pied carré	*cinq-palmes*
dimensions en cm	29,6 * 14,8	29,6 * 29,6	37 * 37

Table 20 – Exemple de four à Kairouan. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure)

	four à briques contemporain
région	Kairouan, Tunisie
dimension du laboratoire	diamètre : 3 m hauteur : 4 m
température du laboratoire	- à proximité de la sole : 800 °c - à la sortie supérieure : 450 °c
matière pour la combustion	broussailles et herbes sèches.
temps de cuisson	par temps chaud et sec : 3 jours pleins

4.2.2.4.3 La chaux et les mortiers

Issue du mot [calcination], le mot *calx* [chaux] décrit une pierre calcaire résultant d'un processus thermique pendant lequel « elle va abandonner son gaz carboni-

que ». Ce procédé, utilisé dès l'antiquité, demeure pratiqué selon des techniques traditionnelles dans plusieurs pays méditerranéens, notamment en « Italie, Grèce, Tunisie et Syrie ». L'observation des fours à chaux encore en activité dans ces régions permet de mieux comprendre les méthodes employées par les romains. La maîtrise de la température et l'absence d'éléments indésirables, tels que l'argile, assurent une calcination optimale et garantissent un liant de qualité pour la construction (Adam, 1984, p. 69).

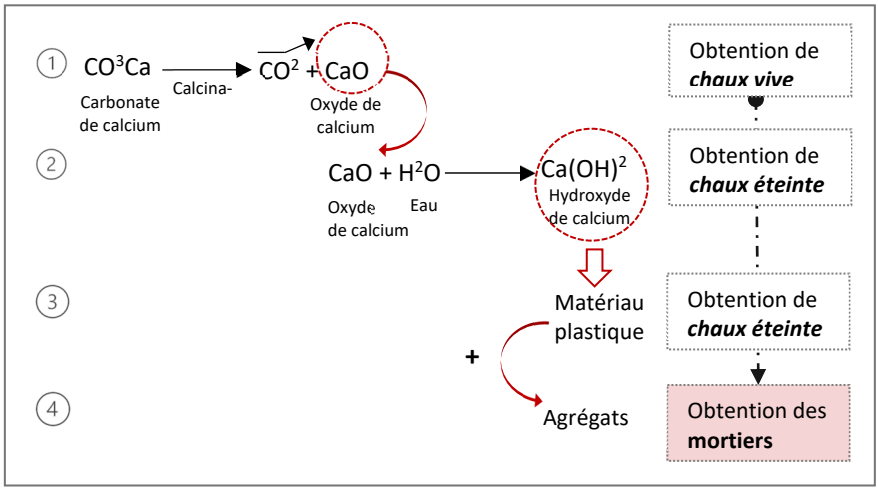


Fig. 41 – Processus de fabrication de la chaux. Interprétation d'après Giuliani Cairoli Fulvio (Giuliani, 2018b, p. 209-214) et Jean-Pierre Adam (1984, p. 69). (établie par l'auteure)

Les propriétés des chaux utilisées dans la construction ancienne varient selon leur composition et leur comportement en milieu de prise (*cf*. Table 22). La chaux aérienne durcit lentement au contact de l'air, tandis que la chaux hydraulique réagit en milieu humide, permettant une prise plus rapide mais limitant le temps de mise en œuvre. Ces deux types se déclinent en variantes grasses ou maigres, selon la teneur en argile du calcaire d'origine (*cf*. Table 21).

Table 21 – L'aspect de la roche en fonction de pourcentage de présence d'argile dans le calcaire. Interprétation d'après Adam (1984, p. 76). (établie par l'auteure)

teneur en argile (silicate d'alumine) dans le calcaire (%)	
> 20 %	les calcaires ne sont plus utilisables pour la production de chaux
> 35 %	la roche devient extrêmement tendre et friable
50 %	la roche acquiert des propriétés plastiques
< 30 % de calcaire	la marne calcaire devient une marne argileuse

Table 22 – Caractéristiques de deux types de chaux : aérienne et hydraulique. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 77). (établie par l'auteure)

	chaux aérienne		chaux hydraulique
cristallisation	se fait en présence d'air, ce qui peut ralentir le rythme de construction		la prise se fait en milieu aqueux
inconvénients	- la prise est lente - résistance mécanique relativement faible		- un temps de prise plus rapide - durée de conservation limitée, ce qui peut être un inconvénient pour certains travaux nécessitant des ajustements prolongés
deux qualités	la chaux grasse	la chaux maigre	
résultant de calcination et extinction	calcaire pur ou contenant 0,1 à 1 % d'argile	calcaire contenant 2 à 8% d'argile	calcaire contenant plus de 8% d'argile

4.2.2.4.4 Grés

Le grès, utilisé à la fois pour ses qualités techniques et esthétiques, résulte de la consolidation naturelle de grains de sable par des agents cimentants tels que la silice ou le carbonate de calcium et présente par ailleurs d'autres caractéristiques physiques et visuelles qui varient selon sa composition et son contexte géologique (*cf*. Table 23).

Table 23 – Caractéristiques du matériau : Grés. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure)

critère	grés
origine	résulte de la consolidation de grains de sable par des minéraux cimentants tels que la silice ou le carbonate de calcium
couleur	variation allant du blanc au gris, avec des nuances de jaune, rouge et brun
composition chimique	composée uniquement de silice
aspect physique	- faible résistance aux éraflures et aux chocs - capacité portante importante - résistance à l'humidité et à la corrosion éolienne
carrières	situées à moins de 2 km à l'est-nord-est d'Oudna, dans la localité d'Aïn Dabboubia
utilisation	- protection - fonction esthétique

4.2.2.4.5 Calcaire compact blanc

Les pierres utilisées dans la construction antique, telles que le calcaire compact, le calcaire mésozoïque ou le basalte, présentent des caractéristiques physiques, mécaniques et géologiques spécifiques. Leur utilisation, leur origine et leur transformation sont synthétisées dans des tableaux (*cf*. Table 24, Table 25, Table 26) afin d'en dégager les constantes et les particularités techniques.

Table 24 – Caractéristiques du matériau : calcaire compact blanc. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure)

critère	calcaire compact blanc
origine	origine organique résultant de la consolidation de sédiments marins riches en coquillages, coraux et autres organismes marins
couleur	blanche.
composition	carbonate de calcium.
aspect physique	- relativement dur et résistant à l'usure - peut être travaillé et sculpté avec des outils appropriés - faible porosité
carrières	Bir Dragin, à deux kilomètres au sud-ouest d'Uthina
utilisation	utilisé pour des constructions variées, des monuments architecturaux aux éléments décoratifs, en raison de ses qualités esthétiques, de sa durabilité et de sa capacité à être finement travaillé

Table 25 – Caractéristiques du matériau : Calcaire mésozoïque. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure)

critère	calcaire mésozoïque
origine	roche sédimentaire formé principalement dans des environnements marins peu profonds
couleur	variations allant du gris clair au brun rougeâtre
composition	principalement composé de carbonate de calcium ($CaCO_3$)
aspect physique	bonne résistance à l'usure
carrières	présentes dans de nombreuses régions du monde, notamment en Europe, en Amérique du Nord, en Asie et en Afrique
utilisation	- matériau durable et résistant, adapté aux structures permanentes - utilisé pour les façades, colonnes, balustrades et autres éléments décoratifs en raison de sa capacité à être finement taillé et poli

Table 26 – Caractéristiques du matériau : basalte. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure)

critère	basalte
origine	roche volcanique
couleur	généralement sombre, variant du noir au gris foncé
composition	principalement composé de minéraux tels que le Pyroxène
aspect physique	excellentes propriétés thermiques
carrières	Sicile
utilisation	utilisé pour la réalisation des pilettes des hypocaustes des salles chauffées

4.2.2.4.6 Bois

L'emploi du bois dans la construction repose sur des techniques anciennes qui ont démontré leur efficacité et leur pérennité. Ce matériau pouvait être utilisé pour l'ensemble de la structure, couvrant à la fois les murs et la toiture, une configuration

désignée par l'expression « le clos et le couvert ». Les éléments en bois étaient assemblés selon deux orientations principales, horizontale ou verticale, et fixés grâce à des « encastrements à mi-bois », garantissant la stabilité des angles de la structure (Adam, 1984, p. 104). Aujourd'hui, ces méthodes traditionnelles s'intègrent aux procédés modernes afin d'optimiser la résistance et la durabilité des constructions en bois.

4.2.3 Les types d'*appareillage* de construction : éléments verticaux

La construction d'un mur (*cf*. Fig. 42) « met en jeu des techniques, c'est-à-dire des appareils et des matériaux » (Ginouvès, 1992, p. 29). En architecture, le terme *appareil* constitue un « ensemble maçonné constitué d'éléments taillés ou dressés, le plus souvent assisés. Il existe une grande variété d'appareils souvent appelés opus » (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 7). Cette notion renvoie plus largement à une « maçonnerie faite d'éléments posés et non jetés, mise en œuvre dans une construction », c'est-à-dire à un assemblage (*cf*. Fig. 44) où les matériaux sont disposés selon un agencement précis, à l'inverse des techniques de blocage où les éléments sont simplement coulés ou entassés. Selon les langues et les traditions, ce terme se décline sous différentes appellations : en anglais, il correspond à « work », « masonry » ou « bond », en italien à « opera », ou « struttura », et en latin à « opus » (Ginouvès, 1985, p. 94).

La maçonnerie romaine (*cf*. Fig. 43) se distingue par la diversité des matériaux employés, chacun répondant à des exigences précises en termes de solidité, d'esthétique et d'adaptabilité aux différents types de constructions :

1. les briques : matériau de construction constitué « d'argile moulée, soit séchée au soleil, soit cuite au four » (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 26). René Ginouvès (1985, p. 128) souligne que l'esthétique d'un parement en brique repose avant tout sur « la régularité de son agencement ». Diverses techniques permettent néanmoins de diversifier l'apparence à travers des « effets de couleur », des « effets de lumière et d'ombre », ou encore un « traitement des joints », Ce dernier répondant avant tout à une exigence structurelle ;
2. les appareils de cailloux et/ou moellons (la pierre brute/équarrie) : utilisée sans taille, servent principalement aux fondations et aux structures secondaires. En revanche, les pierres équarries taillées avec précision, sont employées pour les façades et les parties visibles des édifices (Adam, 1984) ;
3. appareils de bloc (le béton) : perfectionnés par les romains sous forme d'un mélange de chaux, de sable, de gravier et d'eau, souvent renforcé par des fragments de brique ou de pierre. Ce matériau offre une flexibilité architecturale inédite, permettant l'édification de structures complexes telles que les dômes et les voûtes (Adam, 1984).

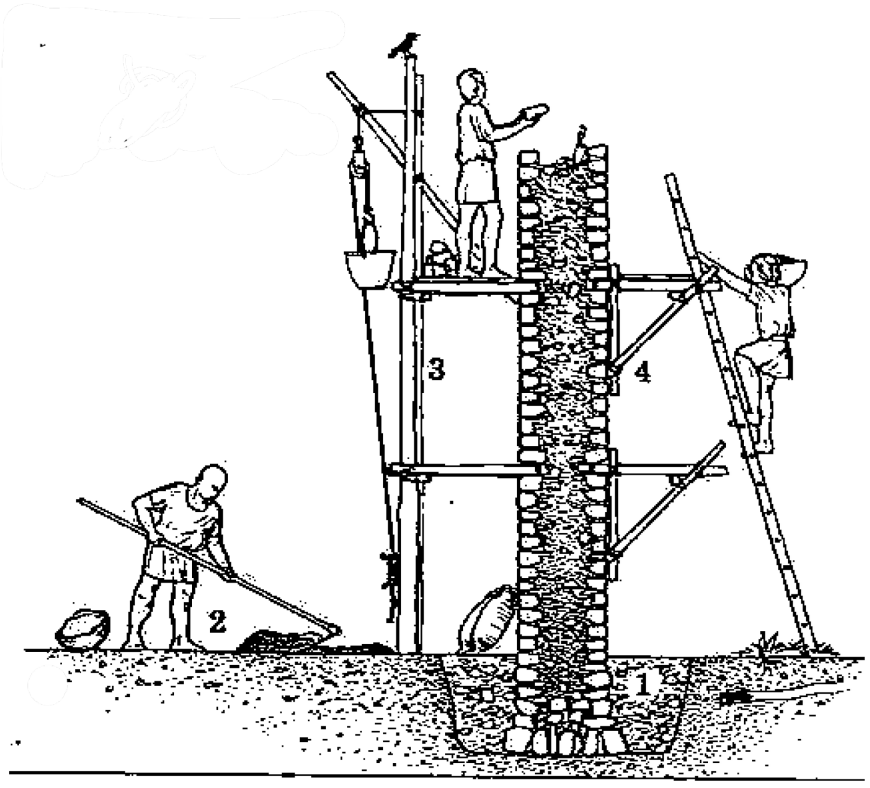


Fig. 42 – Construction d'un mur. Récapitulatif des installations du chantier : 1. tranchée de fondation ; 2. préparation du mortier ; 3. échafaudage encastré à perches ; 4. échafaudage encastré en bascule. JPA. (Adam, 1984, p. 90)

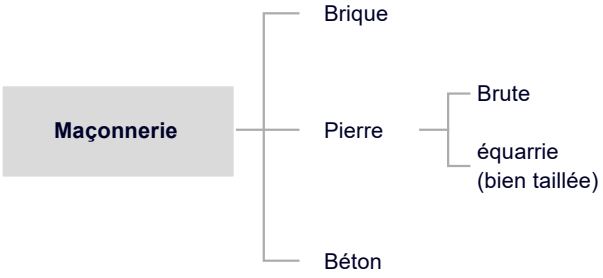


Fig. 43 – Différents types de maçonnerie. Interprétation d'après Roberto Marta (1990) et Jean-Pierre Adam (1984). (établie par l'auteure)

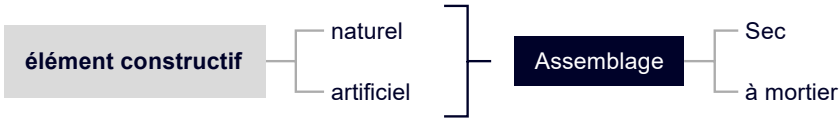


Fig. 44 – Différentes façons d'assemblage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984) et Roberto Marta (1990). (établie par l'auteure)

Les romains développent et perfectionnent différentes techniques d'appareil en maçonnerie, exploitant une diversité de matériaux et de méthodes pour concevoir des structures solides et durables. L'assemblage des éléments de maçonnerie varie en fonction du matériau employé et de l'effet recherché. La distinction entre les types de parements (*cf*. Fig. 45) repose sur « le traitement de la face de parement des éléments » (Ginouvès, 1985, p. 129). Un parement est « la face apparente d'une construction » (Ginouvès, 1985, p. 127), aussi « la partie visible, de construction unitaire, qui constitue une face du mur » (Ginouvès, 1992, p. 30).

Adam (1984) distingue trois types d'appareils en fonction de la taille des pierres et de leur agencement : le grand appareil, les structures mixtes, et le petit appareil. Pour un parement en pierre de taille, la classification repose sur « la hauteur des blocs de pierre », différenciant ainsi « grand appareil, de moyen appareil ou de petit appareil » (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 7).

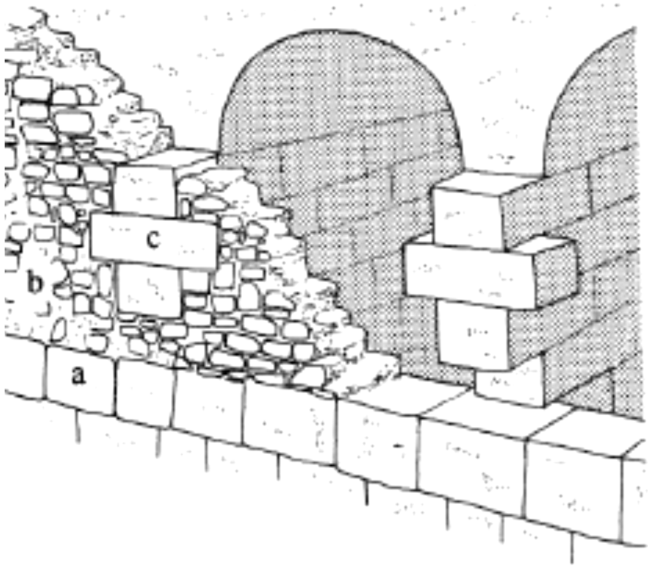


Fig. 45 – Mur à superposition de techniques. a : grand appareil ; b : petit appareil ; c : liaisonnement entre mur de fond et mur de refend (Corinthe, Agora). (Ginouvès, 1992, p. 364 [PL. 13])

De son coté, René Ginouvès (1985), établit une distinction fondée sur la nature des matériaux, séparant les éléments végétaux et minéraux. Chaque catégorie présente des types d'assemblage spécifiques dans l'architecture romaine. L'étude se concentre ici sur les assemblages réalisés à partir de matériaux minéraux, qui sont plus utilisés dans les édifices monumentaux (comme le cas des thermes), formant des appareils de maçonnerie. Parmi ceux-ci, René Ginouvès différencie les appareils homogènes, composés d'un seul type de matériau, et les appareils hétérogènes, combinant plusieurs matériaux au sein d'une même structure (*cf*. Table 27).

La description d'un mur repose sur deux dimensions fondamentales (Ginouvès, 1992, p. 25) « son plan (section horizontale au sol) et sa coupe (section verticale) ». L'analyse en plan permet d'identifier « l'épaisseur et la longueur de la construction », tout en précisant l'orientation de « son axe » (Ginouvès, 1992, p. 25). Un inventaire des murs romains sera établi en intégrant une représentation des différents modes d'assemblage, en mettant en évidence le « traitement de la face de parement » (Ginouvès, 1985, p. 127).

Table 27 – Classifications des appareils. Interprétation selon Jean-Pierre Adam (1984), Roberto Marta (1986) et René Ginouves (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31).

	type d'appareil	appareil
construction homogène	grand appareil (en blocs)	appareil cyclopéen (mégalithique)
		opus siliceum (appareil polygonal)
		opus quadratum (appareil rectangulaire)
	petit appareil (en moellons)	*opus incertum* (incertain)
		quasi reticulatum (quasi-réticulé)
		reticulatum (appareil réticulé)
		opus vittatum / *listatum* (appareil à moellons quadrangulaires)
		appareil *spicatum*
		opus scacchiera (en damier)
	en brique	*opus latericium*
		opus testaceum
construction hétérogène		*opus mixtum*
		le pan de bois (appareil à cadres et remplissage)
		opus africanum (appareil à montants/ossatures et remplissage)

4.2.3.1 Construction homogène

Une construction qualifiée d'homogène repose sur l'usage exclusif d'un seul type de matériau, il correspond à « un mur construit selon la même technique sur toute sa hauteur » et « son épaisseur » (Ginouvès, 1992, p. 29). L'agencement en façade suit un schéma répétitif, basé sur la multiplication d'un module initial (Ginouvès, 1985, p. 94).

Une cartographie des types d'appareillages est établie en distinguant deux grandes catégories : (1) les dispositifs composés d'éléments taillés, comprenant les grands appareils (*cf*. Table 28), ainsi que les petits appareils (*cf*. Table 29) ; (2) les éléments moulés en terre cuite, en particulier les briques (*cf*. Table 30).

Table 28 – Caractéristiques des grands appareils selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31).

	définition de l'appareil	appareil	caractéristique
grand appareil	« appareils utilisant des éléments taillés de grandes dimensions c'est à dire blocs (ne pouvant être portés par un homme) » (Ginouvès, 1985, p. 97)	appareil cyclopéen (mégalithique) (*cf*. Fig. 48)	est constitué de « blocs bruts ou à peine dégrossis de très grandes dimensions, calés par des cailloux ou des éclats et normalement liés par un mortier de terre » (Ginouvès, 1985, p. 97)
		opus siliceum (appareil polygonal) (*cf*. Fig. 47)	« formé de blocs présentent en général plus de quatre faces de joint » (Ginouvès, 1985, p. 97)
		opus quadratum (appareil rectangulaire) (*cf*. Fig. 46)	utilise de « blocs » qui sont « des pierres de taille en forme de parallélépipède rectangle », désigné « comme appareil orthogonal » (Ginouvès, 1985, p. 98)

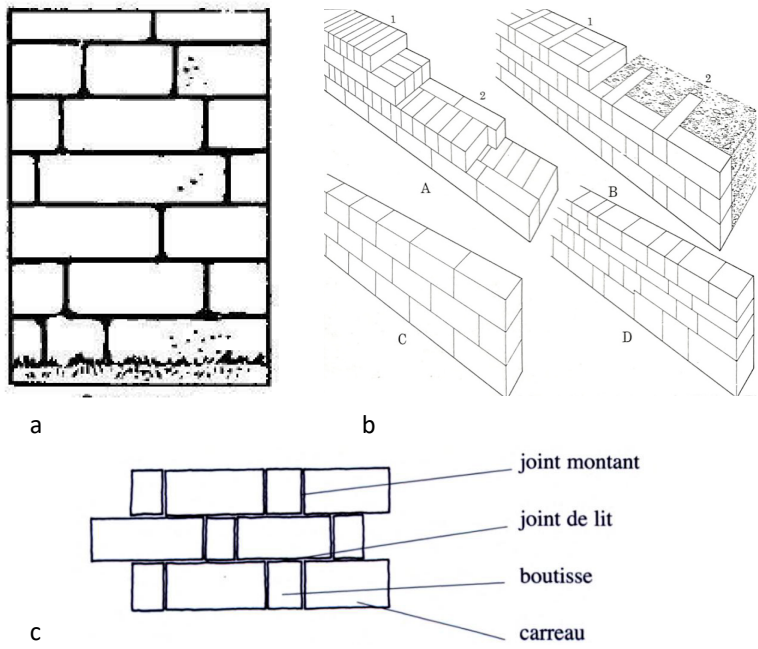


Fig. 46 – *Opus quadratum* « quadrangulaire ». a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : Schémas des principaux aspects du grand appareils quadrangulaire romain : A : alternance d'assises de carreaux et d'assises de boutisses : (1) avec assises de parpaings en boutisses et assises de carreaux. (2) avec assises mixtes de carreaux et boutisses juxtaposés dans l'épaisseur. B : assises alternant carreaux et boutisses. (1) mur à deux parements sans remplissage. (2) parement d'un mur à massif de maçonnerie. C : mur isodome en parpaings. D : mur pseudo-isodome avec décrochement. JPA (Adam, 1984, p. 118) ; c : disposition des pierres pour *opus quadratum* (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8).

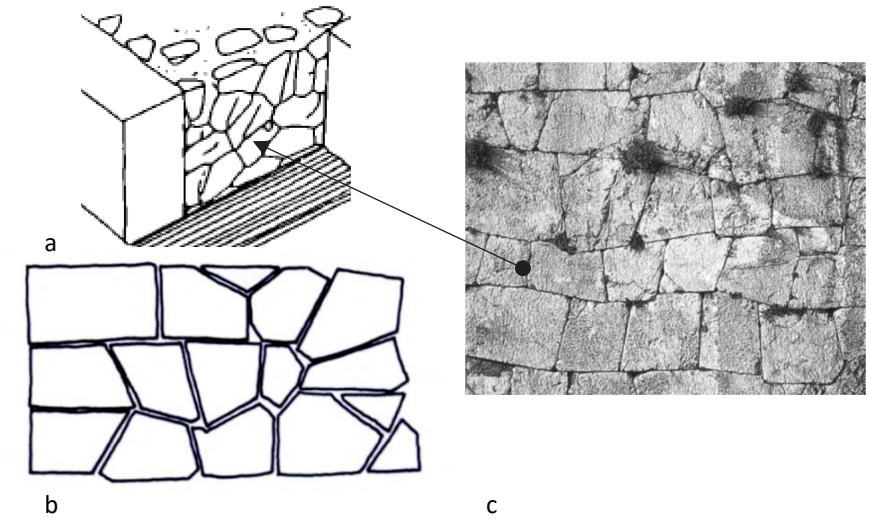


Fig. 47 – *Opus siliceum* (*polygonale*). a : vue en axonométrie de l'appareil (Giuliani, 2018b, p. 227) ; b : coupe sur le type d'appareil (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8) ; c : photo prise d'un mur de terrasse au sanctuaire de la Fortune à Palestrina (Adam, 2017, p. 113).

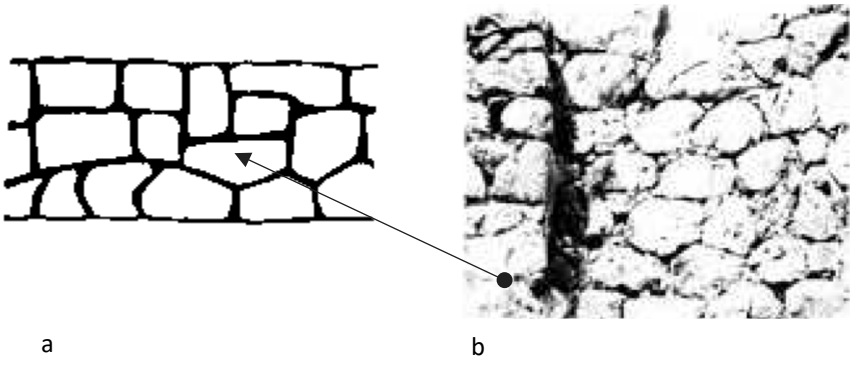
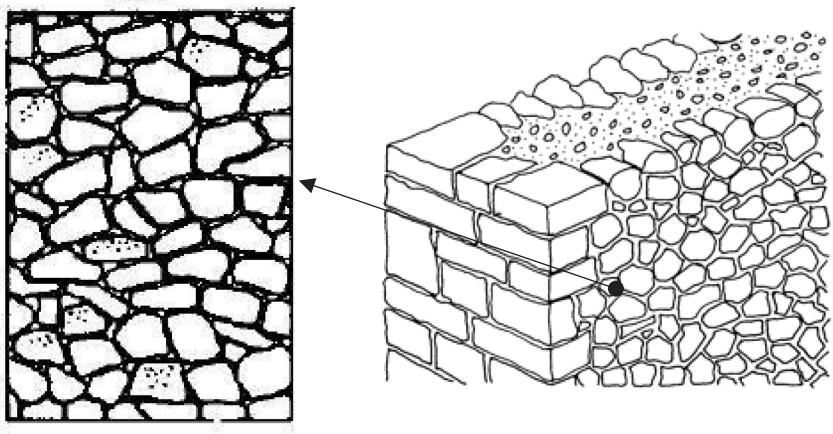


Fig. 48 – *Opus cyclopéen*. a : vue en axonométrie de l'appareil (http://francoib.chez-alice.fr/vocahist/apparei2.htm) ; b : appareil cyclopéen (Mycènes) (Ginouvès, 1985, p. 335 [PL. 22]).

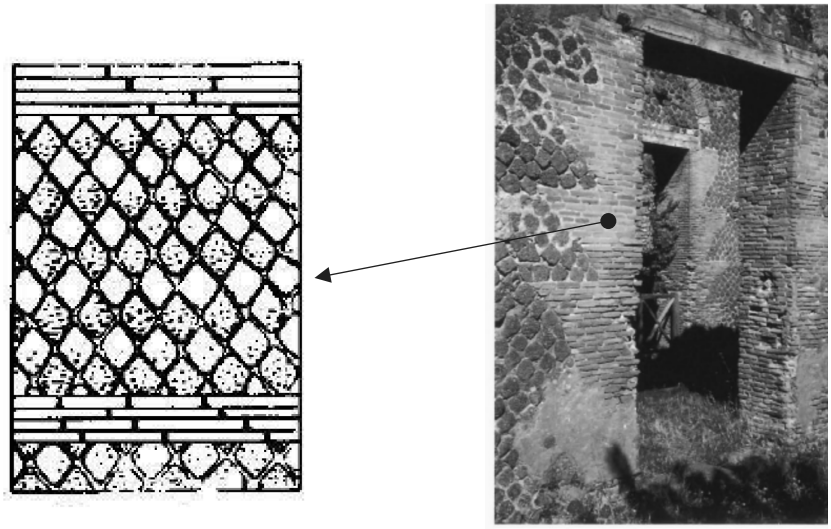
Table 29 – Classification des petits appareils selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31).

	définition de l'appareil	appareil	caractéristique
petit appareil	« appareils utilisant des éléments minéraux sous leur forme originelle et /ou des éléments taillés de petites dimensions c'est-à-dire moellons (petit appareil). (Chacun pouvant être porté par un seul homme) » (Ginouvès, 1985, p. 95)	*opus incertum* (incertain) (*cf*. Fig. 49)	repose sur l'utilisation des « cailloux et/ou moellons de forme irrégulière » (Ginouvès, 1985, p. 95) . Cette méthode ne suit aucun schéma géométrique logique, ce qui lui confère un aspect visuel aléatoire
		quasi-reticulatum (quasi-réticulé) (*cf*. Fig. 50)	constituée de « moellons travaillés sur plusieurs faces, plus ou moins quadrangulaires ou trapézoïdaux en parement » les assises restent « peu régulières avec des joints obliques par rapport à l'horizontale », créant un effet intermédiaire entre la disposition désordonnée de l'opus « incertain et le reticule » (Ginouvès, 1985, p. 95)
		reticulatum (appareil réticulé) (*cf*. Fig. 51)	composé de « moellon travaillé en forme de petites pyramides tronquées, dont la disposition, à 45 degrés de l'horizontale, désigne sur le mur comme filet » (Ginouvès, 1985, p. 96)
		opus vittatum / *listatum* (appareil à moellons quadrangulaires) (*cf*. Fig. 52)	constitué de blocs « parallélépipédiques et disposés en assises horizontales », avec une alternance des joints visant à renforcer la stabilité de la structure. Cette organisation confère à l'ensemble une apparence en « bande » (Ginouvès, 1985, p. 96)
		appareil *spicatum* (*cf*. Fig. 53)	constitué de moellons ou de briques disposés en chevrons, formant un motif en épi. Elle peut « être réalisé aussi en briques » (Ginouvès, 1985, p. 96-97)
		opus scacchiera (en damier) (*cf*. Fig. 54)	une technique combinant « l'utilisation d'éléments assez importants gros moellons ou blocs bruts » avec un empilement alterné, aussi bien à « l'intérieur d'une même assise » qu'entre différentes assises (Ginouvès, 1985, p. 97). Cette méthode repose sur une alternance entre « des blocs de grand appareil avec un remplissage de moellons », où seuls les blocs assurent « la stabilité de la construction » (Adam, 1984, p. 129)



a b

Fig. 49 – *Opus incertum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : vue en axonométrie (Sear, 1982, p. 125-126).



a b

Fig. 50 – *Opus* quasi-*reticulateum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : photo prise de l'Odéon de Pompéi (Adam, 2017, p. 143).

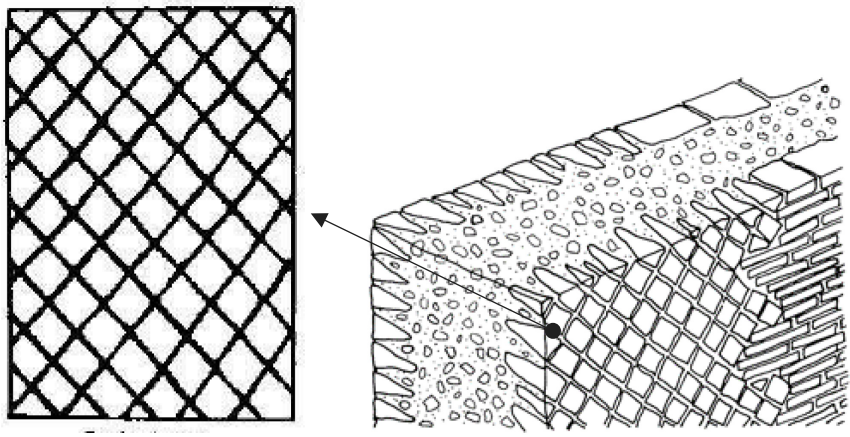


Fig. 51 – *Opus reticulatum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : vue en axonométrie (Sear, 1982, p. 125-126).

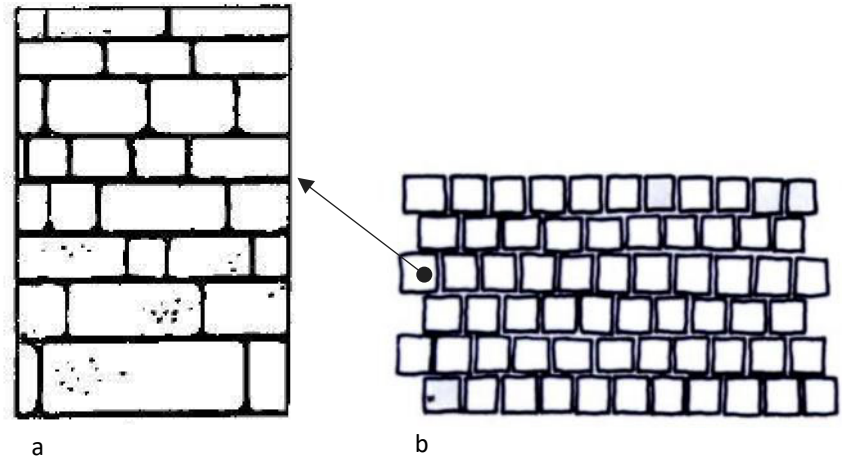


Fig. 52 – *Opus vittatum* (*listatus*). a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : coupe sur le type d'appareil (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8).

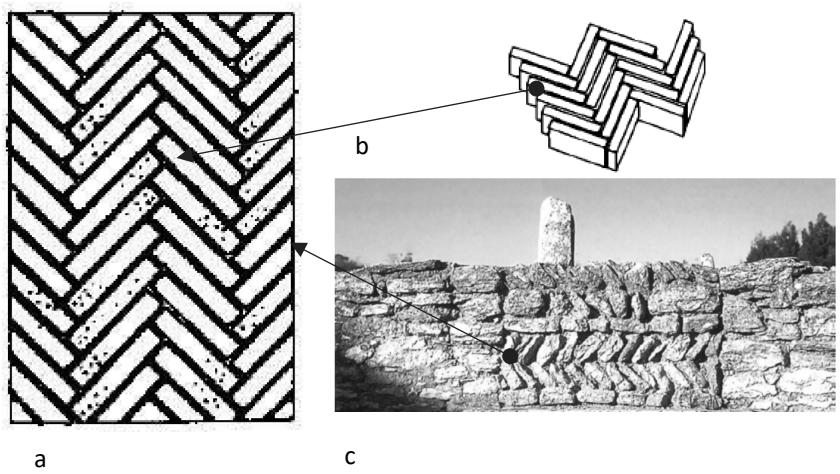


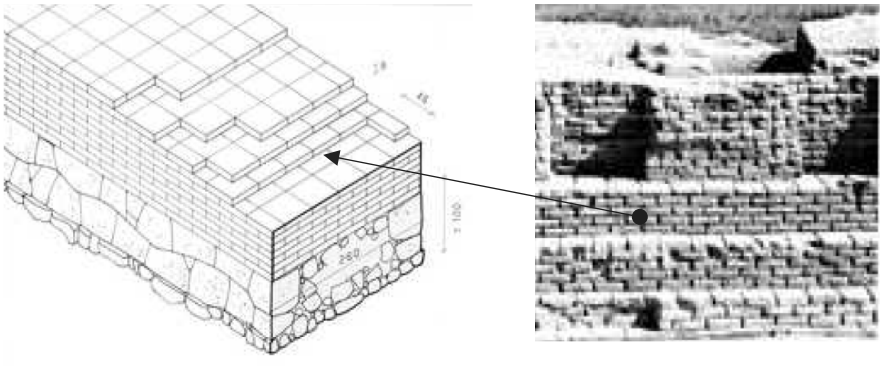
Fig. 53 – *Opus spicatum* . a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : disposition des briques pour l'opus spicatum (Giuliani, 2018b, p. 206) ; c : photo prise de porte murée de la maison des Antes à Glanum (Adam, 2017, p. 156).



Fig. 54 – Opus en damier (*scacchiera*) à Velia de IIIe siècle. (Adam, 1988, p. 129)

Table 30 – Classification des appareils en brique selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31).

	définition de l'appareil	appareil	caractéristique
en brique	« appareils utilisant des éléments moulés, c'est-à-dire essentiellement des briques, soit crues, soit cuites et exceptionnellement, des agglomérés » (Ginouvès, 1985, p. 99)	*opus Latericium* (*cf*. Fig. 55)	utilise « seulement des briques crues » (Ginouvès, 1985, p. 99). Une technique était couramment employé « jusqu'à l'époque d'Auguste », en référence aux descriptions de Vitruve. Cependant, en raison de la nature fragile de ce matériau, « leurs vestiges avaient aujourd'hui disparu » (Adam, 1984, p. 158)
		opus Testaceum (*cf*. Fig. 56)	utilise « seulement des briques cuites » (Ginouvès, 1985, p. 100)



a b

Fig. 55 – *Opus latericium*. a : mur de rempart (Eleusis) ; b : mur de rempart (Ei Khanoum). (Ginouvès, 1985, p. 337 [PL. 24])

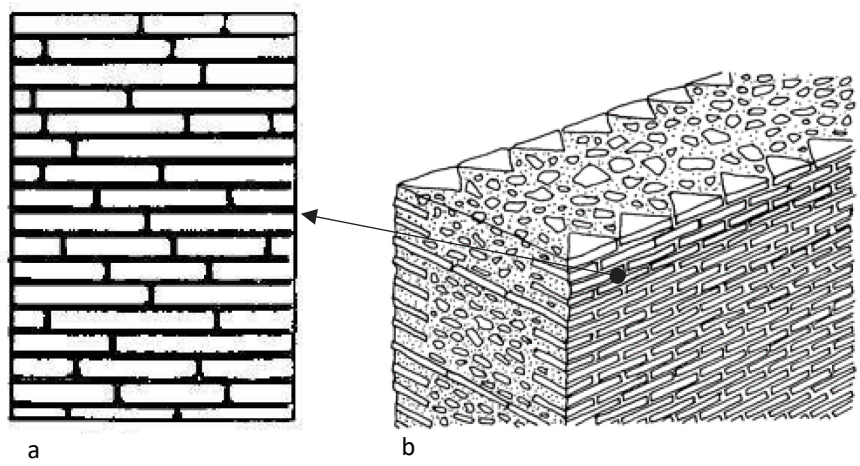


Fig. 56 – *Opus testaceum.* a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : vue en axonométrie (Sear, 1982, p. 125-126).

4.2.3.2 Construction hétérogène

La construction hétérogène (*cf*. Table 31) associe plusieurs matériaux ou procédés au sein d'une même structure. Elles « combinent des systèmes de construction différents » (Ginouvès, 1985, p. 94-95), « soit par la nature du matériau, soit par le rôle différent confié aux divers éléments » (Ginouvès, 1985, p. 101). Dans certains cas, « l'épaisseur du mur est réalisée seulement par deux parements, chacun d'une technique différente » et « normalement le p. extérieur est plus soigné que le p. intérieur » (Ginouvès, 1992, p. 30).

Table 31 – Classification des appareils mixtes selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31).

type d'appareil	caractéristiques et définition de l'appareil
opus mixtum (*cf*. Fig. 57 et Fig. 59)	regroupe « nombreuses variétés de maçonneries, la plupart déjà évoquées » (Adam, 1984, p. 151), « combinant des parties réalisées en briques cuites avec des parties réalisées en moellons et éventuellement en blocs » (Ginouvès, 1985, p. 101)
le pan de bois ou *opus craticium* (appareil à cadres et remplissage) (*cf*. Fig. 58)	représente la « structure mixte la plus répandue » dans l'architecture ancienne (Adam, 1984, p. 132), combinant « une structure portante et un remplissage » (Ginouvès, 1985, p. 101). La partie portante repose sur des « éléments rigides végétaux » parfois « complétés par des éléments minéraux » (Ginouvès, 1985, p. 85) « formant ainsi l'élément portant d'une construction » (Ginouvès, 1985, p. 86). Le remplissage, quant à lui, varie en fonction des ressources disponibles et inclut la brique, l'argile ou la pierre

opus africanum (appreil à montants ou ossatures et remplissage) (*cf*. Fig. 60)	une technique de maçonnerie porteuse, d'origine punique, « transportée par les Carthaginois » et attestée en divers sites de « Sicile » et d' « Italie méridionale » (Adam, 1984, p. 131). Elle repose sur l'insertion de blocs de travertin de dimensions variées entre d'autres éléments du même matériau, disposés de manière alterné, verticalement et horizontalement. L'ensemble se caractérise par « essentiellement des empilements verticaux » (Ginouvès, 1985, p. 102), « reliés au remplissage de moellons par les saillies des pièces horizontales » (Adam, 1984, p. 131)

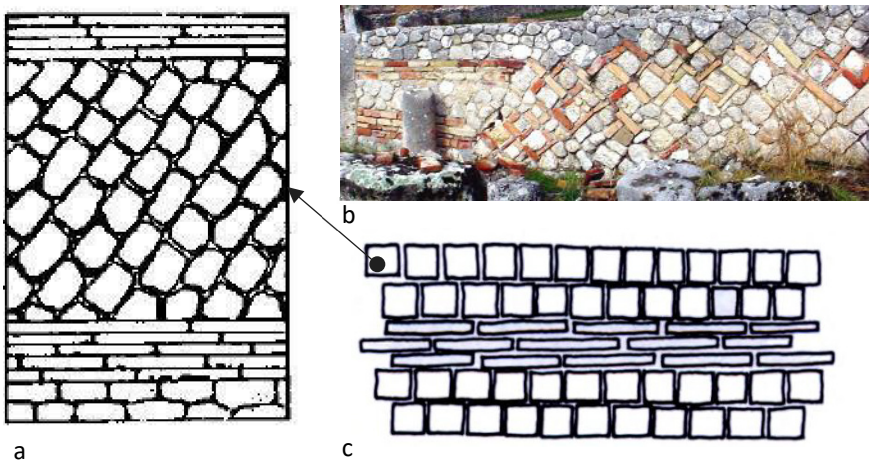


Fig. 57 – *Opus mixtum incertum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : Alba Fucens, Via dei Pilastri (Giuliani, 2018a) ; c : coupe sur le type d'appareil (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8).

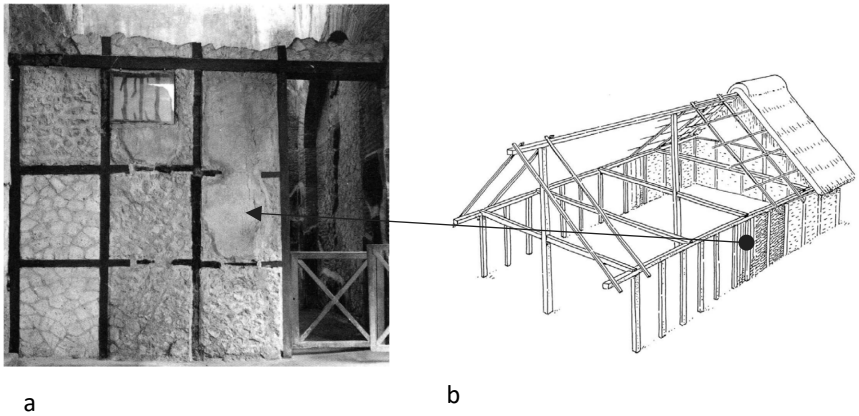
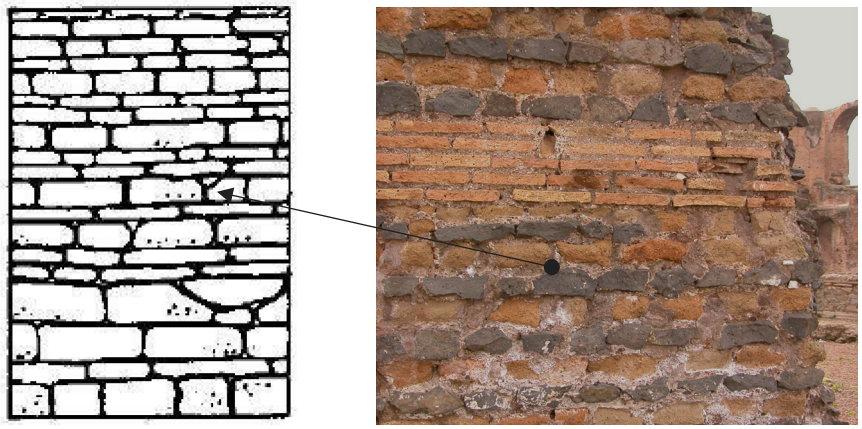
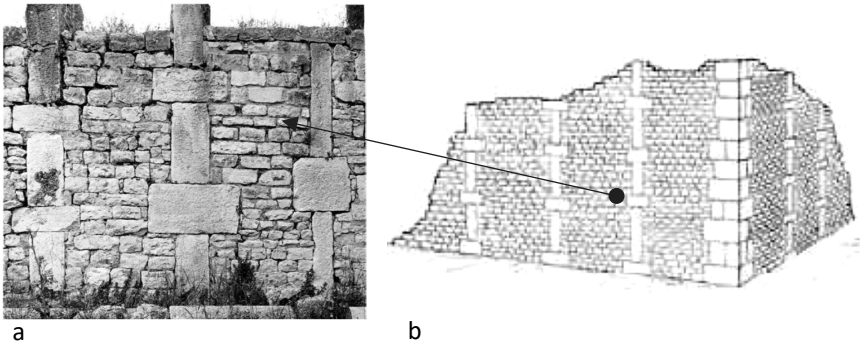


Fig. 58 – *Opus* craticium (*le pan de bois*, *graticio*). a : Herculanum, construite entre 62 et 79 au collège des Augustales. Le remplissage est en *opus incertum,* l'ensemble était enduit (Adam, 1988, p. 133) ; b : vue en axonométrie de construction dans une ville rurale (Gros, 2001, p. 198).



a b

Fig. 59 – *Opus mixtum vittatum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : mur à Roma, Villa dei Quintili (Giuliani, 2018a).



a b

Fig. 60 – *Opus africanum*. a : vue de face des parements (Adam, 1988, p. 131) ; b : vue en axonométrie de l'*opus africanum* à Dougga (Ginouvès, 1985, p. 339 [PL. 26]).

4.3 Schéma relationnel des éléments constructifs

L'objectif de cette section est d'établir une cartographie des techniques de construction des parois verticales (*opus*), en proposant une taxonomie sommaire des éléments mobilisés lors de la mise en œuvre (*cf*. Fig. 61), complétée par une classification plus détaillée (*cf*. Fig. 62).

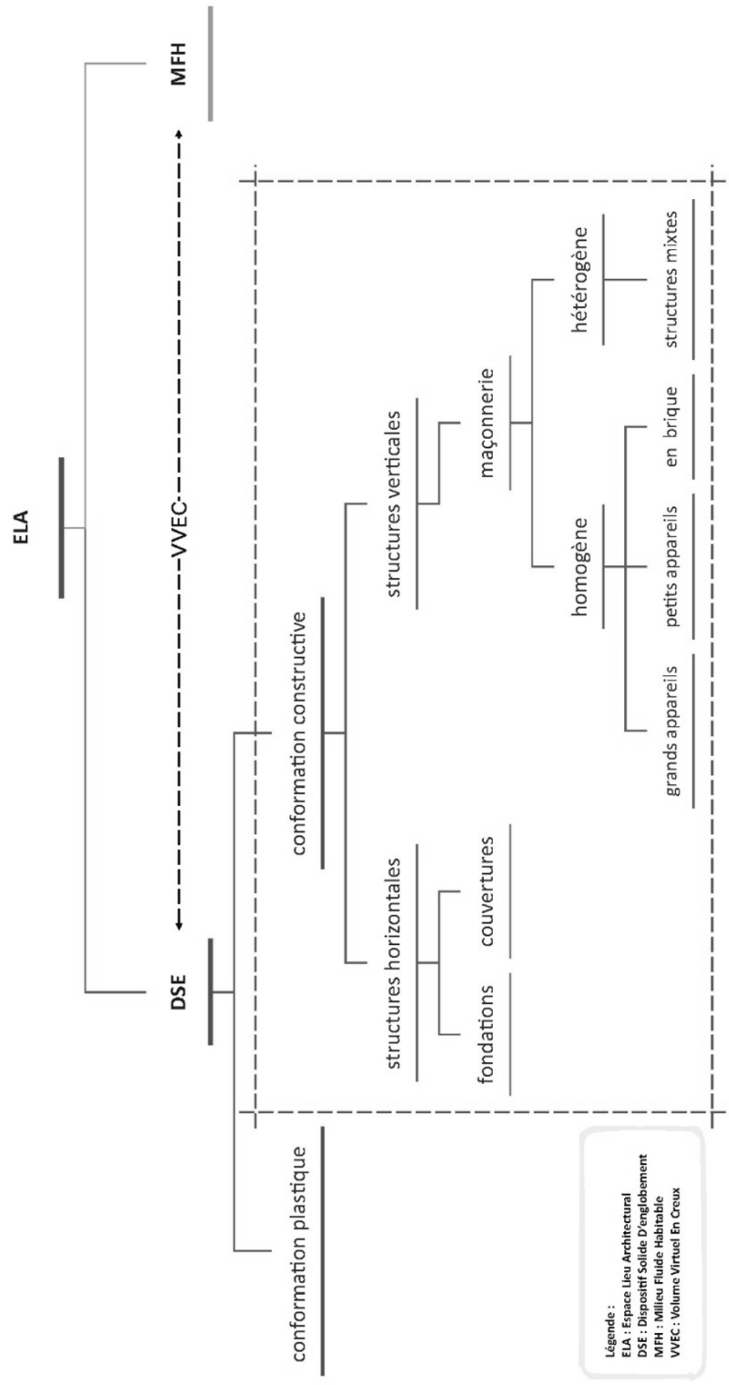


Fig. 61 – Une décomposition sommaire du lieu architectural, en relation avec l'aspect constructif, selon la matrice d'incidence développée par Mounir Dhouib (2004). (établie par l'auteure)

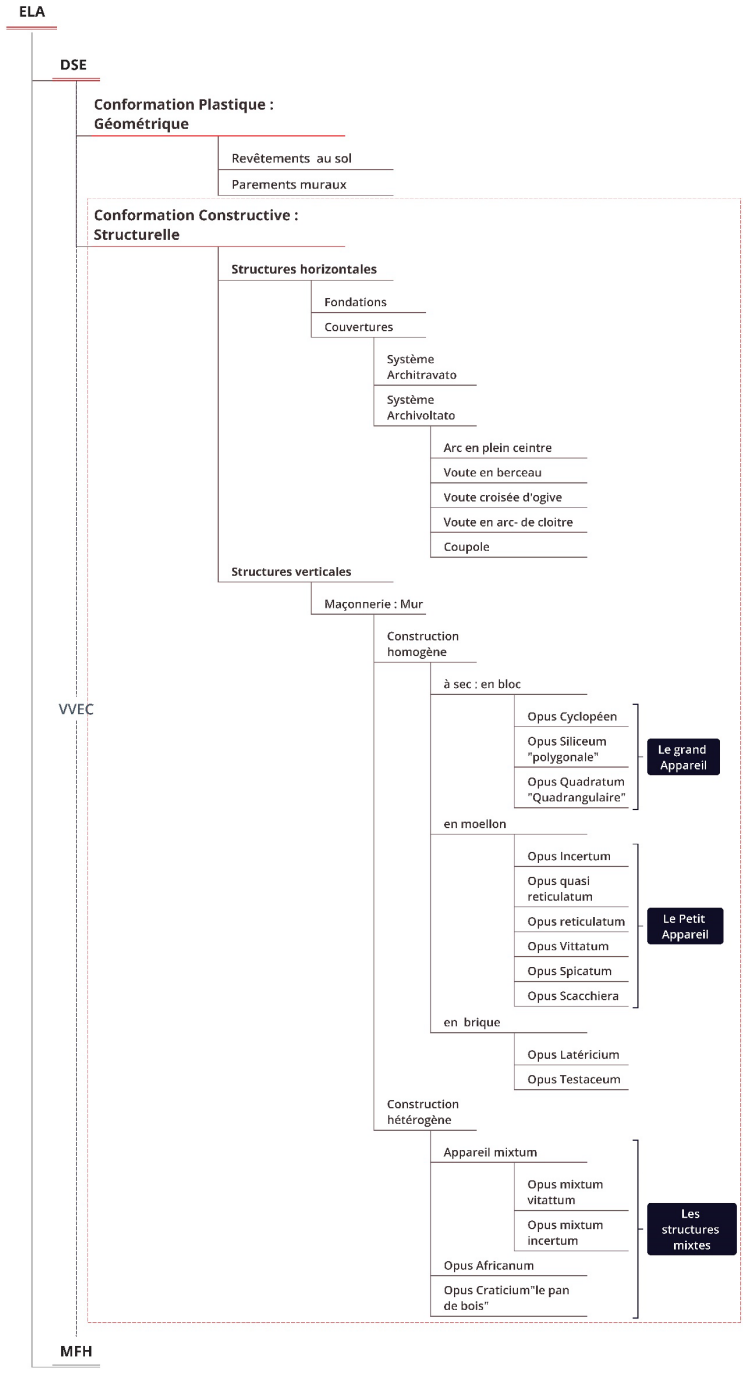


Fig. 62 – Hiérarchisation des éléments constructifs par rapport au dispositif du solide d'englobement (DSE). (établie par l'auteure)

L'étude de la matérialité de l'architecture romaine cherche à identifier les éléments de la construction des murs et à les structurer dans un schéma arborescent sous forme de carte mentale. Cette organisation s'appuie sur l'analyse menée dans la thèse concernant l'aspect constructif des parois, en l'intégrant dans une approche plus large du « lieu architectural » et de ses interactions avec d'autres éléments.

Le cadre théorique s'appuie sur le principe de l'« Espace Lieu Architectural » (ELA) (Dhouib, 2004), qui distingue un « Milieu Fluide Habitable » (MFH) et un « Dispositif Solide d'Englobement » (DSE). L'interface entre ces deux composantes constitue un lieu d'équilibration de l'ensemble des parties dans le tout qu'on appelle Volume Virtuel En Creux (VVEC). Cette interface se déploie dans les trois directions, entre les pleins et les vides, les mettant en interrelation selon les perspectives structuralle, imaginale et historique.

L'analyse des techniques de construction met en évidence l'hétérogénéité du *plein* dans les édifices thermaux romains. Le choix des types ou des épaisseurs d'appareillage ne suit pas toujours un schéma dimensionnel stable, ni une logique constructive unifiée. Les choix de matériaux, souvent conditionnés par des facteurs locaux, tel que disponibilité des ressources, conditions topographiques ou exigences fonctionnelles produisent ainsi une variabilité marquée. Cette disparité complique l'établissement d'un modèle généralisable du *plein,* et aucun schéma constructif homogène ne semble dominer à l'échelle impériale, en dehors de quelques régularités propres à certains territoires.

Ce constat renforce l'intérêt d'une approche inversée, fondée non sur le *plein*, mais sur le *vide* architectural, défini par les espaces construits dans leur dimension géométrique et fonctionnelle. La modélisation des surfaces, des proportions, des relations spatiales, des symétries... sous forme de modèle de jeu de données paramétrique (*Parametric DataSet Model* [PDSM]), fournit des entrées exploitables dans un cadre algorithmique. Le recours au vide permet ainsi de prédire indirectement le plein, par l'intermédiaire d'un modèle artificiellement intelligent de complétion (*Artificial Intelligence Completion Model* [AICM]). Cette orientation méthodologique ne constitue pas un renoncement à l'analyse constructive, mais répond à un besoin d'adapter aux objectifs de complétion automatisée des plans fragmentaires.

Même si les techniques de construction romaines ne soient pas directement traduites en variables numériques dans les modèles développés, leur étude permet de justifier les choix méthodologiques et d'en identifier les limites. L'analyse, portant sur les techniques « de levage », de « mise en place » et d'« assemblage », aussi bien des marques de « tâcherons » ou bien du « traitement des faces » essentiellement du ou des parement(s) du bloc (Ginouvès, 1985, p. 62), permet d'interpréter certains indices matériels observés dans les fragments conservés. À l'instar de ce que souligne Golvin (2005, p. 35) qu'« un indice a toujours été produit par une chose ou un phénomène réels ». Les indices prennent diverses formes : fragments architecturaux (chapiteaux, céramiques…), empreintes (traces de murs disparus), ou symptômes (fissures liées à des tassements de fondations). Chaque indice, par sa nature, établit une relation de cause à effet avec l'objet ou le phénomène qui l'a engendré, par exemple, la présence d'attaches métalliques intégrées aux murs permet d'estimer

l'épaisseur initiale de l'édifice ou indique la présence d'éléments disparus. Ces configurations peuvent être traduites en variables pour mettre en évidence les corrélations possibles entre les données collectées et la structure spatiale d'ensemble.

4.4 Articuler dynamiques historiques et matérialité constructive dans une perspective de modélisation

L'analyse des périodes historiques a montré que les thermes se développent en relation étroite avec les mutations politiques et sociales de l'empire, depuis les premières expérimentations de la fin de la république jusqu'aux réalisations monumentales du haut-empire et aux transformations du bas-empire. Ces dynamiques révèlent un processus d'adaptation, où les modèles urbains et architecturaux romains se diffusent et se transforment dans les provinces, notamment en Afrique du Nord.

L'étude des modalités constructives a mis en évidence la diversité des techniques et des matériaux employés, ainsi que la capacité des bâtisseurs à intégrer des ressources locales et importées dans des systèmes cohérents. La maîtrise du béton, des voûtes et des appareillages variés, associée à une ingénierie logistique et hydraulique avancée, illustre une approche constructive souple, capable de répondre à des contextes géographiques et fonctionnels différents. L'inventaire des dispositifs de levage, de calage, d'assemblage et de scellement a permis de replacer les choix techniques dans une logique d'efficacité structurelle et d'organisation de chantier.

Enfin, le schéma relationnel des éléments constructifs souligne que la variabilité observée dans les appareillages empêche de dégager un modèle homogène du plein à l'échelle impériale. Cette hétérogénéité justifie le choix méthodologique d'une approche fondée sur le vide, où l'espace bâti, défini géométriquement et fonctionnellement, constitue la base du modèle paramétrique. Les techniques de construction ne disparaissent pas pour autant de l'analyse : elles apportent des indices matériels exploitables dans la rétroconception, en reliant les fragments conservés aux logiques spatiales d'ensemble.

5 CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNÉES DU CORPUS

Le cinquième chapitre s'organise en trois sections. La première propose une lecture typologique des plans thermaux, fondée sur la classification de Daniel Krencker (1929), afin de dégager les logiques spatiales propres à l'architecture thermale romaine. La deuxième examine les critères de sélection du corpus, en articulant les contraintes documentaires aux particularismes locaux nord-africains. La troisième présente un inventaire structuré des édifices retenus, sous forme de fiches planimétriques normalisées, constituant la base de données utilisée pour les phases de modélisation.

5.1 Typologie et principes de classification des thermes romains

La classification des thermes romains suscite l'intérêt de plusieurs chercheurs, notamment Daniel Krencker (1929, p. 177-181), qui propose une typologie fondée sur l'itinéraire du baigneur dans son étude des thermes de Trèves, en Allemagne, et distingue ainsi huit grands types architecturaux. Yvon Thébert (2003) prolonge cette réflexion en insistant sur la nécessité d'une catégorisation prenant en compte les pratiques d'utilisation des espaces par les usagers afin d'affiner l'analyse et la compréhension de ces édifices. L'itinéraire du baigneur étant directement liée à la typologie des thermes, « un plan linéaire, axial ou orthogonal est mieux adapté à un itinéraire à rétrogradation », tandis qu'« un plan circulaire ou symétrique est mieux adapté à un itinéraire continu » (Rebuffat, 1991, p. 7). Ce parcours, qui se divise en deux grandes catégories, rétrograde ou continue (*cf*. Fig. 63), dessine ainsi un schéma global de circulation de baigneur à travers les divers espaces thermaux (Thébert, 2003) :

1. itinéraire rétrograde : le parcours implique un retour sur ses pas après avoir atteint le *caldarium*, traversant à nouveau les salles chauffées avant d'accéder au secteur froid ;
2. itinéraire continu : le parcours évite toute régression dans le cheminement. Le baigneur peut traverser deux fois une même pièce, notamment un *tepidarium* servant à la fois d'entrée et de sortie, mais sans jamais revenir en arrière. Les thermes présentant un itinéraire continu, sont à leur tour, déclinés en deux types : *symétrique*, lorsque certaines salles sont dédoublées pour répartir le flux des baigneurs ; *circulaire*, lorsque tous suivent un parcours unique formant une boucle, orientée soit vers la droite (*dextrogyre*), soit vers la gauche (*sinistrogyre*).

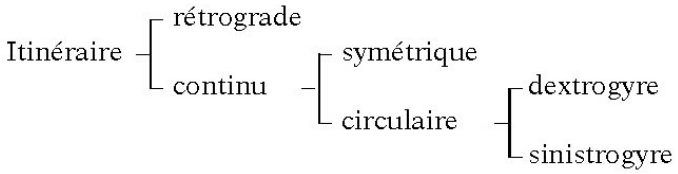


Fig. 63 – Deux catégories d'itinéraire des baigneurs. (Thébert, 2003, p. 119)

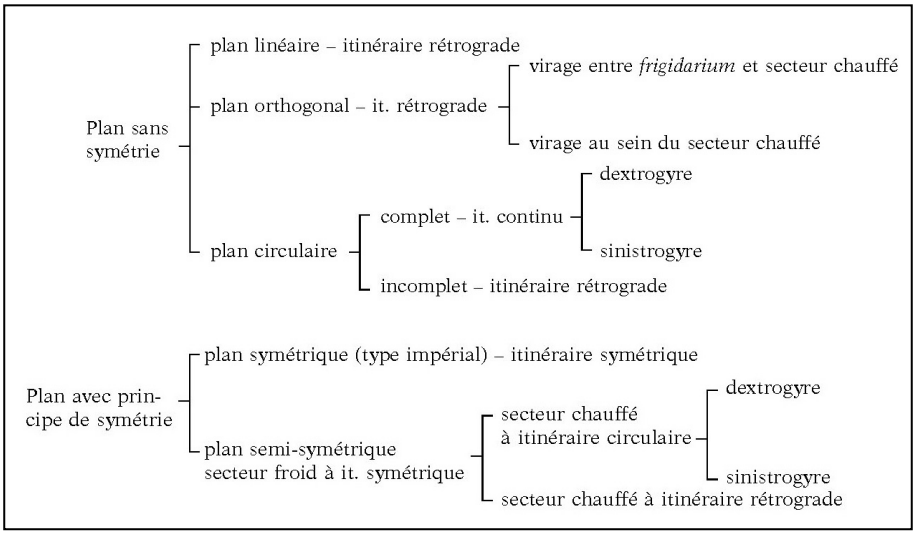


Fig. 64 – Schéma récapitulatif des différents types de plans ainsi que de différents itinéraires. (Thébert, 2003, p. 120)

Selon l'itinéraire du baigneur, les typologies des plans des thermes peuvent être (Rebuffat, 1991, p. 7) : linéaires ou axiaux ; orthogonaux ; symétriques ou partiellement symétriques. Yvon Thébert (2003) propose une classification plus détaillée, distinguant deux grandes approches architecturales : d'un côté, les thermes régis par des principes de symétrie ; de l'autre, ceux qui présentent une organisation plus flexible, échappant à cette stricte rigueur (*cf*. Fig. 64) :

1. Plans asymétriques : constituent la catégorie la plus répandue, en particulier parmi les édifices de petite taille. L'absence de symétrie ne signifie pas un agencement aléatoire, certaines logiques spatiales demeurent perceptibles, notamment dans l'organisation des salles chauffées et leur relation avec les espaces froids. Elle se subdivise en trois sous-types de plans : (a) plans linéaires ou axiaux (*cf*. Fig. 66) : le frigidarium et les salles chauffées sont alignés sur un même axe, imposant un itinéraire rétrograde ; (b) plans orthogonaux (*cf*. Fig. 67) : les salles chauffées forment un angle droit, soit à la jonction avec le *frigidarium*, soit entre elles. L'itinéraire reste rétrograde ; (c) plans circulaires (*cf*. Fig. 68) : les salles sont disposées en anneau.

Lorsque celui-ci est incomplet, l'itinéraire demeure rétrograde. En revanche, un anneau complet permet un parcours continu, orienté soit *dextrogyre*, soit *sinistrogyre*.

Légende :

A : *Apodyterium*	P : *Palestre*
B : *Basilica*	Pi : Piscine
C : *Caldarium*	S : *Sudatorium*
F : *Frigidarium*	T : *Tepidarium*
N : *Natatio*	U : *Unctorium*

Fig. 65 – Légende des espaces dans les plans présentant la typologie. Adapté selon Krencker (1929)

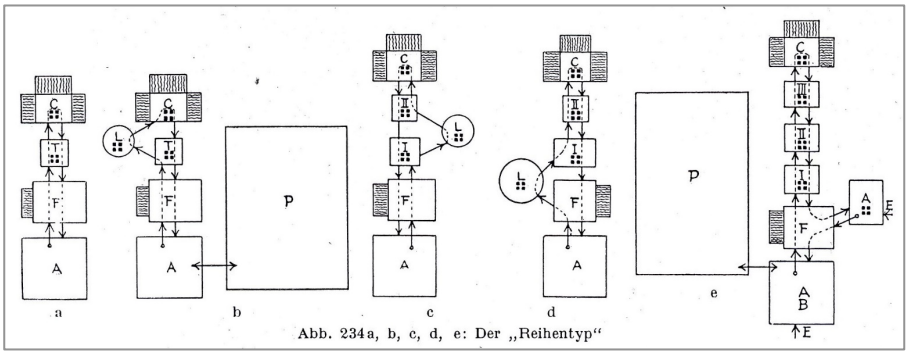


Fig. 66 – Typologie linéaire (*Reihentyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 177)

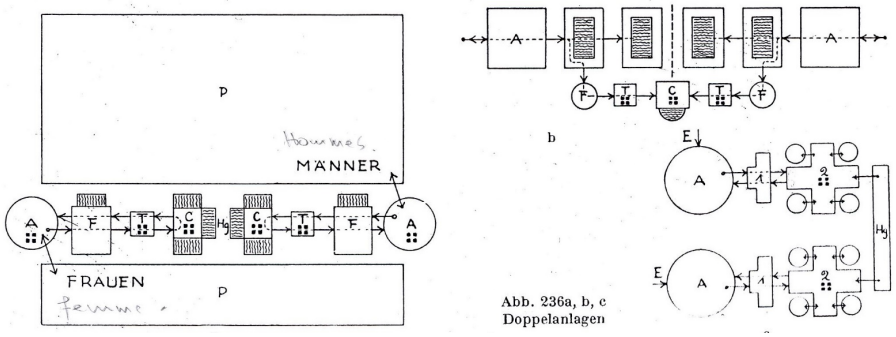


Fig. 67 – Typologie orthogonale (*Doppelanlagen*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 178)

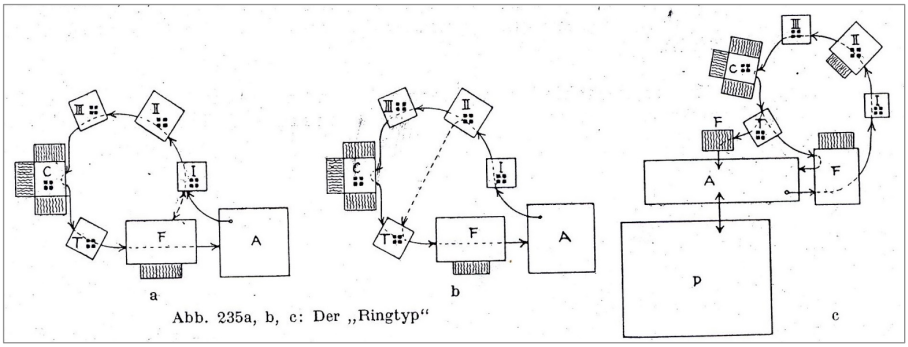


Fig. 68 – Typologie circulaire (*Ringtyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 178)

2. Plans avec principe de symétrie : se déclinent en deux variantes : (a) plans symétriques (*cf*. Fig. 69 et Fig. 70) : l'agencement des espaces repose sur une disposition équilibrée de part et d'autre d'un axe central. Certaines pièces essentielles, telles que la *natatio* et les salles chauffées et froides, s'alignent le long de cet axe, reliées par un *tepidarium* de sortie. Yvon Thébert (2003) associe cette configuration aux thermes impériaux, caractérisés par un itinéraire symétrique ; (b) plans semi-symétriques (*cf*. Fig. 71) : bien que s'inspirant du modèle précédent, ce type de plan présente des différences particulières. Le secteur froid conserve un agencement symétrique autour d'un axe, généralement défini par le *frigidarium*. En revanche, l'organisation du secteur chauffé suit une disposition plus libre, sans duplication des espaces. Le parcours y est principalement circulaire, bien que certains exemples montrent un itinéraire rétrograde.

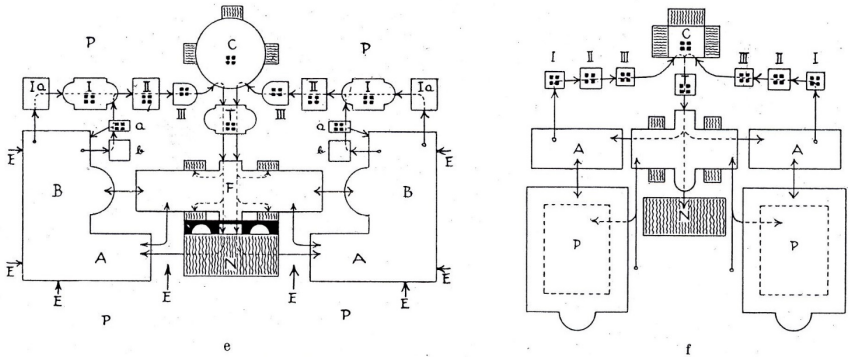


Fig. 69 – Typologie des thermes de type impérial (de grande dimension) (*Der grosse kaisertyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 181)

L'analyse typologique amorcée par Krencker et Krüger (1929), puis approfondie par Thébert (2003), constitue un point de départ méthodologique pour identifier, à une étape ultérieure (*cf*. chapitre 7, p. 171), des régularités géométriques et spatia-

les. L'étude porte sur l'itinéraire des baigneurs, la succession des espaces, l'emplacement de certains locaux, la forme architecturale, ainsi que le nombre et la disposition des bassins... Ces observations sont structurées dans une série de tableaux permettant de faire émerger les constantes du modèle *canonique* impérial romain, ainsi que les variantes des thermes d'Afrique du Nord.

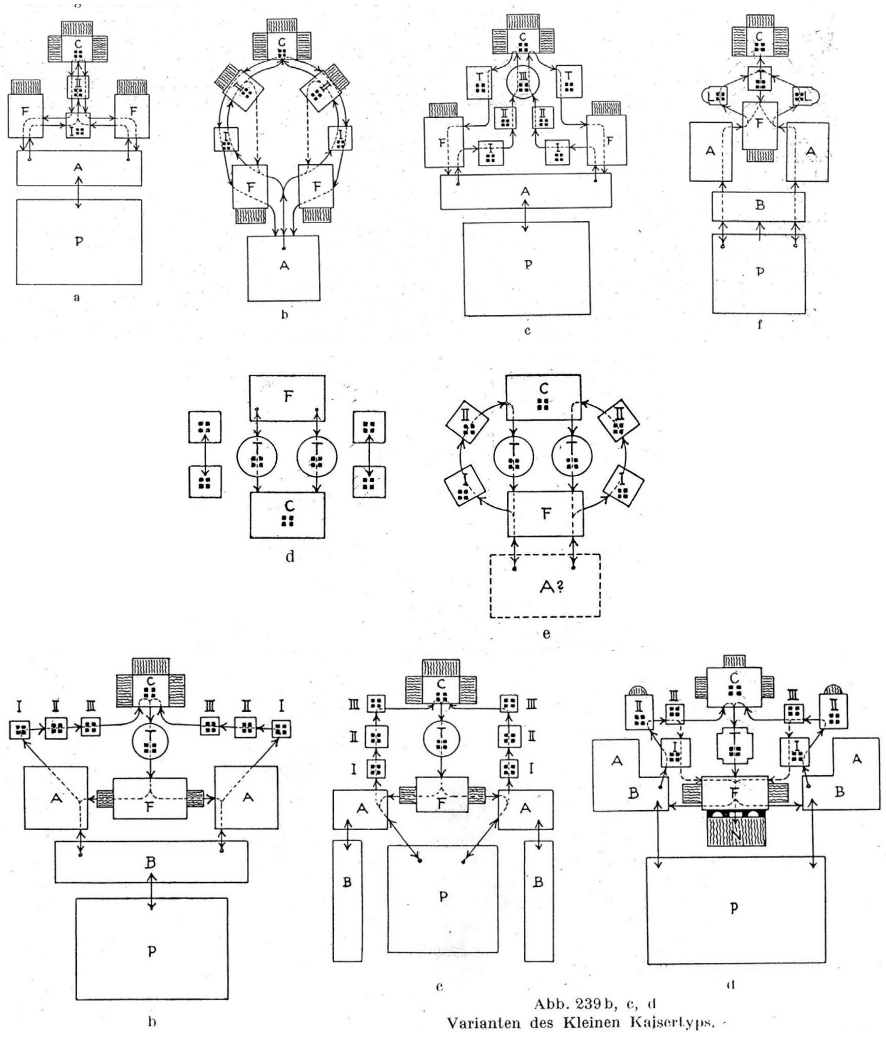


Fig. 70 – Typologie des thermes de type impérial (de petite dimension) (*Des klein kaisertyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 179-180)

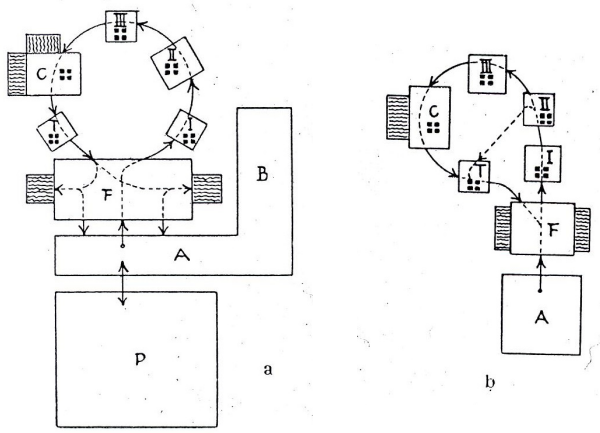


Fig. 71 – Typologie des thermes semi-symétriques (*Halbachsiale Mischtypen*).
(Krencker & Krüger, 1929, p. 181)

5.2 Approche taxonomique pour la sélection du corpus

5.2.1 L'universalité romaine et la singularité Nord-africaine

L'analyse des thermes romains présente plusieurs défis méthodologiques, en raison de l'état fragmentaire des vestiges et de la difficulté à établir une chronologie précise des évolutions architecturales. En Afrique du Nord, ces contraintes sont accentuées par la rareté des infrastructures publiques bien datées, comme le souligne Hélène Jouffroy (1986, p. 176) : « fort peu de vestiges surement datés du I^er^ siècle » y sont attestés, et « très peu de thermes publics du I^er^ siècle ont subsisté en Afrique » (Jouffroy, 1986, p. 193). Même au III^e^ siècle, la baisse du nombre de constructions s'explique par des « circonstances politiques, et les difficultés économiques qu'elles provoquèrent. La reprise de l'activité, bien qu'à un rythme ralenti, au IV^e^ siècle et surtout dans sa seconde moitié, témoigne, au moins en Numidie et en Proconsulaire et Byzacène, du rétablissement des ressources de beaucoup de villes et de la continuité des institutions et des habitudes » (Jouffroy, 1986, p. 462). Quand ils sont dotés d'« installations techniques complexes », les thermes sont souvent plus « fragiles » (Thébert, 2003, p. 7), ils subissent fréquemment des transformations altérant leur configuration initiale. L'analyse de ces modifications est d'autant plus complexe que les sources anciennes fournissent peu de descriptions détaillées. Même les écrits de Pollio Vitruve (1996, 2015) du I^er^ siècle ap. J.-C., souvent cités pour leur précision technique, offrent une portée limitée, « non seulement parce que son ouvrage présente des difficultés d'interprétation, mais aussi et surtout parce que, bien évidemment, il ne peut nous fournir que des informations correspondant à une phase précise de la genèse des thermes » (Thébert, 2003, p. 7).

Si les « témoignages sont plus nombreux en Afrique — et surtout en Proconsulaire — qu'en Italie sur l'existence de grands thermes doubles — *thermae hiemales*, *thermae aestivales* » (Jouffroy, 1986, p. 461), il demeure indispensable d'enrichir la base de données par des exemples *parallèles*, des projets de référence. Le choix du corpus s'inscrit dans une réflexion plus large sur la manière d'« analyser un monument thermal et saisir ce qu'il peut apporter à notre connaissance de l'Afrique si nous ne connaissons pas les lignes de force du contexte dont il est le produit ? » (Thébert, 2003, p. 32). Durant l'antiquité, l'Italie évolue pour devenir non seulement le centre politique de l'empire romain, mais aussi un pôle économique du monde méditerranéen. Toutefois, « le point de référence majeur et incontournable est la Ville, puisque c'est à Rome, dans un contexte tout à fait particulier, qu'est élaboré dans sa plénitude le bâtiment thermal de type impérial » (Thébert, 2003, p. 305). Dans cette perspective, l'Afrique du Nord constitue un terrain d'étude privilégié, en raison du nombre important de thermes recensés, tandis que Rome sert de point d'appui pour valider les hypothèses et affiner les résultats.

Ces édifices, bien qu'inscrits dans un cadre architectural unifié à l'échelle de l'empire, intègrent des adaptations propres aux provinces. L'Afrique du Nord illustre cette tension entre standardisation impériale et ajustements locaux.

Yvon Thébert (2003) rejette toute interprétation qui réduisant des constructions à de simples expressions de particularismes locaux. La dualité entre un cadre architectural romain standardisé et des ajustements liés aux réalités locales s'observe notamment dans l'architecture funéraire. Yvon Thébert (2003), en analysant les mausolées africains d'époque hellénistique, insiste sur la nécessité de les replacer dans un cadre méditerranéen plus large. Ces monuments ne sont pas de simples copies de modèles extérieur, mais le fruit d'adaptations aux besoins et aux aspirations des souverains numides afin de conserver une identité propre.

Inspirée par cette approche et transposée au domaine thermal, l'architecture en Afrique du Nord ne se limite pas à une reproduction des modèles romains, mais elle révèle des adaptations qui intègrent les savoir-faire locaux. Comme l'explique Paul Petit (1974b, p. 141) : « les pays du Maghreb actuel présentaient déjà à l'époque romaine des caractères bien marqués : un climat qui, sans désorienter les Romains, était plus excessif et dur que celui de l'Italie, une population berbère, libyco-berbère, très attachée à ses traditions, notamment au nomadisme pastoral, une élite d'origine punique, et, depuis Massinissa et Juba, en partie numide, pénétrée par les influences grecques depuis l'époque hellénistique et depuis toujours sensible à celles de l'Orient. Malgré ses originalités l'Afrique fut peut-être la plus romanisée des provinces ». Des « thermes sont beaucoup plus fréquents, dans les villes italiennes comme dans celles d'Afrique » (Jouffroy, 1986, p. 460), une telle lecture évite une vision cloisonnée des traditions africaines et permet de réinscrire ces réalisations dans une histoire culturelle partagée.

Dans les provinces occidentales, les grands thermes demeurent rares et n'atteignent pas l'échelle des établissements de prestige observés dans les grandes villes d'Afrique du Nord et de l'Orient (Asie Mineure, Syrie). Le tissu urbain, souvent modeste et marqué par les colonies de vétérans, privilégie des bains de petite ou moye-

nne taille. La prise en charge technique par les ingénieurs militaires favorise, même en cas de besoin accru, la multiplication d'unités réduites plutôt que la construction d'un seul complexe de grande capacité, comme l'illustre l'ensemble de Cemenelum (trois bains). Quelques exceptions se distinguent toutefois : les thermes du Nord (« de Cluny ») à Paris, les thermes constantiniens d'Arles, ainsi que les thermes de Barbara et les thermes impériaux de Trèves. Les thermes de Cluny (*cf*. Fig. 72), datés de l'époque sévérienne, relèvent d'un type impérial à demi-axe ; avec une emprise d'environ 5 000 m², des murs épais en opus caementicium rythmés de niches, de hautes voûtes, un *frigidarium* monumental et un *caldarium*, l'édifice constitue un exemplaire abouti d'un schéma également rencontré à Rome ou à Éphèse. (Yegül & Favro, 2019, p. 471)

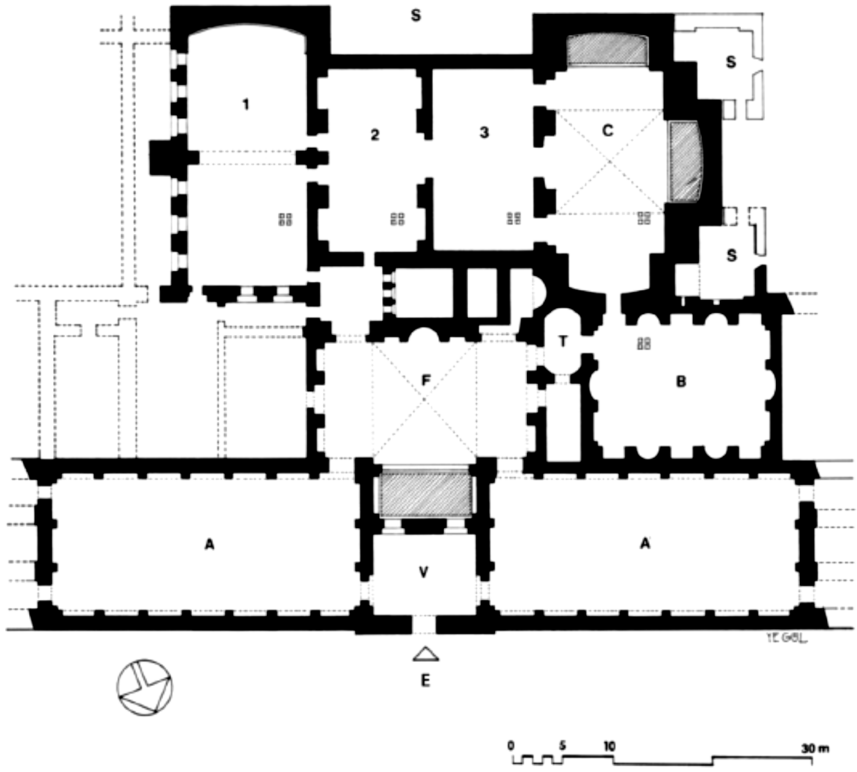


Fig. 72 – Plan des thermes de Cluny, Paris ; rendu par Fikret Yegül. (Yegül & Favro, 2019, p. 472)

L'analyse comparative des provinces romaines révèle des modalités d'appropriation différenciées du modèle thermal impérial. La province d'Asie, en particulier, offre un point de contraste éclairant pour mieux saisir les spécificités nord-africaines. Thébert (2003, p. 316) observe que l'Asie est la seule autre région, avec l'Afrique, à adopter largement le plan de type impérial, mais selon des logiques sensiblement

différentes. Elle le traite : selon des modalités tout à fait spécifiques, bien plus éloignées des modèles de Rome que ce qui se fait en Afrique ».

Les édifices asiatiques se distinguent d'abord par leur densité documentaire. La concentration de thermes de type impérial dans cette province est significative, tant par le nombre de bâtiments recensés que par la qualité des restitutions disponibles. Cette richesse contraste avec la rareté des exemples identifiables dans d'autres régions orientales, où seuls quelques monuments, comme ceux d'Alexandrie, Antioche ou Ankara, paraissent s'inscrire dans cette typologie (Thébert, 2003, p. 293).

Parmi les exemples les plus illustratifs (*cf*. Fig. 73 et Fig. 74), les complexes d'« Aizanoi », « Alexandria Troas », « Aphrodisias » ou « Éphèse » (thermes du port, Est, de Vedius, du théâtre) présentent une organisation héritée du modèle romain : symétrie axiale, enchaînement des salles principales (*caldarium*, *tepidarium*, *frigidarium*), séparation nette des secteurs chauffé et froid. D'autres sites, comme « Hiérapolis » et « Magnésie du Méandre », laissent entrevoir, malgré les lacunes de fouille, une volonté d'alignement formel avec les modèles de la capitale, perceptible dans le dédoublement du *frigidarium* ou la présence de salles mixtes (Thébert, 2003, p. 293).

L'architecture thermale africaine, à rebours des audaces asiatiques, développe une forme de fidélité inventive. Même lorsque la disposition s'éloigne de l'orthogonalité romaine au profit de schémas pyramidaux ou compacts, elle reste ancrée dans l'esprit du modèle originel : « en Afrique, on s'attache inversement à une fidélité beaucoup plus grande ». Cette posture conservatrice contraste avec l'expérimentation formelle observée en Asie, où « on n'hésite pas à prendre ses distances par rapport aux modèles de la Ville » (Thébert, 2003, p. 310). Cette fidélité n'exclut pas une diversité des formes ni une adaptation contextuelle. Yvon Thébert précise que certains édifices africains, comme ceux de Lambèse T17, rappellent des implantations asiatiques, justifiant ponctuellement une comparaison interprovinciale : « il convient de la comparer aux pratiques asiatiques » (Thébert, 2003, p. 309). Néanmoins, cette analogie demeure limitée. L'architecture thermale africaine conserve une organisation lisible, souvent symétrique, et intégrée à une séquence fonctionnelle cohérente, ce qui renforce son rattachement au modèle *canonique* romain. L'échelle des réalisations constitue un autre critère de différenciation. Rome demeure le pôle de référence par l'ambition de ses programmes : « l'importance des surfaces couvertes, souvent de façon grandiose [...], les grands édifices balnéaires de Rome sont conçus à une échelle qui surpasse celle de toute autre réalisation » (Thébert, 2003, p. 307). En Afrique du Nord, seuls les thermes de Carthage T2 relèvent d'une monumentalité comparable. La majorité des édifices recensés présente des dimensions plus modestes, comprises entre 1 500 et 6 000 m², selon une répartition régulière : « cinq couvrent moins de 3 000 m² (dont trois moins de 2 000), trois ont une superficie très proche de 3 000 m², quatre outrepassent ce chiffre » (Thébert, 2003, p. 308). La multiplication des établissements s'accompagne ainsi d'un redimensionnement du programme.

Ces constats justifient le choix méthodologique d'un double corpus : six thermes impériaux situés à Rome, pôle de référence pour l'élaboration du modèle *canonique*, et vingt-trois édifices localisés en Afrique du Nord, retenus comme terrain d'étude

principal. Cette seconde sélection repose sur la disponibilité documentaire et sur la cohérence typologique des constructions, marquées par une relative homogénéité formelle tout en conservant une variabilité interne significative. Le corpus nord-africain comprend des thermes impériaux implantés dans les « centres de gravité de la grande économie africaine et ses secteurs satellites » qui sont implantés en « Tunisie et dans le tiers oriental de l'Algérie, avec une antenne vers la Libye voisine » (Thébert, 2003, p. 297).

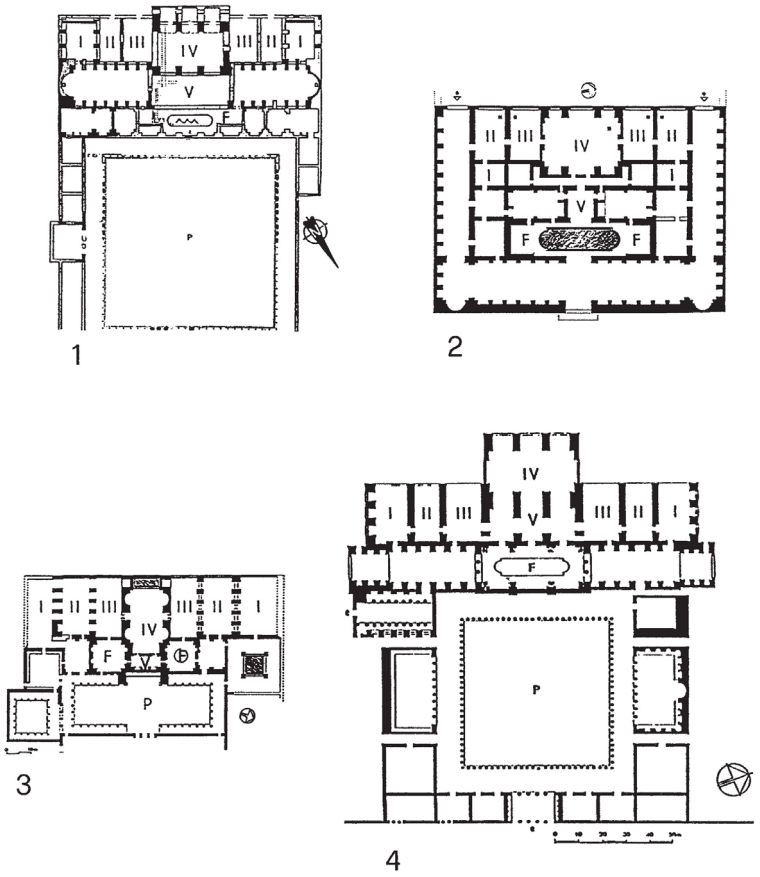


Fig. 73 – Pl. CLII - Province d'Asie : thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Les fonds de plan sont empruntés à Krencker, Trierer Kaiserthermen, à Nielsen, Thermae, ou à Yegül, Baths and bathing. Étant donné l'état des connaissances, la lecture des bâtiments que nous proposons reste souvent hypothétique. 1 - Aizanoi (d'après Nielsen, fig. 219). En restituant trois et non deux salles précédant IV, nous suivons Nielsen et non Yegül (fig. 361), mais suggérons que la première salle devait également être chauffée. V apparaît trop vaste : on manque d'arguments pour l'identifier, comme le voudrait Nielsen, au frigidarium. 2 - Alexandria Troas (d'après Yegül, fig. 355, qui propose trois salles chauffées avant IV et une liaison IV-V-F). 3 - Aphrodisias (d'après Yegül, fig. 343, dont la lecture semble meilleure que Nielsen, fig. 220). 4 - Éphèse, thermes du port (d'après Yegül, fig. 336, dont la lecture semble meilleure que Nielsen, fig. 223). (Thébert, 2003, p. 702)

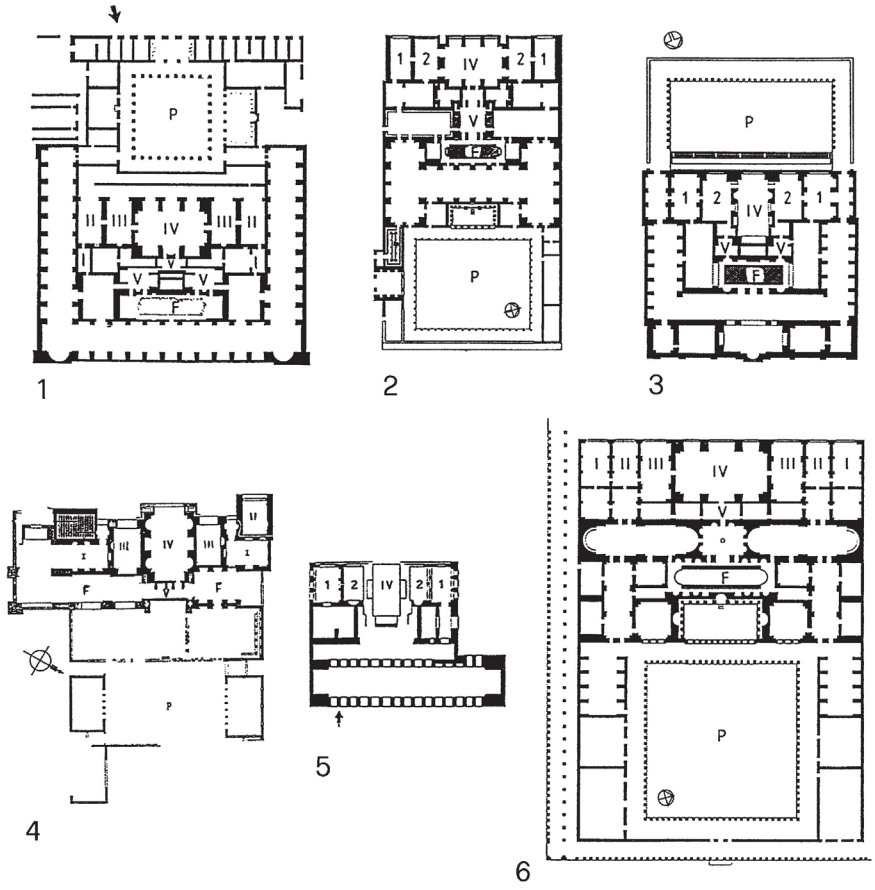


Fig. 74 – Pl. CLIII - Province d'Asie : thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. 1 - Éphèse, thermes Est (d'après Yegül, fig. 351, que nous suivons pour la restitution des salles chauffées précédant IV et celle de V se composant d'un élément axial commandant une partie dédoublée, lecture qui paraît meilleure que Nielsen, fig. 227). 2 - Éphèse, thermes de Vedius (d'après Yegül, fig. 359). 3 - Éphèse, thermes du théâtre (d'après Yegül, fig. 353). 4 - Hiérapolis (d'après Krencker, fig. 428). 5 - Magnésie du Méandre (d'après Yegul, fig. 346). 6 - Sardes (d'après Yegül, fig. 360). (Thébert, 2003, p. 703)

5.2.2 Choix du corpus

L'évolution du choix du corpus repose sur quatre postulats (Dhouib, 2004) définis déjà dans le deuxième chapitre (*cf*. p. 42).

1. Choix du thème de l'objet d'étude : l'analyse repose sur une approche épistémologique où la connaissance se construit entre décomposition et recomposition, passant de l'objet réel à sa théorisation. Le thème retenu concerne les *thermes* en tant qu'un édifice architectural.

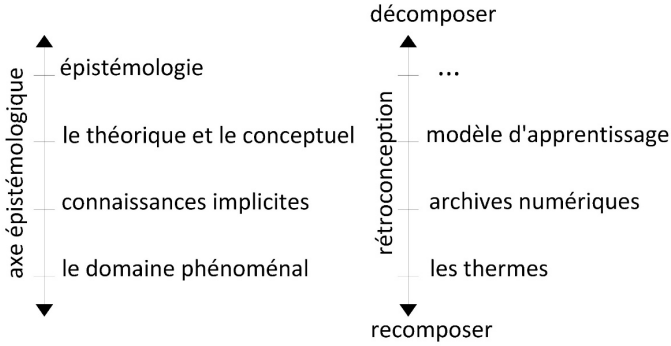


Fig. 75 – Choix du thème de l'objet d'étude selon le postulat épistémologique. (établie par l'auteur)

2. Choix du système architectural complexe : en s'appuyant sur le postulat du « système architectural global », qui englobe toutes les formes architecturales possibles, le système étudié est identifié comme l'*architecture romaine* (*cf*. Fig. 76).

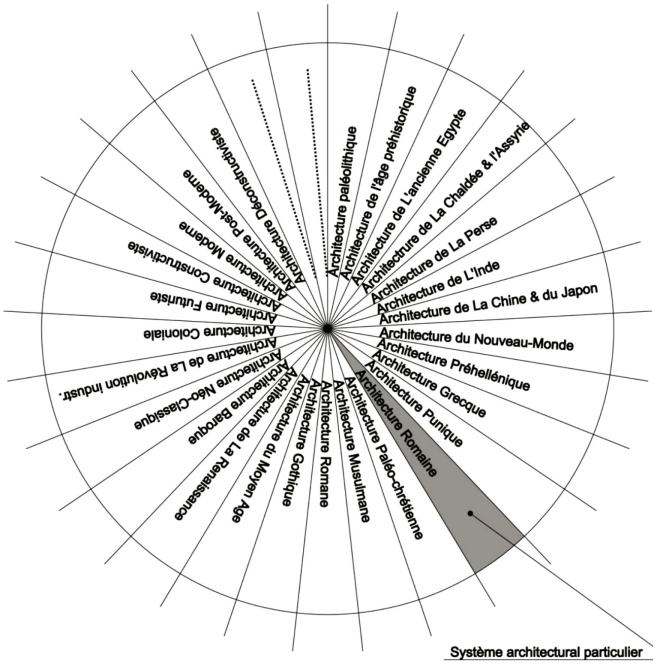


Fig. 76 – Choix du système architectural complexe selon le postulat du système architectural global. Modèle historique en rosace. (Bouaita, 2015, p. 165)

3. Choix de la typologie et de la localisation de l'objet d'étude : le postulat holographique, qui conçoit chaque édifice comme un tout constitué de sous-éléments et comme une partie d'un ensemble plus vaste, permet de préciser la sélection. Les thermes impériaux sont retenus comme catégorie spécifique, avec une focalisation

sur ceux d'Afrique du Nord (Tunisie, Libye, Algérie) et de Rome. Dans cette hiérarchie, l'architecture romaine des provinces nord-africaines constitue un sous-système de l'architecture impériale, elle-même intégrée au cadre plus large de l'architecture publique (*cf*. Fig. 77 et Fig. 78).

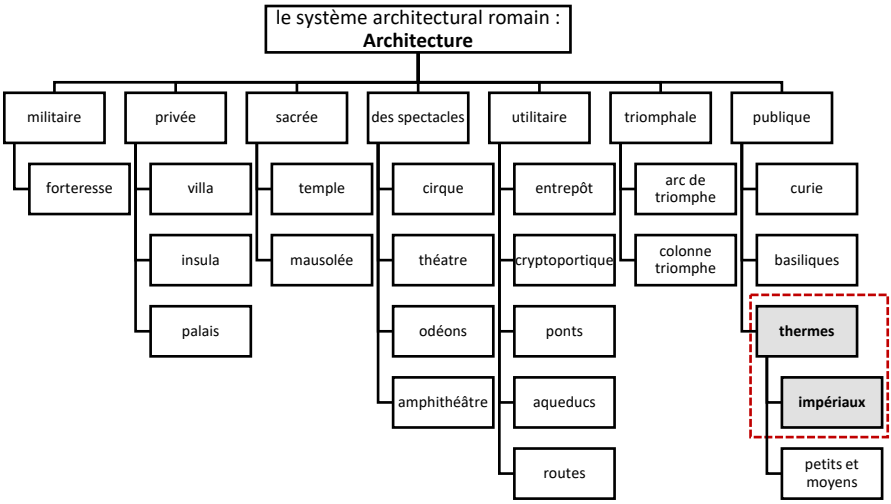


Fig. 77 – Taxonomie des édifices romains selon leur programme.
(redessiné d'après les travaux de Karim Bouaita (2015))

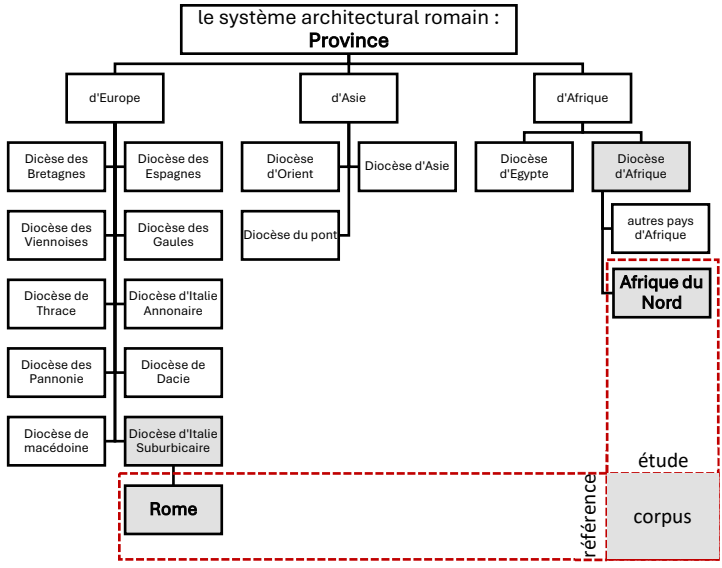


Fig. 78 – Taxonomie selon les provinces romaines. (redessiné d'après les travaux de Karim Bouaita (2015))

4. Choix du lieu architectural : l'application du dernier postulat, relatif au lieu architectural, recentre l'analyse sur le *dispositif du solide d'englobement* (DSE) et ses implications constructives (*cf*. Fig. 79).

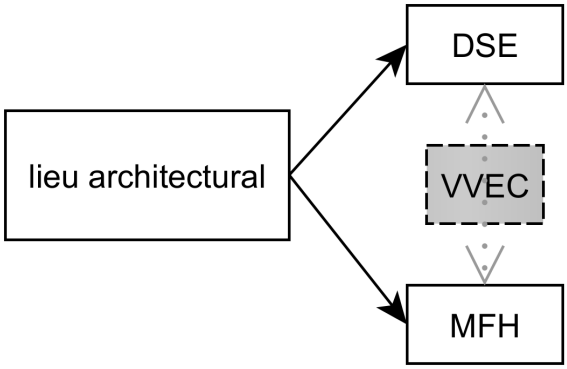


Fig. 79 – Le postulat du lieu architectural : hypothèse du VVEC comme tiers inclus. Adapté et reproduit selon Dhouib (2004, p. 82). (établi par l'auteure)

En croisant les différents postulats, la sélection du corpus d'étude s'affine pour inclure les thermes impériaux romains d'Afrique du Nord et de Rome, avec une attention particulière portée au DSE. L'établissement de cette hiérarchisation aboutit à un schéma récapitulatif (*cf*. Fig. 80) qui croise la taxonomie programmatique des édifices et leur répartition géographique, permettant ainsi une approche méthodologique cohérente.

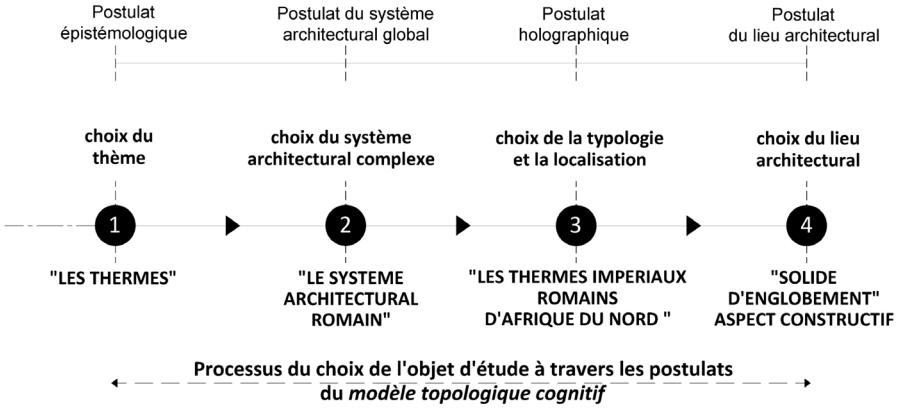


Fig. 80 – Processus du choix de l'objet d'étude à travers les postulats. Par transposition de l'étude des postulats par Mounir Dhouib (2004). (établie par l'auteure)

5.2.3 Description et justification du choix du corpus

Dans « les thermes impériaux, ceux que les empereurs construisaient à Rome, mais aussi dans certaines grandes villes » (Ginouvès, 1998, p. 109-110), « s'élaborent les solutions qui permettent l'application aux monuments balnéaires des principes d'axialité et de symétrie… » (Thébert, 2003, p. 287). Le choix du corpus repose non seulement sur l'ampleur et la position centrale des thermes romains dans l'empire, mais aussi sur les principes de construction qu'elles régissent. La collecte de l'ensemble aboutit à un jeu de données structuré et corrélé, facilitant la mise en place d'un modèle prédictif capable de compléter un plan thermal à partir d'un fragment, en assurant un haut degré de précision. Les thermes impériaux *doubles* (*cf*. Fig. 69 et Fig. 70) se caractérisent par « un plan généralement pourvu d'un grand axe de part et d'autre duquel les aménagements se répétaient », permettant ainsi une utilisation simultanée « par les hommes et les femmes » (Ginouvès, 1998, p. 109). Ils comprennent « d'une part un corps central », « essentiellement destiné aux fonctions proprement balnéaires, complétées par la gymnastique », d'autre part « un ensemble périphérique, séparés par une cour » (Ginouvès, 1998, p. 109-110). L'organisation du parcours du baigneur est pensée de manière à éviter qu'il « ne revient pas sur ses pas, au moins dans la partie chauffée. Ceci implique en général l'existence d'une salle tiède de sortie, lui permettant de regagner la salle froide » (Rebuffat, 1991, p. 6). L'enchainement des espaces repose sur une séquence « évidemment en rapport avec la disposition des pièces les unes par rapport aux autres » (Ginouvès, 1998, p. 109). L'axe central structure ainsi la succession des salles : « piscine découverte, *frigidarium*, *tepidarium*, *caldarium* central, de part et d'autre duquel on trouvait les autres pièces chaudes, reliées et séparées par des cours de chauffe ; de part et d'autre du *frigidarium* et du *tepidarium* on trouvait toute une série de pièces souvent groupées autour d'une cour généralement interprétée comme celle d'une palestre ou d'une grande salle désignée comme *basilica*. Le batiment comprend aussi, bien entendu vestibules, latrines et apodytériums » (Ginouvès, 1998, p. 109-110).

Pour récapituler, l'identification d'un plan comme impérial repose sur le respect de quatre grands principes : (1) le plan doit être parfaitement symétrique et obéit à une axialité ; (2) la liaison entre le *frigidarium* et le *caldarium* s'effectue par l'intermédiaire d'un *tepidarium* de sortie ; (3) l'aménagement prévoit un dédoublement des salles du secteur chauffé, permettant au baigneur d'emprunter deux parcours distincts ; (4) la superficie dépasse généralement 3 000 m².

Le choix du corpus et de la méthodologie dépend étroitement des caractéristiques intrinsèques des données d'entrée. Dans le cas des thermes romains de type impérial, des principes architecturaux comme la symétrie, l'axialité et la disposition des espaces... ont orienté cette sélection en facilitant l'identification des relations spatiales et fonctionnelles entre les différentes pièces. Ces particularités justifient l'adoption d'une approche méthodologique fondée sur des algorithmes d'apprentissage automatique adaptés à un jeu de données organisé, qui exploitent efficacement les corrélations entre les caractéristiques pour gérer les erreurs (faux positifs et faux négatifs) et produire des prédictions fiables.

Dans un contexte où les données ne seraient pas structurées (par exemple, absence de symétrie ou corrélations complexes et imprévisibles entre les espaces), impliqueraient l'usage de modèles capables d'apprendre de manière autonome, notamment en apprentissage profond (*Deep Learning* [DL]), qui exigent un corpus volumineux et diversifié pour interpréter les relations implicites entre les données.

5.3 Inventaire du corpus : une transposition numérique des sources archéologiques

Pour garantir la précision de l'inventaire du corpus, un examen détaillé des documents existants, sur les thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome, est mené en croisant différentes sources, incluant traités architecturaux, relevés (*cf*. annexe : Plans restitués dans la littérature scientifique), coupes, façades et textes, issus d'ouvrages de référence tels que ceux de Daniel Krencker (1929), Fikret Yegül (1992), Jacques Vérité (1998) et Yvon Thébert (2003), ainsi que d'autres sources précisées dans des tableaux (*cf*. Table 32, Table 33, Table 34 et Table 35). Les fouilles montrent mieux « la liste de tous les édifices identifiés comme constructions publiques sur tous les sites urbains », aussi bien qu'« estimer l'importance de l'édifice » donc « sa place parmi les constructions d'une ville » « les éléments de datation » « retrouver les différentes périodes d'activité des villes » (Jouffroy, 1986, p. 8). L'analyse repose principalement sur les plans, complétés par les autres documents permettant de combler certaines lacunes et d'enrichir la base de données. Les plans de vingt-trois thermes impériaux en Afrique du Nord ont été redessinés et intégrés à la base de données, auxquels s'ajoutent six thermes à Rome, retenus en raison de leur excellent état de conservation. Ces édifices servent de références comparatives pour l'analyse et la complétion des plans africains, portant ainsi l'ensemble du corpus à vingt-neuf thermes impériaux (*cf*. Fig. 81). Les plans complets sont décomposés afin d'extraire les caractéristiques (*features*), tandis que ceux présentant des lacunes sont réservés pour la phase de recomposition. Le processus de *redessin* suit plusieurs étapes : (1) s'assurer que les plans sont disponibles dans un format compatible avec Rhinoceros 3D, tel que DXF, DWG ou SVG. Si le fichier est dans un autre format, par exemple une image, une conversion préalable est effectuée sous AutoCAD au format DXF ; (2) reproduire et redessiner[16] les plans dans un format exploitable, garantissant à la fois fidélité aux sources, clarté de lecture et réutilisabilité dans divers contextes d'analyse ou de diffusion.

[16] En architecture, le terme *redessiner* se réfère souvent à la conception ou à la planification renouvelée d'un espace ou d'un bâtiment existant. Cela peut inclure la restitution, la restauration ou la complétion de l'édifice. Toutefois, dans notre contexte, cela signifie de se mettre à la place des romains pour envisager les thermes dans leur état originel. En établissant la rétroconception, des règles de composition seront obtenus, permettant de restituer les thermes tels qu'ils étaient auparavant.

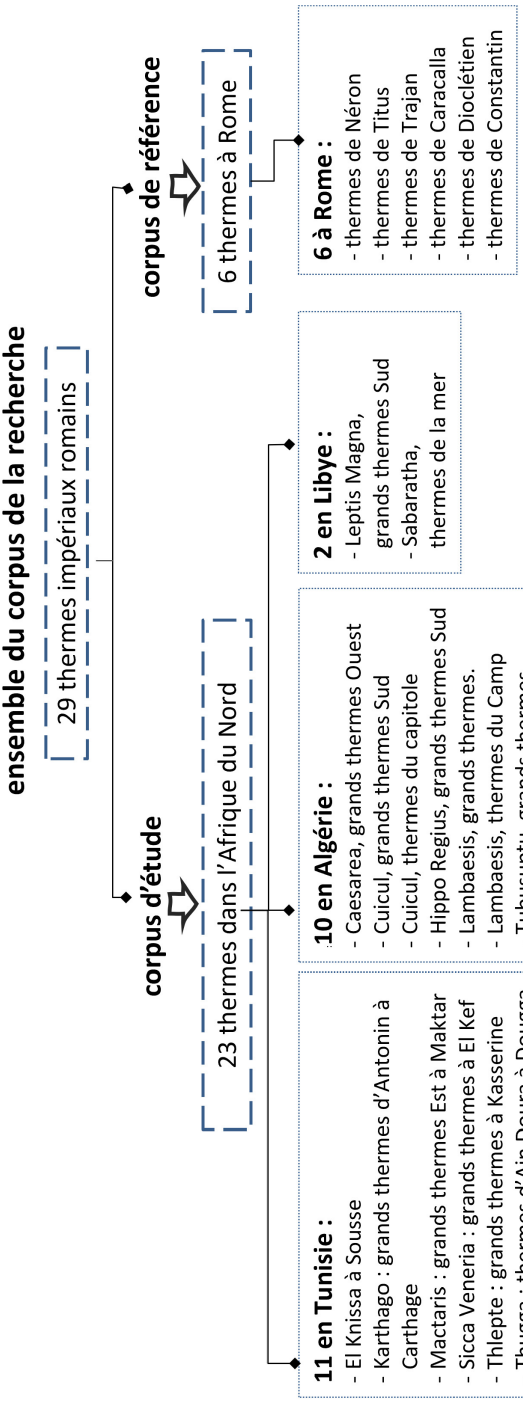


Fig. 81 – Corpus d'étude : les thermes impériaux romains. (établie par l'auteure)

Les thermes s'intègrent généralement dans un ensemble architectural comprenant divers espaces annexes, « l'enceinte elle-même comporte de vastes salles où l'on a identifié nymphées, bibliothèques, lieux de réunion divers, sièges d'associations (telle cette corporation d'athlètes siégeant dans les thermes de Trajan), vastes exèdres équipées de gradins (et en forme de demi-stade dans les thermes de Caracalla) destinées à des spectacles. Entre ces installations périphériques et le bloc balnéaire, les auteurs s'accordent pour restituer jardins et lieux sportifs ». En Afrique du Nord, seuls les thermes de Carthage « sont les seuls à transcrire plusieurs des innovations révolutionnaires de la Ville. On y retrouve l'enclos doté, à sa périphérie, de divers locaux » (Thébert, 2003, p. 314). Ailleurs, le bloc balnéaire est souvent autonome, ou simplement flanqué de palestres ou de gymnases, sans qu'un cadre architectural complet ne l'unifie. Toutefois, l'étude se limite au corps central de l'édifice thermal (*cf*. Fig. 82) sans s'intéresser à l'enceinte (les espaces périphériques), c'est à dire aux espaces essentiels à son usage, définissant son organisation et sa fonction principale (*cf*. Fig. 83).

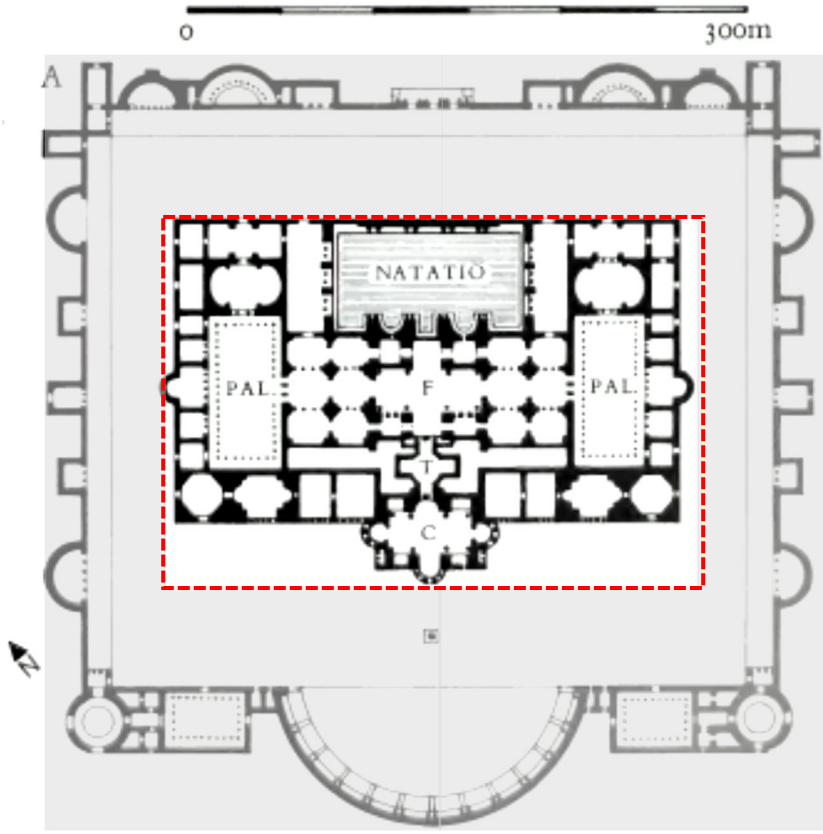


Fig. 82 – Plan des thermes de Dioclétien à Rome montrant le corps central entouré par les espaces annexes (C : Caldarium ; F : Frigidarium ; PAL : Palestre ; T : Tepidarium). (Ward-Perkins, 1994, p. 419)

I : *tepidarium* d'entrée	F : *frigidarium*	Ex : exèdre
II : *destrictarium*	A : *apodyterium* baigneurs	E : escalier
III : *sudatorium/laconicum*	A' : *apodyterium* sportifs	Ap : annexes *palestre*
IV : *caldarium*	P : *palestre*	An : annexes *natatio*
V : *tepidarium* de sortie	N : *natatio*	G : *gymanisium*
VI : *preafurnium*	Ve : vestibule d'entrée	vide
VII : piscine chauffée	H : hall de distribution	U : *unctorium*

Fig. 83 – Liste des espaces du corps central d'un édifice thermal. (établie par l'auteure)

L'inventaire présenté ci-dessous est fait sous forme de fiches individuelles pour chaque cas, synthétisant l'ensemble de données collectées. chaque fiche (*cf*. Fig. 84) inclut : (1) un indice attribué aux thermes étudiés (exemples : T1, T2, T3…), dont l'ordre et la numérotation ont été réorganisés selon une logique géographique, en s'appuyant sur les méthodes de Yvon Thébert (2003), Houda Lichiheb et Mounir Dhouib (2011), ainsi que Karim Bouaita (2015) ; (2) le nom des thermes accompagné de la bibliographie des auteurs de référence ; (3) leur datation ; (4) leur surface totale hors œuvre en m² ; (5) leur emplacement et leur plan de situation ; (6) un plan redessiné avec une légende. Tous les plans redessinés à partir de plusieurs sources et intégrés dans la fiche prototype, accompagnés des informations relatives à chaque édifice thermal, sont présentés en annexes (*cf*. Fiches d'enregistrement).

La constitution d'une base de données fiable repose sur une double démarche de collecte et de sélection, guidée par trois indices fondamentaux : la *certitude*, la *complétude* et la *similitude*. Le *redessin* des plans des thermes s'appuie prioritairement sur l'indice de *certitude* lequel reflète le degré de confiance attribué à chaque plan, en fonction du type de documentation graphique mobilisée (relevés, restitutions, plans publiés), mais surtout de la nature et de la rigueur des références scientifiques qui en garantissent la validité. Ce critère permet de hiérarchiser les documents en privilégiant les sources les mieux argumentées et les plus reconnues dans la littérature. Il convient de rappeler que la majorité des plans disponibles comportent une part d'hypothèse, ce qui impose une évaluation critique pour identifier, parmi les éventuels doublons ou variantes, la version la plus complète, la plus récente et la mieux fondée pour chaque édifice thermal inclus dans la collection. Les deux autres indices, la *complétude* et la *similitude*, interviennent dans la phase de sélection des plans les plus adaptés aux objectifs de la rétroconception (*cf*. chapitre 7, p. 171).

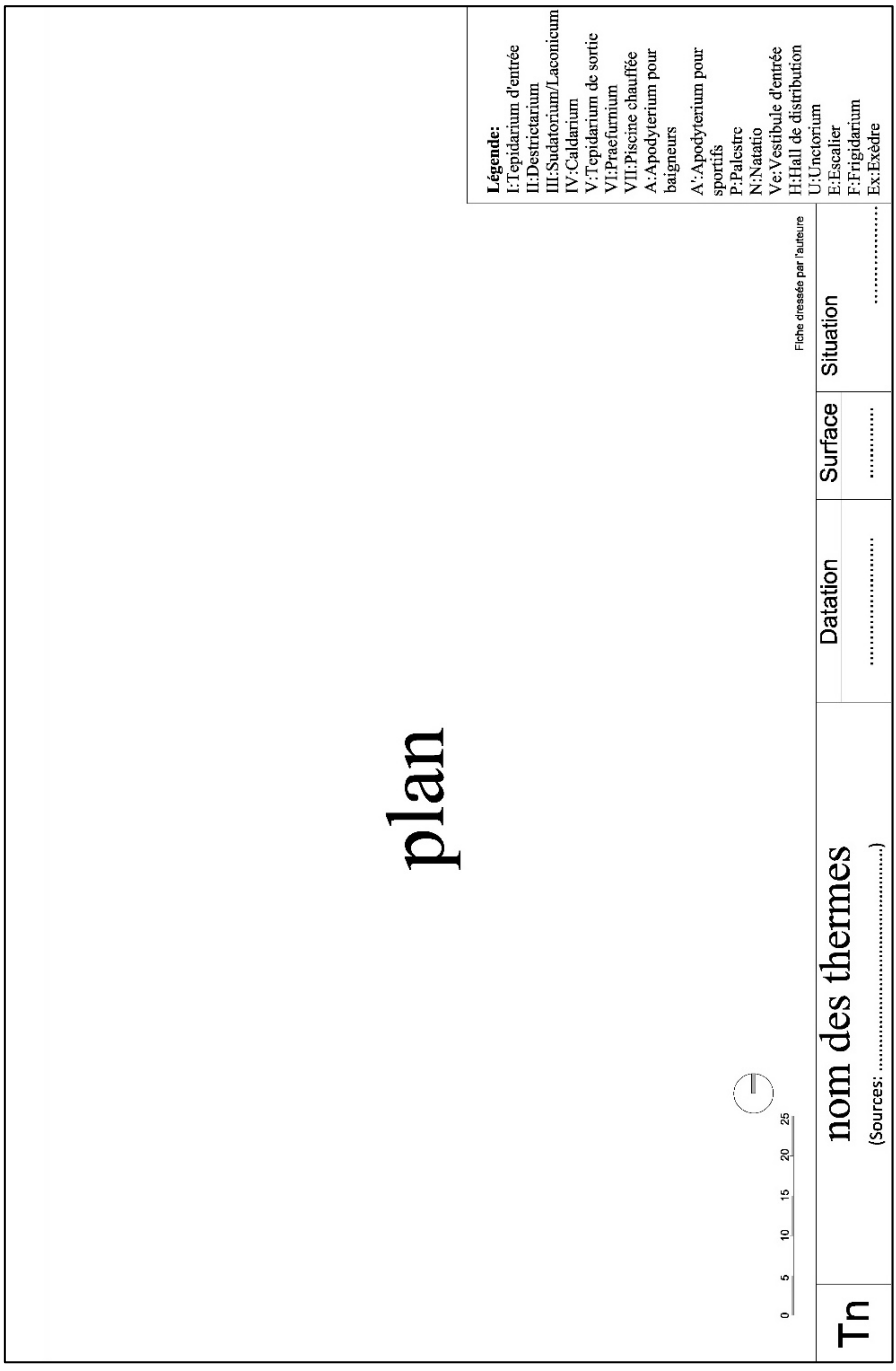


Fig. 84 – Canevas de fiche d'enregistrement des plans des thermes impériaux romains. (établie par l'auteure)

5.3.1 Corpus d'étude : Afrique du Nord

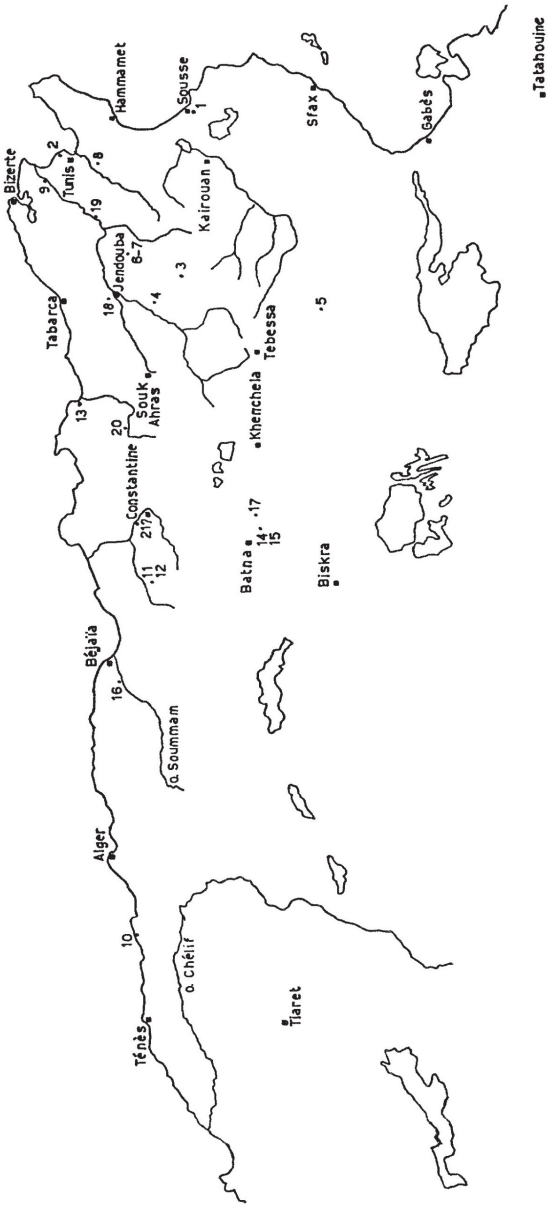


Fig. 85 – Thermes de type impérial en Afrique du Nord. (Thébert, 2003, p. 696). 1 - El Knissa. 2 - Karthago. 3 – Mactaris. 4 – Sicca Veneria. 5 – Thelepte. 6 et 7 – Thugga. 8 – Uthina. 9 – Utica. 10 – Caesarea. 11 et 12 – Cuicul. 13 – Hippo Regius. 14 et 15 – Lambaesis. 16 – Tubusuptu. 17 – Tamugadi. 18 – Bulla Regia. 19 – Membressa. 20 – Calama. 21 ? – Tid

5.3.1.1 En Tunisie

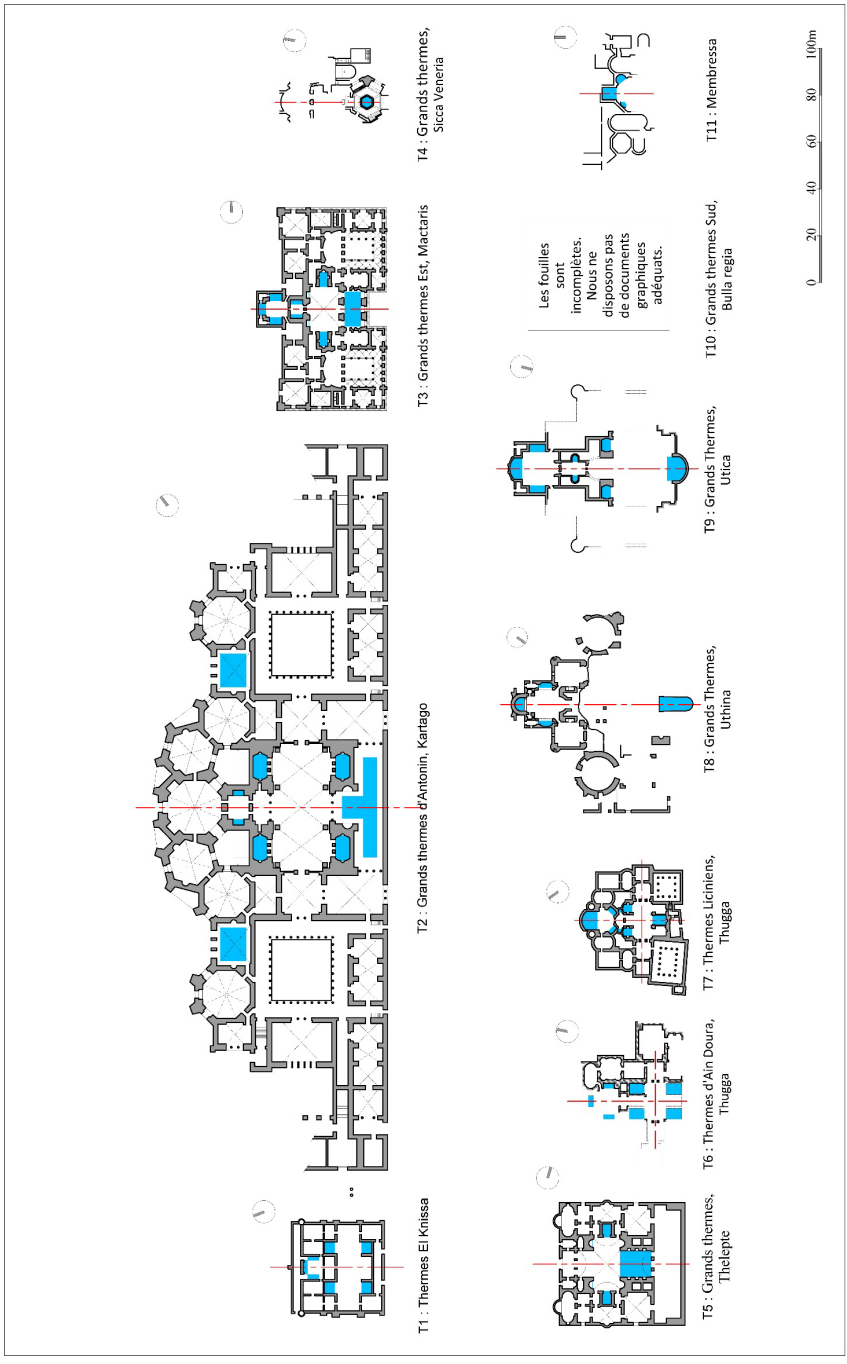


Fig. 86 – Inventaire des thermes impériaux romains en Tunisie. (établie par l'auteure)

Table 32 – Catalogue des thermes romains en Tunisie. (établie par l'auteure)

in-dice	thermes	lieu	datation	surface m²	source de la représentation graphique
T1	El Knissa	Sousse	inconnue	1 600	(Carton, Méhier, & Saladin, 1906, p. 6-26; Thébert, 2003, p. 136-137; Bouaita, 2015)
	état actuel : « Les vestiges semblent visiblement délaissés…ils n'ont pas été bien conservés » « une masse importante de végétation s'est développée au point de rendre l'accés relativement difficile aux ruines » (Bouaita, 2015, p. 30)				
T2	Karthago : Grands thermes d'Antonin	Carthage	145-161 av. J.-C.	18 000	(Lézine, 1968, p. 71-72; Lancel, Picard, Duval, & E.B., 1993; Vérité, 1998; Thébert, 2003, p. 141-143; Bouaita, 2015; Vérité, 2019)
	état actuel : l'édifice a été restauré « entre 388 et 392 » (Thébert, 2003, p. 141) « Le rez-de-chaussée de ces thermes n'a pas été bien conservé » (Bouaita, 2015, p. 35) Les thermes sont accessibles pour les visites				
T3	Mactaris : Grands thermes EST	Maktar	199 av. J.-C.	4 400	(Picard, 1974; Thébert, 2003, p. 144-145; Bouaita, 2015)
	état actuel : « le côté SUD demeure encore enfoui sous le sol » (Bouaita, 2015, p. 40) Le reste du monument est accessible				
T4	Sicca Veneria : Grands thermes	El Kef	début IIIe s.	> 4 000	(Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : « Le monument, quasiment inédit, est partiellement occupé par des constructions modernes, et la fouille du secteur accessible reste incomplète » (Thébert, 2003, p. 148)				
T5	Thelepte : Grands thermes	Kasserine	inconnue	>3 000	(Krencker & Krüger, 1929; Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : « En l'absence de fouilles, on ne dispose d'aucun critère précis de datation ». « Le bâtiment n'est que très partiellement visible » (Thébert, 2003, p. 164). « Ces vestiges sont entourés provisoirement par une clôture rajoutée récemment en guise de protection et de délimitation du monument », « …il est encore enseveli sous les masses de terre à tel point que les structures ne sont pas visibles. Seules les parties supérieures des murs sont perçues » (Bouaita, 2015, p. 51)				
T6	Thugga : thermes d'Ain Doura	Dougga	fin IIe s.-début IIIe s. ?	>3 300	(Poinssot, 1983, p. 72; Thébert, 2003, p. 175-176; Bouaita, 2015)
	état actuel : « Les fouilles sont encore incomplètes surtout du côté Sud Ouest. Seule, la partie Nord Est est dégagée » (Bouaita, 2015, p. 56)				
T7	Thugga : Thermes Liciniens	Dougga	212-217 av. J.-C.	1 700 m²	(Poinssot, 1983, p. 48-52; Thébert, 2003, p. 176-179; Bouaita, 2015)
	état actuel : « Ces thermes présentent relativement un bon état de conservation » (Bouaita, 2015, p. 60)				
T8	Uthina : Grands thermes	Oudhna	début du IIe s.	>3 200	(Lézine, 1968; Ben Hassen & Maurin, 1998; Thébert, 2003; Benzarti, 2008; Bouaita, 2015; Ben Slimene, 2017)
	état actuel : les dernières fouilles ont été réalisées en 2006-2007. le monument est lisible « avec notamment leur délimitation du coté nord-est, nord-ouest et sud-ouest » (Ben Slimene, 2017, p. 51). Tant que l'étage n'est que partiellement fouillé				

in-dice	thermes	lieu	datation	surface m²	source de la représentation graphique
T9	Utica : Grands thermes	Utique	inconnue	5 990	(Lézine, 1968, p. 141-145; Thébert, 2003, p. 186-187; Bouaita, 2015)
	état actuel : « La connaissance très partielle que nous avons de ce monument n'autorise aucune datation précise » (Thébert, 2003, p. 186) « Les vestiges semblent visiblement abandonnés…une végétation abondante qui non seulement entrave l'accès aux vestiges, mais s'implante à l'intérieur même des ruines…les fouilles sont très incomplètes. La quasi-totalité de l'édifice est encore enfouie sous le sol » (Bouaita, 2015, p. 66-67)				
T10	Bulla Regia : Grands thermes Sud	Jendouba	inconnue	> 3 300	(Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : Les fouilles sont incomplètes. Nous ne disposons pas de documents graphiques adéquats.				
T11	Membressa	Mjez el Beb	inconnue	>1 350	(Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : Les fouilles sont incomplètes. Nous ne disposons pas de documents graphiques adéquats				

5.3.1.2 En Algérie

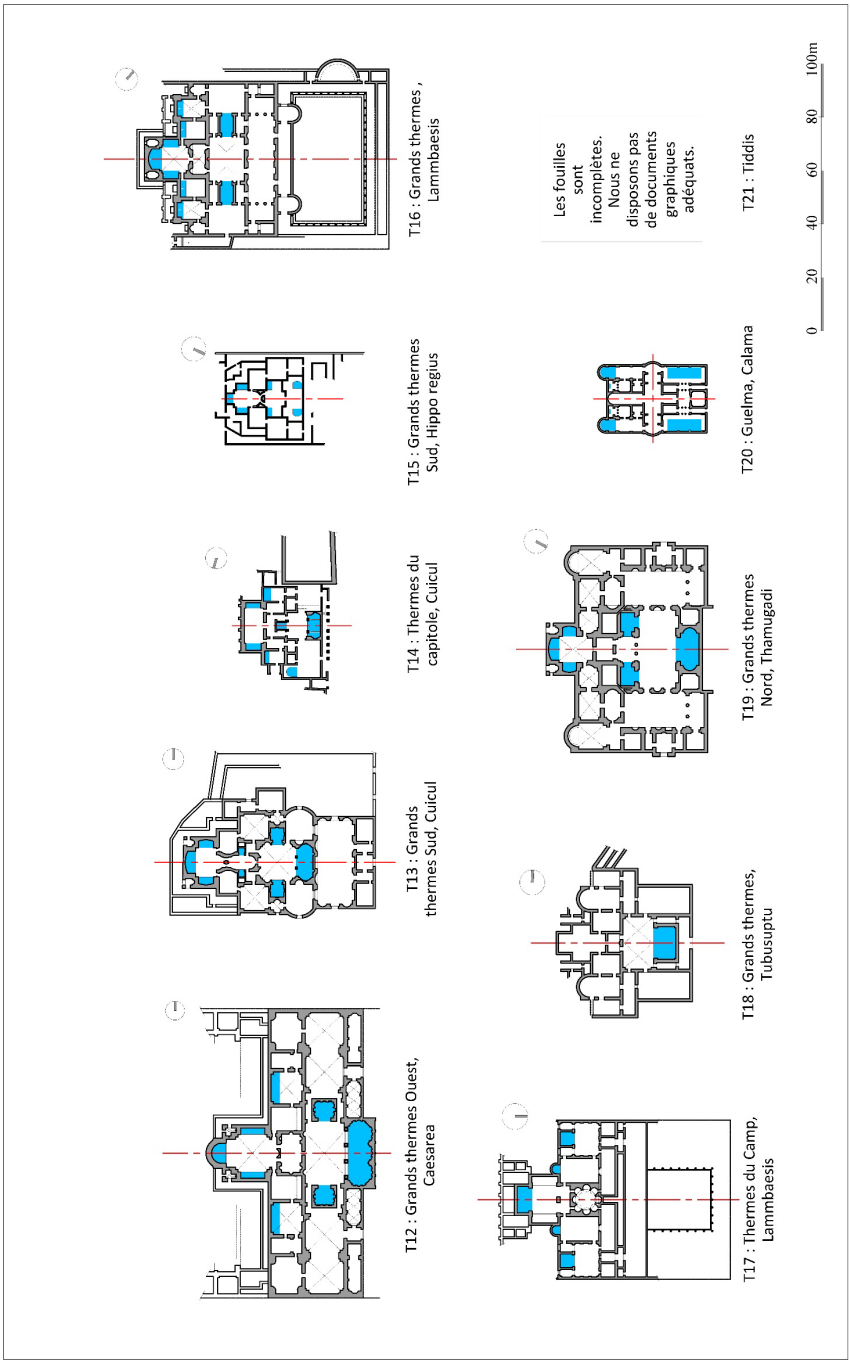


Fig. 87 – Inventaire des thermes impériaux romains en Algérie. (établie par l'auteure)

Table 33 – Catalogue des thermes romains en Algérie. (établie par l'auteure)

indice	thermes	lieu	datation	surface m²	source de la représentation graphique
T12	Caesarea, Grands thermes Ouest	Cherchell	à la fin du IIe s. - début du IIIe s.	5 500	(Gsell, 1901, p. 212; Thébert, 2003, p. 191)
	« il semble même qu'après le triomphe du christianisme, l'édifice ait été transformé en une sorte de musée, asile pour les images des dieux déchus, qu'on avait consenti à épargner à cause de leur valeur artistique. Les fouilles ont fait découvrir une cinquantaine de statues, plus ou moins mutilées, qui sont allées enrichir les musées de Cherchel, d'Alger, et même le Louvre » (Gsell, 1901, p. 216 tome1) Pour leur importance, les thermes sont « appelés par les indigènes « le palais du Sultan ». « Des fouilles y ont été faites à plusieurs reprises, en dernier lieu (1886-1889) par M. Waille, qui a déblayé toutes les parties non ensevelies sous des bâtisses modernes » (Gsell, 1901, p. 212)				
T13	Cuicul, Grands thermes Sud	Djemila	183 - début 184	3 000	(Krencker & Krüger, 1929; Thébert, 2003, p. 194-195)
T14	Cuicul, thermes du capitole	Djemila	IIe s (première moitié ?)	1 200 - 1 300	(Thébert, 2003, p. 196-198)
	« selon toute vraisemblance, nous avons donc des thermes amputés par la construction du capitole, puis annexant à leur profit l'espace (une ruelle?) qui séparait les deux monuments, provoquant ainsi la fermeture des baies du podium (Allais) » (Thébert, 2003, p. 196)				
T15	Hippo Regius, Grands thermes Sud	Hippone-Annaba	198 au plus tard	1 500-2 000	(Thébert, 2003, p. 208)
T16	Lambaesis, Grands thermes	Lambèse-Tazoult	dernières années du IIe s	>5 000	(Krencker & Krüger, 1929, p. 213-215; Thébert, 2003, p. 211-212)
T17	Thermes du Camp, Lambaesis	Lambèse-Tazoult	Hadrien	2 700	(Gsell, 1901, p. 85; Krencker & Krüger, 1929, p. 213; Thébert, 2003, p. 209-211)
	« les salles sont disposées selon un plan symétrique présentant cependant des particularités remarquables. L'axe central n'est pas formé par l'alignement des caldarium, tepidarium de sortie et frigidarium, mais par le caldarium et le laconicum. Il en résulte un dédoublement inhabituel du frigidarium et du tepidarium de sortie, tandis que, inversement, le laconicum est unique » (Thébert, 2003, p. 210)				
T18	Tubusuptu, Grands thermes	Tiklat – El Kseur près de Bejaia	époque sévérienne et plus tard ?	3 000	(Krencker & Krüger, 1929; Laporte, 1988; Thébert, 2003, p. 227-228)
T19	Thamugadi, Grands thermes Nord	Timgad	inconnue	4 400	(Ballu, 1901; Krencker & Krüger, 1929; Thébert, 2003)

in-dice	thermes	lieu	datation	surface m²	source de la représen-tation graphique
T20	Calama	Guelma	IIe siècle	3 000	(Gsell, 1901, p. 227-228; Krencker & Krüger, 1929, p. 201-203; Thébert, 2003) et du musée Orsay[17]
	« Les données disponibles sont d'autant plus rares que le monument n'a été que très partiellement fouillé » (Thébert, 2003, p. 289)				
T21	Tiddis		inconnue	incon-nue	(Thébert, 2003; Filah & Amrous, 2021)
	A. Berthier, *Tiddis*, Alger, 1951, plan n° 5. F. Yegül (*Baths and bathing*, p. 186) considère que cet édifice, qui n'a pas été fouillé, relève bel et bien du type impérial. On peut penser qu'il a recueilli des données sur place car le plan général du site publié par A. Berthier ne montre guère que deux piscines symétriques donnant sur une salle dont on ignore les limites. Ces données sont clairement insuffisantes pour déterminer la catégorie à laquelle appartient le bâtiment (Thébert, 2003, p. 290)				

[17] https://www.musee-orsay.fr/fr/oeuvres/algerie-guelma-les-thermes-romains-plan-general-115846.

5.3.1.3 En Libye

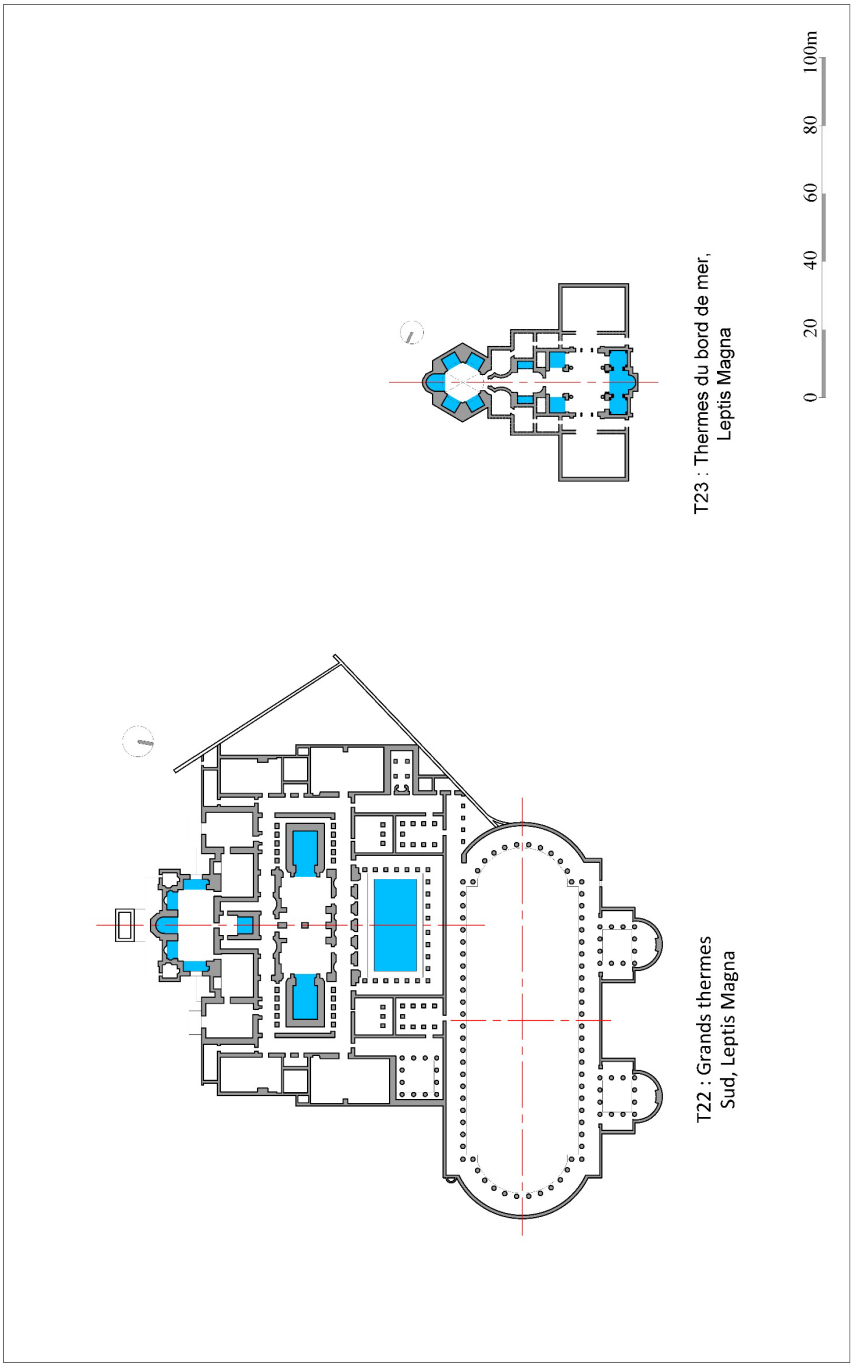


Fig. 88 – Inventaire des thermes impériaux romains en Libye. (établie par l'auteure)

Table 34 – Catalogue des thermes romains en Lybie. (établie par l'auteure)

indice	les thermes impériaux romains	lieu	datation	surface m²	source de la représentation graphique
T22	Lepcis Magna, grands thermes Sud		Hadrien, 126-127 av. J.-C.	>13 000	(Thébert, 2003) D'après D. Krencker et E. Krüger (cf. n. 6), fig. 301, (Di Vita-Évrard, 1991)
	« il fut l'objet de restaurations ou reconstructions dont l'ampleur exacte est difficile à apprécier » (Thébert, 2003, p. 191)				
T23	Lepcis magna, thermes du bord de mer		I-II^{e} siècle	1 900	(Thébert, 2003)
	« est l'objet de grands travaux destinés à le transformer radicalement. L'interruption du chantier nous permet de saisir une étape dans le déroulement des opérations que nous ne pouvons habituellement connaître » (Thébert, 2003, p. 191)				

5.3.2 Corpus de référence : Rome

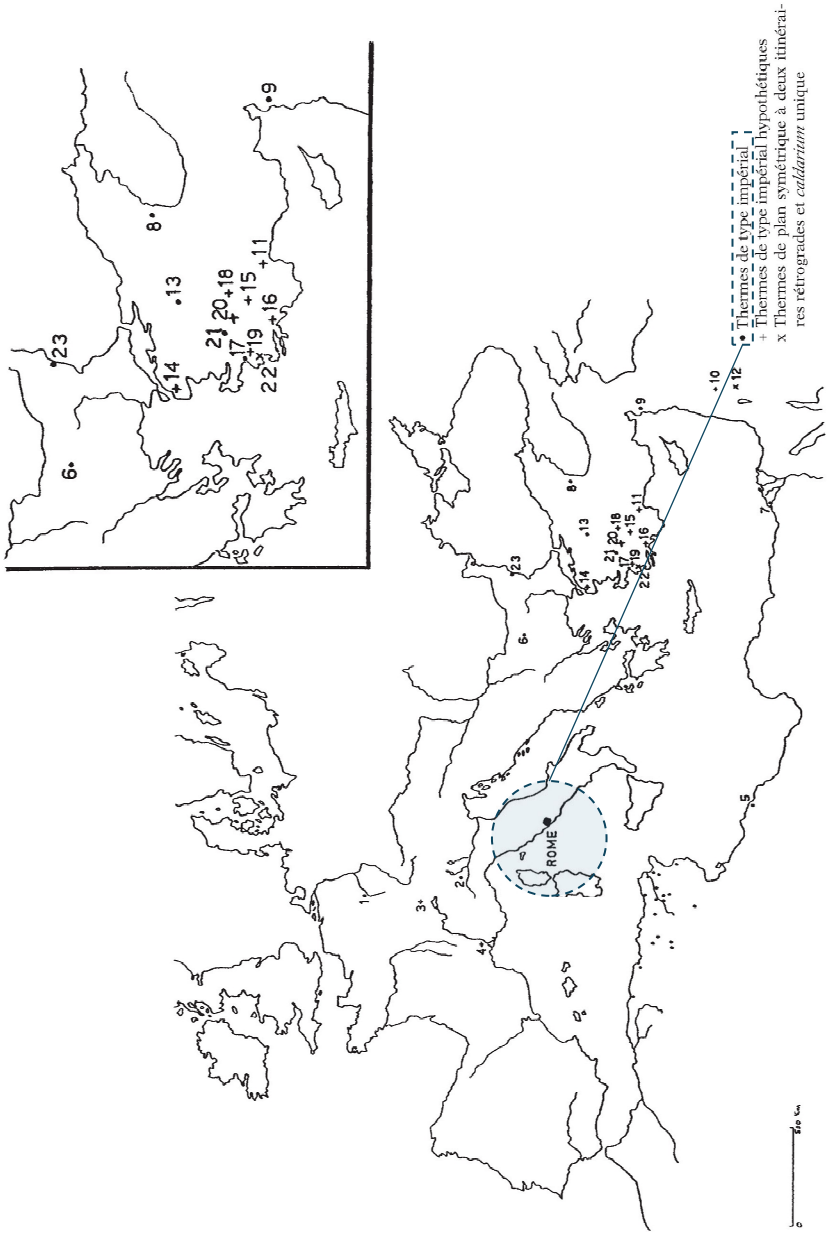


Fig. 89 – Thermes de type impérial dans l'empire romain. (Thébert, 2003, p. 698)

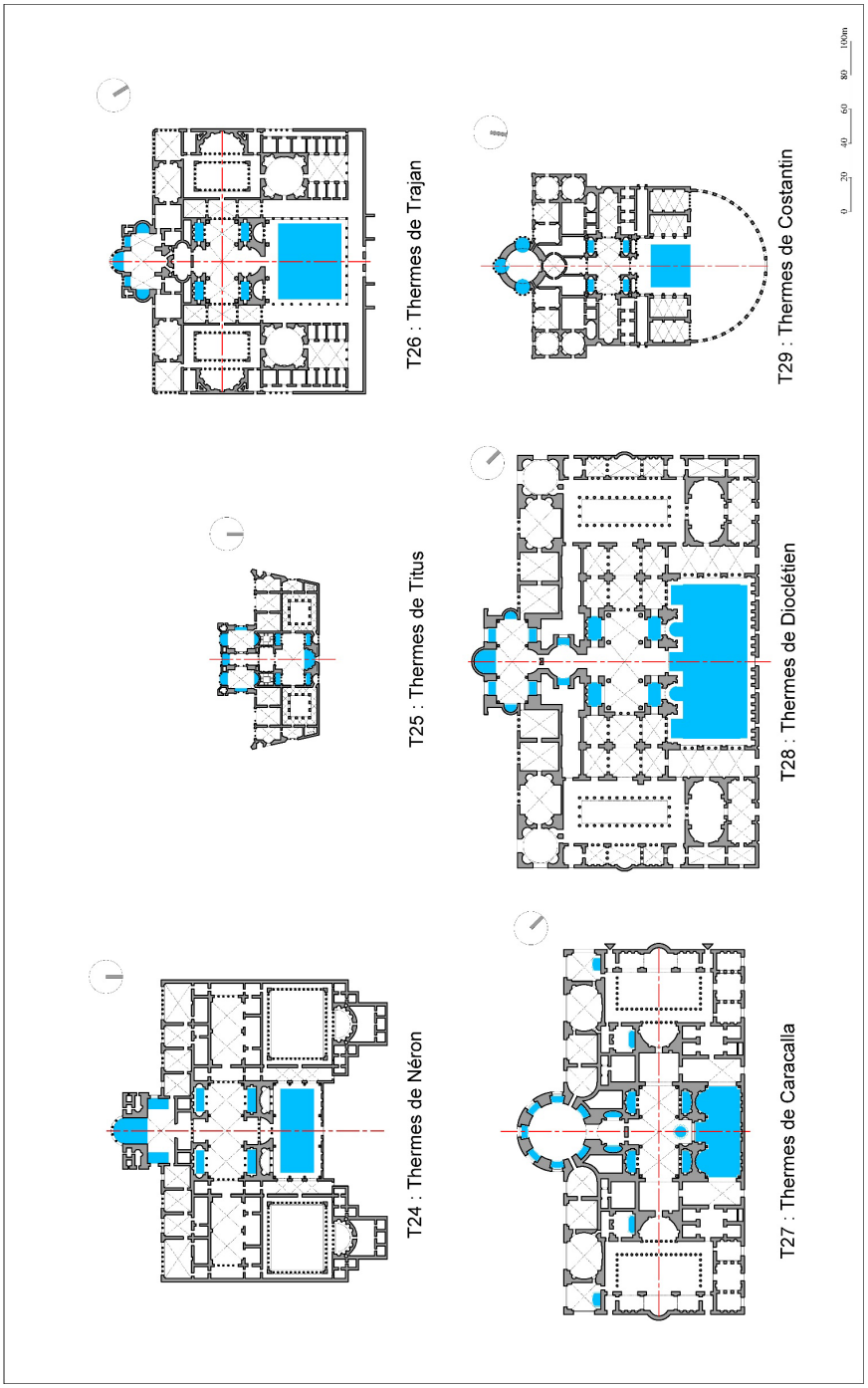


Fig. 90 – Inventaire des thermes impériaux romains à Rome. (établie par l'auteure)

Table 35 – Catalogue des thermes romains à Rome. (établie par l'auteure)

indice	thermes	datation	surface m²	source de la représentation graphique
T24	Thermes de Néron	62 av. J.-C.	21 500	(Palladio, 1797; Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : « il reste peu de vestiges…un tronçon de paroi sous le Palazzo Madama et deux colonnes de granit »[18]			
T25	Thermes de Titus	80 av. J.-C.	4 500	(Palladio, 1797; Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : « très peu de vestiges sont visibles » (Bouaita, 2015)			
T26	Thermes de Trajan	104-109 av. J.-C.	20 500	(Palladio, 1797; Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : « Actuellement, l'endroit de ces thermes est aménagé en jardin public traversé par une voie véhiculaire. Ce qui est resté visible des vestiges c'est la bibliothèque Nord-Ouest, l'exèdre orientale et le nymphée au Nord-Est. »(Bouaita, 2015)			
T27	Thermes de Caracalla	212-216 av. J.-C.	24 000	(Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : Ils « constituent le spécimen le mieux conservé de thermes impériaux dans le monde romain. »(Bouaita, 2015)			
T28	Thermes de Dioclétien	298-306 av. J.-C.	35 500	(Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	« Les thermes ont été en partie effacés par la ville moderne, et en partie conservés grâce à leur intégration dans différents éléments de la structure urbanistique de Rome »[19]			
T29	Thermes de Constantin	315 av. J.-C.	13 000	(Palladio, 1797; Thébert, 2003; Bouaita, 2015)
	état actuel : « très peu de vestiges sont restés visibles surtout après les travaux de démolitions effectuées vers la fin du XIXème siècle pour percer l'actuelle rue "Via Nazionale". » (Bouaita, 2015)			

5.3.3 Mise en forme de l'ensemble du corpus

Afin de poser les bases d'une lecture comparative à l'échelle impériale, une synthèse graphique des plans des thermes étudiés a été réalisée (*cf*. Fig. 91). Ce travail consiste en un *redessin* homogénéisé des édifices sélectionnés, représentés à l'échelle et volontairement dépourvus de nomenclature interne. L'objectif n'est pas ici de détailler les fonctions des espaces, mais de fournir une vue d'ensemble des volumes bâtis, des proportions relatives et de la logique d'organisation générale propre à chaque édifice thermal.

[18] Source : http://www.unicaen.fr

[19] PESCARIN Sofia, « Rome : objectif évasions archéologie » traduit en français par Cécile BREFFORT, Editions White Star, Vercelli, Italie, Août 2010, page 146.

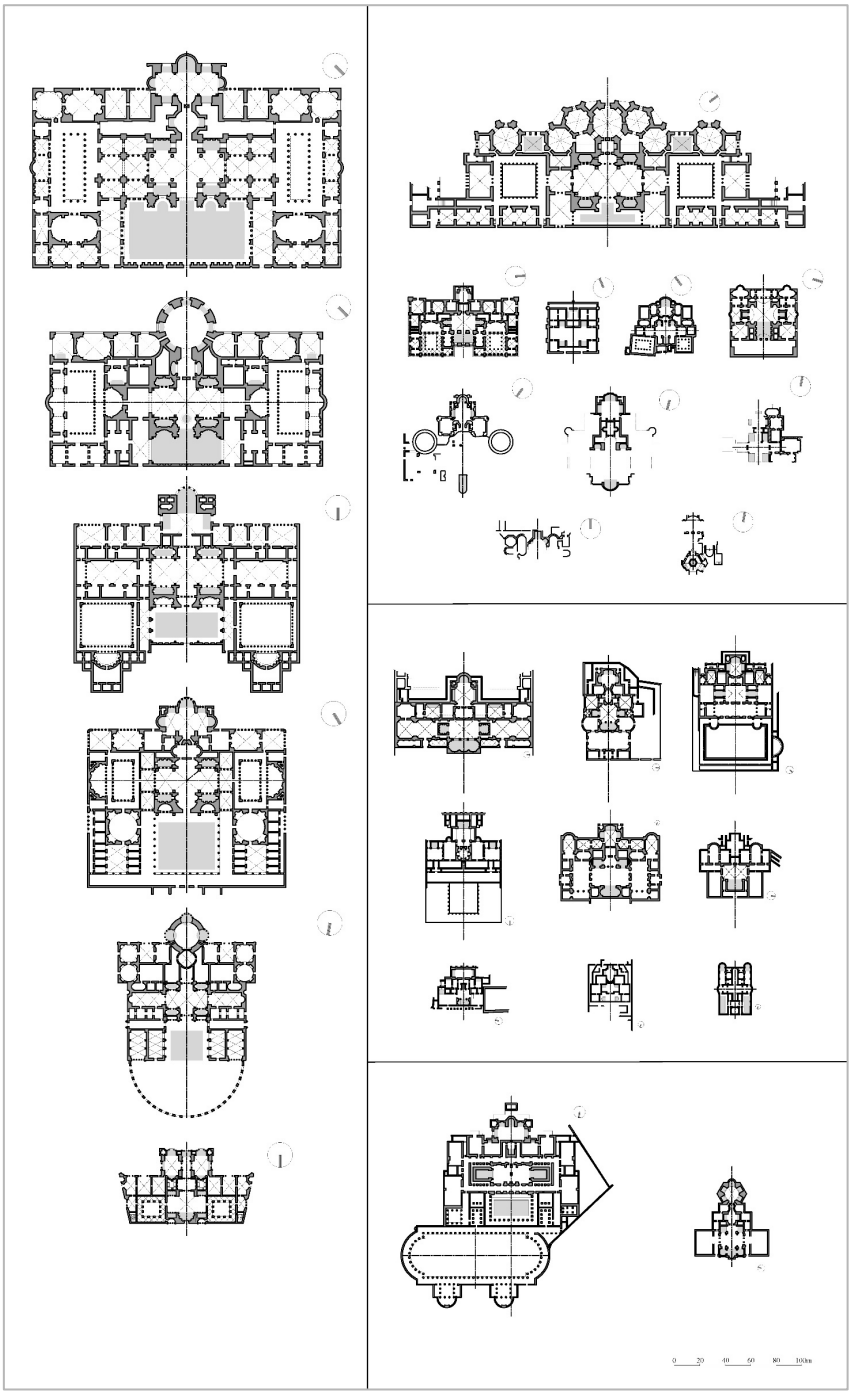


Fig. 91 – Catalogue des thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome. (établie par l'auteure)

5.4 De la classification des plans à la structuration d'une base de données

L'examen des typologies thermales a permis de structurer une grille d'analyse fondée sur l'itinéraire du baigneur et sur les principes de symétrie, d'axialité ou de circularité... Cette approche, amorcée par Krencker et approfondie par Thébert, constitue une étape pour dégager des logiques de composition récurrentes et préparer l'identification des régularités géométriques.

La sélection du corpus s'appuie sur une articulation entre l'universalité du modèle impérial et la singularité des déclinaisons nord-africaines. Rome sert de point de référence pour définir le plan canonique, tandis que l'Afrique du Nord offre un terrain d'étude privilégié, où se manifestent à la fois une fidélité aux modèles centraux et des adaptations liées aux réalités locales. Ce choix méthodologique garantit à la fois la solidité des comparaisons et la pertinence des inférences.

L'inventaire planimétrique réalisé, à partir de vingt-neuf édifices, fournit une base de données homogénéisée et réutilisable. Chaque plan a été redessiné et normalisé afin de faciliter l'intégration dans un modèle paramétrique et d'assurer la comparabilité des plans. L'évaluation critique des sources, fondée sur les indices de certitude, de complétude et de similitude, confère à l'ensemble une cohérence indispensable pour les phases ultérieures de modélisation et d'apprentissage automatique.

PARTIE III.
OUTILS, RESSOURCES ET PARAMÈTRES DE RÉTROCONCEPTION

6 GESTION DE DONNÉES DANS LE CADRE DE LA RÉTROCONCEPTION

Ce chapitre aborde les principes méthodologiques de la gestion des données, en s'intéressant à leur organisation et exploitation dans un environnement numérique. Il est structuré autour de trois axes principaux. Le premier clarifie la notion de *donnée* dans le cadre de la recherche architecturale et précise son rôle dans le développement du modèle de jeu de données paramétriques (*Parametric DataSet Model* [PDSM]). Le second décrit le processus de gestion de données, depuis leur collecte jusqu'à leur structuration, en veillant à garantir leur qualité et leur pertinence pour l'étude. Le troisième présente les outils et les logiciels mobilisés pour construire le PDSM ainsi que le modèle de complétion artificiellement intelligent (*Artificial Intelligence Completion Model* [AICM]).

6.1 La notion de donnée

La conception architecturale peut être définie comme « l'élaboration mentale d'un projet au cours d'un processus dynamique de traitement de données et de croisement d'informations, initié à partir d'un état de connaissance préalable, orienté en fonction d'une finalité projective et, enfin, producteur de connaissance » (Claeys & Naifer, 2022). En architecture, les données deviennent significatives lorsqu'elles sont intégrées dans un modèle cohérent, leur attribuant une valeur contextuelle (géométries, dimensions, proportions, usage des espaces, orientation, relations...). Sans traitement approprié (décodage, interprétation…), les données se définissent comme des faits ou des observations brutes, souvent dépourvues de contexte ou d'interprétation initiale (Shannon, 1948). En l'état, elles restent inertes, incapables de produire un sens ou d'engendrer une action (Ackoff, 1989).

Le processus de transformation de données (Weaver, 1949), se déroule comme suit : les données brutes (chiffres et faits) deviennent des informations une fois traitées. Ces informations se transforment ensuite en connaissances lorsqu'elles sont authentifiées, contextualisées et personnalisées. Les concepts de *donnée*, d'*information* et de *connaissance* font l'objet de nombreuses définitions et distinctions parfois contradictoires. De nombreuses analogies sont opérées entre la « cognition naturelle » et la « cognition artificielle » (Roobaert, Claeys, & Cleven, 2024). Dans ce cadre, les concepts de transformation de données, qui nécessitent d'être définis (Naifer, Abidi, & Claeys, 2023) avant d'aller plus loin dans le raisonnement, sont présents dans des modèles théoriques décrivant, à la fois, le système cognitif humain et le fonctionnement des outils numériques (Le Deuff, 2014; Sowa, 1984). Ils s'avèrent indispensables pour appréhender le fonctionnement de tout « écosystème numéri-

que, peuplé d'humains, de machines et d'outils interconnectés » (Roobaert & Claeys, 2022) :

1. la donnée [*data*] (D) : représente une valeur sans être explicitement exprimées. La donnée, conceptuellement, peut être définie comme un symbole ou une entité brute dépourvue de signification inhérente en dehors de son existence. Elle peut se présenter sous diverses formes, pouvant être exploitées ou non en fonction du contexte (Sowa, 1984; Ackoff, 1989) ;
2. l'information [*information*] (I) : est une donnée sélectionnée pour sa pertinence à laquelle, après traitement (contextualisation), un sens (ou une interprétation) a été ajouté, ce qui donne une représentation claire et utile de la donnée dans le but de formuler une connaissance (Paquet, 2006) ;
3. la connaissance [*knowledge*] (K) : repose sur « un processus humain de transformation des informations brutes afin de leur donner un sens » (Paquet, 2006, p. 2). Ce travail d'analyse et d'assimilation « permet d'aboutir à une action » (Paquet, 2006, p. 11).

L'évolution des données peut s'étendre à d'autres niveaux. Certains auteurs considèrent que la connaissance peut mener à la *sagesse* (Ackoff, 1989), bien que cette notion, difficile à cerner, repose sur un modèle propre à chaque individu. D'autres recherches explorent les relations entre ces concepts (Aamodt & Nygård, 1995; Gaillard & Mercer, 2013; Rowley, 2007). En prenant appui sur les cinq niveaux de la « pyramide cognitive » définie par Georges Bernard (2017), la connaissance se prolonge à travers deux concepts :

4. l'intelligence [*intelligence*] (IN) : est la « faculté de prospecter et d'abstraire », ainsi que « la capacité de s'adapter et de comprendre » (Bernard, 2017) et d'accroître l'efficacité (Rowley, 2007) ;
5. la conscience [*consciousness*] (CS) : représente la faculté de ressentir et de subjectiver, ainsi que la capacité de penser.

En synthétisant différentes manières de les représenter, les cinq niveaux cognitifs peuvent être figurés en mettant en évidence le processus complexe qui les lie dynamiquement en suivant un cheminement privilégié (D → I → K → IN → CS) (Naifer et al., 2023) (*cf*. Fig. 92) :

1. D → I : une structuration des données collectées lors de la numérisation de l'objet patrimonial permet de les rendre compréhensibles et accessibles sous la forme d'informations ;
2. I → K : une analyse et une contextualisation des informations liés à l'objet patrimonial étudié et d'autres, plus générales (histoire, architecture, culture…) permet de les relier sous la forme de connaissances ;
3. K → IN : une flexibilité mentale permet l'adaptation des connaissances à des situations d'actualités ou à de nouveaux défis. Elle favorise le recours à la prédiction et l'anticipation pour prévoir les tendances, évaluer les risques et envisager des stratégies de préservation appropriées ;
4. IN → CS : un engagement éthique assure que les décisions soient alignées sur des valeurs morales et sociales. À ce stade, des connaissances et des décisions sont partagées pour une sensibilisation collective.

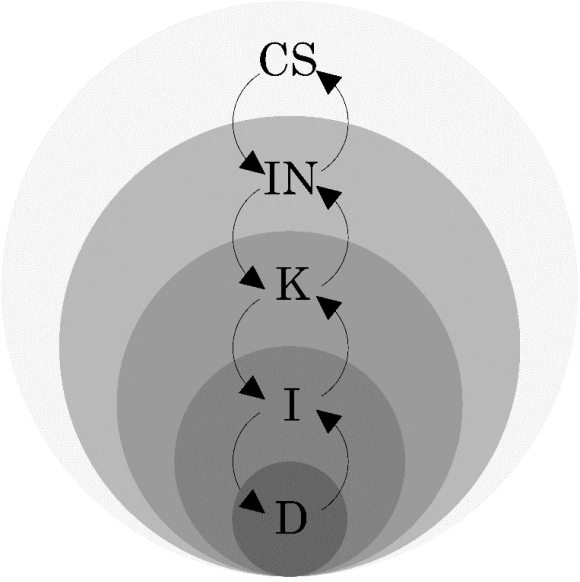


Fig. 92 – Le dynamisme des niveaux cognitifs. (Naifer et al., 2023)

6.2 Processus de gestion de données

La rétroconception architecturale paramétrique réside, dans sa première phase, dite « décomposer », dans l'analyse, le découpage et la segmentation d'un édifice ou d'un objet architectural (Jacquot, 2014), permettant d'élaborer un PDSM. Trois phases sont identifiées pour établir une archive numérique sous cette forme (*cf*. Fig. 93) :

1. *collecte des données*, consiste à extraire toute donnée définie comme « le résultat direct d'une mesure. Elle peut être collectée par un outil de supervision, par une personne ou juste récupérée via une source annexe » (Paquet, 2006) ;
2. *traitement et analyse des données* afin de les transformer en données utiles en se basant sur des logiciels spécifiques ou des structures organisationnelles adaptées ;
3. *modélisation et traduction des données* aboutissant à un modèle capable de calculer les différents attributs possibles. Ce modèle s'applique à l'étude des thermes impériaux romains les mieux *complets* et conservés, afin d'en dégager les principes architecturaux.

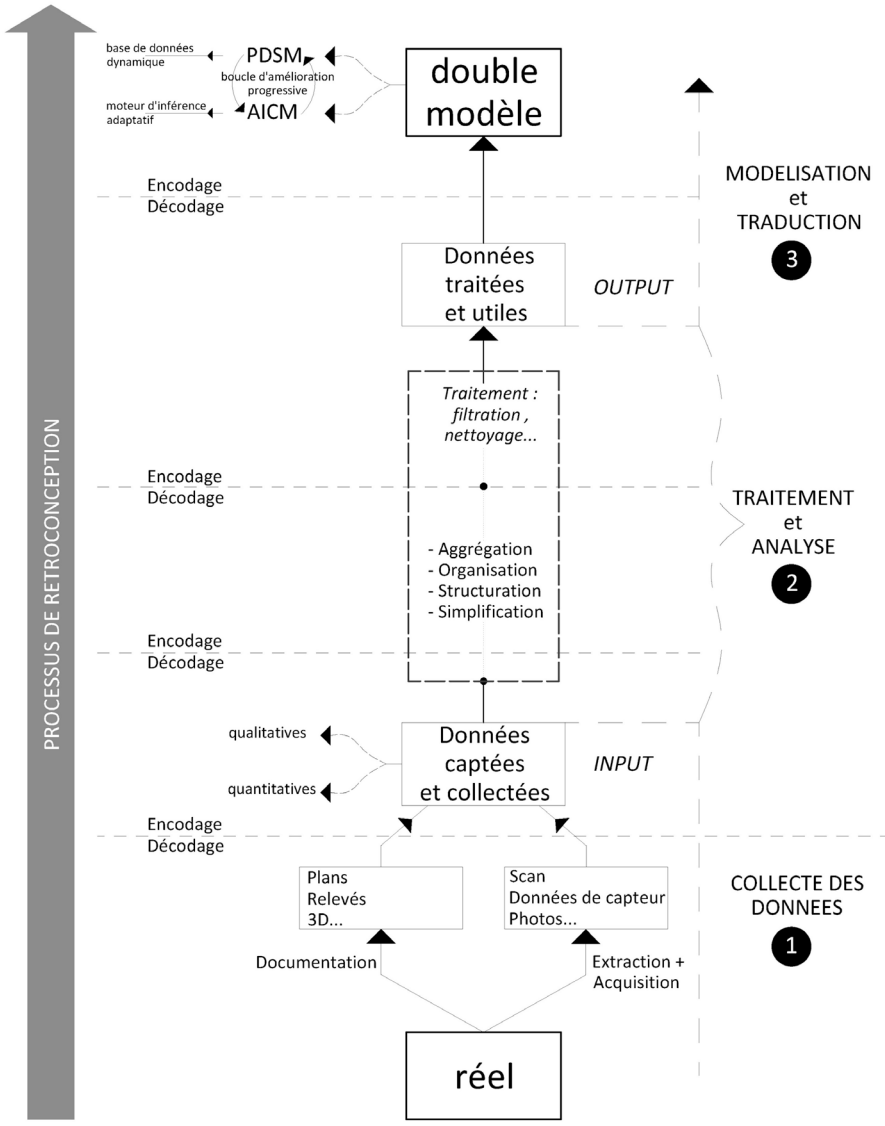


Fig. 93 – Processus de gestion des données pour *rétroconcevoir* un objet patrimonial. Adaptation d'après les travaux de Zaineb Naifer, Zayneb Abidi et Damien Claeys (2023)

6.2.1 Collecte des données

Une première étape consiste à rassembler un volume de données suffisant pour construire le PDSM. Elle repose sur des techniques traditionnelles, telles que la reproduction graphique des éléments d'un édifice, d'un objet ou d'un site patrimonial, obtenue par des relevés in *situ*. Ces données sont ensuite transcrites sous forme de

plans architecturaux enrichis par des descriptions, croquis ou axonométries, selon les besoins spécifiques (Fuchs, 2006). Ces dernières sont, à leur tour, complétées par des bases de données historiques et archéologiques. En parallèle, les technologies numériques avancées permettent une collecte plus précise et détaillée, offrant des possibilités supplémentaires d'analyse. Bien que ces ressources numériques ne soient pas directement exploitées dans la thèse, leur étude théorique reste pertinente pour envisager leur potentiel dans un cadre élargi, à l'élaboration duquel contribue la thèse.

6.2.1.1 Documentation

L'analyse « des constructions publiques en Italie et en Afrique — comme pour les autres régions de l'Empire — repose sur plusieurs catégories de documents qui, le plus souvent, ne donnent chacun que des renseignements fragmentaires, et sont d'importance inégale » (Jouffroy, 1986, p. 6-7). Hélène Jouffroy souligne que les inscriptions constituent la principale source de l'information, complétée par les textes littéraires, l'inventaire archéologiques et, plus rarement, les données *numismatiques*. L'exploitation de ces sources historiques et archéologiques permet d'examiner l'usage des édifices, les matériaux employés et leurs transformations successives. Pour un site archéologique, les données de références se déclinent en trois *types* principaux (Golvin, 2003, 2005) :

1. les données *connues* : représentent l'ensemble des éléments matériels et immatériels déjà identifiés et documentés concernant un site : (1) les « structures en place » : tous les murs et éléments architecturaux encore visibles et subsistants sur le site ; (2) les « objets épars » : les blocs, fragments ou vestiges dispersés qui ne sont plus en position d'origine mais qui appartiennent à l'édifice étudié ; (3) les « couches stratigraphiques » : les différentes couches archéologiques révélant les phases d'occupation et de transformation du site ; (4) ainsi que les « relevés » et « documents d'archive » : toutes les informations collectées sous forme de plans, textes anciens, inscriptions et documents d'archive. Ces données constituent la matière première sur laquelle repose toute étude de restitution ou d'analyse patrimoniale.

2. les données *cachées* : désignent les éléments existants qui n'ont pas encore été découverts, identifiés ou exploités. Ces données incluent : (1) les « vestiges enfouis » : représentent les structures ou éléments architecturaux qui demeurent sous terre, encore inaccessibles ; (2) les « inscriptions non découvertes » : sont les textes ou gravures qui pourraient fournir des informations sur l'histoire ou la fonction d'un site ; (3) les « archives non exploitées » : sont les documents historiques encore non étudiés ou non localisés. Jean-Claude Golvin (2005) souligne que la découverte progressive de ces données ne permettra jamais de combler complètement les lacunes ni de valider une restitution basée uniquement sur les critères du *vrai* et du *faux*. Cela s'explique par deux raisons principales : d'une part, l'impossibilité de réaliser des fouilles exhaustives sur un site patrimonial, en raison des contraintes matérielles, éthiques ou logistiques ; d'autre part, la perte *irrémédiable* de certaines données, de nombreux éléments ayant été détruits ou altérés de manière irréversible au fil du temps. Ainsi, les données cachées représentent une dimension incertaine

et incomplète de l'étude, rappelant que toute opération patrimoniale (restitution, rétroconception…) repose inévitablement sur une part d'hypothèse.

3. les données *détruites* : représentent une part significative et *irrémédiablement* perdue des informations nécessaires à une compréhension exhaustive d'un site patrimonial. Ces données, souvent d'un pourcentage important de l'ensemble, incluent : (1) les « murs arrachés » : structures qui ont été démantelées et dispersées ; (2) les « blocs pillés et réutilisés ailleurs » éléments architecturaux déplacés et intégrés dans d'autres constructions, sans possibilité de les localiser ; (3) les « blocs détruits » : matériaux broyés, brûlés ou utilisés dans des processus industriels. La disparition définitive de ces données rend impossible une restitution basée uniquement sur des critères absolus.

6.2.1.2 Nouveaux outils d'acquisition de données

En complément des représentations graphiques traditionnelles, la digitalisation a transformé les méthodes de relevé architectural. Elle « ne se limite plus uniquement à prendre des mesures géométriques ponctuelles, mais vise à transcrire la réalité de manière extrêmement complète » (Dubois, Vanhellemont, & Bouw, 2018, p. 7). L'évolution des outils de mesure et d'acquisition de données facilite l'extraction de données à partir d'objets réels, tout en garantissant un rendu détaillé, fidèle et quantitativement riche.

Les dispositifs d'acquisitions se distinguent selon leur mode d'interaction avec l'objet patrimonial (Jacquot, 2014). Certains nécessitent un contact direct, tandis que d'autres fonctionnent à distance (*cf*. Fig. 94). Parmi ces derniers, une classification complémentaire repose sur deux critères (Naifer et al., 2023) :

1. les familles technologiques, regroupant différentes méthodes telles que le palpage, la triangulation et la télémétrie ;
2. les approches : (a) *actif* : le dispositif émet un rayonnement dont la réflexion permet de calculer les coordonnées X, Y et Z ; (b) *passif* : les coordonnées sont déduites à partir du rayonnement naturel, comme en photogrammétrie, où des algorithmes de corrélation analysent des photographies pour reconstruire les données spatiales.

Sachant que la *lasergrammétrie* et la *photogrammétrie* figurent parmi les techniques d'acquisition les plus utilisées en rétroconception (Dubois et al., 2018), plusieurs outils (*cf*. Fig. 94) peuvent être classés selon leurs caractéristiques et la nature des données qu'ils permettent d'acquérir (Naifer et al., 2023).

(1) *Photogrammétrie* : une technique basée sur les principes de la photographie pour enregistrer un objet sur un support fixe. À l'origine, la stéréoscopie permettait d'obtenir une perception de la profondeur à partir de deux images prises sous des angles parallèles. L'essor du numérique a conduit au développement de la photogrammétrie multi-images, qui permet de capturer un grand nombre de vues sous différents angles. Un traitement algorithmique est ensuite appliqué pour identifier les points homologues entre les clichés et générer un modèle tridimensionnel précis (Dubois et al., 2018).

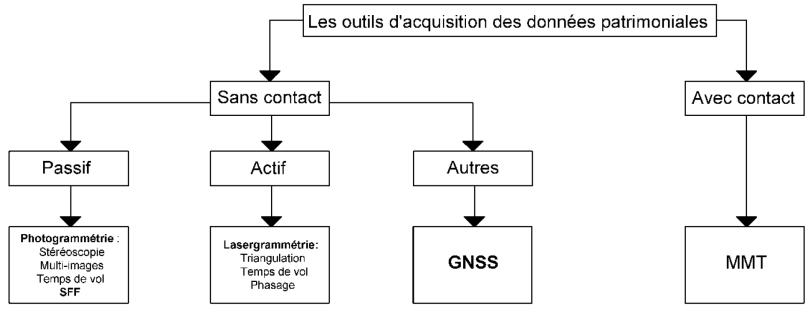


Fig. 94 – Les outils d'acquisition de données patrimoniales et leurs classifications. (Naifer et al., 2023)

(2) *Shape From Focus* (SFF) : utilise des déplacements successifs d'un plan focal afin d'identifier les zones *nettes* et reconstruire des objets en 3D. cette méthode est couramment appliquée en microscopie pour analyser la microstructure des matériaux (Dubois et al., 2018).

(3) *Lasergrammétrie* (ou *scan laser*) : offre une précision élevée dans la mesure des données tridimensionnelles (Fuchs, 2006).

(4) *Global navigation satellite system* (GNSS) : sont utilisées « soit pour l'acquisition de données ponctuelles, soit pour les opérations de contrôles (monitoring, auscultation), de consolidation géométrique ou de géoréférencement » (Billen et al., 2018).

(5) Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) : permet d'obtenir avec précision les coordonnées des points mesurés sur des objets mécaniques, facilitant ainsi des études techniques nécessitant une haute exactitude.

Les résultats issus de ces méthodes se distinguent par deux types de données (*cf*. Fig. 95) : (1) une *donnée quantitative* : qui peuvent être mesurable ou comptables ; (2) une *donnée qualitative* sous forme d'observations, photos, images satellites, vidéos…

Il convient de souligner que le principe de quantification demeure identique pour toutes les méthodes : il s'agit d'attribuer une valeur numérique à un objet d'étude (Espeland & Stevens, 2008), via la mesure ou le comptage (Royer, Garreau, & Roulet, 2019), en s'assurant de la cohérence entre ces valeurs et la réalité observée. Certaines techniques permettent de quantifier des données qualitatives, telles que l'« analyse qualitative comparée (QCA), l'analyse des réseaux sociaux, l'analyse textuelle, ainsi que l'utilisation accrue de nouvelles données qualitatives quantifiées issues d'internet » (Royer et al., 2019). En architecture, la quantification des données qualitatives permet « la description des contraintes sur les espaces en phase de programmation architecturale », afin de vérifier la conformité de la conception à travers l'Exigences Spatiales Qualitatives (ESQL) (Siala, 2019, p. 211).

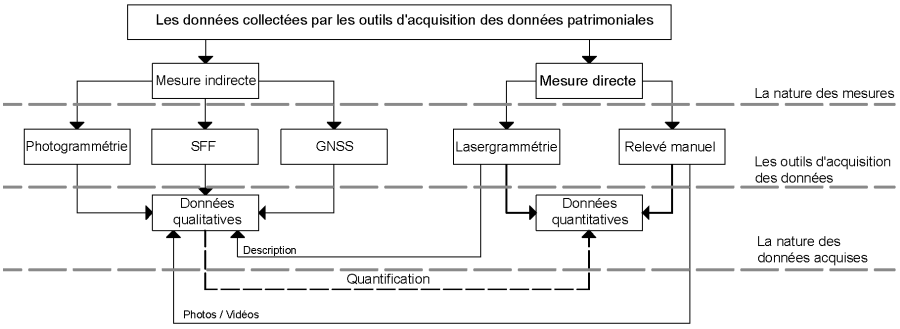


Fig. 95 – La nature des données collectées par les outils d'acquisition de données. (Naifer et al., 2023)

6.2.2 Traitement et analyse

L'interprétation des données collectées repose sur une visualisation simplifiée de l'ensemble, une étape essentielle dans l'organisation des attributs calculés du PDSM et la préparation des données destinées à l'entraînement du l'AICM. Pour analyser ce processus et en comprendre les mécanismes internes, l'étude du cube de données (*Data Cube*, [DC]) (Naifer et al., 2023) s'impose comme une approche structurante.

Le DC (*cf*. Fig. 96) est un opérateur d'agrégation relationnel généralisant les opérations de regroupement, de tableau croisé dynamique et de calcul de sous-totaux (Gray et al., 1997), ainsi que d'autres opérations permettant d'explorer des relations entre les variables. Le concept du DC a été popularisé par le modèle multidimensionnel *Online Analytical Processing* (OLAP) (Harinarayan, Rajaraman, & Ullman, 1996; Chen, Yan, Zhu, Han, & Yu, 2008) qui structure les données selon des dimensions multiples et des mesures associées. Cette organisation facilite l'analyse des données en offrant une structure multidimensionnelle où chaque dimension représente une caractéristique et chaque cellule contient une valeur associée. Dans de nombreux cas, un DC limité à trois dimensions suffit à fournir une représentation claire et exploitable des données patrimoniales.

La construction d'un DC repose sur quatre étapes (Han & Kamber, 2012), qui peuvent être transposées à l'analyse du patrimoine bâti :

(1) *formuler une requête* à partir d'une collecte de données relatives au patrimoine bâti, incluant des informations sur les bâtiments, leur historique, leur état de conservation, les restaurations antérieures, ainsi que des données géographiques, démographiques et environnementales... Une fois rassemblées, des analyses multidimensionnelles seront faites suite à une identification des dimensions, organisées en hiérarchies et en niveaux, telles que le temps, l'emplacement géographique, le type de bâtiment... ;

(2) *extraire les données* en agrégeant des mesures quantitatives selon différentes combinaisons de dimensions. Les agrégats obtenus, exploitables dans un DC, peuvent inclure la surface totale des bâtiments par type et par année, le nombre de bâtiments par zone géographique et par état de conservation, ou encore la

valeur patrimoniale moyenne par lieu et par période... La *réduction* de dimension vise à simplifier la structure des données, améliorer la visualisation, faciliter l'interprétation et optimiser les calculs d'interrogation lors de l'analyse (Gray et al., 1997) ;

(3) *visualiser des résultats* en construisant un DC intégrant les dimensions sélectionnées (temps, emplacement, type de bâtiment…), ainsi que les mesures agrégées associées. Chaque cellule du DC contient une valeur représentant *la mesure* d'une combinaison *donnée* de *dimensions* (Harinarayan et al., 1996) ;

(4) *analyser les résultats* en tirant parti de leur multi dimensionnalité, et générer des visualisations interactives du DC pour faciliter la compréhension et l'interprétation des données et orienter des décisions à la prédiction et la planification du patrimoine bâti.

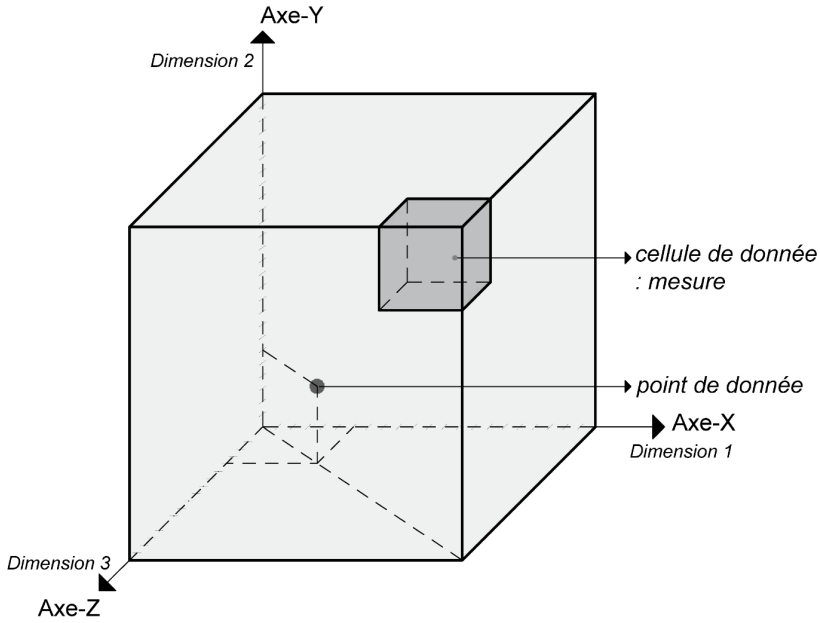


Fig. 96 – Une représentation schématique du cube de données (*data cube* DC). (Naifer et al., 2023)

Différentes approches analytiques peuvent être mobilisées, notamment l'exploration des données (*data mining*), qui consiste à identifier des modèles et des corrélations au sein de grands ensembles de données (Han & Kamber, 2012). Cette approche s'appuie sur des méthodes statistiques, mathématiques et d'apprentissage automatique afin de révéler des relations cachées, exploitables selon les objectifs définis (Han & Kamber, 2012). Une étape supplémentaire, peut être dédiée à :

(5) *assurer la mise à jour et à la maintenance* pour intégrer l'évolution des données et l'ajout d'informations nouvelles, afin de préserver la précision des analyses et la fiabilité des prédictions.

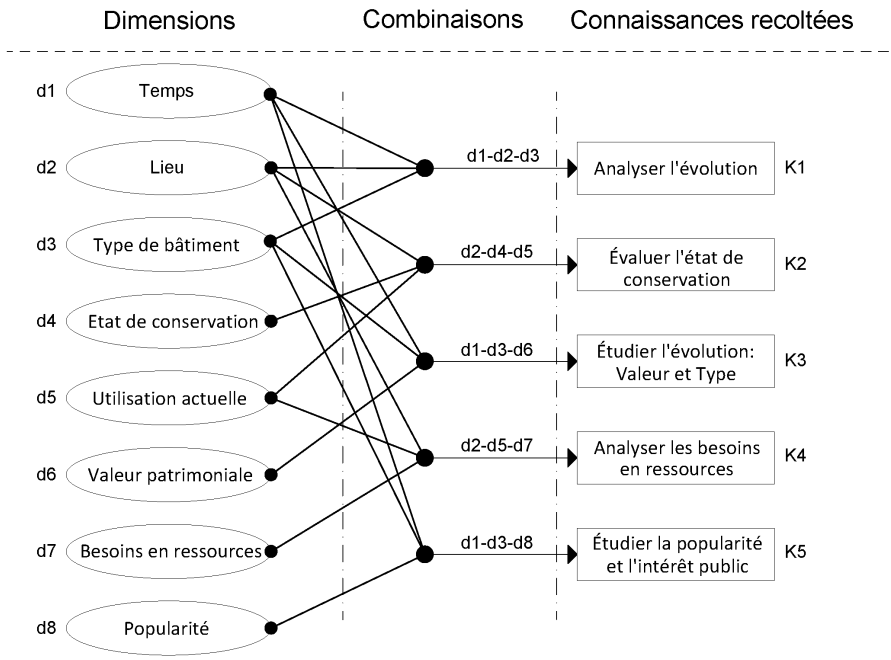


Fig. 97 – Agencement possible des dimensions proposées. (Naifer et al., 2023)

Pour mieux appréhender l'évolution des données vers des connaissances [*knowledge*] (K), un DC peut également être mobilisé pour formuler des *prédictions* sur les différentes interventions patrimoniales envisageables. Une illustration (*cf*. Fig. 97) met en évidence certaines combinaisons possibles entre les dimensions (d) proposées, chacune représentant un aspect des données patrimoniales analysées (Naifer et al., 2023). Cette approche permet d'explorer plusieurs axes d'interprétation et d'application :

(1) K1 : identifier les typologies associées à certaines régions ou catégories de bâtiment ;

(2) K2 : localiser les zones géographiques nécessitant des interventions prioritaires en matière de conservation ;

(3) K3 : repérer les édifices patrimoniaux nécessitant une attention particulière pour leur préservation ;

(4) K4 : optimiser l'allocation des ressources dédiées aux travaux de conservation ;

(5) K5 : guider les décisions en faveur des constructions présentant un intérêt patrimonial plus marqué.

6.2.3 Modélisation et traduction des données

6.2.3.1 Présentation de « jumeau numérique » comme outil de modélisation

Un modèle numérique repose sur une double conversion, traduisant un objet réel en données exploitables, à travers un passage d'un format *lisible* par le concepteur à un format *compréhensible* pour la machine : un processus d'*encodage* et de *décodage*. Tout processus de conversion entre les données captées d'une réalité et les informations générées dans leur modélisation numérique entraîne (Naifer et al., 2023) :

1. une perte d'informations significatives, puisque les données perçues de manières qualitatives par les consciences humaines comportent des subtilités et des interrelations non traductibles en données chiffrées, ce qui mène au traitement des données qualitatives de manière autonome, sans les confondre avec les données quantitatives, et de les contextualiser adéquatement ;
2. une perte d'authenticité au niveau de leur représentation, puisque l'outil numérique manque de sensibilité pour traduire certaines caractéristiques immatérielles du patrimoine, tels que les imperfections, les signes d'usures et les marques du temps faisant partie intégrante de son histoire, la digitalisation du patrimoine « semble minimiser l'importance de l'usage ou de la matière au profit de celle de l'image » (Bos, Claeys, Vandenbroucke, & Stiernon, 2023), ce qui nécessite l'étude prioritaire des données qualitatives pour rencontrer les grilles de valeurs patrimoniales traditionnelles.

En effet, la compréhension des valeurs patrimoniales dépend en partie de la crédibilité et de la véracité des sources d'information qui les décrivent. Garantir l'exactitude des données est une condition essentielle pour préserver et transmettre le patrimoine culturel et historique tout en veillant à maintenir son caractère authentique.

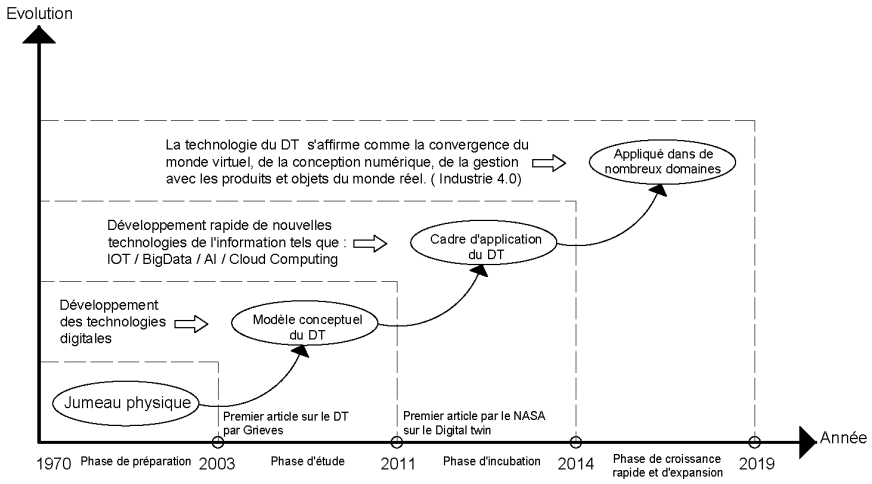


Fig. 98 – L'évolution du *Digital Twin* traduit. (Zhuang, Miao, Liu, & Xiong, 2021)

Dans la thèse, les plans de restitution existants et les bases de données archéologiques constituent les principales sources d'information utilisées pour répondre aux objectifs définis. L'intégration de technologies complémentaires, telles que les outils d'acquisition avancés (lasergrammétrie, photogrammétrie), les cubes de données, ou les jumeaux numériques, offrent une meilleure compréhension de certaines notions et pourraient toutefois ouvrir la voie à des extensions dans le cadre de recherches futures. Le jumeau numérique (*Digital Twin* [DT]) (Naifer et al., 2023), en tant qu'outil avancé de modélisation de données architecturales, permet d'établir des interactions dynamiques entre le physique et le numérique. Bien qu'il ne soit pas directement exploité dans la partie pratique de cette recherche, son potentiel en rétroconception constitue une référence utile pour la construction des modèles PDSM et AICM.

À l'origine, l'idée du DT (*cf*. Fig. 98) a été introduite depuis le monde de l'industrie lors d'une présentation à l'université de Michigan en 2002, intitulée *« Conceptual ideal for PLM »*, parlant du *Product Lifecycle Management* (PLM) (gestion du cycle de vie des produits). Cette présentation définit les composantes d'un DT ainsi que ses interactions, les liens et le flux des données échangeables entre ces derniers. En 2003, le concept a été adopté et redéfini par Michael Grieves comme un modèle virtuel, construit à partir d'informations, et incluant toutes les informations d'un système physique. En 2012, le NASA définit un DT comme étant une simulation virtuelle d'un système qui est relié par son jumeau physique à travers des capteurs, fournissant un historique actualisé de son fonctionnement (Glaessgen & Stargel, 2012; Grieves & Vickers, 2017).

Le DT repose sur deux composantes interdépendantes (*cf*. Fig. 99) : un modèle virtuel reproduisant un modèle physique existant, reliés par un flux d'échanges de données de nature différente. D'une part, le modèle physique génère des données brutes nécessitant un traitement pour être exploitées dans l'environnement virtuel. D'autre part, le modèle virtuel restitue des données analysées, facilitant ainsi la gestion et le contrôle du modèle physique (Grieves & Vickers, 2017).

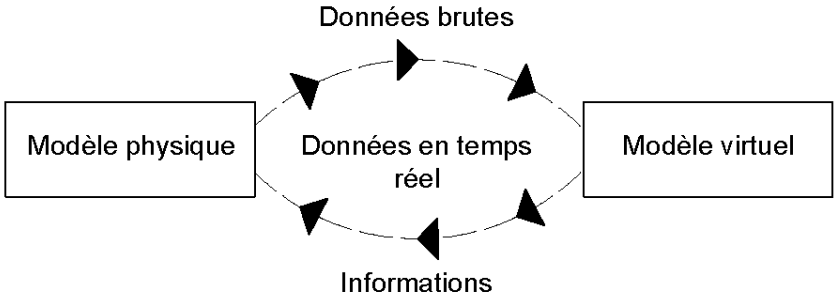


Fig. 99 – Le paradigme du *Digital Twin*. (Naifer et al., 2023)

L'essor du DT dans des secteurs comme la fabrication, l'ingénierie mécanique et l'architecture a conduit au développement de plusieurs modèles adaptés aux besoins spécifiques de chaque domaine. Différentes classifications ont ainsi été établies selon plusieurs critères : (1) les niveaux d'intégrations des données (Kritzinger, Karner, Traar, Henjes, & Sihn, 2018); (2) les degrés de sophistication (Madni, Madni, & Lucero, 2019); (3) les phases d'analyse numérique selon un rapport de Gartner (Agrawal, Fischer, & Singh, 2022); (4) les niveaux de développement des données (Grieves & Vickers, 2017); (5) les niveaux de maturité (Autodesk, 2021).

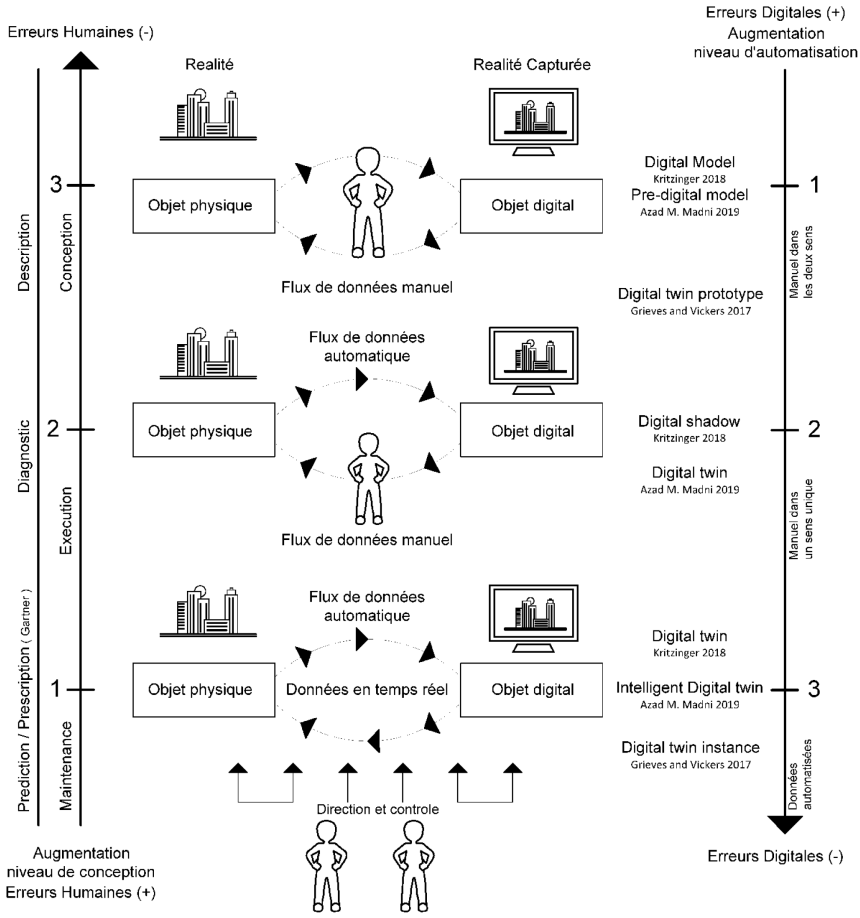


Fig. 100 – Les modèles du jumeau numérique. (Naifer et al., 2023)

Dans le domaine de l'architecture, le DT intègre les principes de *Building Information Modeling* (BIM) et du *Wireless Sensor Network* (WSN), pour optimiser la gestion du cycle de vie d'un projet, de la conception à son exploitation. Son interconnexion avec l'environnement bâti permet un suivi en temps réel grâce à un flux de

données automatisé. Contrairement à une simple représentation numérique, il constitue un outil dynamique capable d'analyser, tester et ajuster les *objets* en fonction des interactions entre l'espace virtuel et le monde physique. L'intérêt du DT dans la rétroconception repose sur sa capacité à créer une maquette numérique dynamique, analogue à l'objet physique étudié. Son avantage par rapport à une maquette paramétrique traditionnelle réside dans son fonctionnement interactif et évolutif. Une première distinction concerne l'enrichissement du modèle paramétrique : la connexion continue entre le monde physique et sa copie numérique permet un contrôle en temps réel des interactions, alors qu'une maquette paramétrique classique repose sur un modèle virtuel statique. Par ailleurs, l'approche du DT s'appuie sur un cycle analytique intelligent, générant des hypothèses qu'il expérimente et ajuste au fil du processus, assurant ainsi un cadre évolutif et réactif.

6.2.3.2 Un système inspiré du jumeau numérique pour la rétroconception

Comme déjà mentionné, un DT est une réplique numérique d'un objet physique évoluant grâce à des données en temps réel ou des simulations prédictives. Utilisé dans divers domaines (industrie, urbanisme, patrimoine), il sert à analyser, surveiller et prédire l'évolution d'un système physique. Trois éléments définissent cette approche : (1) un modèle de données structurées représentant l'objet modélisé ; (2) une capacité d'interaction et d'analyse permettant la comparaison entre modèle et réalité ; (3) une mise à jour continue intégrant les données collectées pour assurer son adaptation.

Table 36 – Correspondance entre le double modèle PDSM/AICM et le DT. (établie par l'auteure)

principe du *DT*	PDSM	AICM
un modèle structuré de référence	fournit une base de données paramétrique, structurant les éléments connus des thermes	exploite la base de données du PDSM pour analyser et s'entrainer sur des connaissances existantes
une interaction dynamique et analytique	permet d'explorer les données sous différentes perspectives et d'intégrer des relations spatiales et constructives	utilise des algorithmes d'intelligence artificielle pour compléter les parties manquantes à partir des fragments connus
une évolution progressive des connaissances	peut être mis à jour avec de nouvelles découvertes archéologiques ou des modèles paramétriques améliorés	affine progressivement ses prédictions à mesure qu'il est entraîné sur plus de données

La construction des modèles PDSM et AICM s'inspire de logique de fonctionnement du DT (*cf*. Table 36), combinant organisation des données et interprétation dynamique par intelligence artificielle (*Artificial Intelligence* [AI]). Cette structuration vise à créer un référentiel numérique exploitable en rétroconception tout en ouvrant la voie à d'autres applications.

1. Le PDSM, conçu comme une base de données dynamique, organise les informations sur les thermes sous une forme paramétrique, comparable à la structure

d'un DT. Il classe et structure les attributs architecturaux dans un format exploitable sous Rhinoceros3D et Grasshopper, facilitant ainsi la manipulation et l'évolution des données. Sa flexibilité permet une mise à jour continue en intégrant de nouvelles découvertes archéologiques, garantissant une approche évolutive.

2. L'AICM, s'appuyant sur une démarche dynamique, exploite des données du PDSM pour formuler des hypothèses et proposer des complétions architecturales à partir de plans fragmentaires. Son fonctionnement repose sur un cycle d'analyse et d'ajustement, proche du modèle DT simulant l'évolution d'un système réel. L'AICM retourne des hypothèses de prédiction qui peuvent être validées et réintégrées dans le PDSM, formant ainsi une boucle d'amélioration progressive.

Une méthodologie, bien que distincte d'un DT, en partage les principes fondamentaux et ouvre plusieurs perspectives : (1) une complétion plus rapide et plus fiable des thermes à partir de fragments incomplets ; (2) la création d'un référentiel structuré et exploitable pour d'autres chercheurs ; (3) une amélioration de l'AICM ; (4) la possibilité d'ajouter des simulations interactives (ex. flux de chaleur, circulation des usagers). En combinant ces approches, la méthodologie mise en place optimise la gestion des données et la prédiction des éléments manquants, s'inscrivant dans une démarche innovante de rétroconception architecturale systématisée.

6.3 Environnement numérique pour la rétroconception

La restitution architecturale en archéologie repose sur une structuration logique des informations, combinant les données directement issues des vestiges et des sources complémentaires telles que les textes, l'épigraphie ou les analogies. L'intégration de ces éléments dans un modèle prédictif, selon les principes avancés par Margueron & Gransard-Desmond (2012) et Demetrescu & Ferdani (2021), exige une méthodologie fondée sur plusieurs critères : (1) une gestion efficace de l'ensemble des variables sélectionnées ; (2) une applicabilité permettant son utilisation dans divers contextes ; (3) une flexibilité adaptée aux spécificités de l'édifice étudié ; (4) une accessibilité favorisant l'exploitation des données sans prérequis disciplinaires complexes ; (5) une polyvalence permettant de croiser différentes sources et de moduler le rôle des informations intégrées. Ces critères structurent la démarche de rétroconception en définissant les sorties attendues et en orientant le choix des outils appropriés à chaque phase (*cf*. Fig. 101).

La rétroconception d'un édifice lacunaire repose, surtout sur l'établissement de relations géométriques entre ses composants élémentaires. Ces relations sont construites par une succession de phases permettant de passer de l'édifice dans son état actuel à une représentation de son état d'origine, afin de compléter un état incomplet de l'édifice en combinant ses principes de conception et d'organisation spatiale. Ce processus suit une logique algorithmique, où chaque étape repose sur des données d'entrée (relevés et observations), un traitement (analyse des principes spatiaux) et une sortie (prédiction des éléments manquants). Par exemple, pour comprendre comment une voûte en berceau a été construite, il est nécessaire de suivre plusieurs étapes : identifier la portée et la hauteur de la voûte, analyser l'épaisseur

et la nature des matériaux utilisés, étudier la répartition des poussées sur les appuis, détecter les dispositifs de contrebutée (murs porteurs, contreforts), et enfin examiner les traces éventuelles du processus de construction, comme les marques de coffrage ou les ajustements des claveaux.

Le processus adopté dans la thèse s'organise en deux phases principales (*cf*. Fig. 101) :

(1) « décomposer » : l'analyse des documents est suivie d'un *redessin* des plans sous format vectoriel via AutoCAD. Ces plans sont ensuite importés dans Rhinoceros3D/Grasshopper afin de paramétrer la décomposition, aussi bien au niveau de composants élémentaires que d'attributs associés ;

(2) « recomposer » : un modèle prédictif est entrainé et testé en langage Python, exploité soit de manière autonome via des environnements comme Jupyter ou Visual Studio Code, soit intégré directement à Rhinoceros3D/Grasshopper sous forme de *plugin*.

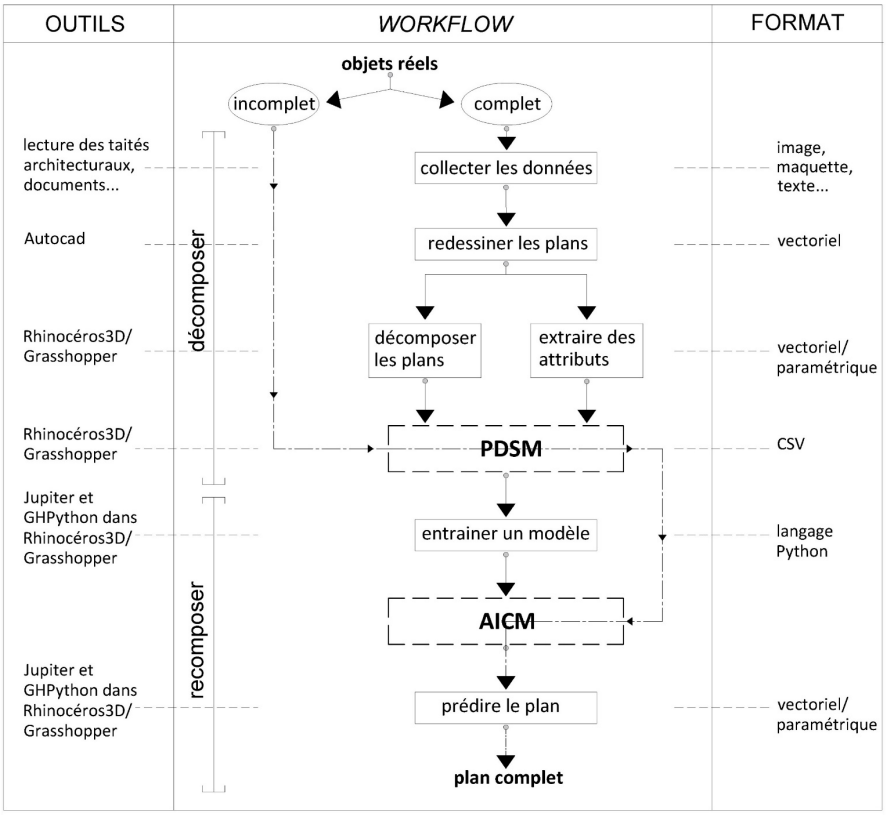


Fig. 101 – Choix d'outils dans un processus de rétroconception pour une complétion du plan d'un objet réel incomplet. (établie par l'auteure)

La modélisation paramétrique repose sur des relations hiérarchisées entre des entités de complexité variable, régies par des principes de dépendance et d'interaction (Woodbury, 2010). La puissance de calcul des outils numériques actuels permet de transcrire un édifice sous forme d'un système de paramètres ajustables, garantissant une flexibilité et une adaptabilité tout au long du processus de rétroconception.

L'utilisation d'environnements de programmation visuelle constitue un levier essentiel dans la simplification des tâches de modélisation et de prédiction, accessibles à la fois aux programmeurs et aux non-programmeurs. Des outils (*cf*. Fig. 102) comme Grasshopper[20], Dynamo[21], Blender[22] ou Generative Components[23] permettent de générer des formes complexes, de structure des relations géométriques et d'automatiser certaines étapes.

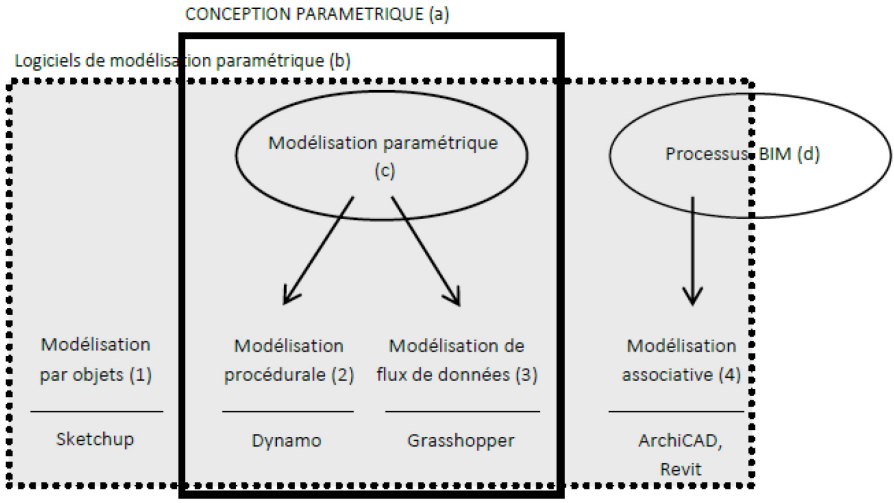


Fig. 102 – Types de logiciels de modélisation paramétrique, (Stals, Jancart, & Elsen, 2018) sur base des travaux de Janssen et de ses collègues (2016). 1-4 : types de modélisation ; a-d : processus. (Stals, 2019, p. 79)

Dans cette étude, Gasshopper a été retenu pour sa capacité à articuler la programmation graphique et la modélisation paramétrique. Son intégration est précédée d'une initiation à Python, utilisé indépendamment, soit en complément sous forme de plug-in. Cette familiarisation passe par l'exploitation de références théoriques et didactiques, notamment à travers un cours sur l'initiation à la programmation (Python) (Ben Mansour, 2025).

[20] http://www.grasshopper3d.com

[21] http://dynamobim.org

[22] https://www.blender.org

[23] https://www.bentley.com/fr/products/product-line/modeling-and-visualization-software/generativecomponents

Développé par Guido Van Rossum en 1989, Python connait plusieurs évolutions, la plus récente étant la version 3.11.1 publié en décembre 2022. Ce langage se distingue par sa syntaxe claire et sa structure modulaire, facilitant l'organisation et la lisibilité du code. Il permet de combiner programmation orientée objet et programmation fonctionnelle, offrant ainsi un cadre flexible pour la gestion de modèles complexes. Son efficacité tient notamment à la concision du code, qui réduit le volume d'écriture par rapport à des langages compilés comme C, C++ ou Java, tout en permettant une exécution immédiate sans étape de compilation. La portabilité constitue un autre atout majeur, garantissant l'exécution des scripts sans modification sur différents systèmes d'exploitation (Linux, Windows ou macOS). Enfin, la richesse de son écosystème, avec des bibliothèques dédiées comme *NumPy* pour le calcul scientifique, *Pandas* pour l'analyse de données ou *TensorFlow* pour l'apprentissage automatique contribue à sa polyvalence (Lutz, 2017).

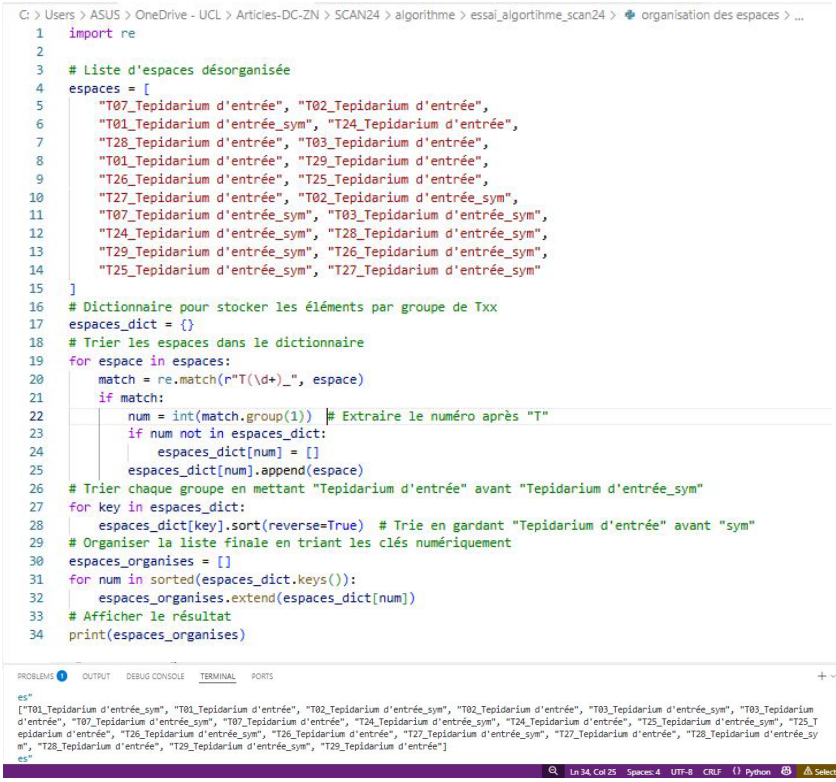


Fig. 103 – Exemple de script codé sur Visual Studio Code pour l'organisation des espaces. (établie par l'auteure)

L'intégration de Grasshopper, développé par l'informaticien David Rutten dans les années 2000, s'impose comme un outil avancé de modélisation paramétrique

étroitement intégré à Rhinoceros 3D (Rhino v. 7.0)[24]. Son interface intuitive et ses fonctionnalités en font un environnement de référence pour la conception architecturale. Le logiciel permet « d'alimenter la conception de bon nombre de bâtiments à travers le monde et d'inspirer toute une génération de concepteurs dits « paramétriques » » (Chaillou, 2021, p. 35). Pour mieux comprendre cet environnement, l'étude s'appuie sur les travaux de Mohamed Khabazi (2009) et jean Pradelle (2018). Au-delà, d'un simple logiciel, Grasshopper constitue un véritable environnement de programmation visuelle (graphique). Contrairement aux langages conventionnels comme Python, où la programmation repose sur l'écriture de lignes de code, la programmation graphiques permet d'élaborer des algorithmes en manipulant directement des éléments sous forme d'icônes connectées.

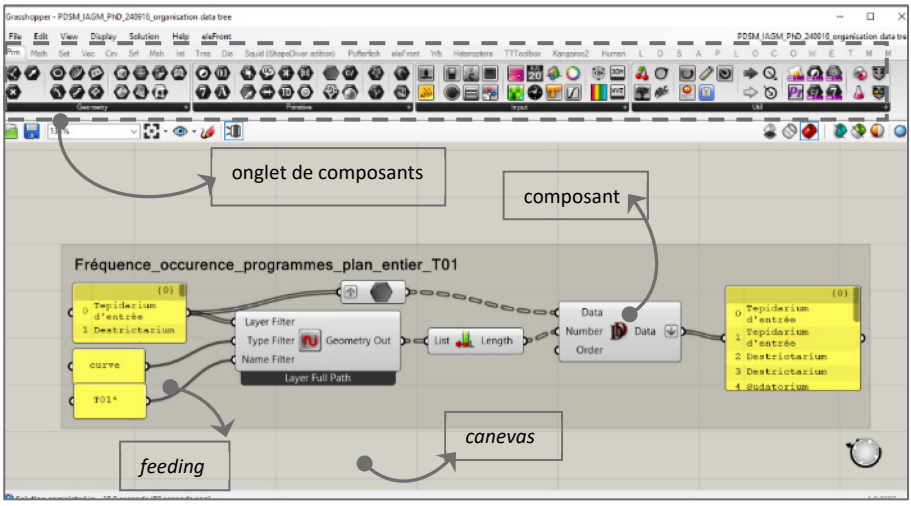


Fig. 104 – Présentation générale de l'interface Grasshopper. (établie par l'auteure)

Ce mode de fonctionnement facilite l'exploration des solutions et la formalisation des processus paramétriques sans nécessiter de connaissances approfondies en codage (*cf*. Fig. 106). La programmation visuelle repose sur une séquence linéaire de « composants », « Le composant Line (Ligne) convertit deux points en une ligne par exemple ». « Les composants sont alimentés par une ou plusieurs données, réalisent une opération (création, modification de) et génèrent en retour une ou plusieurs données ou géométries en sortie » (Pradelle, 2018, p. 17). Pour éviter toute ambiguïté liée à l'usage du terme composant dans différents contextes, le mot anglais *component* est utilisé pour désigner celui employé dans Grasshopper. Ils sont représentés sous forme d'icônes glissées et reliées par des fils (*feeding*) pour transmettre les données sur la surface de travail (*canevas*) (*cf*. Fig. 104).

[24] https://www.rhino3d.com

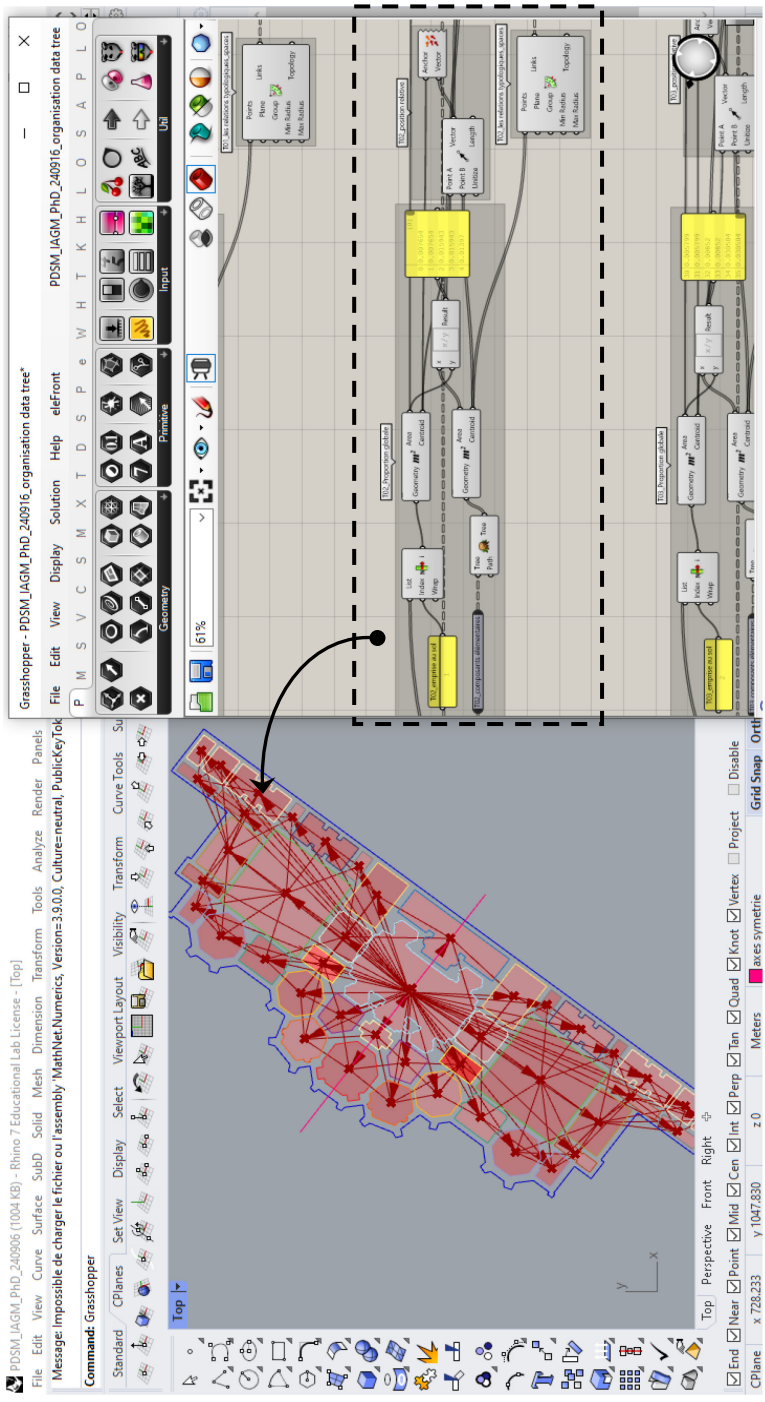


Fig. 105 – Exemple de visualisation des résultats sur Rhinoceros 3D. (établie par l'auteure)

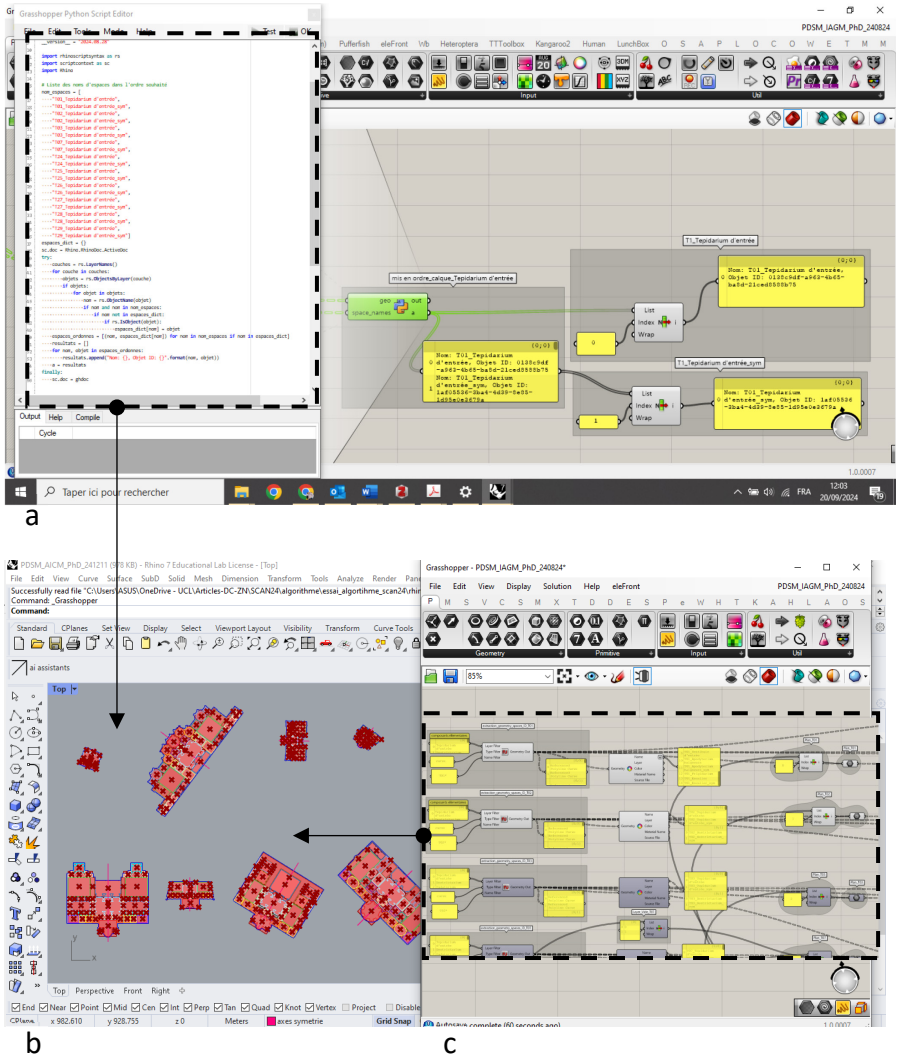


Fig. 106 – Programmation conventionnelle *versus* programmation visuelle : un exemple d'algorithme pour organiser des espaces. a : script travaillé via GHPython sur Grasshopper ; b : visualisation sur Rhinoceros3D ; c : script travaillé avec des composants sur Grasshopper. (établie par l'auteure)

Chaque *component* exécute des opérations spécifiques sur des objets géométriques ou des entités mathématiques, assurant un flux dynamique de données sans recours explicite aux boucles. Les connexions établies entre les *components* déterminent la propagation des informations, où chaque module reçoit les données du précédent avant de transmettre les résultats aux suivants. Les entrées peuvent inclure des objets géométriques, des valeurs numériques, des intervalles ou des listes

correspondant à différentes conditions architecturales. En réponse aux modifications, les sorties s'adaptent en temps réel, garantissant un modèle interactif tout au long du processus de modélisation (*cf*. Fig. 105, p.169). Grasshopper peut être enrichi par des plugins tiers, souvent distribués gratuitement, qui élargissent ses fonctionnalités et permettent d'intégrer des approches issues d'autres disciplines, notamment l'AI.

6.4 D'une donnée brute à un environnement numérique

L'analyse de la gestion des données a montré qu'elles conditionnent la mise en œuvre de la rétroconception architecturale paramétrique. La réflexion menée sur leur nature, de la donnée brute à l'information contextualisée et à la connaissance structurée, souligne que leur valeur ne se déploie qu'à travers des processus de transformation et d'interprétation. Cette dynamique, inscrite dans une approche systémique, place le PDSM au cœur du dispositif, en tant que structure paramétrique capable d'organiser, de stocker et de faire évoluer les attributs architecturaux nécessaires à la prédiction.

L'analyse du processus de gestion a montré que la collecte, le traitement et la modélisation des données doivent être articulés de manière progressive. La diversité des sources – documentaires, archéologiques ou numériques – ainsi que l'apport des outils contemporains (lasergrammétrie, photogrammétrie, data cubes, jumeaux numériques) enrichissent le potentiel du PDSM tout en rappelant la nécessité d'un regard critique sur la fiabilité de ces informations.

La comparaison entre le paradigme du DT et le double modèle PDSM/AICM a permis de situer la méthodologie proposée dans une continuité avec les logiques actuelles de modélisation. Si le PDSM organise les données, l'AICM les interprète pour formuler des hypothèses de complétion, inscrivant ainsi la recherche dans un cycle évolutif où chaque mise à jour enrichit le corpus et affine les prédictions.

Enfin, l'intégration des environnements numériques, en particulier Rhinoceros3D et Grasshopper, démontre que la rétroconception bénéficie d'outils capables de combiner visualisation, paramétrisation et apprentissage automatique.

7 DÉCOMPOSITION DES THERMES

Le septième chapitre propose une analyse approfondie de la décomposition des thermes romains, constituant une articulation méthodologique entre l'analyse générale de l'architecture du corpus étudié (chapitres 4, 5 et 6) et la construction des modèles PDSM et AICM (chapitres 8 et 9). Il s'organise en trois sous-chapitres, consacré aux principes de décomposition, le premier expose les fondements théoriques et les démarches méthodologiques permettant de segmenter ces édifices complexes en unités élémentaires. Le deuxième confronte deux hypothèses à travers une tentative de décomposition manuelle appliquée à une étude de cas (thermes d'Antonin à Carthage). Cette expérimentation vise à déterminer la plus pertinente pour préparer les plans destinés à l'entraînement du modèle. Le troisième traite des opérations préliminaires à la construction des modèles PDSM et AICM. Il implique, d'une part, la sélection et la préparation des plans collectés en vue de leur exploitation méthodique, et d'autre part, l'identification des attributs indispensables à l'élaboration d'un ensemble de données structuré, à la fois complet sur le plan quantitatif et cohérent du point de vue qualitatif.

7.1 Principes de décomposition

La rétroconception architecturale d'un édifice intègre un processus analytique visant à décomposer le système matériel ou non, des composants élémentaires qui le constitue, afin d'en examiner l'organisation et les principes de conception, mais aussi d'exploiter ces connaissances pour recomposer des éléments manquants ou en concevoir de nouveaux dans une logique cohérente (*cf*. Fig. 107, p.175). Ceci explique « une transition entre la décomposition et la recomposition » (Dhouib, 2004, p. 416). Cette idée est appuyée par Jacque Lucan (2009), qui met en avance l'importance du processus de décomposition dans la redéfinition des pratiques architecturales contemporaines. Il explique que ce procédé consiste à « se déprendre des solutions conventionnelles pour redéfinir un vocabulaire élémentaire » (Lucan, 2009, p. 492), c'est-à-dire s'éloigner des solutions conventionnelles pour ouvrir la voie à de nouvelles interprétations. Un concepteur qui décompose, il « sépare », « distingue » pour recomposer c'est-à-dire « rapprocher » (Lucan, 2009, p. 492). À travers les projets des maisons *DeVore* et *Adler* de Louis Kahn (1955), Jacques Lucan montre que cette démarche repose sur l'idée que toute innovation architecturale passe par une analyse minutieuse des éléments constitutifs de l'édifice, afin de comprendre leurs qualités intrinsèques avant de les réassembler d'une manière inédite. Ce dépassement des normes établies est décrit comme un rejet des « interprétations architectu-

rales acceptées » (Lucan, 2009, p. 496), en faveur d'une approche plus libre et plus adaptée aux problématiques de chaque projet. L'un des exemples de cette méthodologie est celui de la fenêtre, qui n'est pas un simple dispositif fonctionnel, mais une entité complexe composée de différentes parties, chacune conçue pour répondre à des « fonctions différentes », comme la gestion de la lumière naturelle, l'orientation, ou encore l'interaction entre l'intérieur et l'extérieur. Louis Kahn pousse plus loin cette réflexion en affirmant que « spécifier des qualités » à travers la décomposition permet d'explorer un large éventail de possibilités architecturales, notamment en jouant sur les contrastes, les dimensions et les configurations spatiales, « une autre modalité de décomposition-composition » (Lucan, 2009, p. 493). Ce processus ne vise pas uniquement à fragmenter pour fragmenter, mais bien à enrichir le vocabulaire architectural en questionnant les structures existantes. Par exemple, dans ses travaux pour les laboratoires *Richards*, Louis Kahn a utilisé ce principe pour repenser la fenêtre comme un espace à part entière, une « petite cavité avec un grand carré » permettant à la fois l'éclairage et une ouverture sur l'extérieur. Ce jeu entre la fragmentation et la recomposition, témoigne d'une volonté de dépasser les limites traditionnelles de la composition architecturale pour créer des formes et des usages plus adaptés. Une démarche conceptuelle visant à réinterpréter et à réinventer les langages architecturaux.

Le processus de rétroconception, qui prend pour point de départ l'édifice existant afin de remonter vers les principes qui ont guidé sa réalisation, s'inscrit en contrepoint de la démarche de conception, où le parti architectural oriente la production de l'objet bâti. Si les deux logiques mobilisent des opérations similaires, telles que l'analyse, la recherche de cohérence ou la formulation d'une intention, elles diffèrent par la séquence des étapes et la logique de progression. Pour expliciter les dynamiques propres à chacune, une comparaison de leurs étapes respectives permet de mettre en évidence l'inversion de leur organisation (*cf*. Table 37). Dans les deux cas, la décomposition des éléments architecturaux constitue une opération commune, mais les objectifs poursuivis ne coïncident pas. Dans le cadre de la conception, cette opération contribue à dépasser les solutions héritées pour renouveler les formes et les usages. En revanche, dans la rétroconception, elle vise à interroger la structure d'un édifice construit, à restituer les logiques qui ont présidé à son élaboration, ou à en prolonger le développement.

L'objectif principal de décomposition détaillée est d'identifier des modules récurrents présents dans les thermes, à travers les principes de composition, lesquels, bien que variés, montrent une organisation à la fois complexe et logique. La complémentarité entre « la méthode réductionniste et la pensée systémique » dans la construction du modèle architectural, permet d'aborder les plans fragmentaires non comme des ensembles figés, mais comme des systèmes dynamiques où chaque élément interagit pour compléter l'intégralité du plan (Claeys, 2013).

Au cœur de cette approche systémique, l'analyse des interactions entre les composants d'un système, en complément de l'examen isolé de chacun d'eux, permet de mettre en lumière les logiques d'organisation qui sous-tendent sa compréhension. La théorie de l'analyse structurale proposée par H A. Simon (Simon, 1969, p.

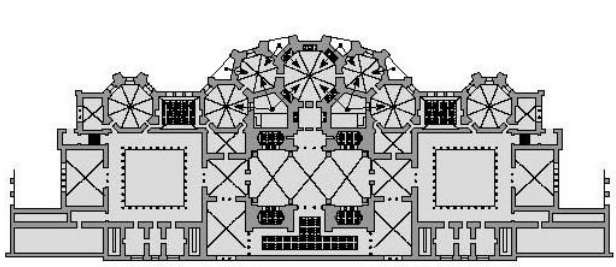
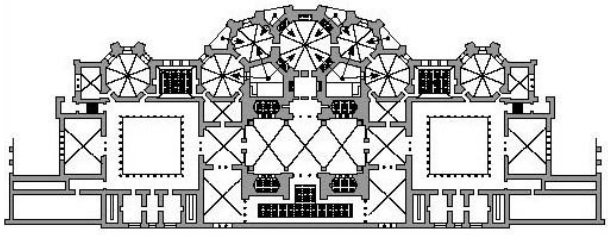
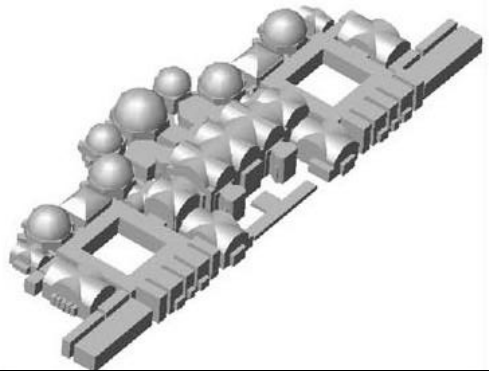
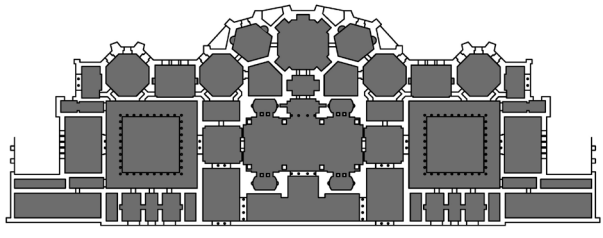
356-357), permet d'appréhender les systèmes complexes qui présentent des propriétés de *hiérarchie*, d'*évolution* et de *quasi décomposabilité*. Mounir Dhouib (2004) transpose la matrice d'incidence développée par H A. Simon à l'espace architectural afin d'identifier précisément les relations entre les composants élémentaires et ainsi décomposer un objet architectural complexe. Une fois les relations qualifiées et quantifiées, il devient possible de compléter un objet architectural par rétroconception, en remontant à rebours son processus initial de conception.

Table 37 – Entre conception et rétroconception. (établie par l'auteure)

conception	définition du programme (besoins, usages)	élaboration d'un concept	décomposition conceptuelle : dissocier le vocabulaire traditionnel pour le réinventer	composition des volumes et des espaces	détail des composants techniques et formels	construction du projet réel
rétroconception	observation de l'existant (formes, fonctions visibles)	formulation d'hypothèses sur la logique organisationnelle	décomposition analytique : isoler les composants à reconstituer	identification des principes de composition (modularité, symétries)	reconstitution hypothétique (plans, simulations)	exploitation pour compléter l'existant ou proposer d'autres solutions

Les thermes peuvent être qualifié de système complexe conformément à la définition proposée par H A. Simon (1991, p. 172), comme étant des ensembles composés « d'un grand nombre d'éléments qui interagissent de façon complexe ». En partant du principe que ces édifices constituent des variantes d'une même structure de référence, l'approche adoptée établit trois postulats fondamentaux : (1) chaque édifice thermal impérial est considéré comme un système, c'est-à-dire un ensemble d'éléments interconnectés opérant dans un environnement défini ; (2) ce système est analysé comme un système fermé, sans interaction avec l'environnement extérieur, bien que d'autres recherches puissent élargir cette perspective en examinant le système dans son contexte ; (3) l'objet étudié présente une organisation interne cohérente, révélée par des relations stables entre ses constituants, caractéristique essentielle définissant sa structure.

Table 38 – Le postulat du lieu architectural. Adaptée et actualisée d'après la thèse de Karim Bouaita (2015, p. 194)

	entité : thermes d'Antonin à Carthage
lieu architectural	
Dispositif Solide d'Englobement : DSE	
Volume Virtuel En Creux : VVEC	
Milieu Fluide Habitable : MFH	

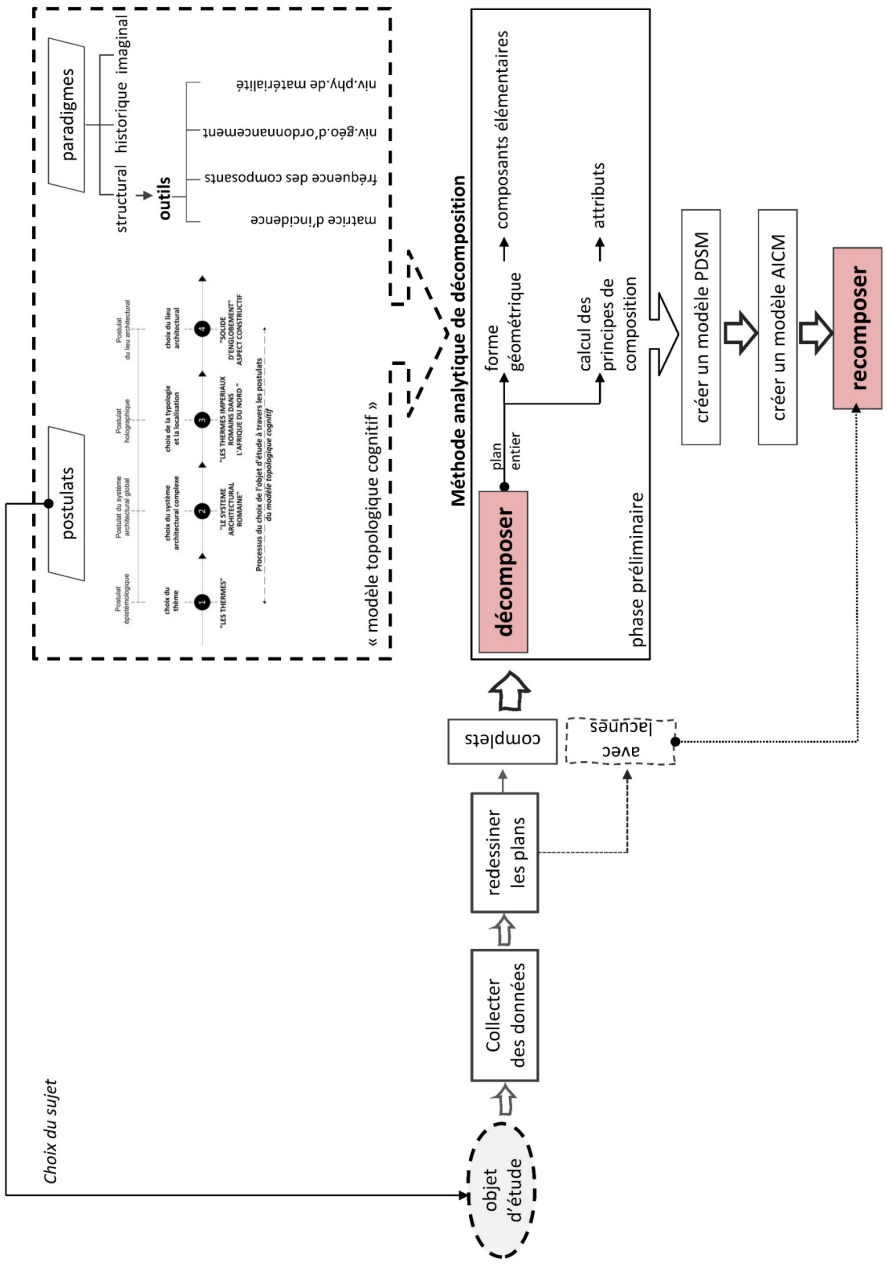


Fig. 107 – Compréhension d'un objet à travers les mouvements de décomposition/recomposition.
(établie par l'auteure)

En distinguant, au sein de l'« espace lieu architectural » (ELA), le « milieu fluide habitable » (MFH) du « dispositif solide d'englobement » (DSE) (Dhouib, 2004), les recherches antérieures ont focalisé sur le MFH, déterminant les usages, les pratiques, le confort et les ambiances (Soussi, 2019). Le présent travail poursuit cette investigation en se concentrant sur le DSE, lequel inclut la « conformation plastique » ainsi que la « conformation constructive ». L'hypothèse avancée suggère que le Volume Virtuel En Creux (VVEC), en tant qu'interface entre le DSE et le MFH, constitue un élément à la fois nécessaire et suffisant pour définir le projet-édifice, donc un lieu d'équilibre où toutes les parties s'articulent harmonieusement pour former une totalité cohérente.

À ce stade, deux hypothèses sont envisagées au point de vue de la décomposition d'un édifice : (1) les solides d'englobement (plein) engendrent les milieux habitables (vide) (du DSE au MFH) ; (2) les milieux habitables (vide) engendrent les solides d'englobement (plein) (du MFH au DSE).

La question du rapport entre le vide et le plein (*cf*. Table 38, p. 173) est centrale en architecture : « Il y aurait une double réalité constitutive du fait architectural et urbain, c'est un solide d'englobement qui engendre un espace englobé. Si ce n'est le contraire qui est vrai : c'est un milieu habitable support des pratiques, qui engendre les parois, et les enveloppes adéquates et adaptées au bon déroulement de l'habiter. Même si cette réalité double, structurale elle aussi, est déclinée avec des nuances en traversant les différentes échelles. Les conformations physiques des solides de l'enveloppe des parois codéterminent les configurations du milieu habitable ; elles s'interdéterminent » (Dhouib, 2004, p. 84). Autrement dit, le DSE et le MFH s'inscrivent dans une relation d'interdépendance, chacun influençant l'autre. D'un côté, l'architecture peut être comprise comme un « solide d'englobement » générant un espace intérieur (espace englobé), où les structures physiques, telles que les parois et les couvertures, définissent et délimitent l'espace habitable. D'autre part, le « milieu habitable », défini par les usages et les besoins des occupants, impose en retour une organisation spatiale qui façonne les contours de l'enveloppe architecturale. Les deux hypothèses sont comparées à partir de l'analyse des thermes d'Antonin à Carthage dans la section suivante (*cf*. section 7.2, p.176).

7.2 Mise à l'épreuve de deux hypothèses génératives de l'espace

Une décomposition manuelle, des éléments architecturaux, est effectuée à partir de l'étude de cas des thermes d'Antonin à Carthage, en Tunisie, qualifiés par Yvon thébert (2003, p. 307-308) comme le « plus grand édifice balnéaire du monde provincial, à l'image de la puissance de la mégapole carthaginoise », dans lequel « le modèle urbain est parfaitement reproduit ». « De fait, dans ce monument si fortement imprégné des leçons romaines, elle souligne le dynamisme des recherches africaines, en offrant une solution originale et équilibrée tant techniquement qu'esthétiquement ». Ils « offrent donc un exemple remarquable de volonté de reproduire les modèles les plus prestigieux de l'Urbs » (Thébert, 2003, p. 311). Cette démarche

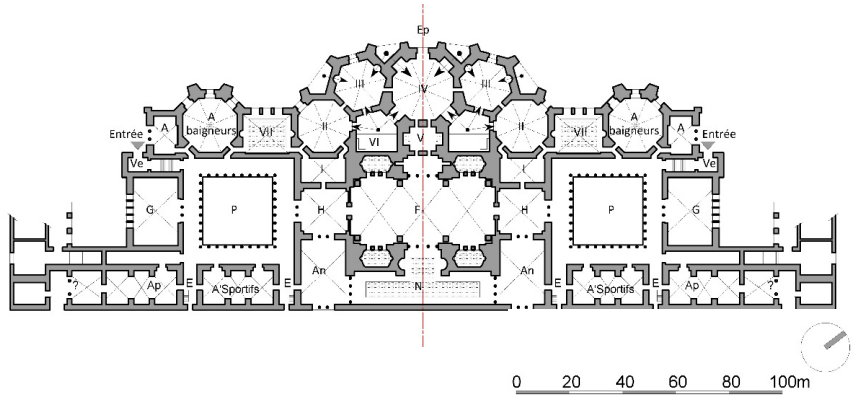
vise à affiner la compréhension des méthodes de construction romaines tout en soutenant l'une des hypothèses relatives à la définition de l'espace architectural.



Fig. 108 – Repérage des thermes d'Antonin, à Carthage (Thébert, 2003)



Fig. 109 – Photo panoramique, prise par l'auteure, du site des thermes d'Antonin à Carthage.



Légende:

I:Tepidarium d'entrée
II:Destrictarium
III:Sudatorium/Laconicum
IV:Caldarium
V:Tepidarium de sortie
VI:Praefurnium
VII:Piscine chauffée par 3 foyers
➔ :Foyer
F:Frigidarium
A:Apodyterium
P:Palestre
G:Gymnasium
N:Natatio
Ve:Vestibule d'entrée
H:Hall de distribution
E:Escalier
Ep:Espace extérieur (exercices physiques)
Ap:Annexe (palestre)
An:Annexe (natatio)

Fig. 110 – Plan originel des thermes d'Antonin à Carthage. (redessiné par l'auteure)

7.2.1 Hypothèse 1 : du plein au vide

La première hypothèse consiste à considérer que le plein engendre le vide, en suivant un processus méthodologique précis de décomposition et de recomposition : (1) chaque mur est initialement appréhendé comme un ensemble de formes simples pleines, intégrant toutes les ouvertures et niches (*cf.* Fig. 111). Aux intersections de deux murs, deux options sont possibles : soit obtenir deux barres croisées (*cf*. Fig. 113-A), soit décomposer les murs en tranches de formes simples (*cf*. Fig. 113-B) ; (2) les formes simples résultant de cette décomposition sont virtuellement divisées en deux parties égales, chacune attribuée aux espaces adjacents afin que chaque espace soit clairement délimité par les portions de murs correspondantes (*cf*. Fig. 114) ; (3) des formes supplémentaires en saillie sont ajoutées pour compléter la structure initiale des murs (*cf*. Fig. 115) ; (4) finalement, les murs sont virtuellement sculptés à l'aide de formes simples pour atteindre leur aspect définitif et ainsi définir l'espace architectural jusqu'à l'obtention du plan complet (*cf.* Fig. 116).

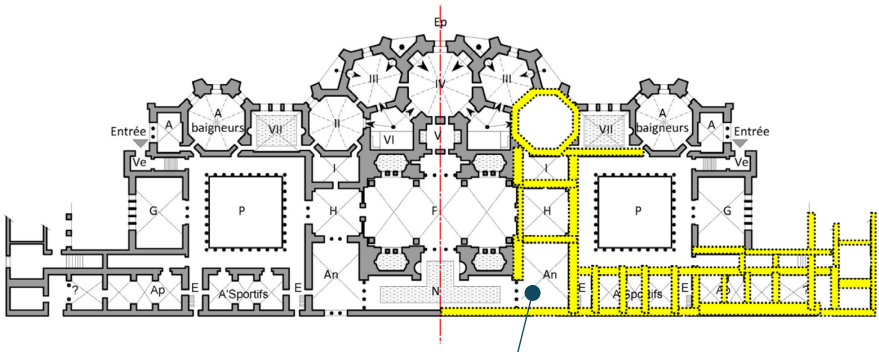


Fig. 111 – Dessin des formes simples des murs. (établie par l'auteure)

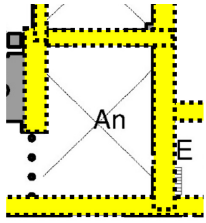


Fig. 112 – Zoom sur une partie du plan pour montrer la jonction des murs. (établie par l'auteure)



Fig. 113 – Deux différentes réflexions de jonction des murs. (établie par l'auteure)

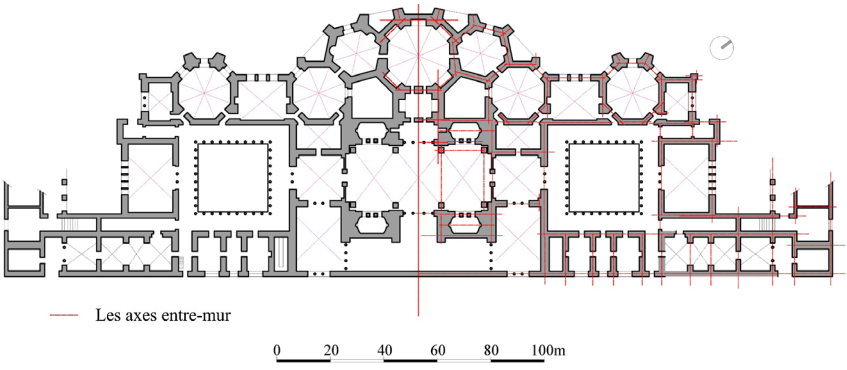


Fig. 114 – Dessin des entre-axes des murs des thermes d'Antonin à Carthage. (établie par l'auteure)

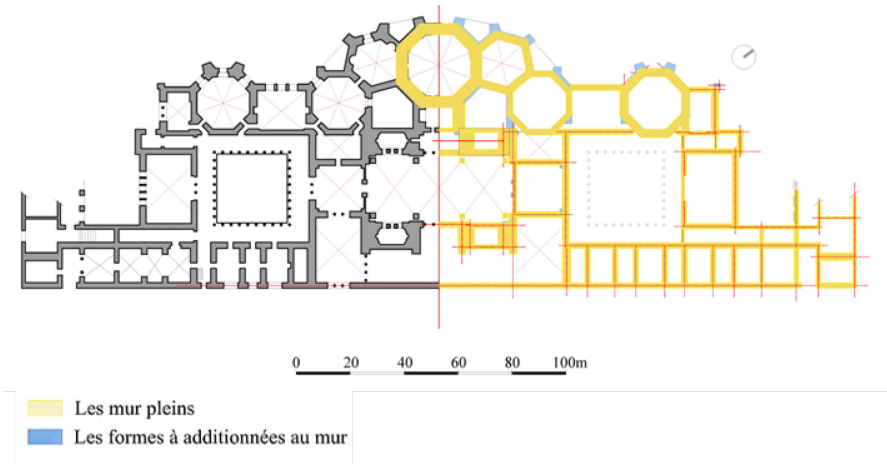


Fig. 115 – Ajout des formes supplémentaires. (établie par l'auteure)

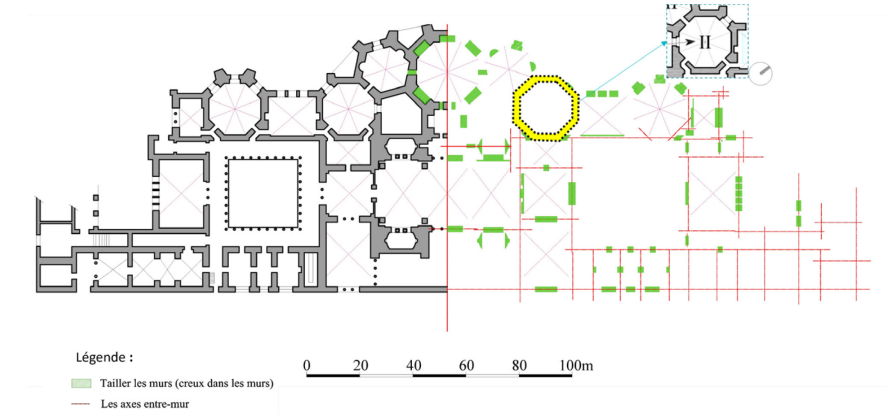


Fig. 116 – Tailler les murs pour dessiner les ouvertures et les niches. (établie par l'auteure)

7.2.2 Hypothèse 2 : du vide au plein

La deuxième hypothèse, inverse, postule que le vide génère le plein : le MFH supportant des activités engendre les parois : (1) les espaces intérieurs sont initialement définis puis décomposés en formes simples (*cf.* Fig. 117) ; (2) les niches et ouvertures nécessaires sont ajoutées à chaque espace ainsi identifié (*cf.* Fig. 118) ; (3) la juxtaposition des formes pleines obtenues permet de visualiser clairement les jonctions des murs ; (4) finalement, en traçant l'emprise au sol, c'est-à-dire la limite extérieure de l'enceinte, le plan architectural se trouve complétement représenté. La figuration, moitié blanche et moitié grise en symétrie (*cf.* Fig. 119), illustre le processus de matérialisation du plein à partir du vide.

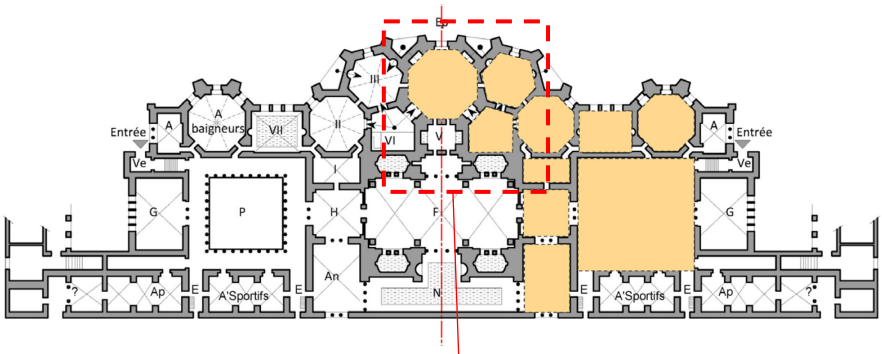


Fig. 117 – Pochage des vides des composants élémentaires : sous des formes simples. (établie par l'auteure)

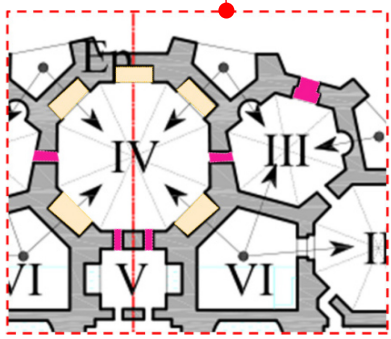


Fig. 118 – Ajout des ouvertures et les niches aux vides pochés. (établie par l'auteure)

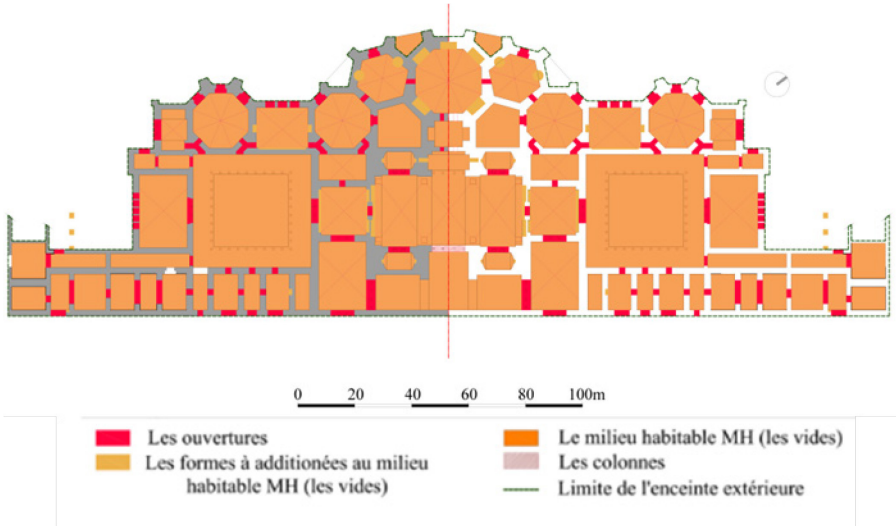


Fig. 119 – Génération du plein à partir du vide. (établie par l'auteure)

7.2.3 Évaluation croisée de deux hypothèses

La méthode de décomposition proposée diffère nettement de la pratique constructive réelle : en effet, décomposer un mur ou lui ajouter des ouvertures telles que des fenêtres ou des niches après sa réalisation n'est pas une démarche logique sur le terrain. Cette procédure constitue plutôt une phase de modélisation, représentant une transition entre la réalité physique et un modèle abstrait, chacune possédant ses propres avantages et limites. En étendant cette approche aux thermes de Néron à Rome (*cf*. Fig. 120), il devient possible de confronter deux traditions architecturales différentes : d'un côté, un complexe nord-africain où l'adaptation locale se lit dans l'organisation des espaces ; de l'autre, un édifice romain qui illustre le modèle impérial de référence. La comparaison souligne la capacité du processus de décomposition à mettre en lumière les logiques sous-jacentes, indépendamment du contexte géographique ou chronologique.

Deux approches principales peuvent être envisagées :

(1) commencer par identifier le plein (parois) pour ensuite déterminer le vide (espaces) par soustraction, méthode potentiellement complexe dans le cas de bâtiments historiques comme les constructions romaines, dont les dimensions de la pierre n'étaient pas standardisées et dépendaient souvent de ressources locales disponibles. Cette approche peut être pertinente lorsque les limites physiques sont partiellement préservées, bien que cela soit rarement le cas, les structures étant souvent très détériorées ou mal définies ;

(2) à l'inverse, une approche partant du vide pour ensuite définir le plein peut être plus adaptée, selon la nature des vestiges disponibles et les objectifs visés par la rétroconception.

Le choix de fonder la modélisation sur le vide, plutôt que sur le plein, s'appuie sur deux constats issus des étapes précédentes : d'une part, l'analyse constructive développée au chapitre (*cf*. chapitre 4, p. 72) met en évidence une hétérogénéité du système constructif rend incertaine toute tentative de déduction spatiale à partir des formes bâties ; d'autre part, l'analyse comparative menée entre les deux hypothèses montre que les configurations spatiales peuvent être reconstituées plus efficacement en partant de ces volumes, traités comme unités d'usage, puis en dérivant les parois nécessaires à leur articulation.

Une fois la méthode de décomposition établie selon les spécificités du corpus, sa mise en œuvre permet d'extraire les paramètres nécessaires à l'élaboration d'un jeu de données. Ce jeu articule des données graphiques et numériques destinées à alimenter le modèle PDSM, tout en constituant la base du traitement *artificiellement intelligent* envisagé dans la suite du processus. L'algorithme se construit autour du fragment, selon une logique séquentielle : à partir des espaces présents, il identifie ceux manquants, en prédit leurs dimensions et leur position, puis propose des formes construites compatibles.

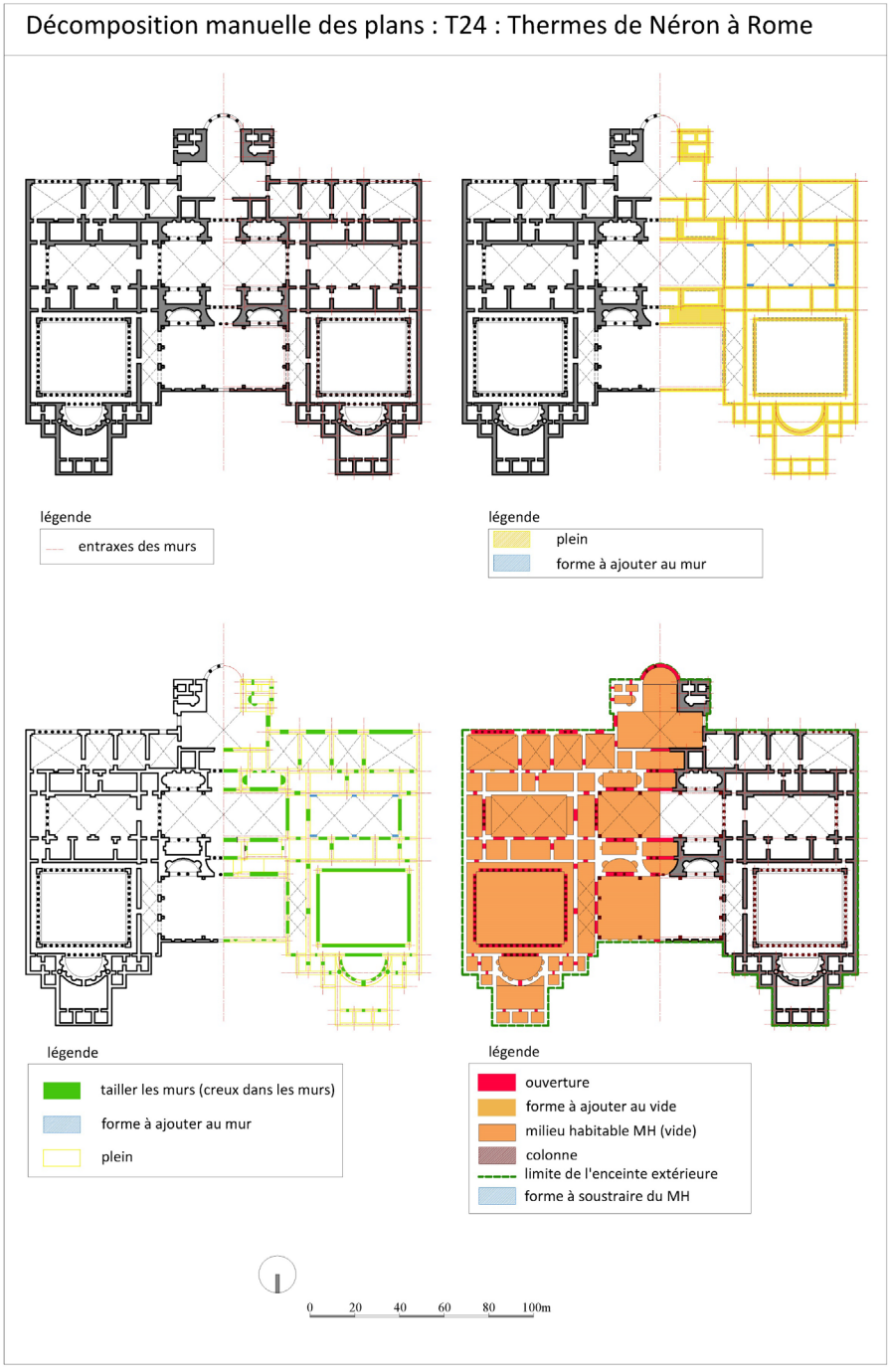


Fig. 120 – Essai de décomposition manuelle des thermes de Trajan. (établie par l'auteure)

7.3 Identification, sélection et préparation de jeu de données

7.3.1 Jeu de données graphiques : plan architectural

Afin de rendre exploitables les plans collectés, dans le cadre de la constitution d'une base de données, une série d'opérations préalables s'impose. Ces étapes de sélection et de préparation visent à garantir la cohérence, la lisibilité et la compatibilité des données avec les outils de complétion *intelligente* et d'analyse paramétrique. Le processus s'organise selon une logique progressive, depuis l'identification du statut des plans (complets ou incomplets) jusqu'à leur nettoyage, leur organisation, puis leur décomposition en composants élémentaires distincts. Le tableau suivant (*cf*. Table 39) présente de manière synthétique les principales étapes mises en œuvre pour structurer ces données architecturales.

Table 39 – Étapes de sélection et de préparation des données collectées sous forme de plans. (établie par l'auteure)

nom de l'étape	description
classification des données collectées constituant le corpus	répertorier les thermes recensés dans un tableau structuré, en distinguant les plans complets de ceux présentant des lacunes. Cette étape permet d'établir une grille de choix raisonnée, facilitant la sélection des édifices utilisés pour chaque phase de la rétroconception
nettoyage des plans	supprimer les éléments superflus ne contribuant pas à l'analyse paramétrique, tels que les annotations, les hachures, les éléments décoratifs ou les objets non pertinents pour l'entraînement. Seuls sont conservés les éléments architecturaux fondamentaux dans le cadre d'une analyse structurale : parois, espaces fonctionnels (*caldarium*, *frigidarium*…) et emprise au sol définissant la distinction entre le plein et le vide, conformément au postulat du lieu architectural
décomposition et organisation des plans	décomposer chaque plan du corpus en composants élémentaires en affectant, dans Autocad, un calque distinct à chaque type d'espace (*caldarium*, *frigidarium*...). Cette décomposition permet de distinguer les entités constitutives du plan et de faciliter leur exploitation paramétrique. Les éléments tels que niches ou ouvertures intégrées aux murs ne sont pas traités comme des entités autonomes

7.3.1.1 Classification et sélection des plans thermaux

Il convient de rappeler que la principale source documentaire mobilisée pour la description morphologique des thermes impériaux analysée est l'ouvrage d'Yvon Thébert (2003). Les travaux de Pierre Gros (2011) sur l'architecture romaine, d'Alexandre Lézine (1968) sur les thermes d'Afrique du Nord, ainsi que ceux de Jean-Pierre Adam (1984) relatifs aux techniques de construction, entre autres, apportent une perspective complémentaire.

Table 40 – L'état de conservation de corpus des thermes impériaux romains étudiés. (Naifer et al., 2024)

ID		thermes impériaux romains	m²	degré de fouille	degré de documentation
T_1	Tunisie	El Knissia, Sousse, date inconnue.	1 600	M	1
T_2		Karthago : grands thermes d'Antonin, Carthage, c.145-161 CE.	18 000	+	1
T_3		Mactaris : grands thermes Est, Maktar, 199 CE.	4 400	M	1
T_4		Sicca Veneria : grands thermes, El Kef, début IIIe s.	> 4 000	M	+/-
T_5		Thelepte : grands thermes, Kasserine, date inconnue.	> 3 000	M	+/-
T_6		Thugga : thermes d'Aïn Doura, Dougga, fin IIe s.-début IIIe s. ?	> 3 300	M	+/-
T_7		Thugga : thermes Antoniniens, Dougga, 212-217 CE.	1 700	+	1
T_8		Uthina : grands thermes, Oudna, début du IIe s.	12 000	M	+/-
T_9		Utica : grands thermes, Utique, date inconnue.	5 990	M	+/-
T_{10}		Bulla Regia : grands thermes Sud, Bulla Régia, date inconnue.	3 300	/	0
T_{11}		Membressa, Mejez El Bab, date inconnue.	> 1 350	/	+/-
T_{12}	Algérie	Caesarea, grands thermes Ouest, Cherchell, date inconnue.	5 500	/	+/-
T_{13}		Cuicul, grands thermes Sud, Djemila, 183-184.	3 000	+	+/-
T_{14}		Cuicul, thermes du capitole, Djemila, IIe s (première moitié ?).	1 200 - 1 300	M	+/-
T_{15}		Hippo Regius, grands thermes Sud, Hippone-Annaba, 198 au plus tard.	1 500 - 2 000	+	+/-
T_{16}		Lambaesis, grands thermes, Lambèse, dernières années du IIe s.	3 100	M	+/-
T_{17}		Lambaesis, thermes du Camp, Lambèse, Hadrien.	2 700	+	+/-
T_{18}		Tubusuptus, grands thermes, Tiklat-ElKseur, époque sévérienne et plus tard ?	3 000	M	+/-
T_{19}		Thamugadi, grands thermes Nord, Timgad, date inconnue.	4 400	/	+/-
T_{20}		Calama, Guelma, IIe siècle.	3 000	+	+/-
T_{21}		Tiddis, date inconnue.	?	/	0
T_{22}	Libye	Lepcis Magna, grands thermes Sud, Hadrien, 126-127 CE.	13 870	+	+/-
T_{23}		Lepcis Magna, thermes du bord de la mer, I-IIe s.	1 914	M	+/-
T_{24}	Rome	Thermes de Néron, 62 CE.	21 500	M	1
T_{25}		Thermes de Titus, 80 CE.	4 500	M	1
T_{26}		Thermes de Trajan, 104-109 CE.	20 500	M	1
T_{27}		Thermes de Caracalla, 212-216 CE.	24 000	+	1
T_{28}		Thermes de Dioclétien, 298 à 306 CE.	35 500	+	1
T_{29}		Thermes de Constantin, 315 CE.	13 000	M	1

Le corpus retenu pour cette étude comprend 29 thermes impériaux romains (Ti), répartis géographiquement comme suit : 11 en Tunisie, 10 en Algérie, 2 en Libye et 6 à Rome. Le degré de fouille des thermes est variable et a été codifié selon trois niveaux : non fouillé (/) ; partiellement dégagé (M) ; entièrement dégagé (+). De manière similaire, le degré de documentation des plans est classé en trois catégories :

inconnus (0) ; partiellement connus (+/-) ; complètement documenté (1). Un tableau synthétique (*cf*. Table 40) présente, pour chaque édifice (Ti), la date de construction, la surface estimée, ainsi que les indicateurs relatifs à l'état de fouille et au niveau de documentation disponible.

Une telle hétérogénéité impose une distinction sélective entre les plans pleinement exploitables pour l'entraînement du modèle et ceux qui, en raison de leur caractère lacunaire, sont plutôt mobilisés pour d'autres phases du processus de rétroconception. Des critères objectifs permettant d'évaluer la fiabilité des données et la pertinence des hypothèses du dispositif méthodologique. Des indices de *similitude* et de *complétude* répondent à cet objectif.

7.3.1.1.1 Indice de similitude

Un indice de similitude est introduit afin d'évaluer le degré de parenté morphologique entre chaque édifice thermal d'Afrique du Nord et le modèle *canonique* impérial romain tel que défini par Yvon Thébert (2003, p. 287-318). Le *modèle canonique* retenu correspond à une forme architecturale stabilisée des grands thermes impériaux romains, apparue à partir du I^er^ siècle ap. J.-C., et qui atteint sa forme « classique » sous les Flaviens et les Antonins (essentiellement sous Trajan et Hadrien). Il repose sur une organisation symétrique, une structuration axiale et une hiérarchisation fonctionnelle des espaces. Ce modèle, bien que diffusé à travers l'empire, « n'est jamais reproduit de façon fidèle » (Thébert, 2003, p. 309). Les variantes observées, notamment en Afrique, témoignent d'une appropriation locale, parfois marquée, de cette forme de référence, puisque « toutes les différences qui existent entre les bains de Carthage et les grands thermes de Rome doivent être attribuées, non pas à une différence de programme, de climat ou à des particularités régionales, mais seulement aux servitudes crées par les dimensions du terrain sur lequel le monument était bâti. L'architecte s'est inspiré des thermes de Rome pour l'essentiel de sa composition, s'écartant du prototype lorsqu'il ne lui était pas possible de faire autrement » (Lézine, 1968, p. 11).

Table 41 – Une grille raisonnée des caractéristiques des plans thermaux servant au calcul de l'indice de *similitude*. (établie par l'auteur)

indice	caractéristique	sous-indice	sous-caractéristique
a	type de bain		
b	séquence axiale		
c	symétrie		
d	dédoublement des espaces		
e	secteur chauffé	e1	orientation du *caldarium*
		e2	identification des principaux locaux chauffés (hors *caldarium*)
		e3	disposition du *caldarium*
		e4	forme du *caldarium*
		e5	nombre de bassins dans le *caldarium*

indice	caractéristique	sous-indice	sous-caractéristique
		e6	disposition de trois locaux : *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *sudatorium*
f	typologie du *frigidarium*	f1	ampleur du *frigidarium*
		f2	disposition du *frigidarium*
		f3	nombre de bassins dans le *frigidarium*
g	*palestre*	g1	forme géométrique de *palestre* (s'il existe)
		g2	nombre de *palestre* dans le plan
		g3	disposition de ou des *palestres*
h	*natatio*	h1	présence/absence
		h2	couverture : couvert/découvert
i	forme des autres façades de l'édifice (hors *caldarium*)		
j	grand axe visuel		
k	insertion du bloc balnéaire dans un immense *enclos*		

À partir de la synthèse proposée par Yvon Thébert (2003), les caractéristiques du modèle *canonique* ont été traduites sous forme d'un tableau typologique (*cf.* Table 42), où chaque critère fait l'objet d'un indice (*cf.* Table 41). Une attention particulière est accordée au *caldarium*, considéré comme « un des points cruciaux du bloc balnéaire », même en Afrique du Nord « la salle des bains chauds est un des points sur lesquels se concentre l'attention des architectes » (Thébert, 2003, p. 312).

Table 42 – Inventaire des caractéristiques du modèle *canonique* des thermes impériaux romains à Rome. (établie par l'auteure selon un examen des plans à disposition ; les travaux de Daniel Krencker (1929) et Yvon Thébert (2003))

indice	description des caractéristiques du modèle *canonique* (Rome)
a	dimensions généralement vastes, pouvant être classées en trois catégories : petites, moyennes ou grandes
b	organisation axiale marquée autour d'un axe longitudinal traversant les espaces principaux. La séquence complète suit l'ordre : *caldarium*, *tepidarium* de sortie, *frigidarium* et *natatio*, considérée comme « véritable colonne vertébrale » (Thébert, 2003, p. 308)
c	présence fréquente d'une symétrie bilatérale renforcée par le dédoublement des espaces, facilitant une circulation rationnelle
d	principe de dédoublement systématique, sauf pour les espaces centraux de la séquence axiale. Les autres espaces peuvent exister en double, placés en symétrie
e1	orientation du secteur chauffé généralement vers le sud-ouest
e2	le *caldarium* est précédé par trois espaces dans le circuit principal : un *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *sudatorium* ou *laconicum* ; parfois précédés d'un vestiaire « comme aux thermes de Néron, Caracalla et Dioclétien » (Thébert, 2003, p. 310)
e3	« dans tous les cas, le *caldarium* est disposé en avancée par rapport à l'alignement principal de la façade » (Thébert, 2003, p. 312)
e4	présence d'absides symétriques et renfoncements opposés rectangulaires ; parfois traités en rotondes à coupole comme « dans les thermes de Caracalla et de Constantin » (Thébert, 2003, p. 312)

e5	nombre élevé de bassins, jusqu'à sept dans les exemples les plus élaborés (Caracalla, Dioclétien)
e6	les trois locaux *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *sudatorium* « sont strictement alignés de part et d'autre de la salle des bains chauds » ce qui donne une disposition « rectiligne » (Thébert, 2003, p. 310)
f1	*frigidarium* de grande taille, souvent monumental
f2	espace central voûté avec bassins latéraux
f3	formule romaine de la typologie de *frigidarium* est : « un type quasiment unique s'est imposé, comportant quatre bassins logés dans les angles de la salle » (Thébert, 2003, p. 310)
g1	« leur plan, correspondant primitivement à un rectangle proche du carré (Néron, Titus) », qui « prend des proportions allongées dès la construction de Trajan» (Thébert, 2003, p. 313)
g2	« deux palestres dont le dédoublement contribue puissamment à ancrer l'édifice dans le monde de la symétrie. » , « seuls les bains de Constantin échappent à cette règle et disposaient, apparemment, d'une palestre unique placée sur l'axe principal du bâtiment et dont la forme semi-circulaire faisait écho, en l'amplifiant, à la saillie du *caldarium* » (Thébert, 2003, p. 313)
g3	emplacement évolutif : (1) d'abord flanquant la *natatio* (Néron), « le glissement des palestres sur le grand axe central du bâtiment et leur étirement en longueur permettent de créer un schéma en H dont le frigidarium constitue la traverse médiane » ; (2) puis le frigidarium, générant une meilleure composition et une circulation optimisée, « l'axe *caldarium-natatio* étant doublé par les itinéraires commandés par les palestres » (Thébert, 2003, p. 313)
h1	généralement située à l'entrée ou à proximité du *frigidarium*
h2	piscine à ciel ouvert (découvert)
i	« les autres façades sont totalement ou essentiellement rectilignes. » (Thébert, 2003, p. 312) (critère pertinent pour la prédiction de l'emprise au sol)
j	axe transversal traversant le *frigidarium*, distinct de l'axe de symétrie, structurant la progression fonctionnelle (Thébert, 2003, p. 311), sauf Constantin qui présente un axe fonctionnel et symétrie qui coïncident
k	inscription dans un enclos monumental structuré (palestres, portiques, jardins, espaces annexes), créant un complexe unifié et fermé, assimilable à une micro-cité du loisir (Thébert, 2003, p. 313)

Lorsque Yvon Thébert (2003) évoque le modèle *canonique*, il désigne une configuration stabilisée, cohérente et largement diffusée dans les provinces de l'empire, servant de référence pour analyser les variations locales, qui « se lit aussi dans le nombre de piscines » (Thébert, 2003, p. 313), aboutissant « à une solution dont nous ne connaissons d'exemples qu'en Afrique » (Thébert, 2003, p. 310). Un tableau de synthèse (*cf*. Table 43) permet de recenser les principales modalités d'adaptation observées dans les thermes d'Afrique du Nord. Il illustre la manière dont les contraintes locales ont été intégrées dans le processus de conception, donnant lieu à des solutions architecturales distinctes, mais inscrites dans la logique du modèle impérial.

Table 43 – Inventaire des caractéristiques des variantes africaines. (établie par l'auteure selon un examen des plans à disposition ; les travaux de Daniel Krencker (1929) et Yvon Thébert (2003))

indice	description des caractéristiques en Afrique du Nord
a	dimensions variées : petite, moyenne ou grande
b	« de nombreux bâtiments offrent une séquence complète, mais avec une *natatio* couverte se présentant comme un grand bassin dépendant du *frigidarium* » (Thébert, 2003, p. 308)
c	symétrie bilatérale généralement respectée, à l'exception de quelques cas particuliers
d	Principe de dédoublement maintenu : *caldarium*, *tepidarium* de sortie, *frigidarium* et *natatio*. Exemple particulier : aux thermes du camp à Lambèse, le *laconicum* et le *caldarium* sont partagés, les autres espaces sont dédoublés (Thébert, 2003, p. 308-309)
e1	orientation dominante vers le sud-ouest
e2	fidélité stricte au modèle : « tous les thermes de plan symétrique sont dotés des trois locaux canoniques » (un *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *laconicum* ou *sudatorium*). « Seuls les grands thermes Sud de Cuicul présentant une version extrêmement réduite du premier d'entre eux ». Et « les thermes d'Hadrien, à Lepcis Magna, n'offrent, dans leur état originel, que deux locaux » « Fidélité inventive » : « ces trois salles sont parfois précédées d'un local qui devait servir de vestiaire : Maktar, Caesarea » (Thébert, 2003, p. 310)
e3	« elle est presque systématiquement saillante, manifestant à l'extérieur l'axe principal de la composition » (Thébert, 2003, p. 312). Cela est logique dans les plans pyramidaux, où l'axe est structurant. Mais même dans les plans rectilignes, cette saillie est un choix affirmé, non imposé par le plan
e4	plans allant du rectangle strict à des compositions plus complexes ; bassins parfois à lignes courbes (Thébert, 2003, p. 313)
e5	nombre de bassins plus restreint que Rome : cinq à Carthage et dans les deux édifices de Lepcis Magna, trois dans les autres édifices africains, et même deux dans les thermes du capitole de Cuicul
e6	fidélité : (1) disposition rectiligne « le plan rectiligne est volontiers reproduit », « peut-être les thermes du capitole de Cuicul : en tout cas les grands thermes de Lambèse et ceux de Tubusuptu » ; ou bien Fidélité inventive : (2) « disposition orthogonale, le baigneur effectuant un virage à angle droit dans le *destrictarium* » ; (3) disposition en profondeur, de type pyramidal , d'où « les baigneurs, divisés en deux flots jamais très éloignés l'un de l'autre, sont invités à un parcours en profondeur » (Thébert, 2003, p. 310-311), favorisant un parcours axial unique
f1	*frigidarium* de type romain présent « à Carthage et, peut-être, Utique et même El Knissia, malgré les dimensions restreintes du bâtiment », « cette solution est encore retenue au IV^{e} siècle à Lepcis Magna » (Thébert, 2003, p. 310)
f2	pièce centrale. Cas particulier : les thermes du camp à Lambèse « ont ici en commun le *laconicum* et le *caldarium*, toutes les autres salles sont dédoublées, à commencer par le *frigidarium* » (Thébert, 2003, p. 308-309)
f3	une solution africaine du type de *frigidarium* : « réduire le nombre de bassins à deux, à les disposer symétriquement sur les petits côtés du *frigidarium*, et à les flanquer de petites pièces qui assurent des relations aisées avec les autres parties du bâtiment » (Thébert, 2003, p. 310)
g1	« le plan des palestres est un carré parfait. », « En imposant un étirement du grand axe du bloc balnéaire, il rendait difficile l'insertion d'espaces rectangulaires transversaux » (Thébert, 2003, p. 314)
g2	« en imposant un étirement du grand axe du bloc balnéaire, il rendait difficile l'insertion d'espaces rectangulaires transversaux ». « les thermes de Carthage constituent une exception remarquable. Ce sont les seuls à transcrire plusieurs des innovations révolutionnaires de la Ville. », « deux palestres alignées avec le *frigidarium* sur le grand axe du bâtiment et commandant des gymnases couverts. » (Thébert, 2003, p. 314)

g3	Il y a ceux dédoublés, d'autres selon un modèle alternatif africain s'affirme avec une palestre unique placée axialement (notamment à Lambèse), n'est pas systématique, il n'existe pas à Carthage, Cuicul, Thugga, ni sans doute à Utique, ou bien replacés par des gymnasiums
h1	deux configurations : (1) *natatio* présent, ceux qui respectent le modèle romain ; (2) ceux avec un *natatio* absent : la *solution africaine* est : lorsqu'il n'était pas possible de construire une grande piscine indépendante (*natatio*), les concepteurs ont intégré une grande piscine froide directement dans le *frigidarium*, à l'emplacement traditionnel de la *natatio*, pour compenser cette absence
h2	elle peut être : (1) couverte : généralement autour d'une centaine de mètres carrés (rarement plus (sauf exception comme Caesarea avec plus de 200m²) ; ou (2) découverte : (hypètre) : plus vaste, par exemple celle de Carthage (environ 300m²) ou Lepcis Magna (400m²)
i	généralement rectilignes
j	grand axe de circulation coïncidant parfois avec l'axe de symétrie, traversant l'édifice de part en part par la plupart des espaces
k	deux configurations : (1) composition fermée en enclos (*Carthage*, *Utique*), intégrant les palestres dans une cour organisée ; (2) plan ouvert sans enclos (Cuicul, Lambèse), palestres juxtaposées au bloc balnéaire, composition étirée (Thébert, 2003, p. 314-315)

D'après les caractéristiques dégagées des thermes nord-africain, un tableau comparatif synthétique (*cf*. Table 44) présente deux grandes logiques identifiées par Yvon Thébert (2003) : d'une part, les édifices de type « H », qui constituent des imitations cherchant à reproduire les grands thermes du modèle *canonique* ; d'autre part, les réalisations qui privilégient des solutions locales, étirées et adaptées, souvent en réponse à des contraintes de terrain, de ressources ou de programmes fonctionnels…

Table 44 – Tableau récapitulatif des caractéristiques de la typologie des thermes impériaux romains en Afrique du Nord selon deux grandes logiques : type « H » et solutions locales. (établie par l'auteure selon un examen des plans à disposition ; les travaux de Daniel Krencker (1929) et de Yvon Thébert (2003))

caractéristiques	thermes africains imitant les modèles romains (type H)	thermes africains à plan axial étiré (adaptation locale)
référence principale	thermes de Néron, Trajan, Caracalla (Rome)	relecture locale du modèle impérial
disposition générale	dédoublement symétrique des palestres	plan étiré axialement
nombre de palestres	deux (palestres dédoublées)	une seule palestre centrale
position des palestres	latérales, flanquant le bloc balnéaire	axiale, placée devant le bloc balnéaire
exemples	Carthage, Maktar, Cuicul (thermes du Capitole), Timgad	Lambèse (deux thermes), peut-être Caesarea, Cuicul (grands thermes Sud)
présence d'un enclos architectural complet	oui, composition structurée et refermée	non, bloc balnéaire précédé ou suivi par des espaces partiels
disposition du secteur chauffé	alignement ou en avancée par rapport à l'alignement principal de la façade	souvent en profondeur, accentuant l'axe
ambition monumentale	forte : volonté de reproduire les modèles de Rome, parfois en version réduite	adaptée à l'espace disponible, mais avec maintien de la symétrie

	caractéristiques du plan T2- Karthago : grands thermes d'Antonin, Carthage (Thébert, 2003, p. 141)	Interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme (taille autorisée)	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	parfaitement symétrique	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	nord-ouest	≠ sud-ouest → variante proche	
e2	fidélité inventive , et les trois salles sont précédées d'un local qui devait servir de vestiaire	≠ stricte, mais adaptation inventive	
e3	en avancée par rapport à la façade	conforme	
e4	forme octogonale	≠ canonique (rectangle/absides) → variante	
e5	cinq	conforme (dans la fourchette haute)	
e6	fidélité stricte au modèle	conforme	
f1	très vaste (1 034 m²)	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	formule romaine de typologie de *frigidarium* est appliquée	conforme	
g1	carrée	conforme (forme classique)	
g2	dédoublé	conforme	
g3	flanquant le *frigidarium*	conforme (modèle Néron/Trajan)	
h1	découverte	conforme (*natatio* à ciel ouvert)	
h2	présent (coté mer)	conforme	
i	rectiligne dans certains côtés, avec des formes géométriques variées (octogone, hexagone..) à coté du secteur chauffé	conforme	
j	formule romaine : un grand axe transversal passant par la salle des bains froids et qui traverse tout le monument	conforme	
k	dans un enclos	conforme	

Fig. 121 – Fiche comparative des thermes d'Antonin à Carthage T2. (établie par l'auteure)

À l'issue de cette étude, il est possible d'établir des fiches comparatives, dont un exemple de T2 est placé ici (*cf*. Fig. 121), et l'ensemble sont en annexes (*cf*. Fiches comparatives des thermes impériaux romains), en adoptant un code visuel unifié pour leur lecture. La légende (*cf*. Fig. 122) repose sur une gamme chromatique permettant d'identifier les fonctions des espaces selon une classification homogène, facilitant ainsi la comparaison typologique entre les édifices du corpus.

L'indice de *similitude* permet d'évaluer dans quelle mesure un édifice thermal reproduit les caractéristiques définies dans le modèle *canonique* romain. Le calcul (*cf*. Table 45) s'appuie sur la grille raisonnée établie précédemment, composée de 21 critères, choisis comme pertinents à la configuration des thermes impériaux. À chaque édifice est attribuée une note en fonction de son degré de conformité à ce modèle : une caractéristique pleinement conforme = 1 point ; une variante proche, interprétée comme une adaptation partielle ou africaine du modèle = 0,5 point ; une caractéristique absente, contraire ou divergente = 0 ; enfin, non documenté, information manquante = N/A. L'indice de similitude est obtenu en rapportant la somme des scores obtenus par un édifice au nombre de critères effectivement renseignés. Les critères non documentés ne sont pas intégrés dans le dénominateur, car leur absence dans les sources ne signifie pas nécessairement qu'ils sont absents de l'édifice. Ils peuvent simplement ne pas avoir été conservés, fouillés, identifiés ou mentionnés par les auteurs. Par exemple, pour un plan comportant 14 critères renseignés sur les 21 de la grille, et un total de valeurs attribuées égal à 10,5, l'indice est de 10,5 / 14 ≈ 0,75. Les notes attribuées reposent sur une évaluation raisonnée mais approximative, fondée principalement sur les travaux d'Yvon Thébert (2003). Il est possible que certaines fouilles récentes fournissent des données complémentaires non accessibles lors de cette analyse. C'est pourquoi les informations absentes sont traitées de manière prudente afin de ne pas fausser l'évaluation globale de l'édifice Ceci garantit un traitement cohérent du corpus, sans pénaliser les plans partiellement documentés.

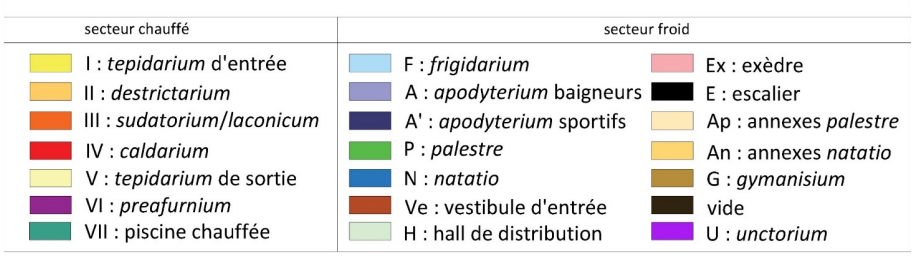


Fig. 122 – Légende des espaces architecturaux pour les fiches comparatives des plans des thermes impériaux romains en Afrique du Nord. (établie par l'auteure)

Table 45 – Tableau de calcul de l'indice de similitude pour les thermes impériaux romains en Afrique du Nord. (établie par l'auteure)

critères	a	b	c	d	e1	e2	e3	e4	e5	e6	f1	f2	f3	g1	g2	g3	h1	h2	i	j	k	total	Indice similitude
T1	1	0,5	1	1	0,5	1	0	1	0,5	0,5	1	1	1	N/A	N/A	N/A	0,5	0	1	1	N/A	12,5	0,735
T2	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19,5	0,929
T3	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	1	1	1	0,5	0	1	1	0	16,0	0,762
T4	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	N/A	N/A	N/A	0,5	0	N/A	N/A	N/A	9,5	0,633
T5	1	0,5	0,5	1	0,5	1	Na	0	N/A	0,5	1	1	1	N/A	N/A	N/A	0,5	0	1	1	N/A	10,5	0,700
T6	1	0,5	0,5	1	0,5	1	0	Na	0,5	0,5	1	1	0,5	N/A	N/A	N/A	1	0	1	1	0	11,0	0,647
T7	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	0	0	N/A	1	1	0,5	16,0	0,800
T8	1	1	1	1	0,5	1	1	1	0,5	0,5	N/A	0,5	N/A	N/A	N/A	N/A	0,5	0	N/A	1	N/A	10,5	0,750
T9	1	0,5	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	N/A	0,5	1	0,5	0	1	1	0,5	15,5	0,775
T10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T11	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	6,5	0,650
T12	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	1	1	1	0,5	N/A	0.5	1	0,5	0	1	1	0	14,5	0,763
T13	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	1	1	0,5	0	0,5	1	0	15,5	0,738
T14	1	1	1	1	0	1	1	1	0,5	1	1	1	1	N/A	0	N/A	0	N/A	1	1	0	13,5	0,750
T15	1	0,5	1	1	0,5	1	0	1	0,5	0,5	1	1	0,5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1	1	12,5	0,781
T16	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1	1	0,5	1	0,5	1	0	N/A	1	1	0	16,5	0,825
T17	1	0	1	0	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0	0,5	1	0,5	1	0	N/A	1	1	0	13,0	0,650
T18	1	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	1	1	0	N/A	N/A	N/A	0,5	0	1	1	N/A	12,5	0,735
T19	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	N/A	N/A	0,5	0	0,5	1	0,5	15,0	0,789
T20	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0	1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	N/A	N/A	0,5	0	0,5	1	0,5	11,5	0,605
T21	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	1	1	0,5	1	0,5	1	1	1	1	1	0,5	19,0	0,905
T23	1	1	1	1	0,5	1	1	0,5	1	0,5	1	1	1	0,5	0,5	N/A	1	0	1	1	0,5	16,0	0,800

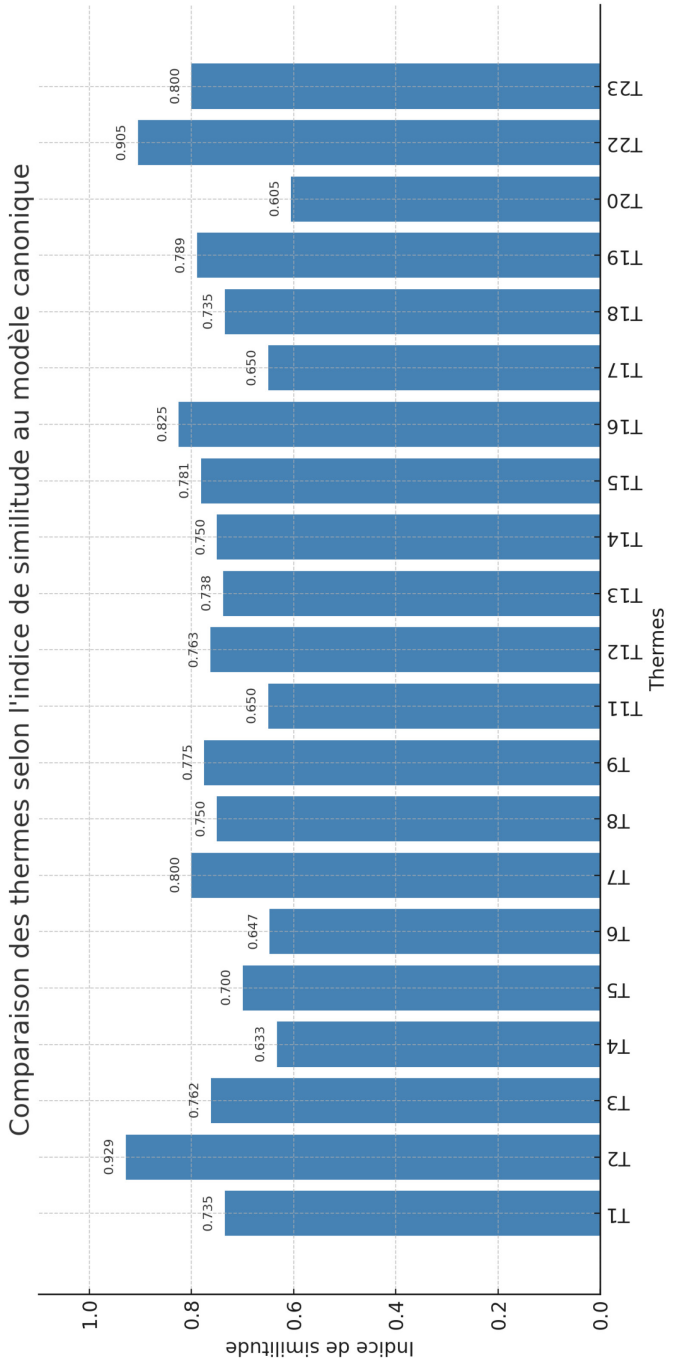


Fig. 123 – Histogramme présentant une comparaison des thermes impériaux romains, d'Afrique du Nord, selon l'indice de similitude au modèle *canonique*. (établie par l'auteure)

Le plan des thermes du Camp à Lambèse (T17), constitue une variante rare dans l'architecture thermale romaine : « les salles sont disposées selon un plan symétrique présentant cependant des particularités remarquables. L'axe central n'est pas formé par l'alignement des *caldarium*, *tepidarium* de sortie et *frigidarium*, mais par le *caldarium* et le *laconicum*. Il en résulte un dédoublement inhabituel du *frigidarium* et du *tepidarium* de sortie, tandis que, inversement, le *laconicum* est unique » (Thébert, 2003, p. 210). Ce dispositif suggère une volonté de renforcer la symétrie selon une logique propre, probablement en lien avec une gestion raisonnée des flux, peut-être en rapport avec le caractère militaire du site, sans qu'aucune fonction précise n'ait pu être identifiée à ce jour. Ce plan s'inscrit dans une époque (probablement sous Hadrien) où le modèle des grands thermes impériaux est déjà clairement établi, notamment dans les complexes de Carthage ou de Lepcis Magna. Sa divergence par rapport au modèle *canonique* relève probablement d'une logique de composition volontaire, comme le souligne Yvon Thébert (2003, p. 311), « toute l'organisation spatiale de l'édifice, et la façon dont il s'offre à la circulation du baigneur, en sont profondément modifiées. Cette remarque ne nous paraît pas relever d'une approche abstraite des plans, mais bel et bien d'une réelle diversité de sensations que ces choix architecturaux différents offraient à l'utilisateur ». À l'intérieur des thermes, « parvenus dans la salle des bains chauds, qui est unique, les baigneurs doivent donc en ressortir en se divisant à nouveau en deux groupes et en revenant sur leurs pas » (Thébert, 2003, p. 309).

Ces configurations singulières peuvent être interprétées comme des diagrammes critiques : elles révèlent les limites structurelles du modèle en rendant visibles ses marges d'erreur ou ses zones d'indétermination. Même lorsqu'un algorithme parvient à prédire une complétion spatialement cohérente et fonctionnellement plausible d'un plan thermal, cette réussite doit être confrontée à l'hétérogénéité inhérente au corpus. Celle-ci s'explique par la diversité des situations de conservation, la variabilité des fonctions associées aux établissements, les disparités géographiques, ou encore les écarts de documentation selon les sites. Ces cas limites ne constituent donc pas des anomalies à écarter, mais des contre-exemples méthodologiques qui permettent de circonscrire le périmètre de validité des prédictions produites. Ils invitent à penser la généralisation non comme une extrapolation indéfinie, mais comme une opération conditionnée par des paramètres de cohérence et de représentativité.

7.3.1.1.2 Indice de complétude

En complément de l'indice de *similitude*, un indice de *complétude* est défini, pour une classification plus nuancée du corpus, adaptée aux objectifs d'exploitation différenciée selon les besoins analytiques. Cette mesure permet de quantifier la part conservée ou reconstituable de chaque plan thermal par rapport à son emprise totale estimée. Compte tenu des incertitudes liées à la précision des surfaces, souvent qualifiées par Yvon Thébert (2003, p. 305) d'« ampleur approximative » et de l'impossibilité, selon lui, de « connaître la superficie exacte de ces constructions, soit que les vestiges en soient imparfaitement conservés ou dégagés, soit que nous ne disposions

pas de relevés d'une qualité suffisante », l'estimation s'appuie sur des hypothèses fondées sur des analogies typologiques ou morphologiques.

La méthode adoptée repose sur une comparaison, pour chaque édifice, entre les espaces identifiés et ceux définis dans le programme minimal (*cf*. Fig. 124), dérivé du programme global des thermes impériaux romains (*cf*. Table 48). Ce programme, établi à partir d'un raisonnement (Thébert, 2003) (*cf*. Table 46) fondé sur la double logique Rome/Afrique du Nord permet de restreindre le calcul à une série de composants considérés comme *essentiels*. Ces composants élémentaires, attendus dans tout plan thermal de la collection, sont jugés indispensables à la fonction des thermes et à la structuration de leur organisation spatiale.

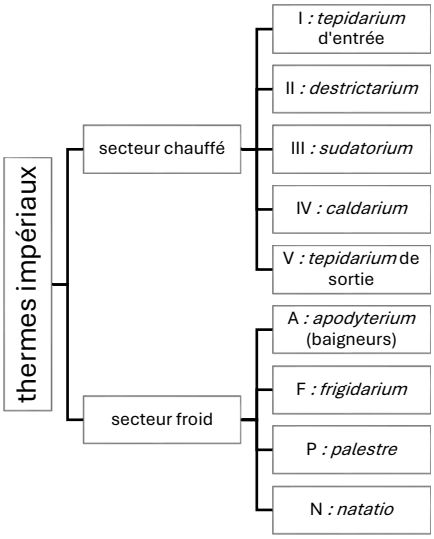


Fig. 124 – Les composants élémentaires minimaux des thermes impériaux romains à Rome et en Tunisie. (établie par l'auteure)

Trois critères guident la sélection de ces espaces : (1) leur rôle structurant dans la logique spatiale des thermes, notamment dans le parcours thermique et l'agencement symétrique ; (2) leur capacité à garantir une lecture fonctionnelle du plan ; (3) leur compatibilité avec les deux grandes variantes géographiques du modèle impérial. Pour qu'un édifice thermal soit jugé exploitable dans le cadre de l'apprentissage automatique, il doit donc comporter l'ensemble des espaces assurant la séquence fonctionnelle minimale complète, c'est-à-dire les lieux de passage obligés du baigneur selon la typologie impériale. La liste finale (*cf*. Fig. 124) retient 9 composants fondamentaux, présents tant dans le modèle romain que dans sa déclinaison nord-africaine, même si des variantes morphologiques apparaissent.

Table 46 – Justification du choix des composants élémentaires indispensables au fonctionnement des thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome. (établi par l'auteure)

indice	espace	secteur	indispensable ?	justification
I	*tepidarium* d'entrée	chauffé	oui	partie du triplet *canonique* (e2, e6)
II	*destrictarium*	chauffé	oui	partie du triplet *canonique* (e2, e6)
III	*sudatorium* / *laconicum*	chauffé	oui	partie du triplet *canonique* (e2, e6)
IV	*caldarium*	chauffé	oui	cœur du secteur chauffé (e3, e4, e5)
V	*tepidarium* de sortie	chauffé	oui	partie de la séquence *canonique* (b)
VI	*praefurnium*	chauffé	non	non systématique, peu documenté, secondaire
VII	piscine chauffée	chauffé	non	variante ou équipement interne au *caldarium*
Ve	vestibule d'entrée	froid	non	non structurant, peu fréquent
A	*apodyterium* (baigneurs)	froid	oui	espace de passage clé, présent dans e2 ou k
A'	*apodyterium* (sportifs)	froid	non	spécifique à certaines variantes, redondant avec A
U	*unctorium*	froid	non	rarement mentionné, non structurant
F	*frigidarium*	froid	oui	partie centrale de la séquence (f1–f3)
P	*palestre*	froid	oui	élément central pour la symétrie et le dédoublement (g1–g3)
G	*gymnasium*	froid	non	variante ou équivalent fonctionnel secondaire de la palestre
N	*natatio*	froid	oui	élément terminal de la séquence (b, h1–h2)
Ex	exèdre	—	non	élément décoratif ou secondaire, peu fréquent
H	hall de distribution	froid	non	rarement mentionné, rôle logistique marginal
E	escalier	—	non	élément structurel secondaire, pas lié à la fonction
Ap	annexe (*palestre*)	—	non	souvent redondant avec A ou Ve
An	annexe (*natatio*)	—	non	trop spécifique, non structurant

Une grille d'analyse uniforme (*cf*. Table 47), utilisant la même légende proposée par Yvon Thébert (2003) (*cf*. Table 48), des chiffres romains pour les salles chauffées et des lettres pour les salles froides, a été appliquée à l'ensemble du corpus. Pour justifier la réduction du calcul de l'indice de complétude à un programme minimal, une vérification est menée sur la présence ou l'absence de chacun des 19 espaces définis dans le programme global, aussi bien dans les plans d'Afrique du Nord que dans ceux de Rome. Chaque composant élémentaire reçoit une notation (*cf*. Table 49) : présence confirmée (*) = 1 point ; présence partielle ou incertaine (+-) = 0,5 point ; et absence ou non identification (-) = 0 point. Cette analyse met en évidence que les écarts de complétude concernent principalement les espaces non essentiels, représentés dans les cases grisées. Ce constat confirme la pertinence d'un calcul restreint aux espaces indispensables, identifiés dans les cases blanches de la grille, réduisant le nombre d'éléments considérés à 9 seulement.

Table 47 – Analyse de la présence des espaces thermaux dans les différents plans des thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome. (*) : présent ; (+-) : présence incertaine ou partielle ; (-) : non identifié ou absent. (établie par l'auteure)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	Ve	A	F	P	G	N	Ex	U	H	E	Ap	An
T1	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	-	*	-	-	-	-	*	-	-
T2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	*	*	*	*
T3	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	-	*	*	-	*	*	*	-
T4	-	+-	-	+-	+-	-	-	-	-	+-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T5	*	*	-	-	*	-	-	-	*	*	*	*	*	-	-	*	-	-	-
T6	*	*	*	+-	*	-	-	-	*	+-	-	*	-	*	-	-	-	-	-
T7	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	-	-	*	-	*	*	*	-
T8	+-	+-	*	*	+-	-	-	-	-	+-	-	-	-	-	-	-	*	-	-
T9	*	*	*	*	*	-	-	-	-	*	+-	-	*	-	-	-	*	-	-
T10	plan non disponible																		
T11	-	-	-	+-	+-	*	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
T12	*	*	*	*	*	-	-	-	*	*	-	*	*	-	-	-		-	-
T13	*	*	*	*	*	-	-	-	*	*	*	*	*	-	-	-	*	-	-
T14	*	*	*	*	*	-	-	-	-	*	-	*	-	-	-	-	-	-	-
T15	*	*	*	*	*	-	-	-	-	*	-		-	-	-	-	-	-	-
T16	*	*	*	*	*	-	-	-	*	*	*	*	-	-	-	-	*	-	-
T17	*	*	*	*	*	-	-	-	*	*	-		-	-	-	-	*	-	-
T18	*	*	*	*	*	-	-	-	*	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
T19	*	*	*	*	*	-	-	-	*	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
T20	-	-	-	*	*	-	-	-	-	*	-		*	-	-	-	-	-	-
T21	plan non disponible																		
T22	*	*	*	*	*	-	-	-	-	*	*	-	*	-	-	*	-	-	-
T23	*	*	*	*	*	-	-	-	-	*	-	*	*	-	-	-	-	-	-
T24	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	-
T25	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	-	*	-	-	-	*	-	-
T26	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	-	*	*	-	-
T27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-
T28	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	-
T29	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	*

Table 48 – Légende commune à tous les thermes romains étudiés dans la thèse. (établie par l'auteure)

indice	I	II	III	IV	V	VI	VII	Ve	A	A'	U	F	P	G	N	Ex	H	E	Ap	An
espace	tepidarium d' entrée	destrictarium	sudatorim/laconicum	caldarium	tepidarium de sortie	praefurnium	piscine chauffée	vestibule d' entrée	apodyterium (pour les baigneurs)	apodyterium (pour les sportifs)	unctorium	frigidarium	palestre	gymnasium	natatio	exèdre	hall de distribution	escalier	annexe (palestre)	annexe (natatio)
secteur	secteur chauffé							secteur froid												

Table 49 – Tableau de calcul de l'indice de complétude pour les thermes impériaux romains en Afrique du Nord. (établie par l'auteure)

composants	I	II	III	IV	V	A	F	P	N	total	Indice de complétude
T1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	7	0,78
T2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T4	0	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	0	0	2	0,22
T5	1	1	0	0	1	1	1	1	1	7	0,78
T6	1	1	1	0,5	1	1	0,5	0	0	6	0,67
T7	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8	0,89
T8	0,5	0,5	1	1	0,5	0	0,5	0	0	4	0,44
T9	1	1	1	1	1	0	1	0,5	1	7,5	0,83
T10	plan non disponible										
T11	0	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	1	0,11
T12	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8	0,89
T13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T14	1	1	1	1	1	0	1	0	0	6	0,67
T15	1	1	1	1	1	0	1	0	0	6	0,67
T16	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8	0,89
T17	1	1	1	1	1	1	1	0	0	7	0,78
T18	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8	0,89
T19	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8	0,89
T20	0	0	0	1	1	0	1	0	1	4	0,44
T21	plan non disponible										
T22	1	1	1	1	1	0	1	1	1	8	0,89
T23	1	1	1	1	1	0	1	0	1	7	0,78
T24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1
T29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1

L'indice de *complétude (cf.* Fig. 125), dit *minimal*, est ainsi défini comme un ratio (n/9), produisant une valeur comprise entre 0 et 1, et permettant de sélectionner les plans les plus complets en vue des analyses et des modélisations ultérieures. Dans cette évaluation, les édifices de Rome constituent les références les plus complètes, « puisque c'est à Rome, dans un contexte tout à fait particulier, qu'est élaboré dans sa plénitude le bâtiment thermal de type impérial » (Thébert, 2003, p. 305).

L'indice ainsi calculé permet d'ajuster la pondération de chaque plan dans les analyses globales. Un édifice présentant un haut degré de complétude est valorisé en tant que référence fiable, tandis qu'un plan très lacunaire est considéré avec plus de précaution, voire exclu de certaines opérations statistiques.

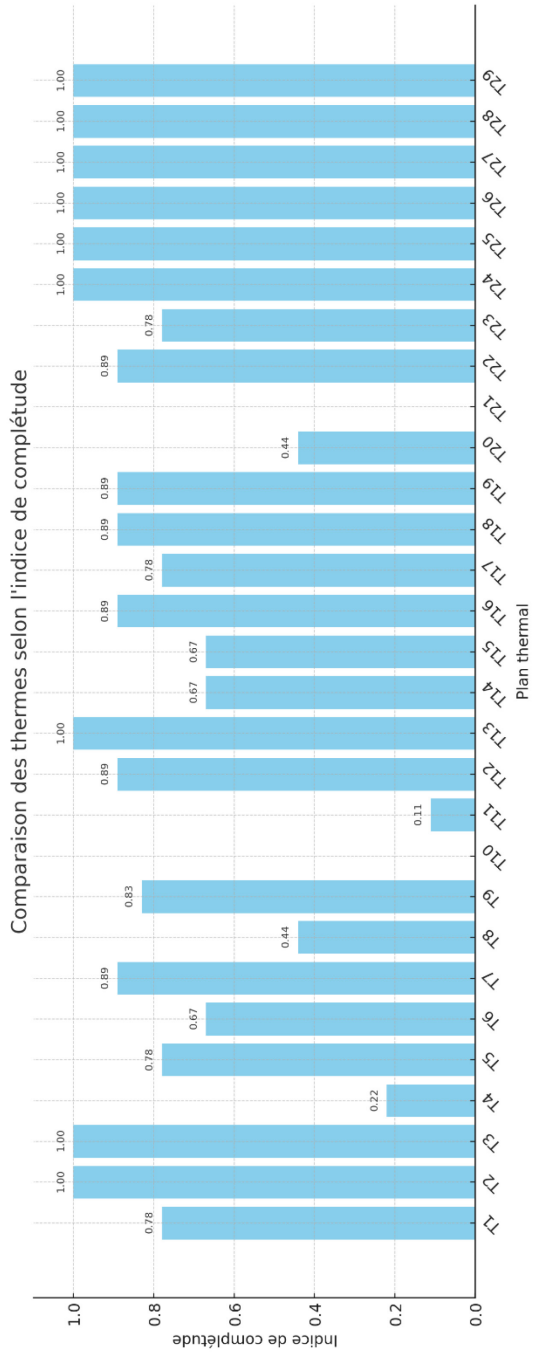


Fig. 125 – Histogramme présentant une comparaison des thermes impériaux romains selon l'indice de *complétude*. (établie par l'auteure)

7.3.1.1.3 Interprétation

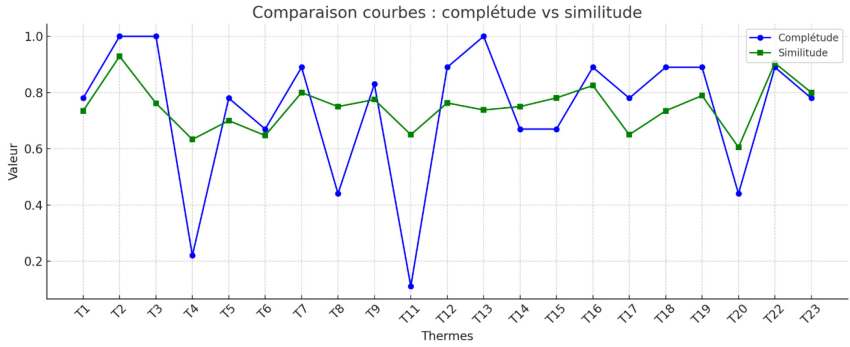
Pour chaque plan thermal, deux indices ont été définis afin de guider leur exploitation dans le cadre du processus de rétroconception. Le premier est un indice de similitude (*cf*. Fig. 123, p.194), évalue le degré de conformité morphologique d'un édifice par rapport au modèle *canonique* des thermes impériaux romains, tel que défini par Yvon Thébert (2003). Le second, l'indice complétude (*cf*. Fig. 125, p.200), qui mesure la quantité d'informations disponibles dans le plan redessiné, sous forme d'une mesure strictement documentaire, indépendamment de toute évaluation architecturale. Ces deux indices constituent les fondements d'une double évaluation, destinée à orienter l'intégration des plans dans les différentes étapes de traitement. Pour cela, deux seuils ont été définis sur la base de l'analyse des moyennes observés dans les histogrammes : (1) indice de similitude >= 0,60 ; (2) indice de complétude >= 0,80. Ces valeurs, issues d'une réflexion croisée entre pertinence morphologique et disponibilité des données, permettent d'établir une *matrice décisionnelle* à quatre entrées, distinguant les plans complets et conformes ; complets mais atypiques ; partiels mais canoniques ; et partiels et atypiques (*cf*. Table 50).

Table 50 – Matrice décisionnelle entre similitude et complétude des thermes impériaux romains. (établie par l'auteure)

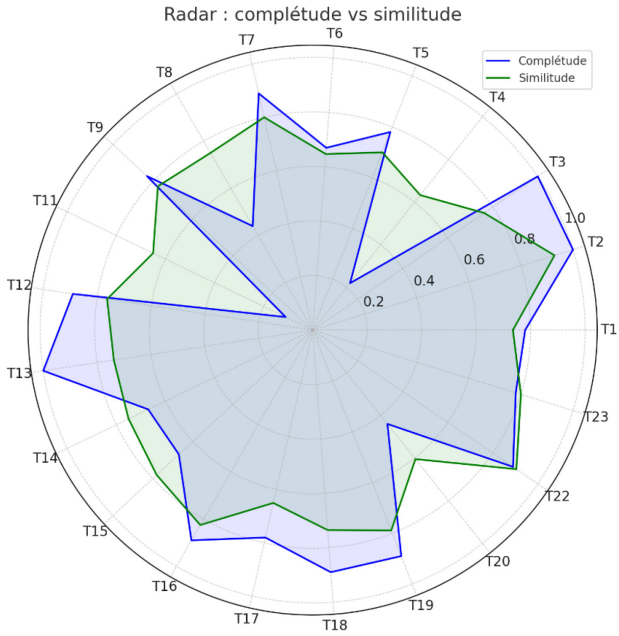
		similitude	
complétude	matrice	haute >= 0,60	basse < 0,60
	haute >= 0,80	plans complets et canoniques	plans complets mais atypiques
	basse < 0,80	plans partiels mais canoniques	plans partiels et atypiques

Certaines variations constatées dans l'organisation spatiales des thermes, comme la fusion de certaines salles, la suppression de la *natatio*, ou le dédoublement partiel d'espaces, ne relèvent pas d'une ignorance du modèle impérial, mais « d'une réflexion destinée à adapter le modèle canonique à un espace restreint » (Thébert, 2003, p. 310). À l'image du plan des thermes du Camp à Lambèse (T17), un score de 0,65 peut être attribué en raison de la conformité à plusieurs critères, bien que ceux-ci ne soient pas exclusivement liés à l'organisation axiale, ce qui reflète la complexité et la nuance de l'évaluation malgré la singularité de l'édifice.

L'indice de similitude ne traduit pas une stricte fidélité structurelle, mais un degré global d'adhésion à plusieurs caractéristiques *canoniques*, pondérées de manière équivalente. Ces édifices ne sont volontairement pas intégrés aux calculs automatisés afin de ne pas introduire de *biais* susceptibles d'altérer les résultats globaux. Toutefois, leur exclusion du traitement algorithmique ne les rend pas inopérantes, mais offrent aux archéologues un point de comparaison critique. Confrontés aux résultats produits par le modèle, ces cas particuliers peuvent être mobilisés comme des leviers d'interprétation ou des occasions de remise en question des hypothèses implicites. En ce sens, les situations singulières participent activement à une réflexion sur la relativité des résultats, en soulignant que les régularités statistiques identifiées par l'algorithme n'épuisent pas la complexité du réel.



(a)



(b)

Fig. 126 – Schémas d'interprétation des résultats de deux indices de similitude et de complétude sous forme de : (a) courbe et (b)radar en toile d'araignée (b) (cas des thermes impériaux romains en Afrique du Nord). (établie par l'auteure)

La combinaison de l'indice de complétude avec une mesure de similitude morphologique entre les plans permet d'affiner la sélection des édifices à intégrer dans le traitement. Ce travail préparatoire vise à assurer la robustesse des résultats produits, tout en maintenant une posture réflexive face aux écarts révélés par les cas exceptionnels. Chaque plan thermal peut ainsi être positionné à partir d'une double métadonnée, *complétude* et *similitude*, qui est représentée graphiquement sous différentes formes : nuage de points, courbes comparatives ou diagrammes radiaux en toile d'araignée (*cf*. Fig. 126, Fig. 127).

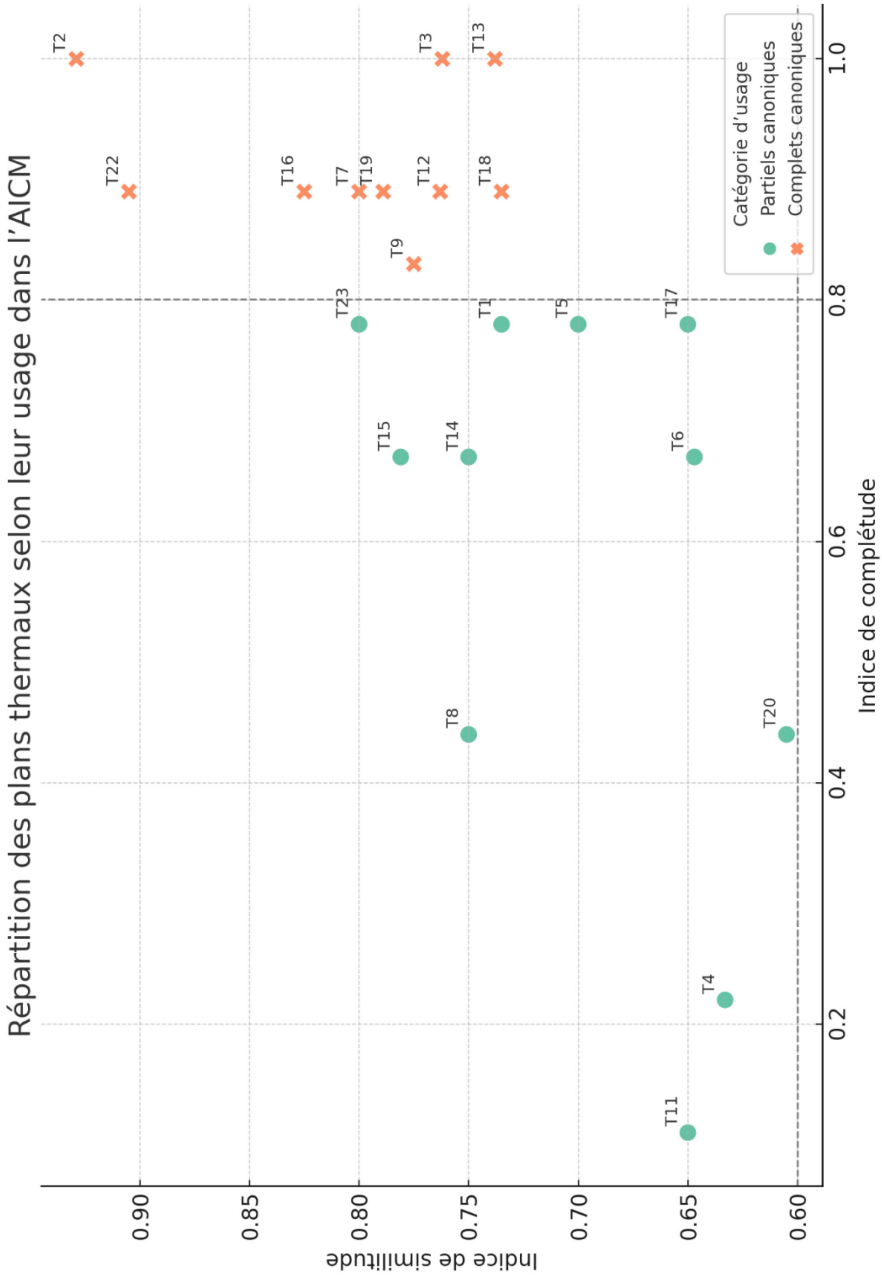


Fig. 127 – Répartition des plans thermaux selon leur usage dans l'AICM. Schéma en nuage de point. (établie par l'auteure)

Table 51 – Tableau des usages recommandés des plans des thermes impériaux romains dans le processus de la rétroconception. (établie par l'auteure)

étape			rôle	usage recommandé des plans
constitution du PDSM			constitue à la fois une archive numérique hiérarchisée et un référentiel d'apprentissage pour l'AICM	tous les plans disponibles de la collection (T1 à T29) sont modélisés avec leurs caractéristiques paramétriques (polylignes, surfaces, orientation…) et deux scores de similitude et de complétude
constitution de l' AICM	phase A, B, C		pour sélectionner le modèle d'apprentissage le plus convenable	- plans complets et canoniques : pour identifier le meilleur modèle d'apprentissage - plans complets mais atypiques : pour apprendre des variations locales
	phase D : inférence causale	test	tester le modèle choisi sur des nouvelles données	plans partiels mais canoniques : pour tester la robustesse du modèle
		évaluation	évaluer les prédictions pour ajuster le modèle AICM	plans partiels et atypiques : pour mesurer la capacité généralisante du modèle

7.3.1.2 Nettoyage et décomposition des plans

Cette phase combine un travail de nettoyage et d'organisation des plans. Tous les éléments non pertinents pour l'analyse paramétrique sont supprimés, notamment les annotations, les hachures, les décors ou objets sans utilité dans le processus *intelligent*. Seuls demeurent les éléments architecturaux structurants : les parois, les espaces fonctionnels (*caldarium*, *frigidarium*…) et l'emprise au sol, définissant clairement la distinction entre *plein* et *vide*, conformément au postulat du lieu architectural (Dhouib, 2004). Une décomposition fonctionnelle est ensuite appliquée à l'ensemble du corpus, en répartissant chaque plan sur des calques distincts, affectés à un type d'espace donné. Cette structuration par calque facilite l'interprétation et l'exploitation paramétrique des plans. Les éléments secondaires intégrés aux murs, comme les niches ou ouvertures, ne sont pas considérés comme des entités autonomes. L'hypothèse retenue repose sur l'idée qu'« un milieu fluide habitable, support des pratiques, engendre les parois » (Dhouib, 2004, p. 84), ce qui implique une approche partant du *vide* pour définir ensuite le *plein*.

La décomposition des plans se concentre sur l'espace intérieur des salles de chaque édifice thermal. Chaque pièce est délimitée par une polyligne fermée, selon une logique de codification distinguant l'« enveloppe physique » du « milieu fluide habitable ». Une hiérarchisation des calques (*cf*. Fig. 128) est réalisée en mobilisant une gamme de couleurs nuancées, allant des secteurs chauffés vers les secteurs froids. Deux calques supplémentaires sont définis : l'un pour l'emprise au sol, l'autre pour l'axe de symétrie. Un calque est également réservé aux polylignes vides, ne correspondant à aucune fonction identifiée, ainsi qu'un autre, « espace inconnu »,

pour les espaces dont la vocation demeure incertaine. Cette organisation hiérarchique permet de convertir les plans de leur état initial (*cf*. Fig. 129) vers une version organisée, jugée prête à être intégrée dans le PDSM (*cf*. Fig. 130).

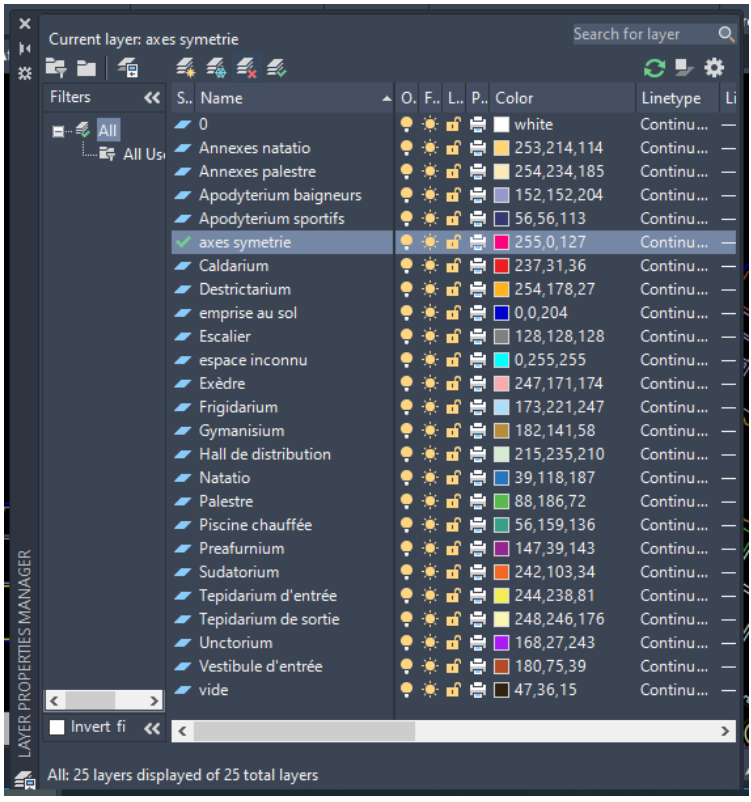


Fig. 128 – Charte des calques élaborée sur AutoCAD pour la préparation des plans en vue de leur implémentation dans le PDSM. (établie par l'auteure)

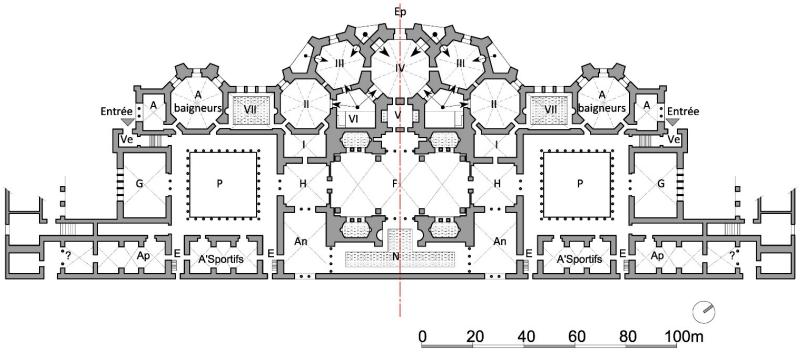


Fig. 129 – Plan initial des thermes impériaux romains d'Antonin, à Carthage. (établie par l'auteure)

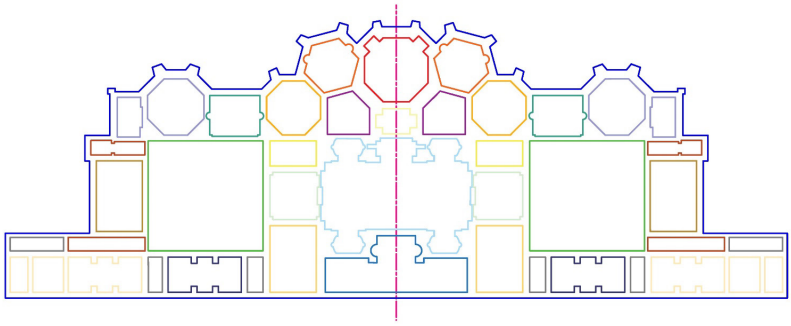


Fig. 130 – Représentation du plan préparé à la modélisation du PDSM. Cas des thermes impériaux romains d'Antonin, à Carthage. (établie par l'auteure)

7.3.2 Inventaire de jeu de données de calcul : attribut

La préparation des plans ne se limite pas à leur numérisation ou à leur vectorisation ; elle implique également une standardisation paramétrique visant à extraire, classifier et formaliser les caractéristiques quantitatives et qualitatives des éléments constitutifs des thermes. Cette étape conditionne la compatibilité des données avec les exigences des deux modèles développés dans la thèse : le PDSM et l'AICM.

Dans une perspective méthodologique complémentaire, l'analyse conduite par Karim Bouaita (2015) sur les thermes impériaux en Tunisie et à Rome (*cf*. Table 52), initialement séparée puis poursuivie dans une approche comparative, a permis de dégager des régularités de composition architecturale entre les deux contextes. Son étude, fondée sur des outils issus du paradigme structural (Dhouib, 2004), identifie notamment des correspondances formelles dans certaines structures thermales. Les modalités d'application des outils, croisés avec les caractéristiques issues du modèle *canonique* impérial romain (Thébert, 2003) et les logiques de fidélité inventive propres à l'Afrique du Nord, sont ici retenues comme pistes d'enrichissement de la sélection des types d'attributs paramétriques.

Un paramètre fondamental dans l'extraction des attributs nécessaires à la caractérisation des thermes réside dans la définition précise des objectifs assignés à chaque sous-modèle du dispositif AICM. En amont de toute extraction, une anticipation des besoins liés aux différentes phases du modèle a été réalisée sous forme de tableau récapitulatif (*cf*. Table 53). Ce tableau associe à chaque sous-modèle son objectif propre ; les types d'attributs requis, qu'ils soient issus du plan global, des secteurs fonctionnels ou des composants élémentaires ; les outputs attendus ; ainsi que des exemples concrets de données mobilisées pour l'entraînement.

Table 52 – Les modalités d'application des outils du paradigme structural. (d'après la thèse de Karim Bouaita (2015))

outils de paradigme structural		modalités d'application
décomposition par matrice d'incidence		l'analyse des thermes s'appuie sur une structure arborescente, fondée sur une décomposition hiérarchique en deux grandes unités fonctionnelles : le secteur froid et le secteur chauffé. Chacune de ces unités se subdivise en composants élémentaires. À partir de cette organisation, il est possible de dégager une logique spatiale cohérente des espaces
fréquence des composants élémentaires		la définition des composants élémentaires minimaux repose sur l'analyse de leur fréquence d'apparition dans les plans les plus complets du corpus, qu'ils soient représentés par un exemplaire unique ou par une double occurrence. Cette vérification permet de dégager un programme minimal, considéré comme commun à l'ensemble des thermes impériaux romains, en Tunisie comme à Rome
niveau géométrique d'ordonnancement		un tableau est élaboré pour les thermes présentant un état de conservation complet, comprenant les éléments suivants : (1) le nombre de composants élémentaires ; (2) les dimensions (longueur et largeur) ; (3) la surface utile mesurée ; (4) l'orientation. À partir de ces données, plusieurs rapports et proportions sont dégagés, tant au niveau de la répartition entre les différents secteurs qu'à celui des composants élémentaires. Ces mesures permettent également de mettre en évidence des tendances récurrentes dans la configuration des formes englobantes, définies en fonction de la surface bâtie
niveau physique de matérialité	quantité de matière	le calcul de la surface totale des parois de chaque édifice permet d'estimer la quantité de matière mobilisée en rapport avec la surface utile
	épaisseur des parois	l'analyse comparée des épaisseurs des parois relevées dans chaque plan thermal vise à dégager d'éventuelles régularités dans le choix des dimensions murales

Il est important de souligner que la complexité d'un modèle est étroitement liée à la variété des entrées présentes dans l'ensemble d'entraînement : plus cet ensemble contient de données diversifiées, plus il est possible d'utiliser un modèle complexe sans risquer le surapprentissage (« Machine Learning | Google for Developers », 2025). En général, l'augmentation du nombre de données permet d'obtenir une plus grande diversité, ce qui autorise la construction de modèles plus élaborés. En revanche, dupliquer les mêmes données ou recueillir des données très similaires ne sera d'aucune utilité (Müller & Guido, 2016, p. 29). Un tableau d'inventaire (*cf*. Table 54) des attributs est établi afin de cartographier les types de données susceptibles d'être extraits de l'analyse des thermes, en identifiant les caractéristiques mesurables (*features*), les modalités de calcul associées. L'organisation de cet inventaire repose sur une hiérarchie structurée : le plan est abordé dans son ensemble, puis décomposé en secteurs fonctionnels intermédiaires, jusqu'aux composants élémentaires. Cette structuration permet de distinguer les données quantitatives directement exploitables des données qualitatives, qui requièrent un traitement en vue de leur quantification.

Table 53– Compréhension de type d'attributs selon les objectifs et les sorties de chaque sous-modèle de l'AICM. (établie par l'auteure)

sous-modèle	objectif	plan entier	secteur	Composant élémentaire	*outputs*	exemples de données nécessaires à l' entrainements
ML 1	prédiction des programmes			*	fonction estimée pour chaque espace du fragment	données géométriques et contextuelles des composants élémentaires (surface, proportion, orientation, position, adjacences)
ML 2	détection des espaces manquants	*	*	*	liste des espaces attendus mais absents	configuration des plans (organisation des espaces, symétrie, orientation)
ML 3	organisation spatiale	*	*		positions et relations spatiales organisées	liste des espaces indispensables, fréquences d'adjacence, distances fonctionnelles, règles d'enchaînement
ML 4	proposition des possibilités de combinaison géométriques			*	forme géométrique probable assignée à chaque espace dans le schéma organisationnel	données dimensionnelles (fonction, surface, proportion)
ML 5	emprise au sol	*			contour global du plan (polyligne de l'emprise)	formes géométriques des emprises au sol, organisation spatiale, axes de symétrie

Table 54 – Inventaire des attributs tabulaires. ((*) indique si l'attribut est calculé dans les différents éléments). (établie par l'auteure)

type d' attribut	attribut	plan entier	secteur chauffé/froid	composant élémentaire
quantitatif	centre de gravité	*		*
	orientation	*		*
	dimensions de forme englobante (L, L, Q=l/L, surface)	*		*
	surface	*	*	*
	périmètre	*		*
	proportion	* - proportion de chaque composant élémentaire par rapport à la surface totale du plan	* - proportion des composants élémentaires au	

type d' attribut	attribut	plan entier	secteur chauffé/froid	composant élémentaire
		- proportion du vide représenté par la surface utile de l'ensemble des composants élémentaires dans un plan - proportion de la quantité de la matière dans un plan	sein des secteurs. - proportion de chaque secteur par rapport au plan entier	
	indice de compacité	*		*
	indice de circularité			*
	calcul de la répartition spatiale	* mesure de distance numérique, reliant les contours de l'emprise au sol au centre de gravité du plan		
	positions relatives des composants élémentaires par rapport au plan	* calcul des distances qui sont des valeurs numériques précises exprimant la position relative du centre d'un espace par rapport au centre du plan global		
	proportion de plein par rapport au vide dans un plan	organisation de données géométriques pour créer une nouvelle structure (les murs) basée sur les formes des composants élémentaires		
qualitatif	fréquence d'occurrence	* classification de la fréquence d'apparition des types d'espaces dans différents plans		
	type d'usage (ID)	* classification des espaces selon leur usage (*caldarium*, *frigidarium*…)		*
	matrice d'incidence (organigramme des relations entre les composants élémentaire)	* organisation des relations entre les éléments, créant une nouvelle structure de données		*
	relations typologiques (dans une matrice)	* calcul des distances des relations possibles entre les centres de gravité de tous les composants élémentaires		
	symétrie	* évaluation de la régularité et classement des éléments en fonction de leur degré de conformité aux principes de symétrie		*

7.4 De la segmentation analytique des plans thermaux à la préparation des modèles PDSM et AICM

La décomposition des thermes impériaux a permis de formaliser une approche méthodologique capable de transformer des édifices complexes en ensembles lisibles et exploitables. L'analyse des deux hypothèses génératives, l'une fondée sur le plein et l'autre sur le vide, a mis en évidence la pertinence d'une démarche orientée vers le milieu habitable (le vide). Ce choix découle de l'hétérogénéité des dispositifs constructifs observés, qui limite toute déduction spatiale à partir des seules structures bâties, et de la possibilité offerte par le vide de restituer plus directement les logiques d'usage.

La confrontation des hypothèses à l'étude de cas des thermes d'Antonin à Carthage a confirmé cette orientation. En considérant le milieu habitable comme unité première, il devient possible d'extraire des composants élémentaires homogènes, de définir des relations fonctionnelles et de structurer un corpus adapté à la modélisation paramétrique et algorithmique. Ce travail préparatoire ne se limite pas à une opération descriptive : il constitue un passage obligé pour dégager les attributs mesurables et organiser les données selon une hiérarchie cohérente entre plan global, secteurs fonctionnels et composants élémentaires.

L'introduction des indices de similitude et de complétude a apporté un cadre d'évaluation du corpus. Ces outils ont permis de distinguer les plans pleinement exploitables de ceux dont l'apport doit être limité à des usages ciblés, garantissant ainsi la fiabilité de l'apprentissage et la représentativité des prédictions. Leur croisement, traduit dans une matrice décisionnelle, prépare l'intégration raisonnée des édifices dans les modèles à venir.

PARTIE IV.
RÉTROCONCEPTION PARAMÉTRIQUE ASSISTÉE PAR AI

8 *PARAMETRIC DATASET MODEL* (PDSM)

Le huitième chapitre est consacré à l'élaboration du modèle de jeu de données paramétriques (*Parametric DataSet Model* [PDSM]), issu de la décomposition des thermes impériaux romains. Il est constitué de trois sections. Dans un premier temps, il est exposé, la méthode adoptée pour le construire. Puis, la section suivante traite de la préparation et de l'intégration des jeux de données dans l'environnement numérique, en tenant compte de l'hétérogénéité des plans analysés et des attributs spatiaux et fonctionnels qui leur sont associés. Enfin, le chapitre se conclut par une présentation structurée du PDSM, conçu comme la base organisationnelle commune à l'ensemble du corpus étudié.

8.1 Méthode et processus de la construction du modèle PDSM

L'intégration des outils numériques dans une démarche transdisciplinaire repose sur la réinterprétation de plans redessinés, accompagnée de la conversion des attributs identifiés en paramètres exploitables. Cette approche conduit à la construction du PDSM (*cf*. Table 55), fondée sur « une information de qualité, concise, efficace, accessible » (Golvin, 2005, p. 19), pensé à la fois comme une archive numérique et comme une base destinée à alimenter le processus *intelligent*. À terme, il vise à constituer un répertoire analytique permettant d'orienter l'interprétation architecturale et de soutenir la mise en relation raisonnée des configurations spatiales observées.

À la différence des méthodes couramment mobilisées en rétroconception patrimoniale, qui reposent sur des procédés d'acquisition tridimensionnelle comme la photogrammétrie ou les capteurs laser, la stratégie développée ici s'appuie en premier lieu sur l'analyse croisée de documents graphiques, textuels et visuels. Le processus permet de passer d'un corpus documentaire hétérogène à un ensemble de données normalisées, compatibles avec les exigences d'un traitement automatisé.

Jean-Claude Golvin (2005, p. 19) distingue trois composants fondamentaux dans la restitution d'un monument : (1) la partie connue, constituée des structures encore en place et visibles sur le site ; (2) la partie reconstituée, élaborée par anastylose en réassemblant les fragments épars dans un ordre logique ; (3) la partie complétée, ajoutée à partir d'hypothèses et d'études comparatives pour combler les lacunes.

Appliqué à la rétroconception architecturale, l'ensemble des connaissances sur chaque édifice thermal du corpus, est constitué d'un relevé de la partie *connue* et encore en place, éventuellement *complété* à travers des hypothèses et par des éléments *reconstitués*. L'établissement d'une continuité logique et fonctionnelle entre les données connues et les lacunes à combler permet de formaliser une méthodologie de construction du PDSM, conçu comme « un modèle complexe qui ressemble

au modèle mental vivant, mais qui offre l'avantage de rester stable. Il ne peut évoluer que si l'on fait entrer volontairement de nouvelles informations dans l'ordinateur » (Golvin, 2005, p. 25).

Table 55 – Étapes de la construction du PDSM. (établie par l'auteure)

étape	action	outil	sortie attendue
importation des plans redessinés dans AutoCAD vers Rhinoceros3D	- importer les fichiers vectoriels (DWG, DXF) dans Rhinoceros3D afin de les préparer à une exploitation dans Grasshopper	Rhinoceros3D	plans vectoriels importés, prêts à être manipulés dans Grasshopper
vérification des plans importés	- s'assurer que l'ensemble des éléments géométriques a été correctement importé. - contrôler l'échelle		plans validés, aux bonnes dimensions, sans perte d'information géométrique
attribution d'identifiants uniques (ID)	- associer manuellement un identifiant à chaque objet géométrique (composants élémentaires, emprises au sol et axes de symétrie) (*cf*. Fig. 133)		objets identifiés de manière unique, prêts pour l'extraction de données
collecte des attributs	- lier les identifiants aux attributs et extraire les caractéristiques [feature] (surface, orientation, périmètre, fonction…) à partir des plans, secteurs et composants élémentaires	Rhinoceros3D /Grasshopper	visualisation et extraction automatisées des attributs
structuration des données	- organiser les données extraites afin de permettre une visualisation claire et une conservation sous forme d'archive numérique		un jeu de données [dataset] structuré (format CSV) avec des paramètres géométriques et architecturaux clairs
nettoyage des données	- corriger les anomalies ou incohérences, telles que : espaces sans dimensions ; espaces sans fonction identifiée		un *dataset* brute, propre et complet → Un PDSM

8.2 Implémentation de jeux de données graphiques et des calculs numériques

8.2.1 Implémentation des plans dans l'environnement numérique

Après vectorisation des plans sur AutoCAD, dans un fichier commun, (*cf*. chapitre 5, p. 114) les données sont exportées au format DWG ou DXF vers Rhinoceros3D. L'importation conserve la nomenclature et l'affectation des calques établis sur AutoCAD. Une vérification de la conformité du fichier importé est ensuite effectuée (*cf*. Fig. 132). Les calques sont organisés sur Rhinoceros3D selon une progression thermique, du secteur chauffé vers le secteur froid (*cf*. Fig. 131). Un identifiant unique,

défini spécifiquement pour ce travail, est attribué à chaque objet à l'aide de la fonction de nommage de Rhinoceros3D (*cf*. Fig. 133), suivant une numérotation allant de T01 à T29. La liste des identifiants est accessible par la commande « SelName » (*cf*. Fig. 134), comme illustré par l'exemple des thermes d'Antonin à Carthage.

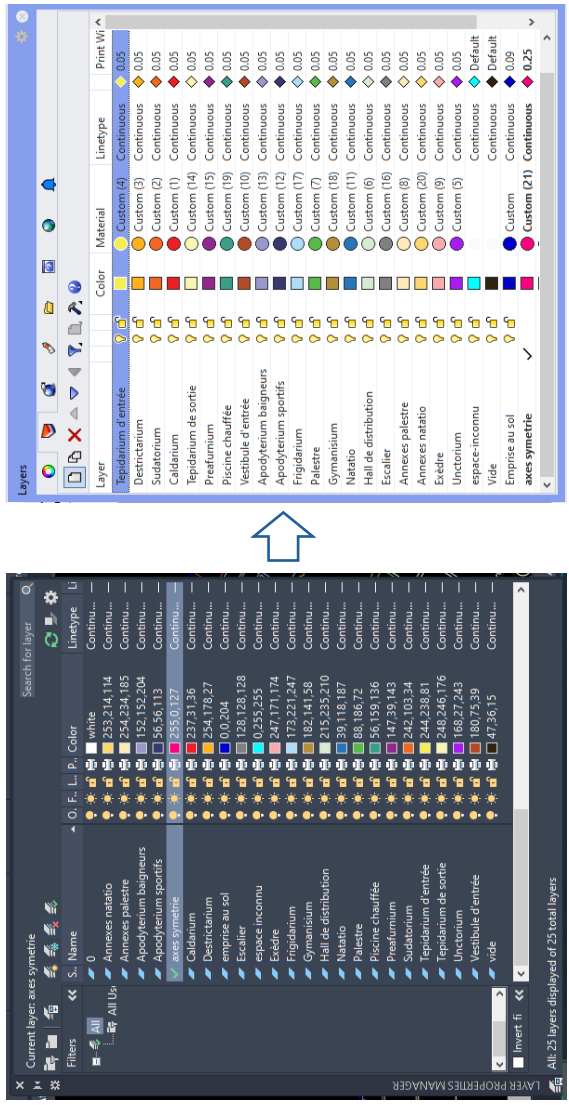


Fig. 131 – Organisation des calques dans Rhinoceros3D. (établie par l'auteure)

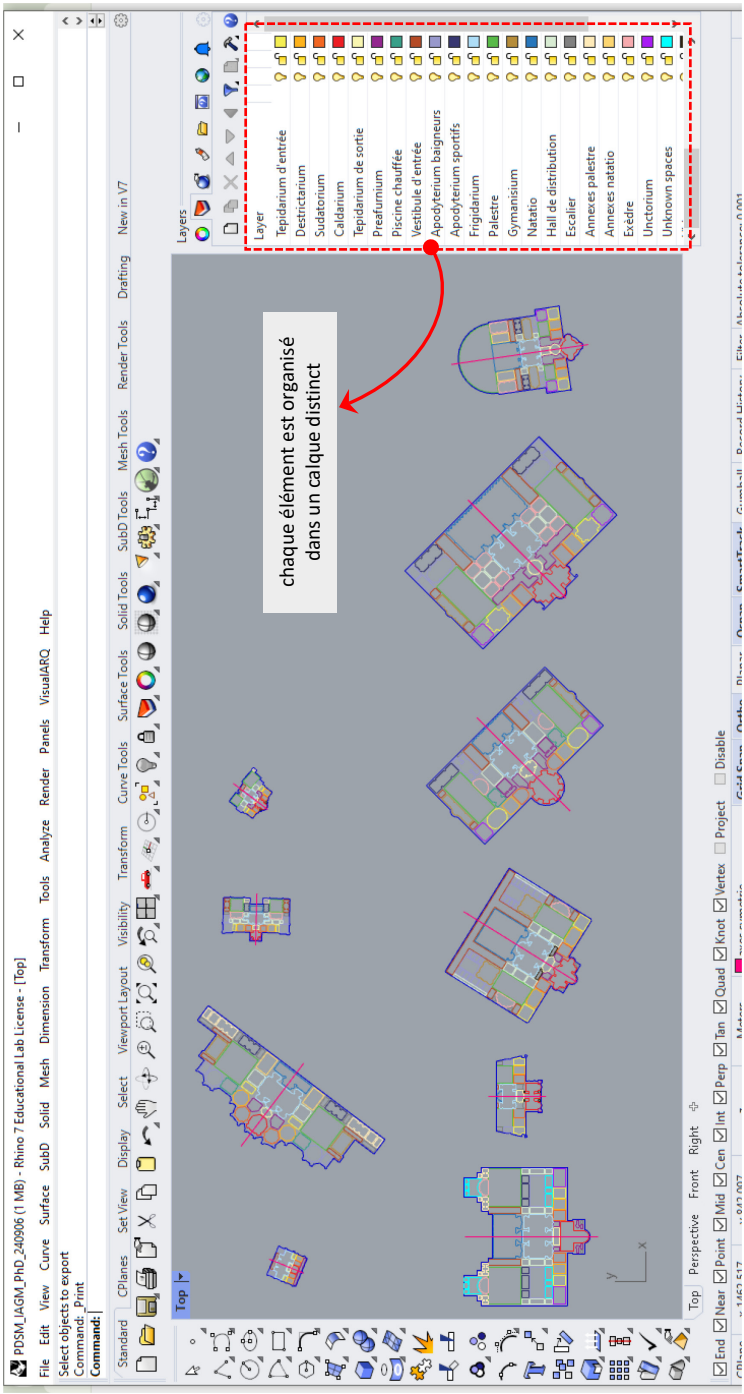


Fig. 132 – Importation des plans (cas des thermes en Tunisie et à Rome) sur Rhinoceros3D. (établie par l'auteure)

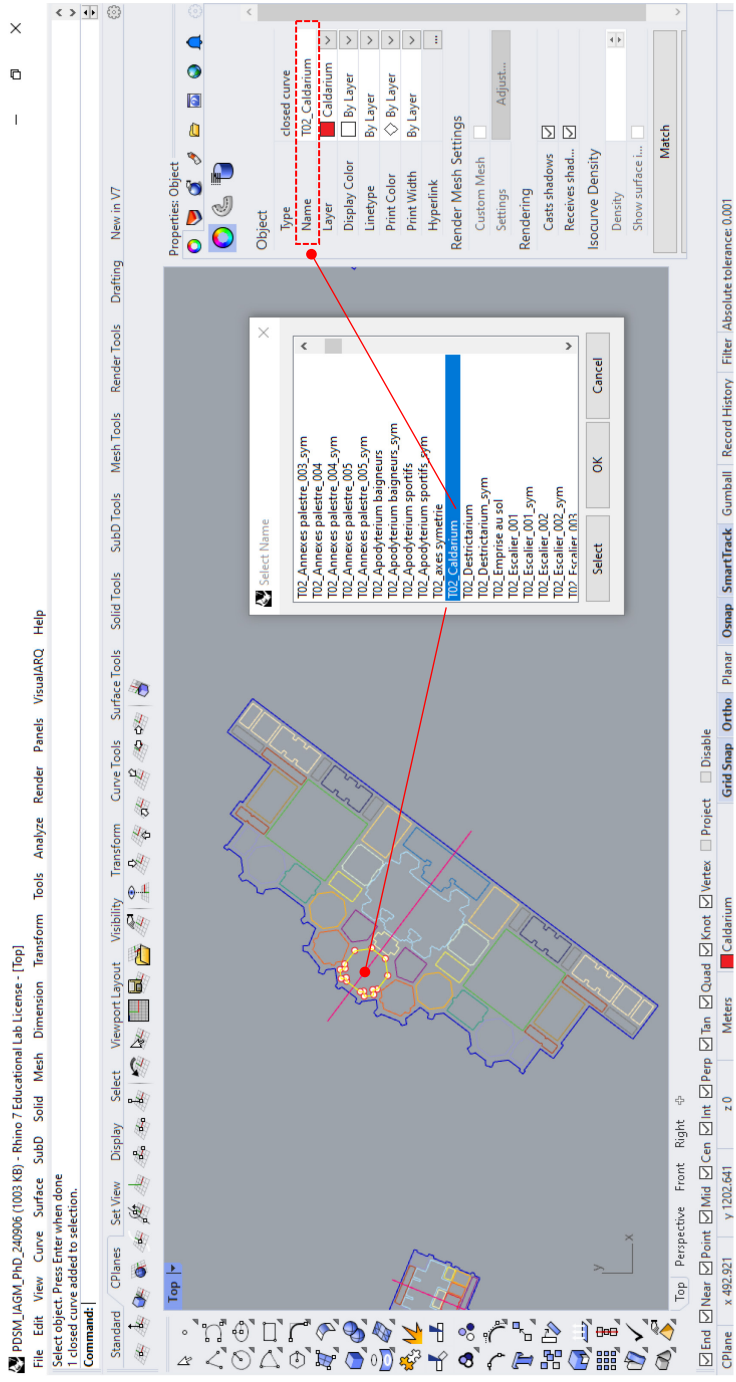


Fig. 133 – Attribution d'identifiant (ID) pour chaque composant élémentaire (cas des thermes d'Antonin à Carthage). (établie par l'auteure)

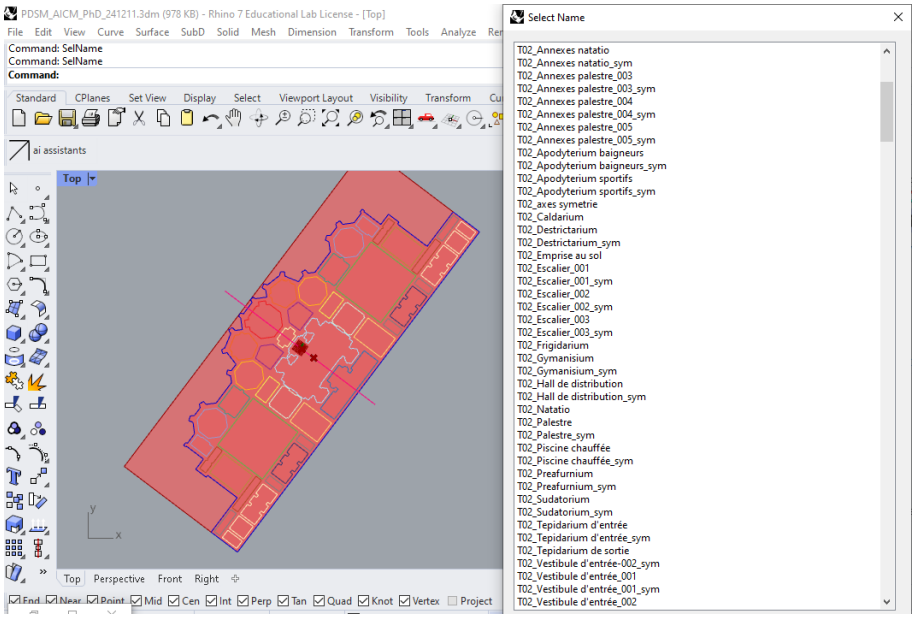
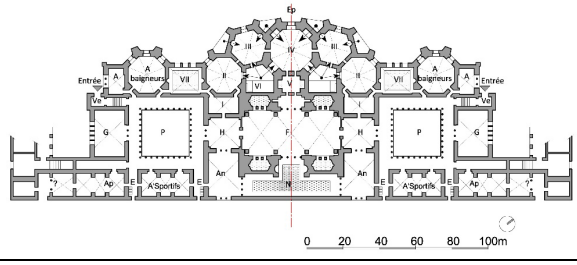
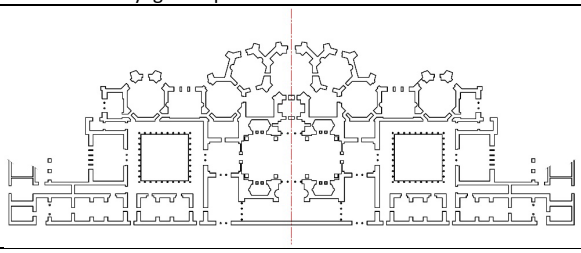
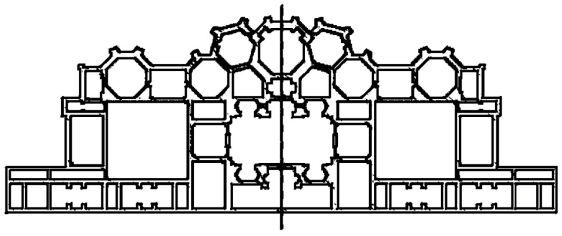
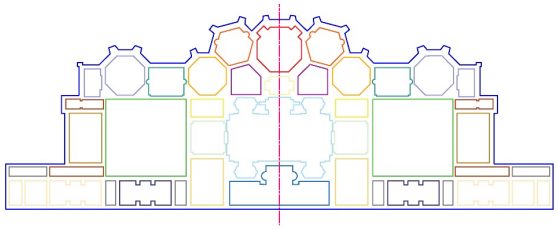


Fig. 134 – Une liste d'identifiants uniques des composants élémentaires des thermes d'Antonin à Carthage. (établie par l'auteure)

En cas d'intégration d'une nouvelle donnée dans Rhinoceros3D, deux procédures sont possibles : (1) l'intégrer directement dans le fichier du PDSM et effectuer les préparations nécessaires sur Rhinoceros3D (procédure rapide) ; (2) réaliser cette préparation en amont sur AutoCAD afin d'éviter la multiplication inutile de calques ou d'objets parasites dans Rhinoceros3D (procédure recommandée). Les étapes d'intégration des nouvelles données sont synthétisées dans un tableau (*cf*. Table 56), précisant pour chacune le nom de l'étape, sa description et le schéma associé. Une fois ces étapes accomplies, il suffit d'importer les nouveaux plans dans le fichier Rhinoceros3D approprié ; le calcul des *features* associés s'effectue alors automatiquement.

Table 56 – Préparation préliminaire à intégration de nouvelles données sur AutoCAD. (établie par l'auteure)

plan initial


1 : nettoyage des plans	
éliminer tous les éléments superflus, notamment les annotations, hachures, et motifs décoratifs. Seuls sont conservés les éléments architecturaux essentiels : parois, espaces fonctionnels (*caldarium*, *frigidarium*…) et emprise au sol	
2 : décomposition des plans	
(1) convertir les éléments architecturaux en polylignes fermées, en suivant les contours exacts de chaque espace fonctionnel et en intégrant les niches ainsi que les ouvertures aux parois ; (2) tracer une polyligne fermée supplémentaire représentant l'emprise au sol, de manière à englober l'ensemble des espaces intérieures ; (3) dessiner l'axe de symétrie sous forme d'une ligne simple ; (4) orienter le plan de façon à aligner le nord avec l'axe Y	
3 : organisation des plans	
affecter chaque élément aux calques appropriés conformément à la charte de calques prédéfinie, afin de garantir une structuration homogène en vue de l'intégration dans Rhinoceros3D	

8.2.2 Conversion des données en attributs paramétriques : extraction des *features*

Tout algorithme lié à un outil *artificiellement intelligent* traite un ensemble des données d'entrée pour produire, après traitement, des données de sortie (Roobaert & Claeys, 2024b) (*cf.* Fig. 135) :

(1) le type d'entrées (inputs) : désigne les différentes catégories de données que l'algorithme peut traiter. Les entrées peuvent être de nature nombre (N), représentant des valeurs quantitatives, audio (A) pour les données sonores, vidéo (V) pour les informations visuelles en mouvement, ou encore textuelle (E) pour des contenus écrits. Certains algorithmes sont capables d'intégrer simultanément plusieurs de ces types ;

(2) le type de sorties (outputs) : décrit les résultats produits par l'algorithme après traitement des entrées. Ces résultats peuvent être : *continus* (générant des valeurs numériques), *catégoriels* (classifiant les données d'entrée en différentes catégories), *séquentiels* (produisant une série de valeurs ou de labels), *structurés* (organisant les données d'entrée pour former une nouvelle structure), de *classement* (classant les entrées selon des critères spécifiques), de *probabilité* (indiquant le degré d'incertitude ou la probabilité liée à un résultat) ...

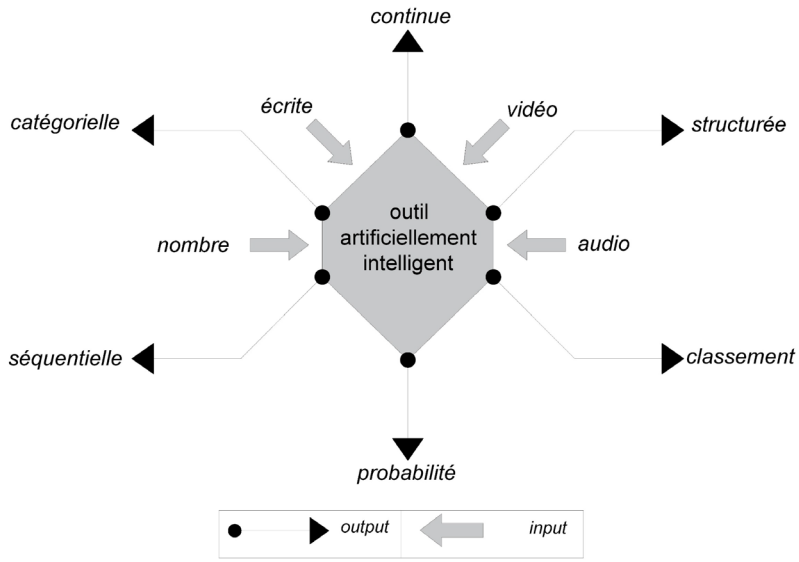


Fig. 135 – Différents types de données (input/output). Interprétation établie par l'auteure d'après l'article de Louis Roobaert et Damien Claeys (2024b).

Le processus *intelligent* développé dans le cadre de la recherche repose sur la construction d'un modèle artificiellement intelligent de complétion (*Artificial Intelligence Completion Model* [AICM]), vise à prédire une configuration complète d'un plan présentant des lacunes. Les plans thermaux, utilisés comme données d'entrée, servent de support à l'extraction d'attributs mesurables qui constituent les premiers résultats de l'analyse. Ces attributs sont ensuite réintroduits comme entrées dans l'AICM, lequel produit en sortie des prédictions spatiales visant à compléter les plans étudiés. Conformément à la classification des types de données en entrée et en sortie (Roobaert & Claeys, 2024b), les variables introduites dans l'AICM doivent être exclusivement numérique. Lorsqu'une caractéristique est de nature qualitative, elle fait l'objet d'une conversion en variable codée. Ainsi, la symétrie est traduite par une variable binaire (0 pour asymétrique, 1 pour symétrique), tandis que l'orientation est exprimée en degrés (de 0 à 360°), calculés par rapport à une direction de référence, telle que le Nord. Les attributs quantitatifs comprennent, quant à eux, des mesures géométriques précises, telles que l'indice de compacité surfacique, le rapport lon-

gueur/largeur, ou encore les distances euclidiennes et topologiques mesurées entre les composants. L'ensemble du traitement aboutit à la constitution d'un fichier tabulaire au format CSV, où chaque ligne correspond à un identifiant unique associé à un élément architectural (plan, secteur, composant élémentaire), et chaque colonne à une variable mesurée ou calculée à partir des données géométriques.

Un tableau détaillé (*cf.* Table 57), construit à partir de l'inventaire d'attribut exposée dans le septième chapitre pour la décomposition des thermes, structure l'analyse en précisant pour chaque attribut identifié la méthode de calcul employée, la figure ou le script associé, à la fois dans sa version détaillée et simplifié, ainsi que la finalité assignée à chaque mesure. Deux niveaux principaux de traitement y sont distingués : (1) les attributs relatifs aux composants élémentaires, à partir desquels sont extraits des paramètres individuels (surface, orientation, proportions, distances relatives à d'autres espaces…), afin d'identifier des régularités propres à chaque catégorie fonctionnelle (*caldarium*, *frigidarium*...) et de mettre en évidence les invariants spatiaux ; (2) les attributs mesurés à l'échelle globale du plan thermal, tels que les dimensions générales de l'édifice ou son orientation principale. À cette structuration s'ajoute l'extraction de sous-attributs dérivés, opérée entre les secteurs froids et les secteurs chauffés.

Table 57 – Tableau du calcul des *features* paramétriques. (établie par l'auteure)

	attribut	explication du script	*script* simplifié	*script* détaillé	objectif du calcul
attributs des composants élémentaires	type d'usage (ID)	intégration de métadonnées (ID) aux objets géométriques dans Rhinoceros3D, permettant à Grasshopper, via le *component* « Geometry Pipeline », d'extraire automatiquement les composants élémentaires en fonction de leur type d'usage et/ou de leur appartenance à un plan, sans nécessiter de calculs complexes supplémentaires	Fig. 137	Fig. 282	identifier la fonction spatiale de chaque composant élémentaire
	surface	utilisation du *component* « Area » est utilisé pour calculer à la fois la surface et le centre de chaque polyligne fermée représentant un espace	Fig. 138	Fig. 283	déterminer la superficie individuelle des espaces
	centre de gravité		Fig. 139	Fig. 284	calculer des *centroid* des composants élémentaires par rapport au centre du plan. Le centre du plan est considéré comme l'origine locale sans nécessiter de déplacement réel dans Rhinoceros3D

	attribut	explication du script	*script* simplifié	*script* détaillé	objectif du calcul
	périmètre	utilisation du *component* « Length » sur les courbes fermées pour calculer le périmètre de chaque espace	Fig. 140	Fig. 285	analyser l'enveloppe linéaire des espaces
	indice de compacité	division de la surface de l'espace (obtenue par « Area ») par le carré du périmètre (obtenu par « Length »), le tout via des expressions mathématiques dans Grasshopper	Fig. 141	Fig. 286	indiquer à quel point l'espace est utilisé de manière dense
	indice de circularité	Insertion d'une expression mathématique ($4\pi \times surface/périmètre^2$) dans le *component* « Expression » pour chaque espace	Fig. 141	Fig. 286	calculer la régularité des espaces dans un plan, notamment dans l'étude de la forme des thermes (une valeur proche de 1 indique une forme circulaire ou régulière)
	symétrie au sein de l'espace	génération de vecteurs normaux et perpendiculaires à partir du centre de chaque espace, création de plans de coupe, puis comparaison des moitiés obtenues via « Brep Cutter » et « Dispatch Pattern » pour évaluer la symétrie	Fig. 142, Fig. 143, Fig. 144, Fig. 145	Fig. 287, Fig. 288, Fig. 289, Fig. 290	étudier l'organisation interne des formes
	dimensions des formes englobantes des composants élémentaires	utilisation du *component* « Bounding Box » pour chaque composant, puis extraction des dimensions L, l et calcul du rapport L/l, avec « Deconstruct Box », « Area », et « Length » pour caractériser la forme géométrique	Fig. 146	Fig. 291	étudier la forme d'une pièce : (1) rectangulaire a un rapport L/l élevé ; (2) carrée a un rapport proche de 1
	orientation des espaces	utilisation du *component* « Bounding Box » minimale de chaque espace (représenté par une polyligne). Cette approche permet d'identifier l'axe principal de chaque espace et de calculer son orientation en fonction de l'axe Nord	Fig. 147	Fig. 292	calculer l'orientation globale de la pièce
	relations typologiques des composants élémentaires	extraction des centres avec « Area » (via la sortie *Centroid*), puis calcul automatique des distances entre centres adjacents à l'aide du *component* « Topology » (connecté à Links) pour générer un graphe des relations spatiales	Fig. 148	Fig. 293	calculer les distances entre le centre de la pièce et les centres des pièces adjacentes

	attribut	explication du script	*script* simplifié	*script* détaillé	objectif du calcul
attributs des secteurs	proportion	filtrage des composants par appartenance au secteur chauffé/froid, extraction des surfaces avec « Area », puis calcul des proportions internes via « Mass Addition » et formules arithmétiques (x/y × 100) pour mesurer le pourcentage de chaque composant élémentaire dans le secteur convenable	Fig. 149, Fig. 150	Fig. 295, Fig. 296	calculer les proportions des composants élémentaires au sein du secteur chauffé et du secteur froid
		filtrage des composants par calques dédiés aux secteurs chauffé et froid, calcul de leurs surfaces avec « Area », puis comparaison avec la surface totale du plan via des divisions normalisées (x/y × 100)	Fig. 151	Fig. 294	calculer la proportion de chaque secteur par rapport au plan entier
	surface	calcul de la surface utile des secteurs : chauffé/froid, via le plugin « Area »	Fig. 151	Fig. 294	déterminer la superficie de chaque secteur
attributs globaux des plans	surface	application des *components* « Area », (via la sortie Centroid) et « Length » sur les polylignes représentant l'emprise au sol pour extraire la surface, le centre global et le périmètre de chaque plan	Fig. 152	Fig. 297	calculer la surface totale de chaque plan entier
	centre de gravité		Fig. 152	Fig. 297	calculer les *centroid* des plans entiers
	périmètre		Fig. 152	Fig. 297	calculer les périmètres des plans entiers qui sont représentés par l'emprise au sol
	relations typologiques (matrice)	extraction des centres avec « Area » (via la sortie *Centroid)*, puis calcul croisé des distances entre chaque paire via « Cross Reference » et « Distance », les résultats étant organisés dans une matrice de relations typologiques où chaque ligne et chaque colonne correspond à un espace spécifique, et chaque cellule représente la distance entre deux centres de gravité de deux espaces	Fig. 153	Fig. 298	calculer les distances des relations possibles entre les centres de gravité de chaque composant élémentaire. Cette structuration matricielle facilite l'analyse de la configuration spatiale et des interrelations entre les différents espaces d'un plan
	fréquence d'occurrence	filtrage des objets par calques nommés selon leur fonction (exemple *caldarium*, *frigidarium*), puis comptage automatique avec « List Length » pour obtenir la fréquence de chaque type de composant dans un plan	Fig. 154	Fig. 299	calculer la fréquence d'apparition de chaque type de composant dans un édifice

	attribut	explication du script	*script* simplifié	*script* détaillé	objectif du calcul
	répartition spatiale	extraction des centres avec « Area » (via la sortie Centroid), puis calcul des distances entre le centre du plan et chaque point de l'emprise au sol à l'aide de « Distance » et « Vector »	Fig. 155	Fig. 300	calculer la distance entre les points de contour de l'emprise au sol et le centre de gravité du plan
	orientation générale de l'édifice	extraction du vecteur directeur de l'axe de symétrie avec « Start/End » et « Unit Vector », puis calcul de l'angle par rapport à l'axe Y (Nord) avec « Angle » et conversion en degrés pour normaliser l'orientation du plan. Normalisation de l'orientation des plans, par rapport à un axe de référence, en les alignant tous selon un axe nord commun lors de leur introduction dans Rhinoceros. Cette normalisation permet au modèle d'apprendre les schémas spatiaux, sans être influencé par les variations d'orientation	Fig. 156	Fig. 301	calculer l'orientation du plan global par rapport à un axe de référence, c'est-à-dire l'angle formé entre l'axe de symétrie et l'axe choisi comme référence, dans le cas présent est l'axe Y représentant le Nord
	proportion globale (surface composant / plan)	extraction des surfaces des espaces principaux et de l'emprise au sol avec « Area », puis calcul de leur rapport via une division directe (x/y) pour évaluer leur poids relatif dans le plan	Fig. 157	Fig. 302	calculer les rapports entre les dimensions des espaces principaux et les dimensions globales du plan
	position relative des composants élémentaires par rapport au plan	calcul des centres des espaces et du plan global via « Area » (via la sortie *Centroid*), puis mesure de la distance entre chaque espace et le centre du plan avec « Vector » et « Length »	Fig. 158	Fig. 303	calculer la distance entre le centre de l'espace par rapport au centre du plan
	dimensions des formes englobantes des plans entiers	génération de « Bounding Box » autour de l'emprise au sol, extraction des longueurs L et l avec « Deconstruct Box », puis calcul du rapport L/l (Q) et de la surface avec « Area »	Fig. 159	Fig. 304	calculer L, l, le rapport Q, surface
	indice de compacité globale	agrégation des surfaces et périmètres via « Mass Addition », puis calcul de l'indice global par la formule x / y^2, où x est la surface totale et y le périmètre total du plan	Fig. 160	Fig. 305	calculer le rapport entre la surface totale des espaces et le carré du périmètre global du plan
	analyse de symétrie	extraction des axes de symétrie, définis en amont dans Rhinoceros3D et identifiés par des identifiants uniques	Fig. 161,	Fig. 306,	calculer l'indice de l'organisation spatiale d'un plan

	attribut	explication du script	*script* simplifié	*script* détaillé	objectif du calcul
		via « Geometry Pipeline », génération de plans à partir de ces courbes avec « Evaluate Curve » et « Plane », puis structuration des axes de symétrie dans un référentiel spatial pour chaque plan complet. Découpage de l'emprise au sol par l'axe de symétrie à l'aide de « Surface Split », suivi d'une répartition des moitiés obtenues avec « Dispatch Pattern » pour analyser la symétrie bilatérale du plan	Fig. 162	Fig. 307	
	proportions du plein et du vide dans un plan	calcul de la surface utile avec « Area », puis comparaison avec la surface totale de l'emprise via des divisions (x/y × 100) pour obtenir la proportion de vide (espaces) et de plein (murs/matière)	Fig. 163, Fig. 164	Fig. 308, Fig. 309	calculer la proportion du plein/du vide représenté par la surface utile des composants élémentaires dans un plan
	construction des plans entiers	extraction des géométries complètes depuis Rhinoceros3D avec « Geometry Pipeline », filtrées par nom de calque et identifiants, puis regroupement des composants pour chaque plan via « Tree Branch » et « Merge »	Fig. 165	Fig. 310	calculer le nombre de composants élémentaires par plan

Les attributs définis sont appliqués à l'ensemble des plans constituant le catalogue étudié dans la thèse. Afin d'illustrer la méthodologie d'élaboration des algorithmes de calcul paramétrique sous Grasshopper, le plan des grands thermes d'Antonin à Carthage a été retenu comme cas de référence (*cf*. annexes : Fiches d'algorithme sur Grasshopper et visualisation sur Rhinoceros3D). Selon Yvon Thébert (2003, p. 307), il s'agit du « plus grand édifice balnéaire du monde provincial, à l'image de la puissance de la mégapole carthaginoise » et il constitue « une exception remarquable. Ce sont les seuls à transcrire plusieurs des innovations révolutionnaires de la Ville » (Thébert, 2003, p. 314). Ce choix permet de détailler les opérations de manière progressive, en agrandissant localement les zones d'analyse lorsque la précision graphique s'impose pour la clarté de l'explication. À chaque étape, l'objectif est d'automatiser le processus dans Grasshopper, tout en adaptant et en optimisant l'utilisation des plugins en fonction de la nature des attributs à extraire.

La démarche simplifiée adoptée pour chaque script de calcul est décrite ci-après, accompagnée d'une légende facilitant la lecture des schémas correspondants (*cf*. Fig. 136). Le processus débute par l'extraction des identifiants des composants élémentaires (*cf*. Fig. 137). À partir de la géométrie des espaces, classés par type de fonction (*caldarium*, *frigidarium*...) pour chaque plan en entrée, un *component* central applique un traitement spécifique visant à extraire les caractéristiques propres à chaque géométrie. La sortie, générée sous forme d'identifiant, est ensuite associée

à la géométrie initiale, ce qui en facilite l'exploitation dans les phases ultérieures d'analyse ou de classification.

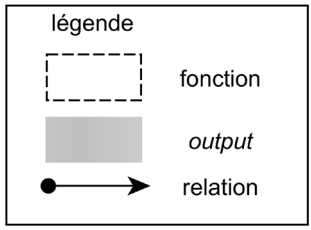


Fig. 136 – Une légende facilitant la lecture des schémas du *script* correspondant. (établie par l'auteure)

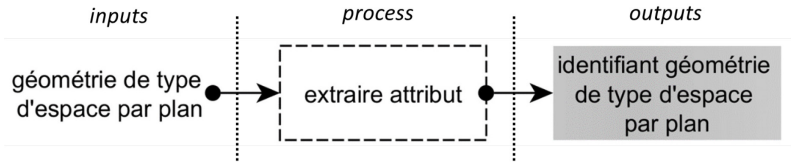


Fig. 137 – Schéma simplifié d'extraction des identifiants des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

Une fois la géométrie identifiée pour chaque type d'espace par plan, un premier calcul permet d'extraire des données dimensionnelles relatives aux composants élémentaires. Pour calculer la surface, le *script* (*cf*. Fig. 138) commence par générer une surface à partir de la géométrie d'entrée (polyligne fermée), puis applique un *component* de calcul d'aire. La valeur numérique obtenue correspond à la surface réelle de chaque type d'espace, exprimée dans l'unité métrique du plan (m²).

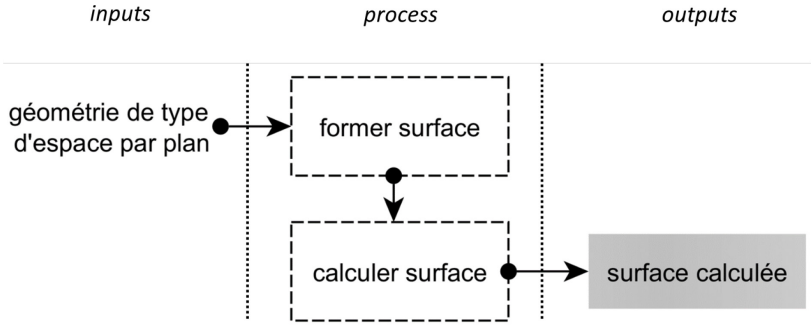


Fig. 138 – Schéma simplifié du calcul des surfaces des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

Sur cette base, un second traitement extrait les coordonnées du centre de gravité de chaque surface (*cf*. Fig. 139). Ce point de référence, obtenu à partir de la masse

géométrique de la surface plane, permet de localiser précisément chaque composant dans l'espace du plan.

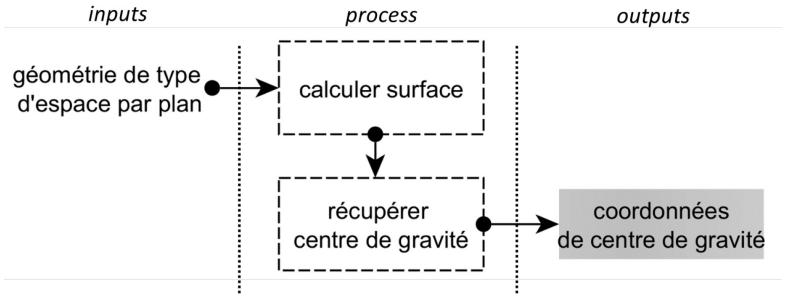


Fig. 139 – Schéma simplifié du calcul des coordonnées du centre de gravité des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

Le calcul du périmètre (*cf*. Fig. 140) repose sur l'extraction du contour de chaque composant élémentaire, suivi d'une mesure automatique de sa longueur. Ce traitement, opéré via deux *components* enchaînés dans Grasshopper, fournit une valeur métrique exprimée en mètres linéaires.

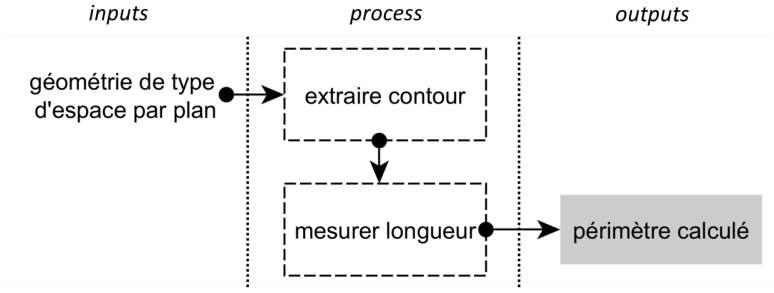


Fig. 140 – Schéma simplifié du calcul des périmètres des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

À partir des valeurs de surface (x) et de périmètre (y) extraites précédemment, deux indices géométriques sont calculés pour chaque composant élémentaire (*cf*. Fig. 141). L'indice de circularité repose sur la formule $(4\pi \cdot x) / (y/2)$, et permet d'évaluer la proximité d'un espace avec une forme circulaire idéale. L'indice de compacité est obtenu par le rapport x/y^2, indiquant le degré d'occupation spatiale par rapport à son contour.

Pour évaluer la symétrie interne des composants élémentaires, quatre *scripts* complémentaires sont mis en œuvre dans Grasshopper.

Le premier *script* (*cf*. Fig. 142) calcule un vecteur normal centré sur la géométrie, en combinant les coordonnées du centre de gravité avec la direction moyenne de la forme. La longueur de ce vecteur est normalisée à partir d'un rapport fixe (L/10), garantissant une échelle cohérente entre les plans.

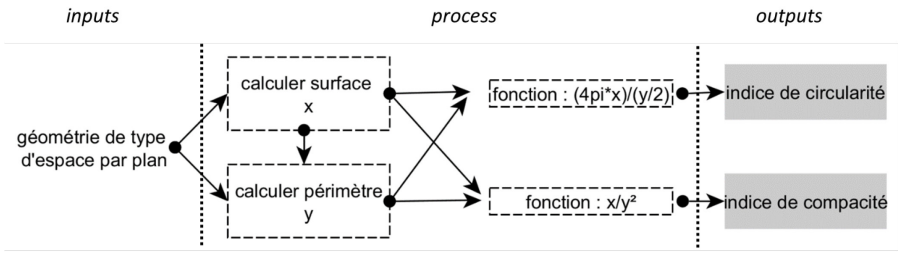


Fig. 141 – Schéma simplifié du calcul des indices de circularité et de compacité des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

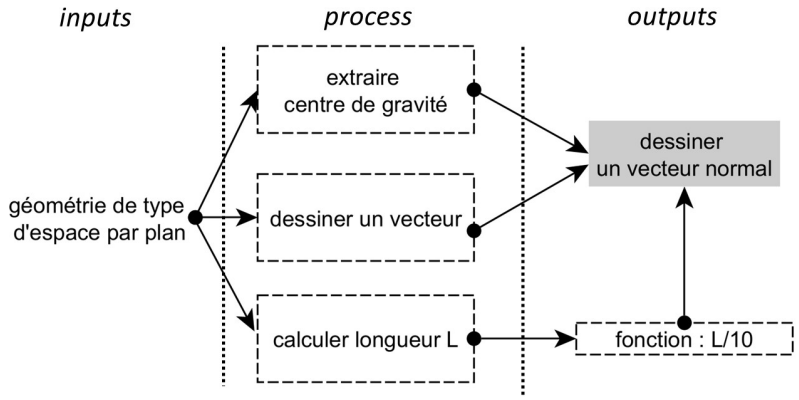


Fig. 142 – Schéma simplifié de la construction des vecteurs normaux des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

Le second *script* (*cf*. Fig. 143) utilise ce vecteur pour définir un plan perpendiculaire à la géométrie, passant par le centre de gravité. Le vecteur est ensuite remappé, et l'axe Y du nouveau plan est extrait afin de constituer un axe de symétrie interne.

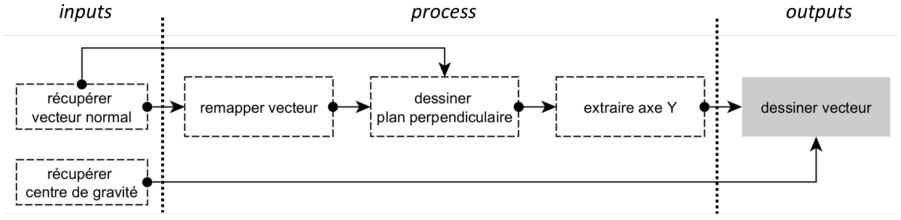


Fig. 143 – Schéma simplifié de la construction des vecteurs perpendiculaires aux vecteurs normaux des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

Le troisième *script* (*cf*. Fig. 144) reconstruit une surface solide à partir de la géométrie de l'espace, puis applique une découpe verticale selon l'axe précédemment

défini. Cette opération permet de séparer visuellement les deux moitiés du composant élémentaire.

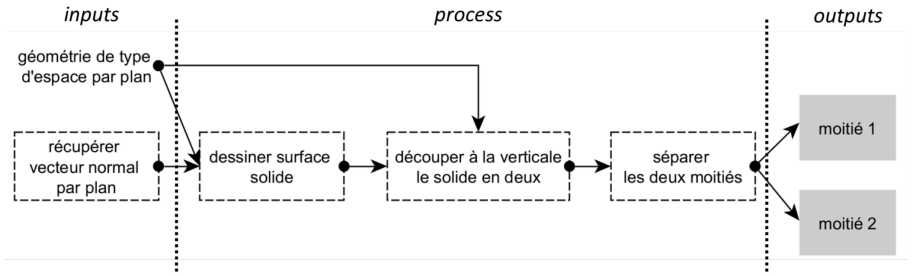


Fig. 144 – Schéma simplifié de la construction des symétries des composants élémentaires : direction de l'axe de symétrie. (établie par l'auteure)

Enfin, un quatrième *script* (*cf*. Fig. 145) applique la même procédure selon une coupe horizontale, en inversant l'orientation du plan de section. On obtient ainsi deux moitiés selon un axe perpendiculaire au précédent, permettant d'évaluer la double symétrie potentielle de chaque forme.

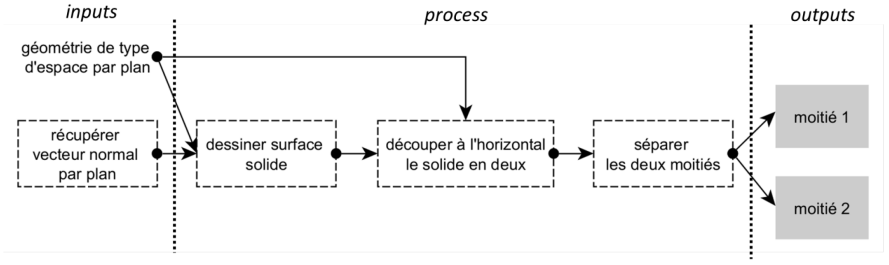


Fig. 145 – Schéma simplifié de la construction des symétries des composants élémentaires : direction perpendiculaire à l'axe de symétrie. (établie par l'auteure)

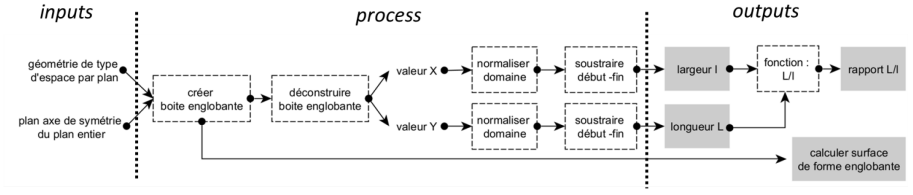


Fig. 146 – Schéma simplifié du calcul des dimensions des formes englobantes des composants élémentaires : L, l, Q=L/l et surface. (établie par l'auteure)

Un nouveau *script* (*cf*. Fig. 146) permet d'évaluer les proportions générales des composants élémentaires par rapport à l'axe de symétrie du plan complet. À partir de la géométrie de chaque espace et de l'axe global fourni en entrée, une boîte englobante est générée puis décomposée afin d'extraire ses dimensions principales.

Les longueurs des axes X et Y sont normalisées et soustraites pour obtenir respectivement la largeur (l) et la longueur (L) de la boite englobante. Ces valeurs permettent ensuite de calculer le rapport de proportion L/l, ainsi que la surface totale de la forme englobante.

L'orientation de chaque espace est calculée à partir de son axe de symétrie. Le *script* (*cf*. Fig. 147) commence par extraire les deux extrémités de l'axe, puis dessine un vecteur correspondant. Celui-ci est comparé au vecteur Y représentant le nord du plan. L'angle entre les deux vecteurs est ensuite calculé et converti en degrés, ce qui permet d'attribuer à chaque composant élémentaire une orientation spatiale normalisée dans le plan.

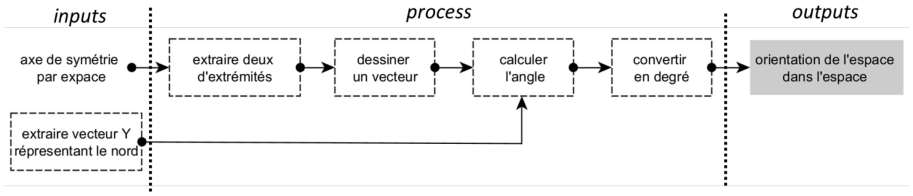


Fig. 147 – Schéma simplifié du calcul des orientations des composants élémentaires.
(établie par l'auteure)

L'analyse se poursuit par la mise en relation de l'emprise globale du plan avec les différents espaces qui la constituent. Le *script* (*cf*. Fig. 148) extrait le centre de gravité de l'emprise au sol, puis celui de chaque espace élémentaire. L'ensemble de ces points est ensuite connecté, permettant de dessiner toutes les relations entre eux et de représenter sous forme graphique les proximités et les interactions spatiales internes au plan.

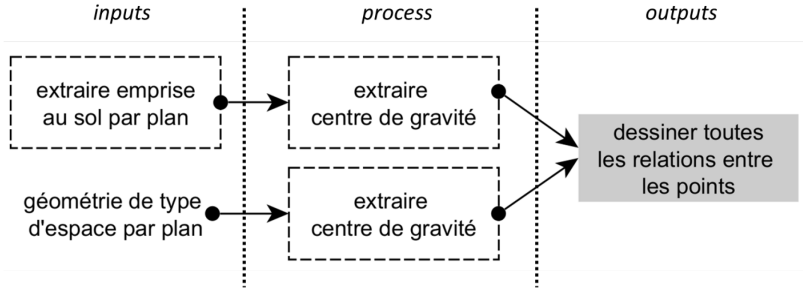


Fig. 148 – Schéma simplifié du calcul des relations typologiques des composants élémentaires.
(établie par l'auteure)

Dans la continuité des extractions métriques, l'analyse s'étend à la répartition interne des espaces par secteur fonctionnel. Les surfaces individuelles sont regroupées par type, puis rapportées à la surface totale du secteur afin d'obtenir un pourcentage représentatif de chaque fonction. Cette opération met en évidence la part

occupée par des espaces spécifiques, comme le *frigidarium* ou l'*apodyterium*, dans l'organisation globale du secteur froid (*cf*. Fig. 149).

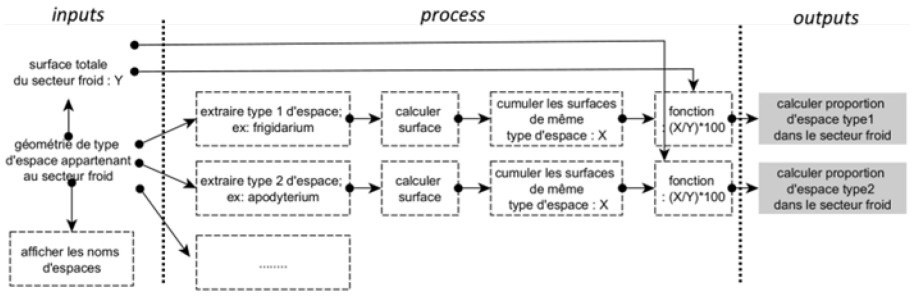


Fig. 149 – Schéma simplifié du calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur froid. (établie par l'auteure)

Le même principe est appliqué au secteur chauffé. Les surfaces des espaces qui le composent, tels que le *caldarium* ou le *tepidarium* d'entrée, sont extraites et regroupées par type. Chaque cumul est ensuite rapporté à la surface totale du secteur, permettant d'exprimer en pourcentage la part relative de chaque fonction dans l'organisation du secteur chauffé (*cf*. Fig. 150).

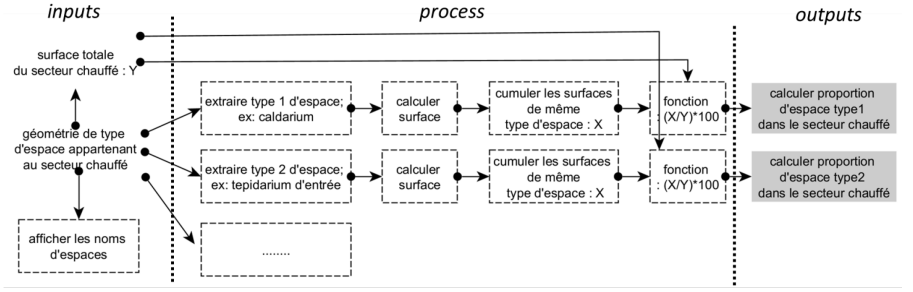


Fig. 150 – Schéma simplifié du calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur chauffé. (établie par l'auteure)

Afin de comparer l'importance relative des grands ensembles fonctionnels, le *script* (*cf*. Fig. 151) calcule la proportion des secteurs froid et chauffé par rapport à la surface totale du plan. Les surfaces individuelles sont d'abord mesurées, puis agrégées pour obtenir les valeurs globales de chaque secteur ainsi que celle de l'édifice entier. Le rapport (X/Y) × 100 permet ensuite d'exprimer en pourcentage la part occupée par chaque secteur dans la composition générale du plan.

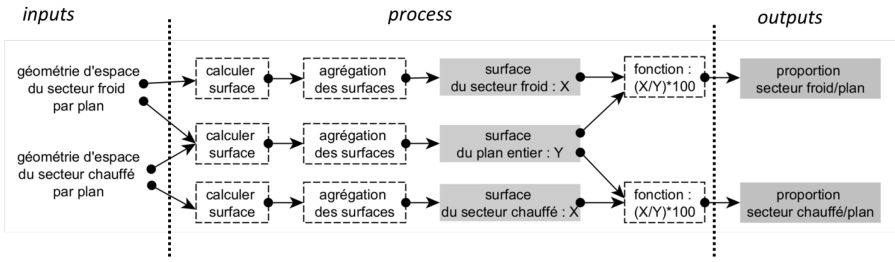


Fig. 151 – Schéma simplifié du calcul des proportions et des surfaces des secteurs chauffé/froid. (établie par l'auteure)

À l'échelle de l'emprise globale du plan, le *script* (*cf*. Fig. 152) permet de calculer plusieurs attributs géométriques fondamentaux. La surface est extraite afin de quantifier l'étendue totale, le centre de gravité est déterminé pour localiser le barycentre de l'emprise, et le périmètre est mesuré pour caractériser le contour externe.

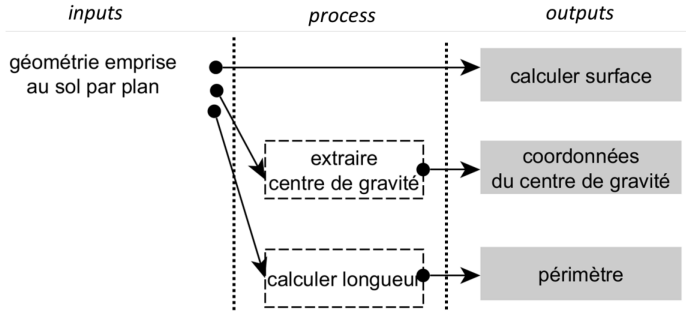


Fig. 152 – Schéma simplifié du calcul des dimensions des plans entiers : surface, centre de gravité, périmètre. (établie par l'auteure)

Les distances entre espaces sont traitées de façon à mettre en évidence leurs relations internes. Le *script* (*cf*. Fig. 153) utilise les coordonnées des centres de gravité pour extraire les métadonnées nécessaires, puis calcule les distances croisées entre chaque paire de points. L'ensemble des résultats est organisé dans une matrice, qui constitue une base structurée pour l'analyse des proximités et des rapports spatiaux entre les espaces.

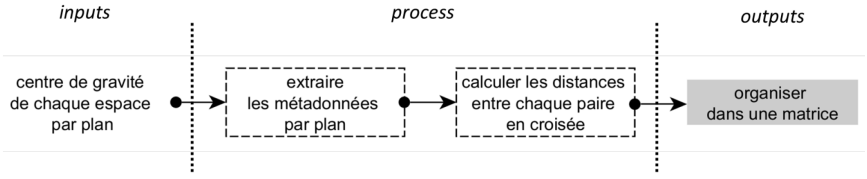


Fig. 153 – Schéma simplifié de la création des matrices d'incidence des différents plans. (établie par l'auteure)

L'identification des espaces indispensables dans un plan est organisée à partir d'une liste de référence. Le *script* (*cf*. Fig. 154) conserve cette liste, puis confronte chaque plan à la présence effective des espaces qu'elle contient. Les géométries sont extraites, leur nombre est comptabilisé et comparé à la liste initiale, ce qui permet de calculer le nombre d'occurrences. Le résultat est affiché sous forme de fréquence d'existence de chaque espace, offrant ainsi un indicateur de récurrence par plan.

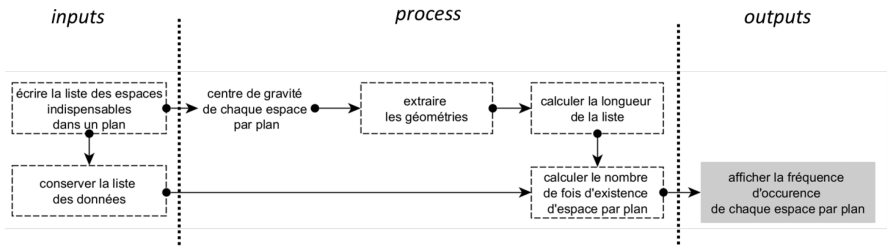


Fig. 154 – Schéma simplifié du calcul des fréquences d'occurrence des différents plans. (établie par l'auteure)

L'emprise au sol sert ici (*cf*. Fig. 155) de base à une analyse géométrique. Les points du polyligne sont d'abord extraits, puis mis en relation avec le centre de gravité de la forme. Les distances entre ces points et le barycentre sont calculées et représentées par des vecteurs, ce qui permet de visualiser la répartition spatiale de l'emprise. Parallèlement, la surface totale est mesurée afin de compléter cette caractérisation de l'enveloppe externe du plan.

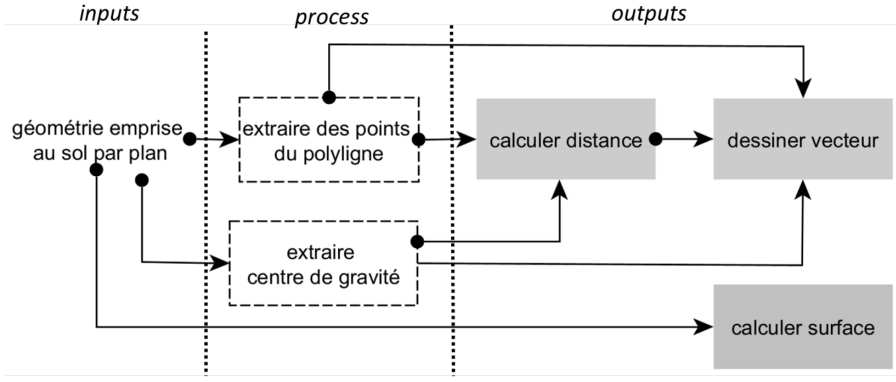


Fig. 155 – Schéma simplifié de l'analyse de la répartition spatiale. (établie par l'auteure)

L'orientation générale de chaque plan est déterminée à partir de son axe de symétrie (*cf*. Fig. 156). Les deux extrémités de cet axe sont extraites afin de tracer un vecteur, qui est ensuite comparé au vecteur Y représentant le nord. L'angle obtenu

est calculé puis converti en degrés, fournissant ainsi une mesure normalisée de l'orientation du plan entier dans son environnement.

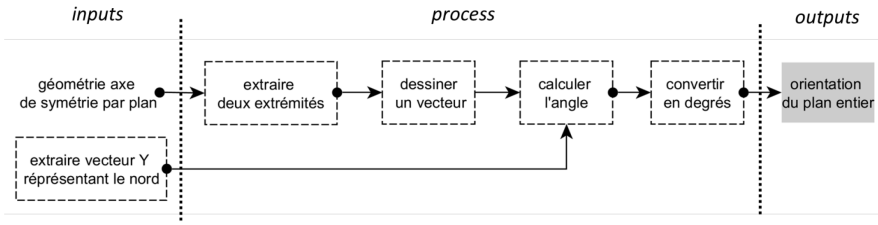


Fig. 156 – Schéma simplifié du calcul d'orientation des plans entiers. (établie par l'auteure)

La proportion globale du plan est obtenue en rapportant la surface des espaces à celle de l'emprise totale. Le *script* (*cf*. Fig. 157) calcule d'une part la surface de chaque composant élémentaire X, d'autre part celle de l'emprise au sol Y considérée dans son ensemble. Le rapport X/Y fournit ainsi une valeur normalisée qui exprime la part occupée par les espaces dans la totalité du plan.

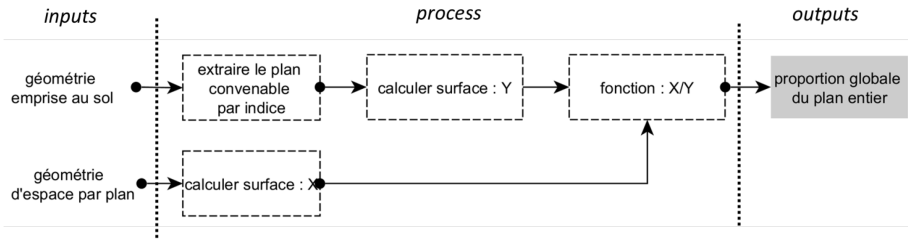


Fig. 157 – Schéma simplifié du calcul des proportions globales des plans entiers. (établie par l'auteure)

Le *script* (*cf*. Fig. 158) met en relation l'emprise globale du plan avec la position des espaces élémentaires. Il extrait d'une part le centre de gravité de l'emprise au sol et d'autre part celui de chaque espace. Ces deux points de référence sont ensuite connectés par un vecteur, permettant de visualiser et de mesurer la relation spatiale entre l'ensemble du plan et les entités qui le composent.

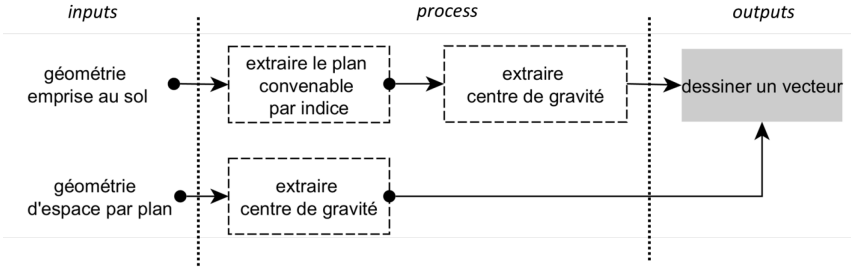


Fig. 158 – Schéma simplifié du calcul des positions relatives des plans. (établie par l'auteure)

L'emprise au sol et l'axe de symétrie servent de référence pour générer une boîte englobante de l'édifice. Celle-ci est décomposée afin d'extraire ses dimensions principales sur les axes X et Y, normalisées et soustraites pour obtenir la largeur l et la longueur L. Le rapport L/l fournit un indicateur de proportion générale, complété par le calcul de la surface de la forme englobante (*cf*. Fig. 159).

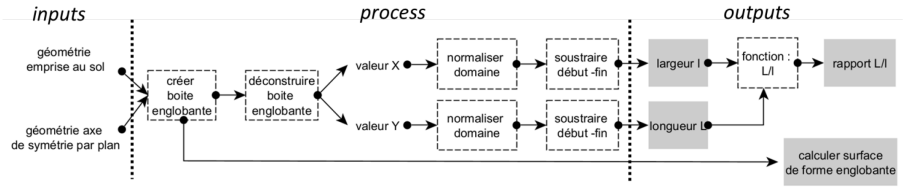


Fig. 159 – Schéma simplifié du calcul de dimensions des formes englobantes des plans entiers. (établie par l'auteure)

L'indice de compacité du plan entier est calculé en rapportant la surface totale des espaces à celle de l'emprise globale. Le *script* (*cf*. Fig. 160) agrège d'une part les surfaces de l'ensemble des espaces (X), et d'autre part calcule la surface de l'emprise au sol (Y). L'application de la formule X/Y^2 permet d'obtenir un indicateur de compacité, reflétant le degré d'occupation de l'emprise par rapport à sa surface théorique.

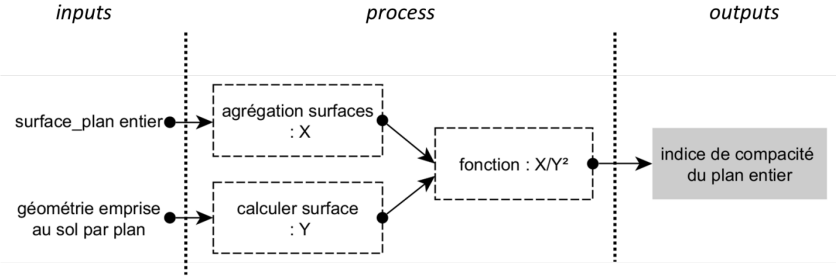


Fig. 160 – Schéma simplifié du calcul d'indice de compacité du plan entier. (établie par l'auteure)

Le repérage du plan de symétrie s'effectue en retraçant une surface de référence perpendiculaire à l'axe identifié. Le *script* (*cf*. Fig. 161) procède d'abord à l'évaluation et au *remappage* des valeurs associées à l'axe, avant de générer une perpendiculaire utilisée pour déconstruire et reconstruire la surface plane correspondante. Les coordonnées obtenues définissent le plan de symétrie du bâtiment et permettent d'en comparer la régularité géométrique.

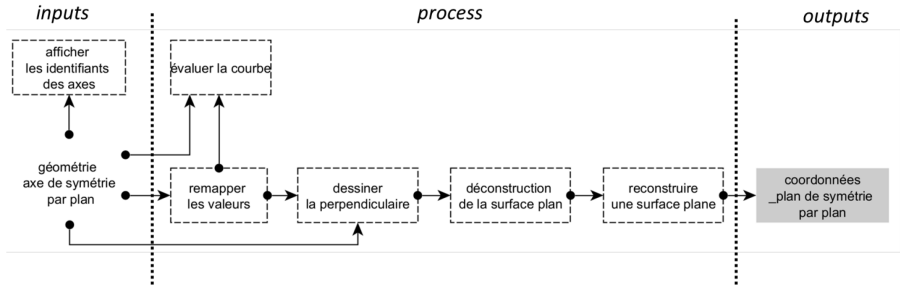


Fig. 161 – Schéma simplifié de création des plans des axes de symétrie dans différents plans. (établie par l'auteure)

La segmentation de l'emprise au sol repose sur l'identification préalable de l'axe de symétrie. Une surface est générée à partir du plan, puis découpée selon cet axe, ce qui permet d'obtenir deux moitiés distinctes. Le *script* (*cf*. Fig. 162) sépare ensuite ces parties afin de rendre possible leur analyse comparative.

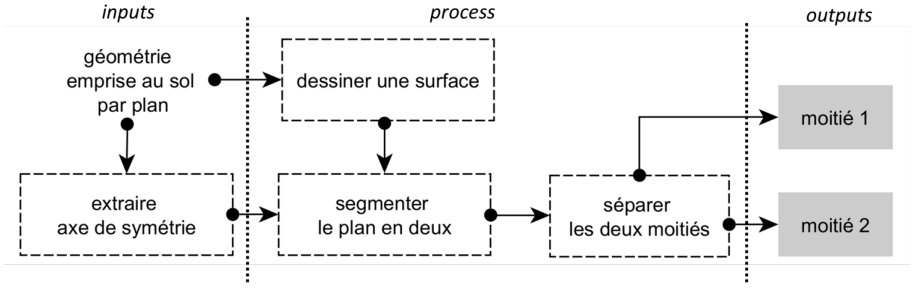


Fig. 162 – Schéma simplifié de la création de la symétrie dans différents plans, selon les axes de symétrie propre à chacun. (établie par l'auteure)

L'évaluation des rapports entre le plein et le vide s'appuie sur le calcul comparatif des surfaces. La somme des surfaces vides est d'abord obtenue, puis rapportée à l'emprise totale du plan afin de déterminer la proportion de vide. En parallèle, la surface du bâti est extraite par soustraction entre l'emprise et les vides, ce qui permet de calculer la proportion de plein ainsi que la quantité effective de matière construite (*cf*. Fig. 163).

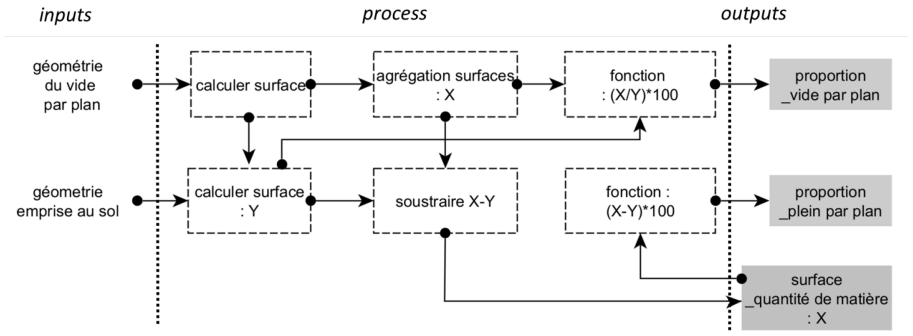


Fig. 163 – Schéma simplifié du calcul de la proportion de la quantité de la matière et le VVEC. (établie par l'auteure)

La représentation du plein est obtenue par une opération de soustraction géométrique. La surface correspondant aux vides est d'abord générée, puis retranchée de l'emprise globale du plan afin de créer une surface équivalente au bâti. Cette dernière est ensuite matérialisée par une mise en couleur, ce qui permet de visualiser directement l'occupation constructive par rapport à l'ensemble de l'emprise (*cf*. Fig. 164).

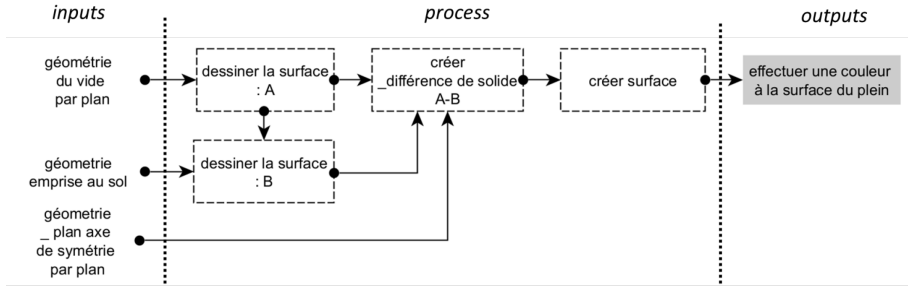


Fig. 164 – Schéma simplifié de la génération du plein (des murs) à partir du vide (les composants élémentaires). (établie par l'auteure)

La reconstitution du plan entier repose sur l'identification des indices géométriques. À partir des surfaces générées pour chaque espace et de l'emprise globale, le *script* (*cf*. Fig. 165) extrait l'indice correspondant qui permet d'agréger l'ensemble des entités. L'assemblage aboutit ainsi à la composition complète du plan étudié.

Au-delà des attributs déjà identifiés et intégrés dans le tableau d'analyse, d'autres paramètres (*cf*. Table 58), peuvent être calculés et ajoutés, en fonction de l'évolution des besoins d'interprétation, des spécificités observées dans certains plans, ainsi que de l'objectif d'amélioration de la qualité des prédictions produites.

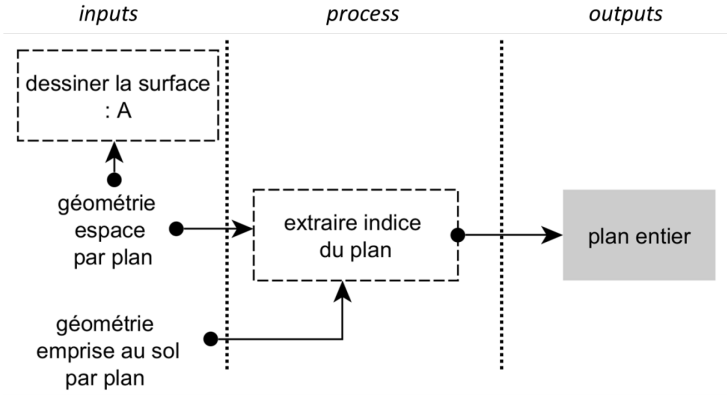


Fig. 165 – Schéma simplifié de la construction des plans entiers. (établie par l'auteure)

Table 58 – Tableau de paramètres supplémentaires au processus de la construction du PDSM. (établie par l'auteure)

attributs supplémentaires	description
nombre de côtés	calcul du nombre de segments définissant la polyligne de chaque espace. Les formes circulaires ou polygonales complexes (comme les absides) peuvent signaler des piscines ou des *caldaria*
nombre de connexions directes	calcul du nombre d'autres polylignes connectées à la pièce (contact ou forte proximité). Les espaces très connectés (comme les salles centrales) remplissent souvent des fonctions spécifiques
proximité avec des groupes d'espaces	calcul de la densité locale des centres pour estimer l'entourage d'une pièce par un *cluster,* permettant d'identifier des ensembles fonctionnels (par exemple, *caldarium* et *tepidarium* de sortie voisins)
séquence axiale : alignement de la colonne vertébrale sur l'axe de symétrie	vérification de l'alignement des espaces principaux selon l'axe de symétrie, caractéristique des organisations *canoniques* des thermes
présence d'absides ou de formes spécifiques	détection des absides ou extrémités semi-circulaires par analyse des angles et courbures de la polyligne (indicateur binaire : 1 si abside détectée, sinon 0)
matrice d'incidence (organigramme des relations entre les composants élémentaires)	représentation sous forme d'organigramme des relations topologiques entre les composants élémentaires (portes, couloirs, pièces).
position du *frigidarium* central	localisation du *frigidarium* par rapport au plan général de l'ensemble thermal
comparaison des dimensions	classement relatif de la surface ou du périmètre de chaque espace : le *frigidarium*, par exemple, présente généralement des dimensions supérieures à celles du *tepidarium*
nombre de composants élémentaires par plan	comptage des pièces par plan par assemblage des composants élémentaires, permettant d'estimer la densité spatiale globale

8.3 Structuration du PDSM

Après conversion des données tabulaires en attributs paramétriques, l'ensemble est organisé de manière logique en branches distinctes, formant une arborescence cohérente désignée sous le nom de PDSM. L'opération mobilise les *components* de Grasshopper (*Merge*, *Flatten*, *Graft*, *Path Mapper*), assurant le regroupement et la hiérarchisation des informations (composants élémentaires, secteurs, plan). Certains plugins supplémentaires peuvent compléter ce processus afin de répondre aux contraintes des phases ultérieures. Avant d'exposer la structure finale du PDSM, une présentation synthétique de quelques types de *data trees* est proposée[25] (Khabazi, 2009; Pradelle, 2018; Tedeschi & Wirz, 2014).

8.3.1 Un aperçu des différents types d'arborescence des données et de leurs applications

Les données calculées, à partir des composants élémentaires, les secteurs et les plans entiers, doivent être organisées au sein de structures appelées arbres de données ou arborescence (*data trees*) (*cf*. Fig. 166), dont la logique repose sur un système hiérarchique analogue à celui des systèmes de fichiers informatiques. Chaque *data tree* est constitué de plusieurs branches, identifiées par un chemin particulier (par exemple : {0;0}, {0;1}...), chacune contenant une liste d'éléments (*items*). Une branche peut regrouper l'ensemble des données associées à un espace fonctionnel donné, comme le *caldarium* ou le *frigidarium*. À l'intérieur de chaque branche, les éléments correspondent aux différentes *features* extraites des attributs paramétriques, tels que la surface, le périmètre ou encore les relations topologiques entre les pièces.

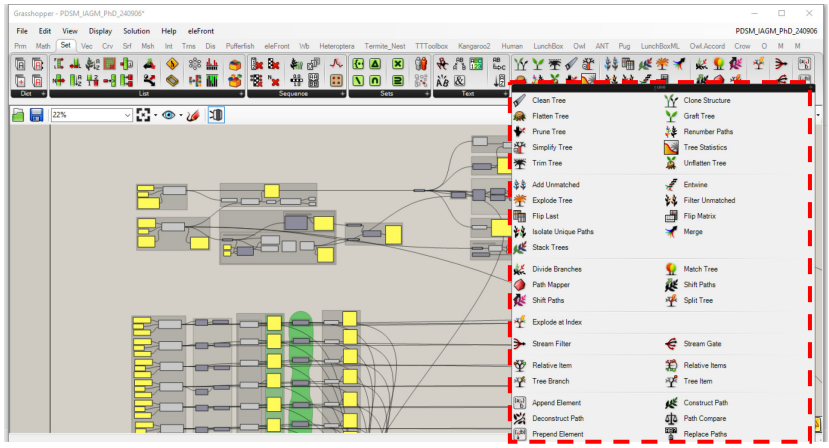


Fig. 166 – Différents composants paramétriques de *data trees* dans Grasshopper. (établie par l'auteure)

[25] Tutorials - Grasshopper

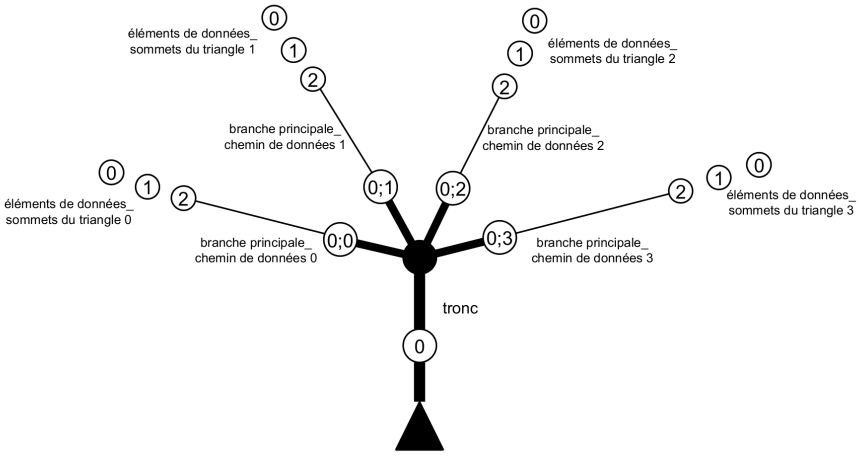


Fig. 167 – Structure de données hiérarchiques sous forme de *data tree*. Reproduit et adapté par l'auteure d'après (Tedeschi & Wirz, 2014, p. 219)

L'organisation des *data trees* dans Grasshopper peut être ajustée en fonction des objectifs du modèle AICM. Trois configurations sont envisageables selon le niveau de structuration recherché.

1. Regroupement des données selon le type d'usage des espaces : chaque branche principale est dédiée à une fonction et subdivisée en sous-branches correspondant aux différents plans. Ainsi, un *caldarium* présent dans le plan T01 (thermes d'El Knissa) est désigné par T01_*caldarium*, tandis que celui du plan T02 (thermes d'Antonin à Carthage) est identifié comme T02_*caldarium*. La hiérarchie de l'arborescence se déploie en trois niveaux, notés {A;B;C}, où : « A » correspond au type d'espace, « B » au plan d'origine, et « C » à l'ensemble des attributs paramétriques associés. Par exemple :

- {0;0;0} : surface du *caldarium* dans le plan T01 ;
- {0;1;0} : surface du *caldarium* dans le plan T02 ;
- {1;0;0} : surface du *frigidarium* dans le plan T01 ;
- {1;1;0} : surface du *frigidarium* dans le plan T02.

2. Regroupement par attribut : chaque branche principale du *data tree* correspond à un paramètre (surface, périmètre, orientation...), tandis que les sous-branches différencient les occurrences dans les plans et les types d'espaces. Ce mode de structuration est particulièrement adapté à l'analyse comparative d'un même attribut à travers l'ensemble du corpus. Par exemple :

- {0;0} : surface du *caldarium* dans le plan T01 ;
- {0;1} : surface du *caldarium* dans le plan T02 ;
- {1;0} : périmètre du *caldarium* dans le plan T01 ;
- {1;1} : périmètre du *caldarium* dans le plan T02.

3. Organisation par plan et par type d'espace : chaque branche regroupe, pour un espace donné dans un plan donné, l'ensemble des attributs. Par exemple :

- {0;0} : surface et périmètre du *caldarium* dans le plan T01 ;
- {0;1} : surface et périmètre du *caldarium* dans le plan T02.

Une fois les attributs paramétriques organisés dans le d*ata tree*, différentes manipulations peuvent être appliquées à l'aide des *components* dédiés dans Grasshopper, afin de faciliter la navigation, la sélection ou la transformation des données structurées, tels que :

1. *tree branch* (*cf*. Fig. 168) : permet d'extraire une branche spécifique du *data tree*. Il est utilisé, par exemple, pour accéder à l'ensemble des surfaces d'un même type d'espace donné au sein d'un plan particulier ;

2. *tree Item* (*cf*. Fig. 169) : permet de sélectionner un élément à l'intérieur d'une branche, en spécifiant son index. Ce *component* est utile pour extraire une valeur, telle que la surface ou le périmètre d'un espace dans un plan déterminé ;

3. *split tree* (*cf*. Fig. 170) : permet de diviser un *data tree* selon des critères définis, comme le type d'espace ou l'attribut recherché. Il facilite ainsi l'extraction sélective d'informations, par exemple en isolant les seules surfaces des *frigidaria* à travers l'ensemble du corpus.

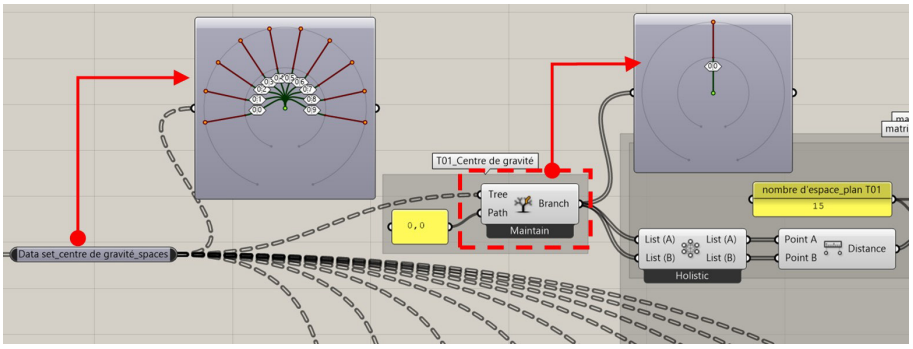


Fig. 168 – Représentation d'un ensemble des composants en utilisant le « *tree branch* ».
(établie par l'auteure)

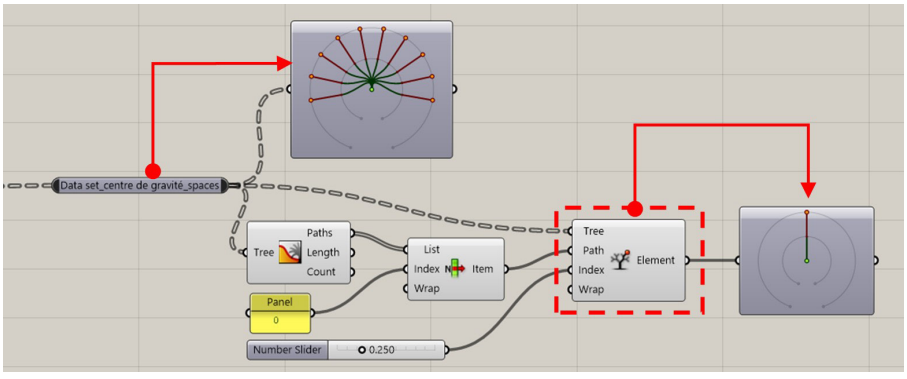


Fig. 169 – Représentation d'un ensemble des composants en utilisant le « *tree item* ».
(établie par l'auteure)

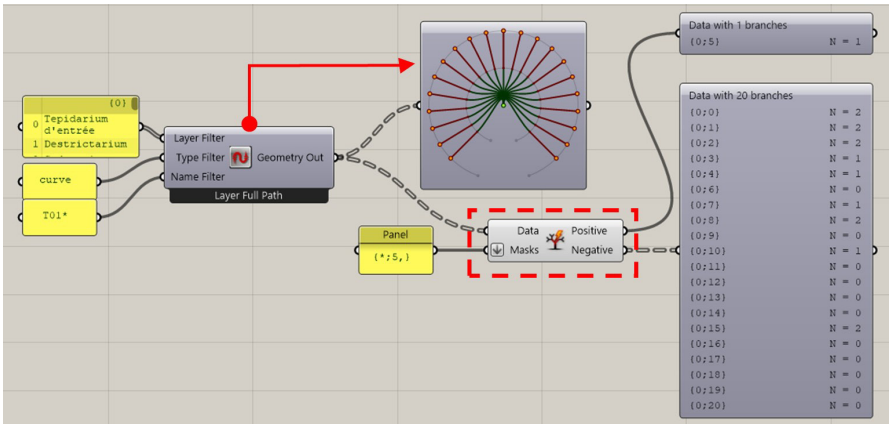


Fig. 170 – Représentation d'un ensemble des composants en utilisant le « *split tree* ».
(établie par l'auteure)

Outre les *components* dédiés à la sélection, la filtration des données peut être réalisée à l'aide d'expressions appelées masques (*masks*) [26] (*cf.* Table 59). Ces masques peuvent être combinés aux opérateurs précédemment décrits pour effectuer des sélections complexes. Ils sont fréquemment utilisés avec des *components* tels que *Replace Tree*, *Split Tree*, *Path Compare*, ainsi qu'avec des outils d'appel de calques comme *Geometry Pipeline*. Les principaux masques mobilisables sont les suivants :

1. astérisque (*) : opérateur agit comme un joker, remplaçant n'importe quel élément d'un chemin. Par exemple, la structure {0;*;1} sélectionne toutes les branches dont le premier et le troisième indice sont respectivement 0 et 1, indépendamment du second ;

2. point d'interrogation (?) : remplace une seule valeur numérique à une position donnée. Par exemple, {0;?;1} cible toutes les branches ayant le premier et le troisième indice fixé, avec un second indice libre ;

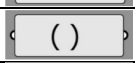
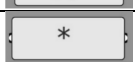
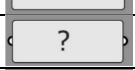
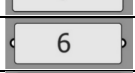
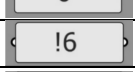
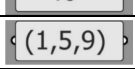
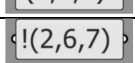
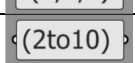
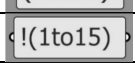
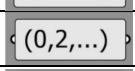
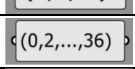
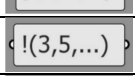
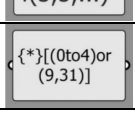
3. plage de valeurs (..) : définit une séquence d'indices. Par exemple, {0;1..3;0} sélectionne les branches dont le deuxième indice varie de 1 à 3, le premier et le troisième restant fixés à 0 ;

4. négation (!) : permet d'exclure certaines branches. La notation {!0;*;1} ignore toutes les branches dont le premier indice est 0, tout en conservant celles avec un troisième indice égal à 1 ;

5. masque de liste ({}) : permet de cibler précisément un chemin précis. Par exemple, {0;1;2} sélectionne uniquement la branche correspondant à cette séquence d'indices.

[26] https://bimcorner.com/how-to-use-masks-in-grasshopper/

Table 59 – Liste des masques dans Grasshopper. Reproduit et adapté par l'auteure d'après (https://bimcorner.com/how-to-use-masks-in-grasshopper/)

masque	description
	les accolades définissent le masque des branches de l'arbre. Utiliser un point-virgule pour séparer plusieurs branches
	les crochets définissent le masque des éléments (feuilles). Si l'on souhaite sélectionner toutes les feuilles, on peut laisser ce champ vide
	les parenthèses servent à organiser ou regrouper des conditions, principalement en combinaison avec les opérateurs booléens and (et) / or (ou)
	l'astérisque permet de sélectionner n'importe quel nombre d'entiers dans un chemin. Quelle que soit la structure de l'arbre, il inclut toutes les branches
	le point d'interrogation représente un seul entier quelconque
	désigne un entier précis, ici le nombre 6
	désigne tout entier sauf un entier spécifique, ici tout sauf 6
	sélectionne l'un des entiers indiqués entre parenthèses. Les valeurs doivent être séparées par des virgules
	sélectionne tous les entiers sauf ceux listés entre parenthèses (ici tout sauf 2, 6, 7)
	sélectionne tous les entiers compris dans une plage, ici de 2 à 10 inclus
	sélectionne tous les entiers en dehors de la plage spécifiée, ici tout sauf de 1 à 15
	sélectionne tous les entiers appartenant à une séquence infinie. La séquence doit contenir au moins deux valeurs et se terminer par trois points après une virgule
	sélectionne tous les entiers appartenant à une séquence finie, ici de 0 à 36 avec un pas de 2
	sélectionne tous les entiers ne faisant pas partie d'une séquence infinie donnée. Par exemple, cette règle retient les nombres pairs (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12...)
	combine plusieurs règles à l'aide des opérateurs and/or. Dans cet exemple, le masque sélectionne toutes les branches, les cinq premiers éléments de chaque liste de l'arbre, ainsi que les éléments 9 et 31

8.3.2 Structuration du PDSM avec les données brutes

L'organisation structurée des données facilite l'analyse et garantit une association entre chaque attribut et son élément respectif, tout en maintenant des relations claires. Le résultat conduit à un catalogue réparti selon plusieurs niveaux hiérarchiques (*cf*. Fig. 171) : (1) des attributs des composants élémentaires ; (2) des regroupements par secteurs comprenant plusieurs espaces ; (3) des caractéristiques globales associées à l'ensemble du plan thermal. Les modalités d'extraction des attributs, qui définissent la structuration du PDSM, évoluent de manière progressive, passant d'une extraction simple à des traitements optimisés, en fonction du raffinement des *components* choisis pour le calcul des caractéristiques architecturales.

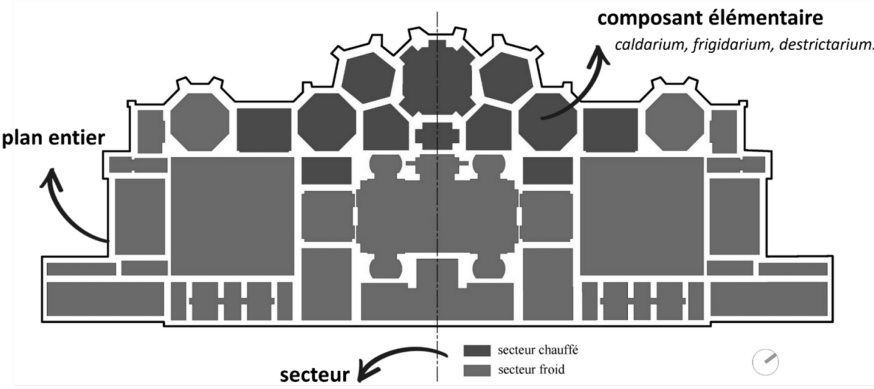


Fig. 171 – Présentation du lieu architectural dans un plan. Cas des thermes d'Antonin à Carthage. (établie par l'auteure)

Initialement, chaque opération de calcul est appliquée isolément à chaque type de composant élémentaire. Cette approche, bien adaptée à la phase exploratoire, génère une répétition de scripts identiques pour plusieurs objets (*cf*. Fig. 172), augmentant la redondance et le volume du fichier. Ce constat a progressivement orienté la réflexion vers une optimisation des calculs, visant à mutualiser les procédures et à réduire la taille des données.

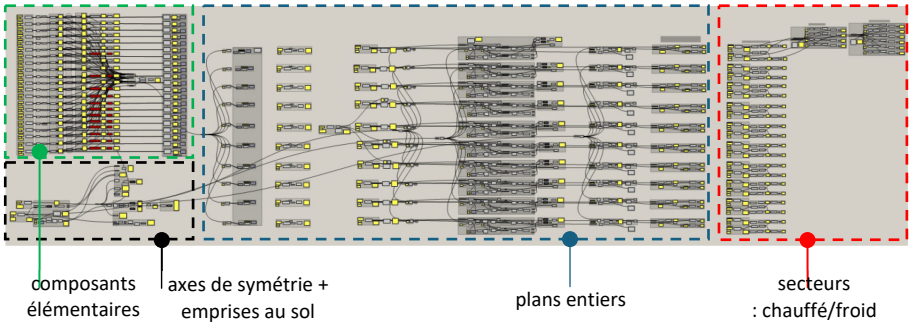


Fig. 172 – Présentation du calcul des attributs pour une première réflexion au modèle PDSM. (établie par l'auteure)

Dans cette optique, une formalisation standardisée des scripts est entreprise pour chaque attribut, de manière à ne modifier que l'entrée relative à un nouvel identifiant (*cf*. Fig. 175). Cette rationalisation conduit à l'adoption de *clusters* (*cf*. Fig. 173), condensant les scripts en un seul *component*. Cette stratégie améliore la lisibilité, facilite l'automatisation des séquences répétitives et permet une mise à jour simultanée des blocs de calculs.

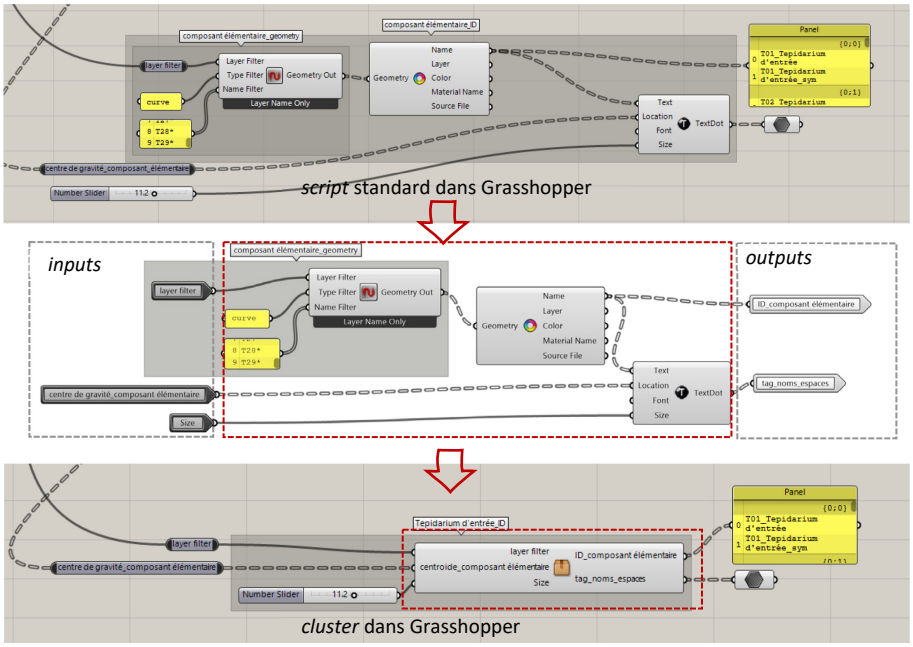


Fig. 173 – Optimisation d'un script vers une version adaptée à la construction d'un *cluster* dans Grasshopper pour l'extraction des identifiants des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

Chaque méthode de calcul et de traitement génère une organisation spécifique des *features* au sein des *data trees*. Une démarche (*cf*. Fig. 174) organise un seul *data tree* par type d'espace, regroupant pour l'ensemble des plans les attributs sous forme de branches distinctes correspondant aux paramètres mesurés (par exemple, 12 branches pour 12 attributs). Afin d'optimiser davantage la manipulation des données, les composants élémentaires sont appelés directement via leurs identifiants, permettant de récupérer, en une seule opération, l'ensemble des caractéristiques pour tous les espaces fonctionnels existants dans le corpus (*cf*. Fig. 176). La structuration du *data tree* adopte la forme {A;B;C}, où A correspond au type d'attribut, B à la fonction de l'espace, et C à l'indice du plan. Même en cas d'absence d'un espace dans un plan, la branche correspondante est conservée avec une valeur nulle, garantissant ainsi la stabilité structurelle indispensable aux traitements ultérieurs. Une version simplifiée et plus lisible de cette structuration est élaborée (*cf*. Fig. 177, Fig. 178).

Le résultat est un PDSM clair et hiérarchisé, représenté d'abord dans son ensemble (*cf*. Fig. 179), puis à travers des extraits permettant une lecture plus détaillée (*cf*. Fig. 180, Fig. 181, Fig. 182, Fig. 183, Fig. 184, Fig. 185, Fig. 186, Fig. 187, Fig. 188, Fig. 189, Fig. 190, Fig. 191, Fig. 192). Les scripts y sont organisés par blocs fonctionnels (« *features* composants élémentaires », « construction du plan entier » ...), ce qui facilite la navigation et la mise à jour du système. Chaque donnée est uniformisée dans un format unique, permettant d'exporter aisément les paramètres nécessaires

à l'entrainement, en les regroupant au sein d'un même *data tree*, comme illustré pour les composants élémentaires (*cf.* Fig. 193). Pour les caractéristiques liées aux plans entiers, chaque branche du *data tree* correspond à un plan thermal, et chaque élément de la branche à une mesure spatiale ou sectorielle. L'ensemble des attributs extraits est ainsi organisé pour permettre un entraînement cohérent sur différentes combinaisons de composants, où chaque ligne du fichier CSV final reflète un plan complet, aligné et structuré.

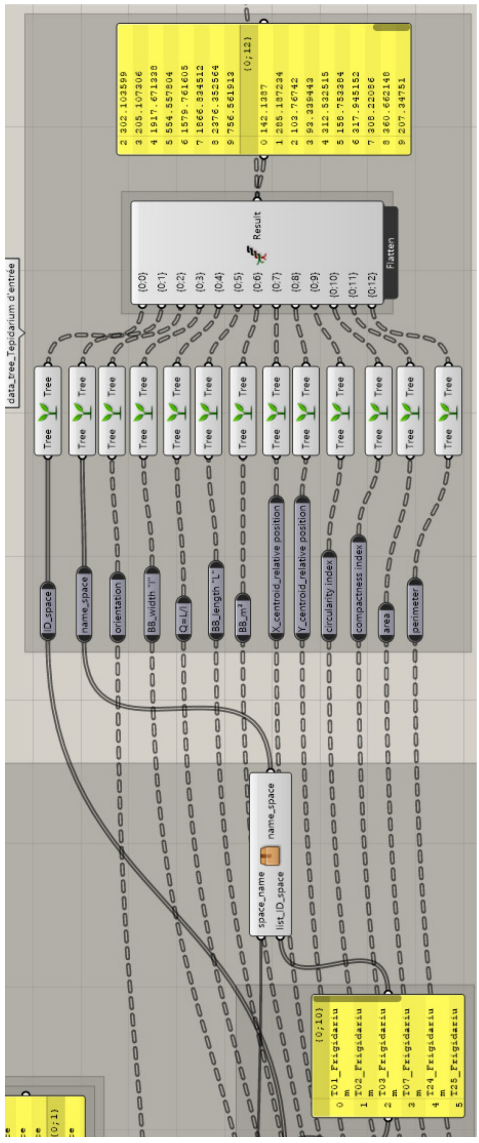


Fig. 174 – Structuration des données des composants élémentaires dans *data tree*.
(établie par l'auteure)

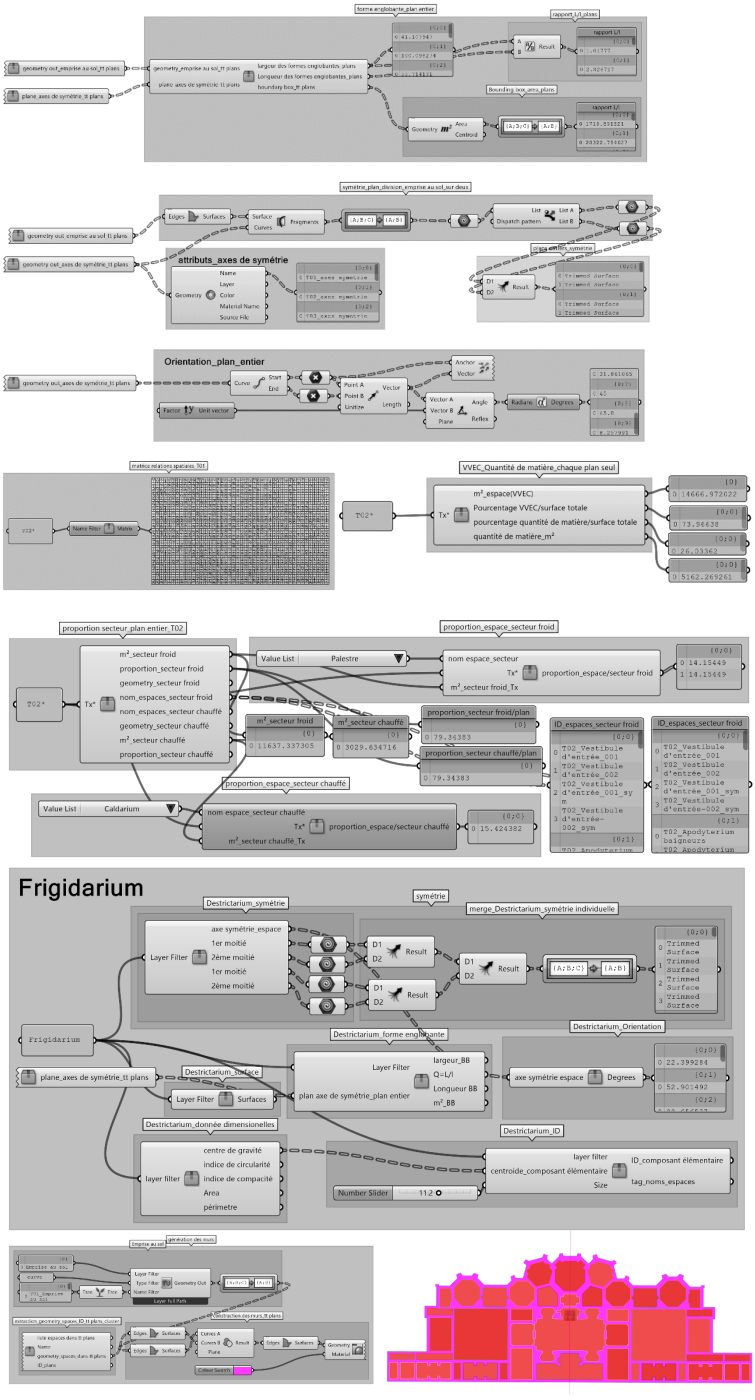


Fig. 175 – Extrait de l'organisation du calcul des attributs, des composants élémentaires, secteurs et plan, dans des *clusters*. (établie par l'auteure)

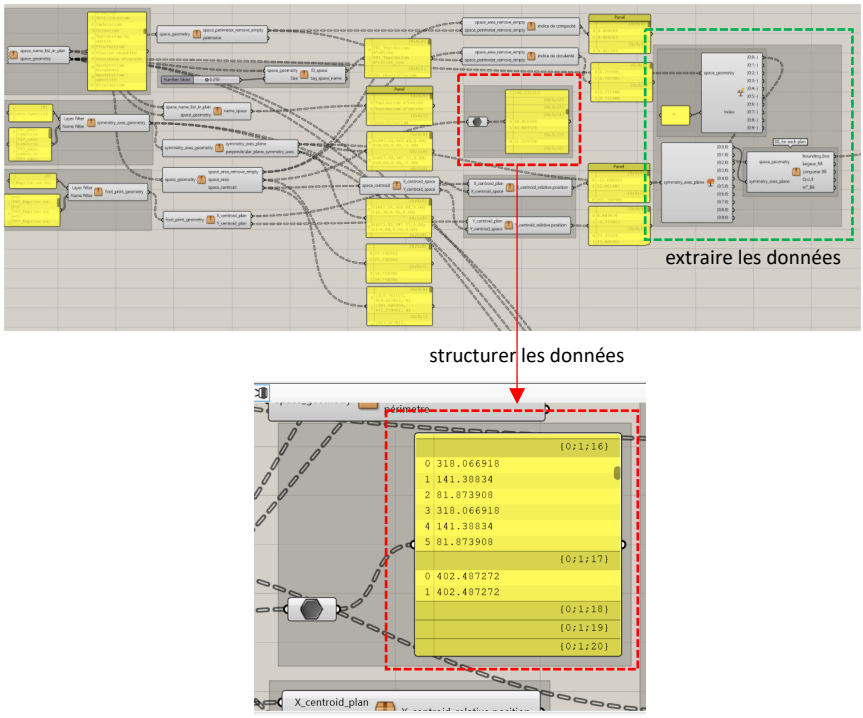


Fig. 176 – Extrait d'organisation du calcul des attributs. Entre structurer et extraire des données. (établie par l'auteure)

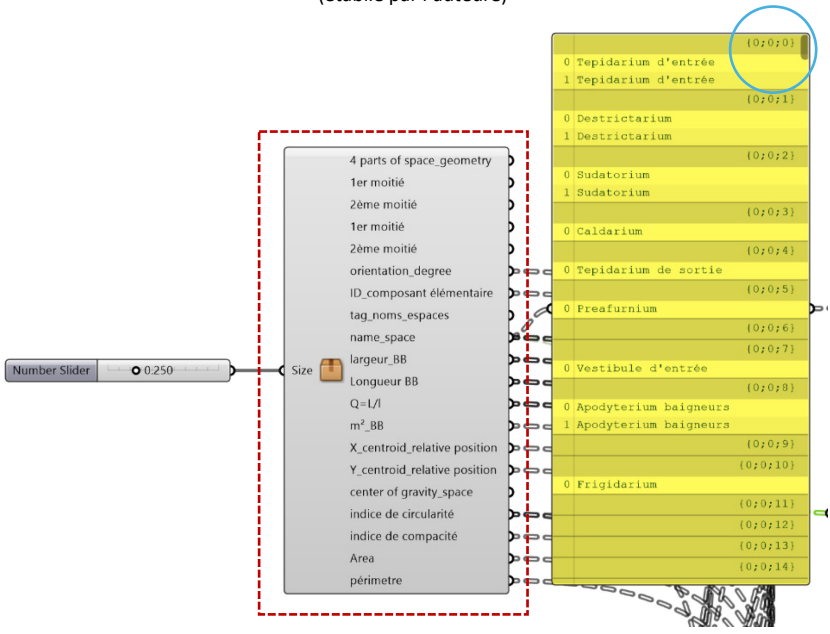


Fig. 177 – Extrait du PDSM englobant les calculs de tous les attributs des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

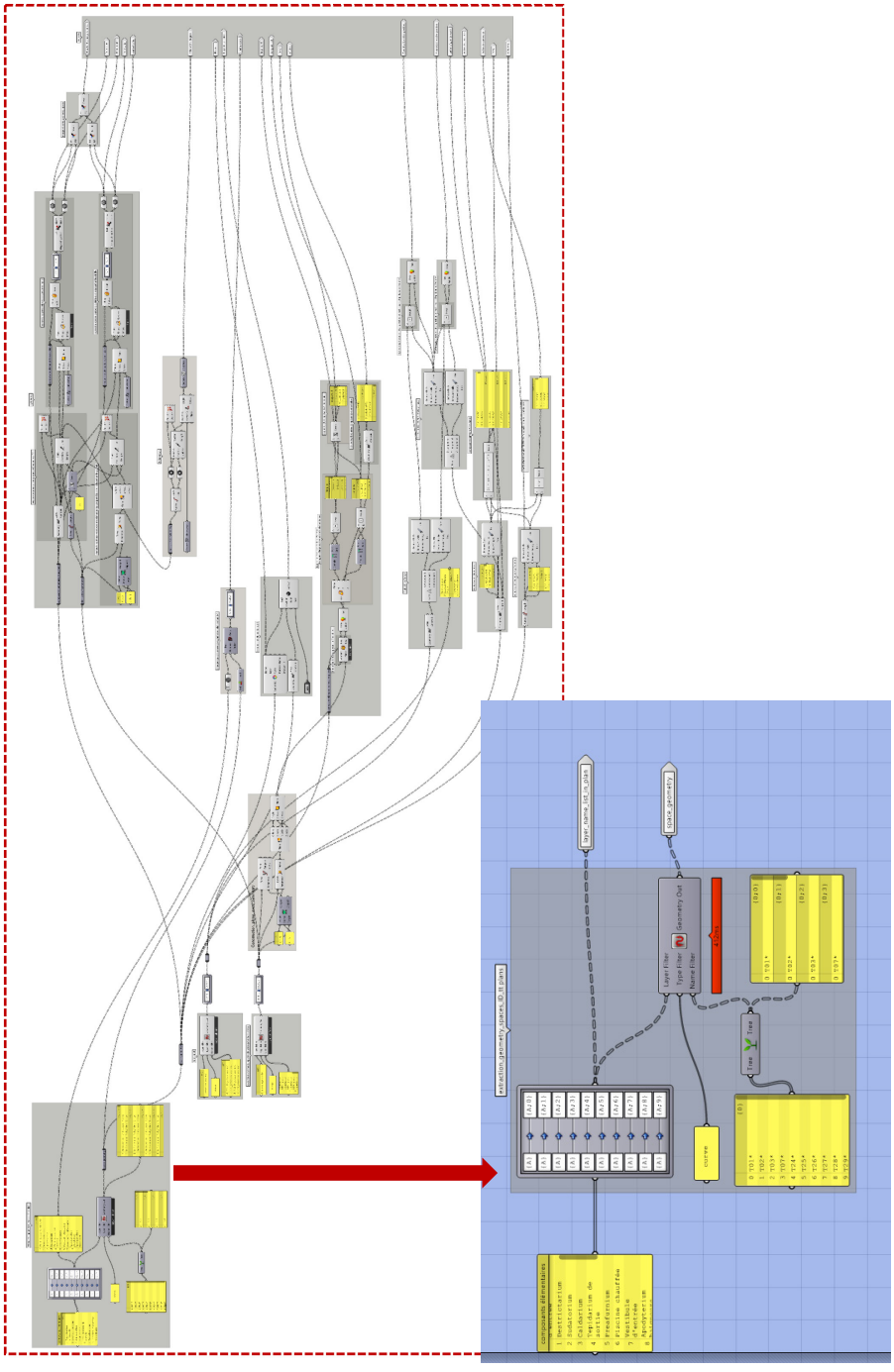


Fig. 178 – Le contenu d'un *cluster* du calcul des attributs des composants élémentaires.
(établie par l'auteure)

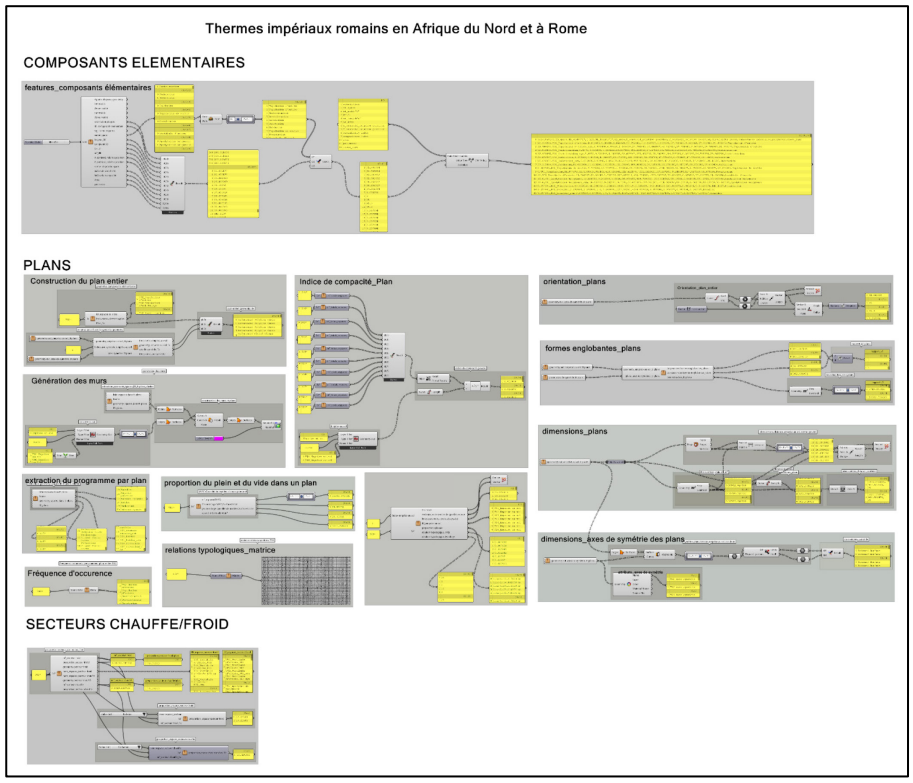


Fig. 179 – Aspect final du PDSM simplifié et compressé. (établie par l'auteure)

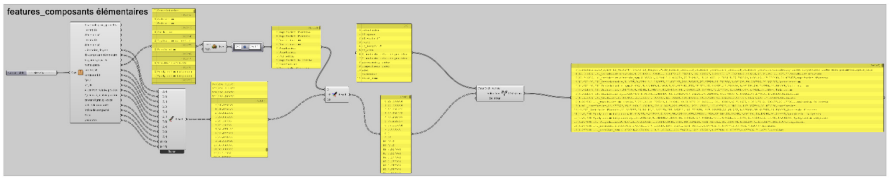


Fig. 180 – Extrait du script relatif au calcul des attributs des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

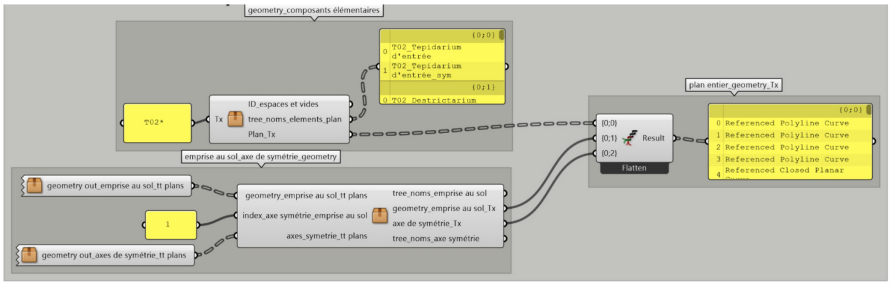


Fig. 181 – Extrait du script relatif à la construction des plans entiers. (établie par l'auteure)

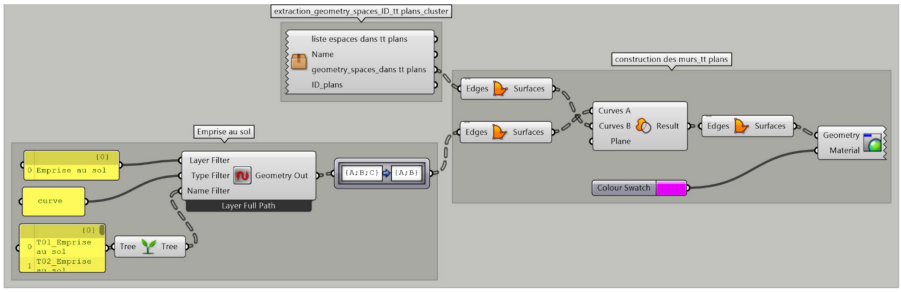


Fig. 182 – Extrait du script relatif à la génération du plein. (établie par l'auteure)

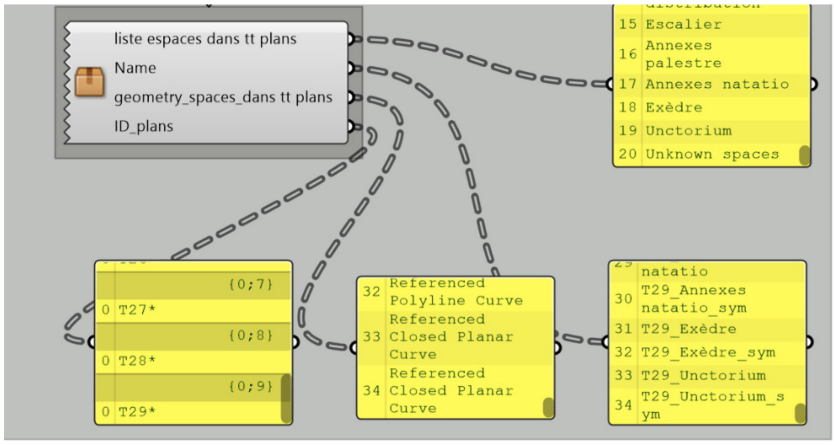


Fig. 183 – Extrait du script relatif à l'extraction du programme par plan. (établie par l'auteure)

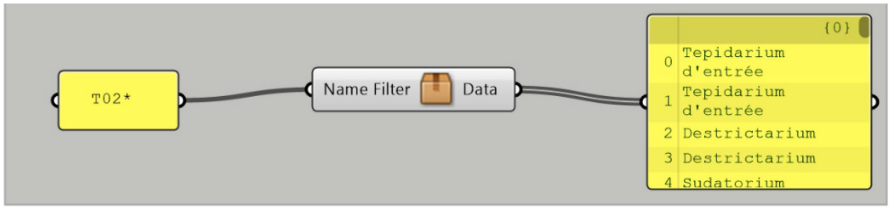


Fig. 184 – Extrait du script relatif au calcul des fréquences d'occurrence (exemple de plan T02). (établie par l'auteure)

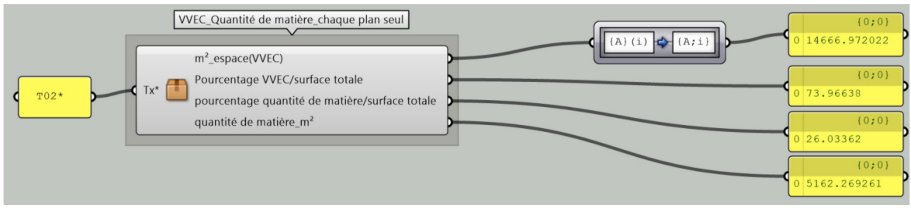


Fig. 185 – Extrait du script relatif au calcul de la proportion du plein et du vide dans un plan (exemple de plan T02). (établie par l'auteure)

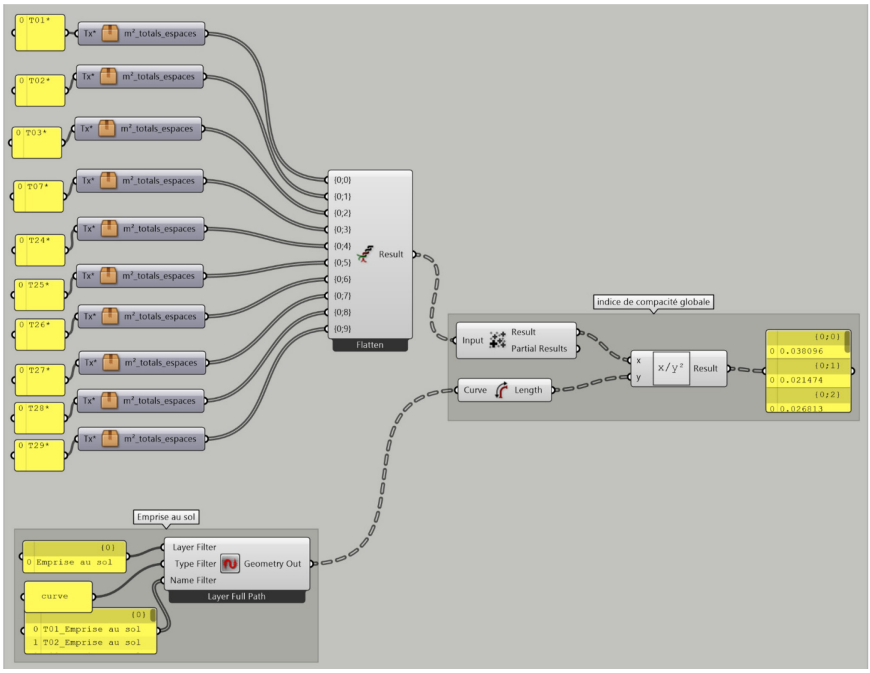


Fig. 186 – Extrait du script relatif au calcul de l'indice de compacité des plans. (établie par l'auteure)

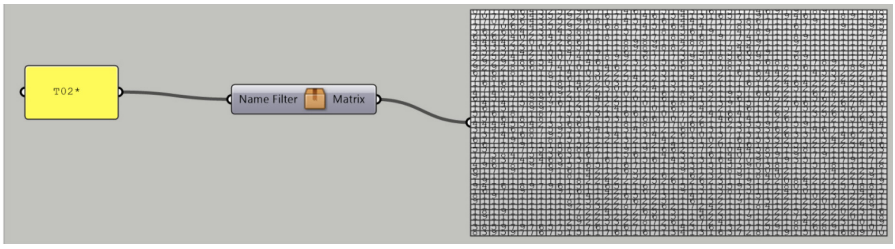


Fig. 187 – Extrait du script relatif à la construction d'une matrice (exemple de plan T02).
(établie par l'auteure)

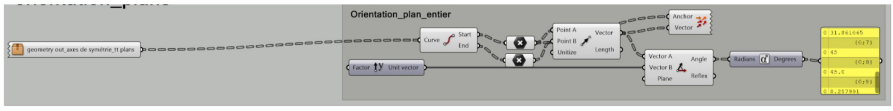


Fig. 188 – Extrait du script relatif au calcul de l'orientation du plan. (établie par l'auteure)

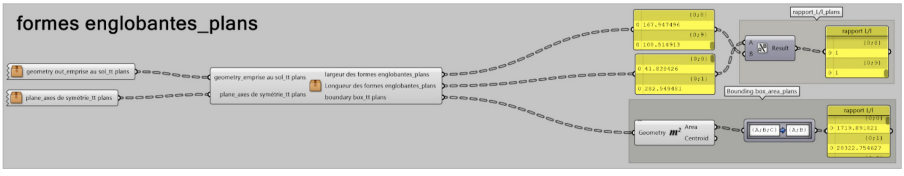


Fig. 189 – Extrait du script relatif au calcul de la forme englobante du plan. (établie par l'auteure)

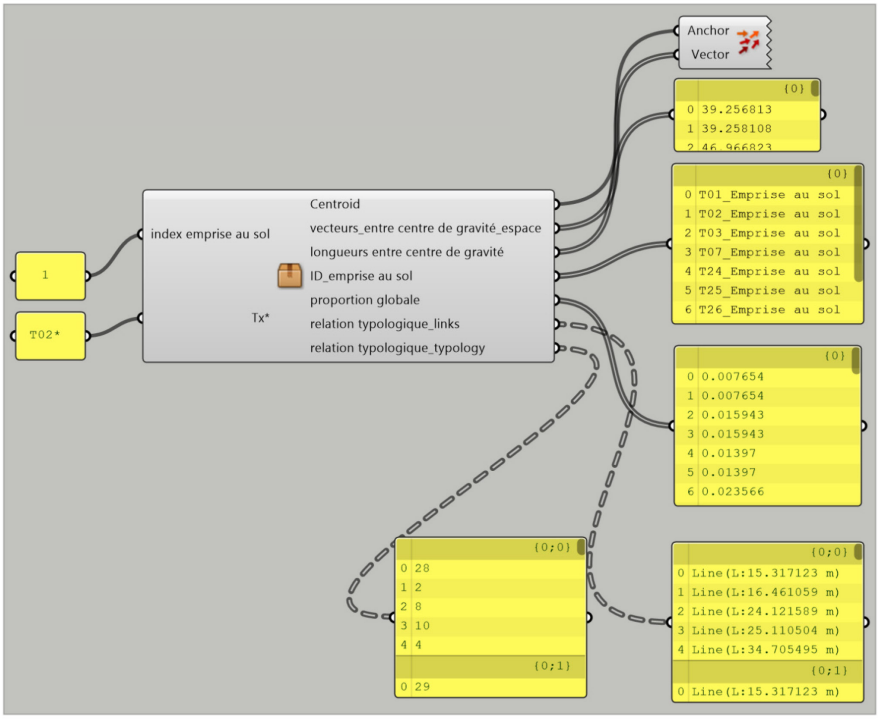


Fig. 190 – Extrait du script relatif au calcul des propriétés du plan : répartition spatiale, proportion globale, position relative des composants élémentaires par rapport au plan (exemple du plan T02). (établie par l'auteure)

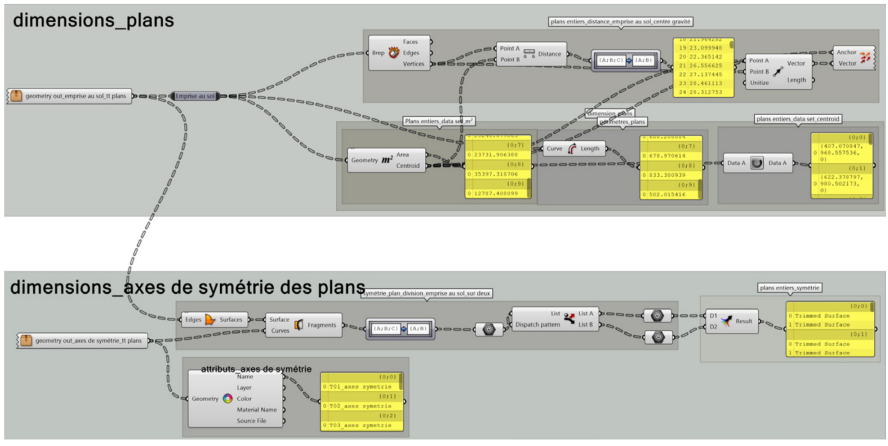


Fig. 191 – Extrait du script relatif au calcul des propriétés du plan : dimensions du plan, surface, périmètre, les centres de gravité, construction des axes de symétrie. (établie par l'auteure)

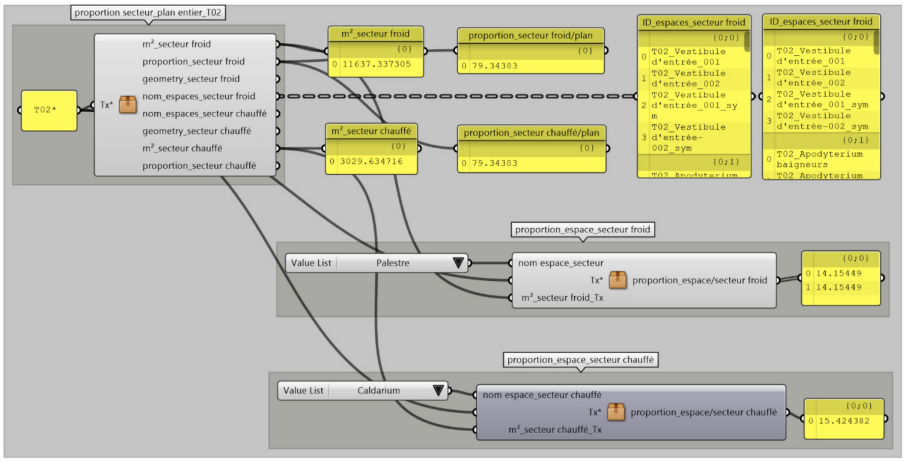


Fig. 192 – Extrait du script relatif au calcul des dimensions des secteurs froid/chauffé (exemple du plan T02). (établie par l'auteure)

L'exploitation du PDSM est directement conditionnée par les types de sorties attendues des différents sous-modèles du AICM. Chaque sous-modèle exige des entrées adaptées à son objectif. Par exemple, le premier sous-modèle ML1, dédié à la prédiction de la fonction d'un espace à partir d'un fragment partiel, nécessite une organisation par type d'attributs pour chaque fonction d'espace dans chaque plan. Les caractéristiques extraites sont d'abord combinées via le composant « Entwine », puis fusionnées par « Merge » pour constituer un *data tree* ou chaque branche correspond à un attribut unique. Cette structuration est indispensable pour convertir ensuite le tout en format CSV, avec un alignement parfait entre attributs et identifiant. La création d'un fichier CSV (*cf.* Fig. 193) est réalisée via le plugin « LunchBox Create CSV » d'où chaque ligne correspond à un espace et chaque colonne à une caractéristique : (1) ID de l'espace (exemple : T02_Caldarium pour le *caldarium* du plan des thermes d'Antonin à Carthage) ; (2) nom de l'espace (fonction de l'espace : *caldarium*, *frigidarium*…) ; (3) calcul quantitatif (surface, périmètre, coordonnées du centre de gravité (X, Y), orientation, symétrie...).

L'objectif est de conserver un jeu de données brut, mais validé, sur lequel s'appuient les différentes phases du processus. Dans cette perspective, le nettoyage appliqué au PDSM se limite à des interventions minimales : (1) détection des erreurs de saisie, telles qu'une surface négative ou un angle supérieur à 360° ; (2) harmonisation élémentaire des désignations fonctionnelles des espaces, en vue d'établir des agrégations uniformes pour l'ensemble des sous-modèles. Toute transformation plus lourde, imputation de valeurs, encodage, normalisation numérique, sélection ou suppression de branches, doit vivre dans le *pipeline* de chaque sous-modèle. Ce principe vise trois objectifs : (1) isoler les choix méthodologiques ; (2) autoriser la comparaison entre différentes stratégies d'apprentissage sans altérer la source initiale ; (3) permettre la réutilisation du même référentiel de données pour plusieurs tâches distinctes.

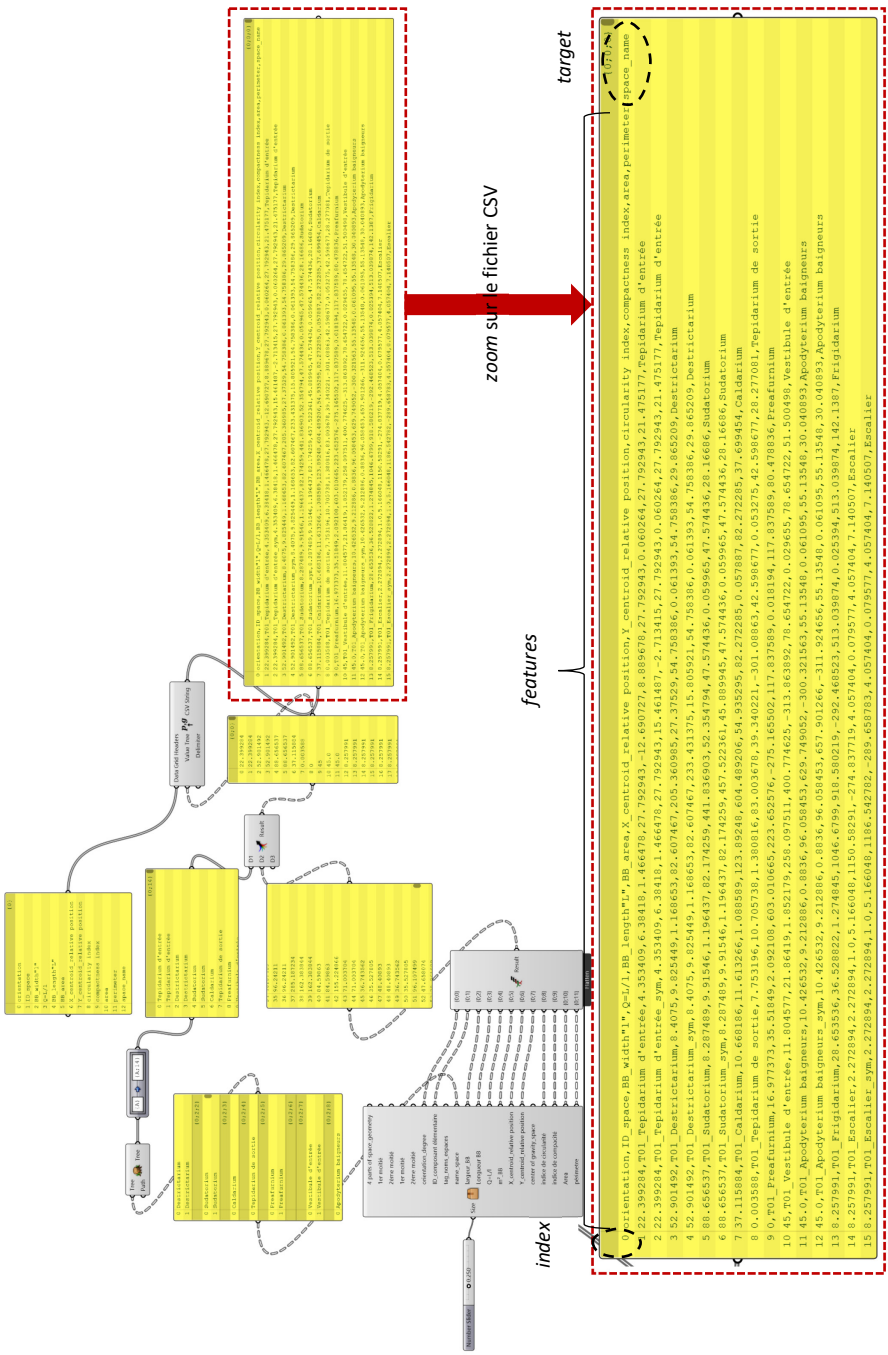


Fig. 193 – Conversion des données en fichier CSV. Exemple des données des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

8.4 D'une base de données au référentiel paramétrique

La mise en place du PDSM a permis de traduire la décomposition des thermes impériaux en un système de données paramétriques, conçu comme une archive numérique flexible. Ce modèle organise les informations issues des plans, des secteurs et des composants élémentaires sous une forme hiérarchisée, rendant possible leur manipulation dans l'environnement Rhinoceros3D/Grasshopper et leur conversion en fichiers tabulaires adaptés au ML.

L'approche méthodologique repose sur une normalisation, allant de l'importation et du nettoyage des plans jusqu'à l'extraction automatisée des attributs géométriques et fonctionnels. L'intégration de ces données dans des arborescences logiques (*data trees*) garantit la traçabilité des calculs et la compatibilité avec les besoins spécifiques de chaque sous-modèle de l'AICM. Le recours à des *clusters* et à une structuration rationalisée a réduit la redondance des *scripts*, améliorant ainsi la lisibilité et la réutilisabilité des traitements.

En consolidant des attributs mesurables à plusieurs niveaux – espaces élémentaires, secteurs et plans entiers –, le PDSM établit un cadre homogène pour comparer, analyser et relier des configurations issues d'édifices différents. Il joue ainsi un rôle double : d'une part, en tant que référentiel de description et de conservation des données architecturales ; d'autre part, comme base opérationnelle pour l'entraînement des modèles supervisés, préparant la transition vers l'étape de complétion artificielle.

9 *ARTIFICIAL INTELLIGENCE COMPLETION MODEL* (*AICM*)

Le dernier chapitre présente le développement du modèle AICM, conçu pour la phase finale de la rétroconception architecturale : celle de la *complétion* ou *recomposition*. Il s'articule en quatre sections. Le premier établit les principes de la recomposition patrimoniale, en précisant les fondements théoriques et les approches techniques retenues. Le second expose la formulation de l'algorithme général du modèle, qui encadre la structuration progressive des sous-modèles. Le troisième décrit le fonctionnement de cet algorithme à travers les différentes phases de construction du processus *intelligent*. Enfin, le dernier sous-chapitre traite l'enchainement des étapes du processus et de mise en œuvre, en décrivant les choix méthodologiques, les difficultés rencontrées et les solutions apportées.

9.1 Principes de la recomposition patrimoniale

Dans la recherche en patrimoine architectural, la rétroconception, malgré sa complexité et ses limites, offre une méthode pertinente pour modéliser et encadrer les interventions sur les édifices archéologiques dégradés par le temps. Cette approche permet non seulement de visualiser les hypothèses sur l'apparence des édifices originels, mais aussi de produire des restitutions architecturales cohérentes avec les méthodes et les styles de l'époque romaine. La restitution vise à reconstituer un édifice dans un état considéré comme originel, souvent altéré par le passage du temps. En théorie et en pratique du patrimoine, cette posture interventionniste suscite des débats sur l'authenticité et la méthode appropriée. Emmanuel Viollet-le-Duc (1866, p. 14), illustre parfois une préférence pour l'invention plutôt que pour la fidélité historique (Naifer et al., 2024), proposant des états complets qui n'ont peut-être jamais existé. Malgré cela, la restitution répond aussi à un besoin identitaire profond. Viollet-le-Duc abordait la question des limites acceptables dans la restitution, reconnaissant l'incertitude liée à l'usage des outils de génération de plans. Ces outils, bien qu'imparfaits, fournissent des indications précieuses pour envisager ce à quoi les édifices pourraient ressembler, tout en respectant des règles de composition établies. Sa méthode, empreinte de rationalité et ancrée dans un contexte romantique, admettait les limites de ses connaissances tout en aspirant à une démarche scientifique, intégrant les incertitudes sans compromettre la rigueur nécessaire à la rétroconception architecturale. Cette reconnaissance nourrit l'approche développée dans la présente thèse, où la rétroconception vise à rétablir ce qui manque, en veillant à recomposer un tout cohérent aussi fidèle que possible à l'organisation originelle de l'édifice.

Jean-Claude Golvin (2005, p. 18) identifie trois motivations principales justifiant la restitution, pouvant être transposées et adaptées au contexte étudié.

(1) La première motivation repose sur la recherche d'une image fidèle du site dans son état originel, pleinement fonctionnel et porteur de sens. Cette image vise à restituer la forme, l'esthétique et le rôle de l'édifice à l'époque de son activité, par opposition à la vision dégradée et arbitraire qu'imposent les ruines actuelles. « Le véritable problème n'est donc pas de savoir s'il faut tenter de restituer l'image d'un monument ou d'un site, il est de savoir comment le faire » (Golvin, 2003, p. 18). Plutôt que d'imposer une vision formelle reconstruite, la thèse propose une méthode de rétroconception appuyée sur l'analyse d'un ensemble structuré d'informations géométriques, typologiques et relationnelles. Organisées dans un modèle de jeu de données paramétrique (*Parametric DataSet Model* [PDSM]), ces données permettent d'opérer une transformation méthodique de la géométrie vers une base paramétrique exploitable pour la modélisation.

(2) La seconde motivation découle du besoin de comprendre et de visualiser les sites tels qu'ils existaient lorsqu'ils étaient habités. La simple contemplation de vestiges partiels ne suffit pas à saisir la réalité vécue par les sociétés antiques. Le concepteur doit s'appuyer sur une démarche scientifique, combinant restitution morphologique et recontextualisation historique, pour reconstituer l'environnement architectural, urbain et social dans lequel s'inscrivait l'édifice. Pour ce faire, le corpus mobilisé s'étend aux provinces africaines de l'empire, en prenant comme référence les thermes situés à Rome. L'ensemble est analysé à travers une grille typologique, qui permet d'extraire les constantes spatiales et fonctionnelles. Ces données constituent la base d'un apprentissage automatique (*machine learning* [ML]) visant à identifier les logiques d'agencement et à les appliquer à des fragments, dans une perspective de recomposition raisonnée.

(3) La troisième motivation de la restitution réside dans l'usage de l'outil informatique, qui offre des possibilités de flexibilité et de dynamisme dans la représentation des sites. Contrairement aux maquettes solides et fixes, souvent rigides et coûteuses à modifier, les outils numériques permettent une mise à jour rapide et efficace des modèles. L'outil informatique, par sa souplesse, permet de résoudre ces problèmes en visualisant des étapes évolutives ou en testant différentes hypothèses pour un même site. Dans le cadre de la rétroconception, l'usage des outils tels que Rhinoceros3D couplé à Grasshopper, et l'introduction d'algorithmes permet de proposer une *complétion* « dynamique ». Le PDSM structure l'ensemble des informations patrimoniales sous une forme exploitable, tandis que le modèle artificiellement intelligent de complétion (*Artificial Intelligence Completion Model* [AICM]) produit et prédit différentes complétions possibles.

La part d'interprétation attachée à toute restitution repose sur l'existence de vestiges archéologiques encore présents sur les sites. Archéologues et historiens reconstituent couramment des édifices à partir de traces matérielles, de structures fragmentaires et de sources textuelles anciennes. La présente thèse propose une approche complémentaire, visant à rétroconcevoir non seulement les éléments disparus, mais aussi à explorer les logiques de conception mises en œuvre par les

bâtisseurs romains. Les outils numériques, largement utilisés pour l'acquisition et la documentation des biens patrimoniaux existants, offrent une capacité reconnue de conservation virtuelle avant transformation ou destruction. Toutefois, leur efficacité s'avère limitée face aux édifices lacunaires ou disparus. Dans ces situations, la rétroconception devient nécessaire et impose une méthodologie capable d'intégrer une part d'inventivité maîtrisée pour pallier l'insuffisance de données.

9.2 Algorithme général du modèle AICM

La méthode repose sur l'exploitation du PDSM, structuré à partir d'un ensemble de plans complets et incomplets de thermes impériaux romains. Ce modèle sert de point d'appui à la mise en place d'un protocole d'apprentissage supervisé, conçu pour orienter la rétroconception des édifices thermaux. L'algorithme est entrainé à organiser les composants élémentaires selon des configurations cohérentes, en tenant compte de l'emprise au sol estimée pendant le processus et des contraintes spatiales issues du fragment partiellement conservé. Le processus adopte une logique itérative, intégrant à chaque étape des ajustements guidés par les résultats des prédictions précédentes.

Le recours à ML se justifie par la structure même des données mobilisées. Celles-ci ne se réduisent pas à des variables numériques isolées, mais engagent une variété d'informations à la fois quantitatives et qualitatives, traduisant les relations entre entités architecturales, au-delà de leur simple métrique.

Dans un contexte strictement numérique, l'usage de modèles génératifs, tels que les réseaux adverses génératifs (*Generative Adversarial Networks* [GANs]), aurait pu être envisagé. Ces modèles visent à produire de nouvelles distributions à partir d'un échantillon initial, sans supervision explicite. Toutefois, un tel choix ne saurait répondre aux exigences du cas présent. Les relations inscrites dans les données excèdent le champ de la génération libre : elles comportent une logique d'interdépendance entre fonctions, orientations, séquences d'usage, et nécessitent un encadrement interprétatif. Les GANs n'intègrent ni les règles compositionnelles telles que l'axialité ou la symétrie, ni les hiérarchies internes propres à l'architecture thermale. En outre, leur usage entraîne la perte des liens causaux identifiés lors de l'apprentissage, compromettant la transférabilité des régularités typologiques vers d'autres cas de configurations. Le choix d'un apprentissage supervisé, appuyé sur un ensemble *labellisé*, répond ainsi aux exigences d'une démarche fondée sur la rétroconception contrôlée, et non sur la génération aléatoire.

Le choix méthodologique repose sur une approche en ML, qui s'oppose à l'apprentissage profond (*Deep Learning* [DL]), qui nécessite un corpus volumineux et rendent difficile l'interprétation des résultats. Dans un contexte caractérisé par la rareté des données et l'exigence d'une lecture explicite des mécanismes, une démarche, qualifiée d'« approche multimodale » (Chaillou, 2019), en anglais « multimodal », « multi-objective » permet une progression raisonnée : chaque sous-modèle intervient de manière ciblée, peut être isolé pour ajustement, et conserve une lisibilité méthodologique essentielle au contrôle du dispositif global. Le modèle AICM

est structuré en cinq sous-modèles (ML1, ML2, ML3, ML4, ML5), chacun produisant une sortie intermédiaire servant l'entrée au suivant permettant une intervention du concepteur à chaque étape. Le fragment partiel d'un plan est d'abord introduit dans Grasshopper, où il est traité comme une entité incomplète comportant des espaces dont la fonction n'est pas toujours identifiée. À partir de cette entrée, un ensemble d'attributs géométriques et topologiques est automatiquement extrait, incluant la surface, le périmètre, la position relative et d'autres métriques dérivées, pour enchainer le processus de complétion :

(1) prédiction des programmes du fragment (ML 1) : dans cette étape, à l'*output*, le modèle va identifier la vocation du fragment existant. Le système s'ajuste et finit par reconnaître n'importe quel composant élémentaire : un *frigidarium*, un *caldarium*... ;

(2) identification des espaces manquants (ML 2) : analyse les espaces présents et prédit les espaces manquants à partir des relations spatiales et des caractéristiques des espaces connus, ainsi, il identifie le programme minimal à compléter ;

(3) organisation spatiale (ML 3) : en fonction de jeu de contraintes (les adjacences significatives, les dimensions caractéristiques des espaces et la position du fragment existant), le modèle propose une répartition des pièces sous forme d'organigramme, traduit les types de relations ;

(4) proposition des combinaisons géométriques possibles des composants élémentaires (ML 4) : sur la base de l'organigramme typologique estimé par ML3, ce sous-modèle propose pour chaque espace manquant une ou plusieurs géométries compatibles avec sa fonction, sa taille attendue et ses relations adjacentes. L'objectif est de produire des variantes spatiales plausibles, combinables avec les espaces déjà présents ;

(5) déduction de l'emprise au sol (ML 5) : ce sous-modèle final conduit le principe de prédiction à son niveau le plus complet. Il consiste à relever le défi suivant la création d'une empreinte de l'édifice thermal approprié pour une combinaison des composants élémentaires choisi par le concepteur dans le sous-modèle précèdent.

Pour illustrer la structuration algorithmique de cette démarche, une figure schématique (cf. Fig. 194) présente le déroulement du test à partir de l'exemple des thermes d'Aïn Doura. L'*input* correspond à un extrait fragmentaire du plan, et l'*output* attendue, à une complétion prédite par l'algorithme, en faisant référence aux essais de *reconception* proposés par Karim Bouaita dans sa thèse (2015).

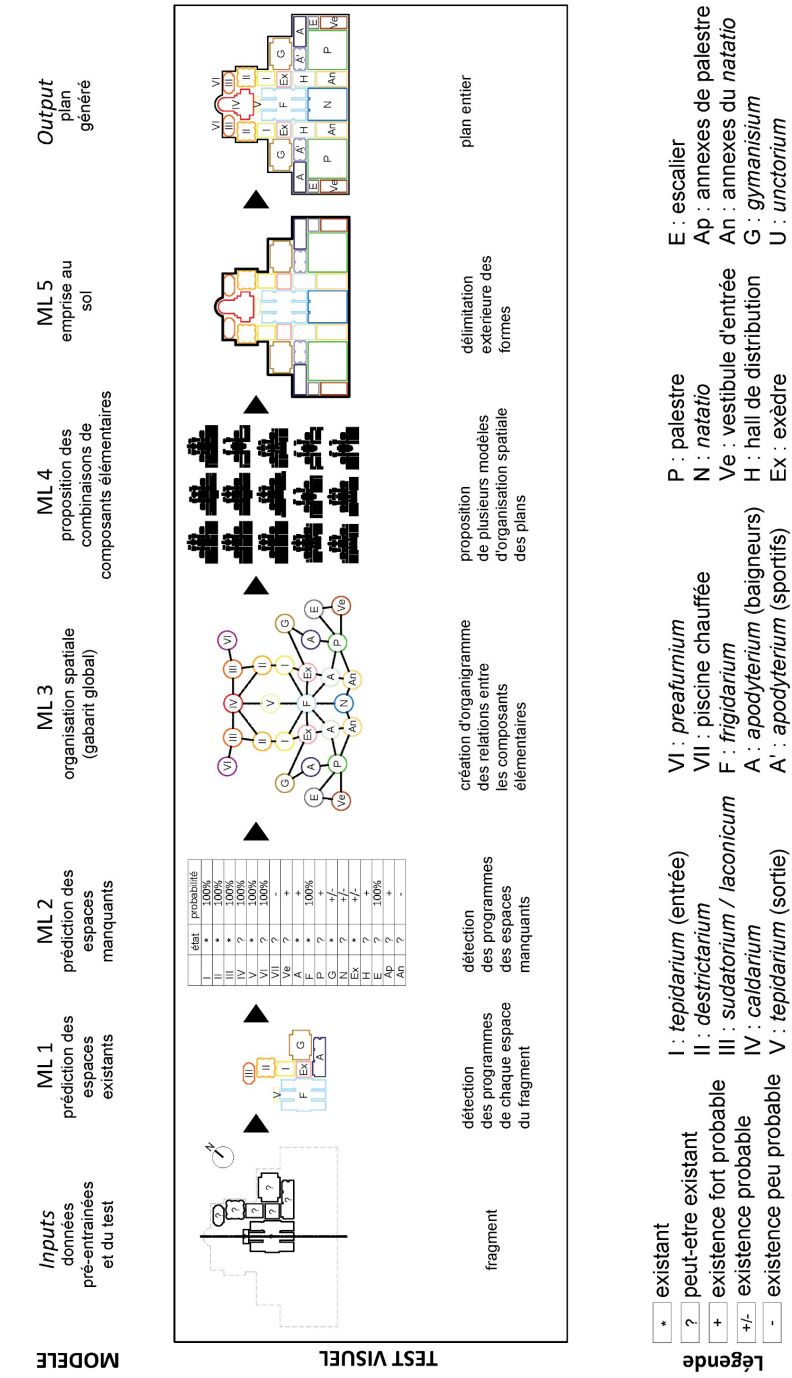


Fig. 194 – Processus de *complétion* du plan lacunaire dans le réseau de neurones (plan des thermes d'Aïn Doura). (Naifer et al., 2024)

9.3 Processus de la construction du modèle AICM

Le modèle AICM utilise les données du PDSM pour produire des représentations complètes des édifices thermaux, même à partir de plans fragmentaires. Cette approche permet non seulement de visualiser à quoi les édifices originels pourraient ressembler, mais aussi de prédire des *complétions* architecturales cohérentes avec les méthodes et styles romains. Le travail a pour finalité de fournir un modèle *intelligent* adaptable, utilisable par les acteurs du patrimoine, permettant de comprendre les thermes avant le démarrage des fouilles.

L'entraînement du modèle AICM s'effectue par itérations, en alternant phases d'ajustement et d'évaluation. L'algorithme apprend à partir d'un ensemble de données étiquetées, ce qui lui permet d'optimiser ses paramètres internes tout en construisant une représentation structurée des relations entre variables. L'objectif consiste à approcher, avec le plus de précision possible, les logiques que les données rendent observables, conformément à l'idée d'« approximation du phénomène que les données documentent » (Chaillou, 2021, p. 41). À chaque cycle, une phase de test vient mesurer la capacité du modèle à produire des inférences fiables à partir de cas non rencontrés, fournissant ainsi les éléments nécessaires pour affiner la démarche et renforcer la robustesse des prédictions.

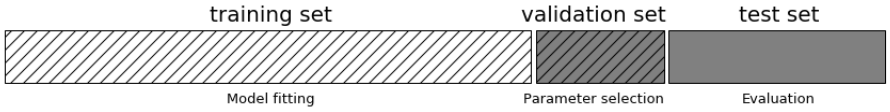


Fig. 195 – Une division tripartite des données en ensemble d'entraînement, ensemble de validation et ensemble de test. (Müller & Guido, 2016, p. 262)

Afin de garantir la validité des résultats et d'éviter toute forme de *surapprentissage*, les données issues du PDSM sont divisées en trois sous-ensembles distincts : ensemble d'entrainement (*training set*), un ensemble de validation (*validation set*) et un ensemble de test (*test set*) (*cf*. Fig. 195). La distinction entre les ensembles est fondamentale pour une application méthodologiquement correcte des méthodes de ML. Toute décision fondée sur la performance mesurée à partir de l'ensemble de test introduit une forme de *fuite* d'information (*data leakage*), compromettant l'intégrité de l'évaluation. Pour cette raison, il est impératif de réserver l'ensemble de test à une évaluation finale, sans l'utiliser lors des phases d'exploration ou de sélection de modèle. Il est donc recommandé de conduire toutes les analyses exploratoires et le réglage des hyperparamètres uniquement à partir de la combinaison *training and validation sets*. Cette règle s'applique également aux visualisations exploratoires. En effet, comparer plusieurs modèles à l'aide de *test set*, puis choisir celui qui affiche les meilleurs résultats, revient à biaiser l'estimation de la performance réelle du modèle, en la rendant artificiellement optimiste (Müller & Guido, 2016, p. 263).

(1) *training set* constitue la portion principale des données. Il est utilisé pour entraîner le modèle (étape de *model fitting*), c'est-à-dire ajuster les paramètres internes à partir des exemples connus. Cette phase vise à capter les régularités sous-jacentes aux données patrimoniales structurées dans le PDSM ;

(2) *validation set* intervient ensuite dans la phase de sélection des paramètres. Il permet d'évaluer la performance du modèle sur des données non vues pendant l'entraînement et d'ajuster les hyperparamètres (par exemple, la profondeur d'un arbre de décision ou le nombre de voisins dans un algorithme k-NN). Cette étape est essentielle pour éviter le surapprentissage (*overfitting*) et garantir une meilleure généralisation ;

(3) *test set* est conservé à l'écart jusqu'à la dernière étape du processus. Il sert à évaluer de manière équitable la capacité prédictive réelle du modèle sur des données entièrement inédites (évaluation). Cette séparation stricte garantit que l'évaluation reflète la *robustesse* du modèle et sa capacité de *généralisation* (McCarthy et al., 2006) à d'autres fragments thermaux non rencontrés pendant l'apprentissage.

1	real world goal	increase revenue
2	real world mechanism	better ad display
3	learning problem	classify click-through
4	data collection	interaction w/ current system
5	collected data	query, ad, click
6	data representation	bow[2], ± click
7	select model family	decision trees, depth 20
8	select training data	subset from april'16
9	train model & hyperparams	final decision tree
10	predict on test data	subset from may'16
11	evaluate error	zero/one loss for ± click
12	deploy!	(hope we achieve our goal)

Fig. 196 – Un processus de conception typique pour une application d'apprentissage automatique. (Daumé, 2017, p. 27)

Une confusion peut parfois s'installer entre la *validation set* et le *test set*, en raison de leur rôle similaire d'évaluation sur des données non vues durant l'apprentissage. Une distinction explicite entre les deux (Müller & Guido, 2016), présentée sous forme d'un tableau (*cf*. Table 60), permet de lever cette ambiguïté et de préciser leur fonction respective au sein du protocole de modélisation.

Table 60 – Distinction entre les ensembles de validation et de test. (établie par l'auteure)

	validation Set	*test Set*
fonction	sert à choisir le meilleur modèle pendant le processus	sert à évaluer objectivement la performance finale
moment d'utilisation	pendant l'entraînement	après le choix du modèle
utilisation autorisée	peut être utilisé plusieurs fois pour comparer les modèles (itératif, réglage d'hyperparamètres)	ne doit être utilisé qu'une seule fois (éviter le surajustement)
accès aux données	le modèle peut *voir* les données indirectement (ajustements)	le modèle n'a jamais vu ces données pendant l'entraînement. (conserver certains thermes entiers pour le cas de test)
objectif	optimisation interne	évaluation externe, généralisation

La construction d'un AICM repose sur un enchaînement structuré de phases méthodologiques, guidant la transition des données brutes vers un système prédictif exploitable. Chaque type d'ensemble de données, entraînement, validation et test, intervient à un moment précis de ce processus : l'ensemble d'entraînement alimente l'apprentissage du modèle, l'ensemble de validation sert à l'ajustement et à la sélection, tandis que l'ensemble de test est réservé à l'évaluation finale de la capacité généralisante. Cette progression a été décrite sous différentes formes par plusieurs auteurs. Hal Daumé (2017, p. 27) en propose une description séquentielle dans le cadre général de l'apprentissage automatique (*cf*. Fig. 196 p.262), tandis que la plateforme Google (2025) en expose les concepts dans le cas de l'apprentissage supervisé (*cf*. Table 61). Louis Roobaert et Damien Claeys (2024b, 2024a) identifient pour leur part quatre étapes majeures, allant de l'analyse initiale à l'exploitation du modèle entraîné. Le cadre adopté ici en reprend la logique (*cf*. Table 62), en y ajoutant une phase préparatoire à la construction du l'AICM qui suit, désignée ici comme *phase 0*, consacrée à la décomposition analytique de l'objet d'étude.

1. Phase 0 – *préparation des données* (*décomposition*) : cette étape aboutit à la constitution du PDSM, base paramétrique de référence pour l'ensemble du processus. Le PDSM est élaboré à partir d'un corpus structuré de plans de thermes impériaux et de l'identification des principes architecturaux caractéristiques observés dans leur configuration géométrique et leur organisation spatiale.

2. Phase A – *analyse et visualisation des données* (traitement et collecte des entrées) : cette phase correspond au traitement des données issues du PDSM, « allant du regroupement, au filtrage ou encore à la classification permettant l'organisation des données de manière structurée facilitant la reconnaissance de *patterns* ou la

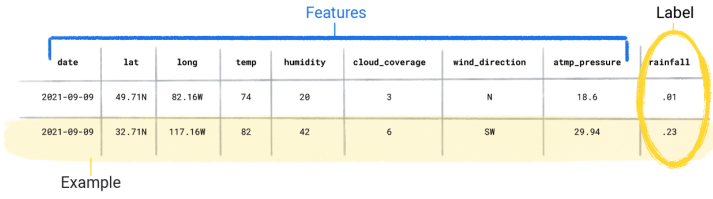
déduction d'*insights »* (Roobaert & Claeys, 2024b, 2024a). Chaque sous-modèle mobilise uniquement les données requises pour la tâche qu'il traite, sans activer l'ensemble du PDSM. Cette sélection ciblée permet d'adapter les entrées à la nature du problème posé, tout en préparant les conditions nécessaires à l'étape suivante du processus.

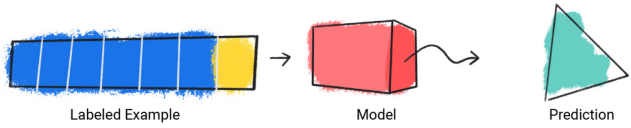
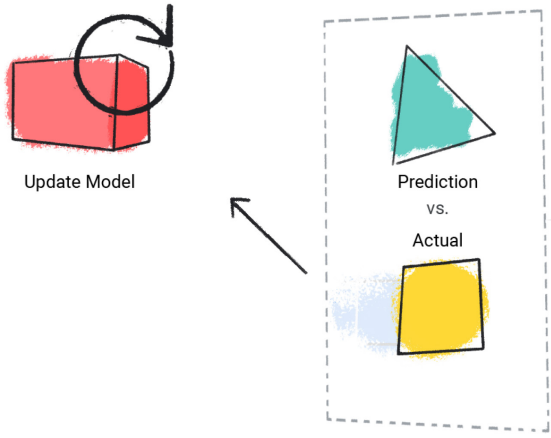
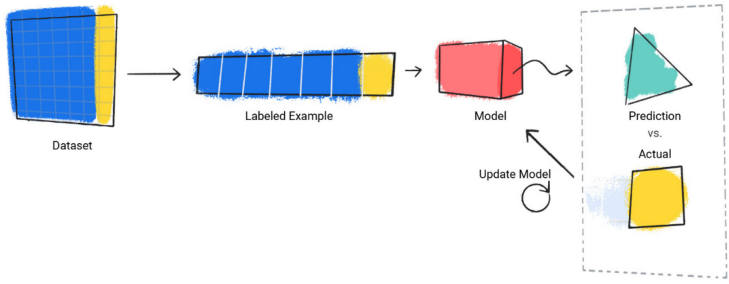
3. Phase B – *développement de modèles* : à partir des données prétraitées, les sous-modèles (ML 1, ML 2, ML 3, ML 4, ML 5) sont entraînés à l'aide du *training set*, constitué d'exemples complets issus du PDSM. Cette phase vise à ajuster les paramètres internes de chaque algorithme (poids, coefficients, seuils) à partir des données connues. Aucun ajustement de structure ou de configuration n'est encore opéré à ce stade.

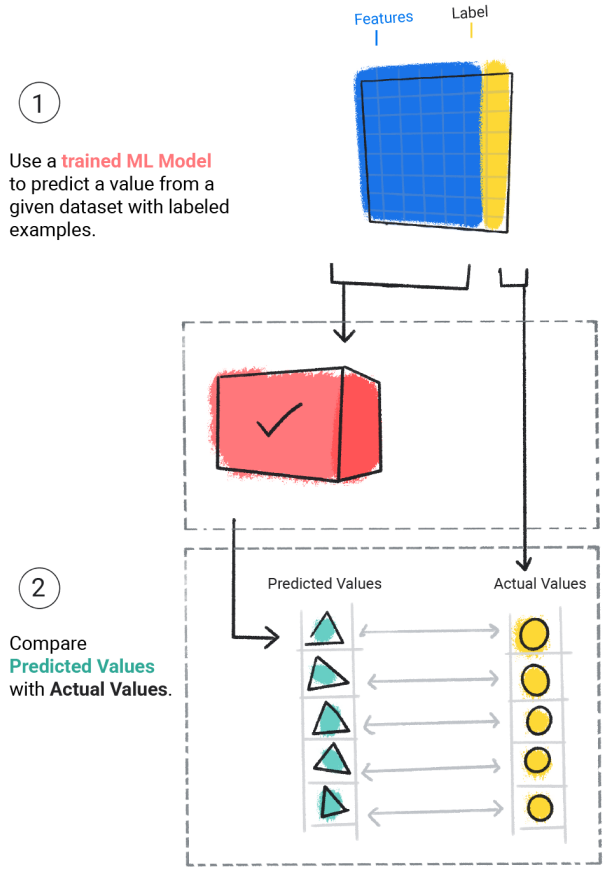
4. Phase C – *prise de décision* (validation et sélection du modèle) : une fois les modèles entraînés, leur performance est évaluée à l'aide du *validation set*, indépendant du corpus utilisé pour l'entrainement. Cette phase permet de comparer différentes *architectures*, d'ajuster les hyperparamètres (profondeur, taux d'apprentissage, nombre de nœuds...) et de sélectionner le modèle le plus performant.

5. Phase D – *inférence causale* (vérification et interprétation des résultats) : cette phase mobilise le *test set* pour évaluer la capacité du modèle à généraliser sur des données totalement inédites. Des tests croisés sont effectués en masquant des espaces dans des plans complets non utilisés pour l'entraînement, afin de vérifier si le modèle est capable de les prédire avec cohérence. La robustesse est également testée par l'introduction de légères perturbations dans les données d'entrée. En reliant les décisions produites aux structures initiales, l'inférence causale vise à identifier les facteurs explicatifs des prédictions et à évaluer la validité du processus décisionnel mis en œuvre. Elle permet ainsi « une rétroaction sur la validité des décisions prises » (Roobaert & Claeys, 2024b, 2024a).

Table 61 – Les tâches de l'apprentissage supervisé peuvent être appliquées à une multitude de scénarios. (adaptation de cours présentés par Google (« Machine Learning | Google for Developers », 2025))

concepts de base	description
données	
modèle	« est l'ensemble complexe de nombres qui définit la relation mathématique entre des schémas de caractéristiques d'entrée spécifiques et des valeurs de libellé de sortie spécifiques. »

formation	 le modèle de ML effectuant une prédiction à partir d'un exemple étiqueté
	 le modèle de ML mettant à jour sa valeur prédite
	 le modèle de ML mettant à jour ses prédictions pour chaque exemple étiqueté de l'ensemble de données d'entraînement

évaluation	 évaluer un modèle de ML en comparant ses prédictions aux valeurs réelles
inférence	le modèle est évalué est utilisé « pour effectuer des prédictions, appelées inférences, sur des exemples non étiquetés »

L'objectif n'est pas de poser une opposition entre l'automatisation et le contrôle, mais de mettre en place une alternance maîtrisée entre prédiction algorithmique et validation experte : la machine propose, l'humain décide. Un schéma (*cf*. Fig. 197) illustre les étapes du processus où l'intervention humaine reste indispensable. Loin de disposer d'une autonomie complète, le système atteint rapidement ses limites, et c'est l'intervention humaine qui oriente les choix et ajuste les résultats.

L'approche de complétion s'organise en quatre phases, où l'automatisation est cadrée par des interventions humaines aux points critiques (*cf*. Table 63).

- Phase A : la sélection des plans exploitables relève d'un choix humain, tandis que les étapes de nettoyage, d'imputation des valeurs manquantes et de normalisation sont confiées à des scripts. L'automatisation extrait les attributs géométriques et typologiques (surface, périmètre, compacité, circularité, position, relations), mais

leur hiérarchisation, leur enrichissement et leur validation exigent une intervention experte.

- Phase B : l'apprentissage automatique repose sur des algorithmes (arbres de décision, forêts aléatoires, gradient boosting, SVM), sélectionnés et configurés par le concepteur, qui écarte les options incohérentes.

- Phase C : la machine génère prédictions, matrices de confusion et scores (*accuracy*, précision, rappel, F1), tandis que l'expert identifie les *biais*, corrige les déséquilibres, ajuste les paramètres et affine la sélection des attributs.

- Phase D : mobilise des tests sur des jeux non vus et des scénarios dégradés (bruit, masquages, transferts). L'analyse des erreurs, l'interprétation des écarts et l'arbitrage des résultats relèvent à nouveau d'un raisonnement humain. Le pipeline ne vise donc pas l'autonomie, mais une complémentarité raisonnée entre capacités calculatoires et intelligence experte.

Table 62 – Les quatre phases fondamentales du processus artificiellement intelligent. (établie par l'auteure, en se référant aux travaux de Louis Roobaert et Damien Claeys (2024b, 2024a))

phase	étape	action	outil	output attendu
phase 0	préparation des données	constitution de la base de données (chapitre 5)	documents patrimoniaux et Autodesk	PDSM
		décomposition des plans et extraction des attributs associés (chapitre 7)	Autodesk	
		implémentation des plans et traduction des paramètres dans l'environnement numérique (chapitre 8)	Rhinoceros3D/Grasshopper	
phase A	*data analysis*	sélection et traitement des entrées pour chaque sous-modèle	Grasshopper ; algorithmes de visualisation (PCA…)	données filtrées et prêtes pour l'entrainement
phase B	*model development*	entraînement et ajustement des paramètres internes des sous-modèles (ML1, ML2, M3, ML4, ML5) à l'aide de *training set*	algorithmes supervisés (*Random Forest*, *SVM*...)	sous-modèles entrainés avec paramètres optimisés
phase C	*decision making*	comparaison des modèles d'apprentissage et réglages des hyperparamètres	métriques de performance (matrice de confusion, courbe ROC...)	modèle d'apprentissage sélectionné pour chaque sous-modèle avec hyperparamètres ajustés
phase D	*causal inference*	test croisé, perturbation des entrées et analyse causale	algorithmes comme *Causal Forest*	validation de la robustesse et interprétation des prédictions

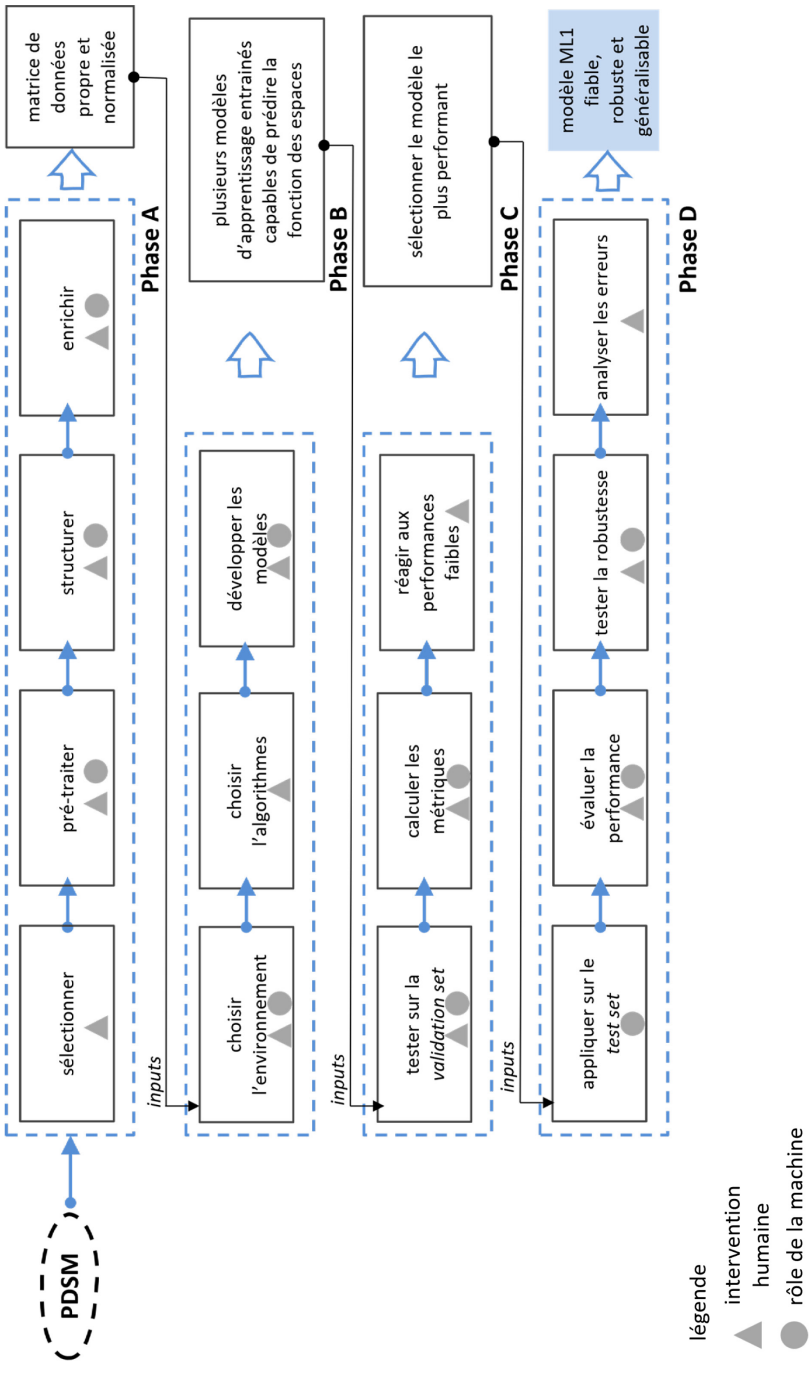


Fig. 197 – L'approche détaillée de complétion en quatre phase : Cas du sous-modèle ML1.
(établie par l'auteure)

Table 63 – Rôles humain–machine par phase dans le processus de complétion (ML1).
(établie par l'auteure)

phase	étape	intervention humaine	rôle de la machine
A	sélectionner	choix des plans exploitables, validation des classes connues	—
	pré-traiter	supervision du nettoyage, arbitrage sur valeurs imputées/échelles	nettoyage géométrique, détection/anomalies, normalisation
	structurer	définition/ajustement de la liste d'attributs pertinents	extraction automatique des attributs
	enrichir	ajout/validation de métadonnées, contrôle des enrichissements	calculs paramétriques, agrégats, rééquilibrage (*SMOTE*/poids)
B	choisir l'environnement	sélection de l'environnement (Grasshopper + Python/scikit learn...)	—
	choisir les algorithmes	choix raisonné des modèles (*décision tree*, random forest, *gradient boosting*, SVM…)	—
	développer les modèles	suivi des sorties, exclusion des configurations inadéquates	entraînement sur le *training set*
C	tester sur la *validation set*	vérification de l'échantillonnage	prédictions automatiques sur X_val
	calculer les métriques	interprétation critique des résultats/biais	matrice de confusion, *accuracy*/*precision*/*recall*/F1
	réagir aux performances faibles	ajustements : algorithme, hyperparamètres, attributs, normalisation, rééquilibrage	—
D	appliquer sur le *test set*	—	prédictions sur données inédites (X_test)
	évaluer la performance	lecture critique, jugement de généralisation	calcul des métriques finales, éventuellement ROC/AUC
	tester la robustesse	analyse de sensibilité et des limites	simulations (bruit, masquages…)
	analyser les erreurs	analyse typologique au cas par cas, décisions d'intégration finale	—

9.4 Enchainement des quatre phases du processus *intelligent*

L'illustration d'un cas simple de classification supervisée, présentée par Muller Andreas C. et Sarah Guido (2016), permet de clarifier les principes fondamentaux du ML. Leur exemple met en scène une botaniste amateur souhaitant identifier des espèces d'iris à partir de mesures relevées sur les pétales et sépales (longueur et largeur, en centimètres). Disposant également d'un jeu de données étiqueté, fourni par un expert, elle cherche à entraîner un modèle capable de prédire l'espèce d'un nouvel échantillon parmi les catégories *setosa*, *versicolor* ou *virginica* (*cf*. Fig. 198). Ce schéma méthodologique est transposé à titre théorique au sous-modèle ML1, conçu pour prédire la fonction des espaces à partir d'un fragment de plan thermal. En s'inspirant du fonctionnement du *dataset* Iris, chaque composant élémentaire identifié, caractérisé par des attributs géométriques, relationnels…, est considéré comme une

unité d'analyse dont la fonction est à inférer. La présentation des quatre phases de construction du modèle AICM s'appuie donc sur une simulation méthodologique de leur application à ML1. Chaque étape, depuis le traitement initial des données jusqu'à l'évaluation du modèle, expose les choix algorithmiques, de techniques de prétraitement ou d'environnement de travail.

À ce stade, le positionnement méthodologique ne cherche plus à interroger le fonctionnement des algorithmes, mais à prendre conscience des choix opérés, des résultats obtenus et des limites qui en découlent. Celles-ci tiennent principalement de la qualité du corpus, autrement dit données réellement accessibles à l'algorithme. Cette recherche propose un *artefact* méthodologique, un *pipeline* paramétrique éprouvé, qui structure l'ensemble du processus de rétroconception des thermes romains. La thèse apporte un modèle PDSM et une méthode dont la validité analytique est démontrée ; l'entraînement des sous-modèles de ML, massif, sensibles aux avancées logicielles, pourront alors devenir les premiers chantiers post-doctorat, bâtie sur un socle désormais stabilisé.

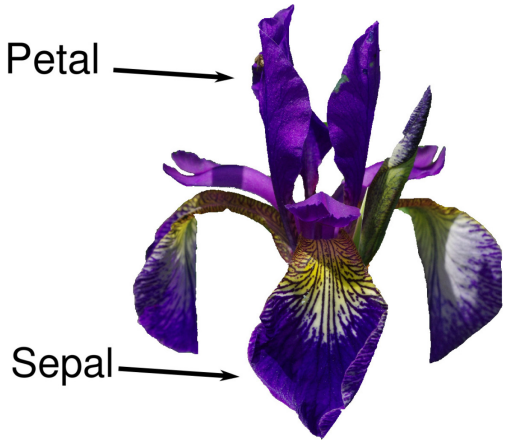


Fig. 198 – Les parties de la fleur Iris. (Müller & Guido, 2016, p. 14)

9.4.1 Phase A : analyse des données

9.4.1.1 Choix et prétraitement des données extraites du PDSM

Cette phase correspond à la sélection, au traitement et à l'organisation des données en fonction de la nature de la sortie attendue pour chaque sous-modèle. La répartition des attributs retenus pour chaque ML est synthétisée dans un tableau (*cf*. Table 64).

Table 64 – Répartition des attributs pour l'entraînement des sous-modèles. (établie par l'auteure)

	attribut	utilité pour le sous-modèle	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5
attributs des composants élémentaires	type d'usage (ID)	- *target* (à prédire) - pour imposer des règles de voisinage fonctionnel - lie forme et fonction	*		*	*	
	surface	- discrimine les fonctions par gabarit - sert à définir la taille de la forme probable	*			*	
	centre de gravité	- position absolue et relative dans le plan. - permet d'organiser les espaces autour d'un axe ou d'un centre	*		*		
	périmètre	- discrimine les formes selon leur fonction (programme) - sert à proposer une combinaison de forme probable (allongée, compacte, circulaire)	*			*	
	indice de compacité	- aide à distinguer les fonctions circulaires ou rectangulaires - sert à estimer si la forme est proche d'un carré ou allongée	*			*	
	indice de circularité	- identifie les formes circulaires				*	
	symétrie au sein de l'espace	- étudier la régularité géométrique interne des composants	*				
	dimensions des formes englobantes des composants élémentaires	- aide à caractériser les formes propres à chaque fonction - donne une tendance sur l'étirement de la forme	*			*	
	orientation	- certaines fonctions suivent une orientation préférentielle	*				
	relations typologiques des composants élémentaires	- sert à la reconstitution des logiques d'enchaînement			*		
attributs des secteurs	proportions des composants élémentaires dans le secteur	- permet d'analyser la distribution interne au sein des secteurs fonctionnels			*		
	proportion de chaque secteur par rapport au plan entier	- sert à évaluer l'équilibre entre secteurs froids et chauffés par rapport à l'emprise globale		*			
	surface sectorielle	- estimation du nombre d'espaces manquants par volume disponible		*			
attributs globaux des plans	surface	- estimation du nombre d'espaces manquants par volume disponible - base de l'emprise minimum à prévoir		*			*
	centre de gravité	- permet d'organiser les espaces autour d'un axe ou d'un centre - sert à recentrer le contour proposé			*		*
	périmètre	- est utilisé pour l'analyse d'emprise					*

	attribut	utilité pour le sous-modèle	ML1	ML2	ML3	ML4	ML5
	relations typologiques (matrice)	- vérifie l'absence de liens fonctionnels attendus - source des relations spatiales		*	*		
	fréquence d'occurrence	- pondère la vraisemblance d'un usage en fonction du corpus. - compare ce qui est attendu avec ce qui est présent	*	*			
	calcul de la répartition spatiale	- sert à identifier les zones sous-occupées - mesure de dispersion à prendre en compte		*			*
	orientation générale de l'édifice	- sert à orienter la polyligne de contour					*
	proportion globale (surface composant / plan)	- poids relatif d'un espace dans l'ensemble	*				
	position relative des composants élémentaires par rapport au plan	- l'emplacement par rapport au centre du plan peut être signifiant. - détection des zones vides périphériques ou centrales. - sert à déterminer les schémas spatiaux - aide à dessiner le contour externe à partir des points extrêmes	*	*	*		*
	calcul des dimensions des formes englobantes des plans entiers	- sert à définir la morphologie générale du plan pour adapter les emprises					*
	calcul d'indice de compacité globale	- évalue la densité spatiale totale de l'ensemble bâti					*
	analyse de symétrie	- certaines fonctions sont souvent placées symétriquement. - signale un déséquilibre pouvant indiquer une absence - contrainte pour ordonner les placements - sert à structurer une emprise régulière ou dissymétrique	*	*	*		*
	proportions du plein et du vide dans un plan	- sert à évaluer la complétude géométrique d'un plan		*			
	construction des plans entiers	- sert de base pour le regroupement des espaces dans l'emprise globale					*

Une fois les données structurées sont sélectionnées pour la tâche précise, elles font l'objet d'un prétraitement destiné à corriger les valeurs manquantes, homogénéiser les formats et éliminer les doublons. Ce nettoyage est suivi d'une normalisation visant à mettre les variables sur une échelle comparable, condition nécessaire au bon fonctionnement des algorithmes d'apprentissage supervisé mobilisés par les différents sous-modèles. Certaines caractéristiques, telles que la distance entre les

points de l'emprise au sol et le centre de gravité, génèrent plusieurs valeurs pour un même plan, ce qui rend leur intégration directe en ligne unique dans un fichier CSV inadaptée. Deux solutions permettent de structurer ces données de façon exploitable : (1) calcul des statistiques agrégées, telles que la moyenne, l'écart-type, ainsi que les valeurs extrêmes (minimum et maximum), afin de condenser l'information dans des indicateurs synthétiques. Ces agrégats sont générés automatiquement à l'aide de composants comme *Average*, *Min*, *Max* et *Standard Deviation* dans Grasshopper ; (2) sérialisation des valeurs sous forme de chaîne, en les concaténant dans une cellule unique séparée par un caractère défini (par exemple, virgule ou point-virgule). Cette méthode permet de conserver l'ensemble des données, mais implique une conversion préalable pour les rendre numériquement exploitables.

L'unité de mesure utilisée peut influencer l'analyse des données. Par exemple, convertir la taille de mètres en pouces ou le poids de kilogrammes en livres peut produire des résultats très différents. De manière générale, exprimer un attribut dans une unité plus petite augmente son intervalle de variation, ce qui tend à accentuer son influence ou son poids dans l'analyse. Pour limiter la dépendance aux unités de mesure choisies, il est recommandé de normaliser ou de standardiser les données. Cela consiste à transformer les valeurs afin qu'elles se situent dans un intervalle restreint ou commun, tel que [–1, 1] ou [0, 1]. Il existe plusieurs méthodes de normalisation des données, parmi les plus courantes figurent : la normalisation min-max, la normalisation par score z (z-score), et la normalisation par échelle décimale (Han & Kamber, 2012, p. 113-114).

La normalisation des données s'effectue dans Grasshopper à l'aide de *components* (*cf*. Fig. 199), dédiés qui automatisent cette opération. Le composant *Bounds* extrait les valeurs minimale et maximale pour chaque attribut (surface, périmètre, orientation...), fournissant ainsi les bornes nécessaires à l'ajustement. Ces bornes sont ensuite transmises au composant *Remap Numbers*, qui réajuste les séries de données dans un intervalle prédéfini, tel que [0, 1] ou [-1, 1], assurant ainsi une mise à l'échelle homogène entre les différentes variables.

Avant d'entamer l'entraînement du modèle il est essentiel de structurer les données en deux catégories : (1) les *inputs* (entrées) correspondent aux caractéristiques (*features*) extraites des fragments de plan, telles que la surface, le périmètre, l'orientation des espaces présents, et les relations spatiales. Ces données décrivent les caractéristiques des espaces sans indiquer la fonction convenable ; (2) les *output* (sorties) représentent l'attribut à prédire (*labels*) des espaces du plan c'est-à-dire les fonctions (le programme). Les modèles de ML, tels que ceux implémentés via des bibliothèques comme *scikit-learn*, ne traite pas directement les plans architecturaux ou les axes de symétrie sous forme graphique. L'entrée du modèle est un tableau numérique, dans lequel chaque pièce est décrite par un ensemble de caractéristiques calculées à partir des plans. Le modèle reçoit un tableau structuré (*cf*. Fig. 200), ou format CSV (*cf*. Fig. 201) où chaque ligne, dans le cas du ML1, correspond à une pièce et chaque colonne représente une caractéristique.

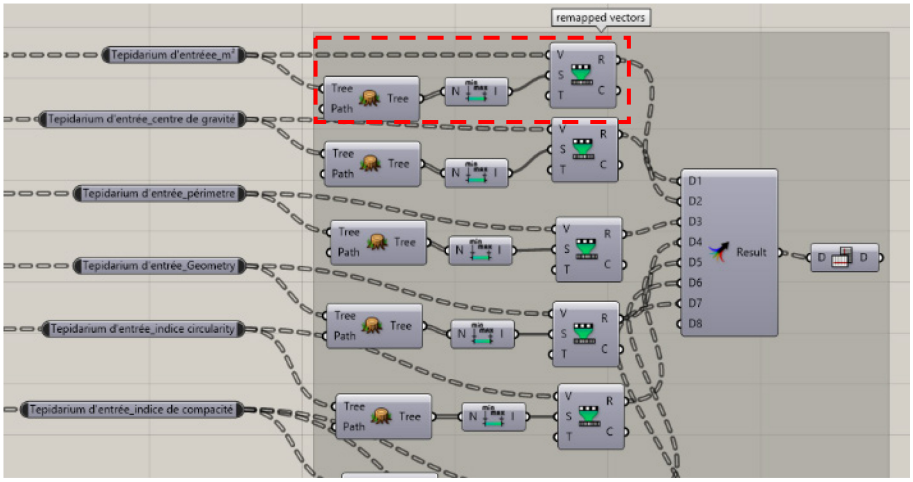


Fig. 199 – Extrait du script sur Grasshopper de normalisation des données. (établie par l'auteure)

labels ***features***

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	space_name	orientation	BB_width*l*	Q=L/l	BB_length*L*	BB_m²	roid_relative	proid_relative	circularity	indempactness inc	area	perimeter
2	Tepidarium d'entrée	22.399284	4.353409	1.466478	6.38418	27.792943	419.761573	959.667857	0.757305	0.060264	27.792943	21.475177
3	Tepidarium d'entrée	22.399284	4.353409	1.466478	6.38418	27.792943	391.609359	971.270951	0.757305	0.060264	27.792943	21.475177
4	Tepidarium d'entrée	52.901492	9.069001	1.84675	16.748174	151.889212	590.105278	958.152289	0.715827	0.056964	151.779258	51.618699
5	Tepidarium d'entrée	52.901492	9.069803	1.846634	16.748608	151.906569	635.093926	1017.644124	0.715827	0.056964	151.779258	51.618699
6	Tepidarium d'entrée	88.656537	9.28356	0.447434	4.153779	38.561856	837.849197	980.677419	0.670936	0.053391	38.561856	26.874678
7	Tepidarium d'entrée	88.656537	9.28356	0.447434	4.153779	38.561856	839.147916	1036.054794	0.670936	0.053391	38.561856	26.874678
8	Tepidarium d'entrée	37.115884	4.404469	1.908057	8.403979	37.015063	1016.393483	1000.983033	0.811792	0.0646	33.201975	22.670676
9	Tepidarium d'entrée	37.115884	4.393121	1.884542	8.279022	36.370746	989.420075	1021.029603	0.801701	0.063797	32.926561	22.718101
10	Tepidarium d'entrée	0.003588	15.958714	0.797636	12.729244	203.142368	500.619227	620.849455	0.772196	0.061449	202.29123	57.375917
11	Tepidarium d'entrée	0.003588	15.958714	0.797636	12.729244	203.142368	389.426697	620.856418	0.772196	0.061449	202.29123	57.375917
12	Tepidarium d'entrée	0	14.414253	0.653761	9.423471	135.832291	667.93386	672.315317	0.715074	0.056904	116.97951	45.340298
13	Tepidarium d'entrée	0	14.414253	0.653761	9.423471	135.832291	580.121734	672.315317	0.715074	0.056904	116.97951	45.340298
14	Tepidarium d'entrée	31.861065	15.350009	1.119932	17.190964	263.881459	845.28786	592.340698	0.782884	0.0623	263.881459	65.081947
15	Tepidarium d'entrée	31.861065	15.350009	1.119932	17.190964	263.881459	730.422136	663.730064	0.782884	0.0623	263.881459	65.081947
16	Tepidarium d'entrée	45	20.406165	1.341805	27.381099	558.743214	1080.980612	597.65993	0.851889	0.067791	477.733781	83.94725
17	Tepidarium d'entrée	45	20.406165	1.341805	27.381099	558.743214	978.099764	700.540778	0.851889	0.067791	477.733781	83.94725
18	Tepidarium d'entrée	45.0	24.121708	1.262342	30.449841	734.502173	1346.412114	585.251022	0.613501	0.048821	602.795062	111.117384
19	Tepidarium d'entrée	45.0	24.121708	1.262342	30.449841	734.502173	1231.805238	699.857899	0.613501	0.048821	602.795062	111.117384
20	Tepidarium d'entrée	8.257991	13.949246	0.986984	13.767676	192.048712	1621.933623	628.722333	0.772156	0.061446	181.555758	54.357234
21	Tepidarium d'entrée	8.257991	13.949247	0.986984	13.767677	192.048717	1531.851692	615.648246	0.772156	0.061446	181.555758	54.357234
22	Destrictarium	22.399284	8.459923	0.765099	6.472681	54.758386	417.017812	953.126883	0.771488	0.061393	54.758386	29.865209
23	Destrictarium	22.399284	8.459923	0.765099	6.472681	54.758386	388.947422	964.696253	0.771488	0.061393	54.758386	29.865209
24	Destrictarium	52.901492	19.535029	1	19.535029	381.617354	577.055612	968.185867	0.948059	0.075444	316.142168	64.733391
25	Destrictarium	52.901492	19.535416	1	19.535416	381.632489	621.885288	1027.467482	0.948059	0.075444	316.142168	64.733391
26	Destrictarium	88.656537	9.348065	0.972652	9.092415	84.99649	837.998988	988.522926	0.747372	0.059474	80.89678	36.880961

inputs_csv

Prêt Accessibilité : vérification terminée

Fig. 200 – Extrait du *data set* organisé sous forme de tableau dans Excel. (établie par l'auteure)



Fig. 201 – Extrait du data set organisé sous forme du CSV sur Grasshopper. (établie par l'auteure)

9.4.1.2 Enrichissement des données d'entrainement

Suite à la création de *data set* restreint, un recours à l'enrichissement artificiel des données constitue une étape recommandée pour renforcer la robustesse des prédictions. L'efficacité de l'AICM dépend en partie de la diversité des exemples fournis lors de l'entraînement, ce qui justifie l'introduction de variantes supplémentaires (« Machine Learning | Google for Developers », 2025). Le choix de la méthode d'enrichissement de données artificielles dépend fortement des relations existantes entre les données et la manière dont les thermes étaient initialement conçus. Toute méthode adoptée doit préserver l'intégrité qualitative des données et être validée en fonction de ses implications sur les résultats attendus.

Certaines opérations couramment utilisées, comme les rotations ou les changements d'échelle, permettent de générer des variantes à partir de données existantes. Les dimensions des plans peuvent, par exemple, être modifiées par l'application de facteurs multiplicatifs tels que 0,5 ou 2. Il est également possible d'introduire des distorsions contrôlées, en ajustant légèrement les proportions ou en combinant des fragments partiels pour simuler de nouvelles configurations. Toutefois, dans le cas des thermes romains, où les relations fonctionnelles et la cohérence spatiale des édifices jouent un rôle déterminant, ce type de transformations peut compromettre l'intégrité des données, en altérant les équilibres architecturaux essentiels à la lecture typologique.

Deux procédés s'avèrent mieux adaptés au cadre de l'étude. Le premier consiste à générer des plans fragmentaires à partir de plans complets, en supprimant certains espaces de manière contrôlée. Le second repose sur la technique du *bootstrap*, qui permet de produire plusieurs sous-ensembles du corpus initial par tirage avec remise.

1. Génération des plans fragmentaires artificiels : l'objectif est de constituer un ensemble de fragments artificiels représentatifs de différents scénarios de lacune, tout en préservant les propriétés architecturales essentielles à l'apprentissage. Cette démarche s'inspire des stratégies de masquage développées dans le domaine de

l'apprentissage auto-supervisé, prenant l'exemple de la méthode *SemDM* (Ma, Cheng, & Ye, 2023), qui introduit un masquage orienté par la tâche (*task-oriented masking strategy*). Plutôt que d'appliquer un masquage aléatoire uniforme, cette approche repose sur une segmentation différenciée de l'entrée, fondée sur la fonction et la structure des objets représentés. Dans leur étude, les auteurs démontrent que l'efficacité d'un modèle dépend fortement de la manière dont le masquage est configuré selon les objectifs d'apprentissage (reconstruction locale ou discrimination d'instances). Ce principe peut être transposé ici sous la forme de stratégies de fragmentation différenciées, construites selon trois logiques complémentaires : (1) le masquage fonctionnel, qui supprime certains types d'espaces (ex. : *frigidarium*, *caldarium*) afin de simuler leur disparition ; (2) le masquage positionnel, basé sur la localisation topologique des espaces (zones périphériques ou centrales) ; (3) le masquage aléatoire contrôlé, qui consiste à supprimer un pourcentage défini d'espaces tout en maintenant un équilibre entre les catégories fonctionnelles.

2. Génération des données supplémentaires (méthode *Bootstrap sample*) : elle repose sur un échantillonnage aléatoire avec remise, permettant de générer, à partir de *n* observations, un ensemble de même taille contenant des répétitions. Concrètement, certaines données peuvent apparaître plusieurs fois dans un même échantillon, tandis que d'autres peuvent être exclues (Müller & Guido, 2016, p. 84). Le *Bootstrap* est souvent couplé à une procédure de validation croisée (*K-fold cross-validation*) (Han & Kamber, 2012, p. 371), qui consiste à diviser l'ensemble de données en *K* sous-groupes. À chaque itération, un de ces sous-groupes est utilisé comme ensemble de test, tandis que les autres servent à l'entraînement. Ce processus est répété *K* fois, en faisant successivement varier le sous-groupe utilisé pour le test. Par exemple, une répartition à $K = 5$ permet de valider le modèle sur un éventail plus large de combinaisons de données et de réduire le *biais* associé à une partition unique. Ce mécanisme rend possible la génération d'un nombre virtuellement illimité de versions dérivées d'un même *dataset*. Sur le plan opérationnel, le modèle est ainsi exposé à une diversité accrue de combinaisons, ce qui améliore sa généralisation et limite le surapprentissage. Chaque itération peut être associée à un paramètre ou à une combinaison particulière de variables, ce qui autorise des comparaisons plus fines et une évaluation différenciée de l'impact de chaque facteur.

9.4.1.3 Structuration méthodologique de la phase A

La structuration méthodologique de la phase A est exposée ci-après, à travers un tableau de synthèse, une description des opérations mises en œuvre, ainsi qu'un script Python associé (*cf.* Fig. 202).

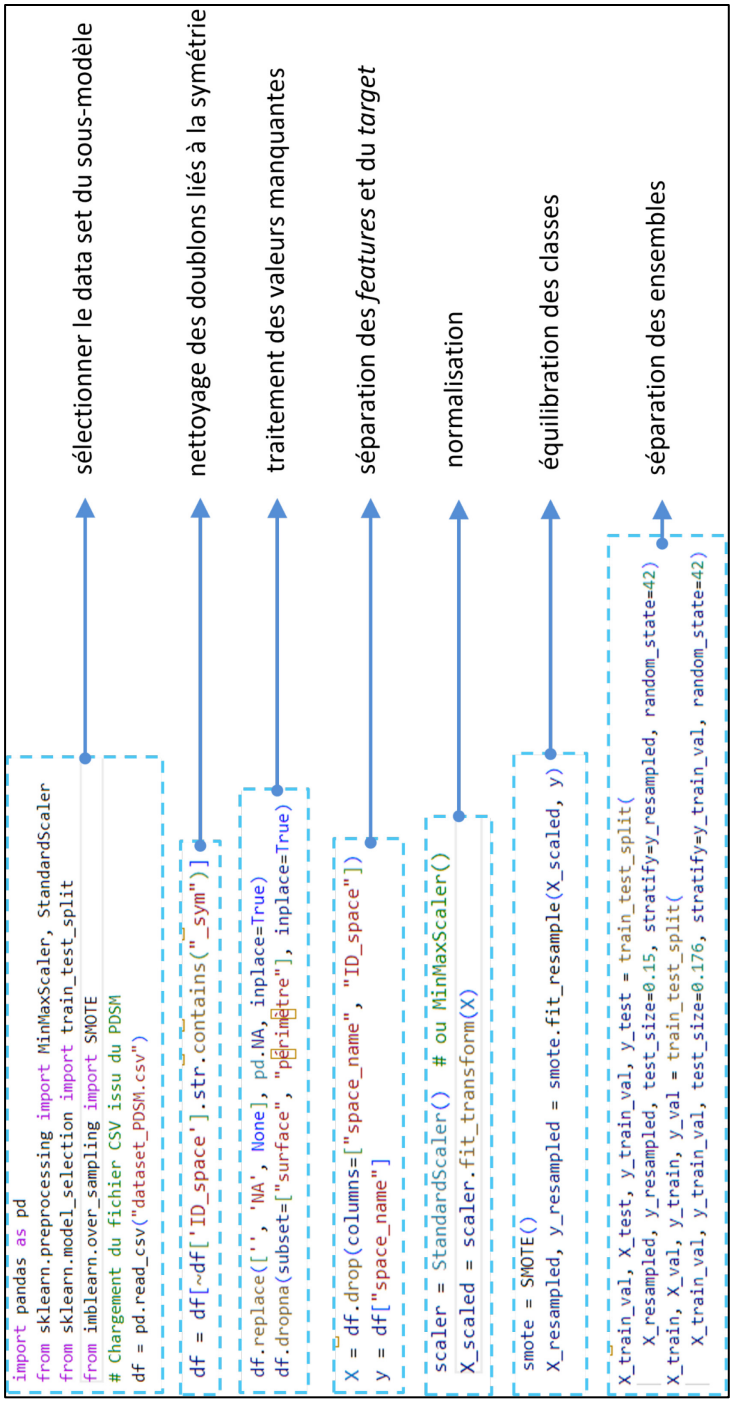


Fig. 202 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase A. (établie par l'auteure)

Table 65 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase A. (établie par l'auteure)

Phase A : analyse de données (préparation, nettoyage et structuration)	
description	correspond au choix, nettoyage, la normalisation et la structuration des attributs extraits du PDSM. Chaque composant élémentaire dont la fonction est connue est représenté par un vecteur de variables : surface, périmètre, compacité, rapport longueur/largeur, distance à l'axe de symétrie... La fonction associée constitue la variable cible, utilisée pour entraîner le modèle supervisé
choix des attributs	type d'usage (ID) surface centre de gravité périmètre indice de compacité indice de circularité symétrie au sein de l'espace dimensions englobantes des composants orientation fréquence d'occurrence analyse de symétrie proportion globale (surface composant élémentaire / plan) position relative des composants élémentaires (dans le plan)
nettoyage	deux opérations principales sont effectuées : (1) filtrage des doublons liés à la symétrie : le fichier contient, pour chaque plan, à la fois les formes originales et leurs symétriques, générées pour évaluer la disposition bilatérale. Ces doublons, identifiables par le suffixe_sym dans le champ ID_space, sont exclus afin d'éviter un biais de redondance dans la distribution des données (2) traitement des valeurs manquantes : un contrôle systématique identifie les cellules vides ou incohérentes (ex. : surface négative, valeur nulle impossible). Selon le cas, les valeurs sont supprimées ou imputées à l'aide d'une moyenne ou d'une médiane
normalisation	les valeurs des attributs géométriques varient selon les plans étudiés. Afin de garantir la stabilité du modèle et sa capacité de généralisation, une mise à l'échelle est appliquée : (1) *Min-Max Scaling* utilisée pour les modèles sensibles à l'échelle des données (ex. : SVM), elle transforme les valeurs dans l'intervalle [0,1] (2) *Standard Scaling* utilisée pour des modèles plus robustes comme les forêts aléatoires, elle centre les données sur zéro avec une variance unité
codage des cibles	le champ *space_name* constitue la variable cible. Chaque ligne correspond à une fonction architecturale (*frigidarium*, *caldarium*…)
séparation des données en ensembles	les données sont divisées en : - *training set* (70 %) : apprentissage des paramètres internes du modèle - *validation set* (15 %) : sélection du meilleur modèle et réglage des hyperparamètres (mobilisé en phase C) - *test set* (15 %) : réservé à l'évaluation finale (mobilisé uniquement en phase D). La répartition est effectuée via la fonction *train_test_split* de *scikit-learn*, avec stratification selon les classes
équilibrage des classes rares via suréchantillonnage SMOTE	certaines fonctions architecturales rares (exèdre, annexe) étant sous-représentées, un rééquilibrage est appliqué : - suréchantillonnage synthétique (SMOTE) pour générer artificiellement de nouveaux exemples à partir des classes minoritaires - ou pondération automatique des classes lors de l'entraînement, selon le modèle utilisé

finalité	aboutit à la constitution d'une matrice de données propre et normalisée, où chaque ligne représente un composant élémentaire caractérisé par un ensemble d'attributs, et étiqueté selon sa fonction. Ce format structuré est directement exploité par le sous-modèle ML1, chargé de prédire la fonction d'espaces inconnus dans des fragments thermaux, sur la base exclusive de leurs propriétés

La phase A débutée par le chargement du fichier CSV issu du PDSM. Les doublons liés à la symétrie sont éliminés afin de limiter les *biais*, puis les valeurs manquantes sont traitées pour assurer la cohérence du corpus. Les attributs numériques sont ensuite normalisés afin d'unifier les échelles et de permettre aux algorithmes de considérer chaque variable de manière équivalente. L'équilibrage des classes est réalisé par la méthode SMOTE, ce qui évite qu'un espace fréquent, tel que le *frigidarium*, ne domine l'apprentissage. Enfin, l'ensemble des données est réparti en trois sous-ensembles distincts : entraînement, validation et test. Cette succession d'étapes garantit un corpus propre, équilibré et structuré, condition préalable à un apprentissage supervisé robuste.

9.4.2 Phase B : développement du modèle AICM

9.4.2.1 Choix de l'environnement

L'environnement visuel de Grasshopper permet d'organiser les modèles de manière intuitive tout en conservant un accès direct aux paramètres géométriques. Pour intégrer des méthodes de ML sans quitter cette interface, plusieurs plugins[27] ont été utilisés (*cf*. Table 66). Parmi ces outils, *LunchBox ML* et *PUG*, encore maintenus, permettent de déployer des algorithmes élémentaires directement dans le flux de conception. Leur usage reste cependant limité dans le contexte d'une analyse spatiale multimodale, comme celle requise pour la recomposition des thermes.

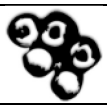
LunchBox ML[28] propose une interface simplifiée reposant sur quelques modèles supervisés, mais sa prise en charge se limite aux données numériques. Cette restriction impose une transformation préalable des données issues du PDSM, notamment pour les entrées spatiales, typologiques ou catégorielles, ce qui complique l'exploitation de structures telles que les polylignes, les matrices d'adjacence ou les séquences fonctionnelles. Le plugin *PUG*[29], plus récent, autorise la manipulation de graphes et l'importation d'images, ce qui ouvre la voie à certaines expérimentations visuelles. Néanmoins, ses capacités restent encore peu documentées, et la structure interne du modèle demeure inaccessible à l'utilisateur. Sa logique orientée graphe ne s'adapte pas aisément aux données architecturales encodées sous forme tabulaire et régies par des règles spatiales explicites.

[27] sur le site https://www.food4rhino.com/fr.

[28] Machine Learning with LunchBoxML - PROVING GROUND

[29] Pug | Food4Rhino

Table 66 – Quelques plugins d'apprentissage automatique dans Rhinoceros3D/Grasshopper. (établie par l'auteure)

logo	plug-in	créé par	version de compatibilité sur Rhinoceros3D	première version-dernière mise à jour	*features*
	Lunchbox	Nathan Miller	Rhino 4/5/6/7/8	08-08-2017 05-05-2025	*- Regression analysis* *- Clustering* *Neural network*
	Owl	Mateusz Zwierzycki	Rhino 4/5/6/7	21-11-2018 21-08-2023	*- Creating Tensors* *- Tuning of neural networks* *- Reinforcement*
	Pug	Diego Apellaniz	Rhino 6/7/8	07-04-2022 21-04-2025	*- Tensor compatibility* *- Supervised learning agent* *- GAN agent* *- Keras layers, Keras model*
	Crow	Benjamin Felbrich	Rhino 4/5/6	25-05-2016 25-05-2020	*- Supervised Learning through Back-propagation Networks* *- Unsupervised Learning through Self-Organizing Maps*
	Octopus	Robert Vierlinger	Rhino 4/5/6	06-12-2012 05-12-2018	*- Neural networks* *- Support vector machines (SVMs)*
	Dodo	Lorenzo Greco	Rhino 4/5	23-11-2015 23-02-2019	*- Neural networks* *- Gradient descent* *- Stochastic gradient descent*

Dans les deux cas, l'absence d'accès aux paramètres internes empêche tout ajustement fin des modèles, qui fonctionnent comme des systèmes encapsulés, « boite noire », limités à un apprentissage initial figé. Ces limitations, tant sur le plan du contrôle algorithmique que sur celui de la compatibilité avec les structures de données complexes, justifient le recours à un environnement externe. Le processus adopté combine la modélisation géométrique dans Grasshopper avec l'exécution d'algorithmes Python 3, via l'extension *GH Python Remote*[30]. Ce dispositif établit une liaison entre Grasshopper (basé sur IronPython 2.7) et un interpréteur Python local (*CPython*) (*cf*. Fig. 203, Fig. 204), permettant d'exploiter des bibliothèques avancées

[30] L'installation de plugin est effectuée via le lien GH Python Remote | Food4Rhino.

telles que *scikit-learn*, *pandas* ou *numpy* (Müller & Guido, 2016, p. 12). Cette approche permet ainsi de combiner la souplesse de l'environnement visuel de Grasshopper avec la puissance des bibliothèques scientifiques de Python 3, tout en restant entièrement local.

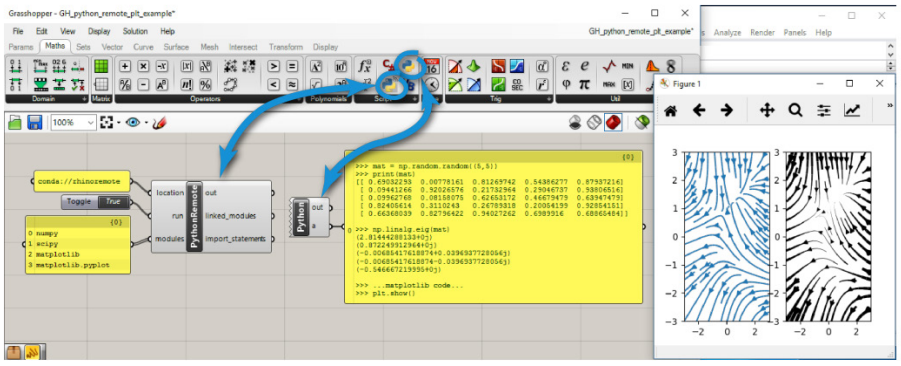


Fig. 203 – Installation de GH Python Remote. (GH Python Remote | Food4Rhino)

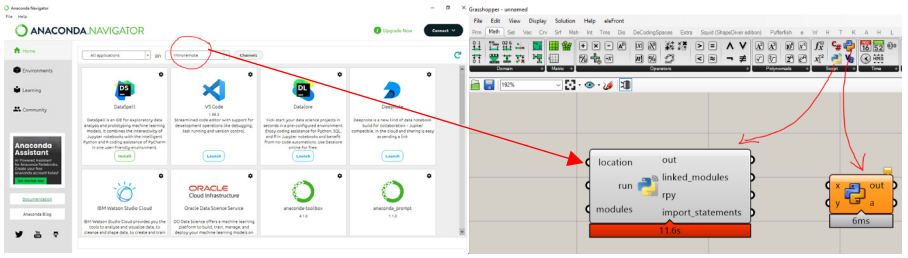


Fig. 204 – Interfaces de *Anaconda Navigator* et Grasshopper confirmant l'installation du plugin *GH-Python-remote* et la connexion à l'interpréteur Python externe. (établie par l'auteure)

9.4.2.2 Choix de l'algorithme des modèles d'apprentissage

Le choix de l'algorithme constitue une étape clé dans le développement d'un modèle d'apprentissage, comme le précise Tom M. Mitchell (2013, p. 13) (*cf*. Fig. 205). Parmi les six familles d'apprentissage, trois seulement qui sont liés au ML (« Machine Learning | Google for Developers », 2025; Roobaert & Claeys, 2024b, 2024a). Celles-ci se distinguent par la nature des données mobilisées et par le degré d'intervention humaine nécessaire, selon la manière dont elles apprennent à produire des prédictions ou à générer du contenu :

(1) *apprentissage supervisé et non profond* : repose sur l'exploitation de données étiquetées, dans lesquelles chaque exemple est associé à une réponse attendue. Le modèle apprend ainsi à relier des configurations d'attributs à des sorties cibles, à la manière d'un élève s'exerçant sur des corrections pour anticiper un nouvel exercice. Cette approche requiert un encodage préalable des données par un humain et per-

met de résoudre, couramment, des tâches de classification ou de régression. Elle se caractérise par une bonne précision sur les données connues, mais une généralisation parfois limitée ;

(2) *apprentissage non supervisé et non profond* : repose sur l'analyse de données dépourvues de sorties préalablement définies. Le modèle n'accède à aucune réponse attendue ; il explore la structure interne des données pour en dégager des régularités, des regroupements ou des associations implicites. Cette démarche consiste à inférer des schémas à partir des seules entrées, sans directive explicite. Elle mobilise des techniques comme le *clustering*, fréquemment utilisé pour détecter des ensembles cohérents au sein d'un jeu de données ;

(3) *apprentissage par renforcement non profond* : désigne un cadre dans lequel un agent autonome apprend à adapter ses actions à un environnement en fonction des conséquences qu'elles produisent. Sans disposer d'exemples annotés, le modèle développe sa propre politique d'action par expérimentation. Ce paradigme est couramment mobilisé dans les domaines de la robotique, des jeux ou des environnements interactifs.

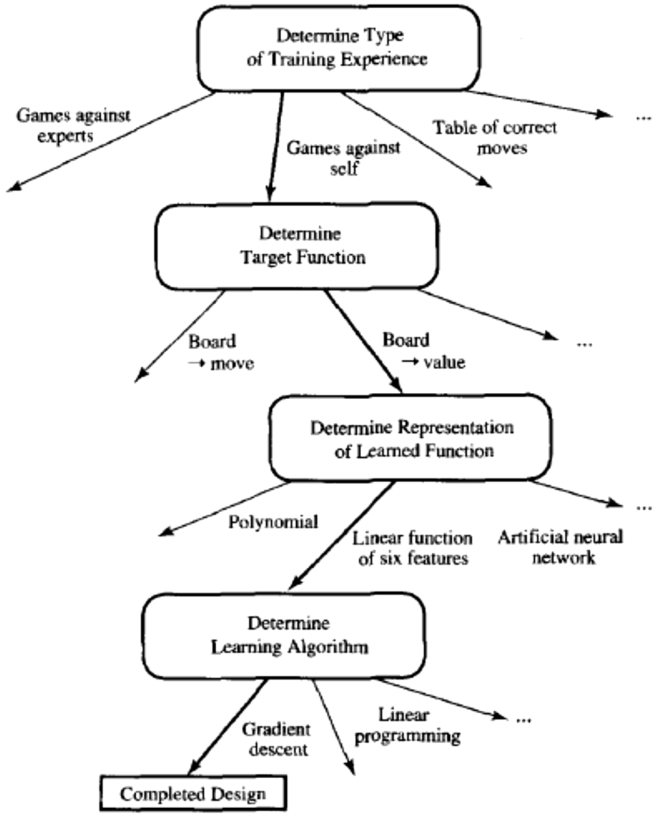


Fig. 205 – Synthèse des décisions de conception pour le développement du programme d'apprentissage du jeu de dames. (Mitchell, 2013, p. 13)

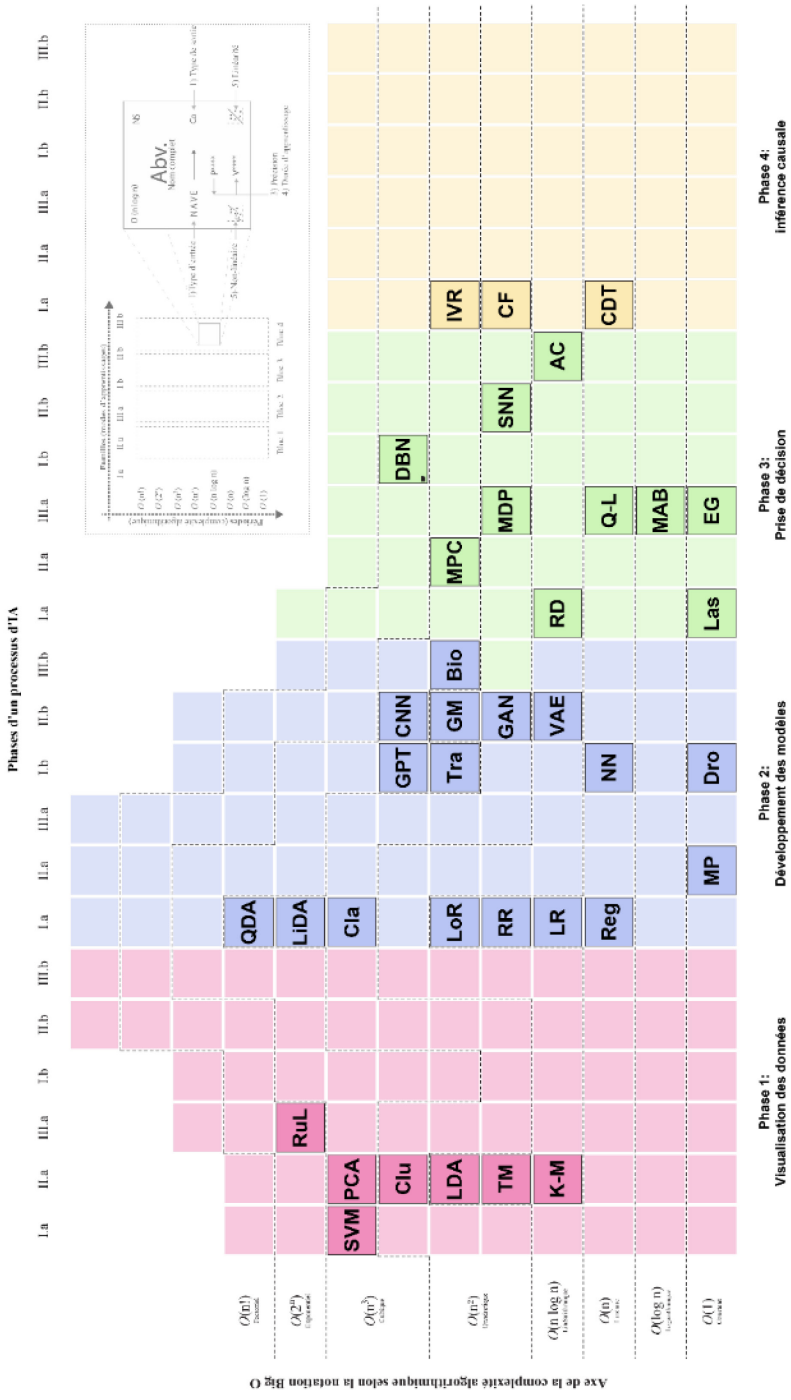


Fig. 206 – Tableau périodique et évolutif des outils *intelligents* d'aide à la conception. (Roobaert, 2024)

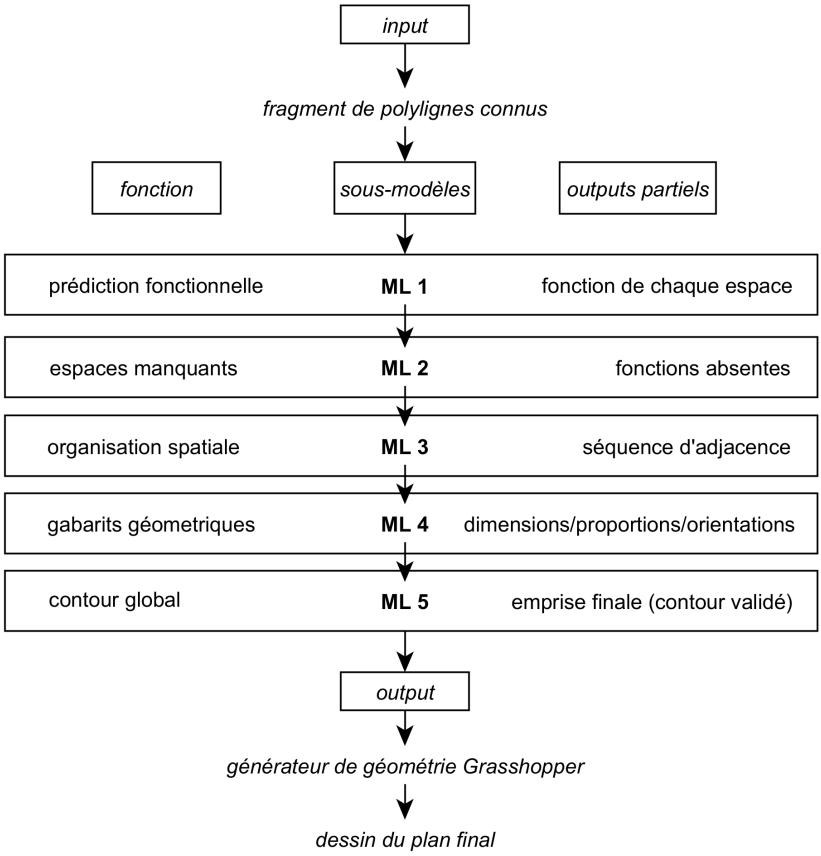


Fig. 207 – Position de l'étape de la génération du dessin dans Grasshopper au sein du processus *intelligent*. (établie par l'auteure)

Dans la « Phase 2 » (*cf*. Fig. 206, p.283) consacré au développement des modèles, Louis Roobaert et Damien Claeys (2024b, 2024a) identifient trois familles de modèles d'apprentissage mobilisables en fonction des types de données et des objectifs visés. Cette typologie rejoint les distinctions proposées par Taiwo Oladipupo (2010), Tom Mitchell (2013), Andreas C. Müller & Sarah Guido (2016) et Luis G. Serrano (2021) qui précisent les conditions de sélection des modèles et des algorithmes selon la nature du problème à résoudre. À partir de ces approches convergentes, un tableau récapitulatif (*cf*. Table 67) est établi pour associer, à chaque sous-modèle ML du *pipeline*, le type d'apprentissage retenu et les algorithmes compatibles.

Les sous-modèles d'apprentissage, déployés pour chaque étape du *pipeline* (fonction → fonction manquante → relations fonctionnelles → formes → contour), n'opèrent pas directement une production géométrique du plan. Ils fournissent un ensemble de paramètres qui traduisent sous forme numérique les caractéristiques attendues des espaces à compléter. La génération du dessin, étape importante dans

le workflow, s'appuie sur ces prédictions paramétriques : un script développé dans Grasshopper (via le *component GHPython*) interprète chaque ensemble d'attributs prédits pour produire la géométrie correspondante. Cette opération consiste, par exemple, à créer une polyligne fermée représentant un espace (*caldarium*, *frigidarium*, *palestre*…) à partir de dimensions, de coordonnées d'ancrage et de règles d'adjacence extraites par le modèle. Le processus se déroule de manière itérative : chaque espace complété s'ajoute à l'ensemble du plan, qui se construit ainsi progressivement selon les séquences définies par les modèles prédictifs. Cette dissociation entre phase de prédiction et phase de génération géométrique (*cf*. Fig. 207) permet de garantir la lisibilité du processus et de contrôler la cohérence architecturale à chaque étape.

Table 67 – Tableau de correspondance entre sous-modèles et algorithmes. (établie par l'auteure)

sous-modèle	tâche	modèle d'apprentissage	algorithmes recommandés	justification
ML 1	prédire la fonction d'un espace donné à partir de ses attributs	classification supervisée	forêt aléatoire, arbre de décision , Gradient Boosting, SVM	les fonctions (caldarium, frigidarium...) sont des classes discrètes
ML 2	déduire les espaces manquants dans le fragment donné (ex. : s'il manque un *tepidarium*) ; c'est-à-dire, déterminer les fonctions absentes mais attendues	classification supervisée	forêt aléatoire, arbre de décision , Gradient Boosting, SVM	chaque plan fragmentaire peut présenter plusieurs fonctions absentes
ML 3	déduire les relations typologiques attendues entre fonctions (agencement spatial)	classification supervisée (par couple d'espaces / fonctions)	forêts aléatoires de classification	les relations sont formulées comme des couples (espace A voisin de B), prévisibles comme oui/non
ML 4	proposer des gabarits géométriques des espaces manquants en cohérence avec leur fonction et leur position supposée	régression supervisée (pour chaque attributs dimensionnel)	forêts aléatoires de régression	la sortie attendue est continue (dimensions, proportions) ou typologique (forme similaire)
ML 5	prédire le contour global de l'édifice (emprise) à partir de la distribution des espaces	classification supervisée (validation de la plausibilité) + optimisation combinatoire (pour le dessin optimal du contour)	arbre de décision de classification (pour valider la plausibilité) + algorithme d'optimisation simple (*greedy*, ou heuristique spatiale)	*decision tree* : simple et explicable pour validation finale ; l'optimisation ajuste le dessin du contour selon contraintes architecturales

9.4.2.3 Structuration méthodologique de la phase B

Dans le cas du modèle ML1, l'apprentissage vise à exploiter l'inventaire des programmes observés dans la collection des thermes impériaux romains afin de prédire la fonction d'un espace donné à partir de ses caractéristiques. Le modèle est entraîné à partir d'un ensemble d'espaces étiquetés, en s'appuyant sur des attributs tels que la surface, le périmètre, la position relative par rapport à l'axe de symétrie ou au centre du plan, ainsi que sur les relations spatiales avec les espaces adjacents. Le cadre retenu relève d'un apprentissage supervisé non profond, adapté à la nature structurée et interprétable des données extraites du PDSM.

Les tâches relevant de la régression se distinguent des tâches de classification par la nature continue des résultats attendus. Dans un cadre régressif, les étiquettes correspondent à des valeurs numériques continues (par exemple, une température, une distance ou une probabilité) et non à des catégories définies (Müller & Guido, 2016, p. 26). Ce n'est pas le cas ici : la sortie recherchée consiste à attribuer à chaque espace une fonction unique parmi un ensemble prédéfini, comme le *caldarium*, le *frigidarium* ou le *tepidarium*. Le problème relève donc d'une classification multiclasse, dans laquelle le modèle doit associer chaque observation à une seule étiquette parmi plusieurs classes discrètes, sans continuité entre elles.

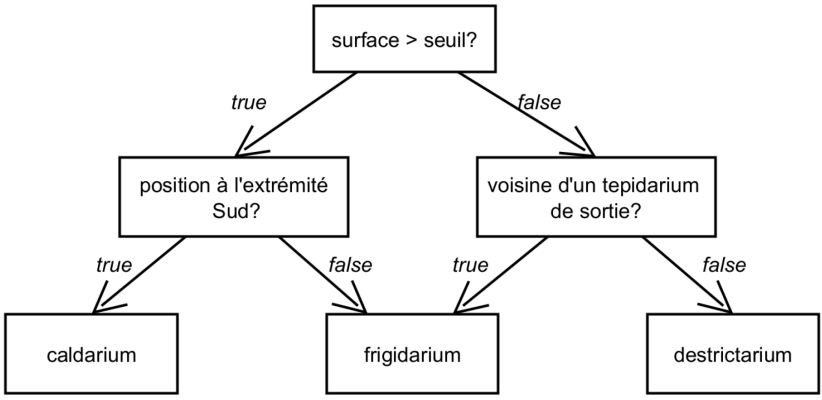


Fig. 208 – Illustration du fonctionnement d'un arbre de décision à partir d'un exemple issu du sous-modèle ML1. (établie par l'auteure)

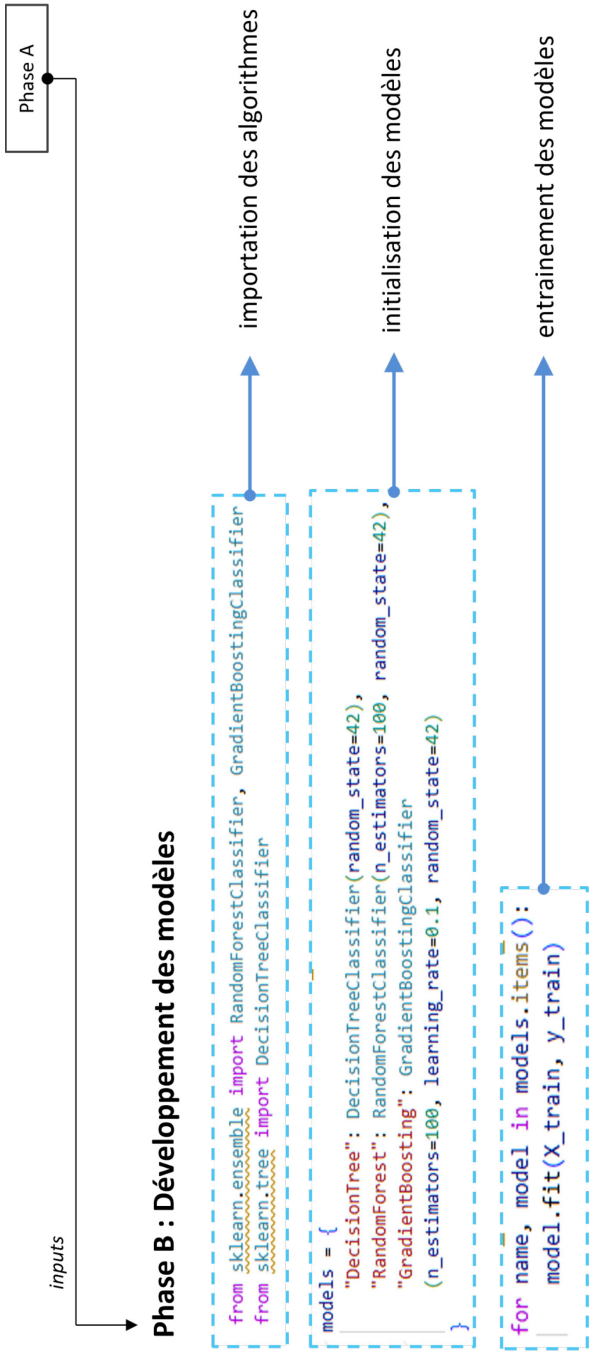


Fig. 209 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase B. (établie par l'auteure)

Table 68 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase B. (établie par l'auteure)

Phase B : développement des modèles	
description	dans le cadre de l'apprentissage supervisé, un modèle est un ensemble structuré de paramètres numériques décrivant la relation mathématique entre les attributs d'entrée (variables) et les étiquettes de sortie (valeurs cibles). Ce modèle apprend à identifier des régularités à partir d'exemples connus, c'est-à-dire il « découvre ces tendances au cours de l'entraînement » (« Machine Learning | Google for Developers », 2025), dans le but de généraliser ses prédictions à de nouveaux cas
importation des données	le fichier contenant les données structurées issues de la phase A (attributs géométriques et étiquettes fonctionnelles) est importé dans l'environnement Python via la bibliothèque pandas. Ce jeu de données est ensuite segmenté pour isoler le *training set*, utilisé exclusivement à ce stade
choix d'un algorithme de classification	le choix de l'algorithme dépend de la nature des données et de la tâche. Plusieurs approches peuvent être testées, notamment : (1) *Decision Tree* ; (2) *Random Forest Classir* ; (3) *Gradient Boosting*
entraînement du modèle	chaque algorithme sélectionné est entraîné à l'aide de la fonction *.fit(X_train, y_train)*, où *X_train* contient les vecteurs d'attributs d'entrée, et *y_train* les étiquettes fonctionnelles. Durant cette phase, le modèle ajuste ses paramètres internes pour réduire l'erreur de prédiction sur les exemples connus. Aucune validation ni sélection de modèle n'est encore réalisée à ce stade
finalité	produire plusieurs modèles entraînés capables de prédire la fonction architecturale d'un espace inconnu à partir de ses seules caractéristiques géométriques et positionnelles... Ces modèles sont ensuite évalués dans la phase suivante à l'aide du *validation set*, afin de déterminer lequel présente les meilleures capacités de généralisation

Plusieurs algorithmes (Müller & Guido, 2016) peuvent être mobilisés pour traiter ce type de problème :

1. arbre de décision (*decision trees*) : sont des modèles largement utilisés pour les tâches de classification et de régression. Ils apprennent une hiérarchie de questions de type « si/alors », conduisant à une décision. Ces questions ressemblent à celles posées dans un jeu du type « qui suis-je ? ». Imaginons qu'il faut identifier si un espace donné correspond à un *frigidarium*, un *tepidarium*, un *caldarium* ou un *destrictarium* (*cf*. Fig. 208). Le modèle peut commencer par une question discriminante telle que : « la surface de l'espace dépasse-t-elle une certaine valeur seuil ? ». Si oui, le modèle oriente l'analyse vers des fonctions associées à de plus grands volumes, comme le frigidarium. Dans le cas contraire, il explore des fonctions secondaires. Une autre question peut alors porter sur la position dans l'axe de symétrie ou la proximité avec des espaces déjà identifiés : « l'espace est-il adjacent à un *tepidarium* ? », ou encore : « se trouve-t-il dans la moitié sud du fragment, près de l'extrémité de l'axe ? ». Chaque réponse permet au modèle de restreindre les possibilités jusqu'à identifier, avec un certain degré de confiance, la fonction probable de l'espace analysé.

2. forêts aléatoires (*random forests*) : la méthode repose sur l'agrégation d'un ensemble d'arbres de décision, chacun construit à partir de variations aléatoires des données ou des attributs. Bien qu'un arbre isolé puisse présenter de bonnes

performances, il est souvent sujet au surapprentissage sur une partie des données. En combinant plusieurs arbres dont les erreurs sont différentes, la forêt aléatoire atténue ce phénomène par un mécanisme d'agrégation.

3. *Gradient Boosted regression trees* : est une autre méthode d'ensemble qui combine plusieurs arbres de décision afin de produire un modèle plus performant. Malgré la mention « régression » dans son nom, ce type de modèle peut être utilisé aussi bien pour la régression que pour la classification. Contrairement à l'approche des forêts aléatoires, le *gradient boosting* construit les arbres de manière séquentielle, chaque nouvel arbre cherchant à corriger les erreurs du précédent.

À l'instar de la phase A, la structuration méthodologique de la phase B est exposée ci-après, à travers un tableau de synthèse, accompagnée d'une description des opérations mises en œuvre et d'un script Python correspondant (*cf*. Fig. 209).

Dans la phase B, différents algorithmes supervisés sont évalués, parmi lesquels l'arbre de décision, la forêt aléatoire et le *gradient boosting*. L'objectif est de comparer leurs performances afin d'identifier celui qui prédit le plus efficacement la fonction des espaces. Chaque modèle est entraîné sur l'ensemble d'apprentissage constitué de plans complets, ce qui lui permet de reconnaître les régularités entre les attributs géométriques (tels que la surface ou la position) et l'étiquette fonctionnelle associée (par exemple, *caldarium* ou *frigidarium*).

9.4.3 Phase C : prise de décision

Après le développement des modèles de prédiction, il est temps de tester le modèle sur des plans incomplets qui n'ont pas été utilisés durant la phase d'apprentissage, afin d'évaluer sa capacité à compléter les parties manquantes. Pour cette phase de validation, des thermes présentant des lacunes sélectionnées, et les résultats produits sont alors confrontés aux connaissances archéologiques existantes. Les espaces prédits par le modèle seront représentés graphiquement, sur Grasshopper, et comparés aux plans complets attendus, ce qui permet d'évaluer la précision des prédictions et d'identifier les écarts entre les résultats obtenus et les données archéologiques réelles. Selon les résultats observés, des ajustements peuvent s'avérer nécessaires. Ces modifications peuvent concerner la structure interne de l'architecture algorithmique, les hyperparamètres (par exemple, le taux d'apprentissage), les variables d'entrée (*features*), ou encore les méthodes de normalisation des données (Yann Le Cun, 2019).

Un sous-ensemble indépendant est mobilisé à cette fin, isolé pour éviter toute fuite d'information susceptible d'introduire un *biais*. Les mêmes métriques d'évaluation peuvent être appliquées au *validation set* et au *test set*, bien que leurs fonctions diffèrent. Le *validation set* est utilisé au cours du processus d'apprentissage pour comparer plusieurs configurations de modèles et ajuster les hyperparamètres. Il convient, à ce stade, de distinguer clairement les hyperparamètres, définis avant l'entraînement, des paramètres internes, optimisés par le modèle pendant l'apprentissage. Cette distinction est synthétisée dans un tableau récapitulatif (*cf*. Table 69), précisant des exemples, le rôle, le mode de détermination de chacun et la phase

concernée. Le *test set*, en revanche, est réservé à l'évaluation finale ; il permet de mesurer de manière objective la capacité du modèle retenu à généraliser sur des données inédites. Les métriques utilisées dépendent de la nature du problème : en classification, les mesures d'exactitude, de F1-score, la précision, le rappel ou encore la matrice de confusion sont fréquemment utilisées (Müller & Guido, 2016, p. 251) ; pour une régression, des indicateurs tels que l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE) ou le coefficient de détermination (R^2) sont privilégiés (Müller & Guido, 2016, p. 299).

Table 69 – Distinction entre les paramètres internes et les hyperparamètres. (établie par l'auteure)

type	paramètres internes	hyperparamètres
définition	valeurs que le modèle apprend automatiquement à partir des données	valeurs fixées manuellement avant l'entraînement du modèle
exemples	- coefficients dans une régression linéaire - seuils dans un arbre de décision - poids dans un réseau de neurones	- profondeur maximale d'un arbre - taux d'apprentissage (*learning rate*) - méthode de normalisation
rôle	capturer les régularités des données observées	contrôler le comportement du modèle pendant l'apprentissage
mode de détermination	calculé automatiquement par le modèle à partir du *training set*	choisi ou ajusté manuellement souvent via le *validation set*
phase concernée	phase B – entraînement	phase C – validation

9.4.3.1 Matrice de confusion (*confusion matrix*)

Le corpus des thermes impériaux romains sert de base à l'entraînement du modèle AICM. Il constitue la vérité de terrain, c'est à dire un ensemble de données validées, complètes et étiquetées, utilisé comme référence pour calibrer et évaluer les prédictions du modèle. Chaque plan inclus dans ce corpus indique explicitement la fonction des espaces architecturaux, fournissant ainsi un cadre stable pour la formation du modèle. À partir de cette base, le modèle est confronté à des plans lacunaires qu'il tente de compléter, et dont les prédictions sont évaluées selon deux critères complémentaires : (1) la précision du modèle, mesurée à l'aide des indicateurs classiques de classification, vrais positifs (*true positif* TP), faux positifs (*false positif* FP), vrais négatifs (true *negative* TN) et faux négatifs (*false negative* FN). Ces éléments permettent de quantifier le degré de concordance entre les prédictions du modèle et les données de référence ; (2) l'inférence causale, qui constitue un mécanisme permettant de vérifier si le modèle repose sur une compréhension cohérente des principes d'organisation architecturale propres aux thermes romains. L'objectif n'est donc pas uniquement d'obtenir des résultats corrects, mais de garantir qu'ils s'appuient sur une logique architecturale reproductible.

Ces deux dimensions s'inscrivent dans une boucle itérative d'apprentissage et d'évaluation, où chaque cycle d'entraînement contribue à renforcer la précision et la capacité de généralisation du modèle. L'analyse repose notamment sur la matrice de confusion (*confusion matrix*) (*cf.* Fig. 210), un outil permettant de représenter les

performances d'un algorithme de classification. Elle croise les prédictions du modèle (axe vertical) avec les valeurs réelles (axe horizontal) (*cf*. Fig. 211), ce qui permet d'identifier les quatre cas de classification possibles (Müller & Guido, 2016, p. 281) : (1) TP : le modèle prédit correctement la présence d'une fonction véridique ; (2) FP : le modèle prédit à tort la présence d'une fonction qui n'existe pas ; (3) TN : le modèle prédit une absence de fonction et la réalité confirme cette absence ; (4) faux négatif FN : le modèle néglige une fonction pourtant présente dans la réalité.

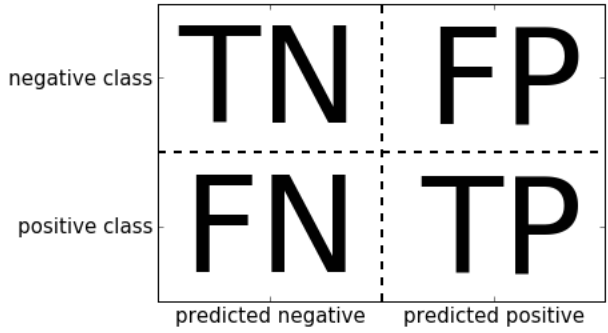


Fig. 210 – Matrice de confusion de classification binaire. (Müller & Guido, 2016, p. 281)

À partir de cette matrice, il devient possible de calculer diverses métriques synthétiques (*cf*. Fig. 212), telles que le score de précision, qui mesure la proportion de prédictions correctes sur l'ensemble des cas observés.

Cependant, un score de précision de 100 % constitue rarement une garantie de performance. Un tel résultat traduit généralement un phénomène de surapprentissage (*overfitting*), où le modèle est trop spécifiquement ajusté aux données d'entraînement, au point de perdre sa capacité à généraliser à des cas nouveaux (Müller & Guido, 2016, p. 28). L'analogie avec la formation d'un architecte permet d'en saisir les limites : un concepteur uniquement formé à produire des maisons individuelles ne sait pas concevoir un hôpital sans réajustement profond de ses référents typologiques. De manière comparable, un modèle surentraîné devient inopérant dès qu'il sort de son domaine de spécialisation. À l'opposé, un modèle trop simple, incapable de saisir la complexité des relations sous-jacentes aux données, présente des performances médiocres, y compris sur l'ensemble d'entraînement. Ce phénomène est désigné comme sous-apprentissage (*underfitting*) (Müller & Guido, 2016, p. 28). L'enjeu central réside donc dans l'atteinte d'un équilibre entre surapprentissage et sous-apprentissage. Un modèle robuste est celui qui parvient à généraliser correctement, tout en restant fidèle à la logique structurelle des données d'origine.

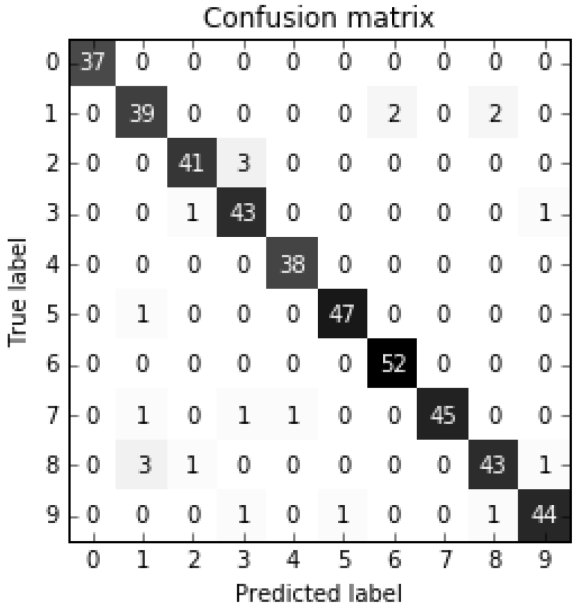


Fig. 211 – Exemple de matrice de confusion pour la tâche de classification des dix chiffres. (Müller & Guido, 2016, p. 298)

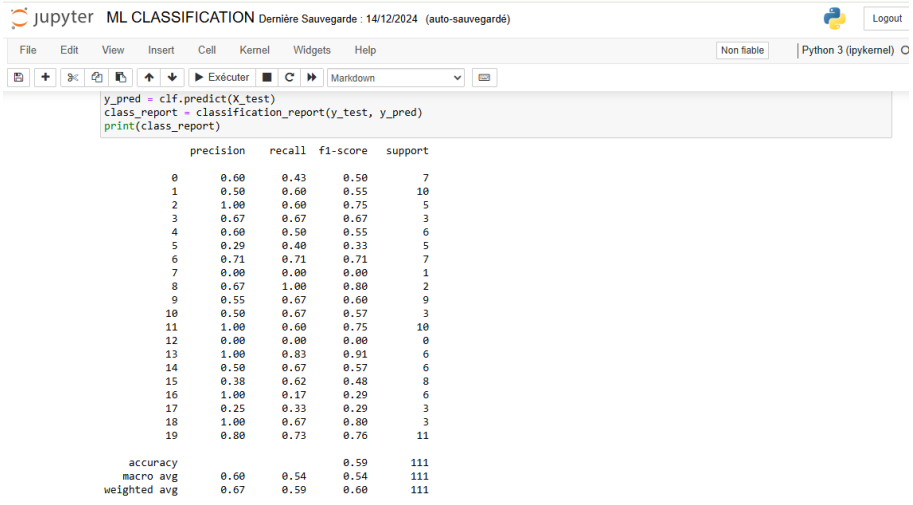


Fig. 212 – Exemple du rapport de classification multi-classe affichant les métriques de précision, rappel et F1-score pour chaque classe fonctionnelle prédite à partir du fragment. (établie par l'auteure)

Enfin, il convient de rappeler que toute prédiction repose nécessairement sur des hypothèses. Comme l'indique Jean Claude Golvin (2005, p. 29), « la prédiction fondera obligatoirement, au moins en partie, sur des hypothèses » ; il est donc essentiel

de prendre en compte « non seulement le vrai et le faux, mais aussi le probable ». Dans le contexte de la rétroconception patrimoniale, le probable ne renvoie pas à une simple approximation, mais à une forme de *vraisemblable*[31] et *admis*[32], capable de produire des restitutions cohérentes malgré l'absence irréversible de certaines données. L'enjeu est alors de construire une représentation architecturale rigoureuse, articulant connaissances scientifiques et part assumée d'interprétation.

9.4.3.2 Courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*)

Un autre outil couramment mobilisé pour analyser le comportement des classificateurs en fonction de différents seuils de décision est la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Contrairement à des représentations basées sur la précision et le rappel, cette courbe trace le taux de vrais positifs (*True Positive Rate*, TPR) en fonction du taux de faux positifs (*False Positive Rate*, FPR), en tenant compte de l'ensemble des seuils possibles d'un classificateur donné. Il convient de rappeler que le taux de vrais positifs correspond au rappel, tandis que le taux de faux positifs mesure la proportion de prédictions erronées parmi les cas négatifs réels (Müller & Guido, 2016, p. 293).

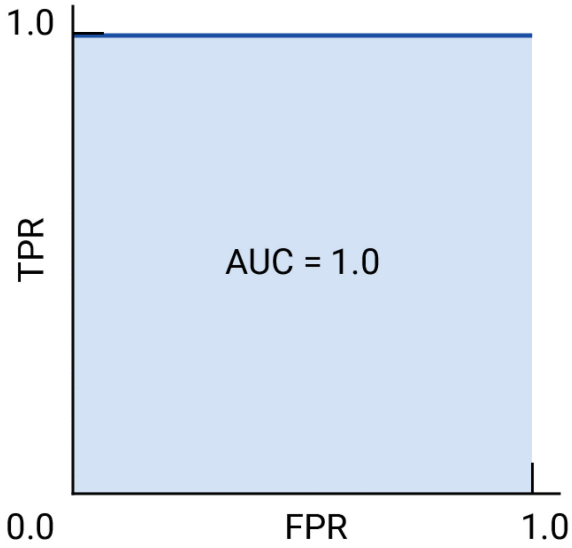


Fig. 213 – ROC et AUC d'un modèle parfait hypothétique.
(« Machine Learning | Google for Developers », 2025)

[31] Est une « proposition qui a le plus de chances d'être vraie » (Golvin, 2005, p. 29).

[32] Est une « proposition acceptable et considérée comme véridique, jusqu'à nouvel ordre » (Golvin, 2005, p. 29).

Représentant graphiquement les données dérivées de la matrice de confusion, la courbe ROC (*cf*. Fig. 213) offre une visualisation synthétique des performances du modèle, en mettant en relation la capacité à détecter correctement les cas positifs avec le risque de générer de fausses alertes. Cet outil est particulièrement utile pour comparer les performances de plusieurs modèles ou pour ajuster le seuil de classification dans une logique d'optimisation. L'ajustement du seuil permet de moduler l'équilibre entre TPR et FPR afin d'obtenir une configuration optimale selon les contraintes du problème.

L'indicateur associé à cette courbe, appelé AUC (*Area Under the Curve*), quantifie la performance globale du modèle. Une surface AUC proche de 1 indique un excellent pouvoir discriminant, tandis qu'une valeur proche de 0,5 reflète une performance équivalente à un tirage aléatoire. Toutefois, une AUC de 1, soit une surface totalement remplie, constitue un signal d'alerte. Ce type de résultat est souvent révélateur d'un surapprentissage : le modèle mémorise parfaitement les données d'entraînement, mais devient inopérant lorsqu'il est confronté à des données nouvelles. La courbe ROC ne permet donc pas seulement d'évaluer la précision du modèle, mais aussi de détecter d'éventuels déséquilibres structurels ou des excès d'adaptation au corpus initial.

9.4.3.3 Structuration méthodologique de la phase C

À l'instar des phases précédentes, la structuration méthodologique de la phase C est exposée ci-après, à travers un tableau de synthèse, accompagnée d'une description des opérations d'évaluation mises en œuvre et d'un script Python correspondant (*cf*. Fig. 214).

Pour chaque modèle de la phase B, une prédiction est réalisée sur les données de validation (X_val) et comparée aux valeurs de référence (y_val). L'évaluation s'appuie sur la métrique F1-score macro, qui correspond à la moyenne des performances obtenues pour l'ensemble des classes, indépendamment de leur fréquence. Le rapport de classification et la matrice de confusion offrent une lecture détaillée de la précision des prédictions. Le modèle obtenant le meilleur F1-score macro est retenu pour la suite du processus. Cette étape permet ainsi de comparer les modèles entraînés afin de sélectionner celui qui présente l'équilibre le plus satisfaisant entre capacité de généralisation et limitation du surapprentissage, avant son évaluation finale sur l'ensemble de test.

Table 70 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase C.
(établie par l'auteure)

Phase C : évaluation et sélection du modèle	
description	cette phase vise à évaluer la capacité du modèle à généraliser sur des cas non observés lors de l'apprentissage, en le testant sur un ensemble indépendant : le *validation set*. Elle permet également de comparer plusieurs versions du modèle afin d'identifier la configuration la plus stable et la plus fiable. Aucun ajustement des *paramètres internes* n'a lieu ici : il s'agit d'une évaluation comparative des performances globales entre modèles concurrents. Si un modèle est insatisfaisant, on reprend un cycle complet depuis la phase B avec un autre algorithme, une autre normalisation, ou une autre sélection d'attributs
test sur le *validation set*	le modèle entraîné est appliqué aux données du *validation set* via la commande : *y_pred = model.predict(X_val)*, où *X_val* représente les attributs des exemples de validation. La comparaison entre *y_pred* (prédictions) et *y_val* (valeurs réelles) constitue la base de l'évaluation
calcul de métriques de classification	plusieurs indicateurs sont mobilisés pour quantifier la performance du modèle : (1) *accuracy* : taux global de bonnes prédictions ; (2) *precision et Recall* : évaluent respectivement la justesse des prédictions positives et la couverture des cas réels pour chaque classe fonctionnelle ; (3) *F1-score* : moyenne harmonique entre précision et rappel, utile pour les classes déséquilibrées. Ces métriques sont générées via la fonction *classification_report* de *scikit-learn* : *print("Classification Report:\n", classification_report(y_val, y_pred))*
réaction en cas de performances faibles	si les résultats obtenus sont insuffisants, plusieurs ajustements peuvent être envisagés : (1) changement d'algorithme de classification (ex. : passage d'un SVM à une forêt aléatoire) ; (2) révision de la sélection des attributs, en supprimant les variables peu discriminantes ; (3) modification de la méthode de normalisation si elle s'avère inadaptée au modèle testé (ex. : passage de *MinMaxScaler* à *StandardScaler*)
finalité	cette phase permet de sélectionner le modèle offrant le meilleur compromis entre précision, robustesse et capacité de généralisation, selon des critères rigoureusement définis. Le modèle retenu est alors prêt à être soumis à une évaluation finale sur le *test set*

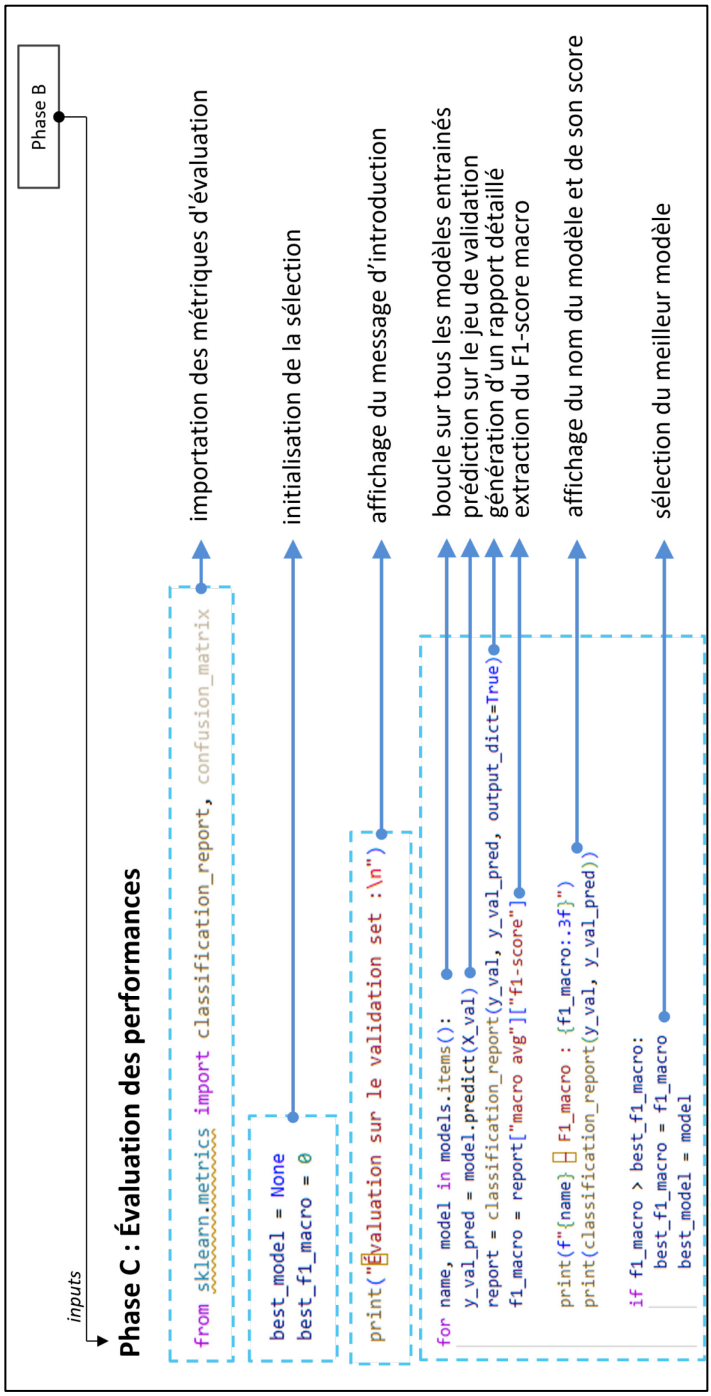


Fig. 214 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase C. (établie par l'auteure)

9.4.4 Phase D : inférence causale

Lorsqu'un algorithme relevant d'un processus *intelligent* est activé, la première opération consiste à générer des résultats, ou *outputs*. Il peut être tentant, à ce stade, de se satisfaire d'une production fonctionnelle. Toutefois, cette apparente réussite ne constitue qu'un indicateur partiel. Une interrogation centrale subsiste : comment interpréter ces résultats et en évaluer la pertinence ?

Cette phase ne se limite pas à une vérification statistique des performances du modèle. Elle vise à comprendre les fondements des décisions produites par l'algorithme, en identifiant les causes structurelles des prédictions, qu'elles soient correctes ou erronées. L'objectif est de déterminer si le modèle a réellement assimilé les logiques architecturales implicites propres aux thermes romains, ou s'il se contente de reproduire des schémas appris de manière mécanique. C'est-à-dire, « une fois que nous sommes satisfaits des résultats de l'évaluation du modèle, nous pouvons l'utiliser pour effectuer des prédictions, appelées inférences, sur des exemples non étiquetés » (« Machine Learning | Google for Developers », 2025). En d'autres termes, il s'agit de construire un modèle capable, à partir d'un ensemble d'entraînement, de produire des prédictions fiables sur des données inédites partageant les mêmes caractéristiques. Lorsqu'un modèle atteint cette capacité, il est considéré apte à généraliser de l'ensemble d'entraînement à l'ensemble de test (Müller & Guido, 2016, p. 26).

Bien que la *déduction*, l'*abduction* et l'*induction*, trois types de raisonnements distingués par Jean-Claude Golvin (2005, p. 30-31), diffèrent par leur niveau de certitude et leur méthodologie, elles peuvent être transposés et appliqués à la rétroconception architecturale comme formes d'inférences possibles :

1. la déduction : est définie comme « le seul raisonnement logique possible qui soit sûr et sans faille ». Appliquée à la rétroconception, elle permet de tirer des conclusions certaines à partir de principes généraux. Ainsi, si les thermes impériaux romains sont généralement organisés selon un plan symétrique, comme le montre le tableau du modèle *canonique* (Thébert, 2003), signifie que certain espace prédit à partir d'un fragment étudié doit être dédoublé ;
2. l'abduction : repose sur des hypothèses non vérifiées, ce qui lui confère une valeur scientifique limitée. Elle consiste à attribuer un cas particulier à une catégorie plus large sans preuve suffisante. Par exemple, l'identification d'un espace présentant des caractéristiques proches d'un *frigidarium* peut conduire à classer des pièces similaires dans cette même catégorie, sans certitude formelle ;
3. l'induction : quant à elle, généralise à partir d'observations répétées. Elle permet de formuler des hypothèses sur une régularité à partir de cas observés. Toutefois, Jean-Claude Golvin souligne le risque inhérent à ce raisonnement : une seule exception peut invalider la règle déduite. Dans le cas présent, observer plusieurs thermes dotés d'un *frigidarium* central pourrait inciter à en faire une règle typologique, malgré l'existence de contre-exemples comme les thermes du Camp T17.

Face à ces limites, J-C Golvin propose une méthode fondée sur la combinaison de l'induction et de la déduction appelée hypothético-déductive. Cette approche per-

met de formuler des hypothèses plausibles à partir de régularités observées, puis de les valider par des raisonnements logiques fondés sur des principes architecturaux. Dans un contexte où les données patrimoniales sont fragmentaires, voire absentes, cette méthode s'impose comme un cadre rationnel et structurant. Les hypothèses, bien que dérivées de l'observation inductive, doivent être suffisamment robustes pour soutenir un raisonnement déductif cohérent. Une fois *admises*, c'est-à-dire « considérées comme véridiques jusqu'à nouvel ordre » (Golvin, 2005), elles permettent de poursuivre l'analyse garantissant la cohérence scientifique des propositions.

L'évaluation des performances du modèle ne se limite pas à une comparaison brute avec les plans complets. Elle consiste à confronter les hypothèses issues de l'algorithme aux configurations réelles observées dans le corpus, en mesurant la qualité des prédictions ainsi que leur cohérence typologique.

9.4.4.1 Structuration méthodologique de la phase D

À l'instar des phases précédentes, la structuration méthodologique de la phase D est exposée ci-après, à travers un tableau de synthèse, accompagnée d'une description des opérations d'évaluation mises en œuvre et d'un script Python correspondant (*cf*. Fig. 215).

Dans cette dernière phase, le modèle est évalué quant à sa capacité à généraliser les apprentissages réalisés sur des plans complets afin de proposer des complétions plausibles pour des plans fragmentaires, tels que ceux rencontrés en contexte archéologique. Les résultats sont examinés à l'aide d'un rapport de classification et d'une matrice de confusion, ce qui permet de repérer les situations où certaines fonctions sont mal attribuées. La robustesse du modèle est ensuite testée par l'introduction de bruit, c'est-à-dire de variations aléatoires dans les données, simulant les imprécisions liées au relevé ou à la saisie des plans. Lorsque les prédictions demeurent cohérentes malgré ces perturbations, le modèle peut être considéré comme stable et apte à être utilisé dans une démarche de complétion assistée.

Table 71 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase D.
(établie par l'auteure)

Phase D : inférence causale (inférence sur de nouveaux espaces (plans fragmentaires))	
description	cette phase correspond à l'évaluation finale du modèle sélectionné, réalisée exclusivement sur le *test set*, c'est-à-dire un sous-ensemble de données totalement inédites pour le modèle, non utilisées ni durant l'apprentissage ni durant la validation. L'objectif est de tester la capacité réelle de généralisation du modèle dans des conditions simulant des cas concrets d'incomplétude ou de fragmentation. Elle permet également d'analyser les erreurs de prédiction et d'en tirer des hypothèses causales sur la distribution des fonctions architecturales
application sur le *test set*	le modèle final, retenu à l'issue de la phase C, est appliqué aux données du *test set* à l'aide de la commande *y_pred = model.predict(X_test)*. Cette prédiction est ensuite confrontée aux étiquettes réelles (*y_test*) afin de quantifier l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs observées

évaluation de la performance finale	les métriques mobilisées sont les mêmes qu'en phase C, mais interprétées différemment : (1) Accuracy globale ; (2) F1-score pour les classes sous-représentées ; (3) Matrice de confusion pour visualiser la répartition des erreurs ; (4) Courbe ROC/AUC si le modèle le permet, pour évaluer la séparation entre classes. Ces indicateurs permettent de juger de la robustesse et de la stabilité du modèle sur des cas réels
tests de robustesse	plusieurs scénarios de simulation sont mis en œuvre pour tester la stabilité du modèle : - masquage partiel d'un plan complet (ex. : suppression volontaire d'un espace fonctionnel connu, puis prédiction par ML1) ; - ajout de bruit ou perturbation légère des attributs géométriques pour observer la sensibilité du modèle aux variations mineures ; - croisement avec des plans inédits ou incomplets pour tester la transférabilité du modèle au-delà du corpus d'apprentissage
analyse des erreurs	les cas de mauvaise classification sont examinés individuellement afin d'identifier les facteurs responsables (redondance typologique, ambiguïté géométrique, position marginale...). Cette étape permet de formuler des hypothèses causales reliant les caractéristiques géométriques aux fonctions mal ou bien prédites
finalité	cette phase conclut le cycle d'apprentissage en validant la fiabilité du modèle ML1 dans des conditions proches de l'usage réel. Elle fournit des garanties sur la qualité des prédictions lorsqu'elles sont appliquées à des plans fragmentaires, et permet de relier les erreurs ou succès du modèle à des propriétés causales propres à l'architecture thermale romaine. Ces résultats fondent la légitimité de l'intégration du modèle dans un processus de rétroconception patrimoniale

9.5 De l'entrainement supervisé à la recomposition patrimoniale

L'élaboration de l'AICM marque l'aboutissement de la démarche méthodologique développée tout au long de la thèse. Construit sur la base du PDSM, le modèle organise la complétion architecturale des thermes fragmentaires selon une succession de sous-modèles, chacun ciblant une étape : reconnaissance des fonctions existantes, identification des espaces manquants, organisation typologique, génération des formes et déduction du contour global.

Ce cadre progressif permet de dépasser la restitution formelle pour proposer une recomposition contrôlée, où l'AI intervient comme outil d'aide à la décision, et non comme substitut de l'expertise humaine. L'intégration de l'apprentissage supervisé garantit une explicitation des régularités spatiales et fonctionnelles, tout en permettant une vérification des inférences par des mécanismes d'évaluation.

Le modèle ainsi structuré ne se limite pas à une expérimentation ponctuelle : il fournit un protocole reproductible, transférable à d'autres édifices et ouvert à des enrichissements futurs. En reliant les prédictions aux règles compositionnelles de l'architecture thermale romaine, l'AICM établit un cadre de rétroconception patrimoniale qui conjugue rigueur historique, lisibilité méthodologique et potentiel d'extension numérique.

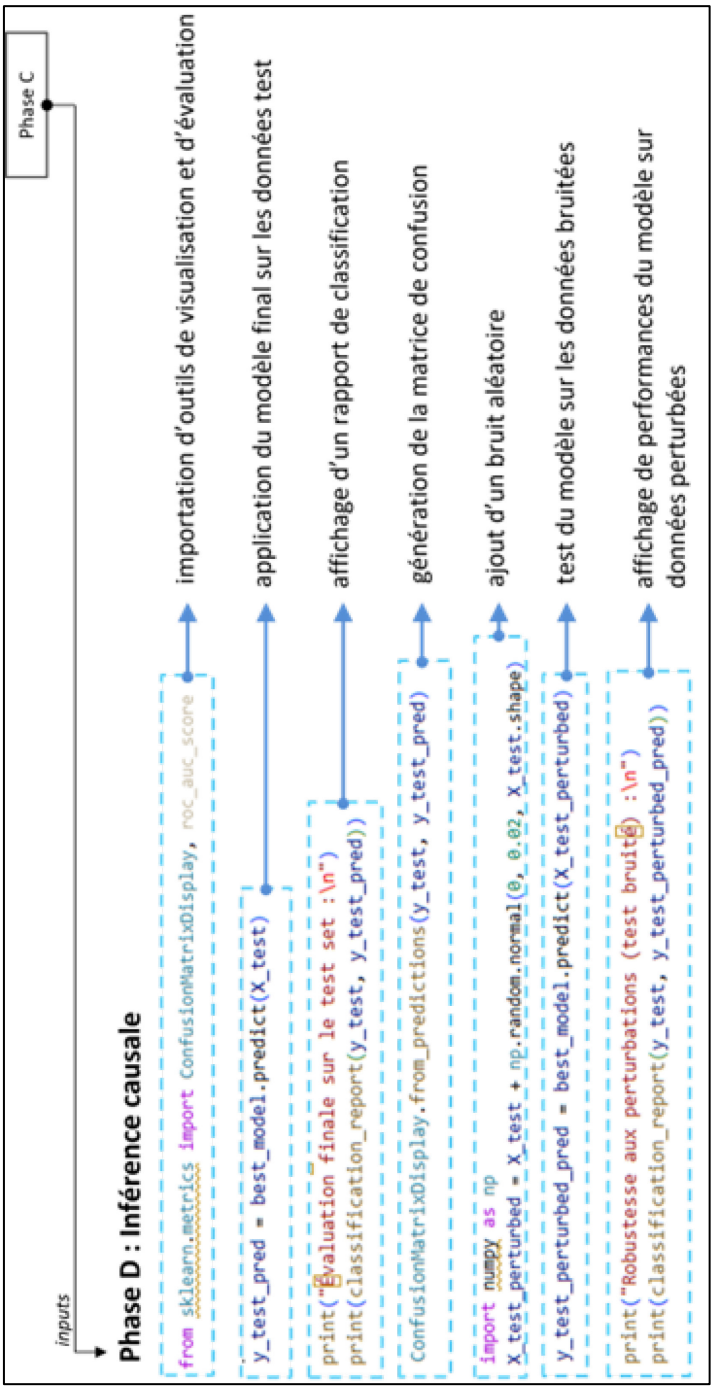


Fig. 215 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase D. (établie par l'auteure

CONCLUSION GÉNÉRALE

La conclusion générale reprend les principaux apports de la recherche et en souligne la portée méthodologique. Elle récapitule les résultats obtenus à travers la mise en place d'un double modèle paramétrique et intelligent, conçu pour la complétion des plans thermaux fragmentaires. Elle met en évidence les spécificités de la démarche adoptée, en insistant sur ses différences avec les approches patrimoniales classiques, puis en expose les limites et les conditions de validité. Enfin, elle ouvre sur les prolongements possibles de la méthode, en envisageant à la fois son application à d'autres typologies architecturales et son intégration dans des dispositifs numériques d'analyse, de médiation et de transmission.

Démarche globale de la rétroconception

L'achèvement de la thèse s'inscrit dans la convergence d'une réflexion d'un modèle paramétrique et une méthode intelligente sur la rétroconception, à la croisée de l'architecture, du patrimoine et des sciences de données. La démarche adoptée permet d'apporter une réponse renouvelée à la problématique de la *complétion* des plans fragmentaires des thermes impériaux romains. L'ensemble de la recherche repose sur une succession d'étapes structurées, depuis la réflexion conceptuelle sur la rétroconception jusqu'à la formalisation d'un *pipeline* paramétrique et algorithmique adapté aux spécificités du patrimoine bâti.

La rétroconception se distingue fondamentalement des approches patrimoniales traditionnelles telles que la restitution, la reconstitution ou la restauration, par une perspective méthodologique, en privilégiant une analyse des processus ayant conduit à la genèse d'un édifice, plutôt que la reproduction fidèle ou la conservation matérielle de son état. La réflexion développée souligne le rôle déterminant de la mémoire, de la perception et de la projection dans le déroulement des *reconceptions* successives, en mobilisant la capacité du concepteur à actualiser les expériences passées, à interpréter les données présentes et à anticiper des configurations futures. La diversité des logiques mobilisées, de l'imitation classique à la modélisation paramétrique, confirme l'impossibilité de figer la *restitution* dans un paradigme unique, et engage à articuler rigueur analytique et dispositifs d'innovation méthodologique.

Afin de synthétiser l'ensemble du processus de rétroconception, un schéma est présenté (*cf*. Fig. 216). Le point de départ est l'objet réel lacunaire, fragmentaire et incomplet, qui fait l'objet d'une décomposition (1) afin d'identifier ses attributs. Ces données sont ensuite traduites et encodées (2) sous un format exploitable par la machine, constituant la base du *Parametric DataSet Model* (PDSM). Le PDSM (3) agit comme un catalogue numérique de données patrimoniales, constituant un jeu de

donnée servant à l'entrainement (4) à l'aide de l'*artificial intelligence* (AI), pour aboutir à la construction d'un ensemble de sous-modèles sous forme de l'*Artificial Intelligence Completion Model* (AICM) (5). Ce dernier applique, par apprentissage automatique (*machine learning* [ML]) supervisé, une série d'inférences destinées à compléter les parties manquantes d'un plan fragmentaire. L'AICM produit alors une sortie interprétable (6), qui propose des solutions de complétion. Ces prédictions alimentent le travail du concepteur, lequel opère une étape de recomposition (7), transformant les résultats numériques en objets physiques ou virtuels complets. Le processus fonctionne ainsi selon une logique itérative, où chaque complétion enrichit à son tour le jeu de données (8), consolidant la robustesse du modèle. Ce diagramme met en évidence la complémentarité entre l'expertise humaine et les dispositifs computationnels : le concepteur fournit les règles d'interprétation et valide les choix, tandis que la machine accélère et systématise les opérations de recomposition. Ensemble, ils permettent de transformer un fragment lacunaire en une représentation cohérente et interprétable de l'édifice originel.

Principes de décomposition

La méthodologie adoptée articule la rétroconception en deux phases principales : une phase de *décomposition* analytique et une phase de *recomposition* prédictive. Chacune est fondée sur une gestion raisonnée des variables et une exploitation optimisée des ressources numériques. L'intégration de la pensée systémique, notamment à travers la « méthode générative » proposée par Mounir Dhouib (2004), a permis de concevoir la décomposition comme une opération analytique guidée par les outils du paradigme structural du « modèle topologique cognitif ». Cette approche a contribué à enrichir l'inventaire des thermes et à poser les bases d'une modélisation fine de leurs configurations spatiales.

L'examen des pratiques constructives et des modalités historiques d'édification a mis en évidence l'extrême diversité des systèmes bâtis, rendant toute généralisation normative inopérante à l'échelle de l'empire, notamment en ce qui concerne le *plein*. En réponse à cette hétérogénéité, l'intégration du concept d'« Espace Lieu Architectural » (Dhouib, 2004), fondé sur l'articulation entre milieux habitables et dispositifs constructifs, a permis de relier la taxonomie des éléments verticaux (parois) à l'organisation spatiale d'ensemble. Cette orientation méthodologique a conduit à privilégier une modélisation centrée sur le vide — c'est-à-dire sur les espaces construits dans leurs propriétés géométriques et fonctionnelles — comme point d'entrée pour la *complétion* algorithmique.

Le modèle topologique cognitif constitue un dispositif d'articulation entre les dimensions immatérielles et les composantes matérielles de l'édifice. Il repose sur une méthode générative qui engage l'analyse à travers un cheminement méthodologique : les postulats permettent de définir l'objet d'étude, les paradigmes en orientent la compréhension, et les outils issus du paradigme structural conduisent à sa décomposition et à sa recomposition (*cf*. Fig. 217).

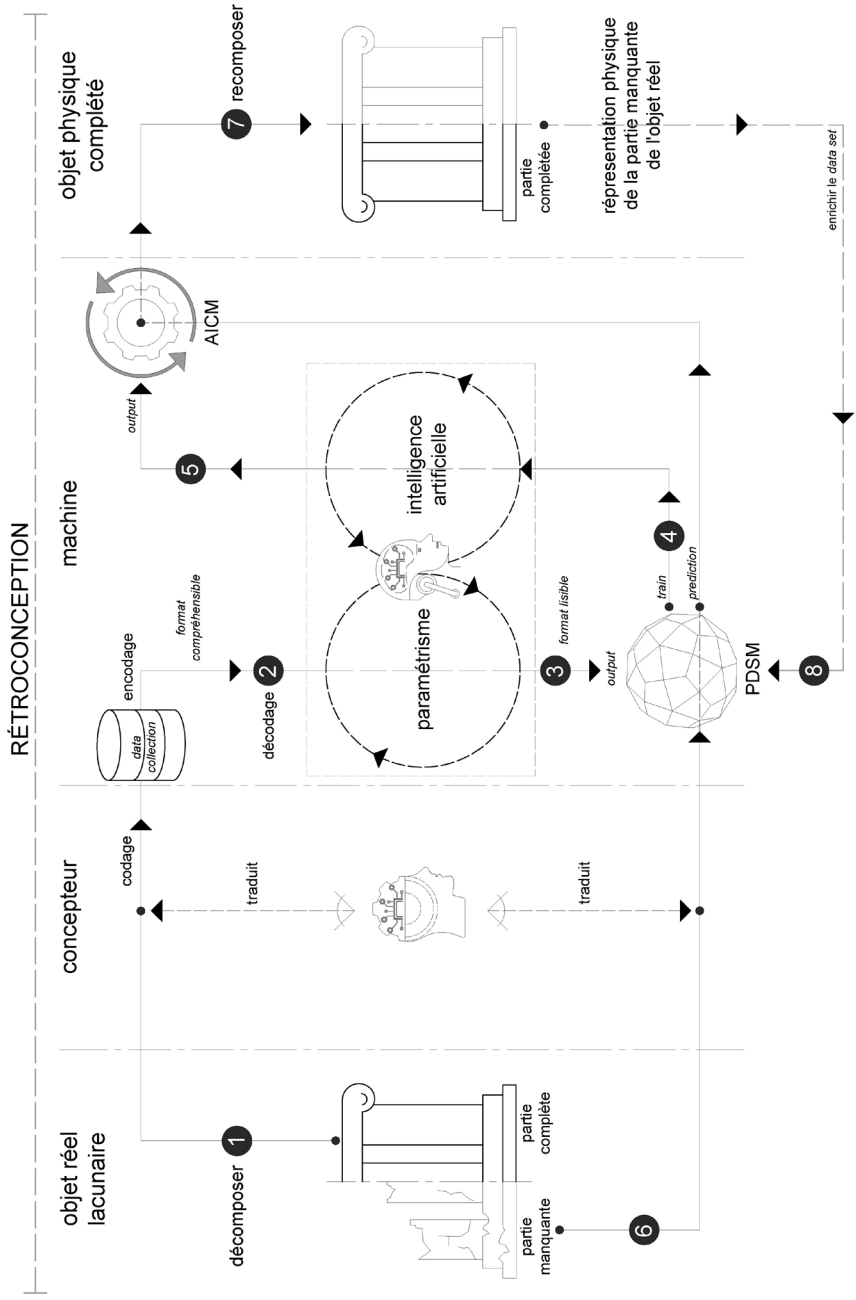


Fig. 216 – Le processus général de la rétroconception. (établie par l'auteure)

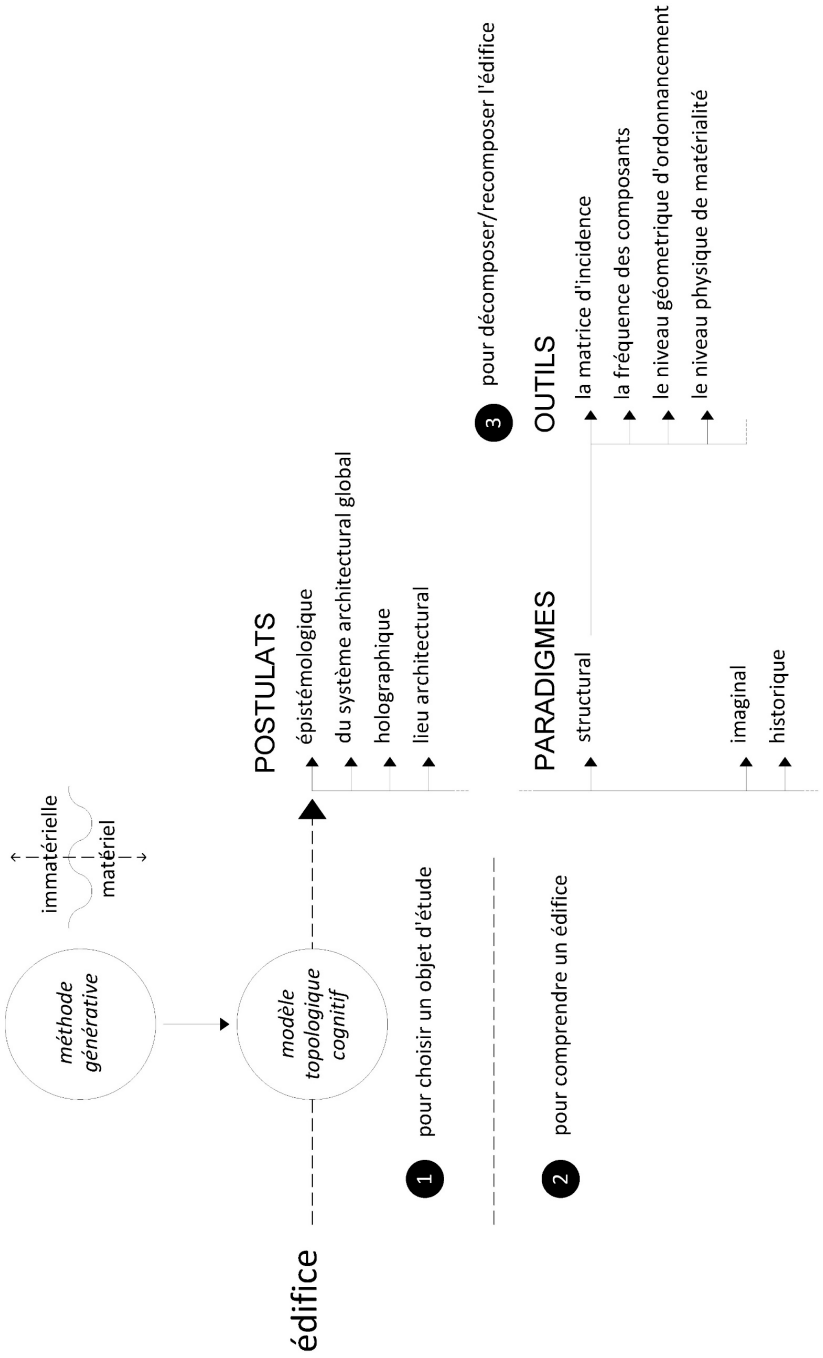


Fig. 217 – Processus d'un projet à travers la méthode générative. Une transposition du travail réalisé par Mounir Dhouib (2004, 2014, 2022). (établie par l'auteure)

Structuration d'un système à double modèle

L'organisation du double modèle PDSM/AICM, inspiré des principes du jumeaux numérique (*Digital Twin* [DT]), assure à la fois la flexibilité des représentations et l'évolution continue de jeux de données. Le PDSM permet de structurer les plans thermaux sous forme vectorielle et paramétrique, en traduisant les données architecturales en variables mesurables, modifiables et exploitables. Il fonctionne à la fois comme une archive patrimoniale et comme une base d'apprentissage pour l'algorithme.

L'AICM, comme approche supervisée et hybride (*cf*. Fig. 218), repose sur une segmentation du processus algorithmique, qui se distingue des approches de type apprentissage profond (*Deep Learning* [DL]) par sa lisibilité et sa capacité à intégrer les contraintes patrimoniales. Le faible volume de données disponibles constitue une limitation inhérente au corpus : les plans thermaux romains sont rares et incomplets. Cette contrainte, bien qu'elle constitue une faiblesse méthodologique au regard des standards habituels d'un processus *intelligent*, devient ici une opportunité. La thèse propose une stratégie alternative fondée sur une architecture *multi-modal* et une intégration raisonnée de l'expertise humaine. L'intervention des spécialistes du patrimoine, familiers des restitutions et des problématiques de fouilles, permet d'orienter et d'affiner les sorties de l'algorithme à chaque étape du *pipeline*. Cette approche collaborative compense le manque de données massives par une méthodologie *originale*, fondée sur cinq sous-modèles successifs. Chaque sous-modèle assure une fonction précise et enchaine ses sorties vers l'étape suivante : (1) le plan partiel est introduit dans Grasshopper où ses caractéristiques géométriques sont extraites et transmises aux scripts développés en *GhPython* ; (2) le sous-modèle ML1 prédit les fonctions des espaces présents ; (3) ML2 identifie les espaces manquants et génère la liste des espaces à ajouter ; (4) ML3 traite les espaces présents et manquants pour créer un organigramme avec des relations typologiques détectées ; (5) ML4 propose des gabarits géométriques plausibles pour chaque espace à insérer ; (6) enfin, ML5 génère les polylignes de l'emprise au sol, à partir des combinaisons retenues par le concepteur, afin de prédire un plan complet.

Chaque sous-modèle mobilise uniquement les données nécessaires à la tâche ciblée, sans solliciter l'ensemble du corpus, et s'appuie sur un algorithme adapté à la nature du problème à résoudre. L'efficacité globale du *pipeline* dépend de sa capacité à assurer la continuité logique du raisonnement, depuis l'analyse du fragment initial jusqu'à la prédiction du plan complet. Cette structuration modulaire exige néanmoins une gestion des flux de données, en particulier pour garantir la compatibilité des formats entre les sous-modèles successifs.

Le processus complet repose sur une séquence méthodologique structurée en quatre phases : (1) phase A, analyse et structuration des données ; (2) phase B, entrainement des sous-modèles à partir du *training set* ; (3) phase C, ajustement et sélection du modèle optimal à l'aide du *validation set* ; (4) phase D, inférence causale et évaluation finale sur le *test set*, permettant de mesurer la capacité généralisante du modèle sur des cas non vus.

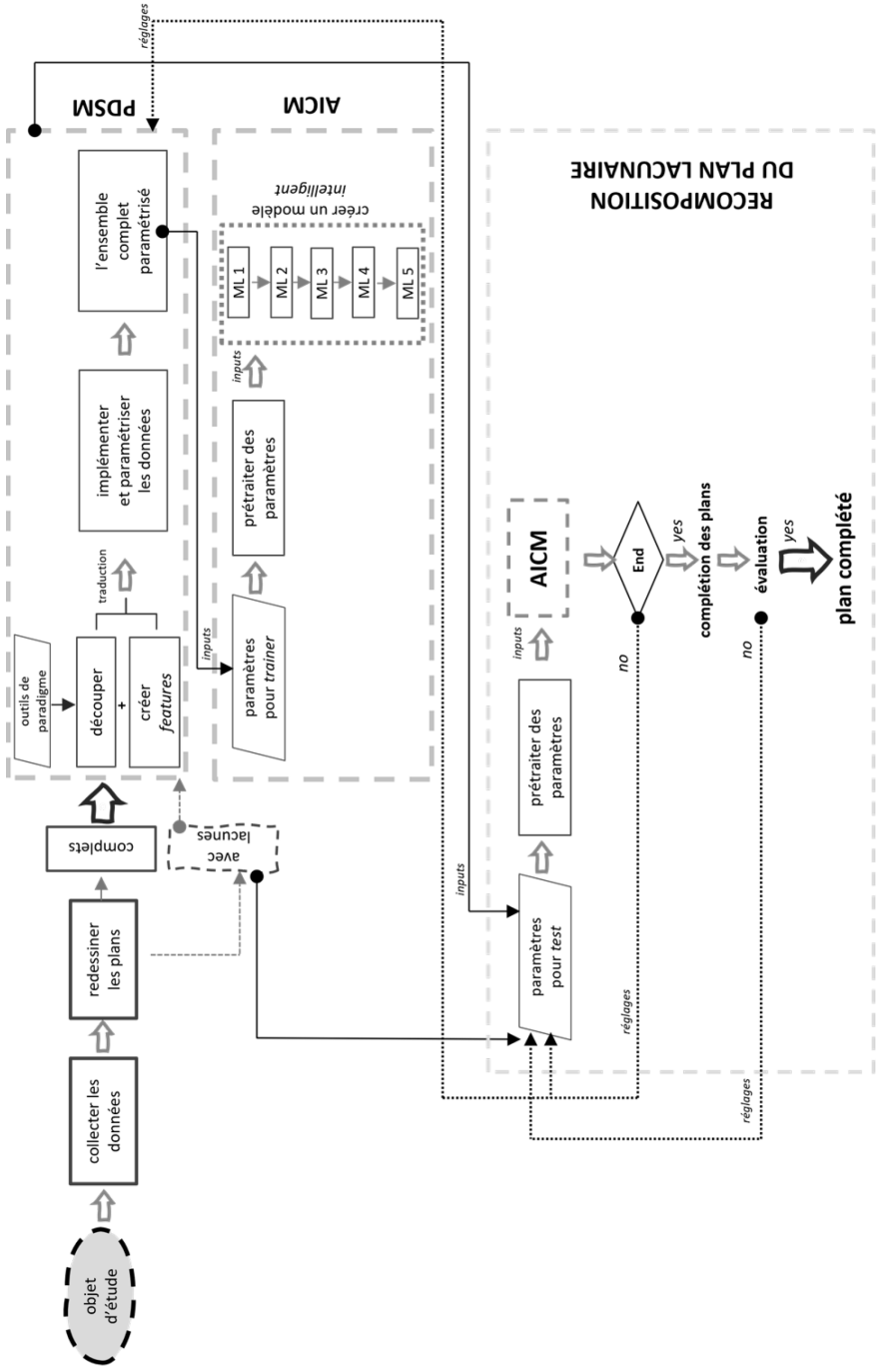


Fig. 218 – Enchaînement des étapes du PDSM et de l'AICM. (établie par l'auteure)

Préparation de jeu de données

La démarche repose sur un corpus issu de vingt-neuf thermes impériaux romains (vingt-trois en Afrique du Nord et six à Rome), sélectionné en raison de sa valeur représentative et de sa capacité à rendre compte des difficultés concrètes de la rétroconception. Face à la diversité des états de conservation et à l'hétérogénéité des sources disponibles, la recherche a visé à formaliser une méthode permettant de structurer et d'exploiter ces données de manière reproductible. La constitution de ce corpus a reposé sur une analyse critique et croisée des sources documentaires, combinant relevés, plans publiés, et restitutions graphiques, enrichie par un *redessin* précis des plans dans un format vectoriel (DXF).

Cette approche, bien qu'élaborée en dehors des standards d'un spécialiste en science de données, démontre qu'une méthodologie fondée sur des principes de segmentation permet de concevoir des solutions algorithmiques adaptées aux spécificités du patrimoine, décrit comme la « meilleure proposition que l'on puisse faire en fonction de l'état de la connaissance du sujet. Elle est discutable et perfectible » (Golvin, 2005, p. 31).

Les limites du processus ne résident pas tant dans les algorithmes eux-mêmes que dans la compréhension de leur fonctionnement, des résultats qu'ils produisent et des effets qu'ils engendrent. À ce stade, l'enjeu n'est plus de repenser entièrement les méthodes, mais d'en reconnaître les implications concrètes, tout en identifiant les leviers d'amélioration. Ces limites tiennent principalement à la qualité du corpus mobilisé, c'est-à-dire aux données fournies à l'algorithme. Deux catégories de cas posent un problème. D'une part, les exceptions morphologiques, qui s'écartent fortement du modèle *canonique* (Thébert, 2003), bien qu'elles soient rares, offrent des indications sur les marges de variation du système thermal. D'autre part, les édifices incomplets, dont le degré de complétude varie fortement, nécessitent une prise en compte nuancée.

En réponse à cette hétérogénéité, deux dimensions ont été dégagées pour qualifier les plans intégrés au corpus : le degré de *complétude*, qui mesure la quantité d'informations disponibles sur un édifice donné, et le degré de *similitude*, qui évalue sa proximité morphologique ou typologique avec les autres thermes du corpus. La première dimension concerne l'intégrité descriptive des données ; la seconde, leur cohérence au regard du *prototype* thermal impérial (Lézine, 1968). Ce double critère est d'autant plus important que le corpus repose parfois sur un nombre restreint de plans complets, qui tendent alors à devenir des références implicites. Or, leur intégrité ne garantit ni leur exemplarité ni leur représentativité. Leur exploitation méthodique doit donc s'accompagner d'un regard critique, afin d'éviter qu'ils ne soient survalorisés au détriment de configurations moins complètes mais historiquement pertinentes. Transposé à la restitution, une *recomposition*, « malgré la part d'hypothèse qu'elle contient nécessairement, ne peut jamais être une invention : elle est le reflet d'une idée patiemment construite » (Golvin, 2003).

Dans ce cadre, bien que l'expérimentation complète du modèle reste à conduire, sa structuration méthodologique a été précisément définie. Le sous-modèle ML1 a

servi de point d'entrée pour une simulation théorique de l'ensemble du processus, intégrant les phases de traitement des données, d'apprentissage, de sélection et d'inférence.

L'articulation des deux modèles, PDSM et AICM, dans un workflow intégré permet d'enchaîner extraction, structuration, prédiction et visualisation au sein d'un même environnement. Grasshopper, en synergie avec Rhinoceros3D, constitue l'environnement de modélisation paramétrique central de la démarche. Il offre une interface visuelle intuitive qui permet de structurer les opérations de manière hiérarchique et logique, indépendamment du niveau d'expertise en programmation, et favorise une lecture claire des flux de données. L'intégration de Python, via le *composant GhPython* ou les scripts externes, enrichit ce dispositif par ses capacités d'automatisation, de traitement algorithmique sur mesure, et d'interfaçage avec des bibliothèques spécialisées.

Examen des hypothèses

L'examen des hypothèses permet de dégager plusieurs enseignements. La première, relative à la structuration paramétrique du corpus, se trouve largement confirmée. La mise en place du PDSM a démontré qu'un ensemble hétérogène de plans pouvait être normalisé, redessiné et enrichi par des métadonnées spatiales pour être exploité dans un cadre paramétrique. Les difficultés rencontrées, liées à la diversité des sources – plans anciens, relevés incomplets, conventions graphiques disparates – n'ont pas remis en cause le principe, mais elles ont mis en évidence la nécessité d'un protocole de préparation des données.

La seconde hypothèse, portant sur la possibilité d'inférer un schéma d'ensemble à partir de fragments, se vérifie sous certaines conditions précises, mais elle demeure la plus délicate sur le plan épistémologique. Les expérimentations ont montré que des indices inscrits dans les fragments permettent d'esquisser une recomposition cohérente. Toutefois, la pertinence dépend du degré de conservation : un axe symétrique complet ou un *frigidarium* central fournit un potentiel de déduction élevé, tandis que des fragments trop partiels n'autorisent que des hypothèses conjecturales.

La troisième hypothèse, relative à l'usage du ML pour assister la rétroconception, est en partie validée mais demeure ouverte. La simulation méthodologique conduite sur ML1 a montré que l'application d'algorithmes d'apprentissage supervisé à un corpus complet permet la formalisation d'un modèle prédictif. Cependant, en l'absence d'une mise en œuvre opérationnelle des cinq sous-modèles de l'AICM, il reste à évaluer empiriquement la performance de ces techniques sur des données archéologiques lacunaires. Cette hypothèse doit donc être comprise comme une perspective de recherche plutôt que comme une validation définitive.

Entre intelligence artificielle et expertise archéologique

Le dispositif fonctionne comme un système évolutif de gestion des données architecturales, capable de s'adapter aux apports progressifs du terrain (*cf*. Fig. 219). Lorsqu'un nouveau plan est découvert, la première étape consiste à déterminer s'il s'agit d'un édifice complet ou fragmentaire. Dans le premier cas, le plan est intégré au PDSM après préparation selon le protocole de schématisation en vigueur, ce qui permet d'enrichir la base de données. Ce processus est automatisé : l'importation dans Rhinoceros3D déclenche l'extraction paramétrique des caractéristiques architecturales, assurant la mise à jour du modèle. Si le plan est partiel, l'AICM, une fois entraîné, peut être mobilisé pour proposer une complétion des espaces manquants. Grâce à cette structuration, le dispositif dépasse la modélisation ponctuelle et devient un outil d'aide à la décision, réutilisable et évolutif, destiné aux chercheurs, archéologues et concepteurs confrontés à l'incomplétude architecturale.

L'efficacité d'une telle démarche repose sur un dialogue constant entre architectes et spécialistes du patrimoine. Les résultats générés par l'algorithme n'acquièrent de sens qu'à travers leur confrontation aux connaissances issues du terrain, des sources matérielles et de l'historiographie. L'outil développé trouve sa légitimité dans sa capacité à fournir aux archéologues une grille de lecture supplémentaire : proposer des hypothèses spatiales là où les vestiges sont lacunaires, explorer des scénarios de restitution ou encore visualiser des combinaisons alternatives de plans. Dans cette perspective, il ne vise pas à imposer une vérité figée, mais à nourrir la réflexion scientifique en offrant du modèle paramétrique adaptatif, ouvert à la critique et à la révision.

La conclusion s'ouvre sur deux dimensions complémentaires : d'une part, une évaluation critique des limites actuelles de la méthode développée ; d'autre part, l'identification de perspectives susceptibles d'en prolonger la portée dans le cadre de futurs travaux.

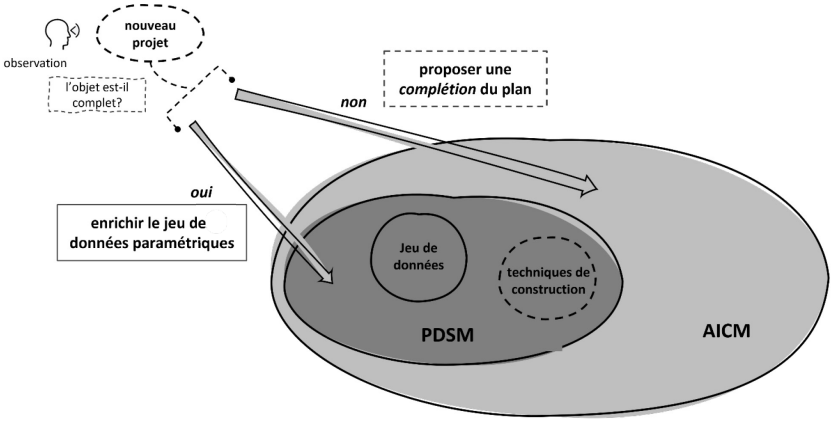


Fig. 219 – L'exploitation ultérieure de double modèle PDSM/AICM. (établie par l'auteure)

Limites identifiées

La principale limite réside dans la rareté des données disponibles. Les fouilles archéologiques livrent fréquemment des plans partiels, altérés par la dégradation postérieure, ce qui restreint la diversité du corpus et complique toute généralisation robuste à l'échelle de l'empire. Cependant, la structuration du système PDSM/AICM permet d'envisager l'intégration de nouveaux édifices, la diversification des cas d'étude, ainsi que le raffinement continu des paramètres d'entrée et des règles de traitement. La représentativité des résultats demeure donc relative : solides pour l'échantillon choisi, ils ne sauraient être étendus sans nuance à l'ensemble du monde romain.

Sur le plan méthodologique (*cf*. Fig. 220), la structuration du système a été clairement définie, et le *pipeline* de traitement a été organisé en quatre phases conceptuelles : prétraitement des données, apprentissage supervisé, prise de décision et inférence causale. Toutefois, seule la première tâche, celle de la prédiction fonctionnelle (ML1), a fait l'objet d'une formalisation complète sous la forme d'une simulation théorique. Les sous-modèles suivants (ML2 à ML5), bien que méthodologiquement planifiés et articulés, n'ont pas encore été expérimentés sur des cas concrets, en raison de contraintes temporelles et de la complexité des chaînes de traitement à implémenter.

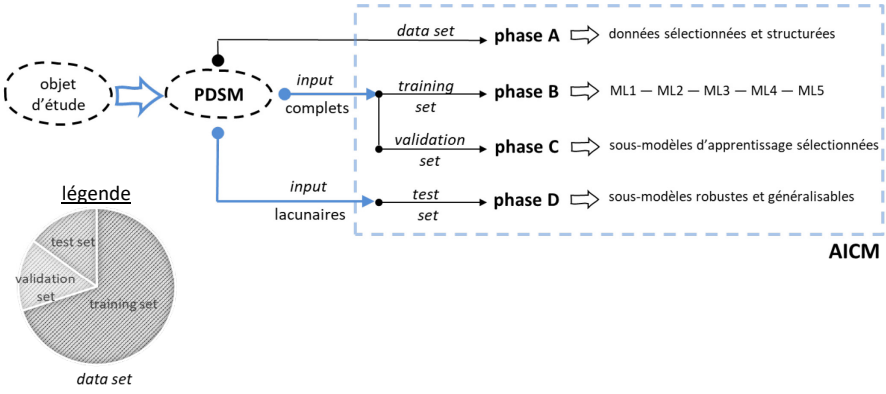


Fig. 220 – L'approche de complétion en quatre phases. (établie par l'auteure)

L'algorithme propose des complétions plausibles mais ne prétend pas atteindre une vérité historique : toute prédiction reste une hypothèse. Le rôle de l'expertise humaine reste donc indispensable pour valider, nuancer ou contester les résultats produits par la machine. L'un des apports de cette recherche d'avoir mis en évidence la nécessité d'associer les acteurs du patrimoine au processus. L'enjeu dépasse la seule sélection des données à intégrer ou à écarter : il engage une réflexion sur l'appropriation de l'AI, sur la manière dont les archéologues peuvent accueillir ces technologies et sur leur articulation avec la définition même du métier. La méthodologie

ne vise pas à se substituer aux spécialistes, mais à renforcer leur démarche critique dans une dynamique interdisciplinaire.

Cette exigence de dialogue permet d'éviter le risque de surgénéralisation souvent souligné par les archéologues, en rappelant la nécessité de contextualiser chaque cas. Chaque site, chaque province, chaque configuration constructive présente des spécificités propres. La tension méthodologique se situe entre deux approches complémentaires : d'une part, la recherche fondamentale, orientée vers la recomposition de la singularité de chaque édifice à partir de son origine et de ses caractéristiques propres ; d'autre part, la logique algorithmique, fondée sur la formalisation de règles générales et la production de modèles transférables.

Perspectives et prolongements possibles

Les limites identifiées dans cette recherche ne remettent pas en cause la validité de la démarche, mais en définissent avec précision la portée actuelle. Plusieurs pistes de prolongement peuvent être envisagées pour approfondir les acquis méthodologiques du présent travail.

L'expérimentation concrète des cinq sous-modèles du dispositif AICM, permettrait de tester la robustesse de la chaîne algorithmique, de valider les étapes de complétion, et d'ajuster les paramètres en fonction des spécificités spatiales observées dans des cas réels. Une autre voie envisageable réside dans l'enrichissement du PDSM, par l'intégration d'attributs supplémentaires, notamment liés à la matérialité constructive (type d'appareil, traces de coffrage...), susceptibles d'affiner l'interprétation des vestiges et d'améliorer la qualité des prédictions.

L'un des défis de cette recherche demeure l'état fragmentaire des édifices étudiés. Pour y répondre, une hiérarchisation des niveaux de complétion est formulée (*cf*. Fig. 221), distinguant trois degrés : (1) la prédiction bidimensionnelle en plan ; (2) la prédiction tridimensionnelle des murs ; (3) la modélisation intégrale incluant murs et toitures. La présente thèse se concentre sur le premier niveau, tandis que les deux niveaux suivants constituent des perspectives de recherche, ouvrant des prolongements possibles aussi bien sur le plan *structural* que sur les dimensions *historique* et *imaginale*, qui pourraient être intégrées ultérieurement au processus de modélisation.

Une piste supplémentaire consisterait à transposer cette méthodologie à d'autres typologies patrimoniales présentant des logiques d'organisation complexes : villas romaines, sanctuaires antiques, enceintes monumentales. Une telle extension impliquerait d'adapter les critères morphologiques et fonctionnels du modèle aux spécificités propres à chaque typologie. L'étude conduite sur vingt-neuf thermes impériaux romains a mis en lumière une série d'aspects architecturaux récurrents, qui constituent autant de structures d'interprétation applicables à d'autres ensembles. Ces aspects peuvent être pensés comme des « bulles » englobantes, au sens d'enveloppes typologiques permettant d'analyser la cohérence spatiale à différentes échelles. L'originalité des thermes étudiés réside précisément dans leur capacité à articuler ces dimensions dans des configurations singulières, mais comparables.

L'intégration ainsi, d'un corpus plus vaste permettrait d'évaluer la transférabilité du modèle au-delà du contexte nord-africain et de mieux cerner les variantes régionales du schéma thermal impérial.

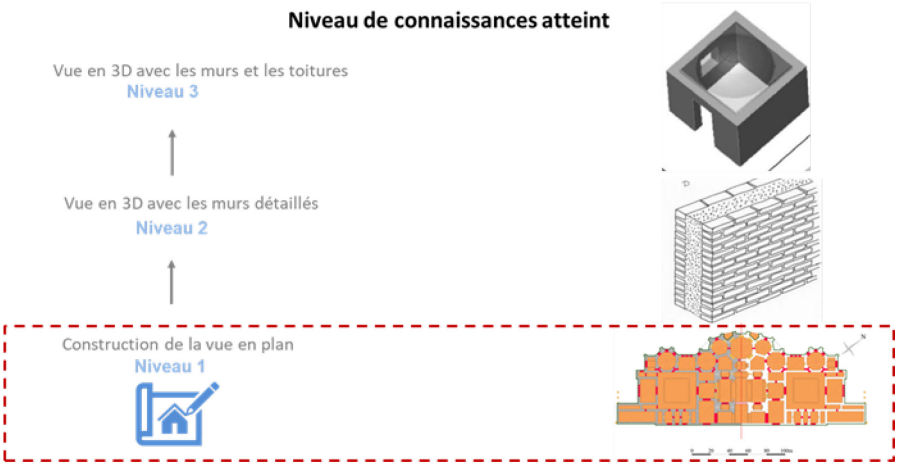


Fig. 221 – Niveaux de connaissances atteints. (établie par l'auteure)

Par ailleurs, les modèles développés pourraient être adaptés à des dispositifs interactifs de visualisation ou d'aide à la décision, facilitant l'appropriation des hypothèses de reconstitution par les conservateurs. En s'appuyant sur une base de données commune, ces outils permettraient de comparer ou ajuster différentes versions d'un même édifice, favorisant ainsi une approche collaborative et ouverte de la restitution. L'intégration du modèle dans des contextes d'enseignement, ou dans des dispositifs de médiation culturelle (expositions in situ, vidéo mapping, maquettes interactives), renforcerait son impact pédagogique et sa valeur de transmission.

« On ne pourra jamais pleinement retrouver l'image d'origine d'un site, dans toute sa richesse, mais une recherche méthodique permettra de s'en rapprocher toujours davantage » (Golvin, 2003).

BIBLIOGRAPHIE

Aamodt, A., & Nygård, M. (1995). Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge—An AI perspective on their integration. *Data & Knowledge Engineering*, *16*(3), 191-222. https://doi.org/10.1016/0169-023X(95)00017-M

Achinstein, P. (1968). *Concepts of science : A philosophical analysis*. Baltimore London: The Johns Hopkins Press.

Ackoff, R. L. (1989). *From Data to Wisdom*. *16*, 3-9.

Adam, J.-P. (1984). *La construction romaine : Matériaux et techniques* (1re éd.). Paris: Picard.

Adam, J.-P. (1988). *L'arte di costruire presso i Romani* (2e éd.). Milano: Longanesi.

Adam, J.-P. (2017). *La construction romaine : Matériaux et techniques* (7e éd.). Paris: Picard.

Agrawal, A., Fischer, M., & Singh, V. (2022). Digital Twin : From Concept to Practice. *Journal of Management in Engineering*, *38*(3), 06022001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001034

Al-Jazarī, I. al-Razzāz. (1973). *The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices (Kitab fi ma c rifat al-hiyal al-handasiyya)* (D. R. Hill, Trad.). Dordrecht: D.Reidel Publishing Company. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2573-7

Amir-Aslani, A., & Bhajun, R. (2015). Les 7 «V» Piliers du Big Data. *spectra biologie*, (218), 42-43.

Aristote. (1846). *Traité De l'âme* (J. B. Saint Hilaire, Trad.). Paris: Librarie philosophique de Ladrange.

Arzomand, K., Rustell, M., & Kalganova, T. (2024). From ruins to reconstruction : Harnessing text-to-image AI for restoring historical architectures. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, *10*(2), 69. https://doi.org/10.20528/cjsmec.2024.02.004

Autodesk. (2021). Digital Twins in Construction, Engineering & Architecture. Consulté à l'adresse https://www.autodesk.com/solutions/digital-twin/architecture-engineering-construction

Bachelard, G. (1942). *L'eau et les rêves : Essai sur l'imagination de la matière*. Paris.

Bachelard, G. (1943). *L'air et les songes essai sur l'imagination du mouvement* (17e réimpression, 1990). Paris.

Bachelard, G. (1948). *La terre et les rêveries de la volonté* (5e impression).

Bachelard, G. (1949). *La psychanalyse du feu* (première édition 1992). Paris: Gallimard.

Ballu, A. (1901). Les fouilles de Timgad. *Bulletin Monumental*, *65*(1), 415-433. https://doi.org/10.3406/bulmo.1901.11267

Balmond, C. (2002). *Informal*. Munich: Prestel.

Batty, M. (2007). *Cities and complexity : Understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge, MA: MIT Press.

Ben Hassen, H., & Maurin, L. (Éds.). (1998). *Oudhna (Uthina) : La redécouverte d'une ville antique de Tunisie*. Talence : Paris: Ausonius.

Ben Mansour, W. (2025). *Cours : Initiation à la programmation (Python)* (école nationale d'architecture et d'urbanisme ENAU). Tunis.

Ben Rajeb, S. (2012). *Modélisation de la collaboration distante dans les pratiques de conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives en conception collaborative instrumentée* (Thèse de doctorat). Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-La Villette, Paris.

Ben Slimene, N. (2017). *Les grands thermes publics d'Uthina : Étude archéologique et architecturale* (Thèse). Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis,Université de Tunis.

Benedikt, M. (Éd.). (1991). *Cyberspace : First steps*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Benzarti, G. (2008). *La restitution des monuments historiques ,vers une approche dynamique.Essai sur le frigidarium des grands thermes d'Uthina* (p. 149) [Mémoire de mastère en Architecture]. Tunis: École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR).

Bernard, G. (2017). La vie augmentée. [Billet de blog].

Billen, R., Jonlet, B., Luczfalvy Jancsó, A., Neuville, R., Nys, G.-A., Poux, F., … Hallot, P. (2018). *La transition numérique dans le domaine du patrimoine bâti : Un retour d'expériences*. Commission royale des Monuments, Sites et Fouilles de la Région wallonne.

Bos, M., Claeys, D., Vandenbroucke, D., & Stiernon, D. (2023). Vers une dynamique d'objectivation de l'évaluation patrimoniale. *lieuxdits*, (23), 32-44. https://doi.org/10.14428/ld.vi23.76853

Bouaita, K. (2008). *Le système de l'architecture romaine, modélisation d'une catégorie d'édifices : Les thermes impériaux en Tunisie* (Mastère de recherche en architecture). École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), Tunis.

Bouaita, K. (2015). *Rétro-conception architecturale : Le modèle des thermes impériaux romains de Tunisie* (Thèse de doctorat en architecture). École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), Tunis.

Bouraoui, I. (2005). *Le système de l'architecture des bains collectifs ifriquiens-analyse comporative et modélisation des thermes et des hammams* (Mastère de recherche en architecture). École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), Tunis.

Brockman, G., Sutskever, I., & OpenAI. (2015). Introducing OpenAI.

Burry, M. (1996). Parametric design and the Sagrada Familia. *Architectural Research Quarterly*, *1*(4), 70-81.

Burry, M. (2011). *Scripting cultures : Architectural design and programming*. Chichester, UK: Wiley.

Cache, B. (1997). *Terre meuble*. Orléans: HYX.

Cache, B., & Beaucé, P. (2003). Vers une architecture associative. In F. Migayrou (Ed.), *Architectures non standard* (p. 138-139). Paris : Centre Pompidou.

Caniggia, G., & Maffei, G. L. (1979). *Composizione architettonica e tipologia edilizia : 1. Lettura dell'edilizia di base*. Venezia: Marsilio.

Carpo, M. (Éd.). (2013). *The digital turn in architecture 1992-2012*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.

Carpo, M. (2017). *The Second Digital Turn : Design Beyond Intelligence*. Cambridge, Massachusetts London, England: The MIT Press.

Carton, L. B. C., Méhier, H. de M., & Saladin, H. (1906). *Les fouilles d'El Kenissia (près Sousse)*. Paris: Ernest Leroux.

Chaillou, S. (2019). *AI + Architecture | Towards a New Approach* (Thèse de doctorat, Harvard University). Harvard University.

Chaillou, S. (2021). *L'intelligence artificielle au service de l'architecture*. Paris: Le Moniteur.

Chen, C., Yan, X., Zhu, F., Han, J., & Yu, P. S. (2008). Graph OLAP : Towards Online Analytical Processing on Graphs. *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, 103-112. Pisa, Italy: IEEE. https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.30

Chikofsky, E. J., & Cross, J. H. (1990). Reverse engineering and design recovery : A taxonomy. *IEEE Software*, *7*(1), 13-17. https://doi.org/10.1109/52.43044

Claeys, D. (2010). Prendre en compte la complexité contextuelle : Vers une architecture « analytico-systémique ». *Architecture*, (2010-3), 32-33.

Claeys, D. (2013). *Architecture et complexité : Un modèle systémique du processus de (co)conception qui vise l'architecture* (Thèse de doctorat). Université catholique de Louvain, Bruxelles.

Claeys, D. (2015). Concevoir un projet d'architecture. Calmer les certitudes, gérer l'incertitude. *Lieuxdits : Sérendipité*, (9-avril), 20-23. https://doi.org/10.14428/ld.vi9.22933

Claeys, D. (2017). De l'interprétation créative du réel au processus bayésien de conception architecturale. *Acta Europeana Systemica (AES)*, (7), 65-80. https://doi.org/10.14428/aes.v7i1.56643

Claeys, D. (2018). *De la crise de l'échelle en conception architecturale à l'opération fondamentale de mise à l'échelle du réel* (p. 16) [Rapport de recherche]. Laboratoire Théorie des systèmes en architecture.

Claeys, D. (2020). *Cours-conférence : Déplacer une mule : Modéliser des projets d'architecture avec la pensée systémique.* (École Nationale d'Architecture d'Agadir). Maroc.

Claeys, D. (2021a). *Anticrise architecturale : Analyse d'une discipline immergée dans un monde numérique*. Louvain-la-Neuve : Presses universitaires de Louvain (coll. forma loci).

Claeys, D. (2021b). *Cours-conférence au séminaire doctoral : Réflexivités en architecture : Approche systémique de la conception architecturale.* (Faculté d'architecture de l'ULiège; E. Le Coguiec, Éd.). Liège, Belgique.

Claeys, D. (2023). Physiological and cognitive discontinuities : From mythical mediation to implicit discretization of architectural design tools. *Frontiers of Architectural Research*, *12*(1), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.06.008

Claeys, D., & Naifer, Z. (2022). Méthodes de reconception architecturale : Imitation, modularité, typologie et paramétrisme. *DNArchi*, (2), 16. https://doi.org/10.48568/1DHB-SG50

Claeys, D., & Roobaert, L. (2022). Cybernétique, interactivité et conversation : Retour sur les effets des expériences de Gordon S. Pask en architecture. *SHS Web of Conferences*, *147*(06002), 13. https://doi.org/10.1051/shsconf/202214706002

Clavert, F., & Noiret, S. (Éds.). (2013). *L'histoire contemporaine à l'ère numérique—Contemporary History in the Digital Age*. Bruxelles: Peter Lang Verlag. https://doi.org/10.3726/978-3-0352-6340-4

Corbin, H. (1964). *Histoire de la philosophie islamique* (p. 201-201). Gallimard.

Corbin, H. (1969). *Creative Imagination in the Sufism of Ibn Arabi* (R. Manheim, Trad.). Princeton University Press.

Corbin, H. (1980). *Temple et contemplation : Essais sur líslam iranien ; publlié avec le concours du centre national des lettres*. Paris: Flammarion.

cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO (I.E.S. JORGE JUAN. DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA, HISTORIA E HISTORIA DEL ARTE). (2011).

Daumé, H. (2017). *A Course in Machine Learning*. Hal Daumé III.

Deleuze, G. (1988). *Le pli : Leibniz et le Baroque*. Paris: Minuit.

Delgado-Martos, E., Carlevaris, L., Sidola, G. I., Pesqueira-Calvo, C., Nogales, A., Maitín, A. M., & García-Tejedor, Á. J. (2024). Automatic Virtual Reconstruction of Historic Buildings Through Deep Learning. A Critical Analysis of a Paradigm Shift. In A. Giordano, M. Russo, & R. Spallone (Éds.), *Beyond Digital Representation* (p. 415-426). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36155-5_26

Demetrescu, E., & Ferdani, D. (2021). From Field Archaeology to Virtual Reconstruction : A Five Steps Method Using the Extended Matrix. *Applied Sciences*, *11*(11), 5206. https://doi.org/10.3390/app11115206

Derycke, D., Buglio, D. L., Cohen, M., Lefèvre, M., & Brunetta, V. (2015). ALICE : 1994-2014. Vingt ans d'expérimentation et d'enseignement sur l'analyse et la représentation architecturale. *CLARA*, *3*(1), 163-174.

Descartes, R. (1637). *Discours de la methode pour bien conduire sa raison, & chercher la verite dans les sciences. Plus la dioptrique. Les meteores. Et la geometrie. Qui sont des essais de cete methode*. Leyde: Ian Maire.

Dhouib, M. (2004). *De la construction de connaissances à la création : Modélisation du processus de conception architecturale* (Thèse de doctorat en architecture). École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), Tunis.

Dhouib, M. (2014). *Cours de doctorat en architecture : Système général et sens universel.* (ENAU/UCAR). Tunis.

Dhouib, M. (2022). *Cours de doctorat en architecture : Système général et sens universel.* (ENAU/UCAR). Tunis.

Dhouib, M., & Lichiheb, H. (2011). Virtual and cognitive reconstruction of Roman Imperial Baths in Tunisia. *حولية الاتحاد العام للآثاريين العرب « دراسات في آثار الوطن العربي »*, *14*(14), 110-160. https://doi.org/10.21608/cguaa.2011.298084

Di Vita-Évrard, G. (1991). Lepcis Magna : Contribution à la terminologie des thermes. *Publications de l'École Française de Rome*, *142*(1), 35-42.

DiNucci, D. (1999). Fragmented future. *Print Magazine*, *4*(32), 220-222.

Dubois, S., Vanhellemont, Y., & Bouw, M. D. (2018). *Le relevé 3D à l'heure du BIM - Capturer la réalité en haute définition* [Rapport technique]. Bruxelles: Institut Belge de Recherche en Bâtiment.

Durand, J.-N.-L. (1802). *Précis des leçons d'architecture* (Vol. 1). Paris: Chez l'AUTEUR, à l'école polytechnique.

Durand, J.-N.-L. (1821). *Partie graphique des cours d'architecture faits à l'École royale polytechnique depuis sa réorganisation; précédée d'un sommaire des leçons relatives à ce nouveau travail*. Paris: Firmin Didot.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2008). *BIM Handbook : A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors* (Hoboken, N.J). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470261309

Espeland, W. N., & Stevens, M. L. (2008). A Sociology of Quantification. *European Journal of Sociology / Archives Européennes de Sociologie / Europäisches Archiv für Soziologie*, *49*(3), 401-436.

Estevez, D. (2015). *Conception non formelle en architecture : Expériences d'apprentissage et pratiques de conception*. Paris: l'Harmattan.

Filah, M. E. M., & Amrous, F. (2021). Castellum Tidditanorum Tiddis, Quintus Lollius Urbicus et son mausolée. *Revue d'études archéologiques*, *19*(1), 434-456.

Fuchs, A. (2006). *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique* (Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I). Université Henri Poincaré - Nancy I, France.

Gaillard, J. C., & Mercer, J. (2013). From knowledge to action : Bridging gaps in disaster risk reduction. *Progress in Human Geography*, *37*(1), 93-114. https://doi.org/10.1177/0309132512446717

Gibson, W. (1984). *Neuromancer*. New York: Ace.

Ginouvès, R. (1985). *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor* (Vol. 1). Rome: École française d'Athènes ; École française de Rome.

Ginouvès, R. (1992). *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome II. Eléments constructifs : Supports, couvertures, aménagements intérieurs* (Vol. 2). Rome: École française d'Athènes ; École française de Rome.

Ginouvès, R. (1998). *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine.Tome III. Espaces architecturaux, bâtiments et ensembles* (Vol. 3). Rome: École française d'Athènes ; École française de Rome.

Giuliani, C. F. (2018a). *CD-Giuliani*.

Giuliani, C. F. (2018b). *L'edilizia nell'antichità. Nuova ediz.* (2e éd.). Carocci.

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures*. Présenté à Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, Hawaii. Honolulu, Hawaii: American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.2012-1818

Golvin, J.-C. (2003). La restitution de l'image des villes antiques : Le problème de la représentation des parties non visibles. *Virtual Retrospect 2003*, *1*, 39-43. Biarritz, France: Ausonius.

Golvin, J.-C. (2005). *Cours de Tunis « L'image de restitution et la restitution de l'image »* (Vol. 1-2). Tunis.

Golvin, J.-C. (2025). *Vue en écorché des thermes d'Antonins de Carthago (Carthage), au IIIe siècle* [Papier vélin fort grammage]. (Carthago (Carthage)).

Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., … Bengio, Y. (2014). Generative Adversarial Networks. *Proceedings of the 27th international Conference on Neural Information Processing Systems*, *2*, 2672-2680. https://doi.org/10.48550/ARXIV.1406.2661

Gray, J., Chaudhuri, S., Bosworth, A., Layman, A., Reichart, D., Venkatrao, M., … Pirahesh, H. (1997). Data Cube : A Relational Aggregation Operator Generalizing Group-By, Cross-Tab, and Sub-Totals. *Data Mining and Knowledge Discovery*, *1*(1), 29-53. https://doi.org/10.1023/A:1009726021843

Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin : Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Éds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (p. 85-113). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

Gros, P. (Éd.). (2001). *L' architecture romaine. 2 : Maisons, palais, villas et tombeaux* (A. et J Picard, Vol. 2). Paris: Picard.

Gros, P. (2011). *L'architecture romaine : Du début du IIIe siècle av. J.-C. à la fin du Haut-Empire* (Troisième édition). Paris: Picard.

Gsell, S. (1901). *Les monuments antiques de l'Algérie* (Vol. 1–2). Paris: Fontemoing.

Han, J., & Kamber, M. (2012). *Data mining : Concepts and techniques* (3e éd.). Burlington, MA: Elsevier.

Harinarayan, V., Rajaraman, A., & Ullman, J. D. (1996). Implementing data cubes efficiently. *ACM SIGMOD Record*, *25*(2), 205-216. https://doi.org/10.1145/235968.233333

Hayes-Roth, B., & Hayes-Roth, F. (1979). A Cognitive Model of Planning. *Cognitive Science*, *3*(4), 275-310. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0304_1

Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *79*(8), 2554-2558. https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554

Hovestadt, L. (2020). *Atlas of Digital Architecture : Terminology, Concepts, Methods, Tools, Examples, Phenomena* (1re éd.). Basel/Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Huang, W., & Zheng, H. (2018). Architectural Drawings Recognition and Generation through Machine Learning. *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 156-165. Mexico City, Mexico. https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2018.156

Jacques de Vaucanson. (1738). *Le mécanisme du fluteur automate : Presenté a messieurs de l'Académie royale ...* Chez J. Guerin.

Jacquot, K. (2014). *Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV*.

Jones, P. V., & Sidwell, K. C. (Éds.). (1997). *The world of Rome : An introduction to Roman culture*. Cambridge ; New York, NY: Cambridge University Press.

Jouffroy, H. (1986). *La construction publique en Italie et dans l'Afrique romaine* (Le Centre National de la Recherche Scientifique et l'Université des Sciences Humaines de Strasbourg, Vol. 2). Strasbourg: AECR.

Kahn, L. I. (1955). Order and Form. *Perspecta*, *3*, 46-63. https://doi.org/10.2307/1566835

Khabazi, M. (2009). *Algorithmic Modelling with Grasshoper (Rhino Plug-in)*. digital.

Koestler, A. (1968). *Le cheval dans la locomotive : Le paradoxe humain* (Calmann-Levy; G. Fradier, Trad.). France.

Kohavi, R., & Provost, F. (1998). Glossary of Terms. *Machine Learning*, *30*(2/3), 271-274. https://doi.org/10.1023/A:1017181826899

Kolarevic, B., & Duarte, J. P. (2018). *Mass Customization and Design Democratization* (1re éd.; B. Kolarevic & J. P. Duarte, Éds.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351117869

Krencker, D., & Krüger, E. (1929). *Die trierer Kaiserthermen.. 1, Ausgrabungsbericht und grundsätzliche Untersuchungen römischer Thermen*. Augsburg: Filser.

Kretzschmer, F., Breuer, J., & Ulrix, F. (1966). *La technique romaine : Documents graphiques*. La Renaissance du Livre.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing : A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 1016-1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *25*. Curran Associates, Inc.

Lancel, S., Picard, G.-Ch., Duval, N., & E.B. (1993). Carthage. *Encyclopédie berbère*, (12), 1780-1811. https://doi.org/10.4000/encyclopedieberbere.2070

Laney, D. (2001). 3D Data Management : Controlling Data Volume, Velocity, and Variety. *META Group*.

Laporte, J.-P. (1988). *Tiklat : Les Thermes de Tubusuctu*. 109-130.

Lavenu, M., & Mataouchek, V. (1999). *Dictionnaire d'architecture* (Jean-Paul Gisserot).

Le Corbusier. (1923). *Vers une architecture*. Paris: Crès.

Le Deuff, O. (2014). *La documentation dans le numérique*. Villeurbanne: Presses de l'enssib. https://doi.org/10.4000/books.pressesenssib.2373

Le Moigne, J.-L. (1977). *La théorie du système général : Théorie de la modélisation*. Paris: Puf.

Le Moigne, J.-L. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Paris: Dunod.

LeCun, Y. (2019). *Quand la machine apprend : La révolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond*. Paris: Odile Jacob.

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, *521*(7553), 436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Léglise, F. (2020). *La conception par bricolage comme art de la situation : Architecture, urbanisme, design* (Phdthesis, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II). Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, Toulouse.

Lemberger, P., Batty, M., Morel, M., & Raffaëlli, J.-L. (2015). *Big Data et Machine Learning. Les concepts et les outils de la data science* (1re éd.). S.l.: Dunod.

Lézine, A. (1968). *Carthage-Utique. Études d'architecture et d'urbanisme*. Persée http://www.persee.fr.

Lichiheb, H. (2011). *Reconstruction virtuelle et cognitive des thermes impériaux romains de Caracalla à Dougga* (Mastère de recherche en architecture). École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), Tunis.

Lichiheb, H., Bouaita, K., & Dhouib, M. (2012). *Modélisation architecturologique des thermes impériaux romains de Tunisie*. (13), 141-152.

Lucan, J. (2009). *Composition, non-composition : Architecture et théories, XIXe-XXe siècles*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Lugli, G. (1957). *La tecnica edilizia romana* (Giovanni Bardi). Tavole: Eredi Dott. G. Bardi.

Luhmann, N. (1984). *Soziale Systeme : Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Suhrkamp: Frankfurt am Main.

Lutz, M. (2017). *Learning Python* (Fifth edition). Beijing Boston Farnham Sebastopol Tokyo: O'Reilly.

Lynn, G. (1993). Architectural curvilinearity : The folded, the pliant and the supple. *Architectural Design*, *63*(3/4), 24-31.

Lynn, G. (1999). *Animate form*. New York: Princeton Architectural Press.

Lynn, G., & Folds, B. (1995). Blobs. *Journal of philosophy and the visual arts*, *6*, 39-44.

Ma, X., Cheng, H., & Ye, L. (2023). SemDM : Task-oriented masking strategy for self-supervised visual learning. *Displays*, *79*, 102439. https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102439

Machine Learning | Google for Developers. (2025).

Madni, A., Madni, C., & Lucero, S. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, *7*(1), 7. https://doi.org/10.3390/systems7010007

Malfroy, S. (1986). *Introduction à la terminologie / Eine Einführung in die Terminologie. L'approche morphologique de la ville et du territoire = Die morphologische Betrachtungsweise von Stadt und Territorium*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule (ETH-Z), Lehrstuhl fûr Stâdtebaugeschichte.

Manzini, E., & Cullars, J. (1992). Prometheus of the Everyday : The Ecology of the Artificial and the Designer's Responsibility. *Design Issues*, *9*(1), 5. https://doi.org/10.2307/1511595

Margueron, J.-C., & Gransard-Desmond, J.-O. (2012). From plan to volume : The need for archaeological analysis in 3D modeling. *Archeologia e Calcolatori*, *3*, 397-410.

Marsault, X. (2012). Reconnaissance automatique de réseaux viaires urbains plausibles via un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis. *Ingénierie des systèmes d'information*, *17*(1). https://doi.org/10.3166/isi.17.1.103-126

Marsault, X., & Nguyen, H. M.-C. (2022). Les GANs : Stimulateurs de créativité en phase d'idéation. *SHS Web of Conferences*, *147*(2). https://doi.org/10.1051/shsconf/202214706003

Marta, R. (1986). *Tecnica costruttiva romana = Roman building techniques* (2e éd.). Roma: Kappa.

Marta, R. (1990). *Architettura romana : Tecniche costruttive e forme architettoniche del mondo romano = Roman architecture* (2e éd.). Roma: Kappa.

Martin, T. H. (1854). *Recherches sur la vie et les ouvrages d'Héron d'Alexandrie : Disciple de Ctésibius, et sur tous les ouvrages mathématiques grecs, conservés ou perdus, publiés ou inédits, qui ont été attribués à un auteur nommé Héron*. Imprimerie impérial.

McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (2006). A Proposal for the Darmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence. *AI Magazine*, *27*(4), 12. https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904

McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, *5*(4), 115-133. https://doi.org/10.1007/BF02478259

Migayrou, F. (2003). *Architectures non standard*. Paris : Centre Pompidou.

Mitchell, T. M. (2013). *Machine learning* (Nachdr.). New York: McGraw-Hill.

Moneo, R. (1978). On typology. *The MIT Press*, (13), 23-45.

Müller, A. C., & Guido, S. (2016). *Introduction to machine learning with Python : A guide for data scientists* (First edition). Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.

Muratori, S. (1959). *Studi per una operante storia di Venezia* (Vol. 3). Palladio.

Nadeau, R. (1999). *Vocabulaire technique et analytique de l'épistémologie* (1. éd). Paris: Presses Univ. de France.

Naifer, Z., Abidi, Z., & Claeys, D. (2023). Repenser la rétroconception patrimoniale de la numérisation à la modélisation : Niveaux cognitifs, cube de données et jumeau numérique. In M. Dhouib (Éd.), *Villes et territoires intelligents concepts, enjeux et stratégies d'actions* (p. 49-66). Tunis: Nirvana.

Naifer, Z., Bouaita, K., & Dhouib, M. (2025). *La théorie d'analyse structurale de H.A. Simon et la méthode de rétroconception spatio-cognitive*. Présenté à Séminaire ER-ASC, Palais Ennejma Ezzahra. Palais Ennejma Ezzahra.

Naifer, Z., Claeys, D., Bouaita, K., & Roobaert, L. (2024). Cadre méthodologique pour la rétroconception paramétrique assistée par intelligence artificielle : Cas des thermes impériaux romains en Afrique du Nord. *SHS Web of Conferences*, *203*(02004). https://doi.org/10.1051/shsconf/202420302004

Newell, A., & Simon, H. (1956). The logic theory machine—A complex information processing system. *IEEE Transactions on Information Theory*, *2*(3), 61-79. https://doi.org/10.1109/TIT.1956.1056797

Novak, M. (1991). Liquid architectures in cyberspace. In *Cyberspace : First steps* (p. 225-254). Cambridge, MA, USA: MIT Press.

O'Donnell, J. J. (2009). *The Ruin of the Roman Empire : A New History* (1st ed). Erscheinungsort nicht ermittelbar: HarperCollins Publishers.

Oladipupo, T. (2010). Types of Machine Learning Algorithms. In Y. Zhang (Éd.), *New Advances in Machine Learning*. InTech. https://doi.org/10.5772/9385

O'Reilly, T. (2005). What Is Web 2.0 Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software.

O'Reilly, T., & Battelle, J. (2009). *Web Squared : Web 2.0 Five Years On*.

Oxman, R., & Oxman, R. (Éds.). (2014). *Theories of the Digital in Architecture*. London New York, NY: Routledge, Taylor & Francis Group.

Palladio, A. (1570). *I quattro libri dell'architettura*. Venice : Domenico.De Franceschi.

Palladio, A. (1730). *Fabbriche antiche disegnate da Andrea Palladio Vicentino e date in luce du Riccardo Conte di Burlington.* Londres.

Palladio, A. (1785). *Le terme dei romani disegnate da Andrea Palladio e ripubblicate con la giunta di alcune osservazioni da Ottavio Bertotti Scamozzi; giusta l'esemplare del lord Co. Di Burlingthon impresso in Londra l'anno 1732*. Vicenza: Francesco Modena.

Palladio, A. (1797). *Les Thermes des Romains dessinées par ANDRE PALLADIO et publiées de nouveau avec quelques observations par Octave Bertotti Scamozzi, d'après l'exemplaire du Lord Comte de Burlingthon* (Jean Rossi à Vicence).

Paquet, P. (2006). *De l'information à la connaissance*.

Pask, G. (1969). The Architectural Relevance of Cybernetics. *Architectural Design*, *37*(6), 494–496.

Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems : Networks of plausible inference* (Rev. 2. ed., transferred to digital printing). San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann.

Pérouse de Montclos, J. M. (1972). *Inventaire général des monuments et richesses artistiques de la France, principes d'analyse scientifique, Architecture*. Paris.

Petit, P. (1974a). *Histoire générale de l'Empire romain. 1 : Le Haut-Empire (27 avant J.-C. -161 après J.-C.)* (Vol. 1). Paris: Éd. du Seuil.

Petit, P. (1974b). *Histoire générale de l'Empire romain. 2 : La crise de l'Empire: (161 - 284)* (Vol. 2). Paris: Éd. du Seuil.

Petit, P. (1974c). *Histoire générale de l'Empire romain. 3 : Le Bas-Empire: (284 - 395)* (Vol. 3). Paris: Éd. du Seuil.

Picard, G. (1974). Les fouilles de Mactar (Tunisie) 1970-1973. *Comptes-rendus des séances de l année - Académie des inscriptions et belles-lettres*, *118*(1), 9-33. https://doi.org/10.3406/crai.1974.12951

Picon, A. (2010). *Digital culture in architecture : An Introduction for the Design Professions*. Basel: Birkhäuser.

Platon. (1992) [VI^{e} siècle av. J.-C.]). *Timée* (2^{e} éd.; L. Brisson, Trad.). Paris: GF Flammarion.

Pline, L. (1986). *Histoire naturelle. Livre XXXV* (Belles Lettres).

Poinssot, P. (1983). *Les ruines de Dougga* (ministere des affaires culturelles; institut national d'archeologe et d'arts). tunis: Préface de Hassen Hosni Abdul Wahab.

Polybe. (1729). *Histoire de Polybe. Tome 2 / nouvellement traduite du grec* (aux dépens de la Compagnie Amsterdam).

Pradelle, J. (2018). *Maitriser Grasshopper 3D pas à pas*. form 2lab.

Priani, E. (2025). Ramon Llull. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Éds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2025). Metaphysics Research Lab, Stanford University.

Quatremère de Quincy, A. C. (1832). *Dictionnaire historique d'architecture : Comprenant dans son plan les notions historiques, descriptives, archaeologiques, biographiques, théoriques, didactiques et pratiques de cet art*. Paris: Adrien Le Clere.

Ramesh, A., Dhariwal, P., Nichol, A., Chu, C., & Chen, M. (2022). *Hierarchical Text-Conditional Image Generation with CLIP Latents*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.06125

Ramón Lull. (1596). *M. Raymundi Lullii ... Ars magna, generalis et vltima quarumcunque artium et scientiarum ipsius Raymundi Lulli assecutrix & clauigera ... Accessit demum index elegans & locuples, sententias electiores complectens*. typis Ioan. Saurii, impensis Cornelii Sutorii.

Ramondenc, M., & Marin, P. (2020). Archéologie du futur. Une rétro-modélisation de l'architecture expérimentale de Pascal Häusermann, Claude Costy et Jean-Louis Chanéac. *SHS Web of Conférences*, *82*(04005). https://doi.org/10.1051/shsconf/20208204005

Razavi-Far, R., Ruiz-Garcia, A., Palade, V., & Schmidhuber, J. (Éds.). (2022). *Generative Adversarial Learning : Architectures and Applications*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91390-8

Rebuffat, R. (1991). *Vocabulaire thermal. Documents sur le bain romain*. Consulté à l'adresse https://www.persee.fr/doc/efr_0000-0000_1991_act_142_1_11482

Reilly, P. (1990). Towards a virtual archaeology. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 133-139. Scopus.

Rénier, A. (1989). Le langage de l'urbain, statut sémiotique et modélisation systémique. In B. Paulré (Éd.), *Perspectives systémiques* (L'interdisciplinaire, p. 262-277). Paris.

Rippinger, J. (2018). Jean-Nicolas-Louis Durand's Clockwork : Computational Magnification of a 19th Century Procedural Design Mechanism. In S. Uddin, S.-Y. Yoon, L. Kim, & C. Welty (Éds.), *Virtual + Actual : Process and Product of Design, 2018 Design Communication Conference, 7-10 October 2018, Cornell University* (p. 556-563). Ithaca, NY: Design Communication Association.

Roobaert, L. (2024). *AI and architectural design. Hybridization of natural and artificial cognitions*. UCLouvain, Tournai.

Roobaert, L., & Claeys, D. (2022). Trois modalités conversationnelles en conception architecturale : Apports de la théorie de la conversation de Gordon S. Pask. *SHS Web of Conferences*, *147*, 04002. https://doi.org/10.1051/shsconf/202214704002

Roobaert, L., & Claeys, D. (2024a). Modèle tabulaire adaptatif de classement des outils intelligents d'aide à la conception architecturale. In P. Marin (Éd.), *BIM : données, intelligences et nature de la ville durable. Ingénierie et architecture, enseignement et recherche.* (p. 37-56). Paris: Eyrolles.

Roobaert, L., & Claeys, D. (2024b). Modèle tabulaire de classement adaptatif des outils intelligents d'aide à la conception architecturale. *SHS Web of Conferences*, *198*(02003), 18. https://doi.org/10.1051/shsconf/202419802003

Roobaert, L., Claeys, D., & Cleven, S. (2024). Espaces d'hybridation en conception architecturale : Modalités collaboratives entre cognitions naturelles et artificielles. *SHS Web of Conferences*, *203*(04002), 15. https://doi.org/10.1051/shsconf/202420304002

Rosenblatt, F. (1958). The perceptron : A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, *65*(6), 386-408. https://doi.org/10.1037/h0042519

Rosenblueth, A., Wiener, N., & Bigelow, J. (1943). Behavior, Purpose and Teleology. *Philosophy of Science*, *10*(1), 18-24. https://doi.org/10.1086/286788

Rowley, J. (2007). The wisdom hierarchy : Representations of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*, *33*(2), 163-180. https://doi.org/10.1177/0165551506070706

Royer, I., Garreau, L., & Roulet, T. (2019). La quantification des données qualitatives : Intérêts et difficultés en sciences de gestion. *Finance Contrôle Stratégie*, (NS-6 (mai)). https://doi.org/10.4000/fcs.3312

Rumelhart, E., D., Mcclelland, J., & L., J. (1986). *Parallel distributed processing : Explorations in the microstructure of cognition. Volume 1. Foundations*.

Russell, S. J., & Norvig, P. (1995). *Artificial intelligence : A modern approach*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Salkowitz, R. (2022). *Midjourney Founder David Holz On The Impact Of AI On Art, Imagination And The Creative Economy* [Forbes]. Consulté à l'adresse https://www.forbes.com/sites/robsalkowitz/2022/09/16/midjourney-founder-david-holz-on-the-impact-of-ai-on-art-imagination-and-the-creative-economy/

Samuel, A. L. (1959a). *Some Studies In Machine Learning Using the Game of Checkers*. *3*(3), 210-229.

Samuel, A. L. (1959b). Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal of Research and Development*, *3*(3), 211-229. https://doi.org/10.1147/rd.33.0210

Schön, D. A. (1983). *The Reflective Practitioner : How Professionals Think in Action*. New York, NY: Basic Books.

Schumacher, P. (2008). *Parametricism as Style—Parametricist Manifesto*. Présenté à Communication présentée au 11th Architecture Biennale, Venise. Venise.

Schumacher, P. (2009). Parametricism : A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Architectural Design*, *79*(4), 14-23. https://doi.org/10.1002/ad.912

Schumacher, P. (2016). *In Defence of Parametricism*. London, UK: Machine Books.

Sear, F. (1982). *Roman architecture* (1ere éd.). Great Britain: B. T. Batsford Ltd.

Serrano, L. G. (2021). *Grokking machine learning* (First edition). Shelter Island, NY: Manning Publications Co.

Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379-423, 623-656. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Siala, A. (2019). *Modélisation et représentation des exigences spatiales qualitatives* (Thèse de doctorat). École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy + Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU).

Simon, H. A. (1969). *The sciences of the artificial* (1er édition). Cambridge: MIT Press.

Simon, H. A. (1973). The structure of ill structured problems. *Artificial Intelligence*, *4*(3-4), 181-201. https://doi.org/10.1016/0004-3702(73)90011-8

Simon, H. A. (1991). *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel* (J.-L. Le Moigne, Trad.). Paris: Dunod.

Sloterdijk, P. (2011). *Bubbles : Spheres I*. Los Angeles, CA: Semiotext(e).

Soussi, I. (2019). *Rétroconception paramétrique des thermes impériaux de Rome* (Thèse de doctorat en architecture). École Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU), Université de Carthage (UCAR), Tunis.

Sowa, J. F. (1984). *Conceptual structures : Information processing in mind and machine*. Reading: Addison-Wesley. Consulté à l'adresse https://ils.bib.uclouvain.be/global/documents/163205

Stals, A. (2019). *Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille Perceptions et usages de la modélisation paramétrique* (Thèse de doctorat en architecture). Université de Liège, Belgique.

Tedeschi, A., & Wirz, F. (2014). *AAD - Algorithms-Aided Design : Parametric strategies using Grasshopper* (First edition). Brienza: Le Penseur publisher.

Thébert, Y. (2003). *Thermes romains d'Afrique du Nord et leur contexte méditerranéen*. Rome: Publications de l'École française de Rome.

Thomas, J. (2006). *L'imaginaire de l'homme romain : Dualité et complexité*. Bruxelles: Latomus.

Turing, Alain. M. (1936). *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*. *42*, 230-365.

Turing, Alain. M. (1950). *Computing Machinery and Intelligence*. *59*(236), 433-460.

Vérité, J. (1998). *Recherches sur la facade maritime des thermes d'antonin de Carthage*. (18).

Vérité, J. (2019). *Recherches sur la facade maritime des thermes d'antonin de Carthage*.

Viollet-le-Duc, E. E. (1866). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle* (Vol. 1–VIII). Paris: A. Morel.

Vitruve, P. (1996). *Les dix livres d'architecture de Vitruve : Corrigez et traduits nouvellement en françois, avec des notes et des figures : Seconde éd. Reveuë, corrigée, & augmentée*. Liège: Mardaga. Consulté à l'adresse https://ils.bib.uclouvain.be/global/documents/1872328

Vitruve, P. (2015). *De l'architecture [De architectura].Traduction par Pierre Gros* (P. Gros, Éd.). Paris: Les Belles Lettres.

Ward-Perkins, J. B. (1994). *Roman imperial architecture* (New impr). New Haven, Conn.: Yale Univ. Press.

Weaver, W. (1949). The Mathematics of Communication. *SCIENTIFIC AMERICAN*, *181*(1), 11-15.

Weizenbaum, J. (1966). ELIZA—a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM*, *9*(1), 36-45. https://doi.org/10.1145/365153.365168

Wheeler, M. (1964). *Roman art and architecture*. New York and Toronto: Oxford University Press.

Wiener, N. (1942). *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series : With Engineering Applications*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. https://doi.org/10.7551/mitpress/2946.001.0001

Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Cambridge MA: MIT Press.

Woodbury, R. (2010). *Elements of parametric design*. London ; New York, NY: Routledge.

Yann Le Cun, L. C. (2019). *Quand la machine apprend La revolution des neurones artificiels et de l'apprentissage profond*. Odile Jacob.

Yegül, F. (1992). *Baths and Bathing in Classical Antiquity*. New York, N.Y. : Cambridge, Mass: Architectural History Foundation ; MIT Press.

Yegül, F., & Favro, D. (2019). *Roman Architecture and Urbanism : From the Origins to Late Antiquity* (1re éd.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9780511979743

Zhuang, C., Miao, T., Liu, J., & Xiong, H. (2021). The Connotation of Digital Twin, and the Construction and Application Method of Shop-Floor Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *68*, 102075. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102075

إبن الرزّاز ,الجزري. (1181). *كتاب في معرفة الحيل الهندسية*. مخطوطة, المكتبة البريطانية: مخطوطات شرقية, 116.

TABLE DES FIGURES ET DES ILLUSTRATIONS

Fig. 1 – Histoire des outils numériques. (établie par l'auteure) xii

Fig. 2 – Canevas de méthode paramétrique et *intelligente* pour une rétroconception architecturale. (Naifer, Claeys, Bouaita, & Roobaert, 2024) xvii

Fig. 3 – Du bâti au modèle intelligent : un passage par la décomposition et la recomposition. (établie par l'auteure) xviii

Fig. 4 – Processus de reconception et deux de ses sous-processus : la rétroconception et la préconception. (Claeys & Naifer, 2022) 28

Fig. 5 – Giovanni Battista Piranesi, « Veduta di Campo Vaccino (Forum Romanum) », série des *Vues de Rome*, 1757. 29

Fig. 6 – Jean-Nicolas-Louis Durand, « Compositions horizontales de colonnes, de pilastres, de murs, de portes et de croisées », *Précis des leçons d'architecture données à l'École polytechnique*, 2e partie, planche 1, 1802. 30

Fig. 7 – Gianfranco Caniggia & Gian Luigi Maffei, « Analyse comparée des principales mutations diachroniques conduisant du type de base monocellulaire à l'immeuble d'appartements urbains en passant par la maison mitoyenne médiévale monofamiliale », *Composizione architettonica e tipologia edilizia*, 1979. 33

Fig. 8 – Un algorithme graphique pour créer un banc et trois occurrences générées sous la forme de modèles 3D. Développé avec Rhino7/Grasshopper dans le cadre du module « Modélisation & conception numérique », LOCI, UCLouvain, 2021 (enseignants : Damien Claeys, Sheldon Cleven, Jesus Manuel Perez Perez, Louis Roobaert). (Claeys & Naifer, 2022) 36

Fig. 9 – Succession de reconceptions du modèle mental d'un projet d'architecture, entre rétroconceptions des données mémorisées, analyse des données perceptives et établissement de préconceptions pour déclencher des actions. (Claeys & Naifer, 2022) 39

Fig. 10 – Le cube. (Corbin, 1980, p. 219) 43

Fig. 11 – Correspondance du plan de la Ka'ba avec le plan des Réalités-archétypes. (Corbin, 1980, p. 229) 44

Fig. 12 – Le *nycthémère* de la cosmogonie. (Corbin, 1980, p. 228) 44

Fig. 13 – La dialogique Configuration/Conformation. (Dhouib, 2014; Bouaita, 2015, p. 124; Dhouib, 2022) 45

Fig. 14 – La dialogie de conversion. (Bouaita, 2015, p. 122; Dhouib, 2014, 2022) 46

Fig. 15 – Le modèle topologique et cognitif. Adaptation selon la thèse de Karim Bouaita (2015, p. 160) 47

Fig. 16 – Les outils du paradigme structural et leurs champs d'action (Bouaita, 2015, p. 172) 49

Fig. 17 – Qualification de l'interaction entre A et B selon la quantité de baie. Par l'équivalence : quantité d'échange = quantité de baie. (Bouaita, 2015, p. 172) 49

Fig. 18 – La matrice d'incidence appliquée aux thermes de Carthage. (Bouaita, 2015, p. 189-190) 50

Fig. 19 – Le niveau géométrique d'ordonnancement. (Bouaita, 2015, p. 175) 52

Fig. 20 – Le postulat épistémologique. (Dhouib, 2004, p. 47) 53

Fig. 21 – Taxinomie des édifices romains selon leur programme. (Bouaita, 2015, p. 167) 54

Fig. 22 – Taxinomie selon les provinces romaines. (Bouaita, 2015, p. 167) 54

Fig. 23 – Le postulat du lieu architectural. (Dhouib, 2004, p. 82) 55

Fig. 24 – Le dispositif du solide d'englobement (DSE) et le milieu fluide habitable (MFH). Adaptée et actualisée d'après la thèse de Karim Bouaita (2015, p. 170) 56

Fig. 25 – L'objet à travers les trois paradigmes du modèle topologique cognitif. Une transposition du travail réalisé par Mounir Dhouib (2004, 2014, 2022). L'image représentée par l'auteure d'après la visualisation (appelée restitution) réalisée par Jean-Claude Golvin (Golvin, 2025). (établie par l'auteure) 60

Fig. 26 – Schéma récapitulatif du modèle topologique cognitif à travers les postulats, les paradigmes et les outils. Une transposition du travail réalisé par Mounir Dhouib (2004, 2014, 2022). (établie par l'auteure) 61

Fig. 27 – La discipline de l'intelligence artificielle et ses grandes sous-parties. (Roobaert, 2024) 69

Fig. 28 – Emboitement des AI, ML, DL. (Serrano, 2021, p. 4) 70

Fig. 29 – Répartition chronologique de thermes d'Afrique du Nord, en pourcentage de la totalité des exemples datés. Adaptation selon Hélène Jouffroy (1986, p. 404) 76

Fig. 30 – Répartition chronologique de thermes en Italie, en pourcentage de la totalité des exemples datés. Adaptation selon Hélène Jouffroy (1986, p. 327) 76

Fig. 31 – Baalbek, vue du Temple de Jupiter, premier siècle après J.-C., avec le Temple de Bacchus, deuxième siècle après J.-C., au premier plan. (By courtesy of Fototeca Unione, Rome). (Sear, 1982, p. 401) 78

Fig. 32 – Carte géologique de la région d'Uthina : gisements de calcaire, de grès, d'argile et de marne (d'après S. Cara, G. Carcangiu et M. Tamanini, 2002, Fig. 1, p. 92). (Ben Slimene, 2017, p. 101) 81

Fig. 33 – Fente d'un bloc à l'aide de coins. Restitution JPA. (Adam, 2017, p. 33) 83

Fig. 34 – Scène de chantier. Peinture du *caldarium* de la villa de San Marco à Stabies Museo archeologico di Castellamare, n° 282. JPA et P.Varène. (Adam, 1984, p. 46) 84

Fig. 35 – Les méthodes de levage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure) 84

Fig. 36 – Caractéristiques des tenons. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure) 86

Fig. 37 – Accrochage des griffes. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure) 86

Fig. 38 – Les faces de la pierre d'après les romains. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 53). (établie par l'auteure) 87

Fig. 39 – Types de dégraissant. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure) 91

Fig. 40 – Processus de fabrication de brique crue. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure) 92

Fig. 41 – Processus de fabrication de la chaux. Interprétation d'après Giuliani Cairoli Fulvio (Giuliani, 2018b, p. 209-214) et Jean-Pierre Adam (1984, p. 69). (établie par l'auteure) 93

Fig. 42 – Construction d'un mur. Récapitulatif des installations du chantier : 1. tranchée de fondation ; 2. préparation du mortier ; 3. échafaudage encastré à perches ; 4. échafaudage encastré en bascule. JPA. (Adam, 1984, p. 90) 97

Fig. 43 – Différents types de maçonnerie. Interprétation d'après Roberto Marta (1990) et Jean-Pierre Adam (1984). (établie par l'auteure) 97

Fig. 44 – Différentes façons d'assemblage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984) et Roberto Marta (1990). (établie par l'auteure) 98

Fig. 45 – Mur à superposition de techniques. a : grand appareil ; b : petit appareil ; c : liaisonnement entre mur de fond et mur de refend (Corinthe, Agora). (Ginouvès, 1992, p. 364 [PL. 13]) 98

Fig. 46 – *Opus quadratum* « quadrangulaire ». a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : Schémas des principaux aspects du grand appareils quadrangulaire romain : A : alternance d'assises de carreaux et d'assises de boutisses : (1) avec assises de parpaings en boutisses et assises de carreaux. (2) avec assises mixtes de carreaux et boutisses juxtaposés dans l'épaisseur. B : assises alternant carreaux et boutisses. (1) mur à deux parements sans remplissage. (2) parement d'un mur à massif de maçonnerie. C : mur isodome en parpaings. D : mur pseudo-isodome avec décrochement. JPA (Adam, 1984, p. 118) ; c : disposition des pierres pour *opus quadratum* (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8). 100

Fig. 47 – *Opus siliceum* (*polygonale*). a : vue en axonométrie de l'appareil (Giuliani, 2018b, p. 227) ; b : coupe sur le type d'appareil (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8) ; c : photo prise d'un mur de terrasse au sanctuaire de la Fortune à Palestrina (Adam, 2017, p. 113). 101

Fig. 48 – *Opus cyclopéen*. a : vue en axonométrie de l'appareil (http://francoib.chez-alice.fr/vocahist/apparei2.htm) ; b : appareil cyclopéen (Mycènes) (Ginouvès, 1985, p. 335 [PL. 22]). 101

Fig. 49 – *Opus incertum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : vue en axonométrie (Sear, 1982, p. 125-126). 103

Fig. 50 – *Opus* quasi-*reticulateum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : photo prise de l'Odéon de Pompéi (Adam, 2017, p. 143). 103

Fig. 51 – *Opus reticulatum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : vue en axonométrie (Sear, 1982, p. 125-126). 104

Fig. 52 – *Opus vittatum* (*listatus*). a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : coupe sur le type d'appareil (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8). 104

Fig. 53 – *Opus spicatum* . a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : disposition des briques pour l'opus spicatum (Giuliani, 2018b, p. 206) ; c : photo prise de porte murée de la maison des Antes à Glanum (Adam, 2017, p. 156). 105

Fig. 54 – Opus en damier (*scacchiera*) à Velia de III^e^ siècle. (Adam, 1988, p. 129) 105

Fig. 55 – *Opus latericium*. a : mur de rempart (Eleusis) ; b : mur de rempart (Ei Khanoum). (Ginouvès, 1985, p. 337 [PL. 24]) 106

Fig. 56 – *Opus testaceum.* a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : vue en axonométrie (Sear, 1982, p. 125-126). 107

Fig. 57 – *Opus mixtum incertum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : Alba Fucens, Via dei Pilastri (Giuliani, 2018a) ; c : coupe sur le type d'appareil (Lavenu & Mataouchek, 1999, p. 8). 108

Fig. 58 – *Opus* craticium (*le pan de bois*, *graticio*). a : Herculanum, construite entre 62 et 79 au collège des Augustales. Le remplissage est en *opus incertum,* l'ensemble était enduit (Adam, 1988, p. 133) ; b : vue en axonométrie de construction dans une ville rurale (Gros, 2001, p. 198). 108

Fig. 59 – *Opus mixtum vittatum*. a : vue de face des parements (*cours : EL ARTE ROMANO ARQUITECTURA Y CIUDAD ESCULTURA: EL RETRATO REALISTA Y EL RELIEVE HISTÓRICO*, 2011, p. 8) ; b : mur à Roma, Villa dei Quintili (Giuliani, 2018a). 109

Fig. 60 – *Opus africanum*. a : vue de face des parements (Adam, 1988, p. 131) ; b : vue en axonométrie de l'*opus africanum* à Dougga (Ginouvès, 1985, p. 339 [PL. 26]). 109

Fig. 61 – Une décomposition sommaire du lieu architectural, en relation avec l'aspect constructif, selon la matrice d'incidence développée par Mounir Dhouib (2004). (établie par l'auteure) 110

Fig. 62 – Hiérarchisation des éléments constructifs par rapport au dispositif du solide d'englobement (DSE). (établie par l'auteure) 111

Fig. 63 – Deux catégories d'itinéraire des baigneurs. (Thébert, 2003, p. 119) 115

Fig. 64 – Schéma récapitulatif des différents types de plans ainsi que de différents itinéraires. (Thébert, 2003, p. 120) 115

Fig. 65 – Légende des espaces dans les plans présentant la typologie. Adapté selon Krencker (1929) 116

Fig. 66 – Typologie linéaire (*Reihentyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 177) 116

Fig. 67 – Typologie orthogonale (*Doppelanlagen*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 178) 116

Fig. 68 – Typologie circulaire (*Ringtyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 178) 117

Fig. 69 – Typologie des thermes de type impérial (de grande dimension) (*Der grosse kaisertyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 181) 117

Fig. 70 – Typologie des thermes de type impérial (de petite dimension) (*Des klein kaisertyp*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 179-180) 118

Fig. 71 – Typologie des thermes semi-symétriques (*Halbachsiale Mischtypen*). (Krencker & Krüger, 1929, p. 181) 119

Fig. 72 – Plan des thermes de Cluny, Paris ; rendu par Fikret Yegül. (Yegül & Favro, 2019, p. 472) 121

Fig. 73 – Pl. CLII - Province d'Asie : thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Les fonds de plan sont empruntés à Krencker, Trierer Kaiserthermen, à Nielsen, Thermae, ou à Yegül, Baths and bathing. Étant donné l'état des connaissances, la lecture des bâtiments que nous proposons reste souvent hypothétique. 1 - Aizanoi (d'après Nielsen, fig. 219). En restituant trois et non deux salles précédant IV, nous suivons Nielsen et non Yegül (fig. 361), mais suggérons que la première salle devait également être chauffée. V apparaît trop vaste : on manque d'arguments pour l'identifier, comme le voudrait Nielsen, au frigidarium. 2 - Alexandria Troas (d'après Yegül, fig. 355, qui propose trois salles chauffées avant IV et une liaison IV-V-F). 3 - Aphrodisias (d'après Yegül, fig. 343, dont la

lecture semble meilleure que Nielsen, fig. 220). 4 - Éphèse, thermes du port (d'après Yegül, fig. 336, dont la lecture semble meilleure que Nielsen, fig. 223). (Thébert, 2003, p. 702) 123

Fig. 74 – Pl. CLIII - Province d'Asie : thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. 1 - Éphèse, thermes Est (d'après Yegül, fig. 351, que nous suivons pour la restitution des salles chauffées précédant IV et celle de V se composant d'un élément axial commandant une partie dédoublée, lecture qui paraît meilleure que Nielsen, fig. 227). 2 - Éphèse, thermes de Vedius (d'après Yegül, fig. 359). 3 - Éphèse, thermes du théâtre (d'après Yegül, fig. 353). 4 - Hiérapolis (d'après Krencker, fig. 428). 5 - Magnésie du Méandre (d'après Yegul, fig. 346). 6 - Sardes (d'après Yegül, fig. 360). (Thébert, 2003, p. 703) 124

Fig. 75 – Choix du thème de l'objet d'étude selon le postulat épistémologique. (établie par l'auteur) 125

Fig. 76 – Choix du système architectural complexe selon le postulat du système architectural global. Modèle historique en rosace. (Bouaita, 2015, p. 165) 125

Fig. 77 – Taxonomie des édifices romains selon leur programme. (redessiné d'après les travaux de Karim Bouaita (2015)) 126

Fig. 78 – Taxonomie selon les provinces romaines. (redessiné d'après les travaux de Karim Bouaita (2015)) 126

Fig. 79 – Le postulat du lieu architectural : hypothèse du VVEC comme tiers inclus. Adapté et reproduit selon Dhouib (2004, p. 82). (établi par l'auteure) 127

Fig. 80 – Processus du choix de l'objet d'étude à travers les postulats. Par transposition de l'étude des postulats par Mounir Dhouib (2004). (établie par l'auteure) 127

Fig. 81 – Corpus d'étude : les thermes impériaux romains. (établie par l'auteure) 130

Fig. 82 – Plan des thermes de Dioclétien à Rome montrant le corps central entouré par les espaces annexes (C : Caldarium ; F : Frigidarium ; PAL : Palestre ; T : Tepidarium). (Ward-Perkins, 1994, p. 419) 131

Fig. 83 – Liste des espaces du corps central d'un édifice thermal. (établie par l'auteure) 132

Fig. 84 – Canevas de fiche d'enregistrement des plans des thermes impériaux romains. (établie par l'auteure) 133

Fig. 85 – Thermes de type impérial en Afrique du Nord. (Thébert, 2003, p. 696). 1 - El Knissa. 2 - Karthago. 3 – Mactaris. 4 – Sicca Veneria. 5 – Thelepte. 6 et 7 – Thugga. 8 – Uthina. 9 – Utica. 10 – Caesarea. 11 et 12 – Cuicul. 13 – Hippo Regius. 14 et 15 – Lambaesis. 16 – Tubusuptu. 17 – Tamugadi. 18 – Bulla Regia. 19 – Membressa. 20 – Calama. 21 ? – Tid 134

Fig. 86 – Inventaire des thermes impériaux romains en Tunisie. (établie par l'auteure) 135

Fig. 87 – Inventaire des thermes impériaux romains en Algérie. (établie par l'auteure) 138

Fig. 88 – Inventaire des thermes impériaux romains en Libye. (établie par l'auteure) 141

Fig. 89 – Thermes de type impérial dans l'empire romain. (Thébert, 2003, p. 698) 143

Fig. 90 – Inventaire des thermes impériaux romains à Rome. (établie par l'auteure) 144

Fig. 91 – Catalogue des thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome. (établie par l'auteure) 146

Fig. 92 – Le dynamisme des niveaux cognitifs. (Naifer et al., 2023) 151

Fig. 93 – Processus de gestion des données pour *rétroconcevoir* un objet patrimonial. Adaptation d'après les travaux de Zaineb Naifer, Zayneb Abidi et Damien Claeys (2023) 152

Fig. 94 – Les outils d'acquisition de données patrimoniales et leurs classifications. (Naifer et al., 2023) 155

Fig. 95 – La nature des données collectées par les outils d'acquisition de données. (Naifer et al., 2023) 156

Fig. 96 – Une représentation schématique du cube de données (*data cube* DC). (Naifer et al., 2023) ... 157

Fig. 97 – Agencement possible des dimensions proposées. (Naifer et al., 2023) 158

Fig. 98 – L'évolution du *Digital Twin* traduit. (Zhuang, Miao, Liu, & Xiong, 2021) 159

Fig. 99 – Le paradigme du *Digital Twin*. (Naifer et al., 2023) 160

Fig. 100 – Les modèles du jumeau numérique. (Naifer et al., 2023) 161

Fig. 101 – Choix d'outils dans un processus de rétroconception pour une complétion du plan d'un objet réel incomplet. (établie par l'auteure) 164

Fig. 102 – Types de logiciels de modélisation paramétrique, (Stals, Jancart, & Elsen, 2018) sur base des travaux de Janssen et de ses collègues (2016). 1-4 : types de modélisation ; a-d : processus. (Stals, 2019, p. 79) 165

Fig. 103 – Exemple de script codé sur Visual Studio Code pour l'organisation des espaces. (établie par l'auteure) 166

Fig. 104 – Présentation générale de l'interface Grasshopper. (établie par l'auteure) 167

Fig. 105 – Exemple de visualisation des résultats sur Rhinoceros 3D. (établie par l'auteure) 168

Fig. 106 – Programmation conventionnelle *versus* programmation visuelle : un exemple d'algorithme pour organiser des espaces. a : script travaillé via GHPython sur Grasshopper ; b : visualisation sur Rhinoceros3D ; c : script travaillé avec des composants sur Grasshopper. (établie par l'auteure) 169

Fig. 107 – Compréhension d'un objet à travers les mouvements de décomposition/recomposition. (établie par l'auteure) 175

Fig. 108 – Repérage des thermes d'Antonin, à Carthage (Thébert, 2003) 177

Fig. 109 – Photo panoramique, prise par l'auteure, du site des thermes d'Antonin à Carthage. 177

Fig. 110 – Plan originel des thermes d'Antonin à Carthage. (redessiné par l'auteure) 178

Fig. 111 – Dessin des formes simples des murs. (établie par l'auteure) 179

Fig. 112 – Zoom sur une partie du plan pour montrer la jonction des murs. (établie par l'auteure) 179

Fig. 113 – Deux différentes réflexions de jonction des murs. (établie par l'auteure) 179

Fig. 114 – Dessin des entre-axes des murs des thermes d'Antonin à Carthage. (établie par l'auteure) 179

Fig. 115 – Ajout des formes supplémentaires. (établie par l'auteure) 180

Fig. 116 – Tailler les murs pour dessiner les ouvertures et les niches. (établie par l'auteure) 180

Fig. 117 – Pochage des vides des composants élémentaires : sous des formes simples. (établie par l'auteure) 181

Fig. 118 – Ajout des ouvertures et les niches aux vides pochés. (établie par l'auteure) 181

Fig. 119 – Génération du plein à partir du vide. (établie par l'auteure) 181

Fig. 120 – Essai de décomposition manuelle des thermes de Trajan. (établie par l'auteure) 183

Fig. 121 – Fiche comparative des thermes d'Antonin à Carthage T2. (établie par l'auteure)..... 191

Fig. 122 – Légende des espaces architecturaux pour les fiches comparatives des plans des thermes impériaux romains en Afrique du Nord. (établie par l'auteure) 192

Fig. 123 – Histogramme présentant une comparaison des thermes impériaux romains, d'Afrique du Nord, selon l'indice de similitude au modèle *canonique*. (établie par l'auteure) 194

Fig. 124 – Les composants élémentaires minimaux des thermes impériaux romains à Rome et en Tunisie. (établie par l'auteure) 196

Fig. 125 – Histogramme présentant une comparaison des thermes impériaux romains selon l'indice de *complétude*. (établie par l'auteure) 200

Fig. 126 – Schémas d'interprétation des résultats de deux indices de similitude et de complétude sous forme de : (a) courbe et (b)radar en toile d'araignée (b) (cas des thermes impériaux romains en Afrique du Nord). (établie par l'auteure) 202

Fig. 127 – Répartition des plans thermaux selon leur usage dans l'AICM. Schéma en nuage de point. (établie par l'auteure) 203

Fig. 128 – Charte des calques élaborée sur AutoCAD pour la préparation des plans en vue de leur implémentation dans le PDSM. (établie par l'auteure) 205

Fig. 129 – Plan initial des thermes impériaux romains d'Antonin, à Carthage. (établie par l'auteure) ... 205

Fig. 130 – Représentation du plan préparé à la modélisation du PDSM. Cas des thermes impériaux romains d'Antonin, à Carthage. (établie par l'auteure) 206

Fig. 131 – Organisation des calques dans Rhinoceros3D. (établie par l'auteure)..... 214

Fig. 132 – Importation des plans (cas des thermes en Tunisie et à Rome) sur Rhinoceros3D. (établie par l'auteure)..... 215

Fig. 133 – Attribution d'identifiant (ID) pour chaque composant élémentaire (cas des thermes d'Antonin à Carthage). (établie par l'auteure)..... 216

Fig. 134 – Une liste d'identifiants uniques des composants élémentaires des thermes d'Antonin à Carthage. (établie par l'auteure) 217

Fig. 135 – Différents types de données (input/output). Interprétation établie par l'auteure d'après l'article de Louis Roobaert et Damien Claeys (2024b). 219

Fig. 136 – Une légende facilitant la lecture des schémas du *script* correspondant. (établie par l'auteure)..... 225

Fig. 137 – Schéma simplifié d'extraction des identifiants des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 225

Fig. 138 – Schéma simplifié du calcul des surfaces des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 225

Fig. 139 – Schéma simplifié du calcul des coordonnées du centre de gravité des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 226

Fig. 140 – Schéma simplifié du calcul des périmètres des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 226

Fig. 141 – Schéma simplifié du calcul des indices de circularité et de compacité des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 227

Fig. 142 – Schéma simplifié de la construction des vecteurs normaux des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 227

Fig. 143 – Schéma simplifié de la construction des vecteurs perpendiculaires aux vecteurs normaux des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 227

Fig. 144 – Schéma simplifié de la construction des symétries des composants élémentaires : direction de l'axe de symétrie. (établie par l'auteure) 228

Fig. 145 – Schéma simplifié de la construction des symétries des composants élémentaires : direction perpendiculaire à l'axe de symétrie. (établie par l'auteure)..... 228

Fig. 146 – Schéma simplifié du calcul des dimensions des formes englobantes des composants élémentaires : L, l, Q=L/l et surface. (établie par l'auteure) 228

Fig. 147 – Schéma simplifié du calcul des orientations des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 229

Fig. 148 – Schéma simplifié du calcul des relations typologiques des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 229

Fig. 149 – Schéma simplifié du calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur froid. (établie par l'auteure) 230

Fig. 150 – Schéma simplifié du calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur chauffé. (établie par l'auteure)..... 230

Fig. 151 – Schéma simplifié du calcul des proportions et des surfaces des secteurs chauffé/froid. (établie par l'auteure) 231

Fig. 152 – Schéma simplifié du calcul des dimensions des plans entiers : surface, centre de gravité, périmètre. (établie par l'auteure)..... 231

Fig. 153 – Schéma simplifié de la création des matrices d'incidence des différents plans. (établie par l'auteure)..... 231

Fig. 154 – Schéma simplifié du calcul des fréquences d'occurrence des différents plans. (établie par l'auteure)..... 232

Fig. 155 – Schéma simplifié de l'analyse de la répartition spatiale. (établie par l'auteure)..... 232

Fig. 156 – Schéma simplifié du calcul d'orientation des plans entiers. (établie par l'auteure)..... 233

Fig. 157 – Schéma simplifié du calcul des proportions globales des plans entiers. (établie par l'auteure)..... 233

Fig. 158 – Schéma simplifié du calcul des positions relatives des plans. (établie par l'auteure) 233

Fig. 159 – Schéma simplifié du calcul de dimensions des formes englobantes des plans entiers. (établie par l'auteure)..... 234

Fig. 160 – Schéma simplifié du calcul d'indice de compacité du plan entier. (établie par l'auteure) 234

Fig. 161 – Schéma simplifié de création des plans des axes de symétrie dans différents plans. (établie par l'auteure)..... 235

Fig. 162 – Schéma simplifié de la création de la symétrie dans différents plans, selon les axes de symétrie propre à chacun. (établie par l'auteure) 235

Fig. 163 – Schéma simplifié du calcul de la proportion de la quantité de la matière et le VVEC. (établie par l'auteure)..... 236

Fig. 164 – Schéma simplifié de la génération du plein (des murs) à partir du vide (les composants élémentaires). (établie par l'auteure)..... 236

Fig. 165 – Schéma simplifié de la construction des plans entiers. (établie par l'auteure) 237

Fig. 166 – Différents composants paramétriques de *data trees* dans Grasshopper. (établie par l'auteure) 238

Fig. 167 – Structure de données hiérarchiques sous forme de *data tree*. Reproduit et adapté par l'auteure d'après (Tedeschi & Wirz, 2014, p. 219) 239

Fig. 168 – Représentation d'un ensemble des composants en utilisant le « *tree branch* ». (établie par l'auteure) 240

Fig. 169 – Représentation d'un ensemble des composants en utilisant le « *tree item* ». (établie par l'auteure) 240

Fig. 170 – Représentation d'un ensemble des composants en utilisant le « *split tree* ». (établie par l'auteure) 241

Fig. 171 – Présentation du lieu architectural dans un plan. Cas des thermes d'Antonin à Carthage. (établie par l'auteure) 243

Fig. 172 – Présentation du calcul des attributs pour une première réflexion au modèle PDSM. (établie par l'auteure) 243

Fig. 173 – Optimisation d'un script vers une version adaptée à la construction d'un *cluster* dans Grasshopper pour l'extraction des identifiants des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 244

Fig. 174 – Structuration des données des composants élémentaires dans *data tree*. (établie par l'auteure) 245

Fig. 175 – Extrait de l'organisation du calcul des attributs, des composants élémentaires, secteurs et plan, dans des *clusters*. (établie par l'auteure) 246

Fig. 176 – Extrait d'organisation du calcul des attributs. Entre structurer et extraire des données. (établie par l'auteure) 247

Fig. 177 – Extrait du PDSM englobant les calculs de tous les attributs des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 247

Fig. 178 – Le contenu d'un *cluster* du calcul des attributs des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 248

Fig. 179 – Aspect final du PDSM simplifié et compressé. (établie par l'auteure) 249

Fig. 180 – Extrait du script relatif au calcul des attributs des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 249

Fig. 181 – Extrait du script relatif à la construction des plans entiers. (établie par l'auteure) 249

Fig. 182 – Extrait du script relatif à la génération du plein. (établie par l'auteure) 250

Fig. 183 – Extrait du script relatif à l'extraction du programme par plan. (établie par l'auteure) 250

Fig. 184 – Extrait du script relatif au calcul des fréquences d'occurrence (exemple de plan T02). (établie par l'auteure) 250

Fig. 185 – Extrait du script relatif au calcul de la proportion du plein et du vide dans un plan (exemple de plan T02). (établie par l'auteure) 250

Fig. 186 – Extrait du script relatif au calcul de l'indice de compacité des plans. (établie par l'auteure) 251

Fig. 187 – Extrait du script relatif à la construction d'une matrice (exemple de plan T02). (établie par l'auteure) 251

Fig. 188 – Extrait du script relatif au calcul de l'orientation du plan. (établie par l'auteure) 251

Fig. 189 – Extrait du script relatif au calcul de la forme englobante du plan. (établie par l'auteure)..... 251

Fig. 190 – Extrait du script relatif au calcul des propriétés du plan : répartition spatiale, proportion globale, position relative des composants élémentaires par rapport au plan (exemple du plan T02). (établie par l'auteure)..... 252

Fig. 191 – Extrait du script relatif au calcul des propriétés du plan : dimensions du plan, surface, périmètre, les centres de gravité, construction des axes de symétrie. (établie par l'auteure)..... 252

Fig. 192 – Extrait du script relatif au calcul des dimensions des secteurs froid/chauffé (exemple du plan T02). (établie par l'auteure)..... 253

Fig. 193 – Conversion des données en fichier CSV. Exemple des données des composants élémentaires. (établie par l'auteure)..... 254

Fig. 194 – Processus de c*omplétion* du plan lacunaire dans le réseau de neurones (plan des thermes d'Aïn Doura). (Naifer et al., 2024)..... 260

Fig. 195 – Une division tripartite des données en ensemble d'entraînement, ensemble de validation et ensemble de test. (Müller & Guido, 2016, p. 262) 261

Fig. 196 – Un processus de conception typique pour une application d'apprentissage automatique. (Daumé, 2017, p. 27)..... 262

Fig. 197 – L'approche détaillée de complétion en quatre phase : Cas du sous-modèle ML1. (établie par l'auteure) 268

Fig. 198 – Les parties de la fleur Iris. (Müller & Guido, 2016, p. 14)..... 270

Fig. 199 – Extrait du script sur Grasshopper de normalisation des données. (établie par l'auteure)..... 274

Fig. 200 – Extrait du *data set* organisé sous forme de tableau dans Excel. (établie par l'auteure) 274

Fig. 201 – Extrait du data set organisé sous forme du CSV sur Grasshopper. (établie par l'auteure)..... 275

Fig. 202 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase A. (établie par l'auteure) 277

Fig. 203 – Installation de GH Python Remote. (GH Python Remote | Food4Rhino)..... 281

Fig. 204 – Interfaces de *Anaconda Navigator* et Grasshopper confirmant l'installation du plugin *GH-Python-remote* et la connexion à l'interpréteur Python externe. (établie par l'auteure)..... 281

Fig. 205 – Synthèse des décisions de conception pour le développement du programme d'apprentissage du jeu de dames. (Mitchell, 2013, p. 13)..... 282

Fig. 206 – Tableau périodique et évolutif des outils *intelligents* d'aide à la conception. (Roobaert, 2024) 283

Fig. 207 – Position de l'étape de la génération du dessin dans Grasshopper au sein du processus *intelligent*. (établie par l'auteure)..... 284

Fig. 208 – Illustration du fonctionnement d'un arbre de décision à partir d'un exemple issu du sous-modèle ML1. (établie par l'auteure)..... 286

Fig. 209 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase B. (établie par l'auteure) 287

Fig. 210 – Matrice de confusion de classification binaire. (Müller & Guido, 2016, p. 281) 291

Fig. 211 – Exemple de matrice de confusion pour la tâche de classification des dix chiffres. (Müller & Guido, 2016, p. 298) 292

Fig. 212 – Exemple du rapport de classification multi-classe affichant les métriques de précision, rappel et F1-score pour chaque classe fonctionnelle prédite à partir du fragment. (établie par l'auteure) 292

Fig. 213 – ROC et AUC d'un modèle parfait hypothétique. (« Machine Learning | Google for Developers », 2025) 293

Fig. 214 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase C. (établie par l'auteure) 296

Fig. 215 – Simplification du code en workflow algorithmique – Phase D. (établie par l'auteure 300

Fig. 216 – Le processus général de la rétroconception. (établie par l'auteure) 303

Fig. 217 – Processus d'un projet à travers la méthode générative. Une transposition du travail réalisé par Mounir Dhouib (2004, 2014, 2022). (établie par l'auteure) 304

Fig. 218 – Enchaînement des étapes du PDSM et de l'AICM. (établie par l'auteure) 306

Fig. 219 – L'exploitation ultérieure de double modèle PDSM/AICM. (établie par l'auteure) 309

Fig. 220 – L'approche de complétion en quatre phases. (établie par l'auteure) 310

Fig. 221 – Niveaux de connaissances atteints. (établie par l'auteure) 312

Fig. 222 – Fiche d'enregistrement des thermes El Knissa : grands thermes. (établie par l'auteure) 343

Fig. 223 – Fiche d'enregistrement des thermes Karthago : à Carthage thermes d'Antonins. (établie par l'auteure) 344

Fig. 224 – Fiche d'enregistrement des thermes Mactaris : grands thermes Est. (établie par l'auteure) 345

Fig. 225 – Fiche d'enregistrement des thermes Sicca Veneria : grands thermes. (établie par l'auteure) 346

Fig. 226 – Fiche d'enregistrement des thermes Thelepte : grands thermes. (établie par l'auteure) 347

Fig. 227 – Fiche d'enregistrement des thermes Thugga : thermes d'Ain Doura. (établie par l'auteure) 348

Fig. 228 – Fiche d'enregistrement des thermes Thugga : thermes Liciniens. (établie par l'auteure) 349

Fig. 229 – Fiche d'enregistrement des thermes Uthina : grands thermes. (établie par l'auteure) 350

Fig. 230 – Fiche d'enregistrement des thermes Utica : grands thermes. (établie par l'auteure) 351

Fig. 231 – Fiche d'enregistrement des thermes Bulla Regia : grands thermes Sud. (établie par l'auteure) 352

Fig. 232 – Fiche d'enregistrement des thermes Membressa. (établie par l'auteure) 353

Fig. 233 – Fiche d'enregistrement des thermes Caesarea : grands thermes Ouest. (établie par l'auteure) 354

Fig. 234 – Fiche d'enregistrement des thermes Cuicul : grands thermes Sud. (établie par l'auteure) 355

Fig. 235 – Fiche d'enregistrement des thermes Cuicul : thermes du capitole. (établie par l'auteure) 356

Fig. 236 – Fiche d'enregistrement des thermes Hippo Regius : grands thermes Sud. (établie par l'auteure) 357

Fig. 237 – Fiche d'enregistrement des thermes Lambaesis : grands thermes. (établie par l'auteure) 358

Fig. 238 – Fiche d'enregistrement des thermes Lambaesis : thermes du Camp. (établie par l'auteure) 359

Fig. 239 – Fiche d'enregistrement des thermes Tubusuptu : grands thermes. (établie par l'auteure)....360

Fig. 240 – Fiche d'enregistrement des thermes Thamugadi : grands thermes Nord. (établie par l'auteure)....361

Fig. 241 – Fiche d'enregistrement des thermes Calama. (établie par l'auteure)....362

Fig. 242 – Fiche d'enregistrement des thermes Tiddis. (établie par l'auteure)....363

Fig. 243 – Fiche d'enregistrement des thermes Lepcis Magna : grands thermes Sud. (établie par l'auteure)....364

Fig. 244 – Fiche d'enregistrement des thermes Lepcis Magna : thermes du bord de mer. (établie par l'auteure)....365

Fig. 245 – Fiche d'enregistrement des thermes de Néron. (établie par l'auteure)....366

Fig. 246 – Fiche d'enregistrement des thermes de Titus. (établie par l'auteure)....367

Fig. 247 – Fiche d'enregistrement des thermes de Trajan. (établie par l'auteure)....368

Fig. 248 – Fiche d'enregistrement des thermes de Caracalla. (établie par l'auteure)....369

Fig. 249 – Fiche d'enregistrement des thermes de Dioclétien. (établie par l'auteure)....370

Fig. 250 – Fiche d'enregistrement des thermes de Constantin. (établie par l'auteure)....371

Fig. 251 – Plans des thermes impériaux romains en Algérie et Libye. Pl. CLV - Maghreb, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. 1 - Caesarea. 2 - Cuicul, grands thermes Sud. 3 - Cuicul, thermes du Capitole. 4 - Hippo Regius, grands thermes Sud. 5 - Lambaesis, thermes du camp. 6 - Lambaesis, grands thermes. 7 - Tubusuptu. 8 - Thamugadi, grands thermes Nord. 9 - Lepcis Magna, restitution de l'état originel hadrianéen, d'après un fond de plan dû à R. Bartoccini, Africa italiana, 4. (Thébert, 2003)....372

Fig. 252 – Plans des thermes impériaux romains en Tunisie. Pl. CLIV - Maghreb, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Comme pour Rome, mais contrairement à l'Asie, les plans ne comportent que le bloc balnéaire. Nous renvoyons aux planches du catalogue pour les éventuelles annexes, en particulier les palestres, ainsi que pour une lecture plus facile des annotations portées sur les plans. De fait, ceux-ci ne sont que les schémas proposés dans le cadre des diverses notices et mis à la même échelle que les plans de Rome et d'Asie afin de faciliter les comparaisons. Nous avons ajouté les thermes de Lepcis Magna, avec leur palestre. 1 - El Knissia. 2 - Karthago, grands thermes d'Antonin. 3 - Mactaris, grands thermes Est. 4 - Thugga, thermes liciniens. 5 - Utica, grands thermes. (Thébert, 2003)....373

Fig. 253 – Plan de Thugga, thermes Ain Doura, en Tunisie. Schéma partiellement restitué d'après M. Bouhlila, thèse, Paris IV, 1987, et l'état des lieux. Éch. 1 :500. (Thébert, 2003)....374

Fig. 254 – Plan de Thelepte, grands thermes, en Tunisie. Pl. LV – Thelepte, grands thermes. 1 - H. Saladin, AMS, 3e sér., 13, 1887, p. 117, fig. 206. 2 - Krencker, Trierer Kaiserthermen, p. 200, fig. 266. Éch. 1 :500. 3 - Schéma restitué d'après les études antérieures et l'état des lieux. Éch. 1 :500. (Thébert, 2003)....375

Fig. 255 – Plan de Uthina, grands thermes, en Tunisie. Pl. LXVIII – Uthina, grands thermes. 1 - Schéma d'après les études antérieures et l'état des lieux. Éch. 1 :500. Uthina, thermes des Laberii. 2 - Plan E. Sadoux dans Mts Piot, 3, 1896, p. 216, fig. 11. Éch. 1 :400. 3 - Schéma d'après les études antérieures et l'état des lieux. Éch. 1 :500. (Thébert, 2003)....376

Fig. 256 – Plan des thermes Lepcis magna thermes du bord de mer grands thermes. Pl. CXLIX – Lepcis Magna, thermes du bord de mer. 1 - R. Goodchild, The unfinished « Imperial » baths of Leptis Magna, dans Libya antiqua, 2, 1965, pl. VIII. Éch. 1 :600. 2 - Restitution du projet

de transformation des thermes du bord de mer en thermes symétriques de type impérial. Éch. 1 :500. 377

Fig. 257 – Plans grands thermes, en Algérie. Pl. CXLVII - 1 - Schéma du secteur chauffé des thermes de Membressa (sans échelle). Le Nord est approximativement en haut. 2 - Krencker, Trierer Kaiserthermen, p. 203, fig. 272 : thermes de Calama. Éch. 1 :500. 3 - Id., ibid., restitution du frigidarium des thermes de Calama. 378

Fig. 258 – Plans des thermes impériaux à Rome : Néron, Titus, Trajan. Pl. CL - Rome, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Les fonds de plan sont tirés de la FUR et ne comportent que le bloc balnéaire. Nous indiquons la figure de D. Krencker (Trierer Kaiserthermen) sur laquelle sont portées ses propositions de lecture des différentes salles. 1 - Thermes de Néron (Krencker, fig. 394a = ici pl. XXIX-1). 2 - Thermes de Titus (Krencker, fig. 396a, qui considère les palestres comme des vestiaires couverts : cf. ici pl. XXX-2). 3 - Thermes de Trajan (Krencker, fig. 397). Nous avons supprimé les piscines indûment restituées par la FUR dans les exèdres flanquant les palestres ainsi que dans les deux rotondes à absides rayonnantes situées de part et d'autre de la natatio. Sur l'identification traditionnelle, et à notre avis indubitable, des palestres, dans ce cas comme dans celui des thermes de Caracalla et de Dioclétien, cf. IVe partie, chap. I, n. 58. (Thébert, 2003) 379

Fig. 259 – Plans des thermes impériaux à Rome : Caracalla, Dioclétien, Constantin. Pl. CLI - Rome, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Les fonds de plan sont tirés de la FUR et ne comportent que le bloc balnéaire. Nous indiquons la figure de D. Krencker (Trierer Kaiserthermen) sur laquelle sont portées ses propositions de lecture des différentes salles. 1 - Thermes de Caracalla (Krencker, fig. 400). 2 - Thermes de Dioclétien (Krencker, fig. 412). 3 - Thermes de Constantin (Krencker, fig. 422b) : dans ce cas, le plan concerne l'ensemble de ce que nous connaissons de l'édifice, y compris l'espace accolé au bloc balnéaire, espace qui devait accueillir une palestre. Nous avons supprimé les bassins restitués par la FUR. (Thébert, 2003) 380

Fig. 260 – Fiche comparative des thermes T1. (établie par l'auteure) 381

Fig. 261 – Fiche comparative des thermes T3. (établie par l'auteure) 382

Fig. 262 – Fiche comparative des thermes T4. (établie par l'auteure) 383

Fig. 263 – Fiche comparative des thermes T5. (établie par l'auteure) 384

Fig. 264 – Fiche comparative des thermes T6. (établie par l'auteure) 385

Fig. 265 – Fiche comparative des thermes T7. (établie par l'auteure) 386

Fig. 266 – Fiche comparative des thermes T8. (établie par l'auteure) 387

Fig. 267 – Fiche comparative des thermes T9. (établie par l'auteure) 388

Fig. 268 – Fiche comparative des thermes T10. (établie par l'auteure) 389

Fig. 269 – Fiche comparative des thermes T11. (établie par l'auteure) 390

Fig. 270 – Fiche comparative des thermes T12. (établie par l'auteure) 391

Fig. 271 – Fiche comparative des thermes T13. (établie par l'auteure) 392

Fig. 272 – Fiche comparative des thermes T14. (établie par l'auteure) 393

Fig. 273 – Fiche comparative des thermes T15. (établie par l'auteure) 394

Fig. 274 – Fiche comparative des thermes T16. (établie par l'auteure) 395

Fig. 275 – Fiche comparative des thermes T17. (établie par l'auteure) 396

Fig. 276 – Fiche comparative des thermes T18. (établie par l'auteure) 397

Fig. 277 – Fiche comparative des thermes T19. (établie par l'auteure) 398

Fig. 278 – Fiche comparative des thermes T20. (établie par l'auteure) 399

Fig. 279 – Fiche comparative des thermes T21. (établie par l'auteure) 400

Fig. 280 – Fiche comparative des thermes T22. (établie par l'auteure) 401

Fig. 281 – Fiche comparative des thermes T23. (établie par l'auteure) 402

Fig. 282 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant l'extraction des ID des composants élémentaires : Cas du *frigidarium.* (établie par l'auteure) 403

Fig. 283 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul de la surface. (établie par l'auteure) 404

Fig. 284 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul du centre de gravité. (établie par l'auteure) 405

Fig. 285 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul du périmètre. (établie par l'auteure) 406

Fig. 286 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul de circularité et compacité. (établie par l'auteure) 407

Fig. 287 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des vecteurs normaux. (établie par l'auteure) 408

Fig. 288 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des vecteurs perpendiculaires aux vecteurs normaux. (établie par l'auteure) 409

Fig. 289 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des symétries des composants élémentaires : direction de l'axe de symétrie. (établie par l'auteure) 410

Fig. 290 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des symétries des composants élémentaires : direction perpendiculaire à l'axe de symétrie. (établie par l'auteure) 411

Fig. 291 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des dimensions des formes englobantes des composants élémentaires : L, l, Q=L/l et surface. (établie par l'auteure) 412

Fig. 292 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des orientations des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 413

Fig. 293 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des relations typologiques des composants élémentaires. (établie par l'auteure) 414

Fig. 294 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur froid. (établie par l'auteure) 415

Fig. 295 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur chauffé. (établie par l'auteure) 416

Fig. 296 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions et des surfaces des secteurs chauffé/froid. (établie par l'auteure) ... 417

Fig. 297 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des dimensions des plans entiers : surface, périmètre, centre de gravité. (établie par l'auteure) ... 418

Fig. 298 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la création des matrices d'incidence des différents plans. (établie par l'auteure) ... 419

Fig. 299 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des fréquences d'occurrence des différents plans. (établie par l'auteure) ... 420

Fig. 300 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant l'analyse de la répartition spatiale. (établie par l'auteure) ... 421

Fig. 301 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul d'orientation des plans entiers. (établie par l'auteure) ... 422

Fig. 302 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions globales des plans entiers. (établie par l'auteure) ... 423

Fig. 303 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des positions relatives des plans. (établie par l'auteure) ... 424

Fig. 304 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul de dimensions des formes englobantes des plans entiers. (établie par l'auteure) ... 425

Fig. 305 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul d'indice de compacité du plan entier. (établie par l'auteure) ... 426

Fig. 306 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la création des plans des axes de symétrie dans différents plans. (établie par l'auteure) ... 427

Fig. 307 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la création de la symétrie dans différents plans, selon les axes de symétrie propres à chacun. (établie par l'auteure) ... 428

Fig. 308 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul de la proportion entre le plein et le vide. (établie par l'auteure) ... 429

Fig. 309 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la génération des murs (le plein) à partir du vide (les composants élémentaires). (établie par l'auteure) ... 430

Fig. 310 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des plans entiers. (établie par l'auteure) ... 431

TABLE DES TABLES

Table

Table 1 – Qualification des relations entre deux composants élémentaires. Adaptation selon Karim Bouaita (2015, p. 173) 51

Table 2 – Liste des travaux sur l'architecture thermale. (Naifer, Bouaita, & Dhouib, 2025) 57

Table 3 - Quelques définitions de l'intelligence artificielle, classées en quatre catégories. (adaptation selon Stuart J. Russel et Peter Norvig (1995, p. 5)) 66

Table 4 – Traduction des termes lié à l'AI en anglais. (établie par l'auteure) 68

Table 5 – Outils de mesure chez les romains. Adaptation d'après Jean Pierre Adam (1984, p. 42-44). (établie par l'auteure) 79

Table 6 – Les valeurs de pieds et ses multiples à l'époque impériale. Adaptation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 43). (établie par l'auteure) 80

Table 7 – Qualités physiques du matériau en fonction de la dureté de pierre. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 23-24). (établie par l'auteure) 80

Table 8 – Les différents types de marbre exploités et leurs provenances. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 24). (établie par l'auteure) 82

Table 9 – Deux types de bardages. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). (établie par l'auteure) 83

Table 10 – Trois méthodes de levage. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 50-53). Les schémas sont tirés de Jean-Pierre Adam (2017, p. 50-52). (établie par l'auteure) 85

Table 11 – Caractéristiques des faces d'une pierre. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 53). (établie par l'auteure) 87

Table 12 – Différents outils d'accrochage. Figure (a) : crampons en double té sur une fontaine pompéienne. JPA ; figure (b) : crampons en Pile profil le plus répondu, au temple de Vénus à Pompéi. JPA. Adaptation selon l'étude de Jean-Pierre Adam (1984, p. 55-60) ; figure (c) : surface d'attente d'un bloc de soubassement du temple romain d'Euromos (Carie). On y remarque, de gauche à droite ; le crampon de scellement, trois logements de goujons verticaux avec canal de coulée et deux trous de pinces ayant permis le serrage du joint du bloc supérieur. JPA. Les schémas sont tirés de Jean-Pierre Adam (1984, p. 55-57). (établie par l'auteure) 88

Table 13 – Caractéristiques du crampon de pi. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 56-60). (établie par l'auteure) 88

Table 14 – Caractéristiques du Goujon métallique. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 56-60). (établie par l'auteure) 89

Table 15 – Caractéristiques du mortier. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 59). (établie par l'auteure) 89

Table 16 – Caractéristiques de l'argile. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure) 90

Table 17 – Types et caractéristiques d'argile. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteur) 90

Table 18 – Plusieurs présentations d'argile. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure) 91

Table 19 – Types de briques. Interprétation selon Vitruve (1996) et L'ancien Pline (1986). (établie par l'auteure) 92

Table 20 – Exemple de four à Kairouan. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 61-68). (établie par l'auteure) 92

Table 21 – L'aspect de la roche en fonction de pourcentage de présence d'argile dans le calcaire. Interprétation d'après Adam (1984, p. 76). (établie par l'auteure) 93

Table 22 – Caractéristiques de deux types de chaux : aérienne et hydraulique. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 77). (établie par l'auteure) 94

Table 23 – Caractéristiques du matériau : Grés. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure) 94

Table 24 – Caractéristiques du matériau : calcaire compact blanc. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure) 95

Table 25 – Caractéristiques du matériau : Calcaire mésozoïque. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure) 95

Table 26 – Caractéristiques du matériau : basalte. Interprétation d'après Jean-Pierre Adam (1984, p. 69-90) et (Ben Slimene, 2017, p. 100-109). (établie par l'auteure) 95

Table 27 – Classifications des appareils. Interprétation selon Jean-Pierre Adam (1984), Roberto Marta (1986) et René Ginouves (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31). 99

Table 28 – Caractéristiques des grands appareils selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31). 100

Table 29 – Classification des petits appareils selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31). 102

Table 30 – Classification des appareils en brique selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31). 106

Table 31 – Classification des appareils mixtes selon Jean-Pierre Adam (1984) et René Ginouvès (1985, p. 94-102, 1992, p. 29-31). 107

Table 32 – Catalogue des thermes romains en Tunisie. (établie par l'auteure) 136

Table 33 – Catalogue des thermes romains en Algérie. (établie par l'auteure) 139

Table 34 – Catalogue des thermes romains en Lybie. (établie par l'auteure) 142

Table 35 – Catalogue des thermes romains à Rome. (établie par l'auteure) 145

Table 36 – Correspondance entre le double modèle PDSM/AICM et le DT. (établie par l'auteure) 162

Table 37 – Entre conception et rétroconception. (établie par l'auteure) 173

Table 38 – Le postulat du lieu architectural. Adaptée et actualisée d'après la thèse de Karim Bouaita (2015, p. 194) 174

Table 39 – Étapes de sélection et de préparation des données collectées sous forme de plans. (établie par l'auteure) 184

Table 40 – L'état de conservation de corpus des thermes impériaux romains étudiés. (Naifer et al., 2024) 185

Table 41 – Une grille raisonnée des caractéristiques des plans thermaux servant au calcul de l'indice de *similitude*. (établie par l'auteur) 186

Table 42 – Inventaire des caractéristiques du modèle *canonique* des thermes impériaux romains à Rome. (établie par l'auteure selon un examen des plans à disposition ; les travaux de Daniel Krencker (1929) et Yvon Thébert (2003)) 187

Table 43 – Inventaire des caractéristiques des variantes africaines. (établie par l'auteure selon un examen des plans à disposition ; les travaux de Daniel Krencker (1929) et Yvon Thébert (2003)) 189

Table 44 – Tableau récapitulatif des caractéristiques de la typologie des thermes impériaux romains en Afrique du Nord selon deux grandes logiques : type « H » et solutions locales. (établie par l'auteure selon un examen des plans à disposition ; les travaux de Daniel Krencker (1929) et de Yvon Thébert (2003)) 190

Table 45 – Tableau de calcul de l'indice de similitude pour les thermes impériaux romains en Afrique du Nord. (établie par l'auteure) 193

Table 46 – Justification du choix des composants élémentaires indispensables au fonctionnement des thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome. (établi par l'auteure) 197

Table 47 – Analyse de la présence des espaces thermaux dans les différents plans des thermes impériaux romains en Afrique du Nord et à Rome. (*) : présent ; (+-) : présence incertaine ou partielle ; (-) : non identifié ou absent. (établie par l'auteure) 198

Table 48 – Légende commune à tous les thermes romains étudiés dans la thèse. (établie par l'auteure) 198

Table 49 – Tableau de calcul de l'indice de complétude pour les thermes impériaux romains en Afrique du Nord. (établie par l'auteure) 199

Table 50 – Matrice décisionnelle entre similitude et complétude des thermes impériaux romains. (établie par l'auteure) 201

Table 51 – Tableau des usages recommandés des plans des thermes impériaux romains dans le processus de la rétroconception. (établie par l'auteure) 204

Table 52 – Les modalités d'application des outils du paradigme structural. (d'après la thèse de Karim Bouaita (2015)) 207

Table 53– Compréhension de type d'attributs selon les objectifs et les sorties de chaque sous-modèle de l'AICM. (établie par l'auteure) 208

Table 54 – Inventaire des attributs tabulaires. ((*) indique si l'attribut est calculé dans les différents éléments). (établie par l'auteure) 208

Table 55 – Étapes de la construction du PDSM. (établie par l'auteure) 213

Table 56 – Préparation préliminaire à intégration de nouvelles données sur AutoCAD. (établie par l'auteure) 217

Table 57 – Tableau du calcul des *features* paramétriques. (établie par l'auteure) 220

Table 58 – Tableau de paramètres supplémentaires au processus de la construction du PDSM. (établie par l'auteure) 237

Table 59 – Liste des masques dans Grasshopper. Reproduit et adapté par l'auteure d'après (https://bimcorner.com/how-to-use-masks-in-grasshopper/) 242

Table 60 – Distinction entre les ensembles de validation et de test. (établie par l'auteure) 263

Table 61 – Les tâches de l'apprentissage supervisé peuvent être appliquées à une multitude de scénarios. (adaptation de cours présentés par Google (« Machine Learning | Google for Developers », 2025)) 264

Table 62 – Les quatre phases fondamentales du processus artificiellement intelligent. (établie par l'auteure, en se référant aux travaux de Louis Roobaert et Damien Claeys (2024b, 2024a)) 267

Table 63 – Rôles humain–machine par phase dans le processus de complétion (ML1). (établie par l'auteure) 269

Table 64 – Répartition des attributs pour l'entraînement des sous-modèles. (établie par l'auteure) 271

Table 65 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase A. (établie par l'auteure) 278

Table 66 – Quelques plugins d'apprentissage automatique dans Rhinoceros3D/Grasshopper. (établie par l'auteure) 280

Table 67 – Tableau de correspondance entre sous-modèles et algorithmes. (établie par l'auteure) 285

Table 68 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase B. (établie par l'auteure) 288

Table 69 – Distinction entre les paramètres internes et les hyperparamètres. (établie par l'auteure) 290

Table 70 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase C. (établie par l'auteure) 295

Table 71 – Exploitation du processus en quatre phases pour le sous modèle ML1 : phase D. (établie par l'auteure) 298

ANNEXES

Fiches d'enregistrement

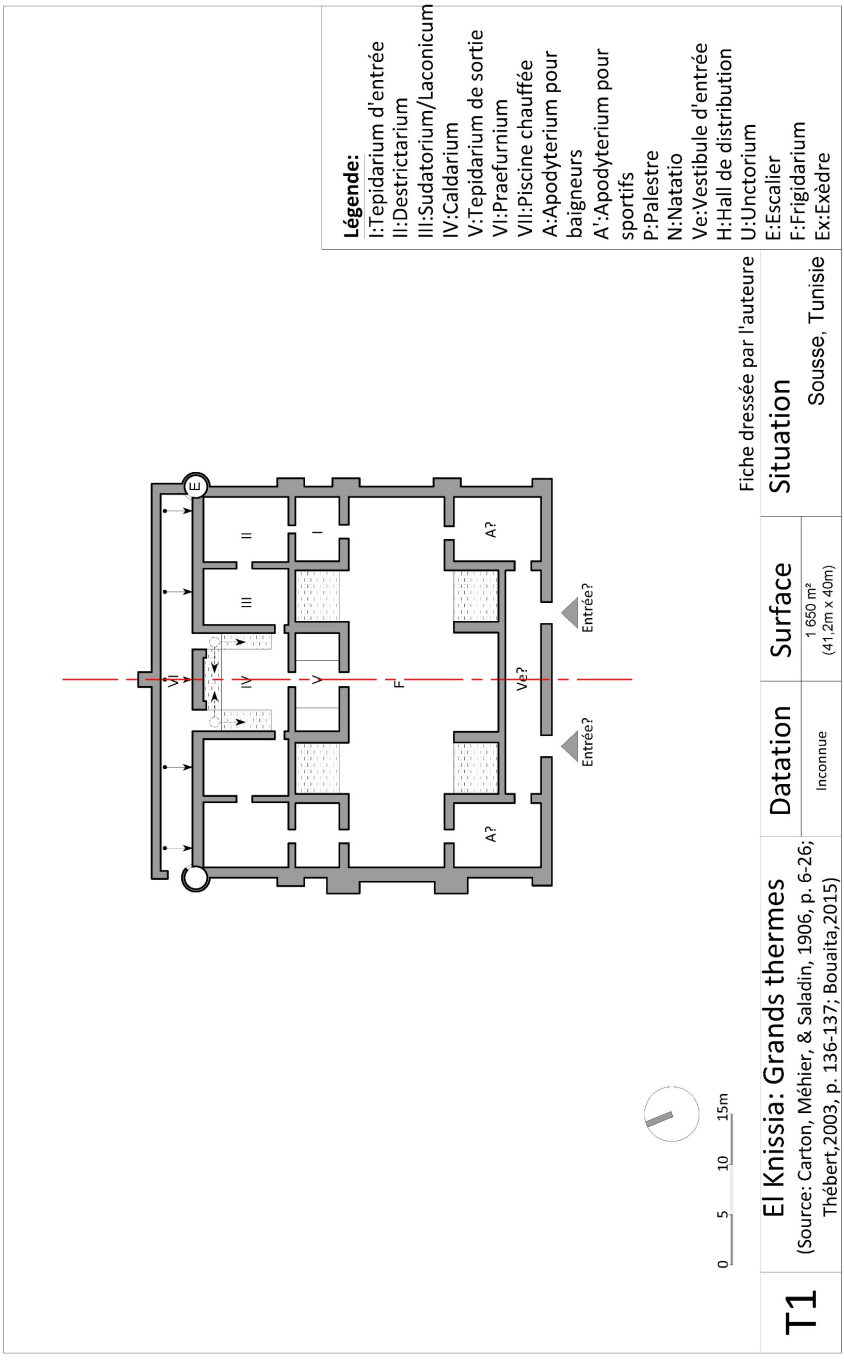


Fig. 222 – Fiche d'enregistrement des thermes El Knissa : grands thermes. (établie par l'auteure)

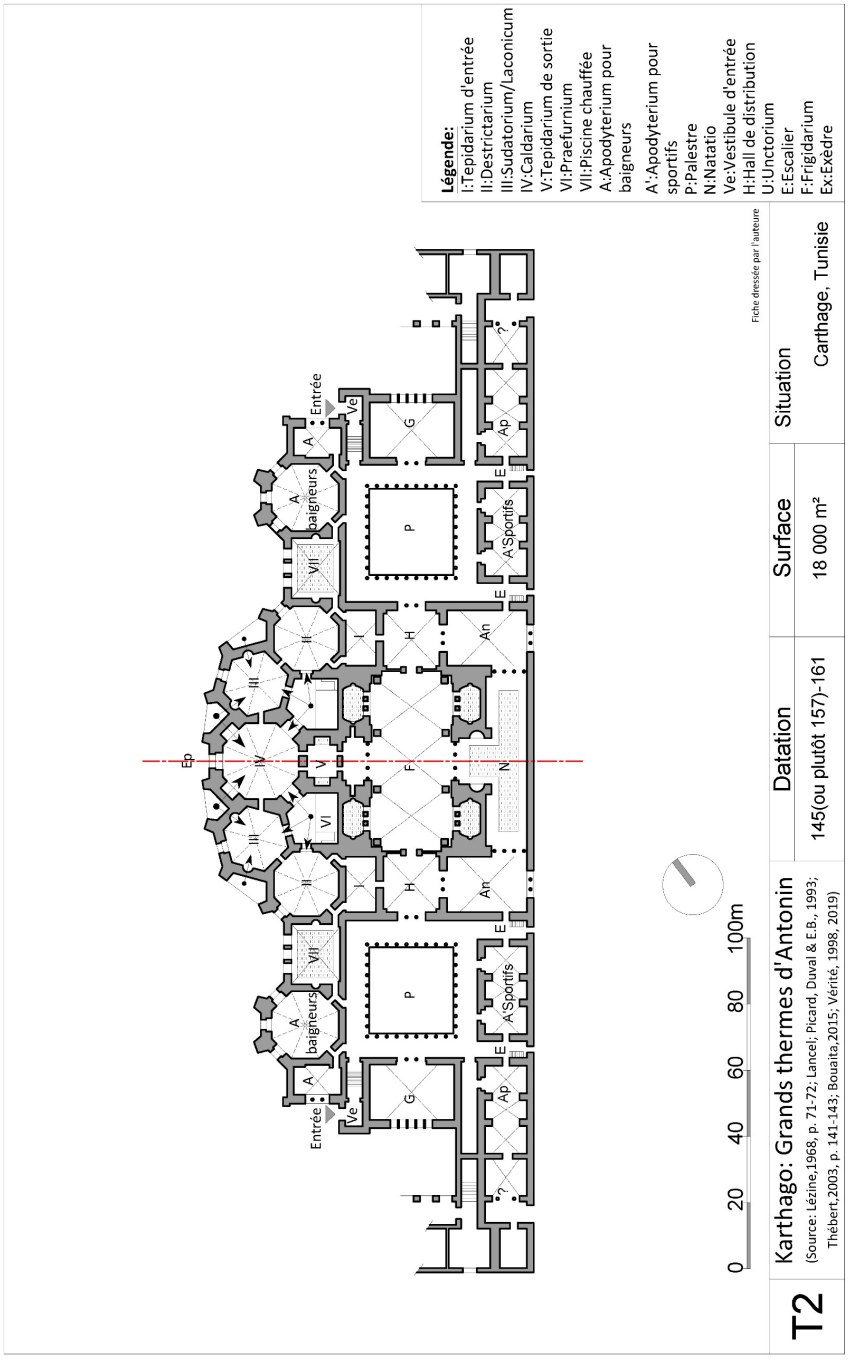


Fig. 223 – Fiche d'enregistrement des thermes Karthago : à Carthage thermes d'Antonins. (établie par l'auteure)

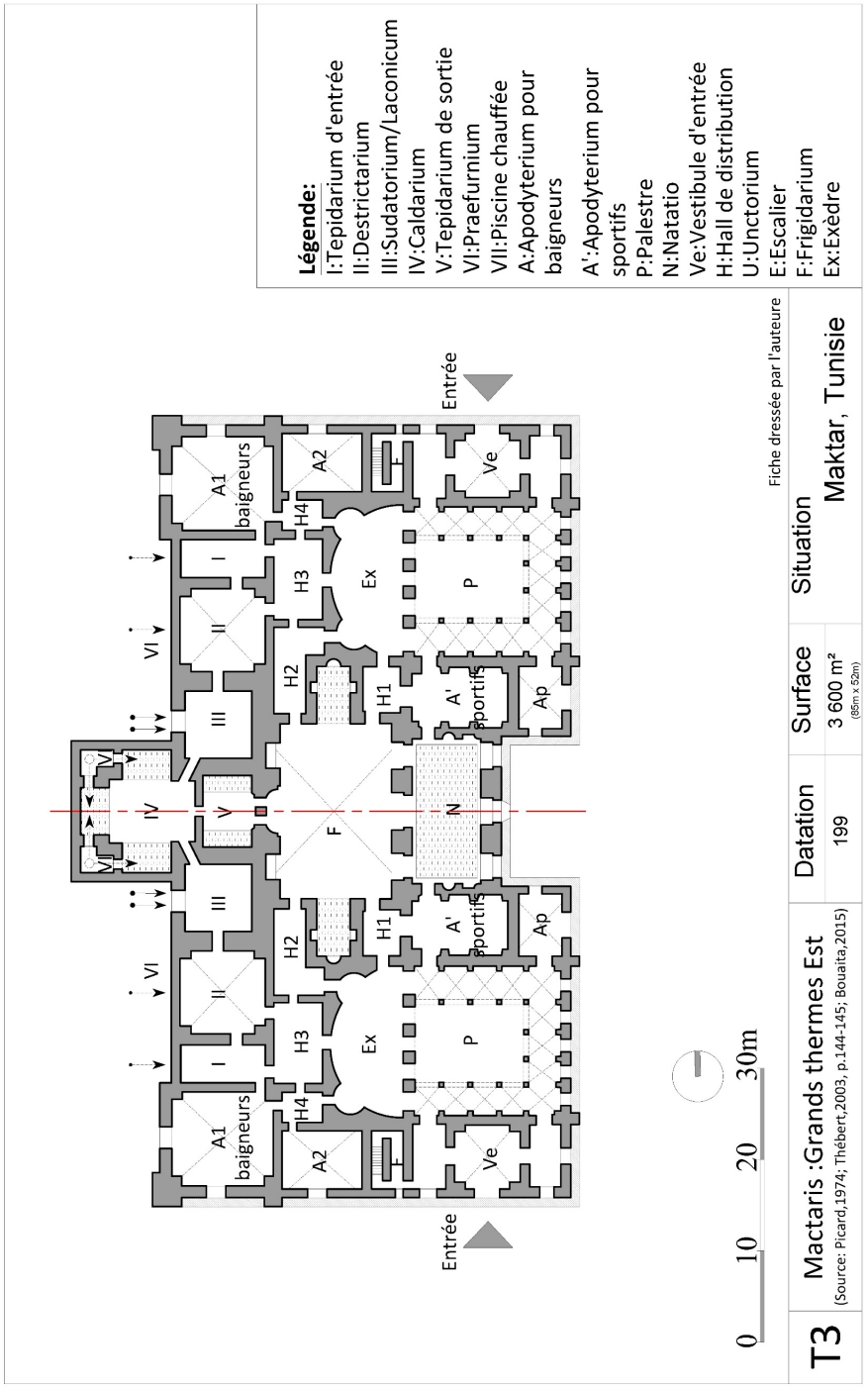


Fig. 224 – Fiche d'enregistrement des thermes Mactaris : grands thermes Est. (établie par l'auteure)

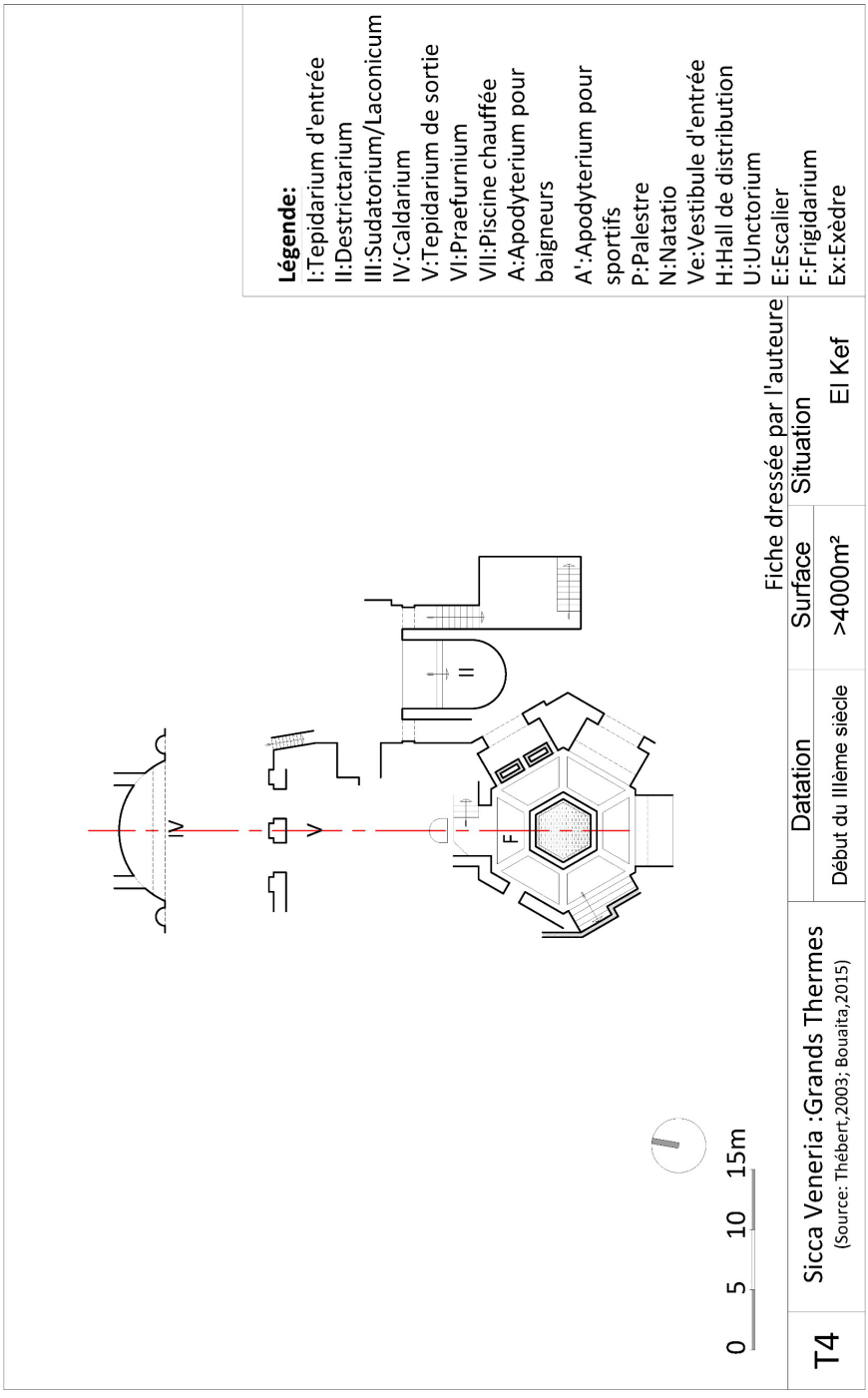


Fig. 225 – Fiche d'enregistrement des thermes Sicca Veneria : grands thermes. (établie par l'auteure)

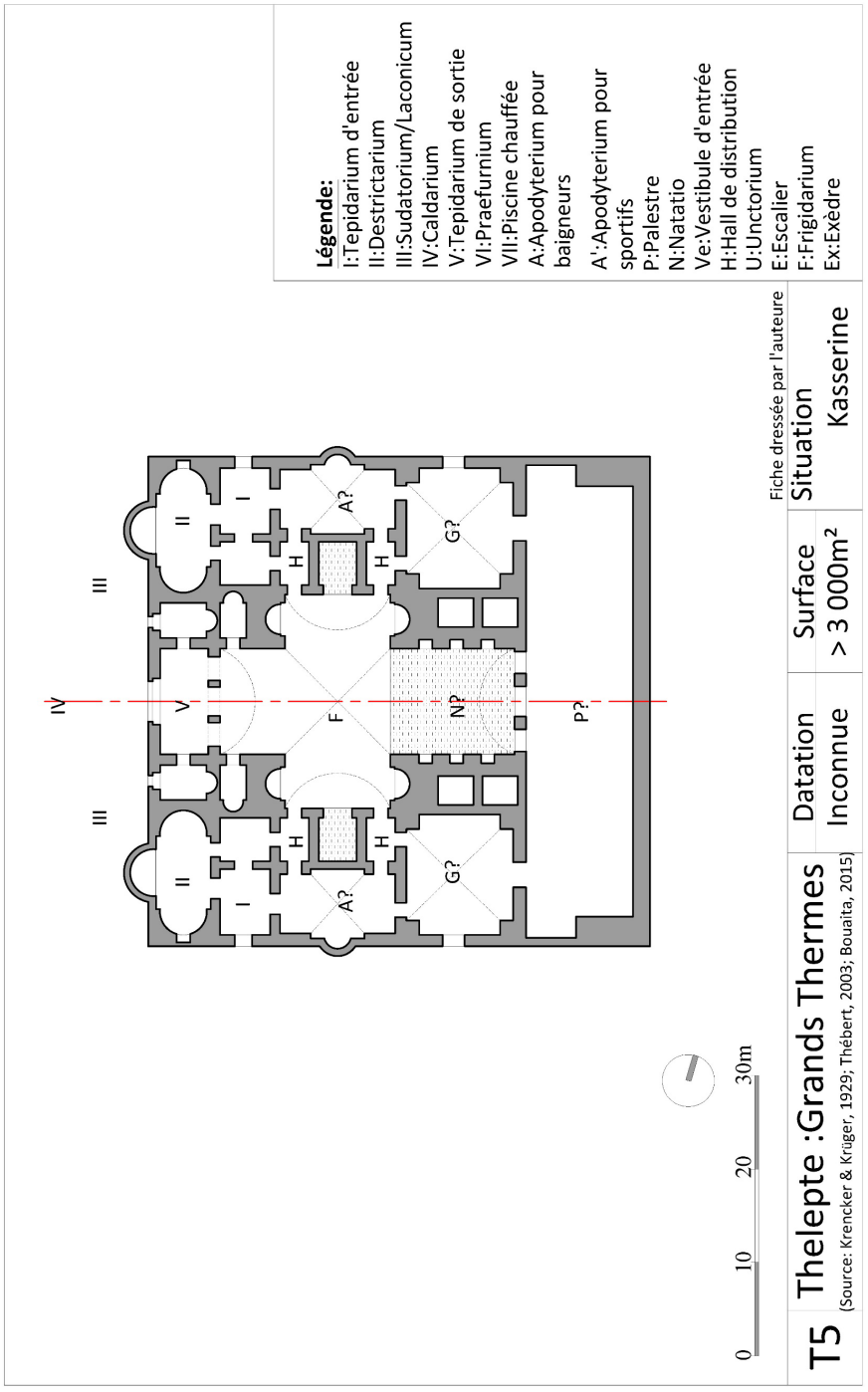


Fig. 226 – Fiche d'enregistrement des thermes Thelepte : grands thermes. (établie par l'auteure)

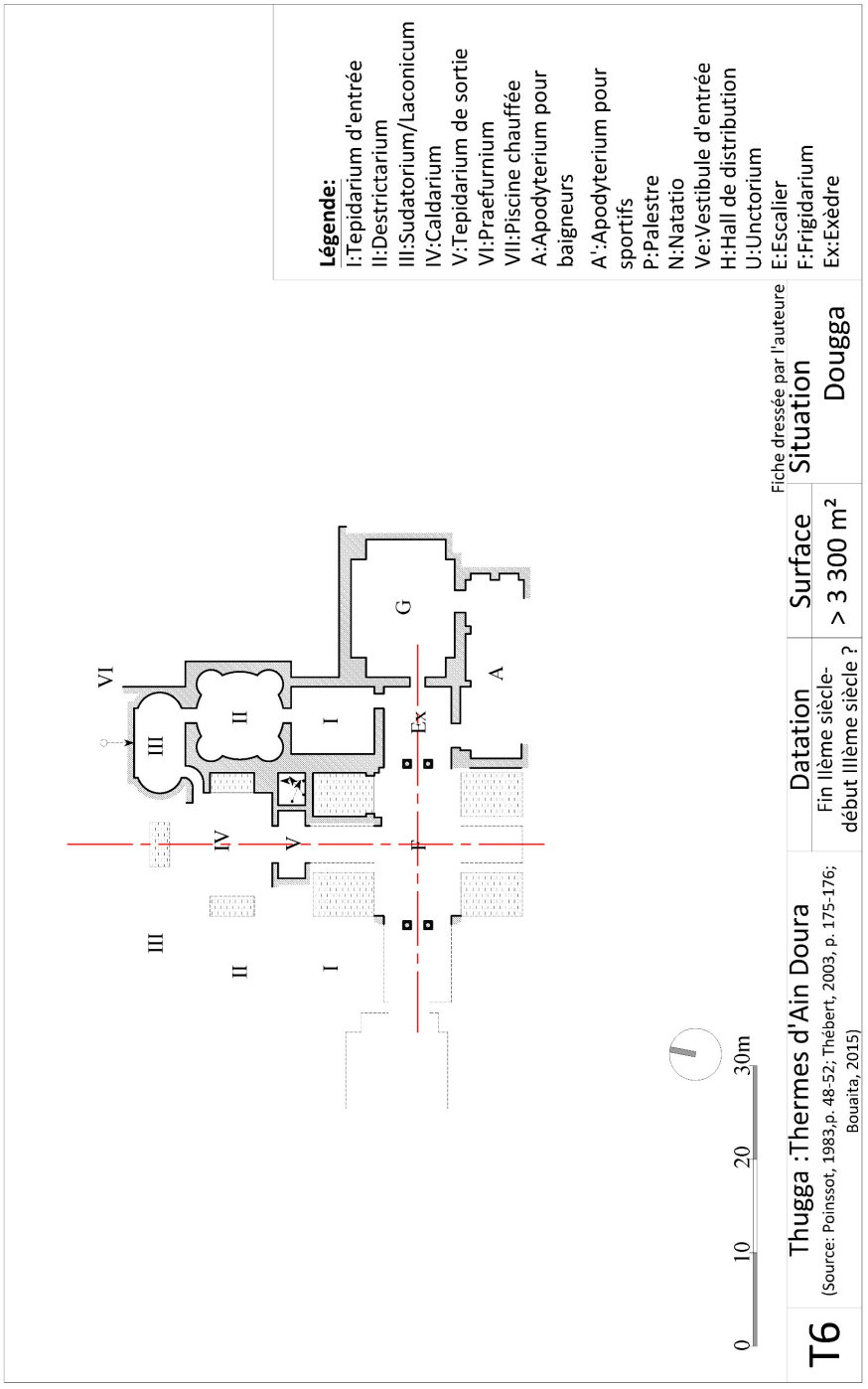


Fig. 227 – Fiche d'enregistrement des thermes Thugga : thermes d'Ain Doura. (établie par l'auteure)

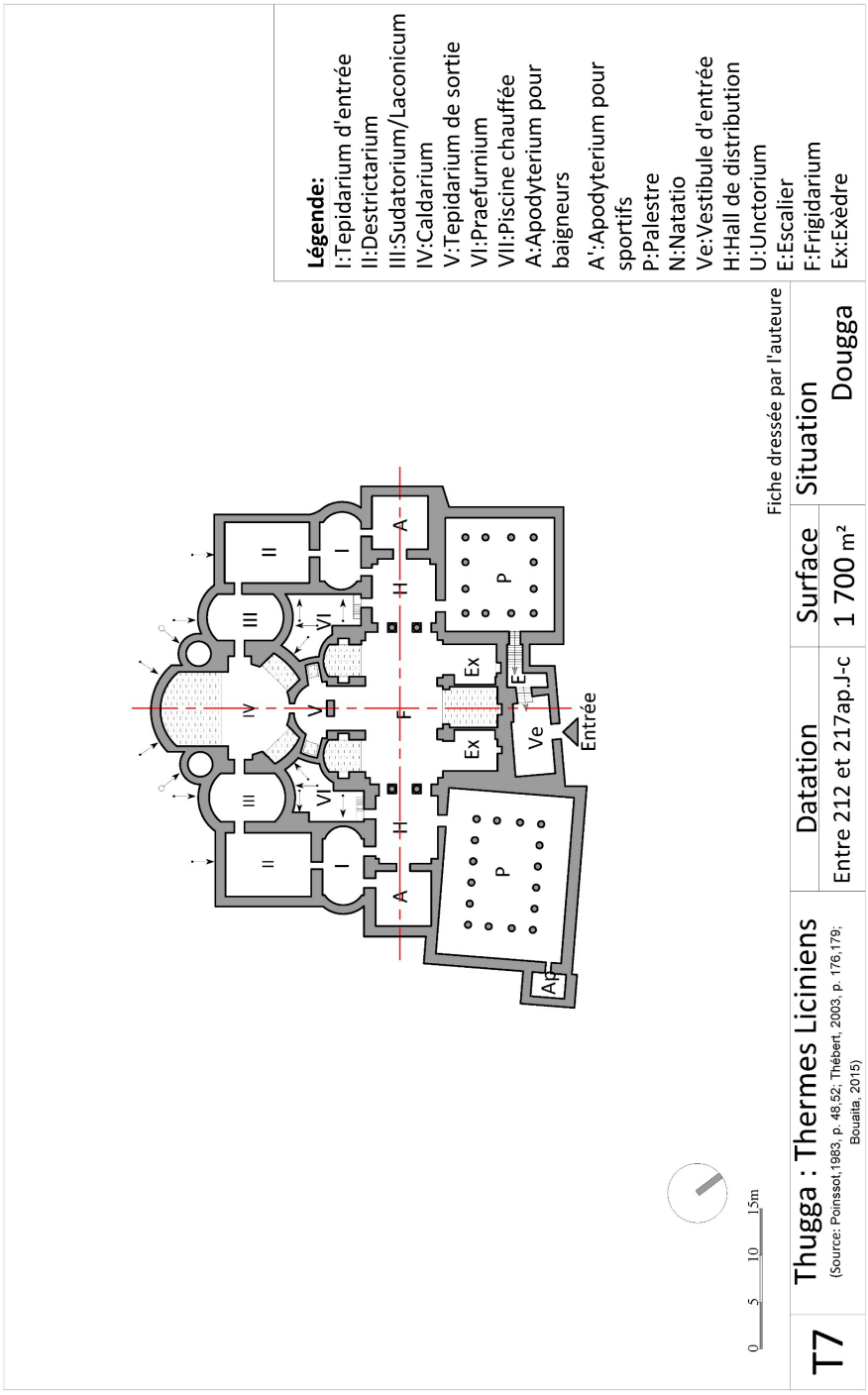


Fig. 228 – Fiche d'enregistrement des thermes Thugga : thermes Liciniens. (établie par l'auteure)

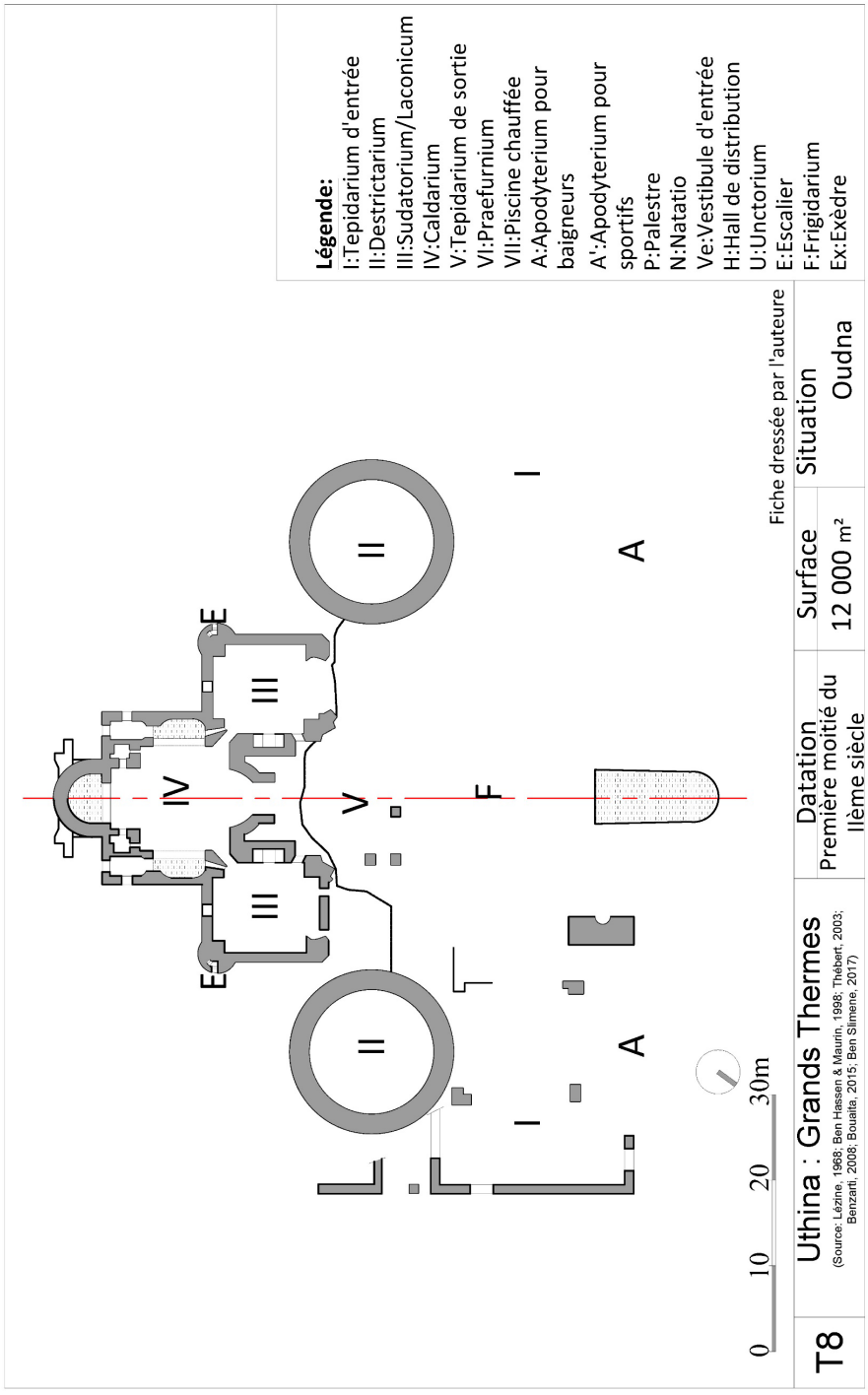


Fig. 229 – Fiche d'enregistrement des thermes Uthina : grands thermes. (établie par l'auteure)

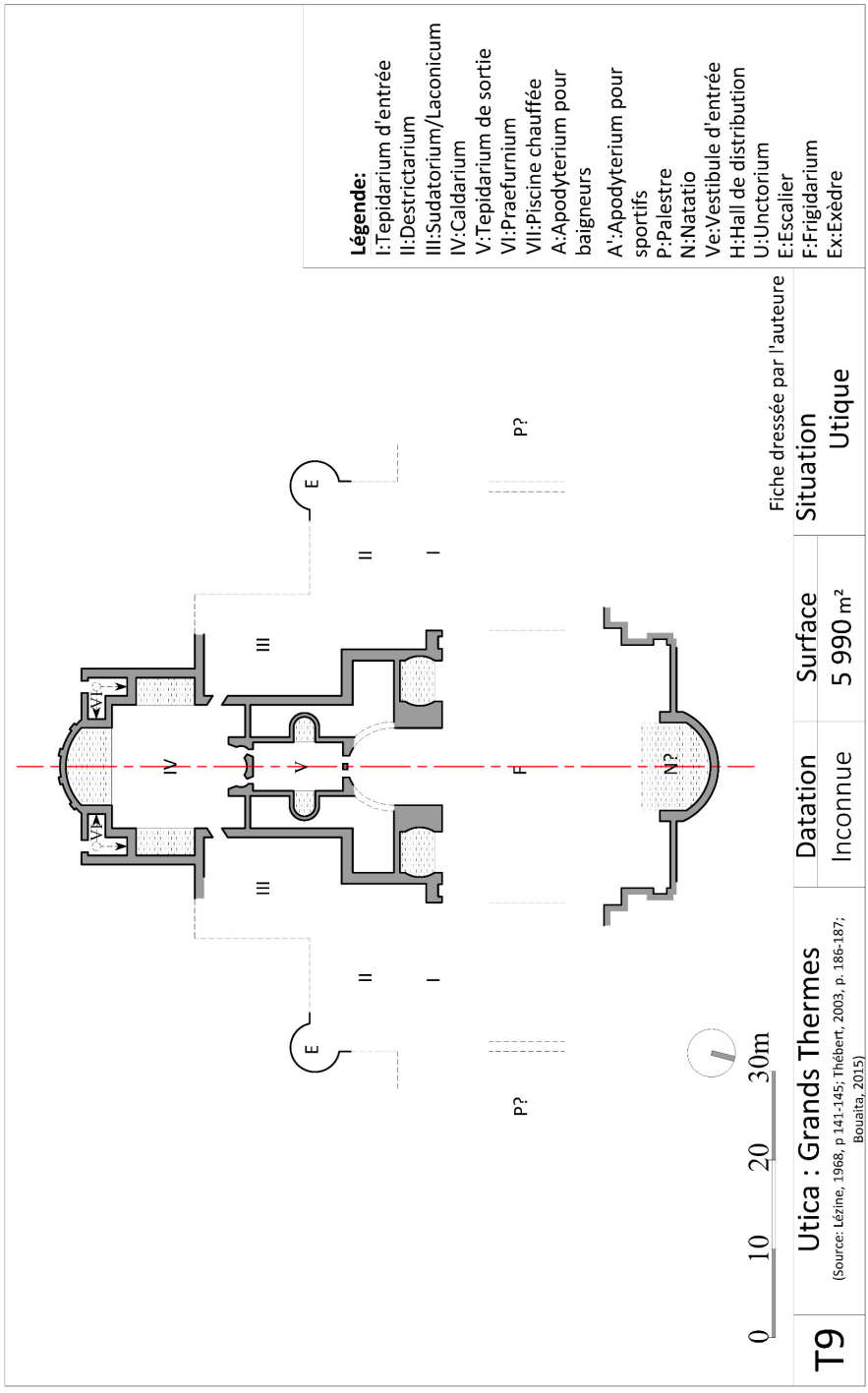


Fig. 230 – Fiche d'enregistrement des thermes Utica : grands thermes. (établie par l'auteure)

«Le bâtiment n'a été qu'effleuré par les fouilles, mais la masse des voûtes écroulées retient d'autant plus l'attention que ces blocs permettent de restituer, sensiblement au coeur de l'édifice, une ample salle couverte d'une voûte d'arête flanquée de deux berceaux. Selon toute probabilité, il s'agit du frigidarium.

Les vestiges visibles permettent de reconnaître un monument mesurant environ 60x55m, soit 3 300m². Il s'agit donc de grands thermes. Nous en connaissons fort peu de choses, mais la façade occidentale, qui fait large usage du grand appareil, est animée par deux avancées de plan courbe séparées par une paroi qui semble située parfaitement dans le grand axe du monument. Un sondage ancien effectué dans l'une d'entre elles permit de découvrir un hypocauste. La restitution la plus probable implique donc un caldarium en position axiale, doté à l'Ouest de deux absides abritant sans doute des bassins. Le peu d'éléments dont nous disposons suggère fortement de grands thermes de plan symétrique. »(*)

(*)THEBERT Yvon, « Thermes romains d'Afrique du Nord et leur contexte Méditerranéen, Etudes d'Histoire et d'archéologie », extrait à partir de la page 288.

Les fouilles sont incomplètes. Nous ne disposons pas de documents graphiques adéquats.

Fiche dressée par l'auteure

		Datation	Surface	Situation
T10	Bulla Regia : Grands Thermes Sud (Source: Thébert, 2003; Bouaita, 2015)	Inconnue	3 300m²	Bulla Régia

Fig. 231 – Fiche d'enregistrement des thermes Bulla Regia : grands thermes Sud. (établie par l'auteure)

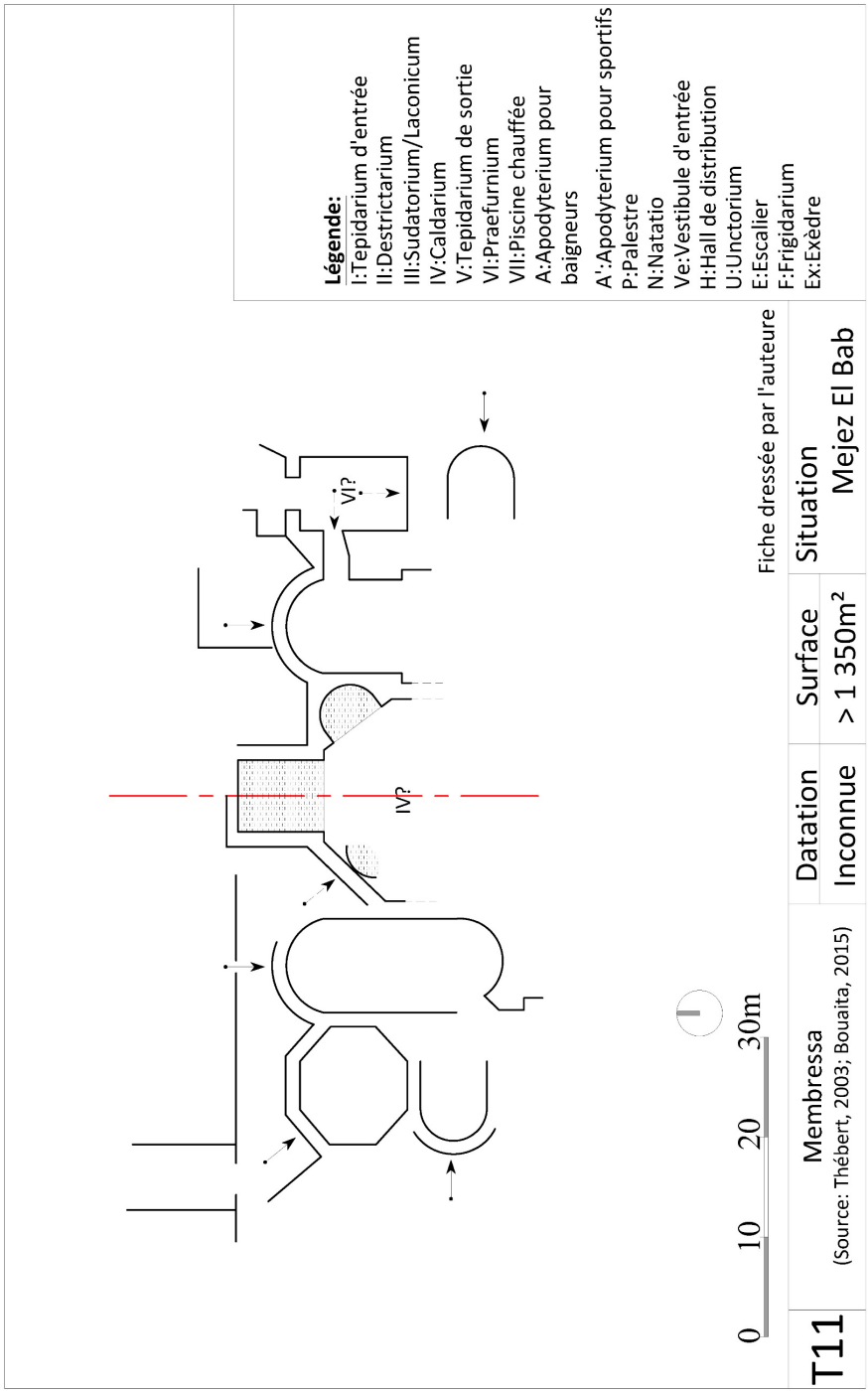


Fig. 232 – Fiche d'enregistrement des thermes Membressa. (établie par l'auteure)

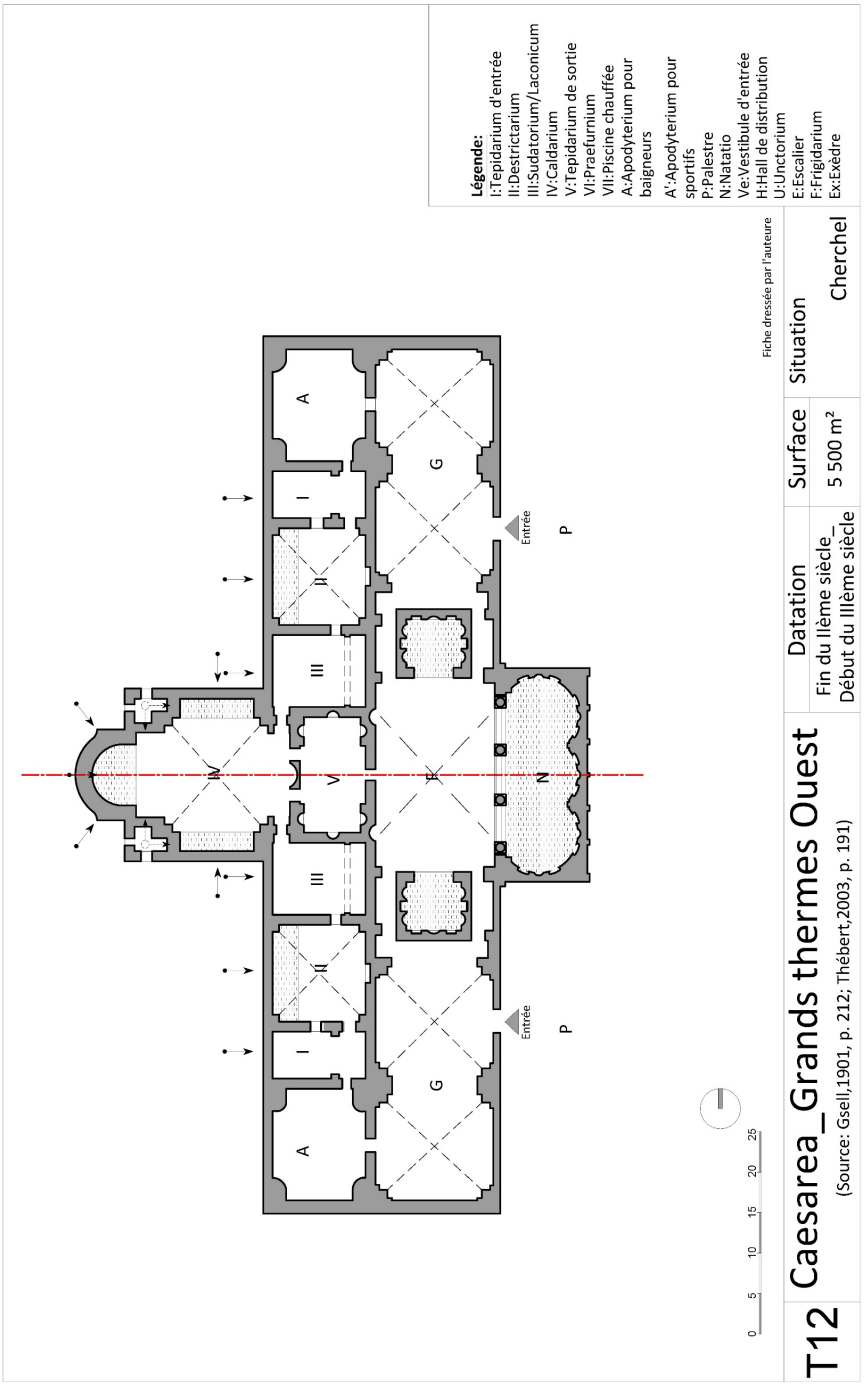


Fig. 233 – Fiche d'enregistrement des thermes Caesarea : grands thermes Ouest. (établie par l'auteure)

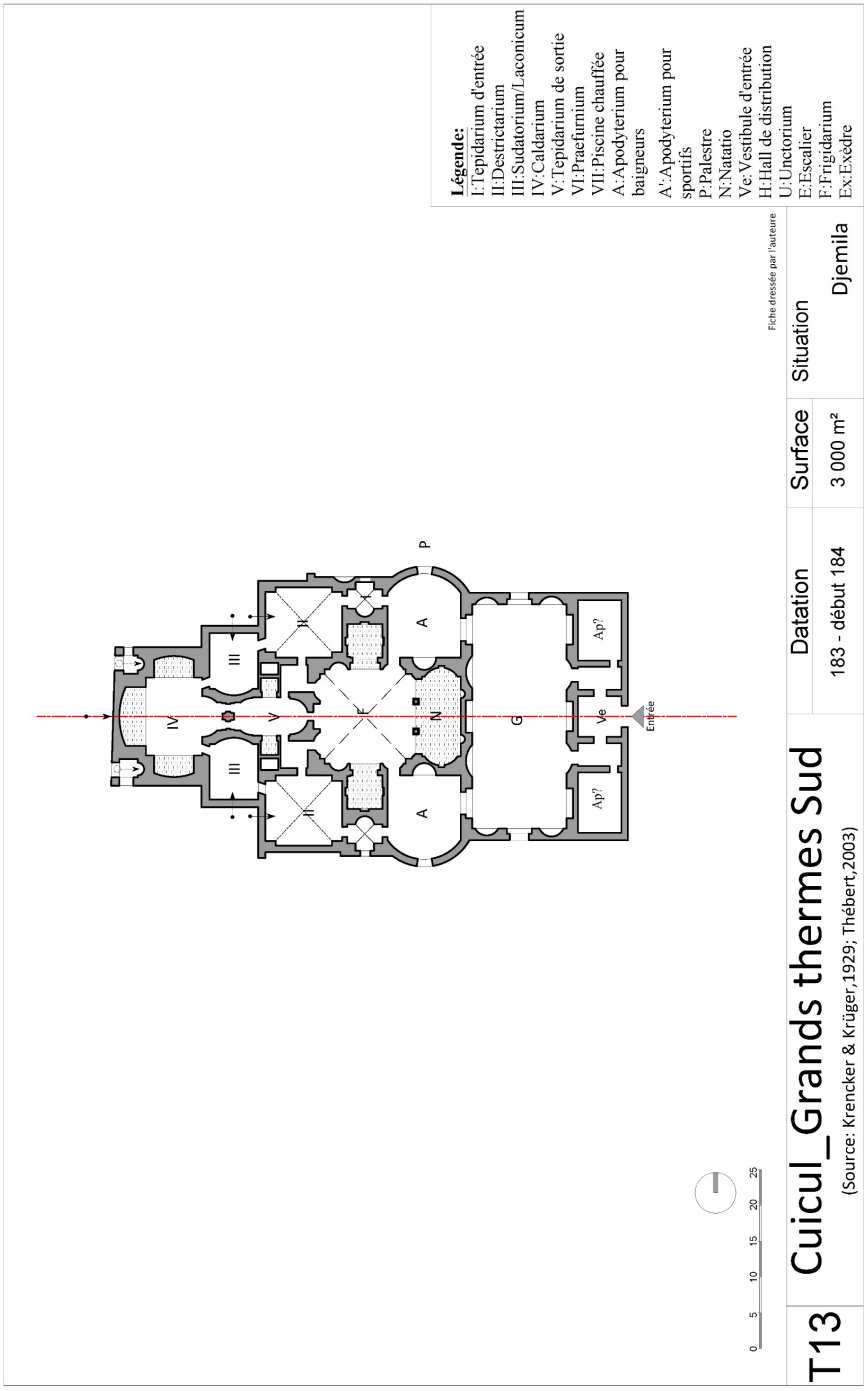


Fig. 234 – Fiche d'enregistrement des thermes Cuicul : grands thermes Sud. (établie par l'auteure)

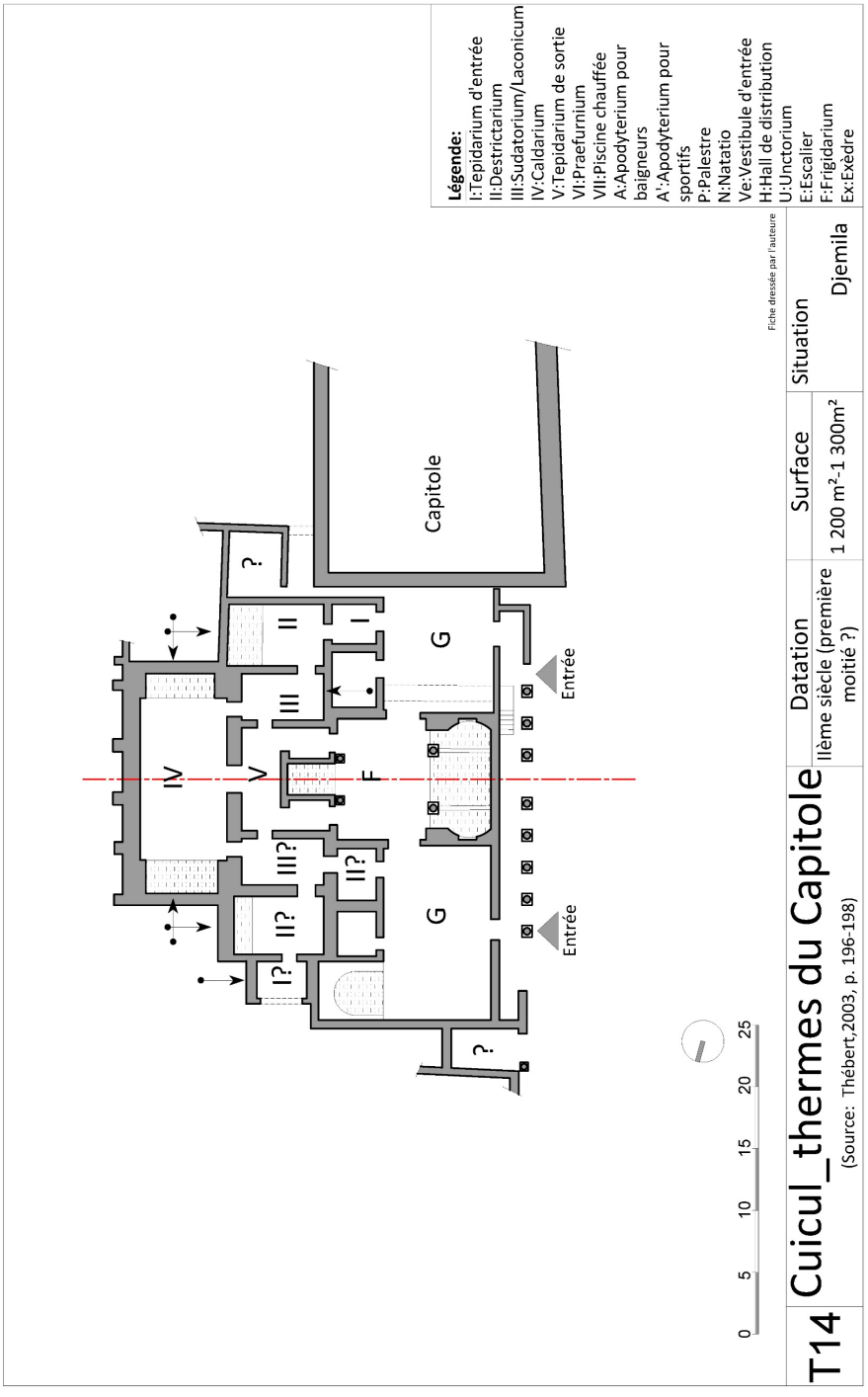


Fig. 235 – Fiche d'enregistrement des thermes Cuicul : thermes du capitole. (établie par l'auteure)

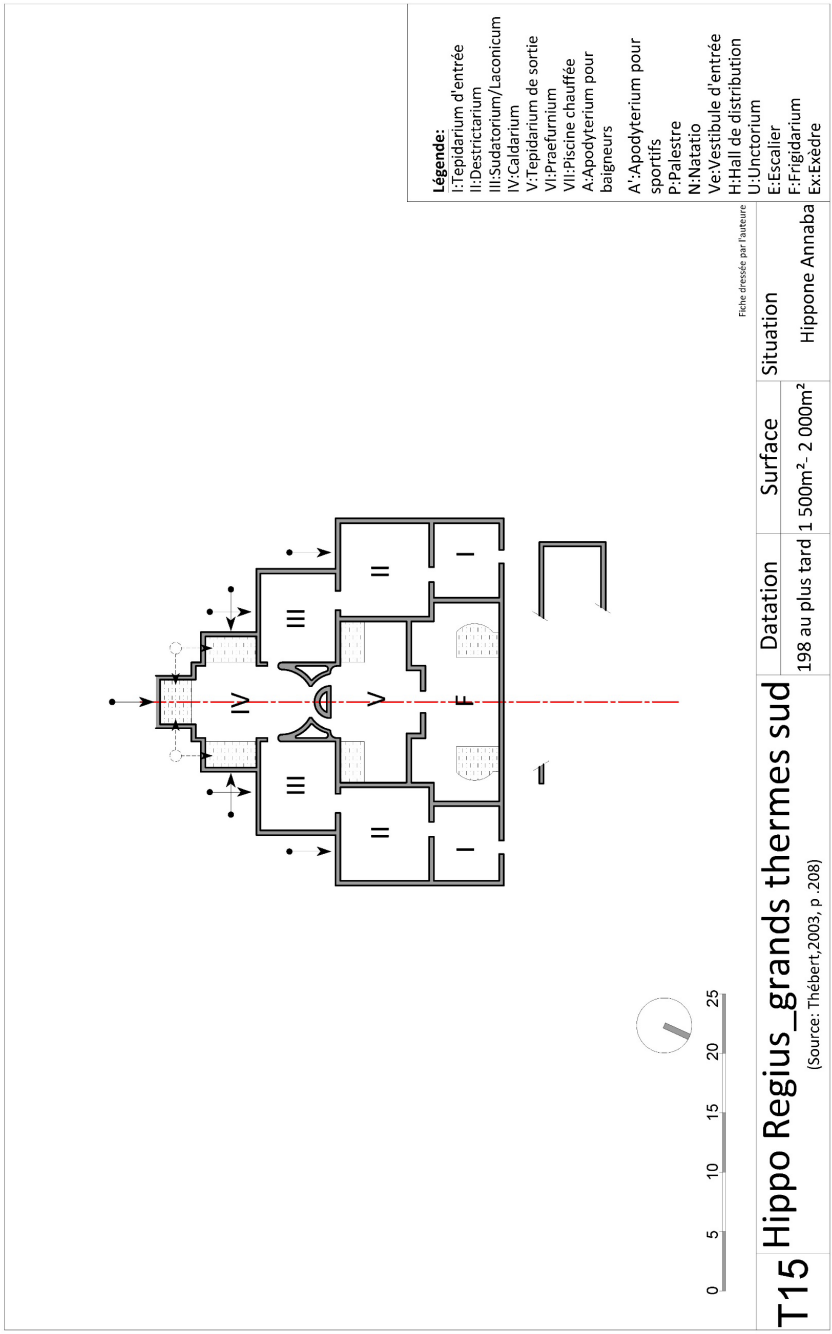


Fig. 236 – Fiche d'enregistrement des thermes Hippo Regius : grands thermes Sud. (établie par l'auteure)

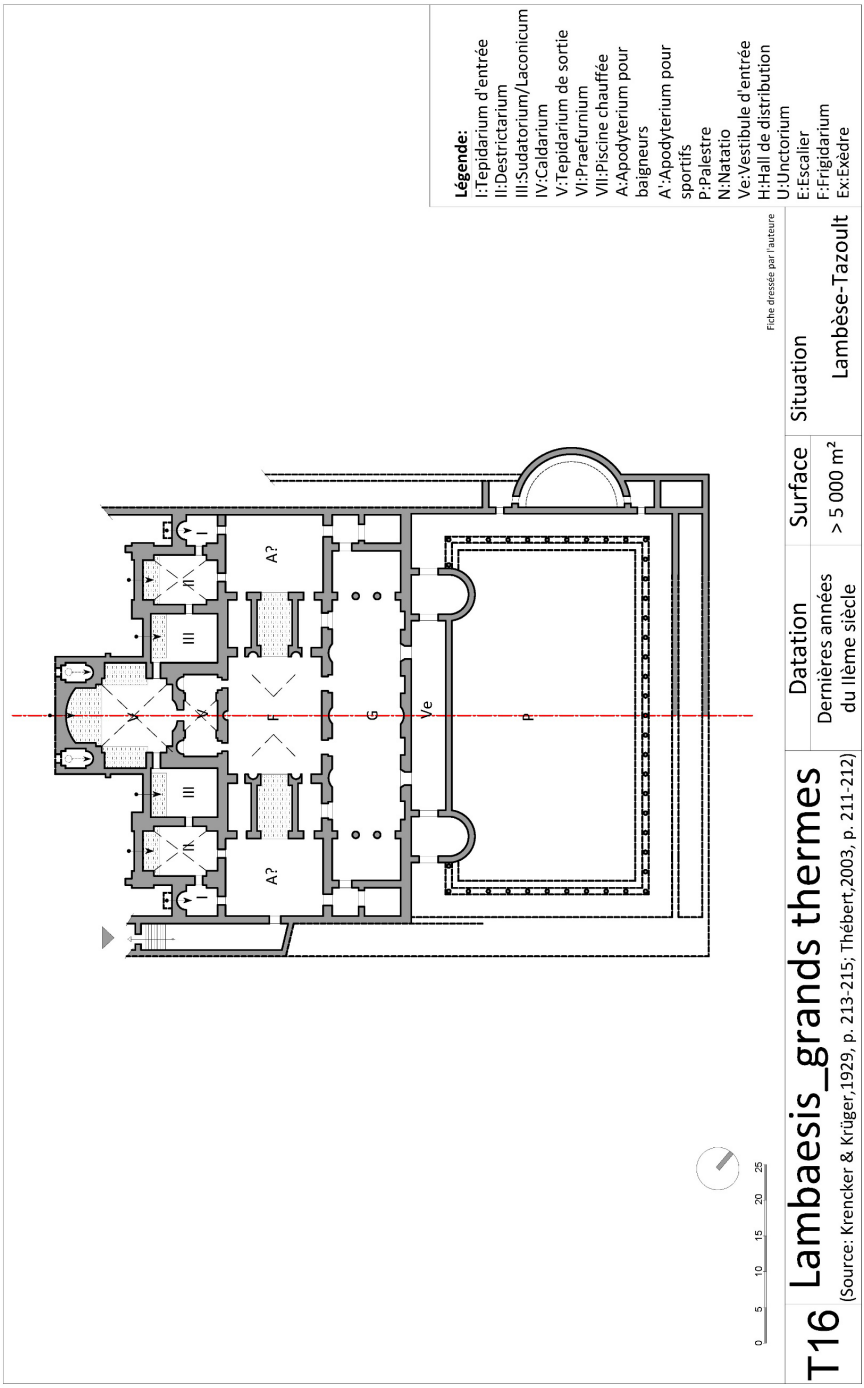


Fig. 237 – Fiche d'enregistrement des thermes Lambaesis : grands thermes. (établie par l'auteure)

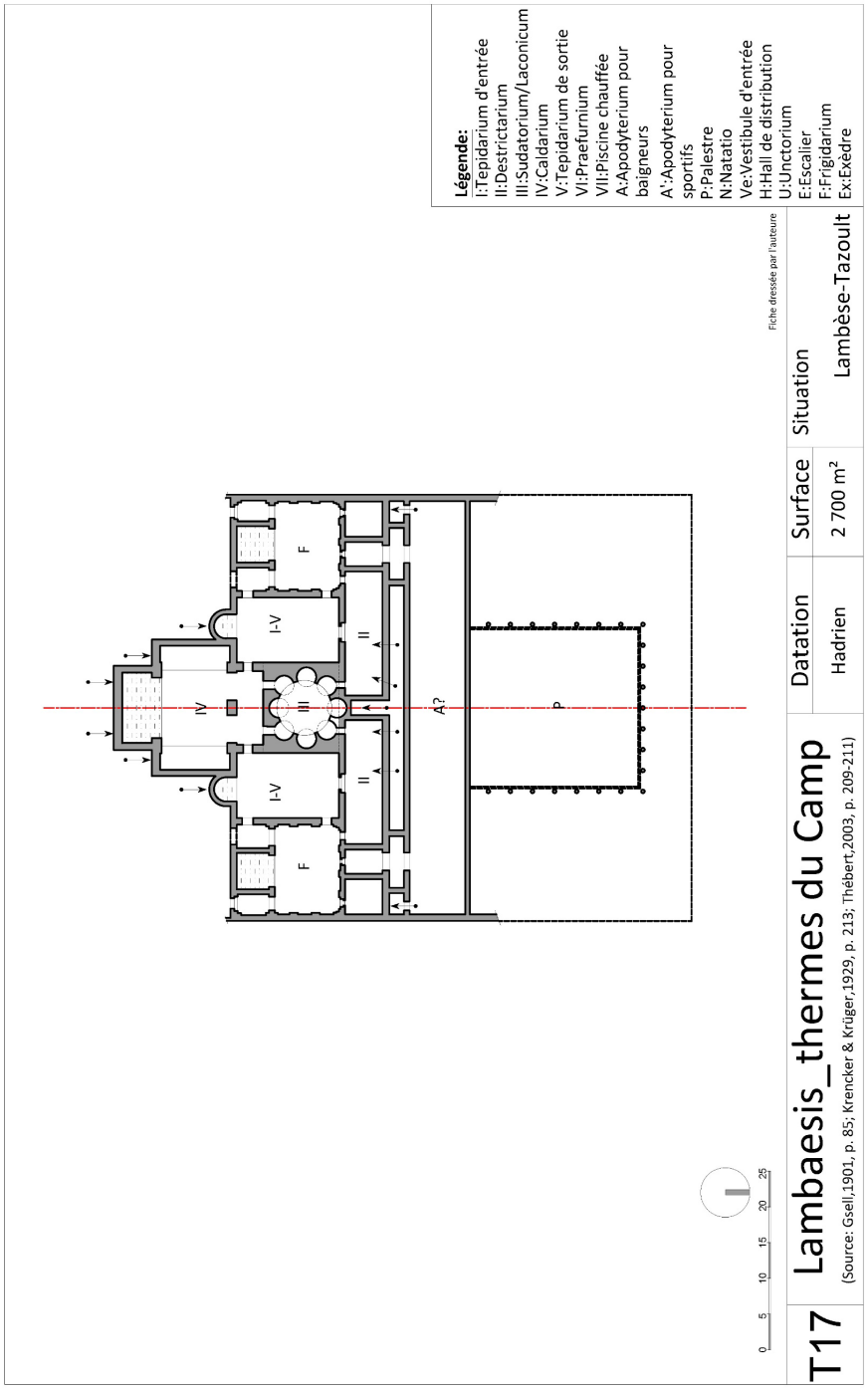


Fig. 238 – Fiche d'enregistrement des thermes Lambaesis : thermes du Camp. (établie par l'auteure)

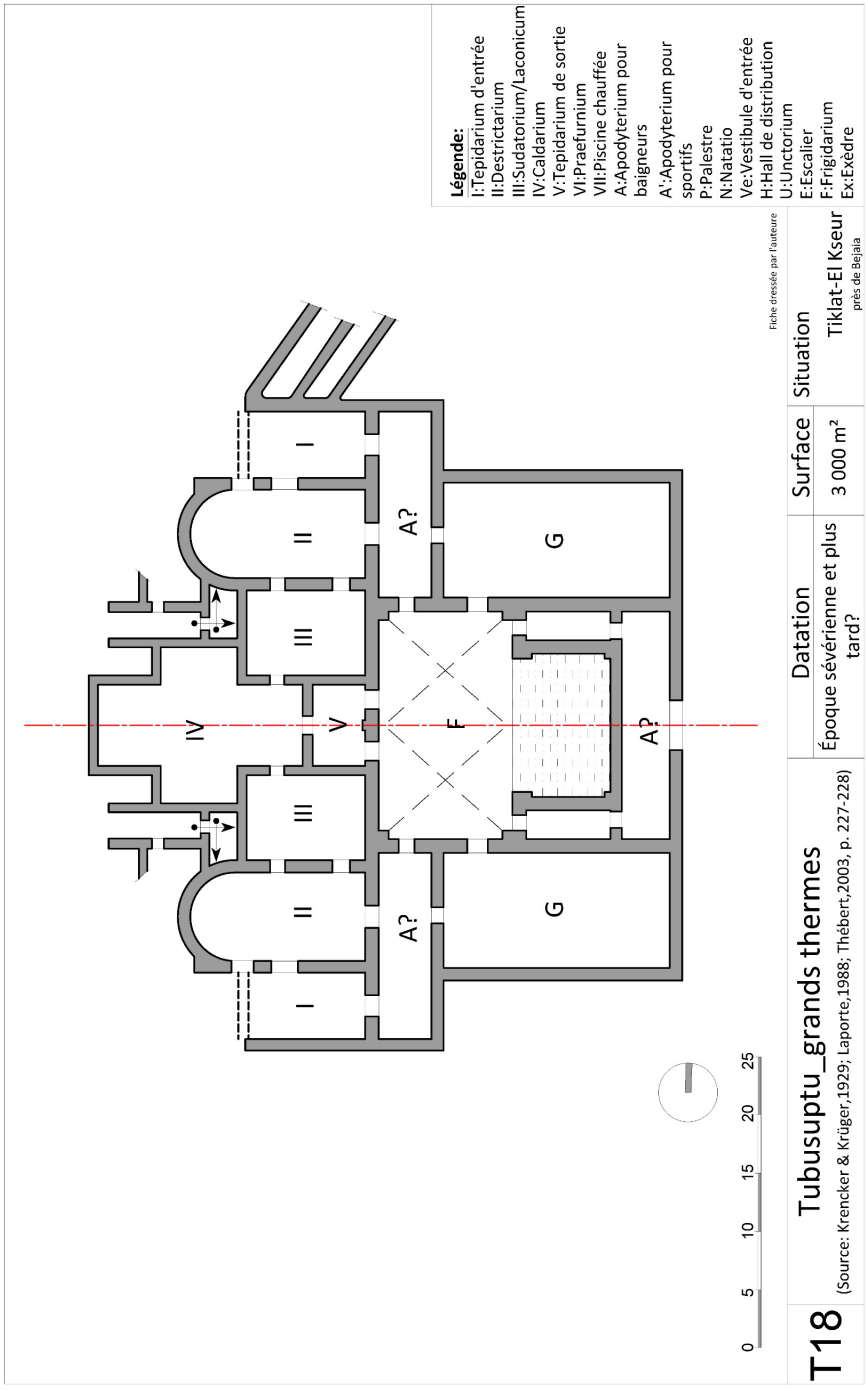


Fig. 239 – Fiche d'enregistrement des thermes Tubusuptu : grands thermes. (établie par l'auteure)

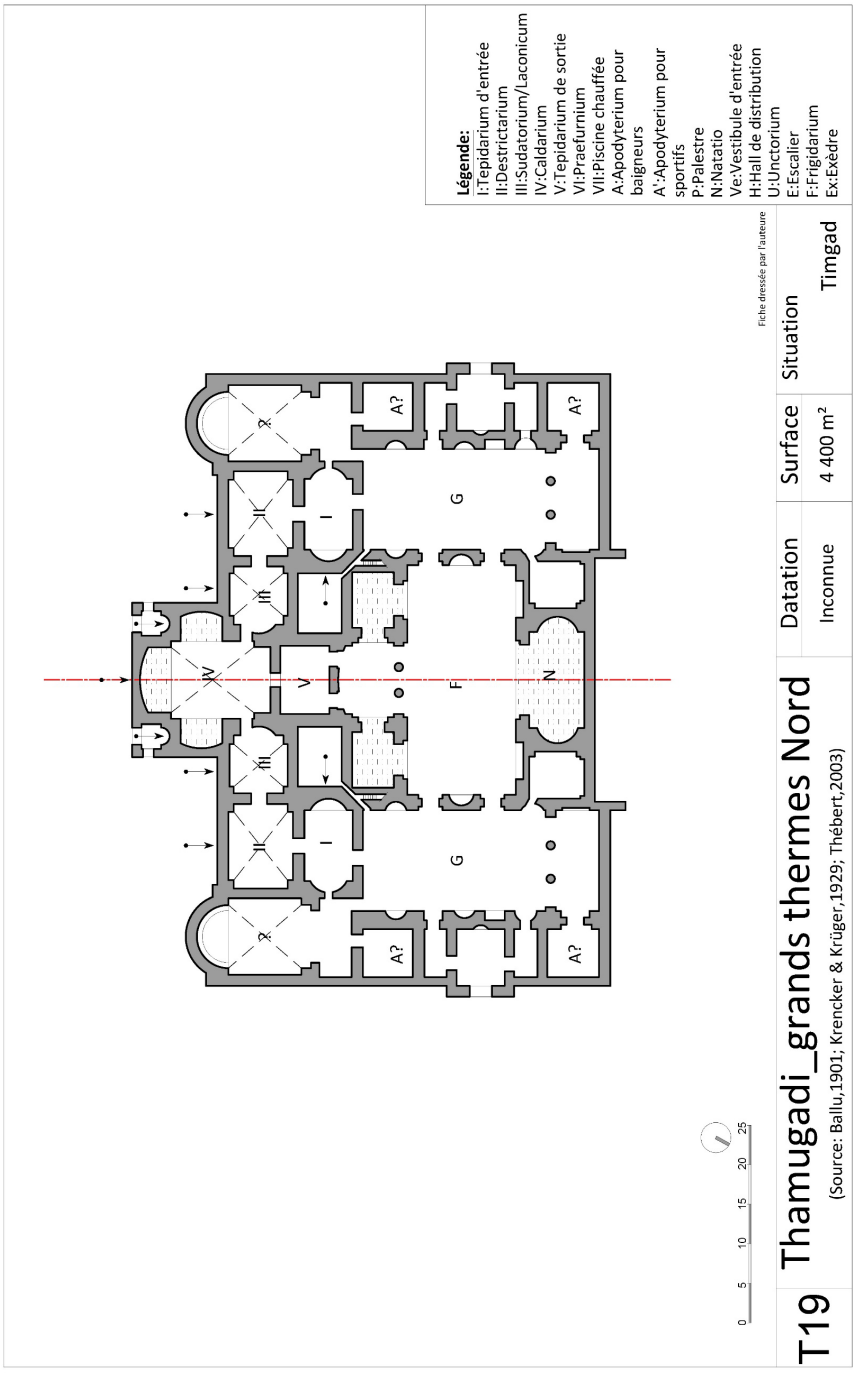


Fig. 240 – Fiche d'enregistrement des thermes Thamugadi : grands thermes Nord. (établie par l'auteure)

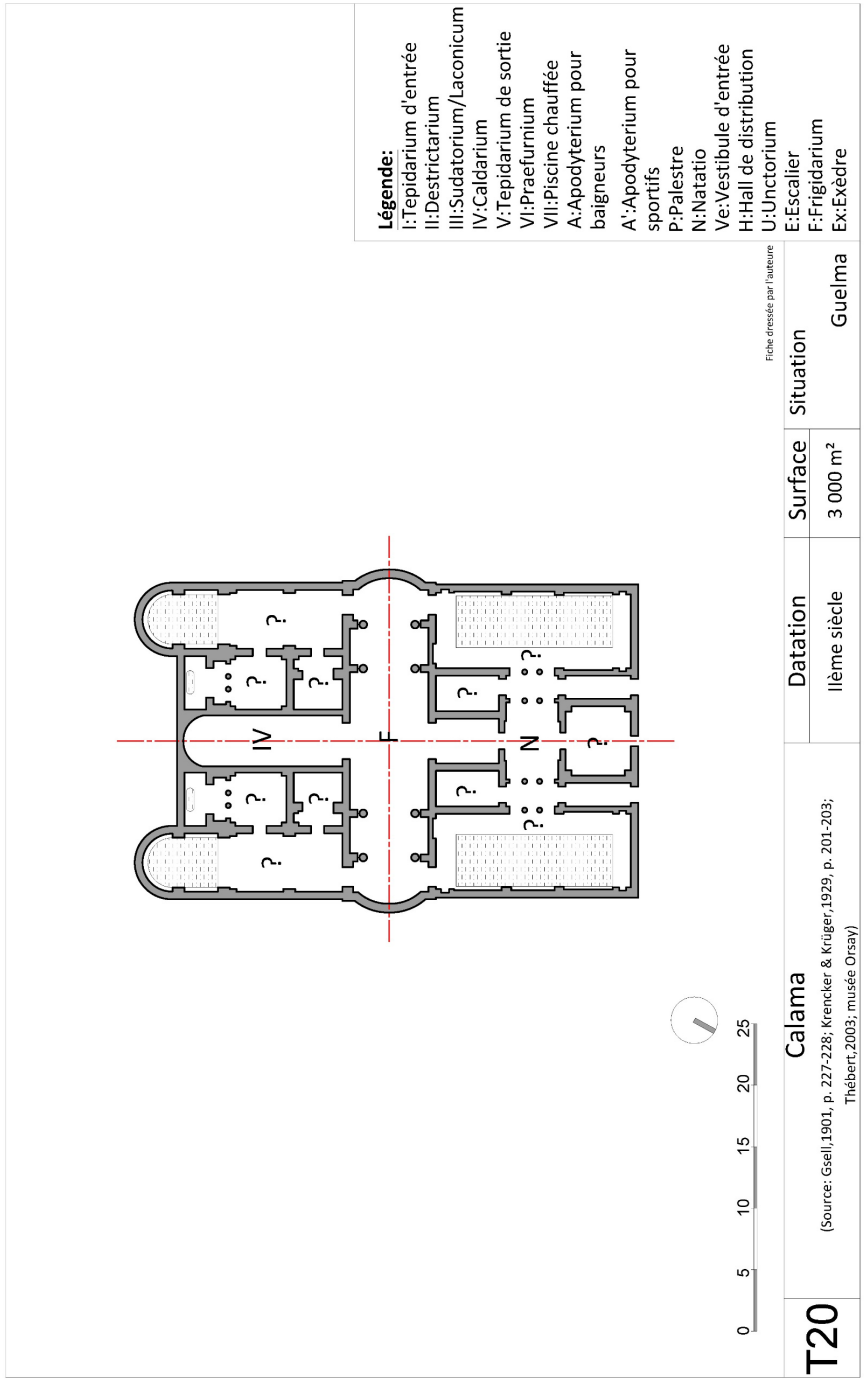


Fig. 241 – Fiche d'enregistrement des thermes Calama. (établie par l'auteure)

	«A.Berthier, Tiddis, Alger, 1951, plan n° 5. F. Yegül (Baths and bathing, p. 186) considère que cet édifice, qui n'a pas été fouillé, relève bel et bien du type impérial. On peut penser qu'il a recueilli des données sur place car le plan général du site publié par A. Berthier ne montre guère que deux piscines symétriques donnant sur une salle dont on ignore les limites. Ces données sont clairement insuffisantes pour déterminer la catégorie à laquelle appartient le bâtiment. »(*) (*)THEBERT Yvon, « Thermes romains d'Afrique du Nord et leur contexte Méditerranéen, Etudes d'Histoire et d'archéologie », extrait à partir de la page 290.			Les fouilles sont incomplètes. Nous ne disposons pas de documents graphiques adéquats.
			Fiche dressée par l'auteure	
T21	Tiddis (Source: Thébert,2003; Filah & Amrous,2021)	Datation Inconnue	Surface Inconnue	Situation -

Fig. 242 – Fiche d'enregistrement des thermes Tiddis. (établie par l'auteure)

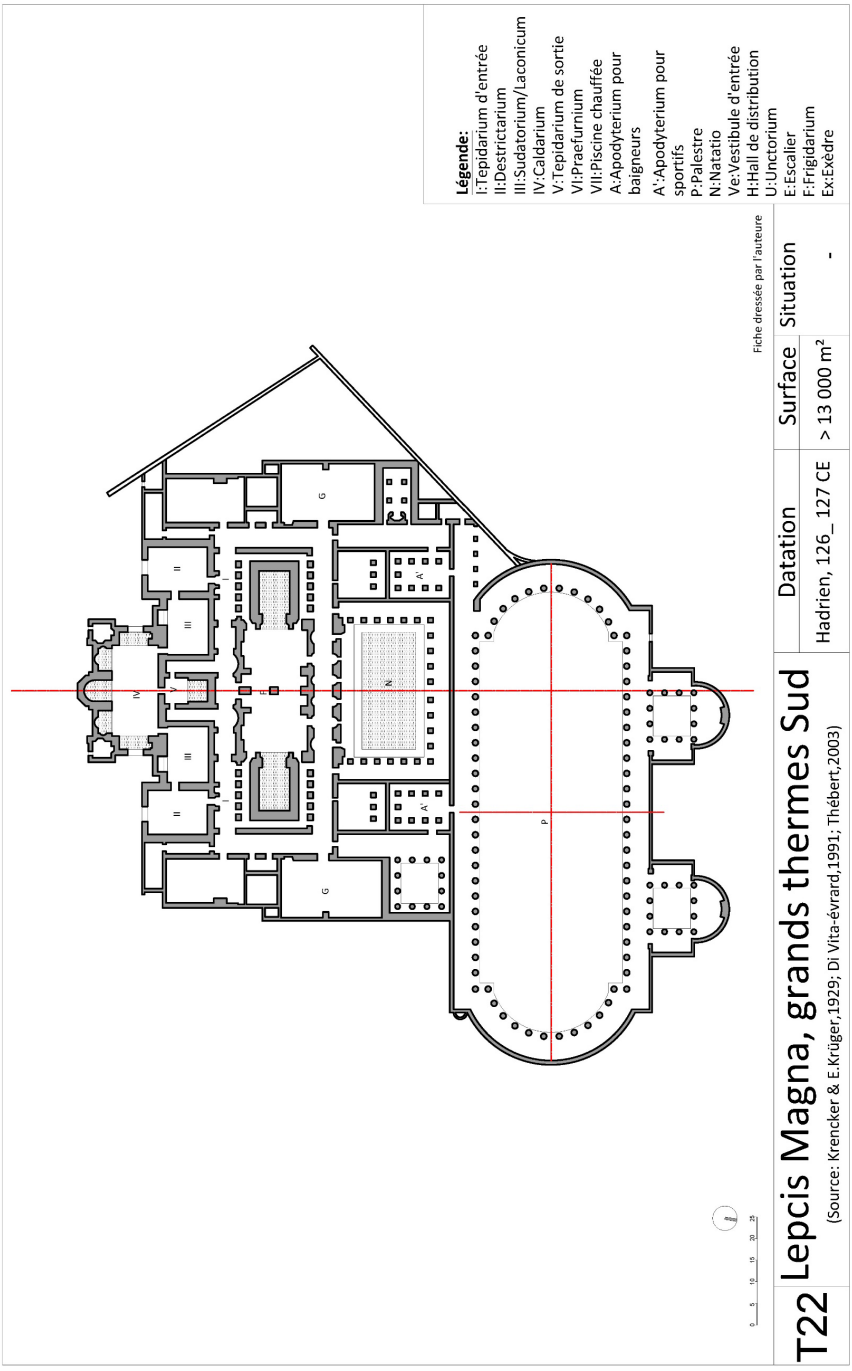


Fig. 243 – Fiche d'enregistrement des thermes Lepcis Magna : grands thermes Sud. (établie par l'auteure)

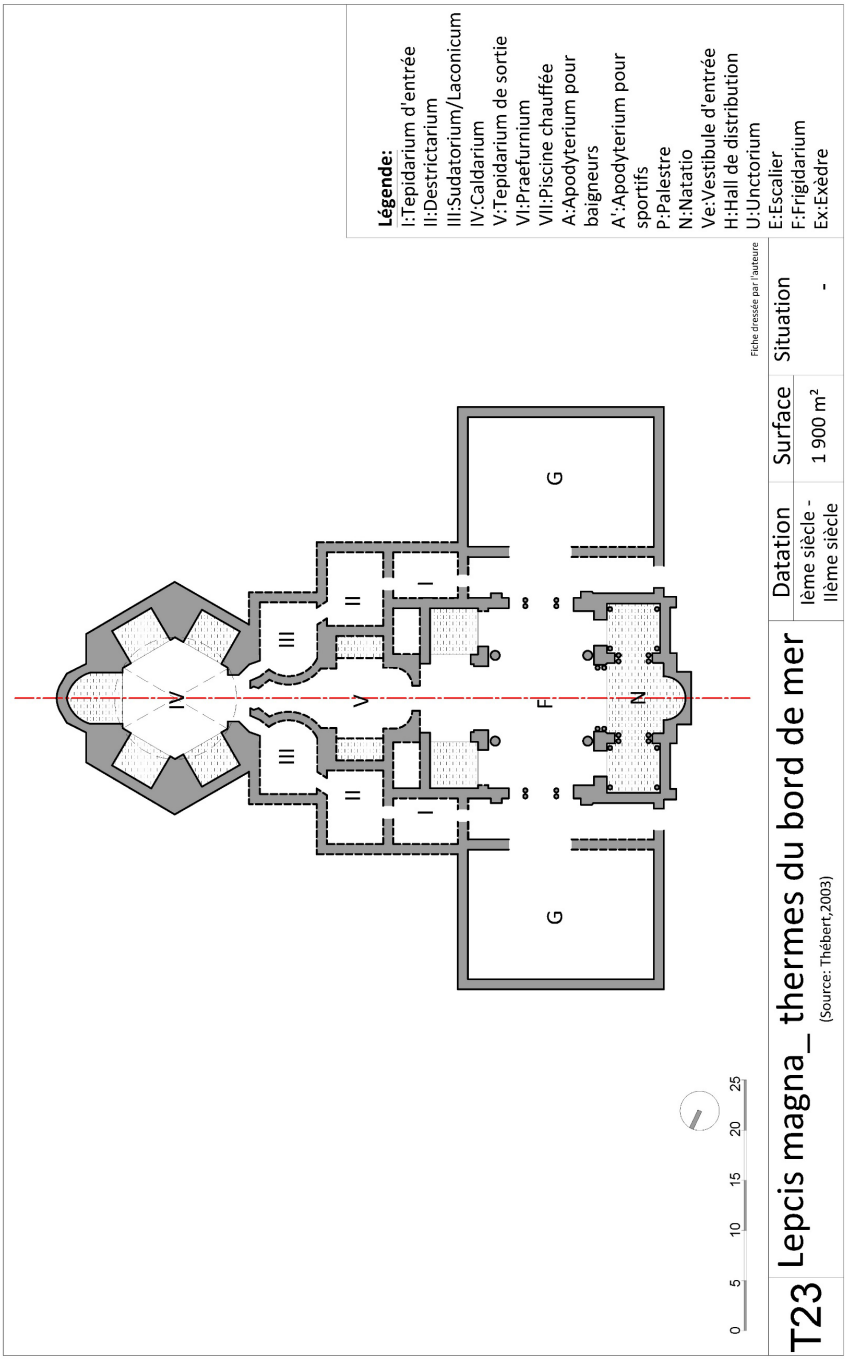


Fig. 244 – Fiche d'enregistrement des thermes Lepcis Magna : thermes du bord de mer. (établie par l'auteure)

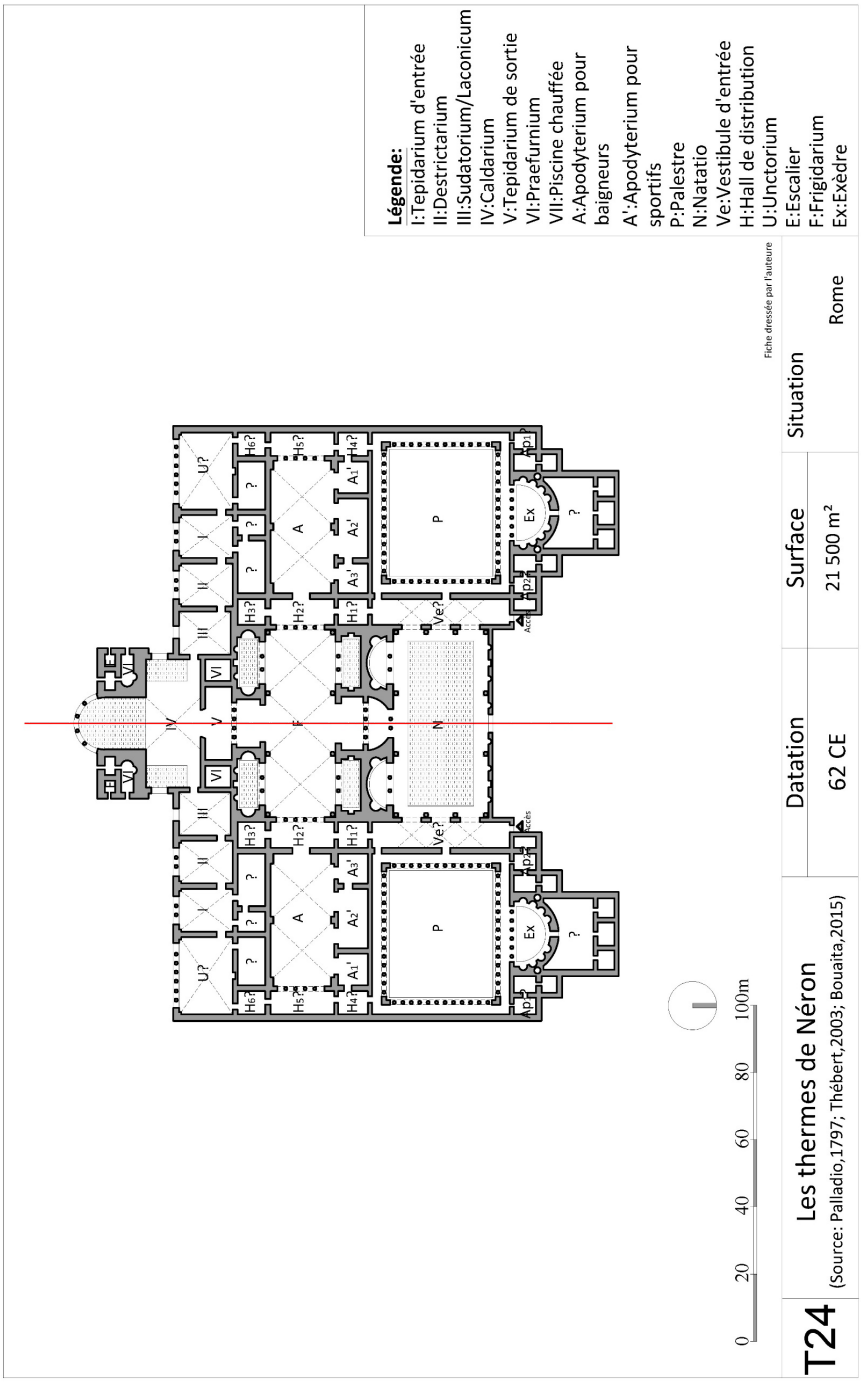


Fig. 245 – Fiche d'enregistrement des thermes de Néron. (établie par l'auteure)

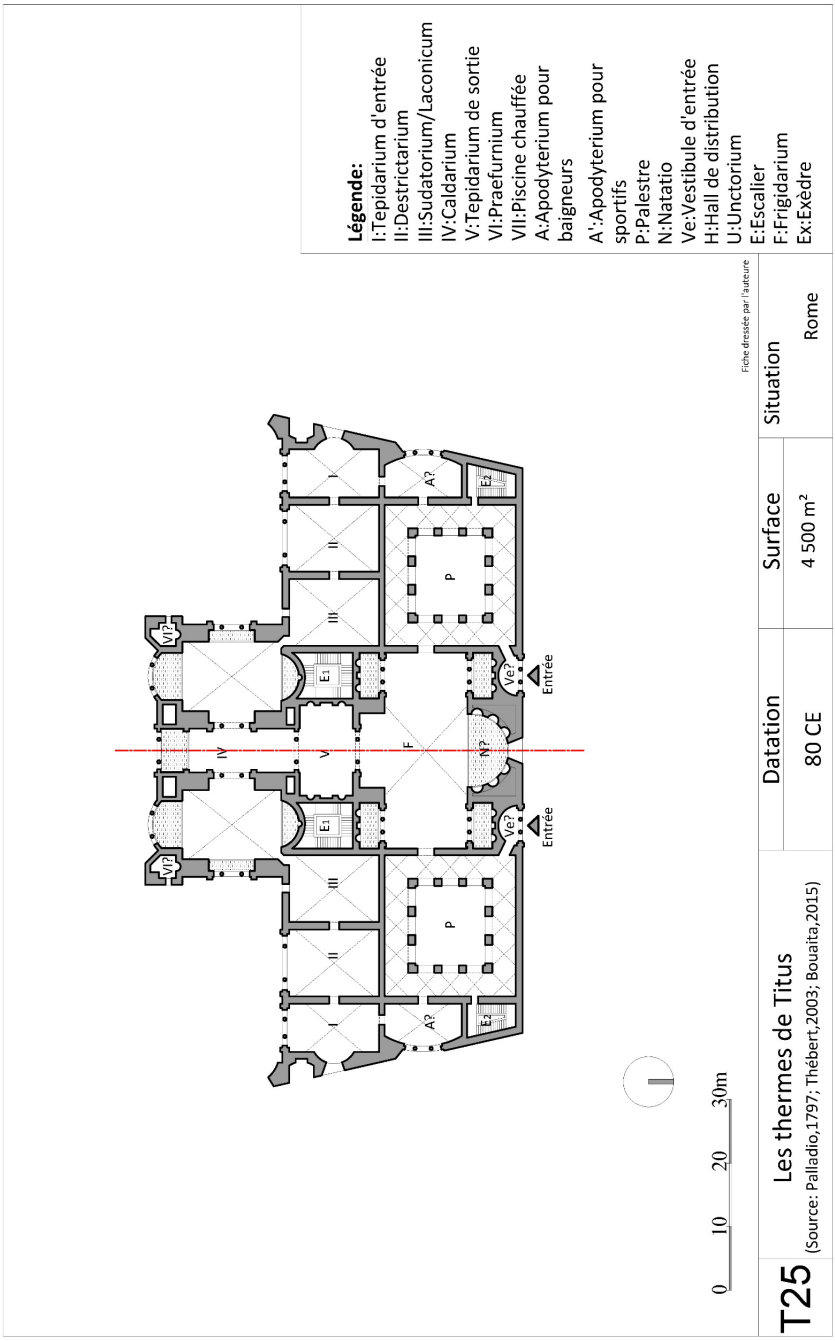


Fig. 246 – Fiche d'enregistrement des thermes de Titus. (établie par l'auteure)

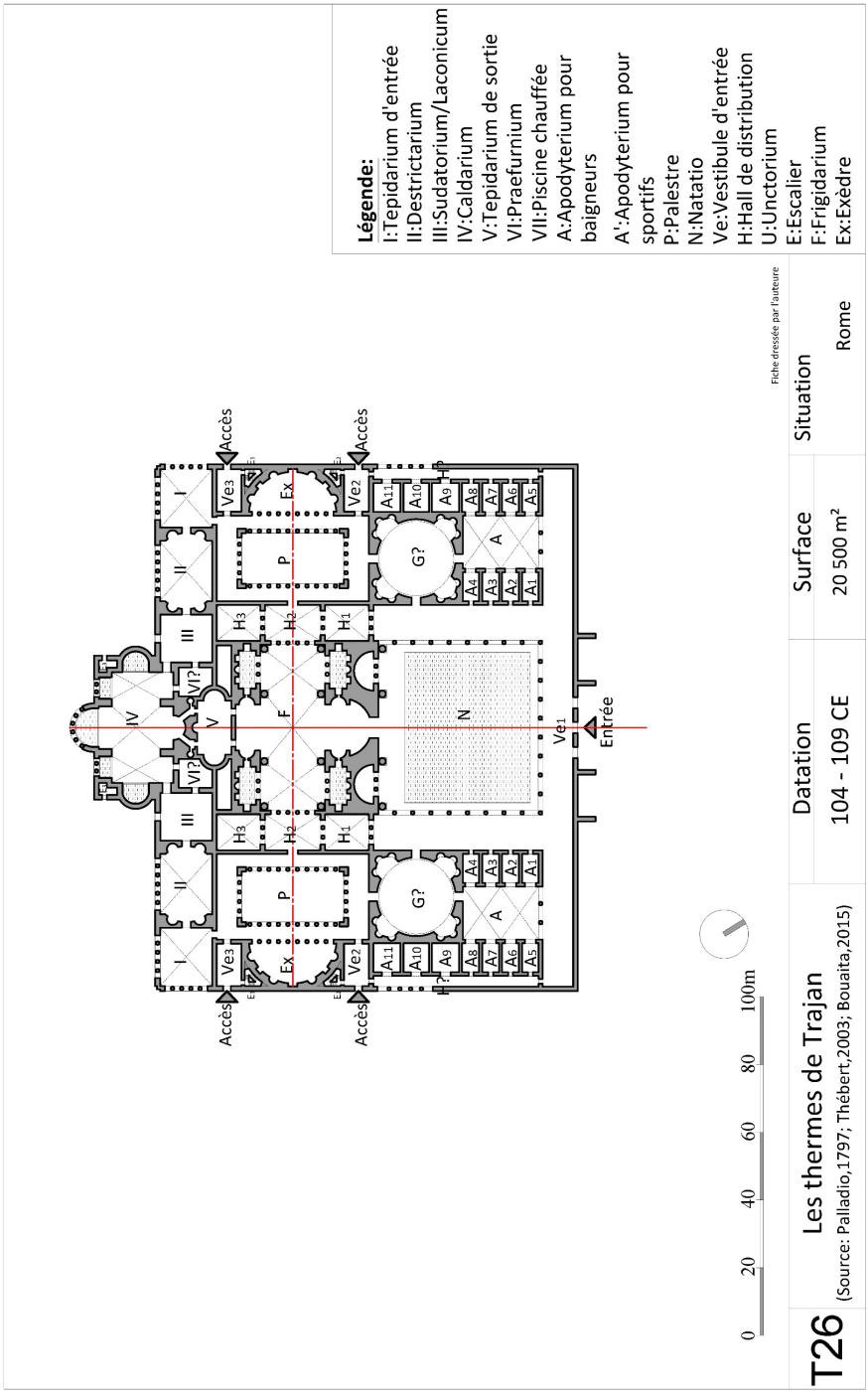


Fig. 247 – Fiche d'enregistrement des thermes de Trajan. (établie par l'auteure)

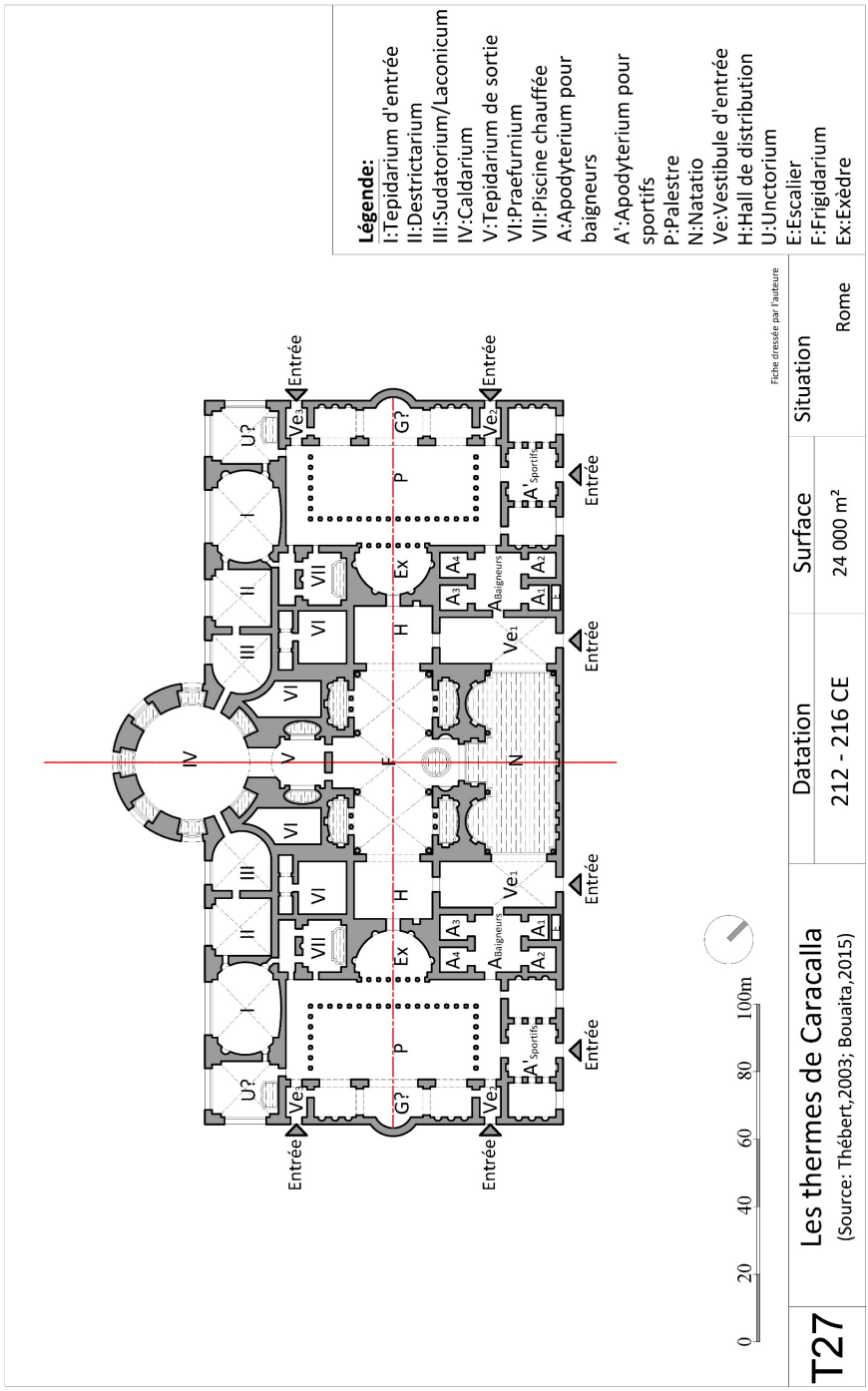


Fig. 248 – Fiche d'enregistrement des thermes de Caracalla. (établie par l'auteure)

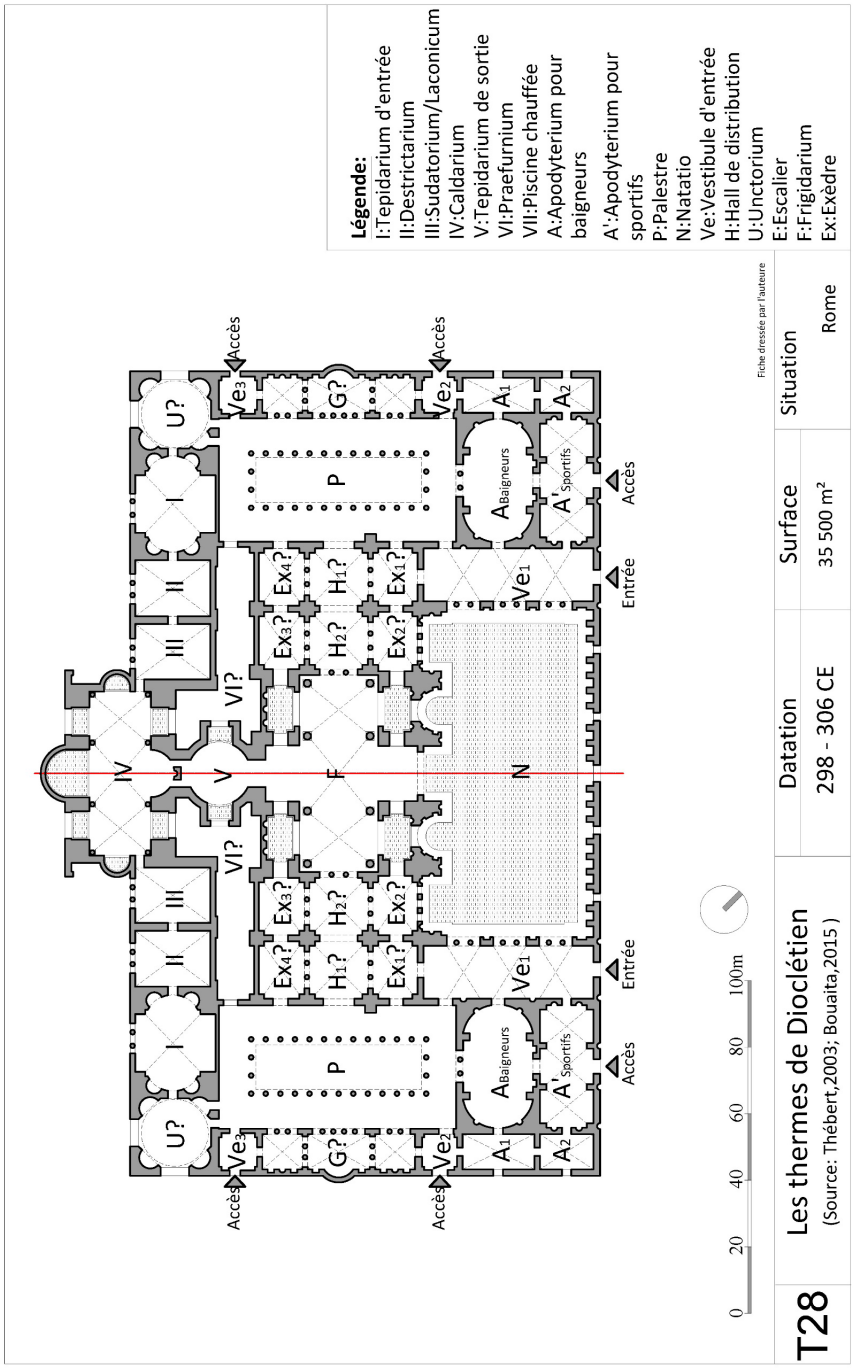


Fig. 249 – Fiche d'enregistrement des thermes de Dioclétien. (établie par l'auteure)

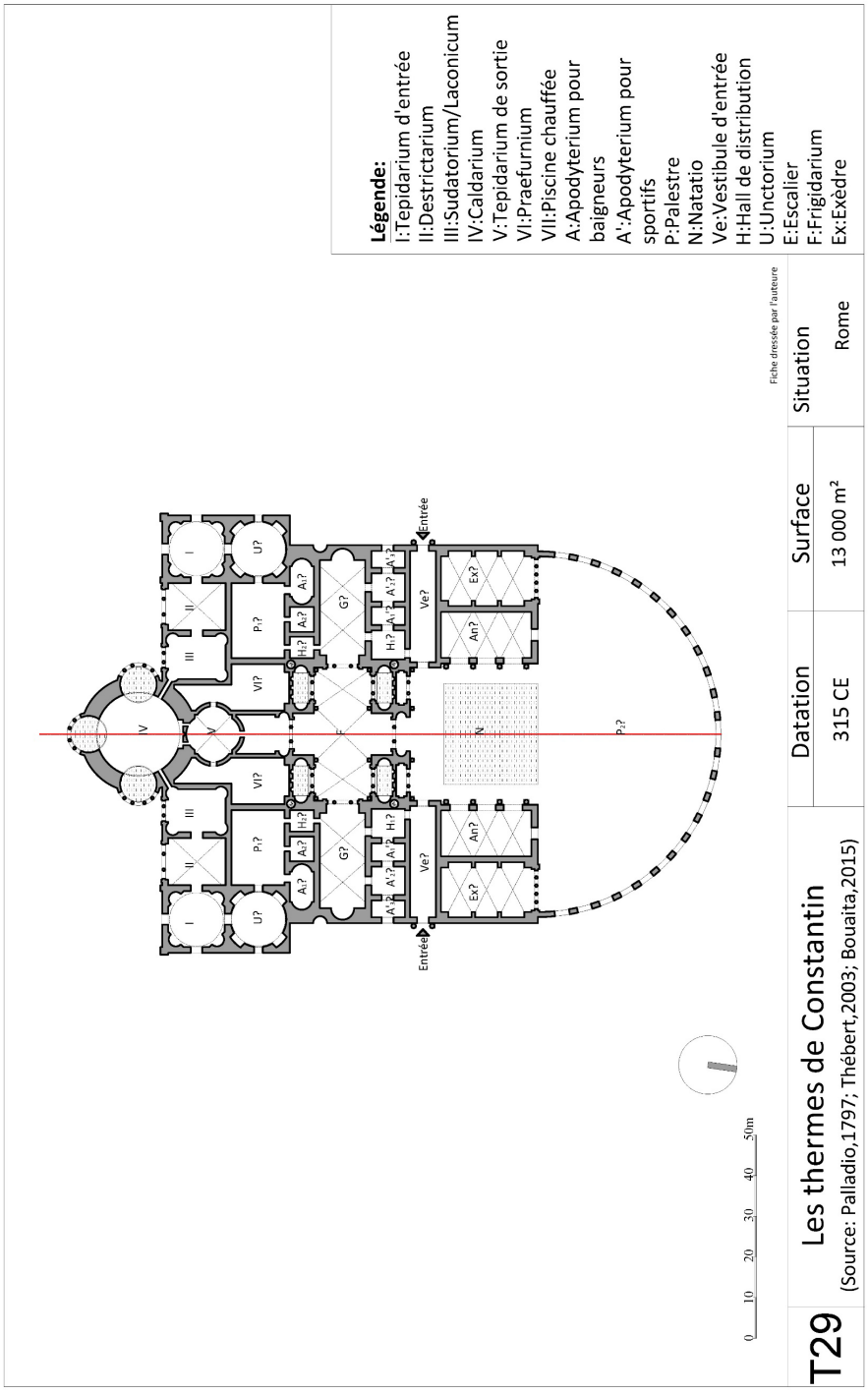


Fig. 250 – Fiche d'enregistrement des thermes de Constantin. (établie par l'auteure)

Plans restitués dans la littérature scientifique

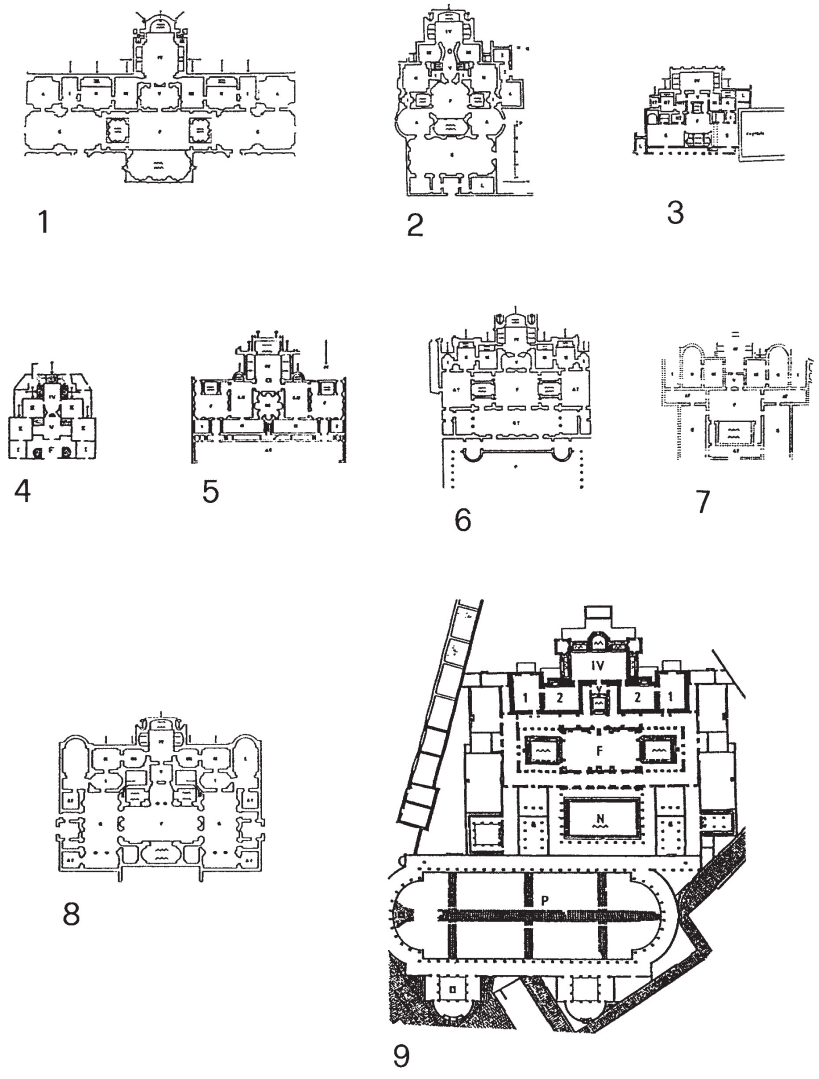


Fig. 251 – Plans des thermes impériaux romains en Algérie et Libye. Pl. CLV - Maghreb, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. 1 - Caesarea. 2 - Cuicul, grands thermes Sud. 3 - Cuicul, thermes du Capitole. 4 - Hippo Regius, grands thermes Sud. 5 - Lambaesis, thermes du camp. 6 - Lambaesis, grands thermes. 7 - Tubusuptu. 8 - Thamugadi, grands thermes Nord. 9 - Lepcis Magna, restitution de l'état originel hadrianéen, d'après un fond de plan dû à R. Bartoccini, Africa italiana, 4. (Thébert, 2003)

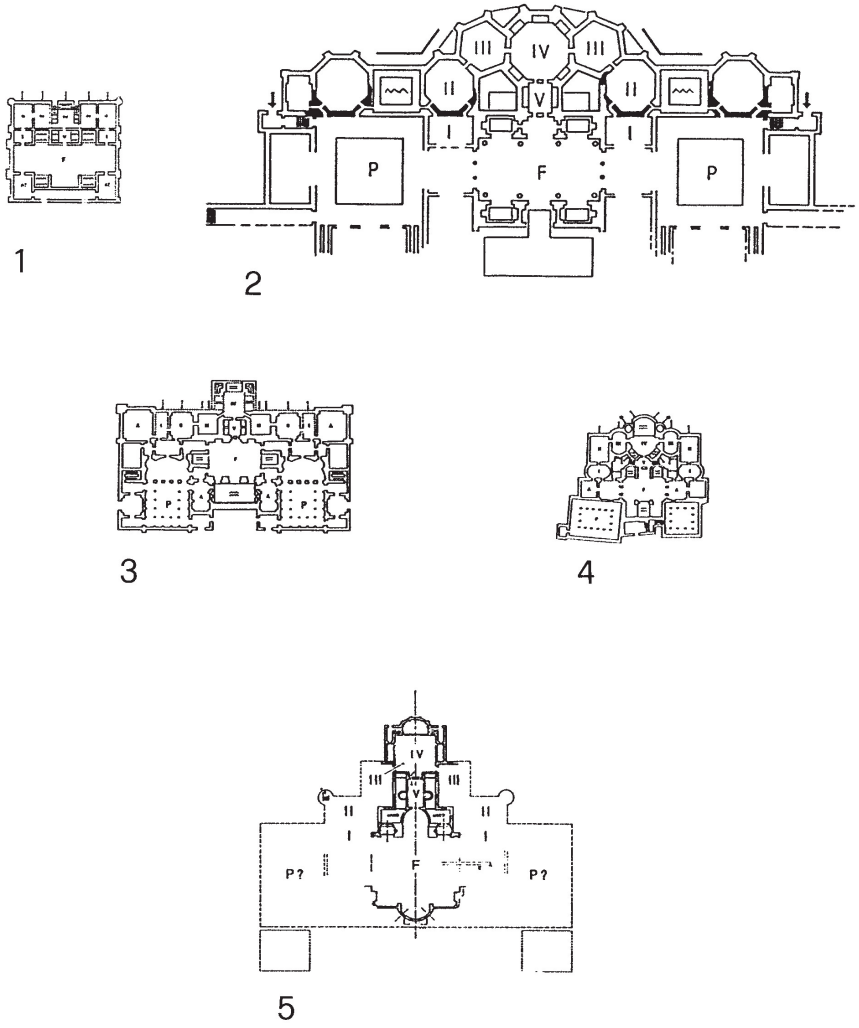


Fig. 252 – Plans des thermes impériaux romains en Tunisie. Pl. CLIV - Maghreb, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Comme pour Rome, mais contrairement à l'Asie, les plans ne comportent que le bloc balnéaire. Nous renvoyons aux planches du catalogue pour les éventuelles annexes, en particulier les palestres, ainsi que pour une lecture plus facile des annotations portées sur les plans. De fait, ceux-ci ne sont que les schémas proposés dans le cadre des diverses notices et mis à la même échelle que les plans de Rome et d'Asie afin de faciliter les comparaisons. Nous avons ajouté les thermes de Lepcis Magna, avec leur palestre. 1 - El Knissia. 2 - Karthago, grands thermes d'Antonin. 3 - Mactaris, grands thermes Est. 4 - Thugga, thermes liciniens. 5 - Utica, grands thermes. (Thébert, 2003)

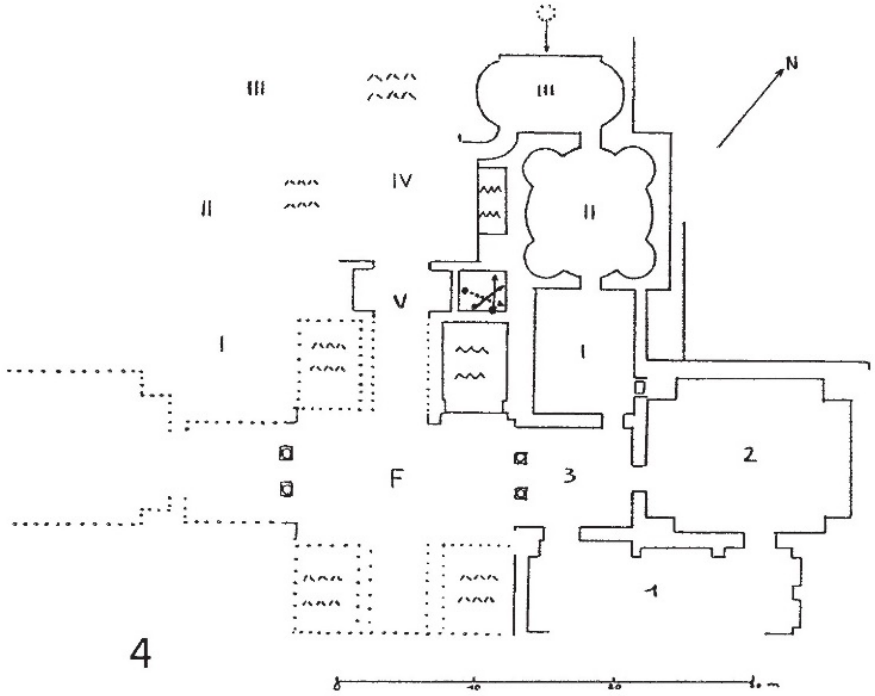


Fig. 253 – Plan de Thugga, thermes Ain Doura, en Tunisie. Schéma partiellement restitué d'après M. Bouhlila, thèse, Paris IV, 1987, et l'état des lieux. Éch. 1 :500. (Thébert, 2003)

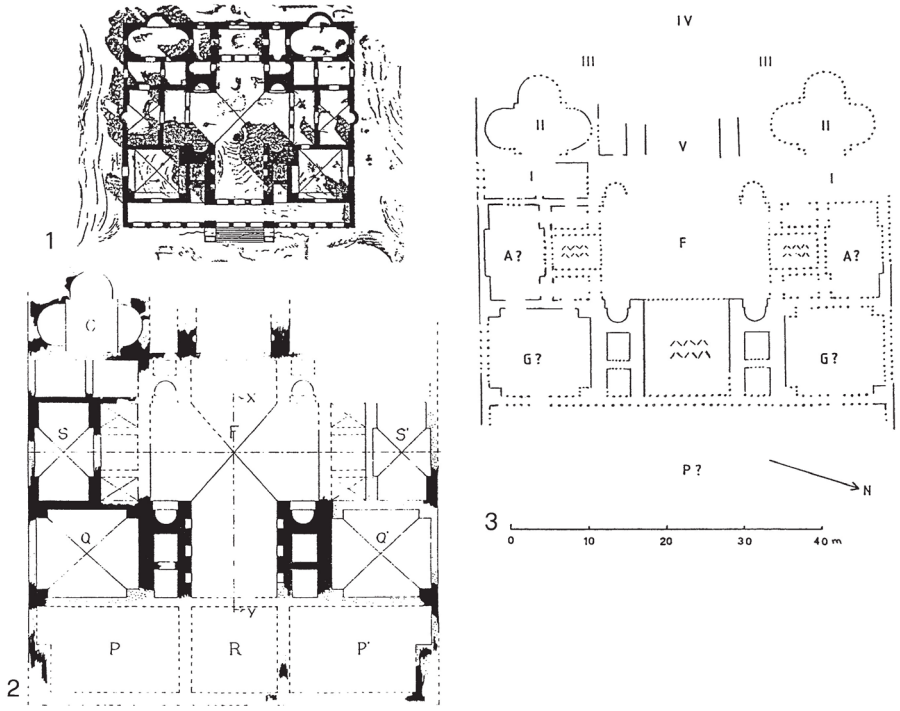


Fig. 254 – Plan de Thelepte, grands thermes, en Tunisie. Pl. LV – Thelepte, grands thermes. 1 - H. Saladin, AMS, 3e sér., 13, 1887, p. 117, fig. 206. 2 - Krencker, Trierer Kaiserthermen, p. 200, fig. 266. Éch. 1 :500. 3 - Schéma restitué d'après les études antérieures et l'état des lieux. Éch. 1 :500. (Thébert, 2003)

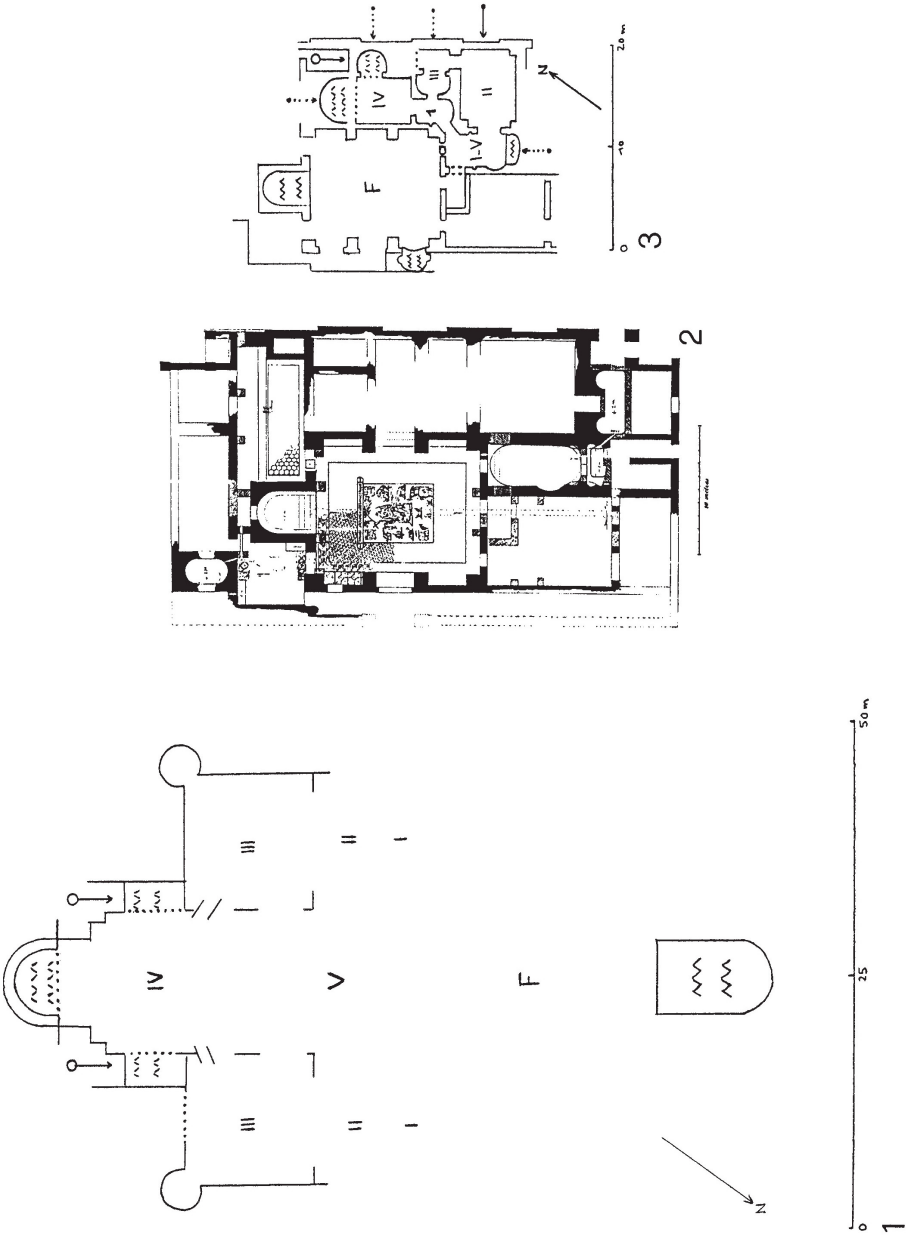


Fig. 255 – Plan de Uthina, grands thermes, en Tunisie. Pl. LXVIII – Uthina, grands thermes. 1 - Schéma d'après les études antérieures et l'état des lieux. Éch. 1 :500. Uthina, thermes des Laberii. 2 - Plan E. Sadoux dans Mts Piot, 3, 1896, p. 216, fig. 11. Éch. 1 :400. 3 - Schéma d'après les études antérieures et l'état des lieux. Éch. 1 :500. (Thébert, 2003)

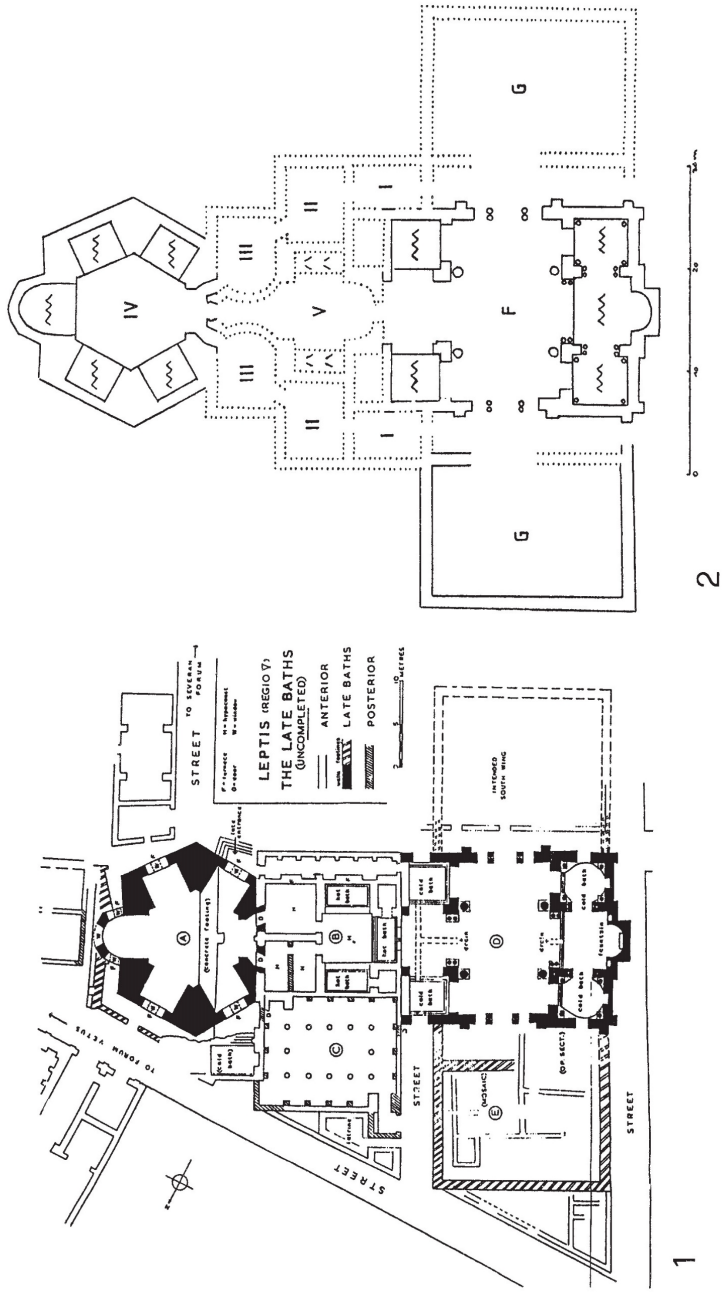


Fig. 256 – Plan des thermes Lepcis magna thermes du bord de mer grands thermes. Pl. CXLIX – Lepcis Magna, thermes du bord de mer. 1 - R. Goodchild, The unfinished « Imperial » baths of Leptis Magna, dans Libya antiqua, 2, 1965, pl. VIII. Éch. 1 :600. 2 - Restitution du projet de transformation des thermes du bord de mer en thermes symétriques de type impérial. Éch. 1 :500.

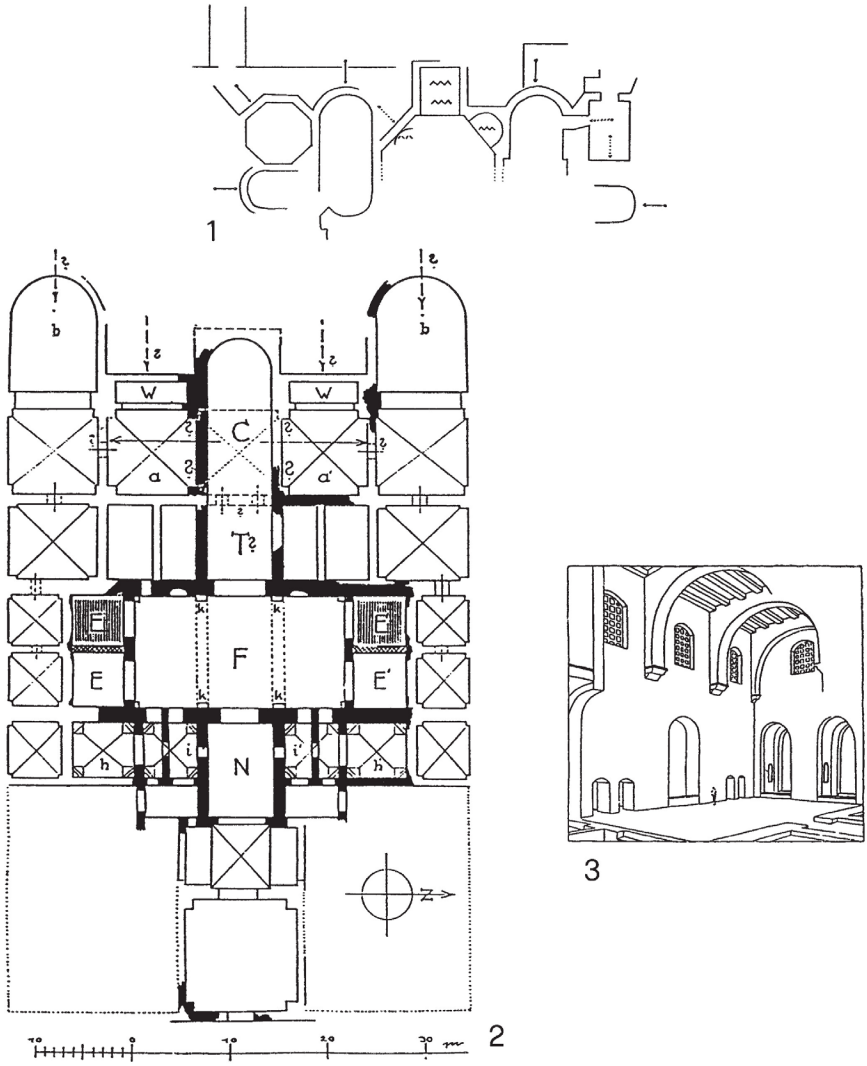


Fig. 257 – Plans grands thermes, en Algérie. Pl. CXLVII - 1 - Schéma du secteur chauffé des thermes de Membressa (sans échelle). Le Nord est approximativement en haut. 2 - Krencker, Trierer Kaiserthermen, p. 203, fig. 272 : thermes de Calama. Éch. 1 :500. 3 - Id., ibid., restitution du frigidarium des thermes de Calama.

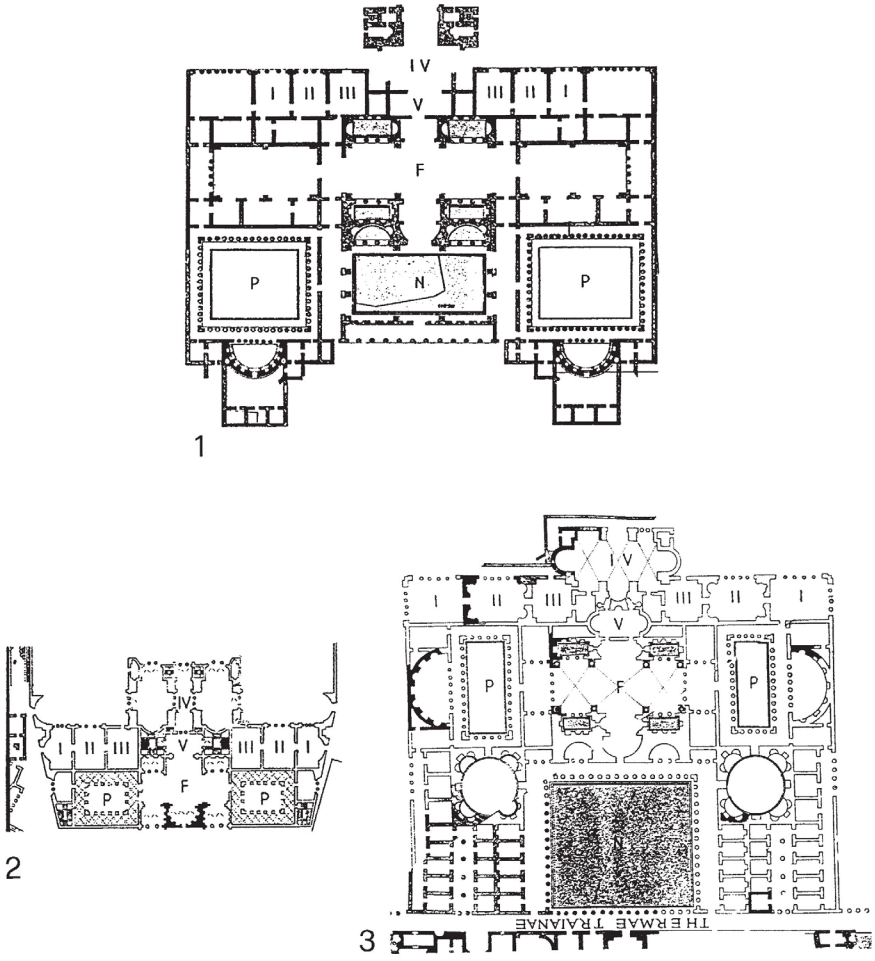


Fig. 258 – Plans des thermes impériaux à Rome : Néron, Titus, Trajan. Pl. CL - Rome, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Les fonds de plan sont tirés de la FUR et ne comportent que le bloc balnéaire. Nous indiquons la figure de D. Krencker (Trierer Kaiserthermen) sur laquelle sont portées ses propositions de lecture des différentes salles. 1 - Thermes de Néron (Krencker, fig. 394a = ici pl. XXIX-1). 2 - Thermes de Titus (Krencker, fig. 396a, qui considère les palestres comme des vestiaires couverts : cf. ici pl. XXX-2). 3 - Thermes de Trajan (Krencker, fig. 397). Nous avons supprimé les piscines indûment restituées par la FUR dans les exèdres flanquant les palestres ainsi que dans les deux rotondes à absides rayonnantes situées de part et d'autre de la natatio. Sur l'identification traditionnelle, et à notre avis indubitable, des palestres, dans ce cas comme dans celui des thermes de Caracalla et de Dioclétien, cf. IVe partie, chap. I, n. 58. (Thébert, 2003)

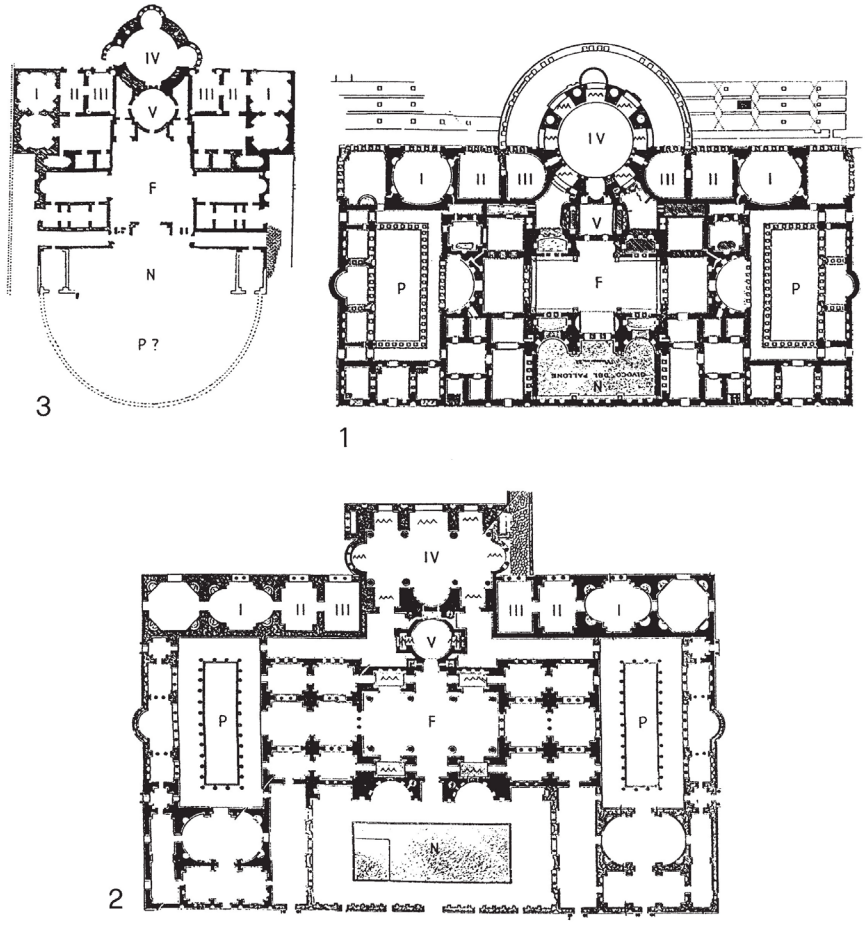


Fig. 259 – Plans des thermes impériaux à Rome : Caracalla, Dioclétien, Constantin. Pl. CLI - Rome, thermes de type impérial. Éch. 1 :2000. Les fonds de plan sont tirés de la FUR et ne comportent que le bloc balnéaire. Nous indiquons la figure de D. Krencker (Trierer Kaiserthermen) sur laquelle sont portées ses propositions de lecture des différentes salles. 1 - Thermes de Caracalla (Krencker, fig. 400). 2 - Thermes de Dioclétien (Krencker, fig. 412). 3 - Thermes de Constantin (Krencker, fig. 422b) : dans ce cas, le plan concerne l'ensemble de ce que nous connaissons de l'édifice, y compris l'espace accolé au bloc balnéaire, espace qui devait accueillir une palestre. Nous avons supprimé les bassins restitués par la FUR. (Thébert, 2003)

Fiches comparatives des thermes impériaux romains

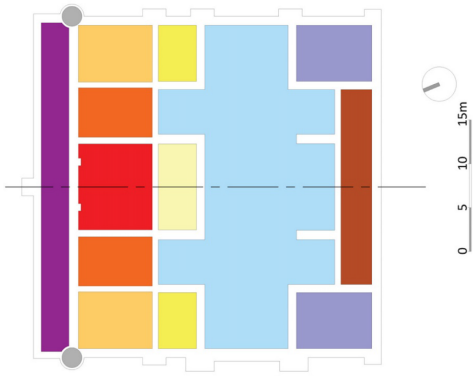
	caractéristiques du plan T1- El knissa, Sousse (Thébert, 2003, p. 136)	Interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	moyenne	conforme (toutes tailles admises)	
b	peut-être séquence axiale complète (ne présente pas du *natatio*)	absence d'un élément essentiel de la séquence canonique → séquence incomplète	
c	plan parfaitement symétrique	conforme	
d	tous les espaces présent dans le plan sont dédoublés sauf la vestibule d'entrée, et le *praefurnium*	conforme au principe général (excepté pour les espaces secondaires)	
e1	sud	proche de sud-ouest → variante proche	
e2	fidélité stricte au modèle	conforme	
e3	le *caldarium* n'est pas saillant, il suit une logique introvertie, alignée sur le reste du bâtiment	≠ modèle en saillie → divergence	
e4	le plan rectangulaire simple, avec des bassins également rectangulaires	conforme	
e5	trois	moins que dans les grands exemples (jusqu'à 7) → adaptation	
e6	fidélité inventive avec disposition orthogonale	variante proche admise par thébert	
f1	*frigidarium* de grande dimension pouvant accueillir aussi des pratiques sportives	conforme	
f2	position centrale	conforme	
f3	formule romaine de typologie de *frigidarium* est appliquée	conforme	
g1	N/A	—	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	une hypothèse : la partie nord du *frigidarium* pourrait intégrer une *natatio* (et non séparée comme Rome)	forme africaine d'adaptation → variante proche	
h2	si l'hypothèse est correcte le *natatio* sera couverte	≠ *natatio* découverte → non conforme	
i	sont rectilignes, même le *caldarium*	conforme	
j	l'axe symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	N/A	—	

Fig. 260 – Fiche comparative des thermes T1. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T3 - Mactaris : grands thermes Est, Maktar (Thébert, 2003, p. 144)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands	conforme	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	parfaitement symétrique	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante proche	
e2	fidélité inventive, et les trois salles sont précédées d'un local qui devait servir de vestiaire	variante proche	
e3	*caldarium* presque entièrement en saillie, *natatio* en retrait	conforme	
e4	plan cruciforme avec trois bassins (*solia* : bains chauds)	≠ modèle rectiligne → variante admise	
e5	trois	variante réduite	
e6	fidélité stricte au modèle (rectiligne)	conforme	
f1	vaste (244 m² hors piscines et niches)	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	solution africaine du type de *frigidarium* combiné à un *natatio*.	variante africaine (≠ formule romaine)	
g1	Hypèthre ceint de portiques	conforme (forme classique)	
g2	dédoublé	conforme	
g3	flanquant la *natatio*	conforme (type Néron)	
h1	présent intégrée au *frigidarium*	variante africaine, admise	
h2	couverte	≠ modèle à ciel ouvert	
i	rectilignes	conforme	
j	l'axe symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	sans enclos	≠ modèle canonique	

Fig. 261 – Fiche comparative des thermes T3. (établie par l'auteure)

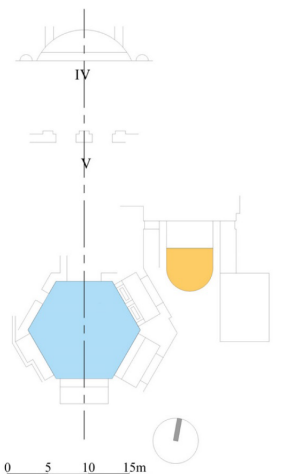
	caractéristiques du plan T4 – Sicca Veneria : grands thermes, El Kef (Thébert, 2003, p. 148)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	moyens ou grands thermes	conforme (petit/moyen/grand admis)	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	symétrie probable mais batiment partiellement dégagé	variante incertaine → prudence	
d	présent (au moins le sudatorium est dédoublé identifiée)	dédoublement partiel, incertain pour les autres → variante	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante	
e2	le *caldarium* est probablement précédé par les trois locaux canoniques	variante proche, probable → **0.5**	
e3	en avancée	conforme	
e4	forme mixte : deux piscines rectangulaires et une bassin semi-circulaire	≠ stricte mais admise comme variante	
e5	trois	variante réduite → **0.5**	
e6	fidélité inventive avec « Disposition en profondeur, de type pyramidal » (Thébert, 2003, p. 311)	variante inventive (africaine)	
f1	vaste (présence d'une grande piscine hexagonale)	conforme (même si forme rare)	
f2	centrale, en position opposée au caldarium	conforme	
f3	1 piscine hexagonale attestée (peut être plus)	variante africaine, réduction → **0.5**	
g1	N/A	—	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	présent, intégré au *frigidarium*	variante africaine → admise	
h2	couverte (voûte en abside sur bassin axial)	≠ modèle à ciel ouvert	
i	N/A (le contour du plan n'est pas défini)	information manquante → **N/A**	
j	N/A	—	
k	N/A	—	

Fig. 262 – Fiche comparative des thermes T4. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T5 – Thelepte : grands thermes, Kasserine (Thébert, 2003, p. 163)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	probablement séquence axiale complète (restitution hypothétique)	incertaine mais plausible → variante	
c	plan probablement symétrique (selon l'hypothèse de Krencker)	hypothèse partielle, admise comme variante	
d	partiellement attesté, probablement tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	variante admissible	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante proche	
e2	le *caldarium* est systématiquement précédé par les trois locaux canoniques	conforme	
e3	N/A	—	
e4	trilobée (forme d'un *destrictarium* selon hypothèse, mais *caldarium* possible)	forme divergente → non conforme	
e5	N/A	—	
e6	fidélité inventive avec « disposition en profondeur, de type pyramidal » (Thébert, 2003, p. 311)	fidélité inventive	
f1	vaste (environ 270 m² hors piscines et niches)	conforme	
f2	centrale avec bassins latéraux et ouverture vers l'est	conforme	
f3	probablement trois (deux latéraux et un *natatio* à l'est)	variante conforme	
g1	N/A	—	
g2	probable (non fouillée)	incertitude → N/A	
g3	probablement au nord et au sud dans les espaces symétriques	variante probable mais non documentée	
h1	présent intégré au *frigidarium*	variante africaine → admise	
h2	couverte	≠ ciel ouvert → non conforme	
i	rectilignes sauf la façade ouest qui n'est pas attestée	conforme	
j	L'axe symétrie et le grand axe se coïncident	incertaine mais plausible → variante	
k	Absence de données sur éventuel enclos	hypothèse partielle, admise comme variante	

Fig. 263 – Fiche comparative des thermes T5. (établie par l'auteure)

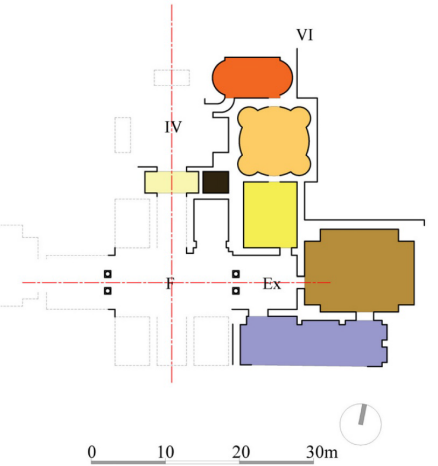
	caractéristiques du plan T6 – Thugga : thermes d'Ain Doura, Dougga (Thébert, 2003, p. 175)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	présente (restitué sur modèle symétrique)	présente mais hypothétique → variante proche	
c	symétrie très probable	partiellement documentée → variante	
d	Il parait un dédoublement des espaces présents sur plan sauf le *caldarium* et *frigidarium*.	conforme au principe général	
e1	nord	≠ sud-ouest → variante	
e2	le *caldarium* est systématiquement précédé par les trois locaux canoniques	conforme	
e3	le *caldarium* n'est pas saillant, il suit une logique introvertie.	≠ modèle canonique → non conforme	
e4	le *caldarium* n'est pas encore fouillé	information manquante	
e5	trois	variante réduite	
e6	fidélité inventive avec disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	vaste (plusieurs piscines identifiées ou restituées)	conforme	
f2	centrale avec extension vers zones latérales et sud	conforme	
f3	formule romaine de typologie de frigidarium est voisine	variante proche	
g1	N/A	—	
g2	probable (gymnase identifié, hypothèse d'une ou deux palestres)	incertain → N/A	
g3	position incertaine, peut etre Est ou Ouest du frigidarium	non documentée	
h1	présente	conforme	
h2	probablement couverte	≠ modèle découvert	
i	probablement rectilignes	variante admissible	
j	probablement l'axe symétrie et le grand axe se coïncident	variante proche	
k	probablement sans enclos	≠ modèle canonique	

Fig. 264 – Fiche comparative des thermes T6. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T7 – Thugga : thermes Antoniniens ou Liciniens, Dougga (Thébert, 2003, p. 176)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	de dimensions moyennes	conforme (toutes tailles admises)	
b	complète	conforme	
c	symétrique	conforme	
d	tous les espaces présentés sont dédoublés sauf la colonne vertébrale (sans *natatio*) et a vestibule d'entrée. La palestre est dédoublée mais de dimension différente.	conforme (exception secondaire admise)	
e1	sud	conforme au modèle canonique (sud-ouest ≈ sud)	
e2	le *caldarium* est précédé par les trois locaux canoniques	conforme	
e3	en avancée	conforme	
e4	forme complexe (grande piscine centrale demi circulaire + annexes)	≠ modèle rectiligne, variante	
e5	trois	variante réduite	
e6	fidélité inventive avec disposition orthogonale	variante proche	
f1	moyen (175m²)	conforme (pas d'exclusion de taille)	
f2	central avec prolongement latéral	conforme	
f3	trois	conforme (formule admise)	
g1	rectangulaire	conforme	
g2	deux différents dimensions	dédoublement présent → conforme	
g3	n'est pas dans l'axe de frigidarium	conforme (toutes tailles admises)	
h1	*natatio* absent	conforme	
h2	N/A	conforme	
i	rectiligne mais accidenté	conforme (exception secondaire admise)	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme au modèle canonique (sud-ouest ≈ sud)	
k	probablement dans un enclos	conforme	

Fig. 265 – Fiche comparative des thermes T7. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T8 – Uthina : grands thermes, Oudna (Thébert, 2003, p. 183)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	complète	conforme	
c	symétrique	conforme	
d	dédoublement de tous les espaces sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	sud-est	≠ sud-ouest → variante proche	
e2	le *caldarium* est précédé par les trois locaux canoniques	conforme	
e3	en avancée	conforme	
e4	rectangulaire + abside	conforme	
e5	trois bassins (deux rectangulaires + un semi-circulaire)	variante réduite → **0.5**	
e6	fidélité inventive avec « Disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	N/A	—	
f2	une grande piscine en abside	≠ modèle à bassins latéraux → variante	
f3	N/A	—	
g1	N/A	—	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	présent (intégré au *frigidarium*)	variante africaine conforme	
h2	couverte	≠ modèle découvert → non conforme	
i	N/A	—	
j	probablement, les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	variante proche → conforme	
k	N/A	—	

Fig. 266 – Fiche comparative des thermes T8. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T9 – Utica : grands thermes, Utique (Thébert_2003_p. 186)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	peut-être séquence axiale complète	variante proche (plan restitué, pas totalement attesté)	
c	symétrique	conforme	
d	dédoublement de tous les espaces présentés dans le plan restitué sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	sud	conforme (≈ sud-ouest)	
e2	le *caldarium* est précédé par les trois locaux canoniques	conforme	
e3	en avancée	conforme	
e4	rectangulaire + abside	conforme	
e5	trois bassins	variante réduite	
e6	fidélité inventive avec « Disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	très vaste (640m²)	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	peut-être formule romaine de typologie de frigidarium est appliquée	variante proche (mais incertitude)	
g1	N/A	—	
g2	deux (hypothétiques)	variante proche	
g3	probablement flanquant le *frigidarium*	conforme (modèle Néron)	
h1	présent intégré au *frigidarium*	variante africaine conforme	
h2	probablement couverte	≠ modèle à ciel ouvert	
i	probablement rectilignes	conforme	
j	probablement la formule romaine est appliqué : un grand axe transversal passant par la salle des bains froids et qui traverse tout le monument	conforme	
k	probablement avec enclos	variante proche	

Fig. 267 – Fiche comparative des thermes T9. (établie par l'auteure)

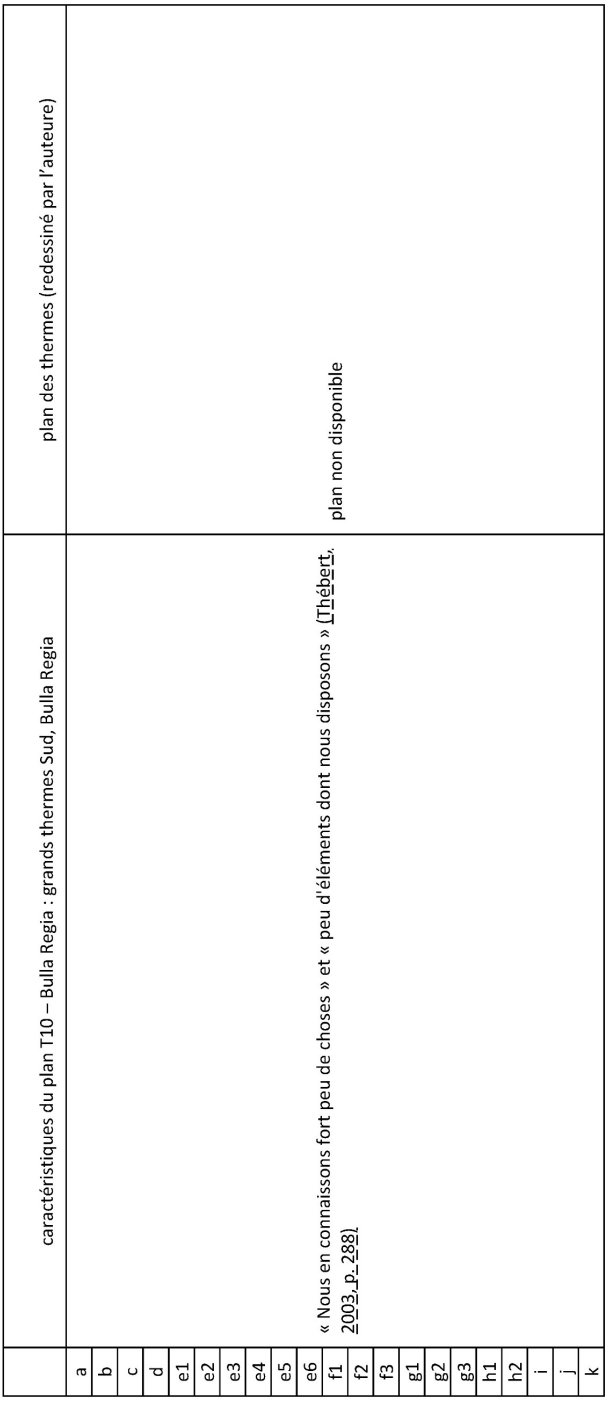


Fig. 268 – Fiche comparative des thermes T10. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T11 – Membressa, Mejez El Beb		plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	de dimensions moyennes	conforme (petit, moyen, grand admis)	
b	présente, de type classique : progression centrale probable du frigidarium au *caldarium*	variante partiellement attestée	
c	symétrique confirmé par la disposition des salles	conforme	
d	probable, au niveau des salles chauffées, mais non complètement observable	variante partielle	
e1	nord	≠ sud-ouest → variante proche	
e2	présence de plusieurs locaux chauffés dont *caldarium* (pièce centrale), *destrictarium* probable	variante partiellement attestée	
e3	probablement en avancée	variante proche	
e4	forme combinée : octogonale + absides	≠ canonique → variante	
e5	trois bassins : un rectangulaire central, deux semi-circulaires	variante réduite	
e6	fidélité stricte au modèle	conforme	
f1	N/A	—	
f2	N/A	—	
f3	N/A	—	
g1	N/A	—	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	N/A	—	
h2	N/A	—	
i	N/A	—	
j	N/A	—	
k	N/A	—	

Fig. 269 – Fiche comparative des thermes T11. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T12- Caesarea, grands thermes Ouest, Cherchel [Thébert, 2003, p. 191]	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	Séquence axiale complète	conforme	
c	rigoureusement symétrique	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante	
e2	fidélité inventive , et les trois salles sont précédées d'un local qui devait servir de vestiaire	variante proche	
e3	les deux extrémités de l'axe (*caldarium* et *natatio*) qui sont traitées en avant-corps	conforme	
e4	forme complexe (*cruciformes* ; absides)	≠ canonique strict, mais admis	
e5	au moins trois	conforme	
e6	formule romaine : disposition rectiligne	conforme	
f1	ampleur importante (environ 350 m² sans piscines)	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	réduire le nombre de bassins à deux, à les disposer symétriquement sur les petits côtés du *frigidarium*	variante africaine	
g1	N/A	—	
g2	possible et très Probable qu'il y a une palestre unique et axiale	≠ double → variante	
g3	placée axialement, hypothétiquement à l'est	conforme (modèle Constantin)	
h1	grand bassin (plus de 200m²), dépend du *frigidarium*	conforme (forme intégrée africaine)	
h2	couvert et en avancée	≠ ciel ouvert → non conforme	
i	rectilignes	conforme	
j	la formule romaine est appliqué : un grand axe transversal passant par la salle des bains froids et qui traverse tout le monument	conforme	
k	probablement sans enclos, mais non confirmé	≠ modèle canonique → variante	

Fig. 270 – Fiche comparative des thermes T12. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T13- Cuicul, grands thermes Sud, Djemila (Thébert, 2003, p. 194)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	peuvent être placés à l'articulation des bains de moyennes et grandes dimensions	conforme (taille moyenne/grande acceptée)	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	symétrique parfaite	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale et le gymnasium	conforme (exception admise)	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante	
e2	fidélité stricte au modèle mais avec un *tepidarium* d'entrée très réduit.	variante proche (fidélité stricte partielle)	
e3	en avancée	conforme	
e4	forme rectangulaire + abside	conforme	
e5	trois	variante réduite	
e6	disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	moyenne	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	deux bassins	variante réduite	
g1	cour dallée, plan rectangulaire	conforme	
g2	dédoublée (un au nord conservé, et un au sud disparue)	conforme	
g3	flanquant la *natatio*	conforme (modèle Néron)	
h1	présent, intégré au *frigidarium*	variante africaine conforme	
h2	couvert	≠ modèle découvert → non conforme	
i	une originalité certaine dans l'emploi systématique de lignes courbes et de niches de plan semi-circulaire ou rectangulaire.	variante stylistique, ≠ canonique	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	bâtiment autonome sans enclos monumental le bloc balnéaire n'est pas inclus dans un quadrilatère monumental	≠ modèle canonique	

Fig. 271 – Fiche comparative des thermes T13. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T14- Cuicul, thermes du capitole, Djemila (Thébert, 2003, p. 196)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	de dimensions moyennes proches de petits thermes	conforme (petit/moyen/grand acceptés)	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	symétrique parfaite	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	est	≠ sud-ouest → divergence	
e2	fidélité stricte au modèle	conforme	
e3	saillant	conforme	
e4	rectangulaire avec des bassins également rectangulaires (forme cruciforme avec hémicycle)	conforme	
e5	deux	réduction → variante	
e6	fidélité stricte au modèle mais il reste probable (le plan semble suivre un tracé rectiligne)	conforme	
f1	de dimension limitée (ne couvre que 90 m² environ)	conforme malgré taille modeste	
f2	plan presque carré central	conforme	
f3	deux bassins situés sur l'axe central du batiment (la piscine à l'ouest est plus grande et divisée en trois bassins distincts).	conforme	
g1	N/A	—	
g2	dénué de palestre	≠ modèle → non conforme	
g3	N/A	—	
h1	absent	≠ modèle → non conforme	
h2	N/A	—	
i	rectiligne	conforme	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	bâtiment autonome sans enclos monumental « le bloc balnéaire n'est pas inclus dans un quadrilatère monumental »	≠ modèle → non conforme	

Fig. 272 – Fiche comparative des thermes T14. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T15 - Hippo Regius, grands thermes Sud, Hippone-Annaba (Thébert, 2003, p. 208)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	thermes de dimensions moyennes	conforme (toutes tailles admises)	
b	séquence axiale complète (probablement sans natatio)	variante partielle (élément manquant)	
c	symétrique parfaite	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	sud-est	≠ sud-ouest → variante proche	
e2	fidélité stricte au modèle	conforme	
e3	le *caldarium* n'est pas saillant, il suit une logique introvertie.	≠ modèle en avancée → non conforme	
e4	forme rectangulaire (un plan cruciforme)	conforme	
e5	trois piscines rectangulaires	variante réduite	
e6	disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	moyenne	conforme	
f2	axiale	conforme	
f3	deux bassins	variante réduite	
g1	N/A	—	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	N/A	—	
h2	N/A	—	
i	rectiligne	conforme	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	dans un enclos	conforme	

Fig. 273 – Fiche comparative des thermes T15. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T16 – Lambaesis, grands thermes, Lambèse-Tazoult (Thébert 2003, p. 211)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	symétrique	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale, le gymnasium et la palestre	conforme (exceptions secondaires admises)	
e1	sud-ouest	conforme	
e2	fidélité stricte au modèle	conforme	
e3	en avancée	conforme	
e4	grande salle, plan cruciforme	conforme	
e5	trois bassins	variante réduite → **0.5**	
e6	fidélité stricte au modèle (rectiligne)	conforme	
f1	grande salle froide (environ 220m²)	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	deux bassins	variante réduite → **0.5**	
g1	Ample palestre (occupe environ la moitié de la surface de l'édifice)	conforme (forme et ampleur)	
g2	une palestre unique	≠ double canonique → variante	
g3	placée sur l'axe principal	conforme (modèle de Constantin)	
h1	absente	≠ modèle → non conforme	
h2	N/A	—	
i	rectiligne	conforme	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	sans enclos	≠ modèle → non conforme	

Fig. 274 – Fiche comparative des thermes T16. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T17 – Lambaesis, thermes du camp, Lambèse-Tazoult (Thébert, 2003, p. 209)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	de dimensions moyennes	conforme (taille moyenne admise)	
b	pas de séquence axiale mais un Axe central formé par le caldarium et le laconicum	≠ séquence canonique → diver-gence	
c	symétrique présentant des particularités remarquables	conforme	
d	un dédoublement inhabituel du *frigidarium* et du *tepidarium* de sortie, tandis que, inversement, le *laconicum* est unique.	variante	
e1	sud	conforme (≈ sud-ouest)	
e2	le *caldarium* est précédé par un *tepidarium* d'entrée (correspond aussi bien à un tepidarium de sortie : une double fonction), un *destrictarium* et un *laconicum*	conforme	
e3	en avant-corps	conforme	
e4	plan rectangulaire simple avec des bassins également rectangulaires (cruciforme)	conforme	
e5	Trois bassins	variante réduite	
e6	fidélité inventive avec disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	deux locaux de frigidarium au total environ 230m²	conforme	
f2	dédoublement inhabituel du frigidarium	≠ formule canonique → variante	
f3	un bassin par local de frigidarium (soit deux)	variante	
g1	forme rectangulaire probable	conforme	
g2	une palestre unique	≠ double canonique → variante	
g3	placée sur l'axe principal	conforme (modèle constantin)	
h1	absente (absence même de principe de grand bassin attaché au frigidarium)	≠ modèle canonique → non conforme	
h2	N/A	—	
i	rectiligne	conforme	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	sans enclos	≠ modèle → non conforme	

Fig. 275 – Fiche comparative des thermes T17. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T18 – Tubusuptus, grands thermes, Tiklat-El Kseur (Thébert, 2003, p. 227)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	il faut ranger cette construction dans la catégorie des thermes de dimensions moyennes particulièrement vastes, ou même dans celle des grands thermes.	conforme (admis dans la grille)	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	vraisemblablement symétrique	variante proche	
d	dédoublement présent	conforme	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante	
e2	le *caldarium* est précédé par un *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *laconicum*	conforme	
e3	presque en saillie	variante proche	
e4	forme probable de cruciforme	conforme	
e5	trois bassins (hypothèse de plan cruciforme)	variante réduite	
e6	fidélité stricte au modèle (rectiligne)	conforme	
f1	vaste (environ 210m²)	conforme	
f2	central	conforme	
f3	un seul grand bassin	≠ formule canonique → non conforme	
g1	N/A	—	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	présente (intégré au frigidarium)	variante africaine conforme	
h2	couverte	≠ *natatio* à ciel ouvert → non conforme	
i	probablement rectiligne	conforme	
j	probablement les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	N/A	—	

Fig. 276 – Fiche comparative des thermes T18. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T19 – Thamugadi, grands thermes Nord, Timgad (Thébert, 2003, p. 228)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	symétrique	conforme	
d	dédoublement présent	conforme	
e1	sud	conforme (≈ sud-ouest)	
e2	le *caldarium* est précédé par un *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *laconicum*	conforme	
e3	en saillie	conforme	
e4	cruciforme	conforme	
e5	trois bassins (hypothèse de plan cruciforme)	variante réduite → **0.5**	
e6	disposition orthogonale, le baigneur effectuant un virage à angle droit dans le *destrictarium*	variante africaine (≠ rectiligne)	
f1	très vaste (environ 400 m²)	conforme	
f2	central	conforme	
f3	trois bassins (dont un grand bassin nord interprété comme une *natatio* couverte)	conforme	
g1	probablement présent au nord	variante admise	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	probablement présente au nord (intégré au *frigidarium*)	variante africaine conforme	
h2	couverte	≠ modèle découvert	
i	une originalité certaine dans l'emploi systématique de lignes courbes et de niches de plan semi-circulaire ou rectangulaire.	≠ canonique → variante stylistique	
j	probablement les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	dans un îlot urbain structuré	variante proche du modèle monumental fermé	

Fig. 277 – Fiche comparative des thermes T19. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T20 – Calama, Guelma [Thébert, 2003]	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	appartient indubitablement à la catégorie des grands thermes	conforme	
b	Probablement séquence axiale complète	variante proche (non totalement attestée)	
c	probablement symétrique	variante proche	
d	dédoublement présent	conforme	
e1	ouest	≠ sud-ouest → variante	
e2	le *caldarium* est précédé probablement par un *tepidarium* d'entrée, un *destrictarium* et un *laconicum*	variante proche	
e3	le *caldarium* n'est pas saillant, il suit une logique introvertie, il est plus tôt en retrait par rapport à la façade (discerner le *caldarium* dans la pièce en position axiale)	≠ modèle canonique → non conforme	
e4	rectangle + abside	conforme	
e5	trois bassins hypothétiques	variante probable	
e6	disposition orthogonale, le baigneur effectuant un virage à angle droit dans le destrictarium (hypothétique)	variante africaine	
f1	vaste (environ 300m²)	conforme	
f2	central	conforme	
f3	vraisemblablement deux bassins froids sur chacun des petits côtés	variante africaine	
g1	probablement présent	variante admissible	
g2	N/A	—	
g3	N/A	—	
h1	un grand bassin probablement présente à l'Est dépendant du frigidarium.	variante africaine conforme	
h2	couverte	≠ modèle découvert → non conforme	
i	une originalité certaine dans l'emploi systématique de lignes courbes et de niches de plan semi-circulaire ou rectangulaire.	variante stylistique	
j	probablement les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	probablement dans un enclos	variante proche	

Fig. 278 – Fiche comparative des thermes T20. (établie par l'auteure)

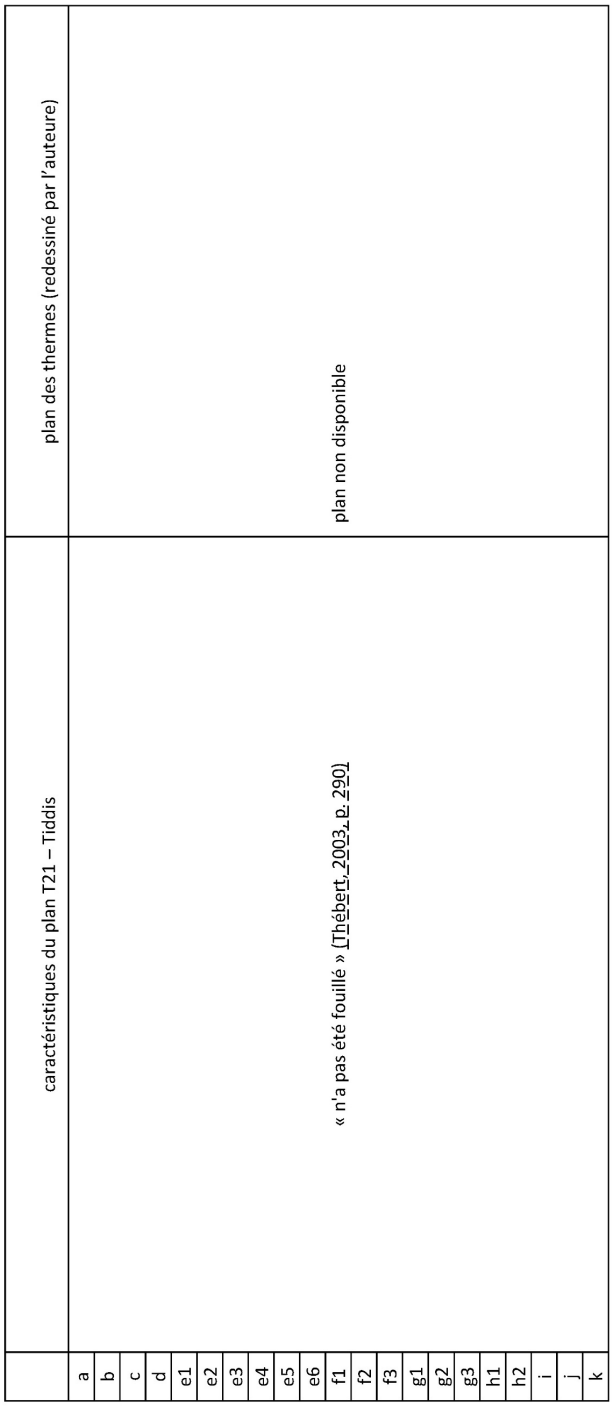


Fig. 279 – Fiche comparative des thermes T21. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T22 – Lepcis (Leptis Magna), grands thermes Sud, Hadrien, Libye (Thébert_2003)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	symétrique totale (même en périphérie)	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale et la palestre	conforme (palestre unique admise comme variante)	
e1	sud	conforme	
e2	fidélité stricte au modèle	conforme	
e3	en avancée	conforme	
e4	plan cruciforme	conforme	
e5	cinq bassins	conforme (valeur haute, proche modèle)	
e6	disposition orthogonale, le baigneur effectuant un virage à angle droit dans le destrictarium	variante africaine conforme	
f1	très ample (environ 300 m²)	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	deux bassins latérales	variante africaine	
g1	présent	conforme	
g2	une palestre unique	variante africaine → ≠ canonique	
g3	vaste péristyle rectangulaire	conforme (forme classique)	
h1	présent	conforme	
h2	une piscine découverte	conforme (modèle à ciel ouvert)	
i	rectiligne, cas particulier la palestre il y a certaine dans l'emploi systématique de lignes courbes et de niches de plan semi-circulaire ou rectangulaire.	conforme globalement	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	probablement dans un enclos	variante proche	

Fig. 280 – Fiche comparative des thermes T22. (établie par l'auteure)

	caractéristiques du plan T23 – Lepcis (Leptis Magna), thermes du bord de mer, Libye (Thébert, 2003)	interprétation	plan des thermes (redessiné par l'auteure)
a	grands thermes	conforme	
b	séquence axiale complète	conforme	
c	plan rigoureusement symétrique autour de l'axe principale	conforme	
d	tous les espaces présents sont dédoublés sauf la colonne vertébrale	conforme	
e1	nord-est	≠ sud-ouest → variante	
e2	fidélité stricte au modèle	conforme	
e3	en avancée	conforme	
e4	Forme hexagonale	≠ canonique → variante	
e5	cinq bassins	conforme	
e6	disposition en profondeur, de type pyramidal	variante africaine conforme	
f1	très ample	conforme	
f2	centrale	conforme	
f3	trois bassins	conforme	
g1	probablement présent à l'Ouest, en façade du batiment	variante admise	
g2	une palestre unique	≠ double canonique → variante	
g3	N/A	—	
h1	présent	conforme	
h2	une piscine couverte hypothétique	≠ modèle à ciel ouvert → non conforme	
i	rectiligne	conforme	
j	les axes de symétrie et le grand axe se coïncident	conforme	
k	probablement dans un ilot urbain monumental	variante proche	

Fig. 281 – Fiche comparative des thermes T23. (établie par l'auteure)

Fiches d'algorithme sur Grasshopper et visualisation sur Rhinoceros3D

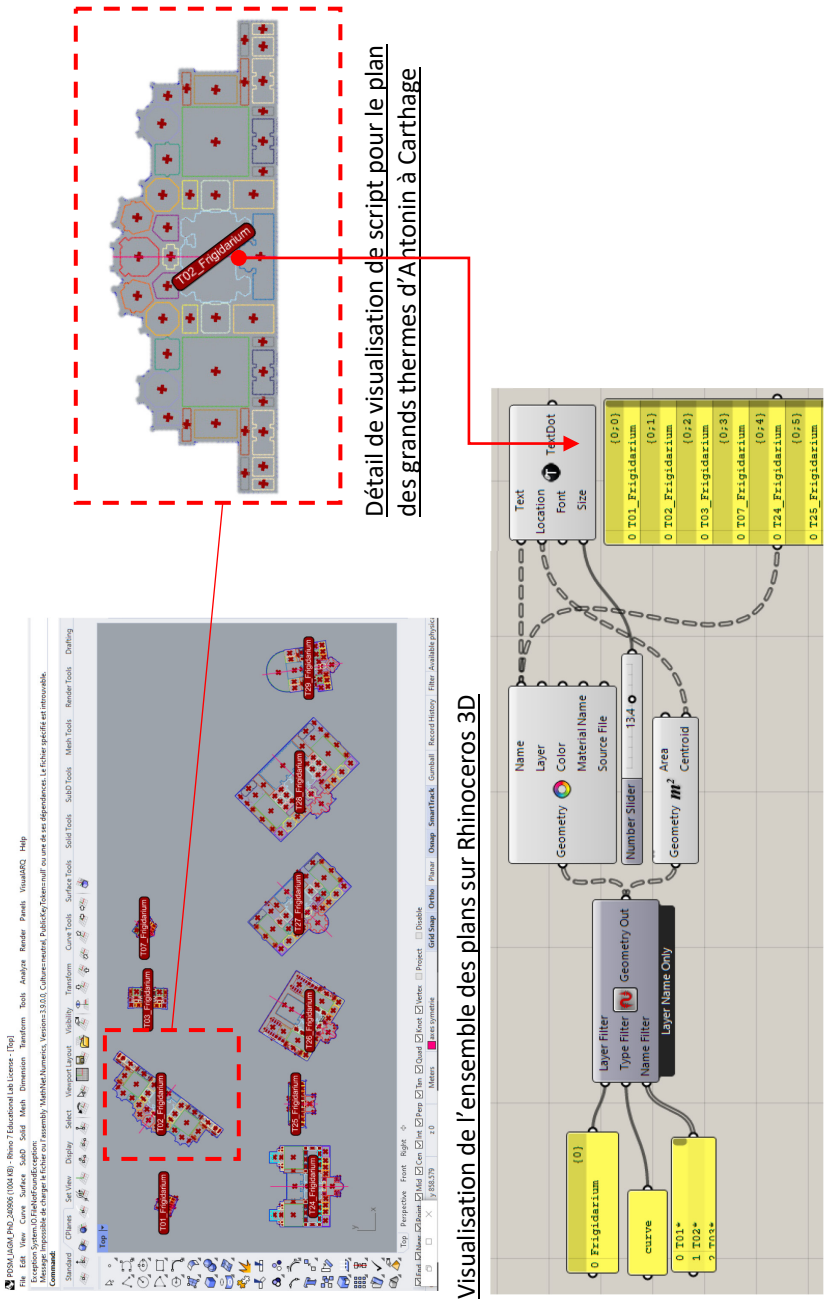


Fig. 282 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant l'extraction des ID des composants élémentaires : Cas du *frigidarium.* (établie par l'auteure)

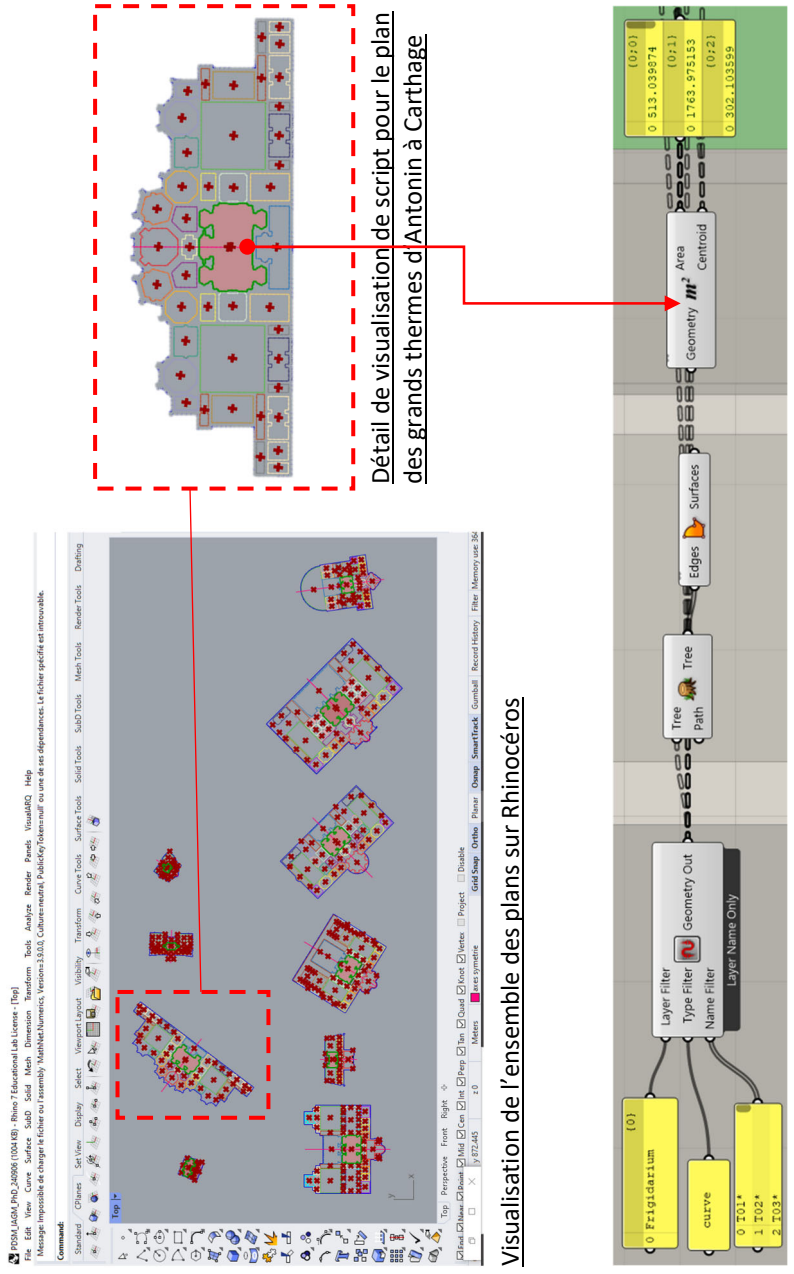


Fig. 283 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul de la surface. (établie par l'auteure)

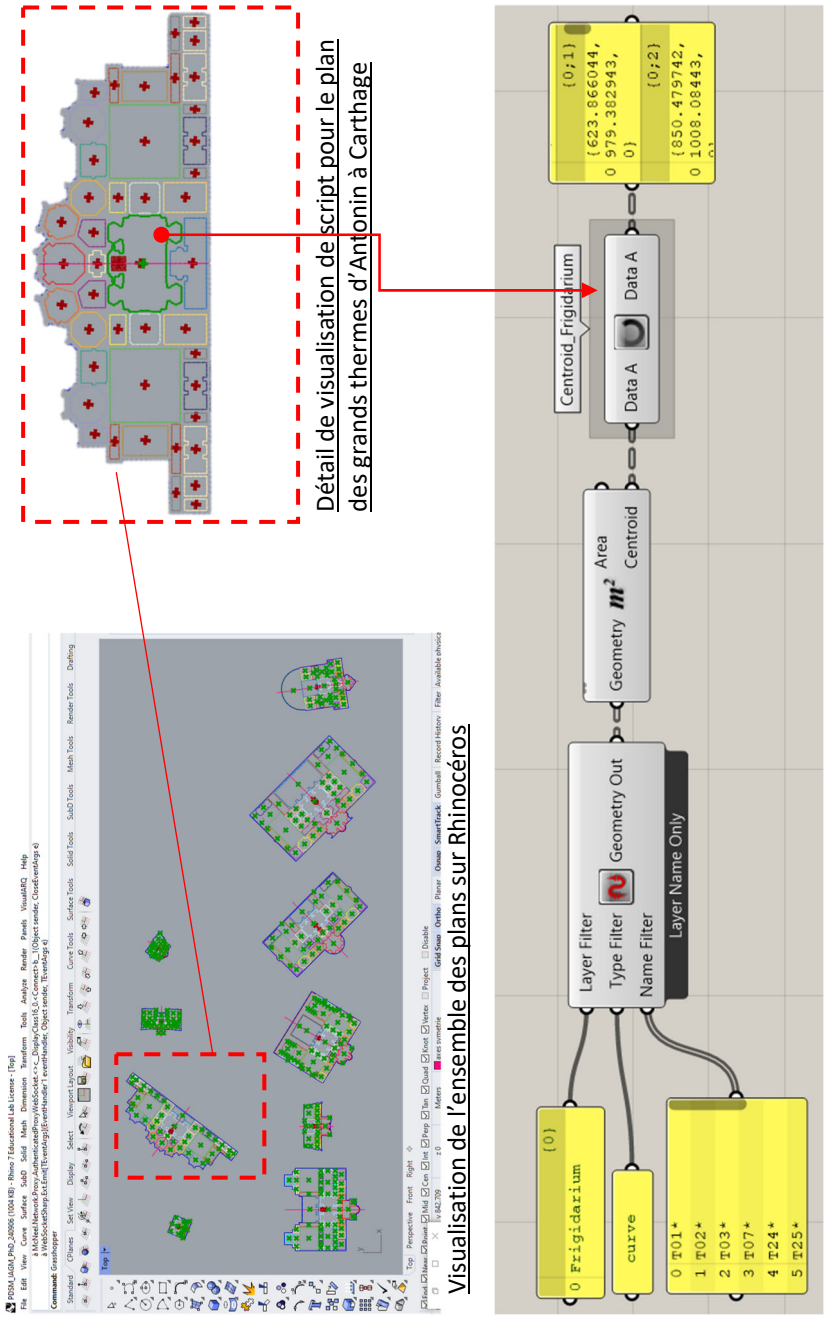


Fig. 284 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul du centre de gravité. (établie par l'auteure)

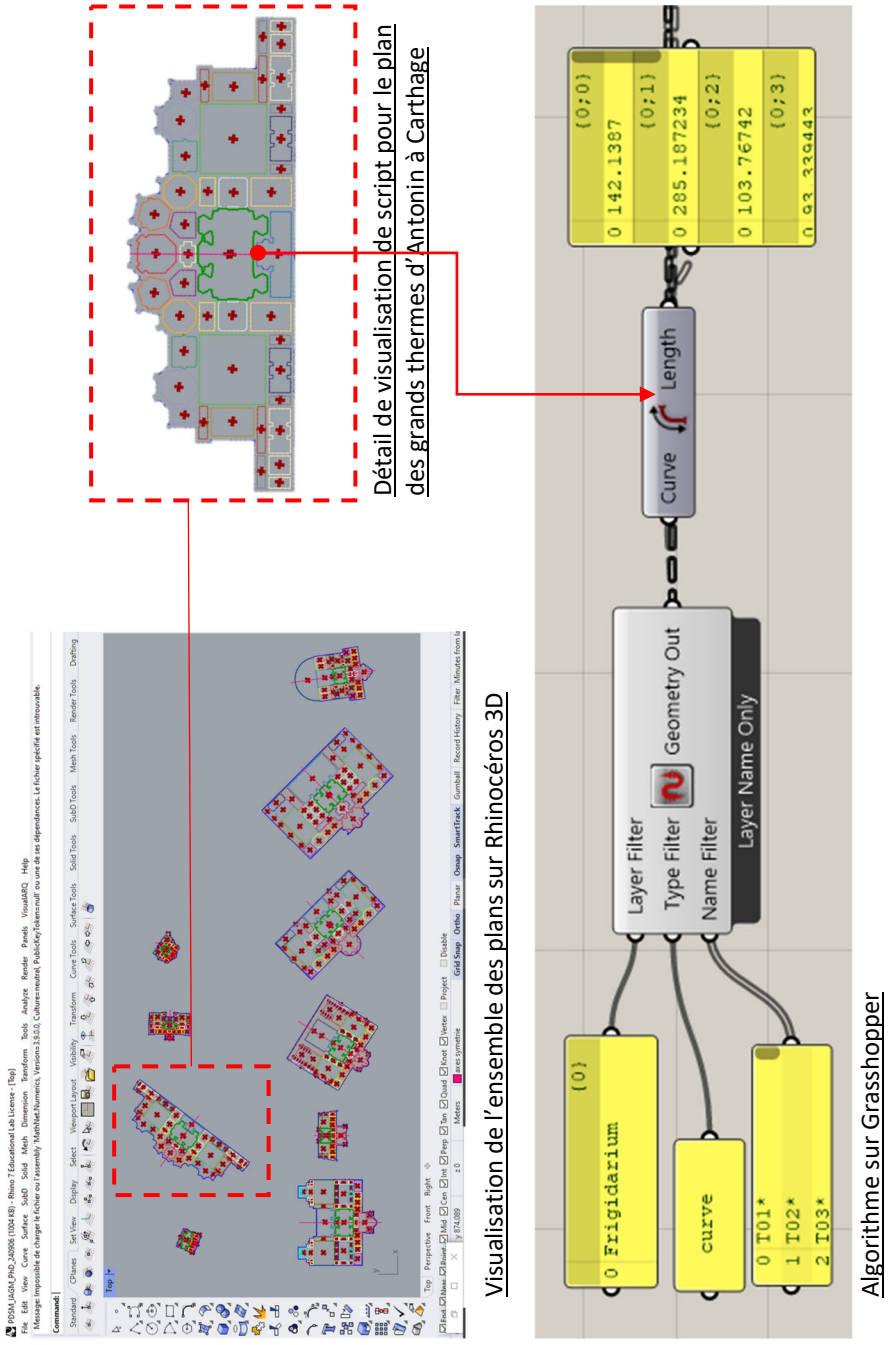
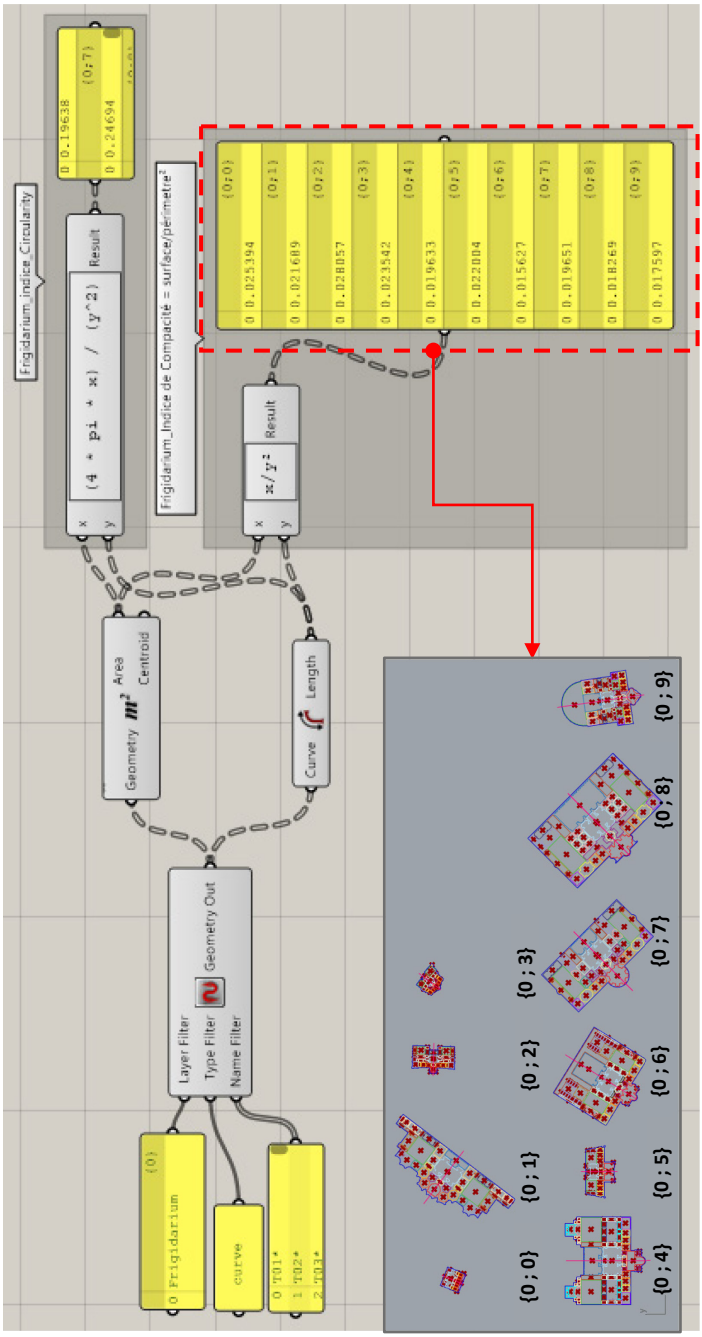


Fig. 285 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul du périmètre. (établie par l'auteure)



Algorithme sur Grasshopper

Fig. 286 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des données dimensionnelles des composants élémentaires : calcul de circularité et compacité. (établie par l'auteure)

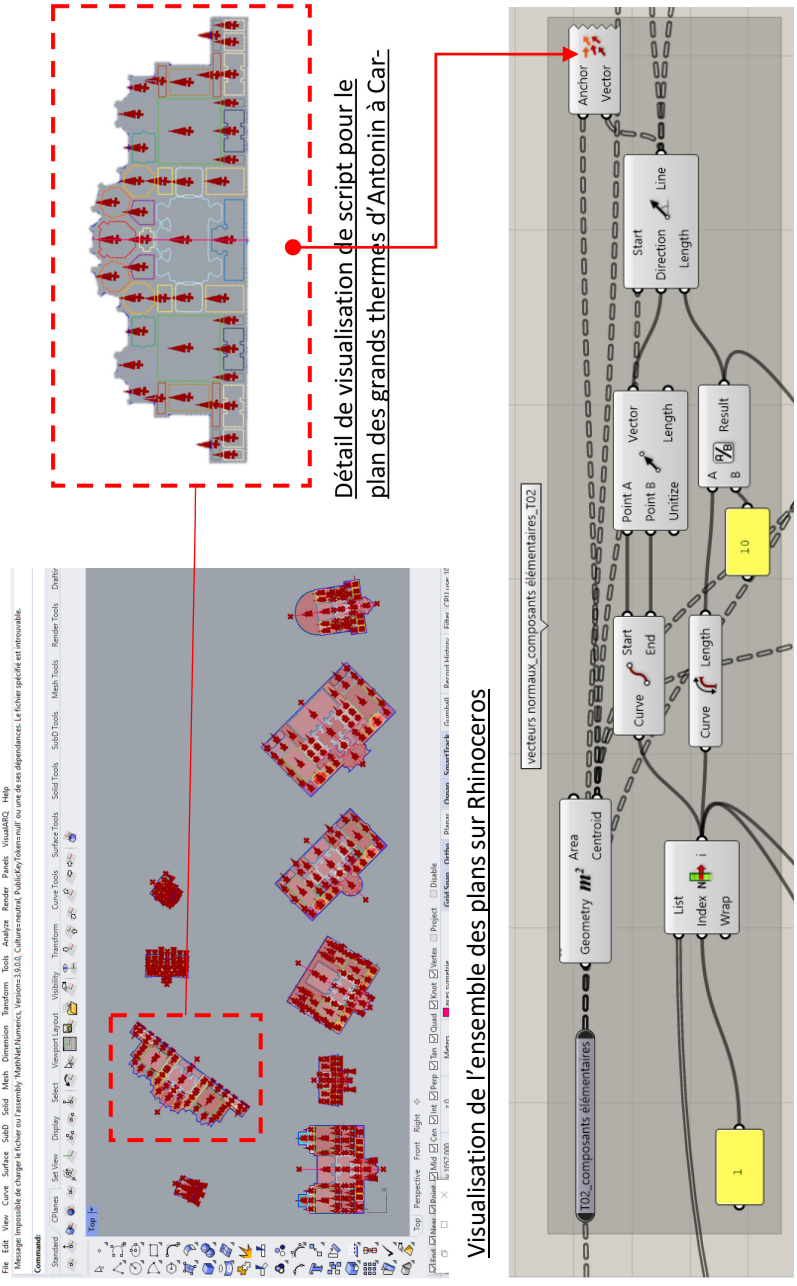


Fig. 287 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des vecteurs normaux. (établie par l'auteure)

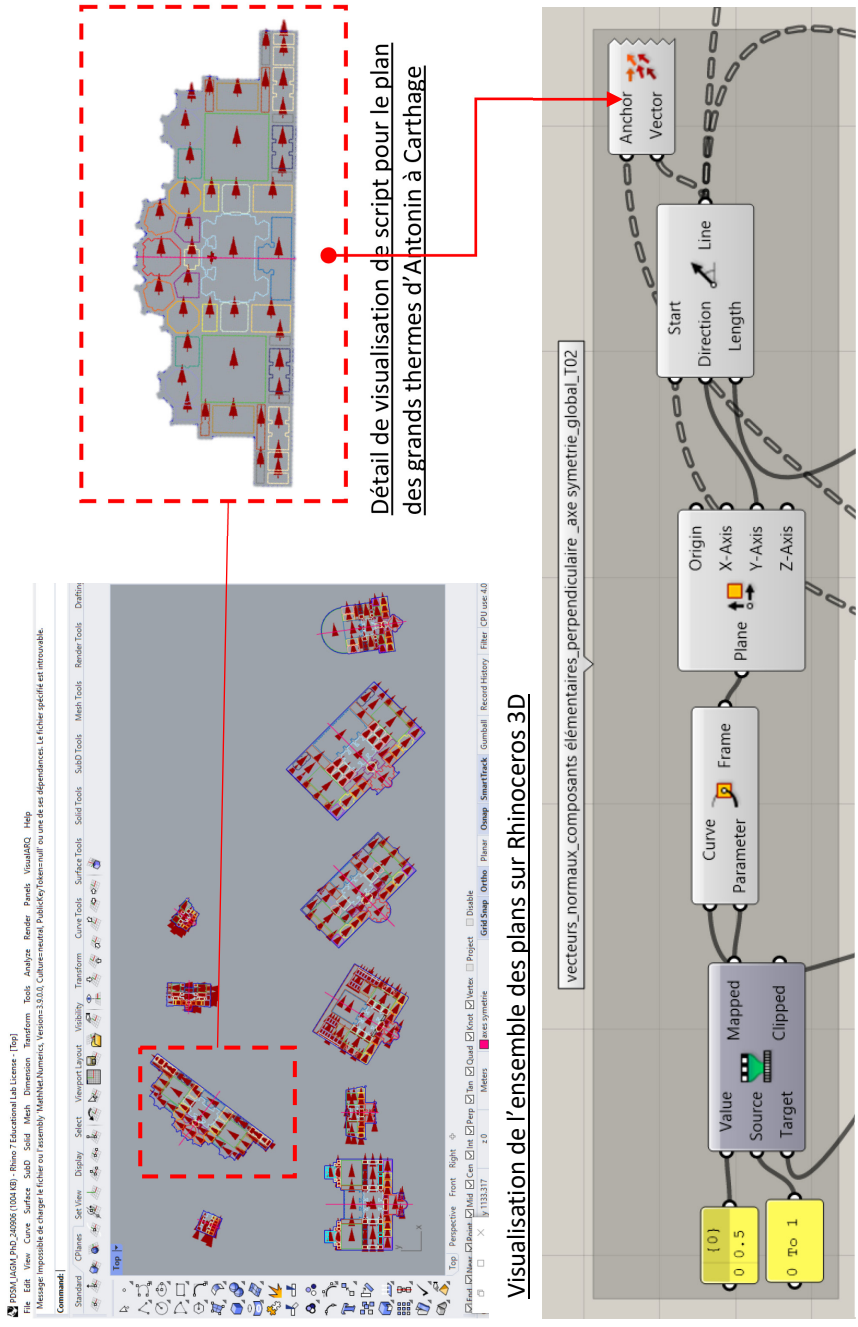


Fig. 288 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des vecteurs perpendiculaires aux vecteurs normaux. (établie par l'auteure)

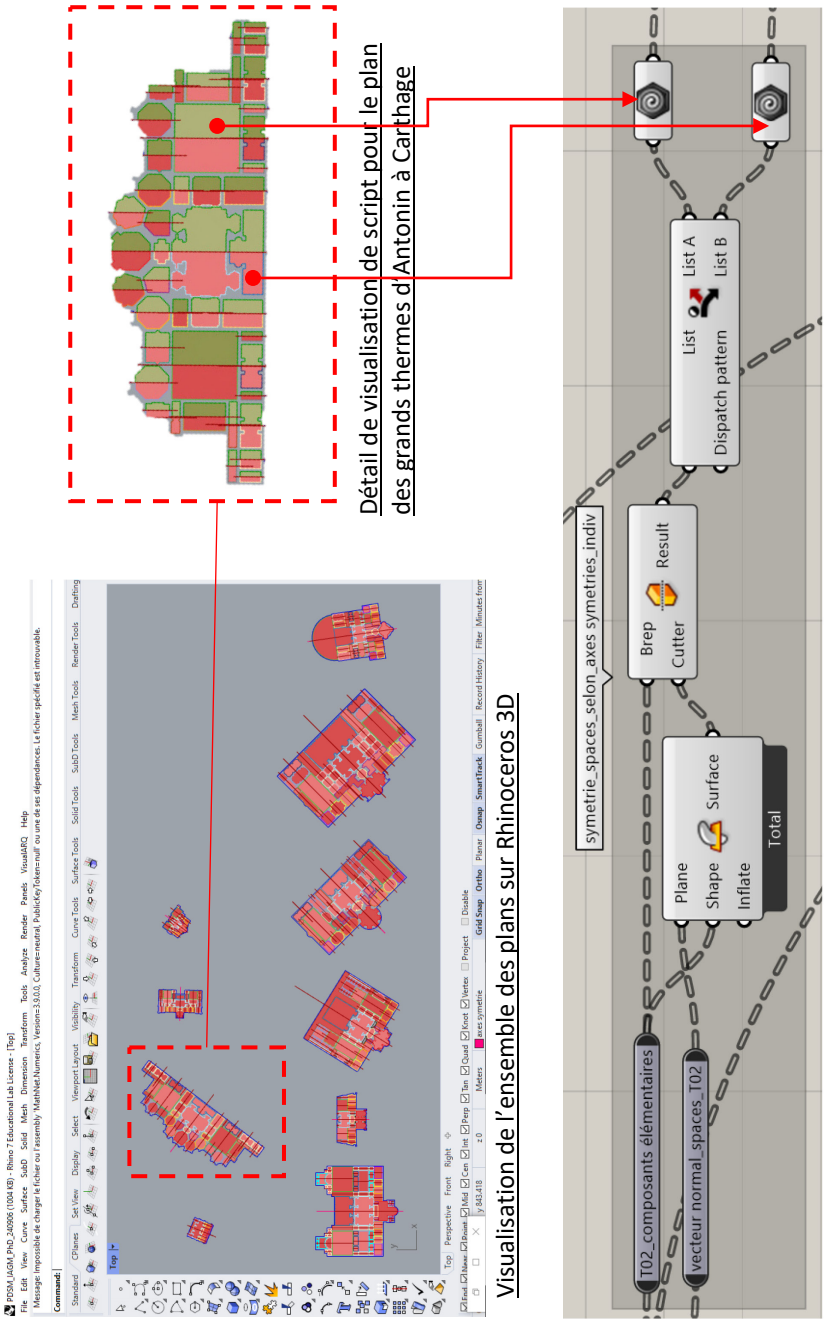


Fig. 289 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des symétries des composants élémentaires : direction de l'axe de symétrie. (établie par l'auteure)

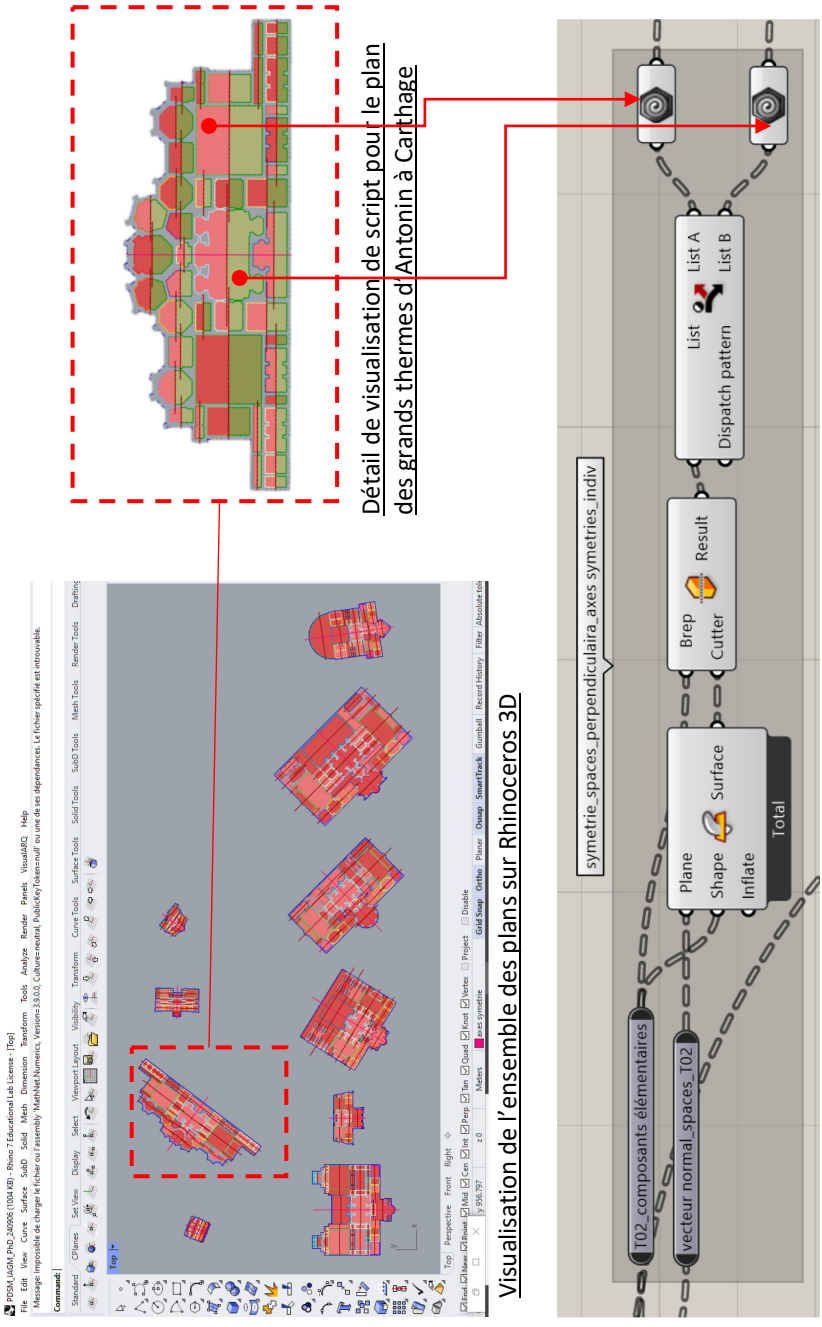


Fig. 290 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des symétries des composants élémentaires : direction perpendiculaire à l'axe de symétrie. (établie par l'auteure)

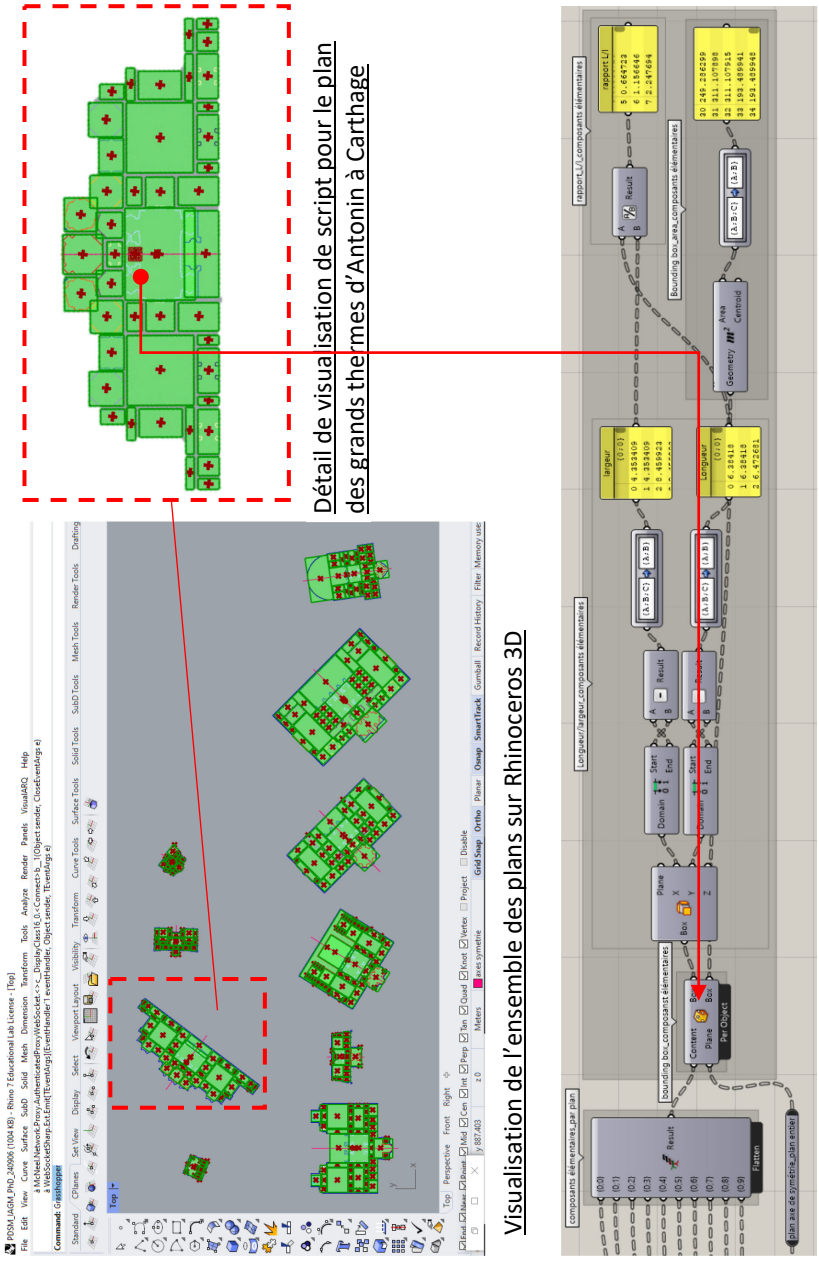


Fig. 291 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des dimensions des formes englobantes des composants élémentaires : L, l, Q=L/l et surface. (établie par l'auteure)

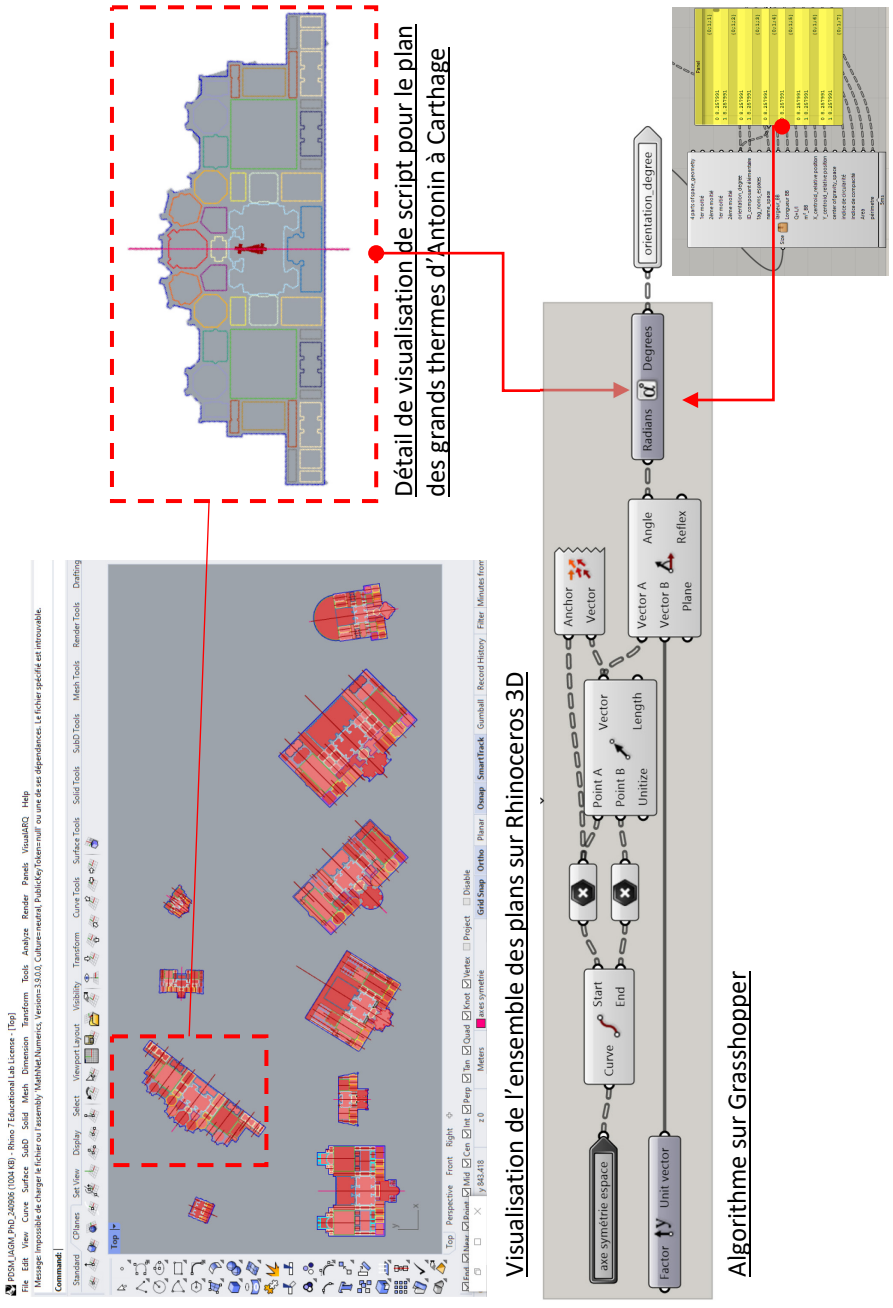


Fig. 292 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des orientations des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

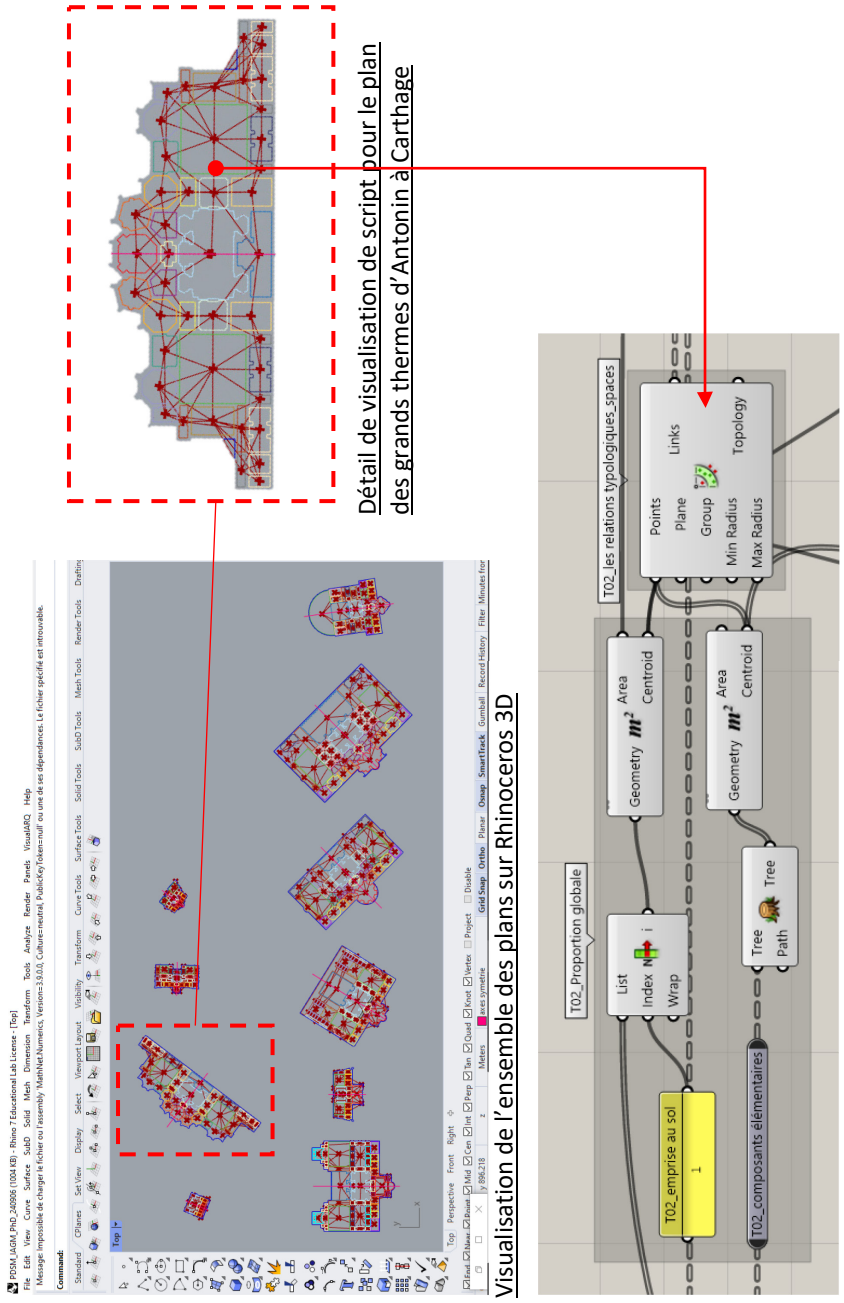


Fig. 293 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des relations typologiques des composants élémentaires. (établie par l'auteure)

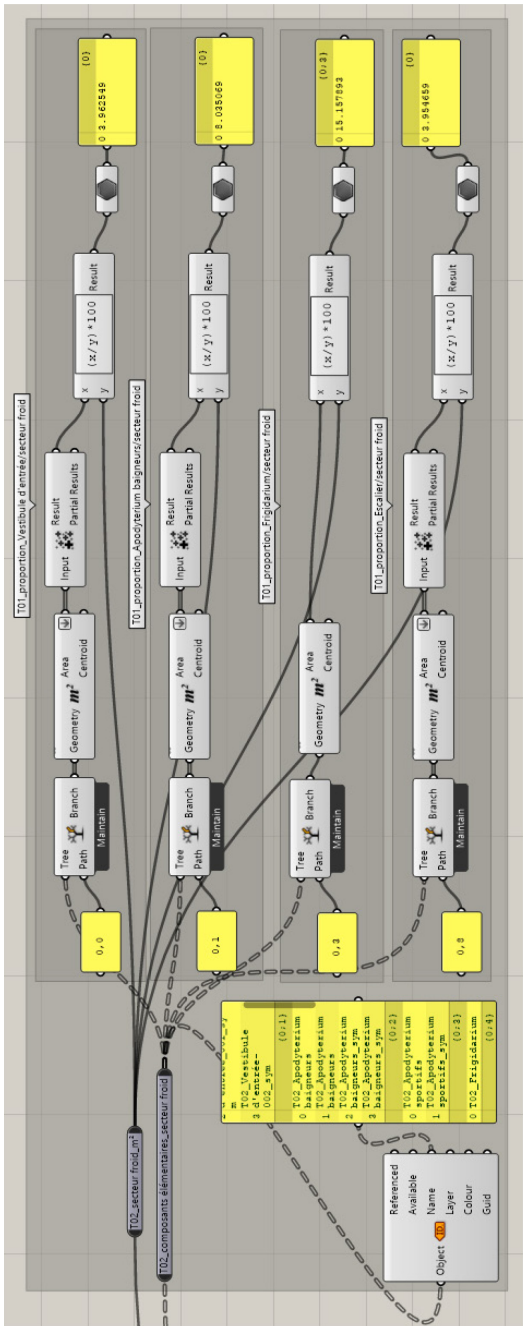


Fig. 294 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur froid. (établie par l'auteure)

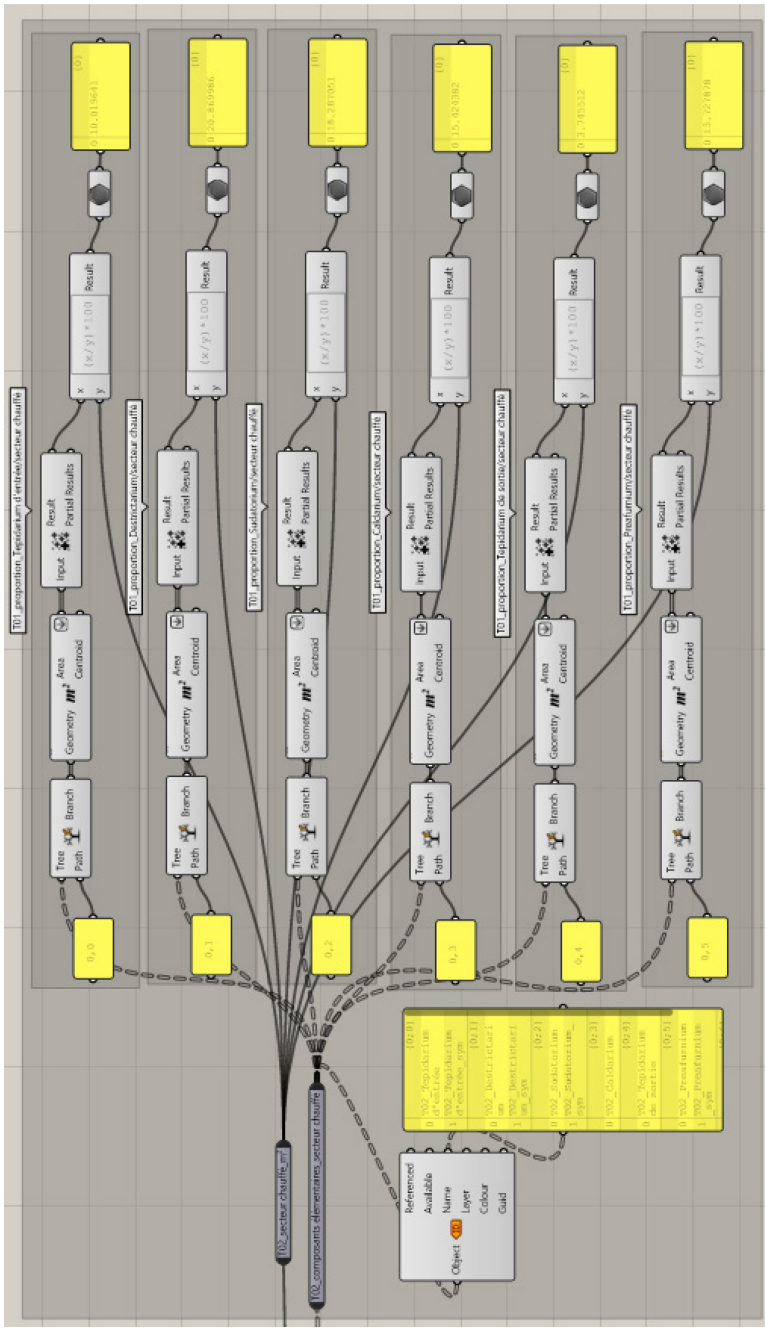


Fig. 295 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions des composants élémentaires dans le secteur chauffé. (établie par l'auteure)

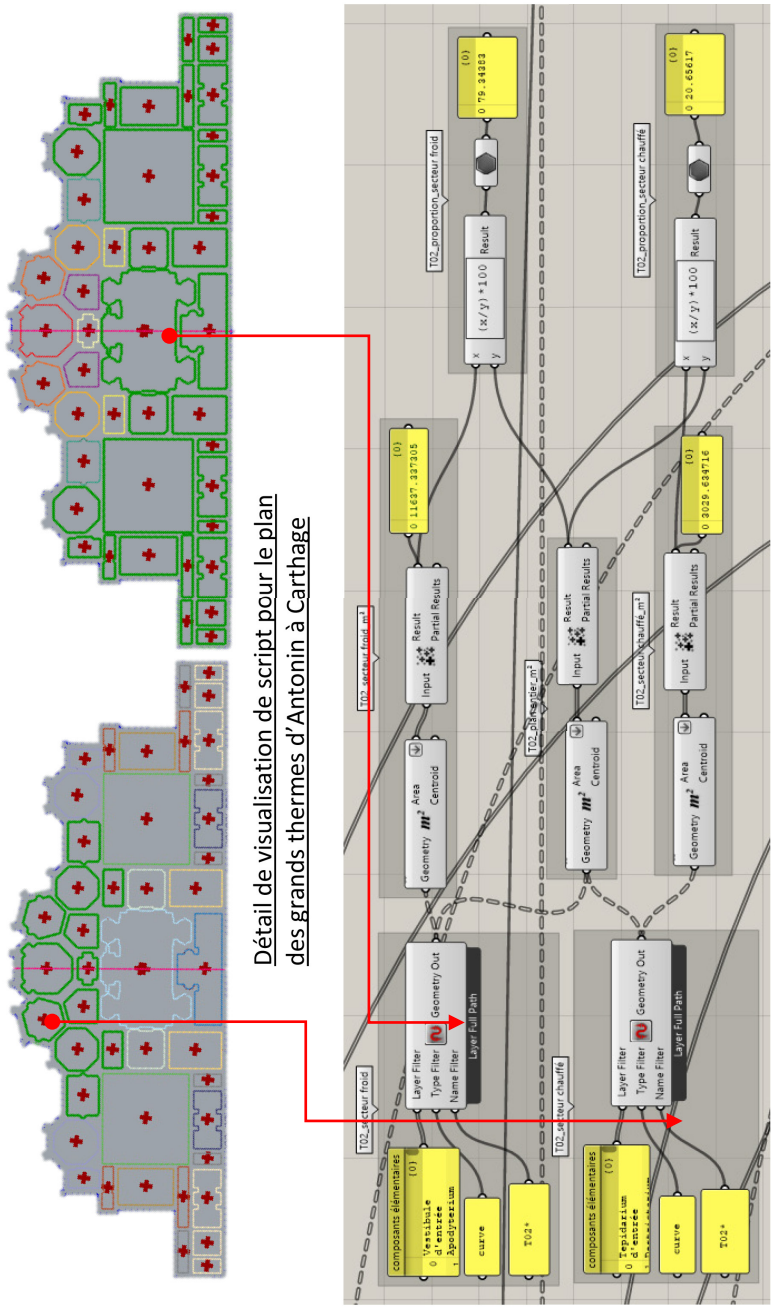


Fig. 296 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions et des surfaces des secteurs chauffé/froid. (établie par l'auteure)

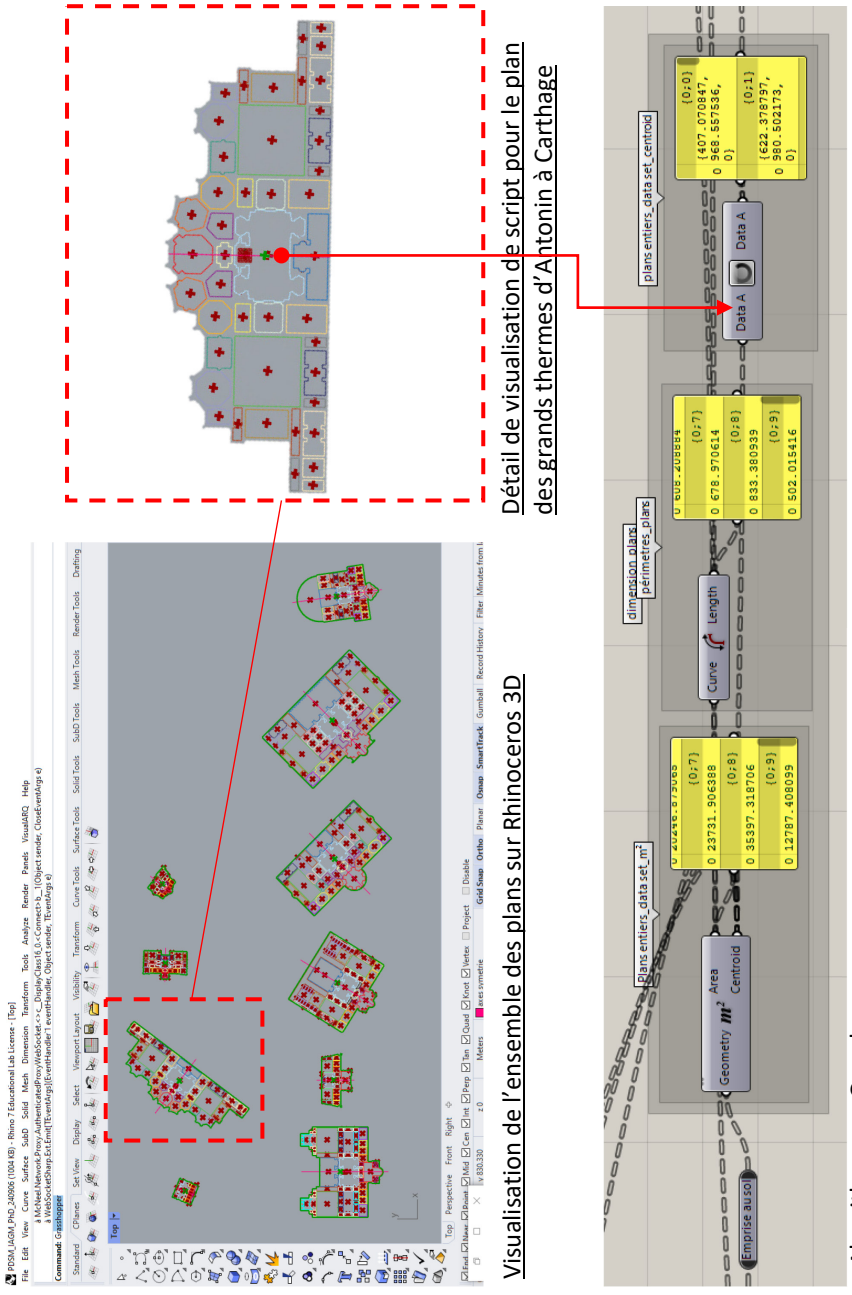


Fig. 297 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des dimensions des plans entiers : surface, périmètre, centre de gravité. (établie par l'auteure)

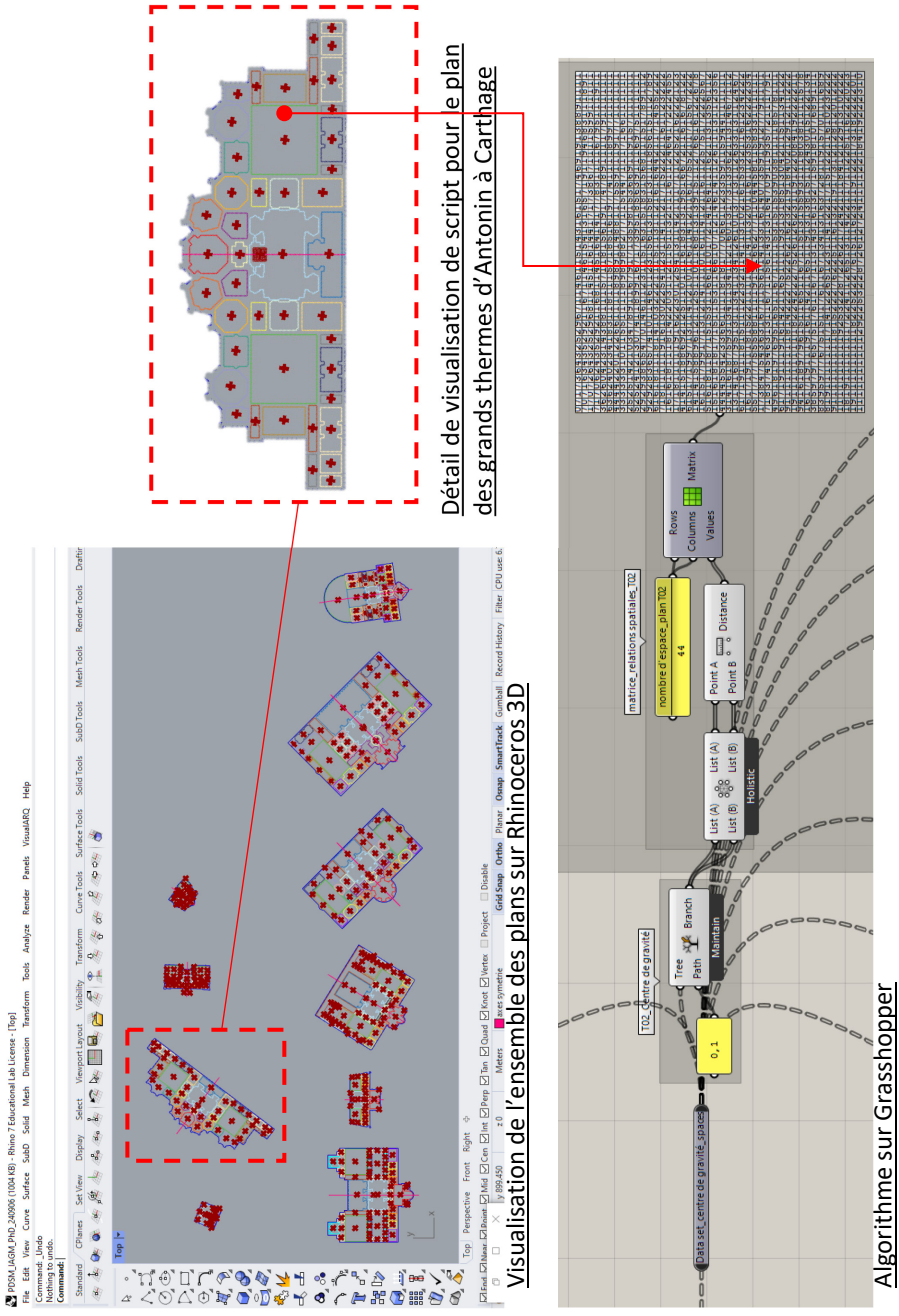


Fig. 298 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la création des matrices d'incidence des différents plans. (établie par l'auteure)

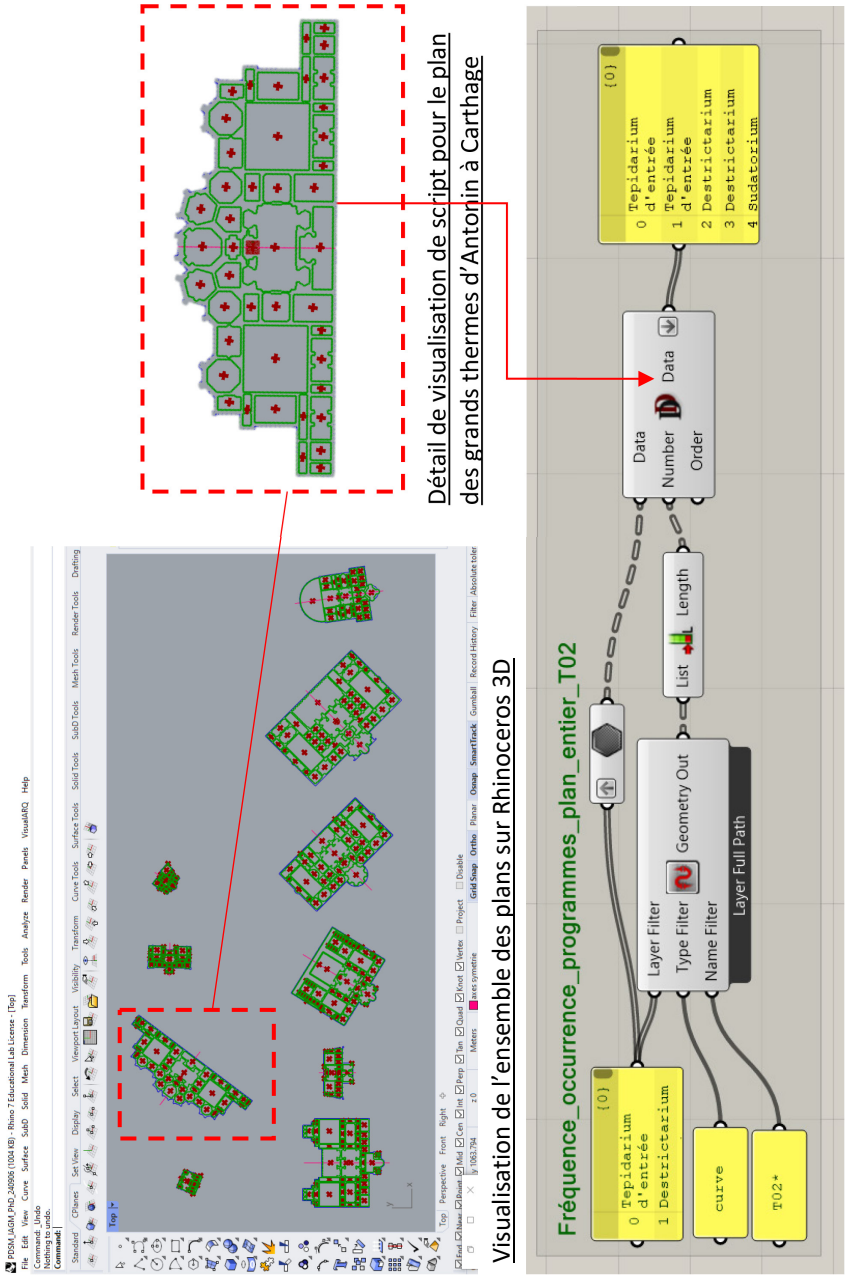


Fig. 299 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des fréquences d'occurrence des différents plans. (établie par l'auteure)

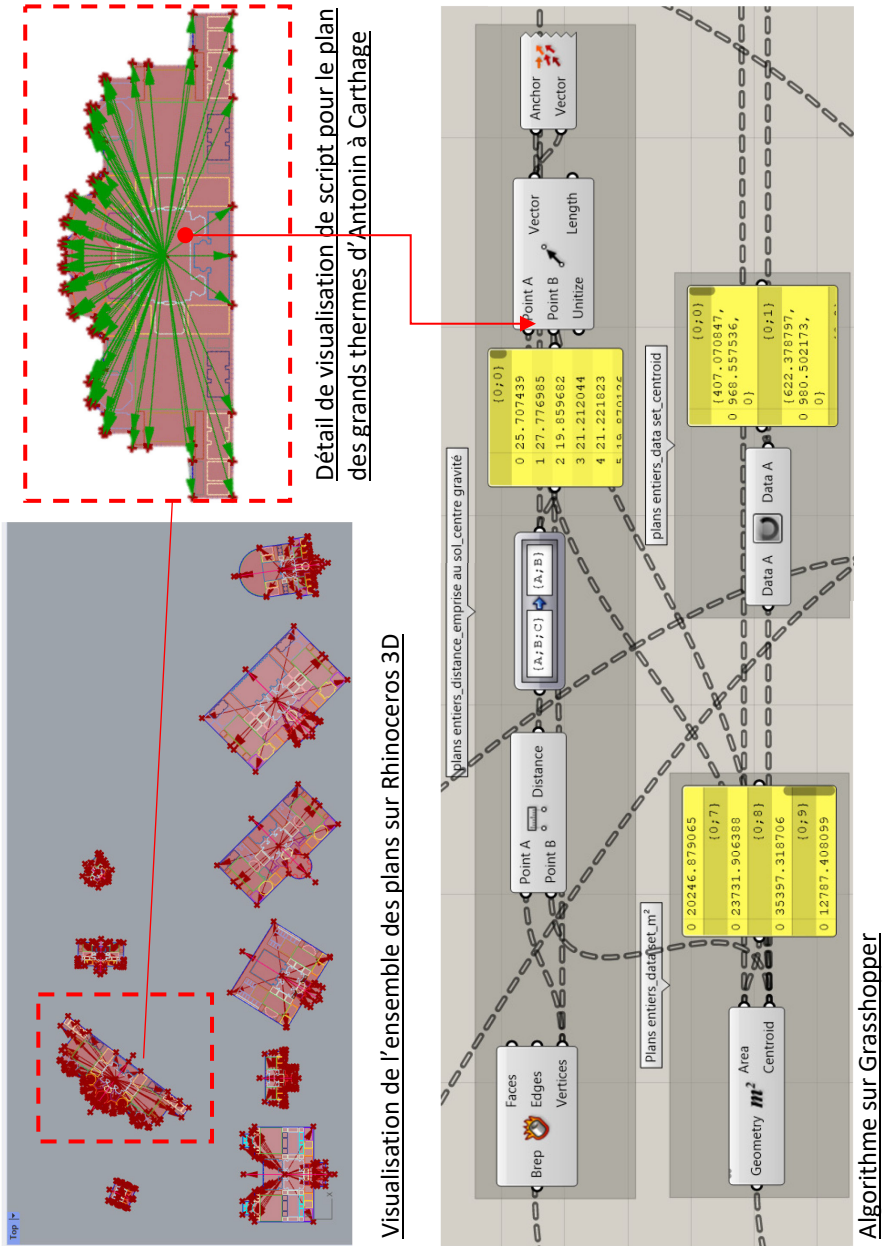


Fig. 300 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant l'analyse de la répartition spatiale. (établie par l'auteure)

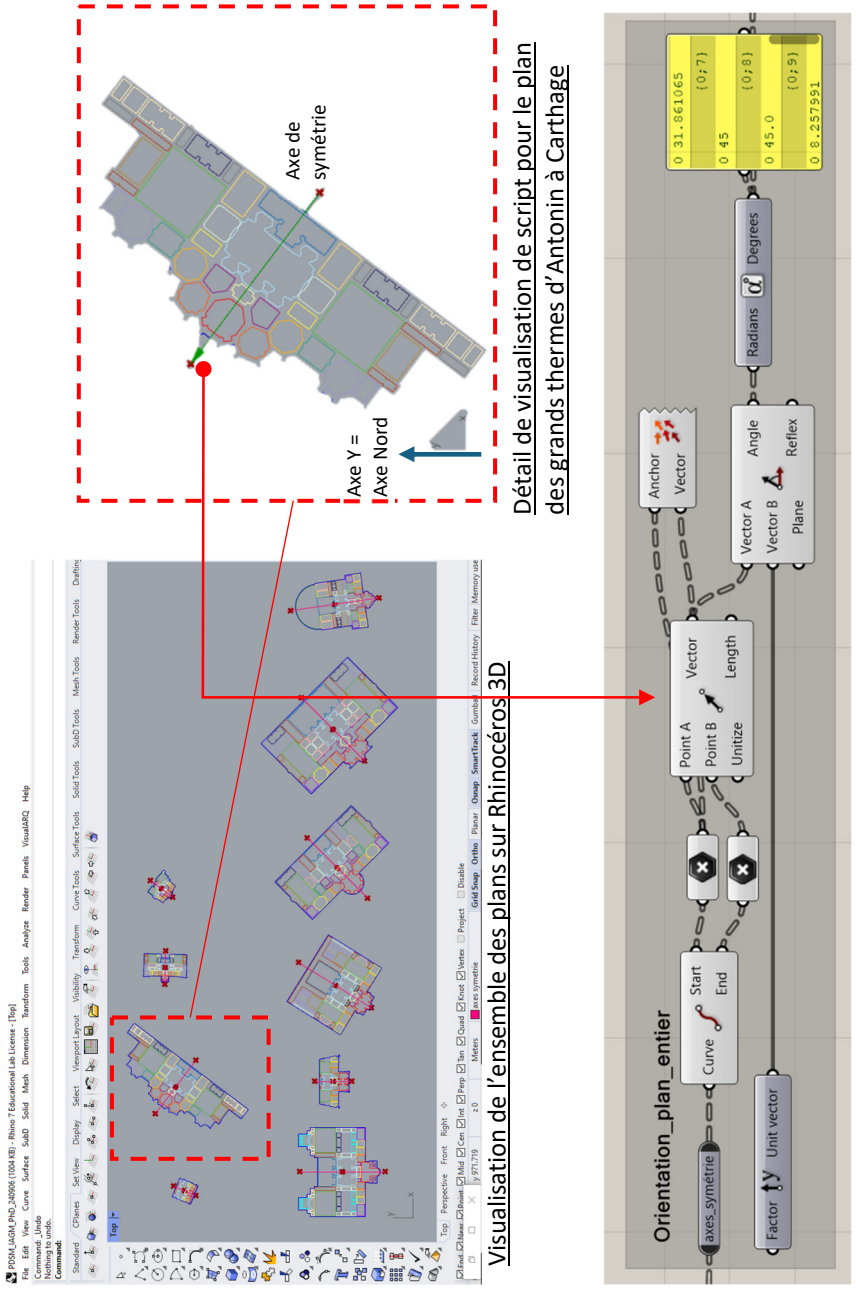


Fig. 301 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul d'orientation des plans entiers. (établie par l'auteure)

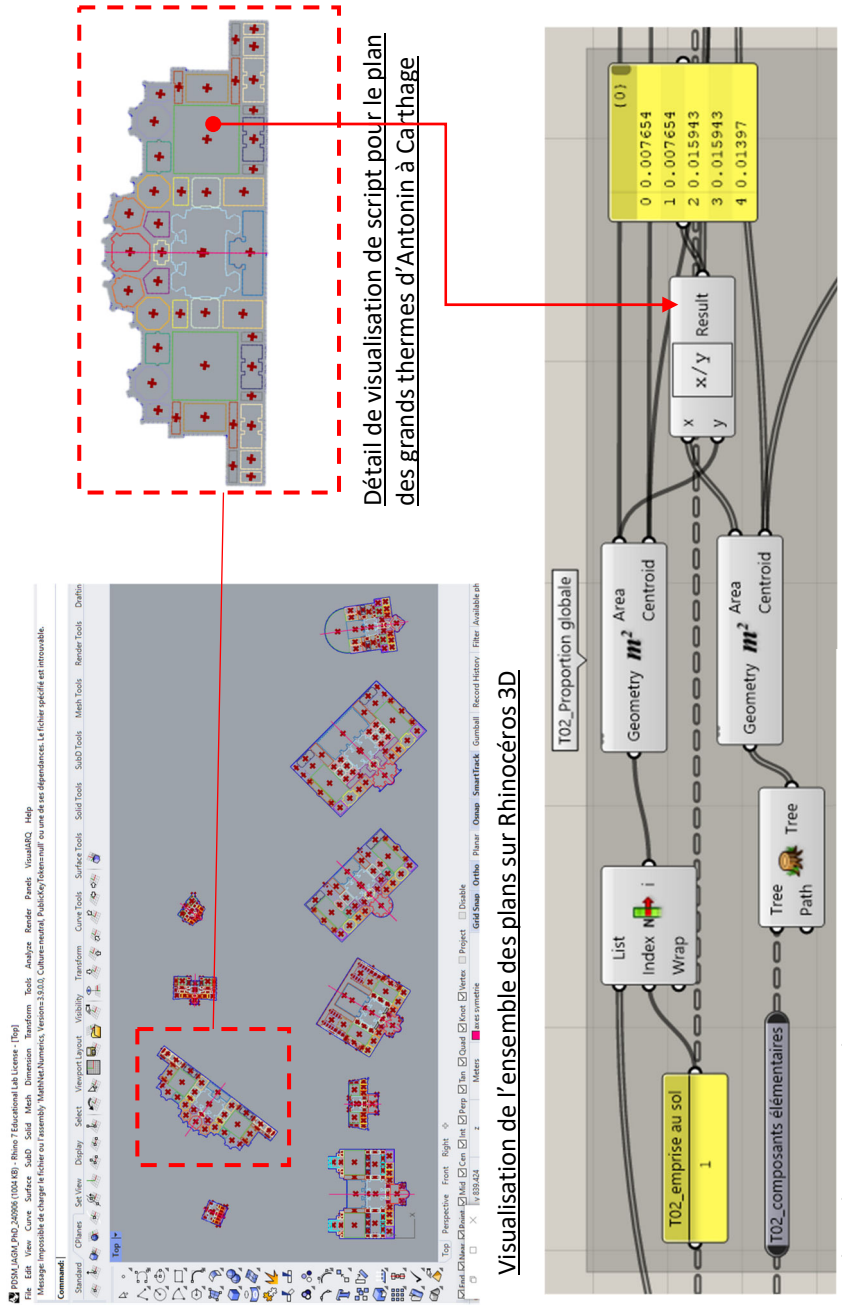


Fig. 302 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des proportions globales des plans entiers. (établie par l'auteure)

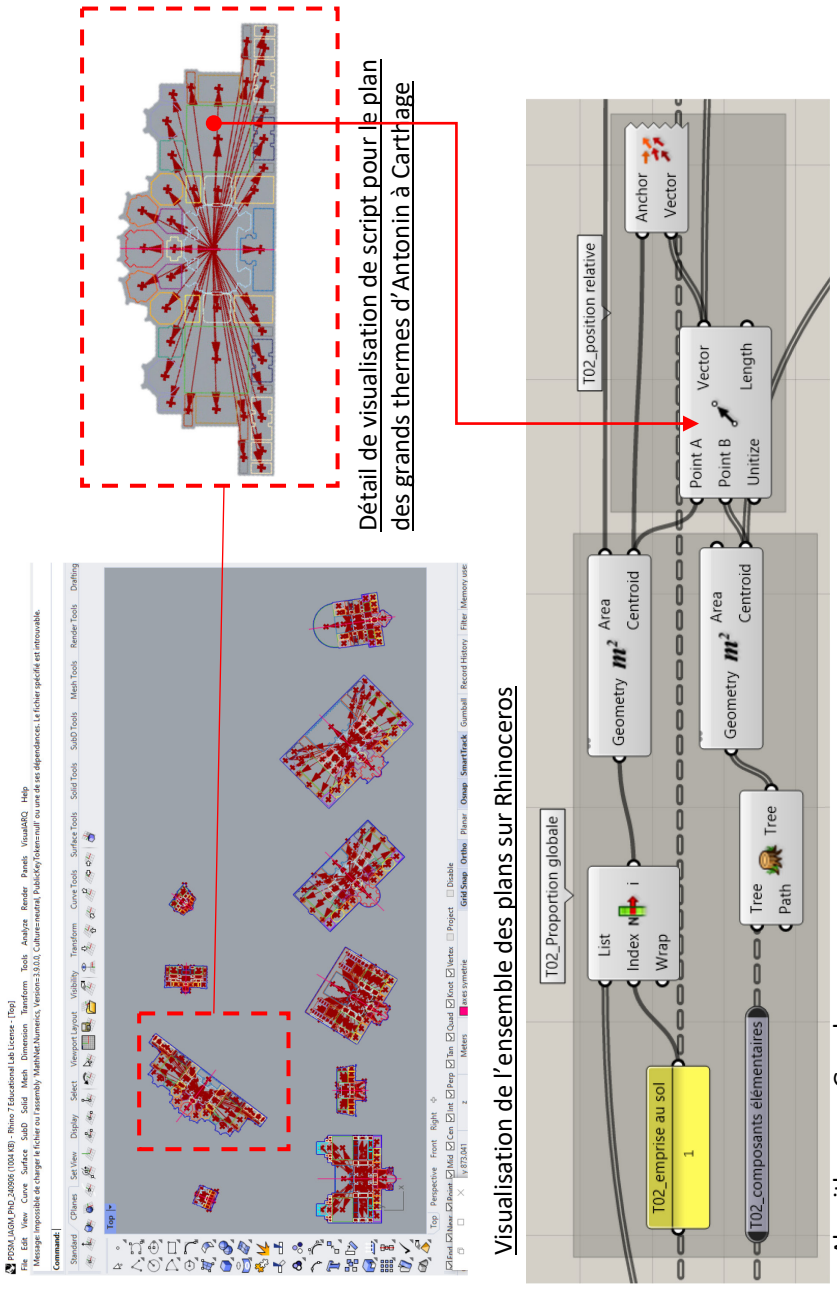


Fig. 303 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul des positions relatives des plans. (établie par l'auteure)

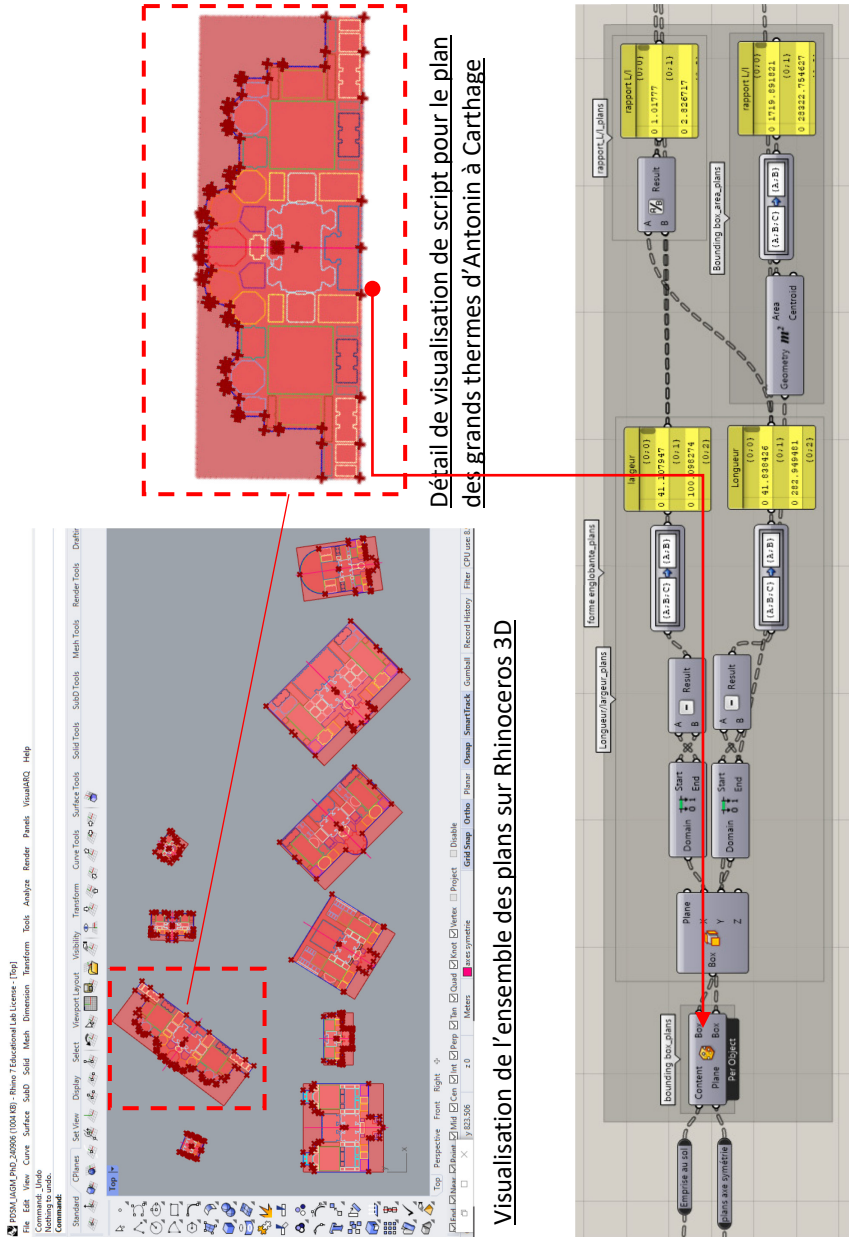


Fig. 304 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul de dimensions des formes englobantes des plans entiers. (établie par l'auteure)

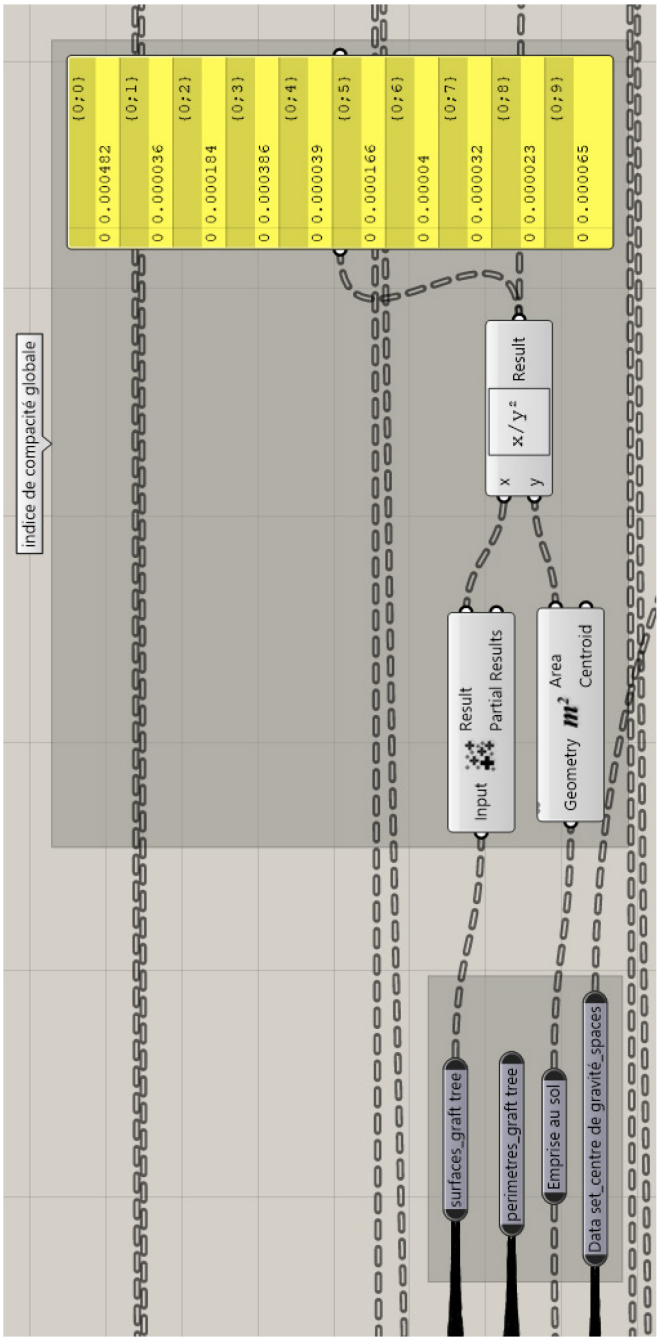


Fig. 305 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul d'indice de compacité du plan entier. (établie par l'auteure)

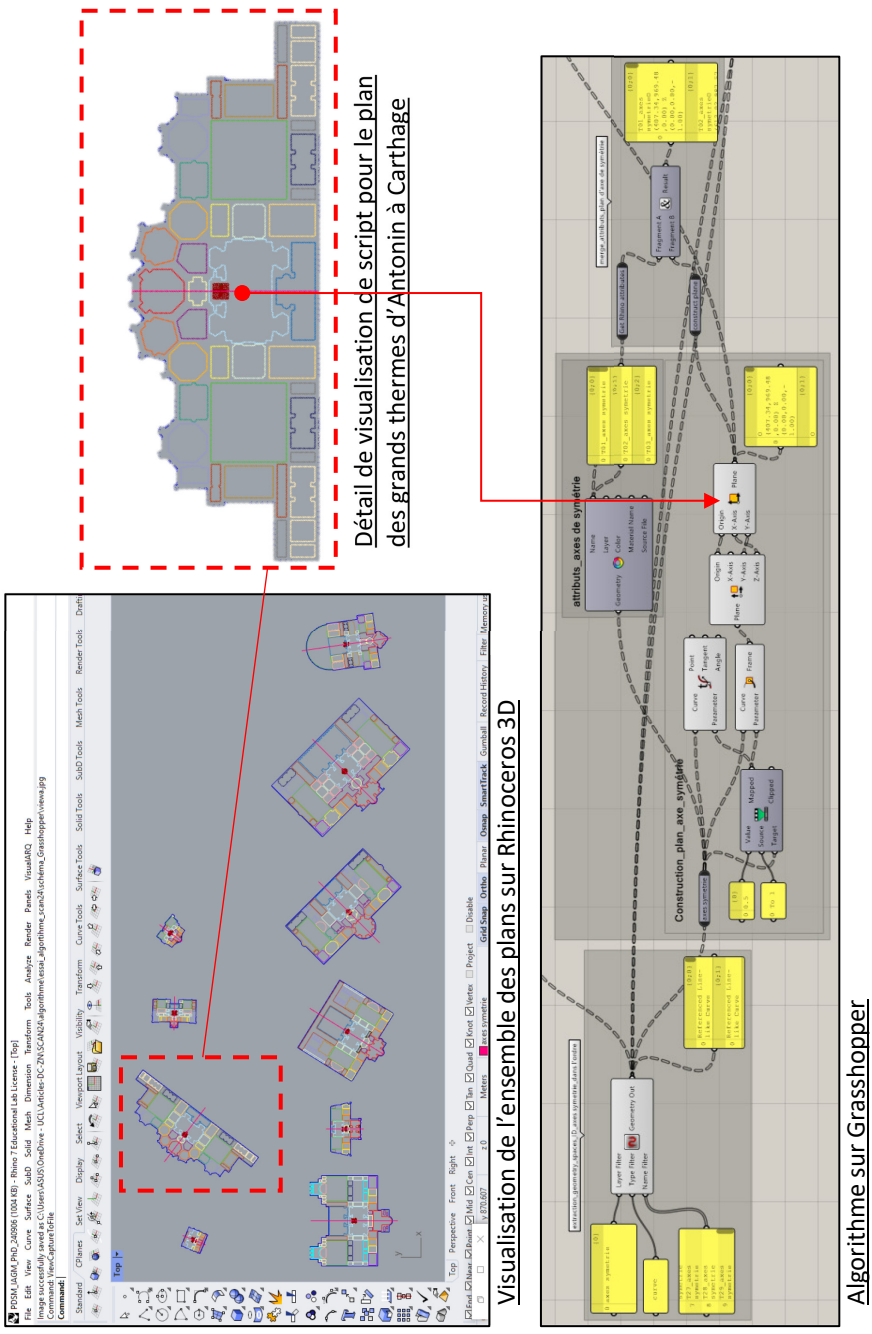


Fig. 306 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la création des plans des axes de symétrie dans différents plans. (établie par l'auteure)

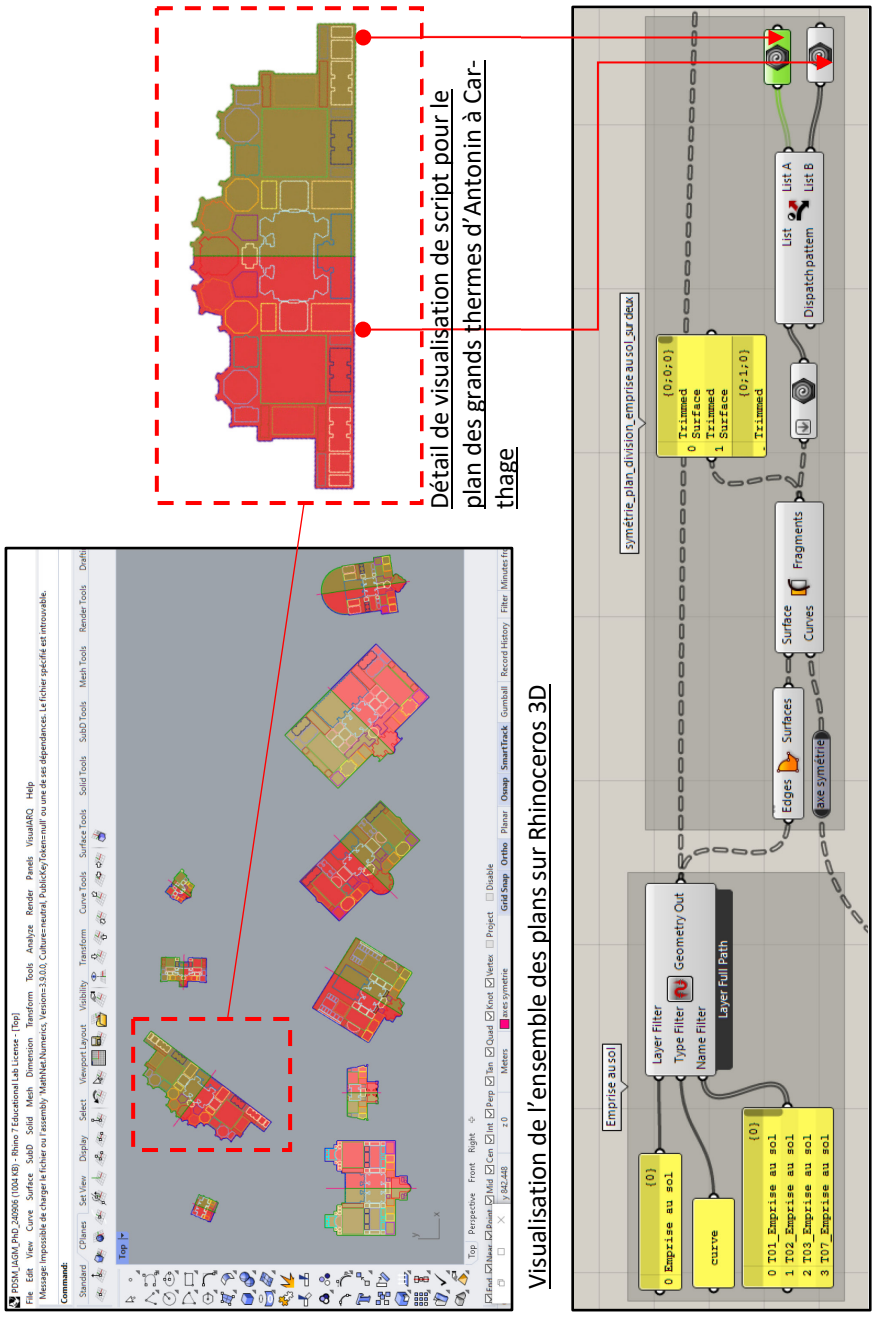


Fig. 307 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la création de la symétrie dans différents plans, selon les axes de symétrie propres à chacun. (établie par l'auteure)

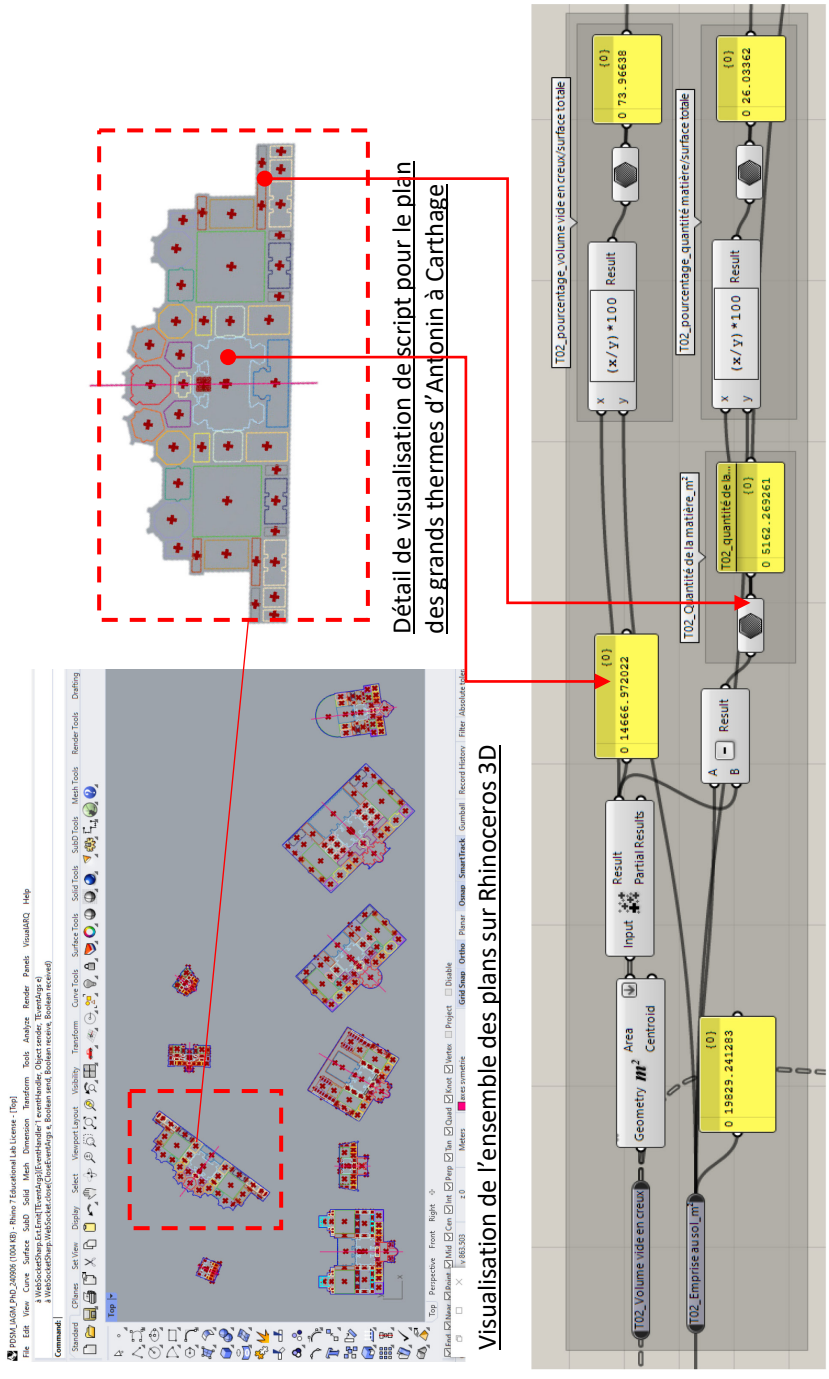


Fig. 308 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant le calcul de la proportion entre le plein et le vide. (établie par l'auteure)

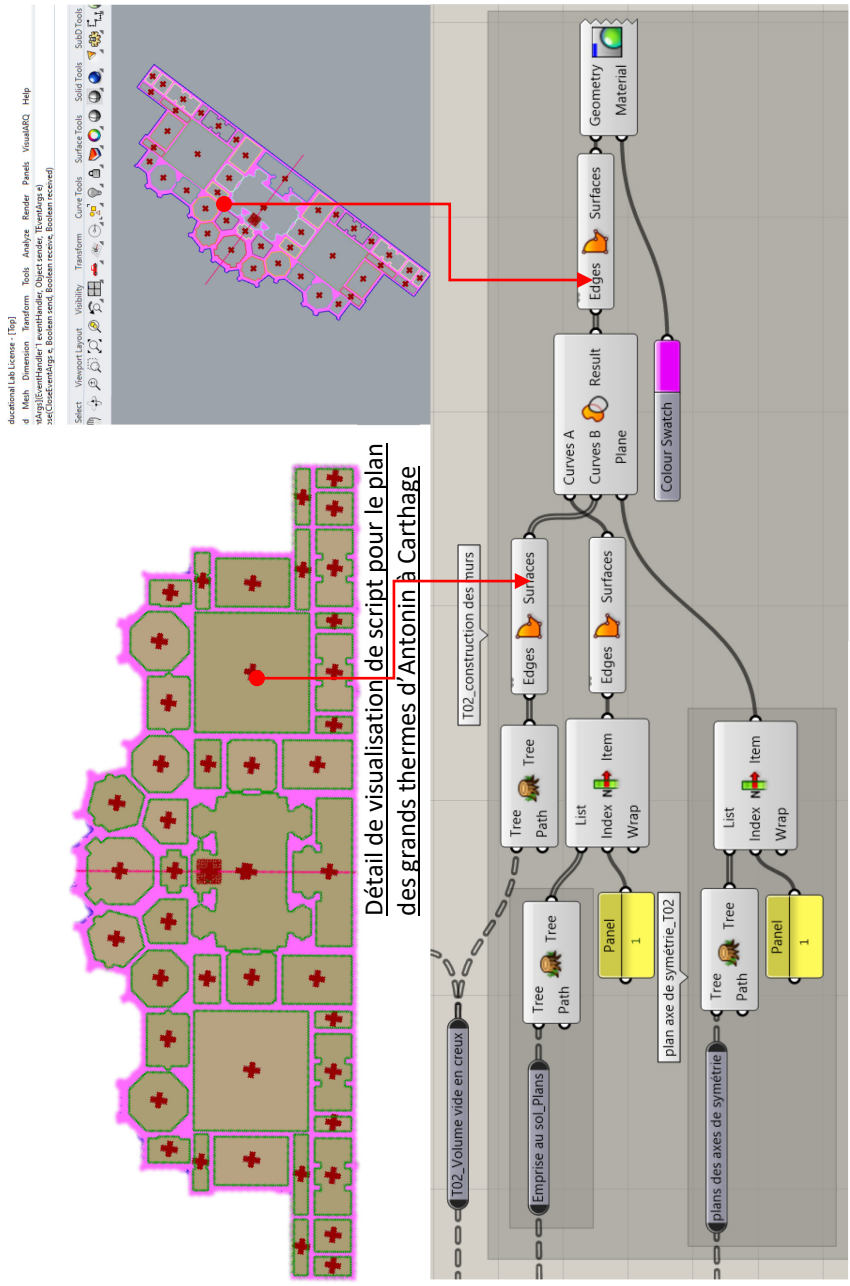


Fig. 309 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la génération des murs (le plein) à partir du vide (les composants élémentaires). (établie par l'auteure)

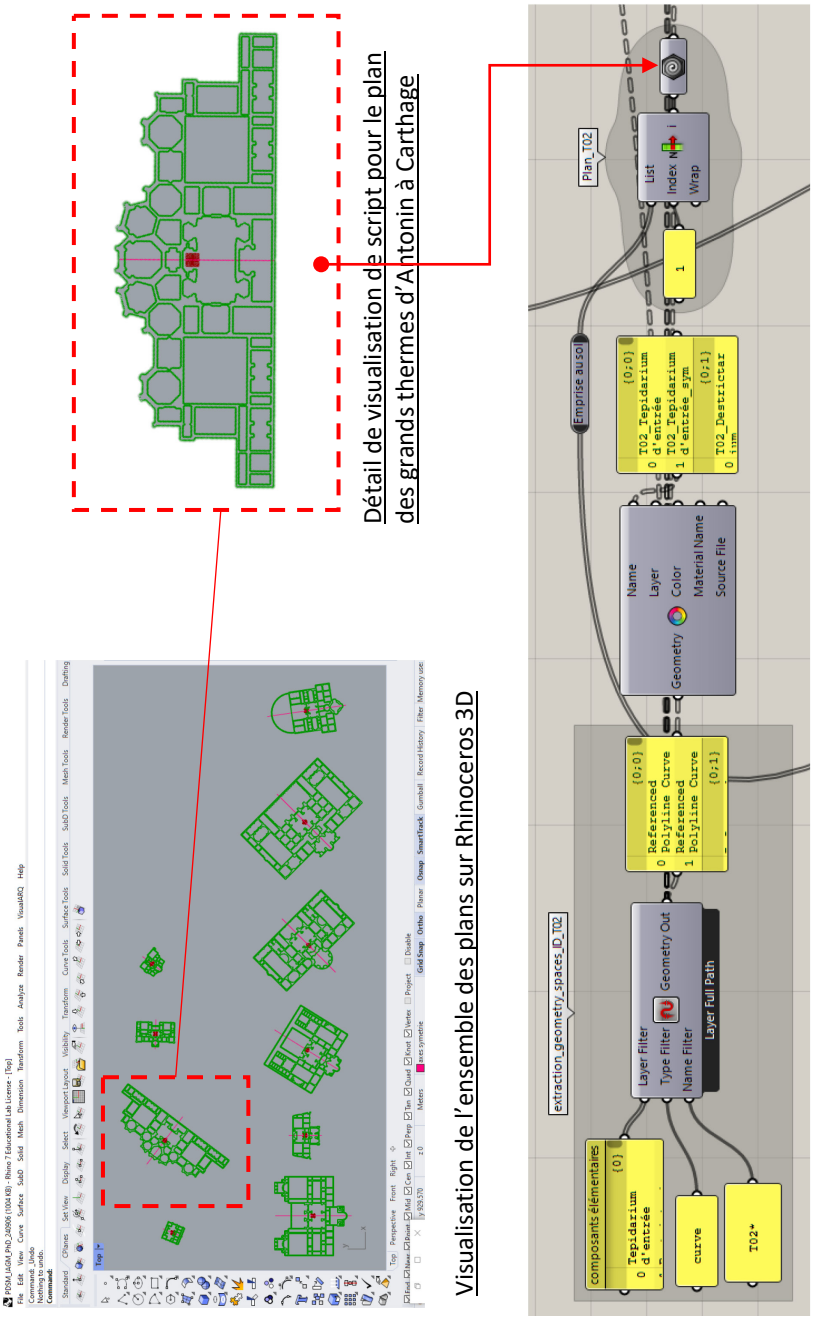


Fig. 310 – Fiche d'algorithme sur Grasshopper et visualisation dans Rhinoceros 3D : permettant la construction des plans entiers. (établie par l'auteure)