

UNIVERSITÉ —
— PARIS-EST



THÈSE

présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS-EST
École Doctorale : Ville, Transports et Territoires
Spécialité : Architecture
Cotutelle avec
UNIVERSITÉ DES ÉTUDES DE FERRARA
Département de Physique et Sciences de la Terre

par

Roberta Zarcone

intitulée

Tradition constructive et innovation pour l'architecture bioclimatique dans la région méditerranéenne en milieu urbain

Soutenue le 15/10/2018 devant le jury composé de :

Nadia HOYET, Présidente du jury, Examinatrice, Professeure Émérite à l'ENSA Versailles

Pierre FERNANDEZ, Rapporteur, Professeur à l'ENSA Toulouse

Chiara TONELLI, Rapporteur, Professeure à l'Università degli Studi Roma Tre

Hassan AIT HADDOU, Examineur, Maître de conférences à l'ENSA Montpellier

Maurizio BROCATO, Directeur de thèse, Professeur à l'ENSA Paris-Malaquais

Donato VINCENZI, Co-directeur, Professeur à l'Università degli Studi di Ferrara

Résumé

Le bâti traditionnel dans le bassin méditerranéen, avec son riche parcours historique, reflète les nécessités socioculturelles pour lesquelles il a été construit. Les besoins environnementaux interagissent et se superposent en déterminant, en milieu urbain, des solutions typologiques et constructives récurrentes. Les solutions architecturales du bâtiment historique méditerranéen présentent des qualités formelles, structurelles et fonctionnelles remarquables et, grâce à la capacité d'adaptation au contexte climatique local, elles garantissent également un bon niveau de confort environnemental interne.

De nos jours, la nécessité de réduire les consommations d'énergie dans le domaine de la construction entraîne le développement de la recherche vers des solutions innovantes qui combinent l'expérimentation sur les nouveaux matériaux et technologies, et la réappropriation des connaissances et des principes de construction de l'architecture « traditionnelle » en milieu dense.

Porté par ces thématiques, étendues aux interactions entre les éléments du bâti et l'ensemble des facteurs qui participent à la détermination du confort intérieur des usagers dans les bâtiments traditionnels en région méditerranéenne, notre questionnement de base est parti des interrogations suivantes : pouvons-nous récupérer des savoir-faire techniques perdus ou oubliés pour répondre aux problématiques actuelles de réduction de consommation énergétique des bâtiments ? Comment réinterpréter certains aspects caractéristiques des bâtiments traditionnels avec les technologies et matériaux contemporains ? Quels outils de conception sont à mettre en place ?

Nous voulions ainsi reconstruire un modèle d'architecture traditionnelle en se concentrant sur une ville en particulier, Palerme, pour sa capacité à illustrer, à travers ses phases historiques, l'évolution d'une métropole méditerranéenne ; sur tous les sous-systèmes (ville, bâtiment, composant constructif), nous retrouvons l'idée de transmission, avec des qualités implicites de permanence, d'héritage, de répétition et de durabilité. Ce choix nous permet, également, de cerner notre champ de recherche sans se perdre dans la multitude de variables possibles.

En s'appuyant sur des recherches scientifiques actuelles et passées, et sur des calculs numériques réalisés, nous essaierons d'évaluer les performances énergétiques de cette architecture qui est souvent considérée comme une forme empirique d'architecture « bioclimatique ». La connaissance du comportement thermique de ce bâti représente une phase préparatoire fondamentale afin de proposer des outils de conception pour la modélisation et l'évaluation thermique de systèmes technologiques innovants, capables de réinterpréter certains aspects de l'architecture traditionnelle avec la mise en place de matériaux ou techniques contemporains.

Mots-clés : Architecture méditerranéenne, Tradition constructive, Architecture bioclimatique, Systèmes innovants

Abstract

With its rich history, the traditional building in the Mediterranean Basin reflects the socio-cultural needs for which it was built : environmental needs interact and overlap, determining cyclic typological and constructive solutions in urban areas. The architectural solutions of the historic Mediterranean building have remarkable formal, structural and functional qualities and, thanks to their ability to adapt to the local climate context, they also guarantee a good level of internal environmental comfort.

The need to reduce energy consumption in the construction field leads today towards the research of innovative solutions that combine experimentation on new materials and technologies and the re-appropriation of knowledge and principles of ‘traditional’ architecture in a dense environment. Moving from these considerations, and taking into account the interactions between the elements of the frame and all the factors involved in determining the internal user’s comfort in traditional buildings in the Mediterranean Region, we asked the following questions : can we recover lost or forgotten technical know-how to answer the current problems of reduction of buildings energy consumption? How to reinterpret certain peculiar aspects of traditional buildings with contemporary technologies and materials? What design tools are needed?

We wanted to reconstruct a model of traditional architecture by focusing on a particular city, Palermo, due to its ability to illustrate the evolution of a Mediterranean metropolis through its historical phases; in all subsystems - city, building, component - we find the idea of transmission with implicit qualities of permanence, inheritance, repetition and durability. This choice also allows us to define our field of research without getting lost in the multitude of possible variables.

Based on past and current scientific research, along with numerical calculations, we will try to evaluate the energy performance of this architecture, often considered as an empirical form of ‘bioclimatic’ architecture.

The knowledge of the thermal behaviour of this building represents a pivotal preparatory phase in order to propose design tools for the modelling and thermal evaluation of innovative technological systems, capable of reinterpreting certain aspects of traditional architecture with the introduction of materials or contemporary techniques.

Key-words : Mediterranean Architecture, Traditional construction, Bioclimatic Architecture, Innovative Systems

Riassunto

L'architettura tradizionale nel bacino del Mediterraneo, crocevia di popoli e di tradizioni, è espressione delle esigenze sociali e culturali delle società che nel corso dei secoli vi hanno abitato. Nelle aree urbane, gli elementi climatici e ambientali hanno inciso fortemente sulla scelta dei modelli costruttivi, tanto da poterli spesso rintracciare nell'uso di tipologie ben definite. Le soluzioni architettoniche del costruito storico mediterraneo presentano notevoli qualità formali, strutturali e funzionali e, grazie alla capacità di adattamento al contesto climatico locale, garantiscono anche un buon livello di confort ambientale interno. L'utilizzo appropriato dei materiali e la forte interazione tra i fenomeni termici e gli aspetti formali dello spazio costruito, ci hanno spinti a rivalutare le conoscenze tecniche perdute, inserendole in un ambito di studio pluridisciplinare. Negli ultimi decenni, la crescente necessità di ridurre i consumi di energia in campo edilizio, ha portato alla ricerca di soluzioni che potessero coniugare la sperimentazione di nuovi materiali e di tecnologie innovative con il recupero delle conoscenze delle tecniche costruttive di tipo tradizionale. In questo percorso di ricerca si è cercato di ripercorrere le riflessioni e gli studi effettuati nel corso del XIX secolo dagli Igienisti, focalizzando l'attenzione sull'architettura tradizionale nell'area mediterranea. Si è voluto altresì ricostruire un modello di architettura tradizionale ordinaria focalizzandosi su una città in particolare, Palermo, per la sua capacità di esemplificare, attraverso le sue fasi storiche, l'evoluzione di una metropoli mediterranea; in tutti i sottosistemi dell'architettura urbana (città, edificio, elemento costruttivo), infatti, è stato possibile rintracciare le qualità di permanenza, ripetizione e sostenibilità tipiche di un modello di trasmissione dei saperi legato alle tecniche costruttive di matrice storica. Nel corso della nostra indagine conoscitiva abbiamo naturalmente dovuto tralasciare la moltitudine di variabili possibili per restringere il campo di ricerca. Nel processo di analisi e approfondimento relativo a queste tematiche, il nostro percorso di ricerca ha cercato di rispondere ai seguenti quesiti: È possibile recuperare il know-how tecnico-costruttivo perso o superato per rispondere all'attuale necessità di riduzione dei consumi energetici degli edifici? È possibile reinterpretare alcuni aspetti peculiari degli edifici tradizionali attraverso le tecnologie e i materiali contemporanei? Quali strumenti di progettazione devono essere messi in atto?

Sulla base delle ricerche scientifiche odierne e passate (in particolar modo quelle del periodo degli Igienisti) e dei calcoli numerici effettuati, abbiamo cercato di valutare la reale prestazione energetica di questa particolare architettura che spesso è considerata come una forma empirica di architettura bioclimatica. La conoscenza dello stato di fatto è stata propedeutica alla valutazione del comportamento energetico di un edificio, consentendoci di avanzare delle proposte sugli strumenti di progettazione per la modellazione e la valutazione energetica di sistemi tecnologici innovativi, reinterpretando alcuni aspetti di architettura tradizionale e al contempo implementando materiali o tecniche contemporanee.

Parole-chiave : Architettura mediterranea, Tradizione costruttiva, Architettura bioclimatica, Sistemi innovativi

Remerciements

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse et notamment mon directeur le Professeur Maurizio Brocato, pour son intérêt et son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant ces années de recherche. Je tiens à remercier mon co-directeur le Professeur Donato Vincenzi d'avoir accepté d'encadrer cette thèse en cotutelle et de m'avoir accompagné durant la rédaction de ma thèse.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de la Fondation Palladio, qui m'a permis, grâce à deux bourses de recherche, de mener ma thèse dans de bonnes conditions.

Je suis reconnaissante à tous ceux qui m'ont aidé à réunir des informations sur le bâti traditionnel à Palerme, les chercheurs du bâti ancien du département d'Architecture de l'Université de Palerme. Un grand merci au département de Physique et Science de la Terre de l'Université de Ferrara, merci à Paolo Bernardoni pour sa patience et sa disponibilité.

Je tiens à remercier tout le laboratoire GSA, lieu d'amitié et d'échange de connaissances et savoirs ; merci à Thierry Ciblac, Ahmed Hussein, Mohammad Mansouri, Francesco Pantalone.

Je suis également très reconnaissante à François Sterboul pour sa relecture attentive du manuscrit.

Au terme de ce parcours, je remercie enfin celles et ceux qui me sont chers et que j'ai quelque peu délaissés ces derniers mois pour achever cette thèse. Leurs attentions et encouragements m'ont accompagnée tout au long de ces années. Je suis redevable à mes parents et à ma sœur, pour leur soutien moral et matériel et leur confiance indéfectible dans mes choix.

Enfin, merci à Thibald pour ses nombreuses relectures, son encouragement et sa présence.

Table des matières

Remerciements	4
Introduction	11
Avant-propos	11
0.1 Définition du contexte et limitation du champ de la recherche	13
0.1.1 Le bâti traditionnel dans le bassin méditerranéen	13
0.2 Méthode et structure du travail	16
0.3 Les premières approches de la question environnementale : les études hygiénistes du XIX ^e siècle	18
Partie I Le bâti traditionnel méditerranéen : le cas de Palerme	21
1 L’orientation et l’exposition : la ville et le bâti	23
1.1 Le tissu urbain de Palerme : analyse typologique du bâti	24
1.2 L’orientation et l’exposition : la ville et le bâti	31
1.2.1 Analyse de l’exposition sur les axes de Palerme	34
1.3 L’accès solaire et les ombres	38
1.3.1 Analyse du facteur H/L pour les axes de Palerme	41
1.3.2 Analyse de la radiation solaire sur les canyons urbains à Palerme	46
1.4 La ventilation naturelle	51
2 Matériaux e composants constructifs à Palerme	57
2.1 Les matériaux de construction à Palerme	58
2.2 Étude morphologique des composants constructifs : l’enveloppe	71
2.2.1 L’enveloppe massive	71
2.2.2 Caractérisation thermo-hygrométrique de l’enveloppe massive	76
2.3 Étude morphologique des composants constructifs : les toitures	91
2.3.1 Les toitures	91
2.3.2 Caractérisation thermo-hygrométrique des toitures	94
2.4 Étude morphologique des composants constructifs : les balcons	97
2.4.1 Les balcons	97
2.4.2 Caractérisation thermique des balcons	101
2.5 Étude morphologique des composants constructifs : les planchers	116
2.5.1 Les planchers	116
2.5.2 Caractérisation thermique des planchers	120

Table des matières

Partie II Tradition et innovation	123
3 Les valeurs bioclimatiques de l'architecture traditionnelle	125
3.0.1 L'orientation	127
3.0.2 La ventilation naturelle	130
3.0.3 Les systèmes de protection des apports solaires	132
3.0.4 L'inertie	134
4 La réhabilitation	137
4.1 Architecture traditionnelle : quel profit aujourd'hui?	138
4.1.1 Nouveaux matériaux pour la réhabilitation : les matériaux à changement de phase (MCP)	139
4.2 Les dispositifs visant l'enveloppe	143
4.2.1 Les interventions sur les murs du bâti traditionnel	145
4.2.2 Les interventions sur les toitures traditionnelles	151
5 Le bâti neuf	155
5.1 La filière de la pierre et les outils numériques	157
5.1.1 L'utilisation de la pierre en Sicile de nos jours	159
5.2 La technologie photovoltaïque	161
5.2.1 Les concentrateurs solaires luminescents (LSC)	163
5.3 L'intégration architecturale du photovoltaïque	169
5.3.1 L'exemple du Solar Decathlon	173
Annexes	187
A La radiation solaire et l'éclairage	187
B L'analyse aux éléments finis en Cast3m	199
Table des figures	221
Liste de Tableaux	227
Bibliographie	227

Table des matières

Introduction

Avant-propos

Les dernières années se sont caractérisées par l'émergence des questions environnementales et par l'impact des outils fournis par les Technologies de l'information et de la communication (TIC). Du le Protocole de Kyoto à la COP21, l'accent est mis sur la nécessité de réduire les émissions de CO₂ par les bâtiments et sur la promotion de leur efficacité énergétique grâce à l'utilisation de technologies innovantes et à l'utilisation de sources d'énergie renouvelables.

Or, si les nécessités d'une construction rapide et économique d'après-guerre ont eu comme conséquence l'aplatissement des modèles d'architecture et le développement de solutions technologiques applicables en tout lieu et situation avec une perte générale d'identité urbaine, il est aussi vrai que la crise pétrolière des années 70 a forcé les États et les professionnels du bâti à réfléchir sur un nouveau mode de bâtir durable [88].

Le concept de durabilité en architecture a changé ces dernières années. Initialement on portait l'attention au contrôle des ressources, à la consommation d'énergie et aux modes de réduction des impacts environnementaux. Désormais, on s'attache fortement aux aspects techniques de la construction, tels que le choix des matériaux et des systèmes technologiques [131]. Pour le secteur de la construction, comme le souligne le *Final Report on sustainable construction* du 2001 de la Commission européenne, le mot «durable» prend différentes significations selon les cadres spécifiques géographiques, économiques, sociaux et culturels. Déjà lors de la Conférence Européenne des Villes de Aalborg en 1994 l'accent était mis sur les particularités contextuelles de chaque État, région ou ville [38]. Dans la Charte des villes européennes pour la durabilité, adoptée par les participants à la Conférence d'Aalborg, au point I.3 nous lisons que «Chaque ville étant différente, c'est à chacune qu'il appartient de trouver son propre chemin pour parvenir à la durabilité. Nous devons intégrer les principes de la durabilité à nos politiques urbaines locales» [38]. Cependant, on constate à partir des années 70, une contradiction entre «bonnes intentions» au niveau international et prescriptions législatives. Les prescriptions européennes, reçues dans les différents États avec les nombreuses législations, ont plutôt tendance à donner des limites à respecter de performances énergétiques, sans porter une grande attention aux caractères locaux du bâti. Les réglementations thermiques prennent en compte les différences climatiques de macro-zones, mais on considère souvent que le contexte local est négligé. Ces réglementations ont un caractère généraliste, qui fixe les mêmes valeurs de performances énergétiques pour tout bâtiment de la même zone climatique. Le développement des instances liées à la transition écologique et au développement durable en architecture offrait la possibilité pour les architectes de se libérer de la répétition des modèles industrialisés en faveur de la recherche de matériaux, de systèmes et de formes innovants, capables de répondre aux questions écologiques et durables locaux [88].

Cependant, que ce soit en France ou en Italie, pour la plupart des architectes d'aujourd'hui, le passage à la conception à basse consommation n'est pas un choix, mais plutôt une obligation réglementaire. Les normes sont vues comme une imposition, exigeant une technicité excessive [138]. Peut-être poussé par le cumul de normes toujours plus complexes et uniformisantes, l'aplatissement des modèles en

architecture n'a pas disparu ces dernières années, mais a seulement changé, dans la plupart des cas, en faveur des nouveaux modèles dits «bioclimatiques». Cela a entraîné le recours à des solutions standardisées, à la répétition de modèles, des formes compactes, aux petites ouvertures sur les façades pour réduire les déperditions, aux enveloppes totalement étanches issus d'un empilement de couches d'isolation «nécessaires» pour atteindre les résistances thermiques normées [88].

Ce respect pour la norme n'a pas toujours présenté une véritable qualité environnementale et écologique d'un bâtiment. De fait, souvent les normes ont visé à la réduction de la consommation d'énergie maximale d'un bâtiment en négligeant un aspect fondamental de l'approche bioclimatique, celle du confort intérieur de l'usager [121]. D'autre part, l'utilisation croissante des systèmes de chauffage et de climatisation due aux majeures exigences de confort intérieur a déterminé l'augmentation exponentielle de consommation d'énergie.

Prenons l'exemple de la région méditerranéenne. Les normes sur l'économie d'énergie dans le bâtiment ont négligé la question du conditionnement d'été [78], en favorisant, de plus en plus, la mise en place d'enveloppes légères et hyper-isolés d'importation continental. Ces normes ont favorisé l'adoption de bâtiments de modèle nord-européen, caractérisés par des valeurs de transmittance thermique très basses. Or, il est intuitif de penser que, dans les régions à climat tempéré, avec une forte variation thermique jour/nuit, la simple réflexion sur les consommations d'hiver n'est pas suffisante. Cette préoccupation ne s'arrête pas seulement aux régions méditerranéennes mais elle a été remarquée aussi en d'autres pays, notamment l'Allemagne et le Royaume-Uni [95], qui ont adopté des typologies constructives orientées vers la seule protection du froid, en générant de grands problèmes pour le confort d'été et de graves pathologies pour la construction (moisissure, condensation etc. . .). En France le volet concernant le confort d'été est considéré comme un des points faibles de la RT2012 [92]. Le législateur a intégré diverses mesures en faveur du confort d'été avec le calcul sur la température intérieure conventionnelle et autres prescriptions pour de possibles solutions comme la présence de protections solaires, le pourcentage d'ouvertures sur une surface et la prise en compte de l'inertie thermique. Cependant ces solutions ne permettent pas réellement de rendre compte de la réalité des situations [92].

La question du respect des questions environnementales touche non seulement les bâtiments neufs mais également la rénovation. Catherine Jacquot, présidente de l'Ordre des Architectes et Rémi Desalbres, président de l'association des architectes du Patrimoine ont interpellé la ministre de l'Écologie, Ségolène Royal, dans un courrier du 21 octobre 2016, pour lui demander de revoir le décret du 30 mai 2016 sur l'obligation d'effectuer des travaux de rénovation énergétique lors d'un ravalement. Ce décret généralisait la pratique de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE), ayant des conséquences non seulement sur l'esthétique du bâti ancien mais aussi pouvant entraîner le développement de graves pathologies dans la construction [54]. Ce courrier met en évidence la nécessité d'interventions basées sur une «approche fine», supportée par des simulations thermiques dynamiques ainsi que d'une étude historique préalable.

0.1 Définition du contexte et limitation du champ de la recherche

0.1.1 Le bâti traditionnel dans le bassin méditerranéen

Le bâti traditionnel dans le bassin méditerranéen, partie dense et vivante d'un riche parcours historique, reflète les nécessités socioculturelles pour lesquelles il a été construit. Les besoins environnementaux, culturels et productifs interagissent et se superposent en déterminant des solutions typologiques et constructives répétées [25]. Il ne représente pas un *unicum*, cristallisé dans l'histoire, mais son apparent conservatisme est dénié par un fort dynamisme d'influences. L'architecture traditionnelle méditerranéenne représente une forme empirique de conservation sélective, transmission des savoirs constructifs qui progressivement s'enrichissent de génération en génération.

Du point de vue sémantique, la définition de «l'architecture traditionnelle» est assez complexe. Souvent le bâti traditionnel est confondu avec le bâti spontané, populaire, vernaculaire ; la liste pouvant être étoffée de termes tantôt similaires, tantôt ambigus. Si, selon l'architecte Philippe Madec [59], le bâti vernaculaire désigne des constructions ancrées dans leur environnement, qui répondent à la géographie, aux conditions climatiques et à leur époque», l'origine latine du terme est liée à *vernaculus*, «relatif aux esclaves nés dans la maison», «domestique, familial, appartenant aux esclaves», évoquant plutôt une architecture isolée, spontanée, strictement liée aux territoires et produite avec très peu d'énergie.

La nuance de signification entre les deux termes devient plus claire. L'architecture traditionnelle peut être aussi bien de caractère urbain que rural ; l'architecture vernaculaire a un caractère strictement local et spontané. Dans le cadre de cette recherche nous faisons référence à une architecture urbaine, non monumentale et d'avant-guerre. Ce type d'architecture est aussi appelée «ordinaire» ou «mineure» en contreposition à une architecture «extraordinaire» ou «monumentale». Françoise Choay définit l'appellation «mineure» comme un terme utilisé en Italie (*architettura minore*) depuis le début du XX^e siècle pour indiquer les bâtiments résidentiels non monumentaux, souvent conçus sans architecte. Elle est définie comme «des constructions et des ensembles de bâtiments desquels on reconnaissait le rôle de contexte des monuments et la capacité de manifester le caractère identitaire d'une ville, d'une région» [5].

Déjà, l'origine latine du terme Méditerranée , «au milieu des terres», évoque l'existence d'un très large éventail de traditions, de couleurs, de morphologies et de sensations. Habiter la Méditerranée signifie identifier l'ensemble des enjeux qui composent cet espace et non plus l'espace en lui-même [25].

Ses qualités définissent un faisceau de perceptions, d'images et de thèmes qui sont des aspects singuliers d'un mode de vie et de tradition, d'une manière très identitaire de bâtir l'urbanité. La Méditerranée est, par excellence, un espace de confrontation entre les diversités qui montrent la même réaction à des problèmes similaires d'ordre climatique, la même attention à l'espace, les mêmes exigences de protection. L'histoire a fait qu'elle est pleine de mélanges et de co-présences qui nous

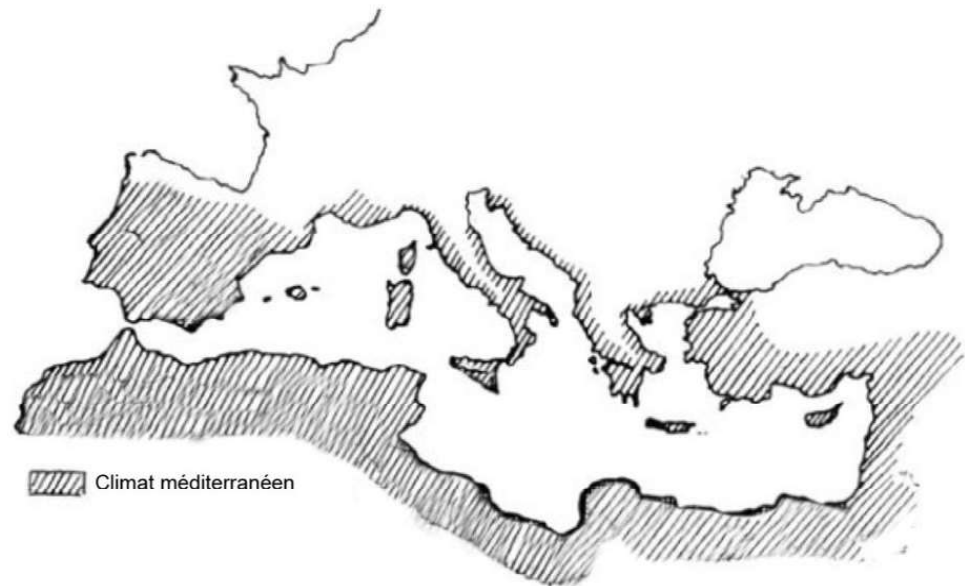


Fig. 1 – Le climat méditerranéen [61]

permettent de regarder la force de ses modèles. L'historien Fernand Braudel écrivait : «Dans son paysage physique, comme dans son paysage humain, la Méditerranée hétéroclite se présente dans nos souvenirs comme une image cohérente, comme un système où tout se mélange et se recompose en une l'unité originale» [17].

Les villes méditerranéennes parsèment le paysage et représentent, aujourd'hui, le lien d'échange d'énergies matérielles et immatérielles avec les villages et les terres. Certaines sont devenues de grandes métropoles gardant des quartiers dont l'architecture témoigne de l'histoire et de la tradition. Même si, déclinée selon les particularités du site, riche ou pauvre, l'habitation méditerranéenne présente des solutions répétées de morphologies urbaines et de typologies constructives. Ces solutions persistent, presque inchangées, jusqu'au xx^e siècle. La transition graduelle entraînée par le mouvement moderne vers le fonctionnalisme a fait décliner, sous la pression économique, l'étroite interaction entre les savoirs techniques, la culture matérielle et l'environnement.

En 1878, dans *Le Fer*, l'architecte Jules Garnier s'interrogeait sur l'innovation des constructions en fer : «Cette innovation s'est produite plutôt sous l'empire de calculs économiques que par l'inspiration de sentiments artistiques» [52]. Les architectes du xix^e siècle se questionnaient sur la possibilité réelle d'importer des modèles continentaux dans la région méditerranéenne, en raison des différences culturelles et environnementales caractéristiques dont il était impossible de faire abstraction [131].

Lorsque, en 1869, l'architecte palermitain Giuseppe Damiani Almeyda a conçu le nouveau marché aux poissons de la ville, ayant pris pour inspiration les marchés parisiens de l'époque en fer et vitre, il avait sous-évalué les spécificités climatiques qui finalement ont mené à l'abandon et à la démolition de cette structure. En 1872,

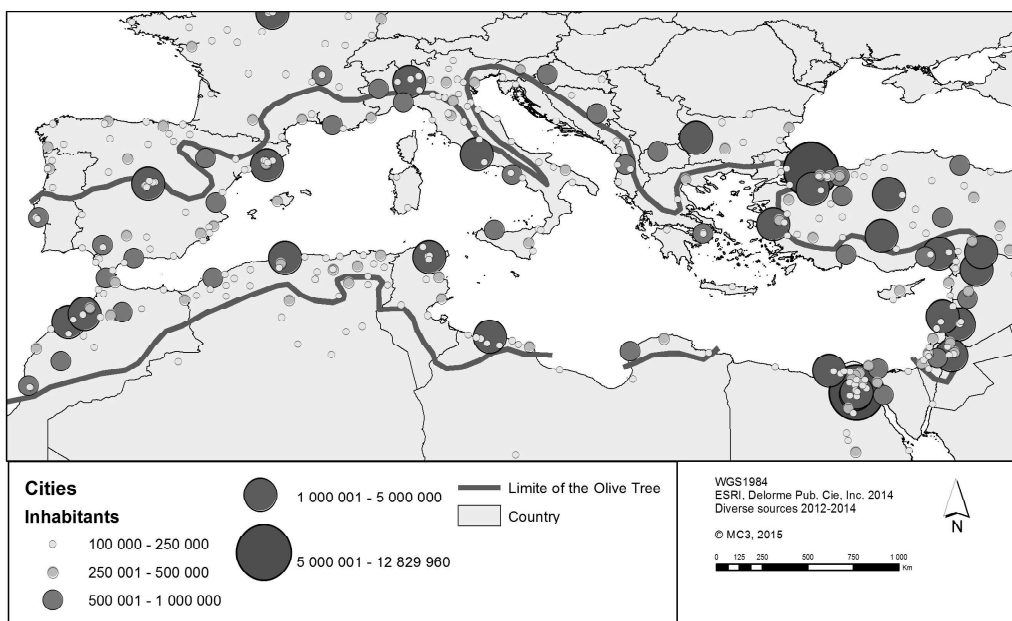


Fig. 2 – Les villes méditerranéennes d’après [18]

l’architecte palermitain Enrico Salemi critique l’importation aveugle de l’architecture en fer et vitre de l’Angleterre. Il écrivait : «[...] Il a été un caprice de la mode justifiable comme les crinolines, les chignons, les robes à queue dont il est futile de parler. Paris vit l’implantation de plusieurs hectares destinés à cet usage, et l’Allemagne, l’Italie, la Suisse et la Belgique n’ont pas tardé à la suivre. Dernières en date, les mairies de Naples et Palerme où l’adoption de ce système, en raison d’une part du prix très élevé du fer et d’autre part de celui plus bas de la pierre de taille, mais surtout pour le besoin de se protéger de la forte chaleur, n’était pas conseillé pour quelque motif raisonnable que ce soit» [109].

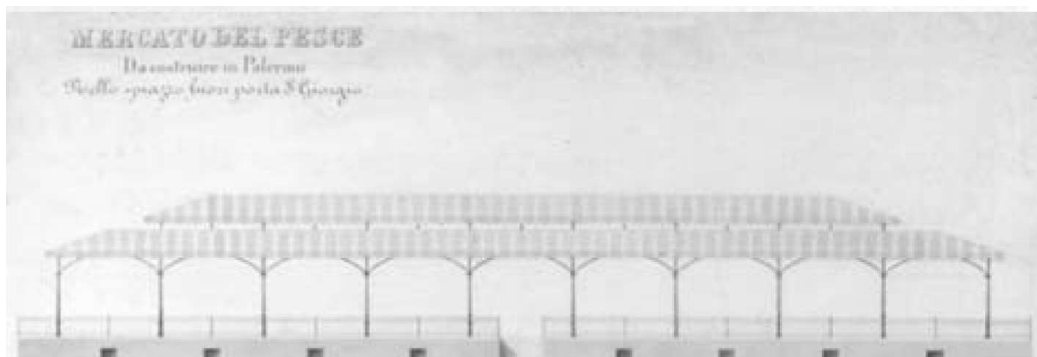


Fig. 3 – Le premier projet du marché du poissons de l’architecte Giuseppe Almeyda [109]

Malgré les difficultés climatiques et la pauvreté des matériaux et des outils, une attention particulière est portée aux stratégies de contrôle thermique du bâti. L'architecture traditionnelle en milieu dense a privilégié l'utilisation de systèmes constructifs en maçonnerie, caractérisés par une grande épaisseur et une forte inertie thermique, avec le moins de fenêtres possible et des espaces ouverts comme éléments de contrôle et de mitigation climatique. Plusieurs recherches ont mis en évidence que dans la Méditerranée la forme s'est déclinée selon les besoins d'ensoleillement et de ventilation, pour minimiser le stockage thermique d'été sans compromettre celui d'hiver [61].

Cette attention pour les aspects environnementaux se présente aussi comme élément performatif du territoire : si d'un côté la construction dépend de l'environnement, de l'autre l'architecture devient un élément fondamental du paysage. Environnement et architecture deviennent deux composants singuliers, mais compénétrés, du même mécanisme qui les associe.

L'étude des matériaux et des techniques constructives traditionnelles, la récupération de la dialectique entre matériaux et homme prend aujourd'hui une grande importance si on considère le bâti traditionnel comme un patrimoine inépuisable de suggestions pour un nouveau mode de bâtir durable.

0.2 Méthode et structure du travail

La nécessité de réduire les consommations d'énergie dans le domaine de la construction entraîne aujourd'hui le développement de la recherche des solutions innovantes qui combinent l'expérimentation de matériaux et de technologies nouveaux. Dans la région méditerranéenne, la ré-appropriation des connaissances et des principes de construction de l'architecture «traditionnelle» en milieu urbain dense semble également nécessaire. En effet, l'utilisation appropriée des matériaux, la forte interaction entre les phénomènes thermiques et les aspects formels de l'espace qu'on retrouve dans l'architecture traditionnelle méditerranéenne, nous a conduits vers une idée de récupération des savoirs perdus sur un terrain d'investigation pluridisciplinaire. Les solutions architecturales et constructives du bâti ancien méditerranéen présentent souvent non seulement des qualités esthétiques, structurales et fonctionnelles mais aussi un bon niveau de confort intérieur, dû surtout à la façon d'adapter ces solutions au contexte climatique local. Cependant, les différentes interventions de transformation urbaine et architecturale plus ou moins récentes, ont eu des conséquences lourdes sur le confort intérieur des usagers [53].

C'est dans cette optique actuelle de réinterprétation et de réintégration des caractères constructifs de l'habitat traditionnel, qu'il est intéressant alors d'investiguer sur les savoirs techniques et la culture matérielle du bâti traditionnel en milieu dense.

Dans ce cadre, nous essaierons de retracer les réflexions et les recherches conduites au cours du XIX^e siècle par les hygiénistes de l'époque, en portant principalement notre attention aux études menées sur l'architecture traditionnelle dans la région méditerranéenne. Nous proposons en effet de reconstruire un modèle de maison méditerranéenne dans une ville en particulier. Cela nous permet de cerner notre champ de recherche sans se perdre dans la multitude de variables possibles.

Nous essaierons de reconstruire ce modèle traditionnel sans partir de modèles connus d'architecture traditionnelle méditerranéenne, qui sont souvent le fruit de simplifications schématiques. S'appuyer sur une ville méditerranéenne en particulier, comme objet de recherche, permettra de prendre en considération non seulement le contexte historique lié au développement de la ville mais aussi les enjeux locaux qui ont déterminé le développement de techniques constructives et matériaux spécifiques. Dans ce cadre, la ville historique de Palerme représente bien l'évolution d'une métropole traditionnelle méditerranéenne. Dans tous les sous-systèmes, ville, bâtiment, composant constructif, nous retrouvons l'idée de transmission, avec les qualités implicites de permanence, d'héritage, de répétition et de durabilité (Fig.4). Si la ville ancienne présente des caractères traditionnels répétés jusqu'aux années d'avant-guerre, aujourd'hui Palerme montre une grande hétérogénéité dans son tissu urbain. La *Colata di Cemento* (coulée de béton) qui a envahi la ville à partir des années 60 caractérise ce qu'on a appelé le *Sacco di Palermo*. Il s'agit d'une période de construction et de spéculation intense au détriment du paysage et du patrimoine culturel, marquée par les opérations criminelles et mafieuses.

Porté par ces considérations, mais étendues aux interactions entre les éléments du bâti et l'ensemble des facteurs qui participent à la détermination du confort intérieur des usagers dans les bâtiments traditionnels en région méditerranéenne, notre questionnement de base est parti des interrogations suivantes : pouvons-nous récupérer des savoir-faire techniques perdus ou oubliés pour répondre aux problématiques actuelles de réduction de consommations énergétiques des bâtiments ? Est-il possible de concevoir des solutions technologiques innovantes assurant de bonnes performances énergétiques, tout en gardant l'aspect topologique de l'architecture des villes méditerranéennes ? Comment réinterpréter certains aspects caractéristiques des bâtiments traditionnels avec les technologies et les matériaux contemporains ? Quels outils de conception sont à mettre en place ?



Fig. 4 – Vue de haut de la ville de Palerme

Pour développer cette problématique, plusieurs champs d'investigation se sont ouverts. Ainsi, trois approches se croisent tout au long de la thèse, avec un dénominateur commun qui est de définir les paramètres influençant les performances thermiques et énergétiques d'un bâtiment. Ces trois approches peuvent se caractériser simplement comme suit :

- L'approche par l'histoire de la construction, qui nous permet de définir les caractéristiques typiques d'un modèle d'architecture ordinaire méditerranéenne ;
- L'approche physique, qui traite des interactions entre contexte environnemental et espace construit ;
- L'approche morphologique, qui représente une trame de fond à ce travail puisque la morphologie d'un bâtiment ou d'un simple système constructif est souvent la réponse à l'interaction énergétique entre espace extérieur et intérieur ;

Dans ce cadre de recherche, le recours au «numérique» est fondamental pour l'analyse des performances énergétiques et la mise en place d'outils capables d'assurer l'interopérabilité de l'analyse morphologique, constructive et énergétique. Pour ce faire, selon les différents cas d'étude, nous utilisons les logiciels Ecotect et Grasshopper ou nous créons notre propre outil (Wolfram mathematica et Matlab).

Ce travail de recherche se développe en deux parties.

Dans la première partie, nous considérons trois échelles pour l'étude de l'architecture traditionnelle méditerranéenne : la ville et le bâti (première chapitre), le système constructif (deuxième chapitre). En s'appuyant sur des recherches scientifiques actuelles et passés (période des hygiénistes) et sur les calculs numériques réalisés, nous essaierons d'évaluer les performances «énergétiques» de cette architecture qui est souvent considérée comme une forme empirique d'architecture «bioclimatique». Sur la base des résultats de la recherche bibliographique et des calculs numériques réalisés pour l'analyse du bâti ancien, nous proposons dans la deuxième partie des outils de conception pour la modélisation et l'optimisation de systèmes technologiques innovants, capables de réinterpréter certains aspects de l'architecture traditionnelle (matériaux, techniques constructives et morphologies) avec la mise en place de matériaux ou techniques contemporains.

0.3 Les premières approches de la question environnementale : les études hygiénistes du XIX^e siècle

Nous posons ici l'hypothèse que la question de l'hygiène et de la salubrité, qui a caractérisé la seconde moitié du XIX^e siècle, et qui s'est largement répandue les premières décennies du XX^e siècle, peut être considéré comme la source d'une approche de la durabilité, dans laquelle on reconnaît l'une des stratégies clés pour la conception et la gestion de l'architecture future.

Cette question est à l'origine placée sous un triple aspect :

- L'aspect urbain, qui traite des problèmes inhérents à l'ensoleillement et de ventilation dépendant de l'amplitude et de l'orientation des rues, ainsi qu'à la hauteur des façades des bâtiments ;

-
- L'aspect relatif à chaque bâtiment, qui traite de facteurs géométriques tels que la hauteur de la façade, la forme et le positionnement des ouvertures pour l'ensoleillement ;
 - L'aspect relatif aux matériaux et aux systèmes constructifs qui étudie les matériaux de construction et les éléments de construction d'un point de vue inédit, à savoir les propriétés physico-hygiéniques.

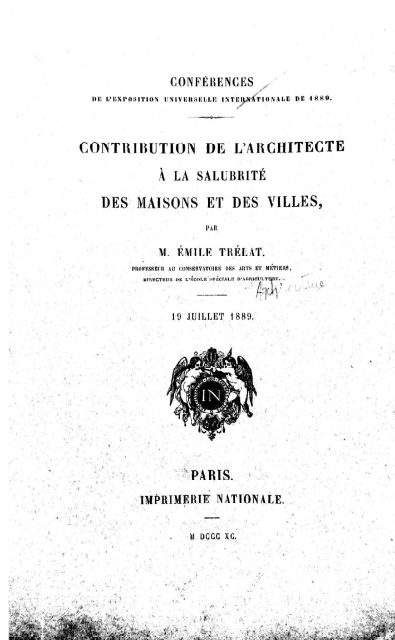
Au XIX^e siècle les premières études sur les «milieux favorables» [128] à la santé ont rencontré un grand succès, l'insalubrité dénoncée par les hygiénistes dans toute l'Europe continentale a suscité le développement de plusieurs recherches sur la contribution de l'architecte à la salubrité des maisons et des villes.

Médecins, ingénieurs et architectes travaillèrent ensemble pour des projets de transformation des villes qui répondaient à des préoccupations de salubrité. Déjà Vitruve, au I^e siècle avant J.C., dans *De architectura*, écrivait à propos de l'architecte : «*medicinae non sit ignarus*». L'architecte devait connaître les «inclinaiions du ciel» et tout ce que les grecs appelaient «climats et influence de flux d'air, lieux salubres et utilisation des eaux» [26]. La France, et en particulier Paris, ont anticipé cette attention portée à la salubrité de ville. On peut citer le «Casier sanitaire des maisons» mis en place en 1884 ou encore les premières formations liées à ces problématiques dans les Écoles des arts et métiers [127]. Emile Trélat, professeur au conservatoire des arts et métier, était parmi les rares architectes à participer activement aux travaux de la Société de médecine publique et de génie sanitaire [93]. En 1889, lors des conférences de l'exposition universelle internationale, il dénonce l'état du milieu urbain «abimé», l'air vicié, la lumière amortie, le calorique mal attribué et la saleté du sol. Il identifie alors les cinq facteurs extérieurs de la santé : l'air, la lumière, la chaleur, l'eau, et le sol . Il était question de faire rentrer plus d'air, plus de soleil et plus de lumière dans les espaces de la ville et dans les habitations.

Sous l'impulsion des découvertes médicales de Koch et Pasteur sur l'origine bactériologique de certaines maladies comme la tuberculose et le choléra, plusieurs recherches, études ou conférences ont été consacrées à la salubrité en ville et dans l'habitation [127].

En Italie, la fin du XIX^e siècle connaît un grand développement sur ces thématiques. En 1888, l'école de perfectionnement d'hygiène publique est inaugurée auprès des laboratoires de la direction générale de la Santé. En 1890 la revue *Ingegneria sanitaria* publie les résultats des recherches de médecins, architectes et ingénieurs italiens et internationales.

Nous posons alors l'hypothèse qu'il existe des niveaux de réflexion sur les questions environnementales liées à la ville et au bâti assez proches à travers le temps. Aujourd'hui comme hier, la réflexion sur le bâti du futur porte aussi sur la lumière, sur le renouvellement de l'air, sur l'approvisionnement solaire. Si hier il s'agissait de l'assainissement des villes et des habitations, aujourd'hui il est question principalement de contrôle de ressources et de réduction de la consommation énergétique dont le secteur des bâtiments est considéré comme le principal responsable.



«Disons, Messieurs, que l'homme s'accommode à la vie des cités; mais il ne le fait pas qu'à la condition d'y sacrifier une partie de sa santé»

Fig. 5 – Contribution de l'architecte à la salubrité des maisons et des villes, Émile Trélat [128]

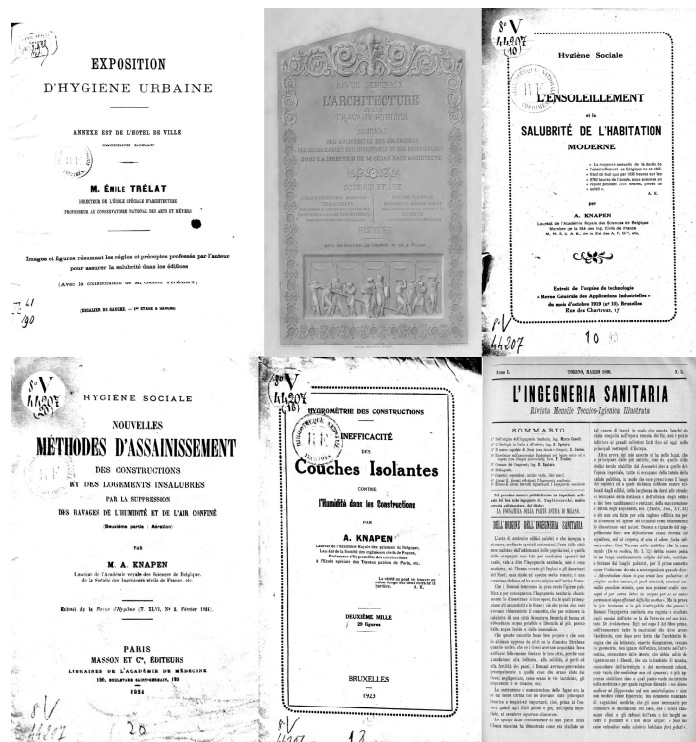


Fig. 6 – Différentes publications autour de la question de l'hygiène dans les bâtiments

Première partie

**Le bâti traditionnel
méditerranéen : le cas de
Palerme**

Chapitre 1

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Résumé : L'interaction entre les paramètres physiques (climat local, profils des températures, ventilation naturelle, radiation solaire entre autres) et les paramètres morphologiques du bâti (orientation, exposition) donne des informations importantes pour la compréhension des potentialités intrinsèques du bâti traditionnel. La prédiction des effets d'ombre causés par les bâtiments et les obstructions urbaines est généralement essentielle pour évaluer le poids que le rayonnement solaire peut avoir sur le bilan énergétique d'un bâtiment. Dans ce chapitre nous analysons, tout d'abord, l'évolution historique des typologies récurrentes du bâti traditionnel à Palerme; dans un deuxième temps, nous évaluons les expositions et les orientations du tissu urbain de Palerme en essayant de mettre en relation l'apport solaire et les caractères morphologiques propres à ce bâti.

Riassunto : L'interazione tra i parametri fisici (clima, profilo di temperature, ventilazione naturale, radiazione solare) e i parametri morfologici del costruito (orientazione ed esposizione) fornisce delle informazioni importanti per la comprensione delle potenzialità dell'edilizia tradizionale. L'analisi degli effetti delle ombre portate dagli edifici e dalle costruzioni urbane è essenziale per valutare il peso che la radiazione solare può avere sul bilancio energetico di un edificio. In questo capitolo, si analizza l'evoluzione storica delle tipologie ricorrenti del costruito tradizionale palermitano. In seguito, si analizzano le esposizioni e gli orientamenti del tessuto urbano di Palermo, in modo da mettere in relazione l'apporto solare con i caratteri morfologici propri di queste tipologie.

1.1 Le tissu urbain de Palerme : analyse typologique du bâti

Pour analyser les typologies du bâti historique à Palerme, il est nécessaire de retracer le processus d'urbanisation de la ville. Bien que notre reconstruction ne soit pas exhaustive, nous essayons d'analyser le bâti du centre ville en parcourant les étapes historiques et législatives principales de son urbanisation. Dans cette reconstruction, nous laissons de côté les dynamiques économiques, politiques et sociales qui ont contribué à la structuration typologique de la ville de Palerme aujourd'hui.

La recherche, dans le tissu urbain de Palerme, des différentes implantations du bâti de première édification met en lumière de manière logique le processus de formation qui a conduit à l'actuelle structuration urbaine. Les outils les plus adaptés pour étudier les formes urbaines originelles et leurs évolutions sont les plans cadastraux de Sicile datant de la fin du XIX^e siècle [77]. Grâce à eux, il est possible d'affirmer que le modèle d'habitation le plus diffusé à Palerme est la maison à patio, commune à la tradition grecque, romaine et islamique. Le bâtiment se développe autour d'une cour ou patio qui est le centre et le cœur du logement et de la vie familiale [25]. La présence d'eau et de végétation, surtout dans le bâti majeur, favorise son microclimat, son rafraîchissement passif grâce à la pénétration des vents dominants d'été, mais aussi à sa capacité de tempérer le fort contraste lumineux méditerranéen entre intérieur et extérieur.



Fig. 1.1 – Cour du *Palazzo Castrone*

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Au cours du Moyen Âge, avec le processus de réduction des surfaces habitables du bâti résidentiel, le patio devient pluri-familial, affirmant une caractéristique d'unité de voisinage qui reste ineffaçable dans la structure urbaine de Palerme. Les Normands, après la conquête de la ville, ont essayé d'importer une culture urbaine continentale prévoyant l'organisation de bandes de bâtiments constitués de constructions de largeur égale à une seule parcelle et de profondeur variable (5-6 mètres). Cependant, ce modèle d'importation s'est adapté rapidement aux traditions palermitaines, en reconstituant l'organisation à patio de la typologie d'habitation locale [77] (Fig.1.2). Jusqu'au XIX^e siècle, le processus évolutif du bâti traditionnel de Palerme se base sur des agrégations et fusions successives, ce qui est physiologique pour une ville murée qui ne disposait pas de nouvelles zones d'expansion.

La Fig.1.2 montre les traces de la parcelle originaires et les transformations successives d'un îlot au centre-ville de Palerme.

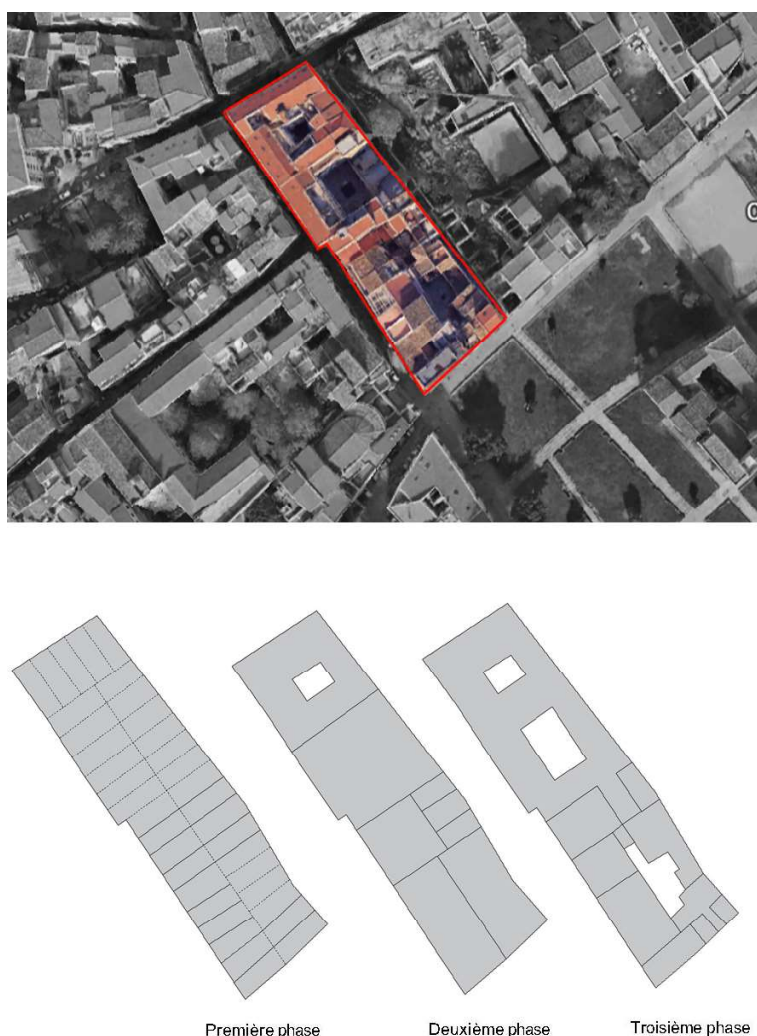


Fig. 1.2 – Tissu urbain de Palerme. En couleur, l'îlot de via Alloro, via Castrofilippo, via Riso (en haut). Traces de lotissement (en bas) [77]

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Au XIX^e siècle la situation sanitaire et hygiénique à l'intérieur du centre ville s'est aggravé. L'administration décida d'intervenir en proposant un plan de remise en état. En 1885, le *Piano regolatore di risanamento*, de l'ingénieur Felice Giarrusso, vit le jour (Fig.1.3). Ce plan, qui suivait le modèle parisien d'Hausmann, prévoyait la démolitions d'immeubles et la construction de nouveaux axes.

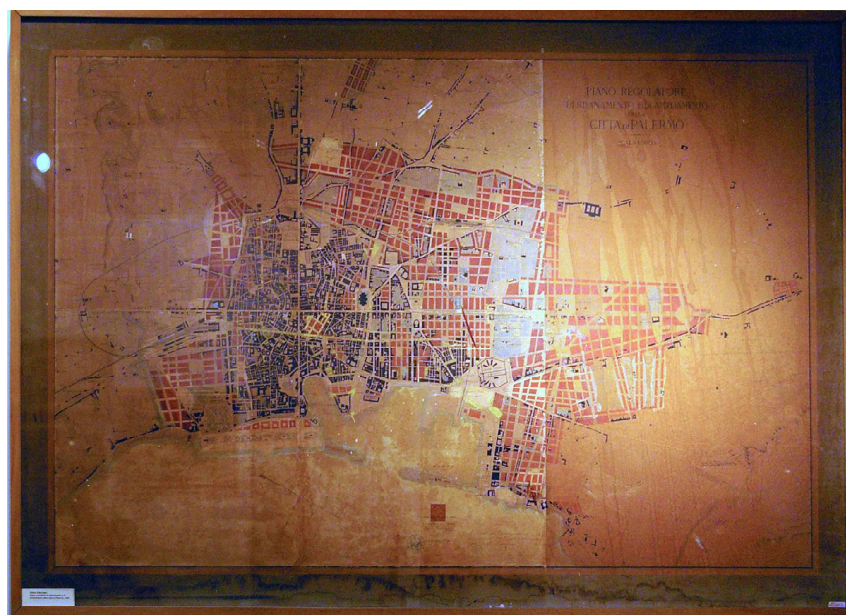


Fig. 1.3 – *Piano regolatore di risanamento e ampliamento* de la ville de Palerme (en haut) et *Piano regolatore di risanamento* (en bas) de l'ingénieur Giarrusso, 1885 [80]

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Avec la nécessité de reconstruire après les bombardements de la Seconde Guerre mondiale, Palerme a connu dans les années 50 une période d'intense activité de construction urbaine. Le centre historique de Palerme était le plus touché par les bombardements de la Seconde Guerre mondiale et la forte densité de peuplement combinée à un tissu historique très dense avait favorisé des conditions de logement malsaines et très difficiles. Le *Piano regolatore generale*, de 1962, tout en protégeant certaines zones du centre historique, avait l'objectif d'améliorer cette vaste zone avec d'autres démolitions [55]. Dans cette logique de modernisation, nous assistons à un remplacement radical du patrimoine historique de la ville par des bâtiments moderne à tour.

Le développement des banlieues est né des programmes de construction de logements sociaux des années 60 ; bien que ces programmes soient des invariants communs à beaucoup de villes européennes, les dynamiques de construction de Palerme sont particulières. Entre les quartiers à construction économique et populaire et les zones centrales historiques, d'autres banlieues se sont développées : celles de la classe moyenne et bourgeoise de Palerme. Les barres de bâtiments en béton à plusieurs étages se répandent de plus en plus. Il s'agit de banlieues à moyenne distance par rapport au centre ville, dotées des infrastructures primaires nécessaires [101]. Dans ce cadre l'image de la ville de Palerme a changé aujourd'hui pour presque le deux tiers du patrimoine bâti [101] (Fig. 1.4).



Fig. 1.4 – Plan de Palerme. En vert le centre historique (quartier Ballarò). En jaune les banlieues bourgeoises (quartier Malaspina). En rouge les quartiers sociaux (quartier ZEN).

Une analyse historique et typologique du bâti du centre ville de Palerme a été effectuée lors de l'élaboration du *Piano particolareggiato esecutivo*, plan urbain exécutif de 1993 qui classe les interventions de restauration et de réhabilitation possibles sur le bâti traditionnel du centre ville, aujourd'hui encore en vigueur. La rédaction du plan fut confiée à Pierluigi Cervellati, Leonardo Benevolo et Italo Insolera, urbanistes renommés en Italie. Le point de départ reposait sur la conviction que l'agregat urbain historique est un invariant de l'équation de la conception. Une analyse typologique / procédurale, permettait donc la reconnaissance des divisions foncières de première édification sur un bâtiment. Cette analyse reconstruisait le processus de formation qui a conduit à la structure actuelle [55].

La confrontation entre le plan cadastral de 1887 et celui de 1954 (Fig.1.5), a permis d'identifier trois familles principales de bâtiments, différenciées selon des paramètres temporels : la ville antique jusqu'au XIX^e siècle ; la construction de la première période industrielle, formalisée dans le plan Giarrusso, et les bâtiments de la période d'après guerre, qui font référence au *Piano regolatore* de 1962 [96].

La classification des bâtiments résidentiels utilisée dans le *Piano particolareggiato esecutivo* comprend cinq types différents (Fig.1.7) : *Palazzi*, *Palazzetti*, *Palazzetti plurifamiliari*, *Catoi*, *Catoi multipli* .

La catégorie des *Palazzi* comprend les anciennes demeures nobles, caractérisées par un système de distribution unifamiliale de grande dimension et une apparence architecturale très reconnaissable. La catégorie *Palazzetti* correspond aux bâtiments qui reproduisent le modèle précédent à plus petite échelle et qui ont comme caractère distinctif la présence d'une cour. Les *Palazzetti plurifamiliari* se différencient des *Palazzetti* pour la présence de plusieurs escaliers issus des processus de fusion ou de dédoublement. Les *catoi semplici* comprennent les bâtiments qui se développent en profondeur avec une longueur ne dépassant pas 8,5 m. Les *catoi multipli* sont le résultat de l'agrégation historique de plusieurs *catoi semplici* (Fig.1.6).

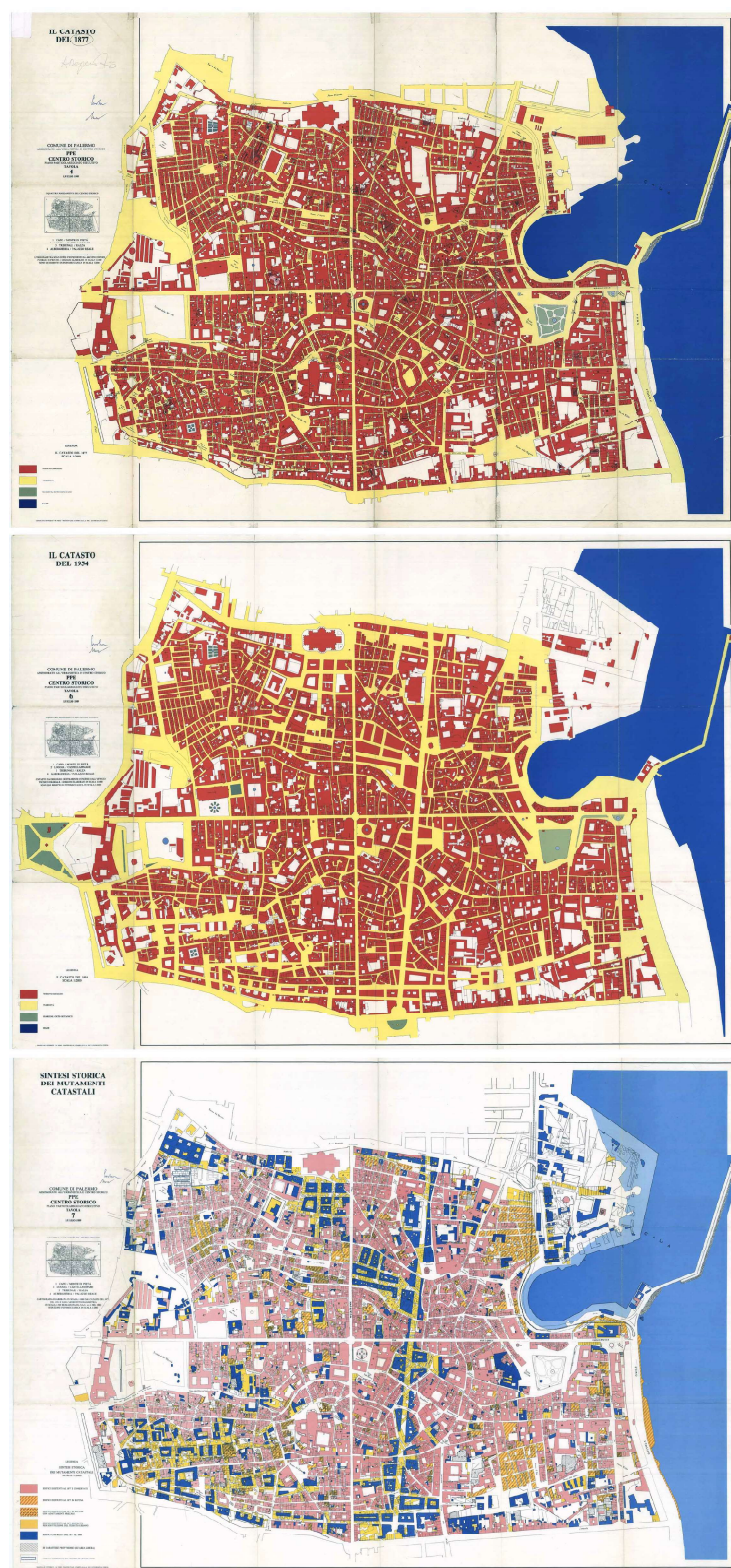


Fig. 1.5 – Plan cadastral de 1887 (en haut). Plan cadastral de 1954 (au milieu). Synthèse historique des transformations cadastrales (en bas) [14]

1.2 L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Au XIX^e siècle, les premières études sur l'ensoleillement des façades, l'éclairage et la ventilation naturelle ont connu une grande diffusion du fait de l'insalubrité dénoncée par les hygiénistes dans toute l'Europe continentale. Palerme était citée dans les traités hygiéniques de l'époque comme une ville exemplaire pour son orientation urbaine [131]. On étudiait les vents dominants afin de produire des recommandations sur la bonne ventilation naturelle. Par exemple, le bâtiment devait être orienté de façon à ne pas être touché par le vent perpendiculairement aux murs les plus longs mais de manière tangentielle. De ce fait, l'aspiration de l'air interne et l'aération étaient garanties par l'écoulement du vent sur la paroi [118] (Fig.1.8).

Dans ce contexte, les deux axes historiques de Palerme, le *Corso Vittorio Emanuele* et la *via Maqueda*, tracés au début du XVII^e siècle selon les principes urbains de la Renaissance, sont cités comme des exemples de bonne orientation dans les traités du XIX^e siècle. De fait, l'orientation de ces deux artères principales qui se croisent orthogonalement entre le *greco* et le *libeccio*, les deux vents dominants, est considérée comme une des meilleures à l'époque (Fig.1.9). Avec cette orientation, aucune façade n'est privée de l'exposition au soleil, ce qui représentait pour l'époque une qualité pour des raisons hygiéniques (Fig.1.10). Les études du XIX^e siècle de Spataro, Tollet, Knauff entre autres donnaient des précises conseils sur l'orientation des bâtiments selon les différents climats : par exemple l'orientation méridienne était à préférer dans le climat froid pour avoir un meilleur approvisionnement de chaleur dû à l'exposition au soleil, tandis que l'orientation équatoriale était plus appropriée pour le climat du sud à cause de la réduite absorption de chaleur et de la meilleure ventilation naturelle [131]. La Fig.1.11 montre l'orientation la plus favorable d'une habitation pour obtenir le maximum d'éclairage selon Kapner [70].

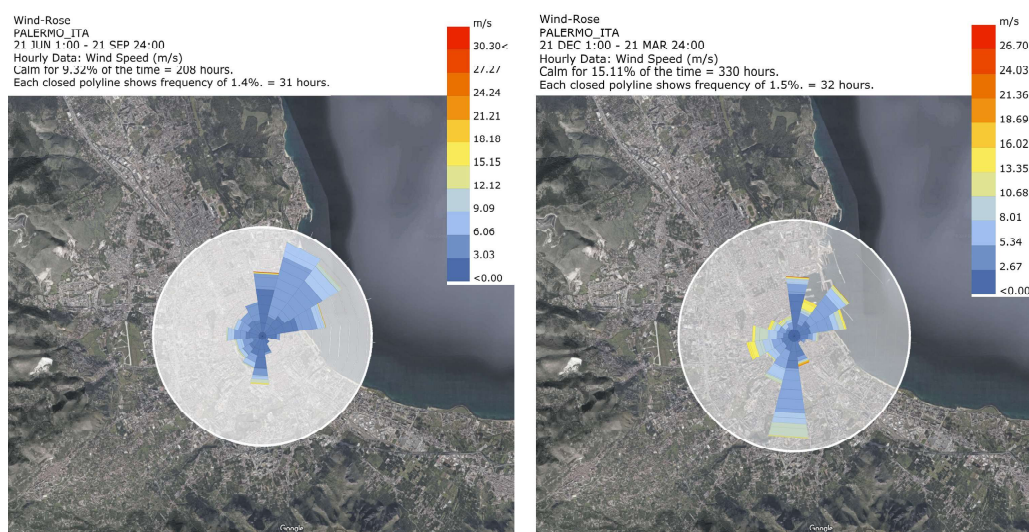


Fig. 1.8 – Les vents dominants à Palerme. Période estivale (à gauche) ; période hivernale (à droite). Simulation effectuée avec le logiciel Ladybug. Données météorologiques, Palerme (* epw)

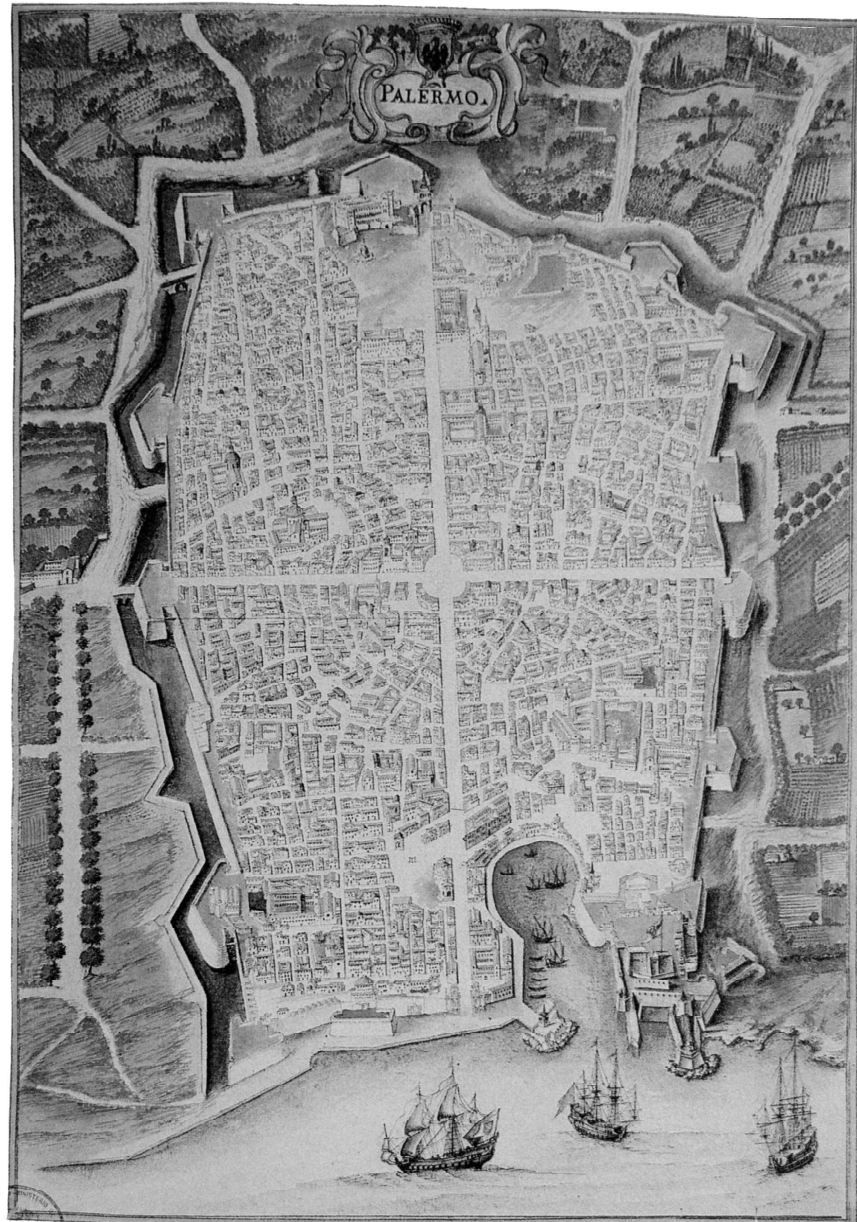


Fig. 1.9 – Plan urbain de la ville de Palerme. Carlo Castiglia, Teatro Geografico Antigo y Moderno del Reyno de Sicilia, 1686. Madrid, Archivo General y Biblioteca del Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación.



Fig. 1.10 – Les deux axes de la ville de Palerme. *Corso Vittorio Emanuele* (à gauche) et *Via Maqueda* (à droite)

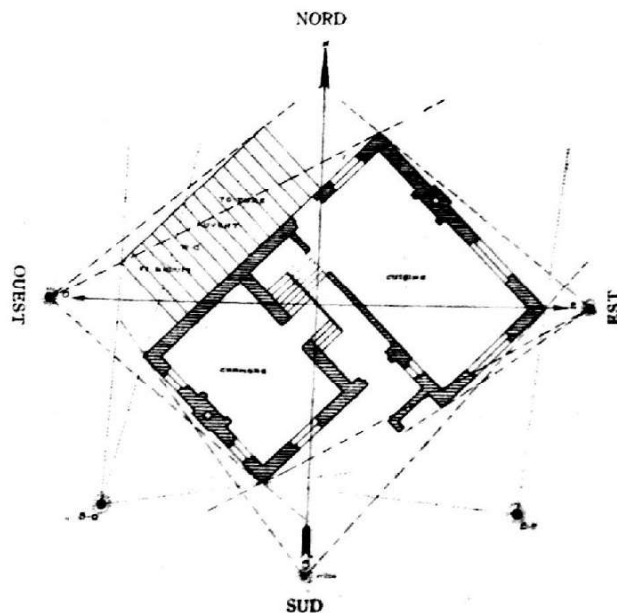


Fig. 1.11 – Orientation la plus favorable d'une habitation pour obtenir le maximum d'éclairage et d'enseillement [70]

1.2.1 Analyse de l'exposition sur les axes de Palerme

Dans ce paragraphe, nous allons étudier les expositions des deux artères de Palerme, *Corso Vittorio Emanuele* et *Via Maqueda* en essayant de mettre en relation la durée d'exposition et la radiation solaire directe et diffuse (Fig.1.12).

Quatre cas d'exposition ont été analysés :

- Exposition nord-est (-30°);
- Exposition nord-ouest (60°);
- Exposition sud-est (150°);
- Exposition sud-ouest (-120°).

Pour ce faire nous avons créé un modèle mathématique solaire qui considère la variation du rayonnement solaire (énergie directe et diffuse) comme une fonction continue du temps.

Le modèle de radiation solaire

Les paramètres du modèle numérique utilisé pour le calcul de la radiation globale (directe et diffuse) sur une surface sont :

- la position du soleil par rapport au site (zenith et azimut) et à la Terre (distance);
- la nature du ciel, qui fait appel à des questions statistiques du climat;
- l'inclinaison locale de la surface.

Le modèle est décrit dans le détail en annexe de ce document (cf. Annexe A). Tout d'abord, nous calculons le rayonnement extraterrestre total pour une surface de

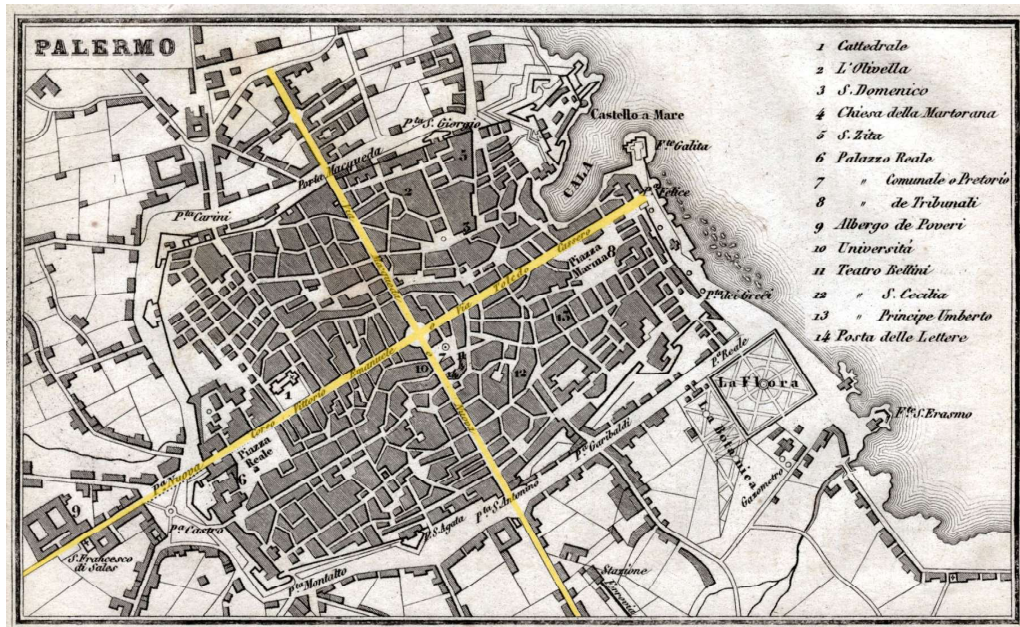


Fig. 1.12 – Carte topographique de Palerme, Artaria, 1891. En jaune, les deux axes : via Maqueda et corso Vittorio Emanuele

géométrie donnée. Le rayonnement extraterrestre, rayonnement qui atteint la partie extérieure de l'atmosphère terrestre, varie légèrement tout au long de l'année. Pour rendre compte de l'excentricité de l'orbite terrestre autour du soleil, le rayonnement extraterrestre est représenté par un terme variable dans l'année [119].

Pour le calcul de la radiation globale sur des surface verticales, nous calculons le facteur d'exposition solaire, ζ , donné par le produit scalaire entre la partie positive du vecteur unitaire du soleil et le vecteur unitaire normal à la surface de mesure. Les Fig. 1.13 et Fig. 1.14 montrent les valeurs des facteurs d'exposition pour les quatre orientations étudiés. Après le passage à travers l'atmosphère de la Terre, le rayonnement solaire comprend à la fois une composante directe du soleil et une composante diffuse due aux réflexions sur les nuages, la vapeur d'eau et d'autres particules dans le ciel. Une méthode pour obtenir la fraction directe et diffuse sur une surface est donnée par le modèle simplifié de l'atmosphère ASHRAE avec ciel clair. Ce modèle est utile parce qu'il fournit une estimation de la limite supérieure de rayonnement direct, estimée à ciel clair. Les Fig. 1.15 et Fig. 1.16 montrent les résultats de ces simulations.

- . Sur les deux orientations sud étudiées, nous pouvons remarquer que :
 - l'orientation sud-est permet une exposition dès les premières heures du matin jusqu'à 14h en été (21 juin). Cela permet de réduire l'exposition pendant une partie de l'après-midi. En hiver (21 décembre) l'orientation sud-est permet une exposition jusqu'au coucher du soleil (16h30).
 - les façades tournées vers le sud-ouest sont exposées au soleil à partir de 12h en été et à partir de 10h en hiver.

Pour les deux orientations (sud-est et sud-ouest), nous pouvons aussi constater que la composante directe de la radiation solaire est plus élevée en hiver. Cela en raison de l'inclinaison des rayons solaires qui sont plus élevés en été, donc plus inclinés par rapport à la façade verticale.

Sur les deux orientations nord étudiées, nous pouvons remarquer que :

- pour l'orientation nord-est, les façades sont exposées à ensoleillement dès les premières heures du matin, jusqu'à 11h le 21 juin et jusqu'à 10h le 21 décembre.
- pour l'orientation nord-ouest, les façades en été sont très peu ensoleillées (ce qui représente un avantage pour les problèmes de surchauffe des bâtiments), en hiver elles ne sont pas du tout ensoleillées.

Les orientations sud-est et sud-ouest représentent alors les meilleures orientations en ce qui concerne les heures d'exposition solaire et les valeurs de radiation solaire directe captée. Les orientations nord-est et nord-ouest présentent des avantages en été à cause de leur moindre durée d'exposition solaire. Cependant en hiver, ce sont les orientations les moins avantageuses.

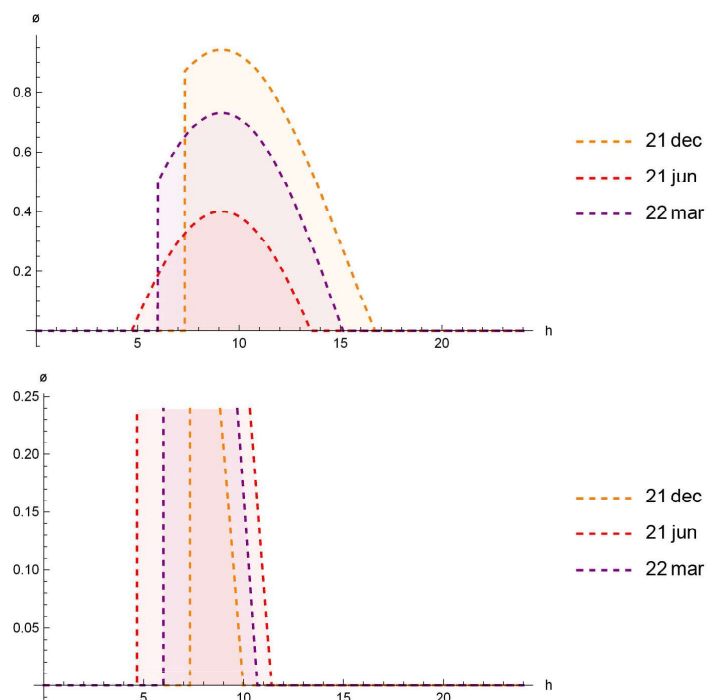


Fig. 1.13 – Facteur d'exposition solaire pour deux expositions : sud-est (en haut), sud-ouest (en bas)

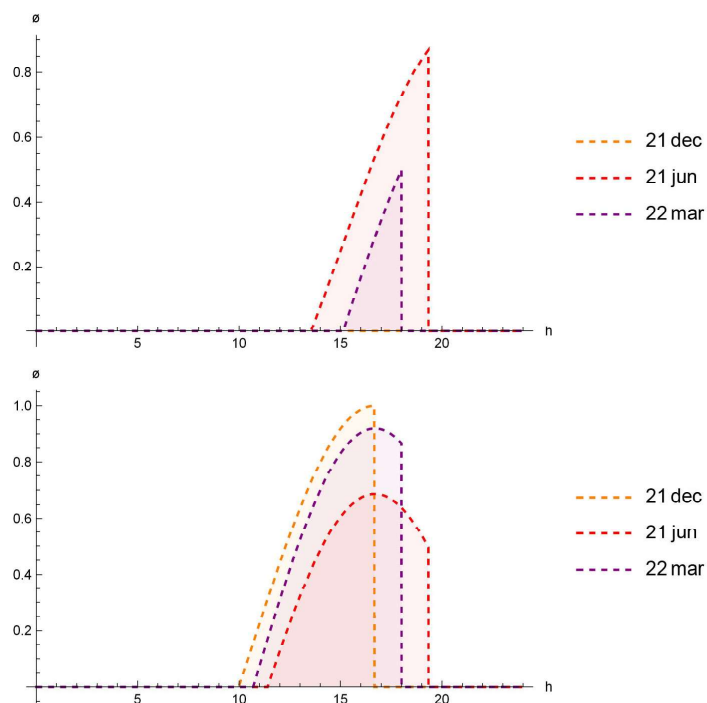


Fig. 1.14 – Facteur d'exposition solaire pour deux expositions : nord-est (en haut), nord-ouest (en bas)

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

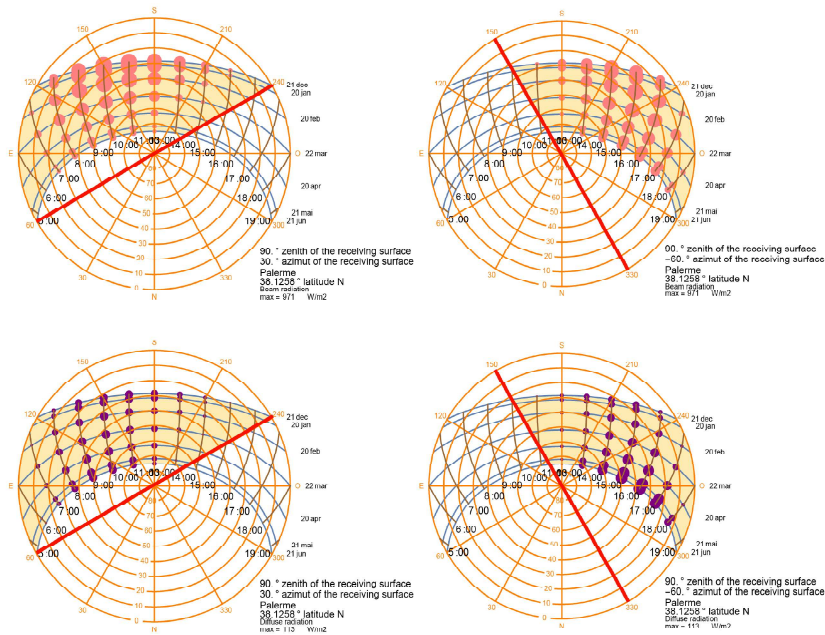


Fig. 1.15 – Valeurs de radiation directe (en haut) et diffuse (en bas). Exposition sud-est (à gauche), sud-ouest (à droite)

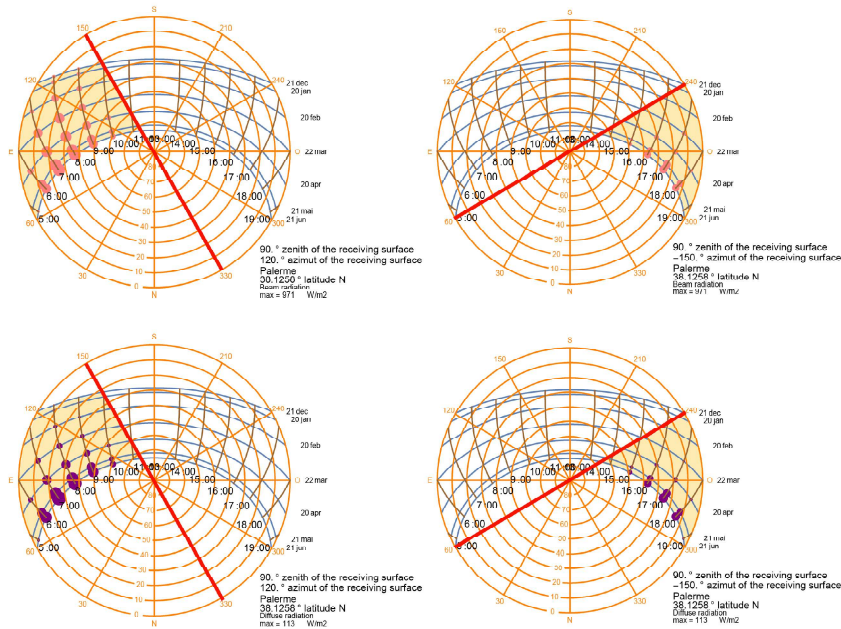


Fig. 1.16 – Valeurs de radiation directe (en haut) et diffuse (en bas). Exposition nord-est (à gauche), nord-ouest (à droite)

1.3 L'accès solaire et les ombres

«Et nous disons de la lumière qu'elle nous donne la vue du monde, qui est la joie de la vie tandis qu'elle nettoie les milieux incessamment avariés par nos repos enfermés» [128]

Les études analytiques sur l'ensoleillement en fonction de la hauteur des bâtiments et de la largeur des rues sont très répandues en Europe au XIX^e siècle notamment grâce à l'apport des Allemands Vogt et Knauff, du Français Trélat et de l'Italien Passaro. Les effets de la lumière naturelle sur la salubrité étaient bien connus et concernaient, d'une part l'action bactéricide des rayons solaires, et d'autre part, la santé visuelle [131]. Les résultats de ces recherches ont été traduits en diagrammes et règles simples, qui ont influencé la morphologie, la distribution et les rapports plein-vide de l'architecture moderne [115].

Trélat écrivait que, pour la distribution de la lumière dans les maisons de ville, les voies publiques devaient avoir des largeurs au moins égales à une fois et demie la hauteur de la crête des maisons qui les bordent [128].

Bien que la distribution et l'accès de la lumière à l'intérieur d'une maison fut considéré comme l'aspect principal pour assurer une maison saine, un autre élément était étudié par les hygiénistes de l'époque : l'accès des murs aux radiations solaires. Adolphe Vogt fut le premier à poser méthodiquement la question de la radiation solaire dans la maison. Il montra que pour assurer le bénéfice des radiations solaires depuis le sommet jusqu'au pied des maisons d'une ville, il fallait établir entre la largeur des rues et la hauteur des constructions riveraines un rapport qui variait suivant la latitude et l'orientation [128].

De ce fait, Vogt montrait par exemple que pour des rues équatoriales dans une ville à 50 °de latitude (Paris) il fallait une largeur égale à plus de quatre fois la hauteur des maisons. Cependant, les résultats de ces calculs étaient trop difficiles à intégrer dans les règlements urbains des villes.

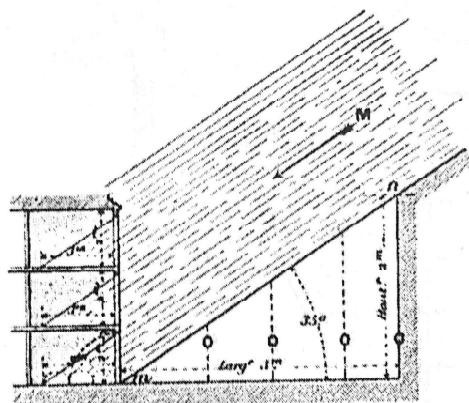


FIG. 5.

«On doit se demander à quelle hauteur il faut limiter l'élévation des maisons relativement à la largeur des rues, pour qu'outre la lumière horizontale, elle n'obstrue pas l'accès de la lumière médiane de la maison. Il faut ici faire un peu de géométrie»

Fig. 1.17 – Épure représentant l'éclairage avec obstacle, Émile Trélat [129]

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Sous ces impulsions, Passaro, dans «La lumière solaire dans la maison » publié en 1893 dans la revue «Ingénierie sanitaire», proposait la formule ci-dessous (Eq.1.2) pour calculer la distance minimale unitaire en fonction de la latitude. La largeur des rues était calculée afin d'assurer que le RDC des façades exposées à l'est et l'ouest, au 21 décembre fût ensoleillé [91]. La distance minimale unitaire est définie comme la distance qui dans un lieu donné est nécessaire entre un obstacle et un point considéré pour permettre aux rayons solaires d'arriver au point considéré.

Considérons le point S comme la position du soleil, PQ la hauteur de l'obstacle, A le point considéré et α , l'angle entre la droite horizontale passant par A et la droite des rayons solaires (Fig.1.18), nous pouvons écrire que :

$$AQ = \frac{PQ}{\tan \alpha} \quad (1.1)$$

Si PQ est égal à 1, AQ est la distance unitaire minimale que Passaro recherchait.

$$\delta = \cot \alpha = \cot(66^{\circ}32' - \lambda) \quad (1.2)$$

avec :

$$\alpha = 90^{\circ} - (23^{\circ}28' + \lambda) = 66^{\circ}32' - \lambda \quad (1.3)$$

où :

$23^{\circ}28' + \lambda$ est la declination solaire au solstice d'hiver ;

λ est la latitude du lieu.

De ce fait, Passaro voulait démontrer que les prescriptions de Trélat et Vogt sur la largeur de rues étaient trop sévères. Selon ses calculs les rues de Palerme (lat. $38^{\circ}07'55''$) devaient avoir une largeur de $4/5$ par rapport à celles de Rome (lat. $41^{\circ}53'30''$) et $3/5$ par rapport à celles de Milan (lat. $45^{\circ}28'38''$)(Fig.1.20). Ces calculs étaient peut-être trop difficiles à respecter et dans le Règlement du bâti de Palerme du 1868, qui traitait pour la première fois plusieurs aspects du projet de remise en état hygiénique de la ville, on s'est limité à la recommandation que la largeur des rues fût égale à la hauteur des bâtiments. Un autre aspect lié à l'ensoleillement qui a été approfondie au cours du XVIII^e siècle est la réflexion de la lumière due à la présence d'autres objets qui la diffusent [131]. L'albédo, les couleurs et la texture des surfaces ont été prises en compte et dans plusieurs règlements urbains de l'époque, on trouve ainsi la prescription de la couleur blanche pour l'enduit extérieur sans traitement complètement lisse pour éviter le phénomène d'éblouissement.

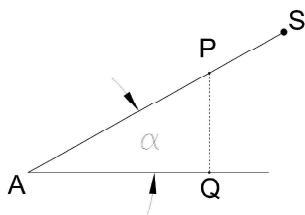


Fig. 1.18 – Distance minimale unitaire [91]

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

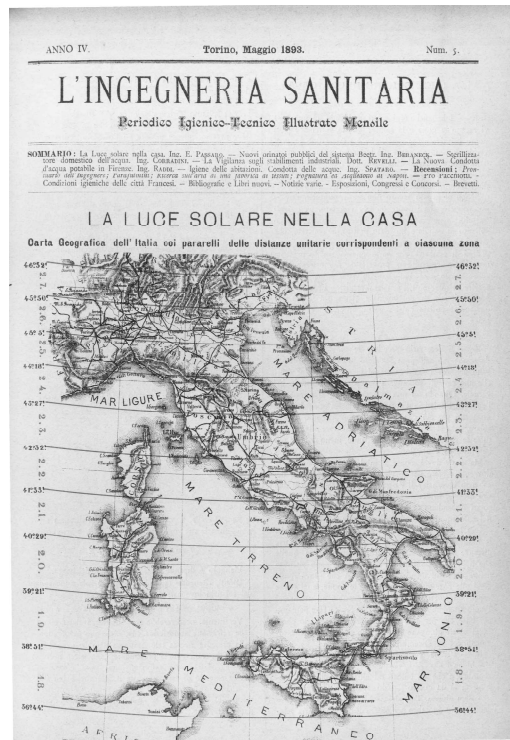


Fig. 1.19 – Ingegneria sanitaria, Torino 1893 [91]

Latitudini fra cui la zona è compresa.	Distanza unitaria.	Latitudini fra cui la zona è compresa.	Distanza unitaria.	Latitudini fra cui la zona è compresa.	Distanza unitaria.	Latitudini fra cui la zona è compresa.	Distanza unitaria.	Latitudini fra cui la zona è compresa.	Distanza unitaria.	Latitudini fra cui la zona è compresa.	Distanza unitaria.
48° 8'	m.	46° 59'	m.	45° 41'	m.	44° 13'	m.	42° 32'	m.	40° 36'	m.
48° 5'	3.00	46° 55'	2.81	45° 37'	2.62	44° 8'	2.43	42° 26'	2.24	40° 29'	2.05
48° 1'	2.99	46° 51'	2.80	45° 32'	2.61	44° 3'	2.42	42° 20'	2.23	40° 22'	2.04
47° 58'	2.98	46° 47'	2.79	45° 28'	2.60	43° 58'	2.41	42° 15'	2.22	40° 16'	2.03
47° 54'	2.97	46° 43'	2.78	45° 24'	2.59	43° 53'	2.40	42° 9'	2.21	40° 9'	2.02
47° 51'	2.96	46° 40'	2.77	45° 19'	2.58	43° 48'	2.39	42° 3'	2.20	40° 2'	2.01
47° 47'	2.95	46° 36'	2.76	45° 15'	2.57	43° 42'	2.38	41° 57'	2.19	39° 55'	2.00
47° 44'	2.94	46° 32'	2.75	45° 10'	2.56	43° 37'	2.37	41° 52'	2.18	39° 48'	1.99
47° 40'	2.93	46° 27'	2.74	45° 5'	2.55	43° 32'	2.36	41° 45'	2.17	39° 41'	1.98
47° 36'	2.92	46° 23'	2.73	45° 1'	2.54	43° 27'	2.35	41° 39'	2.16	39° 34'	1.97
47° 33'	2.91	46° 19'	2.72	44° 56'	2.53	43° 21'	2.34	41° 33'	2.15	39° 27'	1.96
47° 29'	2.90	46° 15'	2.71	44° 51'	2.52	43° 16'	2.33	41° 27'	2.14	39° 20'	1.95
47° 25'	2.89	46° 11'	2.70	44° 47'	2.51	43° 11'	2.32	41° 20'	2.13	39° 13'	1.94
47° 22'	2.88	46° 7'	2.69	44° 42'	2.50	43° 6'	2.31	41° 14'	2.12	39° 6'	1.93
47° 18'	2.87	46° 3'	2.68	44° 37'	2.49	43° 0'	2.30	41° 8'	2.11	38° 58'	1.92
47° 14'	2.86	45° 58'	2.67	44° 32'	2.48	42° 54'	2.29	41° 2'	2.10	38° 51'	1.91
47° 11'	2.85	45° 54'	2.66	44° 28'	2.47	42° 49'	2.28	40° 55'	2.09	38° 43'	1.90
47° 7'	2.84	45° 50'	2.65	44° 23'	2.46	42° 43'	2.27	40° 49'	2.08	38° 36'	1.89
47° 3'	2.83	45° 46'	2.64	44° 18'	2.45	42° 38'	2.26	40° 42'	2.07	38° 28'	1.88
46° 59'	2.82	45° 41'	2.63	44° 13'	2.44	42° 32'	2.25	40° 36'	2.06	38° 21'	1.87

Fig. 1.20 – Tableau des distances minimales unitaires selon les latitudes, [91]

1.3.1 Analyse du facteur H/L pour les axes de Palerme

Si au XIX^e siècle la modification des prospects de rues et le rapport H/L (hauteur des bâtiments sur largeur des rues) étaient calculés surtout du point de vue de l'apport de « lumière dans la maison » répondant à un besoin de salubrité, les recherches actuelles sur les ambiances architecturales et urbaines distinguent d'autres paramètres environnementaux fondamentaux non seulement pour la régulation du microclimat urbain mais aussi pour le confort intérieur du bâtiment.

Dans ce cadre, nous avons exploré l'interaction entre le paramètre radiation solaire et le paramètre morphologique H/L. Cette étude vise à analyser l'apport de radiation solaire et sa réduction due aux ombres portées, dans le cas des deux axes principaux de la ville de Palerme. L'objectif est de permettre une évaluation de l'interaction entre ces deux paramètres afin de pointer les arguments en faveur de l'accès solaire d'un bâtiment.

Tout d'abord, nous analysons différentes configurations H/L pour les deux rues principales de Palerme.

La largeur L de deux rues est égale à environ 8 m. Le modèle prévoit deux bâtiments :

- Bat. A, sur lequel l'analyse solaire est effectuée.
- Bat. B, bâtiment qui porte l'ombre.

La hauteur du bâtiment B est fixée à 14 m, hauteur moyenne des bâtiments traditionnels dans les deux rues étudiées. Trois hauteurs du bâtiment A ont été analysées : 14 m, 18 m, 21 m. Ce dernier cas correspond à la hauteur du bâti d'après-guerre (Fig. 1.21 et Tableau 1.1).

Les simulations ont été développées à l'aide du logiciel Ecotect (Autodesk) (cf. Annexe A). Pour les calculs du rayonnement solaire, nous avons utilisé les données horaires de rayonnement solaire enregistrées à partir du fichier météo (* epw). On fournit les données d'entrée suivantes sont fournies :

- Géométrie, orientation et inclinaison.
- Latitude.

Nous avons donc calculé la radiation moyenne journalière globale pour chaque

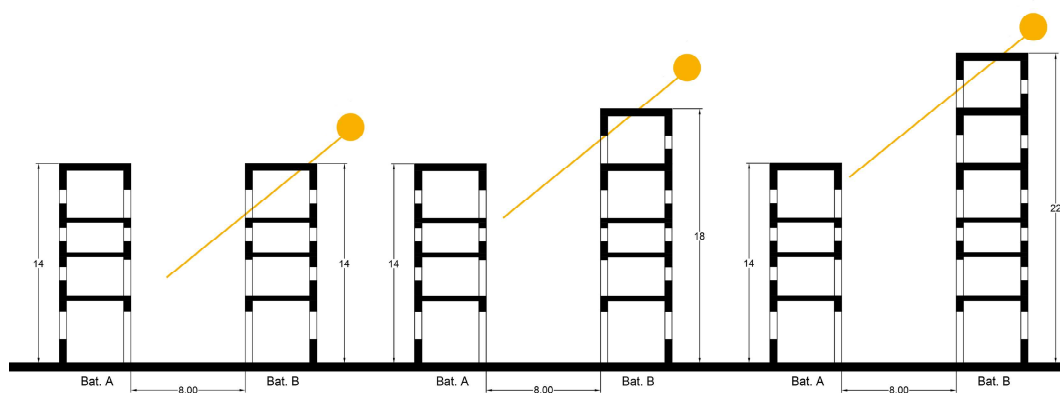


Fig. 1.21 – Configurations pour la simulation

Tableau 1.1 – Valeurs de H/L

	Cas1	Cas2	Cas 3
H Bat.A	14 m	14 m	14 m
H Bat.B	14 m	18 m	22 m
L rue	8 m	8 m	8 m
H/L rue	1.75	2.25	2.75

mois pour les différents cas de H/L. Les trois diagrammes cartésiens ci-contre (Fig. 1.22 à Fig.1.24) montrent l'apport de radiation solaire au cours de l'année pour les quatre expositions avec les différents rapports H/L.

Nous constatons que l'exposition la plus avantageuse en terme d'apport de radiation solaire est, pour les trois cas d'étude, celle sud-est, avec un pic de radiation reçu en aout de 2450 Wh/m^2 (H/L=1.75) (Fig.1.22 Fig.1.23 Fig.1.24). Au fur et à mesure que le rapport H/L augmente, les courbes des expositions nord-est et sud-ouest se rapprochent pendant les mois les plus chauds. L'exposition nord-ouest reste la plus désavantageuse sur les trois configurations.

Pour l'exposition sud-est (Fig.1.25), il est intéressant de noter la réduction de radiation solaire globale pendant le mois de juin dans les trois cas de H/L. Cela s'explique par la position du soleil, qui présente une altitude plus grande. L'après-midi, le soleil se trouve derrière le bâtiment A qui fait l'objet d'analyse, donc la surface est à l'ombre.

Si on considère la radiation solaire directe reçue pour chaque exposition, nous en déduisons que :

- pour l'exposition nord-ouest une différence du rapport H/L n'engendre pas une différence d'apport de radiation solaire directe (Fig. 1.27).
- pour l'exposition nord-est, le même phénomène se vérifie pendant les mois les plus froids (d'octobre jusqu'à mars) (Fig.1.28). Cela s'explique par les valeurs réduites de radiation directe qui touches la façade étudiée. Dans le premier cas, l'intervalle est comprise entre 0 et 400 Wh/m^2 .

En effet si on compare la composante diffuse de la radiation solaire (Fig.1.29) on retrouve une augmentation d'environ 50 Wh/m^2 au fur et à mesure que le rapport H/L s'accroît. Pour l'orientation sud-est, la Fig.1.30 montre le pourcentage d'ombre à midi le 21 de chaque mois de l'année : les courbes indiquent les trois configurations de H/L étudiées.

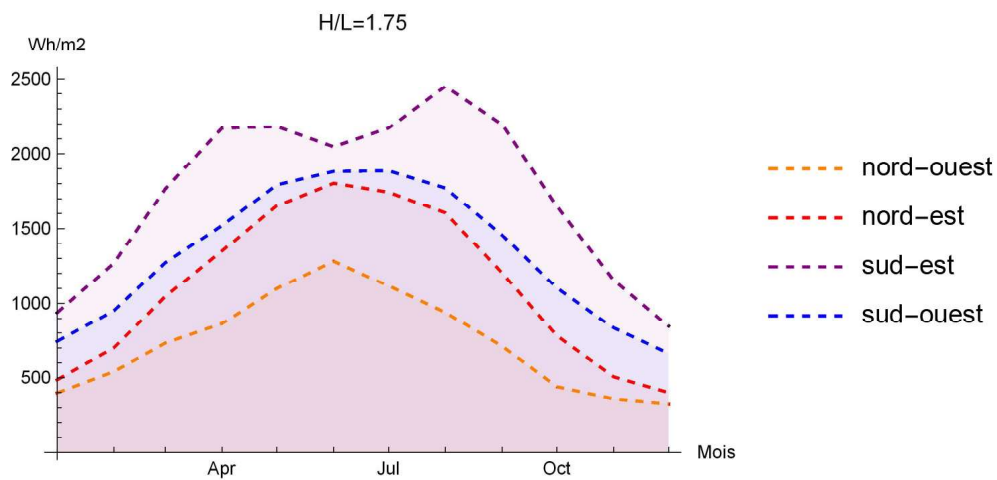


Fig. 1.22 – Radiation moyenne journalière globale, H/L=1.75

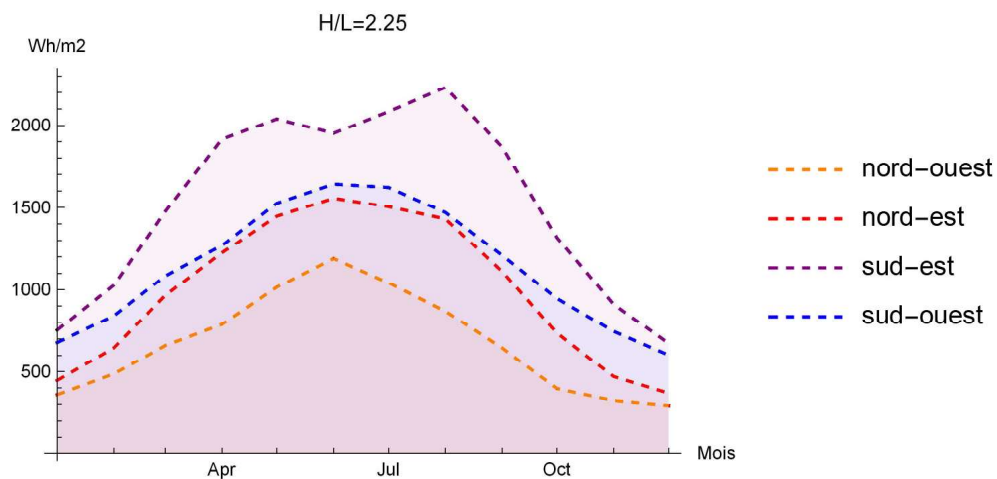


Fig. 1.23 – Radiation moyenne journalière globale, H/L=2.25

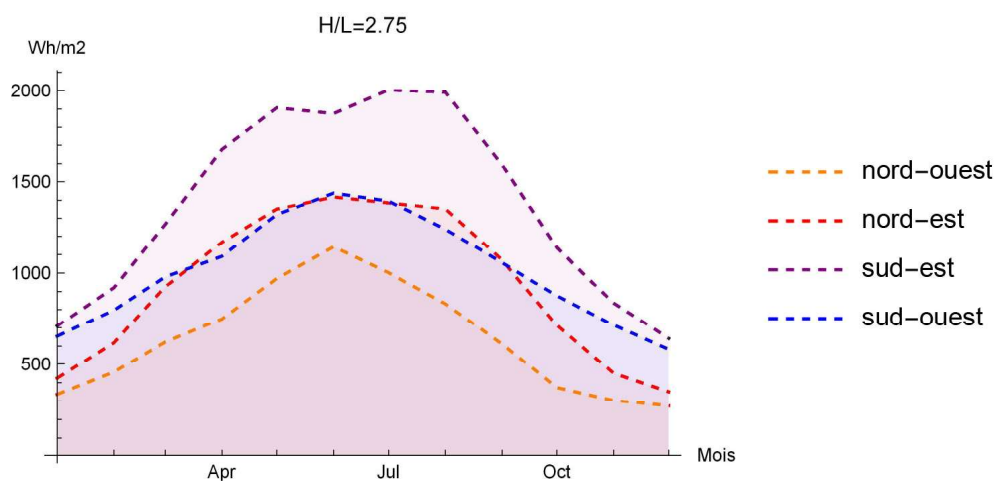


Fig. 1.24 – Radiation moyenne journalière globale, H/L=2.75

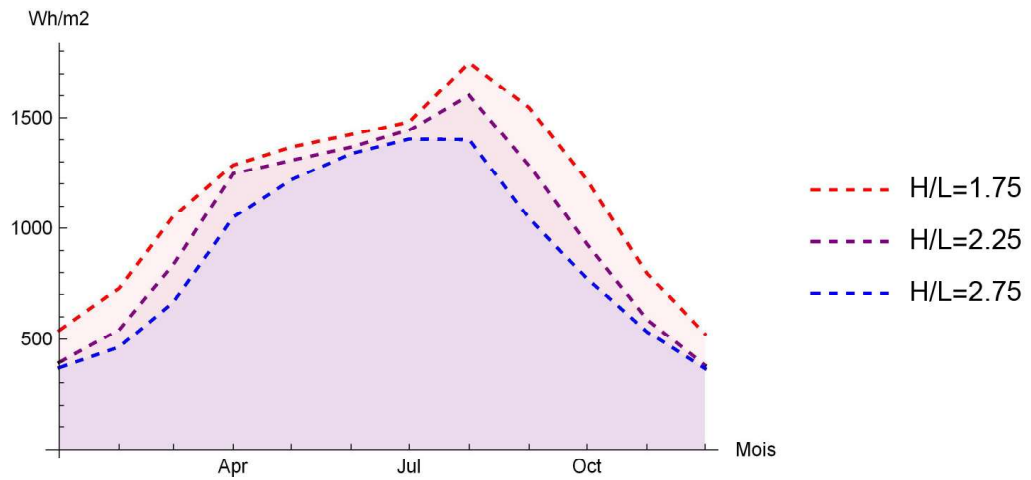


Fig. 1.25 – Radiation moyenne journalière directe, exposition sud-est

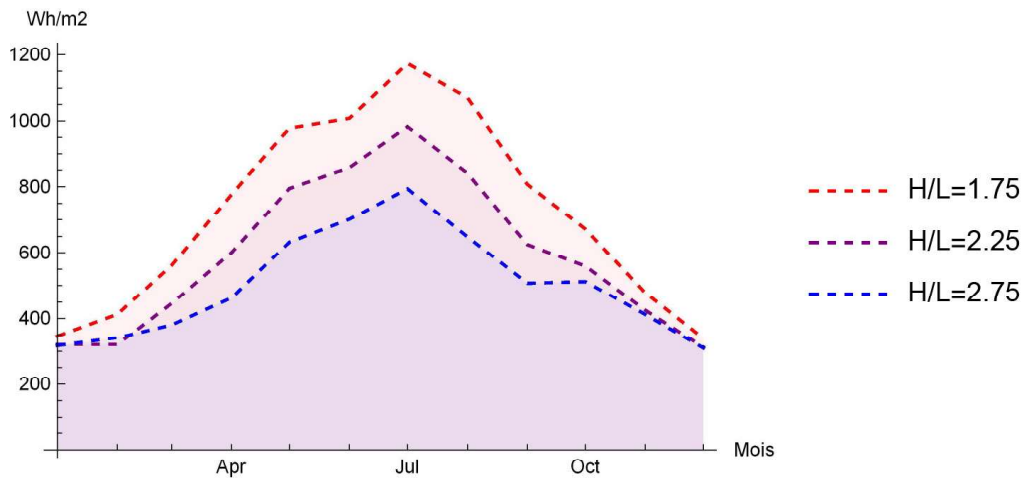


Fig. 1.26 – Radiation moyenne journalière directe, exposition sud-ouest

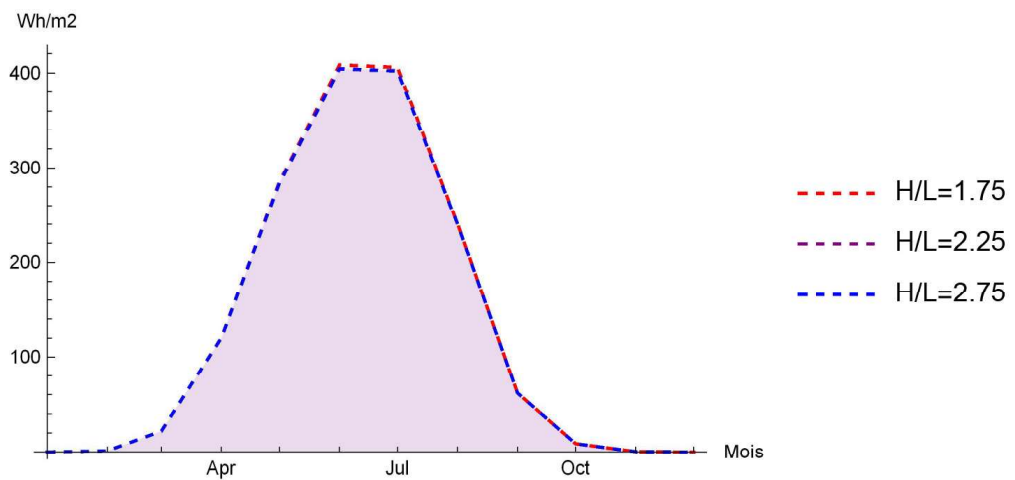


Fig. 1.27 – Radiation moyenne journalière directe, exposition nord-ouest

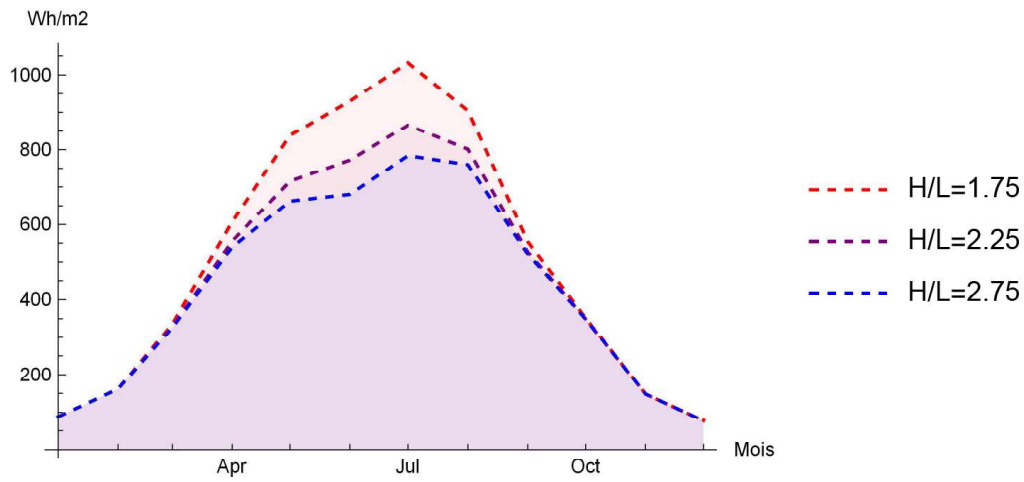


Fig. 1.28 – Radiation moyenne journalière directe, exposition nord-est

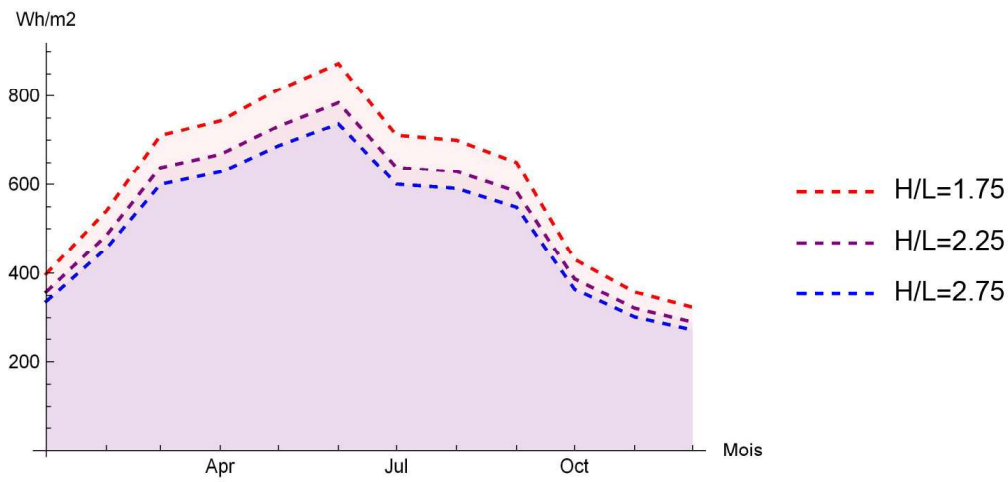


Fig. 1.29 – Radiation moyenne journalière diffuse

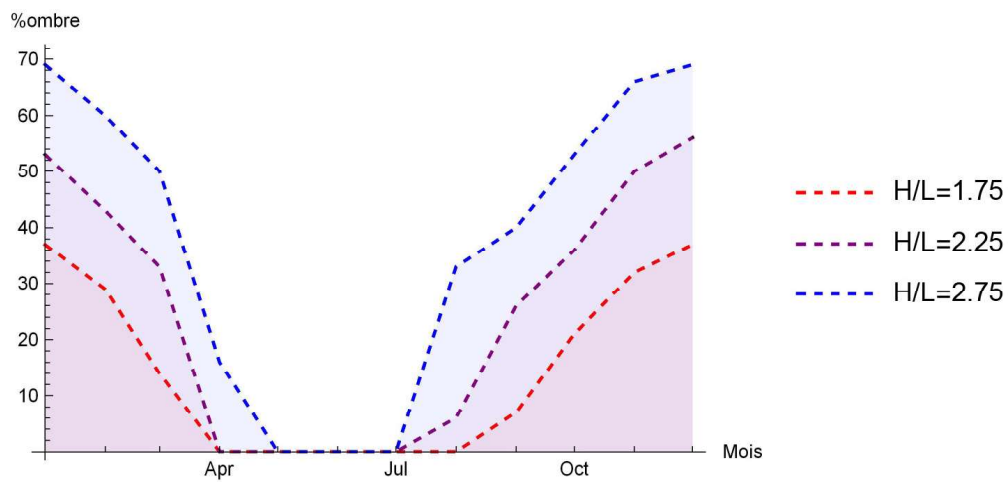


Fig. 1.30 – Pourcentage d'ombre pour l'exposition sud-est

1.3.2 Analyse de la radiation solaire sur les canyons urbains à Palerme

L'urbanisme traditionnel a cherché à contrôler les proportions des rues par rapport aux hauteurs pour réguler l'accès à la lumière et aux rayons solaires. Les liens complexes entre le climat urbain, la forme urbaine et l'utilisation énergétique des bâtiments ont été abordé déjà à l'époque des hygiénistes, quand la préoccupation la plus importante était la lutte contre des maladies liées aux conditions atmosphériques. Plusieurs recherches récentes montrent l'importance que revêt l'incidence de la morphologie urbaine sur les consommations énergétiques des bâtiments. Ces recherches indiquent également que la réflexion des bâtiments obstructifs peut être significative dans des environnements fortement obstrués, tels que des pièces situées au RDC et faisant face à des immeubles de grande hauteur [124].

Aujourd'hui, les lois de zonage et les règlements de construction établissent généralement des rapports entre les hauteurs des bâtiments et la distance des espaces publics. Une abstraction géométrique similaire de l'espace urbain, le canyon urbain, a été utilisée dans la climatologie urbaine pour décrire la façon dont les espaces urbains créent des conditions environnementales particulières. Il s'agit d'un archétype spatial. D'un point de vue géométrique, le canyon urbain est décrit comme le rapport hauteur/largeur de l'espace entre les bâtiments adjacents ou, autrement dit, un espace étroit limité par deux parois verticales hautes. Le canyon urbain permet de décrire de manière simple un motif répété dans le champ autrement complexe des espaces urbains et des formes de construction.

Dans ce paragraphe nous étudions les performances solaires et lumineuses d'un modèle de canyon urbain basé sur le tissu urbain traditionnel de Palerme. Cette recherche repose sur une étude quantitative de la performance énergétique simulée de bâtiments alignés sur une série de canyons urbains diversement proportionnés, comme base d'une discussion qualitative. On a recouru à la conception de modèles basés sur les *types*. Le type est un concept utilisé pour décrire les modèles génériques associés aux bâtiments. Ce concept présente la qualité abstraite d'identifier les paramètres clés que l'on peut faire varier pour définir leur impact relatif sur la performance globale. Hawkers [64] écrit : «Le type offre la possibilité de traduire les résultats de la recherche technique en une forme qui les rend accessibles aux concepteurs» d'espace urbain et de bâtiment.

Nous avons défini trois différents types de canyons dont les rapports de H/L varient de 1.75 à 7. Le rapport égal à 1.75 se retrouve dans les grandes axes de la ville, 3.5 dans les ruelles et passages, et 7 dans dans les cours de la ville ancienne. Chaque canyon est défini avec des bâtiments de deux/trois étages (14 m) (Fig.1.31). Étant donné que le concept de canyon urbain est une abstraction de la complexité spatiale de la vraie ville, sa relation avec la densité urbaine est aussi simplifiée. Nous ne considérons pas l'accès solaire à l'intersection des rues ni l'ombre latérale pour les bâtiments d'angle.

Les analyses sont effectuées comme dans le paragraphe précédent, à l'aide du logiciel ECOTECH (Autodesk) (cf. Annexe A). La Fig.1.32 montre la radiation solaire moyenne journalière au cours de quatre mois : mars, juin, septembre et décembre pour les canyons urbains avec des bâtiments exposés nord-sud. La distribution des

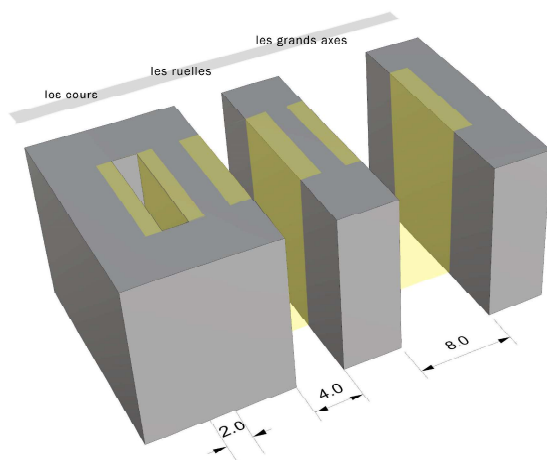


Fig. 1.31 – Proportions des types de canyons urbains de la ville de Palerme

Tableau 1.2 – Valeurs de H/L

Hauteur	Largeur	H/L
14m	2	7
14m	4	3.5
14m	8	1.75

courbes indiquant les niveaux de radiation solaire dépend de l'altitude et de la déclinaison solaires. Nous remarquons que la quantité de radiation solaire journalière moyenne dans le type cour pour le mois de juin, présente des valeurs inférieures d'un dixième au cas des grandes axes. La présence de bâtiments hauts par rapport à la largeur de la cour a une incidence fondamentale sur la quantité de radiation reçue et donc aussi sur le microclimat de ces zones.

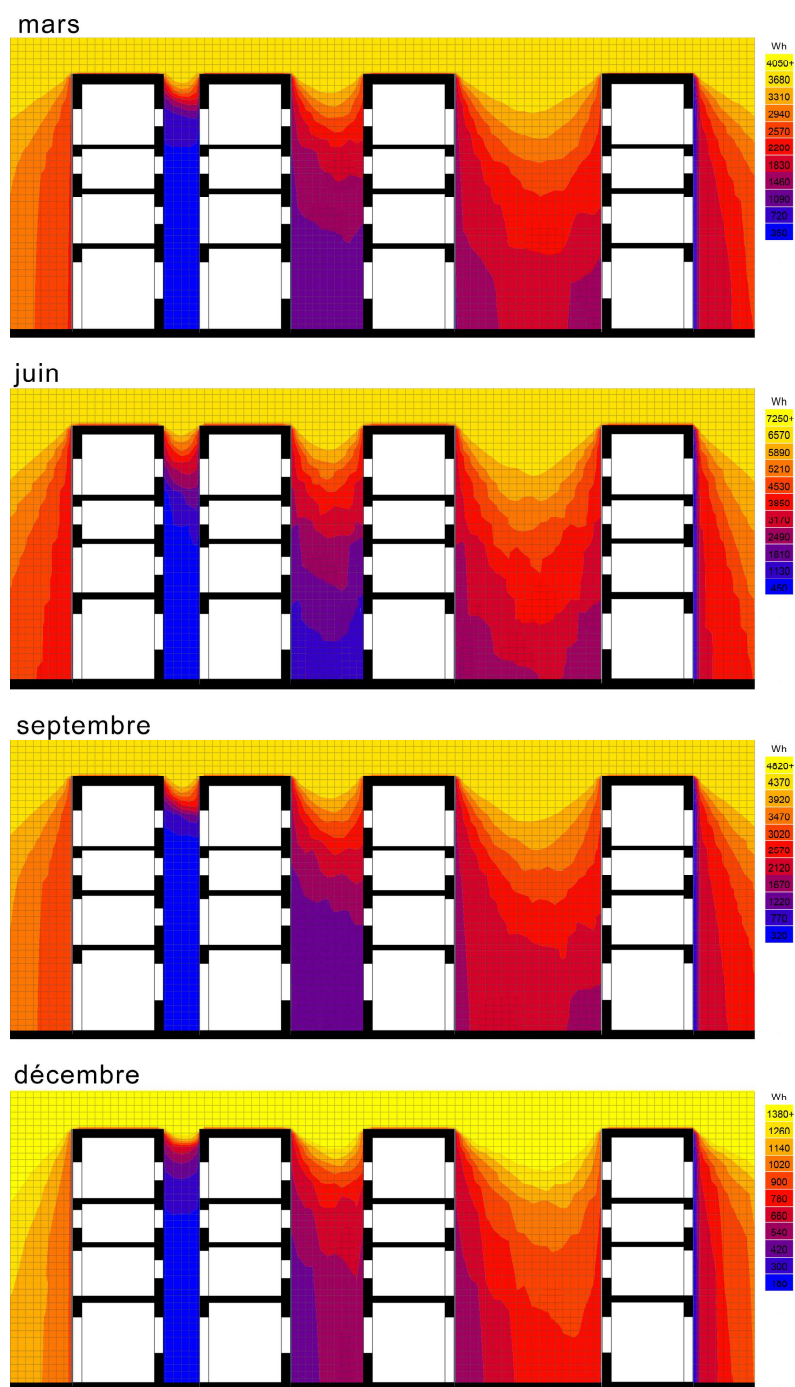


Fig. 1.32 – Radiation solaire journalière moyenne dans les canyons pour les mois de mars, juin, septembre, décembre. Calculé en ECOTECH (plage de contour 320-4820 Wh par pas de 450 Wh). Données météorologiques, Palerme (* epw).

L'orientation et l'exposition : la ville et le bâti

Pour ces mêmes cas, nous avons aussi effectué une simulation sur l'éclairement naturelle dans les différents canyons à l'aide du logiciel Ecotect. Cette fois-ci nous prenons également en considération la réflexion due à la couleur et au type de matériau.

La couleur des surfaces extérieures détermine l'impact de la radiation solaire sur le bâtiment [108]. En effet, seule la partie de radiation absorbée par l'enveloppe contribue aux gains thermiques, et la partie d'énergie solaire réfléchié réduit les apports thermiques [102]. Les propriétés physiques des surfaces extérieures qui participent à l'échange radiatif avec l'extérieur, l'absorbance, la réflectance et l'émissivité sont celles qui déterminent la radiation absorbée et réfléchié (Fig.1.33). La radiation absorbée est proportionnelle à l'absorbance relative à la radiation visible (longueur d'onde courte) et dépend de la couleur tandis que la radiation réfléchié est proportionnelle à la réflectance. Cependant, toutes les surfaces émettent et absorbent également une radiation infrarouge (longueur d'onde longue) grâce à leur émissivité. L'émissivité d'un objet dépend de la nature du matériau et de son état de surface [53].

Pour chaque élément i issu de la discrétisation de la surface à examiner (plan Y-Z), le modèle Ecotect identifie les portions de ciel vues depuis cet élément et détermine l'éclairement énergétique ou lumineux, calculé au centre de gravité de chaque élément de la surface, et en tenant compte des obstructions éventuelles (cf. Annexe A). Les Fig.1.34 et Fig.1.35 montrent l'éclairement naturelle avec deux différentes valeurs d'indice de réflexion lumineuse des murs extérieurs : 0.8 et 0.4. Nous pouvons remarquer que l'éclairement qui arrive à pénétrer dans le canyon avec rapport $H/L=7$ et l'indice de réflexion lumineuse 0.8 est une fois et demie plus importante que l'éclairement avec un indice de réflexion lumineuse égal à 0.4.

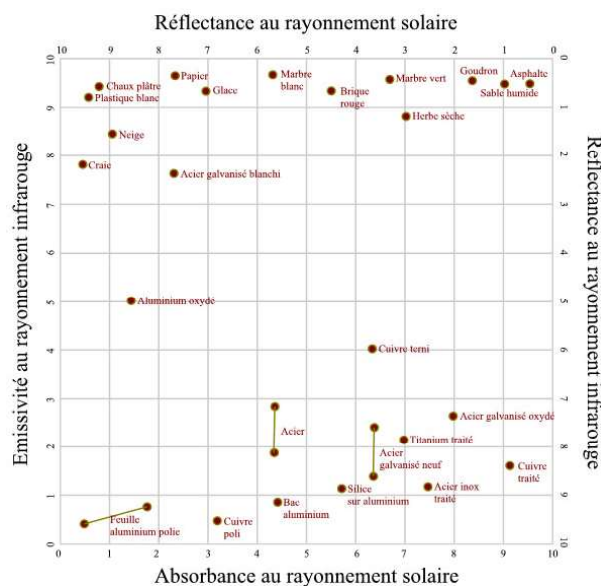


Fig. 1.33 – Absorbance, réflectance et émissivité de différents matériaux

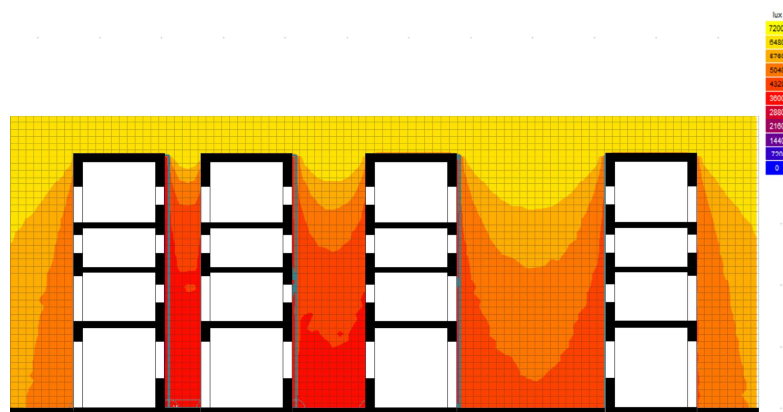


Fig. 1.34 – Distribution de la lumière du jour. Calculé en ECOTECH. Données météorologiques, Palerme (* epw). Mur extérieur avec réflectance=0.4

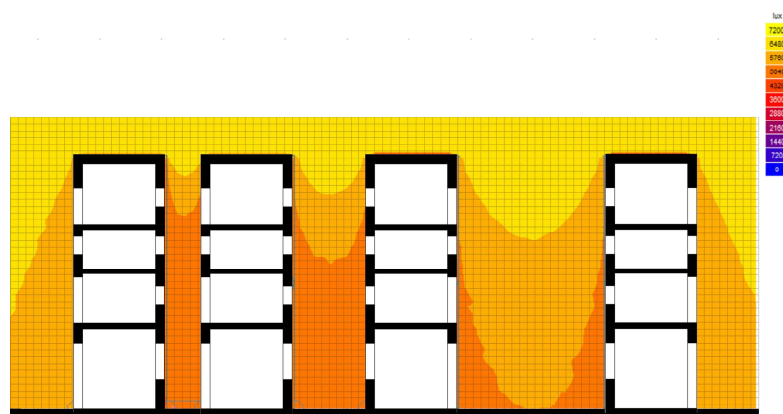


Fig. 1.35 – Distribution de la lumière du jour. Calculé en ECOTECH. Données météorologiques, Palerme (* epw). Mur extérieur avec réflectance=0.8

1.4 La ventilation naturelle

Dans l'optique actuelle de réduction des dépenses énergétiques des bâtiments, nous remarquons une attention particulière pour la qualité de l'air et pour des systèmes passifs capables de réduire le recours à l'installation de système de rafraîchissement artificiels. D'autre part la nécessité de réduire les pertes de chaleur a entraîné le développement d'une totale tenue à l'air des enveloppes. De ce fait, une contradiction est née entre étanchéité de la maison et nécessité de «respiration». Si on regarde les traités techniques jusqu'au XIX^e siècle, on note une certaine attention à la nécessité d'une ventilation naturelle du bâti, en raison surtout de la qualité de l'air assurée. Dans les manuels techniques du XX^e siècle, cette attention a laissé place à la description de systèmes électriques de refroidissement. Actuellement on s'intéresse de plus en plus à l'étude de la ventilation naturelle, non seulement en raison de la qualité intérieure de l'air mais aussi pour la possibilité de mettre en place des stratégies de contrôle thermique en été [50].

Dans ce cadre, les études des hygiénistes du XIX^e siècle sur la ventilation naturelle, en relation avec les systèmes constructifs et à l'utilisation correcte des matériaux sont très intéressantes pour en comprendre le fonctionnement.

Les hygiénistes ont considéré trois types de ventilation [131] :

- La ventilation libre, qui passe à travers les fenêtres et les portes ;
- La ventilation artificielle, assurée par des conduits d'aération ;
- La ventilation capillaire, à travers les pores des matériaux de construction

Comme nous l'avons dit précédemment, le bâti traditionnel dans la Méditerranée se caractérise par des patios ou cours fermées qui favorisent l'entrée et la diffusion des vents. Les patios limitent la nécessité de s'ouvrir sur les murs de périmètre, favorisent la captation de l'air et la ventilation transversale, grâce à la présence d'ouvertures opposées. A l'intérieur d'un espace, pour favoriser un taux d'air significatif pour le rafraîchissement, des ouvertures sont placés sur des parois opposés choisis en fonction de la direction du vent [131]. De plus les ouvertures sont normalement des dimension variable pour augmenter le débit d'air entrant. Le vent chaud touche les surfaces et est généralement rafraîchi par la présence des arbres [61] .

Si la ventilation libre est assurée par les ouvertures et le patio, nous ne retrouvons pas dans l'architecture traditionnelle, comme nous l'avons définie, des systèmes de ventilation «artificielle». Il s'agissait de systèmes de contrôle de la ventilation à travers des conduits d'aération dûment placés sur les parois ou sur la toiture. L'extraction de l'air était assurée par des flammes à gaz qui assuraient aussi l'illumination. Ces types de systèmes sont utilisés surtout dans l'architecture noble ou dans les bâtiments publics. Par exemple, le théâtre Massimo à Palerme, construit entre 1875 et 1891 par l'architecte Basile, s'inspire de grands théâtres de Paris et présente un système d'expulsion de l'air vicié par des grilles d'extraction intégrées à la toiture du théâtre avec une couronne de flammes à gaz placés au-dessous de la coupole pour assurer le tirage de l'air [42] (Fig.1.36 et Fig. 1.37).

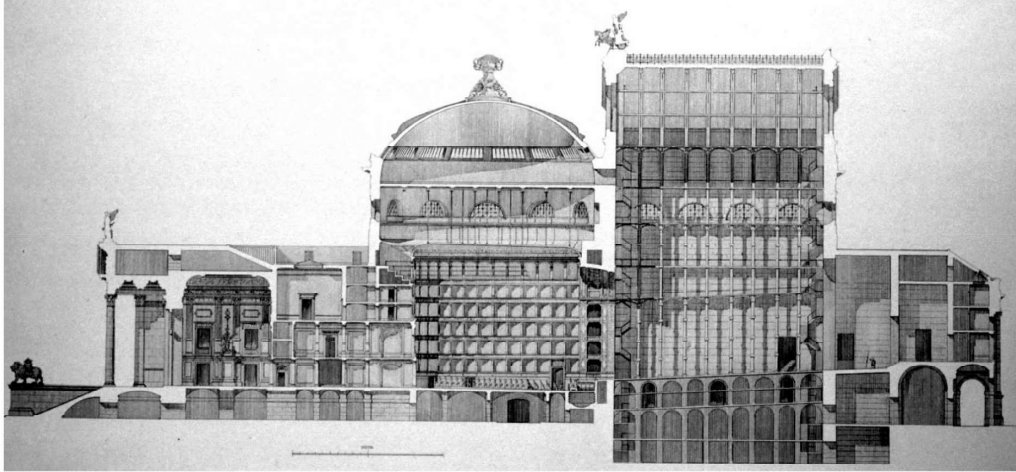


Fig. 1.36 – Coupe longitudinale du Teatro Massimo [42]

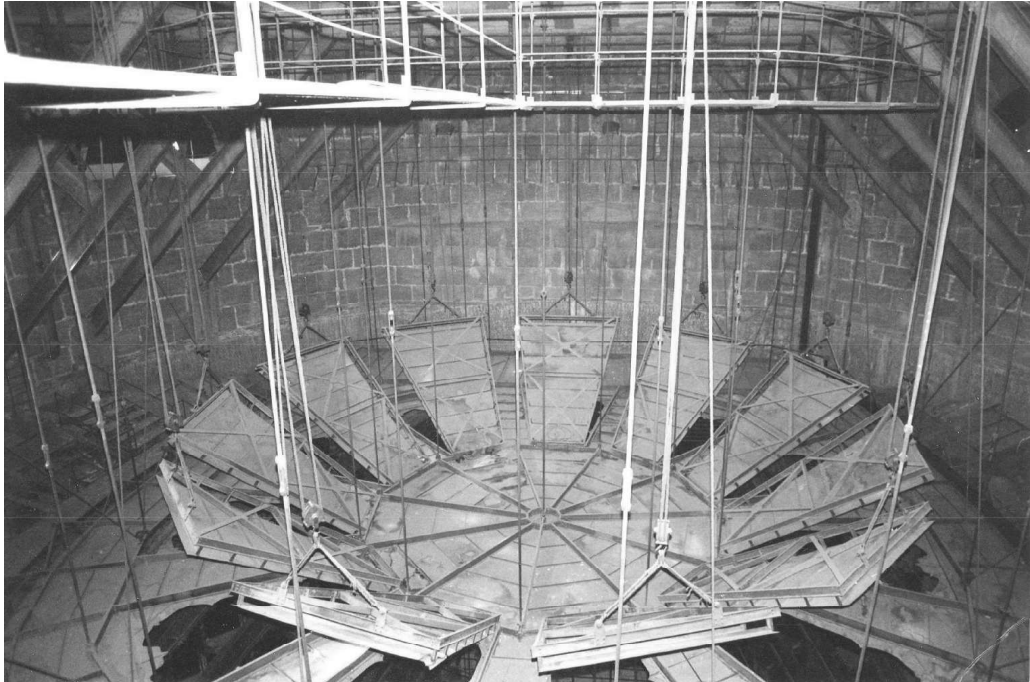


Fig. 1.37 – Vélarium au dessus du théâtre avec le système d'aération mobile [42]

Une partie importante des recherches des hygiénistes sur la ventilation naturelle en XIX^e siècle est dédiée à la ventilation capillaire. L'Allemand Pettenkofer fut le premier à effectuer des expérimentations sur la perméabilité de matériaux à l'air et à l'eau en 1851. Il avait conçu un cylindre de 15 cm de longueur et 5 de diamètre destiné à contenir un morceau de matériau. En soufflant dans le cylindre, il vérifiait si l'air passait [116] (Fig.1.38).

Au travers d'autres expérimentations, il arriva à la conclusion que les murs d'une maison étaient à considérer plus comme un filtre que comme des barrières en raison de la porosité, définie par Pettenkofer comme porosité totale, c'est-à-dire le rapport entre le volume apparent du matériau et son volume réel. Ce rapport donne un pourcentage du volume et il mesure l'espace de vide des matériaux de construction [118]. Au début du XIX^e siècle le débat sur la possibilité d'un renouvellement de l'air grâce à cette perméabilité était ouvert. Au Congrès d'hygiène de Bruxelles du début du XX^e siècle la question était abordée sans pour autant aboutir. Trélat dans sa *Question d'hygiène*, pose la question suivante :

« La porosité des murs étant admise, les uns pensent que nous devons nous efforcer d'en combattre les effets en doublant leurs surfaces intérieures de revêtements aussi imperméables que possible ; les autres estiment qu'il faut conserver à nos murs la communication qu'ils maintiennent entre l'atmosphère extérieure et intérieure- Où est l'idée juste ? » [129]

Or, les expériences à l'époque étaient nombreuses et contradictoires. Si certains hygiénistes affirmaient que les volumes d'air disponibles dans les différents espaces devaient être calculés en fonction de la porosité caractéristique des murs, planchers et plafonds, d'autres mettaient en évidence l'apport négligeable de la porosité des matériaux à la ventilation capillaire. Les recherches menées à Palerme au XIX^e siècle par le médecin De Blasi et l'ingénieur Castiglia sur la caractérisation des matériaux et des différentes composantes du point de vue hygiénique sont particulièrement intéressantes. Elles considèrent la porosité, la perméabilité à l'air et à l'eau, la transmittance thermique et l'aptitude à la transmission de micro-organismes [98]. Nous reviendrons dans le chapitre suivant sur les différents tests effectués sur les types de pierre les plus répandus dans les alentours de Palerme. Nous faisons ci-dessous un calcul simple pour vérifier la quantité d'air qui passait de l'extérieur à l'intérieur dans le cas d'un bâtiment traditionnel à Palerme.



Fig. 1.38 – Les tests de Pettenkofer sur la porosité des matériaux [116]

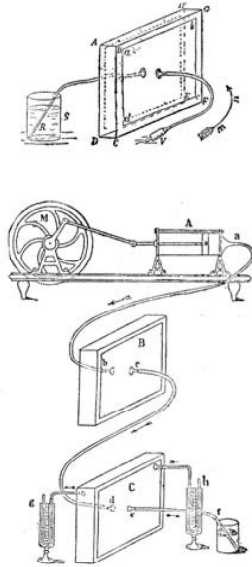


Fig. 1.39 – Les tests de Pettenkofer sur la porosité des matériaux [116]

Considérons une pièce dont les murs ont 0.15 m d'épaisseur. Bien que l'épaisseur d'un mur traditionnel à Palerme soit souvent de l'ordre de 0.60 m, voire plus, nous choisissons cette dimension pour pouvoir utiliser les résultats des tests effectués par Castiglia et De Blasi sur les matériaux traditionnels palermitains. De plus, différentes recherches de l'époque admettaient que pour des matériaux perméables, si l'épaisseur augmente dans une forte proportion, le volume d'air qui les traverse ne varie pas autant. Le volume de la pièce est défini par les dimensions suivantes [128] (Fig.1.40) :

- Largeur : 5 m.
- Longueur : 6 m.
- Hauteur : 4 m.

Le volume total est alors de 120 m^3 . Supposons que les murs soient en contact avec l'extérieur sur deux faces opposées et percés sur chacune d'elles par une fenêtre de 2.5 m sur 1.3 m. La surface d'accès d'air à travers les murs sera égale à : 33.50 m^2 . Admettons que la pression génératrice du passage de l'air à travers les murs est de 0.08 m en colonne d'eau. Dans ces conditions De Blasi et Castiglia indiquent une quantité d'air introduite à travers les murs pour le *tufo*, la pierre plus répandue à Palerme, de 120 litres par heure et par mètre carré, ce qui donnerait un total de $33.5 \times 120 = 4020 \text{ l/h}$. (Fig.1.41). Comme la pression ne s'exercera pas simultanément sur les deux murs opposés, le vent courant dans un sens, il pressera le mur qui lui fera obstacle. Nous ne devons donc considérer que la moitié, soit 2010 litres ou $2,010 \text{ m}^3$. En comparant au volume de la pièce, nous trouvons un rapport de 0.017 h^{-1} . Ce qui veut dire que la quantité d'air introduite à travers les murs n'entreprendrait dans l'atmosphère intérieure qu'un renouvellement horaire égal à 0.017 ; soit à peine

un soixantième du volume habité.

Les mêmes calculs ont été faits par Trélat sur un cas français et ont effectivement re-dimensionné l'importance accordé à ce type de ventilation en terme de renouvellement d'air à l'intérieur, même si la ventilation interstitielle continuait à être recommandée pour assurer la salubrité des espaces. Il arrive à la conclusion que *« Même si l'aération cubique des intérieurs n'a pas d'avantage sensible à tirer de l'air de l'extérieur à travers les murs perméables, dans les murs poreux, l'atmosphère extérieure pénètre par une face dans le mur, en même temps que l'atmosphère intérieure y entre par l'autre et y dépose les souillures aériennes de la vie. La rencontre donne lieu à une combustion froide qui combat et annule incessamment l'infection du mur. »*

Malgré ces études, à partir du début du siècle s'est diffusée la conviction que les finitions extérieures devaient être complètement imperméabilisés, et chaque composant organique devait être «minéralisé» de manière à créer une barrière entre intérieur et extérieur. Murs, planchers, et plafonds ne sont plus vus comme des filtres mais comme des limites étanches.

«Ainsi raisonnent les défenseurs des enduits imperméables; il est certain que leurs déductions sont faites pour séduire[...]» [128]

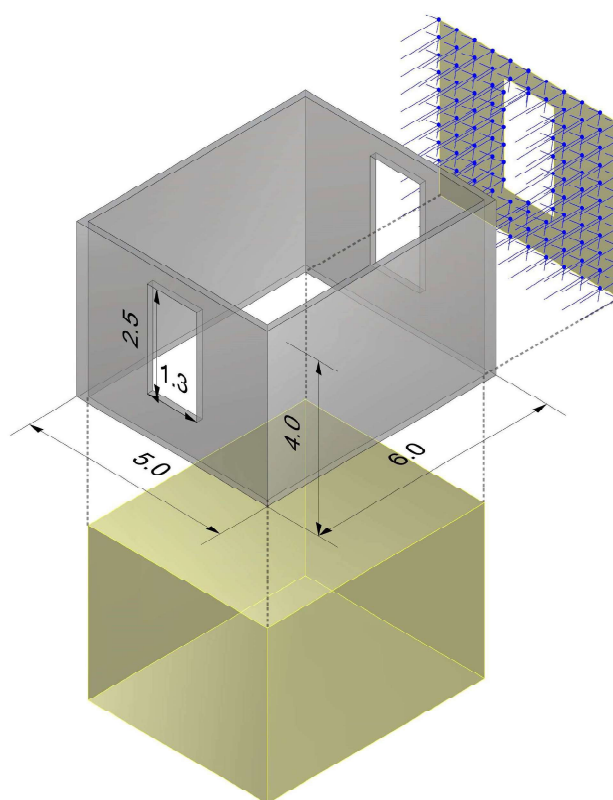


Fig. 1.40 – Schéma de la pièce étudiée

Permeabilità all'aria di vari materiali (Blasi e Castiglia).

N. d'ordine	SPECIE DEL MATERIALE	Groschezza in centimetri	Pressione in colonna d'acqua	Quantità di aria in litri passata in 1 ora e in m ³ l	
1	Tufo di aspra, qualità corrente	Per i 15 materiali cm. 15	Per tutte le esperienze pressochè m. 0,080	120,00	
2	» » » normale			105,80	
3	» » » d'intaglio			90,00	
4	» » Solanzo smarrato			72,00	
5	» » » d'intaglio			32,70	
6	» » dell'Isola delle Femine			32,14	
7	» » di Favarotta			31,00	
8	» » Carini			22,50	
9	» » Cava Acquasanta			16,50	
10	» » » Fossa			14,70	
11	» » Cinisi			11,10	
12	Malta idraulica	Per i 6 materiali cm. 15	Per tutte le esperienze pressochè m. 0,080	2,80	
13	» ordinaria			1,70	
14	» semidraulica			1,60	
15	Impasto di cemento			1,20	
16	Mattone pantofolone di Palermo			5,00	1,30
17	» » uso Livorno			5,50	0,53
18	» » a tre buchi	5,00	0,89		
19	» » a sei buchi	6,50	1,10		
20	» » palmare doppio	2,20	0,35		

Fig. 1.41 – Résultats des analyses de De Blasi et Castiglia [98]

Chapitre 2

Matériaux e composants constructifs à Palerme

Résumé : Ce chapitre vise à contribuer à la caractérisation thermo-physique des matériaux et des composants constructifs historiques de Palerme. Sur la base de documents publiés et d'archives, nous parcourons l'évolution historique de la diffusion des principaux matériaux de construction (pierre, bois, fer, ciment, mortier) à Palerme. Nous identifions leurs propriétés thermiques et hygrométriques en se basant sur les études menées durant la période des Hygiénistes à Palerme. Dans un deuxième temps, nous décrivons l'évolution historique des composants constructifs (mur, toiture, plancher, balcon) les plus répandus afin d'évaluer leurs performances hygrométriques et thermiques en régime stationnaire et dynamique. Dans ce contexte, nous proposons une méthode de calcul pour l'évaluation des ponts thermiques qui prenne en compte l'inertie de ces composants.

Riassunto : Questo capitolo si propone di contribuire alla caratterizzazione termo-fisica dei materiali e dei componenti edilizi storici di Palermo. Sulla base di documenti pubblicati e d'archivio, si ripercorre l'evoluzione storica della diffusione dei principali materiali da costruzione a Palermo. Si identificano le loro proprietà termiche e igrometriche, basandosi principalmente sugli studi del periodo degli Igienisti. In seguito, si descrive l'evoluzione storica dei componenti costruttivi più diffusi al fine di valutarne le prestazioni igrometriche e termiche in regime sia stazionario che dinamico. In questo ambito, si propone un metodo di calcolo per la valutazione dei ponti termici tenendo in conto dell'inerzia termica dei materiali.

2.1 Les matériaux de construction à Palerme

Les pierres

En analysant les traités et la littérature spécialisée jusqu'au XIX^e siècle, on est conduit à penser que les principaux éléments techniques du bâti traditionnel dans la Méditerranée sont restés constants à travers les siècles quant à leurs modes de réalisation et de mise en œuvre, à l'exception de quelques différences morpho-géométriques. Néanmoins, l'analyse philologique des documents d'archives des bâtiments à Palerme, montre un approfondissement continu pour affiner à la fois l'utilisation correcte des matériaux de construction localement disponibles et les techniques constructives et de mise en œuvre [21]. A partir des premières décennies du XX^e siècle, les nouveaux matériaux et techniques constructives commencent à être importés en Sicile. Cependant, la diffusion de ces systèmes est assez lente et, c'est seulement à partir des années 30 qu'on assiste à un déclin progressif des systèmes constructifs traditionnels [20].

Les documents d'archives du XVIII^e siècle permettent de se promener à travers le temps dans les chantiers palermitains [21]. Ils font revivre le quotidien et le dynamisme d'un chantier très organisé qui, déjà dans les phases préliminaires, montrait une grande attention dans le choix des matériaux, le contrôle de la qualité, le coût de chaque opération de travail et la description complète de la réalisation. En amont du processus d'édification, on constate une rationalisation de la chaîne de construction. L'extraction des pierres se fait dans des carrières à proximité de la ville, ce qui réduit les coûts de transport et facilite la tâche des bâtisseurs (Fig.2.1 et Fig.2.2). La destination de la pierre dans les différents composants constructives du bâtiment dépendait de la carrière d'origine et de la hauteur d'extraction [39]. Les carrières à ciel ouvert sont les plus répandues à Palerme et caractérisent son paysage. L'importante exploitation de la pierre locale – calcarénite ou *tufo* (Fig. 2.4), grès formé par la consolidation de sables calcaires est aussi évoquée par les voyageurs étrangers ; dans *Voyage en Italie*, Goethe décrit les paysages de la plaine de Palerme comme des lieux «qui ont comme roche de base un calcaire coquillier, dont la ville est bâtie, et l'on en voit de grandes carrières ouvertes dans ces endroits» [133].

Le chantier était précédé par la définition d'accords préliminaires, d'actes notariaux, entre les acteurs du processus d'édification, le commanditaire et l'architecte. Le métier d'ouvrier se transmettait de père en fils, et souvent les équipes d'ouvriers étaient constituées de familles entières. Les intervenants ont un rôle bien défini durant toute la construction. L'architecte, ou ingénieur, préparait et fournissait les dessins, profils et élévations auxquels les bâtisseurs devaient se référer. Avec l'aide d'un comptable, il rédigeait aussi la *relazione di misura e di stima*, une sorte de détail quantitatif estimatif, avec la liste des travaux et fournitures et le prix de chaque opération. Le *mastro murario* (maître d'ouvrage) collaborait avec le *mastro pirriatore* (Fig.2.3) qui s'occupait de gérer l'extraction et la taille de la pierre dans la carrière, et avec le *mastro calcinaio* qui était chargé de la préparation de la chaux. Les ouvriers non spécialisés s'appelaient *picciotti*. Les bâtisseurs s'organisaient en corporations, dont le prestige se mesurait aussi par la construction de petites églises dédiées à leur saint protecteur [21].



Fig. 2.1 – Les ouvriers dans la carrière d’Aspra (Palerme) [21]



Fig. 2.2 – Les carrières dans les alentours de la ville de Palerme. A=Via Cavallacci à St’Annuzza, B=via Cavallacci, C=via Terrerrosse, D=de via Cavallacci à Giardino inglese, E=via Cavallacci à La Conceria [21]



Fig. 2.3 – *U pirriaturi* dans une carrière de *tufo* [21]



Fig. 2.4 – Claveau de *tufo*

Le *tufo*, utilisé comme principal matériau de construction à Palerme, appartient à la période quaternaire. Il est en grande partie d'origine carbonique avec de l'argile et du sable dans des proportions variables et contient des restes marins fossiles abondants, avec des traces d'oxyde de fer. Selon ces proportions, il revêt une teinte jaunâtre en raison de l'oxyde ferrique qu'il contient [98].

Pour déterminer la *capacità all'acqua*, définie par De Blasi et Castiglia comme le rapport entre le poids sec et le poids humide de l'éprouvette, les deux chercheurs ont utilisé la méthode Renk qui consiste à évaluer la différence de poids du matériau sec et du matériau imprégné d'eau. Des cristallisoirs ont été utilisés, partiellement remplis d'eau distillée, de sorte que la pièce était humide seulement au fond. Pour éviter l'évaporation de l'eau, tout était recouvert d'une cloche en verre [98](Fig.2.6). À partir de ces études, ils ont constaté que les pierres des carrières d'Aquasanta (3 km de Palerme) sont celles qui ont la capacité maximale d'absorber l'eau, et que le *tufo* de Solanto (18 km de Palerme) a la capacité la plus faible, le rendant adapté à l'exposition à la pluie [117]. Pour examiner la porosité, les deux chercheurs choisissent la méthode de Fligge de préférence à celle de Renk. La méthode de Renk est considéré comme imprécise, car l'eau s'enferme dans les pores du matériau et elle n'arrive pas à pénétrer dans les pores les plus étroits ; il y a, donc, toujours une certaine quantité d'air dans le matériau [34]. Avec la méthode Fligge, tout l'air des pores est éliminé et remplacé par de l'acide carbonique [34]. De plus, elle permet de répéter facilement l'expérience pour contrôler les résultats obtenus. Ces résultats ont montré que le *tufo* de Cinisi (39 km de Palerme) a une porosité maximale (47.56%), et celui de Carini (28 km de Palerme) a la porosité plus faible (36.66%). De Blasi et Castiglia ont aussi calculé la quantité d'air en litres circulant en une heure par mètre carré pour les différents matériaux traditionnels [117]. Pour l'examen de la perméabilité à l'air, ils testent des morceaux de *tufo* et d'autres matériaux de construction d'un volume de 1500 cm³, recouverts d'une feuille métallique sur quatre faces, couvrant la cinquième face avec un couvercle d'étain et laissant libre la sixième face [117]. Ils confirment ainsi que le *tufo* est jusqu'à cent fois plus perméable à l'air que les ciments communs, ce qui favorise son séchage [131]. Ils démontrent aussi la meilleure perméabilité à l'air de la calcarénite par rapport aux briques de terre cuite.

De Blasi et Castiglia s'intéressent aussi à la transmission de chaleur dans les matériaux de construction en raison de la grande importance pour l'hygiène des habitations. Ils cherchent surtout à déterminer le coefficient de convection [98]. À cette fin, ils construisent des tubes de même taille et de même surface chauffante dans les différents matériaux. En faisant circuler à la même vitesse un fluide et en mesurant les températures initiales et finales, ils obtiennent, par des formules de physique technique, des relations entre les coefficients de transmission de différents matériaux. En prenant comme référence la valeur de la brique, les deux chercheurs calculent que certains calcarénites conduisent la chaleur plus de la brique et d'autre moins [34].

1898. N. 14.		L'INGEGNERIA SANITARIA		159	
Numero	MATERIALI DA COSTRUZIONE	LOCALITÀ	CAPACITÀ PER L'ACQUA		SPERIMENTATORI
			per % in peso	per % in volume	
1	Malta di vecchi muri	Roma	—	33,88	Serafini
2	» grassa	»	—	35,55	»
3	» ordinaria	»	15,96	28,09	De Blasi e Castiglia
4	» idraulica	Palermo	20,57	34,37	»
5	Mattoni (media di 8 campioni)	»	25,—	36,62 (da 20,67 a 43,83)	»
6	» (media di 4 campioni)	Roma	—	36,20 (da 31,51 a 45,63)	Serafini
7	Tufo vulcanico	»	—	31,10 a 44,60	»
8	» calcare	Palermo	13 a 27	28,80 a 36,53	De Blasi e Castiglia
9	Travertino (media)	Roma	—	4,57	Serafini
10	Selce	»	—	3,74	»
11	Marmo	»	—	0,25	»
12	Roce compatte	Torino	—	0,35 a 1,67	Crema
13	Marmi diversi	Pisa	0,24 a 0,82	—	Pellegrini
14	Ardesia	»	10,70	—	»
15	Xilolit	»	25,42	—	»
16	Mattoni per pavimento	»	29,12	—	»
17	Mattonella cementata	»	0,46	—	»
18	Malta comune	»	10,15	—	»

Fig. 2.5 – Risultats des tests de Castiglia et De Blasi sur la capacité à l'eau [117]

N.	Materiale da costruzione	Località	Volume totale dei pori per cento	Sperimentatori
1	Malta ordinaria	Palermo	38,19	De Blasi e Castiglia
2	» idraulica	»	45,15	»
3	Mattoni (media di 8 campioni)	»	45,63	»
4	Mattoni da pavimenti	—	28,70	Pellegrini
5	Tufo calcare	Palermo	36,66 a 47,56	De Blasi e Castiglia
6	Marmo	—	4,37	Pellegrini

Fig. 2.6 – Risultats des tests de Castiglia et De Blasi sur la porosité des matériaux [117]

Les études sur la caractérisation thermo-physique des calcarénites palermitaines sont très rares aujourd'hui. Toutefois, le travail de recherche appliquée réalisé par Enrico Genova, chercheur à l'Université de Palerme fournit des indications importantes pour la caractérisation thermo hygrométrique des calcarénites traditionnelles [53]. Dans ce travail, il teste trois éprouvettes de calcarénite jaune, de dimension de 20x20x5 cm, prélevées dans deux bâtiments historiques de Palerme. Elles sont ensuite séchées à 105 °C pour retrouver la masse volumique apparente (rapport entre le poids et le volume). Les résultats donnent des valeurs entre 1479 kg/m³ et 1627 kg/m³ (Tableau 2.1).

En ce qui concerne la porosité, mesurée selon la DIN EN 1936 et définie comme le rapport entre la masse volumique apparente et réelle (rapport entre la masse d'un matériau sec et le volume de la matrice solide, c'est-à-dire sans le volume de la porosité accessible), les résultats sont compris entre 40% et 45%. Une autre importante contribution est donnée par le test sur le coefficient de diffusion de vapeur μ . Le test a été effectué selon les prescriptions de la norme DIN EN ISO 12572 qui prévoit deux types de méthodes (une à récipient sec à 23 °C et humidité relative de 0%-50%) et l'autre à récipient humide à 23 °C et humidité relative de 50%-93%). Les résultats donnent un coefficient μ égal à 9.54 avec la première méthode et 9.88 avec la deuxième.

En ce qui concerne la conductivité thermique, les tests effectués par Genova, selon la norme DI EN 12664, utilisent six capteurs de température superficielle, posés sur deux faces opposées de l'éprouvette. Cette dernière est ensuite soumise à une différence de température de 20 °C sur la partie supérieure et de 10 °C sur la partie inférieure. Le flux de chaleur qui traverse l'éprouvette pendant une période garantissant sa stabilisation permet de calculer la résistance thermique et donc, compte tenu de l'épaisseur, sa conductivité en appliquant l'équation du flux de chaleur. Les résultats donnent une conductivité thermique entre 0.67 W/m · K et 0.79 W/m · K (Tableau 2.1). Si on compare ces valeurs avec ceux donnés par la norme UNI EN 1745 :2012 (qui associe une valeur différente de conductivité thermique à des intervalles de masse volumique), on constate des valeurs inférieurs de 12% à 38% (Tableau 2.2).

Il existait à Palerme les pierres artificielles en terre cuites. Elles étaient utilisées pour la construction de piliers, arches, platebandes et voutes. L'argile prévenant de *Acqua de Corsari*, localité voisine de Palerme, était mélangée à de l'eau de mer pour constituer les briques. Les dimensions sont variables par rapport au type d'utilisation et au type d'appareillage. Le type plus répandu est le *pantofole*, de dimension 22.2x11.6x2.4 cm. Ces briques présentaient une porosité élevée et une grande capacité à l'eau dues à la production encore artisanale qui ne permettait pas une correcte

Tableau 2.1 – Résultats des tests,[53]

Éprouvette	ρ [Kg/m ³]	λ [W/m · K]
A	1648	0.795
B	1490	0.673
C	1592	0.754

Tableau 2.2 – Comparaison des valeurs entre la norme UNI EN 1745 :2012 et celles mesurées [53]

Éprouvette	λ mesuré [W/m · K]	λ UNI EN 1745 :2012 [W/m · K]
A	0.795	+38.4%
B	0.673	+26.3%
C	0.754	+12.7%

compactification. De ce fait, De Blasi et Castiglia en déconseillaient l'emploi pour les structures plus exposées à l'eau [34]. Il existait aussi des parpaings à 3 ou 6 trous, présentant de meilleures qualités. Selon ces deux chercheurs la pierre en terre cuite avait une porosité qui variait entre 42% et 46% et une conductivité thermique légèrement inférieure à cela de la calcarénite jaune [131]. A Palerme, les façades étaient souvent revêtues de tuiles en brique. Ces dernières étaient blanchies avec du lait de chaux non seulement pour les rendre étanches à l'eau et éviter les bio-salissures, et également en augmenter l'albédo.

Pour terminer avec les pierres, on constate aussi à Palerme l'utilisation d'une pierre calcaire compacte, comme celle de Boccadifalco et de Billiemi, très coûteuse et employée surtout pour le revêtement de la partie inférieure des murs. Dans ce cas, on plaçait des dalles de pierre naturelle pour de raison à la fois esthétiques et pour empêcher à l'humidité de remonter, évitant à l'enduit de se détacher du mur. En réalité cet artifice augmentait le niveau d'humidité en accroissant la capillarité du système.

Les mortiers

Les mortiers utilisés jusqu'à la première moitié du XIX^e siècle étaient souvent constitués de chaux et de sable. Un autre type répandu est le mortier hydraulique, constitué de chaux, de sable et de pouzzolane ou seulement de pouzzolane. L'inerte qui compose le mortier est classé selon sa localité d'extraction [131].

Le gypse était très répandu en Sicile à la fois comme pierre de construction et comme mortier, en particulier dans la zone centrale. En effet, la conformation géologique sicilienne est similaire à celle du territoire de Paris. Rondelet dans son *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, écrivait : «On trouve en Sicile, aux environs de Girgenti, beaucoup de pierres à plâtre semblables à celles des environs de Paris. Cependant, elles sont un peu plus dures ; on les emploie comme moellons pour les murs des bâtiments qui sont maçonnés en plâtre fait avec la même pierre» [107].

On remarque le développement de techniques constructives similaires entre la Sicile et Paris, avec toutefois un décalage temporel de cinquante ans. En Sicile le gypse a connu le même parcours qu'en France : d'une grande diffusion durant les premières décennies du XIX^e siècle, à des doutes sur son emploi et jusqu'aux proscriptions du début du XX^e siècle [47]. Le plâtre était utilisé pour sa facilité d'extraction, son aptitude à être travaillé et sa prise rapide. Dans les documents d'archive siciliens, on retrouve l'emploi du gypse pour le revêtement des murs extérieurs, pour boucher des fissures, mais aussi comme couche rigidifiante sur les planchers ou sur les fausses-voutes. On retrouve aussi l'emploi du gypse recuit entre une température de 600 °C et 900 °C. Ce type de gypse recuit était utilisé pour la réalisation de pierres artificielles qui à la fois présentaient une bonne résistance et empêchaient l'attaque des microorganismes [47].

Des études sur la perméabilité à l'eau ont aussi été menées sur les mortiers qui constituent 30 à 35% des murs en moellons et 5 à 10% des murs en pierre de taille. Sur ces derniers les mortiers étaient posés par couches horizontales. Le choix de l'eau et du sable s'est porté sur une eau fluviale, en raison de sa teneur réduite en sels qui entraînent avec le temps des fissures dans les murs. Les mortiers les plus utilisés à Palerme sont les mortiers de chaux aérienne qui, selon De Blasi et Castiglia, présentent une absorption capillaire réduite [131]. Le mortier à base de ciment fut surtout employé durant la première moitié du XX^e siècle à cause de sa moindre perméabilité à l'eau. La conductivité sonore et thermique était réduite par l'ajoute de fibres organiques [98].

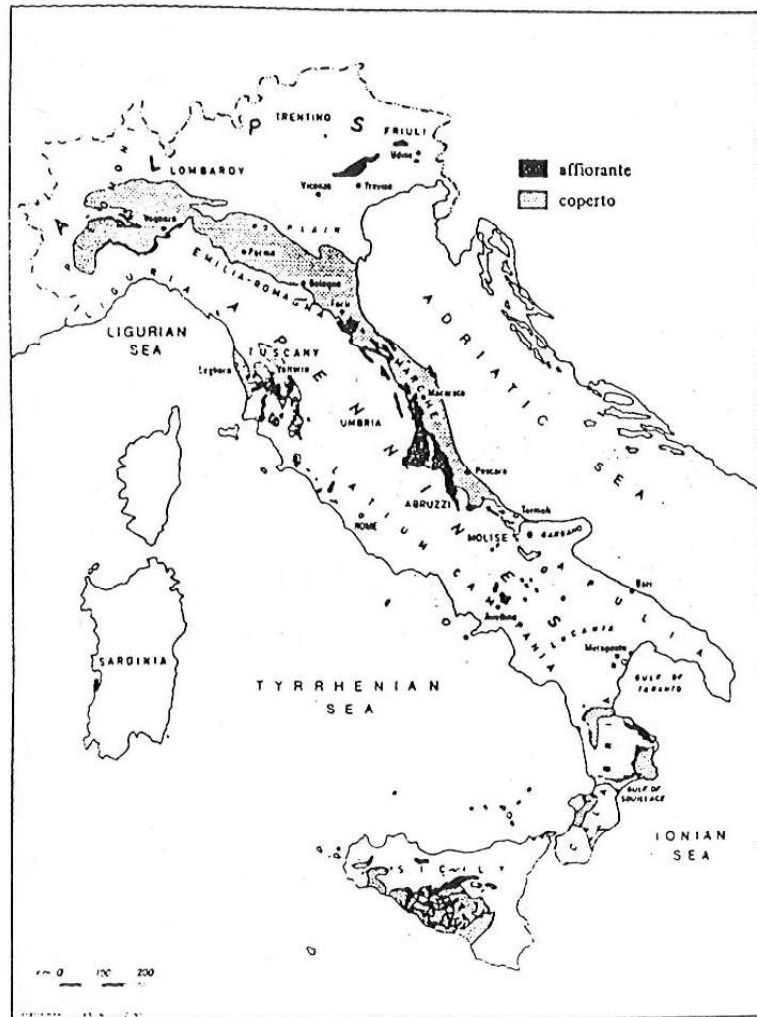


Fig. 2.7 – Carrières de gypse en Italie d'après [110]

Le bois

Les *Tariffe per i lavori delle varie arti inservienti alle opere pubbliche e comunali di Palermo*, les tableaux des prix du Réal Secrétariat d'état du Royaume des deux Siciles du 1850, nous fournit des informations importantes sur les matériaux les plus répandus dans l'architecture traditionnelle à Palerme.

Le bois est généralement utilisé pour les planchers et les toitures du bâti traditionnel. Les dimensions des éléments en bois sont des plus variées, pour les grandes portées, mais aussi pour les petites et pour les planches [39]. Les pièces de bois sont classées en deux catégories tarifaires : celles avec dimension inférieur à 30 *palmi* (7.5 m) et celles de dimensions majeures [20]. Dans les tableaux des prix de Palerme le *quadralino* désigne une poutre de bois de section carrée qui est la plus répandue pour les ouvrages de toiture, plancher, parois et toutes les parties constructives qui ont un rôle structurel (Fig.2.8).

Les essences de bois les plus communes à Palerme sont le châtaignier, d'origine calabraise, mais aussi le chêne d'origine locale. A la fin du XIX^e siècle on retrouve dans les tarifs le sapin et l'érable originaires de Corse et de Trieste.

En ce qui concerne le tablier, les planches ont une dimension de 0,40 m et une épaisseur de 0,02 m. L'essence la plus utilisée reste le châtaignier, mais pour des planches de dimensions inférieurs on retrouve aussi l'érable, le hêtre et le sapin. Selon la destination du tablier, les planches étaient rabotées sur une face. Ce traitement existait aussi dans les planchers du bâti noble [20].



Fig. 2.8 – Poutre en bois dite *quadralino* dans un plancher traditionnel

Le fer

En Europe le fer comme élément de construction, en plus de la pierre et du bois, s'est diffusé déjà à la fin du XVII^e siècle ; avec quelques décennies de décalage, la diffusion de ce matériau en Sicile suit la même évolution que dans le continent. En effet, les nouvelles possibilités architecturales et mécaniques offertes par les structures métalliques, génèrent une véritable invasion dans les systèmes constructifs jusqu'à prendre un rôle déterminant surtout dans le bâti le plus noble [46]. Les recherches sur les caractéristiques mécaniques des métaux ont joué un rôle moteur dans la diffusion du métal en Sicile. Si initialement le métal était utilisé seulement pour des pièces de raccords dans des systèmes traditionnels, on observe par la suite la diffusion de la production de poutres métalliques pour les planchers et les toitures. Jusqu'à la moitié du XVIII^e siècle, le fer semi-fini était exclusivement produit en barres de longueur inférieure à 4,50 m, alors que la production de lames de section rectangulaire (pour les armatures des ponts et les chaînes servant à l'élimination des poussées horizontales dans les structures maçonnées [33]) date de la fin du XVII^e siècle. Ces lames avaient une section entre 42 et 95 mm sur le côté long et entre 11 et 20 mm sur le côté court. Pendant tout le XVIII^e siècle, le fer utilisé à Palerme pour les bâtiments provenait des usines des Flandres et du nord de l'Italie [44]. La première usine de charbon coke dans le territoire palermitain fut implantée en 1837, sous l'impulsion de l'anglais John George Skurray, pour l'alimentation de fours à haute température [48]. A partir de 1867 les profilés à simple T commencent à se répandre pour la construction des velux et après 1873 les profilés à double T pour les planchers métalliques, même s'ils existaient déjà dans le bâti monumental. Par exemple, l'architecte Damiani, déjà cité dans l'introduction, les avait utilisés pour la construction du marché de poisson, détruit quelques années plus tard [32].

En ce qui concerne les dénominations des produits, Palerme a conservé les dénominations européennes [107]. La Fig.2.9 et la Fig.2.10 montrent les barres et les clous produits dans les usines du nord de l'Italie et de la Carinthie. Dans les *Relazioni di misura et stima*, documents annexes au chantier, l'unité de mesure utilisée était le *fascio* et non les dimensions. Le *fascio* désigne un lot de barres d'égales section et longueur et ayant le même poids .

A Palerme, Ernesto Basile fut considéré comme l'«architecte du fer». Après sa participation à l'exposition universelle de Paris de 1867, en tant que représentant de l'administration communale de Palerme, la diffusion du fer dans le bâti à Palerme a commencé à connaître un grand succès [45]. Une formation à ces produits en fer étant devenue nécessaire, Basile, professeur à l'Université de Palerme, introduisit en 1875 des cours sur la conception de couvertures en fer. Au retour de l'exposition, il publia un rapport dans lequel il décrit les innovations les plus intéressantes présentées autour de l'industrie du fer. «[...]plus l'industrie du fer perfectionne ses produits, mieux on comprendra les capacités exactes des matériaux utilisés et moins il faudra se contenter de l'à peu près[...]. Il ne faut plus considérer la main de l'homme que comme transmission de l'intelligence aux forces automatiques auxquelles la force brute doit être dévolue. Seules les forces mécaniques sont dotées de l'énergie propre à réaliser les fers avec précision, économie et rapidité». Cette phrase reflète toute la réflexion autour de ces nouveaux produits issus de la révolution industrielle dans

une période de passage entre tradition et innovation. On peut tirer le rapprochement avec la révolution numérique en cours aujourd'hui, et les réserves exprimées par certains acteurs du processus du projet à l'égard d'outils tels que la robotique en architecture.

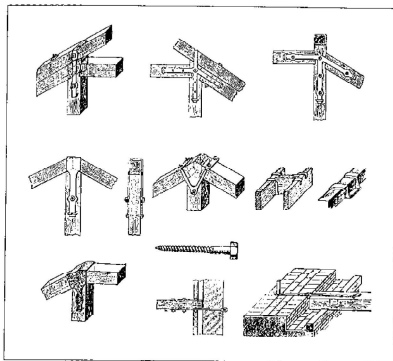


Fig. 2.9 – Éléments métalliques auxiliaires aux structures en bois [130].

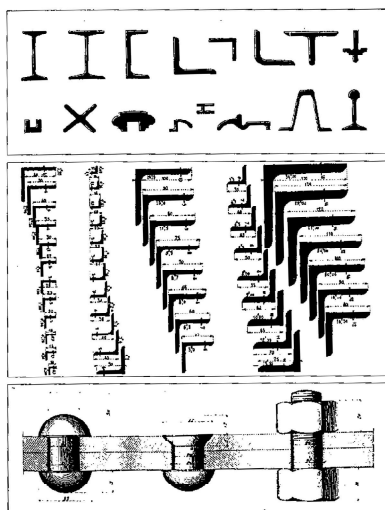


Fig. 2.10 – Profils standardisés [72]

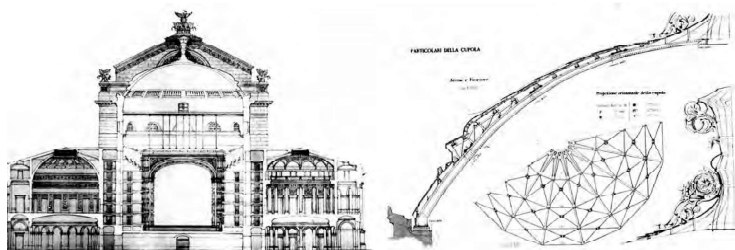


Fig. 2.11 – Dessins de la coupe transversale et de la couverture métallique du Théâtre Massimo de l'architecte Basile [83].

Le ciment

La diffusion des matériaux à base de ciment à Palerme date de la fin du XIX^e siècle. Initialement utilisé pour les éléments de décoration ou de revêtement, le béton à base de ciment, comme matériau de structure, commence à se diffuser à partir du XX^e siècle.

Déjà en 1903, Conigliaro et Ghilardi, propriétaires d'usines de produits en ciment, ont commencé la production de matières premières à Palerme en installant une petite cimenterie, transformée en 1906 en une grande usine produisant du ciment Portland et de la chaux hydraulique à prise lente, en utilisant des marnes retirées de Dalmatie. La production annuelle de 250 000 quintaux de ciment était consommée à Palerme (100 000 quintaux) et dans le reste de la Sicile (100 000), tandis qu'environ 50 000 quintaux étaient exportés vers la Calabre et Naples [22]. D'après le catalogue commercial, l'usine ne se limitait pas à la fourniture de pièces préfabriquées mais fournissait aussi des systèmes structurels à mettre en œuvre comme les systèmes poutre-plancher (Fig.2.12), les dalles pour balcons, les planchers mixtes en entrevous et poutrelles en béton ou encore les poutres en béton armé avec des poutrelles en fer pour résister à la traction.

La diffusion de la structure poteau-poutre en béton fut relativement lente par rapport au béton utilisé pour les éléments de décoration. Initialement on trouve des structures mixtes en pierre avec plancher en béton, seulement dans le bâti scolaire. Après le séisme du 1908 de Messine, la diffusion en Sicile augmente rapidement. A partir des années 30 du XX^e siècle, on assiste à une réduction progressive de l'utilisation des systèmes traditionnels en faveur des systèmes poteau-poutre [22].

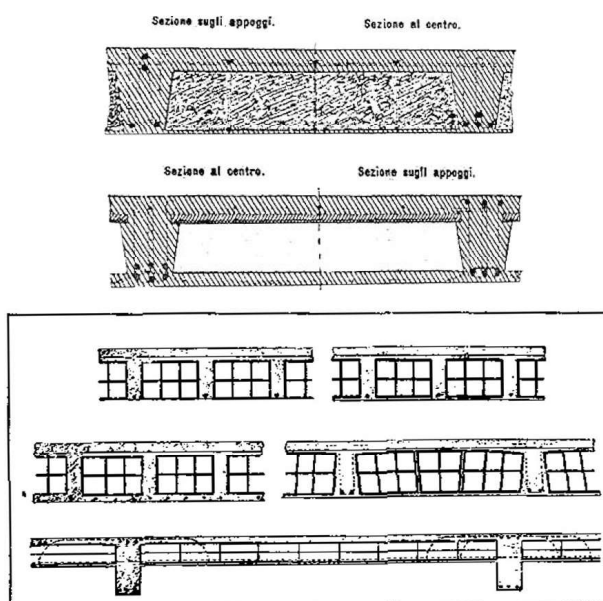


Fig. 2.12 – Système de plancher en béton "Ghilardi" [22]

2.2 Étude morphologique des composants constructifs : l'enveloppe

2.2.1 L'enveloppe massive

Les murs

Dans un contexte *low tech*, comme celui de la Méditerranée, le constructeur optait pour des principes d'économie dans l'utilisation des matériaux et de la main-d'œuvre ainsi que dans le réemploi des déchets. Souvent, il réutilisait les pierres des bâtiments démolis pour faire la mise à niveau des planchers ou pour bâtir des murs mixtes en pierre taillée et moellons, en façade ou à l'intérieur [42]. Il adaptait l'épaisseur des murs à la nature du matériau utilisé, non seulement pour des raisons mécaniques, mais aussi afin d'augmenter leur inertie thermique et d'obtenir le maximum de confort thermique dans une ville où les écarts de température entre l'été et l'hiver, le jour et la nuit, sont très importants [61](Fig.2.13).

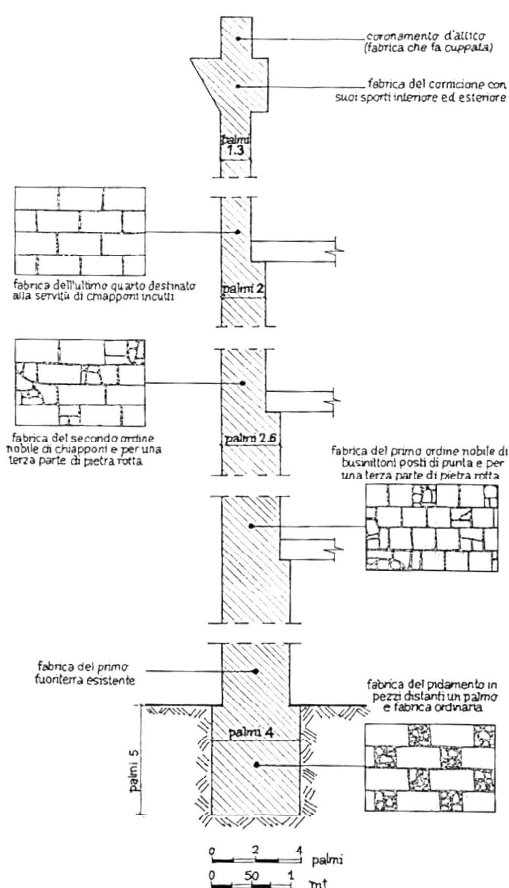


Fig. 2.13 – Coupe constructive du mur extérieur du *Palazzo Asmundo-Paternò* à *Palerme* [21]

Matériaux e composants constructifs à Palerme

On observe plusieurs types d'appareillage des murs que l'on peut classer en relation avec le réemploi des matériaux de chantier (Fig.2.14 et Fig.2.15) :

- Type A : Mur de pierres nouvelles ou *fabrica di pezzi incutti*
- Type B : Mur mixte avec pierres nouvelles et de réemploi ou *fabrica ordinarja*
- Type C : Mur uniquement en pierres de réemploi

Le mur de pierres nouvelles est composé de pierres taillées équarries ; selon la période de construction, le mur pouvait être hourdé. Le lit de pose était de préférence sans calage. L'appareillage est assisé. Néanmoins, dans des erreurs de réalisation on trouve des remplissages avec du mortier et des parpaings afin d'assurer la liaison des deux assises. Le mortier est généralement un mélange de chaux grasse et de sable.

Le mur mixte avec pierres nouvelles et de réemploi est aussi hourdé. L'appareillage présente des rangées plutôt horizontales composées de pierres taillées qui, selon le type, peuvent constituer 1/3 ou 2/3 du total du mur, et des parties réalisées avec un conglomérat de pierre cassée et de mortier.

Durant le XVII^e siècle et le XVIII^e siècle, le mur en pierres de réemploi est un des plus répandus, sous le nom de *pietra del locale*. Il constitue un type particulier de mur dit *pietra e tajo* [99], caractérisé par des moellons de différentes dimensions, dits *petra rustica*. Le Tableau 2.3 montre les caractéristiques des différents types de murs.

Le mortier est composé d'argile et d'eau. Ce type de mur était très économique, mais il présentait de faibles qualités mécaniques, ce qui empêchait d'éventuelles extensions des bâtiments . Utilisée uniquement à l'origine pour les murs et les cloisons internes, cette technique de construction a été appliquée aussi au cours du XVIII^e siècle aux murs de façade. En fait un revêtement d'enduit permettait de cacher l'appareillage du mur [21].

Tableau 2.3 – Caractérisation des différents types de mur

	Type A	Type B	Type C
Type de pierre	Calcarénite jaune	Calcarénite jaune	Calcarénite jaune
Formes et dimensions des pierres	Pierres équarries ou blocs taillés	Moellons équarris et moellons de forme quelconque et de dimensions variables	Moellons de forme quelconque et de dimensions variables
Type de mortier	Mortier de chaux grasse	Mortier de chaux (grasse ou maigre)	Mortier d'argile
% chaux	5%-10%	25%-30%	30%-35%
Agrégats	Sable fleuve	Sable (fleuve ou carrière)	Argile
Présence de revêtement	oui/non	oui	oui

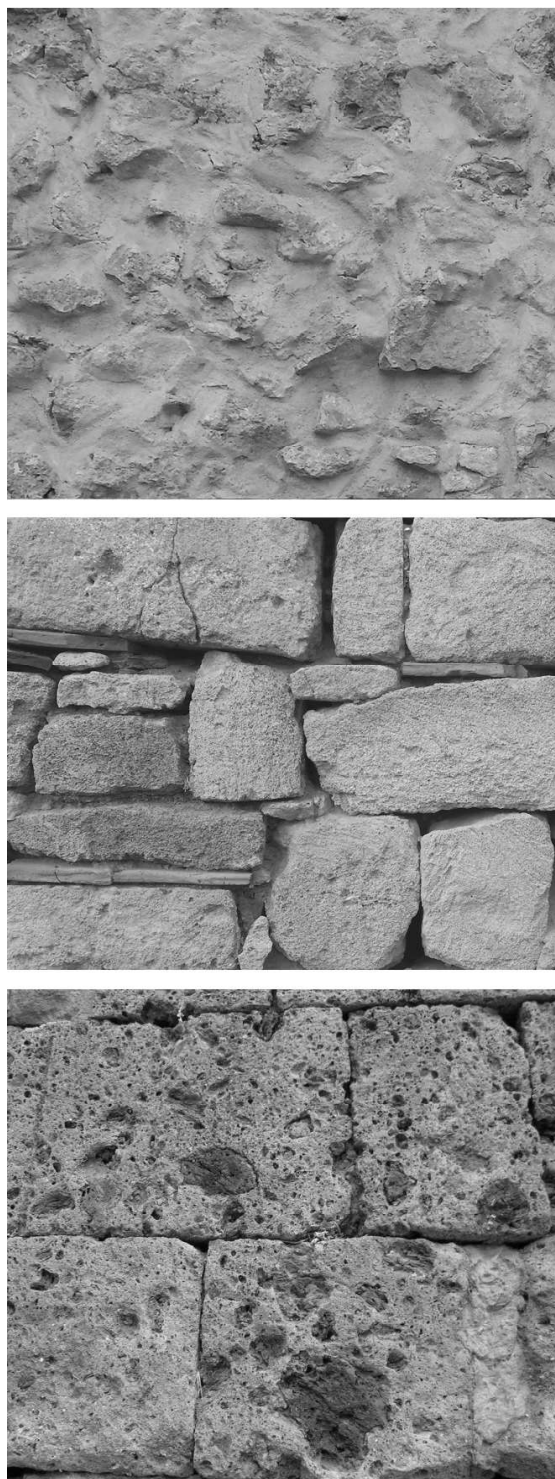


Fig. 2.14 – Les trois grandes types de murs : a) en haut, le mur avec pierres de réemploi ; b) au centre, le mur mixte avec pierres nouvelles et de réemploi ; c) en bas, le mur avec pierres nouvelles

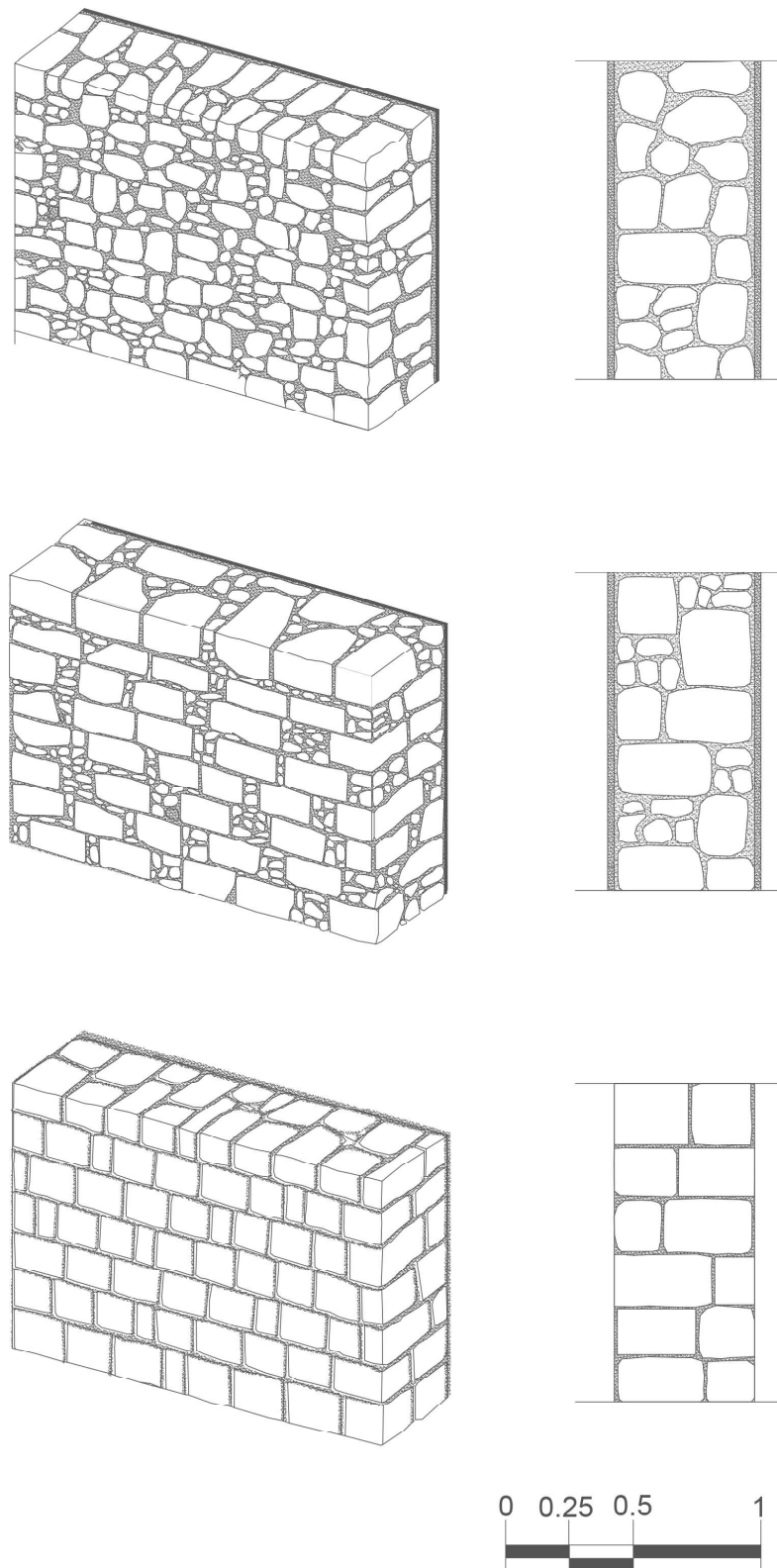


Fig. 2.15 – Les trois grandes types de murs : a) en haut, le mur avec pierres de réemploi ; b) au centre, le mur mixte avec pierres nouvelles et de réemploi ; c) en bas, le mur avec pierres nouvelles

Les revêtements

Le système traditionnel de revêtement d'enduit à Palerme comprendre trois couches [131] :

- Le *rinzaffo*, constitué par du mortier plutôt liquide avec du sable très grossier pour rendre la surface du fond plus rugueuse et niveler les irrégularités de la maçonnerie ;
- L'*arriciato*, qui a une granulométrie moyenne (environ 1,5 mm de diamètre maximum). Il est appliqué dans des épaisseurs allant de 1,5 à 2 cm, revêtant ainsi le rôle d'un véritable squelette du système de revêtement ;
- L'*intonachino* est la dernière couche de finition, qui protège le plâtre et le rend esthétiquement agréable.

L'attention portée à la qualité hygiénique, à la résistance aux agents atmosphériques et à la porosité se retrouve aussi dans le revêtement d'enduit. Le plus répandu à Palerme est l'enduit *Li Vigni*, du nom des frères qui en ont déposé le brevet en 1901. Ce brevet prévoit un enduit composé de 40% de chaux grasse et 60% de sable, avec un ajout de colorants naturels à base de terre [131]. Quand, au début du XX^e siècle, il devient habituel aux producteurs de matériaux de construction de demander aux Instituts d'hygiène des universités italiennes une certification de conformité d'hygiène pour leurs produits, les qualités de l'enduit *Li Vigni* furent confirmées. Ainsi, le directeur de l'Institut d'hygiène de Palerme, L. Manfredi, écrivit que cet enduit montrait «non seulement des qualités esthétiques mais aussi d'hygiène, telles qu'une grande capacité d'évaporation et surtout une résistance élevée aux agents extérieurs» [43].

L'enduit *a mezzo stucco* est un autre type d'enduit répandu à Palerme . Il s'agit d'une pâte de chaux et sable mise en œuvre en pressant la surface de manière à faire sortir l'eau. Cela augmente la résistance thermique du mur sur laquelle il est posé (Fig.2.16). La présence d'un parement mural visible était souvent considérée comme une qualité esthétique. Une technique appelée *incantonato* ou *spolvero* s'est diffusée à Palerme. Réalisée en pulvérisant de la pierre concassée, elle permettait de reproduire l'aspect esthétique de la calcarénite,

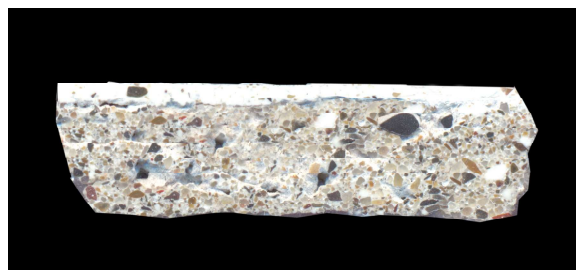


Fig. 2.16 – Revêtement *a mezzo stucco* : deux couches, l'une, à l'intérieur, de mortier d'une épaisseur de 9 mm et l'autre en stuc plutôt uniforme de 2,5-3 mm, à l'extérieur. La couche interne est un mortier de chaux, avec granulométrie assortie. Les grains ont une dimension maximale de 3 mm, de 0,5 à 1 mm en moyenne. On observe différentes variétés : certaines ont des bords arrondis et d'autres des arêtes vives. L'inerte semble être un sable de rivière.

2.2.2 Caractérisation thermo-hygrométrique de l'enveloppe massive

La caractérisation thermo-hygrométrique des éléments qui constituent le « système bâtiment » est fondamentale pour définir la qualité de confort intérieur d'un bâtiment. Il suffit de penser que, pour définir la quantité d'énergie thermique nécessaire pour rafraîchir ou réchauffer une maison, les normes d'aujourd'hui nous demandent non seulement les données climatiques et le taux d'occupation mais aussi les caractéristiques géométriques, thermiques et constructives. Les matériaux de construction, leur épaisseur et leur disposition donnent d'importantes informations sur la transmission de la chaleur et le transport d'humidité alors que les jonctions peuvent représenter des éléments de faiblesse du fait de la formation de ponts thermiques.

Nous étudions dans ce paragraphe les caractéristiques thermo-hygrométriques des murs des bâtiments les plus répandus à Palerme enfin de déterminer les paramètres qui contribuent à améliorer les prestations thermiques et hygrométriques. Nous analysons la diffusion de la pression de vapeur et du flux de chaleur pour chaque type de mur décrit précédemment en régime stationnaire. Dans un deuxième temps, nous considérons aussi les paramètres thermiques dynamiques, tels que le déphasage, le facteur d'amortissement et la transmittance thermique périodique.

Les Tableau 2.4 et Tableau 2.5 indiquent les caractéristiques et la composition de chaque mur.

Les paramètres thermiques stationnaires

La vérification hygrométrique est fondamentale pour analyser ou prévoir la formation de condensation sur les surfaces de l'enveloppe (condensation superficielle) ou à l'intérieur (condensation interstitielle). Les effets de la formation de condensation concernent non seulement la salubrité des espaces avec la formation possible de moisissures, la migration de sels, la réduction du niveau d'isolation thermique mais aussi l'aspect structurel avec des risques de variations dimensionnelles, de formation de fissures ou de déformations à la suite d'une augmentation des volumes d'eau.

La norme ISO 13788 prescrit que tout élément de l'enveloppe doit être vérifié par une analyse thermique et hygrométrique ; elle fournit les procédures de calcul pour évaluer la capacité d'un composant constructif d'éviter les problèmes liés à l'humidité superficielle critique et à la condensation interstitielle. Nous faisons ici l'hypothèse d'un régime stationnaire, d'une diffusion unidimensionnelle et des matériaux homogènes et isotropes.

Tableau 2.4 – Caractérisation thermo-hygrométrique des murs étudiés

	Type A			Type B1			Type B2			Type C		
	%	λ	μ	%	λ	μ	%	λ	μ	%	λ	μ
pierre	95%	0.63	9.7	80%	0.63	9.7	70%	0.63	9.7	60%	0.63	9.7
mortier	5%	0.9	12	20%	0.9	12	30%	0.9	12	40%	0.9	12

Tableau 2.5 – Caractérisation géométrique des murs étudiés

épaisseur [m]	Type A	Type B1	Type B2	Type C
enduit intérieur	absent	0.02	0.02	0.02
mur	0.60	0.60	0.60	0.80
enduit extérieur	absent	0.02	0.02	0.02

Transmission du flux de chaleur

Dans ce paragraphe nous effectuons un calcul simple de flux de chaleur afin de trouver la distribution des températures dans les différents types d'enveloppe.

Nous pouvons écrire les équations de transfert de chaleur en régime stationnaire comme suit :

$$\frac{\Phi}{S} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (2.1)$$

où

$$R_{th} = \frac{1}{h_{si}} + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_{se}} \quad (2.2)$$

où :

e_j l'épaisseur de la couche j ;

λ_j la conductivité thermique du matériau j ;

h_{si} et h_{se} respectivement coefficients de convection surfacique intérieur et extérieur ;

Le Tableau 2.6 montre les valeurs des résistances thermiques calculées pour les quatre types de murs.

Pour définir les conditions thermo-hygro-métriques intérieures, le norme ISO 13788 renvoie aux standards nationaux. En Italie, la UNI 10350 demande que la température intérieure soit évaluée en relation avec la fonction du bâtiment. Pour des applications résidentielles, comme dans notre cas, la norme stipule :

$$\begin{aligned} T_{int} &= 18^{\circ}C \text{ quand } T_{ext} < 18^{\circ}C \\ T_{int} &= T_{ext} \text{ quand } T_{ext} > 18^{\circ}C \end{aligned}$$

Tableau 2.6 – Résistance thermique R_{th}

Type de mur	R_{th}
Type A	1.08
Type B1	1.12
Type B2	1.09
Type C	1.27

Matériaux e composants constructifs à Palerme

Pour les données extérieures (températures et humidité relatives) la norme UNI 10349 preconise de se référer à la moyenne mensuelle (Tableau 2.7) .

Nous effectuons le calcul pour les mois de novembre à avril. Les Fig.2.17 à Fig.2.20 montrent les profils de températures pour chaque mois et pour les quatre type de mur.

Les résultats montrent que le mur le plus performante du point de vue thermique est le mur de type C (*pietra et tajo*) en raison de sa plus grande épaisseur. En ce qui concerne le mur de type B1 et celui de type B2 la différence en pourcentage de mortier (20% dans B1 et 30% dans B2) n'entraîne pas une différence importante de résistance thermique et donc de flux de chaleur. Le mur de type A présente dans l'absolu la meilleur résistance thermique. Le flux de chaleur qui passe à travers ce mur est inférieur d'environ 2-3% à celui des autres types de mur, malgré une moindre épaisseur en raison de l'absence de enduit de finition.

Tableau 2.7 – Températures extérieures et humidités relatives moyennes mensuelles à Palerme selon la UNI 10349

Mois	Température T_e [$^{\circ}C$]	Humidité relative φ_e [%]
Janvier	11.6	72.3
Février	11.4	69.4
Mars	13.4	69.2
Avril	16.2	67.7
Mai	20.2	64.9
Juin	24.2	61
Juillet	26.9	56.3
Aout	27.1	56.6
Septembre	23.6	64.6
Octobre	20.3	71.9
Novembre	16.5	70.3
Décembre	13.4	70.8

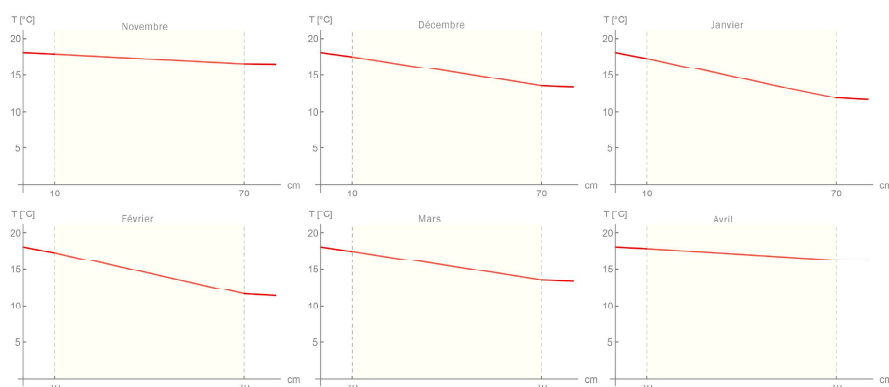


Fig. 2.17 – Profil des températures de novembre à avril, mur de type A

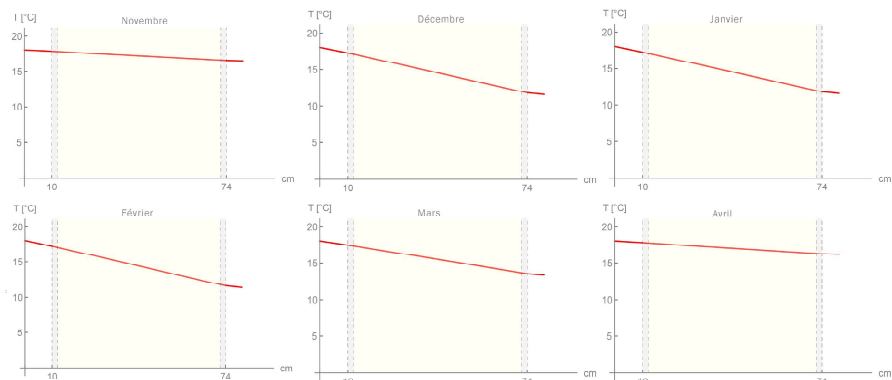


Fig. 2.18 – Profil des températures de novembre à avril, mur de type B1

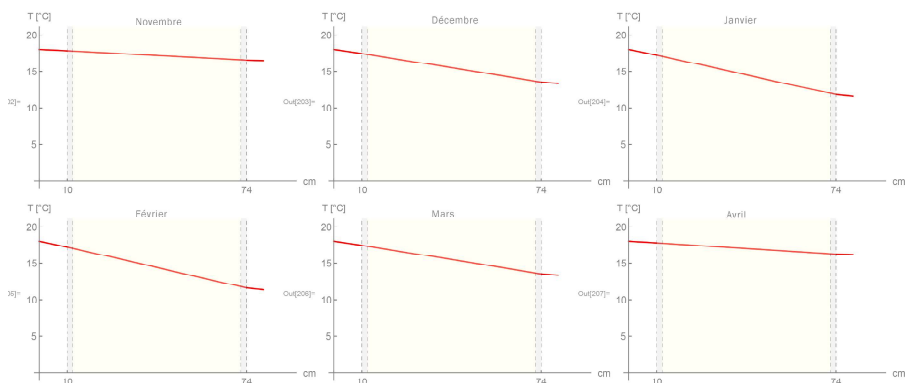


Fig. 2.19 – Profil des températures de novembre à avril, mur de type B2

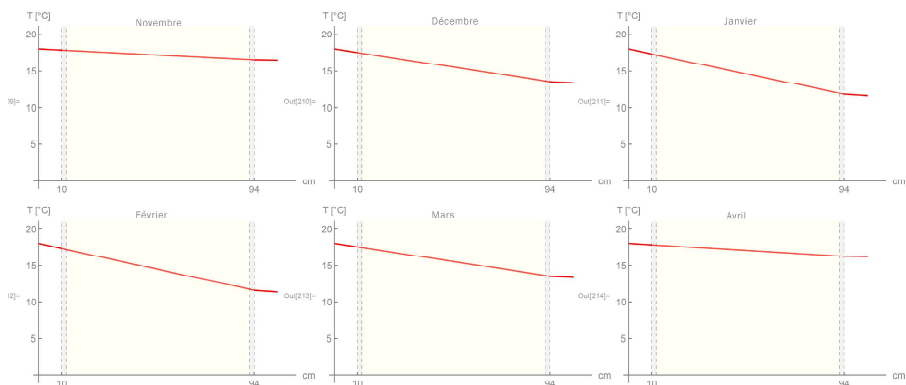


Fig. 2.20 – Profil des températures de novembre à avril, mur de type C

Diffusion de vapeur d'eau

Dans ce paragraphe nous étudions la diffusion de la vapeur d'eau à travers différents types d'enveloppe traditionnels à Palerme. La diffusion de vapeur est causée par la différence de pression partielle entre les faces de la paroi. Ce phénomène est décrit par la loi de Fick, qui est formellement analogue à la loi de Fourier pour la transmission de la chaleur.

L'équation de la diffusion de vapeur d'eau s'écrit :

$$\frac{J}{S} = \frac{\Delta p}{Z_{th}} \quad (2.3)$$

avec :

$$Z_{th} = \frac{1}{\beta_{si}} + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\delta_j} + \frac{1}{\beta_{se}} \quad (2.4)$$

où :

e_j l'épaisseur de la couche j ;

$1/\beta_{si}$ et $1/\beta_{se}$ les résistances au transport de masse convective intérieur et extérieur, négligeables ;

Le Tableau 2.8 montre en parallèle les paramètres intervenant dans la transmission de chaleur et dans la diffusion de vapeur d'eau.

Tableau 2.8 – Analogie entre flux de chaleur et diffusion de vapeur

Transmission chaleur		Diffusion vapeur	
Nom	Unité de mesure	Nom	Unité de mesure
Transmittance $U = 1/R_t h$	$[W m^{-2} K^{-1}]$	Perméance $\Pi = 1/Z_{th}$	$[g m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}]$
Conductivité thermique λ	$[W m^{-1} K^{-1}]$	Perméabilité δ	$[g m^{-1} s^{-1} Pa^{-1}]$
Résistance thermique $R_j = e_j/\lambda_j$	$[m^2 K^1 W^{-1}]$	Résistance au flux de vapeur $Z_j = e_j/\delta_j$	$[m^2 s Pa g^{-1}]$
Différence de température ΔT	$[K]$	Différence de pression Δp	$[Pa]$
Flux de chaleur $\Phi = US(\Delta T)$	$[W]$	Flux de vapeur $J = \Pi S(\Delta p)$	$[g/s]$

Dans ce cadre nous allons examiner la formation de condensation superficielle et de condensation interstitielle selon la norme ISO 13788.

Pour éviter le phénomène de condensation superficielle, il suffit de maintenir la température interne des parois au-dessus de la température de rosée de l'air ambiant, c'est-à-dire qu'il faut vérifier que :

$$T_{si} > T_R \quad (2.5)$$

où :

T_{si} est la température de la surface interne ;

T_R est la température de rosée.

Cette condition équivaut à imposer que la pression partielle de vapeur d'eau en contact avec la surface interne n'atteigne pas la valeur de saturation (Eq. 2.6) :

$$p_{vi} < p_{vs} \quad (2.6)$$

où :

p_{vi} est la pression partielle de vapeur d'eau ;

p_{vs} est la pression de saturation. Pour éviter le risque de moisissure, la norme UNI EN ISO 13788 prescrit :

$$p_{vs,(T_{si})} = \frac{p_{vi}}{\varphi_i} \quad (2.7)$$

où :

φ_i est égale à 80%, valeur pour laquelle il y a risque de moisissure.

La pression de vapeur à l'intérieur est donnée par l'Eq.2.8 :

$$p_{vi} = p_{ve} + \Delta p_v \quad (2.8)$$

où :

Δp_v est la différence des pressions partielles à l'intérieur et à l'extérieur de l'enveloppe ;

p_{ve} est la pression partielle de vapeur dans un site donné.

La norme UNI 10349 donne les valeurs de p_{ve} pour les principales localités italiennes. La norme ISO 13788 donne Δp_v en fonction de la T_{ve} selon les différentes classes d'humidité (Fig. 2.21) [2]. Dans notre cas, comme il s'agit d'un bâtiment résidentiel, nous utilisons les valeurs de la classe 3.

Nous cherchons la pression de saturation correspondant à la $T_{si,min}$, c'est-à dire la température superficielle minimale. La $T_{si,min}$ est donnée par l'Eq. 2.9

$$T_{si,min} = \frac{273 \ln \frac{p_{vs}}{610.5}}{17.279 - \ln \frac{p_{vs}}{610.5}} \quad (2.9)$$

La norme ISO 13788 introduit le facteur de température, défini comme le rapport entre la différence de température sur la surface interne et à l'extérieur et la différence de température interne et externe.

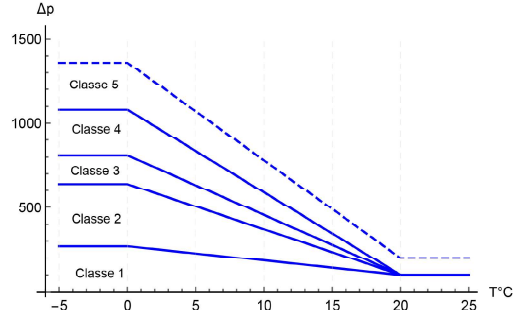


Fig. 2.21 – Valeurs Δp_v , Appendix A ISO 13788 [2]

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad (2.10)$$

où :

T_e est la température externe ;

T_i est la température interne ;

T_{si} est la température sur la surface intérieure .

Nous calculons alors le facteur de température maximale correspondant à la $T_{si,min}$ (Eq.2.10) et nous vérifions que pour le mois critique (mois où le f_{Rsi} a la valeur maximale) $f_{Rsi,max}$ est inférieur à f_{Rsi} de chaque type de mur.

$$f_{Rsi,max} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} \quad (2.11)$$

Tableau 2.9 – Résultats de la vérification pour la condensation superficielle

	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril
T_e [°C]	16.5	13.4	11.6	11.4	13.4	16.2
φ_e	0.70	0.71	0.72	0.69	0.69	0.68
p_{ve} [Pa]	1147	969	892	846	947	1086
Δp_v [Pa]	267	422	512	516	420	280
p_{vi} [Pa]	1414	1391	1404	1362	1367	1366
$p_{vs,(T_{si,min})}$ [Pa]	1768	1739	1754	1702	1709	1708
$T_{si,min}$ [°C]	17.9	17.6	17.8	17.2	17.3	17.3
$f_{Rsi,max}$	0.93	0.91	0.96	0.88	0.85	0.6

Tableau 2.10 – Confrontation entre $f_{Rsi,max}$ et f_{Rsi}

Type de mur	$f_{Rsi,max}$	f_{Rsi}	Vérification
Type A	0.96	0.882	non vérifié
Type B1	0.96	0.884	non vérifié
Type B2	0.96	0.881	non vérifié
Type C	0.96	0.897	non vérifié

Pour la vérification de la condensation interstitielle nous introduisons les valeurs de μ , facteur de résistance à la diffusion d'eau d'un matériau, défini comme le rapport de la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air sur sa propre perméabilité.

$$\mu = \frac{\delta_o}{\delta_j} \quad (2.12)$$

Nous pouvons alors écrire :

$$Z_{d,j} = \frac{e_j}{\delta_j} = e_j \frac{\mu_j}{\delta_o} = \frac{S_{dj}}{\delta_o} \quad (2.13)$$

où :

S_{dj} est l'épaisseur de la couche j d'air équivalente à la diffusion ;

δ_o est la perméabilité au vapeur de l'air égale à $2 \cdot 10^{-10}$ [kg · m⁻¹ · s⁻¹ · Pa⁻¹].

L'eq. 2.4 devient alors

$$Z_{th} = \frac{\sum_{j=1}^n S_{dj}}{\delta_o} \quad (2.14)$$

Nous reportons dans le Tableau 2.4 les valeurs de Z_{th} pour les quatre types de mur.

Après avoir calculé les températures à chaque couche j des murs étudiés (Fig.2.17 à Fig.2.20), nous calculons les pressions de saturation au moyen de l'Eq.2.15.

$$p_{s,j} = 610.5 \exp^{\frac{17.269 \cdot T_j}{273.3 + T_j}} \quad (2.15)$$

où :

T_j est la température à chaque interface j [°C]

Les conditions aux limites sont la température extérieure, l'humidité relative mensuelle (Tableau 2.7) et les pressions relatives intérieures (Tableau 2.9)

Pour trouver les pressions partielles de vapeur à chaque couche des murs nous utilisons l'Eq. 2.16 en fonction de la pression à chaque couche j

$$p_{vj} = p_{vj-1} - \frac{J}{S} \cdot Z_{j-1} \quad (2.16)$$

Tableau 2.11 – Résistance au flux de vapeur Z_{th}

Type de mur	Z_{th} [$\frac{m^2 \cdot s \cdot Pa}{Kg}$]
Type A	$29.4 \cdot 10^9$
Type B1	$34.1 \cdot 10^9$
Type B2	$34.8 \cdot 10^9$
Type C	$64.1 \cdot 10^9$

Matériaux e composants constructifs à Palerme

Les Fig. 2.22 à Fig. 2.25 montrent les profils des pressions de saturation et des pressions partielles pour les différents types de mur.

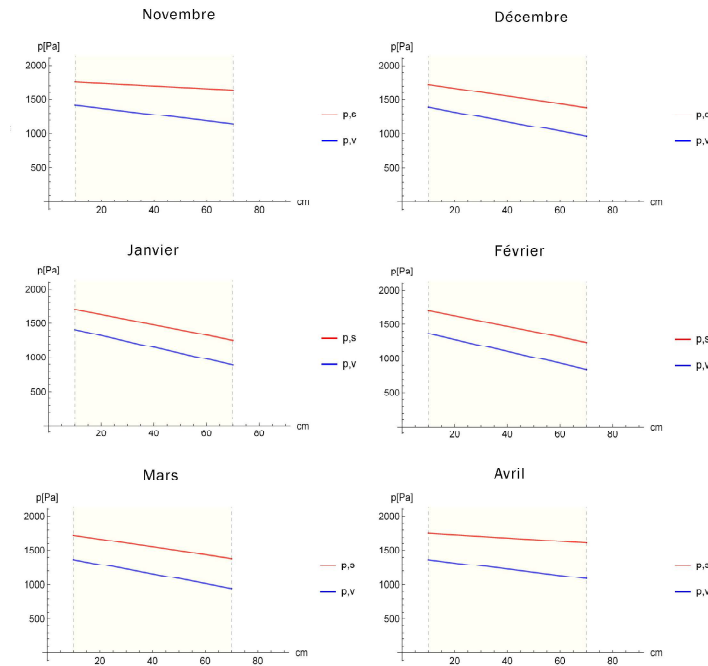


Fig. 2.22 – Profil des pressions de novembre à avril, mur de type A

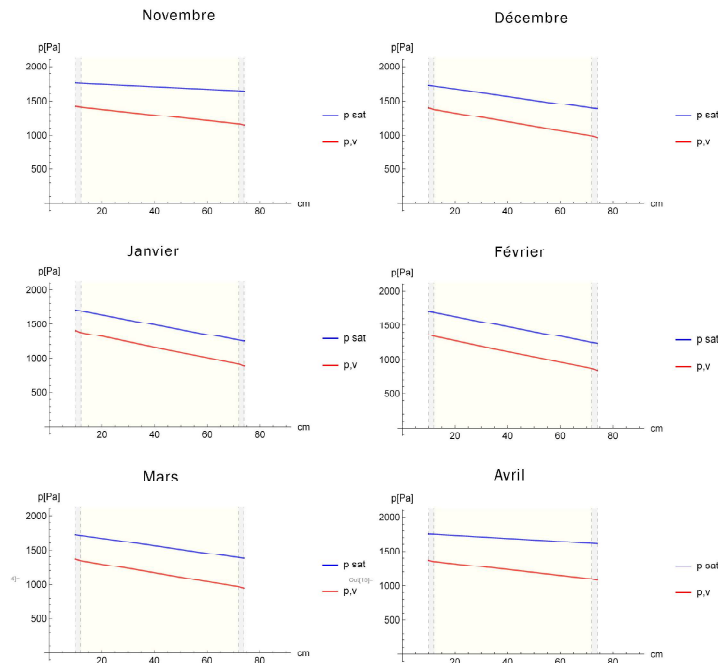


Fig. 2.23 – Profil des pressions de novembre à avril, mur de type B1

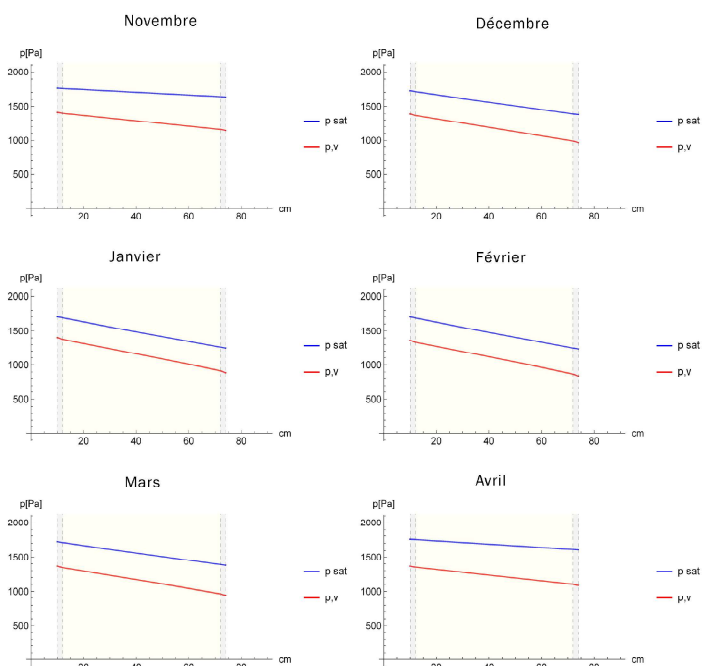


Fig. 2.24 – Profil des pressions de novembre à avril, mur de type B2

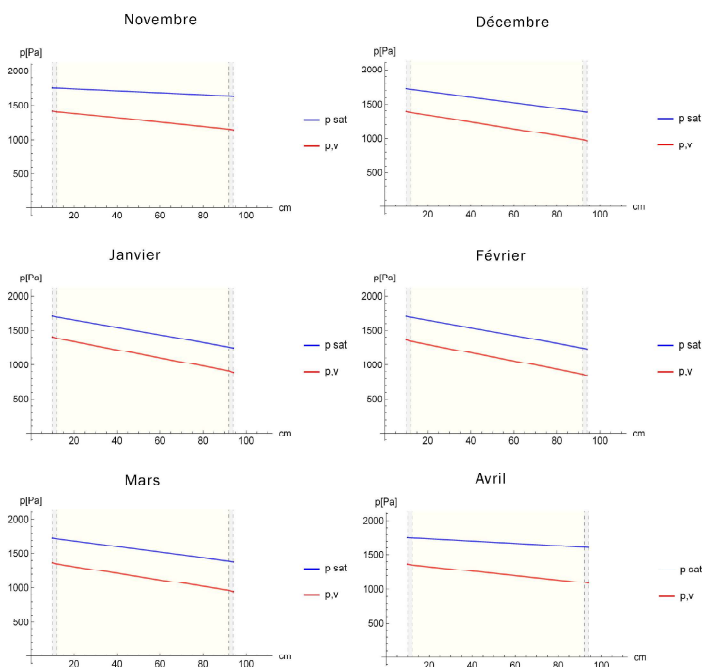


Fig. 2.25 – Profil des pressions de novembre à avril, mur de type C

Les paramètres thermiques dynamiques

Les normes relatives aux performances énergétiques des bâtiments prescrivent que, pour garantir des conditions de confort estival, les composants de l'enveloppe aient une inertie thermique adéquate. L'inertie thermique peut être définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer lentement.

Les paramètres que nous considérons pour évaluer le comportement thermique dynamique des composants de l'enveloppe sont la transmittance thermique périodique, le facteur d'amortissement et le déphasage. Afin de définir la valeur de ces paramètres pour les quatre types d'enveloppe étudiés, nous avons effectué un calcul par éléments finis à l'aide du logiciel Cast3m. Pour ce faire, considérons un problème général de thermique transitoire, sur un domaine Ω , gouverné par l'équation de la chaleur et la loi de Fourier :

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\underline{q}) = f \\ \underline{q} = -\lambda \underline{\text{grad}}(T) \end{cases} \quad (2.17)$$

où :

T : la température ;

\underline{q} : la densité de flux de chaleur ;

t : le temps ;

f : la puissance calorifique volumique engendrée par une source de chaleur ;

ρ : la masse volumique ;

c_p : la capacité thermique massique à pression constante ;

λ : la conductivité thermique.

Le domaine Ω est discrétisé sur un domaine polygonal redéfini à l'aide d'un maillage triangulaire à trois nœuds, avec un degré de liberté par nœud. A cette équation s'ajoutent l'état initial et les conditions aux limites :

- État initial : $T(t = 0) = T_0$;
- Condition de flux de chaleur imposé : $\underline{q} = \underline{q}_{imp}$ (condition adiabatique sur la surface supérieure et inférieure du mur) ;
- Conditions aux limites de convection.

Pour cette dernière condition, nous considérons le transfert thermique par convection, sur une surface $\partial\Omega_c$, qui s'écrit selon la loi de Newton :

$$\underline{q} = h(T_{ext} - T) \quad (2.18)$$

où :

T : la température sur la surface de convection ;

\underline{q} : la densité de flux de chaleur d'origine convective passant à travers la surface de convection et compté positivement lorsque le flux est dirigé vers l'intérieur du système ;

h : le coefficient d'échange convectif ;

T_{ext} : la température extérieure à la surface de convection.

La discrétisation spatiale de cette équation sur un maillage d'éléments finis permet de se ramener au système d'équations suivant, à résoudre aux différents pas de temps :

$$\underline{C}\dot{T} + \underline{K}T = \underline{Q} \quad (2.19)$$

où :

\underline{T} : les températures aux nœuds ;

\dot{T} : la dérivée temporelle des températures aux nœuds ;

\underline{Q} : le flux de chaleur intégré aux nœuds ;

\underline{C} : la matrice de capacité ;

\underline{K} : la matrice de conductivité, complétée de la matrice de blocage associée aux conditions aux limites de température imposées.

Dans des conditions non stationnaires ou dynamiques, les conditions environnementales externes, tant en hiver qu'en été, se caractérisent par des variations significatives sur une période de 24 heures ; pour évaluer et contrôler les conditions de confort d'un environnement dynamique, il faut tenir compte de ces oscillations. Les variations de température externes peuvent, avec quelques approximations, être représentées par une courbe sinusoïdale selon l'équation suivante.

$$T_n(t) = T_n + |T_n| \sin(2\pi/24 \cdot 3600) \quad (2.20)$$

où :

T_n : température moyenne dans la période considérée ;

$|T_n|$: demie-largeur de la variation de température dans la période considérée ;

$2\pi/24 \cdot 3600$ fréquence angulaire de la variation thermique ;

t : période considérée ;

Dans le cas présent, nous évaluons la performance des paramètres dynamiques pour une journée type d'été. La Fig. 2.26 montre l'évolution des températures externes tandis que la température dans l'espace intérieur est de 20°C.

Enfin, nous définissons les conditions de flux de chaleur comme un chargement précisant l'évolution de la température extérieure de convection au cours du temps.

Nous construisons un algorithme pour le calcul aux éléments finis selon le schéma de la Fig.2.27.

Nous utilisons la procédure PASAPAS de Cast3m qui assure le chaînage des étapes de résolution d'un problème de thermique de manière incrémentale : initialisation et mise à jour des paramètres, boucle sur les pas de temps, résolution, test de convergence et sauvegarde des résultats. Les temps de calcul sont définis avec une progression journalière et un pas de 3600 secondes. La procédure thermique utilisée est la DUPONT, méthode à deux pas de temps très efficace pour les problèmes à non-linéarité pas trop forte.

Le déphasage est le temps nécessaire pour que la température intérieure atteigne son maximum à partir du moment où a lieu le pic de température extérieure.

$$\Phi = t(T_{int,max}) - t(T_{ext,max}) \quad (2.21)$$

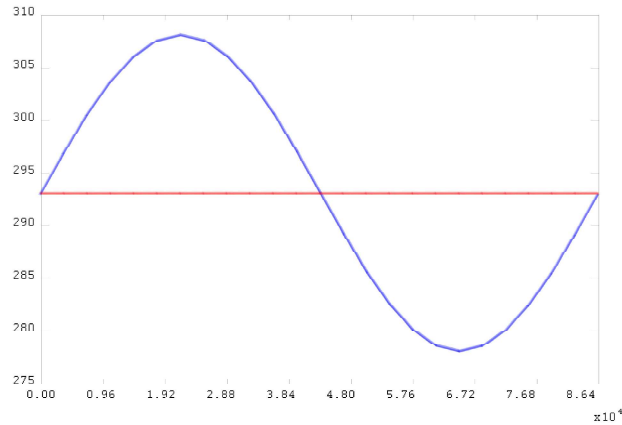


Fig. 2.26 – En bleu, la courbe sinusoïdale de la température externe et en rouge, le profil constant de la température interne

Le Tableau 2.12 montre les valeurs de déphasage des 4 types de mur étudiés.

La transmittance thermique périodique est définie comme le rapport entre le flux induit à l'intérieur par une variation périodique sinusoïdale de la température externe et la variation de température même.

$$Y_{IE} = \frac{\hat{\Phi}_{int}}{\hat{T}_{ext}} \quad (2.22)$$

Nous pouvons alors définir aussi le facteur d'amortissement comme le rapport entre la transmittance thermique périodique et la transmittance stationnaire.

$$f = \frac{Y_{IE}}{U_{stat}} \quad (2.23)$$

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de facteur d'amortissement et de transmittance périodique pour les quatre types de mur.

Tableau 2.12 – Valeurs des paramètres dynamiques

Type de mur	U_{stat} $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Y_{IE} $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	f adimensionnel	Φ h
Type A	0.902	0.018	0.020	13.75
Type B1	0.891	0.015	0.017	14.06
Type B2	0.914	0.0175	0.019	13.55
Type C	0.744	0.002	0.002	17.48

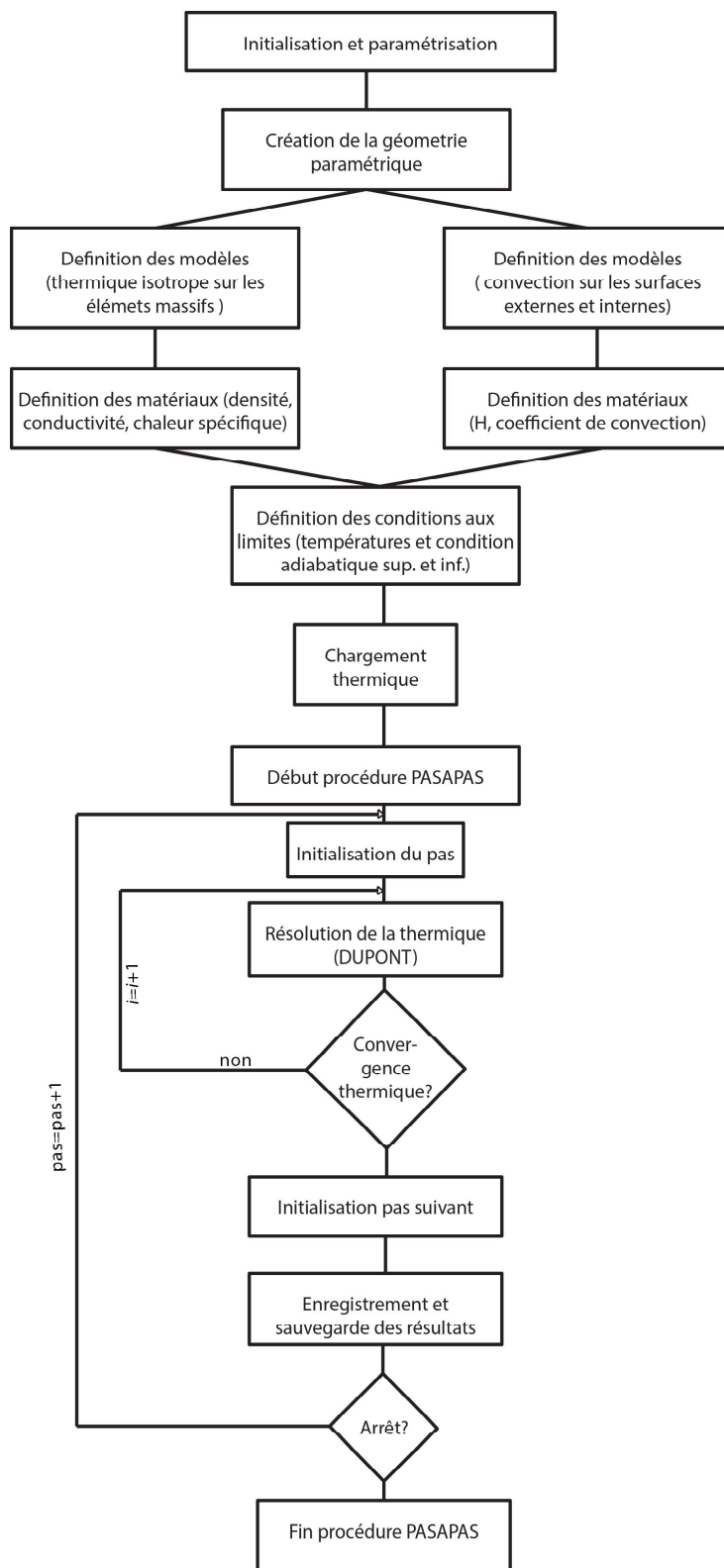


Fig. 2.27 – Structure générale de l’algorithme modifié d’après le schéma type Cast3m

Les résultats des analyses que nous avons effectuées montrent que la valeur de déphasage Φ est très élevée et qu'elle varie entre 14 et 17h. Ce résultat est cohérent au égard à la forte capacité calorifique de la pierre de calcarénite ($cp = 1000[J/Kgm^3]$) et aussi aux grandes épaisseurs (entre 60 et 80 cm). Si on considère les murs de type A, B1 et B2, les valeurs de transmittance périodique varient entre 0.419 et 0.450 $[W/m^2K]$, et les facteurs d'amortissement entre 0.37 et 0.42. Pour le mur de type C (de réemploi), on trouve des valeurs différentes. La transmittance périodique est environ 1/4 de celle des autres types et le facteur d'amortissement f environ la moitié. Cela se justifie par le fait que le mur de type C, avec pierres de récupération, présente une très grande épaisseur (80 cm contre les cm des autres) en raison de ses faibles propriétés mécaniques.

2.3 Étude morphologique des composants constructifs : les toitures

2.3.1 Les toitures

Dans les toitures traditionnelles à Palerme, les charpentes en bois sont les plus répandues. Normalement, le bois utilisé est le châtaignier. Une technique assez pratiquée, que le bâti soit noble ou modeste, prévoit la mise en œuvre de tuiles canal en terre cuite avec la concavité alternée vers le haut et vers le bas. Les tuiles reposent sur des solives en bois de châtaignier sans planches en bois (Fig. 2.29 et Fig. 2.28). La toiture ainsi conçue était étanche à l'eau tout en assurant un flux d'air entre l'espace intérieur et extérieur sur la totalité de la surface.

À Palerme, pour rendre étanches à l'eau les toitures, les tuiles étaient recouvertes de mortier de chaux blanche et de *cocciopesto* (fragments de tuiles minutieusement écrasés) et blanchies avec de la chaux. Cette pratique favorisait la réflexion solaire, et les encrassements biologiques, qui risquent de maintenir la surface humide [118].

Ce type de toiture perméable à l'air était associé à la mise en place d'une fausse voute, ayant la fonction d'assurer une bonne étanchéité à l'eau tout en permettant le passage de l'air. La plus répandue à Palerme est la voute d'*incannucciata* (Fig.2.30 et Fig.2.31). Il s'agit d'une voute constituée par des planches de peuplier cintrées. La structure est rigidifiée par des lattes de bois placées dans des réservations réalisées sur les planches. Au-dessous, une couche de tissu de cannes écrasées avec une fine couche de plâtre.



Fig. 2.28 – Les tuiles canal posées sur les solives

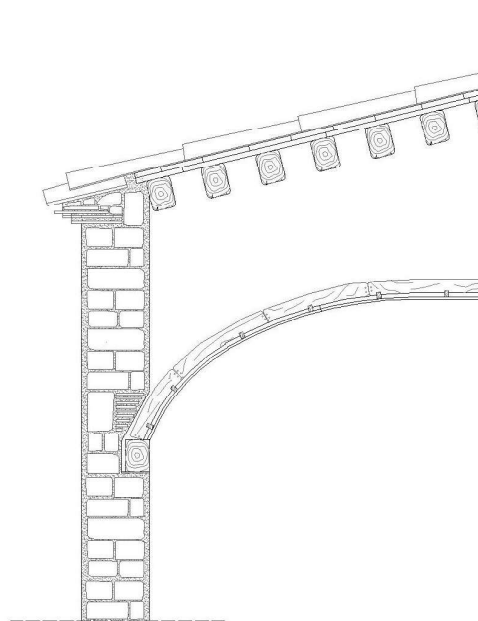
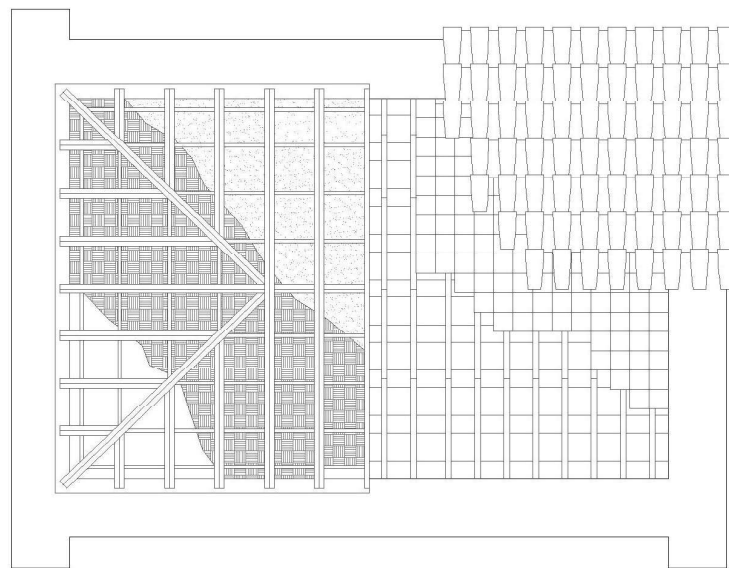


Fig. 2.29 – Plan de la toiture (en haut). Coupe de la voûte (en bas)

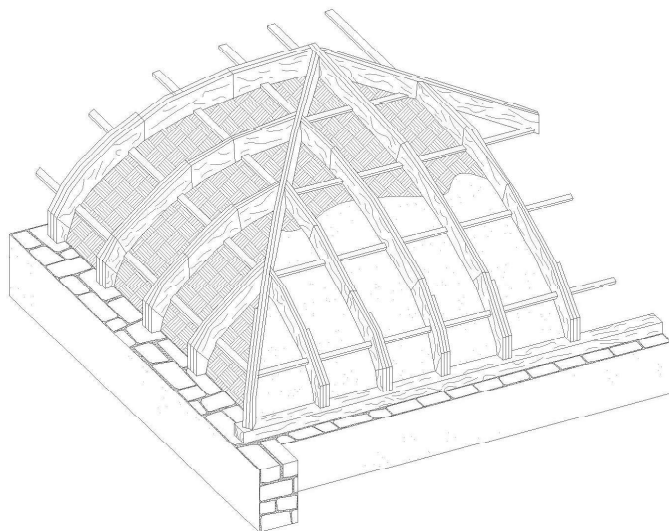


Fig. 2.30 – Axonométrie de la fausse voûte d'*incannucciata*



Fig. 2.31 – Fausse voûte d'*incannucciata*

2.3.2 Caractérisation thermo-hygro-métrique des toitures

Dans ce paragraphe, nous étudions le passage de flux massique d'air à travers la voute *d'incannucciata*. La description de l'échange d'air dans le bâtiment et autour du bâtiment et les phénomènes qui y sont liés (transport de chaleur, d'humidité et de substances polluantes) représentent un problème complexe dans lequel il faut considérer les forces motrices (pression, différences de température, ...), la perméabilité à l'air et le comportement des matériaux de construction (qui peuvent absorber l'air) et de l'utilisateur. Le passage d'air est liée à une différence de pression entre deux régions qui peuvent, par exemple dans notre cas, coïncider avec l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Cette différence de pression peut provenir d'un passage d'air en relation avec la température. En effet, en chauffant un gaz, il aura tendance à se dilater, entraînant une diminution de sa densité. Ce phénomène engendre un courant d'air du bas vers le haut, appelé «effet de cheminée».

Pour calculer le flux de masse d'air échangé nous utilisons l'équation ci-dessous :

$$J = -K \cdot k_r \cdot \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.24)$$

où :

J est le flux massique ;

K est la perméabilité intrinsèque du milieu poreux ;

k_r est l'humidité relative ;

$\frac{\partial p}{\partial x}$ est la variation de pression ;

ρ est la densité de l'air ;

μ est la viscosité de l'air.

D'un point de vue numérique, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis sont couramment employées pour résoudre l'ensemble des équations aux dérivées partielles non linéaires qui contrôlent les processus de transport de masse. Dans le cas présent, on adopte la méthode des volumes finis afin de discrétiser les équations de bilan massique pour les constituants remplissant le milieu poreux, complétées par un ensemble de lois constitutives et de conditions aux limites.

Le calcul a été effectué au moyen d'un algorithme, implémenté sur Matlab, gracieusement mis à disposition par F.Meftah et S.Dal Pont [84]. Le domaine est discrétisé en utilisant des volumes finis et on a adopté un schéma centré sur les nœuds. On définit d'abord la position des nœuds, puis les faces des volumes de contrôle sont construites à mi-chemin entre les nœuds (Fig.2.32). La voute présente une épaisseur de 0.005 m. Nous faisons l'hypothèse d'une distribution linéaire de la température dans l'épaisseur de la fausse voute (Fig. 2.33).

La perméabilité intrinsèque du gypse K est égale à $0.7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ et la viscosité dynamique μ est égale à $1.770 \cdot 10^{-5} \text{ Pa/s}$. La pression atmosphérique en été à Palerme égale à 101800 Pa. Nous calculons, tout d'abord l'humidité relative à chaque nœud. L'humidité relative est donc le rapport entre la pression de vapeur d'eau p_v , pression partielle de l'eau dans l'air, et la valeur de pression saturante p_s (Eq.2.25).

$$H_R = \frac{p_v}{p_s} \quad (2.25)$$

La pression de vapeur d'eau est calculée en fonction de la pression capillaire et de la pression gazeuse [84]. La pression de saturation est calculée en fonction de la température (Tableau 2.13) :

$$p_v = p_v(p_c, p_g) \quad \text{et} \quad p_s = p_s(T) \quad (2.26)$$

La Fig. 2.34 montre l'évolution du flux de masse dans l'épaisseur de la fausse voute.

Considérons une pièce de 6 m x 5 m au sol. En présence de la fausse voute le volume pourrait être égal à 130 m³. Si on compare la valeur de flux de masse (1.3 [Kg/h]) avec le volume de la pièce, nous obtenons un taux de renouvellement d'air de 0.013 h⁻¹. Ce qui veut dire que la quantité d'air qui traverse la fausse voute n'entreprendrait dans l'atmosphère extérieure qu'un renouvellement horaire égal à 0.013 ; soit à peine un soixante-dixième du volume habité. Cette valeur reste basse comparée au flux d'air traversant une pièce par ventilation transversale.

Tableau 2.13 – Valeur de pression de vapeur d'eau, de pression de saturation et d'humidité relative

dx mm	p_v [Pa]	p_s [Pa]	H_R %
0	1744	2644.8	0.659
0.26	1876.3	2797	0.670
0.52	2011.2	2956.9	0.680
0.79	2149.8	3124.7	0.688
1.05	2293	3300.8	0.694
1.31	2441	3485.5	0.700
1.57	2595.3	3679	0.705
1.84	2755.4	3881.9	0.709
2.1	2922	4094.5	0.713
2.36	3095.5	4317.1	0.717
2.63	3276.2	4550.2	0.67
2.89	2464.5	4794.1	0.720
3.15	3660.6	5049.1	0.722
3.42	3864.8	5316.1	0.724
3.68	4077.6	5595.1	0.726
3.94	4299.1	5886.8	0.728
4.21	4529.6	6191.5	0.730
4.47	4529.4	6509.7	0.731
4.73	5018.9	6842	0.735
5	5278.1	7188	0.734

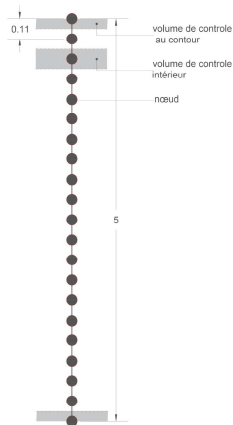


Fig. 2.32 – Discrétisation aux volumes finis

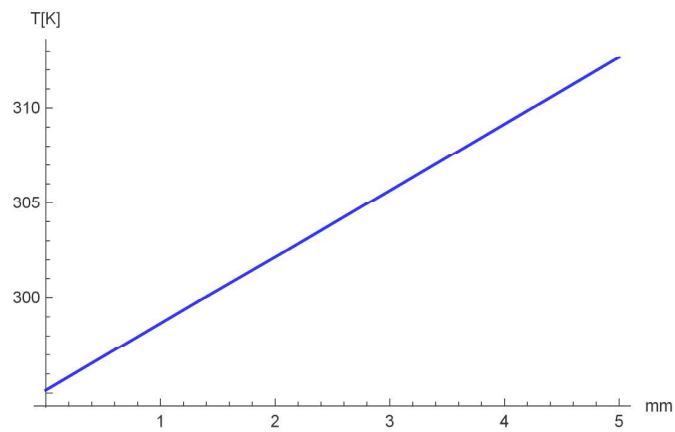


Fig. 2.33 – Évolution de la température [K]

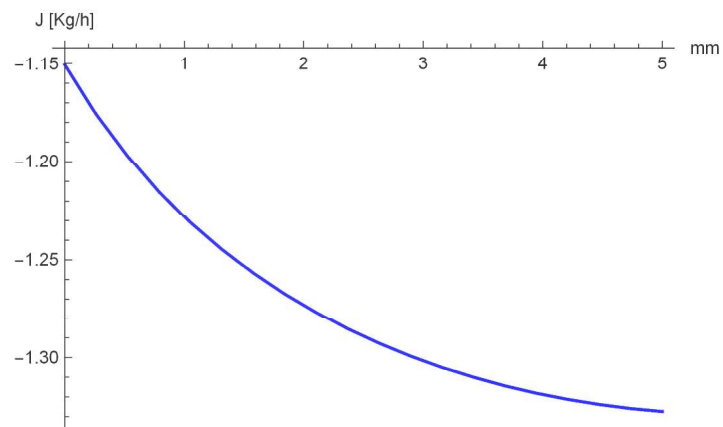


Fig. 2.34 – Flux de masse J en [Kg/h]

2.4 Étude morphologique des composants constructifs : les balcons

2.4.1 Les balcons

Les balcons cadencent les façades du bâti, parfois selon des règles morpho-géométriques précises parfois selon des nécessités empiriques de protection solaire en déterminant des zones obscures dans les petites ruelles de la ville [44]. (Fig. 2.35 et Fig. 2.36) Le climat et le mode de vie ont toujours favorisé la réalisation de terrasses, balcons et loggias, d'une part pour profiter du soleil ou au contraire pour s'en protéger, d'autre part pour avoir un rapport direct entre l'intérieur de la maison et la rue. Les balcons permettent la participation à la vie de la ville tout en restant chez soi.

La diffusion du balcon sur le bâti nobiliaire commence à Palerme au XVII^e siècle avec de premières apparitions à l'«étage noble» et la présence d'encorbellements en pierre sculptée ; sur le bâti le plus pauvre, on trouve les premiers exemples en bois déjà à la fin du XVI^e siècle [131]. A partir du XIX^e siècle, cet élément était très courant sur les façades de Palerme, malgré l'impôt sur les balcons, (double par rapport à une fenêtre normale) et l'hostilité de la plupart des architectes de l'époque (qui les qualifient de « boîtes en fer agrafées aux murs »). Le balcon devient indispensable pour tout espace de la maison, y compris les cuisines [44] (Fig.2.37).

On trouve alors, malgré les différences de qualités exécutives et formelles deux types principaux de balcon en pierre : le premier avec consoles rapportées après coup, qui ne pénètrent pas totalement dans la maçonnerie et dont la stabilité est assurée par des tirants métalliques (dits *bardelle*) sur le fil intérieur du mur pour en empêcher la rotation. Le deuxième type est constitué de deux dalles en pierre. Elles étaient dimensionnées en longueur de façon à s'appuyer, à une extrémité sur une console centrale et à l'autre extrémité sur une console latérale [44] (Fig. 2.38).

Le choix de la pierre était assez important pour des raisons à la fois mécaniques, esthétiques et hygiéniques : elle devait avoir un aspect homogène, un *colore grato* (agréable) et en même temps ne pas se détériorer [44]. Les constructeurs diversifiaient le type de pierre selon la fonction du mur. La pierre la plus utilisée dans les balcons à Palerme est la calarénite jaune ou *tufo*.

La plupart des balcons sont constitués dans ce type de pierre, qui néanmoins ne répondait pas exactement au meilleur choix en raison de la présence de cavités ou d'irrégularités. Dans les contrats de l'époque, on observe que chaque bloc tiré de la carrière devait répondre à de qualités mécaniques et esthétiques bien précises [44]. Si la pierre restait le matériau plus utilisé pour le balcon «d'apparence», elle a été associée ou même remplacée par le fer, utilisé pour des barres de soutien et du garde-corps. On distingue les balcons en fer doux avec corbeaux triangulaires à deux ou trois barres, et ceux avec poutrelles en I d'importation française, plus diffusés à la fin du XIX^e siècle en raisons des contacts entre les architectes et ingénieurs palermitains et français. On observe de nombreuses variations dans les barres en fer doux du fait du progrès technique et de la volonté d'accroître la rigidité flexionnelle avec l'ajout d'éléments «décoratifs» capables d'augmenter la hauteur de l'encastrement ou de

Matériaux e composants constructifs à Palerme

réduire la longueur libre de la barre (Fig.2.39).

Les études réalisées au XIX^e siècle sur les propriétés physiques et hygiéniques des matériaux en Europe confirment souvent que les principes et les critères constructifs de la tradition méditerranéenne étaient adaptés à la fois au choix des matériaux et aux différents systèmes de construction.

Dans le «Projet de réformes topographiques et décoratives de la ville de Palerme» de 1860, le *decorum* et la qualité de la ville tiennent compte également des questions d'hygiène. Même les balcons font l'objet de prescriptions spécifiques dictées par la nécessité d'assurer le passage de l'air et de la lumière, même au rez-de-chaussée, ce qui explique pourquoi il était interdit de construire des balcons à une hauteur de moins de 19 *palmi* (4,90 mètres) et une projection limitée à environ 65 cm [131].



Fig. 2.35 – Rue de Palerme



Fig. 2.36 – Corso Vittorio Emanuele, Palerme



Fig. 2.37 – Les deux types de balcons. En haut balcon en pierre. En bas, balcon en fer

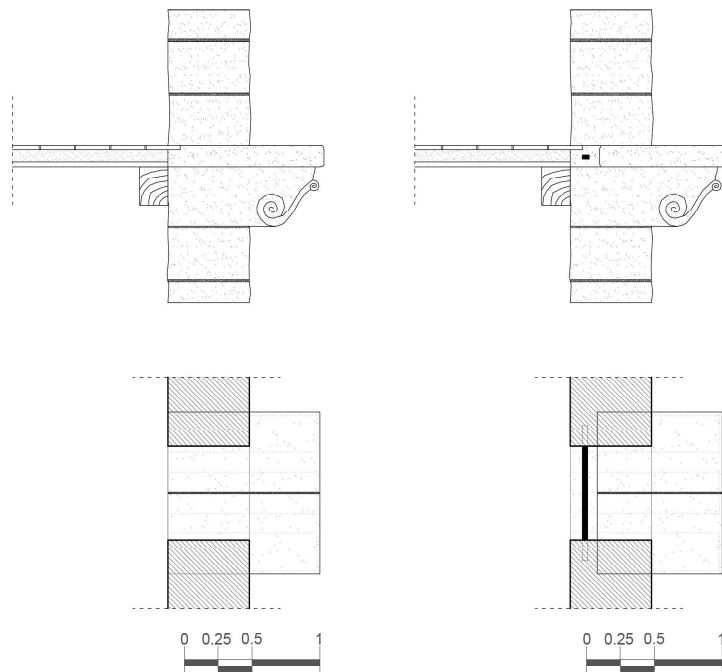


Fig. 2.38 – Deux types de balcons en pierre. A gauche, le balcon avec dalle en pierre jusqu’au fil intérieur du mur. A droite, le balcon avec *bardella*

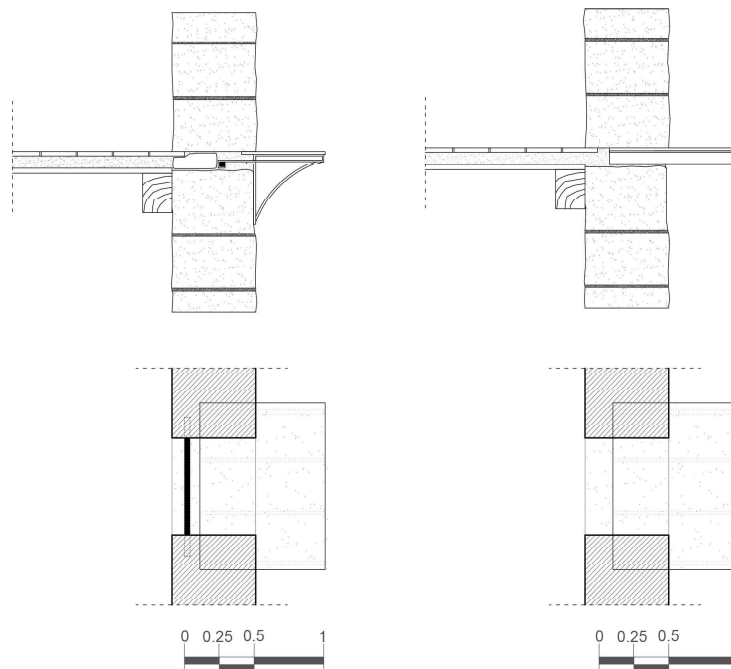


Fig. 2.39 – Deux types de balcons en fer. A gauche, le balcon avec barres de fer. En bas, le balcon avec poutre en I