

2.4.2 Caractérisation thermique des balcons

Dans le cadre de la caractérisation thermique des éléments constructifs du bâti traditionnel en région méditerranéenne, les balcons constituent sans doute un élément perturbateur du transfert de chaleur par l'enveloppe, autrement dit, ils constituent des ponts thermiques. En effet, le pont thermique est défini comme une zone de l'enveloppe où il y existe une forte présence de déperditions thermiques. Il peut y avoir deux causes aux ponts thermiques : l'une liée à la géométrie du nœud constructif (présence d'angles ou de coins) et l'autre liée aux changements de matériaux ou de résistances thermiques. Dans l'étude de la transmission de chaleur dans le bâtiment, le pont thermique reste encore un problème négligé ou pas tout à fait correctement calculé [81]. L'importance de la présence d'un pont thermique en terme de demande énergétique est un sujet encore débattu.

Pour caractériser un pont thermique on introduit le coefficient linéique de transmission thermique Ψ , qui prend en compte un flux de chaleur additionnel engendré par chaque pont thermique. Il est définie par la EN ISO 14683 :2007 [3] et la EN ISO 10211-1 [1] comme suit :

$$\Psi = \frac{\Phi_{PT} - \Phi_{homo}}{\Delta T} = L_{2D} - \sum_{j=1}^n U_j \cdot l_j \quad (2.27)$$

où :

Φ_{PT} est le flux de chaleur passant par pont thermique ;

Φ_{homo} est le flux de chaleur de la partie homogène de l'enveloppe ;

ΔT est la différence de température entre les deux côtés de l'enveloppe ;

L_{2D} est le coefficient de couplage thermique ;

U_j est la transmittance de chaque couche j de l'enveloppe ;

l_j est la longueur de la coupe de l'enveloppe.

Ils existent, en général, trois possibilités pour calculer le coefficient linéique de transmission thermique :

- En utilisant les catalogues ou les manuels qui collectent les principales solutions technologiques ;
- En utilisant des logiciels de calcul pour les ponts thermiques comme Therma ou Kobra ;
- En utilisant la méthode aux éléments finis ou la méthode aux différences finies.

L'utilisation des catalogues ou manuels induit une erreur de 35% par rapport à la réalité physique [132]. Si la norme EN ISO 13786 requiert un calcul dynamique pour l'évaluation de la performance du bâtiment, elle se réfère à la norme EN ISO 10211 [1] pour effectuer des calculs de ponts thermiques en régime permanent. Martin et al. [81] mettent alors en évidence une contradiction de la norme. Dans la EN ISO 13786, au paragraphe 6.1. deux notes sur l'évaluation des ponts thermiques en régime dynamique montrent cette contradiction évidente. D'une part elle renvoie à un calcul numérique par éléments finis :

«Le calcul des caractéristiques thermiques dynamiques des composants non plans et des composants contenant des ponts thermiques sera réalisé par résolution

de l'équation de transfert de chaleur avec des conditions aux limites périodiques. Dans ce but, les règles répondent au modèle donné dans l'EN ISO 10211 avec des méthodes numériques telles que la méthode des différences finies ou la méthode aux éléments finis».

D'autre part elle précise que l'étude dynamique des ponts thermiques est négligeable.

«Les ponts thermiques généralement utilisés dans les composants de construction n'affectent pas les caractéristiques thermiques dynamiques de manière significative, et peuvent être ignorés.»

Cependant, plusieurs recherches montrent le caractère essentiel d'un traitement dynamique des ponts thermiques dans la plupart des cas, du fait que l'inertie thermique d'un mur massif peut avoir des conséquences sur l'évaluation du pont même [23]. Dans ce contexte et compte tenu de la particularité de notre géométrie (non présente dans les catalogues ou manuels), nous choisissons un calcul par éléments finis réalisé à l'aide du logiciel Cast3m. L'algorithme construit est exposé en détail dans en annexe (cf. Annexe B). Comme pour les calculs effectués pour les paramètres dynamiques des murs, nous définissons la géométrie de chaque type de balcons et les propriétés thermiques (λ, ρ et c_p). Nous redéfinissons la géométrie de chaque type de balcon à l'aide d'un maillage triangulaire du domaine Ω gouverné par l'équation de la chaleur et la loi de Fourier (Eq.2.17).

Méthode de calcul

Pour la caractérisation des ponts thermiques nous utilisons le modèle proposé par [82]. En effet, pour effectuer une évaluation correcte des ponts thermiques, on devrait considérer que la surface intéressée par le pont lui même. Or, selon la norme EN ISO 10211, les plans de coupe (sur lesquels on impose la condition aux limites d'un mur adiabatique) doivent être placés sur un plan symétrique entre deux ponts thermiques, si la distance entre ces derniers est inférieure à 1 m. S'il n'y a pas un plan symétrique, les plans de coupe sont placés au moins à 1m de distance par rapport au point central de la géométrie. La Fig. 2.40, montre le positionnement des plans de symétrie selon la norme EN ISO 10211.

Nous décrivons ci-dessous les étapes suivies pour évaluer le coefficient linéique Ψ :

- Nous résolvons l'équation de Fourier (Eq.2.17) en régime permanent en imposant une différence de températures de 20°C . Les plans de coupe sont placés selon les standards EN ISO 10211-1 ;
- L'emplacement des plans de coupe est repositionné là où la température de surface interne s'écarte de plus de $\Delta T = 0,2$ K, c'est-à dire où les isothermes commencent à s'écarter ;
- Sur la nouvelle géométrie redéfinie à l'aide d'un maillage triangulaire, on résout l'Eq.2.17 par un calcul dynamique (température extérieure périodique selon l'Eq.B.3) pour trouver le flux de chaleur Φ_{PT} qui passe par le nœud.
- Nous calculons le flux de chaleur passant par la partie courante de l'enveloppe (sans pont thermique) Φ_{homo}

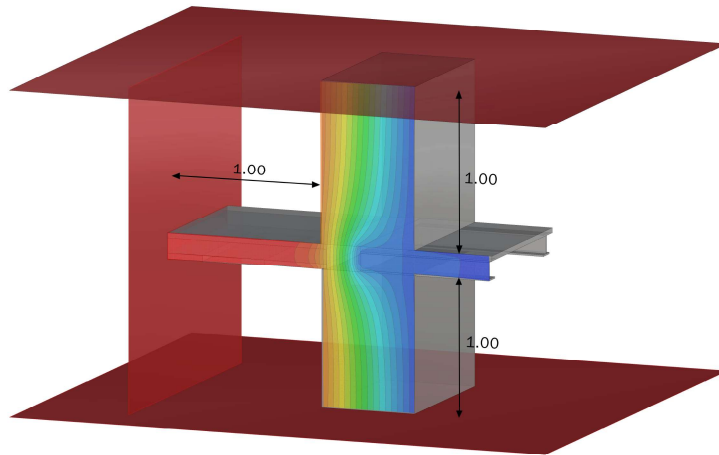


Fig. 2.40 – Positionnement des plans de coupe selon la norme EN ISO 10211

- Nous définissons le Ψ_{din} dépendant du temps (t) en prenant en compte l'inertie du nœud.
- Nous effectuons le même calcul en régime permanent (avec le plan de coupe repositionné) pour trouver Ψ_{staz} et nous effectuons la confrontation avec le Ψ_{din}

Considérons deux types de balcon, celui métallique avec poutre en I et celui en pierre (Fig. 2.39 et Fig. 2.38). Nous effectuons un calcul par éléments finis à l'aide du logiciel Cast3M en régime permanent pour trouver le flux de chaleur qui traverse le nœud. Les conditions aux limites sont :

- Une différence de température imposée égale à 20°C ;
- Une condition de flux de chaleur nul sur la surface supérieure et inférieure (condition adiabatique du mur) ;
- Les conditions aux limites de convection selon l'Eq.2.18.

La Fig.2.41 montre les isothermes pour les deux types de balcon selon la norme EN ISO 10211. Les Fig.2.42 et Fig.2.43 montrent l'évolution des températures sur la surface interne pour les deux types de balcon avec l'indication du plan de coupe.

Nous recoupons la géométrie en réduisant la surface de déperdition supérieurement à 1.60 m et inférieurement à 0.52 m pour le balcon métallique et à 0.40 m inférieurement et 1.25 m supérieurement pour le balcon en pierre. Une fois la géométrie redéfinie à l'aide d'un maillage triangulaire du domaine à trois nœuds, nous résolvons l'Eq.2.17 en appliquant une variation sinusoïdale de la température extérieure selon l'Eq.B.3 pour une journée estivale, tandis que la température interne reste constante (Fig.2.26).

Comme pour l'étude de l'enveloppe massif, nous effectuons un calcul à l'aide de la procédure PASAPAS (Cast3m) décrite précédemment (Fig. 2.27). Dans ce cas, les temps de calcul sont définis avec une progression de 0 à 6 jours avec un pas de 3600 secondes. La Fig.2.44 montre l'évolution de la température sur la surface extérieure et intérieure. La Fig.2.45 montre le flux de chaleur engendré par le nœud et la courbe de la différence des températures intérieure et extérieure (ΔT).

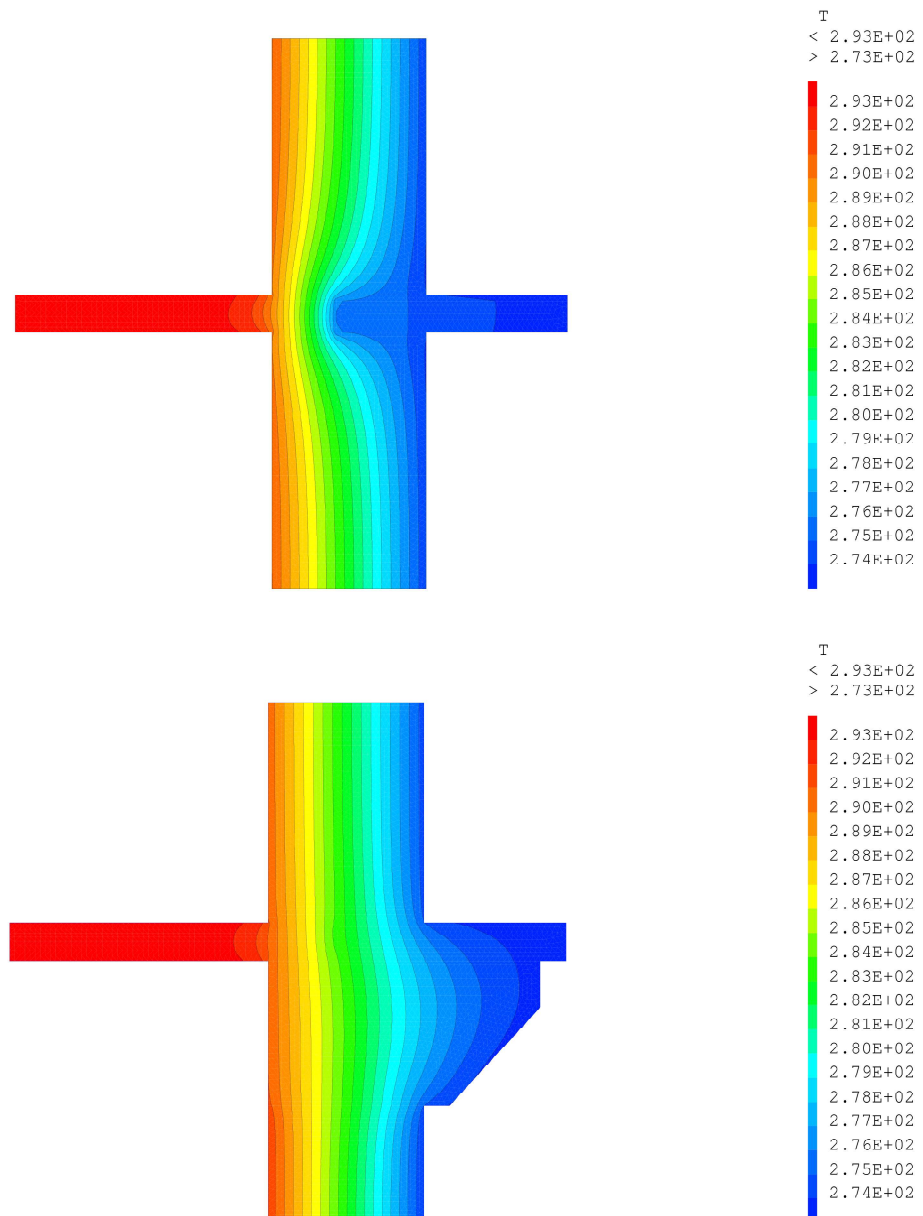


Fig. 2.41 – Profil des températures selon la norme EN ISO 10211. Balcon en métal (en haut), balcon en pierre (en bas)

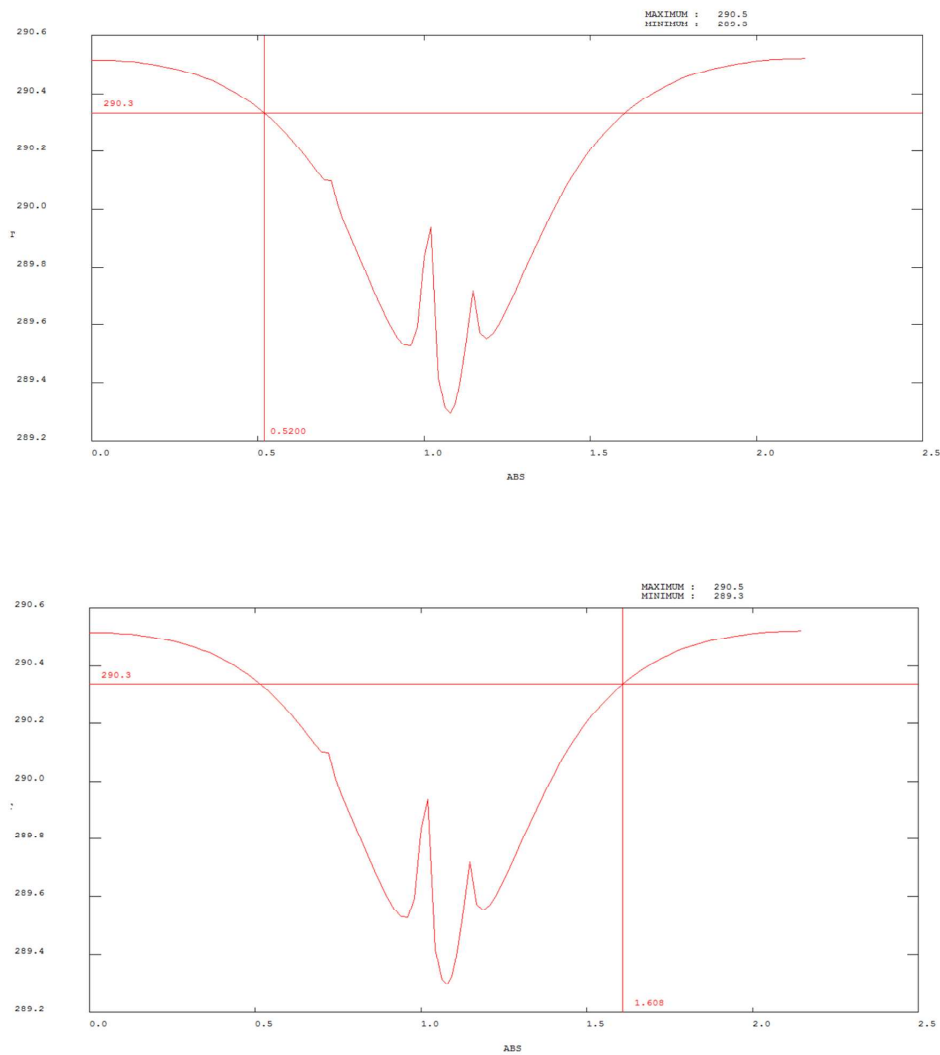


Fig. 2.42 – Distribution de la température sur la surface interne au nœud. Hauteur du plan de coupe supérieur et inférieur. Balcon avec console métallique

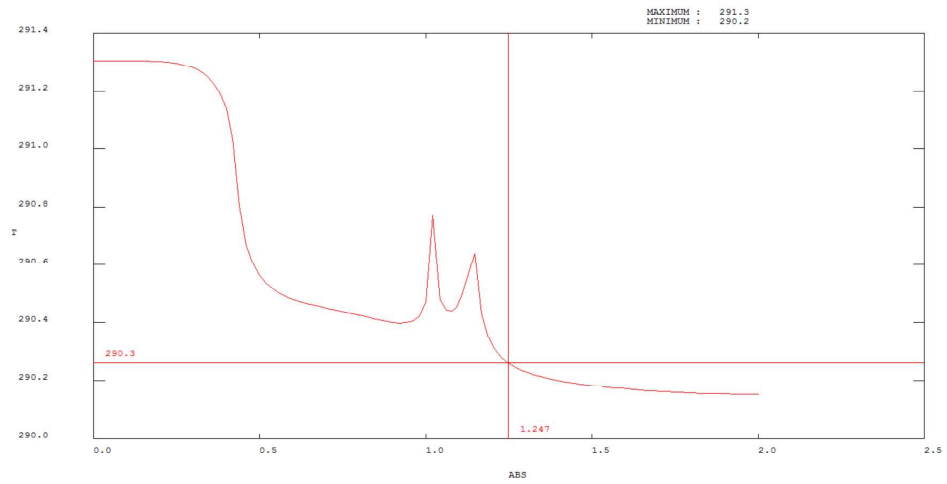
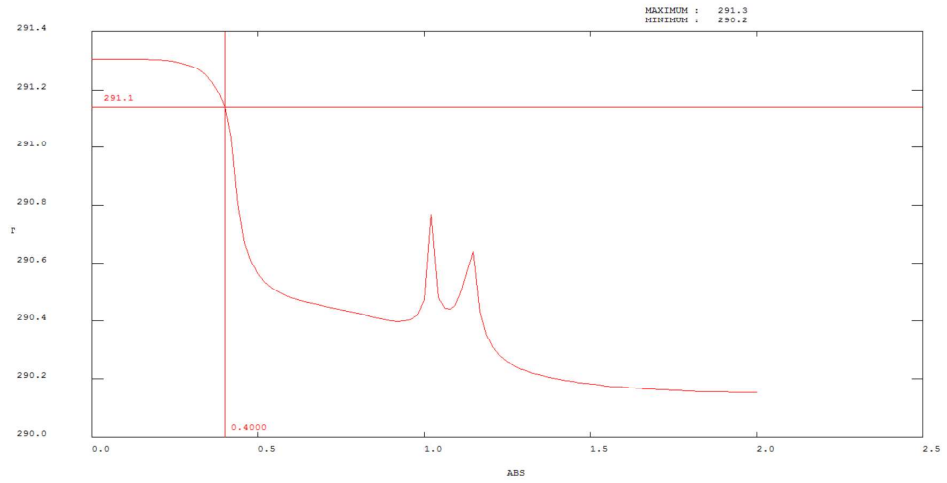


Fig. 2.43 – Distribution de la température sur la surface interne au nœud. Hauteur du plan de coupe supérieur et inférieur. Balcon avec console en pierre

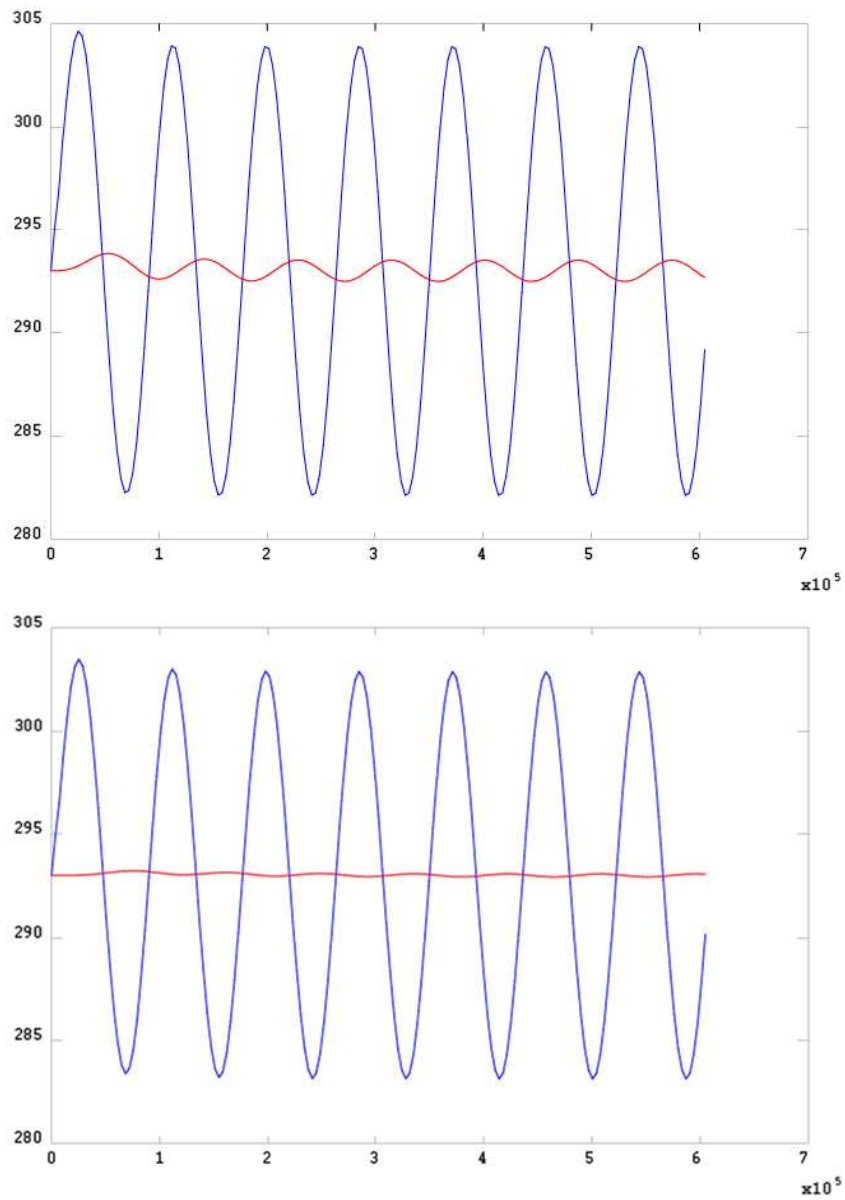


Fig. 2.44 – Évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue). En haut, balcon avec console métallique.
En bas, balcon avec console en pierre

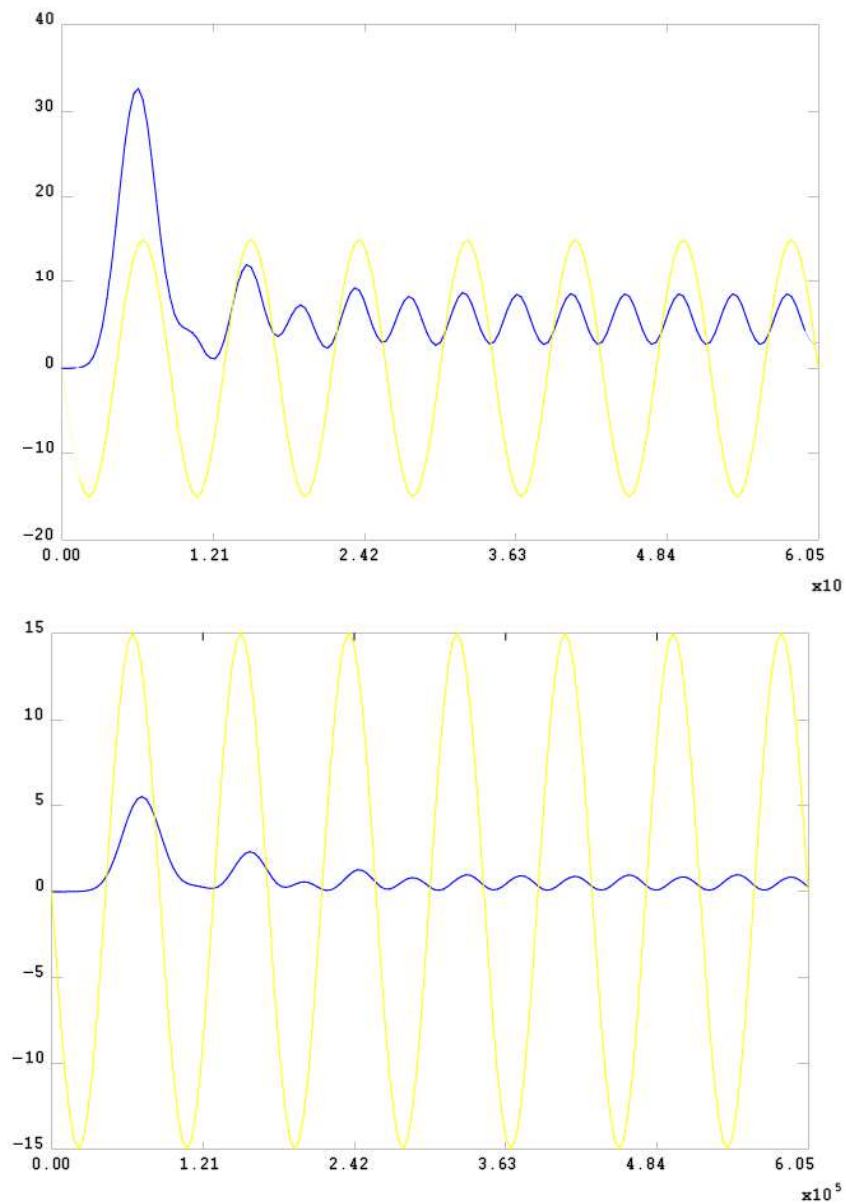


Fig. 2.45 – Flux de chaleur sur le nœud (courbe bleue) et différence des températures ΔT (courbe jaune). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre.

Nous constatons que pendant les trois premiers jours (jusqu'au pas : 259000, soit 72h) la variation de flux de chaleur n'a pas encore atteint un état stable. Nous pouvons aussi remarquer l'influence de l'inertie thermique du nœud massif sur le passage de flux de chaleur. En effet, une différence de température importante (-15 °C) engendre un passage de flux de chaleur conséquent ; cependant nous remarquons un retard entre l'instant t où la différence de température est la plus élevée et l'instant $t + \sigma$ où le flux de chaleur est le plus élevé.

L'Eq. 2.27 définit le coefficient linéique Ψ comme la différence entre le flux passant par le pont thermique et celui sans pont thermique divisé par la différence de température ΔT . Nous effectuons alors le calcul du flux de chaleur passant par la partie homogène de l'enveloppe (sans pont thermique) Φ_{homo} avec l'Eq.2.17 à l'aide de Cast3m. Les conditions aux limites étant les mêmes que pour le calcul de Φ_{PT} , la Fig. 2.47 montre le flux de chaleur qui passe par l'enveloppe massive, et la courbe de la différence des températures intérieure et extérieure (ΔT).

Considérons l'intervalle de temps qui va du pas 259000 (72h) au pas 345600 (96h). La Fig.2.48 montre les flux de chaleur avec et sans pont thermique. Nous remarquons une différence pour le flux de chaleur engendré. S'il est prévisible que le flux de chaleur par le nœud soit supérieur à celui sur l'enveloppe courante, de même que le déphasage pour le balcon avec console en métal, cela n'est pas toujours vrai pour le balcon avec console en pierre. En effet la présence de la console en pierre augmente l'épaisseur et donc l'inertie thermique du nœud ; le pont thermique engendré par la géométrie est réduit, du fait de la présence d'une plus grande épaisseur de la pierre (Fig.2.48).

Nous introduisons alors une grandeur, que nous appelons *retard* défini comme suit (Fig. 2.46) :

$$\sigma = t(\Phi_{max}) - t(\Delta T_{max}) \quad (2.28)$$

où :

t est l'instant de temps ;

Φ_{max} est le flux de chaleur maximum ;

ΔT_{max} est la différence de température entre intérieur et extérieur.

Cette grandeur nous permet de tenir compte de l'inertie thermique dans le calcul de Ψ .

On redéfinit alors Ψ_{din} comme suit :

$$\Psi_{din(t)} = \frac{\Phi_{PT(t+\sigma_1)} - \Phi_{homo(t+\sigma_2)}}{|\Delta T_{(t)}|} \quad (2.29)$$

où :

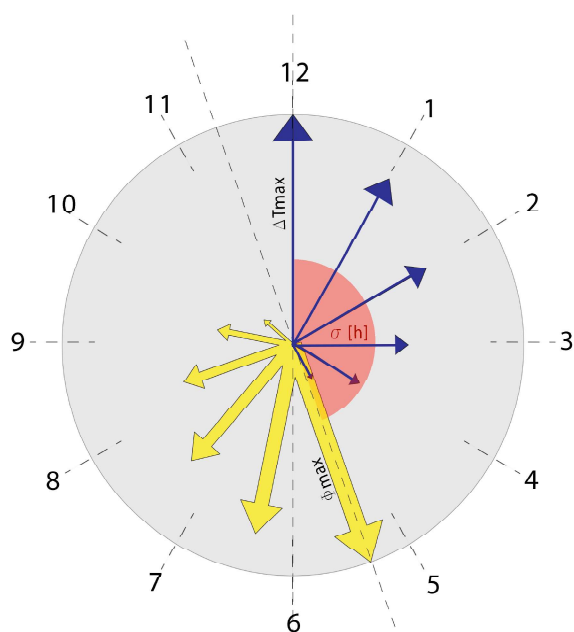
$\Phi_{PT(t+\sigma_1)}$ est le flux de chaleur avec le pont thermique à l'instant de temps $t + \sigma_1$

$\Phi_{homo(t+\sigma_2)}$ est le flux de chaleur de la partie homogène de l'enveloppe à l'instant $t + \sigma_2$.

$\Delta T_{(t)}$ est la différence de température entre les deux côtés de l'enveloppe ;

$t + \sigma_1$ est l'instant auquel Φ_{PT} est maximum.

$t + \sigma_2$ est l'instant auquel Φ_{homo} est maximum.

Fig. 2.46 – Définition du retard σ

Nous pouvons alors calculer Ψ_{din} en fonction du temps et en tenant compte de l'inertie thermique du nœud. La Fig.2.50 montre la courbe de Ψ_{din} pour les deux types de balcon étudiés. Nous pouvons remarquer que la valeur de $\Psi_{din(t)}$ en fonction du temps dans le cas du balcon avec console en métal est toujours positive à la différence du balcon en pierre. Cela s'explique par le fait que, pour le balcon métallique, le flux de chaleur qui s'échappe par le balcon Φ_{PT} est toujours supérieur à celui de l'enveloppe courante Φ_{homo} , ce qui n'est pas le cas du balcon en pierre comme expliqué ci-dessus. De plus, dans le cas du balcon métallique, comme nous pouvons le voir dans la Fig.2.49 qui fait référence au quatrième jour, le maximum de flux de chaleur dans le nœud (courbe bleu) est décalé de 3h par rapport au flux de chaleur maximum dans la partie homogène de l'enveloppe. Il n'en est pas ainsi dans le cas du balcon en pierre où le maximum de flux de chaleur Φ_{PT} a lieu au même instant que pour Φ_{homo} .

Si on effectue le même calcul en régime permanent, comme défini par la EN ISO 14683 :2007 [3] et la EN ISO 10211-1 [1], nous constatons un résultat différent. Cela s'explique par le fait que le calcul selon la norme ne prend pas en compte l'inertie du nœud massif (Fig.2.51). En effet, dans le cas du balcon avec console en métal, la valeur calculée selon la norme est environ 3 fois plus grande que la valeur moyenne obtenue sur la base du calcul dynamique. Dans le cas du balcon avec console en pierre, nous pouvons considérer comme nulle l'influence de la présence du balcon par rapport à une partie courante de l'enveloppe ; ce qui veut dire que dans le cas du calcul en régime permanent il serait erroné de considérer le balcon comme un pont thermique dans le bilan thermique global d'un bâtiment.

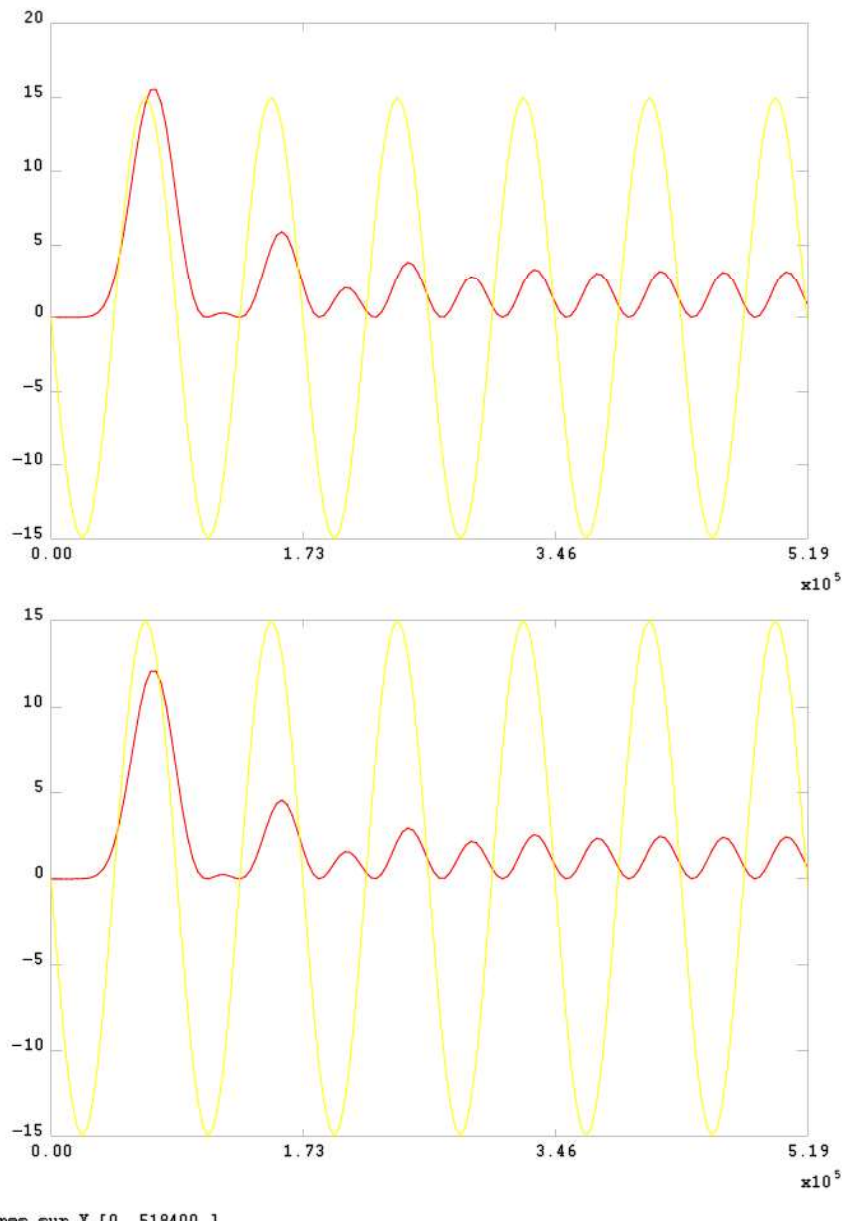


Fig. 2.47 – Flux de chaleur sur la partie homogène de l’enveloppe Φ_{homo} [W] (courbe rouge) et différence des températures ΔT (courbe jaune). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre.

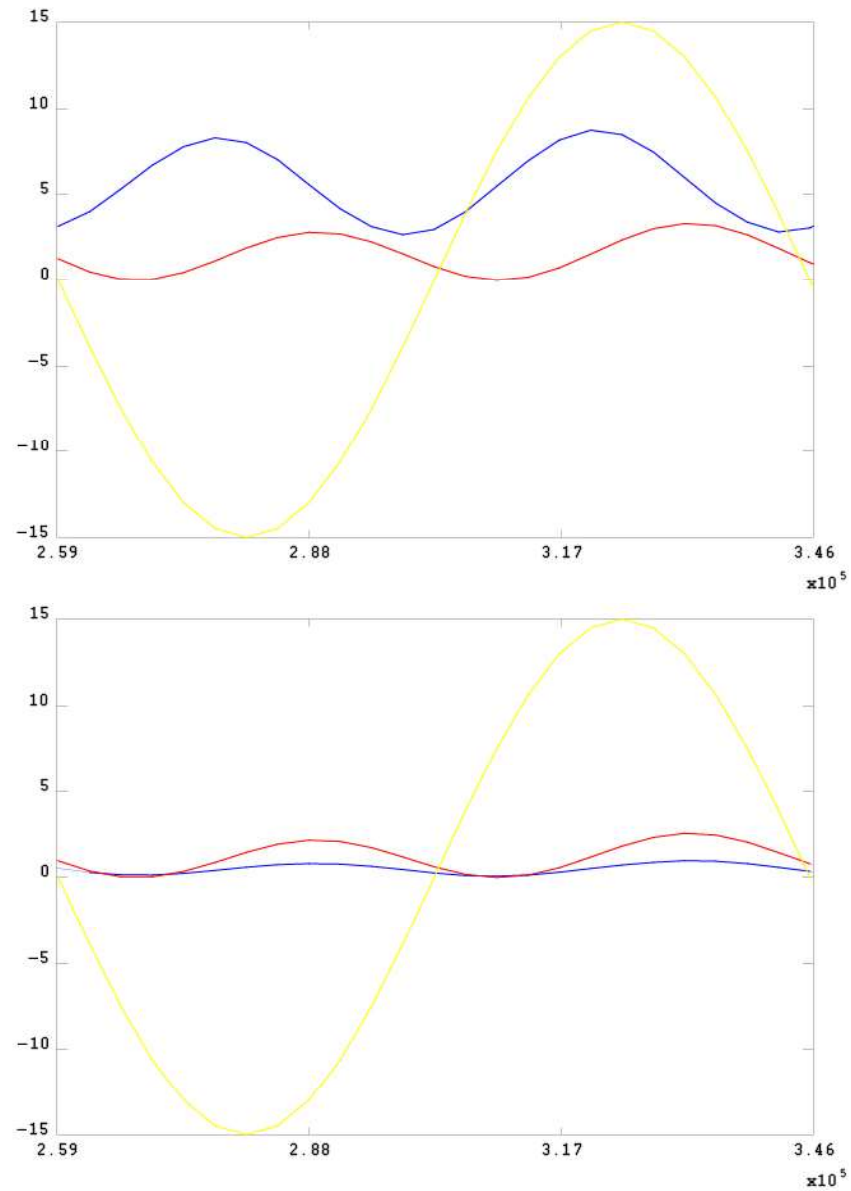


Fig. 2.48 – Flux de chaleur Φ_{PT} [W] sur le nœud (courbe bleue), flux de chaleur sur la partie homogène de l'enveloppe Φ_{homo} [W] (courbe rouge) et différence des températures ΔT [K] (courbe jaune). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre.

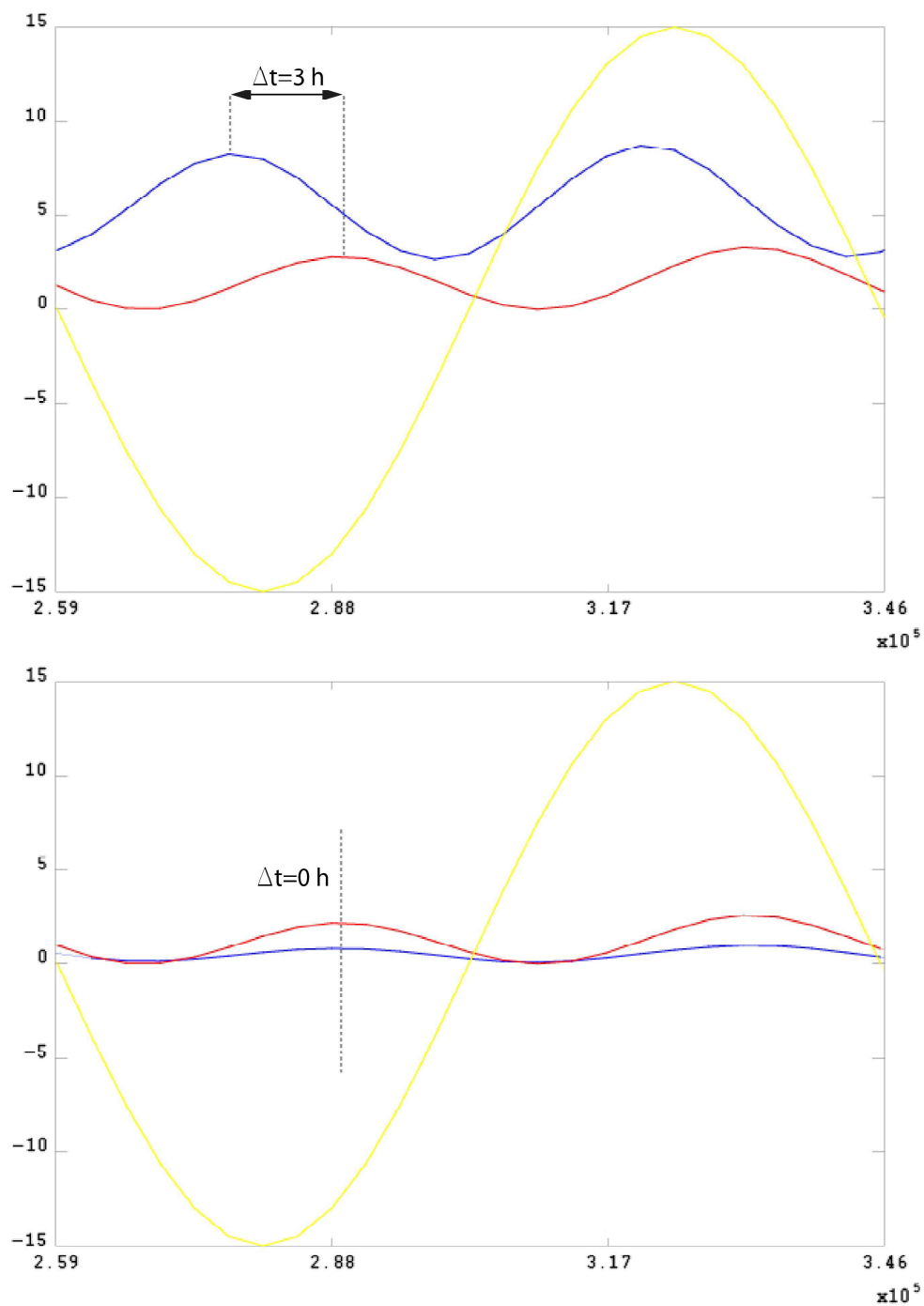


Fig. 2.49 – Flux de chaleur Φ_{PT} [W] sur le nœud (courbe bleue), flux de chaleur sur la partie homogène de l'enveloppe Φ_{homo} [W] (courbe rouge) et différence des températures ΔT [K] (courbe jaune). Balcon en métal (en haut), balcon en pierre (en bas)

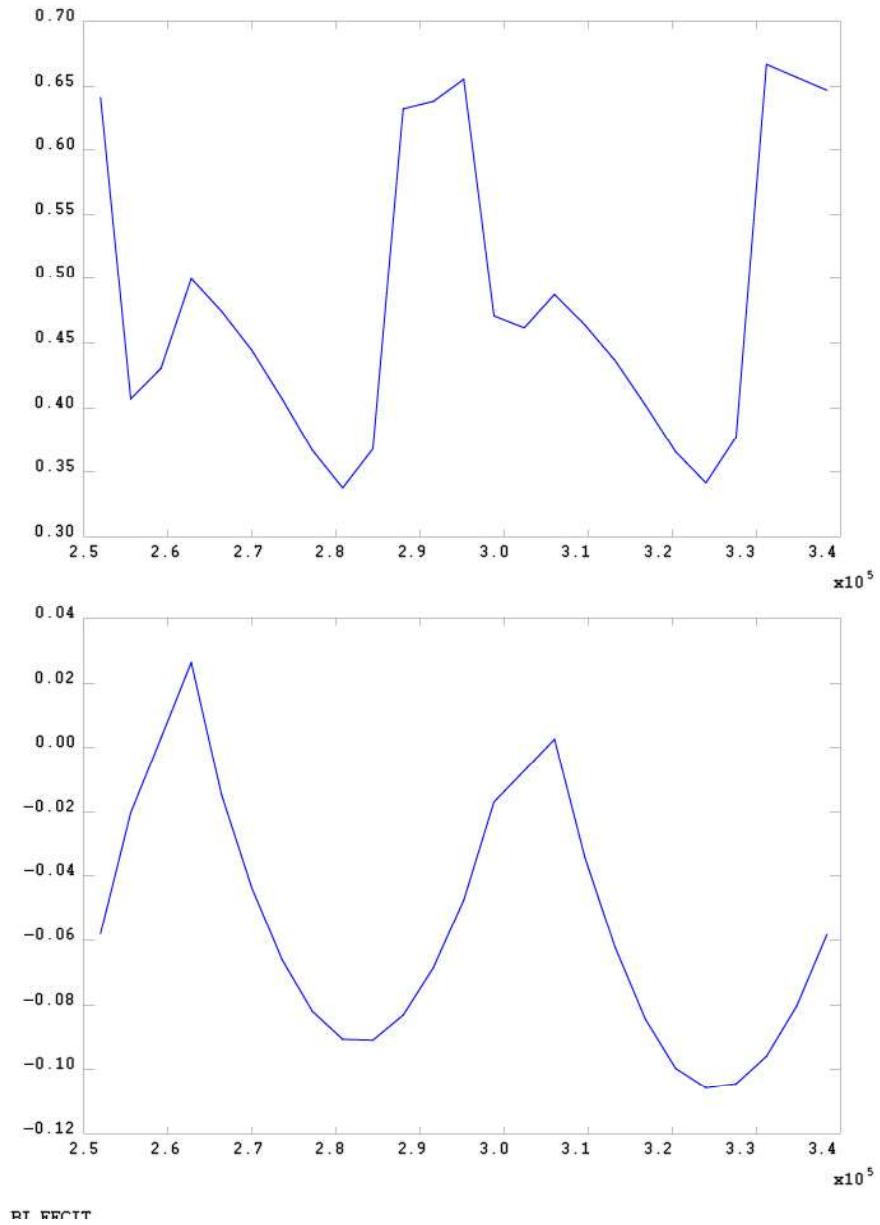


Fig. 2.50 – En haut, évolution de $\Psi_{din}(t)$ pour le balcon avec console en fer. En bas, évolution de $\Psi_{din}(t)$ pour le balcon avec console en pierre

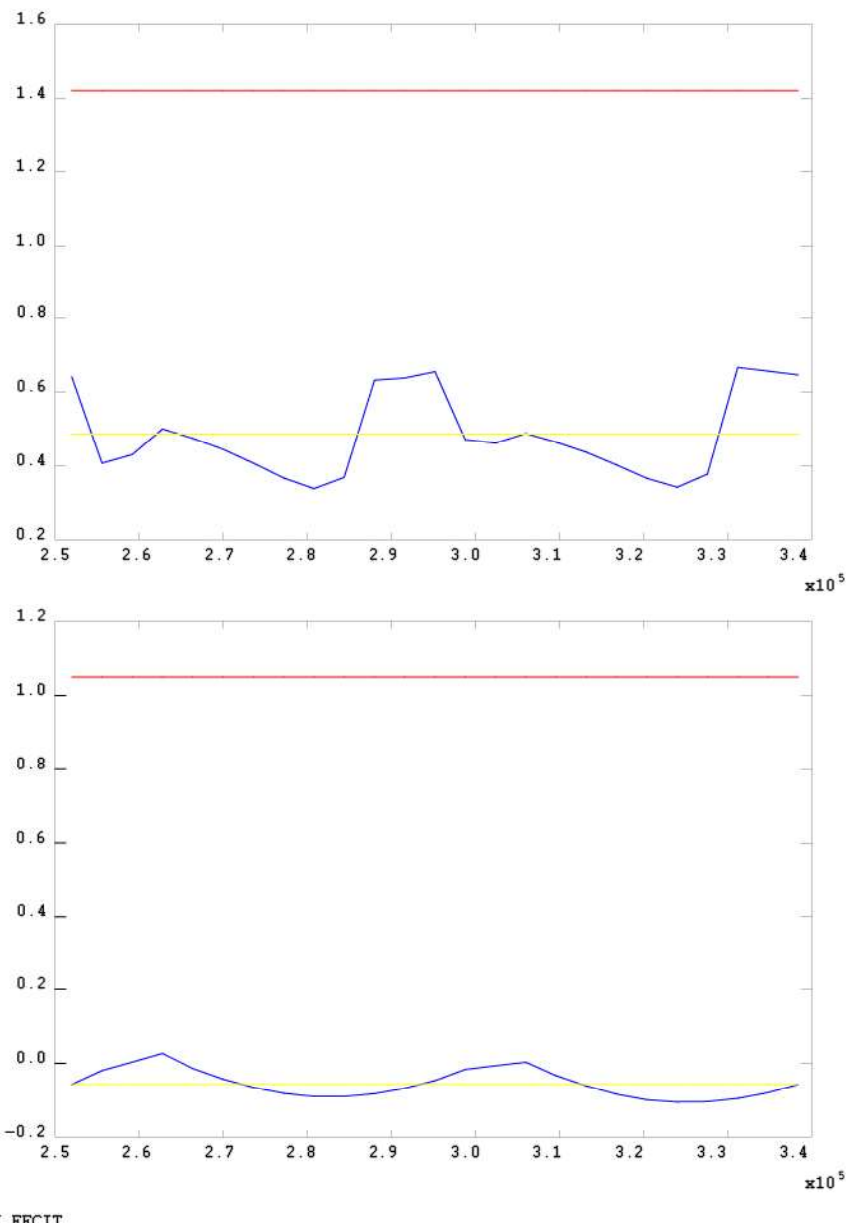


Fig. 2.51 – Évolution de $\Psi_{din}(t)$ (courbe bleue). En jaune, valeur moyenne de $\Psi_{din}(t)$. En rouge valeur selon la EN ISO 14683 :2007 et la EN ISO 10211-1. En haut, cas de balcon avec console en fer. En bas, cas de balcon avec console en pierre.

2.5 Étude morphologique des composants constructifs : les planchers

2.5.1 Les planchers

Les solutions utilisées à Palerme pour le plancher sont à la fois simples et efficaces. Le plancher le plus répandu dans le bâti mineur est le plancher à simple solivage [56]. Sur le plancher en bois, on observe souvent la présence d'un *tercisato*, épaisse couche de mortier de chaux (de 8 cm) qui améliore l'isolation acoustique et thermique. Pour rendre le plancher étanche à l'eau, la coutume était de poser sur les poutrelles des rameaux de châtaignier écorcés, *mezzi ginelli* et au-dessus, une couche de mortier de chaux plus fine. La présence de fragments de tuiles minutieusement écrasés dans la chape de *tercisato* permettait d'éliminer l'eau pendant la phase de battage. En effet cette opération permettait de rendre la chape compacte et de faire émerger en surface l'eau qui s'évaporait ensuite [131]. Dans le bâti nobiliaire, on trouve le plancher à travée composée, dont les poutres principales s'appelaient *bardoni*.

Un autre type de plancher traditionnel se répand à partir de la fin du XIX^e siècle sous l'impulsion de la diffusion du métal dans toute l'Europe. Dans les documents d'archive on trouve déjà en 1878 des éléments métalliques pour la réalisation des planchers [20]. Des poutres en fer à double T étaient posées avec un entraxe déterminé par la dimension des briques dites *palmasi* (Fig. 2.54).

Le développement des structures à base de ciment, comme on l'a vu dans le chapitre précédent, a entraîné la diffusion de planchers en béton armé avec insertion de poutrelles à double T dans la zone inférieure à l'axe neutre, liées avec des barres de fer placées sur la partie supérieure [20]. On a vu aussi apparaître le plancher qui est actuellement est le plus répandu à Palerme, avec poutrelles en béton armé et entrevous (Fig. 2.55).



Fig. 2.52 – Les planchers de la tradition

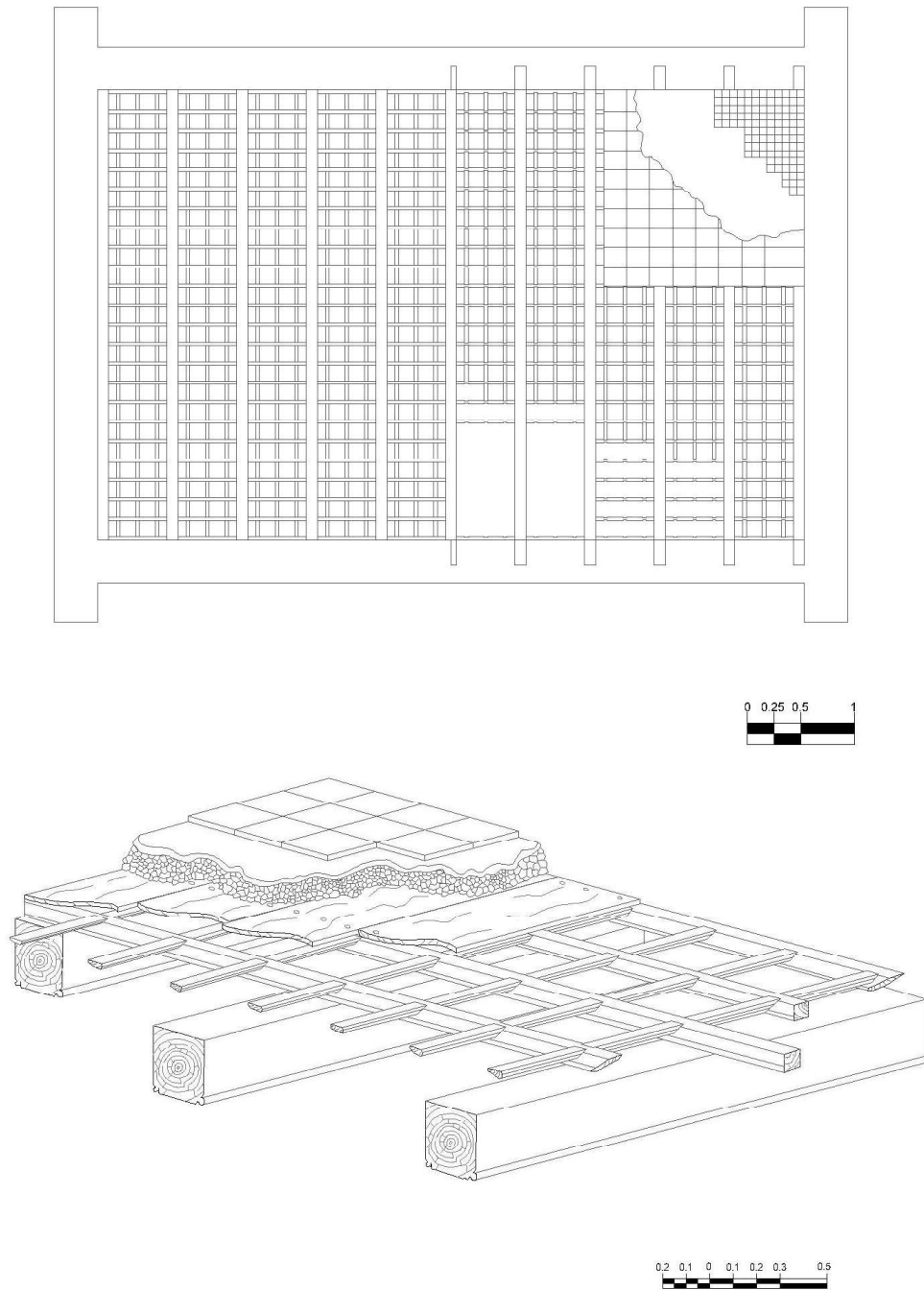


Fig. 2.53 – Plan plancher (en haut). Axonométrie du plancher (en bas)

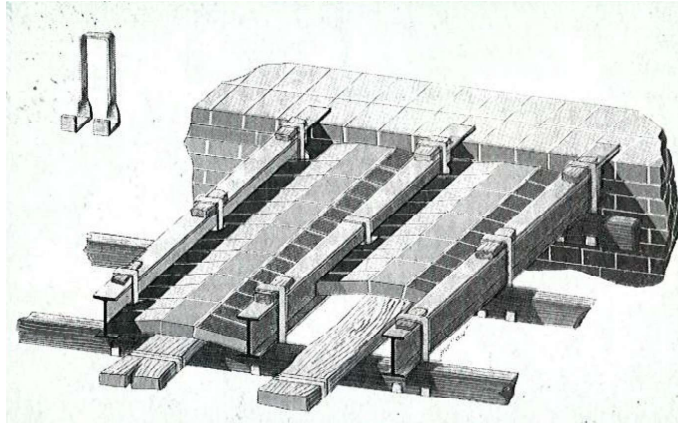


Fig. 2.54 – Plancher avec poutres à double T, bois et brique. D'après [46]

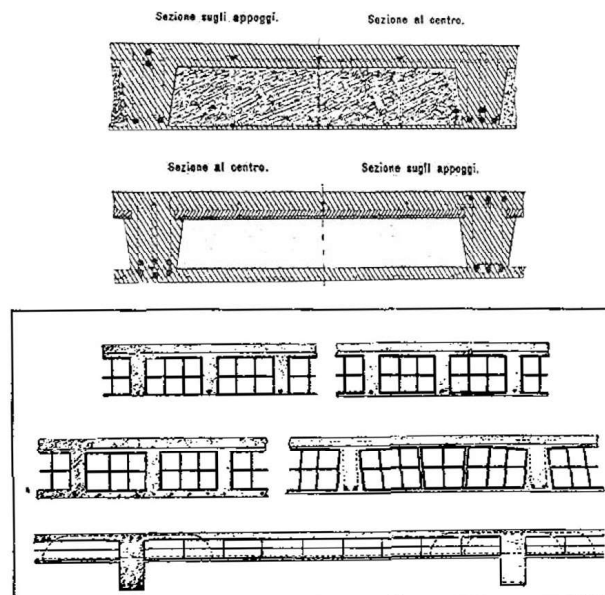


Fig. 2.55 – Plancher avec béton armé (en haut) et plancher en poutrelles et entretous d'après le catalogue de l'entreprise Ghilardi et Conigliaro

2.5.2 Caractérisation thermique des planchers

Dans le cadre de la caractérisation thermique des composants constructifs de la tradition à Palerme, les planchers constituent également des ponts thermiques. La méthode expliquée dans le paragraphe précédent est utilisée ici pour calculer le coefficient linéique. Nous présentons ci-dessous l'analyse effectuée dans le cas du plancher avec poutre en bois.

Comme pour le cas des balcons, nous avons effectué un premier calcul en régime stationnaire en résolvant l'équation de Fourier (Eq.2.17), en imposant une différence de températures de 20°C . Les plans de coupe sont placés selon les standards EN ISO 10211-1. Les conditions aux limites sont les mêmes que dans le cas précédent. La Fig.2.56 montre les isothermes de deux types de plancher.

L'emplacement des plans de coupe est repositionné là où les isothermes s'écartent de plus de $\Delta T = 0.2\text{K}$. La Fig.2.57 montre l'évolution de la température sur la surface interne.

Une fois la géométrie redéfinie à l'aide d'un maillage triangulaire du domaine à trois nœuds, nous résolvons l'Eq.2.17 en appliquant une variation sinusoïdale de la température extérieure selon l'Eq.B.3 pour une journée estivale, tandis que la température interne reste constante (Fig.2.26). Comme pour les analyses précédentes, nous effectuons un calcul à l'aide de la procédure PASAPAS (Cast3m) décrite précédemment, par éléments finis (Fig.2.27). Dans ce cas, les instants de calcul sont définis avec une progression de 0 à 6 jours et un pas de 3600 secondes.

Nous pouvons alors calculer Ψ_{din} , en fonction du temps et tenant compte de l'inertie thermique du nœud. La Fig.2.60 montre la courbe de Ψ_{din} pour le plancher étudié.

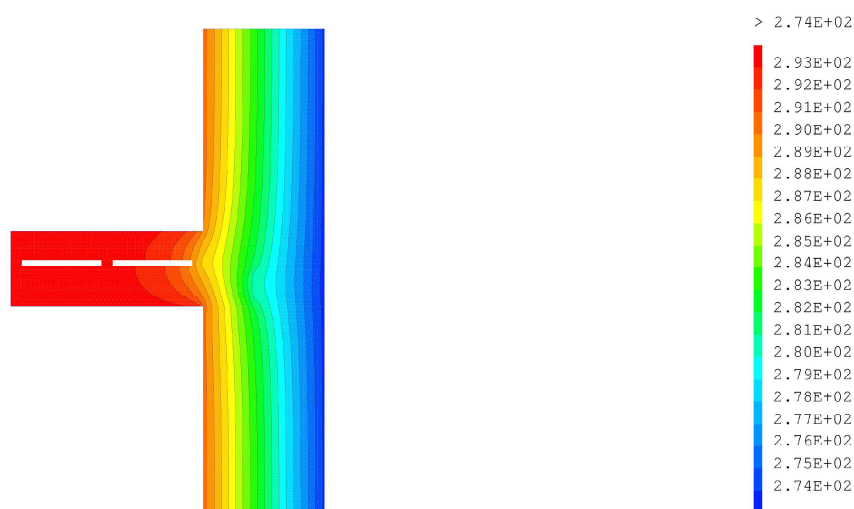


Fig. 2.56 – Profil des températures selon la norme EN ISO 10211.

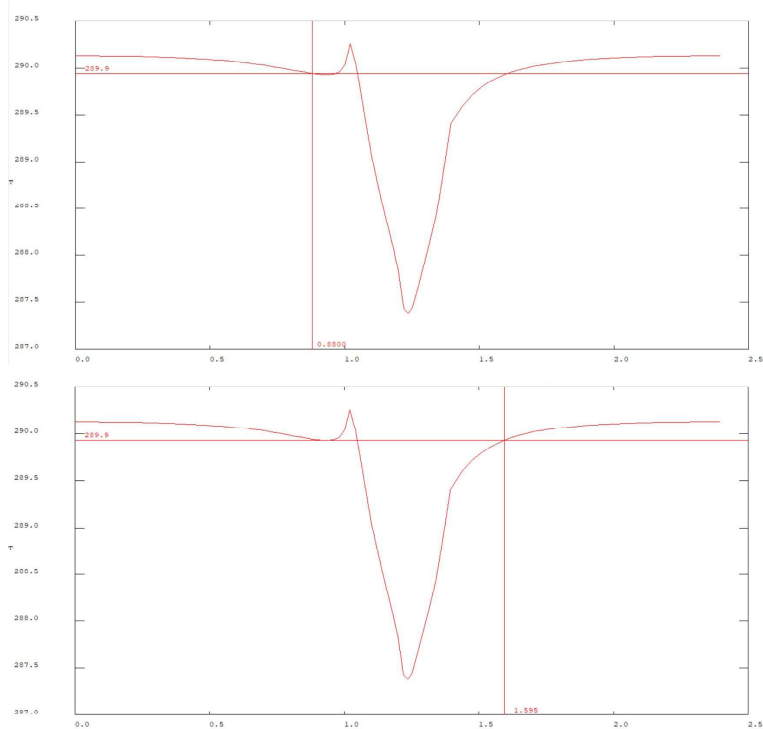


Fig. 2.57 – Évolution de la température sur la surface interne au nœud. Hauteur du plan de coupe supérieur et inférieur. Plancher en bois

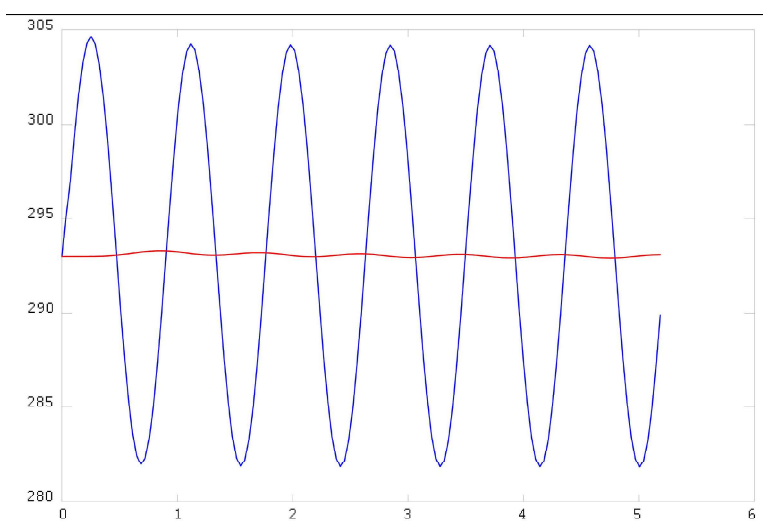


Fig. 2.58 – Évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue).

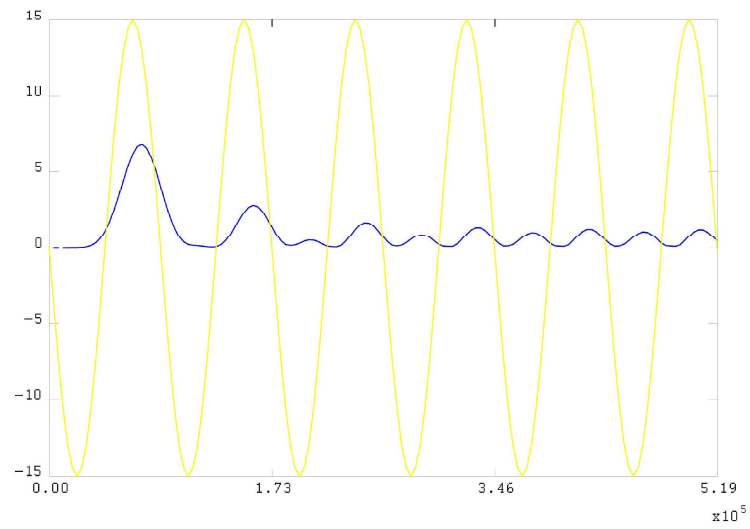


Fig. 2.59 – Flux de chaleur sur le nœud (courbe bleue) et différence des températures ΔT (courbe jaune).

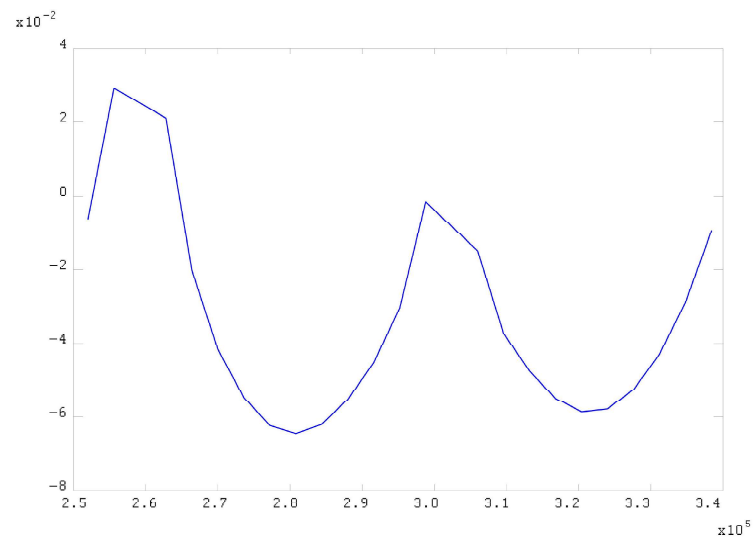


Fig. 2.60 – En haut, évolution de Ψ_{din} pour le plancher en bois.

Deuxième partie

Tradition et innovation

Chapitre 3

Les valeurs bioclimatiques de l'architecture traditionnelle

Résumé : L'analyse des influences que les caractéristiques récurrentes de l'architecture traditionnelle ont sur les performances thermo-hygrométriques représente une phase de connaissance fondamentale préalable à la définition de stratégies pour la conception durable de demain. Ce cadre cognitif porte sur le bâti traditionnel à différentes échelles d'analyse, de l'interaction entre le bâti construit et la ville à l'échelle des composants constructifs jusqu'aux matériaux utilisés. En s'appuyant sur les recherches scientifiques publiées, dans ce chapitre nous allons identifier les facteurs qui contribuent à améliorer les performances énergétiques du bâti traditionnel à Palerme.

Riassunto : L'analisi delle influenze che le caratteristiche ricorrenti dell'architettura tradizionale mediterranea hanno sulle performance termo-igrometriche rappresenta una fase propedeutica fondamentale alla definizione delle strategie per il progetto architettonico sostenibile di domani. Questo quadro normativo riguarda il costruito storico su differenti scale di analisi, dall'interazione tra l'edificio e la città alla scala del componente costruttivo fino ai materiali. Sulla base delle ricerche scientifiche pubblicate negli ultimi anni, in questo capitolo si identificano i fattori che hanno contribuito a migliorare le prestazioni energetiche del costruito storico : l'orientamento, il controllo degli apporti solari, la ventilazione naturale e l'inerzia termica.

« La manière de construire la plus efficace a des centaines d'années. Si vous prenez les monuments traditionnels dans lesquels l'homme se sent chez lui ; les villages, les tentes et les temples ont toujours été érigés par des gens proches de ces constructions et de ce qui a permis de les construire. Il est impossible de faire de grands monuments ou d'endroits confortables sans suivre cette méthode qui s'inspire de formes naturelles ancestrales tel que les arbres, les collines ou les visages. » [7]

L'architecture bioclimatique d'aujourd'hui peut être définie comme une architecture cohérente avec les exigences de protection de l'environnement, en terme d'économie d'énergie et de bien-être thermique, une architecture qui tient compte des caractéristiques climatiques locales. Les objectifs de l'architecture bioclimatique sont la réduction des déperditions thermiques, le contrôle des apports thermiques naturels en été et leur maximisation en hiver. Sous cet angle, à travers l'analyse des caractères du bâti à Palerme, nous pouvons dire que l'architecture traditionnelle méditerranéenne peut représenter un modèle empirique d'architecture bioclimatique.

Dans la première partie de ce travail, nous avons souligné le caractère originaire de l'architecture traditionnelle, à savoir sa capacité de répondre à un besoin d'équilibre entre les habitants et l'environnement. L'hétérogénéité de types, de formes, de matériaux de cette architecture montrent la même nécessité de protection face à l'environnement naturel. Les préoccupations visant à construire de façon salubre et la recherche d'harmonie entre environnement naturel et anthropocène ont d'anciennes racines dans les traditions constructives méditerranéennes et sont à la base de «l'art de la construction intemporelle» de cette région [102]. Les traditions constructives se basent sur des connaissances approfondies, améliorées et transmises à travers le temps, du système environnemental et de ses phénomènes, du climat et de leurs influences sur la vie quotidienne [88].

L'architecture s'est adaptée à des problèmes donnés, à des nécessités spécifiques liées à la protection par rapport à la radiation solaire, ou à la volonté de tirer profit de ces conditions climatiques. L'utilisation de matériaux locaux, comme la pierre de calcarénite, construit une relation étroite entre lieu et bâti construit. Les modèles constructifs présentés sont le résultat de la collaboration de maçons, de tailleurs de pierre, de charpentiers et d'autres acteurs au cours de générations entières. La mise en place de pratiques de réemploi (comme les murs de *pietra e tajo*), montre une recherche continue d'économie en concordance avec les technologies et aux matériaux disponibles. Le lien entre questions sociétales, économiques et environnementales sont étroitement liées : le renvoi au concept de durabilité, tel que défini aujourd'hui, devient alors évident.

L'analyse des influences que les caractéristiques récurrentes de l'architecture traditionnelle ont sur les performances thermo-hygrométriques représente une phase de connaissance fondamentale préalable à la définition de stratégies pour le processus du projet durable de demain. Ce cadre cognitif a porté sur le bâti traditionnel à différentes échelles d'analyse, de l'interaction entre le bâti construit et la ville à l'échelle des composants constructifs jusqu'aux matériaux utilisés. Nous avons essayé de contribuer dans la première partie de ce travail à développer ce cadre cognitif, en analysant à différentes échelles les caractéristiques du bâti traditionnel en milieu

dense afin d'examiner l'influence que ces caractéristiques morpho-géométriques et physiques ont sur les performances thermiques et énergétiques du bâti.

Bien que les stratégies passives pour les régions méditerranéennes ne puissent pas se résumer dans un schéma, on peut identifier des facteurs qui influent sur le processus du projet architecturale bioclimatique. Dans ce chapitre nous définirons ces facteurs de l'architecture traditionnelle à Palerme.

L'analyse des caractéristiques fonctionnelles de l'architecture traditionnelle à Palerme, conduit à mettre en évidence quatre paramètres que l'on peut considérer comme décisifs pour le contrôle thermique et hygrométrique d'un projet durable :

- L'orientation
- La ventilation
- Les systèmes de protection des apports solaires
- L'inertie thermique

Ce bagage de connaissances liées aux aspects bioclimatiques de l'architecture existante peut être dirigé vers deux interventions : la réhabilitation du bâti existant et la conception du bâti neuf. Nous allons dans les chapitres suivants approfondir ces deux cadres d'intervention possibles .

3.0.1 L'orientation

La recherche de l'emplacement le plus adapté pour un bâtiment vise à se protéger ou à profiter du vent, ou encore à orienter les pièces selon qu'elles sont réservées à la vie de jour ou de nuit. Dans le cas de la ville de Palerme, l'orientation des axes principaux assure non seulement la protection contre les vents dominants, mais aussi l'obtention d'une exposition solaire moins dérangeante. On a vu que la ville de Palerme s'est surtout développée selon une exposition sud-est/nord-ouest. Ces deux orientations permettent de réduire les heures d'ensoleillement respectivement le matin et l'après-midi, non seulement à cause des différentes positions solaires mais aussi de la morphologie particulière de la ville. De fait, les montagnes environnantes (Fig. 3.2), dans les heures qui précèdent le coucher du soleil et après l'aube, constituent un obstacle naturel à la pénétration de l'irradiation solaire au centre de la zone urbaine [71].

Les études sur l'orientation et l'exposition à la radiation solaire menées pendant la période des hygiénistes ont poussé à la réflexion concernant les effets que ces paramètres avaient sur la santé humaine, avec la mise en place de prescriptions architecturales et urbaines [62]. Les théories qui ont été développées ont fait l'objet de discussions durant presque tout le XX^e siècle. On peut mentionner, par exemple, la théorie de l'axe héliothermique proposé par Rey, Pidoux et Barde en 1928, devenue célèbre grâce à Le Corbusier qui dans *La ville radieuse* la définit comme "*l'armature du tracé urbain*" [62] (Fig. 3.3).

De nos jours, les recherches sur l'optimisation de l'orientation en fonction du site et de son climat sont surtout dirigées vers l'analyse de son influence sur les performances énergétiques d'un bâtiment.

Bien que le sujet ait été discuté dans la littérature depuis un certain temps, les efforts pour la réduction de la consommation d'énergie se sont surtout concentrés,

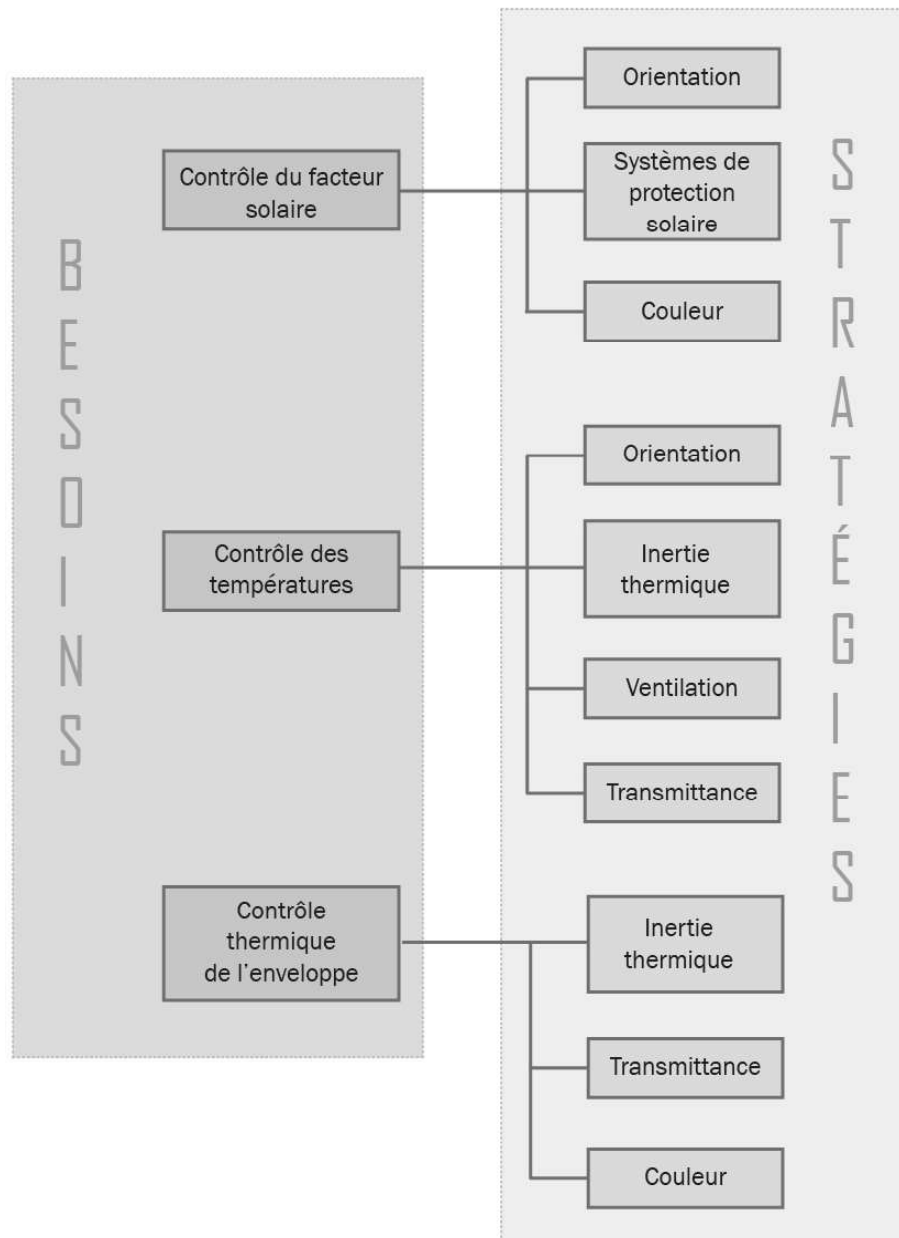


Fig. 3.1 – Besoins et stratégies de l'architecture méditerranéenne



Fig. 3.2 – Les montagnes autour de Palerme

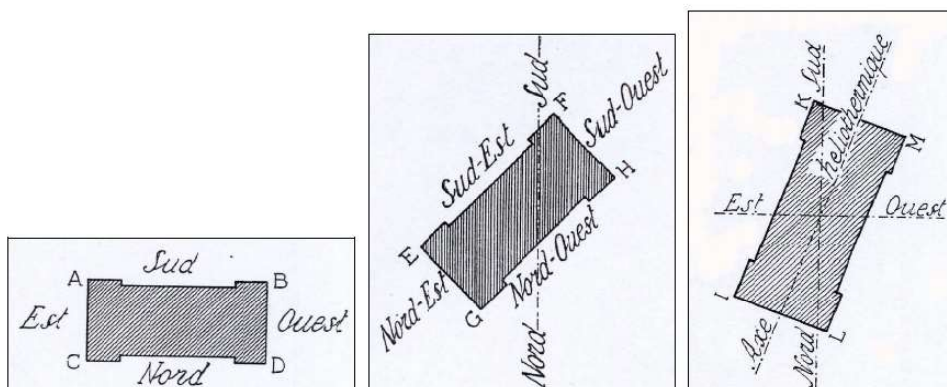


Fig. 3.3 – Différentes orientations d'un immeuble illustrées par Rey, Pidoux et Barde pour traiter la théorie de l'axe héliothermique

à partir des années 70, sur l'enveloppe du bâtiment, les transmissions de chaleur à travers divers assemblages de matériaux, l'ombrage de la fenestration, le contrôle de l'infiltration [67]. Aujourd'hui l'impact de l'orientation et de l'exposition des bâtiments est un sujet qui revêt une importance croissante, surtout en ce qui concerne la mise en place de systèmes solaires actifs pour la production d'énergie [27].

Plusieurs recherches montrent que l'orientation du bâtiment et sa relation avec le site peuvent exercer une influence considérable sur la consommation énergétique finale d'un bâtiment [113, 124, 74].

Dans la région méditerranéenne, une mauvaise orientation influence le comportement énergétique d'un bâtiment de trois façons principales :

- Les charges de refroidissement, élevées en été à cause d'un excès de radiation solaire reçue ;
- Le manque de ventilation naturelle permettant l'activation d'un système passif de mitigation climatique ;
- Les charges de chauffage élevées à cause des faibles gains solaires en hiver.

3.0.2 La ventilation naturelle

L'attention portée à l'emplacement au sol et à la recherche de la bonne orientation du bâti traditionnel est liée aussi à un autre facteur environnemental rarement négligé dans le passé : la ventilation naturelle.

Les études des hygiénistes du xx^e siècle montrent que la ventilation naturelle était le seul moyen d'assurer le renouvellement de l'air et le rafraîchissement des locaux. D'après les analyses réalisées dans la première partie de ce travail, les stratégies mises en place dans l'architecture traditionnelle à Palerme étaient les suivantes [12] :

- une stratégie exploitant l'effet du vent
- une stratégie exploitant l'effet de tirage thermique.

La première stratégie impliquait de trouver une bonne orientation par rapport aux vents dominants et un bon emplacement des ouvertures dans les façades (Fig.3.4).

La différence de pression provoquée peut être décrite par [114] :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.1)$$

où :

C_p est le coefficient de pression ;

ρ la masse volumique de l'air ;

v est la vitesse du vent.

La différence de pression provoquée entre les ouvertures opposées de différentes grandeurs dans le bâti traditionnel [131] engendre une ventilation de type transversal. Cette ventilation permet d'obtenir un confort physiologique de l'occupant pendant la journée en créant un mouvement d'air dans la pièce [58].

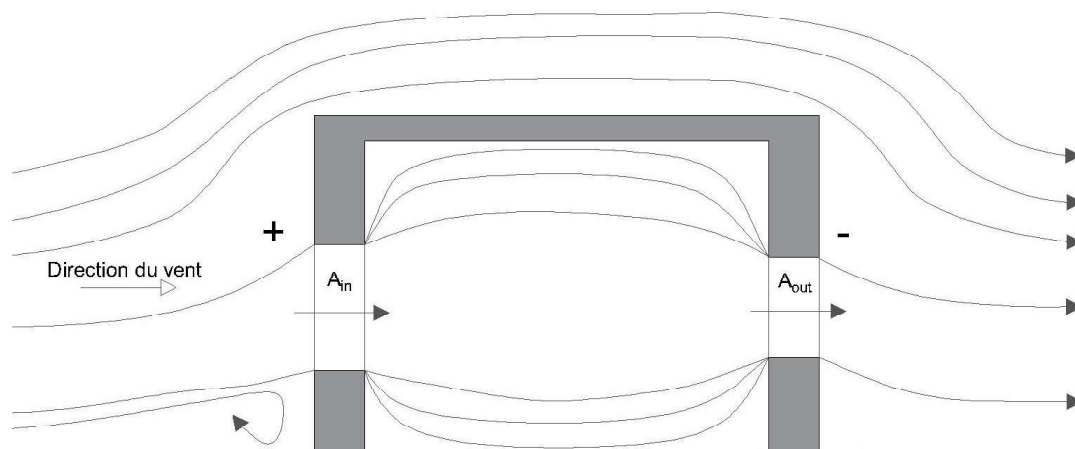


Fig. 3.4 – Ventilation naturelle par effet du vent

La ventilation par tirage thermique est due à la différence de densité d'air entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (Fig.3.5). La différence de pression est donnée par [114] :

$$\Delta p = \rho_i \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_e}{T_e} \quad (3.2)$$

où :

g est l'accélération gravitationnelle ;

ρ_i la masse volumique de l'air à l'intérieur ;

h est la distance verticale séparant les deux ouvrants ;

T_i et T_e la température à l'intérieur et à l'extérieur.

Dans le bâti traditionnel ce type de ventilation était recherché par la mise en place d'une fausse voûte de tissu de cannes écrasées avec une fine couche de plâtre. Le sous-plafond réchauffé pendant la journée devait permettre à l'air chaud de remonter et de s'échapper par la toiture non étanche à l'air [131].

La présence du patio permet un assez bon ensoleillement de la partie haute. Elle est donc plus chaude que le reste de la demeure, du fait que les masses d'air froid, par différence de pression, restent dans les espaces bas. Le déplacement de ces masses d'air froid, à l'intérieur, permet la régulation thermique globale [24].

La ventilation nocturne permet de rafraîchir le bâtiment par convection. L'enveloppe massive permet de stocker la chaleur pendant la journée, pour être restituée à l'extérieur pendant la nuit. Dans ce cas, il est important de réduire les apports solaires durant la journée pour réduire au maximum la température à l'intérieur pendant les heures diurnes. Ce type de ventilation est à préférer quand la température extérieure pendant la journée est très élevée et la différence de température entre extérieur et intérieur dépasse 10 °C [57].

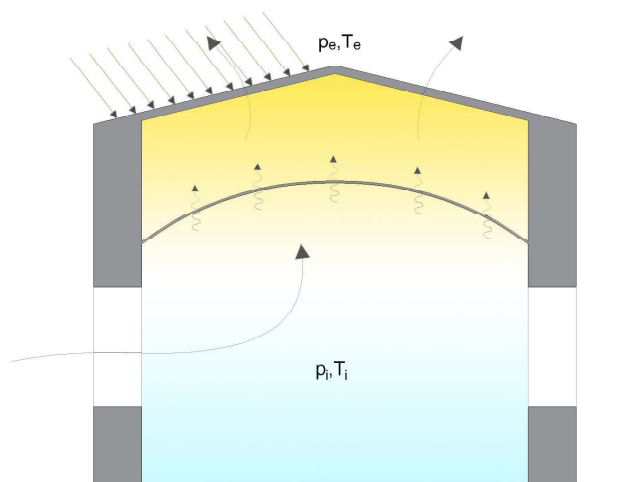


Fig. 3.5 – Ventilation naturelle par tirage thermique

L'importance accordée aux systèmes de contrôle de la ventilation passive aujourd'hui est motivée non seulement par la réduction de la consommation énergétique particulièrement dans la saison estivale mais aussi par la réduction des émissions de CO_2 [16, 120, 60]. Un autre apport de la ventilation naturelle concerne le confort intérieur des occupants [73]. Plusieurs recherches ont montré l'intérêt de la ventilation naturelle du point de vue des performances énergétiques du bâtiment. Cependant, les avantages sont variables, car ils dépendent de l'orientation du bâtiment, de sa forme, du type de matériaux utilisés et du contexte climatique local. A titre d'exemple, nous mentionnons ici les résultats de Genova [53], obtenus par une simulation thermique dynamique pour trois catégories différentes de bâtiments traditionnels à Palerme. En ce qui concerne la période estivale, les résultats montrent que le recours à la ventilation naturelle et aux systèmes d'ombrage garantit des conditions de confort à l'intérieur. Ainsi, la plupart des valeurs de température opérative répondent aux critères de confort thermique de la norme UNI 15251 :2008.

3.0.3 Les systèmes de protection des apports solaires

Nos analyses exposées dans le Chapitre 1 montrent l'importance centrale accordée dans l'architecture traditionnelle de Palerme à l'accès de la radiation directe sur les façades des bâtiments et à l'influence des obstructions environnantes. Il s'agit des éléments d'obstruction qui génèrent une ombre portée sur les façades ou bien de l'utilisation correcte des matériaux, de la couleur et de la texture des surfaces de l'enveloppe.

Dans l'architecture traditionnelle, la présence des patios et des balcons est fondamentale pour le contrôle de la radiation solaire. Le patio joue aussi un autre rôle important lié à ses dimensions au sol et en hauteur. Les simulations réalisées sur les canyons urbains montrent que la présence de ce vide dans le tissu urbain est essentielle pour réduire la pénétration de la radiation solaire dans les locaux (cf.

Paragraphe 1.3.2). Plusieurs recherches sur la relation entre la compacité du bâti et l'accès solaire dans les tissus urbains ont mis en évidence qu'une augmentation de la compacité urbaine entraîne une diminution de la disponibilité de l'énergie solaire dans le tissu urbain et une augmentation de l'intensité des îlots de chaleur dans la zone urbaine, en particulier la nuit [29, 86, 51]. Malgré ces résultats, la compacité urbaine peut avoir des conséquences différentes en ce qui concerne la performance énergétique des bâtiments dans le climat méditerranéen, où la demande de refroidissement est tout aussi importante que celle de chauffage. En effet, selon Salvati et al. [111], la diminution du rayonnement solaire due à l'augmentation de la compacité urbaine a un impact positif sur la demande de refroidissement (environ 20% en moins dans un tissu urbain avec 80% d'obstruction par rapport à un tissu avec 20% d'obstruction). D'autre part la demande d'énergie de réchauffement augmente dans une moindre mesure en raison des effets de l'augmentation d'îlot de chaleur [111]. Les balcons assurent la même fonction d'atténuation de la radiation solaire. Leur présence sur les façades et l'ombre portée qui en résulte réduit la quantité de radiation solaire tout au long de la journée.

La couleur joue un rôle fondamental dans le contrôle du facteur solaire. Aujourd'hui comme hier, une attention particulière est portée au choix de la couleur dans les régions à climat méditerranéen, car la couleur claire peut contribuer de manière importante au contrôle de la radiation solaire. La tradition palermitaine d'imbiber les tuiles canal des toitures avec du lait de chaux pour assurer une plus forte réflexion de la radiation solaire en est une preuve (Fig.3.6).

Nous avons montré l'éclairage urbain dans les canyons urbains à Palerme avec deux valeurs différents de réflectance. Une valeur de réflectance élevée réduit les températures de surface de la finition extérieure des bâtiments, générant ainsi des températures plus basses dans les environnements intérieurs [94]. Plusieurs recherches montrent que les matériaux ou peintures «froides» et réfléchissantes représentent un moyen efficace pour faire face à la fois à l'augmentation de la consommation d'énergie en été sans modifier sensiblement les caractéristiques esthétiques [125, 112, 79]. Ces revêtements réfléchissants solaires peuvent être appliqués sur les parties horizontales, produisant ce qu'on appelle un «toit froid» ou sur les façades. Ils permettent de refléter la lumière du soleil au lieu de l'absorber. On peut mentionner par exemple les recherches de Bansal et al. [13] sur l'effet que la couleur de surface externe a sur le comportement thermique d'un bâtiment. Ils constatent que l'enveloppe peinte en noir enregistre une température maximale supérieure de 7 °C à celle de l'enveloppe blanche pendant les heures de rayonnement solaire maximum. Zinzi et al. [139] ont évalué les propriétés solaires des revêtements écologiques froids et les avantages qui en résultent pour les applications de construction dans différentes localités méditerranéennes. Ils ont montré l'influence des matériaux froids sur la performance énergétique, qui conduisent à de fortes réductions de demande d'énergie et en améliorant les conditions thermiques dans l'environnement bâti. Mansouri et al. [75] estiment l'effet de la réflectivité des matériaux sur les besoins annuels en énergie pour le chauffage et le refroidissement dans la région méditerranéenne. Les résultats montrent que la mise en place d'un matériau de réflectivité égal à 0.5 détermine une réduction en besoin d'énergie de refroidissement de 22% par rapport à un enveloppe avec réflectivité égal à 0.1. Cependant la mise en place d'un revêtement de haute



Fig. 3.6 – Toiture en tuiles canal et lait de chaux

réflectivité solaire génère une augmentation du besoin d'énergie de réchauffement de 18% en hiver. Dans le bilan global annuel les besoins d'énergie peuvent diminuer de 4%.

3.0.4 L'inertie

Une partie importante de notre travail a été dédiée à la caractérisation thermo-hygro-métrique de l'enveloppe. Les analyses et les recherches historiques et bibliographiques effectuées montrent que les propriétés physiques de la pierre de calcarénite dans l'enveloppe opaque ont une importance fondamentale quant à la capacité de retarder le flux de chaleur grâce à ses caractéristiques de diffusivité et effusivité.

Les analyses de De Blasi et Castiglia sur les pierres de calcarénite extraites dans les principaux secteurs voisins de Palerme à la fin du XIX^e siècle portaient sur leur porosité, leur capillarité de saturation et leur perméabilité à l'air. Nous avons démontré que la quantité d'air qui passait de l'extérieur à l'intérieur n'est pas considérable en terme de renouvellement d'air. Les résultats des analyses dynamiques des différents types d'enveloppe mettent en évidence des valeurs élevés de déphasage. Plusieurs recherches [37?] ont montré l'importance de l'inertie thermique dans l'analyse des enveloppes pour le confort d'été. Le rôle de ce paramètre a ainsi été reconnue par les réglementations nationales concernant les économies d'énergie dans les bâtiments [36]. Des études basées sur des simulations dynamiques et des tests de monitoring ont prouvé que les enveloppes massives sont capables de réduire considérablement l'inconfort thermique intérieur pendant l'été. Stephan et al.[122] ont montré, dans le cas particulier d'Angers, que la différence en terme de demande énergétique dans les bâtiments comportant des murs à faible inertie par rapport aux murs à forte

inertie atteint 20% pour la demande d'énergie de refroidissement, et près de 10% en énergie de chauffage demandée, permettant des économies d'énergie.

Bien que plusieurs recherches s'intéressent aux propriétés thermiques dynamiques, la capacité thermique effective n'est pas encore considérée comme l'un des paramètres de conception. Aste et al. [11] affirment qu'il n'est pas convenable de concevoir des bâtiments économes en énergie en utilisant seulement une approche basée sur la valeur de transmittance stationnaire U et que le rôle de l'inertie thermique, c'est-à-dire l'effet positif de la capacité thermique, semble être pertinent en particulier pour la région méditerranéenne.

L'étude menée sur les ponts thermiques au troisième chapitre propose une nouvelle méthode pour le calcul de ces éléments avec une prise en compte de la capacité thermique des nœuds étudiés. Les ponts thermiques augmentent les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été en augmentant la demande énergétique du bâtiment pour le chauffage et le refroidissement [40]. Dans le bilan global d'un bâtiment, les ponts thermiques linéiques sont pris en compte avec une transmission thermique linéique Ψ , définie comme le transfert de chaleur par unité de longueur et par unité de différence de température entre les deux environnements [1]. Plusieurs recherches [40, 126] ont étudié l'impact des ponts thermiques sur la performance énergétique d'un bâtiment. Theodosiou et al. [126] considèrent que le 5 % de l'énergie demandé est dû à la présence d'un pont thermique dans le cas d'un bâtiment avec isolation par l'extérieur, Mao [76] rapporte que, les ponts thermiques demandent jusqu'à 39 % d'énergie dans le cas d'une maison uni-familiale en Grèce.

Malgré leur impact sur la demande énergétique du bâtiment, la directive européenne 2002/91/CE sur les performances énergétiques des bâtiments ne mentionne explicitement aucune action contre les ponts thermiques. Néanmoins, les réglementations nationales traitent cette question, bien qu'à différents niveaux. A titre d'exemple, en France, l'arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, fixe les valeurs de Ψ à ne pas dépasser ($0,65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les logements, $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les immeubles d'habitation et $1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour les autres bâtiments). En réalité, les autorités ne contrôlent généralement pas le respect de ces contraintes [41].

En Italie, les réglementations nationales [36] n'imposent pas une valeur maximale de Ψ ; cependant, si le facteur de transmission thermique supplémentaire ΔU dû aux ponts thermiques dépasse de plus de 15 % la transmittance thermique U de l'enveloppe, l'effet des ponts thermiques ne peut pas être négligé, et la transmittance globale ($U + \Delta U$) doit être prise en compte au regard des valeurs maximales prévues [41]. On accorde une plus grande importance à cette question pour les bâtiments neufs que pour les bâtiments anciens.

Aujourd'hui les logiciels de simulation énergétique pour les bâtiments (*BES*, *building energy simulation*), fournissent de plus en plus un résultat proche de la demande d'énergie réelle [123]. L'analyse en régime dynamique permet de mieux prendre en compte des conditions réelles et présente de grands avantages pour le dimensionnement des installations, les techniques de contrôle, l'utilisation des matériaux. Ainsi, les calculs dynamiques effectués sur les différents ponts thermiques du bâti traditionnel à Palerme (plancher et balcons) ont montré que la prise en

Les valeurs bioclimatiques de l'architecture traditionnelle

compte de l'inertie du composant constructif réduit considérablement les effets de pont thermique d'origine géométrique (présence de coin et d'angle).

Chapitre 4

La réhabilitation

Résumé : Le bagage de connaissances liées aux aspects bioclimatiques de l'architecture traditionnelle peut être dirigé vers deux interventions : la réhabilitation du bâti existant et la conception du bâti neuf. Dans ce chapitre, nous étudions les interventions possibles dans le cas de la réhabilitation. Nous présentons les propriétés des matériaux à changement de phase. Ces matériaux sont des substances qui ont la capacité de passer du solide au liquide et vice versa dans une gamme de températures qui peuvent être utilisées pour le stockage d'énergie. Nous étudions les interventions possibles de ces matériaux visant l'enveloppe du bâti traditionnels à Palerme. Pour ce faire, nous introduisons le cadre normatif associé à la tutelle du patrimoine culturel et paysager à Palerme, et le cadre normatif relatif aux standards de performances énergétiques.

Riassunto : Il bagaglio di conoscenza sugli aspetti bioclimatici dell'architettura tradizionale può mirare a due possibili tipi di applicazioni : la riabilitazione degli edifici esistenti (affrontata nel presente capitolo) e la progettazione degli edifici di nuova costruzione (esaminata nell'ultimo capitolo). Si introducono inizialmente i materiali a cambiamento di fase (MCP) capaci di passare dallo stato solido allo stato liquido in un intervallo di temperature che permette lo stoccaggio d'energia. Si analizzano dei possibili interventi sull'involucro storico di Palermo, attraverso una metodologia comparativa con le applicazioni più comuni di isolamento termico. A tal fine, introduciamo brevemente il contesto normativo sulla tutela del patrimonio culturale e paesaggistico a Palermo e il contesto normativo sugli standards delle prestazioni energetiche.

4.1 Architecture traditionnelle : quel profit aujourd'hui ?

La valeur de témoignage et de patrimoine reconnue à l'architecture traditionnelle méditerranéenne est sûrement une motivation pour tenter de récupérer les des savoirs et savoir-faire oubliés. Il ne s'agit pas seulement d'affirmer une valeur identitaire, de conserver une mémoire mais aussi d'agir pour améliorer ce patrimoine.

La réhabilitation du bâti historique ne peut pas reposer sur la seule nécessité de conserver les valeurs identitaires et sociales qu'ils lui sont propres mais elle doit tendre à une amélioration par rapport à un contexte environnementale qui change de plus en plus. La durabilité environnemental vise alors, dans le contexte du bâti historique à préserver ce patrimoine et à réduire son impact sur l'environnement. L'amélioration énergétique du bâti existant doit faire face à une contrainte de tutelle et préservation, tout en tenant compte des principes de réversibilité et réparabilité de l'intervention.

L'objectif d'amélioration énergétique du bâti historique est facilité dans la région méditerranéenne par l'attention portée au contexte climatique local, propre à cette architecture. La mise en place d'interventions visant à exploiter et rétablir certains expédients déjà présents dans le bâti traditionnel reste fondamentale [53].

Lors de la conception d'une intervention visant à améliorer la performance énergétique d'un bâtiment historique, le processus de développement du projet architectural doit prendre en compte plusieurs facteurs : les caractéristiques historiques à protéger, l'utilisation finale du bâtiment dans son ensemble, l'énergie et le confort des personnes. Il n'est pas toujours possible d'opérer librement, surtout si l'on considère que l'attitude liée à la nécessité d'intervenir «énergétiquement» peut contre-carrer le désir de conservation et, dans certains cas, être presque inconciliable.

Comment intervenir dans un projet de réhabilitation énergétique en région méditerranéenne ? Quels nouveaux matériaux sont à introduire ?

L'amélioration énergétique du bati traditionnel existant implique de mener des interventions de réhabilitation satisfaisant aux exigences de confort d'été et à celles durables, en accord direct avec la pérennité du patrimoine bâti.

Dans ce chapitre, nous étudions des interventions possibles. Ces propositions, dont la liste n'est pas exhaustive, ne représentent pas en elles mêmes un projet mais des exemples de dispositifs pour une réhabilitation durable en région méditerranéenne. La recherche de nouvelles solutions à intégrer au processus de réhabilitation énergétique étant une étape essentielle, notre recherche s'est portée sur des applications capables de répondre aux stratégies définies dans le chapitre précédent.

La recherche de nouveaux matériaux et systèmes en vue de réduire la consommation d'énergie nous oriente vers la mise en place de composants d'enveloppe thermiquement améliorés, capables d'atténuer la transmission de chaleur, de déplacer l'instant du pic et de réduire la charge de pointe elle-même. Nous présentons tout d'abord les matériaux à changement de phase, qui s'avèrent prometteurs dans le domaine de la réhabilitation du bâti existant. Dans un deuxième temps, nous examinons les interventions possibles sur l'enveloppe du bâti traditionnels.

4.1.1 Nouveaux matériaux pour la réhabilitation : les matériaux à changement de phase (MCP)

Dans les chapitres précédents, nous avons traité la question du stockage de l'énergie dans des matériaux par chaleur sensible. L'énergie stockée dépend de la masse de matériau, de sa capacité thermique massique et du différentiel de température. Dans ce paragraphe nous examinons le stockage d'énergie thermique par chaleur latente qui est une technique particulièrement intéressante car elle fournit une densité de stockage d'énergie élevée [4]. Comparé à un système de stockage d'énergie thermique classique, le système de stockage d'énergie thermique latente nécessite un poids et un volume de matériau plus faibles pour une quantité d'énergie donnée. De plus, le stockage de chaleur latente a la capacité de stocker la chaleur de fusion à une température constante ou presque constante qui correspond à la température de transition de phase du matériau à changement de phase (MCP)[10].

Les matériaux à changement de phase sont des substances qui ont la capacité de passer du solide au liquide et vice versa dans une gamme de températures qui peuvent être utilisées pour le stockage d'énergie. Pendant la transition de phase, on observe une rupture des liaisons intermoléculaires et/ou moléculaires. La transition de phase commence lorsque la température atteint le point de fusion. Pendant la transition de phase, qui nécessite une grande quantité d'énergie, le matériau se maintient à une température proche du point de fusion. Dans la solidification, le processus inverse a lieu, avec la libération de l'énergie thermique et la transition vers l'état solide (Fig.4.1). Chaque type de matériau à changement de phase se caractérise par une température de fusion et une valeur de chaleur de fusion latente [4].

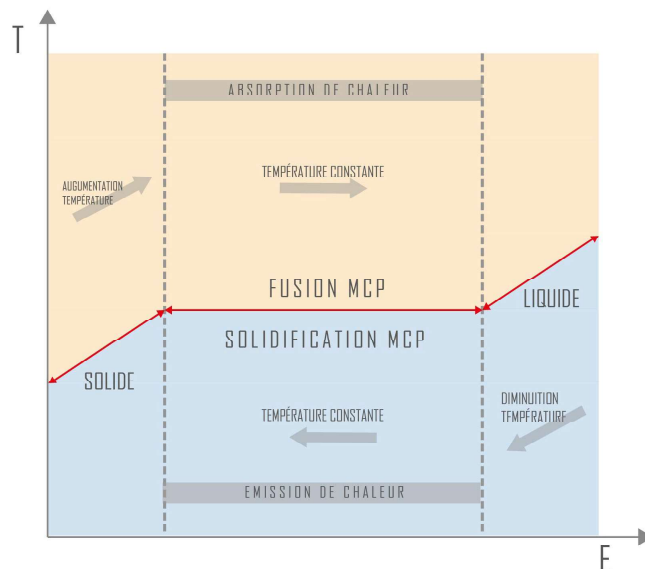


Fig. 4.1 – Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase

Les MCP peuvent être des substances organiques, inorganiques ou eutectiques (Fig. 4.2). Les substances organiques sont subdivisées en paraffines et en acides gras, tandis que les substances inorganiques en sels et métaux hydratés.

Les premières études sur le stockage de chaleur latente se sont concentrées sur la fusion-solidification de sels hydratés à faible coût et facilement disponibles, qui offraient initialement les plus grandes promesses. Cependant, des phénomènes tels que la surfusion et la séparation de phase affectent souvent le comportement thermique de ces matériaux et provoquent une variation aléatoire ou une dérive progressive de la zone de transition à la suite de cycles répétés de changement de phase [69]. Afin d'éviter certains des problèmes inhérents aux MCP inorganiques, l'intérêt s'est porté sur une nouvelle classe de matériaux : les substances organiques anhydres telles que le polyéthylène glycol, les acides gras et leurs dérivés et les paraffines. Ces matériaux ont d'abord été rejetés parce qu'ils sont plus coûteux que les hydrates de sel courants et parce qu'ils ont une capacité de stockage de chaleur un peu plus faible par unité de volume [90]. La stabilité physique et chimique, le bon comportement thermique et la zone de transition réglable les rendent aujourd'hui plus répandus [69]. Contrairement aux deux premières catégories qui sont des substances pures, les MCP eutectiques sont des mélanges de différentes substances, organiques et inorganiques. On obtient ainsi des mélanges ayant différentes températures de fusion, différentes propriétés thermophysiques et une meilleure stabilité, d'où une plus grande durabilité [97].

Un MCP idéal doit remplir un certain nombre de critères [69, 63] :

- **Propriétés thermiques :**
 - Une plage ou une température de changement de phase proche de la température de confort humain (20°C) ;
 - Une chaleur latente volumique élevée
 - Une conductivité thermique suffisante pour assurer les transferts de chaleur dans le matériau.
- **Propriétés physiques :**
 - Une grande densité.
 - Une dilatation volumique faible.
- **Propriétés cinétiques :**
 - Pas d'effet de surfusion.
 - Un taux de cristallisation suffisant.
- **Propriétés chimiques :**
 - Une stabilité chimique à long terme.
 - Pas de toxicité.
 - Une résistance au feu suffisante pour les normes en vigueur dans la construction.

Parmi les différentes applications possibles des matériaux à changement de phase dans le secteur de la construction, on distingue deux méthodes : l'intégration directe et l'encapsulation avant intégration [63]. Dans le premier cas, les MCP sont intégrés lors de la fabrication dans les matériaux de construction ou ils sont intégrés dans les autres éléments du bâtiment. Dans le deuxième cas, les MCP sont encapsulés dans des sphères ou cylindres de petite taille (micro encapsulation), soit ils sont emballés dans des contenants (macro encapsulation) [9] (Fig.4.3).

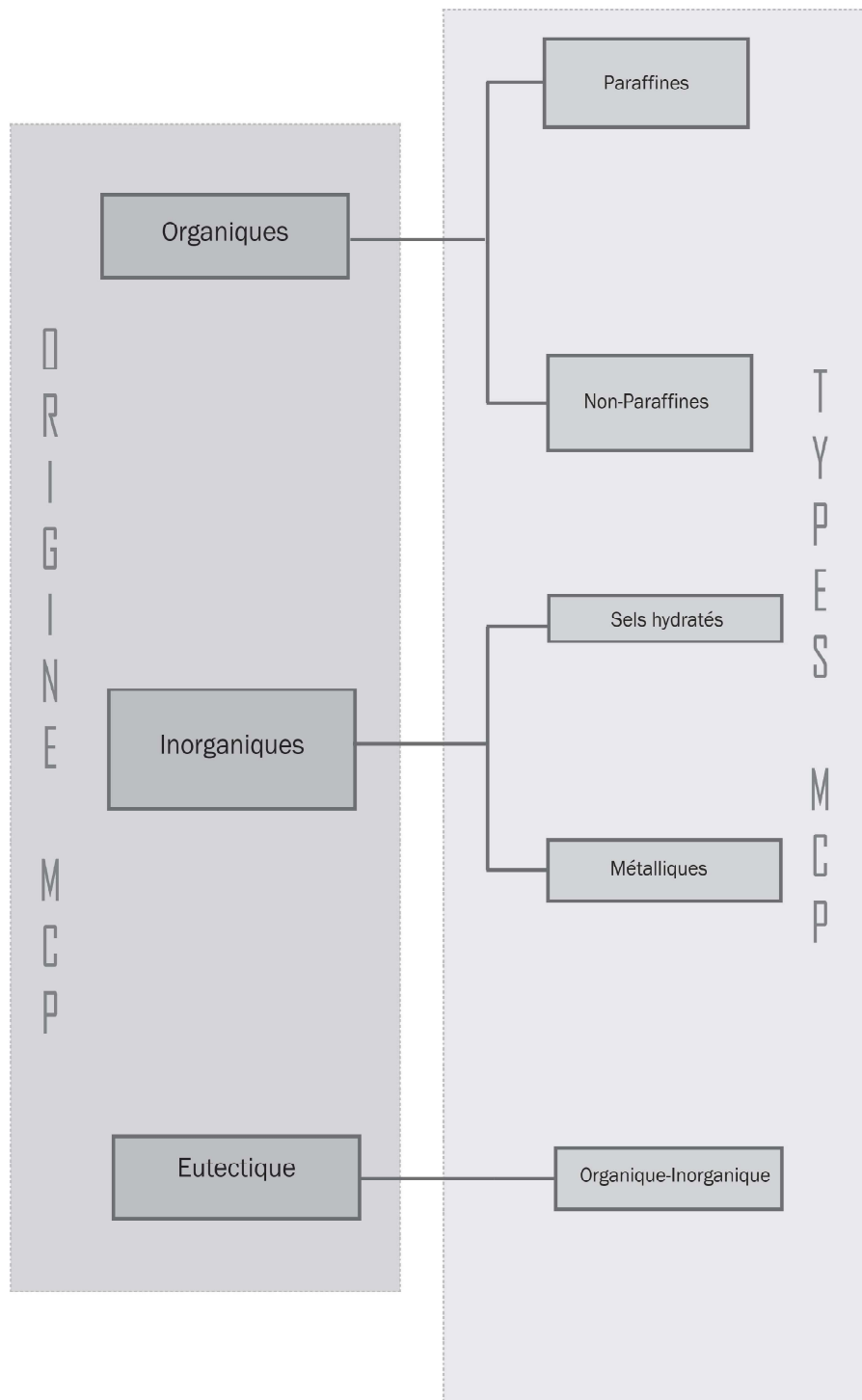


Fig. 4.2 – Classification des matériaux à changement de phase

La réhabilitation

Une des applications possibles des matériaux à changement de phase dans le secteur de la construction se situe dans la stratigraphie de l'enveloppe : cette application peut présenter plusieurs variantes, selon la technologie, le fonctionnement ou les avantages. Elles peuvent opérer à la fois dans le domaine de la rénovation et du bâti neuf pour augmenter l'inertie thermique du bâtiment avec les technologies légères et sèches.

Dans les zones climatiques «chaudes», les applications visent à réduire la consommation d'énergie de chauffage et à améliorer le confort interne, grâce à l'augmentation de l'inertie thermique apportée par une couche de MCP qui est placée dans la stratigraphie, généralement près du revêtement externe. Une autre application possible concerne les MCP, mélangés avec du gypse, pour la réalisation de plaques de plâtre internes. On peut aussi intégrer des MCP à l'enduit. Cette application sera étudiée dans le paragraphe suivant .

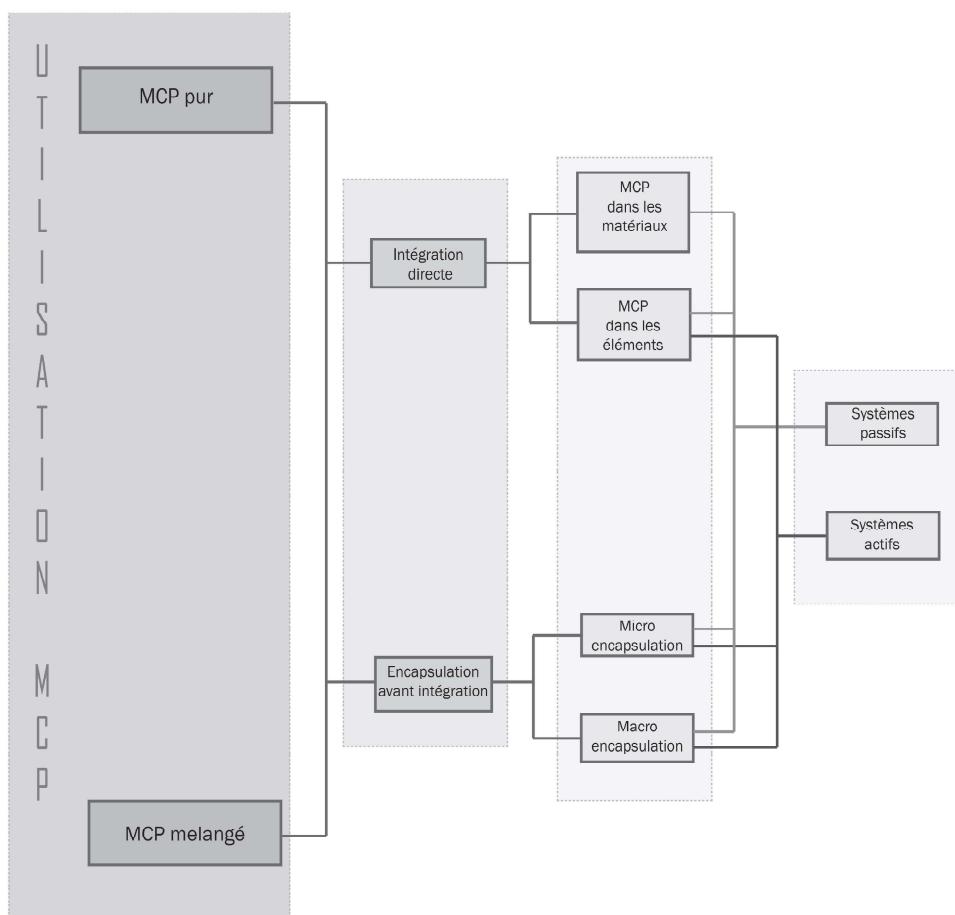


Fig. 4.3 – Différents modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment

4.2 Les dispositifs visant l'enveloppe

Nous présentons dans ce paragraphe des interventions possibles de réhabilitation sur le bâti existant. Pour ce faire nous introduisons le cadre normatif associé à la tutelle du patrimoine culturel et paysager à Palerme, et le cadre normatif relatif aux standards de performances énergétiques. Nous proposons des interventions possibles sur le bâti existant. Ces types d'intervention concernent l'enveloppe du bâtiment (murs et toiture).

Cadre normatif à Palerme

La tutelle des bâtiments reconnus comme patrimoine culturel ou patrimoine paysager en Italie est réglementée par le décret législatif 42 de 2004. Dans le cas du patrimoine culturel, toute intervention sur ce bâti est soumise à contrôle et, dans le cas du patrimoine paysager, seulement les interventions qui modifient l'aspect extérieur du bâtiment. La loi régionale sicilienne 71 de 1978 renvoie à l'avis de la *Soprintendenza*, organe administratif qui gère les patrimoines culturels et paysagers, pour toute intervention sur le bâti dans les centres historiques des villes.

Néanmoins, selon les typologies du bâti identifiées dans le P.P.E de la ville de Palerme (cf. Paragraphe.1.1), il est possible d'effectuer deux types différents d'intervention : la restauration et la réhabilitation.

Selon le P.P.E, la restauration «consiste en un ensemble systématique de travaux visant à préserver une unité de construction en respectant ses éléments formels et structuraux, ses caractéristiques typologiques et les usages actuels, sauf lorsque les normes pour les différents types prévoient la restauration d'usages originaux ou d'autres destinations compatibles avec le bâtiment. Les règles pour les différents types peuvent permettre une reconstruction limitée des parties manquantes selon les modalités de la restauration philologique [...], ou de nouveaux volumes accessoires dans les cas où une altération irréversible de l'ancienne structure s'est produite».

La réhabilitation «consiste en un ensemble systématique de travaux visant à transformer partiellement une unité de construction, en préservant une partie de ses éléments typologiques, formels et structurels et ses caractéristiques typologiques et en assurant sa fonctionnalité pour des destinations compatibles avec le bâtiment. Ce type d'intervention comprend la restauration ou le remplacement de certains éléments constructifs ; l'introduction de nouveaux éléments et installations techniques ; le réaménagement des connexions horizontales et verticales, des services et de la distribution interne». La réhabilitation peut inclure la reconstruction (dans les modalités de la restauration philologique et typologique) d'une partie du volume original, détruite ou à démolir pour la reconstruire plus durablement, et l'ajout de nouveaux volumes accessoires, à condition que ces opérations impliquent des parties mineures du bâtiment.

La restauration est alors obligatoire pour l'architecture majeure, les *Palazzi* et les *edifici speciali civili et religiosi*. La réhabilitation est possible pour l'architecture mineure, définis dans le P.P.E par les typologies *catoio semplice* et *catoio multiplo*. Pour la typologie *Palazzetto*, la réhabilitation est possible sauf prescription exceptionnelle.

La réhabilitation

Pour le bâti d'après-guerre, selon le zonage prévu dans le *Piano regolatore generale*, des interventions de réhabilitation jusqu'à la démolition et reconstruction sur le bâti sont permises sans avis de la *Soprintendenza*.

Au sujet des prescriptions concernant l'efficacité énergétique du bâti, la norme nationale italienne sur l'efficacité énergétique (D.M. 26 Juin 2015 [35]) fixe pour chaque zone climatique les valeurs de transmittance à respecter pour les bâtiments neufs et pour les bâtiments existants soumis à un réhabilitation énergétique.

Concernant les paramètres dynamiques la norme italienne ne fixe pas de valeurs limites de déphasage à respecter, mais pour assurer un bon niveau de confort estival et une inertie thermique adéquate, la norme fixe une masse superficielle supérieure à $230 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ou une transmittance périodique Y_{IE} inférieure à $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ seulement pour les parois verticales non exposées nord-ouest, nord et nord-est [35]. Pour les toitures, la norme ne prévoit pas de valeurs limites de masse superficielle, mais impose une valeur de transmittance périodique $Y_{IE} < 0.20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. La norme italienne ne donne pas de préconisations pour le facteur d'amortissement ou de déphasage. On trouve quelques indications dans le décret du Ministère du Développement Économique du 26 juin 2009, qui définit cinq classes de prestations pour la certification énergétique de la qualité thermique estivale des bâtiments (Tableau 4.2).

Tableau 4.1 – Valeurs maximales de transmittance thermique pour la zone climatique B

Type de composant	U limite $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Enveloppe partie opaque (verticale)	0.45
Toitures	0.38

Tableau 4.2 – Classification qualitative des bâtiments

déphasage Φ h	facteur d'amortissement f_a adimensionnel	Qualité de prestation
$S > 12$	$f_a < 0.15$	<i>I</i>
$12 \leq S > 10$	$0.15 \leq f_a < 0.30$	<i>II</i>
$10 \leq S > 8$	$0.30 \leq f_a < 0.40$	<i>III</i>
$8 \leq S > 6$	$0.40 \leq f_a < 0.60$	<i>IV</i>
$6 \leq S$	$0.60 \leq f_a$	<i>IV</i>

4.2.1 Les interventions sur les murs du bâti traditionnel

Dans la première partie de ce travail, nous avons analysé la contribution positive des murs en pierre de calcarénite au regard des performances thermiques. En effet, en raison de la grande épaisseur des murs et également de la capacité thermique de la pierre locale, on obtient des valeurs de déphasage élevées.

Cependant, si l'on considère la transmittance thermique de ces types de murs, nous sommes bien loin des valeurs établies par la norme nationale italienne sur l'efficacité énergétique (D.M. 26 Juin 2015 [35]).

L'application d'une isolation par l'extérieur, utilisée surtout sur les façades du bâti mineur qui ne donnent pas sur rue, présente néanmoins de grandes désavantages formels. De fait, elle entraîne souvent des problèmes géométriques liés à la présence d'éléments de décor, aux dimensions des ouvertures et à l'alignement des bâtiments mitoyens (Fig. 4.4).

L'application d'une isolation par l'intérieur permet de conserver l'enduit historique extérieur, pratique plus compatible avec les critères de durabilité de l'intervention de réhabilitation, en préservant la valeur de la façade comme «document» de la culture constructive. Cependant, ce dispositif réduit la surface utile à l'intérieur et pourrait créer des problèmes de condensation à cause de la température plus basse sur la surface intérieure du parement. Une autre type d'intervention peut consister en la mise en place d'un revêtement d'enduit constitué de MCP à l'extérieur de l'enveloppe. Ce type d'intervention est plus adapté dans le cas d'un mauvais état de l'enduit existant, car elle permet d'améliorer les performances thermiques tout en gardant l'aspect formel de la façade. De plus, ce type d'intervention n'entraîne pas de modifications géométriques de l'épaisseur. Les MCP peuvent être aussi appliqués comme enduit intérieur sans modification de surface utile.

Dans une optique d'évaluation des améliorations thermiques, nous voulons comparer ces différents dispositifs de retrofit du parement au regard des performances thermiques. Nous considérons le mur de type B dont les caractéristiques géométriques sont décrites au deuxième chapitre (cf. Paragraphe 2.2.2). Sur ce parement, nous effectuons les actions de retrofit décrites ci-dessus : isolation par l'extérieur (T1), isolation par l'intérieur (T2), enduit à changement de phase par l'extérieur (T3).

Nous appliquons une isolation par l'extérieur et par l'intérieur en laine de roche avec les caractéristiques définies dans le Tableau 4.3 et avec une épaisseur de 0.04 m (Fig. 4.5) afin d'assurer la transmittance $U=0.45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. L'enduit que nous choisissons est un enduit thermique à haute capacité de stockage thermique. Il contient 50% de MCP, utilisant exclusivement de la cire végétale microencapsulée. Le point de fusion se situe à 22.5°C et la chaleur latente est de 103J/g .

Nous effectuons une simulation à l'aide du logiciel Cast3m en régime stationnaire (Eq.2.1) et en régime dynamique (Eq.2.19) avec les conditions aux limites définies dans le paragraphe 2.2.2 afin de définir les valeurs des transmittances thermiques et du déphasage.

Le Tableau 4.6 montre qu'avec les actions T1 et T2, on obtient une réduction de transmittance thermique importante avec seulement 0.04 cm d'épaisseur. La trans-

La réhabilitation

mittance respecte la valeur maximale fixée par la norme à $0.45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Dans le cas T1 (isolation par l'extérieur) le déphasage augmente de 1.45 h et de 0.45 h avec l'isolation par l'intérieur. L'intervention de retrofit avec l'enduit extérieur MCP, tout en ne réduisant pas considérablement la transmittance thermique stationnaire, permet d'obtenir un déphasage de 15 h. L'inertie thermique du mur augmente, sans changement d'épaisseur, tout en assurant l'esthétique extérieure.



Fig. 4.4 – Exemple d'altération des ouvertures et des décorations résultant d'une intervention de retrofit de l'enveloppe par isolation par l'extérieur [8]

La réhabilitation

Tableau 4.3 – Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit T1

T1	épaisseur m	c $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	λ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	ρ $Kg \cdot m^3$
revêtement intérieur	0.02	900	0.7	1500
parement existant	0.60	1000	0.68	1300
couche d'isolant	0.04	2100	0.038	50
revêtement extérieur	0.02	900	0.7	1500

Tableau 4.4 – Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit T2

T2	épaisseur m	c $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	λ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	ρ $Kg \cdot m^3$
revêtement intérieur	0.02	900	0.7	1500
couche d'isolant	0.04	2100	0.038	50
parement existant	0.60	1000	0.68	1300
revêtement extérieur	0.02	900	0.7	1500

Tableau 4.5 – Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit T3

T3	épaisseur m	c $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	λ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	ρ $Kg \cdot m^3$
revêtement intérieur	0.02	900	0.7	1500
parement existant	0.60	1000	0.68	1300
revêtement extérieur MCP (winco-tech®)	0.02	1800	0.16	700

Tableau 4.6 – Valeurs des paramètres thermiques

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
État actuel	0.914	0.017	0.019	13.55
Type T1	0.419	0.005	0.011	15
Type T2	0.419	0.007	0.016	14.2
Type T3	0.836	0.017	0.020	15

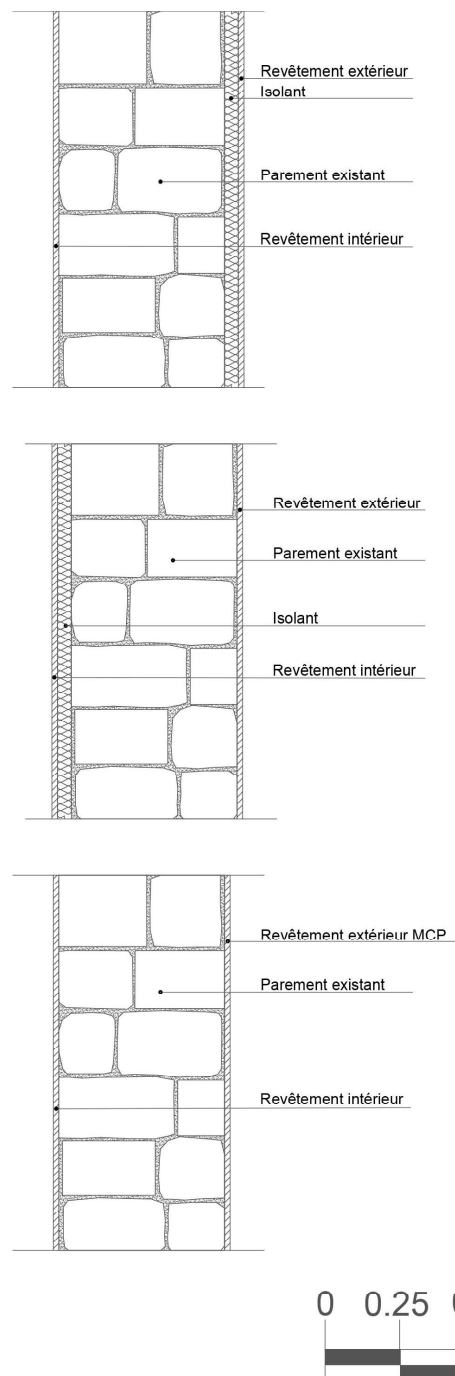


Fig. 4.5 – Actions de retrofit dans le parement existant. Isolation par l'extérieur (T1), en haut. Isolation par l'intérieur au centre (T2). Enduit à changement de phase par l'extérieur, en bas (T3)

La réhabilitation

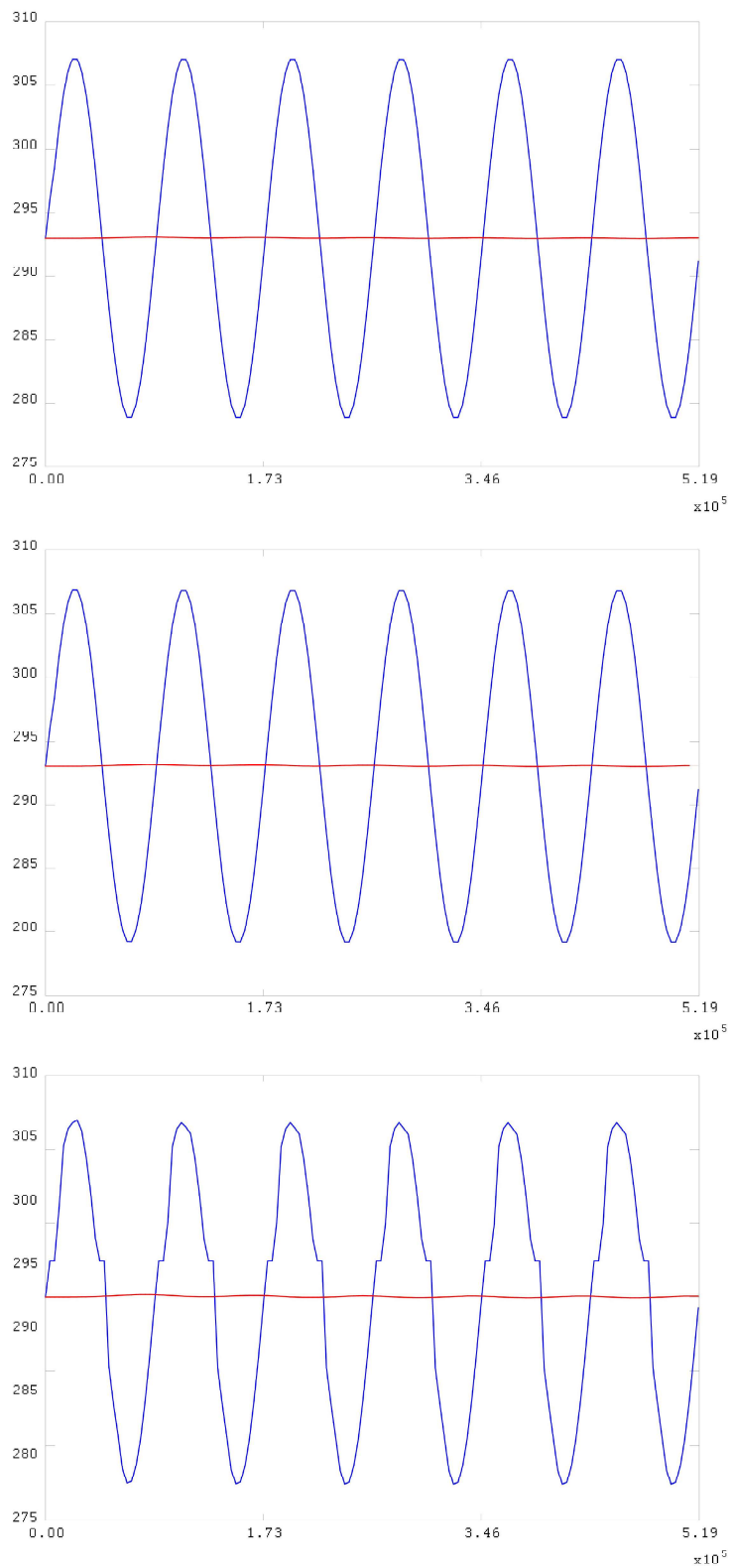


Fig. 4.6 – Évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue). Isolation par l'extérieur (en haut), isolation par l'intérieur (au centre), revêtement MCP (en bas)

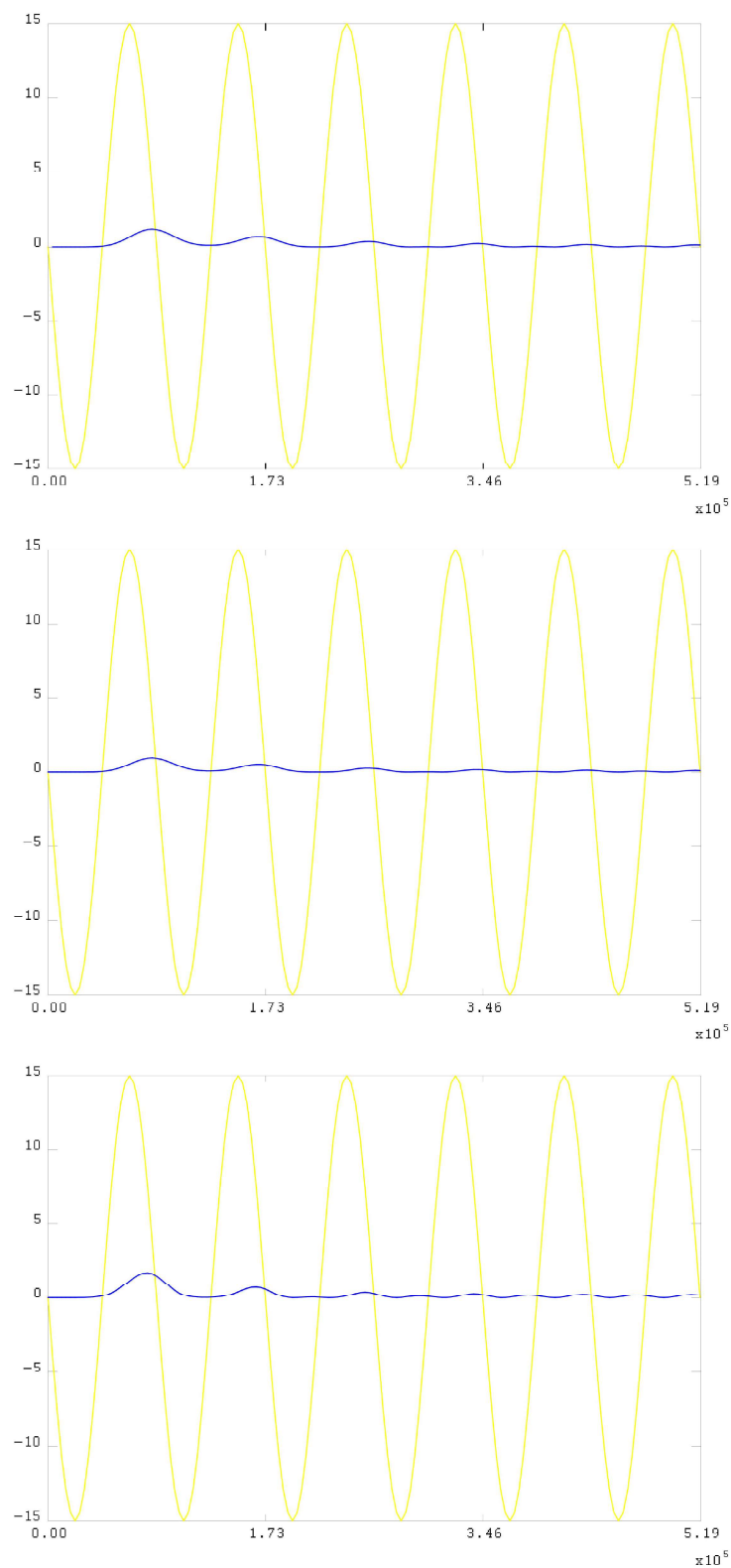


Fig. 4.7 – Flux de chaleur sur l'enveloppe (courbe bleue) et différence de température ΔT (courbe jaune). Isolation par l'extérieur (en haut), isolation par l'intérieur (au centre), revêtement MCP (en bas)

4.2.2 Les interventions sur les toitures traditionnelles

Les interventions concernant les composants horizontaux ont plus d'efficacité du point de vue énergétique s'elles sont effectuées sur les toitures [53]. En effet, les toitures représentent une partie importante de l'enveloppe, la plus exposée aux agents atmosphériques. Pour les toitures légères en bois et tuiles canal, les plus courantes à Palerme, l'intervention doit surtout viser à assurer les prestations énergétiques estivales. Le type de projet le plus répandu prévoit la mise en place d'une couche d'isolant dans la stratigraphie de la toiture. L'isolant peut être placé à l'intérieur (toiture froide) ou au dessous des tuiles canal (toiture chaude)(Fig. 4.8). La première action d'intervention présente l'avantage de ne pas modifier la hauteur du faitage mais en réduisant la hauteur sous plafond. La deuxième action est plus avantageuse du point de vue thermique grâce à la plus grande inertie thermique. Dans le cas d'une architecture ordinaire à Palerme, la hauteur du faitage peut être augmentée d'un maximum de 20 cm.

Les locaux sous toit sont soumis à de fortes amplitudes thermiques journalières et saisonnières, avec de mauvaises conditions de confort intérieur, mais ces locaux sont rarement habités. De ce fait, si l'on peut maîtriser les échanges ventilatoires avec l'extérieur, ils pourraient contribuer au contrôle thermique des locaux des étages inférieurs.

Un type d'intervention possible pourrait prévoir la mise en place d'une couverture ventilé innovante. Nous proposons ci-dessous un type d'action de retrofit avec la mise en place d'une couche isolante posée sur les planches existantes et d'une chambre d'air ventilée avec barrière radiative afin de favoriser la micro-ventilation sous les tuiles et de maintenir les températures à des valeurs plus basses par rapport à la toiture traditionnelle (Fig. 4.9). La Fig.4.10 montre le type d'intervention possible. Pour atteindre l'objectif de transmittance thermique, nous pouvons prévoir 14 cm d'isolant. Pour la barrière radiative, nous devons prendre en considération la diffusivité du matériau choisi. Si nous nous donnons comme limite géométrique de ne pas dépasser les 20 cm de surélévation du faitage pour limiter l'impact visuel, la chambre d'air ventilée pourrait avoir une dimension de 4.5 cm d'épaisseur et la barrière radiative 1.5 cm .

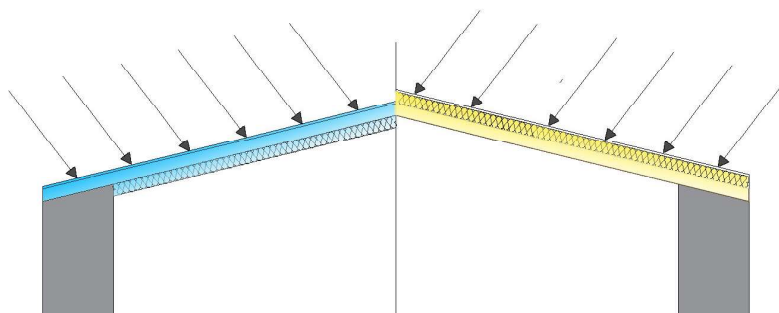


Fig. 4.8 – Toiture chaude avec isolation à l'extérieur (à droite). Toiture froide avec isolation à l'intérieur (à gauche)

La réhabilitation

La diffusivité thermique est définie comme le rapport de la conductivité thermique λ à la capacité calorifique volumique $\rho \cdot c$ et elle détermine la vitesse avec laquelle la chaleur se propage dans le matériau.

$$d = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4.1)$$

La relation entre l'épaisseur et le temps de diffusion de la chaleur à l'intérieur de la toiture ainsi conçue se formule en faisant le produit de la capacité calorifique par la résistance thermique de la barrière radiative. Nous pouvons écrire alors :

$$a = \frac{e^2}{2 \cdot t} \quad (4.2)$$

où :

a est la diffusivité ;

e est l'épaisseur de la couche de barrière radiative ;

t le temps d'exposition.

Avec un temps d'exposition de 7 h, la barrière radiative doit alors avoir une diffusivité égale à : $4 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Le choix d'une barrière radiative constituée par 1.3 cm de panneau OSB et 0.2 cm de feuille en aluminium perforé permet alors d'assurer une diffusivité de $1.5 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Ce type d'intervention permet donc de contrôler les apports solaires tout en augmentant l'inertie thermique de la toiture.

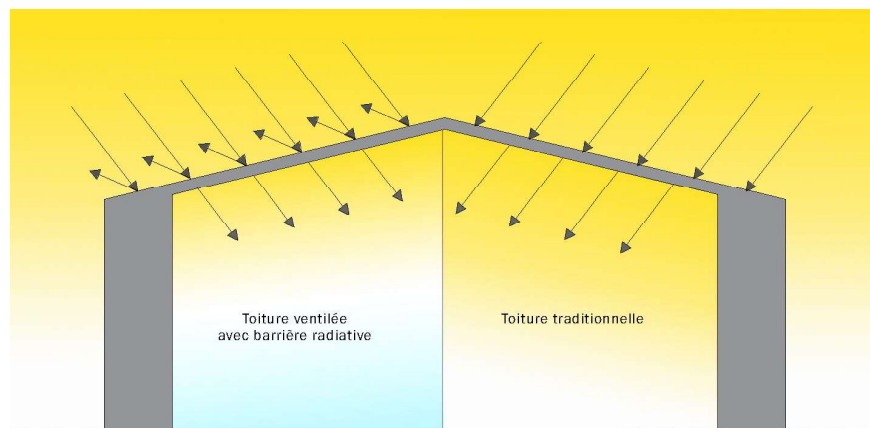


Fig. 4.9 – Action de retrofit sur la toiture. état existant (à droite) et intervention avec couche isolante et barrière radiative (à gauche)

La réhabilitation

Tableau 4.7 – Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit sur la toiture

	épaisseur m	c $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	λ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	ρ $Kg \cdot m^3$
tablier	0.02	2100	0.038	150
isolant	0.14	1450	0.034	33
chambre d'air ventilée	0.045	-	-	-
panneau OSB	0.015	1900	0.13	500
tuiles canal	0.02	840	1.2	1500

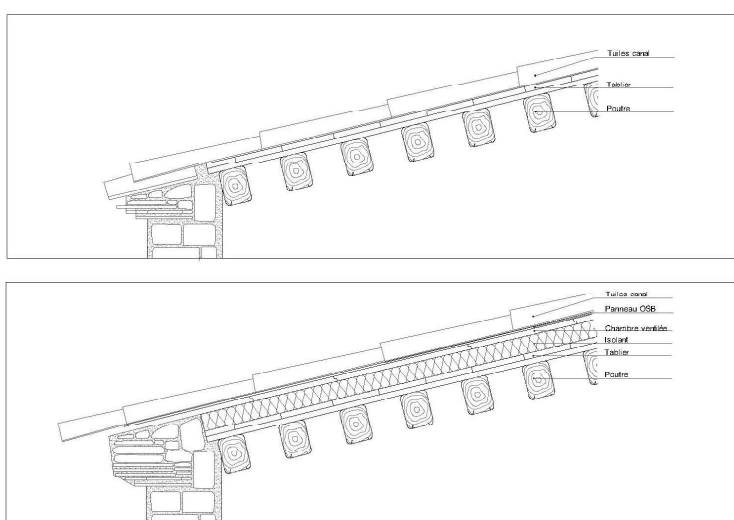


Fig. 4.10 – Action de retrofit sur la toiture. État existant (en haut) et intervention avec couche isolante et barrière radiative (en bas)



Fig. 4.11 – Panneau OSB avec feuille d'aluminium micro-foré

Chapitre 5

Le bâti neuf

Résumé : Dans ce chapitre, nous essayerons de comprendre comment les enseignements du passé peuvent apporter des pistes de réflexion pour l'architecture durable d'aujourd'hui et de demain. Notre hypothèse est que, dans la région méditerranéenne, la question de l'efficacité énergétique des bâtiments peut viser d'une part au stockage de l'énergie grâce à l'utilisation correcte des matériaux et de l'autre à la production d'énergie provenant des ressources renouvelables. Dans un premier temps nous considérons la filière de la pierre et le potentiel qu'apportent les outils numériques au retour de ce matériau de construction. Nous présentons ensuite la question de l'intégration photovoltaïque dans les bâtiments. Pour terminer nous présentons une nouvelle technologie photovoltaïque pouvant s'intégrer dans le bâtiment : les concentrateurs solaires luminescents.

Riassunto : In questo ultimo capitolo, si tratta la questione della progettazione dell'edilizia di nuova costruzione nella regione mediterranea. La nostra ipotesi è che l'efficienza energetica degli edifici mediterranei può mirare da una parte allo stoccaggio dell'energia, grazie alla corretta utilizzazione dei materiali da costruzione, dall'altro alla produzione di energia proveniente da risorse rinnovabili. In un primo momento si considera, allora, il ritorno della filiera della pietra e il potenziale dato dallo sviluppo di strumenti numerici in fase di progetto. In un secondo momento, viene presentata la questione dell'integrazione fotovoltaica negli edifici introducendo i concentratori a luminescenza solare. Un'applicazione di questi sistemi in un prototipo reale conclude, infine, questo capitolo.

Les réflexions sur l'architecture bioclimatique sont d'actualité aujourd'hui en raison de la croissance de la consommation d'énergie et du développement démographique. Pour faire face à ces questions, les normes européennes se multiplient afin de traiter les problèmes que posent la réduction des sources d'énergie non renouvelables, la croissance de consommation énergétique des bâtiments et l'amélioration de la santé et du confort de l'utilisateur. Dans un cadre normatif si restrictif, l'architecture bioclimatique n'est plus une option, mais devient une obligation pour les acteurs qui participent au processus de projet. Selon P.Fernandez et P.Lavigne [49], la complexité des contraintes énergétiques et environnementales, le système d'acteurs et les temporalités font intervenir des facteurs qui sont en amont et en aval du processus de conception, tels que par exemple la planification urbaine et l'évaluation du cycle de vie du projet. Ils introduisent la notion de «processus de projet» qui a donc une acception plus large que le processus de conception.

Ces questions nécessitent de revenir sur le concept de temps, qui gagne en importance dans l'architecture d'aujourd'hui et qui se base, dans la région méditerranéenne, sur l'architecture traditionnelle. Considéré comme la quatrième dimension de l'espace architectural, le temps renvoie à la nature dynamique d'un bâtiment, par opposition à l'image statique qu'on lui a donnée. Prendre en considération le temps en architecture, c'est mettre le bâtiment en relation avec des paramètres variables ; concevoir avec le temps, c'est trouver des solutions qui permettent à l'édifice de s'adapter à ces variations [88]. L'architecture traditionnelle méditerranéenne nous offre une clé de lecture pour le projet architectural durable d'aujourd'hui et de demain. Bien que les systèmes passifs mis en place, plus ou moins empiriquement, dans le bâti traditionnel apportent des avantages énergétiques, le mode de vie actuel et les performances énergétiques demandées au bâti d'aujourd'hui nous imposent la recherche de nouveaux matériaux et systèmes capables de répondre à des exigences de plus en plus élevées.

La demande d'innovation dans le processus du projet architectural et urbain durable pour le bassin méditerranéen implique une nouvelle approche orientée vers l'intégration de la connaissance de la culture architecturale et constructive ancienne avec de nouveaux traitements conceptuels et des méthodologies de conception contemporaines. Le projet architectural durable dans la région méditerranéenne doit être vu comme une synthèse équilibrée entre les principes de la tradition et de la technologie la plus moderne. Ainsi, la nécessité d'assurer le confort de l'utilisateur d'une part, et de réduire les consommations énergétiques du bâti de l'autre, nous porte à la fois à récupérer et améliorer les méthodes et les systèmes bioclimatiques passifs déjà mis en place dans l'architecture traditionnelle et à trouver de nouveaux systèmes et méthodes pour l'approvisionnement énergétique.

Comment réinterpréter les enseignements de la tradition aujourd'hui ? Comment penser le processus du projet aujourd'hui dans la Méditerranée ? Pour traiter ces questions, nous considérons d'abord le retour de la filière pierre en architecture et nous présentons ensuite une nouvelle technologie photovoltaïque pouvant s'intégrer dans le bâtiment. Comme pour le cas de la réhabilitation, nos propositions ne prétendent pas être la seule réponse à appliquer à tout contexte et site. Il s'agit plutôt de deux pistes prometteuses dans la démarche du projet bioclimatique en région méditerranéenne.

5.1 La filière de la pierre et les outils numériques

L'enveloppe du bâtiment a une fonction de médiation entre les conditions externes et internes; elle doit garantir la protection du bâtiment contre les agents atmosphériques et assumer l'identité figurative de l'architecture locale. La pierre est à la base de la capacité de l'enveloppe traditionnelle à stocker de l'énergie; ses propriétés permettent de prendre en compte des variations de la température extérieure et d'atténuer leurs effets.

Ces dernières années, les principaux thèmes de l'architecture durable ont porté sur l'utilisation de matériaux à faible impact environnemental, non nocifs et à faible teneur en énergie grise. Des nouvelles méthodes et normes ont été diffusées pour vérifier la consommation d'énergie grise dans les matériaux de construction. Ces normes visent à promouvoir l'emploi de techniques de construction écologique capables de réduire les impacts sur l'environnement à toutes les étapes du processus de conception, de construction et d'utilisation du bâtiment. La pierre est un matériau naturel et les recherches mettent en avant ses qualités, liées à un cycle de vie long, à une bonne résistance et à sa facilité d'entretien et de recyclage [87].

Toutefois, si l'on respecte la logique du développement durable, l'utilisation de la pierre implique aussi de contrôler son impact sur l'environnement dès le processus d'extraction, de la mise en œuvre et jusqu'à la fin de sa vie. En France, le Centre technique des matériaux naturels de construction (CTMNC) a démontré les atouts environnementaux de la pierre en mettant en évidence son faible impact écologique, lié à sa capacité de réemploi et à sa provenance de filières locales [87]. La pierre est un matériau qui peut participer à une démarche durable du processus de projet en région méditerranéenne, surtout si elle est extraite à proximité du site de chantier; elle peut être récupérée après des démolitions; elle est entièrement réutilisable et, en tout cas, recyclable. Le fait que son traitement n'entraîne aucune émission directe de gaz à effet de serre ni aucun risque de toxicité ajoute encore à son caractère de durabilité.

Un nouvel intérêt porté aux applications architecturales innovantes en pierre et en maçonnerie en général, a conduit au développement de plusieurs prototypes structuraux ces dernières années, grâce à l'apport des outils informatiques qui permettent d'associer à la modélisation numérique la mise en place de machines à contrôle numérique pour la réalisation des ouvrages [19, 106, 134]. L'utilisation de la pierre dans la construction, grâce à des technologies avancées et de nouvelles méthodes de conception numérique, s'avère prometteuse du point de vue des qualités environnementales et des avantages hygrothermiques [31]. La fabrication de pierres est liée à une industrie assistée par ordinateur hautement automatisée, énergiquement très efficace et produisant des quantités très limitées de déchets.

Le développement de l'utilisation de la pierre dans le marché immobilier nécessite néanmoins la résolution de problèmes liés à la liberté des formes architecturales et aux coûts de construction, activité souvent consommatrice de main-d'œuvre et de matériaux. La préfabrication peut représenter une solution à ces problèmes. La durée de construction sur site peut être considérablement réduite par l'utilisation de systèmes en pierre préfabriqués. De plus, des conditions de production contrôlées et des procédures et activités répétitives, associées à l'automatisation, peuvent

conduire à un niveau de qualité plus élevé. Potentiellement, la réduction des impacts environnementaux du projet et la minimisation du gaspillage pourraient être d'autres effets positifs de l'utilisation de la préfabrication [19].

A titre d'exemple on peut mentionner les recherches menées au laboratoire GSA sur les structures en pierre de nouvelle génération : les murs préfabriqués du prototype de maison solaire *Astonyshine* présenté au concours international Solar Decathlon 2012 constitués par une structure sandwich, avec une double couche verticale en claveaux de pierre avec l'appareillage d'Abeille et une couche intérieure d'isolant ; ou encore le mur préfabriqué en pierre auto-bloquant et câbles en acier, expérimenté aux Grands ateliers de l'Isle d'Abeau (Fig. 5.1).

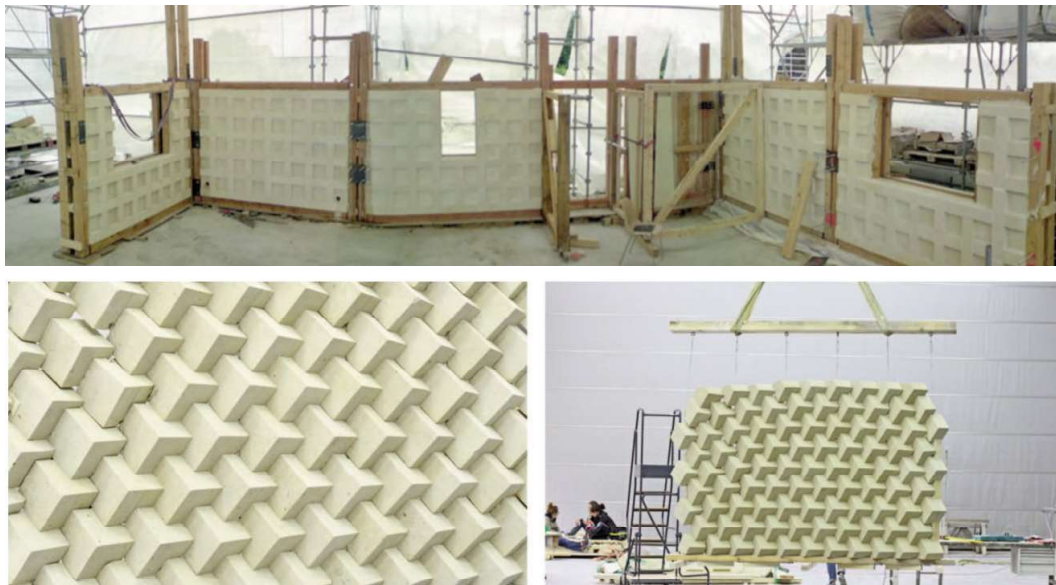


Fig. 5.1 – Mur préfabriqué avec appareillage d'Abeille, prototype *Astonyshine* Solar Decathlon 2012 (en haut). Mur préfabriqué avec éléments auto-bloquants. Workshop avec les étudiants de l'ENSA Paris Malaquais, mai 2013 (en bas)

5.1.1 L'utilisation de la pierre en Sicile de nos jours

La pierre de calcarénite des bâtiments traditionnels de Palerme était extraite des carrières proches de la ville (initialement les carrières de *Fossa della Garofala* et de *Fossa dei Danisinni* et *Bagheria* et ensuite aussi *Cinisi*, *Carini* et *Terrasini*). En Sicile, jusqu'au XX^e siècle il existait plusieurs carrières à proximité de grandes villes de l'île pour l'extraction de la pierre locale [100]. Les transformations culturelles, sociales et matérielles qui ont caractérisé le XX^e siècle ont conduit à l'abandon de la pierre en faveur du béton comme principal matériau de construction. Les limites physiques et technologiques (relatives à la mise en œuvre) de la construction en pierre ont contribué à son abandon en architecture en faveur d'autres matériaux.

Cet abandon entraîne à partir des années 60 en Sicile un aplatissement de l'image des villes, à l'origine caractérisées par des centres historiques où la pierre locale, avec ses couleurs et caractéristiques, a donné une identité figurative à la ville.

La situation actuelle des carrières de pierre en Sicile met en lumière une dynamique très particulière qui a contribué au ralentissement de l'industrialisation de ce secteur à la différence d'autres régions italiennes et d'autres États européens. En Sicile, jusqu'aux années 70, l'activité d'exploitation des carrières était laissée à l'initiative d'une catégorie assez hétérogène d'artisans ou d'entrepreneurs qui, à l'occasion de pics de demandes ouvraient des carrières de manière autonome, en les abandonnant une fois que la demande baissait [100]. Les problèmes économiques, techniques et administratifs liés à un manque de discipline législative ont entraîné le développement incontrôlé de ce secteur productif. La première norme sur l'activité d'exploitation des carrières siciliennes est la L.R.S. 127 de 1980. La norme encore en vigueur prévoit comme obligations l'obtention d'une autorisation préalable à l'ouverture d'une carrière, la conduite technique par un ingénieur et la planification de l'activité d'extraction. Plusieurs autres normes modificatives ont suivi dans les années 90 pour répondre à la forte opposition des entreprises et artisans du secteur qui considéraient la L.R. 127/1980 comme trop restrictive. Les effets de cette réglementation ont été très lents, mais aujourd'hui l'activité d'extraction illégale est désormais considérablement réduite et l'industrialisation du secteur de l'extraction minière atteint est un forte croissance [100].

Actuellement la Sicile est la deuxième région italienne par nombre de carrières actives, avec 431 sites actifs dont 73% extraient du calcaire et de la calcarénite (Fig. 5.2). On dénombre 192 carrières dont 46 de calcaire et 32 de calcarénite, uniquement dans la partie occidentale de la Sicile (Provinces de Trapani et de Palerme) [65]. Ces données peuvent sembler un bon point de départ pour relancer l'activité extractive de calcarénite; cependant il y a encore aujourd'hui 691 carrières désaffectées ou saisies par la justice.

Sur les 40 entreprises siciliennes fournissant de la pierre pour le secteur du bâtiment, seulement 5 produisent aujourd'hui de la pierre structurale de *tufo* (appellation locale de la pierre de calcarénite) (Fig. 5.3), signe d'un manque de demande. Pour la plupart des autres entreprises, la pierre de revêtement constitue la production plus importante. À cela s'ajoute le fait que l'utilisation des machines à contrôle numérique dans les entreprises reste encore très peu répandue.

Non seulement la pierre présente de nombreux aspects positifs du point de vue

Le bâti neuf

énergétique et durable dans son acception la plus large mais encore son utilisation peut préserver l'identité d'une ville et promouvoir sa valeur dans le temps. Le nouvel intérêt porté à la pierre de construction peut trouver toute sa place en Sicile à condition qu'un processus d'industrialisation et de mise à niveau des méthodes de production puisse être activé.

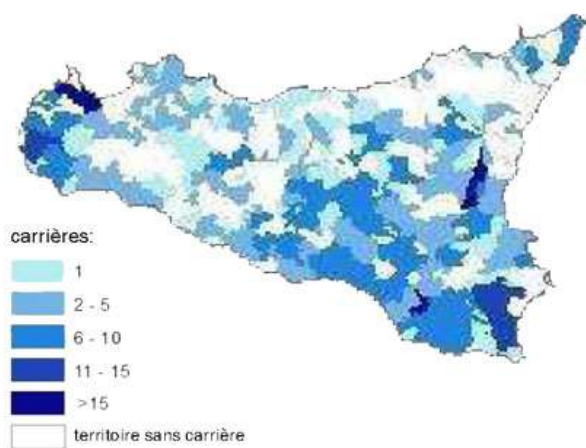


Fig. 5.2 – Les sites actifs en Sicile par 100 m² de terrain. Données ISTAT [65]



Fig. 5.3 – Entreprises qui travaillent la pierre de calcarenite

5.2 La technologie photovoltaïque

Au centre de la culture du projet architectural, la nécessité des transformer les processus et les systèmes d'utilisation des ressources énergétiques, en privilégiant l'utilisation des sources renouvelables, est une question qui se pose aujourd'hui. La disponibilité d'une énergie inépuisable, propre, sûre et fiable est l'une des conditions préalables au développement d'une société durable. Pour assurer la sécurité et la durabilité des approvisionnements énergétiques, il est nécessaire de diversifier ces approvisionnements en utilisant des ressources énergétiques renouvelables. L'Europe voit dans le photovoltaïque la technologie de pointe pour l'avenir, l'option énergétique «verte» par excellence [103].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs. L'énergie apportée par les photons libère les électrons de ces matériaux photosensibles. Le courant, produit à partir du potentiel électrique, peut être recueilli par une grille métallique couvrant la cellule et par un circuit externe [66].

Le silicium est le matériau le plus couramment utilisé pour les modules PV standard. Le silicium employé pour les cellules solaires peut être mono-cristallin, poly-cristallin et amorphe. La diffusion du photovoltaïque standard se heurte à certains problèmes limitant sa durabilité : d'une part le coût encore élevé qui rend cette technologie encore dépendante des mécanismes incitatifs d'État ; de l'autre, la difficulté de production de silicium avec un degré électronique.

Pour faire face à ces contraintes, la recherche s'est tournée vers une autre catégorie de panneaux photovoltaïques, constitués par les cellules solaires dont les matières premières ne sont pas le silicium. Dans cette catégorie, on peut mentionner les CIS et CGIS, qui sont actuellement les plus efficaces parmi les cellules à couche mince. Ils sont composés de plusieurs couches de diséléniure, de cuivre et d'indium (gallium).

La troisième génération de systèmes qui utilisent l'effet photovoltaïque est celle des concentrateurs solaires. Ces derniers sont basés sur des collecteurs optiques qui focalisent la radiation solaire sur des petites cellules photovoltaïques à haute efficacité [6]. Appartenant à la catégorie des concentrateurs solaires, les concentrateurs solaires luminescents sont constitués par une plaque photoconductrice hautement transparente (PMMA), des colorants photo-luminescents dispersés dans la matrice transparente et des cellules photoconductrices solaires disposées sur les bords de la plaque [137].

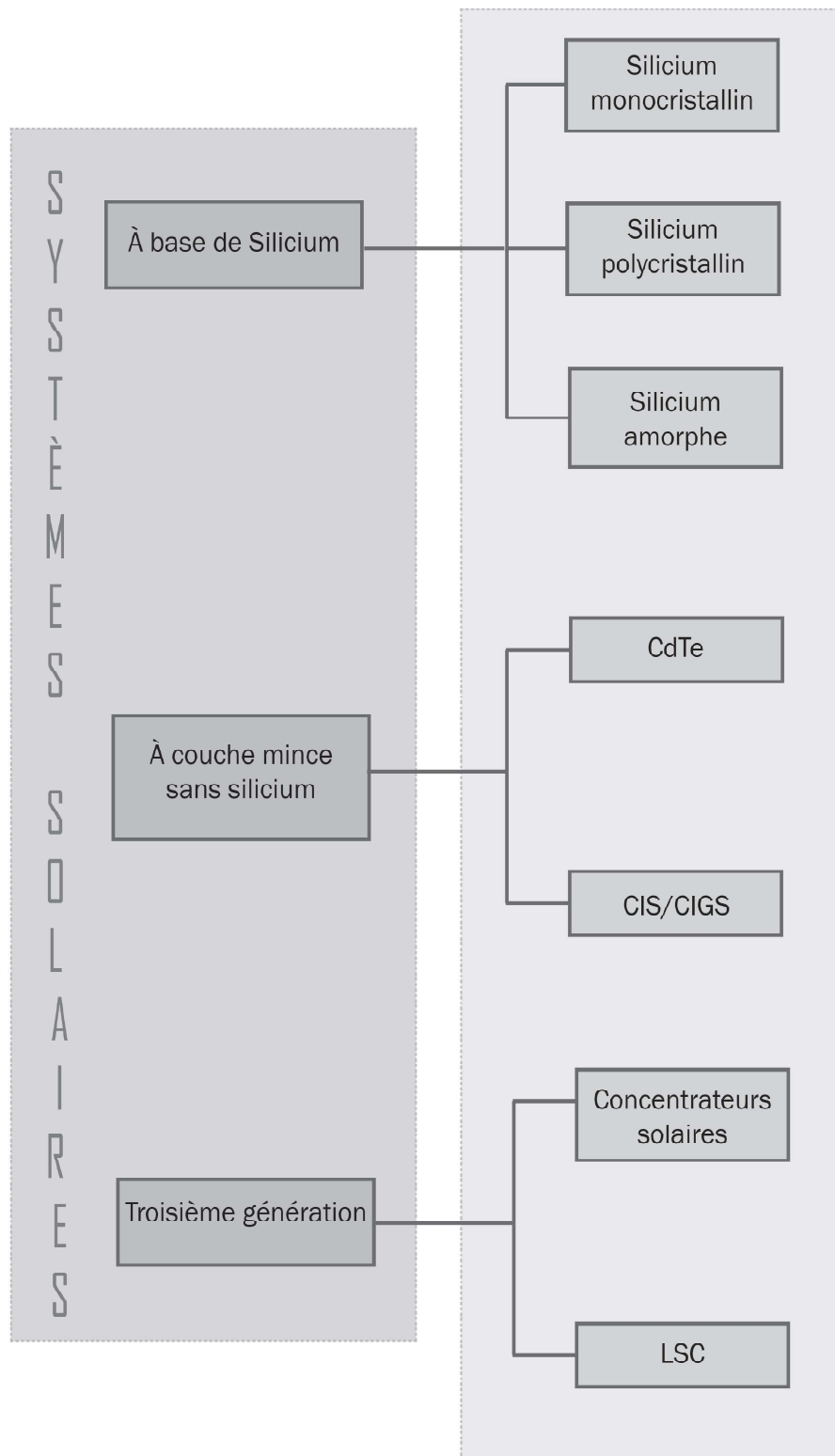


Fig. 5.4 – Les systèmes photovoltaïques

5.2.1 Les concentrateurs solaires luminescents (LSC)

Les concentrateurs solaires luminescents (LSC) sont l'une des rares technologies permettant la création de panneaux photovoltaïques transparents ne déformant pas l'image observée à travers le panneau. Les concentrateurs solaires luminescents présentent un grand intérêt d'un point de vue à la fois architectural et énergétique ; non seulement ils peuvent faciliter l'intégration de panneaux, mais ils permettent aussi d'assurer une production rapide avec des contraintes économiques et énergétiques moins coûteuses. Parmi les concentrateurs solaires, les LSC présentent plusieurs avantages [15] :

- La production d'énergie peut se faire à faible coût (la quantité de cellules solaires est fortement réduite) ;
- La conversion en énergie électrique repose à la fois sur la radiation directe et sur la radiation diffuse, ne nécessitant donc pas de dispositifs de suivi solaire coûteux ;
- Seule la lumière «froide» est collectée par les cellules photovoltaïques, d'où une efficacité de conversion photovoltaïque plus élevée ;

Du point de vue architectural, les avantages des LSC peuvent être résumé comme suit :

- La transparence et la couleur ;
- L'adaptabilité à la forme (surface verticale, horizontale, courbe), toute en assurant aussi la conversion électrique de la composante diffuse de la radiation solaire ;
- La dimension de panneaux jusqu'à 2m x 2m ;

Ces dispositifs sont constitués par une plaque photoconductrice hautement transparente, normalement du PolyMéthylMéthAcrylate (PMMA) d'une épaisseur de quelques millimètres, dopée avec une faible concentration (de l'ordre de 100-1000 ppm) de colorants photo-luminescents dispersés dans la matrice transparente et par des cellules photoconductrices solaires de petite taille, placées sur les bords de la plaque. La lumière solaire incidente sur la plaque est absorbée par les colorants et réémise à l'intérieur de la plaque qui sert de guide d'onde ; enfin elle est recueillie par les cellules solaires sur les bords [15]. Les LSC utilisent le phénomène de réflexion interne totale qui permet à la lumière émise à l'intérieur d'un milieu ayant un indice de réfraction plus élevé que l'air, d'avoir un angle d'incidence sur la surface de séparation (entre ce milieu et l'air) supérieur à l'angle d'incidence critique (angle au dessus duquel la lumière n'est pas réfractée mais réfléchi avec un rendement théorique de 100%) [15]. L'angle au-dessus duquel la réflexion interne totale se produit, dépend de l'indice de réfraction du milieu transparent, selon la loi de Snell :

$$n_1 \cdot \sin(\theta_i) = n_2 \cdot \sin(\theta_t) \quad (5.1)$$

où :

n_1 est l'indice de refraction du milieu transparent (PMMA) ;

n_2 est l'indice de refraction de l'air ;

θ_i est l'angle d'incidence entre la normale au point d'incidence et le rayon incident ;

θ_t est l'angle de réflexion entre la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi.

On peut réécrire l'Eq.5.1 en considérant le deuxième milieu comme de l'air (n_2 indice de refraction de l'air ≈ 1) comme suit :

$$\sin(\theta_i) = \frac{1}{n_1} \cdot \sin(\theta_t) \quad (5.2)$$

On peut alors introduire l'angle critique θ_c qui est l'angle d'incidence donnant un angle réfracté de $\frac{\pi}{2}$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right) \quad (5.3)$$

La Fig. 5.7 montre le comportement d'un rayon lumineux émis à l'intérieur du LSC et venant frapper la surface :

- Si l'angle d'incidence θ_i est supérieur à l'angle critique θ_c , une réflexion totale se produit et le rayon est renvoyé dans le LSC avec un angle égal à l'angle d'incidence.
- Si l'angle d'incidence θ_i est égal à l'angle critique θ_c , le rayon est réfracté à l'interface entre LSC et air.
- Si l'angle d'incidence est inférieur à l'angle critique θ_c , deux phénomènes se produisent, une partie de la lumière est réfractée (3a) et une partie est réfléchie (3b) selon les équations de Fresnel.

La fraction de la puissance incidente qui est réfléchie par l'interface est donnée par la réflectance ou la réflectivité, R , tandis que la fraction qui est réfractée est donnée par la transmittance ou la transmissivité, T . Les équations de Fresnel décrivent comment la lumière est transmise et réfléchie lors de la traversée de l'interface entre deux milieux diélectriques d'indices de réfraction différents. Le facteur de réflexion pour la lumière s-polarisée est donné par :

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right|^2 \quad (5.4)$$

Le facteur de réflexion pour la lumière p-polarisée est donné par :

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right|^2 \quad (5.5)$$

En conséquence de la conservation de l'énergie, les transmittances sont données par :

$$T_s = 1 - R_s \quad (5.6)$$

$$T_p = 1 - R_p \quad (5.7)$$

Si la lumière incidente n'est pas polarisée (contenant un mélange égal de polarisations s et p), la réflectance est :

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (5.8)$$



Fig. 5.5 – La matrice transparent (PMMA) et les colorants des LSC



Fig. 5.6 – Un détail montrant le bord d'une plaque LSC équipée des récepteurs et d'un film réfléchissant sur les bords latéraux [15]

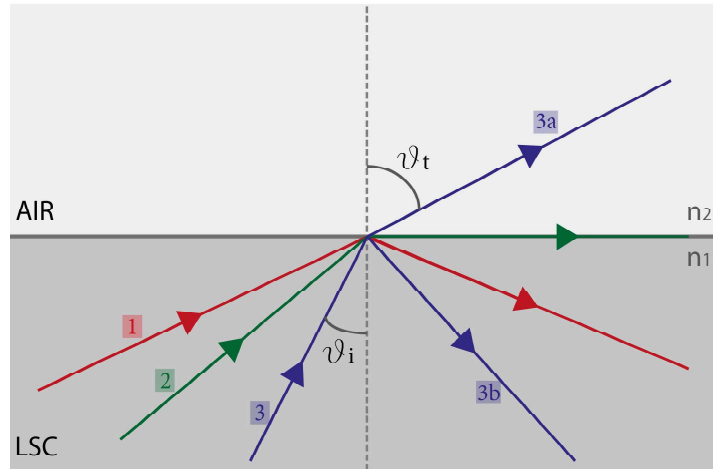


Fig. 5.7 – Un rayon lumineux qui frappe l’interface air-LSC à des angles supérieurs (1) ou inférieurs (3) à l’angle critique (2)

Les équations de Fresnel impliquent que la lumière avec la polarisation p ne sera pas réfléchi si l’angle d’incidence est égal à l’angle de Brewster.

$$\theta_b = \arctan\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \quad (5.9)$$

Pour un PMMA ($n_2 = 1,488$) dans l’air ($n_1 \approx 1$), l’angle de Brewster pour la lumière visible est de 56.0972° .

Pour obtenir une réflexion interne totale dans le LSC, la lumière doit être émise à l’intérieur du milieu transparent. Cette émission est obtenue en dopant le milieu

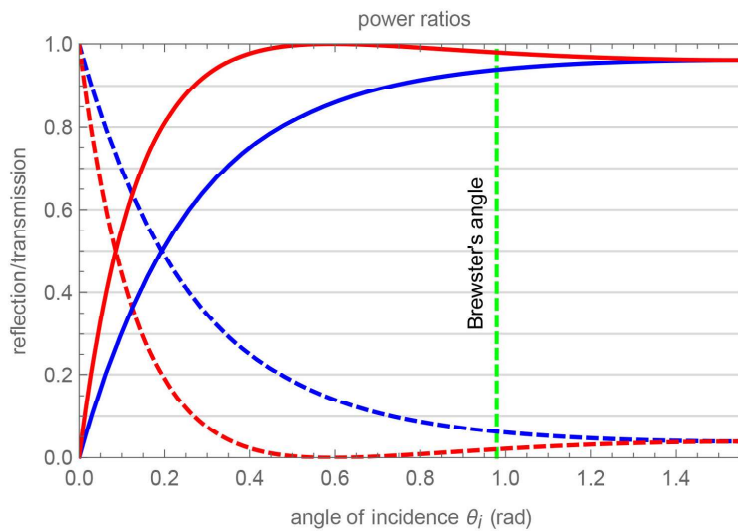


Fig. 5.8 – Coefficient de réflexion et de transmittance pour la lumière à polarisation s et p

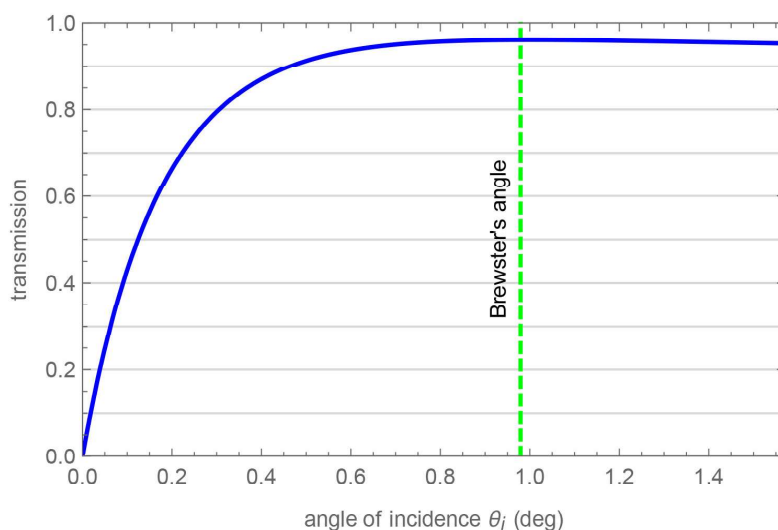


Fig. 5.9 – Transmittance pour la lumière de non-polarisée

optique par des colorants fluorescents dont l'émission est collectée et concentrée sur les côtés du LSC. Les colorants peuvent être des composés organiques (teintures à base de pérylène ou de naphthalène), des complexes de terres rares (c'est-à-dire de l'euporium) ou des points quantiques, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients [137]. Ces colorants agissent comme les centres de luminescence dans les plaques et absorbent les rayons du soleil qui traversent le LSC puis ré-émettent isotropiquement l'énergie absorbée sous forme de lumière à des longueurs d'onde plus élevées (fluorescence). Le spectre d'émission est caractéristique de chaque colorant et lui donne sa couleur distinctive. La lumière émise à l'intérieur du milieu (PMMA) d'indice de réfraction supérieur à l'extérieur (air) subit une réflexion interne totale si, comme nous l'avons vu, elle est émise sous un angle plus grand que l'angle critique par rapport à la normale.

Parmi les colorants fluorescents, les organiques sont les plus largement disponibles dans le commerce. Afin de trouver les plus performants, le Département de Physique et Science de la Terre de l'Université de Ferrara a testé cinq colorants organiques commerciaux ajoutés au PMMA (plaques carrées de 25 cm et 50 cm de côté) [15] :

- Lumogen® F Violet 570
- Lumogen® F Green 850
- Lumogen® F Jaune 083
- Lumogen® F Orange 240
- Lumogen® F Rouge 305

Le test confirme que le LSC teint en rouge est le plus efficace en raison de l'irradiance solaire plus élevée dans son spectre d'absorption. Actuellement, les LSC teints en vert et violet n'offrent pas de performances significatives.

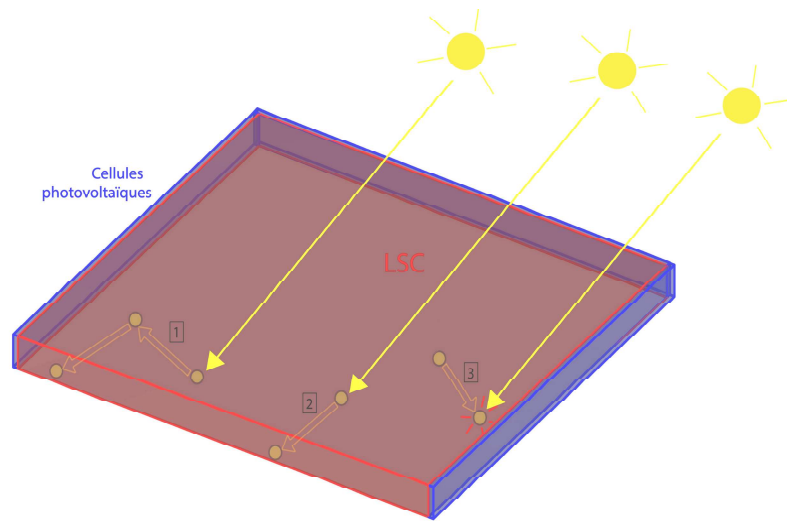


Fig. 5.10 – Absorption d’un photon solaire dans un LSC. [1] le rayonnement réémis est au dessus de l’angle critique donc est piégé à l’intérieur de la plaque jusqu’à ce qu’il soit absorbé par les cellules. [2] Le rayonnement réémis est émis en dessous de l’angle critique et est perdu. [3] Le rayonnement émis est absorbé par une autre molécule de colorant (auto-absorption)

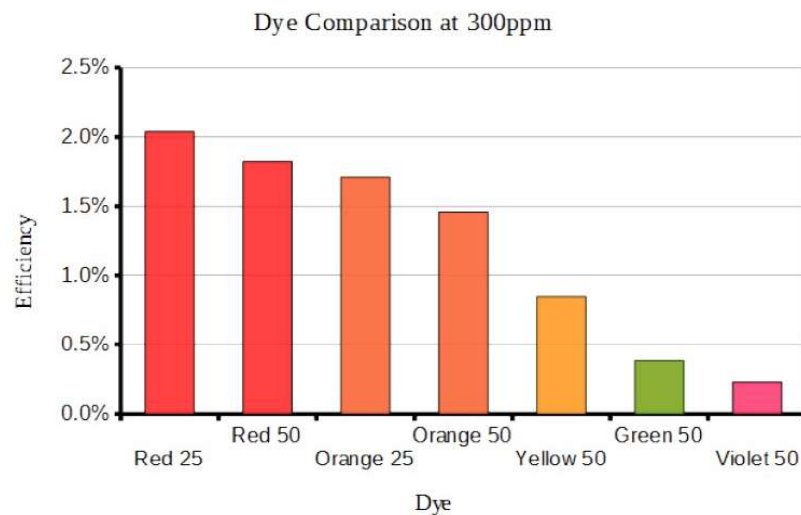


Fig. 5.11 – Performances des LSC : les numéros 25 et 50 correspondent respectivement aux LSC de 25cm et 50cm de côté [15].

5.3 L'intégration architecturale du photovoltaïque

Le concept d'intégration architecturale du photovoltaïque reste encore un sujet débattu [68]. La définition donnée dans la norme EN50583-1 : 2016 : "Photovoltaïque dans les bâtiments - Partie 1 : Modules BIPV" (Approuvé par le CENELEC le 05/10/2015) : «Les modules photovoltaïques sont considérés comme intégrés au bâtiment, si les modules PV forment un produit de construction assurant une fonction telle que définie dans le règlement européen sur les produits de construction CPR 305/2011. Ainsi, le module BIPV est une condition préalable à l'intégrité de la fonctionnalité du bâtiment. Si le module PV intégré est démonté (dans le cas de modules structurellement collés), le module PV sera remplacé par un produit de construction approprié». Il est évident que cette définition du BIPV traite plutôt l'aspect fonctionnel du composant, mais elle n'aborde pas les aspects esthétiques ou architecturaux ni les aspects techniques et/ou constructifs.

Les aspects esthétiques de l'intégration architecturale du photovoltaïque sont définis plutôt dans le volet 7 de l'AIE PVPS «Building Integrated PhotoVoltaics». Ce texte définit l'intégration aux bâtiments comme un problème aussi esthétique : «Par l'intégration, le système solaire fait partie de la conception globale du bâtiment et y ajoute de la valeur au design». Pour éclairer ce concept, le volet 7 de l'AIE PVPS poursuit en ces termes : «L'analyse visuelle des systèmes PV dans les bâtiments montre que l'apparence d'un bâtiment mal conçu ne s'améliore pas simplement en ajoutant un système PV bien conçu. D'autre part, un bâtiment bien conçu, avec un système PV bien intégré, sera accepté par tout le monde». Cette citation illustre la difficulté à définir les aspects esthétiques des BIPV.

La Fig. 5.12 montre schématiquement les caractéristiques auxquelles les BIPV doivent répondre.

Dans le cas de la conception de nouvelles architectures dites photovoltaïques, l'un des principaux problèmes rencontrés par les concepteurs est la nécessité de développer un langage architectural qui permette d'améliorer le potentiel formel et visuel du composant photovoltaïque, ce qui se traduit dans la production de composants photovoltaïques innovants conçus pour l'intégration architecturale et compatibles avec les technologies de construction d'aujourd'hui [104]. La diversité des méthodes d'intégration des systèmes photovoltaïques dans l'architecture résulte de la possibilité d'utiliser des composants spéciaux ou des systèmes d'assemblage extrêmement diversifiés pour différentes applications, qui en résumé, sont les suivants : toits inclinés, toits plats, toits courbés, façades, casquettes. On notera que, dans un même type d'application, les niveaux d'intégration peuvent être différents. En général, on peut dire que les possibilités vont du simple chevauchement des systèmes photovoltaïques sur les composants de construction traditionnels jusqu'à leur intégration partielle ou totale. La Fig.5.13 présente schématiquement quelques types d'application et les niveaux d'intégration possibles correspondants.

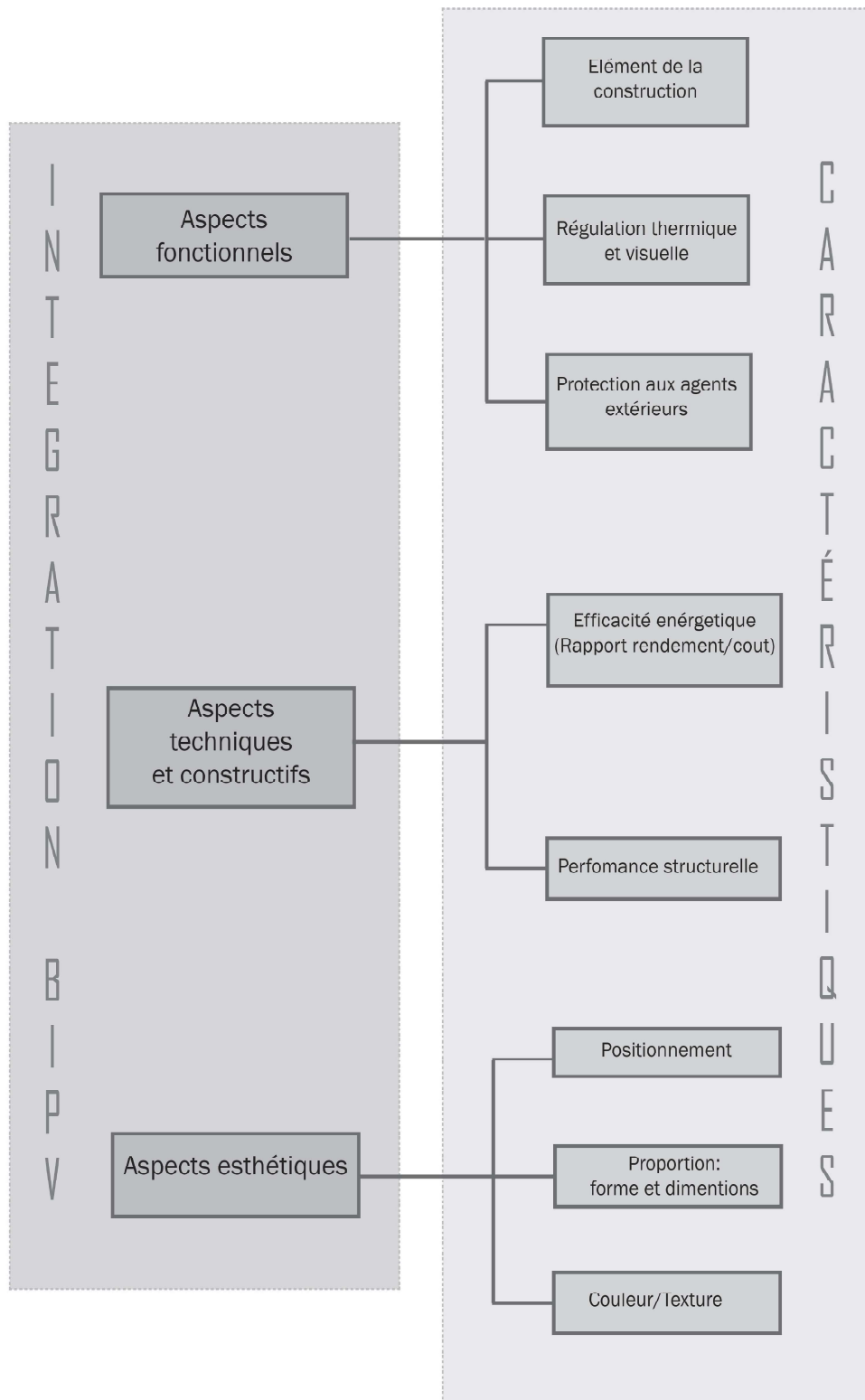


Fig. 5.12 – Caractéristiques de l'intégration architecturale BIPV

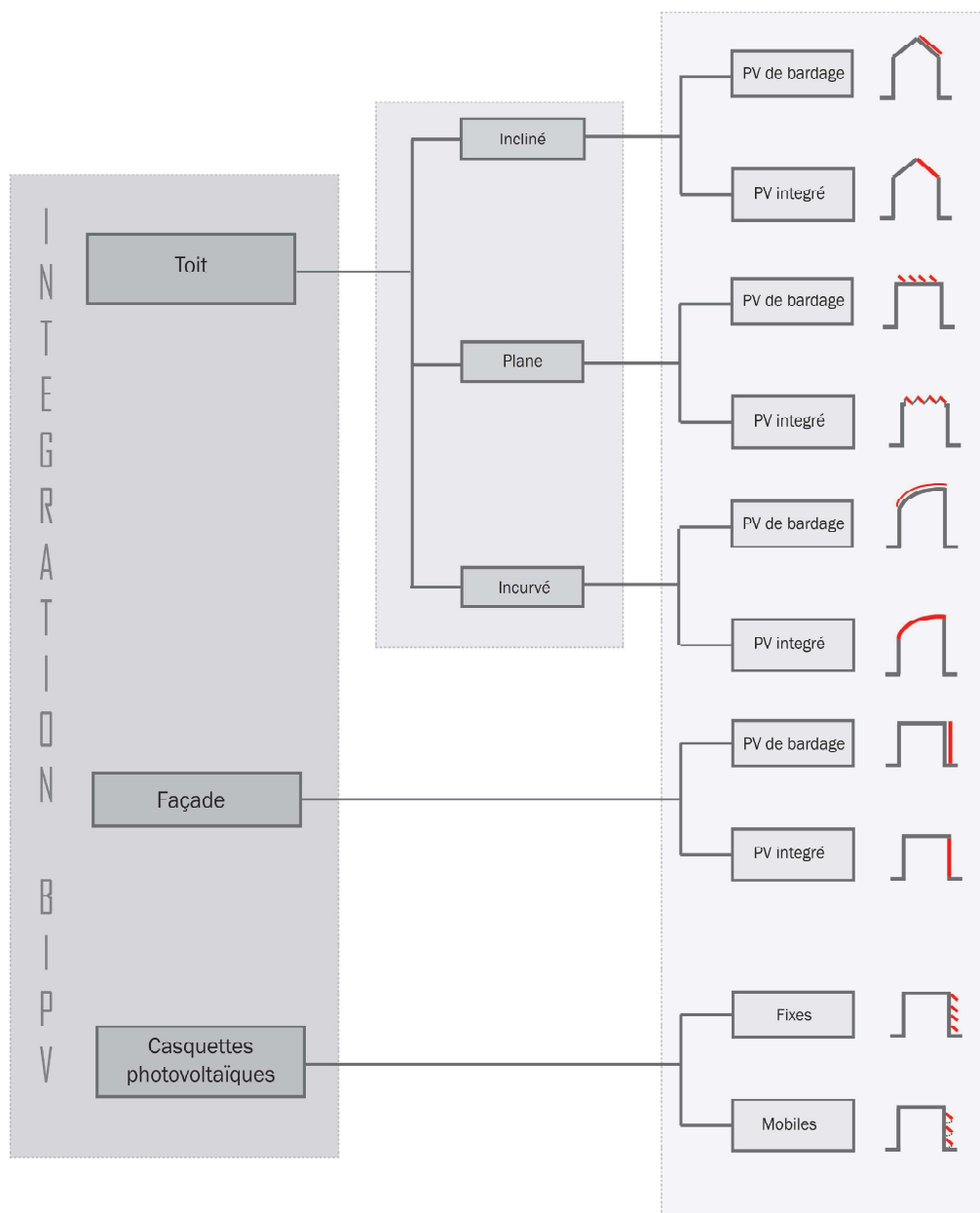


Fig. 5.13 – Types d'intégration BIPV

Comment peut-on évaluer réellement l'intégration architecturale de ces systèmes ? Selon une approche holistique, intégrer un système ne signifie pas seulement remplacer un élément ou un matériau du bâtiment, mais aussi l'intégrer esthétiquement dès les premières phases de la conception architecturale et lui conférer tous les fonctions techniques et constructives nécessaires (du point de vue structurel et énergétique).

La question de l'intégration architecturale et technico-constructive de ces systèmes nous conduit à considérer un autre élément important dans la conception : la surface captante nécessaire à l'alimentation des systèmes technologiques. La nécessité de porter une attention particulière à la dimension, à la morphologie et à la technologie de cette surface est ainsi au centre de ces questions.

Les principaux problèmes que l'on peut rencontrer lorsqu'on fait appel à des systèmes de ce type sont liés à la génération précise de la géométrie, qui traduit la compréhension qu'a le concepteur du projet. Ce dernier se caractérise donc par les différents étapes mathématiques qu'il faut mettre en œuvre dans la génération de la forme afin d'avoir un contrôle complet de la géométrie.

Dans ce contexte, nous avons créé un modèle mathématique de radiation solaire développé avec le logiciel Wolfram Mathematica pour connaître la quantité de radiation directe et diffuse transmise sur une surface de forme quelconque constituée de panneaux LSC. En Annexe A, on donne un exposé plus approfondi sur les différents modèles de radiation solaire. Au premier chapitre nous avons présenté le modèle mathématique pour le calcul de la radiation solaire directe et diffuse touchant une surface selon le méthode de l'ASHRAE.

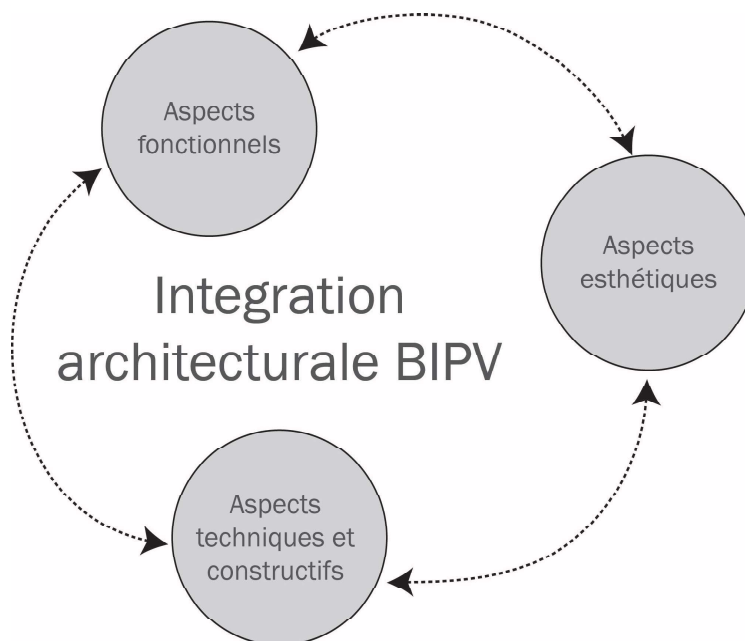


Fig. 5.14 – Approche holistique de l'intégration architecturale du photovoltaïque

Nous utilisons le modèle décrit en annexe en ajoutant d'autres paramètres qui concernent l'évaluation de la composante transmise à l'intérieur du matériau LSC, celle réfléchie et le rendement du système (Eq.5.1 à Eq.5.9). L'algorithme permet donc de calculer la production d'énergie électrique sur une surface quelconque de LSC dans un site donné.

Les paramètres du modèle numérique intervenant pour le calcul de la radiation transmise à l'intérieur des LSC sont :

- La position du soleil par rapport au site (zenith et azimuth) et à la Terre (distance);
- La nature du ciel, qui fait appel à des questions statistiques du climat;
- L'inclinaison locale de la surface;
- La nature du matériau (pour l'évaluation du flux lumineux);
- La conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques.

Les étapes du modèle implémenté en Wolfram Mathematica se résument comme suit :

- Calcul de la radiation extraterrestre;
- Calcul de la radiation globale (après passage par l'atmosphère) sur une surface horizontale
- Calcul du facteur d'exposition (tenant en compte l'azimut et l'angle d'inclinaison de la surface et du passage du soleil sous l'horizon)
- Calcul de la composante directe et diffuse (modèle ASHREA);
- Calcul de la fraction transmise à l'intérieur des LSC;
- Calcul de l'énergie produite par les LSC.

5.3.1 L'exemple du Solar Decathlon

Un premier exemple d'application d'intégration architecturale de LSC et de l'algorithme ci-dessus a été développé à l'occasion du concours Solar Decathlon 2014 par la Team Paris pour le projet Liv-Lib'. Bien que cette première application ait été réalisée dans un climat non méditerranéen, nous décrivons ci-dessous cette expérience de conception et réalisation d'une verrière photovoltaïque avec des concentrateurs à luminescence solaire comme exemple d'optimisation morphologique au regard de la production d'énergie dans un site donné. Il s'agit d'un processus d'interopérabilité entre la recherche morphologique et les performances énergétiques dès les premières étapes de la conception. Pour sa troisième édition en Europe, le Solar Decathlon s'est installé en France, avec la participation de 20 écoles d'architecture et d'ingénierie. L'équipe du Team Paris réunissait plusieurs établissements spécialisés d'Ile-de-France : l'ENSA Paris-Malaquais, l'ESIEE Paris, l'ESTP Paris, l'UPEM et Chimie Paristech, avec des partenaires académiques et industriels, parmi lesquels, pour le LSC, le Département de Physique et Sciences de la Terre de l'Université de Ferrara.

A cette occasion, nous avons élaboré un concept d'habitats collectifs à placer dans la petite ou grande couronne parisienne, dans lesquels le recueil et la gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets soit centralisée dans un "hub" public ou propriété d'un promoteur immobilier, tandis que les habitats, "capsules" modulaires

et très économiques, ne contiennent que le minimum de technologie. Le hub a été conçu comme une infrastructure urbaine solaire intégrant deux types différents de panneaux photovoltaïques (CGIS et LSC), rassemblant en un seul endroit les systèmes technologiques et écologiques nécessaires au fonctionnement de l'habitation (Fig.5.15). Chaque hub dispose de plusieurs «ports» aptes à recevoir une capsule d'habitation, qui est la propriété du citoyen qui l'habite.

Du point de vue architectural, nous avons conçu ce hub comme une verrière solaire qui recueille l'énergie du soleil selon plusieurs angles solaires, plutôt que de l'optimiser par rapport à l'heure et au jour de l'angle de production maximale. L'idée est que, même si ce mécanisme n'est pas économiquement avantageux au niveau local, il peut l'être au niveau global, car, même si l'intégrale de la production est plus faible, il réduit l'amplitude des pics et les étale dans le temps.

La verrière était constituée d'une ossature primaire en bois brut. Sur cette charpente venaient se fixer des menuiseries d'aluminium. Les parois horizontales étaient en alternance des panneaux de PMMA ou des panneaux solaires CGIS intégrés dans du verre (Fig.5.16). Nous avons utilisé les LSC en raison de leur qualité esthétique (transparence). En outre, depuis qu'il a été possible de les centrer à froid, nous avons décidé de concevoir une verrière incurvée qui suit la trajectoire du soleil [15]. Les cinq portails en bois étaient parallèles à la paroi nord-ouest du hub et posés avec un angle de vrillage de 8° l'un par rapport à l'autre, afin de créer un hélicoïde reliant tous les angles entre les poutres et les poteaux des portails à partir du point le plus haut de la paroi nord-ouest jusqu'au sol (Fig.5.18). La morphologie de la verrière a été conçue pour créer une forme continue afin de trouver l'orientation solaire optimale et en même temps pour comporter plusieurs surfaces captantes différemment orientées suivant la trajectoire du soleil, et réduire la production de pointe.

Pour effectuer les simulations, nous avons utilisé le modèle numérique développé en Wolfram Mathematica décrit au paragraphe précédent. Nous comparons notre structure, qui présente des inclinaisons différentes et une exposition principalement au sud-ouest, à une structure "standard" exposée uniquement au sud avec une inclinaison optimale de 35° . Les résultats des simulations montrent que l'exposition au sud détermine une meilleure radiation transmise dès les premières heures de la matinée (Fig. 5.20).

La Fig. 5.21 montre le rayonnement solaire transmis dans trois panneaux avec une inclinaison respective de 15° , $52,5^\circ$ et 35° . Les deux premiers, qui font partie de la structure, sont exposés respectivement au sud (azimut 0°) et au sud-est (azimut 45°) et le dernier (panneau standard) au sud. Nous remarquons que plus les panneaux sont inclinés et orientés au sud-ouest, moins ils sont exposés au rayonnement solaire dans les heures de l'après-midi, réduisant ainsi l'efficacité de la production. Néanmoins, la production maximale d'énergie ne varie pas beaucoup entre les cinq inclinaisons différentes des surfaces de notre structure et l'inclinaison "standard" : elle est de $37,4 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ si les panneaux sont orientés vers le sud (azimut 0°) avec le meilleur angle d'inclinaison (35°), tandis que pour l'inclinaison de $52,5^\circ$ avec orientation sud-ouest (azimut 45°) la production maximale est de $36,8 \text{ W} \cdot \text{m}^2$

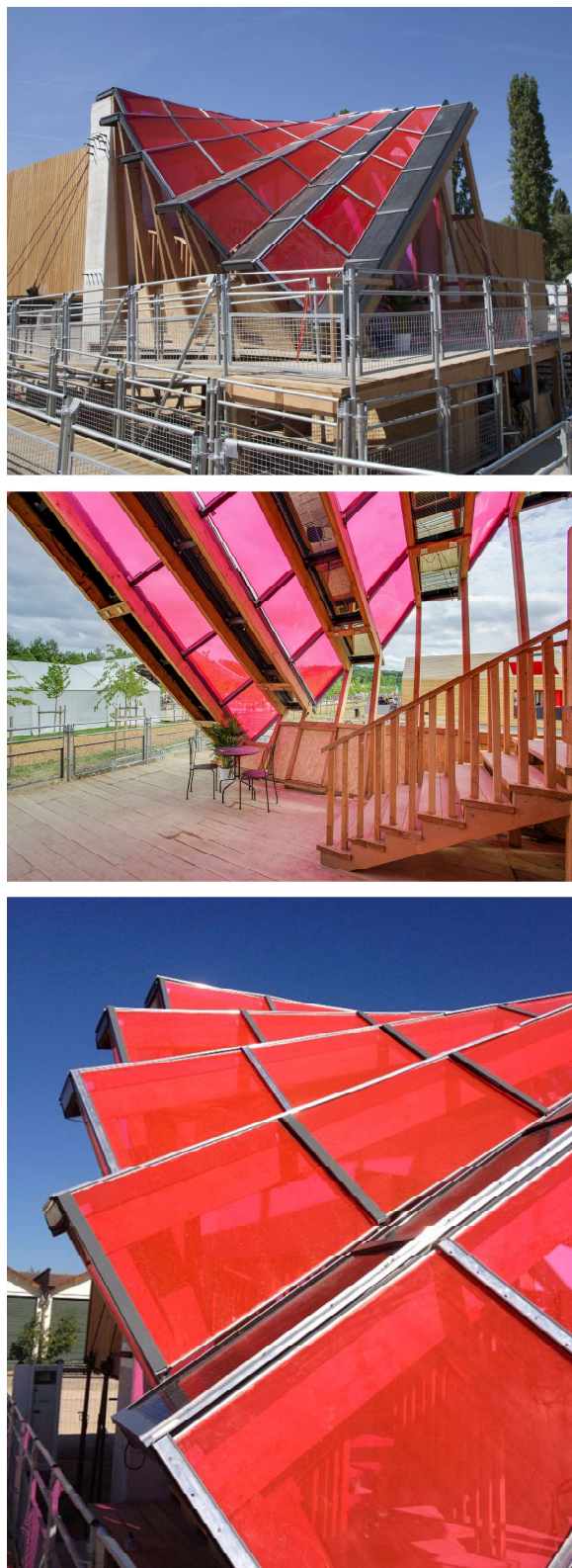


Fig. 5.15 – Verrière solaire présentée au concours SD 2014

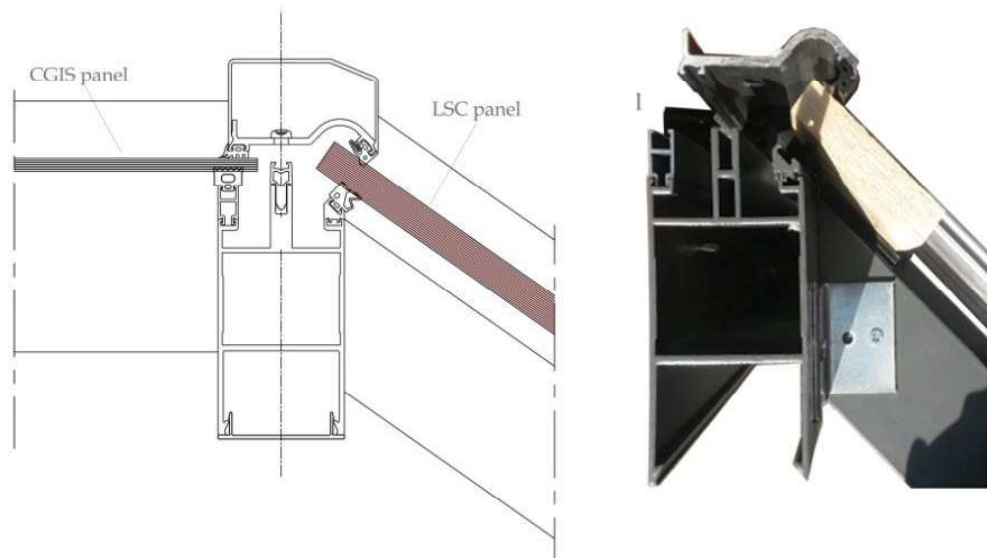


Fig. 5.16 – Détail des deux panneaux photovoltaïques



Fig. 5.17 – Verrière solaire présentée au concours SD 2014

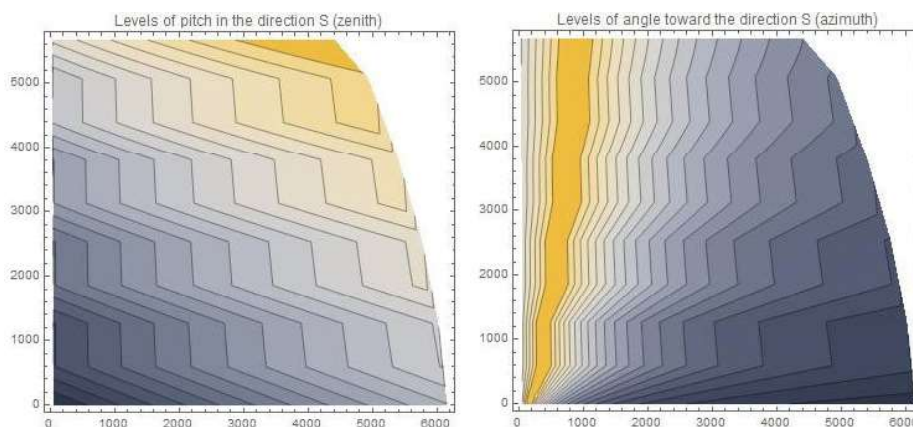


Fig. 5.19 – Angles zénith et azimuth sur les différentes surfaces de la verrière

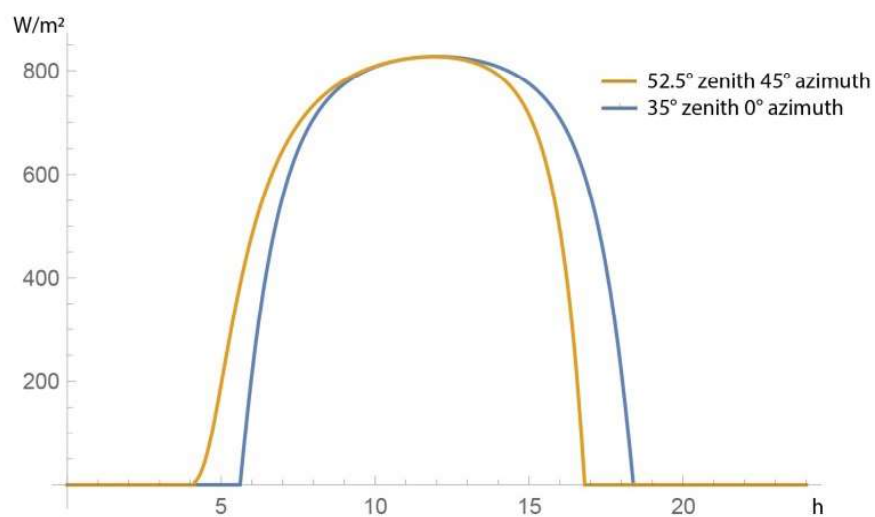


Fig. 5.20 – Radiation directe transmise le 21 juin dans un panneau incliné (azimut 52,5° et zénith 45°). Comparaison avec un panneau "standard" (zénith 35° et azimut 0°)

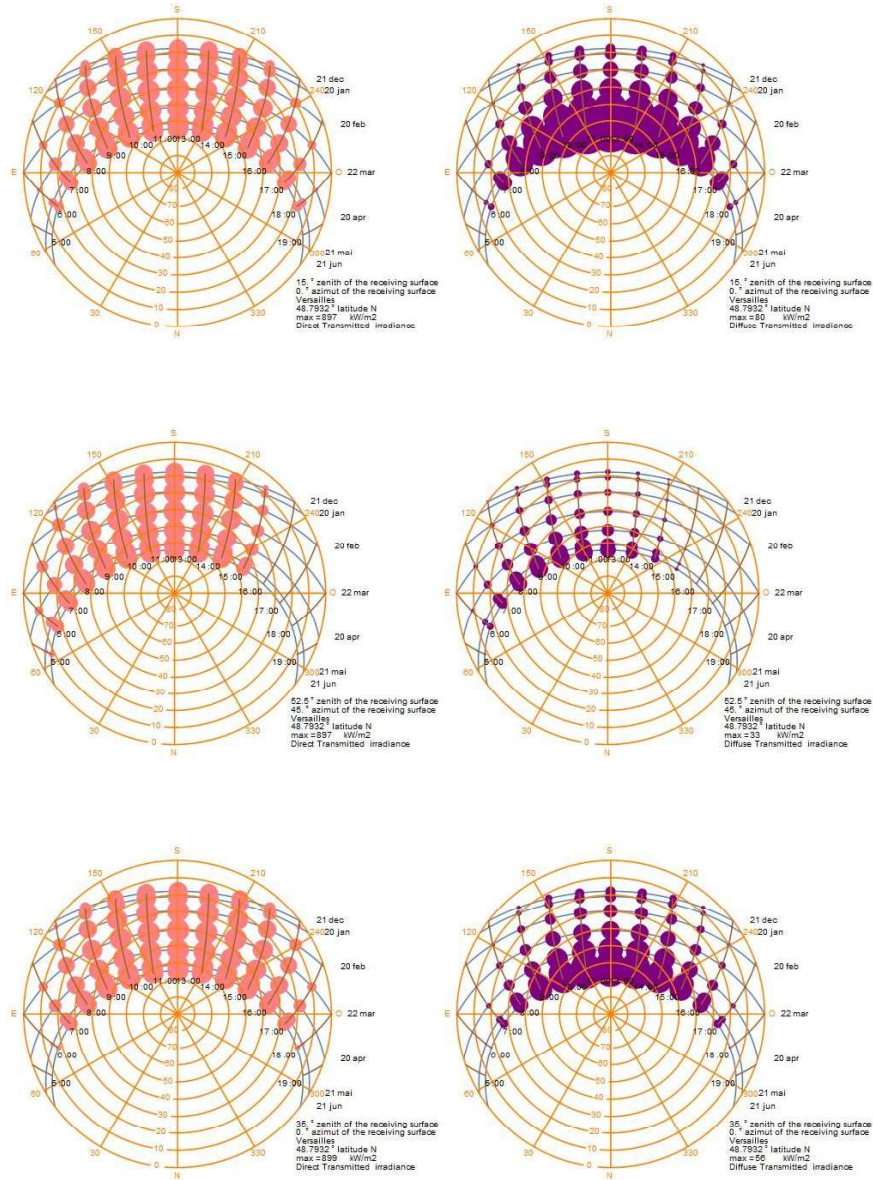


Fig. 5.21 – En haut, radiation directe (à gauche) et radiation diffuse (à droite) transmises sur la surface avec 15°zénith et 0°azimut. Au milieu, radiation directe et radiation diffuse transmises (52.5°zénith et 45°azimut). En bas, radiation directe et radiation diffuse transmises (35°zénith et 0°azimut)

Dans une optique d'optimisation multicritère [135], selon laquelle un ensemble de solutions optimales représente un compromis entre plusieurs critères considérés, le choix de la solution dans l'ensemble des possibilités acceptables peut se faire à l'aide d'un paramètre qui traduit le rapport forme-apport énergétique tout au long de la journée. Grâce au modèle paramétrique proposé, il est possible d'inclure une ou plusieurs surfaces constituées de panneaux LSC dans le processus d'optimisation multicritère d'une façade (ou d'un bâtiment). La recherche de l'optimum peut alors intégrer la détermination de la forme de ces surfaces afin d'augmenter leur production d'énergie dans le temps par rapport à un site tout en respectant les autres critères et les diverses contraintes de conception et de réalisation.

Conclusion et perspectives

L'approche de la question énergétique en matière de construction dans la région méditerranéenne implique une réflexion approfondie sur le thème du confort estival. Le problème des économies d'énergie dans la consommation de chauffage, commun à tous les pays européens, a été largement traité par la réglementation au niveau européen et national, mais la question des économies d'énergie en été et du confort intérieur n'a été prise en considération que ces dernières années. En Italie, la réponse législative et réglementaire à ces problèmes est venue avec le décret législatif n. 192 du 19 août 2005, qui introduit l'obligation de prendre en compte le problème du confort d'été dans la conception et la construction des bâtiments. Les dispositions du D.L.192/2005 ont été complétées par des indications techniques importantes de mise en œuvre dans le D.P du 2 avril 2009 n. 59, avec l'introduction de certains paramètres thermiques dynamiques.

L'examen de l'architecture traditionnelle à Palerme, nous suggère une alternative intéressante dans le domaine de la climatisation passive, c'est-à-dire l'utilisation de mécanismes physiques et techniques visant à assurer le confort d'été.

Dans notre travail, nous avons essayé de mettre en évidence la nécessité d'une double approche de la question environnementale dans la région méditerranéenne : d'une part, la récupération de certains aspects de l'architecture traditionnelle, qui montrent une attention particulière à l'interaction entre bâti et paramètres environnementaux ; d'autre part la réinterprétation de ces aspects pour un projet innovant et compatible avec les particularités du contexte (environnemental, historique et constructif).

La première partie de cette recherche a pour but de définir le cadre cognitif entourant l'architecture traditionnelle pour la ville de Palerme. Bien que la diversité des solutions historiques ne permet pas de généraliser une approche unique du projet architectural, nous avons essayé de comprendre les potentialités énergétiques intrinsèques d'une architecture qui présente néanmoins des caractères récurrents. L'échelle de ce cadre cognitif s'étend des éléments techniques jusqu'à l'interaction des bâtiments avec le contexte qui les entoure. L'étude de l'architecture traditionnelle à Palerme a été menée sous un triple approche. A l'échelle de la ville et du bâti, l'approche par l'histoire de la construction a permis de parcourir les réflexions sous-jacentes au développement de la ville de Palerme au regard de l'orientation et de l'exposition solaire du bâti ; à l'échelle du système constructif, cette approche a permis de définir l'évolution des techniques constructives et des matériaux employés pour les différents éléments du bâti.

L'approche physique a permis d'analyser les interactions entre l'intérieur et l'extérieur du bâti. A l'échelle de la ville, nous avons analysé les paramètres environnementaux avec une attention particulière à la radiation solaire en interaction avec les surfaces exposées du bâti ; à l'échelle du système constructif, cette approche nous a permis d'analyser l'enveloppe du bâti comme élément d'échange matériel et immatériel entre l'espace intérieur et extérieur. L'approche morphologique s'ajoute en toile de fond aux deux autres approches. Celle-ci nous a permis de définir les caractéristiques morpho-géométriques du bâti traditionnel à différentes échelles, allant du rapport entre hauteur des bâtiments et largeur des rues jusqu'à la définition des stratigraphies de l'enveloppe traditionnelle.

Cette phase de connaissance et d'analyse de l'architecture traditionnelle à Palerme s'est nourri de plusieurs études existantes sur les caractéristiques techniques et matérielles, de documents d'archives et de recherches récemment publiées.

Une attention particulière a été portée dans ce travail aux publications scientifiques de la période des hygiénistes. Sur cette base, nous avons défini les caractéristiques géométriques et matérielles des objets d'études et nous avons posé des hypothèses de fonctionnement thermique. Pour l'analyse et les simulations énergétiques nous avons fait recours à une approche numérique (Ecotect, Revit, Wolfram Mathematica et Cast3M).

Au-delà de ces résultats proprement liés à la question énergétique de cette architecture, nous voulons ici mettre en évidence les enseignements touchant à l'économie et à la gestion des ressources. Sans bien évidemment l'idéaliser, l'architecture traditionnelle montre une attention particulière à trois facteurs, qui plus que jamais sont importants dans l'architecture d'aujourd'hui :

- Le réemploi et le recyclage
- L'utilisation des matériaux locaux
- Les savoir-faire humains et la collaboration des tous les acteurs du processus d'édification

La large présence de l'enveloppe avec pierre de réemploi montre toute l'attention de cette architecture pour l'économie des ressources locales. Les carrières voisines de Palerme permettaient de réduire le temps de transport. La gestion de la qualité parfois mauvaise des pierres montre toute l'intelligence de cette architecture qui avec de simples astuces, permettait de valoriser les savoir-faire face à la rareté ou la pauvreté des matériaux. L'organisation du chantier était très hiérarchisée et les tâches réparties dans les plus petits détails. La collaboration et la pluridisciplinarité étaient à la base de la réussite de ces architectures. Ces deux mêmes facteurs sont aujourd'hui primordiaux dans le développement de l'architecture numérique et du BIM (Building information modeling).

A l'issue de cette première partie, nous avons identifié quatre facteurs fondamentaux, qui sont des paramètres décisifs pour le contrôle thermique et hygrométrique d'un projet durable dans la région méditerranéenne à savoir : l'orientation, la ventilation, les systèmes de protection des apports solaires et l'inertie. La gestion de ces facteurs peut permettre d'assurer des conditions de confort et en même temps, générer des économies d'énergie en termes de rafraîchissement.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons exploré les applications possibles des enseignements identifiés ci-dessus. Nous examinons d'abord les actions possibles de retrofit sur le bâti existant. Les bâtiments traditionnels sont souvent inscrits dans des registres locaux offrant un certain degré de protection. Bien que toute modification physique, y compris les réparations, les ajouts, la rénovation énergétique, nécessite l'examen et l'approbation de l'organisme officiel correspondant et une étude spécifique historique et technico-constructive du bâtiment concerné, nous avons voulu montrer des exemples d'interventions possibles pour en évaluer les avantages et/ou désavantages potentiels. Pour le bâti neuf, nous avons voulu mettre en évidence l'importance de la pierre et de sa masse pour sa capacité à stocker l'énergie. Le nouvel intérêt porté aux applications architecturales innovantes de la pierre en architecture peut ouvrir une voie au projet architectural, particulièrement dans la région méditerranéenne. La mise en place de machines à contrôle numérique pour la découpe de la pierre, ainsi que la robotisation du chantier, peuvent contribuer à relancer le retour de la pierre en architecture.

Nous avons donc voulu ouvrir le débat en faveur de l'intégration de nouveaux matériaux (matériaux à changement de phase) et de systèmes solaires (concentrateurs solaires luminescents). Si les premiers présentent des caractéristiques intéressantes quant à leur capacité d'exploiter l'inertie thermique avec de petites épaisseurs, les LSC peuvent répondre à la question de la production d'énergie solaire dans une région à haute radiation solaire. La question de l'intégration des systèmes photovoltaïques demande une approche holistique de la conception architecturale. Les aspects fonctionnels, morphologiques et techniques doivent être pensés dès les premières étapes de la conception afin de réduire l'empreinte environnementale des nouvelles constructions. L'outil mathématique créé permet d'évaluer de manière interoperable la production d'énergie sur une surface quelconque constituée par des LSC dans un site. La démarche mise en place fait appel à la modélisation mathématique comme base de connaissance et de prise de décision ; elle nous a permis de créer un flux d'information continue de l'idée à la génération de la forme, jusqu'à l'évaluation énergétique ; elle nous a permis d'intégrer la recherche des solutions optimales parmi l'ensemble des solutions acceptables. La révolution apportée par le numérique et par les nouveaux matériaux ouvre un large éventail de nouvelles techniques et de procédures dans le processus du projet. La variété des connaissances que nécessite aujourd'hui leur évolution rapide et leur complexité croissante rendent quasiment impossibles un savoir et une maîtrise suffisante. C'est à l'architecte de créer des liaisons, à travers le projet. En travaillant avec des spécialistes, il doit maîtriser tout le processus du projet, son évolution et sa démarche, tout en intégrant les critères environnementaux.

La nature pluridisciplinaire de ce travail, qui touche à l'histoire de la construction et à la physique du bâtiment a rendu cette recherche complexe. Pour la partie calculatoire, nous nous sommes appuyé parfois sur des logiciels commercialisés, parfois nous avons créé notre propre outil. Dans la deuxième partie, le manque d'expérimentations constructives sur les matériaux à changement de phase ne permet pas une comparaison entre le calcul numérique et des tests réels. Il sera intéressant dans des travaux ultérieurs de se confronter avec les contraintes de réalisation et de mise en place de tels matériaux. La construction du prototype du Solar Decathlon

nous a permis de construire la première maison solaire intégrant des concentrateurs solaires luminescents dans un climat nord-européen. Il sera intéressant de répéter l'expérience constructive en région méditerranéenne pour en vérifier la faisabilité dans un contexte climatique différent.

Annexes

Annexe A

La radiation solaire et l'éclairement

La connaissance du rayonnement solaire est essentielle pour une bonne évaluation des conditions aux limites des bâtiments et pour la conception correcte des systèmes d'énergie solaire. Mesurer les données dans un site permet une plus grande précision pour l'évaluation de la radiation solaire. Cependant, la couverture limitée des réseaux de mesure du rayonnement placée sur les abords des grandes villes impose de développer des modèles de rayonnement solaire. Il existe deux catégories de modèles de rayonnement solaire, disponibles en littérature, qui permettent d'évaluer la composante directe et diffuse en fonction d'autres quantités mesurées plus facilement :

- Les modèles paramétriques.
- Les modèles de décomposition.

Les modèles paramétriques nécessitent des informations détaillées sur les conditions atmosphériques. Les paramètres météorologiques fréquemment utilisés, comprennent le type, la quantité et la distribution des nuages ou d'autres observations tels que la turbidité atmosphérique et la teneur en eau [136]. Les modèles de décomposition estiment l'irradiation diffuse et directe à partir des données d'irradiation globale sur une surface horizontale. Les relations entre la radiation directe et celle diffuse sont généralement exprimées en termes d'irradiations avec des intégrales de temps (généralement égal à 1 h) du flux radiant. Des modèles de décomposition développés pour estimer la radiation directe et diffuse à partir de données globales sur la radiation ont été trouvés dans la littérature [89] [105].

Le modèle mathématique de radiation solaire

Nous allons dans cette annexe expliquer le modèle mathématique de radiation solaire que nous avons développé avec une variation du rayonnement solaire (énergie directe et diffuse) comme une fonction continue du temps. Pour ce faire, nous reportons tout d'abord la nature de l'énergie rayonnée par le soleil dans l'espace, sa structure, et l'intensité avec laquelle cette énergie atteint la terre en fonction de la géométrie du système Terre-Soleil.

La position du soleil dans le ciel est exprimée en termes de hauteur solaire β_s et d'azimut solaire α_s . Ces angles dépendent de la latitude de la localité φ , de la déclinaison solaire δ et de l'angle horaire ω . Puisque le plan de l'équateur terrestre est incliné de $23,45^\circ$ par rapport au plan de l'orbite, nous devons, tout d'abord, calculer la déclinaison solaire δ , angle formé par la droite soleil-terre avec le plan de l'équateur terrestre. Elle varie au cours de l'année, provoquant les saisons, avec la variation respective du nombre d'heures de jour et de nuit. Elle est donnée par [30] :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284 + j}{365}\right) \quad (\text{A.1})$$

où j est le jour de l'année. La Figure A.1 montre l'évolution de δ au cours de l'année. Elle vaut 23.45° le 21 juin et -23.45° le 21 décembre. L'angle ω est formé par le plan méridien passant par l'observateur avec le plan méridien passant par le soleil, et est donné par :

$$\omega = 12 - h_s \cdot 15 \quad (\text{A.2})$$

où h_s est l'heure solaire.

Connaissant la déclinaison, l'angle horaire et la latitude de la localité considérée, la hauteur du soleil sur l'horizon, c'est-à-dire l'angle formé entre la direction des rayons du soleil et le plan horizontal, est calculée en utilisant la relation :

$$\beta_s = 90 - \theta_z \quad (\text{A.3})$$

où β_s est complémentaire à θ_z , c'est-à-dire l'angle zénithale du soleil, angle entre les rayons solaires et la direction du zénith.

$$\cos \theta_z = \sin \beta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (\text{A.4})$$

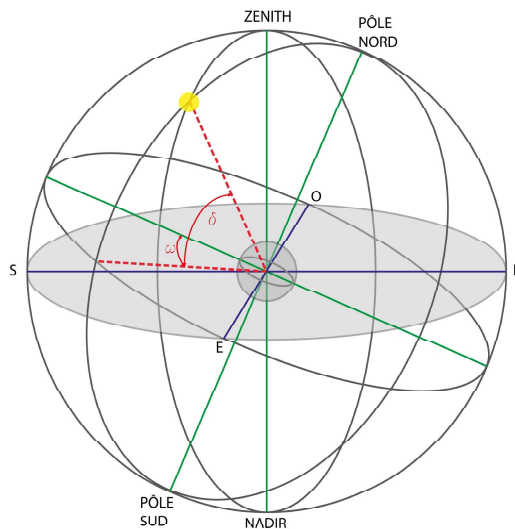


Fig. A.1 – Indication de l'angle de déclinaison solaire δ et de l'angle de temps ω

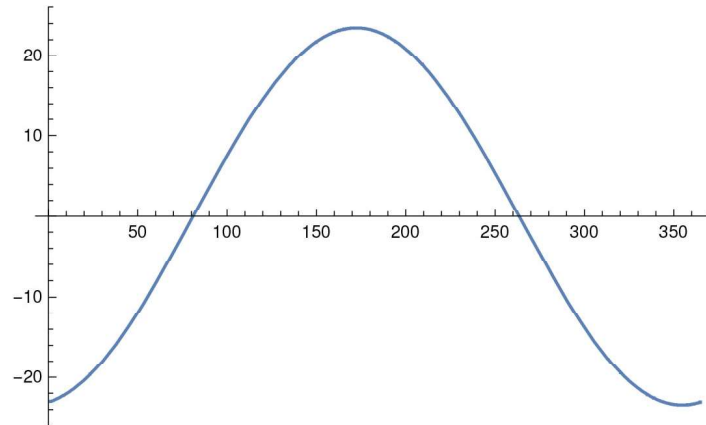


Fig. A.2 – Évolution de δ au cours de l'année

où φ est la latitude du lieu.

L'angle azimutal du soleil, c'est-à-dire l'angle formé entre la projection sur le plan horizontal des rayons solaires et la direction sud, positif vers la direction à l'est et négatif vers l'ouest, est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \beta} \quad (\text{A.5})$$

Grâce à la déclinaison solaire et de la latitude de la localité en question, on détermine l'angle horaire à l'aube et au coucher du soleil, à travers la relation :

$$\omega_s = \arcsin(\pm \tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (\text{A.6})$$

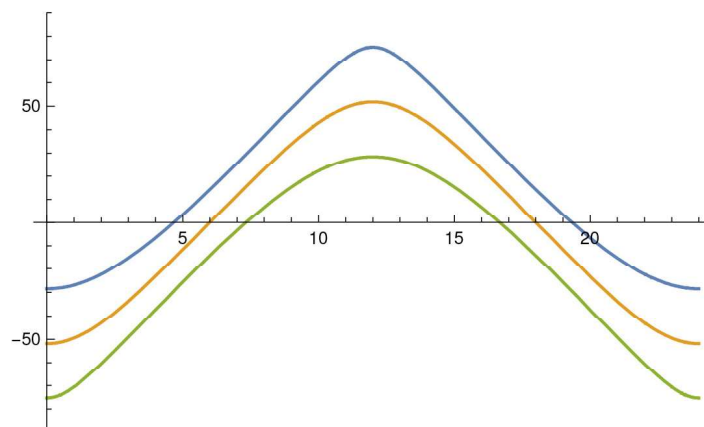


Fig. A.3 – Hauteur du soleil à Palermo. 21 décembre (courbe vert), 21 juin (courbe bleue), 21 mars et 21 septembre (courbe orange)

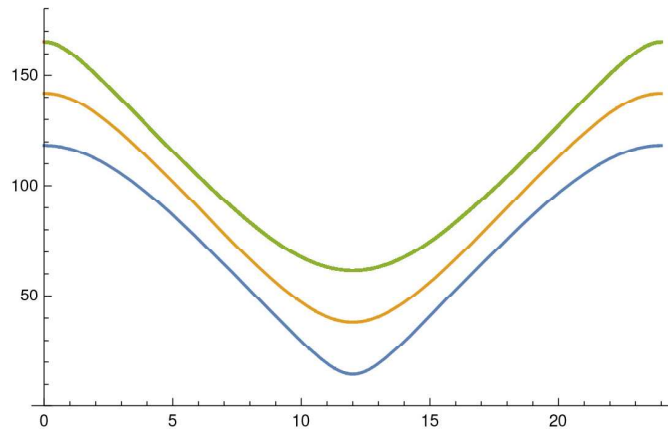


Fig. A.4 – Zénith solaire à Palermo. 21 décembre (courbe vert), 21 juin (courbe bleue), 21 mars et 21 septembre (courbe orange)

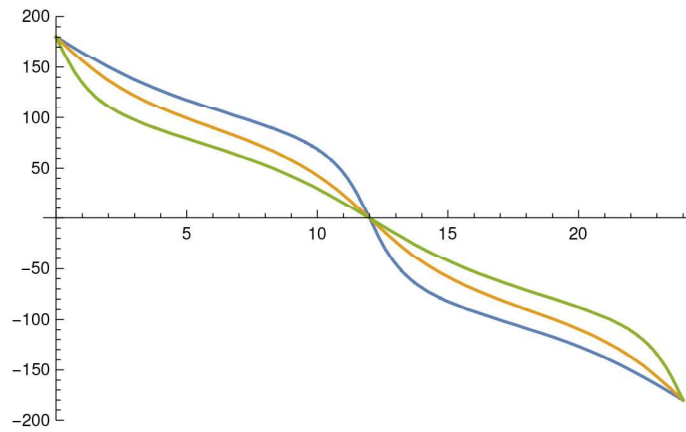


Fig. A.5 – Azimut solaire à Palermo. 21 décembre (courbe vert), 21 juin (courbe bleue), 21 mars et 21 septembre (courbe orange)

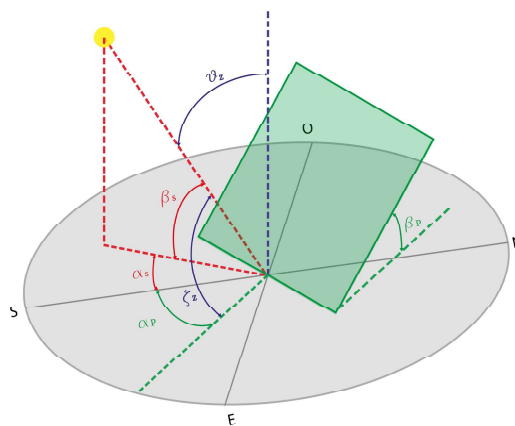


Fig. A.6 – Indication de l'angle d'altitude β_s et de l'azimut solaire α_s

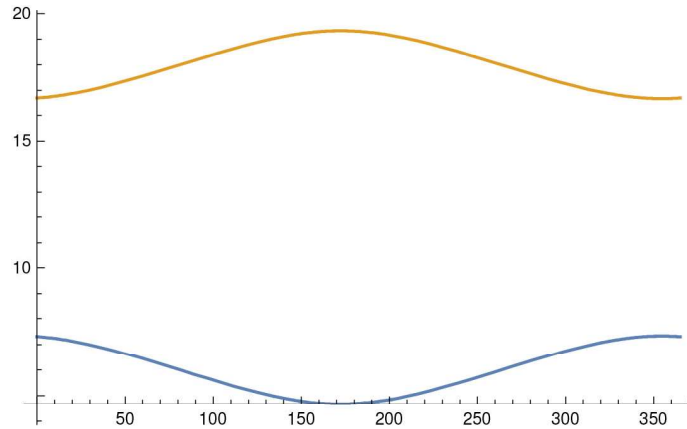


Fig. A.7 – Angle horaire d’aube et de coucher de soleil à Palerme

Tout d’abord, nous calculons le rayonnement extra-terrestre total pour une surface de 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 calculé avec un terme variable dans l’année [119] (Fig.A.8) :

$$I_0 = I_{SC} [1.00011 + 0.034221 \cdot \cos(x) + 0.00128 \cdot \sin(x) - 0.000719 \cdot \cos(2x) + 0.000077 \cdot \sin(2x)] \quad (\text{A.7})$$

où :

$$I_{SC} = 1366.1W/m^2 \quad (\text{A.8})$$

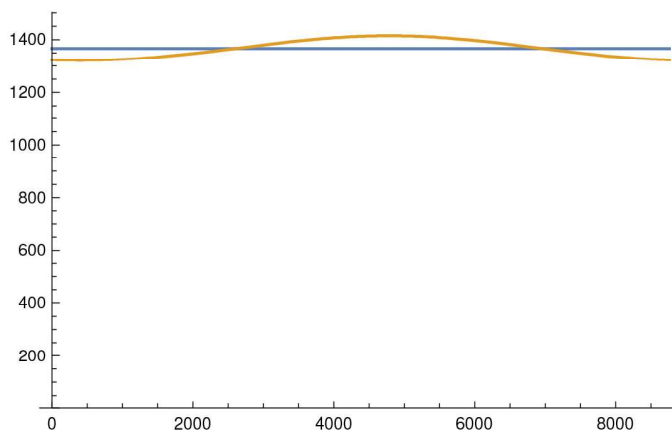


Fig. A.8 – Différence entre la valeur obtenue (en orange) et la constante solaire (en bleue) ,1366.1W/m²

La radiation globale sur une surface horizontale peut alors être calculée de deux manières différentes : soit en multipliant l'irradiation extra-atmosphérique sur un plan horizontal par un facteur de transmission calculé sur une base mensuelle moyenne, soit en multipliant la radiation mesurée (donnée en ligne) pour le facteur d'exposition normalisé à un.

La première méthode considère la trajectoire du soleil et des modèles prédictifs du rapport de transmission atmosphérique K_t [136]. Ce dernier est le rapport du rayonnement global sur une surface horizontale au sol et le rayonnement extra-terrestre. Une détermination de K_t peut être obtenue à partir de la relation entre le rayonnement moyen mensuel sur le terrain (donnée en ligne) et le rayonnement moyen mensuel extra-atmosphérique sur une surface horizontale (calculée) :

$$\overline{K}_t = \frac{\overline{H}_h}{\overline{H}_{0H}} \quad (\text{A.9})$$

où :

\overline{H}_h est le rayonnement moyen mensuel sur le terrain ; \overline{H}_{0H} est le rayonnement moyen mensuel extra-atmosphérique sur une surface horizontale. En ce qui concerne la deuxième méthode de calcul de la radiation globale, nous considérons le facteur d'exposition solaire, $\cos(\zeta)$, donné par le produit scalaire entre la partie positive du vecteur unitaire du soleil et le vecteur unitaire normal à la surface de mesure : $\cos(\zeta)$ est un nombre dans $[0,1]$. Le facteur d'exposition permet de calculer la radiation solaire globale sur une surface quelconque. Il est défini comme suit :

$$\cos \zeta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta_p + \sin \theta_z \cdot \sin \beta_p \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_p) \quad (\text{A.10})$$

La Figure A.10 montre le facteur d'exposition d'une surface horizontale à Palerme. La différence entre les résultats obtenus avec les deux méthodes est négligeable (Fig.A.11).

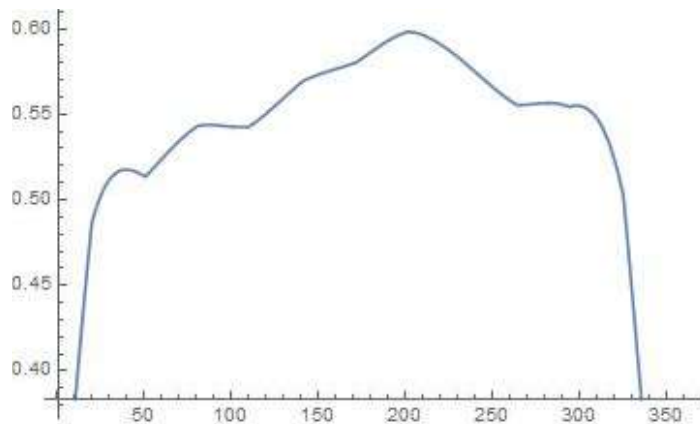


Fig. A.9 – Rapport de transmission atmosphérique \overline{K}_t

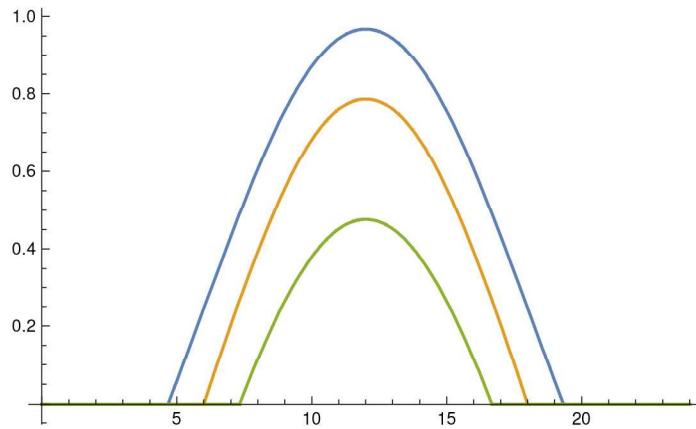


Fig. A.10 – Facteur d'exposition d'une surface horizontale exposé sud à Palermo. 21 décembre (courbe vert), 21 juin (courbe bleue), 21 mars et 21 septembre (courbe orange)

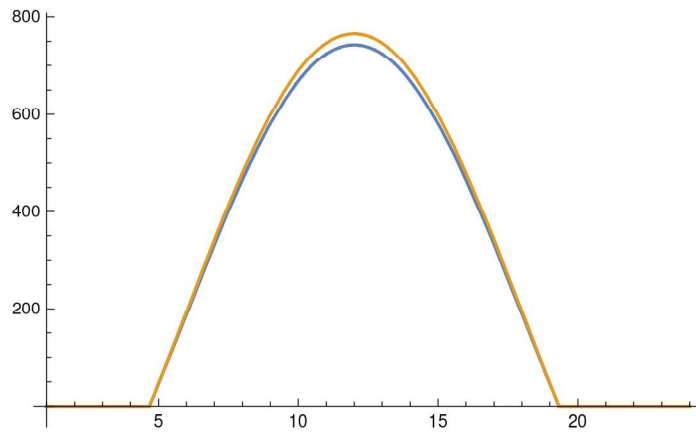


Fig. A.11 – Radiation solaire globale sur une surface horizontale le 26 juin. Résultat avec la première méthode (En orange). Résultat avec la deuxième méthode (En bleue).

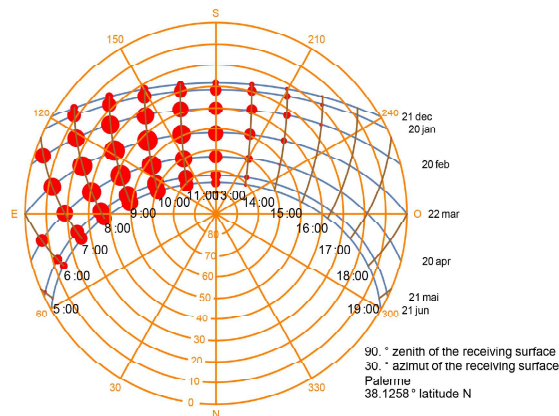


Fig. A.12 – Radiation solaire globale sur une surface verticale (zénith=90°, azimuth=30 °).

Après le passage à travers l'atmosphère de la Terre, le rayonnement solaire comprend à la fois une composante directe et une composante diffuse due aux réflexions sur les nuages, la vapeur d'eau et d'autres particules dans le ciel. Le modèle paramétrique simplifié de l'atmosphère ASHRAE avec ciel clair permet d'obtenir la fraction directe et diffuse sur une surface. Le modèle est utile parce qu'il fournit une estimation de la limite supérieure de rayonnement direct, estimée à ciel clair. La composante directe de la radiation solaire est donnée par [28] :

$$\dot{I}_n = (C_n)A \exp^{-\frac{B}{\sec \alpha}} \quad (\text{A.11})$$

où :

A est le rayonnement extra-terrestre [W/m^2];

B est le coefficient d'extinction atmosphérique;

C est la constante de proportionnalité entre la partie diffuse et directe;

α est l'altitude du soleil;

La composante diffuse est définie par une variable C (sans dimension) donnée dans Tableau <Ashrae>. Elle est donnée par :

$$\dot{I}_d = (C_n) \cdot I_n \cdot F_{ss} \quad (\text{A.12})$$

où F_{ss} est le facteur d'angle entre la surface et le ciel, est donnée par :

$$\dot{I}_d = \frac{1 + \cos \zeta}{2} \quad (\text{A.13})$$

Tableau A.1 – Valeurs de A,B,C four le calcule de la radiation solaire selon [28]

Date	A [W/m^2]	B	C
21 janvier	1230	0.142	0.058
21 février	1215	0.144	0.06
21 mars	1186	0.156	0.071
21 avril	1136	0.180	0.097
21 mai	1104	0.196	0.121
21 juin	1088	0.205	0.134
21 juillet	1085	0.207	0.136
21 aout	1107	0.201	0.122
21 septembre	1152	0.177	0.092
21 octobre	1193	0.160	0.073
21 novembre	1221	0.149	0.063
21 décembre	1234	0.142	0.057

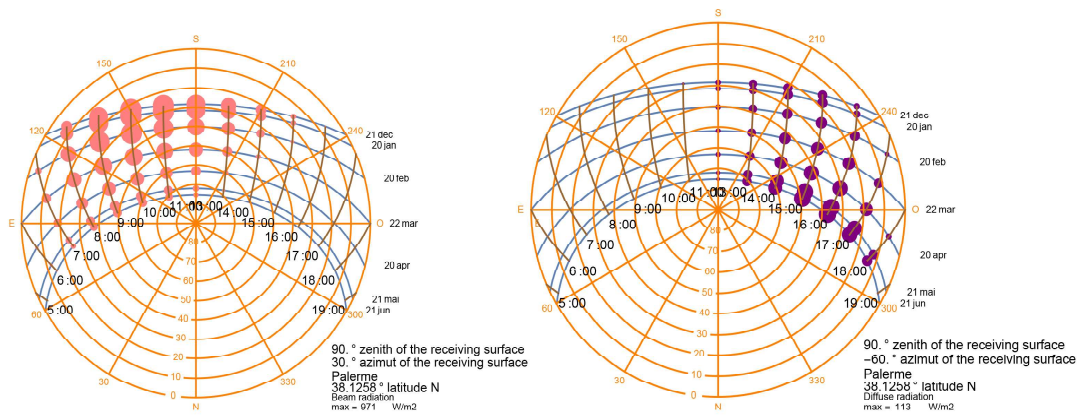


Fig. A.13 – Radiation solaire directe (à droite) et diffuse (à gauche) sur une surface verticale (zenith=90°, azimuth=30 °).

La radiation solaire dans Ecotect

Dans ce paragraphe nous allons expliquer la méthode de calcul de la radiation solaire dans le logiciel Ecotect, outil numérique qui nous a permis d'effectuer les simulations de radiation directe et diffuse en présence d'obstacles sur les canyons urbains.

Le rayonnement solaire incident, fait référence à l'énergie rayonnante à large spectre du soleil qui frappe un objet ou une surface dans le modèle Ecotect. Cela inclut à la fois une composante directe et une composante diffuse. Toutes les composantes sont calculées directement à partir de la géométrie du modèle ainsi qu'à partir des valeurs de rayonnement solaire direct et diffus par heure, présents dans le fichier de données météo chargé. Dans le format des données météo Ecotect, la composante directe est mesurée sur une surface directement face au soleil. Lorsque le soleil se déplace dans le ciel, cette surface de mesure le suit de sorte que la direction du rayonnement incident soit toujours perpendiculaire. La composante diffuse est considéré comme l'énergie disponible sur l'ensemble du dôme du ciel, moins la valeur du rayonnement direct, mesurée sur une surface horizontale plane. Une fois connue cette valeur, elle peut être modérée par l'angle d'inclinaison de chaque surface dans le modèle.

La radiation solaire globale est donnée par la somme de la radiation directe et la radiation diffuse reçues par la surface. La partie directe relevée est multipliée par le facteur d'exposition $\cos(\zeta)$ et par la fraction de surface à l'ombre à cause d'autres géométries environnantes. La radiation diffuse relevée est multipliée par la fraction du ciel diffus effectivement visible depuis la surface.

$$I_g = [I_d \cdot \cos(\zeta) \cdot F_{omb} + I_d \cdot F_{ciel}] \cdot S_{exp} \quad (\text{A.14})$$

La surface à examiner est discrétisée en surfaces élémentaires de dimensions appropriées au détail d'analyse souhaité.

La radiation solaire directe est maximale lorsque l'angle d'incidence approche 0° . Elle est minimale lorsque l'angle d'incidence approche 90° .

Afin de déterminer quelles parties du ciel sont visibles F_{ciel} et quel pourcentage de chaque point est à l'ombre à tout moment F_{omb} , Ecotect calcule progressivement les masques d'ombre détaillés pour chaque point au fur à mesure que le calcul de la radiation s'exécute. Les masques d'ombre stockent le pourcentage d'ombre et les valeurs d'incidence sur la grille du modèle pour chaque altitude et azimuth donné sur la voute céleste. Nous avons choisi une discrétisation angulaire de la voute céleste égal à 5° en altitude et 5° en azimuth. Le contour de la zone ombrée est calculé par rapport à chaque analyse de temps, et à chaque unité de temps on vérifie si le centre de gravité de chaque partie élémentaire se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur du contour.

Les valeurs quotidiennes moyennes de radiation solaire (directe et diffuse) sont calculées comme la somme de toutes les valeurs dans chaque centre des éléments de la grille.

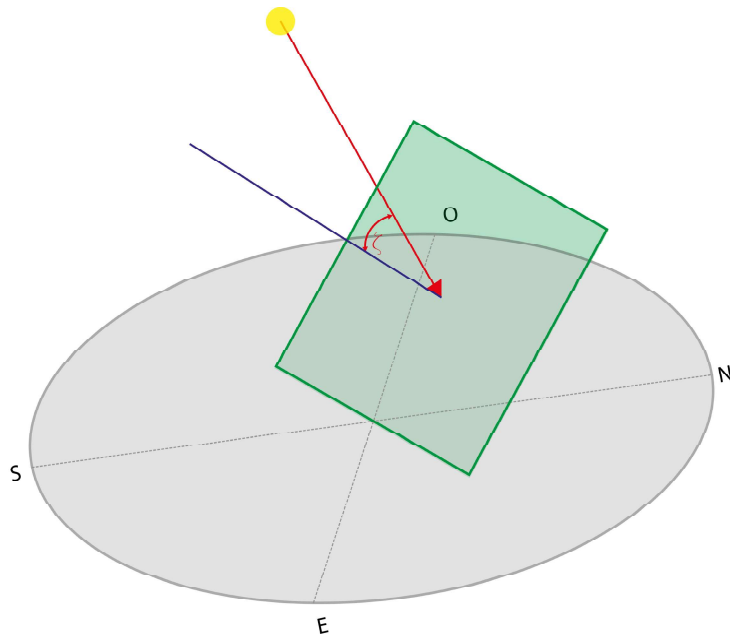


Fig. A.14 – Angle d'incidence ζ

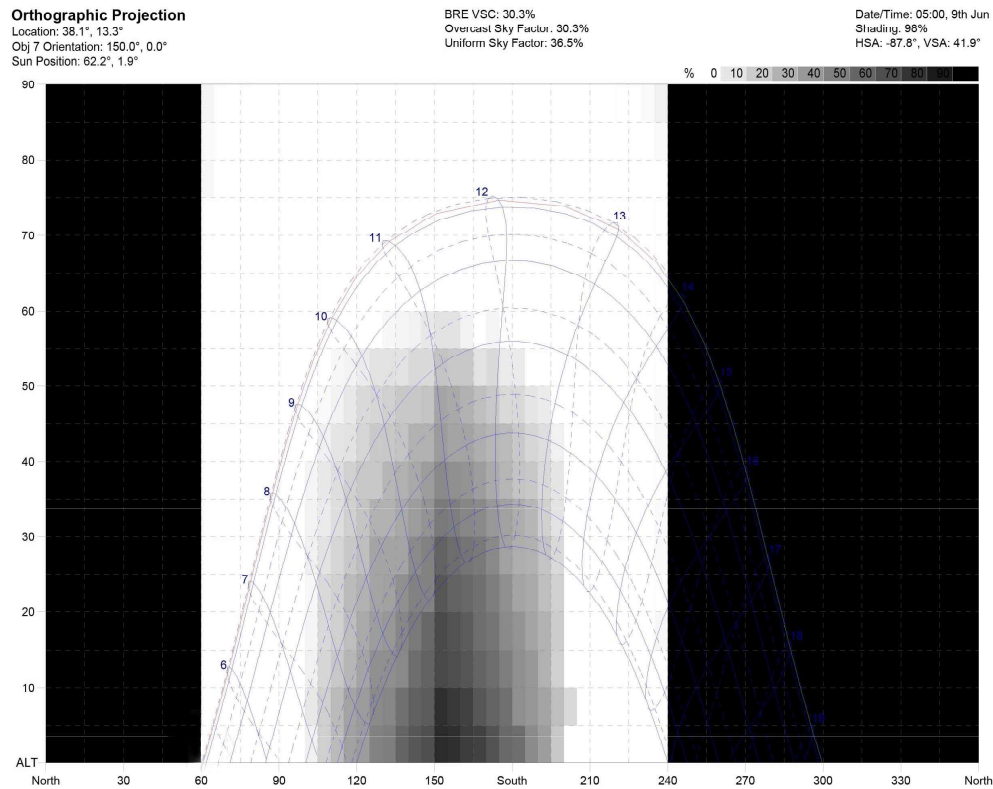


Fig. A.15 – Exemple de masque d'ombre pour un bâtiment à Palerme avec un obstacle. Exposition sud-est.

L'éclairement dans Ecotect

Dans ce paragraphe nous allons expliquer la méthode de calcul de l'éclairement dans le logiciel Ecotect, outil numérique qui nous a permis d'effectuer les simulations en présence d'obstacles sur les canyons urbains.

Comme dans le cas précédent, la surface est discrétisée en surface élémentaires (i). La voûte céleste est discrétisée avec une discrétisation angulaire égal à 5° en altitude et 5° en azimut. L'éclairement énergétique ou lumineux est ainsi calculé au centre de chaque élément. Ecotect identifie les portions de ciel vues depuis cet élément, en tenant compte des obstructions éventuelles et détermine l'énergie reçue par cumul des luminances des éléments de ciel visibles comme suit :

$$E = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \omega_i \cdot L(\alpha_i, \beta_i) \cdot \cos \beta_i \cdot \cos \eta \quad (\text{A.15})$$

où :

$L(\alpha_i, \beta_i)$ est la distribution de l'éclairement, qui est fonction de l'azimut α_i et de l'altitude β_i de l'élément de ciel considéré ;

η_i l'angle entre la direction de ciel visée et la normale à l'élément de la grille i ;

v_i la fonction de visibilité (égale à 1 si l'élément de ciel est visible depuis le centre de l'élément i , 0 dans le cas contraire) ;

ω_i l'angle solide sous lequel est vu l'élément de ciel i .

Après avoir paramétré la valeur exacte de la couleur de chaque surface du modèle, Ecotect utilise la valeur de réflectance externe calculée à partir de la couleur de chaque objet externe. La contribution de chaque rayon sera ainsi modérée par le facteur de réflectivité externe.

Un autre élément pour définir l'éclairement d'un environnement urbain est donné par les réflexions multiples des surfaces. Ces derniers fournissent une énergie provenant de la réflexion de l'énergie incidente par tous les éléments de surface de l'environnement, chacun d'eux se comportant alors comme un émetteur d'énergie secondaire [85]. Comme aucune réflexion multiple n'est envisagée après la frappe du premier objet opaque dans Ecotect, la contribution du rayon est égale à l'éclairement de la partie du ciel qu'il aurait atteinte, en tenant compte de la réflectance des matériaux.

Annexe B

L'analyse aux éléments finis en Cast3m

Nous présentons dans cette annexe l'algorithme développé en Cast3m pour le calcul thermique sur l'enveloppe en régime stationnaire et dynamique.

Cast3M est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis pour la mécanique des structures et des fluides. Cast3M est développé au Département de Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA). Le langage utilisé dans Cast3m est le Gibiane (Fig.B.1).

Etape1 : choix de la géométrie et du maillage

Pour construire la géométrie et le maillage, nous avons utilisé deux méthodes : la première construit le maillage directement sur Cast3m, la deuxième prévoit deux étapes : dans un premier temps, la définition d'une géométrie par un outil de CAO/DAO (Rhinoceros+Grasshopper dans notre cas), puis dans un second temps la génération du maillage à partir de la géométrie créée.

Nous présentons dans ce paragraphe la démarche de création de maillages avec la première méthode. Dans Cast3M, un objet géométrique n'existe que sous forme discrétisée : la discrétisation du domaine en éléments s'effectue au moment de la définition de la géométrie.

La démarche générale de construction d'un maillage est la suivante :

- Construction des points ;
- Construction des droites à partir des points ;
- Construction des surfaces à partir des lignes ;

Étant donné que les entités géométriques sont créées uniquement sous forme discrétisée, il est important de paramétrer la densité du maillage (nombre et/ou taille d'éléments). Nous construisons donc une géométrie paramétrique en définissant dans un repère cartésien les coordonnées x et y de chaque point. A partir des points nous créons les contours fermés de chaque couche (Fig. B.2).

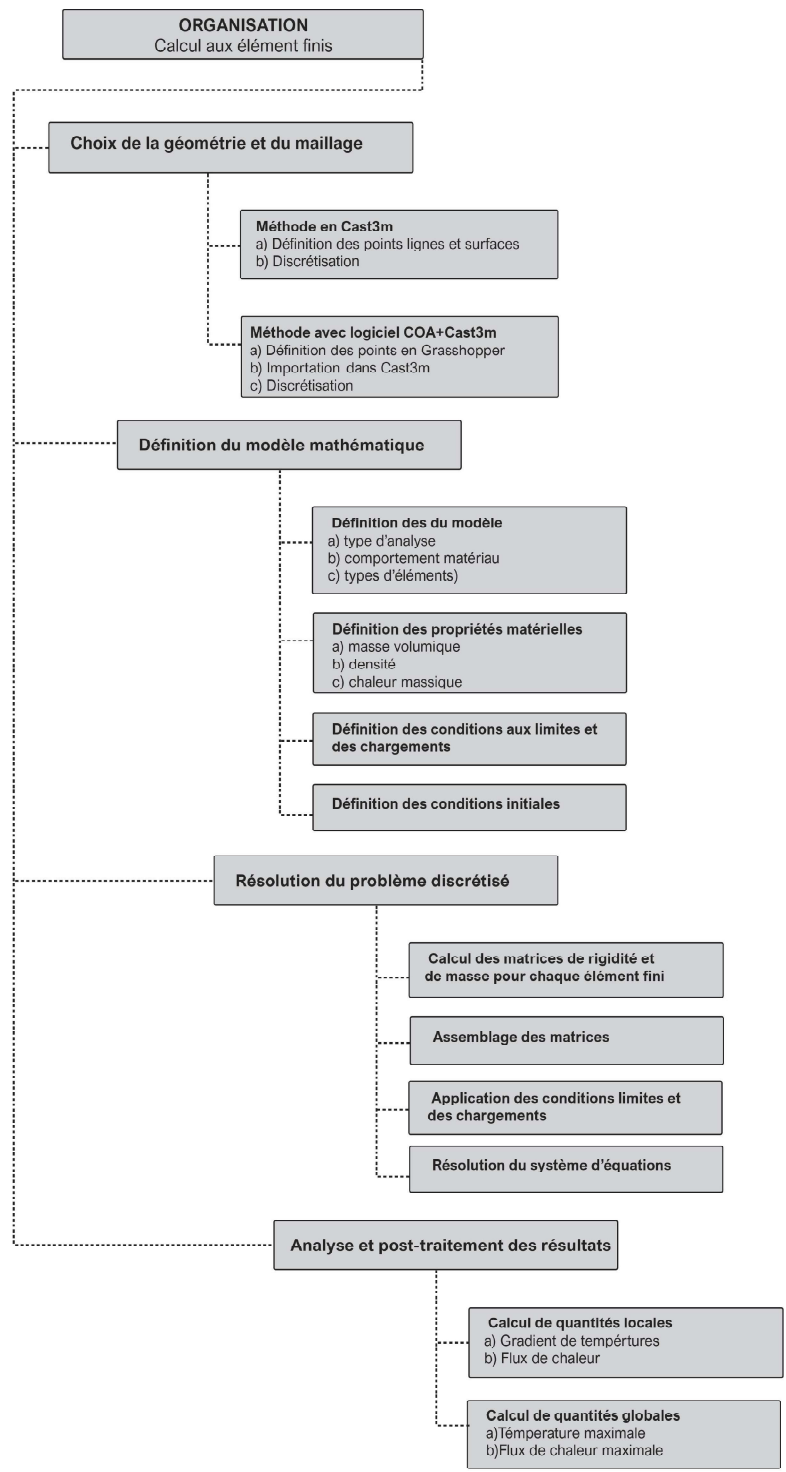


Fig. B.1 – Schéma d'organisation du calcul en Cast3m

OPTI DIME 2 ELEM TRI3 ;
DENSITE 0.02;

*****CREATION GEOMETRIE*****

Hmu=1.;
Lmu=1.;

Axe x

*entraxe

a=1;

*encatremet

b=.0.25;

*épaisseur mur

c=0.6;

*port à faux

d=0.1;

e=0.45;

*marme

f=0.1;

x1= 0.;

x2= a;

x3= x2+b;

x4= x2+c;

x5= x4+d;

x6= x5+e;

x7= x6+f;

Axe y

*hauteur planches en bois

g= 0.02;

*h chaux

h= 0.07;

*h carrelage

i= 0.025;

*hauteur port-à-faux1

l= 0.55;

*hauteur port-à-faux2

m= 0.1;

y1= 0.;

y2= Hmu-l;

y3= y2+l-m;

y4= y3+m;

```
y5= y4+g;  
y6= y5+h;  
y7= y6+i;  
y8= y7+Hmu;
```

```
****définition des points****
```

```
TAB1 = TABLE ;  
TAB1 . SOMMET = TABLE ;  
TAB1 . CONTOUR = TABLE ;  
TAB1 . SURFACE = TABLE ;
```

```
TAB1.SOMMET.1 = (x2 y1);  
TAB1.SOMMET.2 = (x4 y1);  
TAB1.SOMMET.3 = (x2 y2);  
TAB1.SOMMET.4 = (x4 y2);  
TAB1.SOMMET.5 = (x5 y2);  
TAB1.SOMMET.6 = (x6 y3);  
TAB1.SOMMET.7 = (x3 y4) ;  
TAB1.SOMMET.8 = (x2 y4) ;  
TAB1.SOMMET.9 = (x1 y6) ;  
TAB1.SOMMET.10 = (x3 y6);  
TAB1.SOMMET.11 = (x3 y7);  
TAB1.SOMMET.12 = (x2 y7);  
TAB1.SOMMET.13 = (x1 y7);  
TAB1.SOMMET.14 = (x2 y8);  
TAB1.SOMMET.15 = (x4 y8);  
TAB1.SOMMET.16 = (x4 y7);  
TAB1.SOMMET.17 = (x7 y7);  
TAB1.SOMMET.18 = (x7 y4);  
TAB1.SOMMET.19 = (x6 y4);  
TAB1.SOMMET.20 = (x3 y5);  
TAB1.SOMMET.21 = (x1 y5);  
TAB1.SOMMET.22 = (x1 y4);
```

```
TAB1.CONTOUR.1 = TAB1.SOMMET.1 Droite TAB1.SOMMET.2  
Droite TAB1.SOMMET.4 Droite TAB1. SOMMET.3 Droite TAB1. SOMMET.1 ;
```

```
TAB1.CONTOUR.2 = TAB1.SOMMET.22 Droite TAB1.SOMMET.8  
Droite TAB1.SOMMET.7 Droite TAB1.SOMMET.20 Droite TAB1.SOMMET.21  
Droite TAB1. SOMMET.22 ;
```

```
TAB1.CONTOUR.3 = TAB1.SOMMET.21 Droite TAB1.SOMMET.20  
Droite TAB1.SOMMET.10 Droite TAB1.SOMMET.9  
Droite TAB1.SOMMET.21 ;
```

TAB1.CONTOUR.4 = TAB1.SOMMET.9 Droite TAB1.SOMMET.10
Droite TAB1. SOMMET.11 Droite TAB1. SOMMET.12
Droite TAB1.SOMMET.13 Droite TAB1.SOMMET.9 ;

TAB1.CONTOUR.5 = TAB1.SOMMET.12 Droite TAB1.SOMMET.11
Droite TAB1.SOMMET.16 Droite TAB1.SOMMET.15 Droite TAB1.SOMMET.14
Droite TAB1.SOMMET.12 ;

TAB1.CONTOUR.6 = TAB1.SOMMET.7 Droite TAB1.SOMMET.19
Droite TAB1.SOMMET.18 Droite TAB1.SOMMET.17 Droite TAB1.SOMMET.16
Droite TAB1.SOMMET.11 Droite TAB1.SOMMET.10 Droite TAB1.SOMMET.20
Droite TAB1.SOMMET.7;

TAB1.CONTOUR.7 = TAB1.SOMMET.3 Droite TAB1.SOMMET.4
Droite TAB1.SOMMET.5 Droite TAB1. SOMMET.6 Droite TAB1. SOMMET.19
Droite TAB1.SOMMET.7 Droite TAB1.SOMMET.8 Droite TAB1.SOMMET.3 ;

I = 1 ;
repete bouc1 (7) ;
TAB1.SURFACE.I = SURF TAB1.CONTOUR.I 'PLAN';
I = I + 1 ;
fin bouc1 ;

SUR1= TAB1 . SURFACE . 1 ;
SUR2= TAB1 . SURFACE . 2 ;
SUR3= TAB1 . SURFACE . 3 ;
SUR4= TAB1 . SURFACE . 4 ;
SUR5= TAB1 . SURFACE . 5 ;
SUR6= TAB1 . SURFACE . 6 ;
SUR7= TAB1 . SURFACE . 7 ;

*****Definition des surfaces de contours*****

surface intérieur

COINT= TAB1.SOMMET.1 Droite TAB1.SOMMET.3
Droite TAB1.SOMMET.8 Droite TAB1.SOMMET.22
Droite TAB1.SOMMET.21 Droite TAB1.SOMMET.9
Droite TAB1.SOMMET.13 Droite TAB1.SOMMET.12
Droite TAB1.SOMMET.14;

surface extérieur

COEXT= TAB1.SOMMET.2 Droite TAB1.SOMMET.4 Droite TAB1.SOMMET.5
Droite TAB1.SOMMET.6 Droite TAB1.SOMMET.19 Droite TAB1.SOMMET.18
Droite TAB1.SOMMET.17 Droite TAB1.SOMMET.16
Droite TAB1.SOMMET.15;

```

***surface supérieure et inférieure***
COSUP= TAB1.SOMMET.14 Droite TAB1.SOMMET.15;
COINF= TAB1.SOMMET.1 Droite TAB1.SOMMET.2;

BAL1= SUR1 ET SUR2 ET SUR3 ET SUR4 ET SUR5 ET SUR6 ET SUR7
ET COINT ET COEXT ET COSUP ET COINF;
CONTB= CONTOUR BAL1;

***elimination des points doubles***
ELIM BAL1 0.008;

TRAC BAL1;

```

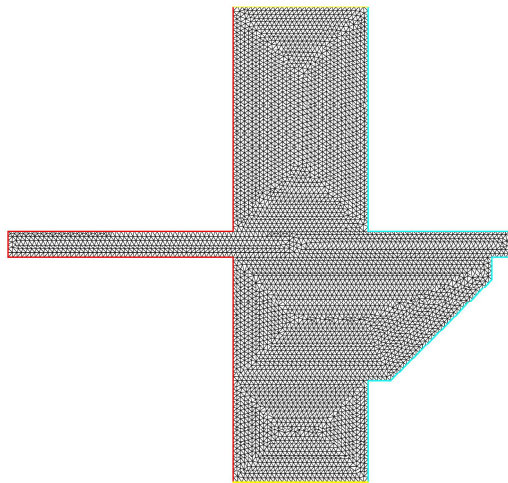
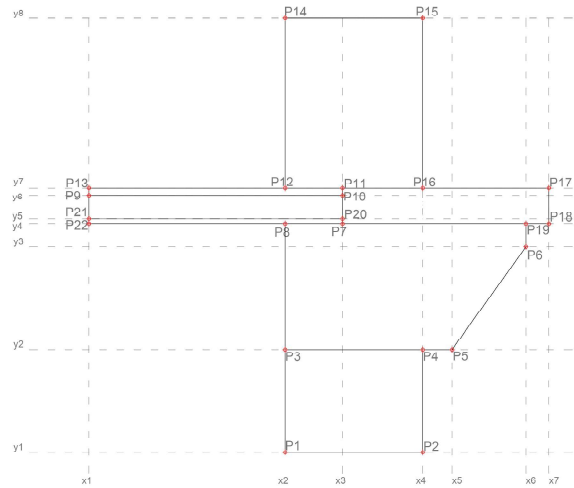


Fig. B.2 – Géométrie construite sur Cast3m

La deuxième méthode prévoit le dessin de la géométrie sur un logiciel CAO/DAO, dans notre cas Grasshopper. Nous avons donc créé un algorithme paramétrique qui permet de sortir la liste des points dans un format compatible avec Cast3m (Fig.B.3). On importe ensuite la liste des points sur Cast3m avec le script suivant :

```
*****CREATION DE LA GEOMETRIE *****
```

```
OPTI ACQU ('points.dat');
TAB1 = TABLE ;
TAB1 . SOMMET = TABLE ;
TAB1 . CONTOUR = TABLE ;
TAB1 . SURFACE = TABLE ;

REPE OBJ 8;
REPE PNT 4;

IDH=0;
ACQU X Y IND;

si (EGA 0 IND);
IDH=IDH+1;
TAB1 . SOMMET . &OBJ = TABLE;
TAB1 . SOMMET . &OBJ. &PNT = TABLE;
TAB1 . SOMMET . &OBJ. &PNT = (X Y);
FINSI;

si (EGA 1 IND);
TAB1 . SOMMET . &OBJ. &PNT = (X Y);
FINSI;

si (EGA 2 IND);
TAB1 . SOMMET . &OBJ. &PNT = (X Y);
FINSI;

FIN PNT;
FIN OBJ;

I = 1 ;
repetier bouc1 (8) ;
TAB1.CONTOUR.I = TAB1.SOMMET.I.1
D TAB1.SOMMET.I.2
D TAB1.SOMMET.I.3
D TAB1.SOMMET.I.4
D TAB1.SOMMET.I.1;
I = I + 1 ;
fin bouc1 ;
```

```
TRAC (TAB1.CONTOUR.1 ET TAB1.CONTOUR.2 ET
TAB1.CONTOUR.3 ET TAB1.CONTOUR.4 ET
TAB1.CONTOUR.5 ET TAB1.CONTOUR.6 ET
TAB1.CONTOUR.7 ET TAB1.CONTOUR.8);
```

```
I = 1 ;
repetier bouc1 (8) ;
TAB1.SURFACE.I = SURF TAB1.CONTOUR.I 'PLAN';
I = I + 1 ;
fin bouc1 ;
```

```
*****geometrie pour les conditions au contour*****
```

```
***surface externe***
```

```
I=3;
P132= TAB1.SOMMET.I.2;
P133= TAB1.SOMMET.I.3;
I=1;
P212=TAB2.SOMMET.I.2;
P213=TAB2.SOMMET.I.3;
P214=TAB2.SOMMET.I.4;
I=4;
P142=TAB1.SOMMET.I.2;
P143=TAB1.SOMMET.I.3;
I=8;
P182=TAB1.SOMMET.I.2;
P183=TAB1.SOMMET.I.3;
```

```
COEXT= P132 D P133 D P212 D P213 D P214 D P142 D P143
D P182 D P183 COULEUR 'ROUGE';
```

```
***surface interne***
```

```
I=3;
P131=TAB1.SOMMET.I.1;
P134=TAB1.SOMMET.I.4;
I=8;
P181=TAB1.SOMMET.I.1;
P184=TAB1.SOMMET.I.4;
I=1;
P111=TAB1.SOMMET.I.1;
P112=TAB1.SOMMET.I.2;
P113=TAB1.SOMMET.I.3;
P114=TAB1.SOMMET.I.4;
I=2;
P121=TAB1.SOMMET.I.1;
P122=TAB1.SOMMET.I.2;
```

P124=TAB1.SOMMET.I.4;
I=5;
P151=TAB1.SOMMET.I.1;
P154=TAB1.SOMMET.I.4;
I=6;
P164=TAB1.SOMMET.I.4;
I=7;
P173=TAB1.SOMMET.I.3;
P174=TAB1.SOMMET.I.4;

COINT= P184 D P173 D P174 D P164 D P154 D P151 D P114
D P111 D P112 D P113 D P124 D P121 D P122 D P134
D P131 COULEUR 'BLEU';

****surface supérieur*****
I=8;
P183=TAB1.SOMMET.I.3;
COSUP= P183 D P184 COULEUR 'JAUNE';

****surface inférieur*****
I=3;
P132=TAB1.SOMMET.I.2;
COINF= P131 D P132 COULEUR 'JAUNE';

BAL1= TAB1.SURFACE.1 ET TAB1.SURFACE.2 ET
TAB1.SURFACE.3 ET TAB1.SURFACE.4 ET
TAB1.SURFACE.5 ET TAB1.SURFACE.6 ET
TAB1.SURFACE.7 ET TAB1.SURFACE.8 ET
COSUP ET COINF ET COINT ET COTEXT;
elim BAL1 0.008;
CONTB= CONTOUR BAL1;

TRAC BAL1;

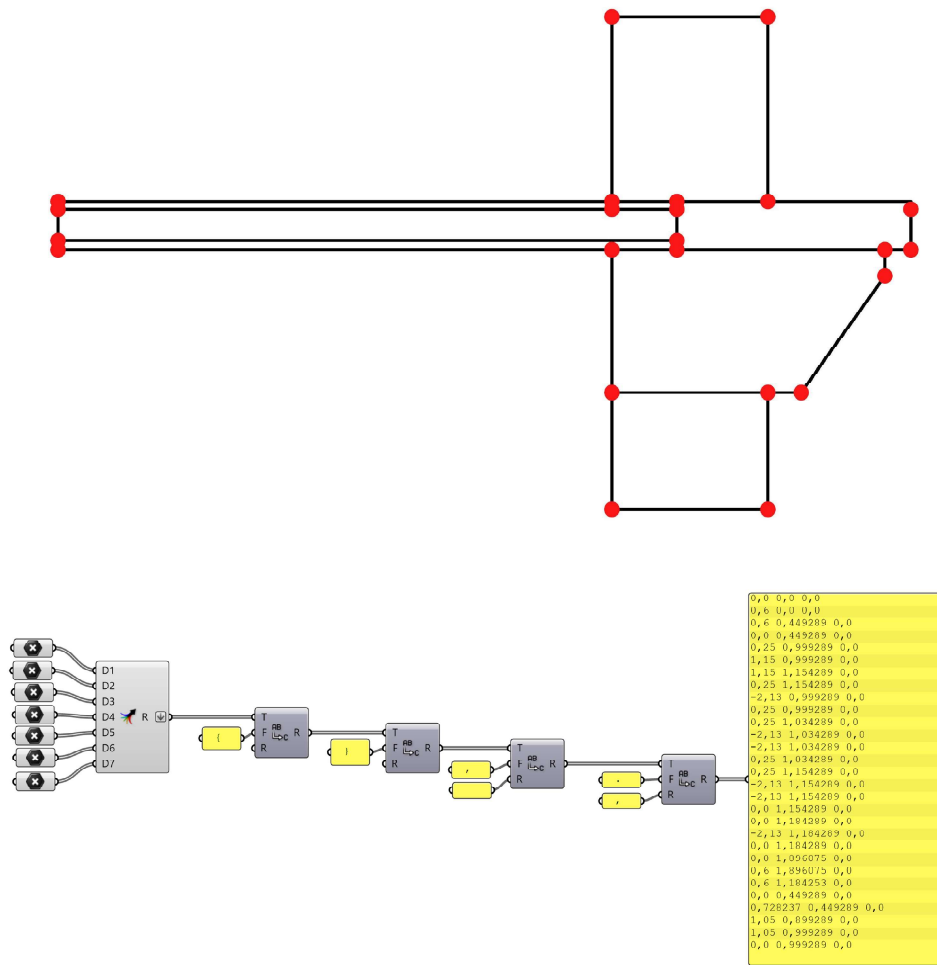


Fig. B.3 – Géométrie construite sur Grasshopper

Étape2a : définition du modèle

Nous définissons le comportement du matériau et les propriétés matérielles. Le modèle est appliqué sur un maillage et sera relatif à un matériau. Il a pour but de spécifier une formulation par éléments finis, ce qui va impliquer le nom des inconnues et de toutes quantités déduites (gradients ..) et le type de matériau. Le matériau est appliqué sur un modèle. Les conditions aux limites sont définis par la condition de convection et la condition de flux de chaleur imposé.

La prise en compte de conditions aux limites de convection se fait en déclarant un modèle de convection ; un champ de propriétés matérielles décrivant les valeurs numériques du coefficient d'échange ; un chargement. Nous appliquons ensuite une condition adiabatique de flux de chaleur imposé sur la surface supérieure et inférieure du nœud.

```
****DONNEES INITIALES****
```

```
***CONDUCTIVITE****
```

```
*Mat1 > bois
```

```
K1= 0.2;
```

```
*Mat2 > chaux
```

```
K2= 0.47;
```

```
*Mat3 > carrelage
```

```
K3= 0.7;
```

```
*Mat4 > pierre
```

```
K4= 0.7;
```

```
*Mat5 > acier
```

```
K5=30;
```

```
***DENSITE***
```

```
*Mat1 > bois ;
```

```
RHO1 = 350. ;
```

```
*Mat2 > chaux
```

```
RHO2 = 150. ;
```

```
*Mat3 > carrelage
```

```
RHO3 = 880. ;
```

```
*Mat4 > pierre
```

```
RHO4 = 1500. ;
```

```
*Mat5 > acier
```

```
RHO5 = 7850. ;
```

```
***CHALEUR MASSIQUE****
```

```
*Mat1 > bois ;
```

```
CO1=1200;
```

```
*Mat2 > chaux
```

```
CO2= 850;
```

```
*Mat3 > carrelage
```

```

C03=800;
*Mat4 > pierre
C04=900;
*Mat5 > acier
C05=350;

*Coefficient de convection (fluss orizz/esterno)
Hext= 23. ;
*Coefficient de convection (fluss orizz/interno)
Hint=8;

*Temperature de l'air exterieur
Text= 273.;
*Temperature de l'air interieur
Tint= 293. ;

*DEFINITION DU MODELE MATHEMATIQUE

* MODELE THERMIQUE (CONDUCTION) A MATERIAU UNIFORME ET CONSTANT

MOD1 = MODE SUP1 THERMIQUE ISOTROPE ;
MOD2 = MODE SUP2 THERMIQUE ISOTROPE ;
MOD3 = MODE SUP3 THERMIQUE ISOTROPE ;
MOD4 = MODE SUP4 THERMIQUE ISOTROPE ;
MOD5 = MODE SUP5 THERMIQUE ISOTROPE ;
MOD6 = MODE SUP6 THERMIQUE ISOTROPE ;
MOD7 = MODE SUP7 THERMIQUE ISOTROPE ;

MODTOT = MOD1 ET MOD2 ET MOD3 ET MOD4
ET MOD5 ET MOD6 ET MOD7 ;

MOD1C= MODE COINT THERMIQUE CONVECTION ;
MOD2C= MODE COEXT THERMIQUE CONVECTION ;
MODCTOT = MOD1C ET MOD2C ;
MODL1 = MODTOT ET MODCTOT ;

****CONDUCTION****

MAT1 = MATE MOD1 'K' K4 'RHO' RH04 'C' C04;
MAT2 = MATE MOD2 'K' K1 'RHO' RH01 'C' C01;
MAT3 = MATE MOD3 'K' K2 'RHO' RH02 'C' C02;
MAT4 = MATE MOD4 'K' K3 'RHO' RH03 'C' C03;
MAT5 = MATE MOD5 'K' K4 'RHO' RH04 'C' C04;
MAT6 = MATE MOD6 'K' K4 'RHO' RH04 'C' C04;
MAT7 = MATE MOD7 'K' K4 'RHO' RH04 'C' C04;

```

MATCDTOT = MAT1 ET MAT2 ET MAT3 ET MAT4 ET
MAT5 ET MAT6 ET MAT7;

CONDITIONS AUX LIMITES
****CONVECTION****

MAT1B = MATE MOD1B 'H' Hoint;
MAT2B = MATE MOD2B 'H' Hoext ;
*
MATCVTOT = MAT1B ET MAT2B ;
MATR1=MATCDTOT ET MATCVTOT ;

*** CHARGEMENT (FLUX)
FF1 = CONVECTION MOD1C MAT1C T Tint ;
FF2 = CONVECTION MOD2C MAT2C T Text;

CONDITION ADIABATIQUE
FF3 = FLUX MOD5 COSUP 0. ;
FF4 = FLUX MOD1 COINF 0. ;

FLUTOT = FF1 ET FF2 ET FF3 ET FF4;

Étape 3a : Résolution du problème discrétisé en régime permanent

Dans un premier temps nous effectuons un calcul en régime permanent. Nous construisons alors les matrices de conductivité. Le système linéaire à résoudre est donc donné par :

$$\underline{KT} = \underline{Q} \quad (\text{B.1})$$

où :

\underline{K} : la matrice de conductivité, éventuellement complétée de la matrice de blocages associée aux conditions aux limites de température imposée;

\underline{T} : les températures aux nœuds;

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

*** MATRICES DE CONDUCTIVITES ****

* CONDUCTION

CND1 = CONDUCTIVITE MOD1 MAT1 ;
CND2 = CONDUCTIVITE MOD2 MAT2 ;
CND3 = CONDUCTIVITE MOD3 MAT3 ;
CND4 = CONDUCTIVITE MOD4 MAT4 ;
CND5 = CONDUCTIVITE MOD5 MAT5 ;

```

CND6 = CONDUCTIVITE MOD6 MAT6 ;
CND7 = CONDUCTIVITE MOD7 MAT7 ;

*assemblage des termes de conductivité

CONTOT= CND1 ET CND2 ET CND3 ET CND4 ET CND5
ET CND6 ET CND7 ;

*CONVECTION
CON1= CONDUCTIVITE MOD1C MAT1C;
CON2= CONDUCTIVITE MOD2C MAT2C;
CONTOT2= CONTOT ET CON1 ET CON2;

*****1ERE RESOLUTION*****:

*TEMPERATURE EXT IMPOSEE + CONVECTION*

TEMP1 = RESO CONTOT2 FLUTOT;
OPTI ISOV surf;
OPTI 'ISOV' 'SULI';
TRAC TEMP3 BAL1 CONTB TITR 'Champ de temperature' 20;

CHAMP2= REDU TEMP1 BAL1;
EVO2= EVOL ROUG 'CHPO' CHAMP2 11;
DESS EVO2 TITR 'Temperature surface interieure' MIMA ;

```

Étape 4a : Analyse et post-traitement des résultats

Nous passons ensuite à l'analyse des résultats et à l'affichage des isothermes et du flux de chaleur.

```

***CALCUL FLUX DE CHALEUR***
*grad T sur les éléments des 2 domaines*

GT1 = GRAD MOD1 TEMP3 ;
GT2 = GRAD MOD2 TEMP3 ;
GT3 = GRAD MOD3 TEMP3 ;
GT4 = GRAD MOD4 TEMP3 ;
GT5 = GRAD MOD5 TEMP3 ;
GT6 = GRAD MOD6 TEMP3 ;
GT7 = GRAD MOD7 TEMP3 ;

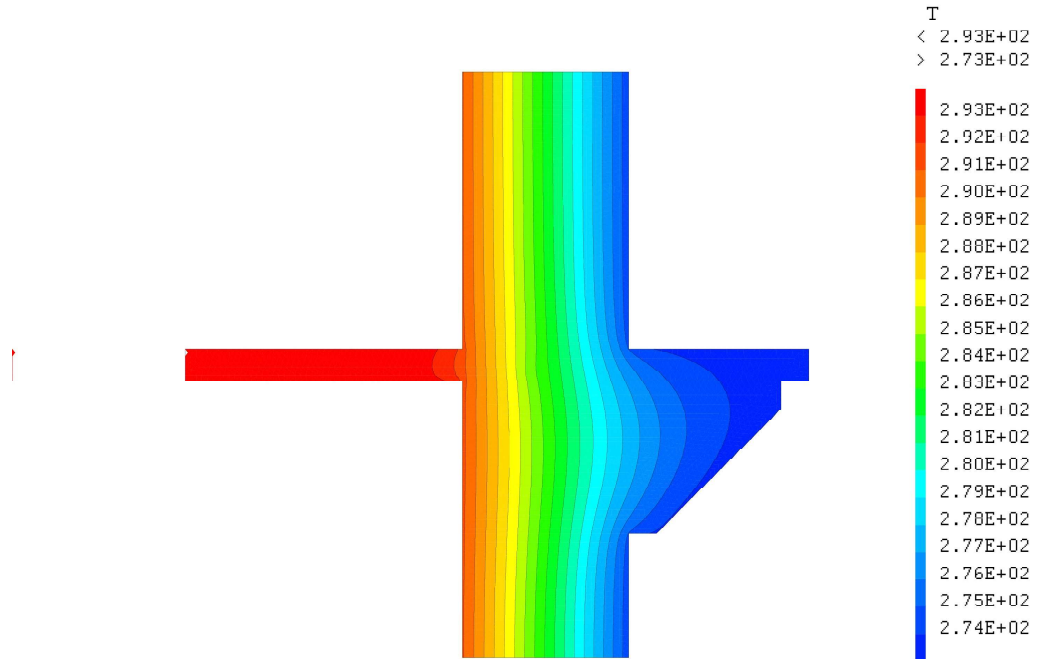
flux1 = (-1)*K4*GT1 ;
flux2 = (-1)*K1*GT2 ;
flux3 = (-1)*K2*GT3 ;

```

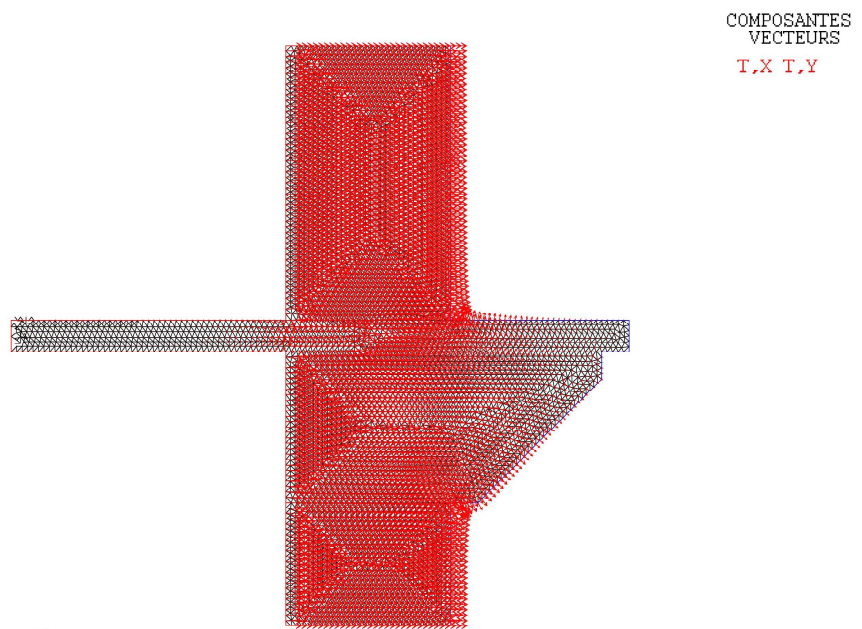
```
flux4 = (-1)*K3*GT4 ;  
flux5 = (-1)*K4*GT5 ;  
flux6 = (-1)*K4*GT6 ;  
flux7 = (-1)*K4*GT7 ;
```

```
flux0 = flux1 et flux2 et flux3 et flux4 et flux5  
et flux6 et flux7 ;  
mod0 = MOD1 ET MOD2 ET MOD3 ET MOD4  
ET MOD5 ET MOD6 ET MOD7 ;
```

```
fluxno0 = chan chpo flux0 mod0 ;  
amp0 = 0.0020 ;  
vflux0 = vect fluxno0 amp0 t,x t,y rouge ;  
titre 'Vecteur flux' ;  
trac BAL1 vflux0 ;
```



Champ de temperature



Vecteur flux

Fig. B.4 – Isothermes (en haut) et vecteurs de flux de chaleur (en bas)

Étape 2b : Définition du modèle mathématique

Nous effectuons un calcul en régime dynamique. La discrétisation spatiale de l'équation de Fourier sur un maillage éléments finis permet de se ramener au système d'équations suivant à résoudre aux différents pas de temps :

$$\underline{C}\dot{T} + \underline{K}T = \underline{Q} \quad (\text{B.2})$$

à résoudre aux différents pas de temps, avec :

\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, éventuellement complétée de la matrice de blocages associée aux conditions aux limites de température imposée.

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.

$$T_n(t) = T_n + |T_n| \sin(2\pi/24 \cdot 3600) \quad (\text{B.3})$$

Avec :

T_n : température moyenne dans la période considérée ;

$|T_n|$: demi-largeur de la variation de températures dans la période considérée ;

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

t : période considérée ;

Dans notre cas d'étude nous évaluons la performance des paramètres dynamiques pour une journée type d'été. La Fig.B.5 indique l'évolution des températures externes tandis que la température dans l'espace intérieur est de 20°C.

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 appliquons ensuite une condition adiabatique de flux de chaleur imposé sur la surface supérieure et inférieure du nœud.

****REGIME DYNAMIQUE****

*** CONDITIONS AUX LIMITES**

* Evolution sinusoidale de la température extérieure*

LTEMPS = PROG 0. PAS 3600. (3600*24*7);

N1=DIME LTEMPS;

LD4 = PROG N1 * Tint;

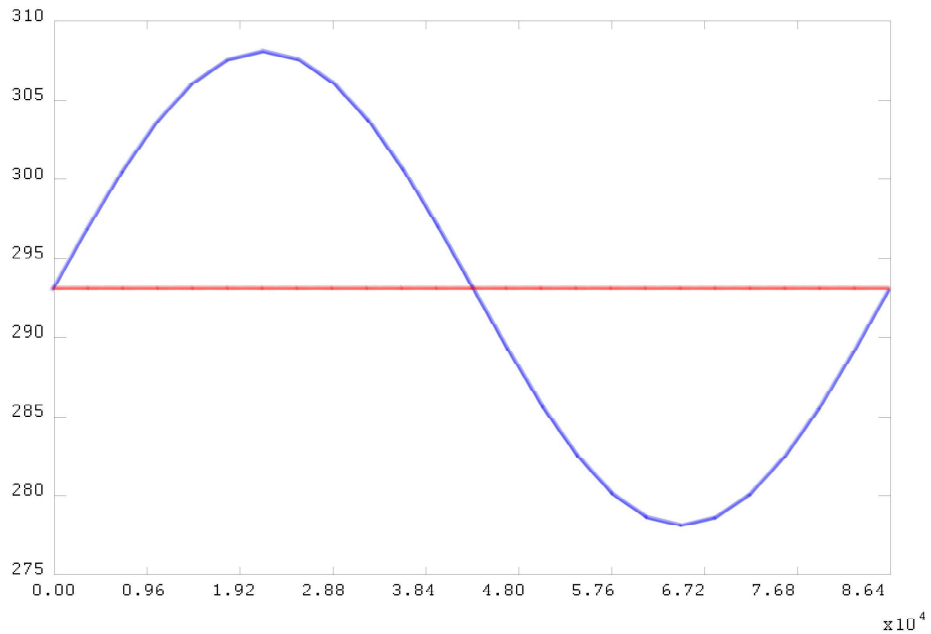


Fig. B.5 – En bleu, la courbe sinusoïdale de la température externe et en rouge, le profil constante de la température interne

```

progt= prog 0. pas 3600. (3600*24*7);
progText= prog N1 * Text;
progth= (15*(sin (progt*360/(3600*24)))) +
progText;
evI=evol BLEU manu progt progth;
EVOLD4 = EVOL ROUGE MANU TEMPS LTEMPS LD4;

*CONDITION ADIABATIQUE*

FLUO = MANU CHPO (COSUP ET COINF ET COTR) 1 Q 0.;
EVOL3= EVOL MANU TEMP LTEMPS FLUX
(PROG N1 * 1.);
FLU1 = CHAR 'Q' FLUO EVOL3;

*** CHARGEMENT (FLUX)***
fLUI= MANU CHPO COINT 1 'T' 1 NATURE DIFFUS;
fLUeXT= MANU CHPO CONVEXT 1 'T' 1 NATURE DIFFUS;
CHAD4 = CHAR fLUI EVOLD4 'TECO';
CHAD2 = CHAR fLUeXT EVI 'TECO';

```

Étape 3b : Résolution du problème discrétisé en régime dynamique

Nous construisons un algorithme pour le calcul en régime dynamique selon le schéma Fig.2.27.

```
****PROCEDURE PASAPAS ****
TA2                                = TABL;
TA2.'TEMPERATURES'                 = TABL;
TA2.'TEMPERATURES' . 0            =
MANU CHPO BAL1 1 T Text.;
TA2.'CHARGEMENT'                  = CHART;
TA2.'MODELE'                      = MODL1;
TA2.'CARACTERISTIQUES'           = MATR1;
TA2.'TEMPS_SAUVES'                = LTEMPS ;
TA2.'TEMPS_CALCULES'             = LTEMPS ;
TA2.'PROCEDURE_THERMIQUE'        = DUPONT;
PASAPAS TA2;
```

Étape 4b : Analyse et post-traitement des résultats

Nous terminons l'analyse des résultats et à l'affichage des isothermes et du flux de chaleur aux différents instants de temps.

```
****POST TRAITEMENT****

*TRACE DES TEMPERATURES*
N1= DIME (TA2.'TEMPERATURES');
REPETER BOU1 N1;
T_I = TA2.'TEMPERATURES'. (&BOU1 - 1);
TPS_I = TA2.'TEMPS'. (&BOU1 - 1 );
MOT_I= CHAI '[3]Temperatures au temps' TPS_I;
TRAC T_I BAL1 CONTB 'TITR' MOT_I LTEMPS;
FIN BOU1;

***CREATION FLUX DE CHALEUR***
DEBP @VECFLU CHP1*'CHPOINT' MOD1*'MMODEL' MAT1*'MCHAML';
G1= GRAD CHP1 MOD1;
G2= CHAN 'TYPE' G1 'CARACTERISTIQUES';
Q= MATCDTOT * G2 (MOTS 'K' 'K') (MOTS 'T,X' 'T,Y') (MOTS 'QX' 'QY') ;

Q= -1. * Q;
Q2= CHAN 'CHPO' Q MOD1;
VEC1= @VECOUL Q2 2.e-3 0.1;
FINP VEC1;

REPETER BOU1 N1;
T_I= TA2.'TEMPERATURES'. (&BOU1 - 1);
```

```

VF_I= @VECFLU T_I MODTOT MATCDTOT;
TPS_I= TA2.'TEMPS'. (&BOU1 - 1 );
MOT_I= CHAI '[3]Vecteur flux de chaleur au temps' TPS_I;
TRAC VF_I CONTB 'TITR' MOT_I;
FIN BOU1;
LIST VF_I;

```

```

***CALCUL DU FLUX INTERIEUR**

```

```

n1= DIME TA2.'TEMPERATURES' ;
PROG1INT= PROG;
PROGT= PROG;
REPETER BOU1 n1;
i=&BOU1-1;
TEMP4=REDU TA2.TEMPERATURES.I BAL1;
T1= TA2.TEMPS.I;
GT1 = GRAD MOD1 TEMP4 ;
GT2 = GRAD MOD2 TEMP4 ;
GT3 = GRAD MOD3 TEMP4 ;
GT4 = GRAD MOD4 TEMP4 ;
GT5 = GRAD MOD5 TEMP4 ;
GT6 = GRAD MOD6 TEMP4 ;
GT7 = GRAD MOD7 TEMP4 ;

flux1 = (-1)*K4*GT1 ;
flux2 = (-1)*K1*GT2 ;
flux3 = (-1)*K2*GT3 ;
flux4 = (-1)*K3*GT4 ;
flux5 = (-1)*K4*GT5 ;
flux6 = (-1)*K4*GT6 ;
flux7 = (-1)*K4*GT7 ;

flux0 = flux1 et flux2 et flux3 et flux4 et flux5
et flux6 et flux7;

fluxno0 = chan chpo flux0 mod0 ;
fluxx0 = exco t,x fluxno0 ;
fluxy0 = exco t,y fluxno0 ;
mflux0 = ( fluxx0**2 + fluxy0**2 )**0.50 ;
fluxml1 = evol rouge chpo mflux0 CONMU ;
puis1 = somm fluxml1 ;
XFL1=EXTR puis1 1;
PROG1INT= INSE PROG1INT &BOU1 XFL1;
PROGT= INSE PROGT &BOU1 T1 ;
FIN BOU1;

```

```
*EVOLUTION DT text-tint*
deltat= LD4-progth;
EVODELTA= EVOL JAUNE MANU PROGT deltat;
*EVOLUTION FLUX CHALEUR*
EVOL1INT= EVOL 'BLEU' MANU PROGT PROG1INT;

dess EVODELTA 'XBOR' 0. 518400.
'TITR' ' Bornes sur X [0. 518400.] ';
dess EVOL1INT 'XBOR' 0. 518400.
'TITR' ' Bornes sur X [0. 518400.] ';
```

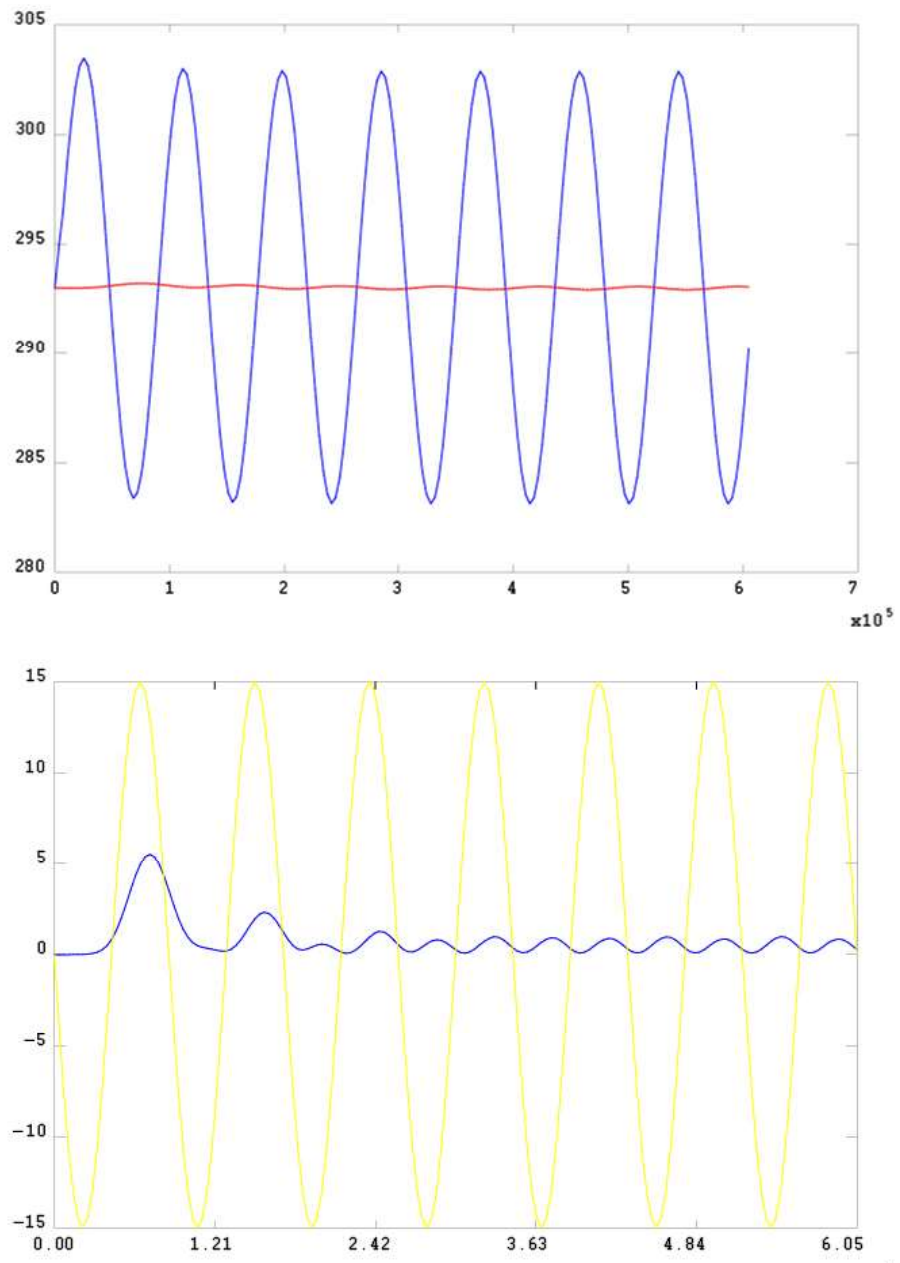


Fig. B.6 – En haut : évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue). En bas : flux de chaleur sur le nœud (courbe bleue) et variation des températures ΔT (courbe jaune).

Table des figures

1	Le climat méditerranéen [61]	14
2	Les villes méditerranéennes d'après [18]	15
3	Le premier projet du marché du poissons de l'architecte Giuseppe Almeyda [109]	15
4	Vue de haut de la ville de Palerme	17
5	Contribution de l'architecte à la salubrité des maisons et des villes, Émile Trélat [128]	20
6	Différentes publications autour de la question de l'hygiène dans les bâtiments	20
1.1	Cour du <i>Palazzo Castrone</i>	24
1.2	Tissu urbain de Palerme. En couleur, l'îlot de via Alloro, via Castrolifippo, via Riso (en haut). Traces de lotissement (en bas) [77] . .	25
1.3	<i>Piano regolatore di risanamento e ampliamento</i> de la ville de Palerme (en haut) et <i>Piano regolatore di risanamento</i> (en bas) de l'ingénieur Giarrusso, 1885 [80]	26
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).	27
1.5	Plan cadastral de 1887 (en haut). Plan cadastral de 1954 (au milieu). Synthèse historique des transformations cadastrales (en bas) [14] . .	29
1.6	La catégorie <i>Palazzi</i> à droite. Le type <i>Palazzetti</i> au milieu. Le type <i>Catoio</i> à gauche [55].	30
1.7	<i>Piano particolareggiato esecutivo</i> . Tableau 12 du P.P.E. du 1993 [14]	30
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)	31
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.	32
1.10	Les deux axes de la ville de Palerme. <i>Corso Vittorio Emanuele</i> (à gauche) et <i>Via Maqueda</i> (à droite)	33
1.11	Orientation la plus favorable d'une habitation pour obtenir le maximum d'éclairage et d'ensoleillement [70]	33
1.12	Carte topographique de Palerme, Artaria, 1891. En jaune, les deux axes : via Maqueda et corso Vittorio Emanuele	34

1.13	Facteur d'exposition solaire pour deux expositions : sud-est (en haut), sud-ouest (en bas)	36
1.14	Facteur d'exposition solaire pour deux expositions : nord-est (en haut), nord-ouest (en bas)	36
1.15	Valeurs de radiation directe (en haut) et diffuse (en bas). Exposition sud-est (à gauche), sud-ouest (à droite)	37
1.16	Valeurs de radiation directe (en haut) et diffuse (en bas). Exposition nord-est (à gauche), nord-ouest (à droite)	37
1.17	Épure représentant l'éclairage avec obstacle, Émile Trélat [129] . . .	38
1.18	Distance minimale unitaire [91]	39
1.19	Ingegneria sanitaria, Torino 1893 [91]	40
1.20	Tableau des distances minimales unitaires selon les latitudes, [91] .	40
1.21	Configurations pour la simulation	41
1.22	Radiation moyenne journalière globale, H/L=1.75	43
1.23	Radiation moyenne journalière globale, H/L=2.25	43
1.24	Radiation moyenne journalière globale, H/L=2.75	43
1.25	Radiation moyenne journalière directe, exposition sud-est	44
1.26	Radiation moyenne journalière directe, exposition sud-ouest	44
1.27	Radiation moyenne journalière directe, exposition nord-ouest	44
1.28	Radiation moyenne journalière directe, exposition nord-est	45
1.29	Radiation moyenne journalière diffuse	45
1.30	Pourcentage d'ombre pour l'exposition sud-est	45
1.31	Proportions des types de canyons urbains de la ville de Palerme . .	47
1.32	Radiation solaire journalière moyenne dans les canyons pour les mois de mars, juin, septembre, décembre. Calculé en ECOTECT (plage de contour 320-4820 Wh par pas de 450 Wh). Données météorologiques, Palerme (* epw).	48
1.33	Absorbance, réflectance et émissivité de différents matériaux	49
1.34	Distribution de la lumière du jour. Calculé en ECOTECT. Données météorologiques, Palerme (* epw). Mur extérieur avec réflectance=0.4	50
1.35	Distribution de la lumière du jour. Calculé en ECOTECT. Données météorologiques, Palerme (* epw). Mur extérieur avec réflectance=0.8	50
1.36	Coupe longitudinale du Teatro Massimo [42]	52
1.37	Vélarium au dessus du théâtre avec le système d'aération mobile [42]	52
1.38	Les tests de Pettenkofer sur la porosité des matériaux [116]	53
1.39	Les tests de Pettenkofer sur la porosité des matériaux [116]	54
1.40	Schéma de la pièce étudiée	55
1.41	Résultats des analyses de De Blasi et Castiglia [98]	56
2.1	Les ouvriers dans la carrière d'Aspra (Palerme) [21]	59
2.2	Les carrières dans les alentours de la ville de Palerme. A= <i>Via Cavallacci</i> à <i>St'Annuzza</i> , B= <i>via Cavallacci</i> , C= <i>via Terzerrosse</i> , D= <i>de via Cavallacci</i> à <i>Giardino inglese</i> , E= <i>via Cavallacci</i> à <i>La Conceria</i> [21]	59
2.3	<i>U pirriaturi</i> dans une carrière de <i>tufo</i> [21]	60
2.4	Claveau de <i>tufo</i>	60

2.5	Résultats des tests de Castiglia et De Blasi sur la capacité à l'eau [117]	62
2.6	Résultats des tests de Castiglia et De Blasi sur la porosité des matériaux [117]	62
2.7	Carrières de gypse en Italie d'après [110]	66
2.8	Poutre en bois dite <i>quadralino</i> dans un plancher traditionnel	67
2.9	Éléments métalliques auxiliaires aux structures en bois [130].	69
2.10	Profilés standardisés [72]	69
2.11	Dessins de la coupe transversale et de la couverture métallique du Théâtre Massimo de l'architecte Basile [83].	69
2.12	Système de plancher en béton "Ghilardi" [22]	70
2.13	Coupe constructive du mur extérieur du <i>Palazzo Asmundo-Paternò</i> à <i>Palermo</i> [21]	71
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	73
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	74
2.16	Revêtement <i>a mezzo stucco</i> : 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.	75
2.17	Profil des températures de novembre à avril, mur de type A	78
2.18	Profil des températures de novembre à avril, mur de type B1	79
2.19	Profil des températures de novembre à avril, mur de type B2	79
2.20	Profil des températures de novembre à avril, mur de type C	79
2.21	Valeurs Δp_v , Appendix A ISO 13788 [2]	82
2.22	Profil des pressions de novembre à avril, mur de type A	84
2.23	Profil des pressions de novembre à avril, mur de type B1	84
2.24	Profil des pressions de novembre à avril, mur de type B2	85
2.25	Profil des pressions de novembre à avril, mur de type C	85
2.26	En bleu, la courbe sinusoïdale de la température externe et en rouge, le profil constant de la température interne	88
2.27	Structure générale de l'algorithme modifié d'après le schéma type Cast3m	89
2.28	Les tuiles canal posées sur les solives	91
2.29	Plan de la toiture (en haut). Coupe de la voute (en bas)	92
2.30	Axonométrie de la fausse voute d' <i>incannucciata</i>	93
2.31	Fausse voute d' <i>incannucciata</i>	93
2.32	Discretisation aux volumes finis	96
2.33	Évolution de la température [K]	96
2.34	Flux de masse J en [Kg/h]	96

2.35	Rue de Palerme	98
2.36	Corso Vittorio Emanuele, Palerme	99
2.37	Les deux types de balcons. En haut balcon en pierre. En bas, balcon en fer	99
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 <i>bardella</i>	100
2.39	Deux types de balcons en fer. A gauche, le balcon avec barres de fer. En bas, le balcon avec poutre en I	100
2.40	Positionnement des plans de coupe selon la norme EN ISO 10211	103
2.41	Profil des températures selon la norme EN ISO 10211. Balcon en métal (en haut), balcon en pierre (en bas)	104
2.42	Distribution de la température sur la surface interne au nœud. Hauteur du plan de coupe supérieur et inférieur. Balcon avec console métallique	105
2.43	Distribution de la température sur la surface interne au nœud. Hauteur du plan de coupe supérieur et inférieur. Balcon avec console en pierre	106
2.44	Évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre	107
2.45	Flux de chaleur sur le nœud (courbe bleue) et différence des températures ΔT (courbe jaune). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre.	108
2.46	Définition du retard σ	110
2.47	Flux de chaleur sur la partie homogène de l'enveloppe $\Phi_{homo} [W]$ (courbe rouge) et différence des températures ΔT (courbe jaune). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre.	111
2.48	Flux de chaleur $\Phi_{PT} [W]$ sur le nœud (courbe bleue), flux de chaleur sur la partie homogène de l'enveloppe $\Phi_{homo} [W]$ (courbe rouge) et différence des températures $\Delta T [K]$ (courbe jaune). En haut, balcon avec console métallique. En bas, balcon avec console en pierre.	112
2.49	Flux de chaleur $\Phi_{PT} [W]$ sur le nœud (courbe bleue), flux de chaleur sur la partie homogène de l'enveloppe $\Phi_{homo} [W]$ (courbe rouge) et différence des températures $\Delta T [K]$ (courbe jaune). Balcon en métal (en haut), balcon en pierre (en bas)	113
2.50	En haut, évolution de $\Psi_{din}(t)$ pour le balcon avec console en fer. En bas, évolution de $\Psi_{din}(t)$ pour le balcon avec console en pierre	114
2.51	Évolution de $\Psi_{din}(t)$ (courbe bleue). En jaune, valeur moyenne de $\Psi_{din}(t)$. En rouge valeur selon la EN ISO 14683 :2007 et la EN ISO 10211-1. En haut, cas de balcon avec console en fer. En bas, cas de balcon avec console en pierre.	115
2.52	Les planchers de la tradition	117
2.53	Plan plancher (en haut). Axonométrie du plancher (en bas)	118
2.54	Plancher avec poutres à double T, bois et brique. D'après [46]	119

2.55	Plancher avec béton armé (en haut) et plancher en poutrelles et entrevous d'après le catalogue de l'entreprise Ghilardi et Conigliaro	119
2.56	Profil des températures selon la norme EN ISO 10211.	120
2.57	Évolution de la température sur la surface interne au nœud. Hauteur du plan de coupe supérieur et inférieur. Plancher en bois	121
2.58	Évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue).	121
2.59	Flux de chaleur sur le nœud (courbe bleue) et différence des températures ΔT (courbe jaune).	122
2.60	En haut, évolution de Ψ_{din} pour le plancher en bois.	122
3.1	Besoins et stratégies de l'architecture méditerranéenne	128
3.2	Les montagnes autour de Palerme	129
3.3	Différentes orientations d'un immeuble illustrées par Rey, Pidoux et Barde pour traiter la théorie de l'axe héliothermique	129
3.4	Ventilation naturelle par effet du vent	131
3.5	Ventilation naturelle par tirage thermique	132
3.6	Toiture en tuiles canal et lait de chaux	134
4.1	Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase	139
4.2	Classification des matériaux à changement de phase	141
4.3	Différents modes d'utilisation des MCP dans le bâtiment	142
4.4	Exemple d'altération des ouvertures et des décorations résultant d'une intervention de retrofit de l'enveloppe par isolation par l'extérieur [8]	146
4.5	Actions de retrofit dans le parement existant. Isolation par l'extérieur (T1), en haut. Isolation par l'intérieur au centre (T2). Enduit à changement de phase par l'extérieur, en bas (T3)	148
4.6	Évolution de la température sur la surface intérieure (courbe rouge) et sur la surface extérieure (courbe bleue). Isolation par l'extérieur (en haut), isolation par l'intérieur (au centre), revêtement MCP (en bas)	149
4.7	Flux de chaleur sur l'enveloppe (courbe bleue) et différence de température ΔT (courbe jaune). Isolation par l'extérieur (en haut), isolation par l'intérieur (au centre), revêtement MCP (en bas)	150
4.8	Toiture chaude avec isolation à l'extérieur (à droite). Toiture froide avec isolation à l'intérieur (à gauche)	151
4.9	Action de retrofit sur la toiture. état existant (à droite) et intervention avec couche isolante et barrière radiative (à gauche)	152
4.10	Action de retrofit sur la toiture. État existant (en haut) et intervention avec couche isolante et barrière radiative (en bas)	153
4.11	Panneau OSB avec feuille d'aluminium micro-foré	153
5.1	Mur préfabriqué avec appareillage d'Abeille, prototype <i>Astonyshine</i> Solar Decathlon 2012 (en haut). Mur préfabriqué avec éléments autobloquants. Workshop avec les étudiants de l'ENSA Paris Malaquais, mai 2013 (en bas)	158

5.2	Les sites actives en Sicile par 100 m ² de terrain. Données ISTAT [65]	160
5.3	Entreprises qui travaillent la pierre de calcarenite	160
5.4	Les systèmes photovoltaïques	162
5.5	La matrice transparent (PMMA) et les colorants des LSC	165
5.6	Un détail montrant le bord d'une plaque LSC équipée des récepteurs et d'un film réfléchissant sur les bords latéraux [15]	165
5.7	Un rayon lumineux qui frappe l'interface air-LSC à des angles supérieurs (1) ou inférieurs (3) à l'angle critique (2)	166
5.8	Coefficient de réflexion et de transmittance pour la lumière à polarisation s et p	166
5.9	Transmittance pour la lumière de non-polarisée	167
5.10	Absorption d'un photon solaire dans un LSC. [1] le rayonnement réémis est au dessus de l'angle critique donc est piégé à l'intérieur de la plaque jusqu'à ce qu'il soit absorbé par les cellules. [2] Le rayonnement réémis est émis en dessous de l'angle critique et est perdu. [3] Le rayonnement émis est absorbé par une autre molécule de colorant (auto-absorption)	168
5.11	Performances des LSC : les numéros 25 et 50 correspondent respectivement aux LSC de 25cm et 50cm de côté [15].	168
5.12	Caractéristiques de l'intégration architecturale BIPV	170
5.13	Types d'intégration BIPV	171
5.14	Approche holistique de l'intégration architecturale du photovoltaïque	172
5.15	Verrière solaire présentée au concours SD 2014	175
5.16	Détail des deux panneaux photovoltaïques	176
5.17	Verrière solaire présentée au concours SD 2014	176
5.18	Verrière solaire présentée au concours SD 2014. Plan et élévation . .	177
5.19	Angles zénith et azimut sur les différentes surfaces de la verrière . .	178
5.20	Radiation directe transmise le 21 juin dans un panneau incliné (azimut 52,5° et zénith 45°). Comparaison avec un panneau "standard" (zénith 35° et azimut 0°)	178
5.21	En haut, radiation directe (à gauche) et radiation diffuse (à droite) transmises sur la surface avec 15° zénith et 0° azimut. Au milieu, radiation directe et radiation diffuse transmises (52.5° zénith et 45° azimut). En bas, radiation directe et radiation diffuse transmises (35° zénith et 0° azimut)	179

Liste des tableaux

1.1	Valeurs de H/L	42
1.2	Valeurs de H/L	47
2.1	Résultats des tests,[53]	63
2.2	Comparaison des valeurs entre la norme UNI EN 1745 :2012 et celles mesurées [53]	64
2.3	Caractérisation des différents types de mur	72
2.4	Caractérisation thermo-hygométrique des murs étudiés	76
2.5	Caractérisation géométrique des murs étudiés	77
2.6	Résistance thermique R_{th}	77
2.7	Températures extérieures et humidités relatives moyennes mensuelles à Palerme selon la UNI 10349	78
2.8	Analogie entre flux de chaleur et diffusion de vapeur	80
2.9	Résultats de la vérification pour la condensation superficielle	82
2.10	Confrontation entre $f_{Rsi,max}$ et f_{Rsi}	82
2.11	Résistance au flux de vapeur Z_{th}	83
2.12	Valeurs des paramètres dynamiques	88
2.13	Valeur de pression de vapeur d'eau, de pression de saturation et d'humidité relative	95
4.1	Valeurs maximales de transmittance thermique pour la zone climatique B	144
4.2	Classification qualitative des bâtiments	144
4.3	Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit T1	147
4.4	Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit T2	147
4.5	Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit T3	147
4.6	Valeurs des paramètres thermiques	147
4.7	Caractéristiques géométriques et propriétés physiques de l'action de retrofit sur la toiture	153

Bibliographie

- [1] ISO EN 10211-1 :2017. Thermal bridges in building construction—heat flows and surface temperatures—general calculation methods, 2017.
- [2] ISO EN 13788 :2012. Hygrothermal performance of building components and building elements—internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation—calculation methods, 2012.
- [3] ISO EN 14683 :2017. Thermal bridges in building construction—linear thermal transmittance—simplified methods and default values, 2017.
- [4] Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, and Mervyn Smyth. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (lhtess). *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2) :615–628, 2010.
- [5] Francesca Albani and Carolina Di Biase. *Architettura minore del XX secolo : strategie di tutela e intervento*. Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2013.
- [6] Francesco Aldegheri, Stefano Baricordi, Paolo Bernardoni, Maurizio Brocato, Guido Calabrese, Vincenzo Guidi, Lucia Mondardini, Luana Pozzetti, Michele Tonezzer, and Donato Vincenzi. Building integrated low concentration solar system for a self-sustainable mediterranean villa : The astonys shine house. *Energy and Buildings*, 77 :355–363, 2014.
- [7] Christopher Alexander. *The timeless way of building*, volume 1. Oxford University Press, New York, 1979.
- [8] Keoma Ambrogio and Marco Zuppiroli. *Energia e restauro. Il miglioramento dell’efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale, tra istanze conservative e prestazionali*. FrancoAngeli, Milano, 2013.
- [9] Serge Ekomy Ango. *Contribution au stockage d’énergie thermique en bâtiment : développement d’un système actif à matériaux à changement de phase*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2011.
- [10] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Rosa Francesca De Masi, Filippo De Rossi, and Giuseppe Peter Vanoli. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials : Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 113 :990–1007, 2014.

-
- [11] Niccolò Aste, Fabrizio Leonforte, Massimiliano Manfren, and Manlio Mazzon. Thermal inertia and energy efficiency–parametric simulation assessment on a calibrated case study. *Applied Energy*, 145 :111–123, 2015.
- [12] Carla Balocco and Giuseppe Grazzini. Numerical simulation of ancient natural ventilation systems of historical buildings. a case study in palermo. *Journal of cultural heritage*, 10(2) :313–318, 2009.
- [13] N K Bansal, S N Garg, and S Kothari. Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings. *Building and environment*, 27(1) :31–37, 1992.
- [14] Leonardo Benevolo, Pier Luigi Cervellati, and Italo Insolera. Il piano particolareggiato esecutivo per il centro storico di palermo. *Parametro*, 178 :12–63, 1990.
- [15] Paolo Bernardoni. *Performance Optimization of Luminescent Solar Concentrator Photovoltaic Systems*. PhD thesis, Università degli Studi di Ferrara, 2015.
- [16] Bill Bordass, Robert Cohen, Mark Standeven, and Adrian Leaman. Assessing building performance in use 3 : energy performance of the probe buildings. *Building Research & Information*, 29(2) :114–128, 2001.
- [17] Fernand Braudel. *La Méditerranée : l'espace et l'histoire*. Flammarion, Paris, 1986.
- [18] Elodie Briche, Olivier Cantat, and Pierre Carrega. Variabilité, changement climatique et conséquences en méditerranée, 2016.
- [19] Maurizio Brocato, William Deleporte, Lucia Mondardini, and Jean-Elie Tanguy. A proposal for a new type of prefabricated stone wall. *International Journal of Space Structures*, 29(2) :97–112, 2014.
- [20] Michele Campisi. *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Flaccovio Editore, Palermo, 1997.
- [21] Tiziana Campisi and Sabrina Mutolo. *Palermo pietra su pietra : apparecchi murari dell'edilizia settecentesca*. ILA Palma, Palermo, 2003.
- [22] Orazio Cancila. *Storia dell'industria in Sicilia*. Laterza, Bari, 1995.
- [23] Stephen Carpenter. Advances in modeling thermal bridges in building envelopes. *Enermodal Engineering Limited*, 2001.
- [24] Xavier Casanovas. *Rehabimed Method. Traditional Mediterranean Architecture*, volume 2 : Rehabilitation Buildings. RehabiMed (CAATEEB), 2007.
- [25] Xavier Casanovas. La ville, patrimoine vivant : mise en valeur sociale, économique et patrimoniale de l'architecture traditionnelle des villes méditerranéennes. *Montada (CAATEEB)*, 2012.

-
- [26] Mario Ceselli. Dell'origine dell'ingegneria. *Ingegneria Sanitaria*, 3 :33–35, 1890.
- [27] Dorota Chwieduk and Barbara Bogdanska. Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in polish conditions. *Renewable energy*, 29(9) :1569–1581, 2004.
- [28] ASHRAE Technical Committees. *2005 ASHRAE® HANDBOOK. Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2005.
- [29] Raphaël Compagnon. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and buildings*, 36(4) :321–328, 2004.
- [30] PI Cooper. The absorption of radiation in solar stills. *Solar energy*, 12(3) :333–346, 1969.
- [31] Natural Stone Council. Case study : Natural stone solar reflectance and urban heat island effect. Technical report, Technical Report prepared By The University of Tennessee Center for Clean Products, 2009.
- [32] Giuseppe Damiani. Mercato coperto nella piazza dei xviii martiri i palerme. *Nuovi Annali di Costruzioni*, 1869.
- [33] Bernard Forest de Belidor, Luigi Masieri, and Claude Navier. *La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e dell'architettura civile*. Perelli e Mariani, Milano, 1840.
- [34] Luigi De Blasi and Enrico Castiglia. Ricerche fisico-igieniche sui materiali da costruzione comunemente usati in palermo. *Ingegneria Sanitaria*, 11 :214, 1893.
- [35] Ministero dello sviluppo economico. Decreto n.39 del 26 giugno 2015 : Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.
- [36] Ministero dello sviluppo economico. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/ce sul rendimento energetico in edilizia.
- [37] Costanzo Di Perna, Francesca Stazi, Andrea Casalena Ursini, and Marco D'Orazio. Influence of the internal inertia of the building envelope on summer-time comfort in buildings with high internal heat loads. *Energy and Buildings*, 43(1) :200–206, 2011.
- [38] Chrisna Du Plessis. Agenda 21 for sustainable construction in developing countries. *CSIR Report BOU E*, 204, 2002.
- [39] Ministero e Real Segreteria di stato. LL PP. Tariffa pei lavori delle varie arti inservienti alle opere pubbliche comunali in palermo, 1850.

-
- [40] Heike Erhorn-Kluttig, Hans Erhorn, Marco Citterio, Manuela Cocco, Dirk van Orshoven, and Antoine Tilmans. Thermal bridges in the epbd context. *ASIEPI Information Paper*, 2008.
- [41] Alessandro Evola, Giuseppe Margani, and Luigi Marletta. Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 43(9) :2385–2393, 2011.
- [42] Giovanni Fatta. La fabbrica del teatro massimo. *Bollettino dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Palermo*, (1), 1996.
- [43] Giovanni Fatta. *L'intonaco di Palermo. Materiali e tecniche nella tradizione palermitana*. CO.GRA.S, Palermo, 1998.
- [44] Giovanni Fatta. *Il balcone nella tradizione costruttiva palermitana*. Palumbo, Palermo, 2002.
- [45] Giovanni Fatta. Architettura e tecnica nella costruzione del teatro massimo ve di palermo. *Meccanica dei materiali e delle strutture*, 2(fascicolo II (2011)) :1–39, 2012.
- [46] Giovanni Fatta and Vincenzo Bellomo. *Il solaio tradizionale a orditura metallica*. Alba, Palermo, 1997.
- [47] Giovanni Fatta and Ornella Fiandaca. *L'uso del gesso nelle murature pre-moderne*. CO.GRA.S, Palermo, 1990.
- [48] Giovanni Fatta and Maria Clara Ruggieri Tricoli. *Palermo nell'" età del ferro" : architettura, tecnica, rinnovamento*. Giada, Palermo, 1983.
- [49] Pierre Fernandez and Pierre Lavigne. *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : fondements & méthodes*. Éd. le Moniteur, Paris, 2009.
- [50] Margherita Ferrucci. *Ventilation naturelle en architecture : méthodes, outils et règles de conception*. PhD thesis, Paris Est, 2017.
- [51] Elena Garcia-Nevado, Anna Pages-Ramon, and Helena Coch. Solar access assessment in dense urban environments : The effect of intersections in an urban canyon. *Energies*, 9(10) :796, 2016.
- [52] Jules Garnier. *Le fer*. Hachette Bnf, Paris, 1874.
- [53] Enrico Genova. *Il miglioramento energetico nel recuper degli edifici storici. Applicazione al patrimonio architettonico palermitano*. PhD thesis, Università degli Studi Di Palermo, 2016.
- [54] Félicie Geslin. Le bâti ancien appelle des solutions non standardisées. <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/le-bati-ancien-appelle-des-solutions-non-standardisees.32324>, 2017. Consulté le 05/03/2016.

-
- [55] Francesca Giambanco. *Il ruolo delle metodologie di analisi impiegate per la redazione dei piani per il recupero del centro storico di Palermo. Lettura degli esiti*. PhD thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2006.
- [56] Francesco Giovannetti. *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Flaccovio Editore, Palermo, 1997.
- [57] Baruch Givoni. Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. *Energy and buildings*, 17(3) :177–199, 1991.
- [58] Baruch Givoni. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, 18(1) :11–23, 1992.
- [59] Marie Godfrain. Retour aux sources. *M le magazine du Monde*, page 52, 2014.
- [60] Elisabeth Gratia, Isabelle Bruyere, and André De Herde. How to use natural ventilation to cool narrow office buildings. *Building and environment*, 39(10) :1157–1170, 2004.
- [61] Mario Grosso. *Il raffrescamento passivo degli edifici*. Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2011.
- [62] Amina Harzallah, Daniel Siret, Eric Monin, and Julien Bouyer. Controverses autour de l’axe héliothermique : l’apport de la simulation physique à l’analyse des théories urbaines. *Collections électroniques de l’INHA. Actes de colloques et livres en ligne de l’Institut national d’histoire de l’art*, 2005.
- [63] Douglas Hawes, Daniel Feldman, and Dan Banu. Latent heat storage in building materials. *Energy and buildings*, 20(1) :77–86, 1993.
- [64] Dean Hawkes. *The environmental tradition : studies in the architecture of environment*. Taylor & Francis, 2013.
- [65] ISTAT. Le attività estrattive da cave e miniere. https://www.istat.it/it/files/2017/04/Report_attivit%C3%A0-estrattive-19-04-2017.pdf?title=Cave+e+miniere+-+19%2Fapr%2F2017+-+Testo+integrale+e+nota+metodologica.pdf, 2014. Consulté le 17 Octobre 2017.
- [66] Bjørn Petter Jelle, Christer Breivik, and Hilde Drolsum Røkenes. Building integrated photovoltaic products : A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 100 :69–96, 2012.
- [67] Duane Keplinger. Site design and orientation for energy conservation. *Ekistics*, pages 177–180, 1978.
- [68] Armin Khazrai and Albin Coric. Integration av fotovoltaiska celler på en byggnads klimatskal ur ett arkitektoniskt fördelaktigt perspektiv, 2017.
- [69] Amar Khudhair and Mohammed Farid. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy conversion and management*, 45(2) :263–275, 2004.

-
- [70] Alexandre Knapen. L'ensoleillement et la salubrité de l'habitation moderne. *Revue Générale des Applications Industrielles*, 10 :5, 1919.
- [71] Maria La Gennusa, Giovanni Lascari, Gianfranco Rizzo, Gianluca Scaccianoce, and Giancarlo Sorrentino. A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments. *Energy Policy*, 39(9) :5335–5343, 2011.
- [72] Bertrand Lemoine. *L'architecture du fer. France : XIXe siècle*. Champ Vallon éditeur, Ceyzérieu, 1986.
- [73] Martin W. Liddament. *A guide to energy efficient ventilation*. Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, 1996.
- [74] Paul Littlefair. Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(3) :303–326, 1998.
- [75] Ouarda Mansouri, Rafik Belarbi, and Fatiha Bourbia. Albedo effect of external surfaces on the energy loads and thermal comfort in buildings. *Energy Procedia*, 139 :571–577, 2017.
- [76] Guofeng Mao. *Thermal bridges : Efficient models for energy analysis in buildings*, 1997.
- [77] Paolo Marconi. *Manuale del recupero del centro storico di Palermo*. Flaccovio Editore, Palermo, 1997.
- [78] Giuseppe Margani. Murature massive e comfort sostenibile in clima mediterraneo. *La Gazzetta dei Solai*, (67), 2010.
- [79] Concetta Marino, Francesco Minichiello, and William Bahnfleth. The influence of surface finishes on the energy demand of hvac systems for existing buildings. *Energy and Buildings*, 95 :70–79, 2015.
- [80] Maria Teresa Marsala. *"La perfezione topografica" del piano regolatore di risanamento e di ampliamento della città di Palermo redatto dall'ingegnere Felice Giarrusso : 1885-1894*. Kappa, Roma, 1997.
- [81] Koldobika Martin, Aitor Erkoreka, Ivan Flores, Moises Odriozola, and José Maria Pedro Sala. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 43(2) :529–535, 2011.
- [82] Koldobika Martin, Aitor Erkoreka, Ivan Flores, Moises Odriozola, and José Maria Pedro Sala. Equivalent wall method for dynamic characterisation of thermal bridges. *Energy and Buildings*, 55 :704–714, 2012.
- [83] Eliana Mauro and Ettore Sessa. *I Disegni della Collezione Basile*, volume 1. Officina edizioni, Roma, 2016.

-
- [84] Fekri Meftah and Stefano Dal Pont. Staggered finite volume modeling of transport phenomena in porous materials with convective boundary conditions. *Transport in porous media*, 82(2) :275–298, 2010.
- [85] Francis Miguet. *Paramètres physiques des ambiances architecturales*. PhD thesis, Université de Nantes, 2000.
- [86] Nahid Mohajeri, Govinda Upadhyay, Agust Gudmundsson, Dan Assouline, Jérôme Kämpf, and Jean-Louis Scartezzini. Effects of urban compactness on solar energy potential. *Renewable Energy*, 93 :469–482, 2016.
- [87] Maria Lucia Mondardini. *Contribution au développement des structures en pierre de taille : modélisation, optimisation et outils de conception*. PhD thesis, Paris Est, 2015.
- [88] Carlo Monti and Maria Rosa Ronzoni. *Costruire sostenibile il Mediterraneo 2001*, volume 2. Alinea Editrice, Firenze, 2001.
- [89] John Orgill and G. Terry Hollands Hollands. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar energy*, 19(4) :357–359, 1977.
- [90] Jean Paris, Michel Falardeau, and Cecile Villeneuve. Thermal storage by latent heat : a viable option for energy conservation in buildings. *Energy Sources*, 15(1) :85–93, 1993.
- [91] Enrico Passaro. La luce solare nella casa. *Ingegneria Sanitaria*, 5 :2, 1893.
- [92] Pierre-Manuel Patry and Dimitri Molle. *RT2012 et RT Existant*. Editions Eyrolles, Paris, 2013.
- [93] Jean-Pierre Peneau. *Ajustement climatique et traces urbains au siècle des lumières*. Université de Nantes, Centre d’Histoire des sciences et des Techniques, Nantes, 1993.
- [94] Anna Laura Pisello, Mattheos Santamouris, and Franco Cotana. Active cool roof effect : Impact of cool roofs on cooling system efficiency. *Advances in building energy research*, 7(2) :209–221, 2013.
- [95] Stephen Michael Porritt, Paul Cropper, Li Shao, and Chris I Goodier. Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. *Energy and Buildings*, 55 :16–27, 2012.
- [96] Renata Prescia. *Restauri a Palermo. Architettura e città come stratificazione*. Kalòs, Palermo, 2012.
- [97] Paolo Principi, Roberto Fioretti, and Benedetta Copertaro. Sviluppo di strutture multistrato contenenti materiali a cambiamento di fase (pcm) per la realizzazione di celle frigorifere per trasporto su vagoni ferroviari. 2014.
- [98] Antonio Purpura. Ricerche fisico-igieniche sui materiali da costruzione di palermo. *Ingegneria Sanitaria*, 11 :3, 1893.

-
- [99] Antonio Purpura. L'antica tecnica siciliana del muro di "pietra e tajo". *Rivista internazionale di ingegneria sanitaria ed urbanistica*, 29 :3, 1937.
- [100] Antonio Purpura. *Schema di piano dei materiali di cava e dei materiali lapidei di pregio*. Ente Minerario Siciliano–RTI GEO-CEPA, 2002.
- [101] Carla Quartarone and Francesca Triolo. Le periferie palermitane : percorsi per rinnovare il passato e tutelare il futuro. In *INU : Territori e città del Mezzogiorno "Qante periferie ? Quali politiche di governo del territorio*, pages 1–12, 2007.
- [102] Valentina Radi. *Edifici a risparmio energetico nelle regioni mediterranee*. Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2011.
- [103] Marco Raugei and Paolo Frankl. Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems : current state of the art and future outlooks. *Energy*, 34(3) :392–399, 2009.
- [104] Tjerk Reijenga and Henk Kaan. *PV in Architecture*. Chichester Wiley, Berkeley, 2003.
- [105] Douglas Reindl, William Beckman, and John A. Duffie. Diffuse fraction correlations. *Solar energy*, 45(1) :1–7, 1990.
- [106] Matthias Rippmann and Philippe Block. Rethinking structural masonry : unreinforced, stone-cut shells. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 166(6) :378–389, 2013.
- [107] Giovanni Rondelet. *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare (trad. it. da 6 ediz. originale a cura di B. Soresina)*. Mantova, 1833.
- [108] Ferdinando Salata, Iacopo Golasi, Andrea de Lieto Vollaro, and Roberto de Lieto Vollaro. How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. a case study. *Energy and Buildings*, 99 :32–49, 2015.
- [109] Enrico Salemi. Applicazioni di un sistema di costruzione mista in pietra e in ferro pei mercati. *Nuovi Annali di Costruzioni*, 1872.
- [110] Francesco Salmojrighi. *Materiali naturali da costruzione*. Hoepli, Milano, 1892.
- [111] Agnese Salvati, Helena Coch, and Michele Morganti. Effects of urban compactness on the building energy performance in mediterranean climate. *Energy Procedia*, 122 :499–504, 2017.
- [112] Mattheos Santamouris, Afroditi Synnefa, and Theoni Karlessi. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12) :3085–3102, 2011.

-
- [113] Limor Shashua-Bar and Milo Hoffman. Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35(1) :61–68, 2003.
- [114] Max Sherman. Infiltration in ashrae’s residential ventilation standards. 2008.
- [115] Daniel Siret. *Les sensations du soleil dans les théories architecturales et urbaines. De l’hygiénisme à la ville durable*. Presses universitaires François-Rabelais (PUFR), 2013.
- [116] Donato Spataro. Fisica tecnica applicata all’igiene. *Ingegneria Sanitaria*, 22 :255, 1898.
- [117] Donato Spataro. Fisica tecnica applicata all’igiene. *Ingegneria Sanitaria*, 14 :157, 1898.
- [118] Donato Spataro. *Architettura sanitaria*. Vallardi, Milano, 1908.
- [119] Joseph Winthrop Spencer. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5) :172–172, 1971.
- [120] George Michael Stavrakakis, Maria Koukou, Michalis Gr. Vrachopoulos, and Nikolas Chris Markatos. Natural cross-ventilation in buildings : Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings*, 40(9) :1666–1681, 2008.
- [121] Francesca Stazi, Andrea Mengarelli, Costanzo Di Perna, and Alessandro Stazi. La casa del comfort sostenibile. *L’industria dei Laterizi*, (108) :12–24, 2008.
- [122] Emma Stéphan, Richard Cantin, Antoine Caucheteux, Sihem Tasca-Guernouti, and Pierre Michel. Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings. *Building and Environment*, 80 :241–248, 2014.
- [123] Paul Strachan, Abdul Nakhi, and Chris Sanders. Thermal bridge assessments. In *Proceedings of Building Simulation*, volume 95, pages 563–570, 1995.
- [124] Jakob Strømmand-Andersen and Peter Andreas Sattrup. The urban canyon and building energy use : Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011.
- [125] Afroditi Synnefa, Mattheos Santamouris, and Kapodistrian Apostolakis. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 81(4) :488–497, 2007.
- [126] Theodoros Theodosiou and Papadopoulou Agis. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40(11) :2083–2089, 2008.
- [127] Maria Cristina Treu. *Città, salute, sicurezza*. Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2009.

-
- [128] Emile Trélat. Contribution de l'architecture à la salubrité des maisons et des villes. In Imprimerie Nationale, editor, *Conférences de l'exposition universelle internationale de 1889*, 1889.
- [129] Emile Trélat. *Questions de salubrité*. Plon-Nourrit, Paris, 1905.
- [130] Giuseppe Valadier. *L'architettura pratica*, volume 3. Sapere 2000, Milano, 1992.
- [131] Calogero Vinci. *La costruzione sana. Criteri di sostenibilità tra tradizione e innovazione*. PhD thesis, Università degli Studi Di Palermo, 2013.
- [132] Hugo Viot, Alain Sempéy, Marie Pauly, and Laurent Mora. Comparison of different methods for calculating thermal bridges : Application to wood-frame buildings. *Building and Environment*, 93 :339–348, 2015.
- [133] Johann Wolfgang Von Goethe. *Voyage en Italie : traduction nouvelle complète avec notes*, volume 71. H. Champion, 1931.
- [134] Emily Whiting, John Ochsendorf, and Frédo Durand. Procedural modeling of structurally-sound masonry buildings. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 28, page 112. ACM, 2009.
- [135] Pete Winslow, Sergio Pellegrino, and Shrikant Sharma. Multi-objective optimization of free-form grid structures. *Structural and multidisciplinary optimization*, 40(1-6) :257, 2010.
- [136] Ling-Tim Wong and Wan-Ki Chow. Solar radiation model. *Applied Energy*, 69(3) :191–224, 2001.
- [137] Roberta Zarccone, Maurizio Brocato, Paolo Bernardoni, and Donato Vincenzi. Building integrated photovoltaic system for a solar infrastructure : Liv-lib'project. *Energy Procedia*, 91 :887–896, 2016.
- [138] Pauline Zeiger and Gwenaëlle Zunin. La rt2012 à l'épreuve de la réalité des pratiques professionnelles. *IAU île de France*, 2013.
- [139] Michele Zinzi. Optical properties and influence of reflective coatings on the energy demand and thermal comfort in dwellings at mediterranean latitudes. In *PLEA 2008-Towards Zero Energy Building : 25th PLEA International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings*. University College Dublin, 2008.