



Habiter 2050

Enseignements vernaculaires pour une architecture
passive sur le Plateau Suisse

Habiter 2050

Enseignements vernaculaires pour une architecture passive sur le Plateau Suisse

Grégoire Turbé

Enoncé théorique de master

EPFL ENAC SAR

Janvier 2025

Groupe de suivi :

Professeur.e énoncé théorique : Marilyne Andersen

Directeur pédagogique : Corentin Fivet

Mentor : Barbara Lambec



2025, Grégoire Turbé

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution (CC BY <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à la licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs auteurs.

Sommaire

1. Introduction	8
Enjeux	9
Image du climat	10
Climat actuel du Plateau Suisse	10
Climat futur du Plateau Suisse	12
Parallèles avec d'autres régions	14
Cas d'études	18
Critères de selection	18
Présentation	18
Problématique	22
Objet d'étude	22
Méthodologie	24
2. Stratégies et concepts passifs	26
Prévenir les gains de chaleur	27
Ombrager	28
Réfléchir	32
Orienter	34
Organiser	36
Réguler les gains de chaleur	38
Stocker	39

Dissiper les gains de chaleur	42
Ventiler	43
Transférer	49
Évaporer	52
Rayonner	54
3. Analyse croisée	56
Ombrager	57
Réfléchir	60
Orienter	62
Organiser	64
Stocker	66
Ventiler	69
Transférer	71
Évaporer	73
Rayonner	75
4. Application	76
Adaptations au Plateau Suisse à l'horizon 2050	77
Climat	77
Traditions, technique	78
Ressources	80

Technologies contemporaines de refroidissement passif	82
Ombrager	82
Ventiler	83
Réfléchir	83
Stocker	84
Transférer	84
Rayonner	85
Analyses de cas	86
Logements Les Grands Chênes - Bunq	86
2226 Emmenweid - Baumschlager Eberle Architekten	89
5. Conclusion	94
Synthèse	95
Introduction au projet de master	97

1. Introduction



Figure 1

Enjeux

Notre société est sur une trajectoire d'émissions toujours croissantes de gaz à effet de serre, ce qui a comme conséquences de perturber gravement l'équilibre climatique de notre planète. Selon un rapport du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, les politiques mises en œuvre actuellement nous placent sur une trajectoire de réchauffement d'environ 2,6°C à 3,1°C d'ici la fin du siècle (United Nations Environment Programme 2024). Réchauffement situé bien au-dessus des objectifs fixés par l'accord sur le climat de Paris en 2015. Ce réchauffement est causé par plusieurs secteurs de notre société tels que les transports, l'agriculture ou encore la production d'énergie. En Europe, la moitié de l'énergie finale¹ est dédiée au chauffage et au refroidissement des bâtiments, ce qui en fait le secteur le plus énergivore (Communication from the commission to the European Parliament, An EU Strategy on Heating and Cooling 2016).

Il est néanmoins possible de réduire cette surconsommation d'énergie via plusieurs moyens efficaces, parmi lesquels on peut citer l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment, ainsi que celles des équipements techniques du bâtiment ou encore la mise en place de procédés dits « passifs ». Ces derniers font usage de ressources naturelles et de phénomènes physiques pour réguler le climat intérieur des bâtiments. De nombreuses recherches ont démontré que ces procédés ont le potentiel de réduire de manière significative les besoins en énergies pour chauffer et refroidir les bâtiments. Dans leur article *Passive design optimization of low energy building in different climates*, Fatima Harkouss et al. ont démontrés que des stratégies passives peuvent réduire jusqu'à 54% des besoins en refroidissement et jusqu'à 87% des besoins en chauffage. (Harkouss, Fardoun, and Biwole 2018)

La surconsommation d'énergie des bâtiments et son impact sur le climat soulignent l'urgence de les rendre plus efficaces, afin de réduire la quantité d'énergie nécessaire à leur régulation thermique. La refonte de notre manière de construire que cela entrainerait nous permettrait de contribuer à l'atténuation des changements climatiques qui impacteront notre planète d'ici la fin du siècle.

¹Energie utilisée par le consommateur (foyer, industrie, agriculture). Exclut énergie utilisée par le secteur de l'énergie lui-même.

Les changements climatiques qui affecteront notre planète dans les décennies à venir auront un fort impact sur les valeurs de température ou de précipitation moyennes, valeurs qui ont changées progressivement jusqu'à présent. Néanmoins, ces valeurs évolueront significativement plus rapidement dans les décennies à venir si aucunes mesures importantes de réductions des émissions ne sont prises.

Image du climat

Le climat de notre planète varie grandement selon les régions. Il est néanmoins possible de déterminer des similitudes par le monde, et de regrouper les différents climats existants en plusieurs catégories partageant des caractéristiques similaires. Il existe plusieurs manières de classifier les climats existants dans les différentes régions de la planète mais la classification de Köppen-Geiger est communément acceptée et permet de représenter de manière claire les zones climatiques et leur changement, via la production de cartes actualisées prenant en compte le changement climatique. Celles-ci se basent sur les quantités de précipitations et les températures et partagent les régions du monde en 5 grandes zones : climat tropical, sec, tempéré, continental et polaire. Ces cartes nous permettent aussi d'observer l'ampleur des changements climatiques futurs, certaines régions passant d'une zone à une autre.

La Suisse se situe parmi les pays dont le climat change le plus rapidement. Selon l'Office fédéral de météorologie et de climatologie, au cours des 150 dernières années, la température a augmenté deux fois plus rapidement que la tendance mondiale. Il est très probable que cette tendance se poursuive à l'avenir et que les caractéristiques du climat que nous connaissons actuellement en Suisse changent.

Climat actuel du Plateau Suisse

Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat de la région du Plateau Suisse est en grande partie située dans la zone de climat dite « Océanique » (Cfb) avec des zones plus limitées situées en zone « Continental humide » Dfb. Cette zone est aussi connue comme « Tempérée, sans saison sèche, et avec des étés tempéré » (voir tableau ci-dessous).

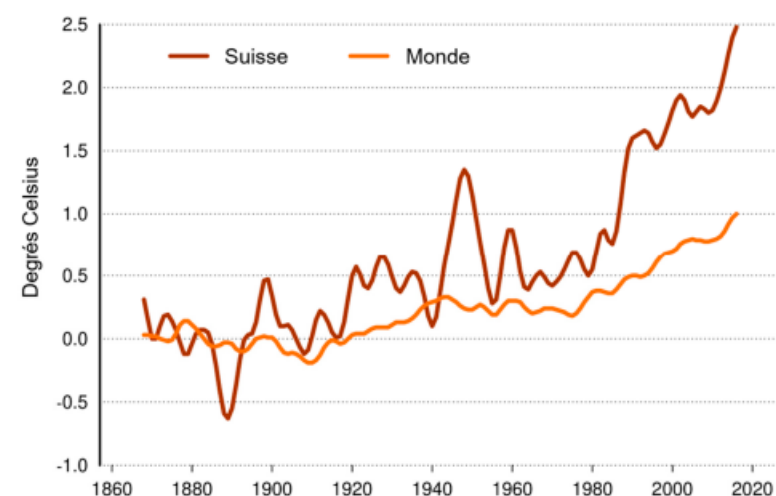


Figure 2 : Réchauffement de l'air proche de la surface entre 1864 et 2020 en Suisse (brun) et dans le monde (orange)

C	Climat tempéré	Température mois le plus chaud > 10°C et température mois le plus froid > -3 mais < 18°C
f	Pas de saison sèche	Précipitations distribuées tout au long de l'année
b	Été tempéré	Température du mois le plus chaud ≤ 22°C et nombre de mois avec température > 10°C ≥ 4

Climat futur du Plateau Suisse

Selon les cartes de Köppen-Geiger établies pour la période 1901-2099 par Beck et al. (Beck et al. 2023), dans un contexte de continuation du développement des énergies fossiles (SSP5) la région du Plateau suisse passera d'une zone principalement située dans la zone climatique Cfb à une zone climatique Cfa ou « Tempérée, sans saison sèche, étés chauds » (voir tableau ci-dessous). Cette tendance devrait augmenter d'ici la fin du siècle, jusqu'à placer la région presque entièrement dans la zone Cfa d'ici 2100 (voir cartes ci-contre).

C	Climat tempéré	Température mois le plus chaud > 10°C et température mois le plus froid > -3 mais < 18°C
f	Pas de saison sèche	Précipitations distribuées tout au long de l'année
a	Été chaud	Température du mois le plus chaud ≥ 22°C

Selon les projections effectuées par le National Centre for Climate Services (NCCS) de la Confédération, dans un contexte où les émissions de gaz à effet de serre augmentent sans restriction (RCP 8.5), les températures annuelles moyennes devraient augmenter d'ici au milieu du siècle de 2 à 3 degrés par rapport à la période de référence 1981-2010. Si les émissions diminuaient rapidement (RCP 2.6), il serait possible de limiter cette augmentation entre 0,6 et 1,8°C. (NCCS, n.d.-b)

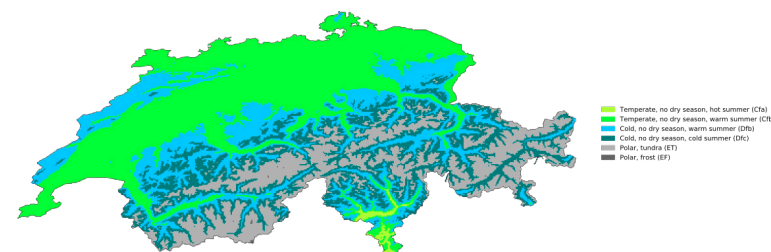


Figure 3 : Zones climatiques Suisse 1991-2020

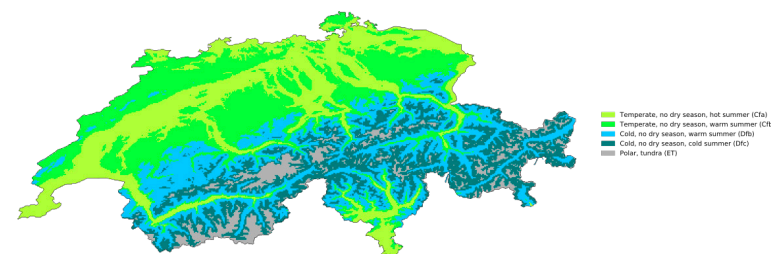


Figure 4 : Zones climatiques Suisse 2041-2070 (SSP 5)

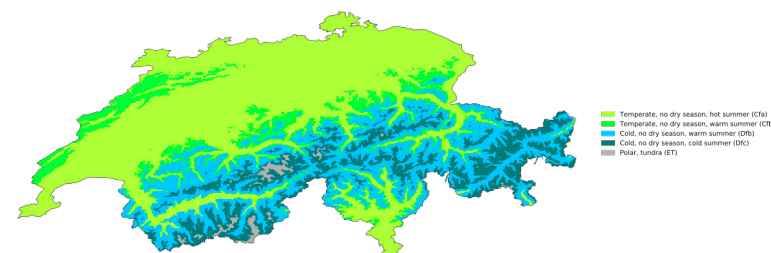


Figure 5 : Zones climatiques Suisse 2071-2099 (SSP 5)

Dans les deux scénarios (RCP 2.6 et 8.5), on devrait observer une augmentation des jours d'été² et des nuits tropicales³. Pour des stations de mesures comme celle de Genève-Cointrin, les prévisions sont comprises entre 68 et 82 journées estivales si l'on considère le RCP 2.6 et entre 87 et 105 pour le RCP 8.5. Si l'on compare avec le nombre de journées estivales de 60 que l'on observe aujourd'hui, la différence est significative, même dans le cas d'un scénario RCP 2.6. Les prévisions pour les nuits tropicales elles devraient augmenter, pour la même station de Genève-Cointrin, de 0.4 aujourd'hui à entre 1.4 et 4.9 pour le scénario RCP2.6 et entre 4.8 et 16.7 pour le RCP 8.5.(NCCS, n.d.-b)

Les prévisions ci-dessus nous indiquent donc que vers le milieu de ce siècle, les caractéristiques climatiques du Plateau suisse seront très différentes de celles d'aujourd'hui. La tendance est à une hausse des températures moyennes, ainsi qu'à une augmentation des précipitations hivernales et à une diminution des précipitations estivales. De plus, des événements extrêmes liés aux températures ou aux précipitations devraient avoir lieu à une fréquence et intensité plus élevées. Ces changements rapprocheront le climat du Plateau de conditions comparables à celles que l'on retrouve actuellement dans plusieurs régions dispersées à travers le monde. Ces régions seront présentées dans le chapitre suivant.

Parallèles avec d'autres régions

Comme mentionné ci-dessus, sous l'influence du changement climatique le Plateau suisse devrait changer de zone climatique et se retrouver en majorité dans la zone subtropicale humide d'ici la fin du siècle. Cette zone englobe actuellement de larges régions du monde. En Europe, nous trouvons des parties du nord et du centre de l'Italie, des parties des Balkans, notamment de vastes zones de Serbie, de Croatie, de Hongrie, de Bulgarie et de plus petites zones de Bosnie-Herzégovine et de Roumanie. En Amérique du Nord, de vastes zones du sud-est des États-Unis satisfont aux conditions de la zone Cfa. En Amérique du Sud l'entièreté de l'Uruguay et certaines parties du nord de l'Argentine, du sud du Brésil et du sud du Paraguay. En Asie, il existe de vastes zones du sud-est de la Chine, du nord de Taiwan, de vastes régions côtières

du sud et du centre du Japon et des zones limitées du sud de la Corée du Sud. La région autour de la ville de Brisbane, sur la côte Est de l'Australie, présente également les mêmes caractéristiques.

Toutes les zones ci-dessus font partie des zones subtropicales humides, où le climat est actuellement caractérisé par des précipitations distribuées le long de l'année, des étés chauds et des hivers doux. Les projections concernant les conditions climatiques du Plateau décrites au chapitre précédent annoncent une évolution claire vers des caractéristiques similaires, c'est pourquoi ce travail se penchera sur les solutions de refroidissement passif mises en place dans l'architecture vernaculaire de ces régions.

² Jours où la température atteint 25°C ou plus

³ Nuits où la température ne descend pas en dessous de 20°C

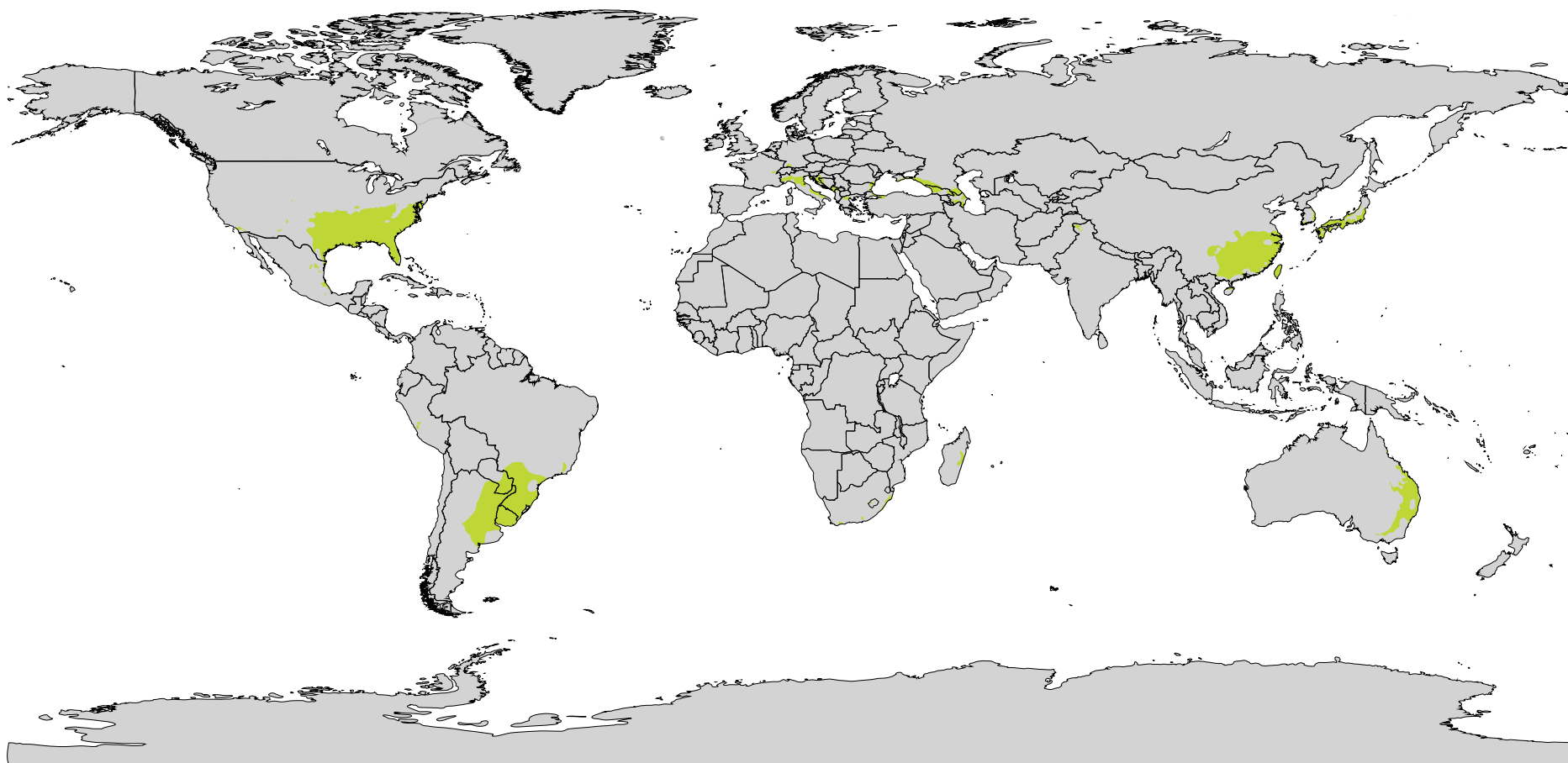


Figure 6 : Distribution des zones climatiques Cfa

Cas d'études

Critères de selection

En préambule à ce travail, une étude de la littérature disponible sur les architectures vernaculaires de différentes régions du monde présentant un climat subtropical humide est effectuée. Cette étude permet de sélectionner différents cas d'études selon les critères suivants. Premièrement, la zone climatique subtropical humide étant présente dans de nombreuses régions du monde, les cas d'études sont choisis pour représenter les différentes régions. Deuxièmement, la littérature disponible permettant d'illustrer chaque cas étant disparate, certaines zones géographiques telles les zones subtropicales d'Amérique du Sud et d'Australie ne sont pas représentées. Troisièmement, la classe sociale des habitants a aussi été prise en compte dans le but de démontrer la possibilité d'implémentation des stratégies et concepts peu importe les moyens financiers.

Présentation

Les exemples d'architecture vernaculaire choisis sont donc les suivants : aux Etats-Unis la Shotgun House de la Nouvelle-Orléans, ainsi que la Charleston Single House de Caroline du Sud. Au Japon, la Machiya. En Chine, le Tulou de la région du Fujian. En Italie, le Sassi de Matera ainsi que le Trullo d'Alberobello de la région des Pouilles. Toujours en Italie, la villa Barbaro ainsi qu'un ensemble de villas à Costozza en Vénétie ont été étudiées. Malgré le fait que le Sassi et le Trullo soient classifiés comme étant dans une zone climatique méditerranéenne, ceux-ci sont proches de la zone subtropicale humide. Ces cas d'études ont donc été retenus dans ce travail pour les stratégies qu'ils mettent en œuvre qui pourraient être transposées dans le climat subtropical humide, tout en tenant compte des différences qui caractérisent ces deux zones climatiques (humidité estivale et répartition des précipitations).



Figure 7 : Shotgun House

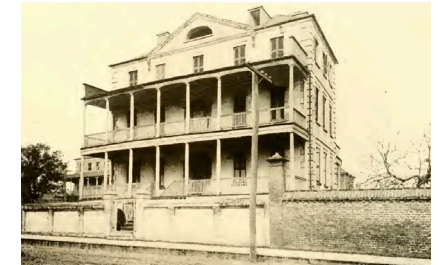


Figure 8 : Charleston Single House



Figure 9 : Machiya



Figure 10 : Trulli



Figure 11 : Villa Barbaro



Figure 12 : Sassi



Figure 13 : Covolli



Figure 14 : Tulou

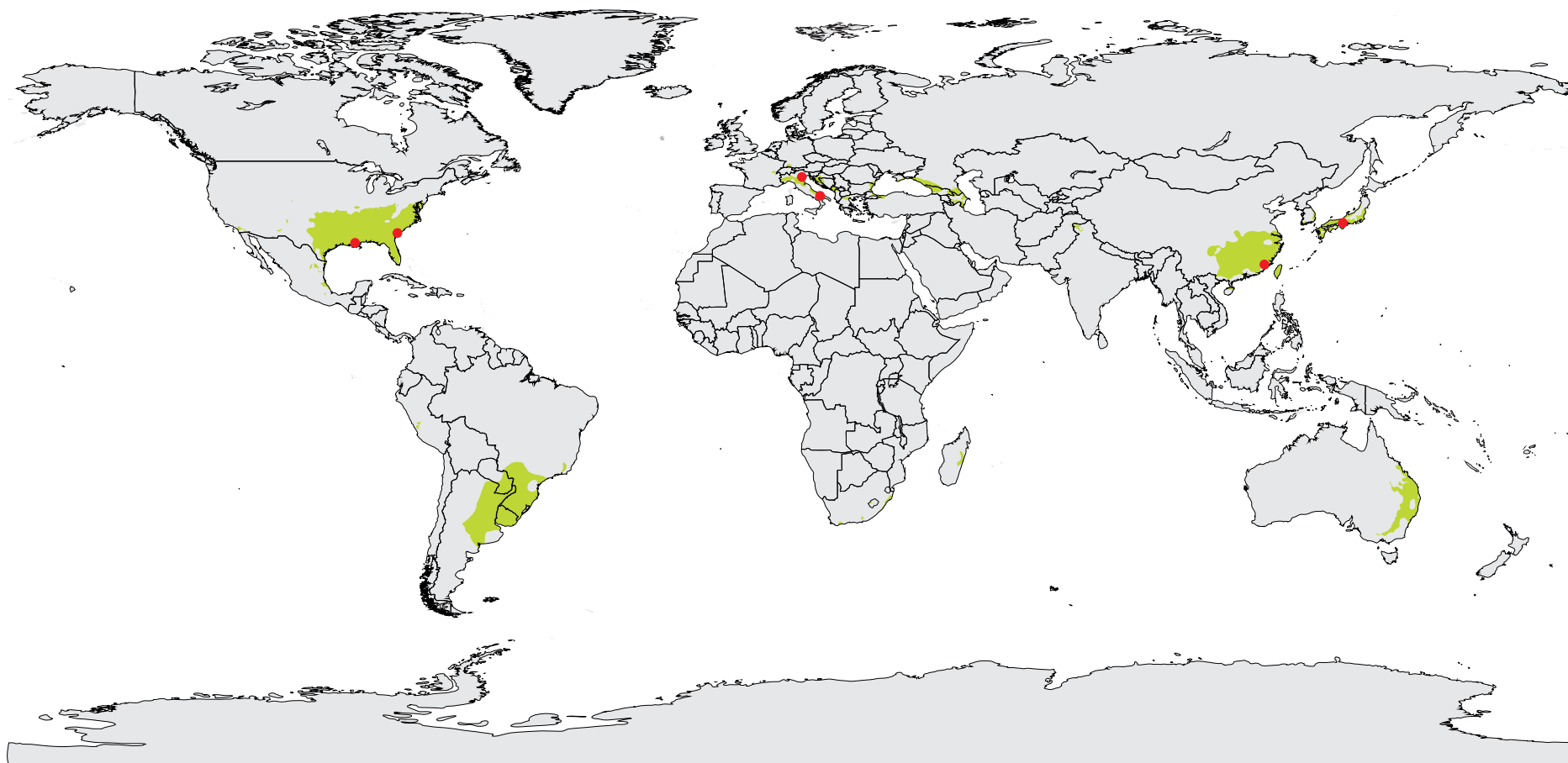


Figure 15 : Distribution des cas d'études

Problématique

Objet d'étude

Les changements climatiques évoqués dans le chapitre précédent auront un impact important sur les besoins en énergie nécessaire pour réguler le climat intérieur des bâtiments situés dans la région du Plateau Suisse. Pour éviter que ces besoins n'augmentent considérablement via un recours intensif aux systèmes actifs, il est urgent de regarder les solutions alternatives et plus particulièrement les solutions passives. Comme mentionné dans l'introduction, il est possible de réguler efficacement le climat intérieur des bâtiments par l'implémentation de solutions passives. On peut observer celles-ci dans de nombreux exemples d'architecture vernaculaire à travers le monde. Ces solutions vernaculaires passives sont une source d'inspiration dont le potentiel n'est à l'heure actuelle pas assez exploité.

Dans le cadre de ce travail, par solutions vernaculaires passives on entend un ensemble de solutions conceptuelles créées avant l'avènement d'équipements permettant d'avoir un contrôle élevé sur le climat intérieur et donc réduisant l'impact de l'environnement extérieur. Ces solutions ont été conçues en réponse au climat d'une région spécifique et en utilisant les ressources présentes dans cette région. Via un processus itératif, les populations indigènes à ces régions ont réussi à trouver une manière efficace de réguler le climat intérieur de leurs bâtiments, utilisant généralement peu d'énergie et présentant un impact sur l'environnement faible.

La notion de confort intérieur des bâtiments, notion fondamentale en architecture, désigne l'ensemble des conditions environnementales qui contribuent au bien être des habitants. Cette notion est influencée par différents facteurs prédéfinis. Parmi ces facteurs, on peut citer notamment l'humidité relative, la température de l'air, la température des surfaces et la vitesse de l'air. Les stratégies et concepts étudiés dans cet énoncé ont un impact sur ces facteurs et permettent donc de refroidir le climat intérieur des bâtiments. Il est important de relever que les stratégies et concepts relevés parmi les cas d'études agissent principalement sur les facteurs autres que l'humidité relative.

Cet énoncé a comme objet d'étude l'architecture vernaculaire des climats subtropicaux humides et plus précisément les stratégies de refroidissement passives mises en œuvre dans ces climats dans un contexte antérieur à l'invention et la propagation des technologies de contrôle du climat. Ce climat étant notamment marqué par des températures plus élevées, l'objectif est de pouvoir répondre à celles-ci sans augmenter considérablement notre consommation d'énergie liée aux technologies de contrôle du climat.

Cette démarche fait écho au diagramme de Behling développé par Inaki Abalos dans son article *Beauty from Sustainability ?* (Abalos 2009) diagramme qui explicite le renversement des valeurs liés à l'architecture bioclimatique. (Voir ci-dessous) Dans ce diagramme, le triangle de gauche représente l'architecture du passé basée sur des principes formels et des systèmes passifs. Le triangle du milieu représente l'architecture actuelle où les systèmes actifs dominent les systèmes passifs et la forme architecturale. Le triangle de droite représente l'architecture du futur, où la forme architecturale et les systèmes passifs prévalent sur les systèmes actifs. Comme l'expliquent Julia Lima Toroxel et Sandra Monteiro Silva dans leur travail de recherche *A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture* : « Dans cette architecture, le flux d'énergie thermique se fait de préférence par des moyens naturels, à savoir le rayonnement, la conduction ou la convection, plutôt que par l'utilisation intensive de dispositifs électriques. » (Toroxel and Silva 2024, 11)

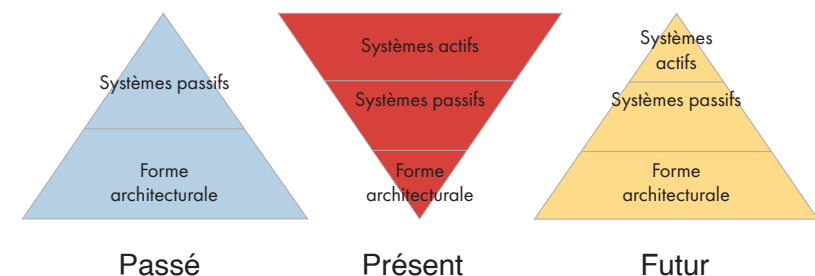


Figure 16 : Diagramme de Behling (adaptation de Abalos 2009 et Fernandes 2012)

Méthodologie

L'objectif de ce travail est d'analyser l'architecture vernaculaire des climats qui possèdent actuellement les conditions qui se retrouveront sur le Plateau suisse en 2050. Cette analyse vise à identifier des solutions passives capables d'apporter une réponse adaptée au climat futur du Plateau suisse. Ces solutions permettront de réduire la dépendance aux systèmes actifs pour garantir les conditions de confort intérieur.

Premièrement, une revue de la littérature disponible sur l'architecture vernaculaire des climats subtropicaux humide a été effectuée. Cette revue avait pour objectif d'établir un « catalogue » de typologies architecturales provenant de ce climat spécifique pouvant servir de base pour la sélection de cas d'études.

Deuxièmement, plusieurs cas d'études ont été sélectionnés selon les critères évoqués dans le chapitre *Cas d'études*. Ensuite, ces cas d'études ont été analysés afin de relever les stratégies et les concepts de refroidissement passif utilisées. Dans son article *Early Design Strategies for Passive Cooling of Buildings : Lessons Learned from Italian Archetypes* (Chiesa 2019, 380), Giacomo Chiesa mets en place « trois grandes familles d'actions » vis-à-vis des gains de chaleur. Dans cet énoncé ces actions sont définies comme des stratégies appliquées par les cas d'études pour gérer les gains de chaleur. Chaque stratégie (prévenir, atténuer, dissiper) se traduit dans les études de cas par des concepts de refroidissement passif. Chaque concept a été illustré par un ou plusieurs cas d'étude d'architecture vernaculaire provenant des climats subtropicaux humides.

Troisièmement, une analyse croisée de ces concepts a été effectuée afin de comprendre les potentielles synergies, antagonismes et limitations pouvant les affecter. Cette analyse cherchait à relever les conditions nécessaires à leur application efficace dans le climat étudié.

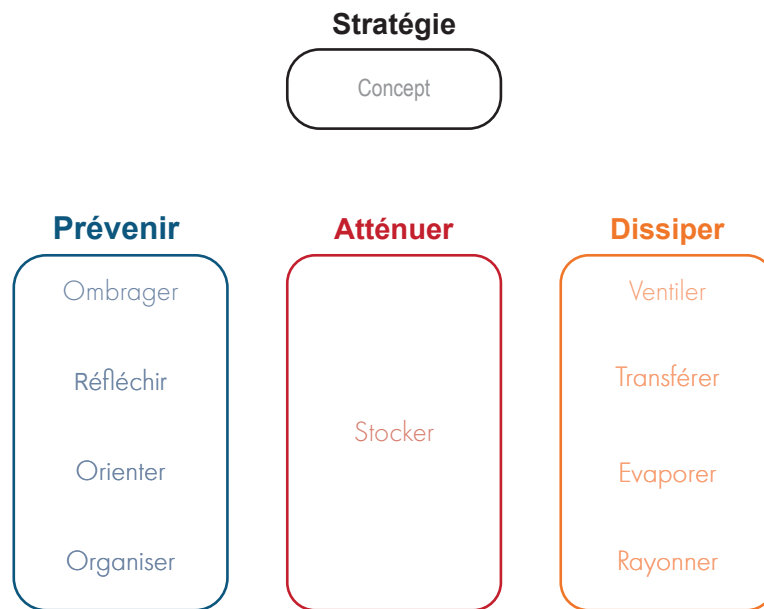
Quatrièmement, leur applicabilité au contexte suisse a été étudiée en analysant des paramètres climatiques, de savoir-faire et de ressources disponibles.

Cinquièmement, la liste de concepts passifs présentée a été comparée

aux stratégies contemporaines de refroidissement passif afin de fournir une vue d'ensemble des solutions possibles et un état actuel des recherches.

Finalement, des exemples de projets actuels mettant en œuvre ces stratégies ont été présentés afin d'étudier les possibles mises en œuvre de ces stratégies passives dans un contexte actuel.

2. Stratégies et concepts passifs



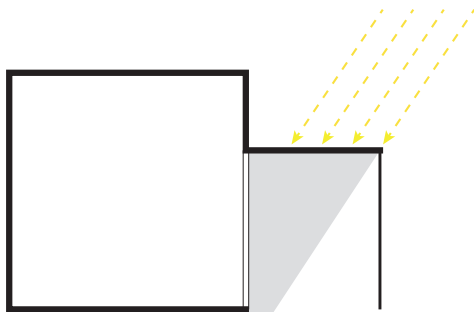
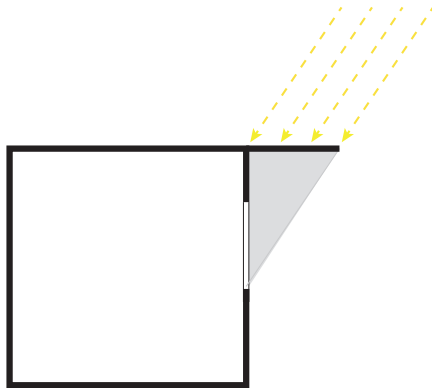
Il est possible de relever trois stratégies principales vis-à-vis des gains de chaleur, stratégies qu'il s'agit de mettre en œuvre pour garder une température confortable au sein des bâtiments. Celles-ci sont les suivantes : prévenir les gains de chaleur, réguler les gains de chaleur, dissiper les gains de chaleurs. Parmi les différents cas étudiés, ces stratégies prennent diverses formes en fonction de paramètres parmi lesquels on peut citer les ressources disponibles et les traditions et savoir-faire propres au territoire dans lequel le bâtiment est construit.

Dans cette partie, l'objectif est de présenter les stratégies et les concepts de refroidissement passif qui sont liés à ces stratégies. Ces stratégies et concepts sont extraits via l'analyse de cas d'études d'architecture vernaculaire sélectionnés dans les zones climatiques subtropicales humides.

Prévenir les gains de chaleur

Selon A. Dimoudi, la prévention des gains de chaleurs peut avoir lieu à plusieurs niveaux : prévention des gains externes et prévention des gains internes au bâtiment. Les gains externes ont leur source dans l'interaction du bâtiment avec son environnement et ont comme sources principales les radiations du soleil et la température ambiante. Quant aux gains internes, ils ont comme source la chaleur produite par le métabolisme des occupants ou encore celle produite par l'éclairage et les appareils pour n'en citer que deux. (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 38–39) L'analyse de différents cas d'études a permis de relever des concepts agissant seulement sur les gains externes et ayant comme but d'empêcher la chaleur d'atteindre l'intérieur du bâtiment, ces concepts sont les suivants : ombrager , réfléchir , orienter et organiser . Ceux-ci seront présentés et exemplifiés dans ce chapitre.

Ombrager



Une action fondamentale pour prévenir les gains thermiques est d'apporter de l'ombre sur la façade et plus particulièrement sur les ouvertures. Plusieurs moyens peuvent permettre d'intercepter les rayons du soleil avant qu'ils n'atteignent la façade. Le premier est l'utilisation de dispositifs, fixes ou modulables permettant d'apporter de l'ombre. Ces dispositifs peuvent prendre de nombreuses formes, comme celles d'avant toits, de volets ou encore de panneaux coulissants. Les dispositifs fixes sont remarquables par leur simplicité conceptuelle et de mise en œuvre, tandis que ceux modulables permettent un contrôle plus élevé de l'environnement.

Ces dispositifs sont particulièrement efficaces, comme le démontre une étude de Georgios A. Florides, Savvas Tassous, Soteris Kalogirou et Luiz C. Wrobel : *Measures used to lower building energy consumption and their cost*. Dans cette étude il est mentionné que la présence d'avant toit en façade peut conduire à une réduction de 7% des besoins en refroidissement annuels pour un bâtiment sans isolation et jusqu'à 19% pour un bâtiment avec 50 mm d'isolation. (Florides et al. 2002, 1)

Un autre moyen est l'ombrage par espaces transitionnels. Par transitionnel on entend un espace situé entre l'environnement extérieur et intérieur et qui fait office d'espace tampon. Ces espaces apportent non seulement de l'ombre sur la façade mais créent également une zone ombragée qui peut être utilisée par les habitants, renforçant la relation avec l'extérieur. Ces espaces transitionnels prennent différentes formes parmi lesquelles on peut citer vérandas, loggias, coursives et balcons ombragés. De plus, comme le stipule Yanyan Huang et Weichang Liu dans leur étude *Measurements and Analysis of the Thermal Insulation Effect of the Transition Space of a Building in the Hot Summer and Cold Winter Zone*, les espaces transitionnels tels que les vérandas seraient à l'origine d'un « effet d'isolation thermique » qui serait largement bénéfique à la régulation du climat intérieur. (Huang and Liu 2020, 8)

Parmi les cas d'études, on retrouve ces stratégies dans la Charleston Single House, maison de propriétaire terrien typique de Caroline du Sud. Cette habitation comporte une piazza latérale protégée du soleil sur le long côté de la façade, ainsi que des volets pour réguler

l'environnement intérieur. Un autre exemple est celui de la Machiya, type d'habitation de marchand ou d'artisan qui prend ses origines dans le Japon médiéval et que l'on retrouve en grand nombre dans des villes importantes telles que Kyoto. On retrouve souvent dans ces maisons, ainsi que dans d'autres habitations traditionnelles japonaises, un toit à forte pente avec un avant toit bloquant le soleil l'été (Tori-bisashi) ainsi que différents éléments cherchant à protéger du soleil tels que des stores en bambous. Les Machiya comportent aussi souvent des vérandas (*Engawa*) qui, telles les piazzas de la Charleston Single House, font office d'espaces transitionnels. (Iba and Hokoi 2022, 3-4)

Nous avons donc pu observer qu'il est possible de prévenir les gains de chaleur en cherchant à venir ombrager l'enveloppe. Cet ombrage peut être apporté via des dispositifs fixes ou modulables, tels que chez la Machiya, ou encore via des espaces transitionnels tel que chez la Charleston Single House.



Figure 17 : Tori-Bisahi

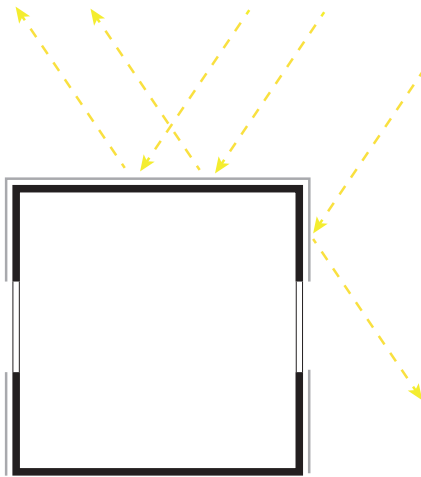


Figure 18 : Stores en bambou



Figure 19 : Véranda latérale et volets en bois

Réfléchir



Une autre stratégie permettant de prévenir les gains de chaleur à l'intérieur du bâtiment est d'utiliser la réflectivité plus élevée des surfaces de couleurs claires. L'albedo supérieur de ces surfaces permet de réduire la quantité de lumière absorbée, qui serait ensuite transformée en énergie thermique et transmise à l'intérieur du bâtiment (Toroxel and Silva 2024, 17). Rejeter une partie de cette énergie via réflexion permet donc de limiter le réchauffement de l'air intérieur.

L'efficacité de cette stratégie est soulignée par Yahya Lavafpour et M. Surat dans leur étude *Passive Low Energy Architecture in Hot and Dry Climate*. Dans cette étude ils stipulent que l'utilisation de surfaces claires, notamment sur les toits permettrait de réduire la température de surface de 40°C par rapport à celle atteinte par un toit de couleur sombre. (Pour 2015, 758) Malgré le fait que cette stratégie soit utilisée très souvent sous des climats méditerranéens, son efficacité a aussi été démontrée sous des climats tempérés. (Kolokotroni et al. 2013)

Les Trulli, constructions typiques de la région des Pouilles dans le centre de l'Italie, figurent parmi les cas d'études mettant en œuvre une enveloppe de couleur claire. Ces constructions sont souvent de plan circulaire ou carré, surmontées d'un toit conique qui recouvre normalement une seule pièce. Il est donc courant de retrouver les Trulli sous formes d'agrégation de plusieurs coupoles. Les murs extérieurs sont soit laissés en pierre apparente ou peints en blanc. Il est intéressant de noter que l'intérieur du bâtiment est souvent aussi de couleur blanche, les murs étant recouverts de mortier à la chaux pour éclaircir ces espaces et éloigner les insectes. (Ruggiero et al. 2013, 87)

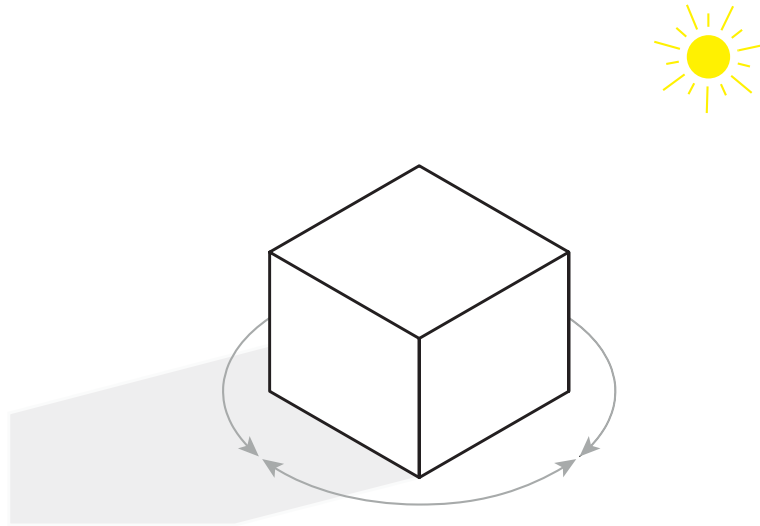


Figure 20 : Façades extérieures Trulli



Figure 21 : Façades extérieures Trulli

Orienter



Troisièmement, il est possible de prévenir les gains de chaleur au sein du bâtiment via une orientation judicieuse en fonction de sa forme et de la course du soleil relative à l'emplacement géographique. Une orientation selon un axe environ nord-sud (avec la façade principale à moins de 30° du sud) permet d'augmenter l'efficacité des protections solaires. D'après Huw Heywood, cette orientation présente l'avantage de protéger aisément le bâtiment contre des apports solaires excessifs. Lorsque le soleil est haut dans le ciel et qu'il illumine la façade sud, un simple dispositif de protection solaire horizontal suffit à créer un ombrage efficace. (Heywood 2012, 65) Selon une étude menée par Lavafpour et Surat, un bâtiment disposé selon un axe légèrement nord-ouest / sud-est recevra moins de radiations sur ses façades est et ouest (Pour 2015).

De nombreuses recherches ont été effectuées sur l'efficacité d'une

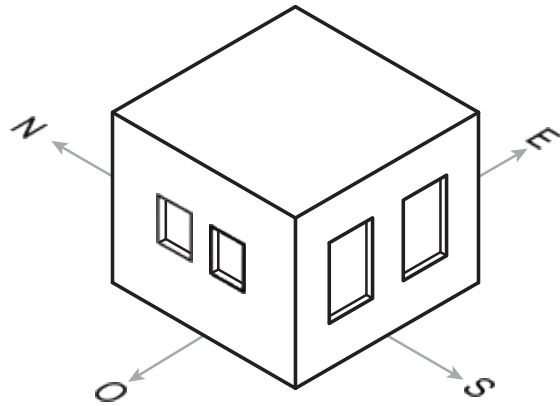
orientation nord-sud des bâtiments, et notamment sur la réduction des demandes en énergie que cette stratégie peut entraîner. Selon Kohansal et al., une orientation efficace du bâtiment (façade principale orientée sud) permettrait de réduire les besoins en énergie entre 11 et 39%. Ceux-ci ajoutent que cette orientation aurait un impact plus important sur la réduction de besoin en refroidissement que ceux en chauffage. (Kohansal et al. 2022, 2)

Les Sassi di Matera situés dans la région de Basilicate en Italie sont un exemple d'architecture vernaculaire faisant usage d'une orientation efficace afin de contrôler les apports de radiation à la fois en été et en hiver. Ces habitations sont caractérisées par le fait qu'elles comportent une partie construite sur et une partie sous terre, directement creusée dans la roche. Celles-ci sont orientées plein sud et plus profondes que larges, ce qui permet de capter efficacement le soleil bas en hiver et bloquer efficacement celui-ci lorsqu'il est haut en été. (Cardinale, Rospi, and Stazi 2010, 95)



Figure 22 : Ouvertures et orientation Sassi di Matera

Organiser



Finalement, il est possible de prévenir les gains de chaleurs atteignant un bâtiment en concevant stratégiquement les différentes ouvertures. Il est possible de jouer sur la taille et l'orientation de ces ouvertures en fonction de leur position sur les façades des bâtiments. Il sera néanmoins important d'équilibrer lors de la conception les proportions des ouvertures suivant à la fois leur apport en chaleur et leur apport en ensoleillement.

Comme vu précédemment, les ouvertures situées en façade sud sont intéressantes car elles reçoivent de grande quantité de rayonnement en hiver et sont faciles à ombrager en été. Celles-ci peuvent donc être de taille plus conséquente. Les ouvertures en façade Est et Ouest sont difficiles à protéger car elles font face au soleil lorsqu'il est bas dans le ciel. Pour remédier à cela il est possible soit de mettre en place des protections solaires telles que des lames verticales ou des « jardins verticaux » (Heywood 2012, 70), ou alors de réduire la taille des ouvertures. Une solution additionnelle est de jouer sur l'orientation des ouvertures et de donner une orientation sud à celles situées sur les façades est et ouest (voir illustration ci-dessous).

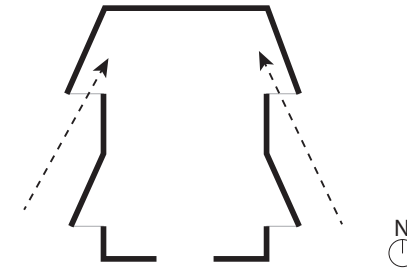


Figure 23 : Exemple de solution simplifiée pour orientation sud d'ouvertures en façade est et ouest (adaptation de Santamouris and Asimakopoulos 2013)



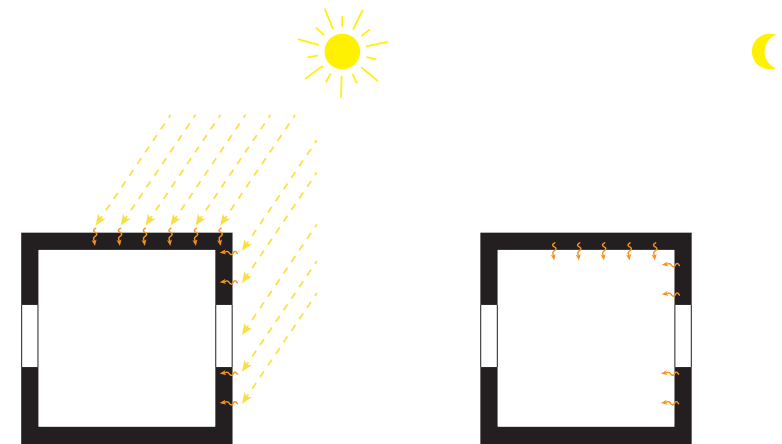
Figure 24 : Fenêtre en façade Trullo

On peut retrouver ce concept dans le Trullo, dont les ouvertures sont situées principalement en façade Sud et de tailles réduites, comme le relèvent Cardinale et al. (Cardinale, Rospi, and Stazi 2010, 592) et Ruggiero et al. (Ruggiero et al. 2013, 88) dans leurs études sur les caractéristiques et performances énergétiques des Trulli. Dans ces études, les auteurs mentionnent aussi les effets indésirables de ces ouvertures tels la ventilation naturelle inadéquate et les conditions réduites de lumière.

Réguler gain chaleur

Après avoir tenté de prévenir les gains de chaleur, la prochaine action possible est de réguler les gains de chaleur au niveau de la structure de l'enveloppe afin de minimiser leur impact sur le climat intérieur. Alors que dans la partie précédente, les stratégies cherchaient à contrer ou renvoyer les apports de chaleur, ici on cherchera à contrôler et réguler la transmission de la chaleur au travers de l'enveloppe du bâtiment. Cette stratégie est principalement mise en œuvre via l'utilisation de matériaux ayant une haute inertie thermique. Le concept d'inertie thermique sera présenté et exemplifié dans ce chapitre.

Stocker



L'inertie thermique est définie comme la capacité d'un matériau à stocker la chaleur et à la retransmettre progressivement. Ce concept permet de refroidir un bâtiment en empêchant la surchauffe, via l'absorption d'une partie des radiations durant la journée au moment où la température extérieure est élevée, pour ensuite la retransmettre lorsque les températures redescendent. De plus, une partie de cette énergie est stockée dans l'enveloppe, pour ensuite être redistribuée vers l'environnement extérieur via convection et radiation le soir (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 41). Parmi les matériaux d'enveloppe à mettre en œuvre pour tirer profit du phénomène d'inertie thermique on peut citer le béton, la brique, la pierre naturelle, l'adobe et le pisé.

Dans leur étude, *Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and*

building use, Stijn Verbeke et Amarylis Audenaert soulignent les impacts positifs que peut avoir l'inertie thermique sur le confort thermique ainsi que l'utilisation d'énergie pour chauffer et refroidir un bâtiment. Les auteurs nuancent néanmoins leur propos en soulignant les différents facteurs impactant l'efficacité de cette stratégie (Verbeke and Audenaert 2018, 2312–13).

L'inertie thermique figure parmi les stratégies de refroidissement passif retrouvées le plus souvent parmi les cas d'études d'architecture vernaculaire des climats subtropicaux humide étudiés. Cette observation permet de suggérer la facilité d'application de cette stratégie dans différentes régions. En effet, la diversité des matériaux permettant de mettre en œuvre cette stratégie rend celle-ci facilement applicable dans pratiquement toutes les régions. On retrouve des matériaux à haute inertie thermique chez la Charleston Single House, dont les murs sont souvent en brique (Piesik 2017, 307), ou encore chez les Tulou. On retrouve ce cas d'étude dans le sud-est de la Chine, particulièrement dans la région du Fujian. Ces habitations suivent un plan circulaire ou carré organisé autour d'une cour. Les murs extérieurs sont d'une épaisseur considérable (1.5-1.8 m), souvent en pisé ou pierre naturelle (Porretta, Pallottino, and Colafranceschi 2022, 913) et comportent de petites ouvertures. Il a été démontré par Jiaqi Yang et Paula Cadima que cette configuration des murs extérieurs permet une fluctuation minimale des températures et donc de garantir le confort thermique intérieur. (Yang and Cadima 2018) On peut encore citer comme exemple le Sassi de Matera et le Trullo d'Alberobello comme cas d'étude utilisant les propriétés d'inertie thermique élevées de leur enveloppe. Pour le Sassi, l'inertie thermique est fournie par la roche dans laquelle les parties sous-terraines sont creusées, alors que pour le Trullo cette inertie est apportée par son enveloppe épaisse constituée d'un double mur en pierre calcaire, dont l'épaisseur varie entre 0.8 et 3m (Ruggiero et al. 2013, 88).



Figure 25 : Mur extérieur Tulou circulaire



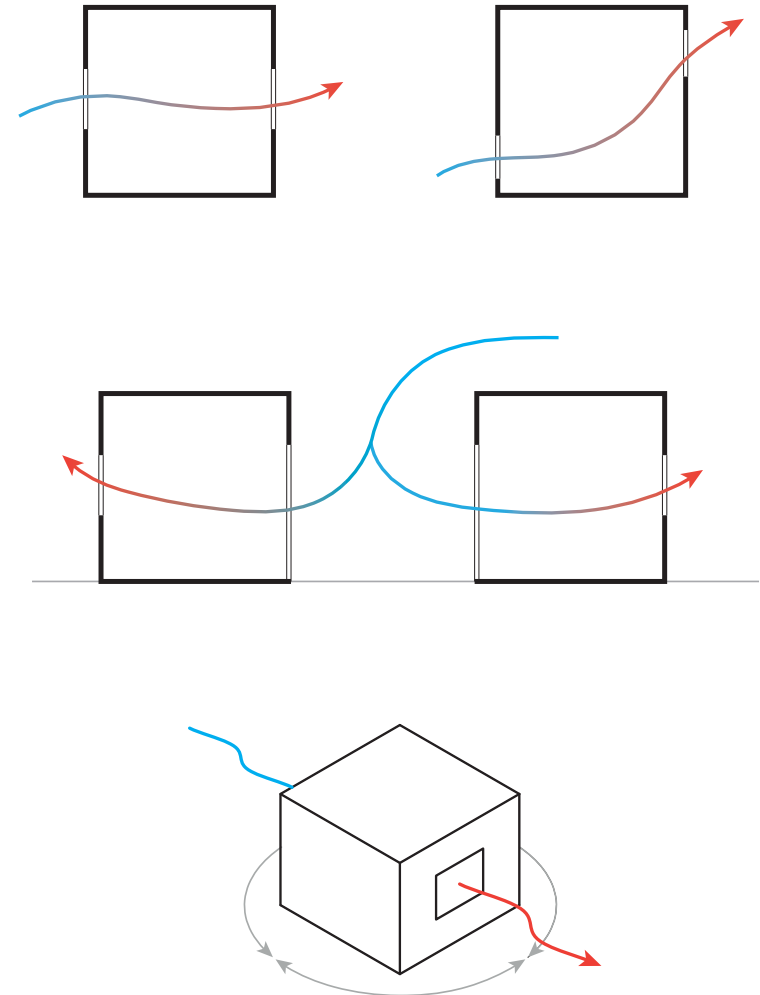
Figure 26 : Tulou carré

Nous avons donc pu voir dans ce paragraphe qu'il est possible de réguler les gains de chaleur en évitant la surchauffe des bâtiments via le concept concept stocker. Ce concept est mis en œuvre par l'utilisation de matériaux ayant une inertie thermique élevée tels que la pierre naturelle ou l'adobe. Des cas d'études tels que la Charleston Single House, le Tulou ou le Trullo font usage de ce concept de refroidissement passif.

Dissiper les gains de chaleur

Finalement, après avoir tenté d'agir sur les apports de chaleur avant que ceux-ci n'atteignent l'enveloppe, puis avoir cherché à réguler leur transmission au travers de l'enveloppe, on cherchera à expulser le surplus de chaleur présent au sein du bâtiment. Cela peut avoir lieu en évacuant la chaleur vers 4 « puits thermiques » : l'air, le sol, l'eau et le ciel nocturne. (Chiesa 2019, 9) Chacun de ces puits thermiques fait référence à une technique d'évacuation du surplus de chaleur, il s'agit de l'évacuation via ventilation, via dissipation vers le sol, via évapotranspiration et via radiation. Dans ce travail, ces derniers ont été synthétisés en 4 concepts de refroidissement passif via dissipation des gains de chaleur : ventiler, transférer, évaporer, rayonner. Ces concepts seront présentés et exemplifiés dans ce chapitre.

Ventiler



Selon Giacomo Chiesa, le concept de refroidissement d'un espace par ventilation naturelle contrôlée fait référence à 3 types principaux. Premièrement, la « ventilation de confort » qui fait référence à l'avantage physiologique direct perçu par les utilisateurs. Deuxièmement, la « ventilation environnementale » qui fait référence à la dissipation de gains de chaleur en substituant l'air à l'intérieur de l'espace avec de l'air extérieur à plus basse température. Finalement la « ventilation structurelle » qui fait référence à l'effet indirect dû à la dissipation nocturne de la chaleur emmagasinée par la structure (Chiesa 2019, 385–86). L'analyse des cas d'études a permis de relever le concept ventiler sous la forme de différentes applications dont le but est de ventiler les espaces intérieurs. Ces applications sont les suivantes : la ventilation croisée, les cours intérieures, l'effet de cheminée et l'orientation des bâtiments pour mettre à profit les vents dominants.

Premièrement, la ventilation croisée est obtenue lorsqu'une pièce présente des ouvertures sur deux côtés opposés et que ces côtés font face à l'extérieur. Dans ce cas, le flux d'air crée une différence de pression, ce qui augmente le débit d'air et crée ainsi un effet de refroidissement (Ahmed et al. 2014, 3), notamment via ventilation environnementale. Cette application a été retrouvée à de nombreuses reprises parmi les cas d'études notamment chez la Shotgun House, où le plan caractéristique plaçant les différentes pièces en enfilade, facilite la ventilation croisée. Au sein de la Machiya, le placement des panneaux coulissants Fusuma permet de contrôler et faciliter le flux d'air d'une partie à l'autre de la maison. (Iba and Hokoï 2022, 13) Enfin, dans la conception de ses villas, l'architecte Andrea Palladio souligne l'importance de l'alignement des ouvertures de part et d'autre, comme le retranscrit Philippe Rahm dans son livre *Histoire Naturelle de l'architecture* (Rahm, 2020). Cette disposition permet une diffusion optimale de la lumière naturelle, ainsi qu'une ventilation naturelle efficace.

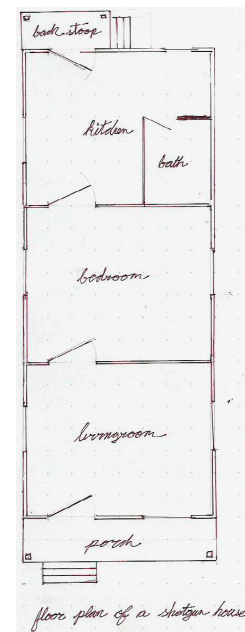


Figure 27 : Plan Shotgun House



Figure 28 : Panneaux Fusuma

Deuxièmement, en plus du fait que celles-ci produisent de l'ombrage sur les pièces adjacentes, l'utilisation de cours intérieures au sein d'un bâtiment permet d'améliorer la ventilation naturelle et l'échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur.(Toroxel and Silva 2024, 13) Cette application est présente au sein de la Machiya avec des cours intérieures *tsuboniwa* ou encore chez le Tulou, dont le plan est organisé autour d'une cour intérieure aux dimensions considérables, qui permet une dissipation efficace de la chaleur accumulée (Su and Chang 2018, 256).



Figure 29 : Cour intérieure tsuboniwa



Figure 30 : Cour intérieure Tulou

Troisièmement, selon E. Dascalaki et M. Santamouris, l'effet de cheminée ou tirage thermique se produit lorsque, dans un espace vertical, l'air chaud monte et est remplacé par de l'air froid. Cela se produit en raison de la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid, le premier étant plus léger que le second (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 226–27). Parmi les cas d'études analysés, l'utilisation de ce phénomène au sein des bâtiments se matérialise par la présence d'ouverture en partie basse et haute afin d'introduire l'air frais et d'extraire l'air chaud, mais aussi par la présence de hauteur sous plafond élevée pour permettre le déplacement de l'air chaud et son remplacement par de l'air frais. Ces deux applications peuvent être retrouvées chez la Shotgun House, qui comporte souvent une hauteur sous plafond élevée, ainsi que chez la Charleston Single House, dont le plan est organisé autour d'un hall central qui via tirage thermique permet d'expulser l'air chaud des chambres, en association avec un attique ventilé pour expulser l'air vers l'extérieur (Piesik 2017, 307).

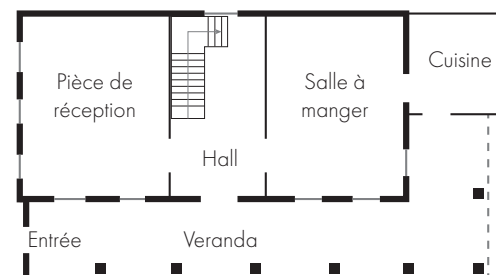


Figure 31 : Charleston Single House-schéma d'un plan typique

(adaptation de B.V Messervy)

Finalement, un autre moyen d'augmenter les flux d'air au sein des bâtiments et donc de dissiper les gains de chaleur est le placement du bâtiment en fonction des vents dominants relatifs à la position géographique. En conjonction avec un design optimal des ouvertures pour conduire ces vents au travers de l'édifice via ventilation croisée, ce concept permet une ventilation efficace. Afin de mettre en œuvre ce concept, il est nécessaire d'étudier dès la phase de conception les

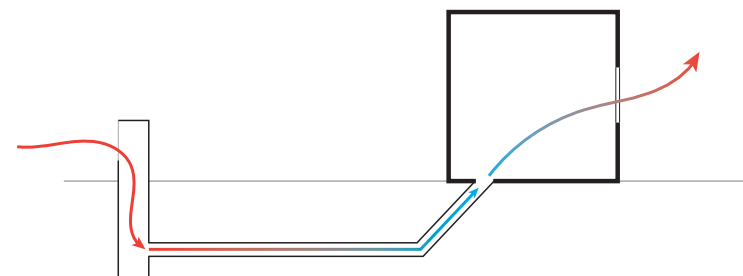
caractéristiques du microclimat propres à la situation géographique du bâtiment, ainsi que la topographie et la végétation à proximité. Ces deux caractéristiques pouvant faire obstacle ou modifier les propriétés des vents dominants. La topographie du site peut être exploitée pour se protéger des vents indésirables et, en positionnant stratégiquement le bâtiment, canaliser les vents favorables à travers celui-ci. La végétation elle peut permettre de réduire la vitesse du vent ou alors de refroidir celui-ci (Heywood 2012, 38).

Il sera donc important d'étudier la direction et la fréquence de ces vents. Une fois ces paramètres connus, les bâtiments pourront être placés et orientés de manière optimale. Selon Victor et Aladar Olgyay dans leur livre *Design with climate*, les bâtiments doivent être orientés avec les ouvertures dans la direction des vents dominants durant les périodes chaudes, tout en protégeant les façades exposées aux vents froids dominants en hiver. L'orientation optimale de la façade serait de 45° par rapport au vent pour réduire le potentiel l'impact néfaste de celui-ci tout en maintenant une bonne ventilation à l'intérieur (Olgyay et al. 2015).

La mise en œuvre d'une orientation selon les caractéristiques du microclimat pour refroidir passivement via ventilation est observable chez les Tulou. En effet, dans leur étude *Winter Wind Environmental Comfort in Courtyard in Vernacular Architecture : A Case Study of the Fuyu Building in Yongding, Fujian*, Ying-Ming Su et Hui-Ting Chang ont démontrés que l'orientation et la forme de ce Tulou permettaient à la fois de minimiser les effets du vent froid en hiver et d'apporter une ventilation efficace en été. (Su and Chang 2018, 256)

Nous avons donc pu voir dans ce paragraphe qu'il est possible de dissiper les gains de chaleurs au sein d'un bâtiment via la mise en place d'une ventilation naturelle efficace. Cette ventilation peut être obtenue de plusieurs manières, notamment par l'utilisation de la ventilation croisée ou de l'effet de cheminée. Le refroidissement passif par ventilation naturelle est appliqué chez la Machiya, la Shotgun House, ou encore chez le Tulou.

Transférer



Un deuxième concept de refroidissement passif via dissipation identifié est le fait de transférer la chaleur accumulée au sein de l'édifice vers le sol. Ce concept est basé sur le fait que le sol possède une capacité thermique considérable, comme l'explique A. Dimoudi (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 51). Cette caractéristique a comme conséquence que la température du sol est généralement considérablement plus basse que celle de l'air durant l'été. De plus, les variations de températures du sol sont limitées. Il est estimé qu'à quelques mètres de la surface les températures restent stables toute l'année. Toujours selon A. Dimoudi, dans les climats tempérés les températures du sol à une profondeur entre 2 et 3 m sont assez basses en été pour servir de source de refroidissement, rendant ce climat particulièrement propice à l'utilisation de ce concept pour le refroidissement passif.

La dissipation vers le sol de la chaleur peut s'effectuer par deux moyens : directe, c'est-à-dire en mettant le bâtiment directement en contact avec le sol, ou alors indirecte via l'introduction à l'intérieur d'air ayant été refroidi via des tuyaux enterrés. On peut retrouver ces deux types de « earth cooling » chez les cas d'études analysés.

Premièrement, le Sassi di Matera fait usage de dissipation directe vers le sol par le fait que ces constructions sont soit complètement, soit partiellement enterrées. Cet aspect permet de faire usage de l'inertie thermique considérable du sol pour refroidir passivement l'intérieur. Selon Nicola Cardinale, Gianluca Rospi et Alessandro Stazi, ces caractéristiques de l'enveloppe du Sassi permettent de garder les conditions intérieures stables tout au long de l'année et la température intérieure entre 18 et 21 °C (Cardinale, Rospi, and Stazi 2010, 106).



Figure 32 : Entrées
Sassi - Matera

Deuxièmement, le concept de dissipation indirect vers le sol a pu être identifié dans un ensemble de villa du 16ème siècle, à Costozza dans la région de Vénétie en Italie du Nord. Ce système relie plusieurs villas à différentes caves naturelles via un système de conduits souterrains, les ventidotti. L'air entre à une extrémité du système, puis est refroidi dans les caves pour être ensuite redirigé dans les villas grâce à la différence de pression entre celles-ci et les caves (Ferrucci and Peron 2018, 5). Selon une étude effectuée par Margherita Ferrucci et Fabio Peron, le système permet de maintenir une température de 20°C lors des chaudes journées d'été (Ferrucci and Peron 2018, 17).

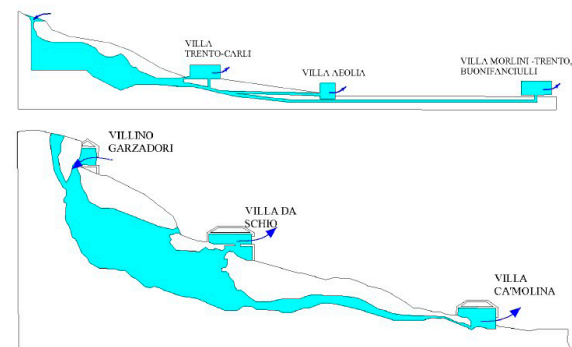
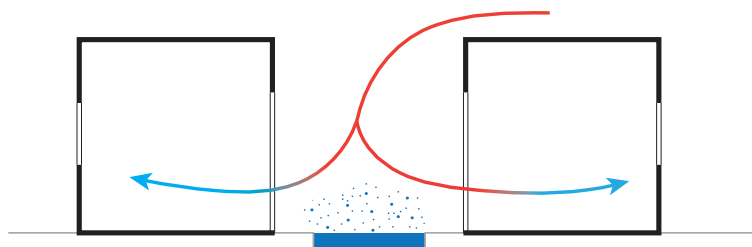


Figure 33 :
Schéma système
de refroidissement
Covolti (Margherita
Ferrucci , 2018)

Évaporer



Un troisième concept de refroidissement passif cherchant à dissiper les gains de chaleur accumulés est la dissipation par évaporation. Ce concept fait usage du procédé d'évaporation comme « puits de chaleur ». Lors du changement d'état de l'eau de liquide à gazeux, la chaleur sensible de l'air est utilisée comme chaleur latente nécessaire à l'évaporation. Ceci permet de refroidir l'air car la chaleur contenue dans celui-ci est absorbée par l'eau pour son évaporation (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 404). Il est possible d'utiliser la dissipation par évaporation de manière directe ou indirecte. Lors de refroidissement par évaporation directe, l'humidité de l'air augmente du au contact direct avec l'eau évaporée, ce qui peut avoir un impact important sur les conditions de confort intérieur. Lors du refroidissement indirect, l'humidité de l'air reste inchangée dû au fait que la réaction s'effectue dans un échangeur de chaleur. Ceci est un avantage considérable par rapport au procédé direct, mais demande une installation plus importante et l'utilisation de systèmes actifs. C'est pour cette raison que seul le refroidissement par évaporation directe sera analysé dans ce travail.

Ce concept peut être utilisé dans le refroidissement passif des bâtiments via plusieurs moyens en utilisant l'évaporation passive, c'est-à-dire lorsque l'évaporation a lieu naturellement. Premièrement, il est possible d'utiliser la végétation autour et dans les bâtiments pour l'évapotranspiration. Lors de cette réaction, une quantité considérable

de chaleur est transférée ce qui a pour effet de refroidir l'environnement. Selon A. Argiriou, un arbre à feuilles caduques de taille normale aurait l'effet de refroidissement de 5 climatiseurs (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 408). Deuxièmement, un espace peut être refroidi passivement via la disposition de plan d'eau ou de fontaines qui ont pour effet de refroidir l'air. Troisièmement, il est possible d'utiliser des tours de refroidissement par évaporation, dans lesquelles l'air ambiant est conduit puis mis en contact d'eau sous forme de gouttelettes (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 409).

Ce concept de refroidissement passif est fortement dépendant des conditions climatiques : adéquat dans les climats chauds et secs, son efficacité est fortement réduite dans les climats humides (Ahmed et al. 2014, 4). De plus, les procédés de refroidissement par évaporation directe ont pour effet d'augmenter le taux d'humidité de l'air, ce qui n'est pas enviable dans les climats humides. C'est pour ces raisons que ce concept de refroidissement passif via évaporation n'a été retrouvé parmi les cas d'études seulement chez le Trullo et la Villa Barbaro. Selon Mario Grosso, il existe des exemples de Trullo dans lequel on retrouve dans la pièce principale un bassin au sol qui a pour effet de refroidir l'air par évaporation (Chiesa 2019, 402). Il est néanmoins important de relever que le climat dans lesquels on retrouve ce cas d'étude possède des conditions d'humidité légèrement différente que pour les autres cas d'études. La Villa Barbaro possède elle, comme de nombreuses villas italiennes de la Renaissance, des plans d'eau et fontaines extérieures, qui peuvent avoir comme effet de refroidir leur environnement immédiat. Ces dispositifs étant situés à l'extérieur, leurs effets négatifs liés à l'augmentation de l'humidité de l'air sont atténués.

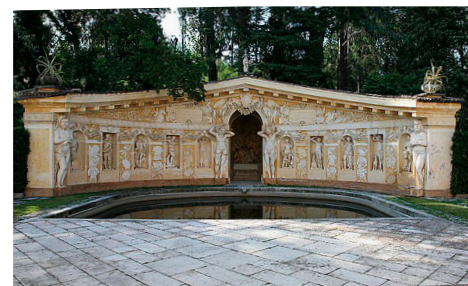
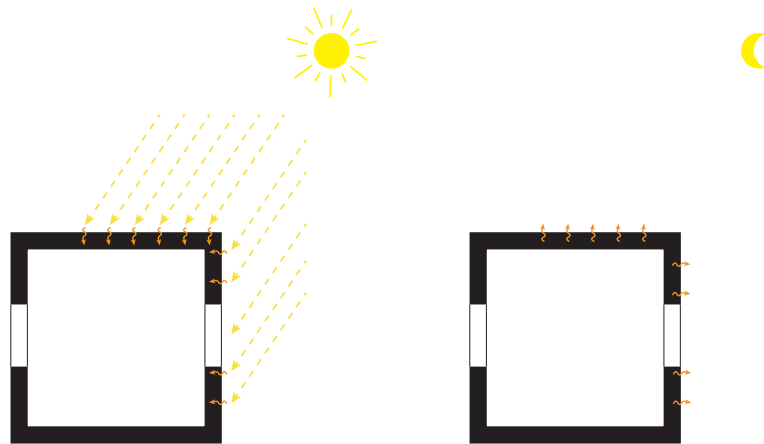


Figure 34 : Fontaine - Villa Barbaro

Rayonner



Un dernier concept de refroidissement passif via dissipation est la dissipation par rayonnement, ou « radiative cooling ». Ce concept est basé sur le principe selon lequel n'importe quel corps chaud émet de l'énergie thermique sous forme de radiation électromagnétique en direction de corps froid lui faisant face (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 45). Dans les bâtiments, l'enveloppe absorbe la chaleur émise sous forme de radiation lors de la journée et la retransmet durant la nuit vers le ciel, la température moyenne de celui étant normalement plus basse que celle de l'enveloppe. De plus, la dissipation de chaleur par les surfaces exposées de l'enveloppe entraîne une baisse de leur température, ce qui contribue également à réduire la température intérieure. (Chiesa 2019, 391)

Dans leur étude *Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand*, Abimit Aili, Xiaobo Yin Ronggui Yang relèvent le potentiel élevé du refroidissement par rayonnement, notamment pour les climats tempérés. Ce concept

de refroidissement pourrait permettre de réduire la dépendance à l'électricité pour refroidir les bâtiments (Aili, Yin, and Yang 2021, 16–17).

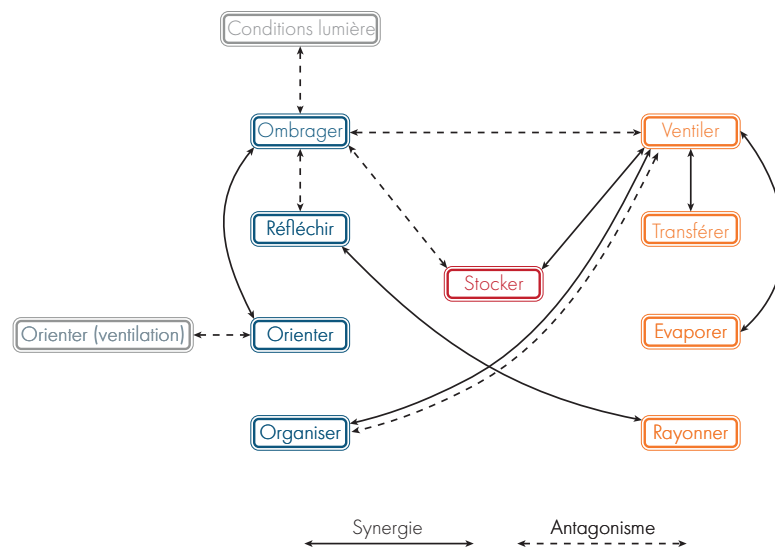
Selon Giacomo Chiesa, le Trullo et son large toit massif exposé permettrait un refroidissement par rayonnement accru, en particulier la nuit (Chiesa 2019, 392). Comme expliqué ci-dessus, la chaleur est emmagasinée la journée au niveau de la toiture du Trullo pour être ensuite redistribuée par radiation vers le ciel la nuit, lorsque la température du ciel est plus basse que celle du toit.



Figure 35 : Gros plan toits Trulli et leur pinnacles

Nous avons donc vu qu'il est possible d'agir sur les gains de chaleurs en appliquant trois stratégies de refroidissement passif : la prévention, la régulation et la dissipation. De nombreux concepts peuvent répondre à chaque stratégie, et leur mise en œuvre varie, comme l'ont illustré les études de cas présentées. Le chapitre suivant propose une analyse croisée des stratégies et concepts présentés ci-dessus.

3. Analyse croisée



Dans ce chapitre le fonctionnement des concepts évoqués auparavant seront analysés plus en détail. Les limitations, antagonismes et synergies relevées lors de l'analyse seront présentées. L'objectif est d'obtenir une vue d'ensemble des potentialités et des limitations de chaque concept. Cela permet de faciliter le choix de ceux à appliquer et de fournir des informations sur leur mise en œuvre efficace.

Ombrager

Limitations

L'ombrage est un concept essentiel pour le refroidissement passif des bâtiments. Son efficacité dépend d'une bonne étude de ses limitations lors de la conception. Ces limitations seront présentées dans ce paragraphe.

Premièrement, la mauvaise conception des dispositifs d'ombrages peut limiter leur efficacité. Il est important de choisir le bon dispositif d'ombrage en fonction de l'orientation de chaque façade et de la position du soleil. Comme mentionné dans le chapitre *Stratégies et concepts passifs*, sur les façades exposées au soleil bas, les dispositifs d'ombrage verticaux seront plus efficaces, tandis que sur les façades exposées au soleil haut, des dispositifs horizontaux tels que des avant-toits seront mieux adaptés.

Deuxièmement, les espaces transitionnels peuvent être une solution aux avantages multiples pour le refroidissement passif des bâtiments. Cependant, ces solutions demandent une surface disponible suffisante autour du bâtiment, ce qui peut poser des problèmes dans des environnements où la densité du bâti est élevée.

Troisièmement, les dispositifs d'ombrage doivent être conçus de manière à proposer un compromis entre la protection de la surchauffe estivale et les gains solaires en hiver. Il est particulièrement important de remplir cette double fonction dans les climats tempérés où les besoins en énergie varient fortement selon les saisons.

Antagonismes

Lorsqu'il est utilisé en parallèle avec d'autres concepts de refroidissement passif, l'ombrage peut générer des antagonismes qui diminuent son efficacité ou celle des autres stratégies mises en œuvre.

Premièrement, les dispositifs d'ombrage peuvent réduire l'efficacité des matériaux à forte inertie thermique utilisés au sein de l'enveloppe. En effet, ces matériaux nécessitent une exposition aux rayonnements solaires pour fonctionner efficacement. Il est donc essentiel de positionner les dispositifs d'ombrage de manière stratégique, en ciblant les zones où leur efficacité sera maximale. Une solution pour atténuer cet antagonisme consiste à optimiser l'emplacement des dispositifs d'ombrage et des éléments à forte inertie thermique, en les intégrant là où leur performance sera la plus bénéfique.

Deuxièmement, selon leur type et leur position les dispositifs d'ombrages peuvent potentiellement entraver le flux de la ventilation naturelle. Il est possible d'atténuer cet antagonisme en ayant recours à des dispositifs d'ombrages modulables tels que stores ou volets, et en plaçant ces dispositifs en dehors des flux d'airs principaux.

Troisièmement, il est important de proposer un compromis entre protection des rayonnements solaires et conditions de lumière optimales. A nouveau les dispositifs d'ombrage modulables pourront proposer ce compromis.

Synthèse

En conclusion, la mise en œuvre de ce concept dans le refroidissement passif des bâtiments doit prendre en compte certains aspects clés pour garantir un refroidissement passif efficace.

Premièrement, il est nécessaire de prendre en compte l'orientation du bâtiment et la position des façades lors du choix du type de protection solaire. Ces deux paramètres sont essentiels pour garantir l'efficacité de la prévention des gains de chaleur.

Deuxièmement, comme le mentionnent A. Dimoudi et D.Mantas dans *Passive Cooling of Buildings* l'ombrage des ouvertures est un point

crucial. Ce point peut orienter l'approche pour régler l'antagonisme entre ombrage et inertie thermique en plaçant ces concepts là où ils seront les plus efficaces. C'est-à-dire au niveau des ouvertures pour les dispositifs d'ombrage, plus particulièrement en façade Sud. En façade Est et Ouest on pourra chercher à venir réduire la taille des ouvertures et accentuer l'inertie thermique, celle-ci étant particulièrement efficace en façade ouest dans les climats tempérés (Heywood 2012, 100).

Troisièmement, comme on a pu le voir ci-dessus l'adaptabilité des dispositifs d'ombrage modulable peut permettre de répondre aux besoins changeants selon les saisons. De plus, cette même adaptabilité permet d'augmenter leur compatibilité avec les autres concepts de refroidissement passif en réduisant les antagonismes créés. Cependant, les dispositifs modulables sont plus difficiles à mettre en œuvre que les dispositifs fixes qui peuvent être constitués d'un simple avant-toit.

Finalement, l'utilisation d'espaces transitionnels pour l'ombrage est intéressants dû aux avantages multiples que ces espaces apportent. Comme mentionné précédemment, l'ombrage par espace transitionnel permet d'ombrager la façade, mais aussi d'apporter un effet d'isolation thermique. De plus, ces espaces sont bénéfiques pour les habitants car ils accentuent la relation avec l'extérieur. Il faudrait néanmoins prendre en compte l'espace additionnel nécessaire que cette application du concept de refroidissement passif par ombrage nécessite.

Réfléchir

Limitations

La prévention des gains de chaleur par réflexion peut contribuer au confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment. Il sera néanmoins important d'être conscient des limitations qui impactent ce concept pour garantir sa mise en œuvre efficace. Les limitations identifiées seront présentées dans ce paragraphe.

Premièrement, il est nécessaire que l'enveloppe du bâtiment reçoive des rayonnements solaires pour que le concept de refroidissement par réflexion puisse faire effet. Les obstacles à ce rayonnement peuvent être la végétation alentour ou les bâtiments à proximité qui créent une ombre sur l'enveloppe. Il est important de souligner que ce point n'est pas à proprement parler une limitation. Si le rayonnement solaire est intercepté avant d'atteindre la façade, les gains solaires au niveau du bâtiment en sont donc logiquement réduits ce qui diminue aussi le besoin en refroidissement passif.

Deuxièmement, les enveloppes dont les surfaces ont une réflectivité élevée peuvent impacter négativement leur environnement en créant par exemple de l'éblouissement aux alentours. Cet effet sera particulièrement néfaste en ville où la densité de bâtiments est élevée.

Troisièmement, il est important d'établir un compromis entre protections des gains solaires en été sans entraver ces gains solaires en hiver. Les conditions des climats tempérés étant marquées par des fluctuations significatives selon les saisons, les besoins en refroidissement changent en conséquence. Cependant, ce concept est difficilement modulable dans sa forme simple, comme l'utilisation de surfaces de couleurs claires. Toutefois, certains matériaux innovants offrent la capacité de changer d'état ou de couleur, permettant d'adapter leurs propriétés de réflexion ou d'absorption en fonction des besoins.

Antagonismes

Les concepts d'ombrage et de réflexion peuvent interagir de manière antagonique. En effet, les dispositifs d'ombrages et l'ombrage par

espaces transitionnels interceptent les rayonnements solaires et rendent donc l'effet de réflexion des surfaces claires nul. Toutefois, cet antagonisme se manifeste uniquement dans les zones où ces deux concepts se superposent au niveau de l'enveloppe. Il est possible de les utiliser en complément l'un de l'autre, c'est-à-dire d'utiliser l'ombrage au niveau des ouvertures et la réflexion au niveau du reste de l'enveloppe.

Synthèse

Comme on a pu l'observer, la réflexion des gains solaires peut s'avérer utile en tant que concept de refroidissement passif. Néanmoins, l'efficacité de ce concept peut être impacté par son environnement immédiat qui viendrait rendre son effet nul, ce qui n'est pas forcément négatif au niveau du refroidissement passif du bâtiment. Il est cependant possible d'utiliser ce concept en complément à d'autres de manière stratégique. De plus, ce concept s'il est mis en œuvre dans des contextes à haute densité de bâti peut avoir un effet néfaste sur son entourage immédiat. L'utilisation de surfaces à réflectivité élevée peut avoir un effet d'éblouissement sur les bâtiments alentours, ainsi que sur les passants.

Comme on a pu le voir, le climat des zones tempérées est caractérisé par des variations saisonnières marquées. Cela rend compliquée la mise en œuvre de concept de refroidissement passif non modulable tels que la réflexion, car les gains solaires passifs en hiver risquent d'être impactés. L'utilisation de matériaux pouvant changer de propriétés de réflectivité peut permettre d'appliquer ce concept dans les climats tempérés.

Finalement, l'utilisation de ce concept sur les toits semblent être particulièrement intéressant. Comme le relève Olgay dans *Design with climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, le toit d'un bâtiment reçoit plus de radiation solaire en été que ses autres parties. Cela rend particulièrement intéressant l'utilisation du concept de refroidissement par réflexion à cet endroit de l'enveloppe. De plus, on peut supposer que le toit d'un bâtiment serait moins sujet à l'ombrage et présente un risque plus faible de créer de l'éblouissement.

Orienter

Limitations

Un autre concept de refroidissement passif ayant le potentiel d'améliorer le climat intérieur dans les climats subtropicaux humides est l'orientation en fonction de la course du soleil. Ce concept de refroidissement est sujet à limitation dans un contexte à haute densité de bâti. En effet, le contexte urbain a comme conséquence de réduire la liberté de l'architecte dans le placement optimal du projet.

Antagonismes

L'implémentation du concept de refroidissement par orientation peut être sujet à des antagonismes lorsqu'il est utilisé conjointement à d'autres concepts.

L'orientation d'un bâtiment peut avoir plusieurs objectifs, l'utilisation des vents dominants et la protection optimale selon la course du soleil. Comme on a pu le voir précédemment, une orientation selon un axe Nord-Sud ainsi qu'une conception adaptée des protections solaires permet un ombrage efficace. Néanmoins, cette orientation peut potentiellement ne pas correspondre à l'orientation optimale préconisée par Olgay et donc créer un antagonisme entre ces deux concepts.

Synergies

Malgré les antagonismes évoqués, une conception judicieuse peut tirer parti de synergies. Par exemple, une orientation stratégique du bâtiment peut augmenter l'efficacité des dispositifs d'ombrages fixes ou modulables. Comme évoqué précédemment, l'orientation d'un bâtiment pour que sa façade principale face le Sud permet un ombrage par simple avant toit.

Synthèse

Cette partie a donc permis de souligner plusieurs points importants à prendre en compte lors de l'utilisation du concept d'orientation.

Tout d'abord, la mise en œuvre de ce concept est difficile à effectuer

dans un contexte urbain dû à la haute densité de bâtiments. Il s'agira donc d'effectuer un compromis entre le refroidissement passif et d'autres paramètres contraignant l'orientation tels que la trame urbaine préexistante.

Ensuite, il est important d'étudier les caractéristiques du lieu du projet tels que la direction des vents dominants ou la course du soleil. Une fois ces caractéristiques connus, il est possible d'effectuer un compromis entre une orientation qui favorise la ventilation et une orientation qui favorise la protection solaire et donc le fonctionnement des dispositifs d'ombrage.

Organiser

Limitations

Une limitation relevée lors de l'analyse du concept est l'impact sur les conditions de lumière naturelle. En effet, des ouvertures de tailles réduites cherchant à prévenir les gains solaires peuvent aussi avoir comme effet une lumière naturelle insuffisante. On peut observer cette limitation chez le Trullo, dont les ouvertures de tailles réduites entraînent des conditions de lumières déplorables, ce qui nécessite l'utilisation d'éclairages artificiels.

Antagonismes

L'organisation et la taille des ouvertures peut aussi créer des antagonismes lors que ce concept est utilisé conjointement avec d'autres. Des ouvertures de dimensions trop réduites peuvent limiter le flux de ventilation naturelle et donc empêcher la dissipation des gains de chaleur. Cet antagonisme est présent chez le Trullo et relevé par Ruggiero et al. dans leur étude *Characteristics and distribution of trulli constructions in the area of the site of community importance Murgia of Trulli*. Dans cet article, les auteurs mentionnent que les fenêtres de tailles réduites du Trullo ne fournissent pas des conditions de ventilation adéquates.

Synergies

Malgré le fait qu'elle peut être au détriment de l'efficacité de ce concept de refroidissement passif, la taille des ouvertures peut aussi être à l'origine de synergies. En effet, les dimensions des ouvertures peuvent augmenter le flux d'air dans le cadre de la ventilation croisée. C'est ce que affirme B. Givoni dans son article *Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems*. Dans celui-ci, l'auteur stipule qu'il est possible de jouer sur les tailles d'ouvertures pour modifier les caractéristiques du flux d'air au sein du bâtiment (Givoni 1991, 180). Cela peut être bénéfique pour augmenter les conditions de confort.

Synthèse

La conception stratégique des ouvertures peut s'avérer efficace pour refroidir passivement un bâtiment. Néanmoins, il sera important de prendre en compte plusieurs paramètres pour garantir cette efficacité.

Premièrement, un compromis devra être trouvé au niveau de la conception des ouvertures entre protections des gains solaires et conditions de lumière naturelle. Cela peut être réglé par une taille des ouvertures définie selon les besoins en lumière naturelle ainsi que par des protections solaires conçues de manière réfléchies. Il sera préférable de protéger les ouvertures par des dispositifs d'ombrages fixes ou modulables, plutôt que de réduire la taille de ces ouvertures. Il est néanmoins possible de réduire la taille des ouvertures en façades Est et Ouest par rapport à celles en façades Sud, ces ouvertures étant plus difficiles à ombrager.

Deuxièmement, une variation de taille entre les ouvertures situées à l'entrée et à la sortie du flux d'air peut améliorer le confort intérieur. Cette proportionnalité doit être adaptée à la configuration des espaces intérieurs, tout en veillant à préserver des conditions d'éclairage naturel satisfaisantes.

Stocker

Limitations

Le concept de régulation des gains de chaleur par inertie thermique peut être sujet à diverses limitations qu'il est important de prendre en compte lors de la conception.

L'efficacité de ce concept dépend fortement de conditions climatiques telles que la variation des températures quotidiennes, ainsi que des conditions d'humidité. Selon Hu Heywood, l'inertie thermique sera efficace si la variation des températures quotidienne est de plus de 6°C (Heywood 2012, 98). En ce qui concerne les conditions d'humidité, celles-ci impactent la capacité des matériaux à stocker et restituer la chaleur et donc l'efficacité de l'inertie thermique de l'enveloppe. (Kontoleon and Giarma 2016, 89)

De plus, la mise en œuvre de matériaux à haute inertie thermique peut être compliquée par les dimensions considérables des murs incorporant ces matériaux. Comme on a pu le voir dans le chapitre « Définition des stratégies », les murs du Tulou peuvent aller jusqu'à 1,8 m d'épaisseur et les murs du Trullo eux peuvent être aussi épais que 3 m. Cela a pour conséquence que les murs mettant en œuvre ces matériaux sont souvent lourds et la structure doit être adaptée en conséquence.

Antagonismes

Comme vu dans le chapitre de l'analyse croisée sur l'ombrage, l'efficacité de l'inertie thermique est impactée par l'exposition des surfaces de l'enveloppe aux radiations du soleil. Lorsque ces surfaces sont exposées directement aux rayons du soleil, l'efficacité de l'inertie thermique sera optimisée. Il sera donc nécessaire de trouver un équilibre entre ombrage et exposition de l'enveloppe aux rayons du soleil afin de ne pas créer d'antagonismes.

Synergies

L'inertie thermique peut être efficacement combinée avec la ventilation naturelle, particulièrement durant la nuit. Refroidir la structure par ventilation naturelle la nuit facilite l'évacuation de la chaleur

emmagasinée durant la journée et permet à ce cycle de se répéter le lendemain.

Synthèse

Premièrement, lors de la conception il est nécessaire d'étudier les caractéristiques du climat tels que les variations quotidiennes de températures, ainsi que les conditions d'humidité. Deux facteurs qui peuvent impacter fortement l'efficacité de l'atténuation des gains de chaleur via inertie thermique. Ces facteurs risquent d'être fortement impactés par les changements climatiques à venir. En effet, il est possible que certains événements extrêmes tels que les nuits tropicales et les événements de fortes précipitations soient plus intenses et fréquents dans le futur. L'augmentation des nuits tropicales pourrait diminuer les variations quotidiennes de températures tandis que les précipitations intenses pourraient augmenter les conditions d'humidité. L'efficacité de ce concept de refroidissement passif dans le cadre du changement climatique est donc sujet à une incertitude élevée.

Deuxièmement, l'intégration de matériaux à haute inertie thermique dans l'enveloppe du bâtiment peut être complexe en raison des dimensions importantes que doivent atteindre les murs pour garantir leur efficacité. Cela peut entraîner des conséquences indésirables sur les exigences en termes d'espace intérieur ou de coûts par exemple. Il est possible de régler ce problème en effectuant un choix judicieux des matériaux en fonction de leur propriété d'inertie thermique. Certains matériaux auront une inertie comparable pour une épaisseur moindre. Il est aussi possible d'intégrer des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe. Ces matériaux seront abordés dans le chapitre « Relation avec les stratégies contemporaines de refroidissement passif ».

Troisièmement, il sera important de placer l'inertie thermique dans les zones de l'enveloppe où ce concept s'avère adéquat. Cela permettra de régler d'éventuels antagonismes et de garantir une efficacité du concept. Selon Hu Heywood, dans les climats tempérés l'inertie thermique s'avère particulièrement efficace sur les façades Ouest (Heywood 2012, 100). Réduire le nombre d'ouvertures sur cette façade au profit de l'inertie thermique peut s'avérer préférable.

Finalement, il est important de coupler l'inertie thermique à une ventilation naturelle nocturne efficace. Cette synergie permet d'augmenter l'efficacité du phénomène d'inertie thermique. Lors de la conception des ouvertures Il sera donc nécessaire de planifier les ouvertures d'un bâtiment en tenant compte de la nécessité de ventilation nocturne.

Ventiler

Limitations

Ce concept malgré son efficacité en termes de refroidissement passif des bâtiments peut être sujet à différentes limitations.

Premièrement, la ventilation naturelle peut être impactée négativement par différents facteurs liés à l'environnement immédiat du bâtiment. Dans les environnements urbains particulièrement, la qualité de l'air extérieur peut être compromise par différents polluants. La ventilation naturelle pourrait introduire ces polluants au sein des bâtiments et impacter négativement la santé des occupants. De plus, la ventilation naturelle nécessite des ouvertures sur l'environnement extérieur du bâtiment, ce qui peut avoir comme effet d'introduire des nuisances sonores.

Deuxièmement, la configuration nécessaire à une ventilation naturelle efficace peut potentiellement contraindre le plan du bâtiment. En effet, ce concept de refroidissement passif dicte certains éléments tels que la profondeur des pièces, la position des espaces de vies ainsi que celle des partitions intérieures.

Troisièmement, dans un milieu urbain la haute densité du bâti contraint la liberté de placement du projet en fonction des vents dominants. De plus, la proximité et l'agencement des bâtiments peuvent perturber le flux de ces vents, rendant leur utilisation pour la ventilation naturelle du projet plus complexe.

Antagonismes

Comme mentionné dans le paragraphe sur le concept de refroidissement passif via ombrage, la ventilation peut être contrainte par certains dispositifs d'ombrages. Il sera donc important d'établir un compromis entre ces deux concepts que sont l'ombrage et la ventilation.

Synergies

Comme mentionné dans le paragraphe précédent sur le refroidissement passif par inertie thermique, le concept de ventilation et de stockage des gains de chaleurs peut fonctionner de manière synergique. En effet,

l'efficacité du stockage de chaleur par les matériaux à haute inertie thermique est amplifiée par un couplage à la ventilation nocturne.

Synthèse

La mise en œuvre de ce concept de refroidissement passif devra intégrer les conditions suivantes pour fonctionner de manière efficace.

Premièrement, il sera important de prendre en compte les caractéristiques du contexte dans lequel le projet est placé. Parmi ces caractéristiques on peut citer les sources potentielles de pollution, qu'elles soient de l'air ou bien la pollution sonore. Dans les environnements urbains présentant une pollution de l'air élevée il sera nécessaire d'intégrer un système de traitement de l'air en parallèle à la ventilation naturelle. Une autre caractéristique du contexte est la topographie ainsi que la végétation à proximité. Ces deux éléments peuvent impacter la direction ainsi que la vitesse du flux d'air. De plus, il sera important de prendre en compte la direction des vents dominants relatif à la position géographique du projet. Tous ces caractéristiques ont le potentiel d'impacter favorablement ou négativement la ventilation naturelle.

Deuxièmement, la typologie du bâtiment peut permettre d'améliorer l'efficacité de la ventilation naturelle. Comme mentionné précédemment, certaines configurations telles que la taille des ouvertures et la position de celles-ci peuvent impacter la vitesse du flux d'air. De plus les dimensions des pièces font partie des paramètres dictant l'efficacité de la ventilation au sein du bâtiment. En effet, selon Hu Heywood, un critère essentiel pour permettre l'utilisation de la ventilation croisée est que la profondeur de l'espace ne dépasse pas cinq fois sa hauteur (Heywood 2012, 146). Certains espaces tels que les cours intérieures ou les espaces de circulation tout hauteur permettent eux aussi de dissiper les gains de chaleur. Ces espaces encouragent les mouvements d'air et donc l'évacuation de l'air chaud.

Transférer

Limitations

Le concept de dissipation des gains thermiques via transfert vers le sol peut être efficace pour refroidir passivement les bâtiments. Néanmoins, certaines limitations à sa mise en œuvre peuvent impacter son efficacité.

Pour commencer, ce concept est dépendant des caractéristiques du sol tels que sa température ou ses propriétés de conductivité. Ces caractéristiques impacteront la mise en œuvre du système ainsi que la capacité du sol à transmettre et stocker la chaleur (Arghand 2019, 9).

Ensuite, le concept de transfert des gains de chaleur direct comporte des limitations spécifiques. Premièrement, on peut citer la complexité des structures, ces structures devant supporter le poids considérable du sol au-dessus. Cet aspect complique considérablement la mise en œuvre de ce concept. Deuxièmement, la ventilation est plus difficile à garantir dans les structures enterrées, et les projets mettant ce concept en œuvre devront probablement intégrer un système actif de contrôle de l'environnement. Troisièmement, il est plus difficile de fournir des conditions de lumière naturelle adéquate dans des bâtiments partiellement enterrés ou sous-terrain. Cela a pour effet d'augmenter la consommation d'électricité à cause du besoin accru en éclairage artificiel. Il est cependant possible d'apporter de la lumière naturelle via des solutions comme les puits de lumières. Troisièmement, selon A. Argiriou les bâtiments utilisant ce concept peuvent avoir des problèmes de condensation dû au fait que durant l'été la température du sol est plus basse que la température ambiante (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 366).

Le concept de dissipation des gains de chaleur par transfert indirect avec le sol comporte lui aussi des limitations spécifiques. Tout d'abord, de la condensation peut se produire à l'intérieur des tuyaux enterrés, notamment lorsque ce concept est appliqué dans des climats chauds et humides. Cela aura comme conséquence d'augmenter l'humidité à l'intérieur du bâtiment (Heywood 2012, 210). De plus, il est possible que dans ces climats des champignons se développent dans les tuyaux, ce

qui peut affecter la santé des occupants. Ensuite, ce concept nécessite une mise en œuvre compliquée due au réseau étendu de tuyaux et aux excavations nécessaires. Cependant, ces excavations sont considérablement réduites comparées à celles nécessaires lors de la mise en œuvre du transfert direct.

Synergies

Une synergie relevée est l'association entre un système de transfert indirect conjointement à un système de ventilation naturelle. On peut observer cette synergie dans le cas du Covolli évoqué dans le paragraphe « Définition des stratégies ». Dans ce cas d'étude l'air est d'abord conduit dans des caves naturelles via un réseau de conduits souterrains pour être refroidi. Une différence de pression entre l'intérieur des villas et les caves permet d'augmenter le flux de l'air de manière passive et de conduire celui-ci jusqu'aux villas. L'association de ces deux concepts permet donc d'augmenter leur potentiel de refroidissement.

Synthèse

Les applications du concept de dissipation par transfert sont caractérisées par une mise en œuvre qui s'avère difficile dans de nombreux cas, dû à l'étendue des réseaux ainsi qu'aux structures complexes qu'ils impliquent. De plus, du fait de leur nature même ces applications peuvent avoir des effets néfastes sur les conditions intérieures tels qu'une augmentation de l'humidité ainsi qu'une ventilation insuffisante. Ceci a pour effet que ces applications nécessitent souvent une mise en œuvre en association à un système actif de contrôle de l'environnement ainsi qu'une ventilation mécanique.

Evaporer

Limitations

Le concept de refroidissement passif par évaporation peut être sujet à diverses limitations qu'il sera nécessaire de prendre en compte pour une mise en œuvre efficace.

Premièrement, les applications de ce concept tels que plans d'eau et fontaines nécessitent un approvisionnement en eau continu. Cet approvisionnement peut poser des défis significatifs, notamment dans un contexte de changement climatiques et sécheresses accrues.

Ensuite, ce concept est fortement dépendant des conditions climatiques telles que l'humidité de l'air. En effet, un air saturé limite l'évaporation et donc la mise en œuvre de ce concept. De plus, dans des environnements humides, augmenter le taux d'humidité de l'air peut ne pas être désirable.

Synergies

La mise en œuvre de ce concept conjointement à d'autres concepts évoqués dans cette liste peut créer des synergies augmentant leur effet.

En effet, la mise en place de ce concept en parallèle à une ventilation naturelle efficace augmente le potentiel de refroidissement par évaporation. L'effet de refroidissement de ce concept est obtenu grâce au mouvement d'un flux d'air et de l'entrée en contact de celui-ci avec de l'eau. Une ventilation naturelle et un flux d'air élevé garantissent donc l'effet de refroidissement de ce concept.

Synthèse

Une limitation pouvant affecter le concept de refroidissement par évaporation est son besoin continu en eau. Ce besoin peut devenir problématique dans un environnement où l'apport en eau est réduit. De plus, ce concept est fortement dépendant des conditions d'humidité de l'air et son efficacité est réduite dans les environnements humides. Par ailleurs, le principe de refroidissement par évaporation libère de l'humidité dans l'air, ce qui le rend moins adapté aux climats humides.

Il sera donc intéressant d'appliquer ce concept pour le refroidissement des espaces transitionnels ou extérieurs afin de ne pas augmenter l'humidité au sein du bâtiment. Une ventilation naturelle efficace peut augmenter l'effet de refroidissement de ce concept en augmentant le flux d'air nécessaire à la réaction. La ventilation naturelle permet aussi d'évacuer l'humidité dégagée lors de cette réaction.

Rayonner

Limitations

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, il est possible de dissiper les gains de chaleur accumulés au sein du bâtiment par rayonnement vers le ciel. La mise en œuvre de ce concept est sujette à des limitations qui seront abordées dans ce paragraphe.

Premièrement, ce concept dépend de paramètres tels que la température ainsi que de l'humidité de l'air. En effet, selon Giacomo Chiesa pour que l'effet de ce concept soit maximisé, il est nécessaire que la température de l'air soit basse (Chiesa 2019, 391). De plus, ce concept est dépendant des conditions d'humidité car celles-ci ont pour effet d'absorber les radiations (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 446). L'applicabilité de ce concept dans les climats subtropicaux humides est donc limitée.

Deuxièmement, le refroidissement passif par rayonnement implique la mise en place de matériaux à inertie thermique élevée sur le toit, ce qui demande une structure renforcée pour supporter le poids de ceux-ci. Cela rend la mise en œuvre de ce concept plus complexe et entraîne des coûts élevés.

Synergies

Il est possible d'appliquer ce concept conjointement à celui de refroidissement par réflexion en appliquant une couleur claire au niveau du toit. Cela a pour conséquence que le toit absorbera moins de radiations durant la journée, sa température sera plus basse et il sera donc plus facile de refroidir ce toit par radiation durant la nuit (Mat Santamouris and Asimakopoulos 2013, 432).

Synthèse

Ce concept est sujet à des limitations notamment dûes à sa dépendance à des paramètres tels que la variation de température jours/nuits et l'humidité de l'air. Ce concept implique une mise en œuvre qui peut s'avérer compliquée dû à la complexité des structures permettant de rayonner la chaleur accumulée la nuit tels que les toits à inertie thermique élevée. Néanmoins, l'efficacité de ce concept peut être améliorée s'il est mis en œuvre conjointement à des toits à réflexivité élevée.

4. Application

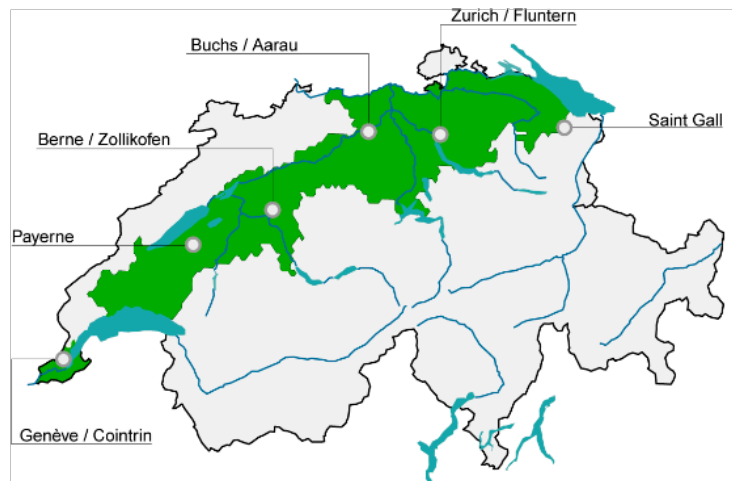


Figure 36 : Carte de la région du Plateau avec principales stations de mesures (NCCS)

Adaptation des stratégies au Plateau Suisse à l'horizon 2050

Au fil de cet énoncé nous avons pu relever plusieurs stratégies et concepts de refroidissement passif ayant le potentiel de répondre au climat futur du Plateau Suisse à l'horizon 2050. Il nous reste cependant à comprendre si ces stratégies et concepts sont compatibles avec les paramètres spécifiques au contexte local. Ceux-ci doivent être pris en compte dans tout projet architectural et c'est pourquoi ils seront étudiés ici. Ces paramètres sont : le climat local et les caractéristiques culturelles et architecturales telles que les traditions, techniques et matériaux locaux. Étant donné que l'étude de chacun de ces paramètres mérite un travail complet, ce chapitre a pour objectif de donner une vue d'ensemble de la relation entre ces paramètres et les stratégies et concepts associés qui ont été relevés.

Climat

Les concepts de refroidissement passif présentés dans ce travail proviennent d'une analyse de cas d'études vernaculaires provenant des zones climatiques subtropicales humides. Comme évoqué dans le chapitre « Climat futur probable du Plateau Suisse », il s'agit du climat qui devrait caractériser une grande partie de la région du Plateau aux alentours de 2050. Ces concepts devraient donc être adaptés au climat futur du Plateau, étant donné qu'il s'agit du même climat que celui dans lequel ils sont apparus. Néanmoins, une étude du microclimat spécifique est à effectuer dans la phase de conception d'un projet préalable au choix des stratégies passives à appliquer. Les caractéristiques du microclimat tels que la topographie, la présence de plan d'eau à proximité ainsi que les conditions géologiques varient et influencent la mise en œuvre des stratégies et concepts de refroidissement passifs.

De plus, comme on a pu l'observer dans le chapitre « Analyse croisée », certains concepts tels que stocker, rayonner et évaporer dépendent fortement de paramètres tels que l'amplitude des températures journalières ainsi que l'humidité de l'air. Or dans le contexte étudié dans cet énoncé, ces paramètres fluctueront d'une manière qui risque

de limiter l'efficacité de ces concepts de refroidissement passif. Comme évoqué dans le chapitre « Climat actuel et futur du Plateau Suisse », le nombre de nuit tropicales devrait augmenter et donc réduire l'amplitude des températures journalières. Les prévisions de précipitation étant sujettes à une incertitude élevée, il est donc important de rester vigilant vis-à-vis des concepts dépendant fortement des conditions d'humidité (stocker, rayonner-voir chapitre « Analyse croisée »). Il est crucial de considérer ces incertitudes dans le choix des concepts passifs à appliquer.

Traditions, techniques

L'architecture vernaculaire est conditionnée par les cultures et traditions liées aux zones géographiques dont elle constitue le patrimoine. Comme le stipule la Charte du Patrimoine Bâti Vernaculaire de L'ICOMOS de 1999, l'architecture vernaculaire est ancrée dans la communauté ainsi que les traditions liées. De plus, elle possède un caractère local ou régional spécifique. Etant donné que cet énoncé étudie diverses régions du monde possédant chacune des communautés, traditions et caractères spécifiques, l'objectif a été d'extraire des stratégies et concepts de refroidissement passif qui étaient communs à ces régions, pour pouvoir les transposer dans la région du Plateau. Ceux-ci ne sont plus liés à une culture précise, mais au besoin universel d'obtenir des conditions de confort intérieur agréables. Cependant, ce besoin peut varier selon les zones géographiques et les climats. En effet, les conditions de confort d'une personne vivant dans un climat tropical humide ne seront pas les mêmes qu'une personne vivant dans un climat méditerranéen par exemple. Or dans cet énoncé sont considérés des zones climatiques similaires, les conditions nécessaires au confort des personnes habitant dans ces régions devraient donc être similaires elles aussi.

On peut retrouver parmi les cas d'études présentés de nombreux exemples de mise en œuvre des concepts de refroidissement passifs. Ces constructions font usage des mêmes concepts sous différentes formes, en utilisant des matériaux et techniques de constructions propres aux traditions vernaculaires locales. C'est le cas chez le Trullo et chez

le Tulou. Ces deux exemples comportent des murs extérieurs massifs permettant de stocker la chaleur et de la redistribuer avec un certain décalage, utilisant ainsi le même concept de refroidissement passif. Néanmoins, chez le Trullo les murs extérieurs sont construits utilisant une technique particulière de maçonnerie sans mortier ainsi que des pierres calcaires locales (Ruggiero et al. 2013, 88), alors que chez le Tulou du Fujian les murs extérieurs sont faits le plus souvent en pisé (Porretta, Pallottino, and Colafranceschi 2022, 918) et sont de forme courbe.

En fin de compte, il est possible de sélectionner les stratégies, concepts et applications les plus adaptées au contexte spécifique, en tenant compte des contraintes mentionnées dans le chapitre « Analyse croisée ». Ensuite, ces solutions peuvent être ajustées pour correspondre à la culture et aux traditions spécifiques au Plateau Suisse. Cela pourrait être réalisé en utilisant d'avantage des matériaux locaux tels que la molasse, une pierre couramment trouvée dans la région, ou en sélectionnant des essences parmi les nombreuses variétés de bois disponibles en Suisse, comme le chêne, le hêtre ou le frêne. Il serait aussi possible de puiser dans le vaste répertoire d'architecture vernaculaire du Plateau et de s'inspirer de ces traditions et techniques pour la mise en œuvre du projet.

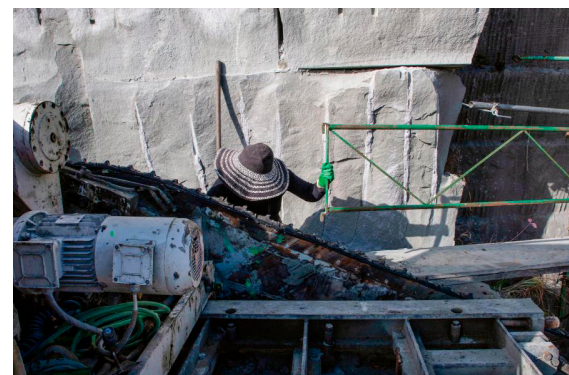


Figure 37 :
Découpe de
molasse - carrière de
Villardlöd, Fribourg
(©ellipsearchitecture)

Ressources

Finalement, l'architecture vernaculaire utilise comme matériaux de construction principalement ceux disponibles localement. Sur le Plateau Suisse il s'agit principalement du bois et de la pierre. Ces matériaux sont présents sous diverses formes dans les exemples d'architecture vernaculaire du Plateau. Parmi ces exemples on peut citer la maison de type « Châtelet » d'Argovie dont les murs sont constitués de pierre calcaire recouverte de mortier à la chaux ("Maison d'habitation de Villnachern AG, Vers 1635," n.d.), ou encore la maison paysanne de Tinterin dans le canton de Fribourg qui est-elle tout en bois ("Maison Paysanne de Tinterin (Tentlingen), FR 17. Jh. / 1790," n.d.).



Figure 38 : Maison de type « Châtelet » (© Ballenberg)



Figure 39 : Maison paysanne de Tinterin (© Ballenberg)

Par ailleurs, les matériaux de construction mentionnés précédemment permettent la mise en œuvre efficace des stratégies et concepts passifs présentés dans ce travail, comme en témoigne leur emploi dans de nombreux cas d'étude. En effet, la pierre est utilisée aussi bien pour la Charleston Single House que la Villa Barbaro, et le bois est utilisé aussi bien pour la Machiya que la Shotgun House.

Pour conclure, ce paragraphe ne préconise pas un simple retour aux matériaux utilisés dans l'architecture vernaculaire du Plateau Suisse mais une augmentation de la part d'utilisation de ces matériaux dans les projets. Cette approche tirée de l'architecture vernaculaire et axée sur l'utilisation des ressources locales s'avère pertinente pour réduire les émissions de CO₂ liées au secteur du bâtiment.

Technologies contemporaines de refroidissement passif

Le besoin urgent de réduction des émissions de CO₂ du secteur du bâtiment, notamment pour le contrôle du climat intérieur a poussé la recherche à trouver des solutions optimisant le fonctionnement des stratégies et concepts de refroidissement passif présentés dans le chapitre « Définition des stratégies ». Certaines de ces solutions seront présentées dans ce chapitre.

L'objectif de ce chapitre n'est pas de suggérer l'application systématique de ces technologies contemporaines dans les nouveaux bâtiments, mais de présenter les alternatives possibles et un état actuel des recherches en optimisation du refroidissement passif. Il est important de noter que dans de nombreux cas, les concepts de refroidissement passif et leur application présentées dans ce travail sont suffisants pour apporter un refroidissement significatif. Néanmoins, certaines de ces stratégies pourraient bénéficier d'un « ajout technologique » afin de palier à leurs défauts. Comme mentionné dans le chapitre Méthodologie via la présentation du diagramme de Behling, un équilibre est à trouver entre utilisation de systèmes passifs et actifs.

Ombrager : Brise-soleil orientable à distance

Cette technologie permet de prévenir les gains de chaleur en ajustant la position des dispositifs d'ombrage de manière automatique. Selon Salwa M. Al-Masrani et Karam M.Al-Obaidi, le système est composé d'éléments amovibles couplés à un algorithme permettant de répondre aux conditions météorologiques extérieures ou intérieures (Al-Masrani and Al-Obaidi 2019, 2). Cette technologie permet une grande adaptabilité des dispositifs d'ombrage, ce qui peut fournir une solution à certaines limitations et antagonismes relevés dans le chapitre « Analyse croisée des stratégies ». Par exemple, cette technologie permettrait de fournir un compromis entre protection solaire en été et gains solaires en hiver, ou alors d'atténuer l'antagonisme entre protections solaires et ventilation naturelle.

Ventiler : système de ventilation mixte

Cette technologie permet d'améliorer le confort des occupants en couplant la ventilation naturelle et la ventilation mécanique. Selon Jungsoo Kim et Richard de Dear, la ventilation mécanique n'est activée que lorsque la ventilation naturelle ne suffit plus à assurer le confort des occupants. Il existe plusieurs stratégies opérationnelles de ventilation mixte (ou hybride). Premièrement, le mode concomitant dans lequel la ventilation mécanique et la ventilation naturelle sont actives en même temps et dans le même espace. Deuxièmement, le mode changement dans lequel le système change entre utilisation de la ventilation naturelle et mécanique selon les saisons ou lors des heures de la journée. Troisièmement, le mode zone dans lequel les deux types de ventilation opèrent dans différentes parties du bâtiment (Kim and De Dear 2021, 1). Cette technologie a le potentiel d'atténuer les impacts de l'environnement immédiat sur la ventilation naturelle relevés dans le paragraphe sur le concept ventiler dans le chapitre « Analyse croisée des stratégies ». Par exemple, en cas de fortes périodes de pollution, il peut être envisagé d'utiliser exclusivement la ventilation mécanique, plutôt que la ventilation naturelle.

Réfléchir : Matériaux et peintures à haute réflectivité

Cette technologie permet de prévenir les gains de chaleur via l'utilisation de matériaux aux propriétés améliorées en façade. Selon M.Santamouris et al., ces matériaux sont caractérisés par des propriétés de réflexion solaire et d'émission plus élevées. De plus, ils permettraient de réduire d'une part la chaleur qui pénètre au sein du bâtiment, et d'autre part la chaleur qui est transférée à l'intérieur du bâtiment (M. Santamouris, Synnefa, and Karlessi 2011, 3086). Cependant, ces matériaux ont un impact négatif significatif, car ils augmentent les besoins en chauffage des bâtiments pendant l'hiver (M. Santamouris, Synnefa, and Karlessi 2011, 3099). En effet, étant donné que cette technologie permet de réfléchir une part plus élevée des rayonnements solaires, il est nécessaire d'augmenter l'utilisation du chauffage pour garder une température intérieure confortable.

Stocker : Matériaux à changement de phase MCP (PCM)

Cette technologie permet d'augmenter l'efficacité du concept de stockage des gains solaires via l'utilisation de matériaux pouvant stocker et relâcher une quantité plus élevée d'énergie thermique. Lors de leur changement d'état ces matériaux stockent une grande quantité de chaleur, qu'ils vont alors relâcher lors du retour à leur état initial (Marani and Nehdi 2019, 37). Il existe différents types de MCP selon les changements d'état effectués : solide à liquide, solide à solide et solide à gazeux (Da Cunha and De Aguiar 2020, 2). Selon Afshin Marani et Moncef L.Nehdi, il serait aussi possible d'intégrer des MCP à d'autres matériaux de construction pour améliorer leurs propriétés. Il serait possible de réduire les dommages dus aux changements de températures dans les bétons par exemple. Néanmoins les auteurs soulignent que cette intégration peut aussi avoir des points négatifs, tels la fuite des MCP à l'état liquide ce qui peut avoir des impacts sur les propriétés mécaniques du béton (Marani and Nehdi 2019, 37).

Ces matériaux à changement de phase ont donc le potentiel d'augmenter l'efficacité du concept de stockage des gains de chaleur. Cependant, il est importable d'être attentif à la manière d'intégrer ces matériaux dans la structure pour ne pas subir les effets négatifs associés.

Transférer: Earth to air Heat Exchanger

Tels le Covolli présenté dans le chapitre « Définition des stratégies », cette technologie fait usage de l'inertie thermique considérable du sol pour utiliser celui-ci comme « puit de chaleur ». Les systèmes EAHE sont composés d'une part d'une entrée d'air en surface, d'un réseau de tuyaux enterrés et d'une sortie d'air à l'intérieur du bâtiment. Ce système peut être utilisé aussi bien en été qu'en hiver dû à la température stable du sol tout au long de l'année. En effet, l'air peut être préchauffé ou pré-refroidi au sein des tuyaux enterrés (Chiesa 2019, 388). Cette technologie est généralement couplée à un système de ventilation mécanique, néanmoins selon Giacomo Chiesa, ceci n'est pas nécessaire pour de petits bâtiments (Chiesa 2019, 388).

Pour conclure, cette technologie reprend de manière proche le principe appliqué par le Covolli et l'améliore via la mise en place d'un réseau de

tuyaux enterrés. Le réseau est ensuite optimisé en ajustant des paramètres de conception tels que la longueur et le diamètre des tuyaux. Cette technologie a donc le potentiel d'augmenter l'efficacité du concept de refroidissement passif via transfert indirect des gains de chaleur. Par ailleurs, l'installation d'un réseau de tuyaux enterrés permet d'intégrer cette technologie dans divers contextes, sans nécessiter de dépendre d'éléments naturels comme le Covolli et les caves.

Rayonner : refroidisseurs radiatifs

Cette technologie fait usage du concept de refroidissement passif par rayonnement pour refroidir les bâtiments. Alors que les systèmes précédents permettaient de refroidir par rayonnement principalement la nuit, les propriétés améliorées de ces matériaux permettent ce refroidissement également la journée (Chen and Lu 2020, 126). Cette évolution augmente considérablement le potentiel de refroidissement de cette technologie. Il est possible d'intégrer ces technologies à différents endroits dans les bâtiments et notamment dans les toits des logements.

Il existe de nombreux types de systèmes de refroidissement par radiation. Étant donné qu'il ne s'agit pas là du sujet de cet énoncé ces types ne seront pas abordés. Néanmoins, il est suggéré de se référer aux nombreuses études effectuées sur ces matériaux et leur application, telles celles effectuées par Jianheng Chen et Lin Lu (Chen and Lu 2020), ainsi que celle par Muntasir Hossain et Min Gu (Hossain and Gu 2016).

Ce chapitre a donc permis de présenter un état actuel des recherches menées dans le domaine des technologies de refroidissement passif. Ces technologies sont multiples et il a été possible de relever au moins une technologie pour chaque concept présenté dans cet énoncé. Ces technologies peuvent améliorer l'efficacité des concepts et réduire leur limitation. Cependant, elles requièrent fréquemment l'emploi de matériaux industriels sophistiqués. Ces matériaux possèdent souvent une empreinte carbone élevée et il sera important de considérer si leur intégration dans le bâtiment permettra de compenser cette empreinte. De plus, certaines de ces technologies demandent une association avec un système actif de contrôle de l'environnement. Il sera donc essentiel d'évaluer les contributions de celles-ci en tenant compte de leurs éventuels inconvénients.

Analyses de cas

Ce chapitre a comme objectif de présenter une sélection de projets architecturaux contemporains mettant en application un ou plusieurs des concepts évoqués dans ce travail. Ces projets proposent une association entre forme architecturale, concepts passifs et systèmes actifs pour améliorer les conditions de confort intérieur des occupants. L'objectif de ce chapitre est de fournir au lecteur des pistes probables de cette association comme elle a été présentée dans le chapitre méthodologie.

Logements « Les Grands Chênes » - Céigny, Suisse (Bunq)

Cet ensemble de quatre immeubles de logements est situé dans la commune de Céigny, dans le canton de Genève en Suisse. Il s'agit de la première phase de développement qui pose les bases pour un projet de quartier à venir. Le site s'intègre efficacement dans le paysage champêtre de cette partie de la commune.

Les architectes ont intégré dans ce projet de nombreuses attentions destinées au confort des habitants, telles des cours liés à chaque immeuble. Ces espaces permettent aux habitants d'interagir et de se rencontrer dans un espace communautaire en plein air. Ces cours permettent également de refroidir leur environnement immédiat.



Figure 40 : Plan de site (© Bunq)

Celles-ci comportent des fontaines publiques ce qui contribue à leur refroidissement passif via le concept évaporer. Additionnellement, plusieurs éléments répondant au concept de prévention des gains de chaleur par ombrage sont présents. Premièrement, chaque appartement possède une loggia qui, comme évoqué précédemment, permet de prévenir les gains de chaleur via ombrage et effet d'isolation thermique. Étant donné l'orientation (nord-ouest / sud-est) cette loggia permet de protéger efficacement le bâtiment des gains solaires en été. Deuxièmement, chaque loggia dispose de volets ce qui apporte un dispositif d'ombrage additionnel. Vu l'orientation des bâtiments les loggias devraient permettre d'ombrager efficacement les appartements. On peut donc supposer que ces volets ont aussi comme fonction d'augmenter la privacité de l'espace. Finalement, l'orientation selon un axe nord-ouest / sud-est des bâtiments permet une protection efficace des ouvertures selon le concept orienter. De plus, les ouvertures sur les autres façades des bâtiments sont peu nombreuses, ce qui fait écho au concept organiser.

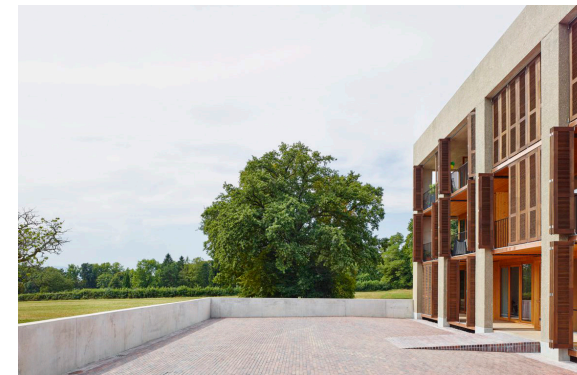


Figure 41 : Vue de la cour et des loggias

(© Bunq)

Plusieurs éléments permettant de dissiper les gains de chaleur ont été intégrés dans le projet. Premièrement, les appartements sont traversants, ce qui permet d'augmenter la ventilation croisée. Deuxièmement, les conduits de ventilation sont placés de manière à tirer avantage du tirage thermique. La cheminée est placée dans une zone de dépression ensoleillée, et l'entrée d'air est placée dans une zone ombragée de

la façade (Comment 2021). Lorsqu'il n'est pas possible de ventiler les logements de manière naturelle, quand le vent et la température extérieure ne créent pas suffisamment d'appel d'air par exemple, la ventilation naturelle est complétée par une ventilation mécanique (Comment 2021). Finalement, l'orientation des bâtiments du complexe permet de tirer parti des vents dominants de la région. Dans la région de Nyon, les vents dominants proviennent du sud-ouest et du nord-ouest. L'orientation nord-ouest sud-est des bâtiments a comme conséquence que les vents dominants les atteignent sur la petite façade sud-ouest, ou la grande façade nord-ouest (Leveille, 2022). Cette orientation permet de ventiler de manière efficace les différents appartements.



Figure 42 : Plan d'étage type bâtiment A et B (© Bunq)

Le concept atténuer est présent via la composition de la structure du projet. Les murs sont constitués de béton, doublés de briques en terre cuite isolante. Grâce à leur forte inertie thermique, ces deux matériaux contribuent à atténuer les variations de température conformément au concept stocker. Cependant, on peut légitimement s'interroger sur la possibilité d'utiliser des murs porteurs en terre cuite, plutôt que de limiter ce matériau à un rôle de parement intérieur. Réduire l'utilisation

de béton en le remplaçant par un matériau à plus faible empreinte carbone, comme la terre cuite, permettrait de préserver l'effet de refroidissement passif des matériaux de la structure tout en diminuant l'impact environnemental lié à leur production.

En complément des concepts déjà appliqués, ce projet aurait pu intégrer d'autres concepts afin d'optimiser davantage le refroidissement passif. Par exemple, l'utilisation du concept réfléchir par l'application d'une toiture de couleur claire aurait pu permettre de prévenir les gains de chaleur. L'emplacement du projet sur une parcelle où la densité de bâtiments est réduite diminue les risques liés à l'application de ce concept.

En conclusion, ce projet illustre plusieurs concepts de refroidissement passif étudiés dans cet énoncé. Ce projet est un exemple d'intégration des concepts passifs dans une démarche cherchant à améliorer non seulement le confort thermique des habitants, mais aussi à augmenter leur bien-être en général. L'aménagement d'espaces transitionnels et extérieurs, qu'ils soient communautaires (comme les cours) ou privés (tels que les loggias), favorise les interactions sociales et renforce le lien avec l'environnement champêtre du projet. De plus, on a pu voir dans le chapitre « Relation avec les stratégies contemporaines de refroidissement passif », qu'il était parfois nécessaire de compléter les concepts passifs avec des systèmes actifs. Ce projet exemplifie cette relation, avec un système de ventilation mettant l'accent sur la ventilation naturelle, et complétant celle-ci par de la ventilation mécanique lorsque la ventilation naturelle n'est pas suffisante.

2226 Emmenweid – Emmenbrücke, Suisse (Baumschlager Eberle Architekten)

Cet immeuble de bureau et d'administration est situé dans l'agglomération d'Emmenbrücke dans le canton de Lucerne en Suisse. Ce bâtiment a été érigé à la place d'un bâtiment industriel dont il reprend les dimensions. Le projet suit le concept 2226 selon lequel la température intérieure reste toute l'année entre 22 et 26°C. Il accomplit cela sans utiliser de système actif de chauffage ou refroidissement, ni de système de ventilation mécanique. La température intérieure est donc

régulée de manière principalement passive. Les concepts passifs utilisés sont les suivants.

Premièrement, l'enveloppe est composée de doubles murs en brique d'une épaisseur totale de près de 80 cm. Cette emphase mise sur l'inertie thermique est un exemple d'application du concept d'atténuation des gains de chaleur par stockage présenté dans ce travail. L'inertie thermique importante des murs permet une température intérieure stable tout au long de l'année. Deuxièmement, la ventilation est effectuée principalement via l'ouverture de volets d'aération situés dans le cadre des fenêtres. Ceux-ci sont commandés par des capteurs qui ouvrent ces volets en fonctions de la température et des niveaux de CO₂ mais peuvent également être ouverts manuellement selon les besoins. Troisièmement, les grandes fenêtres sont posées en applique permettant ainsi de les ombrager dû fait de la profondeur importante des ouvertures créées.



Figure 43 : Vue extérieure (© Baumschlager Eberle Architekten GmbH)

Ce projet met l'accent sur les concepts passifs pour contrôler la température dans un intervalle entre 22 et 26°C tout au long de l'année. Le concept permettant d'achever cela est principalement le stockage des gains de chaleurs au sein de l'enveloppe. Cela a comme conséquence une enveloppe aux dimensions considérables, ce qui fait écho aux limitations du concept stocker décrite dans le chapitre « Analyse croisée des stratégies ». On peut supposer que cette utilisation

considérable de matière aurait pu être réduite par l'intégration dans la conception du projet d'autres concepts de refroidissement passif pour contrôler la température intérieure.

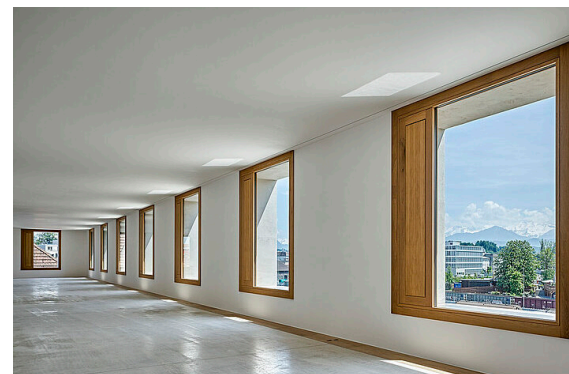


Figure 44 : Vue intérieure - fenêtres (© Baumschlager Eberle Architekten GmbH)

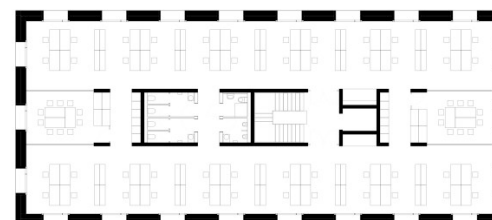


Figure 45 : Plan d'étage type

(© Baumschlager Eberle Architekten GmbH)

Les architectes ont du faire des compromis à cause de l'emplacement et du programme du bâtiment. Ce projet, situé en milieu urbain et prenant la place d'un bâtiment préexistant dont il reprenait les dimensions, a vu les concepts applicables se réduire. Des concepts tels que réfléchir les rayonnements, orienter le bâtiment selon la course du soleil ou les vents dominants sont en effet difficiles à mettre en œuvre dans un environnement urbain contraint. On peut cependant se demander si certains concepts présents auraient pu être optimisés. L'ombrage des

ouvertures aurait pu être renforcé par l'ajout de dispositifs fixes ou modulables, venant compléter la profondeur des ouvertures existantes. Par ailleurs, le plan du projet est dicté par le programme du bâtiment. La disposition du noyau central entrave le flux d'air, ce qui complique l'application du concept de ventilation naturelle. Actuellement, le seul côté permettant de ventiler les espaces de manière croisée sans entraves est le long côté du bâtiment. Or, selon Hu Heywood pour que la ventilation croisée soit possible, la profondeur de l'espace à ventiler ne peut pas être plus grande que 5 fois la hauteur de cet espace (Heywood 2012, 146). Réorganiser le plan de manière à favoriser la ventilation croisée transversale est une piste pour pouvoir améliorer le refroidissement passif du bâtiment.

La conception de ce projet permet un refroidissement passif efficace, gardant la température intérieure dans un intervalle entre 22 et 26°C. Ce refroidissement mettant l'accent sur le concept stocker, cela a comme conséquences une utilisation de matière très importante. On a pu observer que la favorisation de ce concept à la place des autres est probablement dû au contexte dans lequel se situe le projet, ainsi qu'au programme particulier. Le refroidissement passif du projet pourrait être optimisé là où cela est possible pour diminuer l'utilisation de matière. L'étude de ce projet a permis d'illustrer les compromis nécessaires que les architectes doivent effectuer entre le refroidissement passif, et des paramètres tels que le contexte et le programme du bâtiment.

Pour conclure, ce chapitre a permis de présenter quelques projets mettant en œuvre efficacement certains des stratégies, concepts et applications étudiés dans cet énoncé. Ces projets illustrent la diversité des approches possibles et peuvent servir d'inspiration bénéfique à la conception d'un projet d'architecture passif dans le contexte du Plateau Suisse en 2050.

5. Conclusion



Figure 46 : Vue du Plateau près de Zurich

Synthèse

Cet énoncé a permis de souligner la source d'enseignement que peut constituer l'étude de l'architecture vernaculaire. Les enseignements sont multiples, et au travers de ce travail, il a été possible de mettre en exergue des moyens efficaces de refroidir passivement les bâtiments. Ces enseignements sont particulièrement intéressants dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des températures comme celui qui va impacter la Suisse. L'objectif de ce travail n'est pas de suggérer une copie des cas d'études présentés, mais un rééquilibrage de notre manière de construire. En effet, comme évoqué dans le chapitre introduction de ce travail avec la présentation du diagramme de Behling, il est nécessaire de sortir du modèle d'architecture presque entièrement basé sur l'utilisation de systèmes actifs. Ce modèle peut être remplacé par une alternative se basant sur l'utilisation de principes formels et passifs, complétés de systèmes actifs là où il est nécessaire.

L'objectif de ce travail était donc de fournir ce que Giacomo Chiesa définit comme une « boîte à outils » de stratégies et concepts passifs. Ces outils ont le potentiel de proposer une solution efficace aux conditions de températures qui vont définir le climat du Plateau Suisse d'ici le milieu du siècle. Cette boîte à outils est constituée des éléments suivants.

Premièrement, les stratégies et concepts identifiés lors de l'étude de cas effectuée ont été présentés et exemplifiés. Les stratégies de refroidissement passif étudiées sont les suivantes: la prévention des gains de chaleur, l'atténuation des gains de chaleur et la dissipation des gains de chaleur. Chaque stratégie est appliquée par les cas d'études combinant plusieurs concepts. Ces concepts sont les suivants. D'abord, la prévention des gains de chaleurs est possible via les concepts ombrager, réfléchir, orienter et organiser. Ensuite, l'atténuation des gains de chaleur est possible via le concept stocker. Finalement, la dissipation des gains de chaleur est elle possible par les concepts ventiler, transférer, évaporer et rayonner. La synthèse et la classification effectuées ont permis de relever non pas des procédés architecturaux indissociables d'une culture spécifique, mais des procédés de refroidissement passifs qui peuvent répondre au besoin universel de confort intérieur. Ce besoin est rempli via l'utilisation des stratégies et concept présentés.

Deuxièmement, les limitations ainsi que les antagonismes et synergies liés à ces stratégies, concepts et adaptations ont été discutés afin d'informer et d'orienter le choix des concepteurs éventuels. Troisièmement, des technologies contemporaines améliorant l'effet de ces procédés passifs ont été analysées. Ce chapitre a permis de présenter certaines solutions permettant de compléter les stratégies et concepts passifs, ce qui fait écho au troisième triangle du diagramme de Behling. Finalement, une sélection de projets contemporains mettant en œuvre ces stratégies et concepts de manière efficace a été présentée afin de proposer des mises en œuvre possibles des procédés passifs étudiés.

Il est important de relever les défis significatifs qui peuvent impacter la mise en application des stratégies, concepts et applications présentés dans le contexte étudié.

Premièrement, cet énoncé a comme contexte d'étude une région étendue, celle du Plateau Suisse. Cette région s'étend diagonalement sur tout le pays, de Genève à l'ouest jusqu'à Saint Gall à l'est. Il est possible d'établir des prévisions climatiques pour l'ensemble de cette région et d'en déduire des stratégies et concepts adaptés pour y faire face. Cependant, comme on a pu l'observer dans le chapitre « Analyse croisée des stratégies », il reste essentiel de considérer les spécificités du microclimat propre au site du projet.

Deuxièmement, certaines caractéristiques du projet peuvent restreindre l'étendue des procédés qu'il sera possible d'appliquer. Parmi ces caractéristiques l'emplacement joue un rôle crucial. En effet, en milieu urbain les contraintes liées à l'espace disponible résultant de la densité du bâti peuvent réduire l'éventail des solutions passives applicables. Certains concepts tels que l'orientation optimale peuvent donc ne pas pouvoir être appliqués de manière efficace. De plus, les nuisances liées à la pollution de l'air et au bruit seront également amplifiées dans cet environnement. Cela peut avoir comme conséquence d'imposer une intégration plus importante des systèmes actifs au projet. A l'inverse, en milieu rural, la plus grande disponibilité d'espace dû à une densité du bâti moindre peut faciliter l'implémentation de procédés de refroidissement passif tels qu'une orientation optimale. L'éventail des

procédés passifs qu'a permis de relever l'analyse effectuée est étendu ; cela devrait permettre de proposer dans chaque cas plusieurs concepts de refroidissement passif à appliquer.

Malgré les défis évoqués, le potentiel des procédés présentés dans cet énoncé est indéniable. En effet, les études citées témoignent de leur potentiel de refroidissement. De plus, les technologies modernes et les exemples de projets actuels qui les intègrent montrent qu'il est possible de les appliquer efficacement dans un contexte contemporain.

Introduction au projet de fin de master

J'ai choisi d'implanter mon projet de fin de master dans le cadre du projet de nouveau quartier situé au Chemin de la Paumière dans la commune de Chêne-Bougeries dans le canton de Genève. Ce projet de nouveau quartier se situe dans le cadre du grand projet Chêne-Bourg-Chêne-Bougeries qui prévoit la réalisation de 1000 logements et 500 emplois à l'horizon 2030 ("Chêne-Bourg - Chêne-Bougeries," n.d.). Ce choix a été influencé par différents paramètres, qui seront présentés dans ce paragraphe.



Figure 47 : Périmètre du projet urbain Paumière

Premièrement, j'ai choisi de travailler sur Genève car ce canton semble être particulièrement impacté par la hausse des températures parmi les autres cantons situés sur le Plateau. Si l'on observe les températures saisonnières moyennes mesurées sur la période de référence 1981-2010, on remarque que les températures estivales mesurées par la station de mesure de Genève/Cointrin sont déjà entre 1.2 et 3 degrés supérieures à celles d'autres grandes agglomérations telles Berne ou

Zurich. Or ces températures devraient encore augmenter dans le futur. Celles-ci passeraient d'une moyenne de 19.3°C aujourd'hui, à un intervalle entre 20 et 21.2 °C selon le RCP 2.6 et entre 21.4 et 23 °C selon le RCP 8.5 (NCCS, n.d.-a). Comme on a pu l'observer dans le chapitre Climat actuel du Plateau Suisse, le nombre de journées estivales et nuits tropicales devraient également augmenter significativement d'ici 2050. Il paraît donc particulièrement intéressant de proposer un projet de bâtiment passif dans cette région du plateau au vu des défis liés au changement climatique ainsi qu'à la hausse des températures.

Deuxièmement, la population du canton de Genève est prévue d'augmenter considérablement d'ici le milieu du siècle. La population du canton devrait accueillir entre 86'000 et 135'000 habitants de plus en 2040. Cela constituerait une augmentation entre 18 et 28% ("Une croissance galopante de la population est attendue à Genève" 2016). Il y a donc un besoin accru de nouveaux logements dans ce canton. C'est pourquoi les autorités cherchent à maximiser l'espace disponible pour répondre à la demande croissante de logements. Cette densification prend la forme de nombreuses nouvelles constructions en ville de Genève mais également dans les communes périphériques, telles Chêne-Bougeries ("Le canton de Genève a construit plus de 3000 nouveaux logements en 2021" 2022). Il paraît donc pertinent de proposer un projet de logement situé en périphérie de Genève du au besoin accru de logement ainsi qu'à la densification déjà en cours dans ces communes. De plus, cette densification à rythme soutenu du canton a comme conséquence une forte standardisation du bâti. On peut supposer qu'avec cette standardisation vient une perpétuation du modèle d'architecture privilégiant les systèmes actifs qui a été évoqué dans cet énoncé. Il paraît donc pertinent de venir s'implanter dans ce contexte de densification et de besoin de nouveaux logements, mais sans perpétuer le même modèle et en venant chercher à proposer un nouveau modèle de bâtiment.

Bibliographie

Abalos, Iñaki. 2009. "Beauty from Sustainability?" *Harvard Design Magazine* 30: (Sustainability) + Pleasure Volume 1: 14–17.

Ahmed, Ahmed-Shams Forruque, Khan-Mohammad Masud Kamal Khan, Amanullah-Amanullah Maung Than Oo, and Rasul-Mohammad Golam Rasul. 2014. "Selection of Suitable Passive Cooling Strategy for a Subtropical Climate." *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 9 (1): 14. <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0014-7>.

Aili, Ablimit, Xiaobo Yin, and Ronggui Yang. 2021. "Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand." *Atmosphere* 12 (11): 1379. <https://doi.org/10.3390/atmos12111379>.

Al-Masrani, Salwa M., and Karam M. Al-Obaidi. 2019. "Dynamic Shading Systems: A Review of Design Parameters, Platforms and Evaluation Strategies." *Automation in Construction* 102 (June): 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>.

Andrea Palladio, *I quattro libri dell'architettura*, 1570, t.I, chap. XXV traduit par Philippe Rahm, *Histoire Naturelle de l'architecture* (France, Pavillon de l'Arsenal, 2020).

Arghand, Taha. 2019. "Direct-Ground Cooling Systems for Office Buildings : Design and Control Considerations."

Beck, Hylke E., Tim R. McVicar, Noemi Vergopolan, Alexis Berg, Nicholas J. Lutsko, Ambroise Dufour, Zhenzhong Zeng, Xin Jiang, Albert I. J. M. Van Dijk, and Diego G. Miralles. 2023. "High-Resolution (1 Km) Köppen-Geiger Maps for 1901–2099 Based on Constrained CMIP6 Projections." *Scientific Data* 10 (1): 724. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>.

Cardinale, Nicola, Gianluca Rospi, and Alessandro Stazi. 2010. "Energy

and Microclimatic Performance of Restored Hypogeous Buildings in South Italy: The 'Sassi' District of Matera." *Building and Environment* 45 (1): 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.017>.

Chen, Jianheng, and Lin Lu. 2020. "Development of Radiative Cooling and Its Integration with Buildings: A Comprehensive Review." *Solar Energy* 212 (December): 125–51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.013>.

"Chêne-Bourg - Chêne-Bougeries." n.d. *ge.ch*. Accessed January 6, 2025. <https://www.ge.ch/node/3452>.

Chiesa, Giacomo. 2019. "Early Design Strategies for Passive Cooling of Buildings: Lessons Learned from Italian Archetypes." In *Sustainable Vernacular Architecture*, edited by Ali Sayigh, 377–408. Innovative Renewable Energy. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06185-2_17.

Comment, Audanne. 2021. "C'est dans l'air: la ventilation naturelle | Espazium." *espazium*. July 30, 2021. <https://www.espazium.ch/fr/actualites/cest-dans-lair-la-ventilation-naturelle>. Consulté le 10/01/2025

Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee of the regions, An EU Strategy on Heating and Cooling. 2016. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1575551754568&uri=CELEX:52016DC0051>. Consulté le 07/12/2024

Cui, Diyang, Shunlin Liang, Dongdong Wang, and Zheng Liu. 2021. "A 1-Km Global Dataset of Historical (1979–2017) and Future (2020–2100) Köppen-Geiger Climate Classification and Bioclimatic Variables." <https://doi.org/10.5194/essd-2021-186>.

Da Cunha, Sandra Raquel Leite, and José Luís Barroso De Aguiar. 2020. "Phase Change Materials and Energy Efficiency of Buildings: A Review of Knowledge." *Journal of Energy Storage* 27 (February):101083. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>.

Ferrucci, Margherita, and Fabio Peron. 2018. "Ancient Use of Natural Geothermal Resources: Analysis of Natural Cooling of 16th Century Villas in Costozza (Italy) as a Reference for Modern Buildings." *Sustainability* 10 (12): 4340. <https://doi.org/10.3390/su10124340>.

Flórides, G.A, S.A Tassou, S.A Kalogirou, and L.C Wrobel. 2002. "Measures Used to Lower Building Energy Consumption and Their Cost Effectiveness." *Applied Energy* 73 (3–4): 299–328. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00119-8](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00119-8).

Givoni, B. 1991. "Performance and Applicability of Passive and Low-Energy Cooling Systems." *Energy and Buildings* 17 (3): 177–99. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90106-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90106-D).

Harkouss, Fatima, Farouk Fardoun, and Pascal Henry Biwole. 2018. "Passive Design Optimization of Low Energy Buildings in Different Climates." *Energy* 165 (December):591–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.019>.

Heywood, Huw. 2012. *101 Rules of Thumb for Low Energy Architecture*. London: Riba Pub.

Hossain, Md. Muntasir, and Min Gu. 2016. "Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials." *Advanced Science* 3 (7): 1500360. <https://doi.org/10.1002/advs.201500360>.

Huang, Yanyan, and Weichang Liu. 2020. "Measurement and Analysis of the Thermal Insulation Effect of the Transition Space of a Building Veranda in the Hot Summer and Cold Winter Zone." *Future Cities and Environment* 6 (1): 3. <https://doi.org/10.5334/fce.86>.

Iba, Chiemi, and Shuichi Hokoi. 2022. "Traditional Town Houses in Kyoto, Japan: Present and Future." *Energies* 15 (5): 1913. <https://doi.org/10.3390/en15051913>.

Kim, Jungsoo, and Richard De Dear. 2021. "Is Mixed-Mode Ventilation a Comfortable Low-Energy Solution? A Literature Review." *Building and Environment* 205 (November):108215. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108215>.

Kohansal, Mohammad Ebrahim, Hamid Reza Akaf, Javad Gholami, and Shahab Moshari. 2022. "Investigating the Simultaneous Effects of Building Orientation and Thermal Insulation on Heating and Cooling Loads in Different Climate Zones." *Architectural Engineering and Design Management* 18 (4): 410–33. <https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1901220>.

Kolokotroni, M., B.L. Gowreesunker, and R. Giridharan. 2013. "Cool Roof Technology in London: An Experimental and Modelling Study." *Energy and Buildings* 67 (December):658–67. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.011>.

Kontoleon, K.J., and C. Giarma. 2016. "Dynamic Thermal Response of Building Material Layers in Aspect of Their Moisture Content." *Applied Energy* 170 (May):76–91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.106>.

"Le canton de Genève a construit plus de 3000 nouveaux logements en 2021." 2022. infoSport. rts.ch. March 11, 2022. <https://www.rts.ch/info/regions/geneve/12929318-le-canton-de-geneve-a-construit-plus-de-3000-nouveaux-logements-en-2021.html>. Consulté le 06/01/2025

"Maison d'habitation de Villnachern AG, Vers 1635." n.d. Ballenberg-Musée Suisse En Plein Air. <https://ballenberg.ch/fr/guide/sites-architecturaux/lasuisse-romande/211/>. Consulté le 06/01/2025

"Maison Paysanne de Tinterin (Tentlingen), FR 17. Jh. / 1790." n.d. Ballenberg-Musée Suisse En Plein Air. <https://ballenberg.ch/fr/guide/sites-architecturaux/la-suisse-romande/511/>. Consulté le 03/01/2025

Marani, Afshin, and Moncef L. Nehdi. 2019. "Integrating Phase Change Materials in Construction Materials: Critical Review." *Construction and Building Materials* 217 (August):36–49. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.064>.

NCCS, National Centre for Climate Services. n.d.-a. "Changements locaux." Accessed January 6, 2025. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regionen/grossregionen/mittelland/klimaszenarien-ch2018-mittelland/lokale-veraenderungen.html>.

NCCS, "Scénarios climatiques CH2018 Plateau." Accessed November 25, 2024. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regionen/grossregionen/mittelland/klimaszenarien-ch2018-mittelland.html>.

Olgyay, Victor, Aladar Olgyay, Donlyn Lyndon, Victor W. Olgyay, John Reynolds, and Ken Yeang. 2015. *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and Expanded Edition*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc77kqb>.

Piesik, Sandra, ed. 2017. *Habitat: Vernacular Architecture for a Changing Planet*. London: Thames & Hudson.

Porretta, P., E. Pallottino, and E. Colafranceschi. 2022. "Minnan and Hakka Tulou. Functional, Typological and Construction Features of the Rammed Earth Dwellings of Fujian (China)." *International Journal of Architectural Heritage* 16 (6): 899–922. <https://doi.org/10.1080/15583058.2021.2001116>.

Pour, Yahya Lavaf. 2015. "Passive Low Energy Architecture in Hot and Dry Climate." Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3139.9840>.

Ruggiero, Giuseppe, Stefano Dal Sasso, Rosa Viviana Loisi, and Giuseppe Verdiani. 2013. "Characteristics and Distribution of Trulli Constructions in the Area of the Site of Community Importance Murgia of Trulli." *Journal of Agricultural Engineering* 44 (2): 13. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.198>.

Santamouris, M., A. Synnefa, and T. Karlessi. 2011. "Using Advanced Cool Materials in the Urban Built Environment to Mitigate Heat Islands and Improve Thermal Comfort Conditions." *Solar Energy* 85 (12): 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>.

Santamouris, Mat, and D. Asimakopoulos, eds. 2013. *Passive Cooling of Buildings*. Online-Ausg. Abingdon, Oxon: Earthscan from Routledge.

Su, Ying-Ming, and Hui-Ting Chang. 2018. "Winter Wind Environmental Comfort in Courtyards in Vernacular Architecture: A Case Study of the Fuyu Building in Yongding, Fujian." In *Green City Planning and Practices in Asian Cities*, edited by Zhenjiang Shen, Ling Huang, KuangHui Peng, and Jente Pai, 243–57. *Strategies for Sustainability*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70025-0_12.

Toroxel, Julia Lima, and Sandra Monteiro Silva. 2024. "A Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies Based on Bioclimatic and Vernacular Architecture." *Energies* 17 (5): 1006. <https://doi.org/10.3390/en17051006>.

"Une croissance galopante de la population est attendue à Genève." 2016. infoSport. rts.ch. July 12, 2016. <https://www.rts.ch/info/regions/geneve/7873692-une-croissance-galopante-de-la-population-est-attendue-a-geneve.html>. Consulté le 06/01/2025

United Nations Environment Programme. 2024. "Emissions Gap Report 2024: No More Hot Air ... Please! With a Massive Gap between Rhetoric and Reality, Countries Draft New Climate Commitments," October. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>.

Verbeke, Stijn, and Amaryllis Audenaert. 2018. "Thermal Inertia in Buildings: A Review of Impacts across Climate and Building Use." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (February):2300–2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>.

Yang, Jiaji, and Paula Cadima. 2018. "Passive Cooling Strategies of Tulou in Fujian, China."

Sources iconographiques

Figure 1 :

AC condensers on a house in Singapore's Chinatown, Matti Blume, 16 August 2023, 15:39:27

Figure 2 :

Réchauffement de l'air proche de la surface entre 1864 et 2020 en Suisse (brun) et dans le monde (orange)., Météo Suisse, publié dans la section Climat du blog de MétéoSuisse le 12 mai 2021

Figure 3 :

D.G, Beck, H. E. , McVicar, T. R. , Vergopolan, N. , Alexis, B. , Lutsko, N. J. , Dufour, A. , Zeng, Z. , Jian, X. , van Dijk, A. I. J. M. , Miralles. 2024a. Köppen–Geiger Climate Classification Map at 1-Km Resolution for Switzerland 1991–2020. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koppen-Geiger_Map_v2_CHE_1991%E2%80%932020.svg.

Figure 4 :

2024b. Köppen–Geiger Climate Classification Map at 1-Km Resolution for Switzerland 2041–2070 SSP585. "High-resolution (1 km) Köppen–Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections". Scientific Data. DOI:10.1038/s41597-023-02549-6. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koppen-Geiger_Map_v2_CHE_2041%E2%80%932070_SSP585.svg.

Figure 5 :

Köppen–Geiger Climate Classification Map at 1-Km Resolution for Switzerland 2071–2099 SSP585. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koppen-Geiger_Map_v2_CHE_2071%E2%80%932099_SSP585.svg.

Figure 6 :

Zifan, Enhanced, modified, and vectorized by Ali. 2016. Cfa (Köppen

Climate Classification). Derived from World Köppen Classification (with authors).svg. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfa_\(K%C3%B6ppen_climate_classification\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfa_(K%C3%B6ppen_climate_classification).svg).

Figure 7 :

Shotgun House. ca. Unknown architect. 1910. Wood frame. <https://jstor.org/stable/community.8746050>.

Figure 8 :

Leiding, Harriette Kershaw. 1921. The Ball Family Maintained a Town House at the Northeast Corner of Vernon Street and East Bay Street in Charleston, South Carolina. Historic Houses of South Carolina. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ball_family_house_on_Vernon_Street.png.

Figure 9 :

Japanexperterna.se. 2014. Machiya in Kyoto, near Nijojo.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Machiya_building.jpg.

Figure 10 :

Schmitt, Holger Uwe. 2023. Wurden Die Trulli in Alberobello UNESCO-Weltkulturerbe. . https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22Einfach_drollig_sind_die_Trulli%22._12.jpg.

Figure 11 :

Marcok. 2009. Villa Barbaro Und Tempietto. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villa_Barbaro_panoramica_frente_Marcok.jpg.

Figure 12 :

Velvet. 2014. Des Habitations Dans Les Sassi de Matera. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Matera_maisons_sassi.jpg.

Figure 13 :

Gioseffi, Claudio. 2013. Costozza Di Longare - Villa Trento Carli. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Costozza_di_Longare_-_Villa_Trento_Carli-9.jpg.

Figure 14 :

Gisling. n.d. Fujian Tulou (Earth Buildings) at Tianluokeng (Snail Pit Village) in Southwestern Fujian Province. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snail_pit_tulou.jpg.

Figure 15 :

Adaptation de Zifan, Enhanced, modified, and vectorized by Ali. 2016. Cfa (Köppen Climate Classification). Derived from World Köppen Classification (with authors).svg. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfa_\(K%C3%B6ppen_climate_classification\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cfa_(K%C3%B6ppen_climate_classification).svg).

Figure 16 :

Adaptation de Fernandes et al. 2012. Portuguese vernacular architecture: The contribution of vernacular materials and design approaches for sustainable construction. DOI : 10.1080/00038628.2014.974019

Figure 17 :

Japanexperterna.se. 2014. Machiya in Kyoto, near Nijojo. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Machiya_building.jpg.

Figure 18 :

Japanexperterna.se. 2014. Machiya in Kyoto, near Nijojo. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Machiya_building.jpg.

Mariemon. 2010. n.d. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ky%C5%8D-machiya_01.JPG

Figure 19 :

ProfReader. 2013. This Pre-Revolutionary House at 123 Tradd St., Charleston, South Carolina Is a Fine Example of a Charleston Single House. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:123_Tradd.jpg.

Figure 20 :

Schmitt, Holger Uwe. 2023. Wurden Die Trulli in Alberobello UNESCO-Weltkulturerbe. . https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%22Einfach_drollig_sind_die_Trulli%22._12.jpg.

Figure 21 :

Marcok. 2006. Trulli Strung along via Monte Pertica in Alberobello, Province of Bari, Italy. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trulli_Alberobello11_apr06.jpg.

Figure 22 :

Velvet. 2014. Des Habitations Dans Les Sassi de Matera. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Matera_maisons_sassi.jpg.

Figure 23 :

Adaptation de Santamouris, Mat, and D. Asimakopoulos, eds. 2013. Passive Cooling of Buildings. Online-Ausg. Abingdon, Oxon: Earthscan from Routledge.

Figure 24 :

MPhernambucq. 2021. A Street with Trulli Houses in Alberobello. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Street_with_trulli_Alberobello.jpg.

Figure 25 :

Bolobolo. 2006. Earth Building Yude Lou. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_building-yuchang2.jpg.

Figure 26 :

Gisling. 2007. Square Tulou. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Square_tulou.JPG.

Figure 27 :

Susan Murray. 2006. Ground Floor Plan of an American Shotgun House. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shotgun_house_plan.jpg.

Figure 28 :

663highland. 2006. Ishitani Residence in Chidu-Cho, Tottori Prefecture, Japan. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ishitani_residence23_1920.jpg.

Figure 29 :

n.d. 2012. Yoshida Family residence. wikimedia

Figure 30 :

Vincent. 2009. @tulou. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:@tulou_\(4056345018\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:@tulou_(4056345018).jpg).

Figure 31 :

Adaptation de B.V Messervy.n.d. <https://www.dedeandbv.com/dedesdish/charlestonsingle>

Figure 32 :

Cliff Face and City Wall, Sassi Di Matera, Matera, Italy. Vickery, Robert L. n.d. <https://jstor.org/stable/community.22293285>.

Figure 33 :

Ferrucci, Margherita, and Fabio Peron. 2018. "Ancient Use of Natural Geothermal Resources: Analysis of Natural Cooling of 16th Century Villas in Costozza (Italy) as a Reference for Modern Buildings." *Sustainability* 10 (12): 4340. <https://doi.org/10.3390/su10124340>.

Figure 34 :

Rosbach, Hans A. 2007. Villa Barbaro at Maser by Andrea Palladio. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VillaBarbaro_2007_07_08_09.jpg.

Figure 35 :

Istvánka. 2011. Alberobello Trullo Siamese.jpg. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alberobello_Trullo_Siamese.jpg

Figure 36 :

NCCS. n.d.-d. "Mittelland_withstations.Png (588×392)." Accessed January 13, 2025. https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/grandes-regions/plateau/scenarios-climatiques-ch2018-plateau/changements-locaux/_jcr_content/par/image/image.imagespooler.png/1540483775039/588.1000/Mittelland_withstations.png.

Figure 37 :

"Molasse-Architecture-Contemporaine-Plateau-Suisse-B.Jpg (915×610)." n.d. Accessed January 13, 2025. https://espazium.s3.eu-central-1.amazonaws.com/files/styles/espazium_610px_height/public/2022-04/Molasse-architecture-contemporaine-plateau-suisse-B.jpg?itok=ctEm3rOK.

Figure 38 :

"750d7665-8d19-4596-952e-2ffc9cab4bdd_2023-07-31_dabi_Personen_4145.Jpg (1600×1068)." n.d. Accessed January 13, 2025. https://images.prismic.io/ballenberg/750d7665-8d19-4596-952e-2ffc9cab4bdd_2023-07-31_dabi_Personen_4145.jpg?auto=compress,format&w=1600.

Figure 39 :

"Bb40b633-1829-45f6-A85d-F87ef4a3074d_2021-08-31-Sami-Zentrales-Mittelland-Villnachern.Jpg (1280×852)." n.d. Accessed January 13, 2025. https://images.prismic.io/ballenberg/bb40b633-1829-45f6-a85d-f87ef4a3074d_2021-08-31-sami-zentrales-mittelland-villnachern.jpg?auto=compress,format&w=1280.

Figure 40 :

Bunq. n.d.-a. "CE_photo-Depuis-Cour-1170x877.Jpg (1170×877)." Accessed January 13, 2025. https://www.bunq.ch/wp-content/uploads/CE_photo-depuis-cour-1170x877.jpg.

Figure 41 :

Bunq. n.d.-c. "CE_plan-Site-1170x752Jpg (1170x752)." Accessed January 13, 2025. https://www.bunq.ch/wp-content/uploads/CE_plan-site-1170x752.jpg.

Figure 42 :

Bunq. n.d.-b. "CE_plan-Batiments-ABJpg (2500x1672)." Accessed January 13, 2025. https://www.bunq.ch/wp-content/uploads/CE_plan-batiments-AB.jpg.

Figure 43 :

Hueber, Eduard. n.d.-a. "csm_20190612_2015_MIS_ZRH_150603_2226_Emmenweid_Emmen_202_RF_authorized__1__43908467a0.jpg (1710x1154)." https://www.baumschlager-eberle.com/fileadmin/_processed_/7/d/csm_20190612_2015_MIS_ZRH_150603_2226_Emmenweid_Emmen_202_RF_authorized__1__43908467a0.jpg.

Figure 44 :

Hueber, Eduard. n.d.-b. "csm_20190624_2015_MIS_ZRH_150603_2226_Emmenweid_Emmen_754_RF_authorized_9aa5492c2f.jpg (736x569)." https://www.baumschlager-eberle.com/fileadmin/_processed_/e/9/csm_20190624_2015_MIS_ZRH_150603_2226_Emmenweid_Emmen_754_RF_authorized_9aa5492c2f.jpg.

Figure 45 :

BauNetz. n.d. "Bürogebäude 2226 Emmenweid in Emmenbrücke | Mauerwerk | Büro/Verwaltung | Baunetz_Wissen." Baunetz Wissen. Accessed January 13, 2025. <https://www.baunetzwissen.de/mauerwerk/objekte/buero-verwaltung/bueroegebaeude-2226-emmenweid-in-emmenbruecke-7004172>.

Figure 46 :

Roland Zh. 2008. City of Zurich, Zürichsee (Lake Zürich), Zimmerberg (to the right) and Glarus Alps, as seen from Käferberg-Waidberg hills.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Z%C3%BCrich_-_Waidberg-Z%C3%BCrichsee_2.JPG

Figure 47 :

"Chêne-Bougeries - Chemin de la Paumière." n.d. ge.ch. Accessed January 13, 2025. <https://www.ge.ch/node/3905>.

Les diagrammes présentant les stratégies et concepts pages 28-32-34-36-39-43-49-52-54 sont inspirés de la publication de Toroxel et Siva. 2024

