

Gilda Gysin
Enoncé Théorique de Master
Architecture
EPFL | Janvier 2017

Groupe de suivi
Prof. Roberto Gargiani
Prof. Dieter Dietz
Assistant Raffael Baur

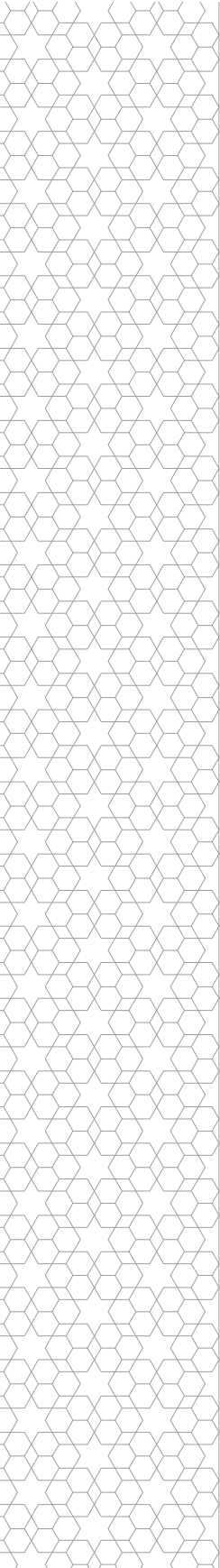
Dispositifs Archaiques

Principes intemporels

"Today's renewable-energy revolution is the fruit of seeds planted decades, centuries, even millennia ago, then bravely and persistently cultivated through countless vicissitudes."

"Even if we need never again reinvent this renewable-energy wheel, we must understand where it came from."

Amory B. Lovins
Foreword of *Let it Shine*
April 28, 2013



Dispositifs Archaïques

Principes intemporels

Dispositifs Archaïques

Principes intemporels

Gilda Gysin

Groupe de suivi
Prof. Roberto Gargiani
Prof. Dieter Dietz
Assistant Raffael Baur

Enoncé Théorique de Master
EPFL | Janvier 2017

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	7
2. UNE DOUBLE RETROSPECTIVE	11
2.1 Une dimension oubliée	11
2.2 Design Passif	15
Stratégies	17
3. ELEMENTS	21
3.1 Feu	25
Hypocauste	25
Kang	29
Heliocaminus	35
Engawa	39
3.2 Air	43
Badgir	43
Malquaf	47
Mashrabiya	49
3.3 Eau	51
Tour à vent avec évaporation d'eau	51
Atrium	53

3.4 Terre	57
Puit canadien	57
4. INTEMPORALITÉ DES PRINCIPES	61
4.1 Discontinuité historque	61
4.2 Cas d'étude	63
Jean-Marie Tjibaou Cultural Center, Nouvelle-Calédonie, Mélanésie	63
Torrent Research Centre, Ahmedabad, India	65
5. CONCLUSION	69
6. ANNEXES	73
Bibliographie	73
Sources des figures	76
Sources complémentaires pour les re-dessins	77
Remerciements	81

The only radical difference between human history and “natural” history is that the former can never begin again... the chimpanzee and the orangutan are distinguished from man not by what is known strictly speaking as intelligence, but because they have far less memory. Every morning the poor beasts have to face almost total oblivion of what they lived through the day before, and their intellect has to work with a minimum fund of experience. Similarly, the tiger of today is identical with that of six thousand years ago, each one having to begin his life as a tiger from the beginning as if none had existed before him... Breaking the continuity with the past, is a lowering of man and plagiarism of the orangutan.¹

¹ Jose Ortega y Gasset, cité par: Rowe, Colin & Koetter, Fred (1984). Collage City. Cambridge, Massachusetts & London, England: The MIT Press; p. 118

² Source: Muramoto, Katsuhiko. *Relational Bodies in Japanese Architecture: Sustainability Reconsidered*. In: Inter-Disciplinarity.net. Consulté en decembre 2016; p. 4.

1. INTRODUCTION

La présente recherche se propose en tant qu’outil de redécouverte des dispositifs architecturaux du passé pour la régulation du confort. Le “passé” sera ici considéré comme toute la période précédant l’avènement massif des technologies à la fin du XIX^{ème} siècle. L’étude s’inscrit dans la discipline de l’architecture bioclimatique: en effet, la littérature académique dans ce domaine s’est récemment orientée autant vers l’architecture du passé que l’architecture vernaculaire.

Deux critiques majeures sont soulevées par rapport au regard contemporain envers ces types d’architecture. Selon le professeur Muramoto, la vision dominante actuelle reconnaît dans l’architecture vernaculaire une harmonie avec la nature, qui serait strictement reliée aux climats locaux. Ce point de vue a amené à considérer l’architecture traditionnelle comme un dictionnaire de solutions écologiques. Cependant, les recherches menées se sont trop souvent focalisées sur les performances énergétiques, en négligeant ainsi d’autres dimensions tout autant importantes, telles que le rôle social, culturel, spirituel ou encore religieux de ces dispositifs.² Il faut de surcroît considérer les dispositifs du passé comme possédant un impact architectural complètement différent par rapport aux installations technologiques de nos jours: en effet, ces anciens dispositifs s’inscrivent dans un cadre architectural plutôt que dans le cadre de l’ingénierie tel que c’est le cas aujourd’hui. Une deuxième critique se réfère à l’interprétation peu objective de ce type d’architecture qui a parfois abouti à des retranscriptions trop littérales ou des interprétations trop romantiques avec des résultats contre-productifs.

Cet énoncé, quand les sources à disposition le permettent, va donc à la redécouverte des dispositifs architecturaux du passé pour la régulation du confort, tant du point de vue des principes que de

leurs impacts spatiaux et sociaux qu'ils ont pu induire dans l'histoire.

L'énoncé se structure en trois parties. Un chapitre introductif justifie la retrospective sur l'architecture vernaculaire et ancienne sous deux points de vue. Premièrement, le discours résume brièvement l'évolution de l'impact architectural des systèmes responsables du réglage du confort dans le bâtiment. Deuxièmement, l'intérêt écologique de la redécouverte de ces systèmes est synthétisé, en incluant une brève présentation des stratégies constructives par rapport au climat. Ensuite, le chapitre principal décrit dix exemples de dispositifs pour le réglage du confort. Leurs principes ainsi que leurs rôles sociaux et architecturaux sont étudiés. L'analyse se fait à travers le re-dessin des dispositifs, il est important de mentionner que dans la plupart des cas, les dessins se basent sur une interprétation personnelle à partir de texte et de photos, étant donné la limite et l'imprécision des sources disponibles. Dans la dernière partie, l'intérêt se tourne vers le présent en questionnant l'intemporalité des principes présentés dans les différents dispositifs. Pour ce faire, des cas d'étude contemporains sont traités comme exemples de réutilisation. Une conclusion finale offre des perspectives de questionnement et des possibles ouvertures pour le projet.

2. UNE DOUBLE RETROSPECTIVE

2.1 La dimension oubliée

Dans l'histoire de la climatisation du bâtiment, l'architecte a eu un rôle variable. Si dans l'Antiquité il était directement impliqué dans tous les processus de conception des systèmes, avec l'émergence et la spécialisation des techniques à partir de la fin du XIX^{ème} siècle, il a perdu le monopole sur le sujet pour en déléguer une partie aux spécialistes.

Selon Vitruve, l'architecte devait posséder des connaissances de base dans tous les domaines scientifiques, artistiques et littéraires. Dans son énumération des sciences à maîtriser, il mentionne l'importance de la physiologie¹ en tant que moyen permettant de concevoir une architecture qui répond aux contraintes des éléments naturels. Alberti, quant à lui, définit l'architecte comme:

[...] celui qui, avec une parfaite méthode, sait concevoir de façon rationnelle et réaliser de façon pratique [...] des œuvres qui s'adaptent au mieux aux besoins les plus importants de l'homme.²

L'architecte s'occupait ainsi de concevoir une architecture qui répondait à des conditions climatiques spécifiques et assurait le niveau de confort requis par les occupants. Les systèmes utilisés étaient strictement reliés à la spatialité du bâtiment: ils étaient de vraies composantes architecturales, au même titre que les murs et le toit.

Dans le cas particulier de l'architecture vernaculaire, nous sommes parfois confrontés à une architecture sans architectes. Il reste malgré tout justifié de dire que les stratégies utilisées comme réponse aux conditions climatiques extrêmes font partie de l'héritage architectural des différentes cultures qui habitent ces régions. Elles se

¹ “[...] philosophie qui traite des choses naturelles, et qui en grec est appelée physiologie.”
Vitruve. I Dieci Libri dell'Architettura. Traduit par: Perrault, Caude. Les Dix Livres D'architecture. (1837) Paris: Tardieu & Coussin Fils; p. 7.

² “[Architetto] chiamerò colui che con metodo sicuro e perfetto sap-pia progettare razionalmente e rea-lizzare praticamente [...] opere che nel modo migliore si adattino ai più importanti bisogni dell'uomo.”
Alberti. De Re Aedificatoria. Tra-duit par: Orlandi, Giovanni (1966). L'Architettura. Milan: Il Polifilo; p.7.

sont développées en parallèle avec les techniques constructives et elles ne sont pas de simples éléments ajoutés à la construction en tant que produit fini.

La dimension architecturale du réglage du confort a peu à peu disparu suite à l'avènement des technologies, avec la séparation des tâches et la tendance à cacher les installations techniques. Ce phénomène est décrit par Reyner Banham dans *The architecture of the Well-Tempered Environment*.³ Dans la période comprise entre les années 1960 et la fin du siècle, les architectes ont délégué presque tout ce qui concernait la climatisation aux ingénieurs et à leur savoir-faire. Les nouvelles technologies ont eu un gros impact sur l'architecture, en révolutionnant la spatialité du réglage du confort à travers des nouveaux éléments, tels que les faux plafonds, les gains techniques, etc. Même s'il est clair que, dans certaines cultures, les infrastructures ne sont pas complètement cachées, elles ne sont pas intégrées à la dimension architecturale et spatiale puisqu'elles ne sont pas conçues en parallèle avec l'architecture.

Au XX^{ème} siècle, on assiste à un phénomène contraire, c'est-à-dire à un retour progressif vers le design climatique passif de la part des architectes. Le besoin de réchauffer, refroidir et éclairer a affecté le travail de certains architectes célèbres tels que Frank Lloyd Wright et le Corbusier, qui ont ressenti la nécessité de rendre les bâtiments efficaces d'un point de vue énergétique.

Frank Lloyd Wright, dans le *Marin County Civic Center*, a souligné l'importance de la luminosité naturelle et des protections solaires. Pour maximiser l'apport de lumière naturelle, le bâtiment linéaire est divisé par un atrium vitré, alors que les fenêtres extérieures sont protégées de la lumière directe par un système d'arcades.

³ Banham, Reyner (1998). *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. Traduit par: Morabito, Giovanni & Cristian Stanesco (1978). Bari: Laterza & Figli.

⁴ Source: Lechner, Norbert (2015). *Heating, Cooling, Lightnings Sustainable*. New Jersey: John Wiley & Sons; pp. 7-8.

⁵ Iannis Xenakis, cité par: Daniel, Siret. *Le Corbusier Plans. 1950 - Grille climatique (Chandigarh)*. Version française. Fondation Le Corbusier.

Le Corbusier, quant à lui, a introduit le confort thermique comme une des "fonction" dans la célèbre formule moderniste *Form follow Function*. Son travail autour de la question de l'ensoleillement, entrepris dès 1930, et en particulier sur le développement des brise-soleil, sont un exemple de réflexion architecturale en tant que solution climatique. Au 1932, le Corbusier conçoit la *Cité de Refuge* à Paris. Le bâtiment présente une façade Sud complètement vitrée pour capter et profiter au maximum de la lumière du jour. Il en résulte qu'en juin, le bâtiment devient trop chaud pour rester confortable. Pour répondre à ce problème, le Corbusier invente le système fixe connu comme brise-soleil. Après cette réalisation, la question de l'ensoleillement deviendra centrale dans son architecture. Différents bâtiments de l'architecte utilisent les protections solaires en tant qu'élément visuel fort. Les bâtiments gouvernementaux de la ville indienne de Chandigarh en fournissent à ce propos une belle illustration.⁴ Le Corbusier s'est occupé aussi des problèmes de ventilation intérieure, de contrôle de l'humidité de l'air et de protection contre la pluie. Dans le cadre de cette recherche, il est important de mentionner l'outil méthodologique mis en place par Le Corbusier et son atelier en 1951. Ce travail, souvent traité de façon expéditive, est très pertinent dans le discours sur l'architecture climatique. Il s'agit d'un:

*Programme d'études des Conditions Climatiques Optimales et des Moyens Architecturaux de correction.*⁵

Le programme propose la composition d'une grille, résumant les variables fondamentales responsables de l'environnement climatique et leurs variations journalières et annuelles. Cette grille propose ensuite des *corrections architecturales* répondant aux différents problèmes.

[Les six variables, qui composent les six bandes horizontales de la grille] correspondent au soleil, à la lumière, à la température (de l'air), à la ventilation (vents dominants), à la pluie et à l'humidité relative. La grille est divisée en trois colonnes, correspondant aux trois étapes de la méthode: le relevé des données climatique du site, les "conditions optimales" à atteindre, et enfin les "procédés architecturaux" permettant de tirer vers ces conditions optimales, dans le contexte climatique donné. Chaque colonne est découpée en douze mois [...]. [Selon ce qui écrit Le Corbusier au 1952, après avoir finalisé la grille définitive] il s'agit de [...] réaliser par des dispositifs architecturaux les conditions capables d'assurer le bien-être et le confort. [Dans cette dernière version de la grille,] la seconde colonne s'intitule "corrections en vue du confort et du bien-être" [alors que la troisième est nommé "solutions architecturales" et renvoie à des planches d'études de la solution si celle-ci existe].⁶

En matière des problématiques liées au climat et au design passif ⁷, le XX^{ème} se caractérise par le retour des architectes dans le jeu. Ce phénomène nous suggère une envie de réappropriation par rapport à certains aspects du projet qu'ils avaient dans le passé délégué aux spécialistes. Un deuxième élan vers le design architectural passif est relié aux problématiques de la crise environnementale et écologique. Face aux préoccupations liées au développement durable, un courant architectural s'est orienté vers ces questionnements. Ainsi, durant les vingt dernières années, beaucoup de recherches ont été faites dans ce sens, afin de trouver des solutions architecturales les plus écologiques possibles.

⁶ Daniel, Siret. *Le Corbusier Plans. 1950 - Grille climatique (Chandigarh)*. Version française. Fondation Le Corbusier.

⁷ "By taking advantage of what nature can offer, the bioclimatic design approach avoids dependency on mechanical systems and helps to reduce the energy consumption. It is often described as "passive design"."
Muramoto, Katsuhiko. *Relational Bodies in Japanese Architecture: Sustainability Reconsidered*. In: *Inter-Disciplinarity.net*. Consulté en décembre 2016; p. 4.

⁸ Lechner, Norbert (2015). *Heating, Cooling, Lightnings Sustainable*. New Jersey: John Wiley & Sons; p. 2.

⁹ La construction des bâtiments indigènes, par définition, se base sur les matériaux locaux et reflète le climat du lieu de construction. Source: Cook, Jeffrey (1996). *Architecture indigenous to extreme climates*. In: *Energy and Buildings*, vol. 23. Arizona State University: Elsevier, pp. 277-291.

¹⁰ Source: Alp, Ahmet Vefik (1990/91). *Vernacular Climate Control in Desert Architecture*. In: *Energy and Buildings*, vol. 15-16. Arizona State University: Elsevier, pp. 809-815.

2.2 Design Passif

Sustainable architecture can be achieved by using "the best of the old and the best of the new".⁸

Au XXI^{ème} siècle, un phénomène crucial survient: en plus d'être vus comme des espaces de vie, la perception des bâtiments inclut désormais ceux-ci comme partie intégrante de l'écologie de la planète. Cela a lancé un nouveau regard sur l'architecture du passé et l'architecture vernaculaire. Les études révèlent comment, dans le passé, pour répondre à des conditions climatiques sévères, les cultures préhistoriques, historiques et contemporaines ont abouti à des solutions très créatives. L'analyse rétrospective de ces systèmes révèle plusieurs aspects positifs qui peuvent être utilisés de nos jours: ils n'utilisent pas d'autre énergie que les forces naturelles, ils n'ont en général pas besoin d'entretien, ils ne polluent pas l'environnement et ils représentent souvent des solutions plus économiques par rapport aux installations techniques. Les techniques utilisées pour répondre au climat local et à la culture peuvent ainsi devenir des sources d'idées et des inspirations pour l'architecture moderne.⁹

Il n'est évidemment pas réaliste d'imaginer qu'aujourd'hui, avec le niveau des standards requis, l'architecte puisse assumer la direction totale de la régulation du confort à l'intérieur d'un bâtiment pour les résoudre au niveau architectural. Il ne s'agit pas non plus de rejeter les moyens que la technologie nous offre aujourd'hui. Cependant, il est envisageable d'imaginer que les architectes devraient, comme c'était le cas durant l'Antiquité, intégrer des *corrections architecturales* dans l'effort d'atteindre le contrôle climatique maximal avec les moyens naturels/passifs, pour par la suite l'améliorer en se servant des installations techniques.¹⁰

After all, the Greek portico is simply a feature to protect against the rain and the sun.¹¹

Selon Lechner, un type d'architecture est en train de se développer dans cette optique, à travers l'utilisation des sciences modernes, des technologies et des idées d'esthétique combinées à des idées traditionnelles répondant aux besoins humains, au régionalisme et au climat. Cette ambition résultera en une architecture plus variée par rapport à l'architecture contemporaine, qui ne donne aucun indice sur la localisation d'un bâtiment. En effet, la plupart des architectures contemporaines se ressemblent, et ce, peu importe que l'on se trouve à New York, Paris, New Delhi ou Tokyo. De plus cette architecture "internationale" n'est appropriée nulle part, car elle n'est soutenable pour aucun climat. Nous voyons ainsi que, en général, l'architecture peut seulement partiellement résoudre les enjeux climatiques dans les bâtiments. Il est évidemment important de faire intervenir le support énergétique. La conclusion est que ces deux moyens devraient être combinés et être intégrés l'un à l'autre. L'effort que s'impose l'architecture bioclimatique est en fait celui de profiter de l'énergie naturelle qui nous parvient sous forme de lumière et de chaleur grâce à des configurations architecturales adéquates complétées par les connaissances technologiques. L'architecture contemporaine, en matière de régulation du confort, regorge déjà de nombreux exemples de réutilisation, de remise au goût du jour de ce que l'on considère comme des "dispositifs anciens" ainsi que des solutions vernaculaires.

The perennial popularity of classical architecture is based on not only aesthetic but also practical grounds.¹²

¹¹ Lechner, Norbert (2015). Heating, Cooling, Lightnins Sustainable. New Jersey: John Wiley & Sons; p. 5.

¹² *Ibidem*

Stratégies

Il sera utile, avant de poursuivre, de différencier ce qui peut être considéré comme stratégies mises en place en réponse aux différents climats, et les éléments architecturaux qui ont été conçus en tant que systèmes utilisant des principes physiques. Même si la recherche suivante se concentre sur l'analyse de la deuxième catégorie de cette typologie, il semble opportun de résumer brièvement les stratégies générales pour pouvoir mieux comprendre le contexte dans lequel ces dispositifs s'inscrivent.

Dans les climats chauds et secs, on peut retrouver généralement des murs et des toitures massives, exploités pour leur capacité de stockage de la chaleur. D'autre part, puisque le soleil est très intense, des petites fenêtres suffisent pour fournir la quantité de lumière nécessaire tout en permettant, de par leurs dimensions réduites, d'empêcher à la chaleur externe de rentrer. Les couleurs des surfaces sont claires à l'extérieur pour minimiser l'absorption de la chaleur, de même qu'à l'intérieur, afin de diffuser la lumière dans la pièce. Comme généralement la quantité de pluie est peu importante, les toitures sont souvent plates et sont utilisées en tant qu'espace additionnel pendant la nuit. En réalité, les espaces extérieurs se refroidissent rapidement après le coucher du soleil. Par conséquent, ces toits plats se révèlent être confortables la nuit, alors que les espaces intérieurs se maintiennent à une température plus élevée à cause de la chaleur stockée dans les murs massifs durant la journée. Les structures massives à coupole sont appropriées à ce genre de climat. En effet, en plus de l'avantage thermique assuré par leur masse, la forme de dôme comporte deux bénéfices supplémentaires. Le premier concerne l'impact du soleil pendant la journée sur la surface du dôme, qui est minimisé grâce à la forme,

alors que pendant la nuit l'ensemble de la coupole est exposé à l'air frais nocturne et se refroidit par radiation. Le deuxième bénéfice concerne la stratification de l'air à l'intérieur de la coupole qui permet aux habitants d'occuper les espaces inférieurs qui sont ainsi les plus frais. Une illustration bien connue est le Panthéon à Rome, où l'oculus situé à l'extrémité de la coupole permet à la lumière de rentrer et en même temps d'évacuer l'air chaud. Au même titre que les spécificités des bâtiments individuels, la disposition des villages est également pensée pour pouvoir répondre aux contraintes du climat. Dans les climats chauds et secs, les bâtiments sont fortement agglomérés pour profiter des ombres réciproques.

Dans les climats chauds et humides, les bâtiments sont complètement différents car l'humidité présente un autre problème à résoudre. La meilleure solution pour le confort thermique consiste dans l'ombre et dans la ventilation naturelle qui donne une sensation de refroidissement. Le refroidissement par évaporation ne fonctionne pas très bien dans ce climat à cause de la quantité de vapeur déjà présente dans l'air. Par conséquent, l'architecture dans ce type de climat comporte une multitude de grandes fenêtres, avec des volets en surplomb, des murs clairs et des hauts plafonds. Les grandes fenêtres maximisent la ventilation et, en même temps, les volets empêchent la pénétration du soleil et de la pluie. La construction massive n'est pas avantageuse dans ce type de climat puisque la température ne varie pas significativement entre le jour et la nuit. Les bâtiments sont plutôt construits en bois léger. Les hauts plafonds permettent la construction des grandes fenêtres et aussi la ventilation verticale en évacuant l'air chaud en premier lieu. Parfois les bâtiments de ces régions se construisent sur pilotis et quand une plus grande ventilation est requise, des tours à vent ont pu être utilisées.

¹³ Source: Lechner, Norbert (2015). Heating, Cooling, Light-nins Sustainable. New Jersey: John Wiley & Sons; pp. 3-5

Dans les régions avec un climat doux à tempéré mais nuageux, les bâtiments sont ouverts pour capturer le plus de lumière possible. L'utilisation de baies vitrées est très commune. Au contraire de ce que le nom "tempéré" suggère, ces climats sont généralement froids en hiver et chauds en été, il en résulte ainsi de grosses difficultés pour concevoir des bâtiments adaptés à ces conditions si variables.

Dans les climats principalement froids, la typologie des bâtiments se focalise sur la rétention de la chaleur. Les bâtiments tendent à être les plus compacts possibles, pour diminuer le ratio de la surface avec le volume. Le nombre de fenêtres est réduit puisqu'elles représentent un point faible dans l'enveloppe thermique du bâtiment. L'apport de lumière est ainsi sacrifié en faveur de la rétention de chaleur. Les murs sont construits en bois plutôt qu'en pierre pour une question de résistance thermique. En réponse au mouvement de l'air chaud vers le haut, les plafonds sont maintenus très bas. Les arbres sont utilisés pour se protéger du vent.¹³

3. ELEMENTS

Les dispositifs identifiables dans les différentes architectures vernaculaires sont multiples. Toutefois, les principes physiques selon lesquels ils fonctionnent sont limités en nombre. Le choix a donc été celui d'étudier et d'énumérer quelques exemples de dispositifs, plus ou moins connus, pour chaque principe physique.

Les dispositifs ont été premièrement regroupés selon des catégories correspondant aux principes régulateurs du confort dans le bâtiment (ventilation, température de l'air, éclairage et traitement des eaux), pour faciliter la recherche. Il faut reconnaître que le traitement des eaux ne rentre pas forcément dans le cadre de la thermorégulation, mais il comporte un aspect important du confort dans les différentes traditions vernaculaires, de même qu'une problématique actuelle dans la conception écologique du design passif. Pour préserver la cohérence du catalogue, le traitement du principe se limite aux exemples concernant l'impact architectural direct dans le bâtiment.

En s'inspirant de l'outil d'étude du Corbusier des grilles climatiques, les dispositifs sont ici présentés selon un tableau indiquant l'élément naturel à la base du système (feu, air, eau et terre) et le principe régulateur auquel ils répondent (réchauffement, refroidissement, ventilation, éclairage, traitement des eaux).

	3.1 Feu	3.2 Air	3.3 Eau	3.4 Terre
Réchauffement	Hypocauste			Puit canadien
	Kang			
	Heliocaminus			
	Engawa			
Refroidissement	Engawa	Badgir	Tour à vent avec évaporation d'eau	Puit canadien
		Malquaf		
		Mashrabiya		
Ventilation	Kang	Badgir	Tour à vent avec évaporation d'eau	Puit canadien
	Engawa	Malquaf		
		Mashrabiya	Atrium	
Eclairage	Heliocaminus	Mashrabiya	Atrium	
	Engawa			
Traitement des eaux		Mashrabiya	Atrium	

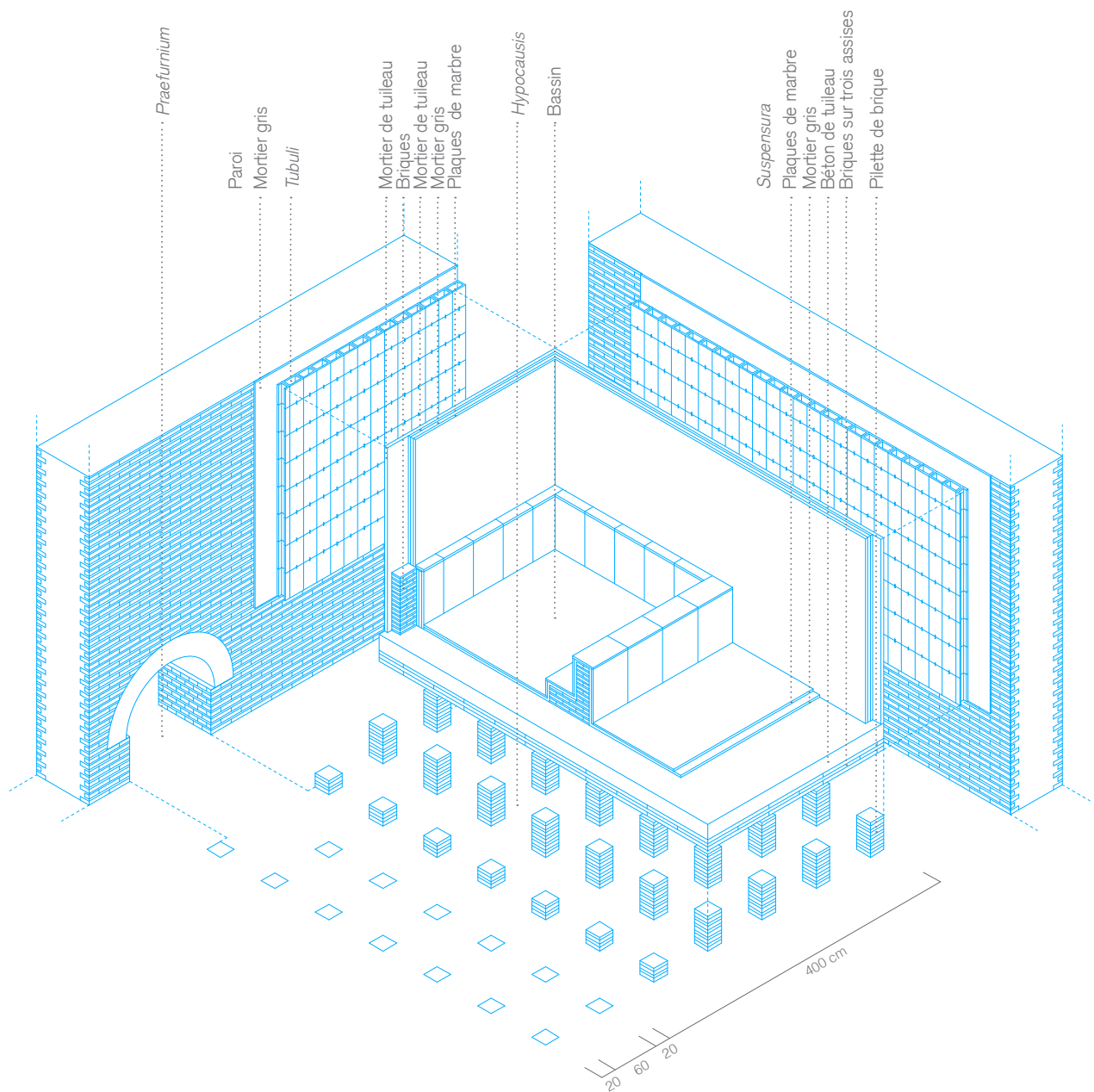
3.1 Feu

Hypocauste

Le premier moyen de chauffage romain est le même que celui de toutes les sociétés primitives, c'est-à-dire un foyer unique qui était placé dans l'atrium et fonctionnait comme source de chaleur. Il était également utilisé pour cuire les aliments. Du IV^{ème} au III^{ème} siècle av. J.-C., avec l'apparition des cuisines, le feu assume une fonction plus spécifique et se déplace. Le feu est élevé sur un plan de travail en maçonnerie, l'évacuation de la fumée et des vapeurs se fait au travers d'ouvertures dans la toiture. C'est le moment où l'on commence à recourir à d'autres solutions pour assurer le chauffage. Un des moyens imaginés était les braseros mobiles. Ces derniers comportaient cependant un gros risque d'intoxication, surtout la nuit avec les fenêtres fermées; c'est d'ailleurs pour cela que les Romains préféraient du bois très sec ou du charbon de bois. Ce système, en plus d'être dangereux, était médiocre en terme d'efficacité. Il était néanmoins très répandu dans les habitations, aussi car c'était le seul qui pouvait être utilisé dans les appartements des étages supérieurs. Même les premiers thermes, avant de connaître l'hypocauste, utilisaient aussi ce système de chauffage. La grande révolution en terme de chauffage dans le monde romain se matérialise avec l'hypocauste qui fait son apparition entre la fin du II^{ème} et le début du I^{er} siècle av. J.-C. Le terme témoigne de son origine grecque. Les exemples les plus anciens que l'on a pu retrouver se

trouvent à Pompéi, où le système est utilisé autant dans les habitations que dans les thermes (en particulier pour ce qui concerne les salles tièdes et chaudes). Grace aux ruines retrouvées, on remarque aussi que le système n'a pas évolué de manière conséquente au fil des siècles. Le système fonctionnait à partir d'un feu qui chauffait l'air en sous-sol. En circulant, l'air chauffait le sol par convection, et le sol rayonnait la chaleur dans la pièce. La pièce était ensuite réchauffée par le mouvement de l'air. Cette solution permettait la distribution de la chaleur de façon saine en évitant la fumée toxique. Le dispositif était composé par les éléments suivants:

- le *praefurnium*, installé au sous-sol et abritant le feu. Il s'agissait d'une simple ouverture à la base du mur, entre la pièce de service et le sous-sol de la pièce chauffée. La pièce de service, aussi au sous-sol, devait être accessible pour pouvoir entretenir le feu, et devait être suffisamment ventilée et disposer d'une réserve de carburant. La largeur du *praefurnium* dépendait des dimensions de la pièce à chauffer. Dans les thermes, plusieurs pièces de service munies de *praefurnium* étaient placées le long d'une galerie ouvrant sur l'extérieur (le long de la façade postérieure) pour faciliter les approvisionnements, alors que dans les habitations, le foyer, ainsi que le stockage du charbon et le matériel nécessaire à l'entretien du feu, se trouvaient généralement dans la cuisine.



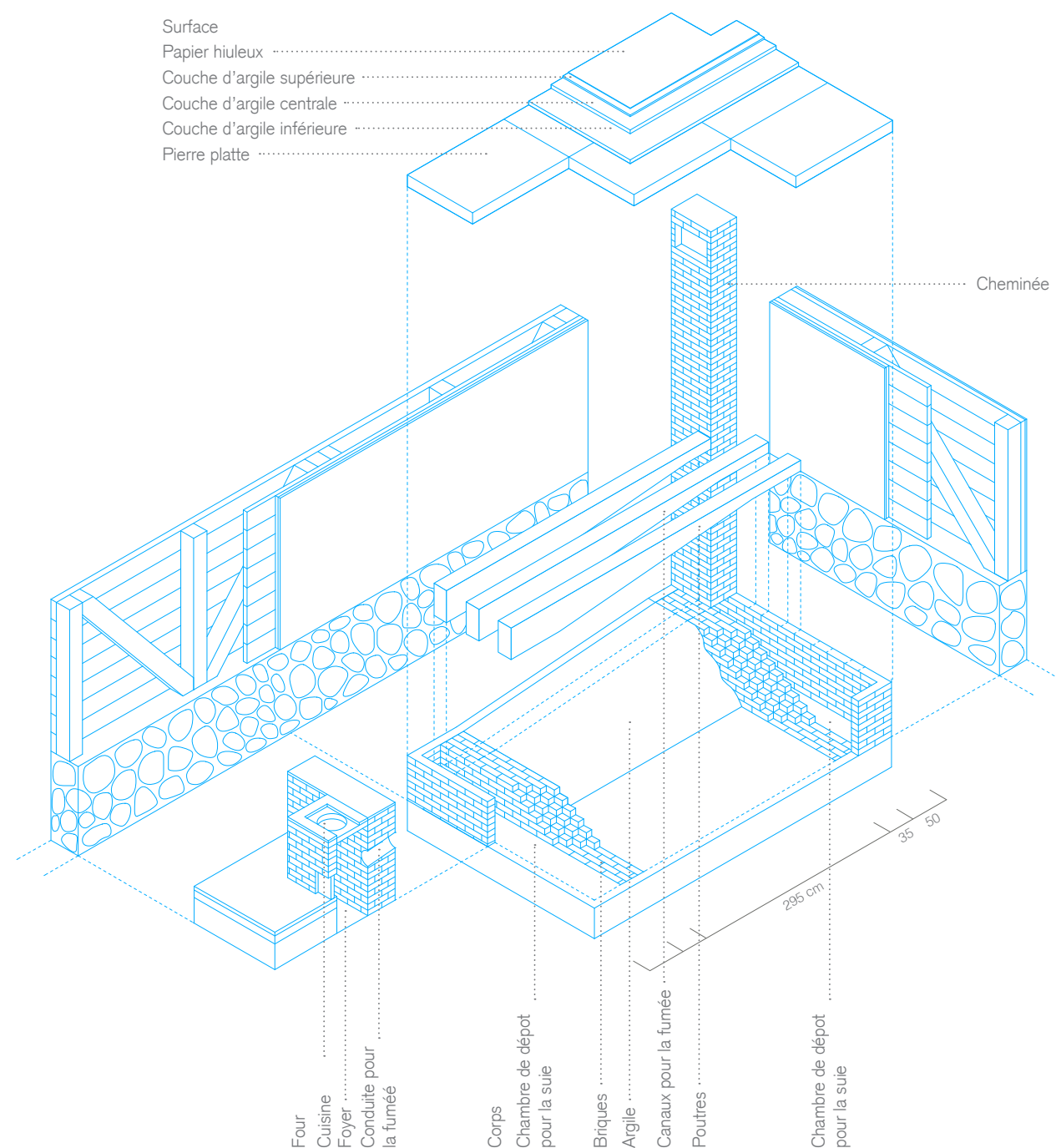
- l'*hypocaustis*, qui, dans sa signification latine (du grec *hypo*, "sous" et *kauston*, "bruler"), signifie le volume en sous-sol de la pièce à chauffer. La chaleur produite par le feu se répandait du *prefurnium* à cet espace pour être ensuite évacuée par des conduits verticaux intégrés aux murs. Le volume de l'*hypocaustis* était recouvert par un sol suspendu, dit la *suspensura*.
- la *suspensura*, représentant le sol suspendu qui recouvrait l'*hypocaustis*. Elle était soutenue par des pilettes d'environ 20 cm par côté, construites en brique et distancées d'environ 60 cm l'une de l'autre. Ces dimensions sont données par Vitruve dans *Les Dix Livres d'Architecture*, alors que la hauteur des pilettes pouvait varier entre 45 et 75cm. On connaît aussi des exemples où les pilettes sont moulées en une seule pièce de céramique, ce qui semble indiquer une sorte de standardisation des hypocaustes.
- le bassin d'eau, présent uniquement dans les établissements des thermes. Il était positionné sur la bouche du foyer, de façon à profiter au maximum de la chaleur. L'étanchéité était assurée grâce à une feuille de plomb couvrant la surface à la base du bassin, entre les grandes briques appuyées sur les pilettes et la première couche de béton.
- les parois, à travers lesquelles s'effectuait l'évacuation de la fumée et qui permettaient donc une récupération de chaleur supplémentaire. C'est pour cette raison

qu'au lieu d'installer une cheminée d'évacuation, les Romains avaient prévu des cavités entre les murs porteurs et le parement, qui montaient dans les parois jusqu'à la toiture. Les cavités étaient assurées d'abord par les *tegulae mammatae* et, par la suite - on estime à partir de la première moitié du I^{er} siècle av. J.-C. - par les *tubuli*. Les *tegulae mammatae* consistaient fondamentalement en des briques plates rectangulaires avec quatre à cinq éléments saillants (sortes de têtes, d'où le nom "tuile à mamelles"). Il existe des preuves d'une utilisation alternative des tuiles, c'est-à-dire qu'elles servaient également à l'isolation contre les infiltrations d'humidité. L'efficacité de ces éléments n'était toutefois pas optimale à cause de la faible épaisseur de la couche d'air entre les parois qui ne permettait pas un bon tirage vers le haut et provoquait parfois un retour de l'air vers le bas. C'est pour résoudre ce problème que les Romains ont inventé un deuxième système beaucoup plus efficace: les *tubuli*, constitués par des briques en céramique vidées à l'intérieur. Certaines possédaient aussi des ouvertures latérales pour permettre à l'air de passer d'une canalisation à l'autre en diffusant la chaleur de façon homogène. La couche des *tubuli* était collée au mur avec du mortier à partir de la hauteur de la *suspensura*, de telle façon que l'air qui circulait dans l'hypocauste pouvait ensuite passer dans les parois et les parcourir jusqu'à la toiture où les conduites aboutissaient dans des cheminées

qui assuraient le tirage et l'évacuation de l'air.

Si dans les villes méridionales telles que Pompéi, l'hypocauste était utilisé seulement dans les bains - autant privés que publics -, dans les régions avec un climat moins tempéré telles que la Gaule, ce système de chauffage était aussi adopté dans les maisons du rez-de-chaussée.¹

¹ Source: Adam, Jean-Pierre (1984). *La Construction Romaine, Matériaux et Techniques*. Paris: Picard; pp. 287-300.



Kang

L'ancien *kang* (qui signifie "sécher" en chinois) est un système intégré aux habitations traditionnelles chinoises qui remplit différentes fonctions telles que cuisiner, dormir, réchauffer et ventiler. De façon similaire à l'hypocauste, il peut être décrit comme une plateforme réchauffée. Le système s'est développé pendant les périodes Printemps et Automne de la dynastie Zhou, entre 722 et 481 av. J. -C.. Le même type de dispositif existait dans d'autres cultures, chez les Romains mais aussi en Corée, où il était appelé *ondol*.²

Sa conception est probablement le résultat d'une combinaison d'idées et techniques. Les Chinois étaient producteurs de poteries depuis la période néolithique et ils savaient fondre le cuivre et le fer. Ces facteurs ont certainement influencé la réalisation du *kang*. Toutefois, le dispositif a suivi un processus complexe relié aux idées sur le mode de vie et les différentes théories architecturales. Depuis l'Antiquité, les Chinois mangeaient, s'asseyaient et dormaient directement sur le sol, mais pendant la période des dynasties du Nord et du Sud (317 - 589 apr. J.-C.), le concept de "meuble haut" est devenu courant grâce au commerce, la migration et la guerre. Ces phénomènes ont eu un impact

dans la façon de s'asseoir, en introduisant les chaises et par conséquent un nouveau style de vie. Le *kang* évolue dans le nord de la Chine en héritant des caractéristiques du lit pour devenir un objet domestique, avec la particularité technique de régulateur du climat. Le changement n'a pas eu lieu de façon instantanée: pendant la période de la dynastie Tang (618 - 907 apr. J.-C.), les deux façons pour s'asseoir étaient utilisées. D'ailleurs, la culture de s'asseoir au sol est maintenue encore aujourd'hui dans les populations mongoles, coréennes et japonaises. Dans sa forme originelle, le *kang* occupait entre un tiers et la moitié d'une pièce, mais il existe une variante, développée pendant la dynastie Qing (1644 - 1911 apr. J.-C.) et appelée *dikang*, où le dispositif occupe la surface totale de la pièce. Ces deux variantes sont similaires mais elles favorisent le style de s'asseoir par terre ou l'utilisation des meubles. Le *kang* était utilisé en Chine du Nord alors que le *dikang* était répandu en Corée du Nord (avec le nom de *ondol*). Tous les deux étaient utilisés en Mandchourie (région correspondant aujourd'hui au Nord Est de la Chine et une partie de la Russie). Le développement du *kang* a donc eu un impact direct dans le style de vie et a déterminé un changement dans l'architecture vernaculaire chinoise.

² Source: Zhuang, Li, Chen & Guo (2009). *Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China - A review*. In: Energy and Buildings, vol. 41. Elsevier, pp. 111-119.

Le *kang* classique pouvait être classé selon deux catégories: le type en I et le type en U. Le premier type était le plus diffusé alors que le second s'est développé en relation à des activités spécifiques et n'apparaît que dans l'architecture de la Mandchourie. Les deux types étaient constitués par les mêmes trois composantes :

- le four, généralement à l'intérieur de la maison, en correspondance de la cuisine et servant simultanément les deux systèmes. Il existe une variante où le four était placé à l'extérieur de la maison, sur la véranda protégée par le toit, et il communiquait avec le corps du *kang* à travers un conduit dans le mur.³
- le corps du *kang*, qui se trouve surélevé par rapport au sol de la pièce. Les dimensions moyennes d'un *kang* se basaient sur le corps humain: la largeur variait entre 1.8 et 2 mètres (la hauteur d'une personne adulte), la hauteur était comprise entre 0.6 et 0.7 mètre (correspondant au plan de travail de la cuisine) et la longueur correspondait généralement à celle de la pièce. Le *kang* est constitué par une plateforme solide de terre ou argile, sur laquelle prennent place plusieurs conduites construites en briques (hauteur 15-25 cm, largeur 20-28 cm) avec une pente de 3% pour attirer l'air du four à la cheminée. Il existe

différentes possibilités en ce qui concerne la disposition des conduites à l'intérieur du *kang*, ce qui implique différents impacts sur la circulation de la fumée et donc sur la température. La disposition des conduites détermine le temps de permanence de la fumée avant de quitter le système et donc l'échange de chaleur entre la fumée et les planches en-dessus. Pour résumer le principe, plus il y a de résistance dans les conduites, plus grand est le temps de permanence de la fumée et donc le temps de réchauffement des planches. Toutefois, la résistance n'est pas favorable à la bonne circulation de l'air et risque de causer des refoulements.

- La surface du *kang* est composée de plusieurs couches: des briques couvertes en plâtre (ou alternativement des pierres plates) sont disposées directement sur les conduites, ensuite on trouve un mélange d'argile et paille, suivi par un mélange d'argile et sable, couvert successivement par un mélange de chaux et de fibres de chanvre et pour finir une couche de papier huilé. La surface, qui maintient une température entre 25 et 30°C, est utilisée pendant la journée pour les activités de temps libre et pendant la nuit pour dormir.
- la cheminée, utilisée pour l'évacuation de la fumée et qui débouche sur l'extérieur.

Le fonctionnement du système se base sur l'utilisation de la chaleur résiduelle de la fumée d'une cuisinière adjacente au *kang*. Dans le *kang*, les planches libèrent la chaleur de la fumée par radiation et par convection dans la chambre. Deux phénomènes importants d'échanges de chaleur et de mouvement de l'air sont impliqués dans le système. Le premier consiste en la circulation de la fumée guidée par la force ascensionnelle (qui est produite par la différence de température entre l'air dans le *kang* et celui provenant du four) et le vent. La fumée chaude générée dans le four rentre dans le *kang* à travers un conduit qui connecte directement le four au réservoir de suie. La chaleur chauffe donc le corps du *kang* qui fonctionne comme un échangeur de chaleur et la température de sa surface augmente. La fumée est alors aspirée par la cheminée par convection et quitte le *kang*. La pression du vent dépend de la vitesse du vent à l'extérieur. Cette caractéristique a ainsi un impact sur l'extraction de la fumée à travers la cheminée. Avec le vent favorable, la bonne circulation de la fumée est assurée. Cependant, dans une situation avec un vent allant dans le sens opposé, la fumée peut circuler dans la mauvaise direction et ainsi engendrer des refoulements.

Le deuxième phénomène est celui du stockage thermique des planches du *kang*. En effet, ces planches sont constituées généralement de matériaux avec un potentiel de stockage thermique élevé, tels que le béton ou la pierre. Les planches se réchauffent grâce à la fumée au moment où le four est allumé pour la prépara-

tion du repas et elles restent chaudes pendant plusieurs heures par la suite.

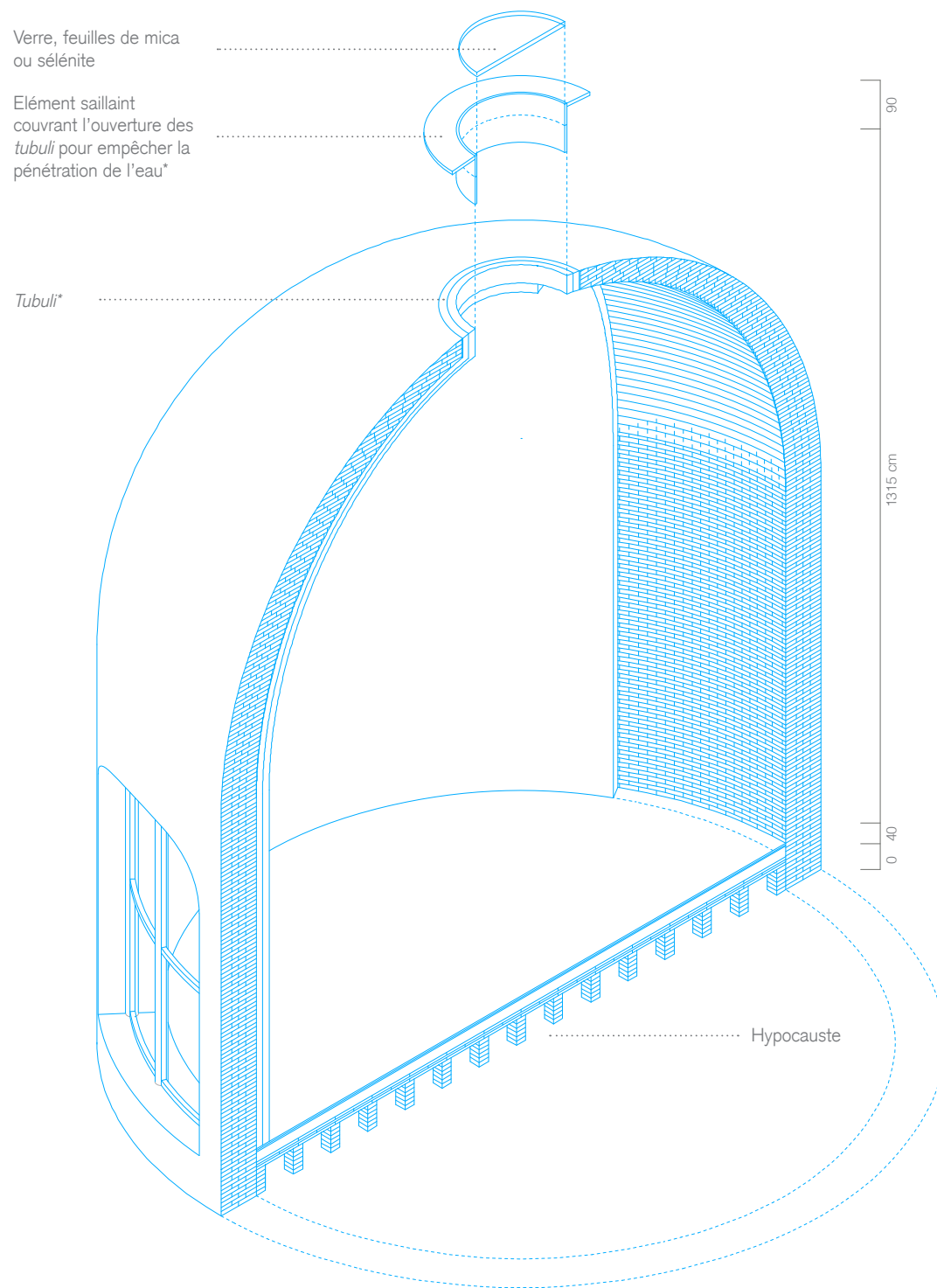
Il est intéressant de noter que ce dispositif, par ailleurs similaire à l'hypocauste romain, est encore aujourd'hui utilisé dans 85% des maisons rurales de la Chine du Nord. Certaines maisons peuvent disposer de plusieurs *kang* pour permettre de séparer les activités et assurer l'intimité aux différents membres de la famille. D'un point de vue social, le *kang* joue un rôle important en tant que centre social de la famille (correspondant au foyer primitif). C'est l'endroit où plusieurs activités domestiques ont lieu. Dans les temps plus modernes, le *kang* est passé de sa position originelle (où la base du *kang* était posée sur le sol de la pièce) à une position surélevée, avec un vide d'air entre le plancher et la base du *kang*. En 1990, le gouvernement chinois a encouragé cette nouvelle forme combinée avec une amélioration du four, ce qui rend le *kang* plus efficace dans le réchauffement de la pièce en diminuant aussi la consommation de combustible et les temps de combustion. Cette solution a aussi eu un impact bénéfique sur la pollution à l'intérieur de l'habitat qui était problématique dans le *kang* au sol et qui était la cause des nombreuses maladies liées à l'intoxication.⁴ Pour conclure, il est intéressant de remarquer que dans ce cas, au contraire du cas romain, c'est le dispositif en lui-même qui devient partie de la culture et de la vie sociale. Les Romains avaient la culture des thermes, mais l'hypocauste n'était qu'un moyen impliqué dans

³ Source: Guo, Qinghua (2002). *The chinese Domestic Architectural Heating System [Kang]: Origins, Applications and Techniques*. In: Architectural History, vol. 45. SAHGB Publications Limited, pp. 32-48

la construction de ces thermes. A l'inverse, le *kang* a un impact direct sur la spatialité et dans l'usage de la pièce. Ces considérations mènent à l'hypothèse que le *kang* a survécu grâce aux améliorations intervenues au fil des siècles, mais aussi grâce à son intégration dans la culture chinoise. Il est d'ailleurs fortement improbable que le *kang* disparaisse prochainement des maisons vernaculaires du nord de la Chine.⁵

⁴ Source: Zhuang, et al. (2009). *Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China - A review*. In: Energy and Buildings, vol. 41. Elsevier, pp. 111-119.

⁵ Source: *Ibidem*



*Hypotèses

Heliocaminus

Pour garantir le chauffage, surtout dans le cadre des bains romains qui nécessitaient une grosse quantité d'eau chaude, la demande de bois était énorme. Pour cette raison, des forêts entières étaient désignées expressément pour l'approvisionnement du bois destiné à l'hypocauste. Dans le texte de Vitruve, on retrouve la recommandation de s'appuyer sur le rayonnement solaire en tant qu'aide pour le réchauffement. Le conseil qu'il donne est de construire selon la bonne orientation, en évitant d'orienter les bâtiments vers le nord. De plus, pour les complexes des bains, les Romains construisaient généralement les façades sud entièrement en verre. Il en résulte donc naturellement que, à la fin du 1^{er} siècle apr. J.-C., les Romains connaissaient et utilisaient déjà le potentiel de l'énergie solaire. Pour illustrer cette pratique, il est intéressant de mentionner un dispositif qui exploite totalement cette connaissance: l'*heliocaminus*, littéralement "chaudière solaire". Le nom indique que le potentiel de réchauffement de cette pièce peut franchir des températures largement supérieures aux autres locaux du bâtiment. Le plan de la pièce est généralement rond, surmonté d'une coupole avec une ouverture zénithale. D'autres ouvertures sont placées au sud-ouest,

probablement couvertes en verre ou en un autre matériel transparent, tel que des feuilles de mica ou de sélénite.

Ces matériaux fonctionnaient comme des trappes pour le soleil, en permettant la pénétration du rayonnement à l'intérieur mais en empêchant à la chaleur de s'enfuir. Les Romains utilisaient ces trappes solaires aussi pour la cultivation des plantes, pour en accélérer la croissance et pour la production des fruits pendant l'hiver, d'une manière similaire à nos serres actuelles.⁶

Il faut se rappeler que les Romains avaient développé un processus de soufflage du verre et ils savaient produire du vitrage plat pour en constituer des fenêtres.

Selon les études de E. D. Thatcher, la température dans les salles chauffées des bains romains devait avoisiner les 40°C, et selon les calculs de James W. Ring, pendant les journées ensoleillées, le soleil à lui seul pouvait fournir la plus grande part de l'énergie nécessaire pour maintenir cette température.⁷

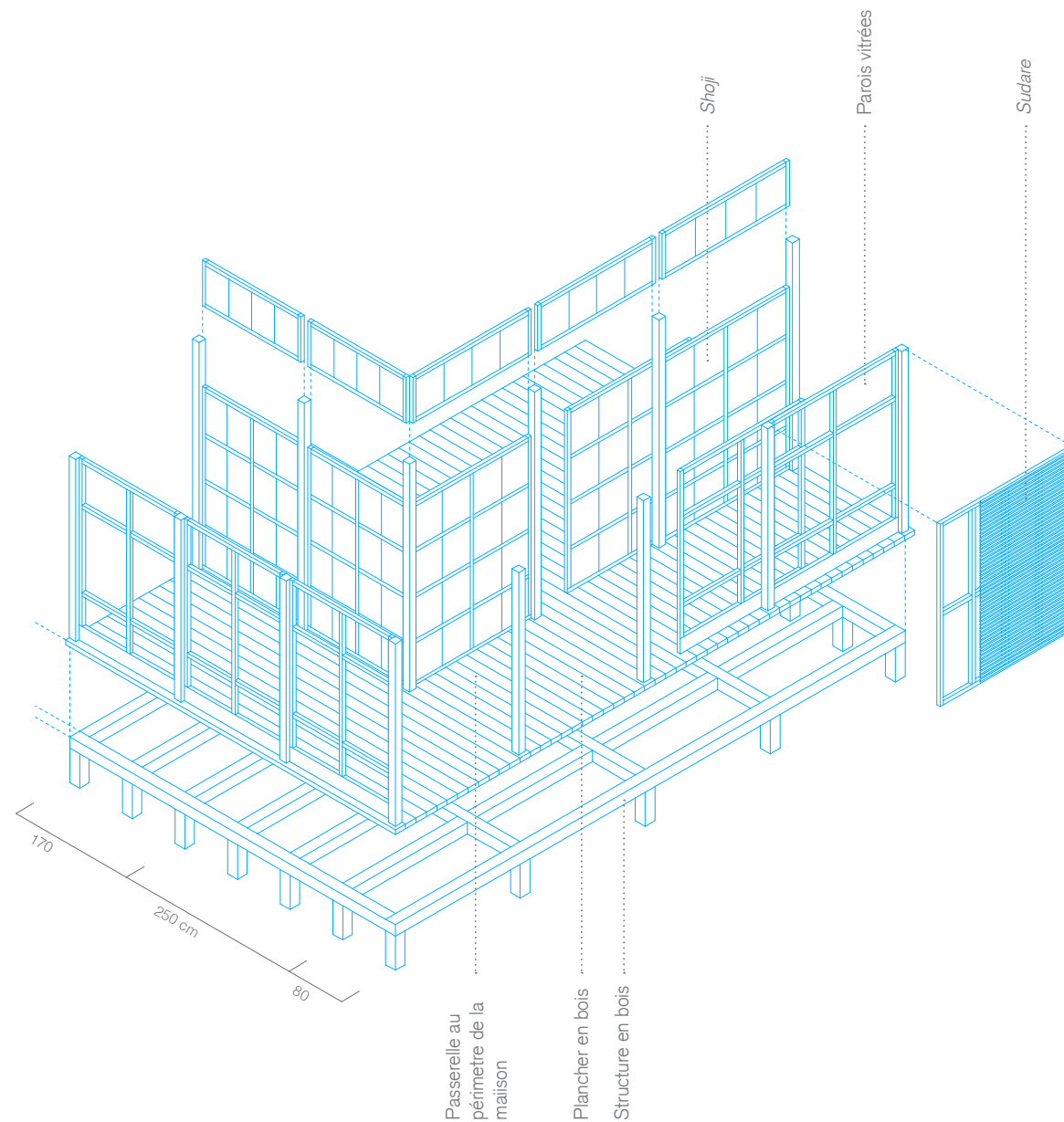
Les *heliocamini* étaient très diffusés et utilisés à l'époque romaine. Parallèlement à la croissance démographique, il y a eu une augmentation de la construction des bâtiments et donc des obstacles à l'accès solaire pour les heliocamini existants. Des preuves des disputes nous sont par-

⁶ Source: Perlin, John (2013). *Let it Shine: The 6'000-Year Story of Solar Energy*. California: New World Library; pp.1-77.

⁷ Source: Ring, James W (1996). *Windows, Baths, and Solar Energy in the Roman Empire*. In: *American Journal of Archaeology*, vol. 100. Archaeological Institute of America, pp. 717-724.

venues grâce au juriste Ulpian, qui a vécu durant le II^{ème} siècle ap. J.-C.. Dans ses écrits, il prend le parti du propriétaire en déclarant que l'accès d'un *heliocaminus* à la lumière solaire ne peut pas être violé. On retrouve la même sentence dans le *Code Justinien* du VI^{ème} siècle, ce qui démontre que l'utilisation des *heliocamini* a perduré dans le temps.⁸

⁸ Source: Perlin, John (2013). Let it Shine: The 6'000-Year Story of Solar Energy. California: New World Library; pp.1-77.



Engawa

L'architecture méditerranéenne est caractérisée pas la présence d'un espace de transition, semi-ouvert, dans lequel les conditions thermiques sont, elles aussi, intermédiaires entre l'intérieur et l'extérieur. Ces espaces fonctionnent comme des modérateurs climatiques, mais historiquement ils ont joué aussi un rôle social primaire à une échelle micro. Ce type d'espace a toujours existé dans différents pays avec des caractéristiques spécifiques à la culture et au climat. Dans l'histoire méditerranéenne, de nombreuses variations de ces espaces semi-ouverts se sont développés avec les noms de portiques, patios, loggias etc. Ces conditions intermédiaires impliquent la nécessité d'adapter le bâtiment aux changement extérieurs dynamiques, en combinant le besoin de refroidir pendant l'été avec celui de réchauffer en hiver. Pour cette raison, les espaces de transition sont considérés comme des stratégies passives importantes, principalement pour leurs enjeux liés à la modulation du rayonnement solaire direct. On peut diviser ces espaces en deux types différents : le type central, comme par exemple la cour, le patio et l'atrium; et le type en périmètre, comme le portique, la loggia, le balcon, le péristyle. Dans les pays chauds et secs, les cours petites

et profondes sont utilisées pour leur espace ombragé pendant la majeure partie de la journée, mais aussi parce qu'elles bloquent le vent chaud qui pourrait disperser l'air frais. Dans l'architecture grecque et romaine, ces dispositifs protègent contre le rayonnement, le vent et la pluie en créant des espaces habitables semi-ouverts. La présence d'un espace ombragé réduit les fluctuations de température et produit un environnement plus agréable. Toutefois, la capacité à protéger contre les facteurs environnementaux extérieurs dépend de la configuration du dispositif ainsi que des matériaux dont il est composé. Il est intéressant de remarquer comment l'avènement du verre dans l'architecture moderne a rendu possible la transformation de ces deux types d'espace traditionnels: le type central est devenu atrium et le type en périmètre s'est transformé en jardin d'hiver.⁹

Un exemple particulier de portique est représenté par l'*engawa*, élément originaire de l'architecture vernaculaire japonaise. Même s'il avait été partiellement oublié avec l'urbanisation, le dispositif est en train de réapparaître aujourd'hui à travers des réinterprétations modernes. Un des plus anciens exemples encore existants d'*engawa* se trouve dans la *Maison Hakogi*. Il s'agit de la plus vieille maison vernaculaire existante et

⁹ Source: Poggi, Rogora & Scudo (2014). *Evaluation of Environmental Control of Transitional Microclimatic Spaces in Temperate Mediterranean climate*. In: 30th International PLEA Conference. CEPT University, Ahmedabad: PLEA.

elle est située à Kobe au Japon. Dans la maison, datant de la période Muromachi (1336 - 1573), il est possible d'observer le dispositif.¹⁰ Cet espace est très utile dans la régulation du climat de la maison traditionnelle japonaise. Le *engawa*, qui est souvent traduit par le terme "véranda", se compose d'une étroite passerelle en bois, entourant la maison (étymologiquement, le préfixe "*en*" se réfère à une notion de périphérie) et couverte par un avant-toit surplombant. Il se trouve au niveau du sol intérieur, en continuité avec le plancher, et donc surélevé par rapport à l'extérieur. L'espace est délimité des deux côtés par des panneaux coulissants. Du côté intérieur, donc entre le *engawa* et la maison, sont placés les *shoji*, les traditionnelles parois coulissantes composées de papier de riz translucide encadré en bois. Vers l'extérieur on retrouve des parois vitrées, qui peuvent être ensuite protégées par une autre couche: soit les *sudare*, que l'on peut comparer à des stores composés de lattes en bambou fixées avec de la ficelle, soit les *amado*, des panneaux solides en bois. Culturellement, cet espace est considéré comme espace de transition entre la maison et le jardin, un espace de communication, une interface

entre intérieur et extérieur, entre l'homme et la nature.¹¹ Il est responsable de plusieurs fonctions, telles que le confort thermique, mais il règle aussi la circulation et des aspects de la vie sociale. Traditionnellement, il était l'espace désigné pour recevoir les invités, mais aussi pour s'asseoir, contempler le jardin et boire du thé, ou encore pour des fonctions plus pratiques tels que sécher les légumes ou les vêtements.¹² Grace aux deux limites flexibles, le *engawa* représente un espace perméable, ce qui permet une multitude de configurations:

- Les deux écrans sont ouverts. Cette configuration crée un espace continu entre intérieur et extérieur, en créant des relations avec la nature mais aussi avec les voisins. Dans le cadre climatique, cette disposition permet la ventilation transversale dans la maison et la baisse de température subséquente. Il est possible de fermer les *§* qui empêchent le rayonnement solaire direct dans la maison mais permettent encore à l'air de circuler librement.
- Les parois vitrées extérieures sont fermées alors que les *shoji* sont ouverts. Cette configuration permet un gain de chaleur à l'inté-

rieur grâce au rayonnement solaire à travers les vitres. L'*engawa* est traité ici comme espace supplémentaire intérieur. Cependant, cette configuration ne protège pas des regards extérieurs.

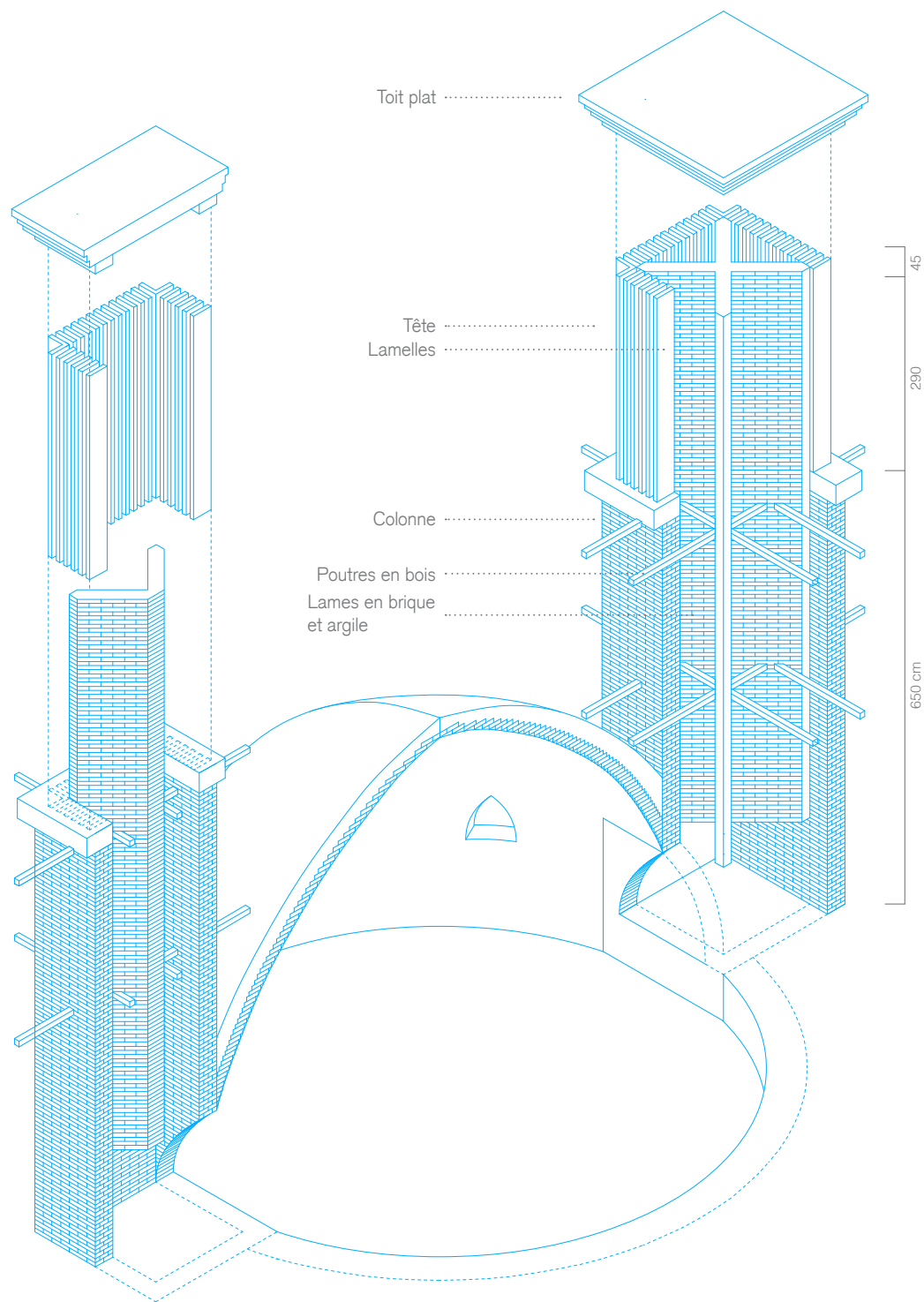
- Les parois vitrées extérieures sont ouvertes alors que les *shoji* sont fermés. L'*engawa* devient espace extérieur ventilé, ce qui permet de refroidir aussi l'intérieur de la maison. Les *shoji* permettent la pénétration de la lumière mais protègent l'intimité, tout en isolant l'intérieur.
- Les parois vitrées et les *shoji* sont fermés. Cette configuration sépare l'espace intérieur de l'*engawa*, tout en gardant le deuxième fermé. L'*engawa* fonctionne donc comme un solarium et au même temps permet d'isoler les pièces à l'intérieur. La lumière est libre de pénétrer dans la maison grâce aux *shoji* translucides.
- Les deux couches sont fermées et l'extérieur est protégé avec les *amado*. On atteint la protection intérieure maximale, la maison peut affronter les températures extrêmes des nuits hivernales et les ouragans.¹³

¹⁰ Source: Kimura, Ken-ichi (2007). *Design Features Evolved in a Vernacular House under Hot and Humid Climate with Measured Results of Indoor Environment*. In: PLEA2007 - The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture. National University of Singapore: PLEA, pp. 499-504.

¹¹ Source: Muramoto, Katsuhiko. *Relational Bodies in Japanese Architecture: Sustainability Reconsidered*. In: Inter-Disciplinarity.net. Consulté en decembre 2016.

¹² Source: Kimura, Ken-ichi (2007). *Design Features Evolved in a Vernacular House under Hot and Humid Climate with Measured Results of Indoor Environment*. In: PLEA2007 - The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture. National University of Singapore: PLEA, pp. 499-504.

¹³ Source: Muramoto, Katsuhiko. *Relational Bodies in Japanese Architecture: Sustainability Reconsidered*. In: Inter-Disciplinarity.net. Consulté en decembre 2016.



3.2 Air

Badgir

Les tours à vent étaient déjà utilisées des milliers d'années auparavant en Egypte et existent toujours au Moyen-Orient. Elles s'inscrivent dans le cadre des stratégies utilisées dans les pays chaud et secs typiques de cette région. Les tours à vent peuvent intervenir sur la direction du vent pour l'injecter dans le bâtiment. Dans certains contextes urbains et dans d'autres endroits avec peu de vent, les tours à vent sont utilisées pour maximiser la ventilation et améliorer le climat sévère de la région arabe. On observe différentes variantes en Iran, Egypte, Iraq et Pakistan, chaque pays ayant construit les tours par rapport au vent dominant dans la région. Quand, dans une région, il y a une direction prédominante du vent, les tours sont toutes orientées de la même façon. A l'inverse, dans les régions où la direction du vent varie, les tours présentent plusieurs ouvertures et prennent le nom de *badgir*. Cette dernière variante permet de capturer le vent provenant de plusieurs directions. De plus, la tour est conçue de telle façon qu'à chaque heure de la journée et pendant toute l'année, deux cotés soient toujours à l'ombre et deux cotés soient toujours exposés au vent. Un double flux d'air parallèle est donc déterminé: le premier a pour fonction d'extraire l'air chaud du bâtiment alors que le deuxième permet d'insérer de l'air frais.

Les tours à vent se composent de quatre éléments principaux:

- la colonne, le corps du dispositif, qui est gé-

néralement à section carrée, rectangulaire ou en forme de prisme. Dans le *badgir*, grâce à la colonne, le dispositif peut atteindre une hauteur variable entre 8 et 50 mètres, déterminée par rapport à l'altitude à laquelle le vent souffle. On remarque des petites poutres en bois qui sortent horizontalement de la structure. Elles travaillent en traction pour consolider les parois internes en les fixant à celles externes, et elles augmentent la résistance de la tour à la poussée du vent. Les poutres n'étaient pas coupées pour pouvoir être réutilisées en tant qu'échafaudages pour les travaux d'entretien.

- La tête, où se localisent les ouvertures protégées par un système de lamelles verticales avec différentes fonctions. Elles renforcent la structure, elles empêchent aux oiseaux de rentrer dans le conduit et enfin elles ont une fonction ornementale. Dans l'exemple iranien, les lamelles sont largement espacées à cause de la vitesse considérable du vent. On distingue les ouvertures pour l'accès de l'air, avec des volets qui peuvent être fermées quand la situation le demande, et une ouverture qui garantit l'évacuation de l'air.
- les lames, qui se trouvent à l'intérieur de la colonne et divisent le conduit principal en plusieurs puits d'air séparés, orientés dans autant de directions différentes. Ces parois sont construites en argile et en brique.
- le toit, qui est plat dans le dispositif iranien, mais qui peut aussi être incliné dans des

autres situations.¹⁴

Les typologies des tours à vent dépendent en général de l'arrangement des lames internes et du nombre d'ouvertures. Le but du dispositif, quelle que soit sa forme, est de récupérer l'air frais à une hauteur élevée de l'atmosphère pour la diriger dans les espaces intérieurs par le biais d'un conduit vertical afin de provoquer le processus du rafraîchissement sensible (qui fonctionne grâce au mouvement de l'air).¹⁵

Toutefois, les tours fonctionnent de deux façons différentes en absence et en présence du vent. Dans le premier cas, le dispositif marche comme une cheminée solaire: il absorbe la chaleur pendant la journée, en la stockant dans les murs et dans le conduit, pour après la relâcher à l'extérieur du bâtiment pendant la nuit en créant un courant ascendant. Les jours suivants, l'air chaud extérieur rentre dans le conduit de la tour et baisse sa température grâce à l'échange de chaleur avec les murs refroidis pendant la nuit. L'air frais descend dans la maison par convection, et, après avoir circulé à l'intérieur du bâtiment, sort par l'orifice d'évacuation de la tour et par les fenêtres. Pendant la nuit, l'air frais

pénètre dans le bâtiment à travers la tour et les fenêtres, absorbe la chaleur et l'air pollué et ressort à travers l'ouverture d'évacuation de la tour. En présence de vent, grâce à la vitesse de l'air et à la différence de pression entre le haut de la tour et l'intérieur du bâtiment, l'air est poussé dans la tour et circule dans le bâtiment, pour ensuite le quitter à travers les fenêtres et le conduit d'évacuation du dispositif.

Il est possible de contrôler les ouvertures de la tour de façon à régler la circulation de l'air.¹⁶

Dans certains cas, les tours peuvent être munies d'un grillage pour filtrer la poussière de l'air. Le filtre peut même accueillir du charbon dans le but de filtrer les mauvaises odeurs. Les dispositifs doivent toutefois être dimensionnés par conséquence, puisque les filtres causent une perte de pression de l'air en réduisant la ventilation naturelle.

Il est important de remarquer que cet élément architectural n'était pas utilisé seulement dans les maisons privées, mais aussi dans les bâtiments publics. Pendant la période du califat abbasside (750 - 1258), tous les hôpitaux étaient équipés avec ces dispositifs. Les badgir étaient

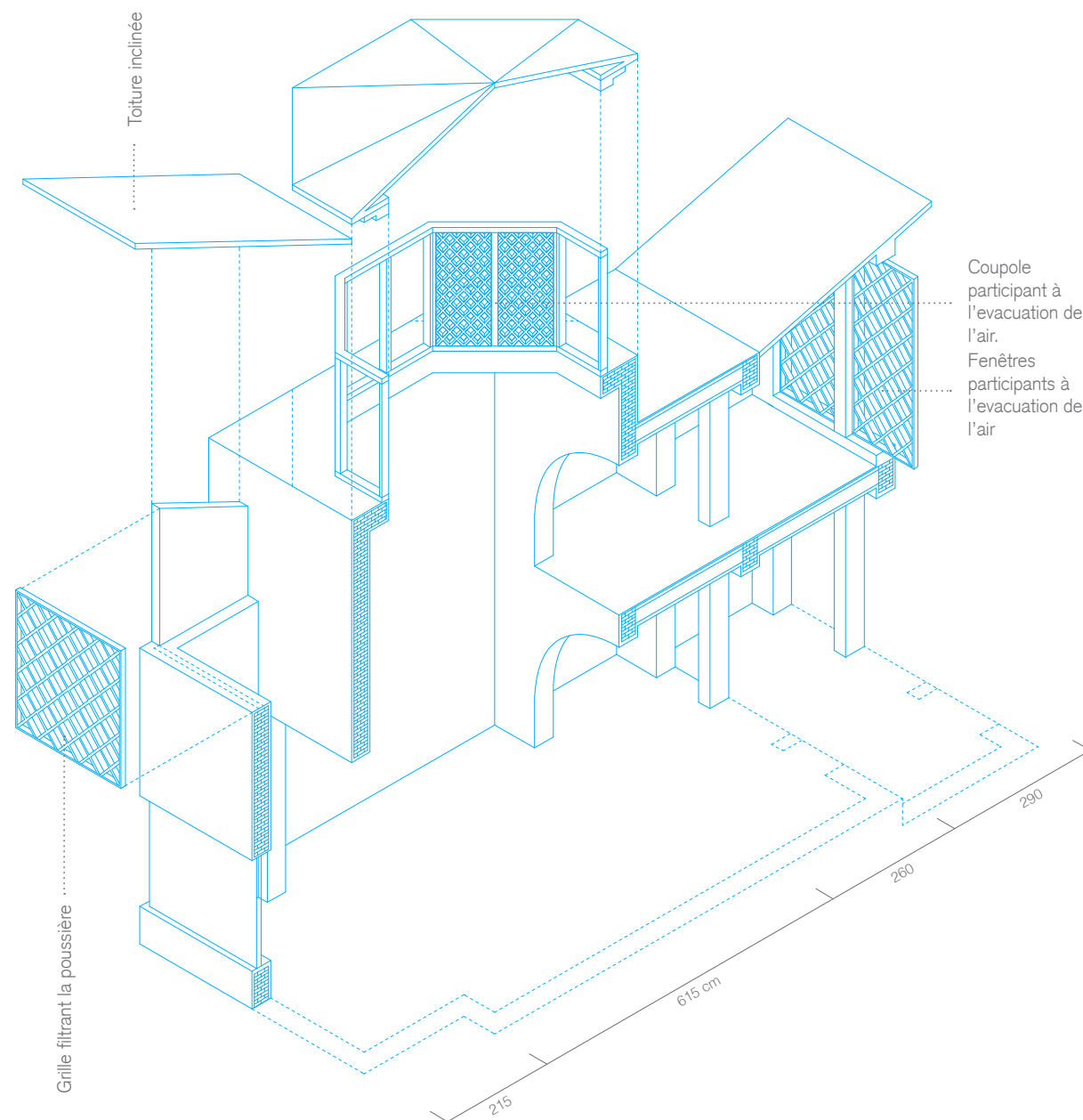
aussi utilisés pour ventiler les citernes de stockage d'eau destinée à l'utilisation domestique.¹⁷

¹⁴ Source: Boloorch, Hossein & Egtesadi, Nahal (2013). *Investigation of the Middle East Windcatchers and (comparison between Windcatchers in Iran and Egypt in Terms of Components)*. In: International Journal of Architecture and Urban Development, vol.4. Iran: Islamic Azad University, pp. 87-93.

¹⁵ Source: Suliman, Ayman Al (2014). *Wind Catchers and Sustainable Architecture in the Arab World*. In: Journal of Civil and Environmental Research, vol. 4. Disponible en ligne sur iiste.org, pp130-136. Téléchargé en octobre 2016.

¹⁶ Source: Boloorch, Hossein & Egtesadi (2013). *Investigation of the Middle East Windcatchers and (comparison between Windcatchers in Iran and Egypt in Terms of Components)*. In: International Journal of Architecture and Urban Development, vol.4. Iran: Islamic Azad University, pp. 87-93.

¹⁷ Source: Suliman, Ayman Al (2014). *Wind Catchers and Sustainable Architecture in the Arab World*. In: Journal of Civil and Environmental Research, vol. 4. Disponible en ligne sur iiste.org, pp130-136. Téléchargé en octobre 2016.



Malqaf

En Egypte, les tours à vents sont mono-orientées et prennent le nom de *Malqaf*. Le *Malqaf* est un dispositif vernaculaire primaire qui a été dessiné et intégré dans l'architecture traditionnelle de cette région. Les premières traces de ce principe datent de la période pharaonique. D'autres exemples ont été retrouvés dans des maisons de Tal Al-Amarna, datant de la dix-huitième dynastie (1543 - 1292 av. J.-C.).

Les composantes varient par rapport à la version iranienne:

- La colonne est absente dans le *Malqaf*. La section du dispositif est généralement carrée ou rectangulaire, mais le corps n'est pas visible à l'extérieur du bâtiment puisque les vents favorables soufflent à une faible altitude.
- L'ouverture. A cause du climat égyptien qui se caractérise par la présence des vents défavorables qui transportent de la poussière, l'ouverture doit être mono-orientée vers la direction prédominante du vent favorable, typiquement le nord-ouest. De plus, les lamelles sont remplacées par une grille au maillage réduit pour prévenir le passage de la poussière

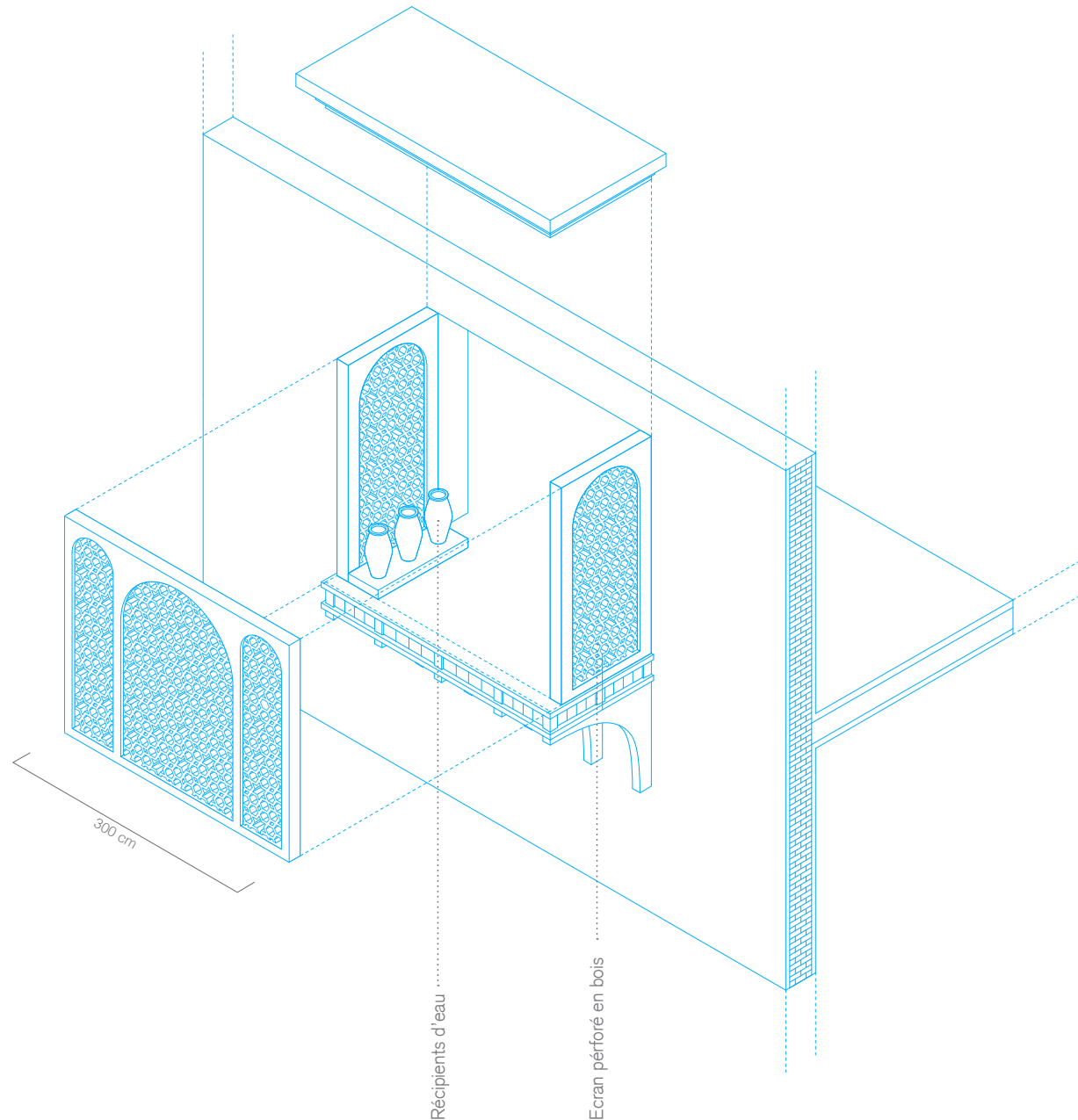
transportée par le vent. La dimension des trous a un impact sur la vitesse et le débit d'air qui pénètre dans le bâtiment. Il faut donc dimensionner l'ouverture de conséquence.

- Le toit du *Malqaf* est en pente pour augmenter la dimension de l'ouverture et donc la quantité d'air qui pénètre dans le bâtiment, en réponse au type de vent qui se caractérise par des vitesses plus faibles par rapport à la région iranienne.¹⁸

D'une manière générale, le dispositif fonctionne de la même façon qu'une tour à vent. La seule différence est que, dans cette version, l'air doit sortir par les fenêtres et la porte puisque le *malqaf* ne dispose pas d'un conduit d'évacuation. Dans les bâtiments d'échelle plus grande, où le débit d'air est plus important, une coupole est aménagée sur le toit. En jouant une double fonction, elle est à la fois une source de lumière et un moyen pour l'évacuation de l'air qui monte par convection.¹⁹

¹⁸ Source: Boloorch, Hossein & Egtesadi, Nahal (2013). *Investigation of the Middle East Windcatchers and (comparison between Windcatchers in Iran and Egypt in Terms of Components)*. In: International Journal of Architecture and Urban Development, vol.4. Iran: Islamic Azad University, pp. 87-93.

¹⁹ Source: Tavakolinia, Fereshteh (2011). *Wind-Chimney: Integrating the Principles of a Wind-Catcher and a Solar-Chimney to Provide Natural Ventilation*. A Thesis presented to the Faculty of California Polytechnic State University. San Luis Obispo.



Mashrabiya

Le *mashrabiya* était un élément spirituel, décoratif et fonctionnel de l'architecture islamique. Il a été reconnu en tant qu'élément significatif de l'architecture du Moyen-Orient à partir du Moyen-Âge jusqu'au XVIII^{ème} ou XIX^{ème} siècle. Originellement, le *mashrabiya* traditionnel peut être considéré comme une boîte en bois qui enfermait les fenêtres ou les balcons du dernier étage d'un bâtiment. L'espace à l'intérieur pouvait être utilisé en tant que zone pour s'asseoir, mais aussi comme étagère pour les récipients d'eau à refroidir. Le dispositif assurait aussi d'autres fonctions telles que la protection solaire et la protection de l'intimité.

Les premiers exemples du dispositif dont on a pu retrouver des preuves aujourd'hui sont situés en Egypte et datent du XII^{ème} siècle. Le *mashrabiya* est ensuite rentré dans l'usage commun à partir du XIV^{ème} siècle.

Le dispositif était construit typiquement selon deux configurations: la forme rectangulaire, employée majoritairement en Egypte, et la forme semi-circulaire utilisée surtout en Libye.

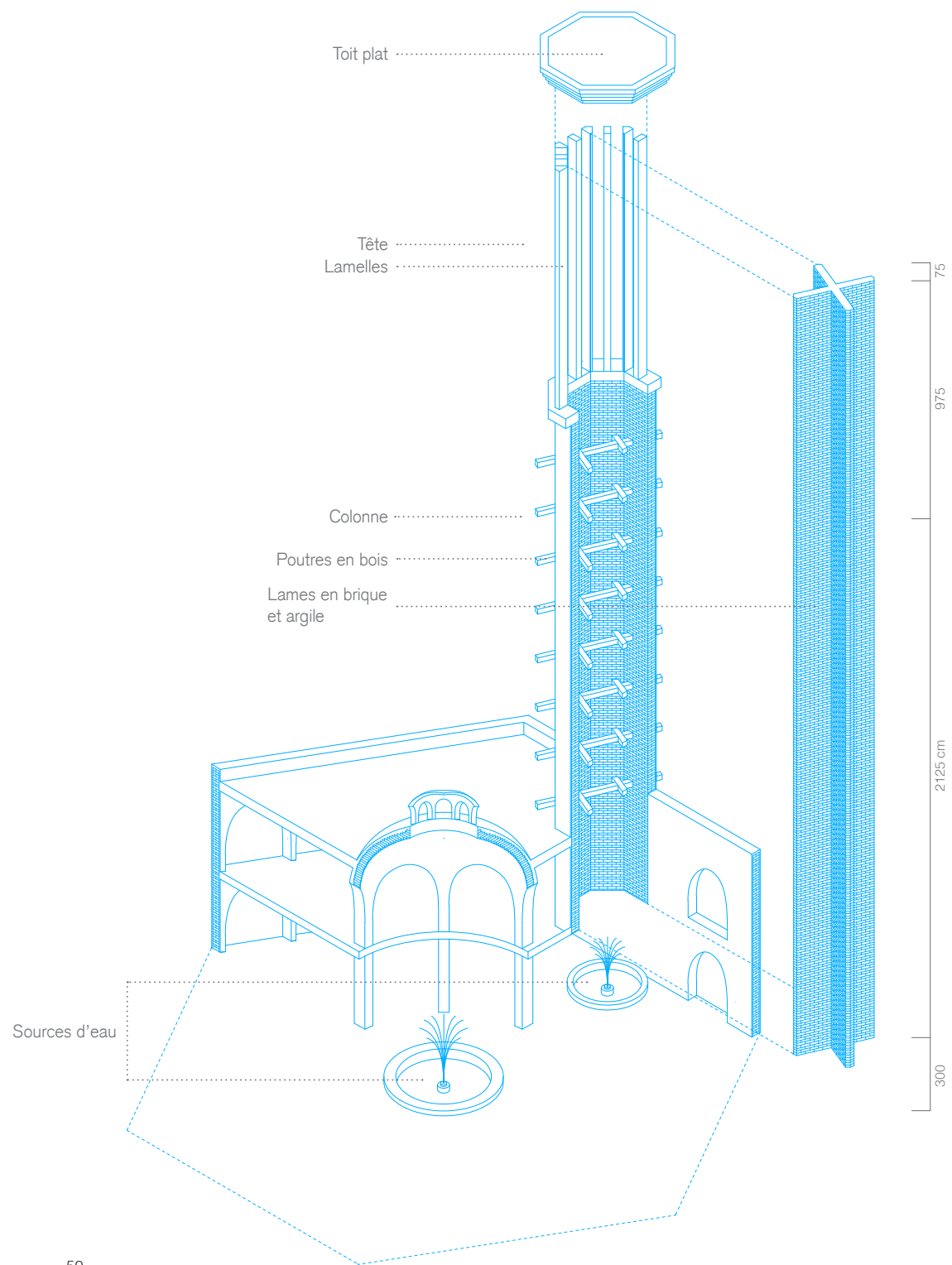
Les fonctions principales étaient de:

- contrôler les infiltrations de lumière dans le bâtiment. Grâce aux motifs ornementaux dé-

coupés dans le bois, le dispositif formait un écran capable de filtrer le rayonnement solaire direct arrivant dans le bâtiment.

- contrôler le flux d'air. L'écran bloquait le passage du soleil mais pas de l'air, la ventilation était donc assurée par les ouvertures de l'écran.
- réduire la température du courant d'air. Le *mashrabiya* profitait du processus de refroidissement par évaporation. Des récipients d'eau étaient placés à l'intérieur du bâtiment en correspondance de l'écran, de telle façon que l'air, en pénétrant à travers le dispositif, pouvait céder une partie de sa chaleur à l'eau en baissant de température. Ce même processus permettait aussi de refroidir l'eau potable dans les récipients.
- augmenter l'humidité de l'air, selon le processus d'évaporation décrit précédemment.
- assurer l'intimité à l'intérieur du bâtiment. Le dispositif jouait un rôle social et religieux très important puisqu'il permettait aux femmes de regarder discrètement à l'extérieur sans être vues. En général, il représentait un espace confortable pour s'asseoir ou dormir.²⁰

²⁰ Source: Mohamed, Jehan (2015). *The Traditional Arts and Crafts of Turnery or Mashrabiya*. A Capstone submitted to the Graduate School-Camden. The State University of New Jersey

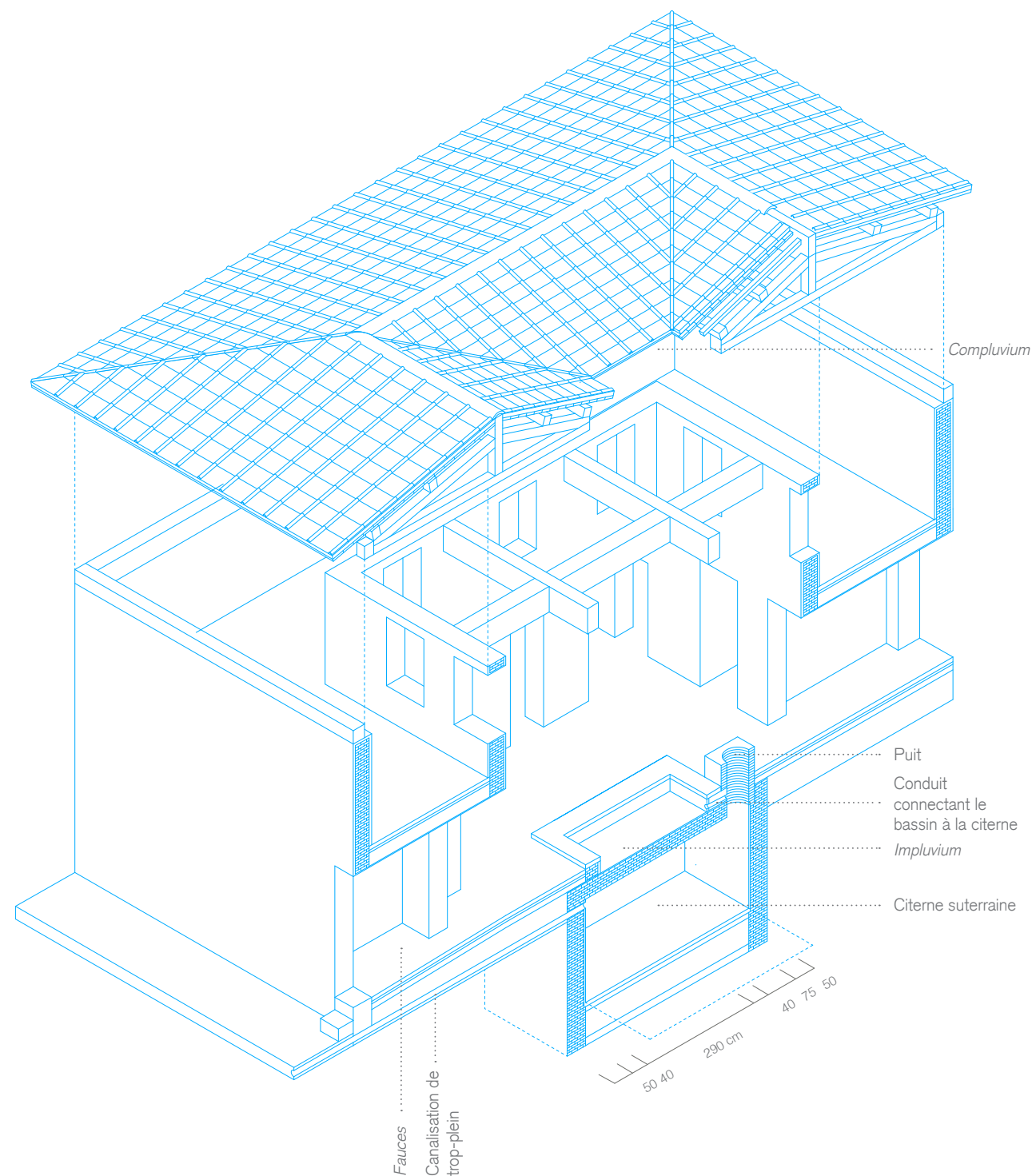


3.3 Eau

Tour à vent avec évaporation d'eau

Dans les régions au climat sec, il existe une variante des tours à vent qui reprend le même principe général mais en le combinant avec l'eau. En exploitant le processus d'évaporation, cela permet d'améliorer le refroidissement de l'air entrant dans le bâtiment. Ce type de tour à vent date environ de la même époque des *badgir* iraniens classiques. Ce système peut être mis en place selon deux types de sources d'eau différentes. La première possibilité est que la tour fonctionne avec une source d'eau posée à la base de la tour. L'eau peut être contenue dans des récipients poreux ou peut se présenter sous la forme de fontaine. Quant à la deuxième possibilité, la tour est construite loin de la maison et est connectée à celle-ci à travers un canal d'eau souterrain. Quand l'air passe à travers la source d'eau, cette dernière s'évapore en prélevant la chaleur de l'air qui par conséquent baisse de température avant de pénétrer dans le bâtiment. Le système de circulation de l'air à l'intérieur du dispositif reste le même que celui de la tour à vent, sauf que l'air est refroidit par moyen de la source d'eau avant de pénétrer dans le bâtiment.²¹

²¹ Source: Alp, Ahmet Vefik (1990/91). *Vernacular Climate Control in Desert Architecture*. In: *Energy and Buildings*, vol. 15-16. Arizona State University: Elsevier, pp. 809-815.



Atrium

L'entrée de la maison romaine (nommée *fauces*) s'ouvre sur l'atrium qui correspondait en général à l'espace de distribution de toutes les pièces (sauf dans les cas où l'atrium n'était pas présent pour des questions de disponibilité d'espace). Le nom atrium est dérivé du mot latin *ater* qui signifie "noir", du fait que dans l'Antiquité, quand l'atrium n'avait pas encore son ouverture zénithale et sa fonction de collecteur d'eau, c'était l'endroit où l'on pouvait trouver le foyer. Les parois de l'atrium devenaient noires à cause de la fumée, d'où l'origine du nom.

En plus de sa fonction principale de récupération des eaux, l'atrium était une source de lumière et d'air. Il avait toutefois des inconvénients. Le premier était lié à la pénétration de l'air froid de l'hiver dans la maison. Le deuxième était lié à une question d'intimité. L'atrium donnait en effet accès aux regards indiscrets des voisins qui habitaient dans des maisons plus hautes par rapport à celle en question. Un troisième inconvénient était représenté par les voleurs qui avaient facilement accès à la maison depuis cette ouverture.²²

Utilisé surtout dans les pays méditerranéens, le but principal de ce dispositif était donc la récolte de l'eau de pluie. Grâce aux preuves fournies par l'exemple de la ville de Pompéi, on sait que les premiers habitants de la ville profitaient d'un

cours d'eau (le Sarno) pour répondre aux besoins en eau de la ville. C'est seulement à partir du VI^{ème} siècle av. J.-C. que chaque maison (autant les bâtiments privés que publics, tels les thermes) dispose de sa propre citerne emmagasinant l'eau de pluie. Pour favoriser la récolte de l'eau pluviale, l'atrium se composait des éléments suivants:

- la toiture, qui était composée par une charpente en bois supportant des pans inclinés vers l'intérieur de la maison, et au milieu de ces derniers était aménagé une ouverture quadrangulaire appelée *compluvium*. L'eau pouvait s'écouler de trois façons: sur une rive, sur toute la longueur du toit, ou encore par des gargouilles.
- le *impluvium*, le bassin qui recevait les eaux s'écoulant de la toiture. L'*impluvium* avait aussi une fonction de décantation de l'eau qui abandonnait la poussière collectée sur le toit.
- la citerne souterraine, qui se positionnait sous l'*impluvium*. Les deux éléments étaient directement connectés à travers d'un orifice positionné au-dessus du fond. Après avoir été emmagasinée dans la citerne, l'eau était recueillie par un orifice de puisage. La citerne souterraine disposait d'une canalisation de trop-plein, qui évitait le risque de débordement de l'eau en déchargeant l'eau en excès sur la rue. Dans certains cas, une fontaine

²² Source: Adam, Jean-Pierre (2012). La maison romaine. Arles: Honoré Clair.

connectée au réseau des eaux était aussi présente dans l'atrium, ce qui était un indice d'un grand confort domestique.

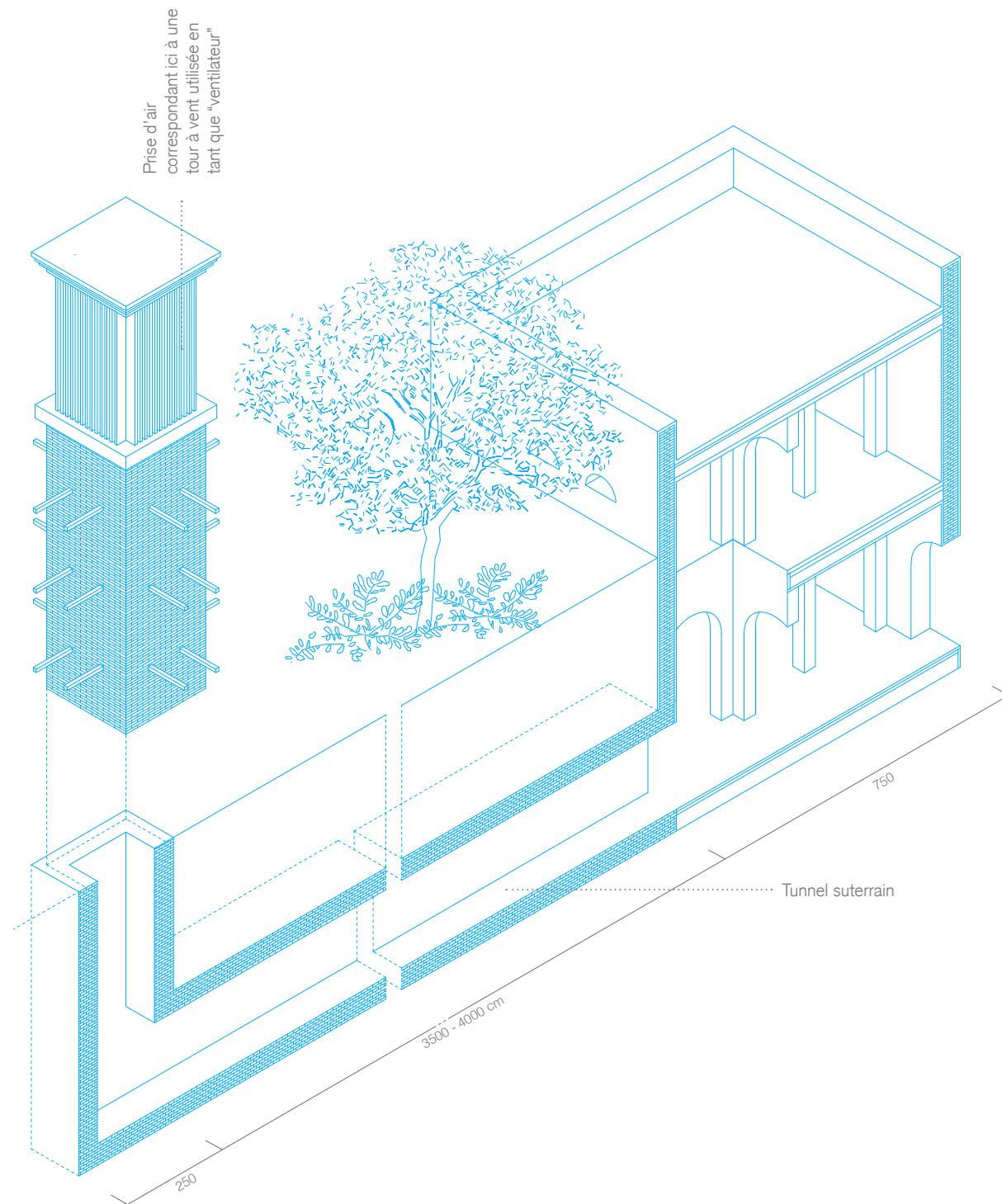
représentait ainsi un important lieu de réception. A titre d'illustration, c'était l'endroit où le seigneur de la maison recevait ses clients.

Ce système de collection d'eau à travers une ouverture zénithale a été un des premiers grands progrès en ce qui concerne la collection de l'eau pluviale. Un système très similaire était aussi parfois présent dans le péristyle. Dans ce cas, l'eau s'écoulant du toit tombait dans une rigole de pierre ou de maçonnerie qui parcourait le périmètre à la base du portique. Cette rigole était munie d'une pente et conduisait l'eau à une cuvette possédant la même fonction de décantation du bassin dans l'atrium. D'une manière similaire à l'*impluvium*, un conduit menant à la citerne s'ouvrait au-dessus du fond. Le recueil de l'eau pouvait donc se faire dans l'atrium, dans le péristyle et exceptionnellement dans la cuisine, grâce à l'orifice de puisage.

Les dimensions des citernes varient selon l'usage qu'il en était fait. Les citernes privées des maisons avaient des dimensions limitées à 2 mètres carrés, alors que les édifices publics, tels que les thermes, exigeaient des volumes d'eau des dizaines de milliers de litres.²³

L'atrium, en plus de sa fonction d'élément organisateur du plan de la maison, avait un important rôle sociale. Il constituait la première pièce rencontrée lorsque l'on pénétrait dans la maison. Il

²³ Source: Adam, Jean-Pierre (1984). La Construction Romaine, Matériaux et Techniques. Paris: Picard; pp. 257-286.



3.4 Terre

Puits canadien

L'idée d'utiliser la terre en tant que dissipateur thermique remonte à l'Antiquité. Autour du 3'000 av. J.-C., les architectes iraniens ont su combiner les tours à vent avec des canaux souterrains en profitant du refroidissement passif.²⁴ Des archéologues ont aussi trouvé des preuves de l'existence des puits canadiens à l'époque romaine.

Il est possible d'utiliser le sol en tant que régulateur thermique, en profitant de la température du sous-sol pratiquement constante pendant toute l'année. Les puits canadiens ont été redécouvertes assez dernièrement, en 2003, suite à la canicule et à l'intérêt croissant porté aux énergies renouvelables.²⁵ Selon le principe de ce dispositif, l'air utilisé pour la ventilation de la maison circule d'abord dans une conduite située en sous-sol. Puisque la température du terrain en profondeur est moins variable que celle de l'air extérieur, ce processus peut être utilisé comme système de (pré-)réchauffement en hiver ou pour le refroidissement en été. Le dispositif est utilisé Amérique du nord. Pendant les hivers ri-

goureux, les habitations sans chauffage utilisent ce processus pour se maintenir hors gel.

Le dimensionnement du dispositif est assez délicat à cause des nombreux paramètres à considérer, tels que la longueur, le diamètre, la profondeur d'excavation ou encore le débit de ventilation.²⁶

Les puits canadiens se composent principalement de trois éléments :

- une prise d'air, soit l'élément par le biais duquel l'air rentre dans la maison. Différentes protections contre la pluie et les animaux sont appliquées à l'ouverture.
- une ou plusieurs canalisations, qui doivent être dimensionnées pour assurer une vitesse de l'air appropriée. Si l'air circule à une vitesse trop élevée, le temps prévu pour l'échange de chaleur avec le terrain sera limité et l'air n'aura pas le temps de se réchauffer ou de se refroidir. Dans l'exemple iraniens, l'air qui pénètre dans le tunnel souterrain au moyen d'une tour à vent, est ensuite refroidi grâce à l'humidité du terrain. L'eau utilisée pour l'arrosage des plantes est absorbée par le sol rend l'air humide dans la canalisation.

²⁴ Source: Ozgener, Leyla (2011). *A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15. Elsevier, pp. 4483-4490.

²⁵ Source: Hohota, R.; Colda, I.; Enache, D.; Gavan, M.; Enache, R. (2008). *Etude numérique des 'puits canadiens' pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments*. Université Technique des Constructions Bucarest. France: IBPSA, pp. 4483-4490.

²⁶ Amitrano, David (2006). *Éléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol. dit 'puits canadien'*. In: HAL archives-ouvertes. Soumis en Septembre 2007.

- “le ventilateur”. Notons qu’aujourd’hui, le débit d’air est assuré par un ventilateur actionné par de l’énergie mécanique.²⁷ Dans l’Antiquité, le puits était associé à un autre dispositif qui assurait le tirage de l’air, qui pouvait être représenté par une tour à vent ou une cheminée solaire. Quand le conduit de la cheminée se réchauffait grâce au rayonnement solaire, l’air chaud à l’intérieur de la maison s’échappait à travers le tuyau d’évacuation par convection. La diminution de pression causée par le mouvement de l’air permettait le tirage de l’air provenant de la canalisation du puits.²⁸

Pour conclure, il faut toutefois remarquer que aujourd’hui, en terme de réchauffement, il existe une solution passive beaucoup plus efficace: l’exploitation de l’énergie solaire (par moyen des panneaux solaires). L’énergie reçue par la surface de la terre en fait, correspond à 10’000 fois le taux d’énergie consommé en un an au niveau mondial. Théoriquement donc, l’énergie solaire est la seule énergie renouvelable qui pourrait couvrir les besoins globales en thermes énergétiques.²⁹

²⁷ <http://ines.solaire.free.fr/solpv/page1.html>, consulté en décembre 2016 .

²⁸ Source: Tavakolinia, Fereshteh (2011). *Wind-Chimney: Integrating the Principles of a Wind-Catcher and a Solar-Chimney to Provide Natural Ventilation*. A Thesis presented to the Faculty of California Polytechnic State University. San Luis Obispo.

²⁹ Source: Hohota, et al. (2008). *Etude numérique des “puits canadiens” pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments*. Université Technique des Construtions Bucarest. France: IBPSA, pp. 4483-4490.

4. INTEMPORALITÉ DES PRINCIPES

4.1 *Discontinuité historique*

La recherche effectuée pour cette étude souligne l'existence des lacunes dans l'analyse des dispositifs connus et laisse supposer l'existence d'éléments qui n'ont pas encore été redécouverts. Souvent les sources à disposition traitent l'argument de façon partielle et l'analyse est généralement abordée soit du point de vue archéologique et historique, soit plutôt du point de vue énergétique. De plus, il est évident que certaines informations - nous pouvons par exemple prendre le cas de l'architecture romaine - sont plus accessibles par rapport à d'autres – comme l'architecture arabe -.

Une autre lacune importante, qui influence aussi la disponibilité des sources, se réfère à la disparition de certains éléments dans l'architecture, au même titre que dans la littérature. Dans certains cas, la discontinuité littéraire nous empêche de reconstruire l'histoire précise de la création du dispositif. Dans d'autres cas, les dispositifs disparaissent complètement sans une cause manifeste. Il est évident que, dans les pays les plus développés, l'avènement des technologies a rendu obsolètes certains systèmes désormais considérés comme antiques, alors que dans certaines zones rurales ou moins développées, les dispositifs utilisant l'énergie naturelle ont été conservés dans la tradition architecturale. En effet, la disparition de l'hypocauste est certainement due au fait qu'il était strictement lié à une pratique romaine disparue avec la chute de l'empire. Il est toutefois surprenant comment son cousin chinois, le *kang*, continue d'être utilisé et d'avoir un rôle social si important. Un autre facteur de cause de disparition est lié au goût esthétique changeant. Selon Lechner, en Europe, les stores, conçus en tant que dispositifs pour la protection solaire, étaient considérés comme un objet esthétiquement désirable jusqu'à la moitié du XX^{ème} siècle. Avec l'apparition de l'air conditionné, qui était initialement un privilège des riches, les stores ont gagné une connotation négative en tant que

“dispositif pour les pauvres”. Les bénéfices des stores ont ensuite été redécouverts au XXI^{ème} siècle, ce qui nous montre à quel point certains dispositifs peuvent suivre un développement discontinu.¹

Pour conclure, il est important de mentionner l'évolution rapide des standards. Cette évolution fait qu'un dispositif qui pouvait être considéré comme durable vingt ans auparavant peut très bien ne plus l'être aujourd'hui. De plus, les standards liés à la salubrité ont aussi évolué. Souvent les systèmes, même en étant soutenables du point de vue énergétique, comportent des autres problèmes liés à la salubrité. Un exemple est fourni par le *kang* et les risques d'intoxication causés par les retours de fumée. Le refroidissement par évaporation comporte aussi des risques au niveau de l'hygiène, et le système doit être totalement isolé pour pouvoir être utilisé.

¹ Source: Lechner, Norbert (2015). Heating, Cooling, Lightnins Sustainable. New Jersey: John Wiley & Sons; p. 233.



Fig. 1. Jean-Marie Tjibaou Cultural Center

4.2 Cas d'étude

Jean-Marie Tjibaou Cultural Center, Nouvelle-Calédonie, Mélanésie

Dans les dix dernières années, les simulations via des modèles CFD (*computational fluid dynamics*) ont beaucoup évolué, ce qui a permis un progrès significatif dans l'étude et l'application des dispositifs pour la ventilation naturelle. Malheureusement, ce type de logiciels sophistiqués comporte une accessibilité limitée aux spécialistes. La plupart des architectes ne maîtrisent pas ce type de simulations numériques très précises, et le risque d'un projet trop compliqué est d'obtenir des résultats imprévus.

Le cas du *Tjibau Cultural Center*, fondé en 1999, peut être mentionné pour expliquer le mythe de la conception architecturale écologique. Le projet est présenté en tant qu'exemple d'architecture écologique utilisant un nouveau concept de ventilation naturelle. Il est important de remarquer qu'aucune modélisation d'étude n'a été faite pendant la conception du projet. Le centre, mesurant 238 mètres de longueur et 65m de largeur, est composé d'un long bâtiment horizontal auquel se branchent dix volumes, disposés le long de la façade sud-ouest en tant que protection contre les vents océaniques. Ces éléments sont en fait enveloppés par une sorte de cage en lamelles de bois de 28 mètres d'hauteur, inspirée par l'architecture vernaculaire des cabanes calédoniennes pour célèbre la culture vernaculaire Kanak de la Nouvelle-Calédonie. Le projet se propose comme une combinaison entre tradition et innovation, entre nature et architecture. Pour favoriser la ventilation, le volume de la structure se resserre vers le haut pour recueillir l'air et le diriger en bas dans le bâtiment, ou alors pour faciliter le mouvement montant et descendant de l'air par convection. La ventilation peut aussi être réglée par rapport aux différents types de vent en ouvrant

ou resserrant les volets positionnés en bas, en haut et à l'entrée de chaque volume.

Les diagrammes de Piano montrent les prévisions concernant la circulation de l'air, pour un vent standard (fig. 3) et en présence d'un cyclone (fig 4.). Dans le premier cas, les volets supérieurs de la structure sont toujours ouverts (pour équilibrer la pression entre l'intérieur et l'extérieur), alors que le toit en pente doit être fermé en étant le mur intérieur de la cabane. L'atrium du patio (B dans la fig. 2) fonctionne en tant que source de lumière mais sert également à effectuer une partielle évacuation de l'air rentrant par la façade de la cabane (A dans la fig. 2). Les fenêtres positionnées sur le périmètre du patio peuvent être gérées manuellement pour faciliter la pénétration du vent dans la partie inférieure du bâtiment. Le vent circule donc dans le bâtiment en pénétrant par les deux ouvertures des structures en bois (A), traverse le bâtiment en recueillant l'air usé dans le patio (B) et quitte le bâtiment par les terrasses au nord-ouest du bâtiment (C). En présence d'un cyclone, l'air des terrasses (C) devient l'entrée du vent au cause du changement de direction dicté par le changement de saison. Les ouvertures du toit incliné doivent être ouvertes pour permettre l'évacuation de l'air qui pousse alors vers le haut.

Les calculs faits grâce au modèle CFD révèlent que le design de la structure n'est pas optimal. En analysant les vents locaux, il en résulte que la vitesse réduite de l'air provoque un phénomène de stagnation à la base des cabanes, ce qui indique une ventilation insuffisante de la partie du bâtiment réservée aux activités humaines. Les ouvertures frontales de la structure se révèlent être trop petites pour capturer la quantité d'air nécessaire. De plus, l'évacuation partielle de l'air à travers le patio est aussi insuffisante à cause de la

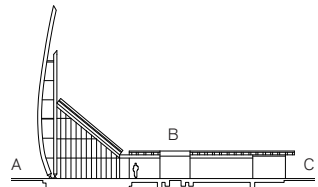


Fig. 2. Coupe transversale dans une "cabane" du Jean-Marie Tjibaou Cultural Center.

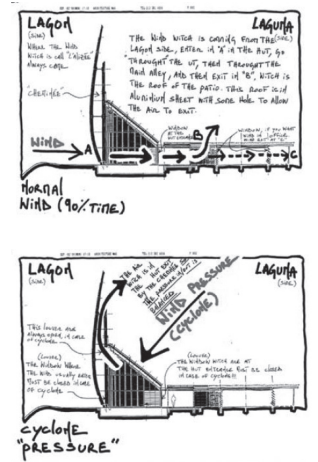


Fig. 3. et 4. Schémas de Piano en présence d'un vent standards et en présence d'un cyclone

² Source: Wu, Yu-Chou; Yang, An-Shik; Tseng, Li-Yu; Liu, Chin-Lung (2011). *Myth of ecological architecture design: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia*. In: *Energy and Buildings*, vol. 43. Elsevier, pp. 2788-2797

³ Source: Thomas, Leena & Baird, George (2004). *Post-occupancy evaluation of passive downdraft evaporative cooling and air-conditioned buildings at Torrent Research Centre, Ahmedabad, India*.



Fig. 5. Torrent Research Centre

vitesse réduite du vent. Il en résulte que le rapport d'air entrant (air intake ratio, AIR) se limite à 2.4%.

En présence d'un cyclone, la simulation montre que le vent est principalement dévié au-dessus du toit de la cabane. Toutefois, une partie rentre directement dans la base du bâtiment pour être renvoyée vers le haut par le mur intérieur de la cabane. Ce mouvement a pour effet de provoquer des tourbillons d'air désagréables à l'intérieur du bâtiment.

Les cabanes calédoniennes ne représentent pas un vrai dispositif, mais plutôt une technique constructive issue de la disponibilité des matériaux locaux et du climat. Toutefois, il est intéressant de citer cet exemple puisqu'il s'inscrit bien dans le paysage naturel, en tenant compte du contexte, des matériaux locaux et des techniques constructives. Cependant, il résulte des analyses que d'un point de vue technique, le bâtiment ne fonctionne pas comme prévu par l'architecte.²

Torrent Research Centre, Ahmedabad, India

Dans le contexte du design passif indien des vingt dernières années, un grand nombre de bâtiments non-résidentiels ont été développés en réponse aux préoccupations énergétiques soulevées par l'urbanisation croissante. Le *Torrent Research Centre Building* a été terminé au 1997 et fut considéré comme un exemple crucial du design climatique passif intégrant un système de refroidissement par évaporation, processus connu sous le sigle PDEC (*Passive Downdraft Evaporative Cooling*).³

Le complexe est constitué par une série de laboratoires pour la re-

cherche pharmaceutiques et les services relatifs de support. L'étude mentionnée ici, menée au 2004 par Leena Thomas et George Baird, se focalise sur l'analyse des cinq bâtiments de laboratoires principaux et un bloc administratif. Les architectes principaux du projet, la couple Nimish Patel et Parul Zaveri, ont défini depuis le début que le projet devait fonctionner pendant la journée avec le moins d'énergie électrique possible. Le bâtiment a été conçu autour d'un couloir central qui est la source d'approvisionnement d'air frais introduit au moyen d'une tour à vent. La température de l'air, avant de rentrer dans le bâtiment, est diminuée grâce au processus du rafraichissement par évaporation. À travers le couloir central, elle est distribuée dans les trois étages des bâtiments pour être ensuite évacuée à travers des cheminées positionnées sur le périmètre externe du bâtiment. Le revêtement extérieur est dessiné pour minimiser le réchauffement par rayonnement solaire, en permettant la pénétration de la lumière diffusée mais en réfléchissant la lumière directe. L'utilisation des matériaux locaux a été favorisée, les murs extérieurs et le toit sont isolés par le biais d'un minéral naturel, la vermiculite.

Avant le projet du *Torrent Research Center*, le système PDEC avait été testé seulement dans des bâtiments expérimentaux. Le principe du refroidissement par évaporation avait été déjà compris et appliqué depuis longtemps en combinaison avec des supports mécaniques. Les récentes études se sont focalisées sur l'utilisation du système sans assistance mécanique, c'est-à-dire en utilisant la force du vent ou le mouvement de l'air par convection. Le *Torrent Research Center* a démontré que cette technique peut être appliquée à des bâtiments de grande échelle tout en étant rentable du point de vue économique et technique dans différentes régions au climat chaud et sec. Suite à l'analyses des données, il en résulte que le système

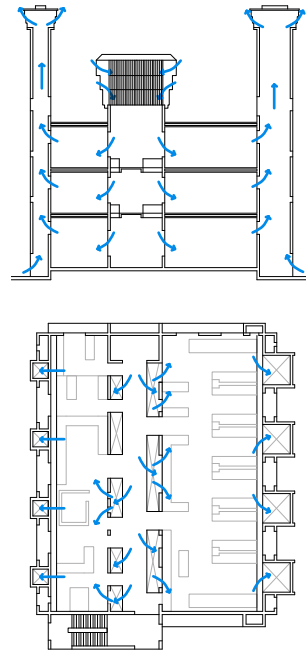


Fig. 6. Coupe et Plan dans un bâtiment de laboratoires du Torrent Research Centre. Les flèches indiquent le mouvement de l'air.

⁴ Source: Ford, Brian; Patel, Nimish; Zaveri, Parul; Hewitt, Mark (1998). Cooling without Air Conditioning: The Torrent Research Centre, Ahmedabad, India. In: Renewable Energy, vol. 15. Pergamon, pp. 177-182

est efficace et que les températures intérieures maximales diffèrent généralement de 10-14°C par rapport à la température extérieure. Dans la première année de vie, le complexe a utilisé 64% d'énergie en moins par rapport au même bâtiment refroidi par un système d'air conditionné.

L'évaluation fait par les occupants a confirmé que pendant l'été les laboratoires étaient confortables et pas malodorants (qui se trouve être un problème récurrent dans les laboratoires chimiques) même sans l'utilisation des ventilateurs. Pensant la période des moussons, comme il l'avait effectivement été prévu, les laboratoires se sont révélés être étouffants. Les ventilateurs ont donc été installés pour remédier à cette situation pendant les 2-3 mois de cette période.⁴

5. CONCLUSIONS

Il est important, à la fin de cette étude, de se demander si la réutilisation de l'architecture traditionnelle est toujours possible ou justifiée et s'il existe encore des dispositifs qui n'ont pas été étudiés.

Une première conclusion que l'on peut tirer des deux derniers exemples mentionnés concerne le mythe du design passif en architecture. Il n'est pas suffisant de s'inspirer de l'architecture vernaculaire d'un lieu pour répondre aux conditions climatiques de la région. Il faut en comprendre les principes pour pouvoir les appliquer correctement, en considérant aussi la question cruciale de l'échelle. Le *Torrent Research Centre* nous montre ainsi l'utilisation d'un dispositif correctement dimensionné pour le bâtiment qu'il dessert. De plus, il faut être conscient du fait que les bâtiments sont devenus trop compliqués pour être conçus par une seule personne de même que la nécessité de durabilité a fortement augmenté la complexité. Il n'est donc pas envisageable que les seules sources anciennes et vernaculaires puissent régler toutes les nécessités contemporaines en termes de confort. De même, comme déjà mentionné, il n'est pas réaliste de rejeter les succès de la technologie moderne pour les questions climatiques dans les bâtiments.

L'analyse des anciens dispositifs soulève aussi la question de la permanence et de la monumentalité. La tradition européenne ancienne a toujours visé une architecture qui pouvait perdurer dans le temps et même laisser des traces de sa présence, alors que dans d'autres cultures, l'architecture a toujours été reliée à une conception éphémère. En sachant que les standards du monde contemporaine évoluent à une vitesse extraordinaire, ne serait-il ainsi pas plus justifié, dans le contexte de la durabilité, de concevoir un type d'architecture éphémère?

Dans les soixante dernières années, par exemple, l'isolation thermique a évolué énormément, et certaines solutions qui avaient été jugées écologiques, ne respectent plus les standards actuels de durabilité. Une architecture éphémère pourrait ainsi conjuguer des solutions réputées écologiques au moment de leur construction avec le changement inévitable de l'environnement, des techniques et des standards.

De plus, les questions liées au contexte social rentrent aussi en jeu. Si l'on présume pouvoir trouver des solutions dans les sources anciennes et de les hybrider avec les technologies modernes pour en créer de nouveaux dispositifs, est-il envisageable d'utiliser ces solutions dans toutes les régions ayant le même climat? L'architecture inspirée de la tradition d'une autre culture sera-t-elle acceptée par la population et les autorités locales? Et enfin, est-il justifié de séparer les aspects fonctionnels des aspects culturels et sociaux?

Pour terminer, la recherche a révélé certains cas où deux principes étaient combinés dans un même système. On peut alors mentionner l'exemple des tours et des cheminées solaires, ou encore des tours à vent avec puits canadiens. Il serait donc intéressant proposer une recherche autour de l'hybridation des divers dispositifs en les combinant avec la technologie moderne. Est-il ainsi possible de créer des bâtiments machines passives complexes?

Bibliographie

Livres

Adam, Jean-Pierre (1984). La Construction Romaine, Matériaux et Techniques. Paris: Picard.

Adam, Jean-Pierre (2012). La Maison Romaine. Arles: Honoré Clair.

Alberti. De Re Aedificatoria. Traduit par: Orlandi, Giovanni (1966). L'Architettura. Milan: Il Polifilo.

Banham, Reyner (1698). The Architecture of the Well-Temperes Environment. Traduit par: Morabito, Giovanni & Critstian Stanescu (1978). Bari: Laterza & Figli

Cipriano, Silvia (2011). Archeologia e tecnica dei pozzi per acqua dalla pre-protostoria all'età moderna. Trieste: Editreg.

Gargiani, Roberto; Rossellini, Anna (2011). Le corbusier: Béton Brut and Ineffable Space, 1940-1965: Surface Materials and Psychoèhysiology of Vision. Lausanne: EPFL press, distributed by Routledge.

Hellmann, Marie-Christine (2002). L'architecture greque. Paris: Picard.

Hix, John (1974). The Glass House. London: Phaidon

Koolhaas, Rem (1944). Fundamentals 14th International Architecture Exhibition.

Lechner, Norbert (2015). Heating, Cooling, Lightnins Sustainable. New Jersey: John Wiley & Sons.

Liébard, Alain & De Herde, André (2004). Traité d'Architecture et d'Urbanisme Bio-climatiques. France: le Moniteur

Nicolin, Pierluigi (2012). Il pensiero di un'altra modernità. Macerata: Quodlibert Abitare.

Perlin, John (2013). Let it Shine: The 6'000-Year Story of Solar Energy. California: New World Library.

Pfammatter, Ulrich (2014). Building for a Changing Culture and Climate: World Atlas of Sustainable Architecture. Berlin: DOM publishers.

Serlio, Sebastiano (1584). I Sette Libri dell'Architettura. Venezia

Thierfelder, Anja (2003). Transsolar Climate Engineering. Switzerland: Birkhäuser.

Usher, Abbott Payson (1929). A History of Mechanical Inventions. New York: McGraw Hill Book Company.

Vitruve. I Dieci Libri dell'Architettura. Traduit par: Perrault, Claude. Les Dix Livres D'architecture de Vitruve. (1979) Paris: Tardieu & Coussin Fils.

Articles

Amitrano, David (2006). *Éléments de dimensionnement d'un échangeur air/sol. dit "puits canadiens"*. In: HAL archives-ouvertes. Soumis en Septembre 2007

Alp, Ahmet Vefik (1990/91). *Vernacular Climate Control in Desert Architecture*. In: Energy and Buildings, 15-16. Arizona State University: Elsevier, 809-815.

Armada, Jacqueline (2012). *Sustainable Ephemeral: Temporary Spaces with Lastin Impact*. In: Syracuse University Honors Program Capstone Projects, paper 111.

Boloorchi, Hossein & Egtesadi, Nahal (2013). *Investigation of the Middle East Wind-catchers and (comparison between Windcatchers in Iran and Egypt in Terms of Components)*. In: International Journal of Architecture and Urban Development, vol.4. Iran: Islamic Azad University, pp. 87-93.

Choi, Jeong-Wha (1993). *Bed Climate of Korean using Ondol Heating System*. In: J. therm. Biol, vol. 18. Grande Bretagne: Pergamon Press, pp. 399-403

Cook, Jeffrey (1996). *Architecture indigenous to extreme climates*. In: Energy and Buildings, 23. Arizona State University: Elsevier, 277-291.

Daniel, Siret. *Le Corbusier Plans. 1950 - Grille climatique (Chandigarh). Version française*. Fondation Le Corbusier. Le Corbusier Plans, DVD N11, Fondation Le Corbusier, Echelle-1 Codex Images International, 2006, <http://e1-intl.com.halshs-01249645>,

Ford, Brian; Patel, Nimish; Zaveri, Parul; Hewitt, Mark (1998). *Cooling without Air Conditioning: The Torrent Research Centre, Ahmedabad, India*. In: Renewable Energy, vol. 15. Pergamon, pp. 177-182

Guo, Qinghua (2002). *The chinese Domestic Architectural Heating System [Kang]:*

Origins, Applications and Techniques. In: Architectural History, vol. 45. SAHGB Publications Limited, pp. 32-48

Hohota, R.; Colda, I.; Enache, D.; Gavan, M.; Enache, R. (2008). *Etude numérique des 'puits canadiens' pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments*. Université Technique des Construtions Bucarest. France: IBPSA, pp. 4483-4490.

Kimura, Ken-ichi (2007). *Design Features Evolved in a Vernacular House under Hot and Humid Climate with Measured Results of Indoor Environment*. In: PLEA2007 - The 24th Conference on Passive and Low Energy Architecture. National University of Singapore: PLEA, pp. 499-504

Mohamed, Jehan (2015). *The Traditional Arts and Crafts of Turnery or Mashrabiya*. A Capstone submitted to the Graduate School-Camden. The State Univeristy of New Jersey

Muramoto, Katsuhiko. *Relational Bodies in Japanese Architecture: Sustainability Re-considered*. In: Inter-Disciplinarity.net. Consutlé en decembre 2016.

Ozgener, Leyla (2011). *A review on the experimental ans analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey*. In: Renewable ans Sustaibable Enery Reviews, vol. 15. Elsevier, pp. 4483-4490.

Poggi, Rogora & Scudo (2014). *Evaluation of Environmental Control of Transitional Microclimatic Spaces in Temperate Mediterranean climate*. In: 30th International PLEA Conference. CEPT Univeristy, Ahmedabad: PLEA.

Ring, James W (1996). *Windows, Baths, and Solar Energy in the Roman Empire*. In: American Journal of Archaeology, vol. 100. Archaeological Institute of America, pp. 717-724.

Suliman, Ayman Al (2014). *Wind Catchers and Sustainable Architecture in the Arab World*. In: Journal of Civil and Environmental Research, vol. 4. Disponible en ligne sur iiste.org, pp130-136. Téléchargé en octobre 2016

Tavakolinia, Fereshteh (2011). *Wind-Chimney: Integrating the Principles of a Wind-Catcher and a Solar-Chimney to Provide Natural Ventilation*. A Thesis presented to the Faculty of California Polytechnic State University. San Luis Obispo.

Thomas, Leena & Baird, George (2004). *Post-occupancy evaluation of passive downdraft evaporative cooling and air-conditioned buildings at Torrent Research Centre, Ahmedabad, India*.

Wu, Yu-Chou; Yang, An-Shik; Tseng, Li-Yu; Liu, Chin-Lung (2011). *Myth of ecological architecture design: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia*. In: Energy and Buildings, vol. 43. Elsevier, pp. 2788-2797

Yeo, Myoung-Souk; Yang, In-Ho; Kim, Kwang-Woo (2003). *Historical changes and recent energy saving potential of residential heating in Korea*. In: Energy and Buildings, vol. 35. Elsevier, pp. 715-727

Zhuang, Li, Chen & Guo (2009). *Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China - A review*. In: Energy and Buildings, vol. 41. Elsevier, pp. 111-119.

Sites web

<http://ines.solaire.free.fr/solpv/page1.html>, consulté en décembre 2016.

<http://www.karavansera.com/water-storage.html>, consulté en décembre 2016.

https://it.wikipedia.org/wiki/Dinastie_della_storia_cinese, consulté en octobre 2016.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Manchuria>, consulté en octobre 2016.

http://fugadeideas.org/paccs/pubs/cooling_syst_iran.html, consulté en décembre 2016.

<http://rozsavolgyi.free.fr/cours/civilisations/pompei/p6.htm>, consulté en novembre 2016.

Sources des figures

Fig. 1. http://www.arteinlab.it/blog/?attachment_id=2161, téléchargée en janvier 2017

Fig. 2. Re-dessin de: Wu, Yu-Chou; Yang, An-Shik; Tseng, Li-Yu; Liu, Chin-Lung (2011). *Myth of ecological architecture design: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia*. In: Energy and Buildings, vol. 43. Elsevier, pp. 2788-2797. Fig. 3, p. 2792.

Fig. 3. Wu, Yu-Chou; Yang, An-Shik; Tseng, Li-Yu; Liu, Chin-Lung (2011). *Myth of ecological architecture design: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia*. In: Energy and Buildings, vol. 43. Elsevier, pp. 2788-2797. Fig. 3, p. 2792. Fig 4, p. 2793.

Fig 4. Wu, Yu-Chou; Yang, An-Shik; Tseng, Li-Yu; Liu, Chin-Lung (2011). *Myth of ecological architecture design: Comparison between design concept and computational analysis results of natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia*. In: Energy and Buildings, vol. 43. Elsevier, pp. 2788-2797. Fig. 3, p. 2792. Fig 5, p. 2794.

Fig. 5. <http://www.torrentpharma.com.mx>, téléchargée en janvier 2017

Fig. 6. Re-dessin de: Thomas, Leena & Baird, George (2004). *Post-occupancy evaluation of passive downdraft evaporative cooling and air-conditioned buildings at Torrent Research Centre, Ahmedabad, India*. Fig. 1.

Sources complémentaires pour les re-dessins

Kang

<http://www.nzdl.org/gsdldmod?e=d-00000-00---off-0aedl--00-0----0-10-0---0--0direct-10---4-----0-1l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-OutfZz-8-00&a=d&cl=CL1.1&d=HASHcc64d169aa8cabb984e331.6>, consulté en décembre 2016

<https://rwprekorea.wordpress.com/2011/12/>, consulté en décembre 2016.

Heliocaminus

Perlin, John (2013). Let it Shine: The 6'000-Year Story of Solar Energy. California: New World Library. Fig 3.2, p. 25.

Ring, James W (1996). *Windows, Baths, and Solar Energy in the Roman Empire*. In: American Journal of Archaeology, vol. 100. Archaeological Institute of America, pp. 717-724.

<http://www.alamy.com/stock-photo-dome-of-heliocaminus-solar-furnace-an-early-heating-system-based-on-90955886.html>, consulté en décembre 2016.

https://www.researchgate.net/figure/275655537_fig2_Fig-3-Remains-of-ancient-Heliocaminus-Baths-built-during-120-AD-at-villa-Adriana-near, consulté en décembre 2016.

<http://www.emeraldecocity.com/Standing%20on%20the%20Shoulders%20of%20Giants.html>, consulté en décembre 2016.

Engawa

http://www.ehow.com/how_5125600_build-shoji.html, consulté en décembre 2016.

<http://pedarch.com/blog/?paged=2>, consulté en décembre 2016.

<http://vernmichi.blogspot.ch/2012/03/engawa-engawa-is-japanese-word-for.html?sref=pi>, consulté en décembre 2016.

<http://the-walnut-house.blogspot.ch/2013/08/e-n-g-w-i-s-h.html>, consulté en décembre 2016.

Badgir

<http://www.amusingplanet.com/2015/02/the-wind-catchers-of-iran.html>, consulté en décembre 2016.

<http://www.kuriositas.com/2012/06/windcatchers-of-persia.html>, consulté en décembre 2016.

Tour à vent avec évaporation d'eau

<http://www.karavansera.com/wind-catcher.html>, consulté en décembre 2016.

Malqaf

<http://www.nzdl.org/gsdImod?e=d-00000-00---off-0cdl--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-tr-50---20-preferences---10-0-1-00-0--4---0-0-11-10-0windowsZz-1254-00&cl=CL2.14&d=HASH28d1d3a01dbf303cd-ed8b6.6>=1>, consulté en décembre 2016.

Mashrabyia

<https://en.wikipedia.org/wiki/Mashrabiya>, consulté en décembre 2016.

Atrium

<http://bernardorodriguezcerezuelaipat2013.blogspot.ch/2013/03/el-atrium-impluvium-y-estancias-de.html>, consulté en décembre 2016.

http://servicios.laverdad.es/murcia_agua/infografias12.htm, consulté en décembre 2016.

<http://andrewmalone.blogspot.ch>, consulté en décembre 2016.

<http://www.romanoimpero.com/2009/08/architettura-romana.html>, consulté en décembre 2016.

http://www.parlandosparlando.com/view.php/id_597/lingua_0/whoisit_1, consulté en décembre 2016.

Puits canadiens

http://fugadeideas.org/paccs/pubs/cooling_syst_iran.html, consulté en décembre 2016.

Tout d’abord merci aux professeurs Roberto Gargiani et Dieter Dietz ainsi qu’à l’assistant Raffael Baur pour avoir choisi de suivre ce travail et pour le temps qu’ils m’ont dédié.

Merci à mon expert, Pierre Jaboyedoff, pour la documentation fournie et les précisions techniques.

Un merci spécial à ma famille et à Siro pour le soutien et l’encouragement continu.

Merci à mes amis, en particulier les Radicchios et les Superamici, pour leur énorme support moral.

Merci enfin à Thomas pour la correction du français.

