



HAL
open science

Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique : histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances.

Gholamreza Dehghan Kamaragi

► To cite this version:

Gholamreza Dehghan Kamaragi. Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique : histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances.. Art et histoire de l'art. Université Paris-Est, 2014. Français. NNT : 2014PEST1500 . tel-03435253

HAL Id: tel-03435253

<https://theses.hal.science/tel-03435253>

Submitted on 18 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



GOLFE BADGIR PERSIQUE

DOCTORAT D'ARCHITECTURE

LES SYSTEMES DE VENTILATION ET REFROIDISSEMENT DANS L'ARCHITECTURE TRADITIONNELLE DU GOLFE PERSIQUE, HISTOIRE DES DISPOSITIFS, MODELISATION, EVALUATION DES PERFORMANCES

**DEGHAN KAMARAGI Gholam Reza, laboratoire GSA, sous la direction de
Joël SAKAROVITCH et Robert LE ROY**

Le 05.12.2014 à 14h30, ENSA Paris-Malaquais, salle Gertrude Jekyll

Cette recherche porte sur l'histoire et l'évaluation des performances des tours à vent (Badgir en persan). En termes de construction, les tours à vent se sont développées de manière considérable au cours de l'histoire. Le matériau de construction utilisé a été en grande partie l'adobe : mélange de terre d'argile, de paille et d'eau. Ce matériau naturel possède de fortes capacités de stockage de chaleur et permet l'extraction de l'air chaud.

A l'aide de la CFD (Computational Fluid Dynamics), a été mis en place un outil informatique adapté permettant des calculs thermiques sur les tours à vent, afin d'estimer la température intérieure en fonction de l'inertie thermique du bâtiment et de la température extérieure. Plusieurs études expérimentales ont été effectuées utilisant des essais en soufflerie dans un laboratoire pratiquant des analyses sur la ventilation naturelle dans les bâtiments, en particulier sur les modèles à grande échelle.

L'objectif de cette recherche est de démontrer la performance environnementale des systèmes de ventilation et de régulation de température dans les bâtiments utilisant la ventilation naturelle plutôt que des systèmes mécaniques.

JURY :

Bruno CHANETZ (Rapporteur) : Président du jury, Adjoint au Directeur du Département d'Aérodynamique Fondamentale et Expérimentale (DAFE) de l'ONERA, HDR
Christian PEDELAHORE (Rapporteur), Docteur en architecture, Professeur à l'ENSA Paris la Villette, HDR
Jean-Denis PARISSÉ (Examinateur), Maître de conférences à l'IUSTI de l'Université de Marseille, HDR
Robert LE ROY (Co-Directeur), Professeur à l'ENSA Paris-Malaquais, agrégé de génie civil, HDR

UNIVERSITÉ
— PARIS-EST

Pôle de recherche et d'enseignement supérieur

ÉCOLE DOCTORALE : VILLE, TRANSPORTS ET TERRITOIRES



Table des matières

Table des matières	1
Introduction	6
CHAPITRE I	12
1.1 Carte géographique d'Iran	12
1.2 Consommation d'énergie	14
1.3 La pollution atmosphérique	14
1.4 Les climatiseurs mécaniques modernes (Cooler).....	15
<i>1.1.1 Fonctionnement d'un Cooler</i>	16
<i>1.1.2 Consommation d'électricité en Iran pour l'année 2011</i>	17
<i>1.1.3 Nombre d'abonnés iraniens à l'électricité en 2011</i>	17
1.5 Déserts, lacs et précipitations en Iran.....	18
1.6 Construction passive iranienne	21
1.7 Disponibilité des énergies naturelles	22
<i>1.1.4 Énergie solaire</i>	22
1.8 Température idéale pour le corps humain	23
<i>1.1.5 Le mécanisme d'évaporation de l'eau</i>	24
1.9 Mouvement et déplacement de l'air	25
<i>1.1.6 Mouvement d'air par différence de pression</i>	26
<i>1.1.7 Mouvement d'air par convection</i>	27
<i>1.1.8 Déplacement des brises, jour/nuit</i>	28
<i>1.1.9 Différentes caractéristiques du vent</i>	29
<i>1.1.10 Conception d'ombrage</i>	30
1.10 Conclusion.....	31
1.11 Objectif de la thèse	32
CHAPITRE II	34
Histoire des Badgirs	34
2.1 Histoire des Badgirs au Moyen-Orient	34

2.1.1	Badgir d'Égypte.....	35
2.1.2	Badgir d'Afghanistan.....	37
2.1.3	Badgir du Pakistan.....	37
2.1.4	Badgir d'Irak.....	37
2.2	Histoire des Badgirs d'Iran.....	38
2.1.5	Badgir et les Perses.....	38
2.3	Les Badgirs de la province de Yazd	42
2.4	Les Badgirs du golfe Persique	48
2.1.6	Carte géographique du golfe Persique.....	48
2.1.7	La province d'Hormozgan.....	51
2.1.8	Les Badgirs du Bandar Lengeh.....	53
2.1.9	Le Baadkesh (capteur de vent horizontal de la ville du Bandar Lengeh)	54
2.1.10	Les Badgirs de Dubaï et de Doha (Qatar).....	57
2.1.11	Le Baadkesh (capteur de vent horizontal du quartier de Bastakiah)	58
2.1.12	Éléments perforés et ouvertures dans le golfe Persique.....	59
2.1.13	Particularités des maisons du golfe Persique	59
2.5	Bâtiments munis de Badgir	66
2.6	Impact de la culture, religion et tradition sur l'architecture persane	72
2.7	Conclusion.....	75
	CHAPITRE III.....	76
	Étude du fonctionnement et de la conception des Badgirs	76
3.1	Différence de pression	76
3.2	Fonctionnement d'un Badgir, jour/nuit	78
3.3	Divers modes de fonctionnement d'un Badgir.....	78
3.1.1	Convection	78
3.1.2	Évaporation.....	78
3.4	Pression et dépression.....	79
3.5	Utilisation de jarres d'eau dans les Badgirs Égyptiens et Iraniens	79
3.6	Construction d'une fontaine au centre de la pièce à Badgir.....	80
3.7	Construction d'un Badgir	80
3.1.3	Structure	81

3.1.4	Colonne.....	82
3.1.5	Lames.....	82
3.1.6	Cage.....	83
3.1.7	Badgir à une face	86
3.1.8	Badgir à deux faces.....	87
3.1.9	Badgir à trois faces.....	87
3.1.10	Badgir à quatre faces (rectangulaire ou carré).....	87
3.1.11	Badgirs multidirectionnel (octogonaux et circulaires)	87
3.1.12	Ornements des Badgirs	88
3.8	Toit en forme de dôme	90
3.1.13	Hauteur des Badgirs.....	91
3.9	Badgirs des maisons traditionnelles iraniennes	91
3.1.14	Principe général	91
3.1.15	Les pièces les plus utilisées en été	93
3.10	Différence entre les Badgirs du golfe Persique et ceux du centre désertique	97
3.1.16	Badgirs des régions chaudes et humides	97
3.1.17	Badgirs des régions chaudes et arides	98
3.11	Conclusion.....	98
CHAPITRE IV		100
4.1	Étude in situ.....	100
4.3	Badgir de la maison de Nasuri, situé à Siraf (golfe Persique)	102
4.1.1	Observations de la température du Badgir de Siraf.....	107
4.4	Conclusion.....	108
4.6	Badgir, jardin de Dolat-Abad ; Yazd, zone désertique	109
4.1.2	Caractéristique des bâtiments dans le climat chaud et aride	111
4.7	Conclusion.....	112
4.9	Le tissu historique de la ville de Bushehr.....	113
4.1.3	Situation géographique et climat de la province de Bushehr	114
4.1.4	Différence d'altitude du terrain de la ville de Bushehr.....	115
4.10	Spécifications des maisons traditionnelles à Bushehr.....	118

4.11	Conclusion.....	118
4.13	Le village historique d'Abyaneh, construit en terre d'argile	120
	4.1.5 Caractéristiques architecturales d'Abyaneh	120
4.14	Conclusion.....	125
	CHAPITRE V	126
	Expérimentations, analyses et calculs numériques.....	126
5.1	Observation du flux d'air dans un Badgir.....	126
5.2	Masse volumique, pression et inertie thermique.....	128
5.3	Simulation numérique	129
	5.1.1 Analyse en soufflerie.....	129
	5.1.2 Angle du vent dominant à 0°.....	140
	5.1.3 Angle du vent dominant à 30°.....	140
	5.1.4 Angle du vent dominant à 45°.....	141
	5.1.5 Résultats et analyse des essais effectués en soufflerie.....	141
5.4	CFD (Computational Fluid Dynamics)	142
5.5	Gambit (Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit)	142
5.6	Fluent.....	143
5.7	Mise en place d'un modèle CFD	143
5.8	Équations utilisées dans les analyses CFD	144
	5.1.6 Nombre de Reynolds.....	148
5.9	Analyse numérique d'un Badgir	148
	5.1.7 Analyses sous Fluent.....	150
	5.1.8 Direction du vent à 0°.....	150
	5.1.9 Direction du vent à 30°	151
	5.1.10 Résultat des essais numériques.....	152
	5.1.11 Comparaison des analyses de la soufflerie et les analyses numériques	154
	5.1.12 Combinaison d'un système de ventilation hybride.....	154
	5.1.13 Combinaison d'un Badgir et d'un éolien vertical.....	157
5.10	Conclusion générale.....	158

Photos.....	159
Liste des figures	163
Glossaire	167
Bibliographie.....	168
Webographie.....	170

Introduction

L'évolution, avec les dérèglements climatiques, de l'équilibre entre sauvegarde de l'environnement et protection de l'être humain conduit à une pratique écologiquement responsable du projet architectural et urbain.

La durabilité dans la conception des établissements humains, à toutes les échelles, a cessé d'être un sujet marginal ; elle constitue désormais un axe central de la progression du projet, depuis l'élaboration du programme jusqu'à la mise en exploitation des ouvrages et des équipements.

Le rôle de l'architecte est de se poser les questions pertinentes, à chaque étape de la réalisation d'un projet ; de façon à élaborer une réponse en cohérence avec le contexte géoclimatique et socio-économique propre au territoire et les objectifs fonctionnels conformes au programme.

Mon expérience professionnelle en France, au Chili ou aux États-Unis, m'a montré que cette problématique environnementale structure en continuité la pratique du projet architectural et urbain à toutes les échelles spatiales. L'intermodalité des transports doit faire une place de plus grande aux circulations douces et/ou les moins polluantes possible.

Cette double exigence environnementale concernant la gestion des flux de transport n'est qu'un exemple parmi tant d'autres qui conduisent à réévaluer et repenser le rapport de la ville à son territoire.

La pratique écologiquement responsable du projet architectural et urbain nécessite la capacité de mesurer, pour chaque variante étudiée, les coûts environnementaux durant la réalisation puis l'exploitation.

Dans une société, hantée par le doute ; quant à son devenir, quant à l'avenir des générations futures, c'est dans la quête d'une relation harmonieuse entre la ville et son territoire que l'architecte fonde la légitimité de ses prescriptions architecturales ou urbaines.

Dans ma manière d'agir et de penser, la question de la durabilité occupe une place primordiale.

Qu'est-ce que la notion de l'homme et son bien-être ?

Quels sont les véhicules, supposés favoriser l'usage des techniques énergétiques comme la puissance solaire, l'eau et/ou la ventilation naturelle ?

Comment un habitat devrait-il être passivement chauffé, refroidi, ventilé, sensible aux changements saisonniers ?

Pourquoi privilégier des structures en bois, en pierre ou en tout autre matériau naturel? Comment minimiser les impacts négatifs d'une construction sur son environnement et sur la nature ?

Ce livre porte sur l'histoire et l'évaluation des performances des tours à vent (Badgir,¹ en persan) déployées depuis de nombreux siècles dans la région du golfe Persique et les territoires désertiques du centre de l'Iran.

Les Badgirs iraniens ressemblent à de grandes cheminées. Des conduits verticaux contenant des fentes sur leurs façades aspirent l'air pour ensuite le diriger vers les espaces internes et assurer le confort des habitants.

Au cours du VIII^e et IX^e siècle, ces tours à vent se sont amplifiées de manière conséquente. Le matériau de construction exploité a été en grande partie l'adobe : mélange de terre d'argile, de paille et d'eau ; cette matière contient de fortes capacités de stockage de chaleur et permet l'extraction d'air chaud.

L'objectif de cette recherche est de démontrer la performance environnementale des systèmes de ventilation et de régulation de température dans les bâtiments utilisant la ventilation naturelle plutôt que des systèmes mécaniques.

Pourquoi retourner vers les anciennes prescriptions ?

L'épuisement des ressources naturelles, le réchauffement climatique et l'augmentation des prix des combustibles fossiles sont des préoccupations réelles des êtres humains.

Au cours des 60 dernières années, les journées et les nuits chaudes ainsi que les vagues de chaleur sont apparues de façon exponentielle. Les précipitations ont diminué et les zones touchées par la sécheresse ont été atrocement accrues dans certaines parties du monde.

Nous sommes préoccupés par la pollution, l'émission de gaz à effet de serre, le trou dans la couche d'ozone et le réchauffement climatique brusque.

Pendant la période 1970-2010, la deuxième plus forte hausse régionale des émissions de CO₂ provenant des bâtiments résidentiels se trouvait au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. L'énergie consommée dans ces secteurs est en majorité produite par des combustibles fossiles, provoquant une quantité considérable d'émissions de gaz à effet de serre.

De 1995 à 2011, la croissance de la population a causé plus de 200 % d'augmentation des émissions de CO₂ dans le monde.

¹ En persan, Badgir signifie « tour à vent ». Dans le dictionnaire iranien, nous trouvons diverses appellations pour décrire une tour à vent : Badgir, Badkhan, Badkhaneh, Badkhor, Badkesh et Badrass.

En 2011, l'émission de CO₂ des industries manufacturières et de la construction en Iran a été évaluée à 104,26 (en millions de tonnes). La Catégorie GIEC révèle ces émissions (Figure 1).



Figure 1 : Émissions de CO₂ des industries manufacturières et de la construction (en millions de tonnes) en Iran

33 % des terres de notre planète se trouvent dans des zones désertiques. Nous n'avons pas assez d'eau dans ces déserts ni assez d'humidité nécessaire pour les plantes ; mais la nature nous offre une pléthore d'énergies, telles que l'énergie du vent, du soleil et des eaux souterraines.

L'expansion de la construction nous contraint à nous pencher sérieusement sur un sujet sensible qui est l'économie d'énergie. Avec une prise de conscience accrue des coûts et des répercussions environnementales, une des méthodes efficaces pour réduire la consommation d'énergie demeure la ventilation naturelle.

La ventilation naturelle peut être définie comme l'usage de stratégies passives afin d'aspirer l'air de l'extérieur vers l'intérieur d'un bâtiment pour un processus de refroidissement. Avec une conception appropriée, adaptée à l'emplacement du bâtiment, pour économiser de l'énergie, la ventilation naturelle remplace tout, ou partie d'un système mécanique.

La conception spécifique des systèmes de ventilation naturelle varie en fonction du type de bâtiment et du climat local. Ces dispositifs s'appuient sur les forces motrices naturelles, comme les différences de température entre un bâtiment et son environnement.

Par des procédés d'« évaporation »² et de « convection »,³ ainsi que les courants d'air, nous pouvons gérer le confort thermique interne d'un local. Le déplacement d'air s'effectue suivant le processus de « Pression »⁴ et de « Dépression »⁵.

² Passage du liquide à l'état gazeux. L'air chaud, en passant sur une fontaine crée un effet d'évaporation.

³ La convection ressemble à une bande transporteuse invisible qui transfère de la chaleur à travers les fluides (liquides et gaz). Lorsqu'une partie d'un fluide est chauffée, elle se dilate. Le fluide est ainsi plus léger et moins dense que celui autour d'elle, de sorte qu'il s'élève. Et en s'élevant, il s'éloigne de la source de chaleur ; ensuite, il commence à refroidir et à se déplacer vers le bas ; et le cycle recommence.

Pour décrire minutieusement l'impact de la ventilation naturelle, à travers cette recherche, nous allons nous concentrer sur le golfe Persique⁶.

L'architecture traditionnelle de ces régions demeure le produit de la géographie, du climat local et de la culture de différents peuples qui y vivent. C'est une architecture conçue selon les principes bioclimatiques ; elle exploite des matériaux aux propriétés thermiques exemplaires, comme la terre, le bois et la pierre. C'est une architecture conforme à l'environnement, sans endommager la nature, au contraire, elle cherche à minimiser la consommation d'énergie, évitant considérablement la pollution.

Hormis le soleil et le vent, la mer joue un rôle important sur l'urbanisme et l'architecture vernaculaire du golfe Persique. L'eau y constitue un élément majeur du paysage, d'où émerge une caractéristique intéressante dont il faudrait tirer profit.

Une des conditions climatiques de la région du golfe Persique reste sa forte humidité, où le vent devient la technique de refroidissement passif par excellence. L'usage de la terre d'argile et de la brique de boue aide à stabiliser les gains de chaleur intense et les fluctuations quotidiennes de la température.

La structure la plus adéquate jouant un rôle fondamental dans les techniques de refroidissement au golfe Persique est le Badgir (la tour à vent). Nous le constatons dans les climats chauds et arides ainsi que chauds et humides.

Le premier objectif de cette investigation est d'explorer le climat désertique et le second est d'expliquer les énergies durables qui existent dans ces régions.

Dans le but d'un refroidissement naturel, nous allons étudier la manière dont nous devons exploiter le vent, l'énergie solaire ainsi que les eaux souterraines.

Cette étude a pour but de démontrer la valeur des Badgirs par un aperçu de l'application des dispositifs de ventilation naturelle comme une alternative aux appareils de refroidissement modernes.

De ce fait, plusieurs études expérimentales ont été effectuées en réalisant des essais en soufflerie, exerçant des analyses sur la ventilation naturelle dans les bâtiments, notamment les modèles à grande échelle.

⁴ La pression est le rapport de la force à la zone sur laquelle la force est distribuée.

⁵ Une zone de basse pression est une région où la pression atmosphérique est inférieure à celle des zones environnantes. Les systèmes de basse pression se forment dans les zones de divergence du vent qui se produisent dans les couches supérieures de la troposphère.

⁶ Le golfe Persique est la partie peu profonde de l'océan Indien qui se trouve entre la péninsule arabique et le sud-est de l'Iran.

Recherches antérieures

Plusieurs recherches ont été effectuées par architecte et chercheuse anglaise, Susan Roaf ;⁷ elle a passé dix ans de sa vie avec des nomades en Iran et en Irak. Son but principal a été d'observer l'effet de la température saisonnière sur la vie des gens au sein des maisons traditionnelles. Au cours de son séjour en Iran, elle a étudié le comportement et le mode de vie des gens de Yazd (région du centre désertique).

Susan Roaf nous révèle que les premiers cas de Badgir authentifiés sur le plateau iranien sont six exemples datant du 14^e siècle : Un Badgir se trouvant à Khorasan et cinq autres dans la province de Yazd. Il s'agit notamment des Badgirs de deux et quatre faces.

Selon Susan Roaf⁸, les voyageurs du 17^e siècle ont aussi parlé des Badgirs de la ville d'Ispahan, de Shiraz, de Lar, de Kashan et de Tabriz, et il semble que ces tours aient été largement utilisées à cette époque.

Thévenot mentionne qu'à Shiraz et à Lar, « *les maisons ont des tours qui poussent vers le ciel pour capter le vent venant de toutes les directions* ».

En 2008, trois chercheurs iraniens (Bahadori, Mazidi et Dehghani⁹) ont construit deux modèles de Badgirs à l'université de Yazd en Iran. Le premier modèle a été muni de colonnes humides en tuiles d'argile, tandis que le deuxième contenait des surfaces humides en toile de jute.

Afin de filtrer l'air entrant vers l'intérieur et d'empêcher la perte d'air, dans les deux cas, toutes les ouvertures du haut de la tour ont été équipées d'écrans et de rideaux plastiques. Les rideaux ont été installés verticalement avec une distance de 10 cm les uns des autres, fixés solidement sur la partie inférieure pour les empêcher de flotter. Ils étaient ensuite humidifiés par un jet d'eau installé au-dessus.

Le Badgir avec des surfaces humides en toile de jute était également équipé de grillages similaires à ceux que nous utilisons dans des climatiseurs classiques. Ces grillages ont été installés au niveau des ouvertures sur le dessus de la pièce à Badgir pour être humidifiés.

Les chercheurs ont constaté qu'en nous servant des surfaces humides, dans les deux cas, nous gagnons quelques degrés de plus en fraîcheur¹⁰.

⁷ Susan Roaf : Living with the desert, page 59

⁸ Ibid.

⁹ IIIIEE Theses 2006—Energy-efficient buildings in warm climates of the Middle East—Experience in Iran and Israel.

¹⁰ IIIIEE Theses 2006—Energy-efficient buildings in warm climates of the Middle East—Experience in Iran and Israel—page 27.

En 1964, six petits bâtiments ont été construits sous la direction de l'architecte Hassan Fathy, sur les terrains du Centre de Recherche sur les Bâtiments au Caire (CBRC)¹¹. Ces expériences ont été réalisées afin d'évaluer le coût, la disponibilité locale et le confort thermique.

À cette occasion, différents matériaux de construction ont été utilisés. Un des bâtiments a été entièrement construit en briques de boue avec des murs épais de 50 cm et le toit en forme de coupole et de voûte combinées. L'autre a été construit avec une épaisseur de 10 cm en panneaux de béton préfabriqués, tant pour les murs que pour le toit.

Des analyses ont été réalisées au mois de mars, lorsque la température de l'air extérieur variait entre 12 °C et 6 °C. La température passait de 28 °C à 14 heures et revenait ensuite à 12 °C vers 16 heures. Le changement de température de l'air à l'intérieur du modèle en briques de terre ne dépassait pas les 2 °C pendant la période de 24 heures, variant de 21 °C à 23 °C, tandis que la température maximale de l'air à l'intérieur du modèle préfabriqué en béton a atteint 36 °C soit 13 °C de plus que dans le modèle en briques crues et 9 °C de plus que la température de l'air à l'extérieur.

¹¹ Hassan Fathy—Natural Energy and Vernacular Architecture—Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates—page 40.

CHAPITRE I

I.1 Carte géographique d'Iran

L'Iran est le dix-huitième plus grand pays du monde. Sa superficie équivaut à peu près à celle du Royaume-Uni, de la France, de l'Espagne et de l'Allemagne réunis, soit un peu moins que l'état d'Alaska. La superficie de l'Iran est 1 648 000 km². Ses frontières sont avec l'Azerbaïdjan et l'Arménie au nord-ouest ; la mer Caspienne au nord ; le Turkménistan au nord-est ; le Pakistan et l'Afghanistan à l'Est ; la Turquie et l'Irak à l'ouest, et enfin les eaux du golfe Persique et du golfe d'Oman au sud. L'Iran avait une population d'environ 77 891 220 d'habitants en 2011.

L'Iran se situe entre les masses d'air anticycloniques de l'Asie centrale et du nord de la Sibérie, des vents méditerranéens au centre (vents d'ouest et dépressions amenant la pluie et la neige) et des influences tropicales et subtropicales au sud et au sud-est du pays.

Il existe différents types de climats en Iran, depuis les Basse-Terre subtropicales humides sur la côte sud de la mer Caspienne¹² jusqu'aux déserts chauds et secs (Dasht-e Kavir¹³ et Dasht-e Lut¹⁴).

Au nord-ouest, en décembre et en janvier, les hivers sont froids avec de fortes chutes de neige et des températures glaciales. Le printemps et l'automne sont relativement doux, alors que les étés sont chauds et secs.

Au sud, les hivers sont doux et les étés très chauds, avec des températures moyennes en juillet excédant les 38 °C. Sur la plaine du Khouzestan, la chaleur de l'été est accompagnée d'une forte humidité.

En général, l'Iran a un climat aride dans lequel la plupart des précipitations, relativement faibles, tombent d'octobre à avril. Dans la plupart des régions du pays, les précipitations annuelles sont de 25 cm ou moins. Les exceptions majeures sont les plus hautes vallées des monts Zagros¹⁵ et la plaine côtière de la Caspienne où les précipitations annuelles sont en moyenne de 50 cm. Dans la partie occidentale de la Caspienne, les chutes de pluie excèdent les 100 Cm par an et sont distribuées de

¹² La mer Caspienne est à l'intérieur de l'Asie, bordée par la Russie, le Daguestan, la Kalmoukie, l'oblast d'Astrakhan, l'Azerbaïdjan, le Turkménistan, l'Iran, et le Kazakhstan.

¹³ Dasht-e Kavir est connu sous le nom de Kavir-e Namak ou grand désert salé, c'est un grand désert au milieu du plateau iranien. Il mesure environ 800 km de long et 320 km de large.

¹⁴ Le Dasht-e-Lut est un grand désert salé de la province de Kerman dans le sud-est de l'Iran. Avec une température maximale de 70,7 degrés, c'est un des endroits les plus chauds du monde. C'est également un des plus arides.

¹⁵ Les monts Zagros constituent la plus grande chaîne d'Irak et la deuxième plus grande chaîne d'Iran. Elle a une longueur totale de 1 500 km depuis l'ouest de l'Iran, plus particulièrement la province du Kordestan, aux frontières de l'Irak jusqu'au golfe Persique. La chaîne se termine au détroit d'Ormuz. Les points culminants sont le Zard Kuh (4 548 m) et le mont Dena (4 359 m).

manière relativement égale tout au long de l'année. Cette situation contraste avec celle de certains bassins du Plateau central, qui reçoivent 10 cm, voire moins de précipitations annuelles.

Les chaînes montagneuses d'Alborz¹⁶, de Zagros et du nord-ouest de l'Iran sont caractérisées par des surplus de précipitations. Elles sont humides pour une partie de l'année, voire toute l'année. Le reste du pays est caractérisé par le manque de précipitation. Des vents forts ou permanents ainsi que des températures élevées sont la cause d'une aridité extrême.

L'Iran peut être divisé en quatre grandes régions climatiques (Ghobadian, Taghi & Ghodsi, 2008) :

- Climat tempéré dans le nord
- Climat froid en montagne et région des hauts plateaux
- Climat chaud et sec en plateau central
- Climat chaud et humide dans le sud

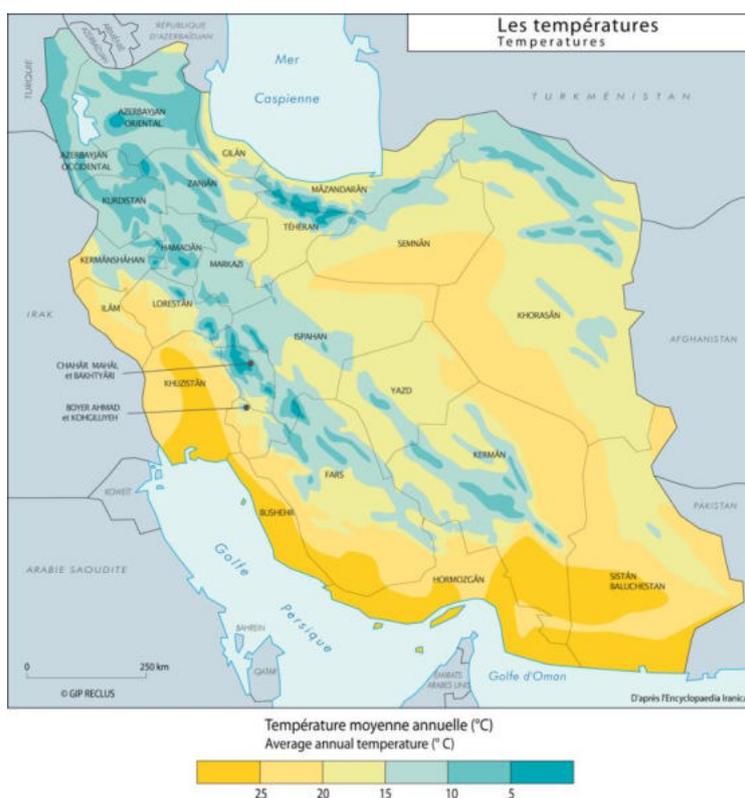


Figure 2 : Température moyenne annuelle de l'Iran (source : Irancarto)

¹⁶ Alborz est une chaîne de montagnes au nord de l'Iran, s'étendant des frontières de l'Arménie au nord-ouest, à la mer Caspienne au nord, jusqu'à l'est aux frontières du Turkménistan et de l'Afghanistan. C'est au sud de la chaîne qu'est situé le plus haut sommet d'Iran, le mont Damavand (5671 m) et la ville de Téhéran, située en moyenne à 1300 mètres d'altitude (le centre est à 1200 mètres).

I.2 Consommation d'énergie

Les secteurs résidentiels et commerciaux iraniens ont utilisé 40,5 % de l'énergie finale totale du pays en 2006 (Iran, ministère de l'Énergie, 2006). Les principaux vecteurs énergétiques utilisés pour répondre à cette demande d'énergie sont le gaz naturel, les produits pétroliers et l'électricité (Figure 3, l'organisation iranienne de l'économie de carburant, 2008).

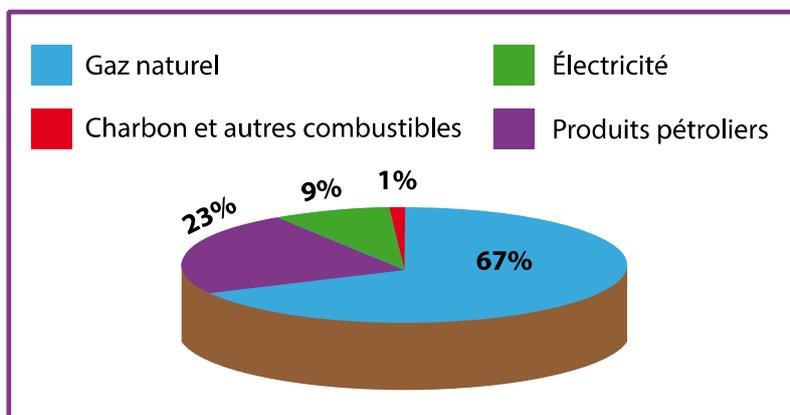


Figure 3 : Énergie utilisée par le secteur du commerce (selon les statistiques IFCO, 2008)

L'électricité est la principale source d'énergie utilisée pour le refroidissement. Environ 91 % de l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles tandis que le reste provient de la production d'hydroélectricité.

En 2006, le secteur résidentiel iranien représentait une consommation d'électricité de 33,2 %, ce qui était le plus grand partit parmi tous les secteurs. La consommation d'électricité par habitant a été rapportée à 2 690 kWh, montrant une augmentation de 2,4 % par rapport à 2005 (Tavanir, 2008). Sans aucun doute, la qualité de l'air a été influencée par cette énorme quantité de consommation de combustibles fossiles.

I.3 La pollution atmosphérique

En 2004, les émissions de dioxyde de carbone par habitant étaient de 6,4 tonnes (Banque mondiale, 2008). En 2006, le total des émissions de CO₂ dues à la consommation d'énergie a été de 381 938 000 tonnes dont 29 % ont été émis par les secteurs résidentiel et commercial (Iran, ministère de l'Énergie, 2006), voire le schéma suivant (Figure 4).

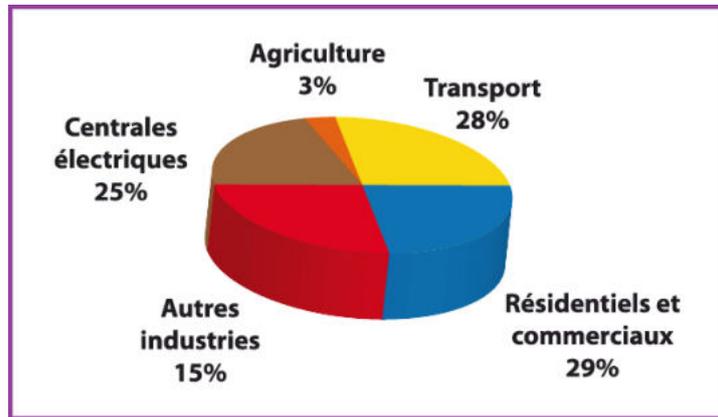


Figure 4 : Émissions de CO2 de divers secteurs d'activités en Iran (2006)¹⁷

La pollution atmosphérique est un impact environnemental majeur de la consommation d'énergie et des émissions dans le pays, en particulier dans la capitale, Téhéran. Le schéma suivant (Figure 5) illustre la qualité de l'air à Téhéran en 2006. Pour environ 244 jours, la qualité de l'air avait été signalée comme bonne, ce qui est un niveau acceptable même si elle peut être nuisible aux personnes qui sont malades ou sensible à l'air pollué.

En 84 jours, soit 23 % du temps de l'année, les gens ont été exposés à un air pollué (Iran, ministère de l'Énergie, 2008).

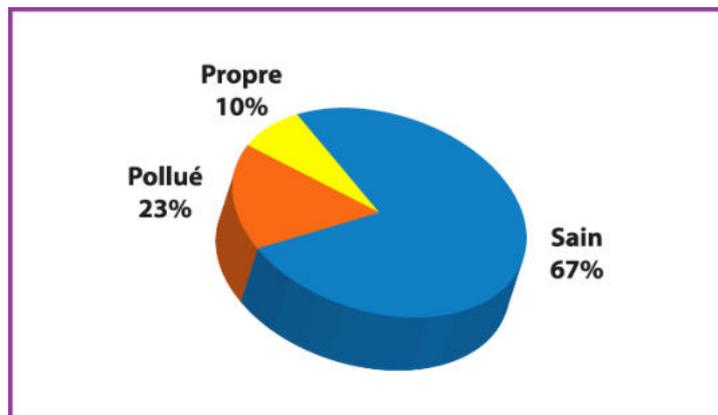


Figure 5 : Qualité de l'air à Téhéran en 2006¹⁸

I.4 Les climatiseurs mécaniques modernes (Cooler)

Il est important de décrire ce système de refroidissement qui malgré sa notoriété demeure néfaste à la santé de l'homme et à son bien-être. Dans les régions chaudes, les Coolers (les refroidisseurs mécaniques, désignés sur l'image ci-dessous) sont devenus des refroidisseurs de confort par excellence.

¹⁷ Source : Iran, ministère de l'Énergie – <http://www.moe.gov.ir>

¹⁸ Ibid.



Figure 6 : Des Coolers placés au pied des tours à vent

À son apparition, le « Cooler » a été un luxe pour seulement quelques privilégiés, tandis qu'à nos jours, sa présence demeure une obligation dans de nombreuses maisons d'habitation, bureaux ainsi que dans le transport public. Cependant, leurs entretiens défectueux conduisent à des problèmes de santé, déclenchant des troubles de l'organisme, comme la maladie du légionnaire (légionellose)¹⁹.

D'après les recherches effectuées, voici quelques risques provenant des Coolers :

- Les changements brusques de température et d'humidité affectent le système respiratoire.
- Ils ont un effet desséchant sur la peau et les muqueuses.
- La circulation d'air peut transmettre des maladies respiratoires infectieuses.
- La poussière et les champignons dans l'air peuvent provoquer des réactions allergiques.
- La climatisation est associée à une rhinite chronique et à la pharyngite, irritation de la gorge et enrrouement.
- La climatisation peut causer les affections oculaires telles que conjonctivite et blépharite.

Sans oublier la forte consommation d'électricité et le bruit ambiant qui contribue à son tour à la pollution sonore.

1.1.1 Fonctionnement d'un Cooler

Une pompe électrique fait circuler l'air depuis le bac situé au fond de l'appareil. Pulvérisée dans la grille du centre, l'eau se transforme en gouttelettes. La grille absorbe et retient l'humidité. Par conduction directe, un ventilateur aspire la

¹⁹ Pneumopathie aiguë grave due à un bacille Gram négatif : Legionella pneumophila qui se propage par les systèmes d'air conditionné et les canalisations d'eau. Source : Encyclopédie médicale.

température ambiante, transférant la chaleur du côté sec des électrodes vers le côté humide. Ce processus provoque l'évaporation. Cette vapeur est ensuite entraînée par l'air, traversant les canaux verticaux pour être évacuée au sommet de l'appareil. L'air frais passe à travers les canaux horizontaux pour assurer la fraîcheur ambiante.

Selon le ministère de l'Énergie, environ 70 % des ménages iraniens, durant la saison chaude, utilisent un refroidisseur à eau ou à gaz. Un refroidisseur à eau nécessite une puissance de 500 watts, et un refroidisseur à gaz nécessite une puissance de 2 000 watts. Vu l'utilisation massive de ces équipements, nous imaginons bien les effets néfastes sur l'environnement et la santé des utilisateurs.

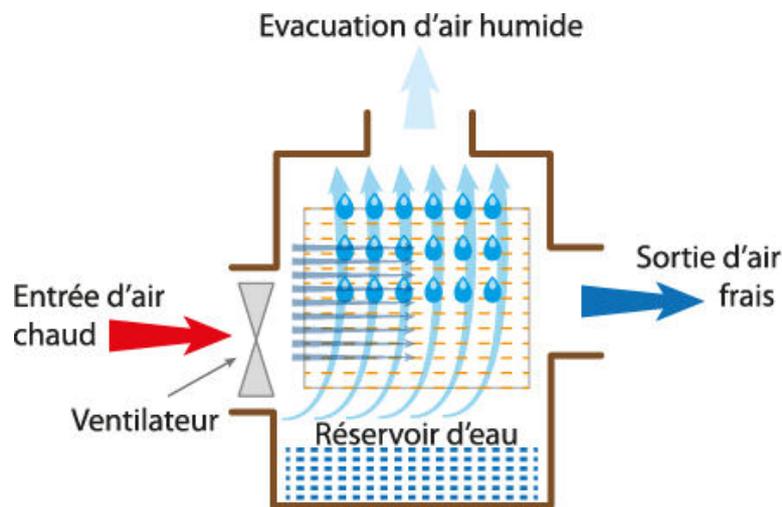


Figure 7 : Fonctionnement d'un Cooler à eau

I.1.2 Consommation d'électricité en Iran pour l'année 2011

I.1.3 Nombre d'abonnés iraniens à l'électricité en 2011

- Ménages : 21 045 000
- Administratifs : 1 013 000
- Divers : 3 223 000
- Industriel : 159 000
- Agricole : 258 000
- **Total : 25 698 000**

En sachant qu'un Cooler à eau consomme 500 watts et qu'un Cooler à gaz consomme 2 000 watts en électricité, nous avons :

$N \times 2\,000 + N \times 500 = 15\,000 \text{ Mw}$ d'où les deux « N » sont les Cooler à gaz et le Cooler à eau respectivement.

En sachant que chaque abonné utilise l'un de ces deux Coolers, nous avons :

$$N (\text{Cooler à gaz}) + N (\text{Cooler à eau}) = 24\,298\,000$$

Et, en observant ces deux chiffres, nous avons :

$$N (\text{Cooler à gaz}) = 1\,911\,000$$

$$N (\text{Cooler à eau}) = 22\,387\,000$$

Il est à noter que le prix d'électricité (2013) est très bas en Iran, entre 7 et 16 cents, alors qu'en Australie, le tarif est entre 46 à 56 cents.

Conformément à la norme d'étiquetage iranienne, les refroidisseurs à évaporation électrique possédant un rendement énergétique de l'ordre de 33 % à 39 % sont tombés dans la classe F (mauvais)²⁰. Une variété d'équipements produite en Iran utilise ainsi des matériaux non standards.

1.5 Déserts, lacs et précipitations en Iran

Le long de la frontière entre l'Iran et l'Afghanistan, il y a plusieurs lacs marécageux qui se dilatent et se contractent selon la saison de l'année. Le plus grand d'entre eux reste Hamun-Sabari, dans le nord de province du Seestan et Baloutchistan.

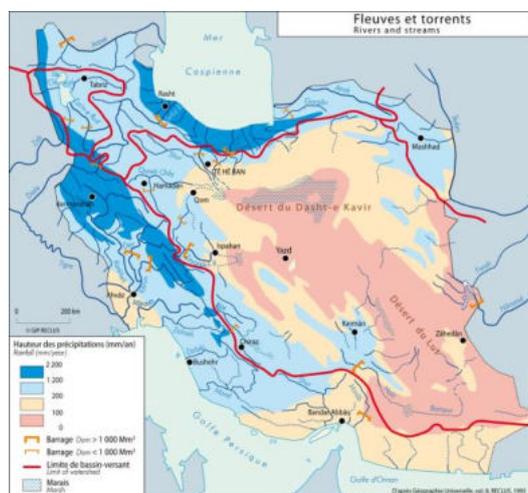


Figure 8 : Déserts et lacs en Iran (source : Irancarto)

Les véritables lacs d'eau douce sont extrêmement rares en Iran. Il y a environ 10 lacs dans le pays, et la plupart d'entre eux sont de petites tailles. Les plus importants sont : le lac Ourmia (superficie, 3 900 – 6 000 km² selon la saison) situé dans l'ouest de l'Azerbaïdjan, Namak (1 806 km²), dans la province de Qom, Bakhtegan (750 km²), dans la province de Fars, Tasht (442 km²), dans la province

²⁰ Ministère iranien de l'Énergie en 2008.

de Fars, Moharloo (208 km²), dans la province de Fars, Howz Soltan (106 5 km²), dans la province de Qom.

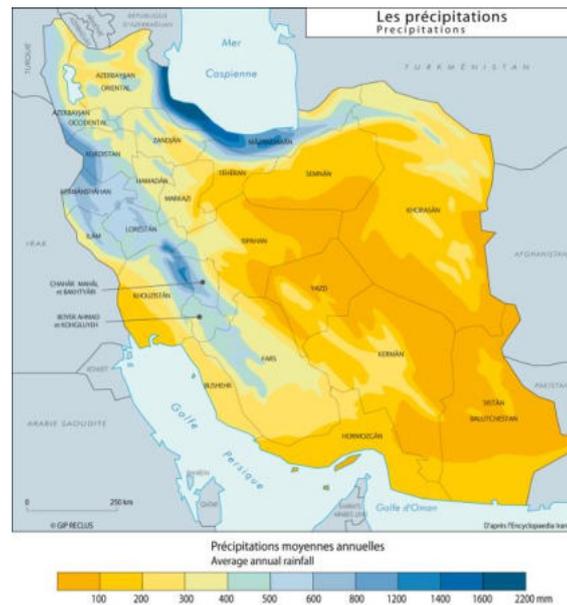


Figure 9 : Précipitations moyennes annuelles en Iran (source : Irancarto)

Au centre de l’Iran, le temps est très différent de celui du sud. Une forte humidité accompagne la chaleur du sud, tandis que le désert iranien connaît un climat chaud et aride. Les caractéristiques climatiques du centre désertique sont les suivantes :

- Un temps chaud et sec en été et froid et sec en hiver
- De très faibles précipitations
- Peu d’humidité
- Une grande différence de température entre les nuits et les jours
- La présence fréquente de vents de sable

Les vents qui parviennent du sud-ouest et du nord-ouest des zones désertiques perdent leur humidité pendant leur passage sur les autres régions. Dans les zones semi-tropicales où la pression de l’air est élevée, il fait chaud et sec. Afin de réaliser un confort thermique adéquat, dans la conception des bâtiments de ces régions, la sécheresse du climat doit être prise en compte.

L’intensité de la lumière²¹ directe du soleil dans ces régions est telle, qu’elle produit de 700 à 800 kcal/hm² d’énergie sur les surfaces horizontales²². Pendant ce temps, le ciel dans ces régions est généralement sans nuages, alors que dans l’après-

²¹ L’unité de mesure de l’intensité lumineuse est la candela (cd). Une candela est l’intensité lumineuse, dans une direction donnée, d’une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 hertz et dont l’intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

²² 800 kcal/hm² = 930 W/m².

midi, brouillard, orage et poussière sont élevés en raison d'un temps chaud. L'été, la température dans la journée atteint 40 °C à 50 °C, alors que la nuit la température peut tomber entre 15 °C et 20 °C.

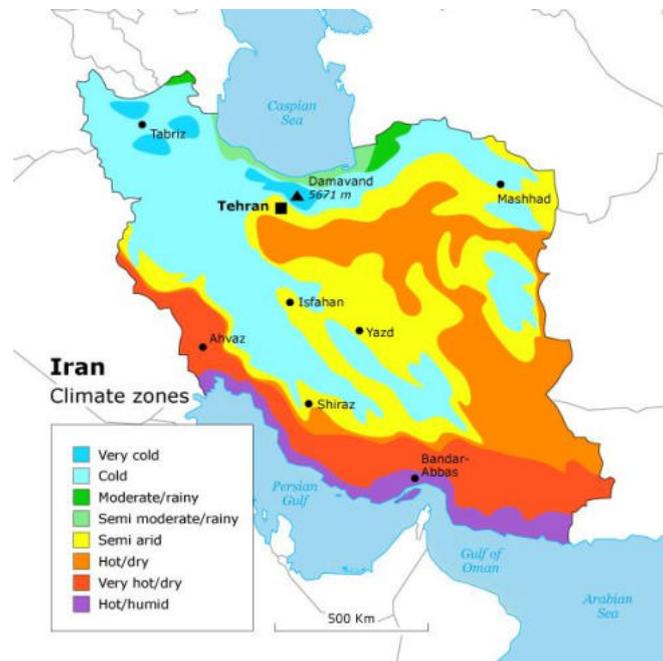


Figure 10 : Différence de température en Iran (source : Irancarto)

Déserts

Les vastes déserts de l'Iran se trouvent sur le plateau du nord-ouest, près de Téhéran et Qom, sur une distance d'environ 643 km vers le sud-est. Presque, 1/6 de la superficie totale de l'Iran est un désert aride.

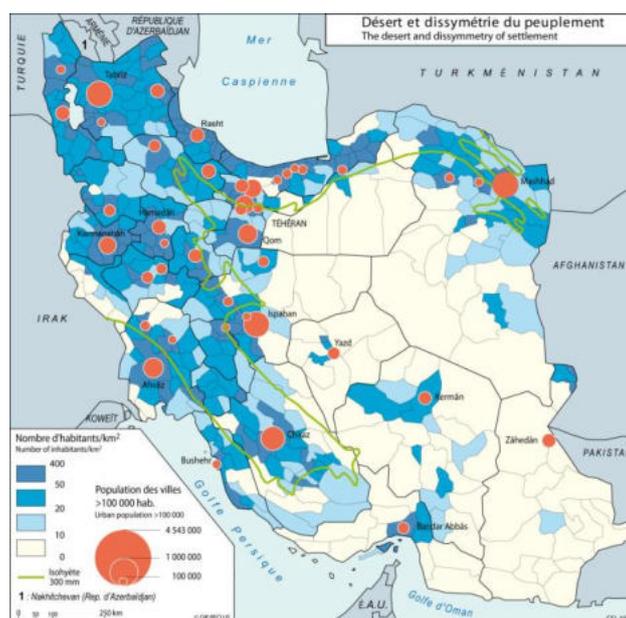


Figure 11 : Déserts et dissymétrie du peuplement (source : Irancarto)

Les deux plus grandes régions désertiques Iraniennes sont connues sous le nom de Kavir-e-Lut et Dasht-e Kavir. Ces déserts contiennent des minéraux tels que chlorures, sulfates et carbonates.

I.6 Construction passive iranienne

L'architecture traditionnelle iranienne a été conçue selon les principes bioclimatiques, employant certains matériaux spécifiques aux propriétés thermiques tels que la terre, le bois et la pierre.

L'architecture qui s'est développée dans les zones chaudes et humides du golfe Persique possède une technique de construction cohérente qui favorise un conditionnement climatique passif.

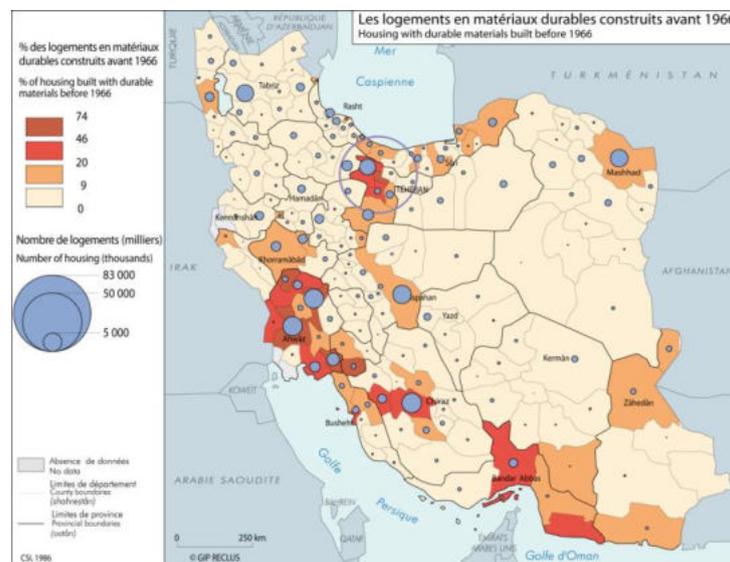


Figure 12 : Logements construits en matériaux durables en Iran (source : Irancarto)

Dans la région du golfe Persique, les maisons sont formées autour d'une cour et ont des murs hauts et épais. Afin de protéger les habitants du fort rayonnement solaire, ces maisons ont été construites à proximité les unes des autres. Les murs sont structurellement séparés, mais assurent collectivement une protection thermique colossale. Les ruelles piétonnes étroites de 1 m à 1,50 m (Figure 13) sont ombragées et permettent d'accélérer l'air qui y circule.



Figure 13 : Ruelles étroites, ombre et soleil de la ville de Bushehr au bord du golfe Persique

I.7 Disponibilité des énergies naturelles

I.1.4 Énergie solaire

Le soleil émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement traverse l'atmosphère, touche la surface terrestre, et est soit absorbé et chauffe la terre, soit réfléchi vers le haut. Même si le soleil brille partout sur la Terre, il y a une grande différence dans la répartition de la température en passant d'une région à l'autre : l'équateur et les deux pôles, nord et sud.

Le rayonnement électromagnétique qui provient du soleil est conçu de photons. L'air est constitué d'atomes attachés ensemble sous forme de molécules. L'absorption des photons permet aux atomes de gagner de l'énergie cinétique. En se réchauffant, les molécules se déplacent ; leur mouvement combiné à la rotation de la Terre provoque le vent.

L'équateur, le pôle nord et le pôle sud reçoivent la même quantité de rayonnement, mais la zone qui reçoit le rayonnement aux deux pôles est plus grande que la zone qui reçoit la même quantité de rayonnement à l'équateur, et cela à cause de l'angle d'incidence par rapport à la normale.

Le soleil est à angle droit au niveau de l'équateur, tandis qu'il se trouve à un angle oblique aux pôles. Par conséquent, la quantité de rayonnement qui tombe sur une unité de surface au niveau des pôles est inférieure à la radiation tombant sur une unité de surface à l'équateur. Ceci peut être expliqué clairement à l'aide de la figure ci-dessous :

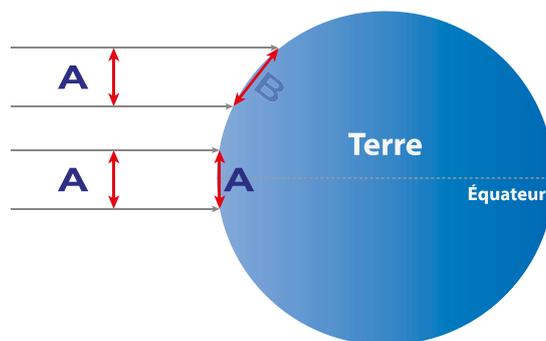


Figure 14 : Angles du rayonnement solaire

De plus, la quantité d'absorption du rayonnement solaire est affectée par la concentration de molécules d'air dans l'atmosphère. Pour atteindre les pôles, le rayonnement solaire traverse un chemin beaucoup plus long que pour atteindre l'équateur.

Il faut aussi noter que la réflexion d'ondes de la lumière est influencée par la nature de la surface. Aux pôles, la terre est recouverte de glace, et comme la glace possède une capacité de réflexion élevée, près de 75 % à 95 % de l'énergie qui

atteint les pôles sont réfléchies. Cependant, avec l'augmentation de la température de la terre et la fonte des glaces aux pôles, l'énergie solaire est de plus en plus absorbée.

Pendant la journée, les personnes vivant dans les régions chaudes, près de l'équateur, souffrent de hautes températures. Le vent est toujours chaud et sec, et les maisons sont naturellement chaudes puisque le soleil frappe directement.

Comment ont fait nos ancêtres pour refroidir leurs espaces de vie ?

Ils ont essayé de trouver des solutions novatrices afin de refroidir leurs maisons et de conserver leurs nourritures. Le manque de technologie et d'équipement de refroidissement, les ont amenés à créer des méthodes simples. Nous allons parler amplement de ces idées novatrices dans les chapitres qui suivent.

2 000 ans avant J. C., les Égyptiens utilisaient de grands bassins d'eau pour humidifier l'ambiance. Les Indiens se servaient des tapis humides pour créer un effet de refroidissement à l'intérieur des pièces. Les tapis humides étaient suspendus aux portes et fenêtres, et quand les vents chauds les traversaient, le processus d'évaporation et le courant d'air causaient un effet de rafraîchissement.

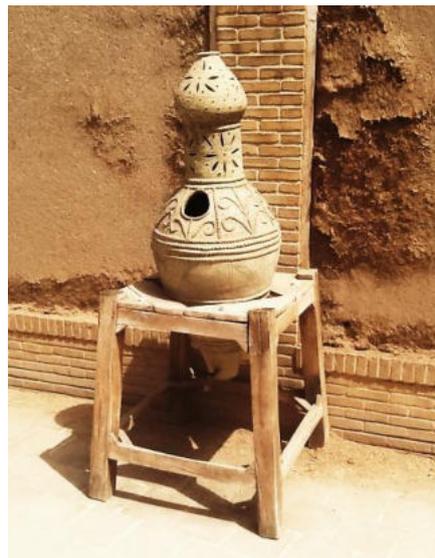


Figure 15 : Jarre perforée destinée à rafraîchir l'eau, Kashan, Iran

1.8 Température idéale pour le corps humain

Il convient de rappeler deux points importants concernant le comportement du corps humain envers la chaleur ambiante ainsi que l'origine de la vapeur d'eau.

Lorsque la température de l'air se rapproche de la température du corps humain (37 °C), tout l'effet de refroidissement est crédité à l'évaporation. Les pertes de chaleur par convection et rayonnement diminuent au minimum pour devenir finalement nulles. Si la température dépasse les 37 °C et le taux d'évaporation

diminue, le corps humain commence à gagner de la chaleur par convection de l'air chaud en mouvement autour du corps.

Même si la température est assez élevée, lorsque l'air se déplace sur la peau humide, il donne une sensation de fraîcheur. En conséquence, la température du corps humain a été utilisée comme un point de référence pour la ventilation en mettant en avant l'hypothèse que la ventilation naturelle ne serait efficace que lorsque les températures sont inférieures à 37 °C.

Le point de rosée²³ est la mesure la plus utile combinée de la température et de l'humidité. Le point de rosée est la température à laquelle la teneur en vapeur d'eau de l'air est à sa saturation. Il varie avec la quantité d'eau dans l'air.

1.1.5 Le mécanisme d'évaporation de l'eau

Imaginons un espace fermé avec de l'eau liquide comme le montre le dessin suivant (Figure 16). L'énergie cinétique moyenne ainsi que le mouvement des particules dans l'eau liquide sont régis par la température.

Certaines particules ont une énergie supérieure à la moyenne et s'échappent du liquide.

Sur cette image, nous pouvons constater que les particules d'eau gazeuse exercent une pression sur les parois.

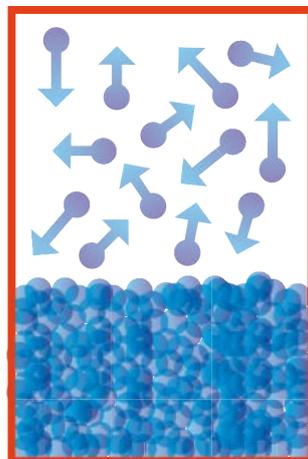


Figure 16 : Espace fermé avec de l'eau liquide et particules de gaz (vapeur d'eau)

Dans les climats humides et secs, le mouvement d'air et l'évaporation sont les principaux éléments affectant les effets de refroidissement. Pour analyser l'état thermique intérieur lié à la construction, la carte bioclimatique de Givoni est un indice important. Son idée est basée sur le « confort » et des zones dites « de conditions supportables ». Nous pouvons y observer la relation entre la vitesse de

²³ Le point de rosée ou température de rosée est la température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il se produise une formation d'eau par condensation.

l'air et des conditions thermiques. En augmentant la vitesse de l'air, nous pouvons diminuer la température. Par exemple, si la vitesse de l'air est de 1 m/s et la température interne est de 29,2 °C, en augmentant la vitesse de l'air, la température interne passera à 27,9 °C.

I.9 Mouvement et déplacement de l'air

Pour mieux saisir le fonctionnement des tours à vent iraniennes (Badgirs), nous allons décrire deux principes concernant les mouvements : le déplacement et le comportement de l'air dans un environnement (Figure 17).

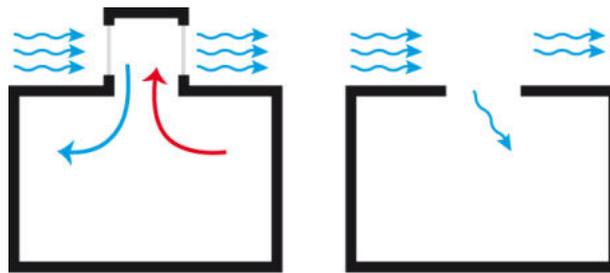
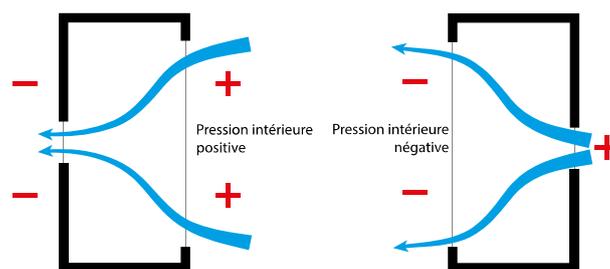


Figure 17 : Flux d'air avec et sans capteur de vent

Dans le schéma suivant (Figures 18), nous pouvons observer la présence de la pression positive à l'entrée des pièces à vivre, tandis qu'à la sortie, du côté des fenêtres, il y a une pression négative. Ce processus est primordial dans l'utilisation de la ventilation naturelle. Lorsque l'air traverse un bâtiment, il crée une pression d'air plus élevée du côté du capteur du vent. En raison de la pression d'air inférieure produite du côté opposé, l'air se déplace avec une pression supérieure vers la région ayant une pression inférieure et génère un mouvement d'air.



Figures 18 : La Pression négative et la Pression positive.

Le schéma suivant (Figure 19) nous montre différentes manières de manier la ventilation naturelle dans un habitat. Le point le plus important reste à savoir comment et dans quelle condition nous pouvons traiter l'arrivée et la sortie du vent.

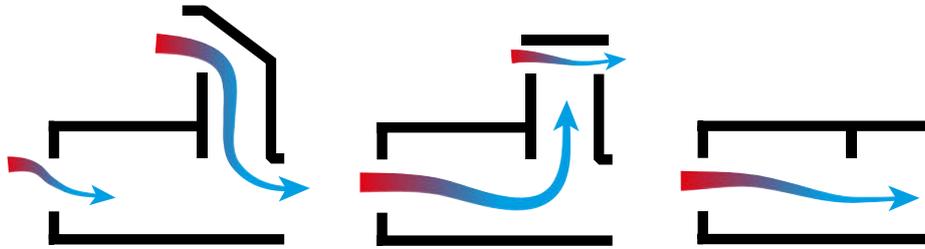


Figure 19 : Passage du vent dans un bâtiment

La température de l'environnement est l'un des facteurs les plus importants qui régissent la survie et le confort humain. Le mouvement de l'air joue un rôle important dans le processus de refroidissement de la température du corps. Le mouvement naturel de l'air peut être appliqué à l'aide de deux principes : par différence de pression ou par convection. En somme, le confort est présent s'il y a une évaporation intermédiaire par la vitesse de l'air, tandis que l'inconfort est la sudation (sueur).

1.1.6 Mouvement d'air par différence de pression

Lorsque la vitesse du vent varie, elle produit une différence de pression provoquant le déplacement d'air depuis une zone de pression plus forte vers une zone de pression plus faible. Ceci est basé sur la théorie de Bernoulli²⁴ et est appelé « Effet Venturi », qui explique que la pression diminue lorsque la vitesse d'un fluide en mouvement augmente.

Grâce à la réduction de la superficie, lorsque l'air est dirigé vers la partie la moins large d'un tube en forme d'entonnoir, il s'accélère.

Cette vitesse va diminuer la pression de la partie « A » (Figure 20), par rapport à la pression atmosphérique en « B » existant sur la partie inférieure du tube latéral. Ainsi, l'air est aspiré dans le tube grâce à la différence de pression. Dans un bâtiment, ce concept peut être utilisé de différentes manières.

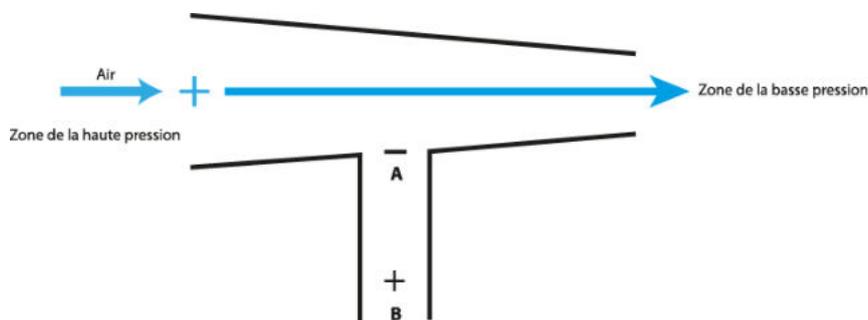


Figure 20 : Pression haute, pression basse²⁵

²⁴ Le théorème de Bernoulli qui a été établi en 1738 par Daniel Bernoulli exprime le bilan hydraulique simplifié d'un fluide dans une conduite. Il a posé les bases de l'hydrodynamique et d'une façon plus générale, de la mécanique des fluides.

²⁵ Dessin inspiré d'une idée d'Hassan Fathy.

De plus, lorsque l'air s'écoule autour d'un bâtiment, il produit une zone de basse pression du côté opposé du vent et une zone de haute pression sur le côté où arrive le vent. Et grâce aux ouvertures du côté du vent, on obtient un écoulement d'air stable.

1.1.7 Mouvement d'air par convection

Le fait qu'un liquide ou un gaz flotte ou monte vers la surface est appelé « force de flottabilité » (Buoyancy, en anglais). En raison de la différence de densité entre l'air frais et l'air chaud, l'air chaud a tendance à se déplacer vers le haut et s'échapper en raison de sa densité plus faible. Ce mouvement d'air, appelé convection, peut conduire à un effet de cheminée entraîné par la flottabilité²⁶.

Tant qu'il y a une source continue de chaleur ainsi qu'une quantité considérable d'air frais disponible, un flux d'air constant est produit. Plus la différence de température et la hauteur du bâtiment changent, plus fort, seront la force de flottabilité et l'effet de tirage²⁷.

Le système de refroidissement naturel, utilisé dans les maisons possédant des cours, est un bon exemple pour produire un mouvement d'air par convection. Exemple : Régions chaudes et arides du Moyen-Orient.

Dans ces régions, toutes les pièces de la maison sont construites autour d'une cour. Les habitants ont appris à fermer leurs portes et fenêtres du côté de la rue et les ouvrir du côté de la cour. Dans la soirée, puisque la température de l'air chute, l'air chaud de la cour s'élève et est remplacé par l'air refroidi de la nuit, rafraîchissant ainsi la cour et les pièces autour.

Un autre exemple de ce système de refroidissement naturel, qui fonctionne par convection, est la combinaison de la zone de la cour et du jardin. La cour reste fraîche jusqu'à l'après-midi, car elle est ombragée par les murs d'enceinte. Dans le même temps, le jardin qui se trouve exposé au soleil se réchauffe. Cet air chaud monte et est remplacé par de l'air frais venant de la cour. Le schéma suivant (Figure 21) représente la coupe transversale de la cour et du jardin.

²⁶ Dans un liquide, les corps sont soumis à la poussée d'Archimède. Les corps ont une flottabilité différente selon leur masse volumique. La flottabilité est la poussée verticale, dirigée de bas en haut, qu'un fluide (gaz ou liquide) exerce sur un volume immergé. La flottabilité agit toujours dans la direction opposée à la gravité.

²⁷ CSTB – Jean-Pierre Vantelon, Laboratoire de Combustion et de Détonique, CNRS, ENSMA, POITIERS – État des connaissances sur la fumée.

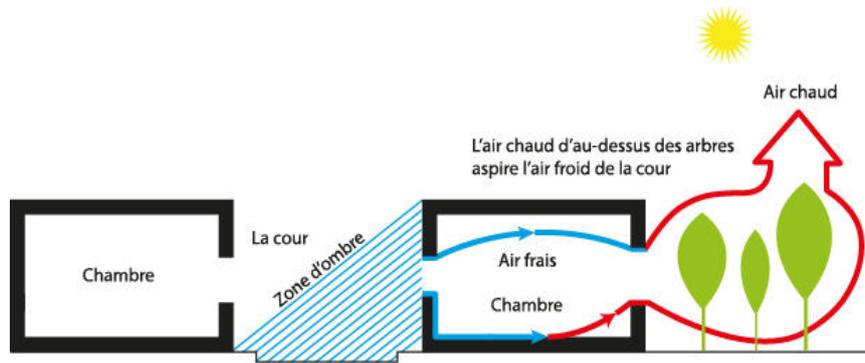


Figure 21 : Coupe transversale de la cour et du jardin d'une maison traditionnelle

1.1.8 Déplacement des brises, jour/nuit

Pendant la journée, lorsque la surface de la Terre se réchauffe, l'air se dilate et devient moins dense ; elle contient cependant une pression inférieure à l'air sur l'eau. En raison de cette différence de pression, la brise marine glisse vers la terre, poussant cet air chaud à monter.

Pour atteindre sa température maximale, la brise marine émerge de la côte, puis avance progressivement vers l'intérieur des terres. Durant la nuit, la brise circule à l'inverse, car la nuit, la surface terrestre refroidit plus rapidement que la surface de la mer.

L'air en contact avec la terre se refroidit plus vite que l'air qui se trouve sur la surface de l'eau. L'augmentation de la densité provoque une pression relativement plus élevée sur la terre que sur l'eau ; cette différence de pression, à son tour, pousse l'air à se déplacer de la terre vers la mer.

La brise terrestre commence 2 à 3 heures après le coucher du soleil et se termine peu de temps après le lever du soleil. Après avoir été refroidie en contact avec le sol, elle demeure stable.

Sur le schéma suivant (Figure 22), nous pouvons constater la direction des brises marines, jour et nuit. À droite de l'image, le changement de température joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la tour à vent (Badgir).

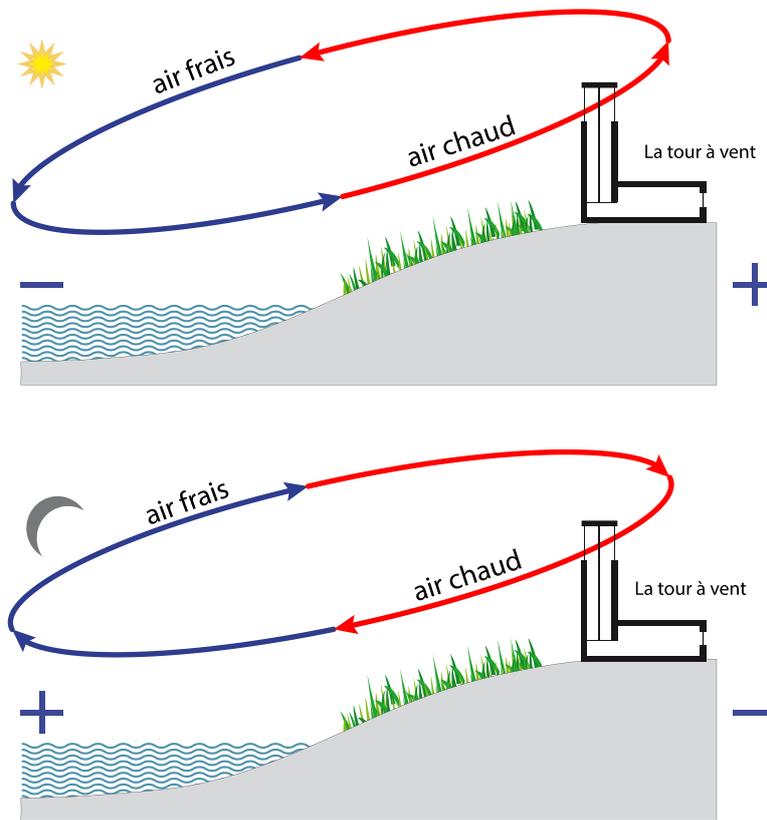


Figure 22 : Direction des brises marines s'inversant entre le jour et la nuit

1.1.9 Différentes caractéristiques du vent

Le vent est un facteur clé de la conception pour les architectes. Il peut augmenter le niveau de la satisfaction des occupants dans un espace et rendre l'ambiance thermiquement confortable. Le vent est un phénomène irrégulier. Dans la couche inférieure de l'atmosphère, divers obstacles et objets comme les reliefs et la végétation causent des turbulences. Cette turbulence ralentit la vitesse du vent et change le comportement des vents tout en induisant une augmentation de vitesse dans certaines zones et un effet de ralentissement dans d'autres.

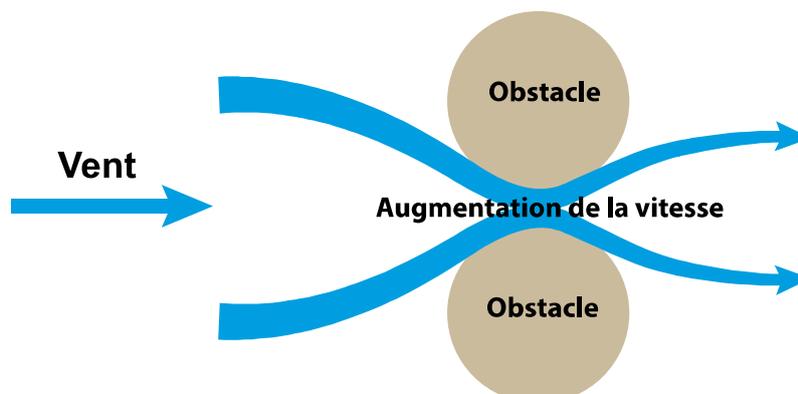


Figure 23 : Augmentation de la vitesse du vent par les obstacles

La rugosité du sol augmente la vitesse du vent. Le vent est la conséquence directe des basses et des hautes pressions. L'écoulement du vent est produit lorsqu'un orifice d'entrée est positionné dans une zone de pressions positives et les

sorties sont placées dans des zones de pressions négatives. Les différences de pression entre les entrées et les sorties forcent l'air à traverser un bâtiment.

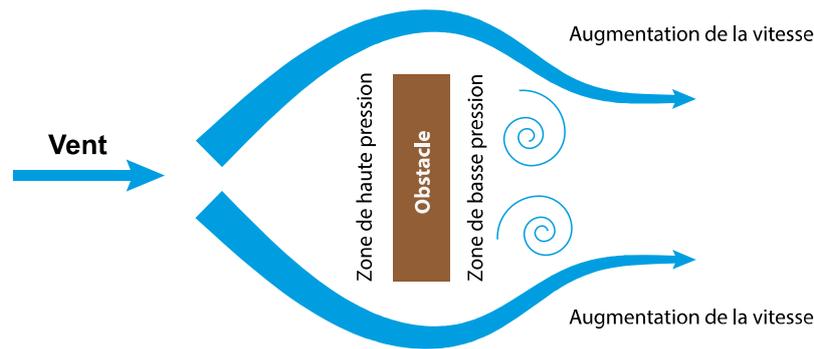


Figure 24 : Zones de hautes et de basses pressions

La chaleur est principalement acquise par le rayonnement solaire et la conduction par l'enveloppe du bâtiment. Elle est également générée dans l'espace par des moyens différents, telle que les personnes qui y circulent, les lumières, ainsi que les systèmes mécaniques et électriques.

Quand la température d'air augmente, l'air monte et augmente la température du plafond. La suppression de cette chaleur excessive peut diminuer la charge de refroidissement global de l'espace et faire passer la température vers une zone de confort.

Le mouvement de l'air sur les différentes surfaces de l'intérieur diminue le gain de la chaleur par convection. Plus vite se déplace l'air, plus vite arrivera l'effet de refroidissement. Cet effet peut se produire dans une stratégie appelée ventilation nocturne, car les journées connaissent des températures élevées. La ventilation nocturne est utilisée avec l'enveloppe des bâtiments ayant une masse importante.

Une enveloppe à haute masse conserve essentiellement la chaleur pendant la journée et retarde le transfert de la chaleur à l'intérieur des bâtiments. Lorsque la nuit tombe, les parois sont prêtes à transférer de la chaleur dans l'espace ; le vent est conduit à l'intérieur et chasse la chaleur vers l'extérieur du bâtiment. Ce procédé réduit la température des surfaces de l'intérieur et se met en place pour un nouveau cycle.

1.1.10 Conception d'ombrage

Les dispositifs d'ombrage extérieurs sont les outils les plus efficaces pour contrôler la pénétration du soleil. Selon Steven V. Szokolay²⁸, trois catégories de base de conception d'ombrage peuvent être établies :

²⁸ Le Dr Steven Szokolay est architecte et consultant en environnement. Il est à la fois professeur à l'Université de Queensland ainsi que superviseur des étudiants en recherche de troisième cycle. Il possède une expérience dans la pratique architecturale à Sydney, en

1. Dispositifs verticaux : des volets ou des ailettes en saillie. Ils sont caractérisés par des angles d'ombres horizontales.
2. Dispositifs horizontaux : des avant-toits en saillie, auvent ou volet horizontales. Ils sont caractérisés par un angle d'ombre vertical.
3. Dispositifs alvéolés : des grilles en béton ou en métal.



Figures 25 : Ombrage des ruelles de la ville de Yazd (gauche) et de Kashan (droite)

I.10 Conclusion

Les systèmes de refroidissement mécanique des bâtiments sont de grands émetteurs de dioxyde de carbone. Ces climatiseurs ont des impacts négatifs sur l'environnement et amplifient le réchauffement climatique.

Avec l'introduction du système de refroidissement mécanique, qui a brisé le lien entre le climat et les humains, une série de changements viennent d'avoir lieu dans la façon dont nous concevons et vivons dans les bâtiments.

À son apparition, l'air conditionné a été employé dans les bâtiments commerciaux pour augmenter la satisfaction et la productivité, mais rapidement, il est devenu omniprésent dans le monde, en allant du lieu du travail à la maison d'habitation.

Une série d'installations standardisées ont peut-être fourni l'accessibilité et la performance, mais la conception des bâtiments dépendants à 100 % de ces services mécaniques s'avère alarmante pour la consommation d'énergie ainsi que la santé humaine.

Il ne faut pas oublier que dans les villes aux climats chauds, la présence de ces appareils électriques s'avère problématique, car ces appareils sont sans cesse en train de gémir dans les rues tout en rendant l'îlot de chaleur urbaine encore plus chaud avec les pots d'échappement des millions de voitures climatisées et des bâtiments renfermés sur eux-mêmes.

1.11 Objectif de la thèse

Cette étude tente dans un premier temps de rechercher les conséquences architecturales des tours à vent, pour ensuite envisager dans quelle mesure le flux d'air pourra contribuer au confort thermique dans un bâtiment.

Le but principal de cette recherche est de démontrer la valeur des Badgirs tout en donnant un aperçu de l'application des systèmes de ventilation naturelle comme une alternative au système de refroidissement moderne. Elle vise également à examiner le statut théorique des Badgirs et à identifier aussi ses spécificités, son utilisation et sa fonction dans le contexte de la pratique architecturale dans le passé, le présent et l'avenir.

Nous allons nous concentrer sur les systèmes de refroidissement passifs dans les régions désertiques, au climat aride et sec, mais aussi chaud et humide de l'Iran.

Notre objectif sera aussi d'évaluer les mesures par lesquelles le système de refroidissement passif peut être intégré avec succès dans les bâtiments en Iran ou d'autres pays aux climats semblables afin d'améliorer leurs performances énergétiques.

Cette recherche se concentre sur diverses questions autour des Badgirs :

- Le Badgir, un fonctionnement complexe.
- Un principe de conception non totalement explicite.
- Nécessité de comprendre la part de la conception qui relève de l'efficacité mécanique et celle qui relève des questions architecturale et environnementale.
- Performance énergétique des Badgirs par rapport aux refroidisseurs mécaniques modernes.
- Potentialité des Badgirs dans la conception bioclimatique actuelle.

Pour atteindre les objectifs mentionnés ci-dessus, les données et informations pertinentes sont collectées à partir de l'observation et l'étude de plusieurs bâtiments munis de Badgirs. Les études de cas sont choisies selon des critères suivants : leur conception, dimensions, type de ventilation ; leur fonctionnalité actuelle et l'état physique de leurs structures.

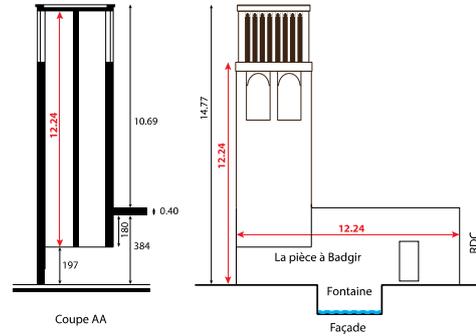
Pour terminer, nous décrivons le fonctionnement des Badgirs en relation avec d'autres dispositifs de refroidissement passif.

Cette recherche explicite quatre étapes concrètes :



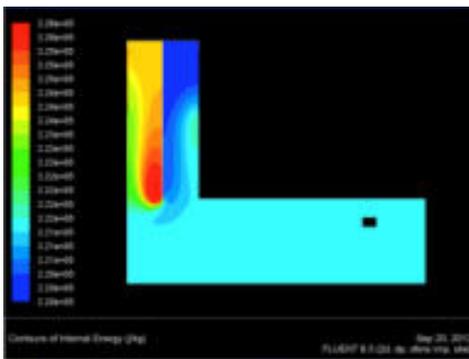
Chapitre II

Étude historique et architecturale des Badgirs



Chapitre III

Fonctionnement des Badgirs et expériences in situ



Chapitre V

Analyse mécanique et thermique des Badgirs (CFD²⁹)



Réflexions et propositions !

Figure 26 : Les objectifs de la thèse

²⁹ Computational Fluid Dynamics.

CHAPITRE II

Histoire des Badgirs

2.1 Histoire des Badgirs au Moyen-Orient

Les modèles primitifs des tours à vents se composaient d'un morceau de tissu, soutenu par trois bâtons en bois, tenant en place par de simples cordes. Cette petite structure permettait de capter le vent et de rafraîchir l'intérieur des tentes. Mais la première apparition historique et évidente des Badgirs, remonte aux plusieurs siècles avant J. C. Des exemples ont été trouvés dans des maisons de la XVIII^e dynastie de Tal Al-Amarna ainsi que des maisons de style pharaonique de Neb-Amon de la XIX^e dynastie (1 300 av. J.-C.).

Nous pouvons y observer un capteur de vent avec deux ouvertures, l'une en face du vent pour capter l'air frais et l'autre du côté opposé pour évacuer l'air chaud par aspiration.



Figure 27 : Maison de Nebamu, XIX^e dynastie (1300 av. J.-C.), Égypte³⁰

Les Badgirs ont évolué dans des régions désertiques aux 17^e et 18^e siècles. Même si l'idée de base resta la même, la conception fut beaucoup plus évoluée et l'architecture beaucoup plus complexe. Hormis l'effet de refroidissement, les Badgirs iraniens ont pu avec le temps préserver la glace stockée à des températures proches de zéro. Ces dispositifs ont existé ailleurs dans le monde, comme en France³¹ où nous les retrouvons sous le nom de glacières communément présentes chez les riches propriétaires pour nous procurer de la glace durant l'été.

³⁰ Ibid

³¹ En Provence, les glacières connurent un développement important au XVII^e siècle. En Europe, de nombreux châteaux étaient équipés d'installations spéciales pour la conservation de la glace jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Il s'agissait de grandes pièces enterrées, ou bien de vastes puits, dans lesquelles on entassait de la glace récoltée sur les plans d'eau en hiver. La glace était isolée du sol et de l'air extérieur par de la paille et des branchages. L'eau de fonte était éliminée. La grande glacière du château de Chantilly faisait 9,25 mètres de

Pour les architectes du sud, le vent a toujours été un facteur important dans la conception urbaine, en particulier dans les villes désertiques telles que Yazd, Kashan ainsi qu'au long des rives nord du golfe Persique et de la mer d'Oman.

Dans les régions du Golfe, les architectes ont su faire un usage efficace de la brise marine. En bâtissant des tours à vent, ils ont réussi à capter un maximum de vents pour rafraîchir les pièces durant des journées chaudes d'été.

Masuda, archéologue japonais, a découvert en 1969, d'anciens systèmes de refroidissement semblables aux Badgirs dans le nord de Chahroud, ville située dans le nord-est de l'Iran. D'après ses constatations, ces structures ont été mises en usage environ 4 000 ans avant notre ère.

Les Badgirs de la ville de Yazd ont été développés en matière de performance durant le 8^e et le 9^e siècle. Nous pouvons observer des Badgirs au centre de l'Iran, construits au 14^e siècle étant encore en activité. Au 19^e et au 20^e siècle, certains Badgirs ont été construits à Dubaï et à Bahreïn par des émigrants perses.

Avant de rentrer dans les détails des Badgirs et de leur construction, il convient de mentionner un phénomène qui a toujours préoccupé les gens du désert: la tempête de sable. Pour éviter la rentrée des sables dans les maisons et les tours à vent, les architectes ont dû prendre des précautions bien particulières.

La tempête de sable est aussi connue sous le nom de « tempête de poussière ». Le vent est en effet levé par des courants de convection (qui sont créés par le réchauffement intense du sol), et est généralement assez fort pour déplacer la surface des dunes. L'air est instable lorsqu'il est chauffé, et cette instabilité provoque le mélange des vents plus forts dans la troposphère avec des vents dans la basse atmosphère, produisant ensemble de forts vents de surface.

Dans les zones désertiques comme la péninsule arabique ou le centre de l'Iran, le vent peut lever tellement de sable que la visibilité est pratiquement réduite à zéro. L'air chaud est rempli de tonnes de poussière et court à travers les ruelles et les maisons. La vitesse des tourbillons de poussière peut atteindre les 30 km/h.

2.1.1 Badgir d'Égypte

Il est en premier lieu important de décrire le Malqaf, une des structures mettant en œuvre un système de ventilation naturelle.

Au début de la civilisation arabo-islamique, la cour représentait l'espace intermédiaire entre l'entrée de la maison et la partie où se trouvaient les convives.

diamètre et onze mètres de profondeur, la fonte naturelle pouvait représenter jusqu'à cinq cents kilogrammes de glace par jour, mais elle pouvait en contenir six cents tonnes. Cela constituait donc une réserve utilisable plusieurs années.

Les réunions occasionnelles des visiteurs masculins ont toujours eu lieu dans le Takhtabush, un salon ayant un côté ouvert sur la cour. Dans la période Mamluk, au XII^e siècle un changement dans le style de la maison a eu lieu ; entraînant la fermeture de la cour et l'usage de Qa'ah (la salle de réception principale de la maison).

Tout en couvrant la cour, le Qa'ah avait un haut plafond couvert par une lanterne en bois (Ghophé ou Jamkhané en iranien). Deux Iwans (coin de repos placés sur un socle) étaient aussi placés à la fois au nord et du côté sud de la salle. La lanterne était munie de petites ouvertures permettant à l'air chaud de s'échapper. Sa forme pouvait être carrée, octogonale ou hexagonale.

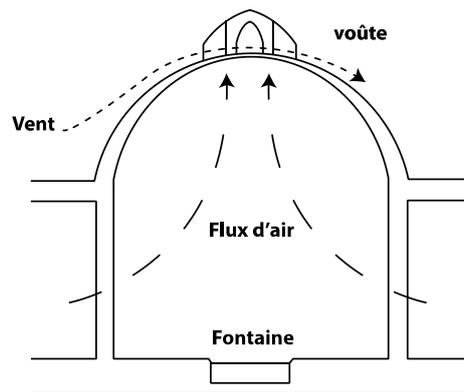


Figure 28 : Fonctionnement de la circulation d'air à l'intérieur de la lanterne

Pour obtenir du confort thermique à l'intérieur du Qa'ah, un nouveau système de ventilation a été inventé. Et cela fut le Malqaf, placé au-dessus de la maison avec une seule ouverture face au vent dominant.

Le Malqaf captait l'air frais en le canalisant vers l'intérieur de la maison. La taille d'un Malqaf était déterminée par la température de l'air extérieur de la région où se trouvait la maison. Si la température de l'air était élevée, la taille du Malqaf était petite et si dans une région la température était faible, une taille plus grande devenait indispensable.

Pour augmenter, l'humidité de l'air provenant de l'extérieur, le Salsabil, une plaque de marbre, décoré avec des motifs ondulés, munie d'une source d'eau a été également mise en place. Le Salsabil a été placé sur une paroi opposée à l'Iwan, et ceci selon un certain angle pour permettre à l'eau de couler correctement en surface.

Nous pouvons observer un exemple de combinaison Malqaf, Salsabil et Lanterne au Caire, dans la maison du Muhib Ad-Din Ash-Shaf'i Al-Muwaqqi.

Un exemple illustré ci-dessous montre la maison du royal scribe Nakht, qui date de la dix-neuvième dynastie (1300 av. J.-C.).

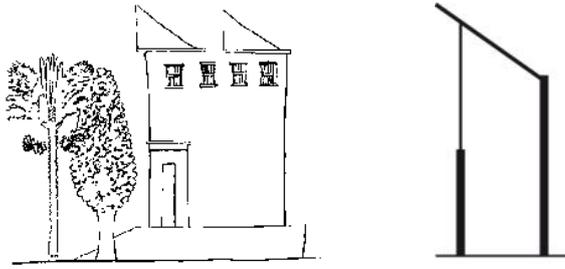


Figure 29 (gauche) : Malqaf de la maison royale du scribe Nakht³²
 Figure 30 (droite) : La pente du Malqaf à 30°

2.1.2 Badgir d’Afghanistan

Les plans des Badgirs d’Afghanistan sont carrés, d’environ 1 m par 1 m. Ils sont composés d’une seule face et possèdent un toit courbé. Nous retrouvons aussi des Badgirs de ce type dans le nord-est de l’Iran. Ces Badgirs atteignent une hauteur de 1,50 m.

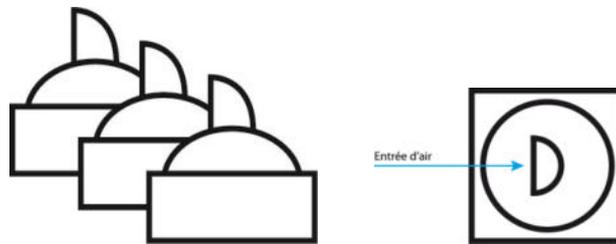


Figure 31 : Coupe et plan du Badgir d’Afghanistan (Source : Mahyari, 1996)

2.1.3 Badgir du Pakistan

C’est une structure triangulaire posée sur le toit, aspirant l’air frais vers l’intérieur des maisons. Hyderabad Sindh est connue sous le nom de « la ville des Mangh (Badgir, en pakistanais) ». La majeure partie de ces Badgirs est détruite à ce jour.

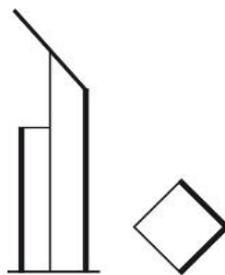


Figure 32 : Modèle de Badgir du Pakistan, pente à 45°
 (Source : Mahyari, 1996)

2.1.4 Badgir d’Irak

Depuis des temps immémoriaux, l’Irak, l’ex-Mésopotamie était le royaume de l’argile. La qualité de son argile était incomparable. Il y a une centaine d’années, les monuments anciens étaient encore exploités comme carrières, car les vieilles

³² Susan Roaf (1982), « Living with the Desert ».

briques étaient toujours de bien meilleure qualité que les nouvelles. Malheureusement, la plupart de ces anciennes constructions en argile ont disparu depuis les deux derniers siècles.

La structure de base de la maison Baghdadi (de la ville de Bagdad) était une maison avec un hall d'entrée, portée par des piliers (Tarma ou Taremi) ainsi qu'un Iwan³³ donnant sur le Tarma. Mais avec le temps, cette maison s'est développée autour d'une cour, couverte ou parfois ouverte, mais souvent munie d'une fontaine au centre. Nous pouvons aussi relever ce type de maison en Andalousie (sud de l'Espagne) et au Maroc. Ces maisons étaient divisées en une zone publique à gauche et une zone privée (Harem) à droite. Les chambres étaient construites et distribuées autour de la cour centrale.

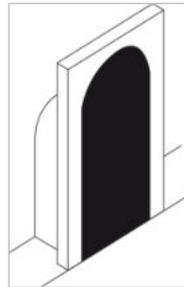


Figure 33 : Modèle de Badgir en Irak

L'utilisation de l'argile dans la construction irakienne n'a pas été conçue seulement dans un but esthétique, mais offrait en même temps un avantage majeur au niveau du confort thermique. Le système de la tour à vent en lien avec Sardab (sous-sol) était une solution climatique naturelle que possédait l'habitat irakien de l'époque. Les Badgirs aspiraient l'air frais de la cave pour rafraîchir les chambres et les salons. Les maisons restaient assez fraîches durant la grande chaleur de l'été qui s'élevait non loin de 50 °C. Les gens vivaient en se déplaçant dans la maison. Pendant l'hiver, ils vivaient du côté du sud, principalement dans des chambres fermées ; et l'été, ils vivaient du côté du nord, dans les sous-sols ou sur le toit pendant la nuit.

2.2 Histoire des Badgirs d'Iran

2.1.5 Badgir et les Perses

Le plus grand nombre de Badgirs se trouvent en Iran. Le Badgir devient un chef-d'œuvre de l'architecture iranienne évoquant ainsi un signe d'intelligence climatique. Les tours à vent n'existent pas seulement au-dessus des maisons d'habitations, mais aussi sur des citernes d'eau, les caravansérails ou les salles de prière des mosquées.

³³ Iwan est un élément architectural qui consiste en un vaste porche voûté ouvert de face par un grand arc.

Les expériences montrent que chaque tour à vent est unique et a été conçue de manière spécifique, adaptée au climat de sa région. Les maisons peuvent avoir un, deux, trois ou quatre Badgirs.

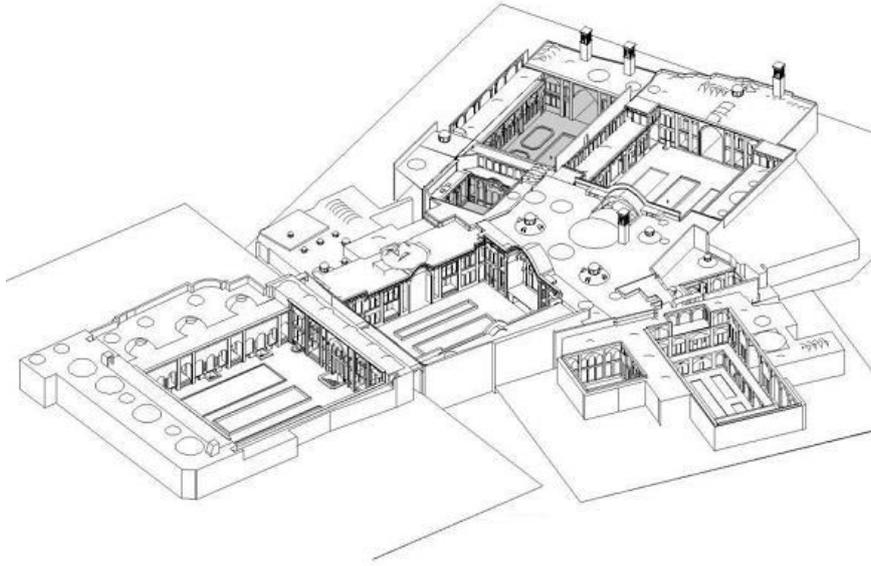


Figure 34 : Maison d’Ameriha à Kashan contenant quatre Badgirs et cinq cours³⁴

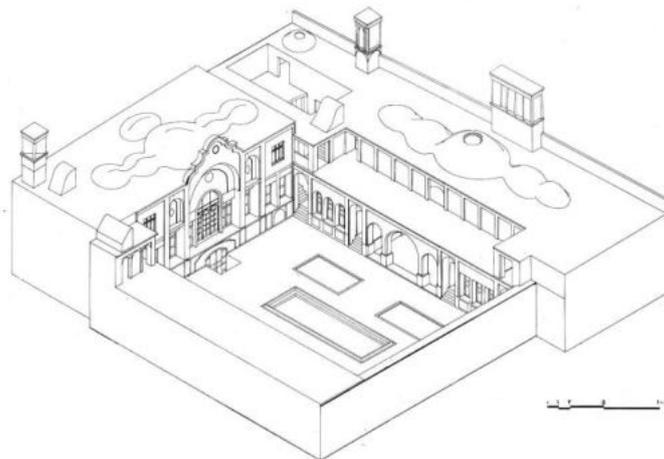


Figure 35 : Maison d’Attarha à Kashan possédant trois Badgirs³⁵

³⁴ Source : « 100 houses, 100 plants, Dr. Farrokhyar », 2012.

³⁵ Source, « 100 houses, 100 plants, Dr. Farrokhyar », 2012.

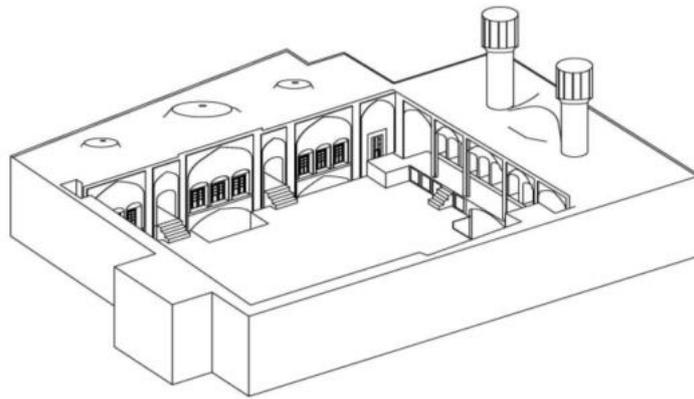


Figure 36 : Maison de Karkhanehchi à Kashan contenant deux Badgirs de types circulaires ³⁶

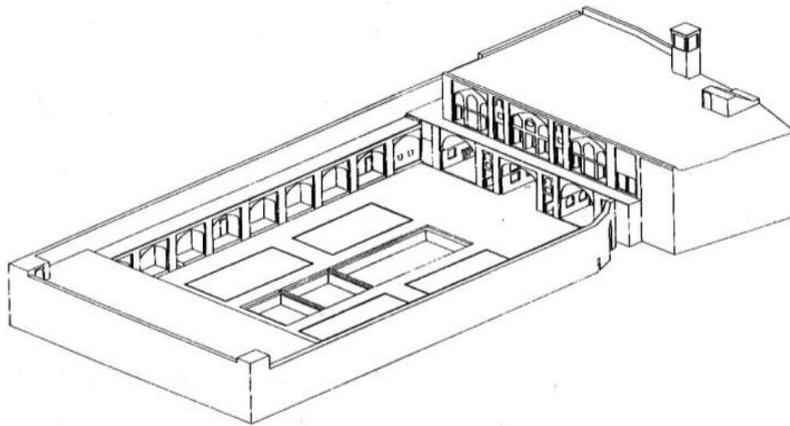


Figure 37 : La maison Akhbari à Kashan possède un seul Badgir³⁷



Figure 38 : Les poteaux traversant la structure servaient d'échafaudage et d'entretien du Badgir

Les extrémités saillantes des poutres servaient d'échafaudage dès que les tours avaient besoin d'un quelconque entretien ou de réparations. Nous supposons que cette partie des poutres qui dépasse la tour d'au moins un mètre servait aussi au drainage³⁸. Durant la nuit, vu leur porosité importante (Figure 39), ces poutres

³⁶ Ibid.

³⁷ Source, « 100 houses, 100 plants, Dr. Farrokhyar », 2012.

³⁸ Le drainage est une technique de construction qui consiste à protéger les bâtiments de l'humidité. Il peut être réalisé à l'aide de matériaux naturels ou synthétiques. En construction, il est recommandé de mettre en place un drain au niveau des fondations d'un édifice

absorbent l'humidité nécessaire ; et le lendemain, comme le soleil frappe fort sur les tours, l'humidité accumulée dans le bâti sert à rafraîchir de quelques degrés l'air chaud qui pénètre dans le bâtiment.



Figure 39 : Poutres en bois utilisés pour la construction des maisons et des Badgirs

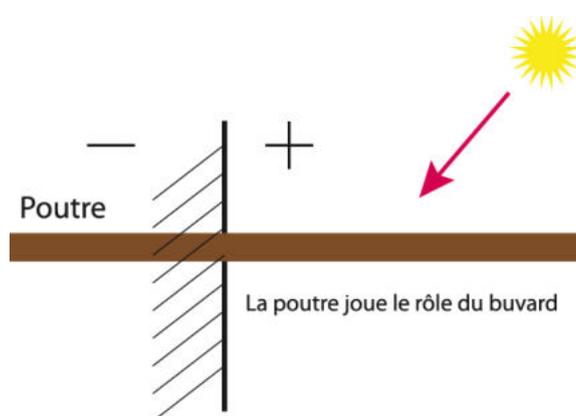


Figure 40 : La poutre absorbe l'humidité qui se produit à l'intérieur et l'envoie vers l'extérieur

Les tours à vent ont une hauteur moyenne de 15 m au-dessus du niveau du sol et fonctionnent avec la moindre brise. À cette hauteur, le vent, dès qu'il entre dans les conduits, prend de la vitesse. En hiver, lorsque la ventilation n'est plus nécessaire, les bouches d'aération des Badgirs sont fermées.

Dans chaque ville munie de Badgir, la culture et la situation géographique ont créé un paysage urbain unique avec un caractère fort et localement distinctif.

Les tours à vent sont réalisées dans deux régions d'Iran : la zone chaude et humide, telle que Bandar Lengeh, située dans le sud ; et la zone désertique du Yazd au climat chaud et aride, ville située sur le haut plateau central.

Nous allons à présent concentrer notre étude sur ces deux régions, contenant des Badgirs datés de plusieurs siècles : la province de Yazd et le golfe Persique.

afin de collecter les infiltrations d'eau dans le sous-sol avant qu'elles ne risquent de porter atteinte à la stabilité de la construction suite à l'affouillement progressif de l'assise des fondations par l'érosion provoquée par les courants d'eau souterraine.

2.3 Les Badgirs de la province de Yazd

La province de Yazd est située dans la partie centrale de l'Iran. Elle couvre une superficie de 76 156 km² et se compose de dix cantons, 21 villes, 19 districts et 51 villages. Les déserts voisins de cette province sont les Kavir-e-Loot, Kavir-e Namak et Dasht-e Kavir. Les précipitations peu abondantes donnent à cette province un climat sec. La proximité de déserts et les tempêtes de sable sont les principales caractéristiques géographiques de cette province.



Figure 41 : Dasht-e Lut et Dasht-e Kavir (source : Irancarto)

Cette province possède des altitudes allant de 850 m à 4 055 m (Shirkooh, dont le pic est couvert de neige pendant toute l'année). Les précipitations annuelles sont entre 50 et 100 millimètres. Les changements de température sont très variés en hiver et en été, même entre le jour et la nuit, cela varie de +45 à -20 °C, la moyenne étant de 11,9 à 20,7 °C. La majeure partie de la province de Yazd se trouve au désert. En 2011, la population de la province est d'environ 814 000 habitants.

La ville de Yazd

Avec plus de 3 000 ans d'histoires ; possédant un patrimoine brillant de culture et de civilisation antique, la ville de Yazd est une ancienne terre de la Perse. Selon les historiens, la ville de Yazd a été fondée par Alexandre, qui y construisit une prison et la nomma ainsi. D'autres historiens pensent que la ville a été fondée sous le commandement de Yazdgerd Premier (339-421 av. J.-C.) durant la période des Sassanides. Le nom de Yazd vient ainsi de ce titre et signifie « le Saint ».

Un des noms de cette ville a été « Isatis », ville construite probablement sur les ruines de la ville antique de « Kattah ». Après l'émergence de l'Islam en Perse, Yazd

a reçu le nom de «Darol'ebadeh». Les caractéristiques géographiques de cette région ont poussé les architectes à développer des styles architecturaux bien particuliers. Pour cette raison, dans le tissu ancien de la ville, la plupart des maisons sont construites en briques de terre munie de toits en forme de dôme.



Figure 42 : 5 Badgirs couvrant un réservoir d'eau, Yazd

Les villes et les régions situées dans les déserts possèdent leur propre type de constructions. La forte chaleur, ainsi que les nuits froides obligent les habitants de ces régions à mettre en place des dispositions adaptées, voire exceptionnelles, pour répondre à leur besoin en termes de confort. Il ne faut pas négliger le manque de pluie et de neige, la présence des tempêtes de sable, sans oublier la différence de température sous le soleil et à l'ombre.

Les gens qui vivent dans ces déserts ont mis en place de nombreuses solutions pour faire face à ce climat. Nous pouvons nous référer à la densité des bâtiments, la construction des citernes, des maisons avec de hauts murs, des toits en forme de dôme ou encore des ruelles étroites couvertes par des arcades.

Ces villes sont caractérisées par un îlot de chaleur important par rapport aux zones environnantes, car la convection des masses d'air chaud crée une dépression locale. Au centre de la ville historique, le vent est influencé par les ruelles étroites, dans lesquelles il atteint une vitesse très élevée grâce aux éléments sculptés sur la surface des murs.

Les facteurs de rafraîchissement sont l'ombre, le vent, les caves, les canaux des sous-sols, des espaces verts et les plans d'eau.

Il a toujours été important de façonner l'accès d'air frais dans la ville par les systèmes de vents locaux.

Dans toutes les villes historiques de ces régions, nous pouvons observer la densité des maisons, les ruelles étroites, et cela sur toutes les périodes. Ces similitudes sont dues au même processus physique : réduire les distances, afin d'accorder au vent une vitesse de plus en plus importante.

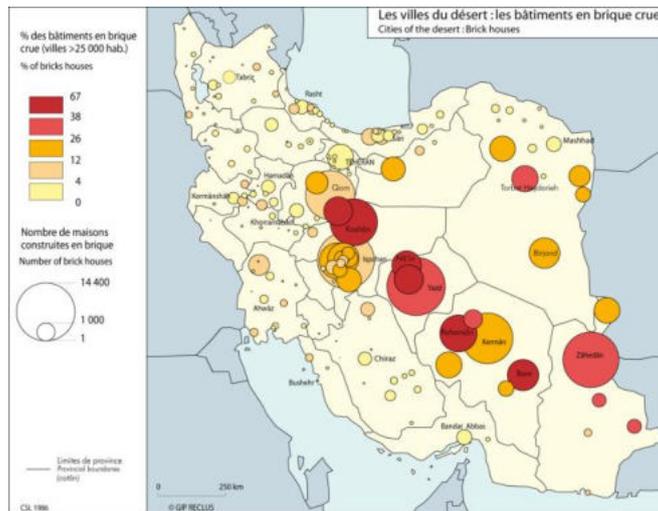


Figure 43 : Les bâtiments construits en brique crue (source : Irancarto)

Pour créer un climat tolérable dans ces régions, les consignes suivantes ont été respectées :

- Constructions de structures compactes
- Construction de ruelles étroites
- Réalisation de surfaces de refroidissement et d'ombrage comme : arbres, fontaines, espaces verts, toits en pente et rues ombragées
- Les Badgirs

Dans le passé, pour obtenir de l'eau de source, les gens du désert ont creusé des puits nommés Qanat. Le Qanat est une ancienne méthode ingénieuse de système d'irrigation par lequel les eaux souterraines de montagne remontent en surface.

Dans ce processus, l'eau traverse à travers une série de puits au niveau du sol pour être stockée ensuite dans les réservoirs et être servie en été. Nous décrivons le fonctionnement des Qanat dans le chapitre suivant.

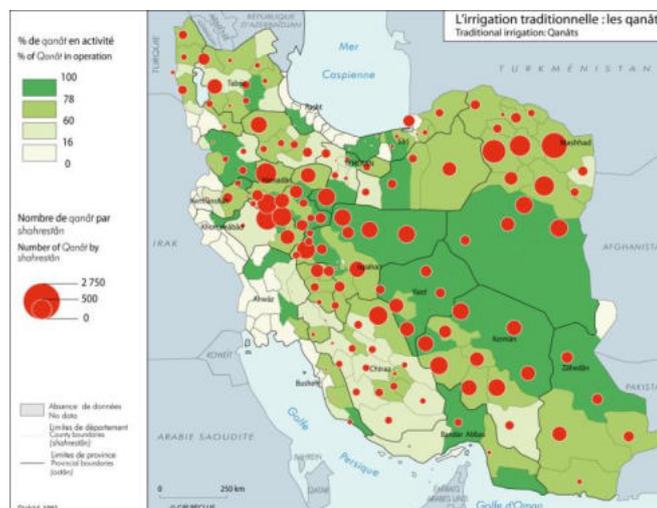


Figure 44 : Les Qanat en Iran (source : Irancarto)

Ardekan

Située au cœur du désert central Iranien, à 60 km au nord-ouest de Yazd, cette ville possède la plus grande superficie de la province. Elle a un climat sec et sa plus grande partie est constituée de déserts³⁹.

Meybod

Cette ville est située au nord-ouest, à 50 km de Yazd. Ayant un climat chaud et sec, la ville a été irriguée par de nombreux Qanat dans un passé lointain. Dans le sud et le sud-ouest de Meybod, il y a des montagnes couvertes de neige en hiver⁴⁰.

Taft

Taft est située au sud-ouest, à 18 km de Yazd, près du mont Shirkooh, la plus haute montagne de la province⁴¹.

Abar Kooh

Cette ville est située à 140 km au sud de Yazd. Il y a plusieurs centaines d'années, cette ville se trouvait sur la route principale qui reliait la Chine à l'Europe, la route de la soie⁴².

Mehriz

Constituée de terres plates, cette ville est située à 30 km au sud de Yazd.

Bafq

Elle est située à 120 km au sud de Yazd.

Le positionnement des Badgirs face aux vents dominants

Grâce au désert qui entoure la région de Yazd, l'intensité du vent est élevée. La direction du vent dominant pour les six premiers mois de l'année est le nord-ouest et le sud-est pour les quatre mois suivants, tandis que de novembre à février, le vent est dominant par l'ouest. Les tempêtes de sable sont fréquentes. La vitesse du vent peut atteindre 120 km/h.

³⁹ Nous y trouvons des monuments importants comme : la mosquée de Jame, la mosquée Zir-e Deh, les tombes de Imamzadeh Seyyed mohammad et Seyed Noor-ed-din, le caravansérail de Shah Abbas, et des lieux saints zoroastriens comme « Pir-e Sabz e-Chek » et « Pir-e Harisht ».

⁴⁰ Les monuments historiques de la ville sont nombreux ; parmi les plus importants se trouvent : Ghal'e Narin, rare monument construit en briques de terre, des mosquées, des châteaux, des caravansérails, des sanctuaires, des moulins, des réservoirs d'eau et des centres religieux zoroastriens.

⁴¹ Nous y trouvons les monuments historiques suivants : Ghadamgah-e-Islamiye, le mausolée du cheikh Joneyd, et les mosquées de cheikh Ali Baliman et Shah Vali.

⁴² La mosquée de « Jomeh » ainsi qu'un vieux cyprès de 4 500 ans comptent parmi les monuments de cette ville.

Les deux schémas suivants (Figure 45 et Figure 46) présentent le positionnement des Badgirs du centre désertique iranien par rapport à la maison qui les abrite. Nous pouvons constater que dans 68 % des maisons, les Badgirs se trouvent à l'arrière des façades, vers le sud. Et 96 % des Badgirs reçoivent le vent dominant avec un angle qui varie entre 30° et 45°. Cet angle va être étudié et analysé dans les chapitres suivants.

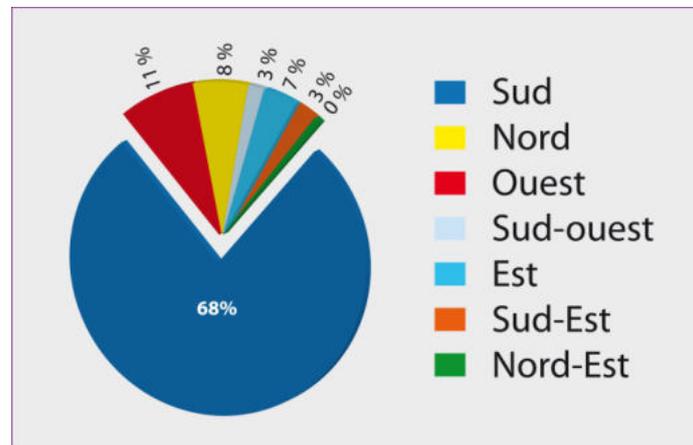


Figure 45 : Position des Badgirs à l'arrière des façades⁴³

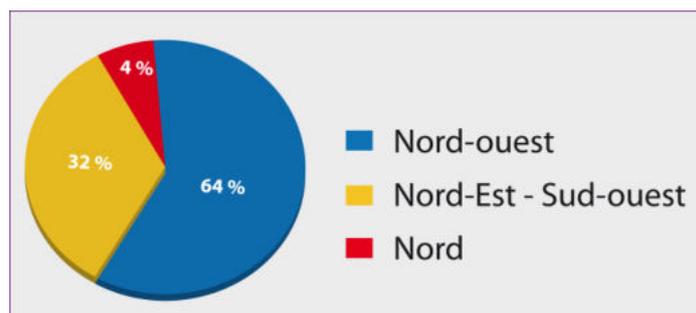


Figure 46 : Position des Badgirs face à la direction des vents dominants⁴⁴



Figure 47 : Façade de deux maisons face au sud possédant des Badgirs à l'arrière

⁴³ Bureau de l'urbanisme de la ville de Yazd.

⁴⁴ Ibid.

Le schéma suivant (Figure 48) présente le pourcentage et le nombre de Badgirs de la ville de Yazd avec des hauteurs calculées à partir du toit de la maison.

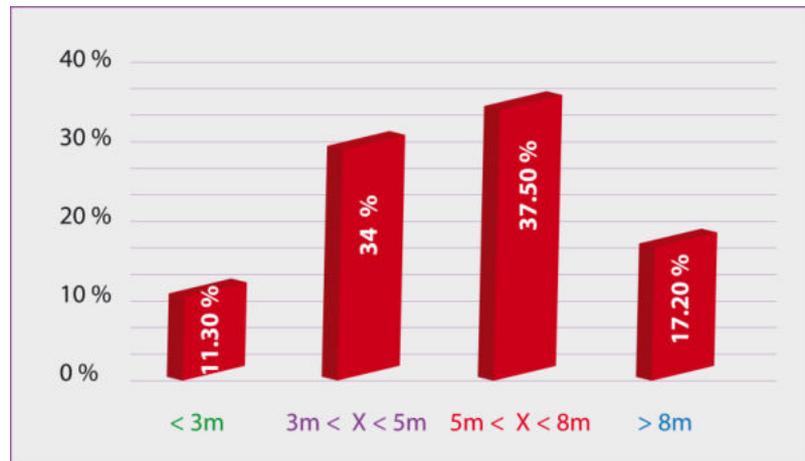


Figure 48 : Hauteur des Badgirs à Yazd saisie à partir du toit des bâtiments⁴⁵

Impact de la direction du vent sur le positionnement et la construction des Badgirs

Un des paramètres les plus importants qui influence le confort thermique et la conservation de l'énergie dans la construction est la distance entre les maisons. Les bâtisseurs de l'époque ont conçu les maisons et les Badgirs situés sur le golfe Persique de manière à pouvoir attraper un maximum de vent par rapport aux structures voisines sans se faire déventer.

La direction et l'emplacement des Badgirs ont été calculés selon la direction du vent. Sont ensuite venus s'ajouter la forme de la construction, l'enveloppe des bâtiments ainsi que les matériaux de construction. Tous ces paramètres sont liés les uns aux autres et les valeurs de chacun ont été déterminées en fonction des caractéristiques climatiques de la région.

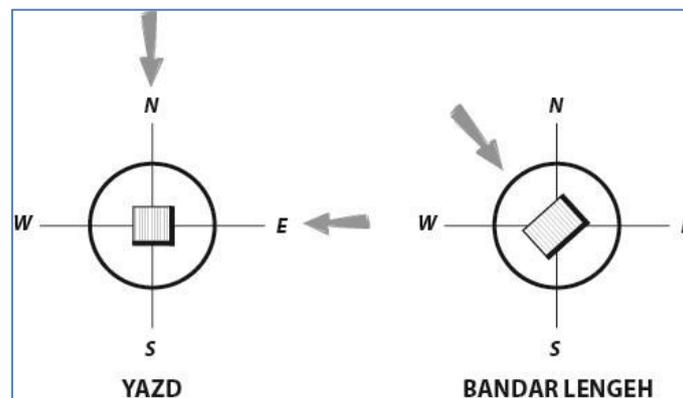


Figure 49 : Direction du vent dans les régions du centre (gauche) et du sud (droite)

⁴⁵ Bureau de l'urbanisme de la ville de Yazd, 2002.

2.4 Les Badgirs du golfe Persique

2.1.6 Carte géographique du golfe Persique



Figure 50 : Le golfe persique (source : Irancarto)

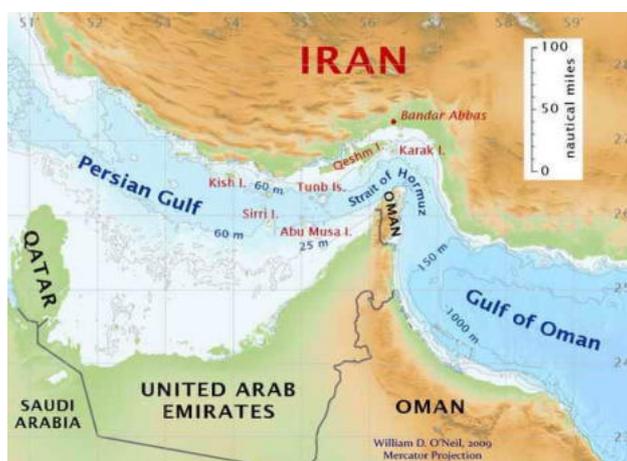


Figure 51 : Le golfe persique (source : Irancarto)

L'histoire du Golfe est liée inextricablement aux commerces entre Africains, Arabes, Indiens et Européens. Cette région est un riche hybride de l'ancien peuple perse et d'Arabie. L'île de « Qeshm » est probablement le point culminant du golfe Persique. Son petit village « Laft » est constellé de tours à vent.

Le golfe Persique possède une superficie de 240 000 kilomètres carrés. Sa longueur est de 990 kilomètres, et sa largeur varie entre un maximum de 338 kilomètres pour un minimum de 55 kilomètres dans le détroit d'Ormuz. Il touche l'Iran au nord, nord-est, puis l'est ; l'Irak et le Koweït au nord-ouest ; à l'ouest et au sud-ouest par l'Arabie Saoudite, le Bahreïn et le Qatar ; et au sud et au sud-est par les Émirats arabes unis et Oman.

Les îles les plus importantes du golfe Persique sur la partie iranienne sont les suivantes : Minoo, Kharg, le Cheikh Saas, le Cheikh Sho'ayb, Hendurabi, Kish, Farur, Sirri, Abou Moussa, la grande et la petite Tumb, Qeshm, Hengam, Larak, Ormuz, Lavan.

Les ports importants sur la côte du Golfe Persique sont : Abadan, Khorramshahr, Bandar Iman Khomeiny, Mahshahr, Deilam, Genaveh, Rig, Bushehr⁴⁶, Bandar Lengeh, Bandar Abbas.

Le côté iranien est montagneux, avec forte présence de falaises. La plaine côtière s'élargit au nord de Bushehr sur la rive du Golfe et passe dans la vaste plaine deltaïque des fleuves Tigre⁴⁷, Euphrate⁴⁸ et Karun. Il est nettement asymétrique de profil, avec une profondeur d'eau tout au long des côtes Irlandaises et une large zone peu profonde. Le golfe Persique a une profondeur inférieure à 120 pieds (37 m) le long de la côte d'Arabie.

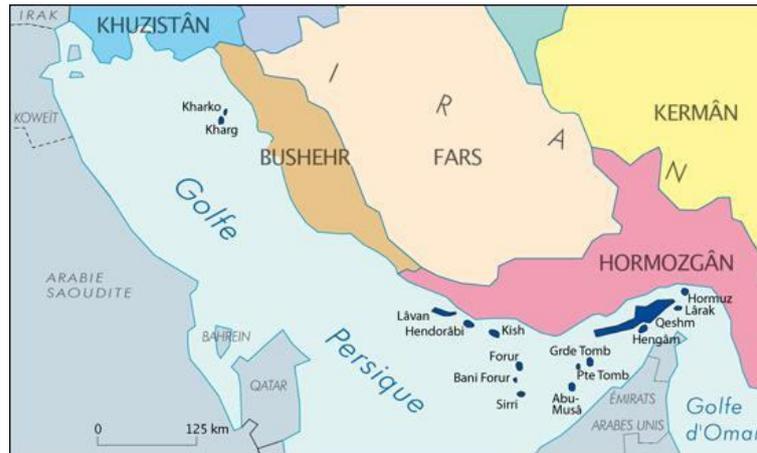


Figure 52 : Les îles du golfe persique (source : Irancarto)

Le golfe Persique constitue la plus grande réserve d'hydrocarbure dans le monde, ce qui le rend extrêmement important pour la production de pétrole et il demeure l'une des plus importantes voies navigables stratégiques du monde.

Le golfe Persique et les pays voisins produisent environ 31 % de la production mondiale totale du pétrole et gèrent 63 % des réserves mondiales. La région du golfe Persique restera encore une importante source de pétrole du monde pendant une longue période.

⁴⁶ Je suis natif de la région de Bushehr.

⁴⁷ Le Tigre est un fleuve de Mésopotamie, long de 1900 km.

⁴⁸ L'Euphrate est un fleuve d'Asie de 2780 km de long. Il forme avec le Tigre dans sa partie basse la Mésopotamie, l'un des berceaux de la civilisation.

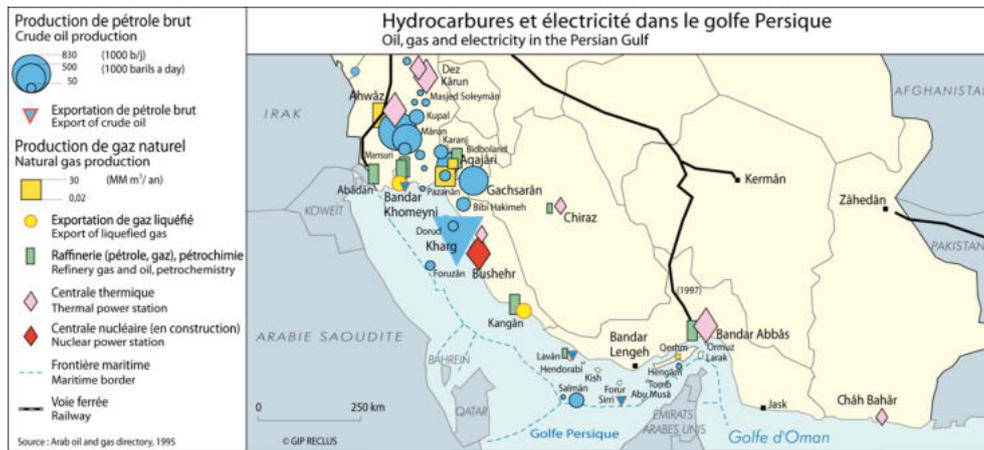


Figure 53 : Hydrocarbure et électricité dans le golfe persique (source : Irancarto)

Il y a quelques cours d'eau à Bushehr, sur la côte sud de l'Iran, mais pratiquement, aucune eau douce ne se jette dans le golfe Persique sur son côté sud-ouest. Des terres désertiques environnantes envoient de grandes quantités de poussières fines vers la mer. Dans les profondeurs du golfe Persique, on trouve une sorte de boue de couleur gris-vert, riche en carbonate de calcium.

Jusqu'à la découverte du pétrole en Iran, en 1908, la région du golfe Persique était importante pour la pêche, la perliculture, la construction de boutres, la fabrication de la toile à voile, l'élevage de chameaux, la création de nattes de roseaux, la culture de dattes et de tabac ainsi que la production d'ocre rouge⁴⁹. Aujourd'hui, ces industries traditionnelles ont été amplement diminuées et l'économie de la région est réduite à la production du pétrole.

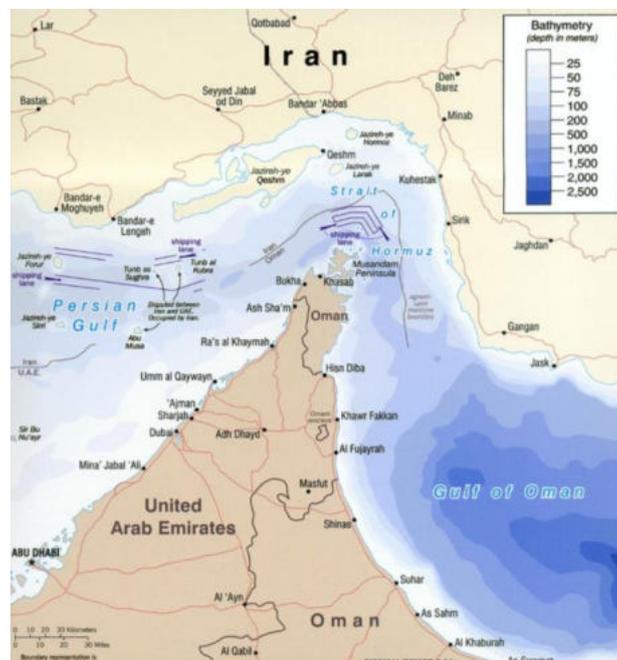


Figure 54 : Bathymétrie du golfe persique (source : Irancarto)

⁴⁹ L'ocre rouge est une argile.

Climat du golfe Persique

La température peut descendre à 0°C en hiver et le mercure peut franchir la barre de 55°C en été par endroits. La température moyenne en janvier est de 16°C et de 35°C en juillet. Les précipitations annuelles moyennes dans la zone sont de 152 mm.

Le golfe Persique a un climat chaud et humide. Même si les hivers peuvent être assez frais à l'extrémité du nord-ouest, les températures sont en général très élevées. Les précipitations éparses produisent principalement des averses fortes entre novembre et avril et sont plus élevées dans le nord-est. L'humidité est élevée. La couverture nuageuse est peu fréquente en été. Orages et brouillards sont rares, mais les tempêtes de poussière et la brume se produisent fréquemment en été.

Le vent du « Shomal⁵⁰ », un vent qui souffle principalement de la direction nord-nord-ouest au cours de l'été reste faible. Rafales et violentes averses sont fréquentes en automne.

Vu la présence de la mer à proximité des villes, ainsi qu'un rayonnement fort du soleil en été et au printemps, il y a un niveau très élevé d'évaporation et d'humidité. Le sol dans ces régions est physiquement fait de calcaire ; il y a une forte absence de plantes.

Pendant les saisons chaudes, la chaleur crée un climat étouffant qui donne des conditions de vie très gênantes. Cette région possède les caractéristiques climatiques suivantes :

- Niveau insuffisant de précipitations annuelles
- Humidité extrêmement élevée en toutes saisons de l'année
- Climat très chaud et humide en été et hiver modéré
- Niveau de température faible entre le jour et la nuit
- Nappe phréatique salée dans la plupart des régions
- Niveau insuffisant d'herbe et de plantes

2.1.7 La province d'Hormozgan

La province d'Hormozgan est une des 30 provinces d'Iran, possédant une superficie de plus de 68 400 kilomètres carrés, située dans la partie sud du pays, face à Oman. Elle est entourée par le golfe Persique et Mokran ou mer d'Oman au sud

⁵⁰ Le mot « Shomal » signifie littéralement « nord » et les vents provenant du nord se nomment les vents du Shomal. Ces vents se forment normalement sur le golfe Persique durant l'hiver (de novembre à mars) et en été (de juin à août).

et est délimitée par les provinces de Bushehr et Fars à l'ouest, et au nord-ouest, de Kerman, à l'est et au nord-est, et du Sistan et Baloutchistan au nord-est.

Cette province connaît un climat très chaud et humide, avec des températures dépassant parfois 50 °C en été. Il y a très peu de précipitations dans l'année.

Bandar Abbas, la capitale de cette province, anciennement connue sous le nom de Gambroon, est une ville portuaire. La ville occupe une position stratégique sur les détroits d'Ormuz, et c'est l'endroit principal de la marine iranienne. Elle avait une population estimée à 352 173 d'habitants en 2005.

Les villes d'Hormozgan sont les suivantes : Bandar Abbas, Bandar Lengeh, Haji Abad, Minab, Qeshm, Jask, Bastak, Bandar Khamir, Parsian (Gav bandi), Roudan et Abumusa. La province compte également 21 districts, 69 municipalités, 2046 villages et 1,5 million d'habitants. La densité de la population est d'environ 18,6 habitants par kilomètre carré.

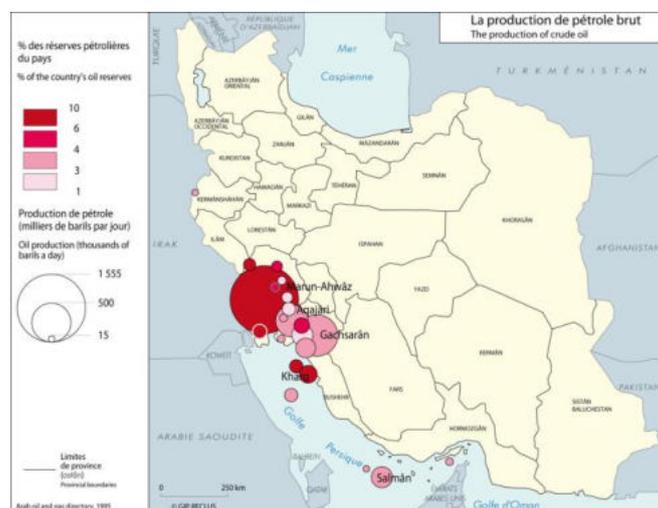


Figure 55 : Les zones de production de pétrole dans le golfe persique (source : Irancarto)

Histoire d'Hormozgan

La province d'Hormozgan est connue pour avoir été colonisée à l'époque Achéménide. La province a été particulièrement importante entre 241 et 211 avant J. C. Elle a ensuite progressé dans le domaine du commerce après l'arrivée de l'ère islamique.

Marco Polo a visité le port de Bandar Abbas en 1272 et 1293, et a signalé la forte présence du commerce de bijoux persans, d'ivoire, de la soie de l'Indochine et de perles de Bahreïn dans les bazars d'Ormuz. Dirigés par Vasco de Gama, en 1497, des colonisateurs européens ont débarqué dans la région pour la première fois. En 1506, les Portugais, dirigés par Alfonso d'Albuquerque ont envahi la région avec sept navires de guerre, sous le prétexte de protéger les intérêts de l'Égypte et de Venise. À cette époque, le port d'Ormuz était déjà considéré comme un port stratégique pour les intérêts commerciaux dans le Golfe.

Bandar Lengeh et Bandar Kong

Bandar Lengeh est une ville portuaire de la province d'Hormozgan sur la côte du Golfe Persique. Pendant de nombreuses générations, Bandar Lengeh a été un patrimoine héréditaire des Arabes Juvasmi, et c'est seulement en 1898 qu'ils ont été expulsés par une force perse.

2.1.8 Les Badgirs du Bandar Lengeh

Les Badgir sont directement connectés à une pièce, nommée « la pièce à Badgir ». Cette pièce joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de la tour. Les longueurs, largeurs et hauteurs sont déterminées minutieusement par les bâtisseurs.

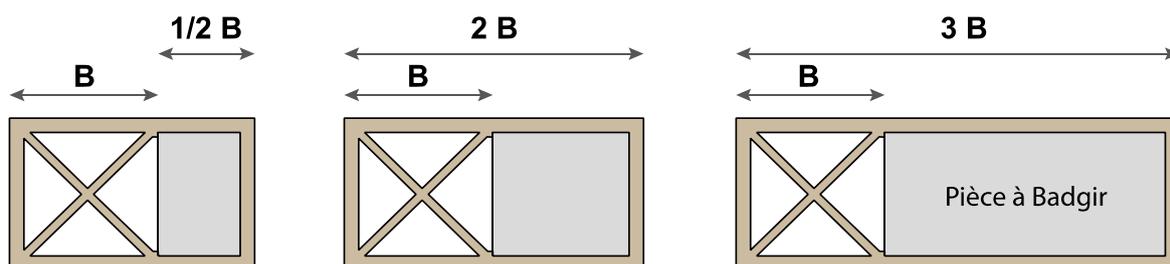


Figure 56 : Proportion des tours par rapport à la « pièce à Badgir »

Vu la faiblesse du vent dans certaines régions du golfe Persique, plusieurs tours sont construites sur la même parcelle. Il y avait parfois cinq Badgirs sur la même maison.

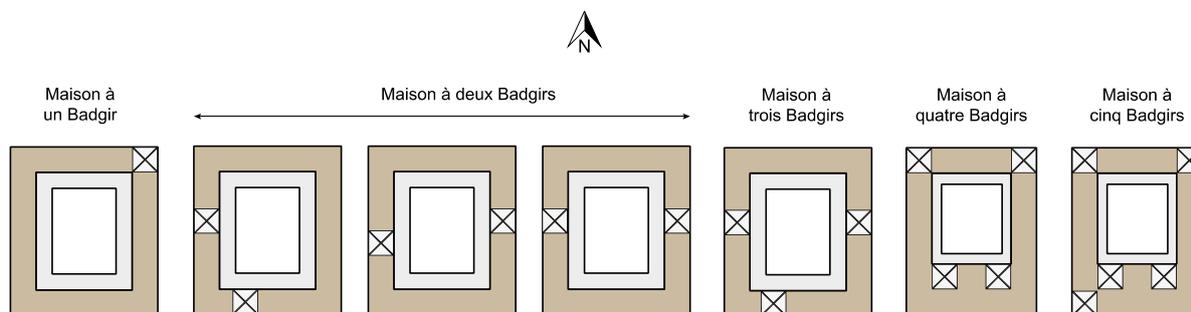


Figure 57 : Emplacement des Badgirs dans différentes parties de la maison

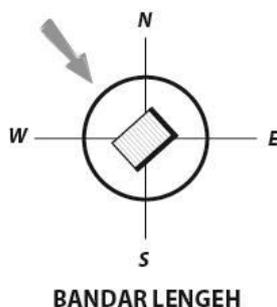


Figure 58 : Direction du vent dominant à Bandar Lengeh



Figure 59 : Maison à un seul Badgir. Maison de Fekri, Bandar Lengeh ; à deux Badgirs

2.1.9 Le Baadkesh (capteur de vent horizontal de la ville du Bandar Lengeh)

À Bandar Lengeh, hormis les tours à vent que nous détaillerons plus loin, nous avons constaté deux sortes de capteurs de vent introduits dans les bâtiments : le premier est réalisé dans le corps du bâti, le deuxième se trouve autour du toit, incrusté dans les garde-corps. L'espace serré de ces capteurs permet un passage rapide du vent.

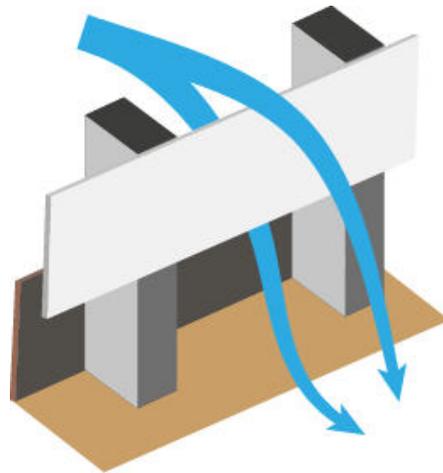


Figure 60 : Baadkesh (Badgir horizontal)

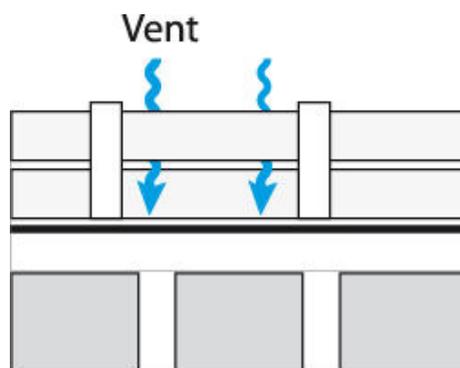


Figure 61 : Capteur horizontal dans le corps du bâtiment

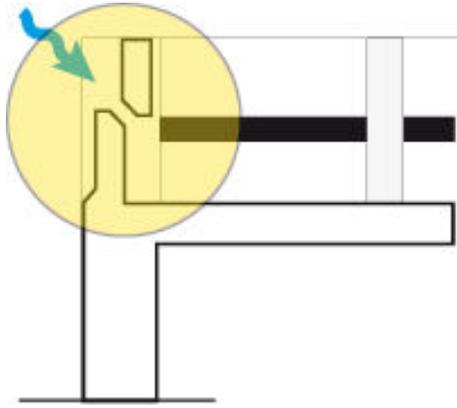


Figure 62 : Capteur horizontal autour du toit

L'île de Qeshme

Qeshm⁵¹ est une île située dans le détroit d'Ormuz, au large de la côte sud de l'Iran et à l'est du golfe Persique. Sa surface est essentiellement aride et rocailleuse. Avec une superficie de 1500 km² et près de 136 kilomètres de longueur, elle est la plus grande île du golfe Persique.

L'île de Kish⁵²

Les Badgirs représentent une caractéristique dominante sur cette île. Leurs dimensions et hauteurs sont les causes de leurs distances de la mer.

Pierres calcaires et adobe sont couramment utilisés dans la construction des maisons. Ces deux matériaux fournissent une bonne réflexion solaire ; l'adobe en raison de sa composition et le calcaire grâce à sa couleur claire.

Dans une grande partie de la région, les eaux souterraines sont salines et la végétation rare. En raison de la forte humidité, il n'y a pas de sous-sol dans les maisons. Afin de réduire la température élevée, la ventilation naturelle reste le moyen essentiel.

Dans cette région, les longs étés sont chauds et humides et les hivers sont courts et doux. L'humidité est élevée (plus de 60 %) en toutes saisons. Les précipitations annuelles sont très faibles. La pluviométrie moyenne annuelle est de 145 mm. La température moyenne se situe entre 30 °C et 34 °C au cours du printemps et de l'été.

L'île possède une population estimée à 20 000 habitants. La superficie de l'île est de 91 km². Des récifs coralliens et de nombreuses autres petites îles font partie du paysage de cette île.

Bandar Laft

Laft est un village situé dans le district central du comté de Qeshm, province d'Hormozgan. Au recensement de 2006, sa population était de 3 899 pour 765 familles. Le port de Laft a plus de 2 000 ans, et est situé sur l'île de Qeshm dans le détroit d'Ormuz, au sud-ouest de Bandar Abbas.

⁵¹ Cette île date de plusieurs siècles avant notre ère. Ptolémée l'appelait apparemment Alexandrie ou Aracia (Livre 6, chap. IV). En raison de sa situation stratégique, située près de l'embouchure du Golfe Persique, elle a été fréquemment attaquée par des envahisseurs, dont les Elamites, Omeyyades, Abbassides, ainsi que les Portugais et les Anglais. Pendant la dynastie Sassanide, cette île s'appelait Abarkawan. Selon les registres historiques, l'île de Qeshm a été célèbre comme centre de commerce et de navigation. Elle a été une liaison avec la Chine, l'Inde et l'Afrique.

⁵² La ville de Kish a une histoire longue d'environ 3000 ans. Elle a été appelée sous différents noms comme Kamtina, Arakia, Arakata Ghiss. En 325 av. J.-C., Alexandre le Grand a déclenché une expédition dans la mer d'Oman et le Golfe Persique. Les écrits sur Arakata sont la première mention connue de l'île de Kish. Quand Marco Polo a visité la cour impériale de Chine, il a discouru sur les perles des femmes de l'empereur, et on lui a dit que les perles venaient de Kish.

Laft est entouré de forêts (mangroves). Les caractéristiques architecturales les plus évidentes des maisons sont leurs Badgirs. Les maisons de Laft sont construites très proches les unes les autres, créant des ruelles étroites.

Les monuments historiques de ce village sont le Château Naderi, un château en forme de carré possédant quatre tours à vent, ainsi que deux Ab-anbars (réservoirs d'eau) en forme de dôme. Dans ce village, nous pouvons observer un cimetière dans lequel une partie des inscriptions date d'un millier d'années, telles que les sanctuaires de Seyed Hassan Mansor, Sheikh Tousi, et Sheikh Andarabi.

Derrière le château Naderi, dans un cratère, 366 puits ont été creusés pour recueillir l'eau, un pour chaque jour de l'année bissextile perse. Certains historiens pensent que ces puits datent de l'époque des dynasties Achéménide (vers 556 – 330 av. J.-C.) et Sassanide (226 – 651).

Sur le port de Laft, il existe un quai datant des dynasties Achéménide et Sassanide. Ce port fait environ 130 m de long et sa principale profondeur est d'environ 7 m. Les murs de ce quai font environ 3 m d'épaisseur et sont construits en pierres biseautées.

2.1.10 Les Badgirs de Dubaï et de Doha (Qatar)

Au début du XX^e siècle, le quartier de Bastakiah a été construit sur la côte sud des plages de Dubaï par les Iraniens sunnites ; un peuple qui avait quitté leurs maisons situées dans une région nommée Bastak. Cette population a apporté les techniques traditionnelles de la construction des tours à vent.

Les maisons munies de Badgirs sont construites autour d'une cour. Le rez-de-chaussée est utilisé durant la saison d'hiver, et l'étage supérieur, celui exposé beaucoup plus aux vents, est utilisé en été. Les maisons sont construites en blocs de corail pétrifié, avec des poutres en bois formant une toiture recouverte de boue et de paille.

Les Badgirs sont construits sur un plan carré et contiennent un dispositif de lames en forme de « X ». Afin d'augmenter, la vitesse du vent, dans certains cas, la partie basse de la tour se resserre de plus en plus comme à travers un entonnoir.

Des toiles de jute humide ont été parfois mises en place à l'entrée du Badgir pour augmenter la fraîcheur. L'utilisation de broussailles humidifiées devant les bouches des Badgirs a été aussi fréquente.

Afin d'empêcher la poussière et les bêtes d'entrer dans la maison, les bouches de la tour sont protégées par une grille métallique. En hiver, ces grilles sont complètement fermées à l'aide de planches en bois.

Il existe une grosse différence entre les Badgirs du centre de Doha et ceux qui se trouvent dans la zone de Bastakiah.

À Doha, le Badgir est placé sur une pièce d'environ deux fois plus grande que la superficie de la section de la tour. Cette pièce est munie d'un piège à sable et on y trouve des petites ouvertures laissant l'air de circuler dans les espaces adjacents.

À Bastakiah, en revanche, les tours à vent sont placées sur une pièce beaucoup plus grande que les salles à Doha. Cette salle est destinée au propriétaire susceptible d'avoir un lit directement sous la tour pour profiter de la brise fraîche. Le chef de la maison se servait du lit placé sous le Badgir, tandis que sa femme dormait avec les enfants dans des pièces voisines. Cette utilisation indique qu'à Bastakiah, il n'y avait pas la même quantité de sable et de poussière pénétrant la maison.

À Doha, le vent du Shomal est ainsi porteur d'une quantité significative de poussière ou de sable, ce qui n'est pas le cas à Bastakiah.

Dans les deux cas, les Badgirs ne se trouvent pas à plus de 2 m au-dessus du toit de la maison. Les tours sont généralement situées à l'extrémité nord des salles auxquelles elles sont liées. Cela semble être la disposition idéale pour le refroidissement de ces espaces.

Les Badgirs de Doha et de Wakra (Qatar) sont de type multidirectionnel (quatre faces). Hormis le vent du Shomal, ces Badgirs captent les vents de l'Est qui apportent moins de sable.

Les gens qui se sont installés dans le quartier de Bastakiah à Dubaï étaient apparemment plus riches que ceux qui se sont installés à Doha au Qatar. Leurs maisons ont été construites autour d'une cour, munie de grandes salles assez sophistiquées par rapport aux chambres simples des maisons au Qatar.

2.1.11 Le Baadkesh (capteur de vent horizontal du quartier de Bastakiah)

Comme en Iran, nous trouvons des capteurs horizontaux dans le quartier de Bastakiah à Dubaï. Cette structure est maçonnée dans le corps des murs sur la façade extérieure des maisons. Son but est de donner de la vitesse au vent qui entre dans les salles.

Il a toujours été de coutume chez les habitants de cette région de s'asseoir sur le sol tapissé, et c'est une des raisons principales d'utiliser ces types de Badgirs pour capter de l'air relativement frais.

Le schéma suivant (Figure 63) montre la manière dont le vent entre par le panneau supérieur et se dirige aussitôt vers l'intérieur de la pièce par un percement d'environ 100 mm. Il y avait la possibilité de condamner les Baadkeshs par des volets en bois, fermés de l'extérieur.

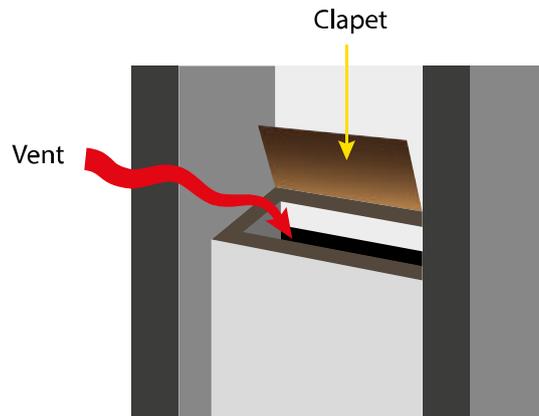


Figure 63 : Volets en bois des Baadkeshs

2.1.12 Éléments perforés et ouvertures dans le golfe Persique

À Al Wakrah (une ville du Qatar), des panneaux perforés (Naqsh) ont été déployés sur la façade, au-dessus des fenêtres, des portes ainsi que sur des Badgirs.

Des bâtiments ont été anciennement décorés avec des dispositifs dentés donnant un aperçu crénelé sur le haut des Badgirs. On dit parfois que ces crénelages ont été construits pour chasser le Djin (mauvais esprit). Les habitants du Golfe, par leur croyance, avaient la certitude qu'il fallait chasser les hiboux – le symbole de malchance – qui cherchaient à s'installer sur les toits des bâtiments.

Dans son ouvrage sur l'architecture des mosquées, Hassan Fathy a confirmé que les concepteurs du passé ont voulu créer une liaison entre la terre et le ciel en construisant ces décorations crénelées nommées Shufra. Il est d'avis que le vide de cet espace représente le ciel ou l'âme, et le plein, la terre.

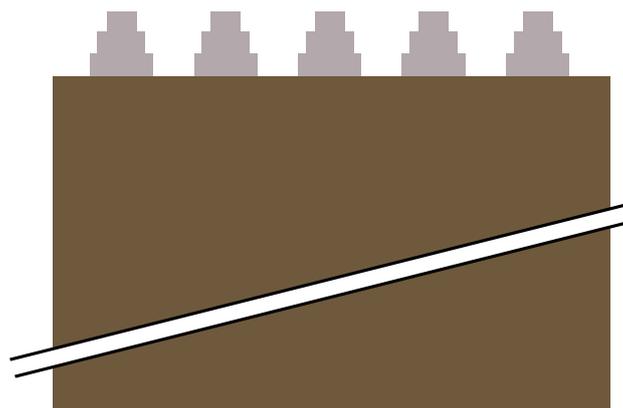


Figure 64 : Shufras, élément crénelé autour des toits

2.1.13 Particularités des maisons du golfe Persique

Dans les tissus historiques de la région du golfe Persique, la ventilation naturelle a été utilisée sous forme de ventilation transversale ou verticale. Les caractéristiques des bâtiments varient selon la ventilation choisie. Les villes de cette région sont

généralement classées en deux catégories et cela en fonction de la ventilation qui a été choisie. La plupart des villes et des ports comme Bandar Abbas et Bandar Lengeh ont recours à l'utilisation de la ventilation transversale et verticale. Dans ces villes, la plupart des bâtiments sont orientés face à la mer. De grandes fenêtres permettent de faire entrer les brises marines.

Diverses contraintes ont obligé les bâtisseurs à construire selon la direction du vent. Dans la ville de Bushehr par exemple, il s'est créé un contexte urbain compact et dense. Afin de recevoir un maximum de vent, les bâtiments sont construits sur deux ou trois étages.

Les caractéristiques des maisons dans les régions du sud d'Iran et du golfe Persique incluent les éléments et principes suivants :

- Les maisons possèdent de petites cours, mais encerclées par de hauts murs. Les cours au centre des maisons servent à la fois de cheminée d'aération, mais aussi pour l'organisation et la distribution de divers espaces.
- Dans les villes côtières, les tours à vent sont un élément architectural dominant. La taille et la hauteur de chaque Badgir varient selon son emplacement par rapport à la mer.
- Les toits généralement plats sont exploités comme endroit idéal pour dormir pendant les nuits d'été.
- Les étages supérieurs des bâtiments sont utilisés comme espaces de vie ; tandis que les rez-de-chaussée des bâtiments sont utilisés comme cuisine et cave.
- En raison de la présence de la nappe phréatique proche de la surface, il n'y a pas de sous-sol dans ces bâtiments.
- Le Taremi : cet espace muni de portiques spécifiques est utilisé comme espace de vie pendant la majeure partie de l'année. Cet espace gère les courants d'air et offre à la fois une bonne ventilation ainsi qu'une ombre de qualité.



Figure 65 : Taremi

- Shenashir : ces balcons munis d'écrans perforés, généralement très volumineux, enveloppent d'ombres les bâtiments et réduisent également la température interne. Afin de rester à l'abri des regards, profiter de l'air frais et pouvoir en même temps jeter un coup d'œil discret à l'extérieur, les architectes ont conçu des Shenashirs. À travers ces structures en bois, les habitants pouvaient avoir une conversation avec les voisins de la ruelle d'en face sans être vus de l'extérieur. Les Shenashirs ont été assemblés avec un bois de couleur sombre. Ce bois absorbe un maximum de chaleur dans la journée, aspire l'air frais de la cave et évacue la chaleur de la maison vers l'extérieur.



Figure 66 : Shenashir

- Baz-sho ou Panjareh : Les fenêtres habituellement utilisées dans ces bâtiments sont larges et hautes. Leurs tailles augmentent avec la hauteur du bâtiment. Pour aspirer un maximum de vent, les étages supérieurs possèdent de grandes et larges fenêtres. Pour utiliser la ventilation transversale à l'intérieur des espaces, les fenêtres côté rue et les fenêtres du côté cour sont souvent construites dans l'alignement les uns des autres.



Figure 67 : Fenêtre construite en plusieurs parties distinctes

- Goljam, la partie des portes et fenêtres contenant un écran perforé (avec de nombreux motifs géométriques). Les Goljams permettent des courants de convection doux dans l'espace intérieur. Leurs reflets aux multiples couleurs chassent en même temps les insectes.
- Jaalie, ce balcon perforé se présente avec une caractéristique unique tout au long des rives du golfe Persique.

Hayat (la cour centrale)

La cour centrale est un élément essentiel de l'architecture traditionnelle du golfe Persique. Pendant l'été, elle contribue essentiellement au système de refroidissement passif. Afin d'empêcher l'air frais de s'échapper, les portes des chambres donnant sur la cour sont fermées durant la matinée.

Pendant l'hiver, dans les petites maisons, la cour centrale est exploitée comme une partie du système de chauffage. Elle est en effet recouverte par des plaques en polycarbonate créant un effet de serre efficace.

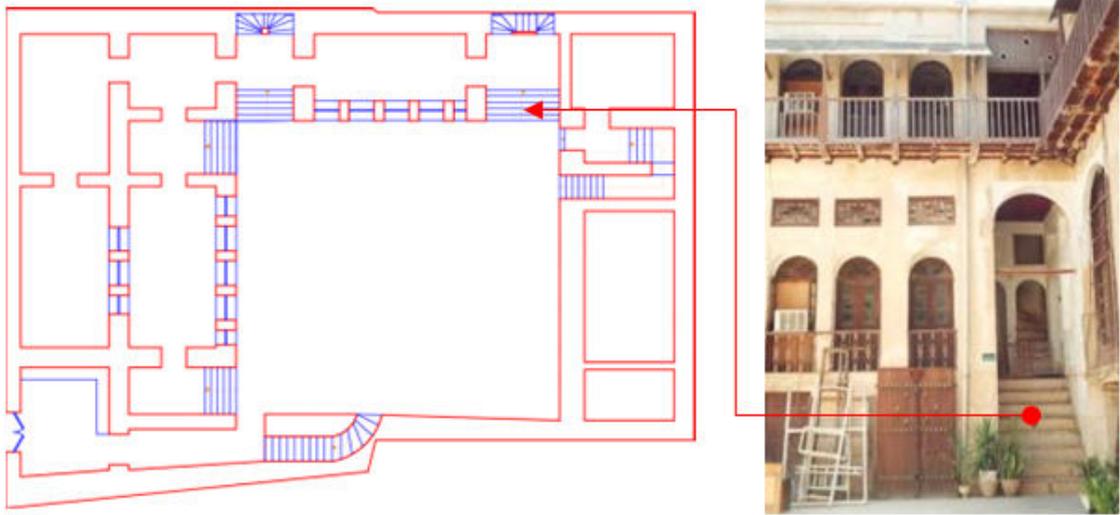
La différence entre la cour dans le climat chaud et humide, et dans le climat des régions chaudes et arides, c'est que dans la région du golfe Persique la cour n'est pas complètement fermée.



Figure 68 : Cour centrale et fontaine (région chaude et humide)

Une autre différence entre les cours de cette région et celles des régions chaudes et arides est l'emplacement des portiques. Dans la région chaude et aride, tous les portiques sont orientés vers la cour. Nous ne pouvons pas les observer depuis la rue, tandis que les bâtiments dans la région chaude et humide possèdent des portiques donnant sur la rue pour aspirer un maximum de vent.

Les cours dans la région chaude et aride sont plus larges et contiennent différents éléments, comme des fontaines, piscines et végétations pour rafraîchir l'air ; tandis que les cours dans la région chaude et humide sont généralement plus petites, entourées de hauts murs.



Figures 69 : Fenêtres donnant sur la cour (région chaude et humide)

Dans les maisons où vivent des familles aisées, il y a deux cours centrales. L'une est privée, l'autre destinée aux fréquentations externes. Dans les plus grandes maisons, il y a une troisième cour que l'on appelle cour de services. C'est une cour de plus petite taille destinée à la vie des domestiques et des gens qui y travaillent.

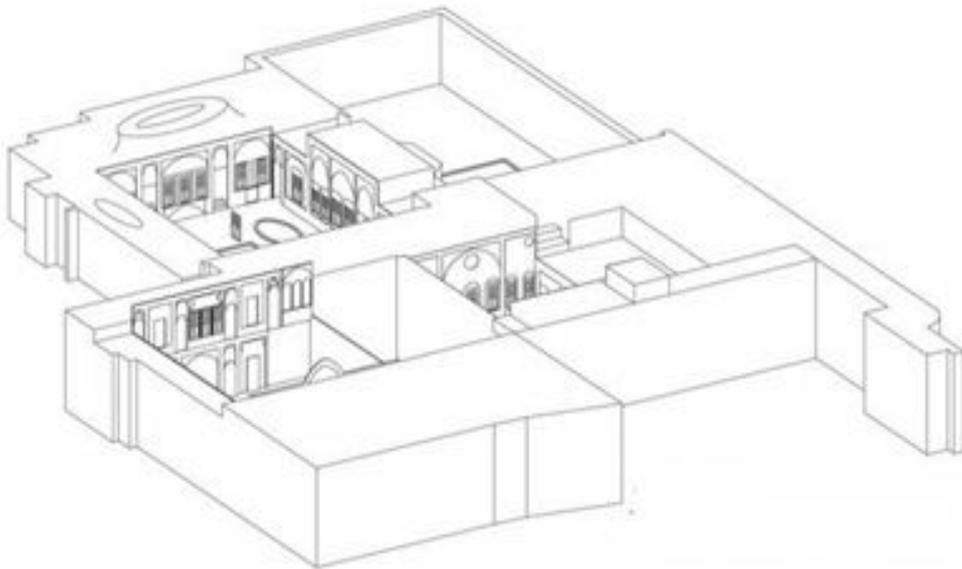


Figure 70 : Maison à trois cours

Toits plats

Dans la région du sud, les toits voûtés ne sont pas couramment utilisés. La plupart des bâtiments possèdent des toits plats, enduits avec de l'argile. Pour construire des toits et des planchers solides, de longues poutres « Chandal » en bois sont encastrées dans les murs à un intervalle de 30 centimètres, ensuite sont posées des nattes en feuille de palmier, couvertes d'une couche épaisse d'argile. Les poutres sont légères, longues, et sont traitées contre les termites et l'humidité.



Figure 71 : Chandal (poutres en bois), dans les ruelles de la ville de Bushehr



Figure 72 : Toits plats réalisés avec du Chandal, feuilles de palmier et de terre d'argile

Le rôle de chaque étage

Dans les maisons traditionnelles du sud, le premier et le deuxième étage servent aux espaces de vie tels que salons, chambres et salles à manger. Les chambres atteignent généralement une hauteur sous plafond de 4 m. À cet effet, l'air dans la pièce est mieux brassé, car des fenêtres se trouvent en vis-à-vis.

Matériaux de construction et textures

Dans les zones chaudes et humides, les matériaux utilisés possèdent une inertie thermique convenable à l'habitat local. La pierre de mer (Sanguéh Marjani)⁵³, la terre d'argile et le calcaire sont les matériaux locaux utilisés dans la construction des bâtiments. Le bois a été toujours utilisé pour la construction de charpentes, fenêtres

⁵³ La pierre de mer ou Sanguéh Marjani est une pierre naturelle comportant des coquillages et des planctons (l'ensemble des organismes, vivant dans les eaux douces, saumâtres et salées) de la mer.

et portes. D'autres matériaux utilisés sont le corail marin et les roseaux. Comme ces pierres sont poreuses, elles sont de bons isolants thermiques et acoustiques.



Figures 73 et 74 : Pierre de mer (Sanguéh Marjani)



Figures 75 : Murs construits en pierre de mer, épais de 60 à 70 cm

Les matériaux qui constituent les Badgirs doivent se trouver en parfaite harmonie avec le climat. À Yazd, les façades des Badgirs sont enduites de couleurs vives contribuant vigoureusement à la réflexion du rayonnement solaire. Le mélange de la paille et de la boue laisse une texture intéressante sur les façades.

À Bandar Lengeh, dans la région du golfe Persique, le plâtre, le mortier de chaux et la cendre laissent une couleur blanche, empêchant l'absorption du rayonnement solaire. À Yazd, le matériau utilisé est la brique de terre enduite avec de l'argile et de la paille, tandis que dans le golfe Persique, a été utilisé le plâtre de chaux afin d'empêcher la pénétration d'humidité dans les murs.

Des poteaux en bois poreux, encastrés horizontalement à l'intérieur des briques de terre jouent le rôle de renfort dans le mur et augmentent également sa résistance contre les forces latérales. En tapant à grande vitesse sur la partie haute des Badgirs (la cage de Badgir), le vent affaiblit la résistance de la structure, d'où l'utilisation des poteaux dans cette partie pour empêcher de tels affaiblissements. Les lames posées à l'intérieur des Badgirs sont aussi considérées comme des facteurs de stabilisation. Dans le centre de l'Iran, le bois utilisé (Sho-runeh) résiste aussi bien que le Chandal aux attaques des termites.



Figures 76 : Chandal (bois poreux)

Couleurs et textures

Dans le climat chaud et humide où le soleil rayonne presque toute l'année, la couleur des murs et des toits d'un bâtiment joue le meilleur rôle pour absorber ou diffracter les rayons solaires. Cela augmente aussi la capacité et la stabilité thermique du bâti. Cependant, le plâtrage « Gatch (enduit blanc) » n'est pas appliqué sur toute la surface des murs, car il est nécessaire de laisser le bâtiment absorber aussi de l'énergie solaire. La différence de température entre un toit de couleur blanche et un toit de couleur foncée est de 40 °C.



Figure 77 : Texture claire des murs à Bushehr

2.5 Bâtiments munis de Badgir

Maisons

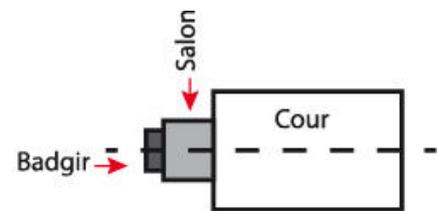
Les Badgirs sont en général construits dans la partie estivale de la maison. Afin de pouvoir capter un maximum d'air frais, leur placement est soigneusement étudié par rapport aux jardins, arbres et sous-sols.



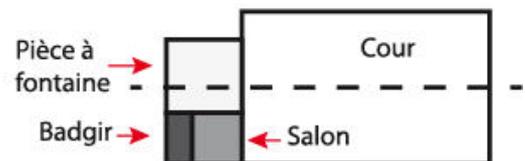
Figure 78 : Badgir construit sur une maison

Dans la plupart des maisons, le vent sec et chaud passe au-dessus d'une fontaine et rafraîchit par évaporation. Les habitants posaient aussi des tuiles ou des bottes d'épines humides devant l'ouverture principale des Badgirs afin de rendre plus frais l'air au passage. Le schéma suivant (Figure 79) montre différents emplacements des tours à vent dans les maisons iraniennes.

1- Sur ce schéma, le Badgir est placé dans l'axe symétrique du salon. Le salon et la cour sont dans le même axe.



2- Le Badgir est placé dans un coin de la cour. Le Badgir est connecté au salon par l'intermédiaire d'une pièce à fontaine, mais n'est pas directement lié à cette dernière.



3- Le Badgir est positionné dans un coin du salon vers le nord.

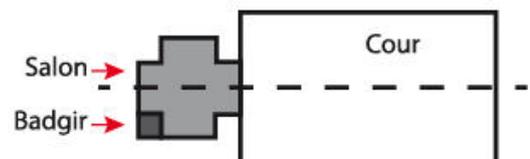


Figure 79 : Emplacement des Badgirs dans divers axes de la maison

Ab-Anbar (réservoir d'eau)

Le matériau de construction utilisé dans cette structure est un mortier spécial appelé « Sarooj », fait de sable, d'argile, de chaux, de cendre, de poil de chèvre et de blanc d'œuf, tout, dans des proportions spécifiques, en fonction du lieu et du climat de la ville. Ce mélange est résistant au transfert de la chaleur et a été pensé pour être complètement imperméable.

Les briques ont une épaisseur de 22 cm et ont été spécialement cuites pour les réservoirs d'eau. Ces briques sont nommées aussi « Ajour-Ab-Anbar ». Comme de

nombreuses villes en Iran sont situées sur des zones souvent frappées par des tremblements de terre violents, ces briques ont été conçues pour résister aux tremblements de terre.

Pour accéder à l'eau, il faut entrer par une ouverture nommée (Sardar). Cette entrée reste toujours ouverte, il suffit de descendre les escaliers jusqu'au fond où se trouvent les robinets d'accès à l'eau. Selon l'emplacement où les robinets sont installés, nous pouvons récupérer de l'eau très fraîche, moins fraîche ou peu fraîche, voire tiède ; tout dépend de la hauteur des robinets.

Afin de réduire une contamination possible, personne n'avait accès à la masse d'eau elle-même. La réserve a été complètement isolée de l'extérieur à l'exception des conduits de ventilation des Badgirs. Pour minimiser la contamination, une composition saline a été dispersée sur la surface de l'eau formant une couche de protection. Le réservoir était surveillé toute l'année afin de s'assurer que la surface restait propre.

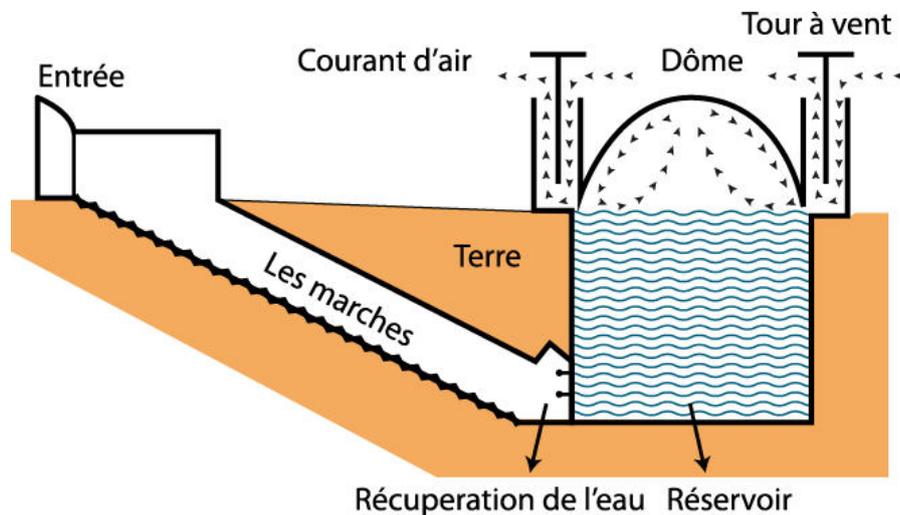


Figure 80 : Ab-Anbar (réservoir)

Yakhchals (ancien réfrigérateur naturel)

En 440 avant J. C., les Perses possédaient la technique de stockage de glace en plein été dans le désert. Les Yakhchals ont été construits et déployés en particulier en Iran. Cette structure en forme de dôme semi-enterré a été utilisée aussi pour conserver les aliments. C'est un grand espace souterrain qui avait des murs épais réalisés également avec du Sarooj. Afin de conserver la température glaciale de l'intérieur durant l'été, cet espace était ventilé par plusieurs Badgirs.

Pendant l'hiver, les gens allaient chercher de la glace dans des montagnes environnantes pour les conserver dans des Yakhchal. Cette structure était capable de stocker jusqu'à 5000 m³.



Figure 81 : Yakhchal (glacière) dans la ville de Meybod

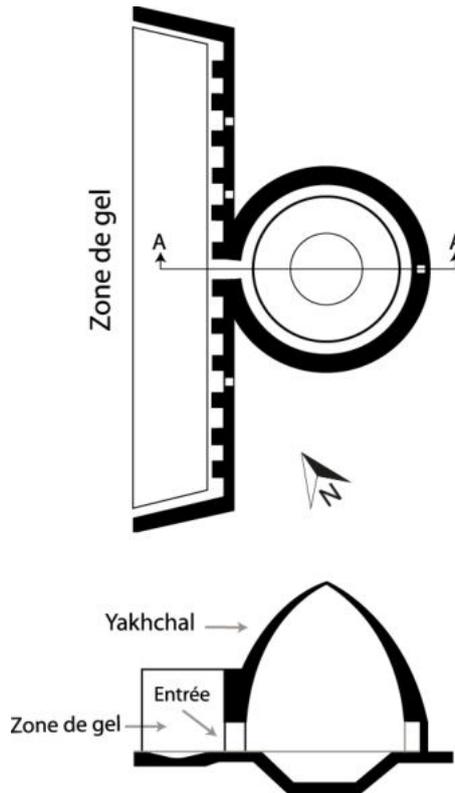
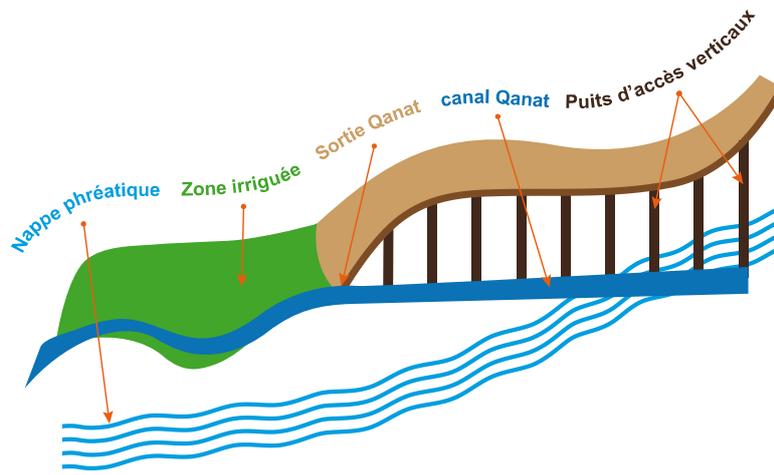


Figure 82 : Yakhchal, coupe et plan

Qanat (puits)

Le problème le plus important dans le désert, comme nous le savons tous, est l'eau. Il fallait donc trouver un moyen d'amener l'eau à la ville. Un puits a été creusé dans un endroit loin de la ville où on a pu atteindre la nappe phréatique à environ 100 m sous le sol. Ensuite, ils ont creusé de nombreux puits pour diriger l'eau vers la ville en se servant de la pente des collines, s'assurant de pouvoir apporter de l'eau à proximité de la surface. Nous pouvons observer ce parcours plus clairement dans la figure ci-dessous (Figures 83).



Figures 83 : Qanat

À l'heure actuelle, bien que ces structures aient été remplacées par les puits profonds et modernes, les terres agricoles dans de nombreuses villes centrales iraniennes comme Yazd, Kerman, Naein, Kashan, Shiraz, et Ispahan bénéficient encore des Qanat.

À Yazd, certaines parties de la ville sont situées sur les Qanat. Ces installations urbaines sont la principale ressource en eau pour l'irrigation des terres agricoles. De nombreux bâtiments résidentiels tels qu'écoles, bazar et mosquées ont également été reliés au réseau de Qanat à l'aide de canalisations, de ruisseaux ou d'étangs. Dans certains cas, les gens utilisaient l'eau de Qanat pour leur usage personnel comme eau potable ou pour le nettoyage et l'arrosage de jardins.

Les Qanat ont généralement 5 à 8 km de longueur, mais à Yazd on en trouve un qui s'étend sur 120 km, sa source étant à 116 m de profondeur.

À Gonabad, il y a trois puits creusés durant le 13^e siècle que l'on dit être de 300 m de profondeur. Le géographe Henri Goblot⁵⁴ estime que depuis 1950, on a compté 40 000 Qanat sur tout le plateau, une production de 600 000 litres par seconde, et des canaux sur une longueur totale de 400 km.

Le Qanat alimentait les structures suivantes :

- Mazhar : eau potable ou point de collecte de l'eau potable fraîche
- Ab-Anbar: réservoir d'eau potable fraîche
- Yakhtchal : stock de glace et d'eau potable fraîche
- Jube : canal d'eau urbain
- Hammam : bain public
- Asiab : moulin à farine

⁵⁴ Géologue, historien. Ingénieur civil des Mines de Paris.

- Hoz : fontaines

Caravansérails (auberge)

Dans le monde musulman, un caravansérail est une auberge se trouvant le long des anciennes routes de caravanes. Durant des siècles, le caravansérail a été construit dans le Moyen-Orient et en Asie centrale, offrant un lieu de repos aux commerçants, pèlerins et autres voyageurs le long de la Route de la Soie qui reliait la Chine, l'Inde et l'Europe.



Figure 84 : Caravansérail situé en plein désert, entre Kashan et Yazd, région désertique

Les caravansérails étaient aussi un lieu d'échange de marchandises. Dans la plupart des régions, les Badgirs rafraîchissaient les chambres d'hôtes et jouaient ainsi leur rôle en termes de confort et étaient devenus en même temps l'emblème de chaque ville.

Les caravansérails ont survécu aux Empires, aux Califes et autres guerres, jusqu'à la disparition du commerce caravanier. Ceux qui n'ont pas disparu sont devenus des ruines, ou ont été restaurés pour se transformer en hôtels, en musées, en marchés, ou des sièges militaires.

Mosquées

Dans toutes les sociétés musulmanes, la mosquée est l'édifice le plus important de la communauté, fournissant un fort sentiment d'identité des lieux. Il est l'un des quatre types de bâtiments qui dominent le paysage urbain musulman – les autres étant le marché, le palais ou la citadelle et les bâtiments résidentiels. La mosquée est souvent munie de Minbar (chaise du leader religieux), de Mihrab (coin de prière) et d'un Minaret. La mosquée est généralement entourée de bâtiments densément enveloppants, de sorte que l'approche à travers les rues étroites provoque un sentiment de découverte.



Figures 85 : Badgir de la mosquée de Bardestan, la région du golfe Persique

2.6 Impact de la culture, religion et tradition sur l'architecture persane

Il convient de rappeler quelques points importants qui ont influencé l'architecture iranienne depuis de nombreux siècles. Nous constatons quelques différences dans la forme et dans le style architectural entre la maison zoroastrienne et la maison islamique en Iran. Tout en étant dans la même zone géographique et climatique, les deux formes de maison présentent des caractéristiques architecturales distinctes.

Les principes religieux ont forcé chacun à créer des espaces de vie singuliers les uns les autres. Nous pouvons observer une forte distinction architecturale entre l'espace public et l'espace privé, entre le monde de l'homme et celui de la femme.

Tradition islamique

La distinction entre espace public et espace privé a poussé les architectes à construire des maisons tout en mettant en place des éléments à réduire au maximum la visibilité sur l'intérieur des maisons. L'intimité de la maison devait être protégée par de hauts murs sans fenêtres ni autres ouvertures donnant sur l'extérieur. Les portes d'entrée étaient souvent placées en oblique par rapport à l'axe de la rue pour éviter le regard direct des personnes étrangères dans la maison.

La maison est divisée en deux zones, le « Biruni », située du côté de la cour principale donnant vers l'extérieur de la maison destinée aux hommes et leurs invités masculins, et le « Andaruni » situés en arrière de la maison, destinée aux femmes et enfants. Chaque espace contenait généralement son Badgirs.

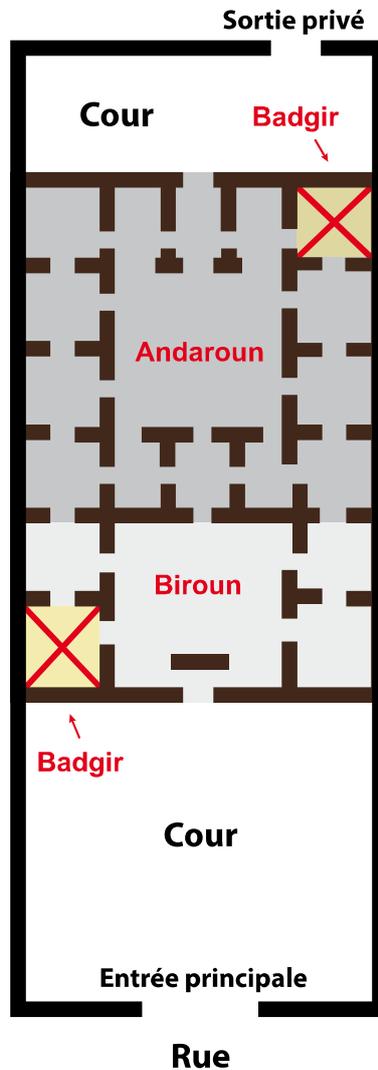


Figure 86 : Biroon et Andaroon, et l'emplacement des Badgirs

Chez les plus riches, cette séparation s'effectuait par la création de plusieurs cours, mais chez les familles moins riches, cette séparation d'espace se réalisait par de simples murs en bois.

Dans les maisons islamiques, vu l'obligation de construire face à la Mecque, certaines pièces et ouvertures devaient se diriger dans cette direction. Les architectes ont donc orienté autant que possible les maisons vers le Sud-Ouest. Un soin particulier a été pris en ce qui concerne l'orientation des toilettes afin qu'elles ne se trouvent pas dans cette direction. Elles se trouvent dans la direction est-ouest.

Beaucoup de maisons de l'ère islamique possèdent deux heurtoirs sur la porte d'entrée, dont chacun produit un son distinct par lequel les habitants pouvaient discerner le sexe du visiteur. L'anneau en forme de cœur était utilisé par les femmes, et un anneau en forme de pendule par les hommes.



Figure 87 : Porte à deux heurtoirs, femme et homme

Tradition zoroastrienne⁵⁵ (religion des Perses, 500 ans av. J.-C.)

Chez les zoroastriens, la relation entre hommes et femmes était différente de la tradition islamique. Nous ne constatons pas de séparations physiques de zones hommes-femmes. La distinction entre espace invité et espace privé n'existe pas et les caractéristiques architecturales de la maison zoroastrienne sont le reflet de leurs traditions socioculturelles distinctives.

L'enseignement majeur du zoroastrisme était la vénération envers la nature et les éléments qui la composent telle que le feu, l'air, la terre et l'eau. Parmi ceux-ci, le feu était considéré comme le plus sacré. La vénération pour le feu était en partie due aux pouvoirs purificateurs rituels. Les zoroastriens ont la conviction que dans leur temple, une flamme doit rester allumée pour l'éternité. Dans l'Atashkadeh ou le Temple du Feu, existe une flamme qui est allumée depuis 700 ans, autour de laquelle nous pouvons observer diverses salles de prières. L'architecture de ce monument historique est dans une certaine mesure similaire à l'architecture des temples zoroastriens en Inde.

Un deuxième aspect important de croyances et de pratiques religieuses était que les zoroastriens croyaient au dualisme et à la lutte incessante entre le Bien, Ahura Mazda, et le Mal, Ahriman, avec le triomphe ultime du Bien sur le Mal.

La province de Yazd abrite la plus grande population de zoroastriens iraniens ; une région construite entourée d'un mur, située en haut d'une colline ; nous pouvons voir une de leurs tours nommées « Tour de silence ».

Dans la tradition zoroastrienne iranienne, les tours ont été construites au sommet des collines ou des basses montagnes situées toujours dans des endroits

⁵⁵ Zoroastre était l'ancien prophète des Perses. La religion était le zoroastrisme. Chekchekou ou Pir-e Sabz est un sanctuaire zoroastrien situé entre les montagnes d'Ardakan et d'Anjireh à Tabas.

désertiques, éloignés des villes et villages⁵⁶. Les tours ont un toit presque plat dont le périmètre est légèrement supérieur à celui du centre. Le toit est divisé en trois cercles concentriques.

2.7 Conclusion

Le climat a eu un effet majeur sur les formes et les performances de l'architecture des bâtiments traditionnels iraniens et de leur consommation d'énergie. Les conditions climatiques ont forcé les gens du désert ainsi que les habitants du golfe Persique à construire leurs maisons avec des stratégies basées sur une consommation d'énergie minimale.

Les Badgirs ont été construits dans d'autres pays comme l'Irak, Dubaï, le Qatar et le nord de l'Afrique (l'Algérie, l'Égypte). Cet outil a été le système de refroidissement principal de ces régions au cours des trois derniers millénaires.

Le Malqaf est considéré comme un Badgir bidirectionnel tout en étant associé à d'autres éléments architecturaux connus sous le nom de Salsabil qui est une plaque de marbre ondulé reliée à une source d'eau. Les Badgirs traditionnels sont généralement à quatre faces.

Les constructeurs de l'époque ont appliqué des calculs géométriques et mécaniques afin de contrôler le vent du désert ou de la mer. Pour construire une tour à vent, les bâtisseurs ont pris en compte la superficie de base de la maison, la dimension de la cour, l'emplacement des fontaines, les espaces souterrains ainsi que les hauteurs et les largeurs des bâtis dans leur intégralité.

Dans l'architecture vernaculaire du golfe Persique et le centre désertique iranien, la conception, la forme et la hauteur des Badgirs dépendaient de la position sociale des habitants. Les propriétaires décidaient en effet s'ils souhaitaient avoir une tour plus ou moins haute que celle des voisins. Tout en sachant que dans le désert l'augmentation de la hauteur d'un Badgir permettait d'aspirer des vents plus frais, et avec moins de poussières.

L'utilisation de l'eau et de la technologie de refroidissement par évaporation a été employée pendant plusieurs siècles. Ces techniques ont été utilisées non seulement en Iran, mais aussi en Jordanie et en Égypte. Ce processus de refroidissement par évaporation permet de réduire la température jusqu'à 10 °C par rapport à la température ambiante.

⁵⁶ Dans la tradition zoroastrienne, les morts étaient placées sur le sommet d'une tour appelée la tour de silence, exposé au soleil et aux oiseaux charognards. Ceci pouvait durer parfois un an avant la disparition entière des corps.

CHAPITRE III

Étude du fonctionnement et de la conception des Badgirs

3.1 Différence de pression

Afin que toute brise soit dirigée vers la pièce à vivre avant de s'échapper à nouveau vers l'extérieur, au centre de la tour, sont construites des parois en forme de « X » (Figure 88). Le matériau utilisé pour construire une tour à vent est l'adobe (de la terre mélangée avec de la paille). L'ensemble de la tour est construite autour d'une armature de poteaux en bois, qui stabilisent et renforcent la structure.

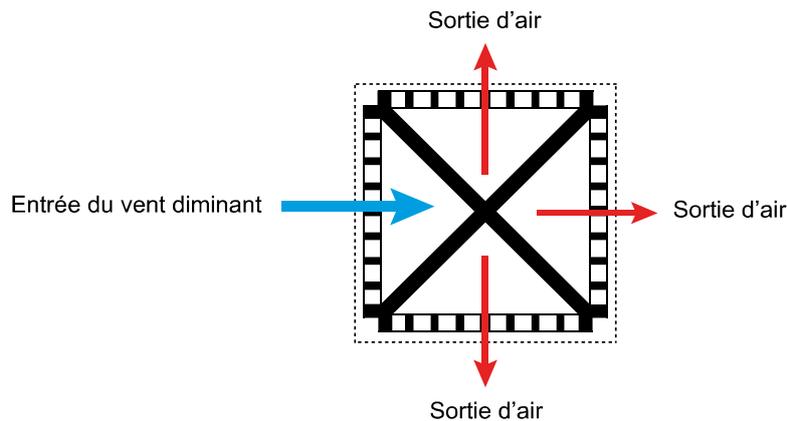


Figure 88 : Parois internes en forme de « X »

En observant le schéma suivant (Figure 89), nous constatons que le vent frais entre par le haut de la tour ; y descend ; une partie de ce vent circule dans la pièce à Badgir, tandis que l'autre partie remonte aussitôt par les conduits voisins.

C'est la différence de pression produite entre le haut et le bas de la colonne qui permet l'échappée d'air chaud par le conduit opposé (ici, en flèche rouge). La pression d'air de l'intérieur, étant supérieure à celle de l'extérieure, permet de tirer l'air chaud vers le haut tout en laissant l'air frais dans la pièce à vivre.

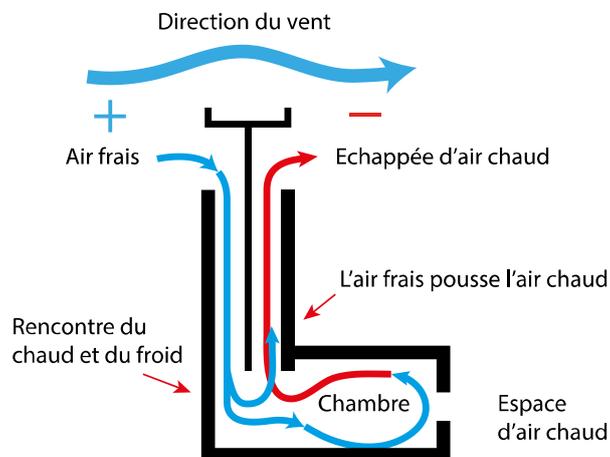


Figure 89 : Fonctionnement d'un Badgir par pression d'air

Comme les matériaux de construction de ces Badgirs possèdent une inertie thermique assez élevée, ils permettent de préserver la fraîcheur en permanence.

Dans le sud de l'Iran, dans la région du golfe Persique, ont été utilisés des Badgirs à quatre faces, tandis que dans les régions chaudes et arides comme Kashan et Yazd, nous observons aussi des Badgirs à 6 ou à 8 faces. Puisque les vents locaux de la région chaude et humide ont généralement moins d'intensité que les vents de la région chaude et aride, les tours à vent sont plus basses et souvent plus larges.

Les Badgirs possèdent en général une hauteur allant de 30 cm à 10 m au-dessus du toit. Comme mentionné dans le chapitre précédent, leur hauteur est déterminée par rapport à leur distance de la mer et la prospérité du propriétaire de la maison. Les villes côtières possèdent généralement les tours à vent de grandes dimensions, tandis que les villes qui se trouvent loin de la mer contiennent rarement des tours à vent.

Pour atteindre un confort thermique maximal, les tours de la région chaude et aride fonctionnent à la fois sous forme de « convection » et l'« évaporation ». Avant d'être diffusés dans l'espace, les vents passent au-dessus d'une fontaine placée sous la tour pour absorber de l'humidité.

Dans la région chaude et humide, les tours à vent ne fonctionnent qu'avec la convection en raison de la présence de l'humidité extrême.

Contrairement aux tours à vent des régions chaudes et arides, qui visent à augmenter le taux d'humidité, les tours à vent de la région chaude et humide créent des courants d'air intenses pour réduire l'humidité ambiante.

Quand il y a peu de vent ou l'absence totale de vent, l'air monte dans la tour où les parois sont déjà chauffées par le soleil et laisse ainsi l'air frais et humide venant de la cour et sous-sol de s'installer dans les chambres.

Les Badgirs sont quelquefois combinés avec un canal d'eau souterraine. De cette manière, l'air chaud est aspiré dans le canal et est refroidi avant de se propager dans la pièce à Badgir.

Les ouvertures des Badgirs sont décorées avec de la brique, du plâtre ou de la boue richement sculptés, puis sont enduites à la chaux. Ces éléments décoratifs servent à créer de l'ombre en haut des Badgirs afin de garder cette zone fraîche.

3.2 Fonctionnement d'un Badgir, jour/nuit

Pendant la journée, les rayons du soleil tapent sur la face sud des Badgirs. L'air qui se trouve à l'intérieur du conduit se chauffe et remonte vers la sortie. Cette évacuation d'air chaud permet à l'air frais du nord de descendre et de s'incruster dans le cœur de la terre d'argile (Figure 90, gauche).

Durant la nuit, l'air frais de l'extérieur descend le long des parois, se chauffe par la chaleur induite dans les murs, et évacue l'air chaud par les portes et fenêtres. Ce cercle se poursuit jusqu'au moment où la température des parois internes et la température externe se trouvent aux mêmes niveaux, cela dit le lendemain matin. Un équilibre de température est ainsi suivi en permanence (Figure 90, droite).

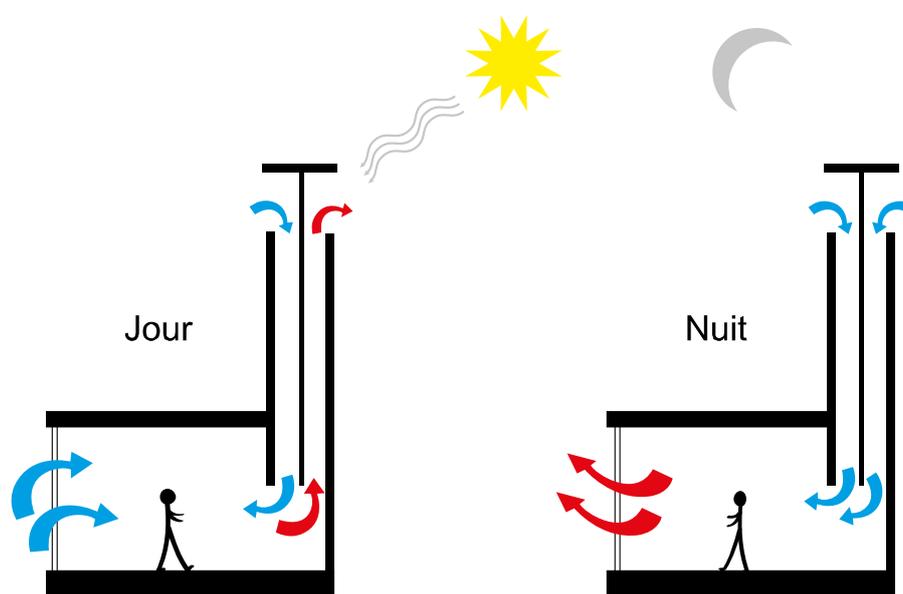


Figure 90 : Fonctionnement du Badgir en journée et durant la nuit

3.3 Divers modes de fonctionnement d'un Badgir

3.1.1 Convection

La convection est comme une bande transporteuse virtuelle qui peut transférer de la chaleur à travers les fluides (liquides et gaz). Lorsqu'une partie d'un fluide est chauffée, ce dernier se dilate. Étant plus léger et moins dense, le fluide s'élève vers le haut. En s'élevant, il s'éloigne de la source de chaleur, se refroidit et se déplace vers le bas ; et le cycle recommence.

3.1.2 Évaporation

L'évaporation est le passage du liquide à l'état gazeux. L'air chaud, en passant sur une fontaine crée un effet d'évaporation.

3.4 Pression et dépression

La pression est le rapport de la force à la zone sur laquelle cette force est distribuée.

Une zone de basse pression est une région où la pression atmosphérique est inférieure à celle des zones environnantes. Les systèmes de basse pression se forment dans les zones de divergence des vents qui se produisent dans les couches supérieures de la troposphère⁵⁷.

3.5 Utilisation de jarres d'eau dans les Badgirs Égyptiens et Iraniens

L'eau va s'évaporer si l'air qui y passe possède un point de rosée⁵⁸ inférieur. Donc, non seulement l'air se refroidit, mais devient aussi plus humide. Ce phénomène est appelé refroidissement par évaporation, et il a été employé depuis toujours dans l'architecture vernaculaire au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.

Hassan Fathy affirme même que cela remonte à 1 300 avant J. C. et que le peuple égyptien exploitait les Badgirs avec le système d'évaporation à eau comme le prouvent les dessins dans les tombes de Thèbes (Louxor).

Le refroidissement par évaporation a été manié autant dans des zones chaudes et arides, que dans des zones chaudes et humides. On déposait un chiffon humide devant les fenêtres pour rafraîchir la brise qui y passait à travers. La technique a été développée et exploitée davantage pendant l'ère islamique. Pour le refroidissement dans un système appelé système de refroidissement par évaporation, Rosa Schiano en 2004 a mentionné que de la poterie poreuse et des vases d'argile ont été utilisés.

Durant une étude récente de la Commission européenne de l'Université de Nottingham en 2004, des chercheurs ont déposé des céramiques poreuses modulaires, remplies d'eau, empilées les unes sur les autres, face à une ouverture. Grâce à l'effet d'évaporation et de convection, l'air chaud absorbait plus de fraîcheur et d'humidité.

⁵⁷ La troposphère est la partie de l'atmosphère terrestre située au plus proche de la surface du globe jusqu'à une altitude d'environ 8 à 15 km, selon la latitude et la saison. Elle est plus épaisse à l'équateur qu'aux pôles.

⁵⁸ Le point de rosée ou température de rosée est la température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il se produise une formation d'eau par condensation.

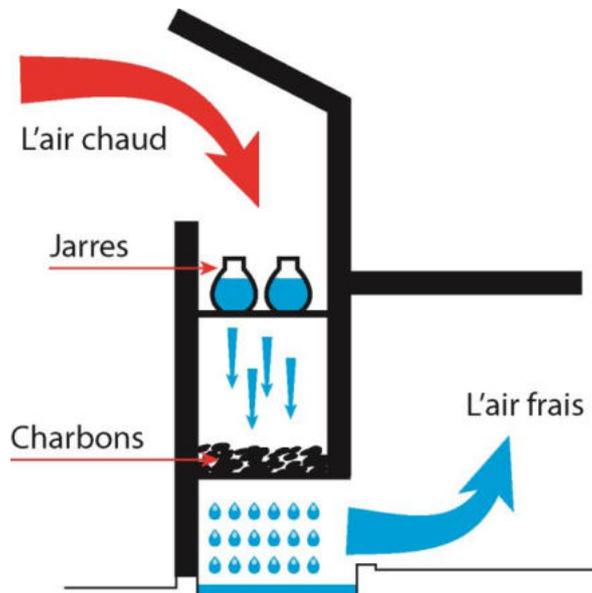


Figure 91 : Utilisation de jarres dans les conduits d'air ⁵⁹

3.6 Construction d'une fontaine au centre de la pièce à Badgir

La réduction de la température dépend de l'humidité de l'air ambiant. En présence d'une fontaine, l'air chaud est refroidi cédant sa chaleur à l'eau. Cela permet à l'eau de s'évaporer. L'eau évaporée absorbe de la chaleur et produit d'air frais pour les diriger vers les pièces voisines.

3.7 Construction d'un Badgir

Dans la construction des Badgirs, le rapport de la longueur à la hauteur et la largeur à la longueur sont d'une grande importance.

Un Badgir est composé de quatre parties principales :

- Structure
- Colonnes
- Lames
- Cage

⁵⁹ Le charbon a été utilisé comme ralentisseur et filtrage des poussières.

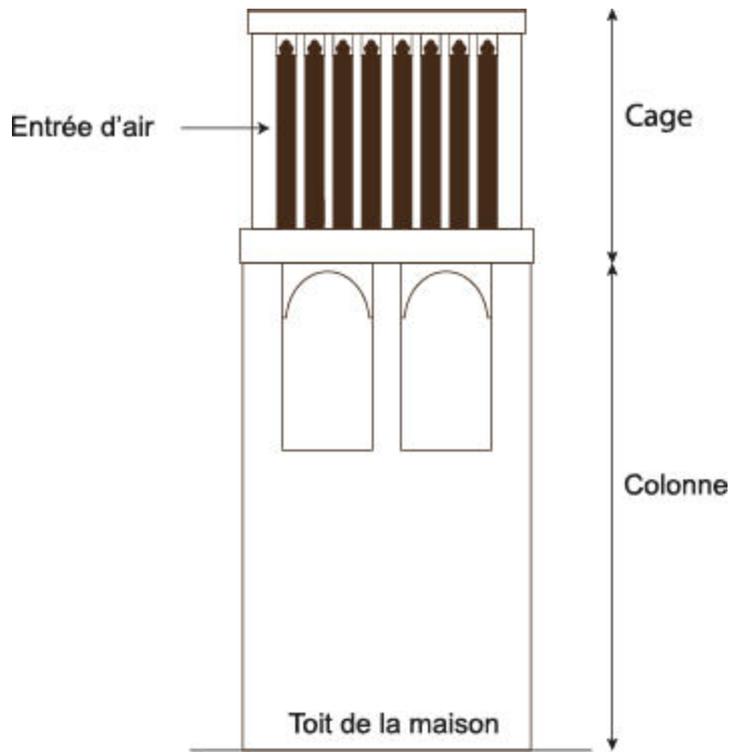


Figure 92 :
Les éléments qui composent un Badgir

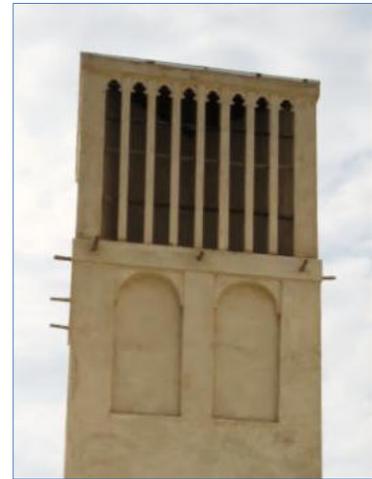


Figure 93 :
Cage et colonne d'un Badgir

3.1.3 Structure

Un cadre en bois a été bâti, maçonné ensuite par des briques de boue. Des lames ont été ajoutées en pleine longueur de la structure pour la soutenir.

Les poutres horizontales en bois ont servi à différents niveaux pour augmenter la résistance tout en jouant le rôle du chaînage.

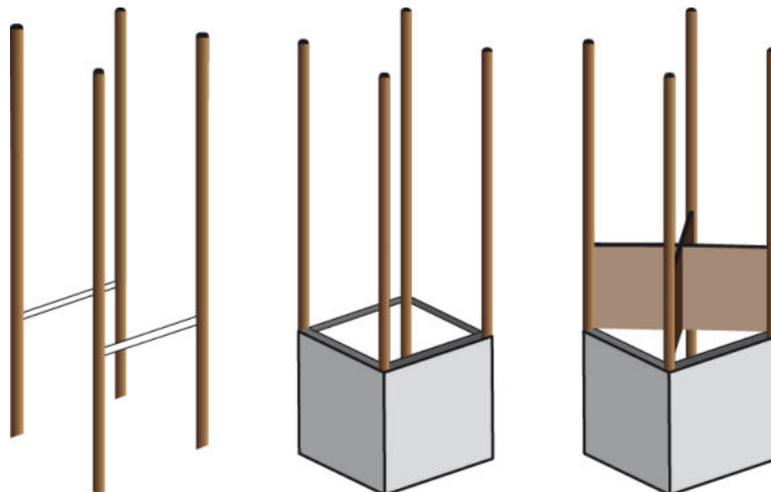


Figure 94 : Structure de Badgir

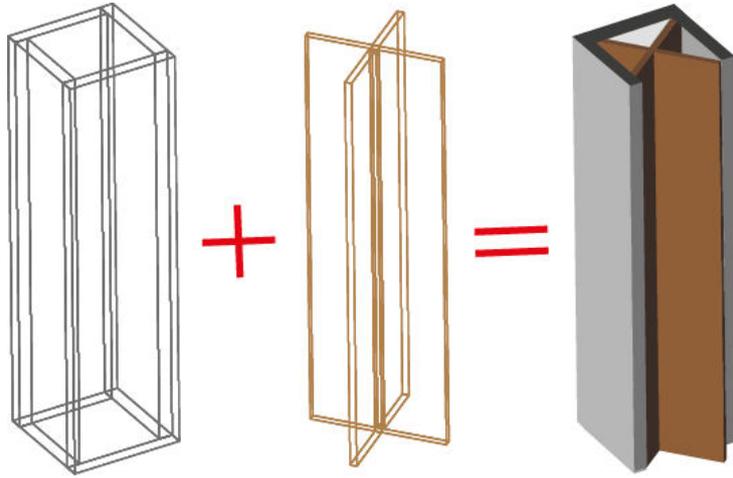


Figure 95 : Construction d'un Badgir

3.1.4 Colonne

La colonne, la partie principale du Badgir est située au-dessus du toit. Sa hauteur dépend de son emplacement par rapport aux Badgirs qui se trouvent à proximité, ou encore de la région où elle se trouve.

3.1.5 Lames

Les lames, installées dans la colonne, ont été conçues pour diviser la colonne en quatre conduits. C'est grâce à ces lames que la tour dans sa globalité aspire de l'air frais pour ensuite repousser et chasser l'air chaud par les conduits voisins. Il existe deux types de lames :

Lame principale

La lame principale descend dans toute la hauteur de la tour pour subdiviser le Badgir en deux, quatre, six ou huit conduits verticaux. Ces lames permettent également à l'air d'entrer et de sortir en même temps. La lame principale peut être perpendiculaire, diagonale ou en forme de « H ».

Lame secondaire

Les lames secondaires ont été conçues pour améliorer les performances telles que la résistance de la structure. Comme ces lames sont construites avec des briques de boue, elles jouent à leur tour le rôle de stockage de chaleur.

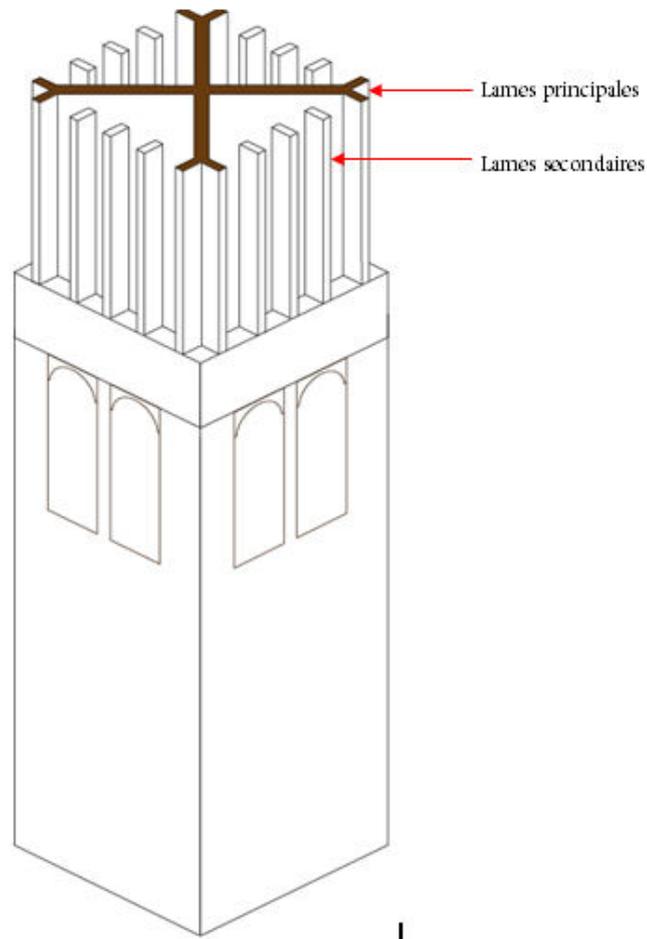


Figure 96 : Lames d'un Badgir

3.1.6 Cage

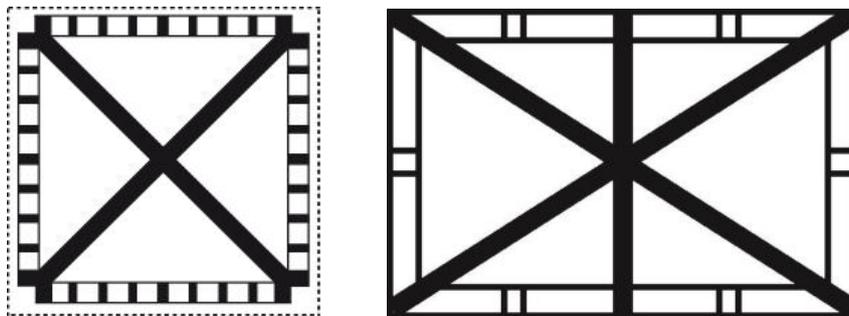
La partie la plus haute du Badgir s'appelle la cage. Et c'est autour de la cage que sont situés les capteurs (ouvertures). Le nombre d'ouvertures dépend de l'emplacement de la tour et la direction du vent dominant. Les ouvertures peuvent se trouver sur une, deux ou quatre côtés de la tour. Chaque face d'un Badgir peut contenir jusqu'à douze bouches. Ces bouches sont décorées par différentes formes d'arcs. Les décorations en forme d'arc ne s'appliquent ni pour des raisons fonctionnelles ni pour des raisons structurelles, mais esthétiques.



Figure 97 : Cage du Badgir

Lame en forme de « X »⁶⁰

Ces lames peuvent être posées sur un plan carré ou rectangulaire.



Figures 98 : Lame en forme de « X », ville de Yazd

Lame en forme de « + »

Lame en forme de « + » reste la forme la plus utilisée dans le centre désertique de l'Iran. Dans ces types de Badgir, les lames sont espacées de manière égale.

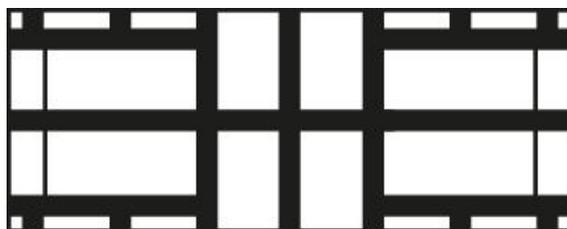


Figure 99 : Lame en forme de « + », la ville de Yazd

⁶⁰ Les dessins (Coupes sur les tours) des différents Badgirs ont été inspirés d'après les études réalisées par Susan Roaf, architecte anglaise, suivie par d'autres architectes iraniens. Après avoir mesuré onze Badgirs d'aspect différent, nous avons amélioré certains dessins.

Lame en forme de « H »

Dans ce type de Badgir, les conduits qui aspirent le vent sont moins nombreux que les conduits qui l'extraient. Il est favorable de les employer dans les régions où se trouve un fort vent dominant.

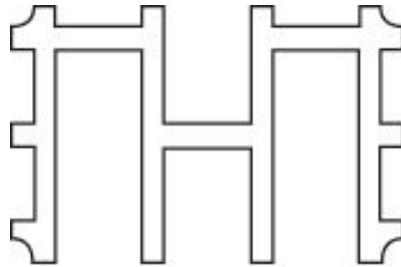


Figure 100 : Lame en forme de « H », ville de Yazd

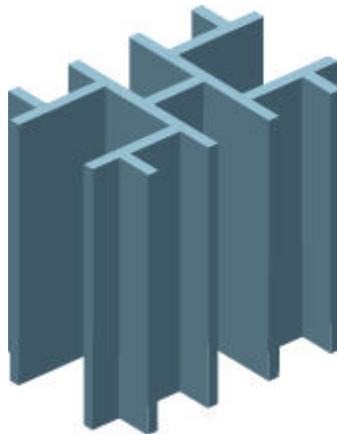


Figure 101 : Aspect 3D des lames en forme de « H », ville de Yazd

Lame en forme de « K »

La conception de ces lames est la combinaison d'une lame en forme de « X » et d'une lame en forme de « + ». Le point fort de ce Badgir est qu'il peut capter du vent des quatre faces sans qu'il y ait des bouches fermées ni sur la longueur ni sur la largeur. Comme la montre, le schéma suivant (Figure 102), la largeur fait une fois et demie la longueur du plan du Badgir.

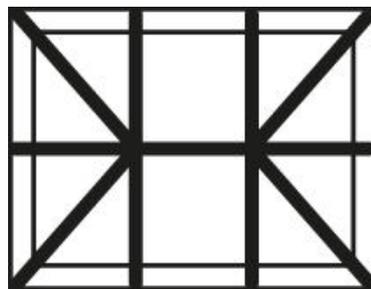


Figure 102 : Lame en forme de « K », ville de Yazd

Lame en forme de « I »

Pour ne pas laisser échapper l'air, certaines bouches ont été commandées du côté largeur du Badgir (Figure 103). C'est le plan le plus rectangulaire possible. Le rapport entre largeur et longueur est de 3,75.

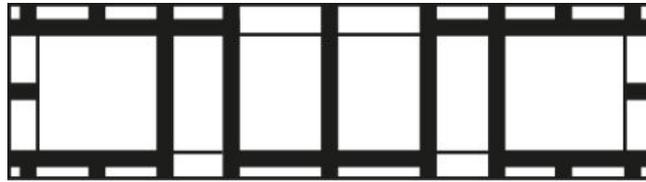


Figure 103 : Lame en forme de « I », la ville de Yazd

Le schéma suivant (Figure 104) montre le pourcentage exact des lames utilisées dans les Badgirs iraniens.

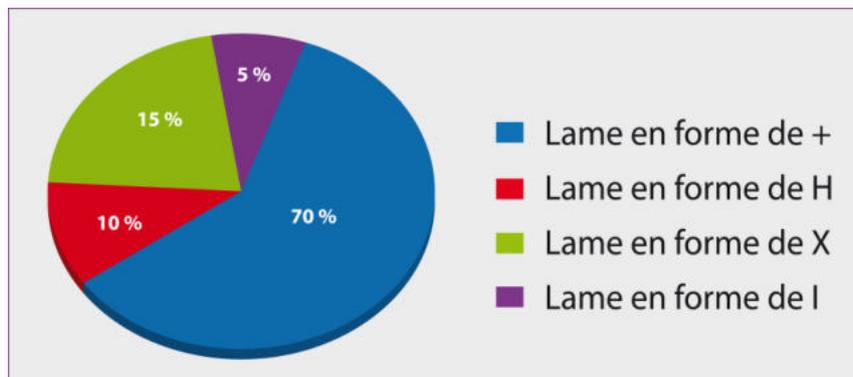


Figure 104 : différents types de lames

3.1.7 Badgir à une face ⁶¹

Les Badgirs à une face sont les catégories les plus simples. Ils ont été construits face aux vents dominants de chaque région. Afin d'éviter les fortes tempêtes, les ouvertures opposées au vent sont bouchées. Ce type de Badgir se trouve principalement dans les régions désertiques telles qu'Ardakan et Maybod.



Figure 105 : Badgir à une face

⁶¹ Les dessins (Coupes sur les tours) des différentes Badgirs ont été inspirés d'après les études réalisées par Susan Roaf, architecte anglaise, suivie par d'autres architectes iraniens. Après avoir mesuré onze Badgirs d'aspect différent, nous avons amélioré certains dessins.

3.1.8 Badgir à deux faces

Ces types de Badgirs sont construits avec deux faces, l'une opposée à l'autre ayant des ouvertures hautes et étroites. Ils sont souvent construits sur les réservoirs d'eau.



Figure 106 : Badgir à deux faces

3.1.9 Badgir à trois faces

Ce type de Badgir n'est pas habituel, mais il en existe un à Arg Bam (Ghobadian).

3.1.10 Badgir à quatre faces (rectangulaire ou carré)

Ce sont les types les plus répandus. Ils ont été parfois construits sur deux plans rectangulaires où la face la plus large joue le capteur principal et se trouve face au vent dominant. Sinon, ils sont construits sur un plan carré attirant l'air à proportion égale sur les quatre faces. Ces derniers sont surtout présents dans la province de Bushehr, sur le golfe Persique.

3.1.11 Badgirs multidirectionnel (octogonaux et circulaires)

Généralement octogonaux, hexagonaux et parfois circulaires, ces types de Badgir se trouvent à Yazd et dans d'autres régions du centre. Nous pouvons observer des Badgirs à six faces sur certains réservoirs d'eau à Yazd, centre désertique.

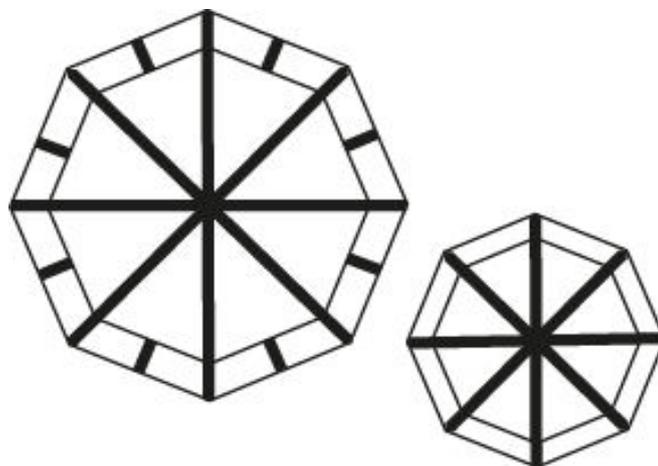


Figure 107 : Badgir à huit faces



Figure 108 : Badgir à quatre faces

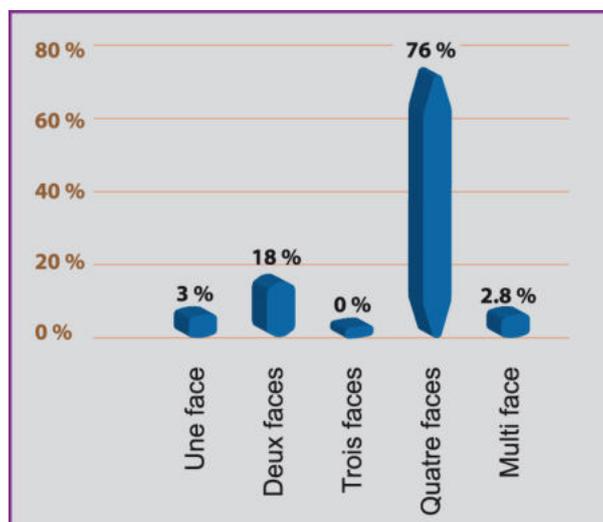


Figure 109 : Typologie des Badgirs existants au 19^e siècle (source : Susan Roaf, 1988)

3.1.12 Ornements des Badgirs

Il existe deux types d'ornements : le premier est décoratif, ajouté au corps du Badgir pour des raisons esthétiques, et le second est appliqué pour rendre les éléments aussi décoratifs que fonctionnels.

Les Badgirs à Yazd portent des éléments désignés comme décoratifs, utilisant du plâtre (Gatch) sur la finition des lames et des ailettes pour fabriquer une variété d'arcs. Selon leurs goûts et préférences personnels, les bâtisseurs et propriétaires ont manié certains types d'arcs personnalisés pour en quelque sorte signer l'œuvre. Ces éléments servaient ainsi de décoration et n'avaient aucune autre fonction. Mais dans d'autres cas, tel que sur les Badgirs qui se trouvent dans la région du golfe Persique, des rangées de briques ont été placées sur la partie haute et basse de la cage des Badgirs permettant de créer un effet d'ombre sur le corps de la tour, tout en réalisant des éléments décoratifs.



Figure 110 : Sculpture destinée à l'esthétique des cages des Badgirs, Yazd

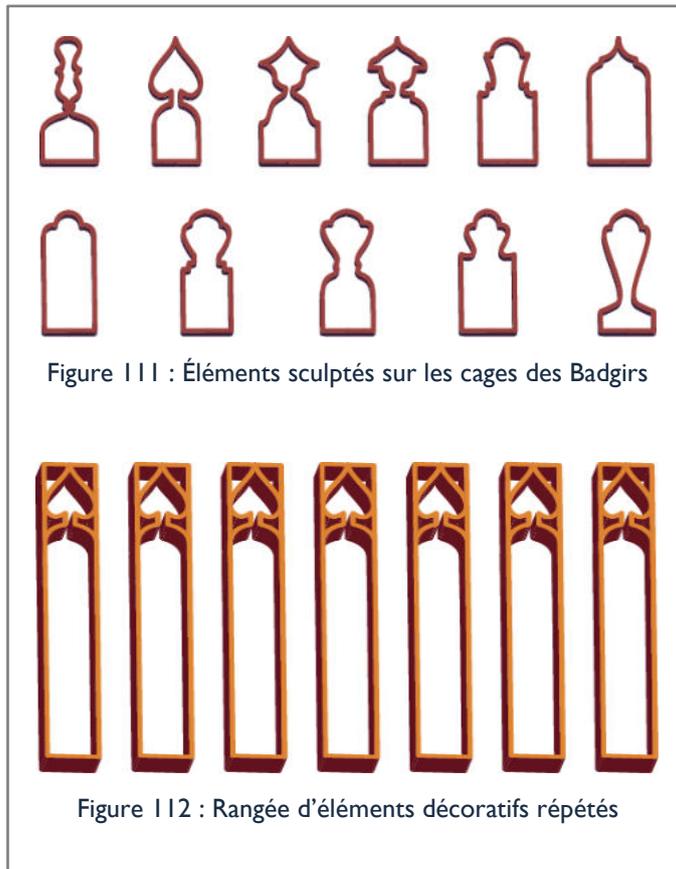


Figure 111 : Éléments sculptés sur les cages des Badgirs

Figure 112 : Rangée d'éléments décoratifs répétés

3.8 Toit en forme de dôme

Coupoles et voûtes ont été largement appliquées pour couvrir les toits des bâtiments dans le Moyen-Orient. Ces formes de toitures ont prouvé leur efficacité dans un processus de ventilation naturelle et de refroidissement passif.

Une voûte ou une coupole possède une plus grande surface par rapport à un toit plat couvrant la même zone. Une étude menée par des chercheurs iraniens (Bahadori & Haghghat, 1986) a montré que la vitesse du vent autour d'un toit en forme de dôme est plus élevée que celui d'un toit plat.

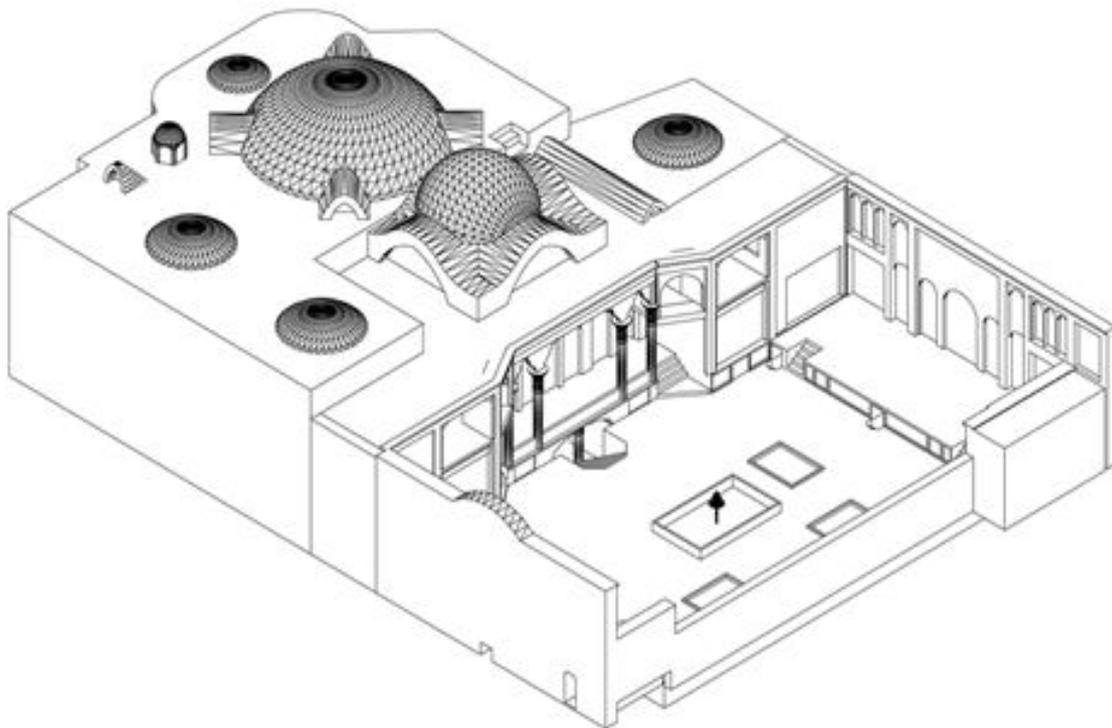


Figure 113 : Toit en forme de dôme⁶², maison à Yazd, centre désertique

Et la perte de chaleur par le toit en forme de dôme est plus élevée que celle d'un toit construit à plat, ce qui rend le « dôme » préférable pour les zones chaudes et arides et le « toit plat » pour les zones chaudes et humides.

La réalisation d'ouvertures et de percements dans les toits voûtés crée un système de ventilation efficace. L'air chaud accumulé sous un dôme peut être évacué par une ouverture au sommet de celui-ci. L'air frais entre dans une pièce par portes et fenêtres et force l'évacuation de l'air chaud à travers les ouvertures du dôme. Par temps venteux, le flux d'air sur le dôme génère une aspiration et force l'air chaud à s'évacuer.

⁶² Source, « 100 houses, 100 plants, Dr. Farrokhyar », 2012.

Ces ouvertures peuvent également être utilisées pour l'éclairage naturel de l'espace intérieur. Une autre méthode pour fournir la lumière naturelle était de percer le toit des dômes et de placer des vitres colorées en forme de bulbes.

3.1.13 Hauteur des Badgirs

Les Badgirs de la ville de Yazd sont plus hauts que ceux des autres régions en Iran. Susan Roaf, durant ses recherches à Yazd, a rencontré un principe intéressant : elle déduit d'après les voyages effectués par les experts tels que Puttinger, 1816, Khanikoff, 1861, Goldsmid, 1867 et 1876, Mac Greggor, 1879, Stewart, 1881, Floyer, 1882, Stack, 1882, Vaughan, 1890, Curzon, 1892, Napier, 1905, ainsi que les recherches réalisées par docteur Afshar en 1969, que c'est bien à la fin du 19^e siècle que les architectes iraniens ont commencé à construire des Badgirs aux colonnes très hautes.

Susan Roaf rappelle qu'avant le 19^e siècle les Badgirs ont été courts, mais qu'ils ont ensuite été construits de plus en plus haut pour une simple et unique raison, la poussière. Car plus haut est le Badgir, moins il va ramasser de la poussière du désert, vu que la poussière atteint rarement cette hauteur et est attirée par la force de gravitation.

3.9 Badgirs des maisons traditionnelles iraniennes

3.1.14 Principe général

Pour mieux saisir le fonctionnement des Badgirs, nous allons étudier leur environnement et surtout leurs combinaisons avec les autres espaces de la maison traditionnelle iranienne. Comme mentionné dans le chapitre précédent ; la plupart des maisons sont introverties, ou se retournent vers l'intérieur. Les chambres, salles et salons ont tous été disposés autour d'une cour souvent rectangulaire.

Cette disposition et ces règles géométriques imposent une hiérarchie aux différentes zones de la maison. Elles déterminent l'aménagement des pièces selon leurs caractères et importances. Les zones sont harmonieusement reliées les uns aux autres, mais gardent leur indépendance et sont souvent séparées par des pièces intermédiaires.

Les chambres sont généralement disposées autour de la cour de telle manière que les pièces d'été se trouvent toujours face au nord, à l'écart du soleil brûlant des après-midi. Les chambres d'hiver sont situées sur le côté opposé.

Les pièces destinées aux services ont été traditionnellement séparées des zones d'habitation. Cette séparation comprend tous les secteurs de services, tels que les cuisines, les toilettes, les caves, et les écuries qui devaient rester cachées de la vue et ne pas déranger le confort des habitants.

Voici les espaces qui composent en général une maison traditionnelle iranienne :

Hashti

Hashti est situé après l'entrée, et est relié à l'espace extérieur de la maison. La plupart du temps, l'une de ses fonctions était de diviser la zone d'entrée en deux. En effet, c'est un espace de pause avant d'entrer dans la maison. Les plafonds des Hashti sont souvent peints de très beaux paysages ou de motifs traditionnels.

Dalan (Corridor)

Il est le composant le plus simple de la zone d'entrée. Sa fonction principale est de relier deux espaces.

Ivan (Iwan)

Ivan est un espace plus petit que Talar (salle de fête). Couvert d'un plafond, cet espace reste ouvert, mais sans portes et fenêtres.

Shahneshin

Shahneshin (la place du roi) est une partie du salon, construit à un niveau plus élevé que le plancher. Shahneshin est dédié aux visiteurs importants, sinon le maître de la maison.

Narenjestan

C'est une très petite cour où les fruits et les plantes peuvent être protégés contre le froid d'hiver.

Gowdal-Baghcheh

C'est un espace conçu autour de la piscine centrale qui possède peu de profondeur, servant de jardins et d'espaces verts.

Birouni (extérieur)

Une petite cour en forme de carré ou de rectangle munie d'une fontaine recevant les invités et visiteurs étrangers.

Andarooni (intérieur)

C'est une cour plus grande que Birouni (extérieur). Sa taille dépend en grande partie des pièces voisines et sert aux personnes intimes, vivant dans la maison.

3.1.15 Les pièces les plus utilisées en été

Tanbi

Cet espace est construit dans des maisons à grand Peymoon⁶³ (échelle). Placé à côté d'un Badgir, il est en forme de croix. C'est l'espace entre Talar et Badgir destinés à prendre du repos.

Howz-khaneh (pièce munie d'une fontaine)

C'est la pièce centrale de la maison. Une fontaine est construite au centre de cette pièce offrant un climat frais et humide. De nombreuses salles donnent sur le Howz-khaneh. Un Khishkhan (lanterne) muni d'un tapis imbibé d'eau est construit dans le plafond de cette salle.

Nessar et Sardaab (sous-sol)

La partie sud de la cour qui se trouve à l'ombre est appelée Nessar. Le sous-sol nommé Sardab se trouve dans cette partie fraîche de la maison où durant les journées chaudes, les habitants se réfugient.



Figures 114 : Sardaab et Panj-Dari (pièce à cinq portes) à Yazd, maison Tabatabai

⁶³ L'unité de mesure de base dans des bâtiments traditionnels de l'Iran est appelée « Peymoon ». On disait grande Peymoon pour désigner les grandes maisons destinées aux riches, petites Peymoon pour des maisons de tailles moyenne et toute petite Peymoon pour des maisons ordinaires.

Le tableau ci-dessous montre la chute de la température dans le Sardaab (sous-sol). La température du sous-sol diminue de moitié par rapport à la température de l'extérieur. Ces mesures ont été relevées en avril 2013 entre 13 h et 15 h.

Lieux	Température (°C)	Humidité (%)
Extérieure (Cour)	36,5	11,5
Talar (salle de fête)	35,6	12,02
Couloirs	28,8	30,1
Salle de réception	24,2	41,1
Sardab (sous-sol)	16,4	71,3

Figure 115 : Température et l'humidité de la maison Tabatabai relevés en avril 2013

Talar (salle de fête)

Talar possède trois ou cinq portes. C'est un espace également conçu pour les fêtes et autres rassemblements tels que mariages, anniversaires, etc.

Kolah farangui

Kolah Farangui est un élément en forme de voûte construit sur le toit servant à la fois de bouche d'aération et de capteur de lumière.

Nous devons rappeler que lorsque l'air passe sur un corps sphérique, il obtient une vitesse plus élevée et la pression sur ce point tombe en conformité avec le théorème de Bernoulli.

L'augmentation de la vitesse et la chute de la pression sont également basées sur ce principe. Quand une pièce est équipée d'un plafond voûté ou sphérique, muni d'ouvertures au-dessus de sa section hémisphérique, l'air chaud de l'intérieur de la pièce est aspiré laissant place à l'air frais.

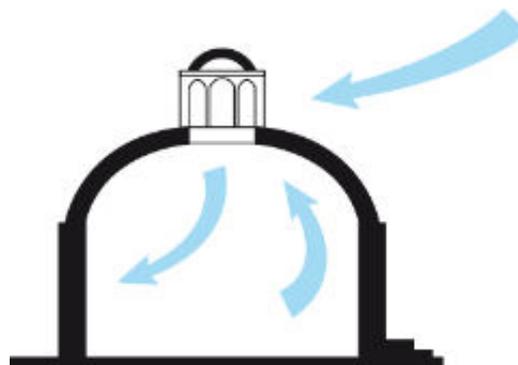
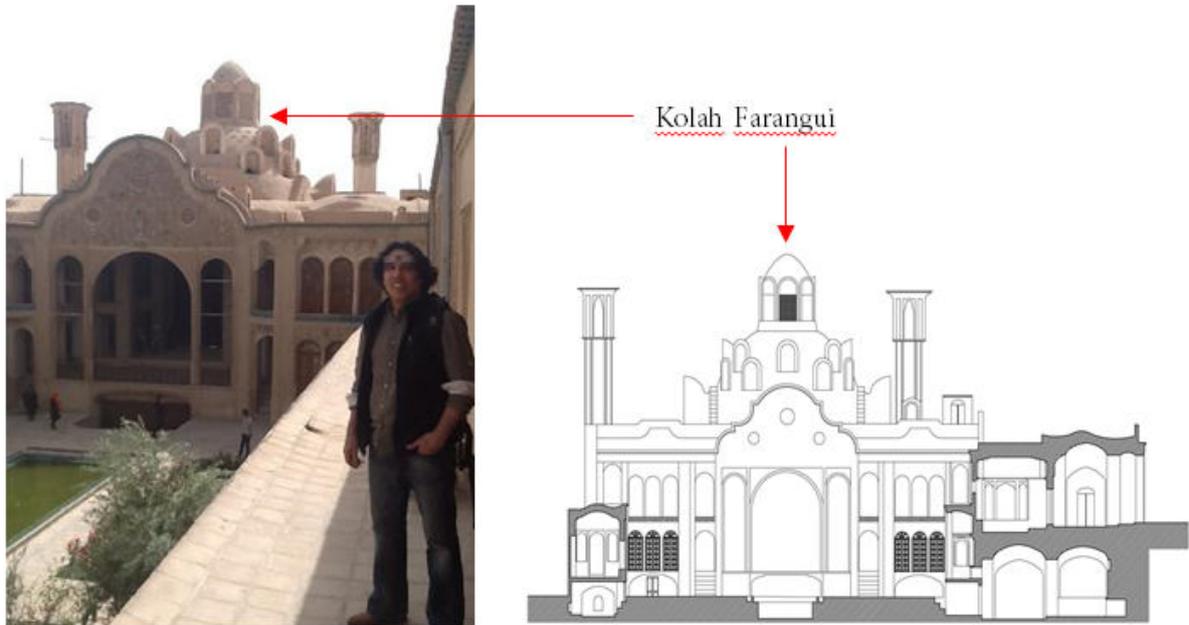


Figure 116 : Fonctionnement d'un Kolah Farangui



Figures 117 : Kolah Frangui de la maison de Boroojerdi à Kashan ⁶⁴

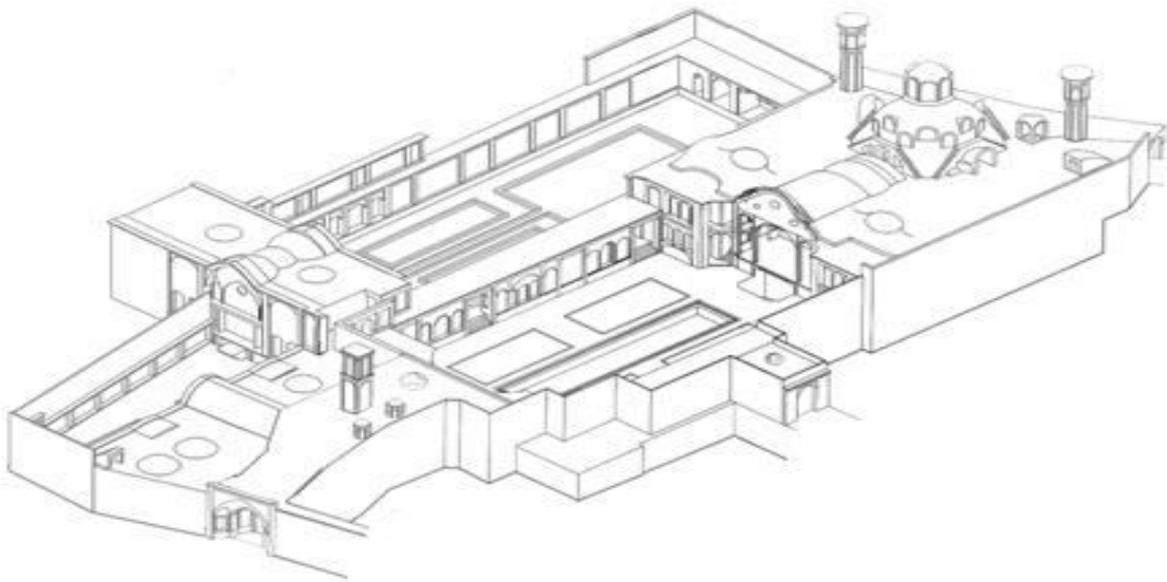


Figure 118 : La maison de Boroojerdi possède trois cours ⁶⁵

Hayat (la cour)

Les cours sont l'un des principaux éléments architecturaux dans la composition des maisons traditionnelles iraniennes. Les cours ainsi que des piscines entourées de plantations jouent des rôles importants dans le système passif de refroidissement des bâtiments de la région du centre désertique.

⁶⁴ Source, « 100 houses, 100 plants, Dr. Farrokhyar », 2012.

⁶⁵ Source, « 100 houses, 100 plants, Dr. Farrokhyar », 2012.

Les images suivantes (Figures 119) montrent des cours munies de piscines d'une région chaude et aride.



Figures 119 : Piscines construites au milieu de la cour, maison de Lariha, Yazd

Les cours sont exploitées comme des lieux de détente et de loisirs. Elles possèdent une température de quelques degrés plus bas que celle de l'extérieur. L'humidité y est légèrement plus élevée.

Une cour doit être suffisamment étroite pour fournir de l'ombre en été, et assez large pour recevoir le rayonnement solaire pendant l'hiver. C'est aussi une raison de construire plusieurs types de cours dans la même maison.

Mousharabieh

Cette structure a surtout été utilisée en Égypte disposant un climat à caractère nettement désertique, un climat très sec, avec de rares précipitations, uniquement en hiver et seulement pour quelques jours.

Le Mousharabieh est un écran en bois aux caractères spécifiques et sophistiqués offrant des aspects esthétiques et passifs. Il a été employé pour fournir de l'ombre et de l'intimité dans les maisons traditionnelles égyptiennes.

3.10 Différence entre les Badgirs du golfe Persique et ceux du centre désertique

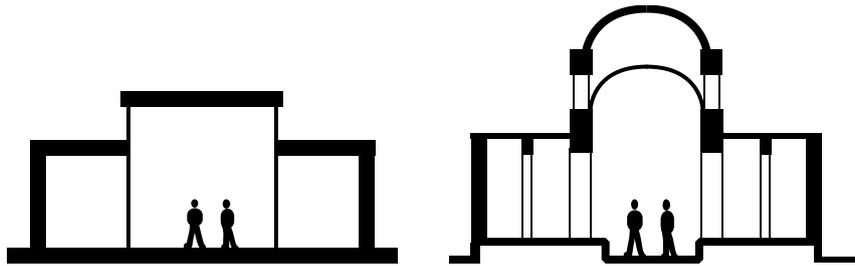


Figure 120 : Toit de la maison dans le golfe persique (gauche) et dans le centre désertique (droite)

3.1.16 Badgirs des régions chaudes et humides

En raison de la faible puissance du vent, ces types de Badgirs sont moins hauts et possèdent des ouvertures relativement larges. Dans la plupart des cas, pour un meilleur confort thermique, chaque salle dispose de son propre Badgir.

Les matériaux qui ont été utilisés dans la zone chaude et humide sont : terre crue, pierre de mer, mortier de plâtre et chaux. Ces matériaux possèdent une texture blanche et contribuent à réduire l'absorption du rayonnement solaire. Le plan de ces Badgirs est en grande partie, carré.

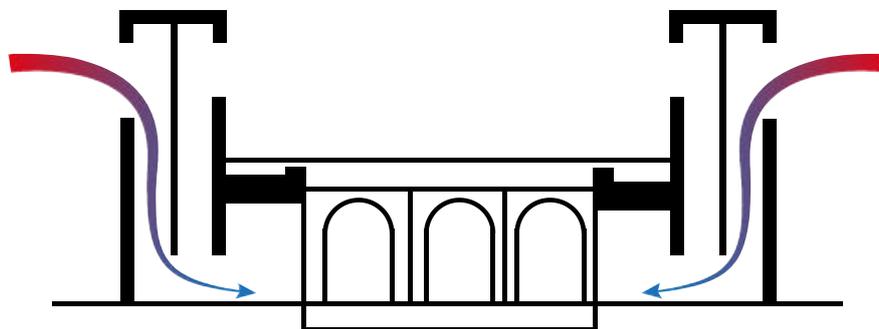


Figure 121 : Badgir de Bandar Lengeh (région du golfe Persique)

3.1.17 Badgirs des régions chaudes et arides

En raison de la vitesse élevée du vent et la présence de tempêtes de sable, la hauteur des Badgirs dans ces régions est plus élevée que celle dans les climats chauds et humides.

Dans ces régions, lorsque le vent traverse les conduits et pénètre dans la pièce, il passe aussitôt au-dessus d'une fontaine, produit de l'humidité et augmente ainsi l'effet de rafraîchissement.

Les matériaux utilisés sont généralement : brique de boue mélangée avec de la paille.

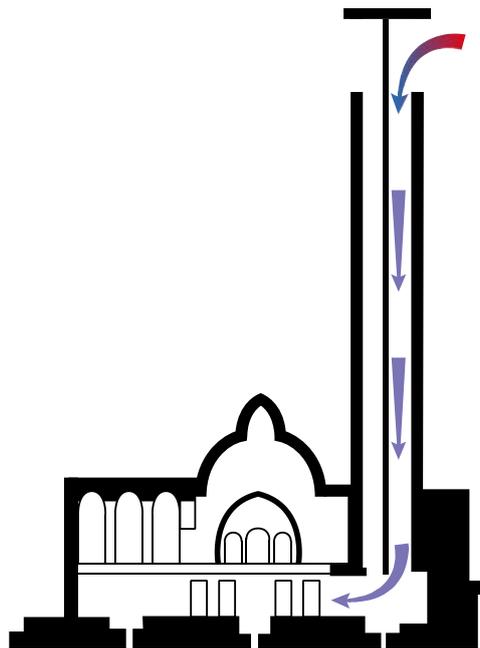


Figure 122 : Badgir de la ville de Yazd (Région chaude et aride)

Concernant les régions désertiques, Susan Roaf mentionne dans ces recherches : « Nous constatons que dans ce genre de structure, l'individu ne choisit pas le climat de sa chambre, mais choisit une chambre où le climat lui est le plus favorable. »⁶⁶.

3.1 | Conclusion

Nous constatons dans ce chapitre que l'habitat est un univers à petite échelle. Sa forme varie sous l'influence du climat, les méthodes de construction ainsi que le choix des matériaux. Les conditions climatiques de chaque région déterminent l'inclusion de ses techniques spécifiques de contrôle climatique passif.

⁶⁶ Susan Roaf, 1988.

Les maisons les plus grandes sont développées de l'intérieur, autour d'une cour ou d'un jardin, possédant différents types de pièces (trois ou cinq portes), Talar, Taremi, etc. Piscines et jardins sont des éléments indispensables dans les maisons traditionnelles iraniennes. Les portes et fenêtres sont construites en retrait dans les murs pour les préserver toujours à l'ombre. Le sous-sol avec une atmosphère fraîche est un abri idéal pour l'été.

Nous pouvons observer à présent que les architectes traditionnels iraniens ont créé des zones résidentielles avec des conditions de confort en appliquant des techniques simples telles que l'utilisation de plans compacts ainsi que des matériaux avec une forte caractéristique thermique capable d'équilibrer l'énergie de l'intérieur.

Les stratégies mises en œuvre dans l'architecture traditionnelle iranienne ont une grande influence dans la conception d'une architecture durable. Ces techniques peuvent encore être exploitées dans la réalisation de complexes résidentiels des zones tropicales afin de minimiser la consommation d'énergie et offrir plus de confort.

CHAPITRE IV

4.1 Étude in situ

Nous avons visité environ 70 Badgirs en Iran. Nous en avons mesuré plusieurs, et choisi deux d'entre eux pour réaliser nos analyses expérimentales et numériques. Ces deux Badgirs possèdent des caractéristiques particulières ; ils ont été sélectionnés suite aux divers critères climatiques.

Cette partie de la recherche présente quatre expériences effectuées sur le terrain en avril 2012 et juin 2013 :

1. Badgir, situé sur la rive nord du golfe Persique, climat chaud et humide.
2. Badgir, situé à Yazd, la région du centre désertique iranien, climat chaud et aride.
3. Étude du tissu historique de la ville de Bushehr située au bord du golfe Persique.
4. Abyaneh, un village historique perse situé sur la haute altitude (2 300 m au-dessus du niveau de la mer).



Figure 123 : Les lieux choisis pour nos recherches sur le terrain (source : Irancarto)

Pour approfondir nos études sur les matériaux de construction, ainsi que les conditions climatiques, ces lieux et structures ont été minutieusement choisis. Afin d'acquérir des résultats pertinents, ces recherches se sont effectuées dans diverses conditions de vent.

Dans une première étude de Badgir, le flux d'air est transféré directement vers la pièce principale située sous la tour (Siraf), tandis que dans le deuxième exemple,

l'air traverse une salle munie d'un toit en dôme pour se distribuer ensuite dans les pièces avoisinantes (Yazd).

Notre troisième étude est celle du tissu historique de la ville de Bushehr qui nous a permis de connaître le centre d'une ville durable construite il y a trois siècles.

Quant au village en haute altitude, nous y sommes restés deux jours à nous promener dans les ruelles pour constater l'harmonie des structures, matériaux de construction et la circulation à l'intérieur du village.

Voici une image de chaque expérience présentée dans ce chapitre :



Figure 124 : Badgir de Siraf (région chaude et humide)

Figure 125 : Badgir du jardin de Dolat-Abad (région chaude et aride)



Figure 126 : Maison traditionnelle à Bushehr

Figure 127 : Village d'Abyaneh, situé en haute altitude

4.2 Expérience I

4.3 Badgir de la maison de Nasuri, situé à Siraf (golfe Persique)

C'est certainement l'originalité de ce Badgir qui a attiré notre attention afin d'y réaliser de nombreuses analyses. Les résultats numériques de cette expérience se trouvent dans le chapitre suivant, le chapitre consacré à la CFD (Computational Fluid Dynamics).

La ville de Siraf est un ancien port situé dans le district central du comté de Kangan, province de Bushehr. La ville de Siraf fut naguère un port sassanide antique, située sur la côte nord du golfe Persique. Ses ruines se trouvent à environ 220 km à l'Est de Bushehr, 380 km à l'ouest de Bandar Abbas et à 30 km de Kangan. Siraf servait de route maritime entre la péninsule arabique et l'Inde.



Figure 128 : La ville de Siraf (golfe Persique)

La tradition affirme que Siraf a été détruit et partiellement émergé au 10^e siècle suite à un tremblement de terre et que son port et ses bâtiments ont disparu sous l'eau et les sables (Banaji, 2007).



Figures 129 : La ville de Siraf, 2013

Une des premières fouilles archéologiques de Siraf a été réalisée par Sir Aurel Stein⁶⁷ dans les années 1930. Plus tard, David Whitehouse⁶⁸, de l'Institut britannique d'études persanes, en coopération avec l'Institut d'archéologie de l'Iran y a effectué plusieurs fouilles.

Selon David Whitehouse, le premier contact entre Siraf et la Chine a eu lieu en l'an 185, après J. C. David Whitehouse a également retrouvé des vestiges de l'époque des Parthes⁶⁹ et des Sassanides.

En 2002, une fouille a été réalisée à une profondeur de huit mètres. Les résultats ont révélé l'existence de matériaux de construction antique sous l'eau comme des blocs de pierre pour la construction des murs ainsi que des dalles de pierre utilisées pour les chaussées. Nous pouvons dire à présent que Siraf a été un port de commerce très important, équipé d'installations portuaires et de chantiers navals.

⁶⁷ Aurel Stein était un archéologue et un explorateur britannique d'origine hongroise, ses travaux ont porté essentiellement sur les anciennes civilisations de l'Asie centrale.

⁶⁸ David Bryn Whitehouse était un archéologue britannique et chercheur principal du « Corning Museum of Glass ». Il a été directeur de la « British School at Rome » entre 1974 et 1984.

⁶⁹ L'Empire parthe (247 av. J.-C. – 224 ap. J.-C.), également appelé Empire arsacide, est une importante puissance politique et culturelle iranienne dans la Perse antique.



Figures 130 : Maison de Nasuri et son Badgir

La particularité climatique de la maison de Nasuri est qu'elle se trouve au pied de la montagne et à une cinquantaine de mètres de la mer. La première journée d'analyse sur cette tour a été réalisée le 17 avril 2013 entre 8 heures et 20 heures. La deuxième analyse a été réalisée le 18 avril 2013 entre 21 h et 7 h du matin. Pour obtenir plus de précisions, nous avons enregistré nos données durant trois jours consécutifs.

Cette tour possède une hauteur de 14,77 m. La salle qui se trouve sous le Badgir a une longueur de 12,24 m, une largeur de 2,80 m, donc une superficie de 34,27 m², avec une hauteur sous plafond de 3,84 m. Cet espace est construit selon des proportions géométriques de 1/3, tant pour la hauteur de la tour que pour la vue en plan. Afin de transférer le flux d'air dans les pièces adjacentes, cette pièce est munie d'une porte et de deux fenêtres donnant sur les pièces voisines. L'orientation de la tour est environ à 30° par rapport au vent dominant.

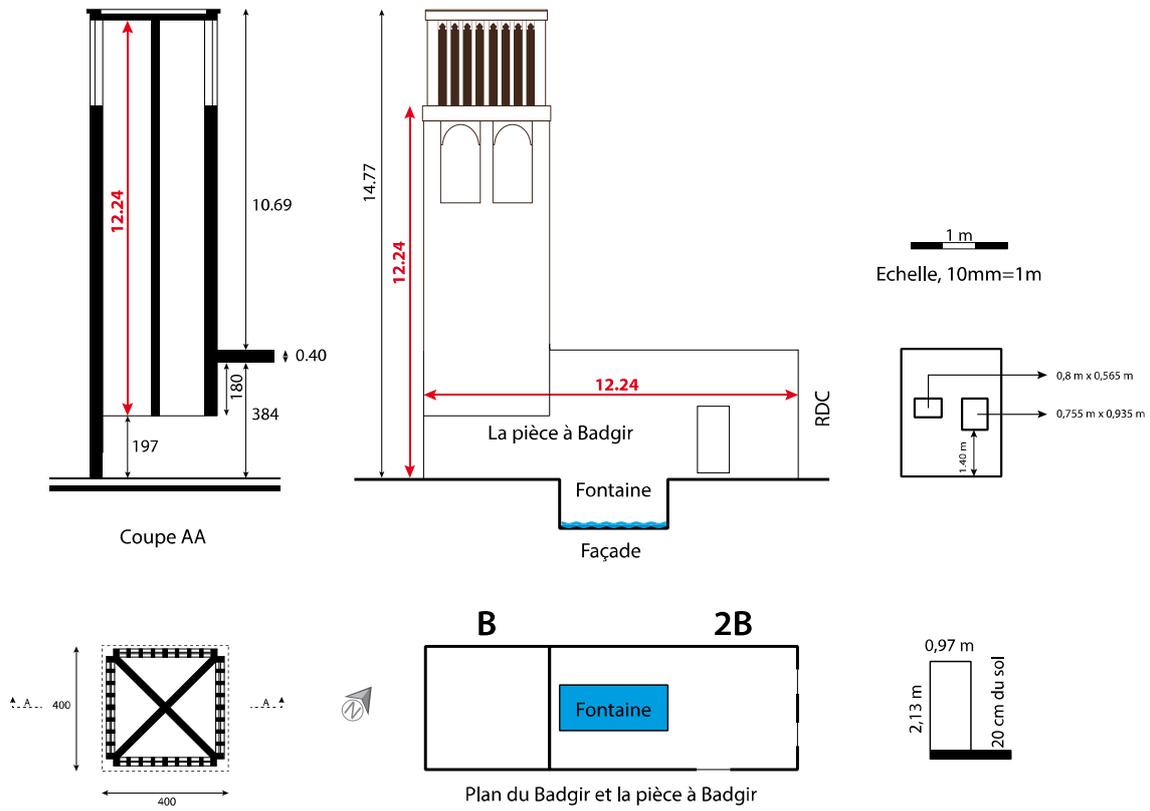


Figure I31 : Plan, coupe et façade du Badgir de la maison de Nasuri à Siraf

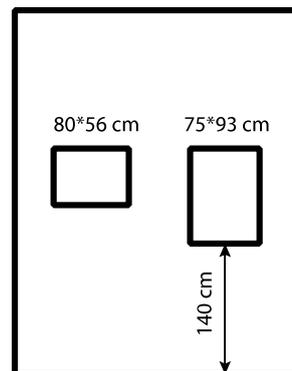


Figure I32 : Fontaine sous le Badgir de la Maison de Nasuri
 Largeur = 1,14 m, longueur = 3,38 m, profondeur est de 1,53 m
 Figure I33 : Dimensions des fenêtres

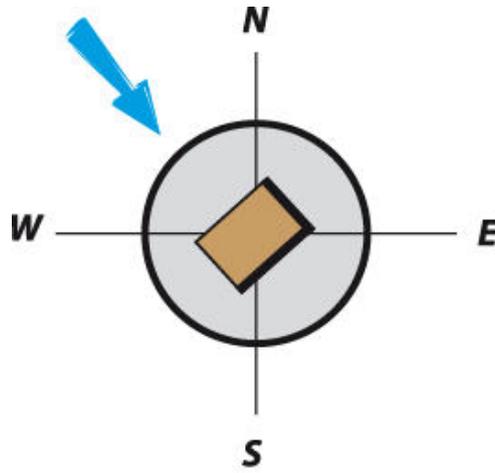


Figure 134 : Direction du vent dominant à Siraf

En avril 2013, les différences de température minimale et maximale entre la pièce à Badgir et l'extérieur du bâtiment de 9 h à 18 h sont respectivement de 5,4 °C et 8,1 °C. Nous avons constaté que la température ambiante moyenne extérieure pendant la journée est de 35 °C et la température moyenne de la pièce à Badgir est d'environ 27 °C.

Dans la pièce située sous la tour se trouvait une fontaine, mais comme durant notre séjour la maison était en état de restauration, la fontaine était vide. L'évaporation d'eau de cette piscine jouera certainement beaucoup sur la chute de température durant les mois d'été.

4.1.1 Observations de la température du Badgir de Siraf

Dans le tableau ci-dessous (Figure 135), nous pouvons observer la différence de température ainsi que la variation de la vitesse du vent entre l'extérieur et l'intérieur durant une journée du mois d'avril. Le gain de la fraîcheur atteint son sommet entre 15 h et 16 h.

Temps	L'air de l'extérieur		L'air sortant de la pièce à Badgir		
	Heure	Vitesse m/s	T°C	Vitesse m/s	T°C
9h	2,5	33,2	1,5	27,8	5,4
10h	2,1	34,6	1,2	27,2	7,4
11h	2,6	34,9	1,5	27,1	7,8
12h	2,6	35,1	1,4	28,8	6,3
13h	2,5	35,8	1,8	28,5	7,3
14h	3,2	35,9	2,1	28,2	7,7
15h	3,1	36,2	2,1	28,2	8
16h	3,9	35,7	1,3	27,6	8,1
17h	3,8	35,1	1,2	27,3	7,8
18h	3,6	34,2	1,4	26,9	7,3

Figure 135 : Différence de température entre l'extérieur et l'intérieur du Badgir de Nasuri en avril 2013, sans présence d'eau dans la fontaine



Figure 136 : Pierre avec laquelle a été construite la maison de Nasuri



Figure 137 : Structure et épaisseur des murs et planchers de la maison de Nasuri



Figure 138 : Salle aux larges ouvertures de la maison de Nasuri

4.4 Conclusion

Cette expérience a duré plusieurs jours. Nous avons pu effectuer nos analyses sous différentes températures et conditions de vent. D'après les résultats obtenus, le flux pénètre dans les pièces voisines à la moitié de sa vitesse d'entrée. L'autre partie du flux d'air entre et sort à travers les canaux opposés. Toutes nos analyses numériques vont être basées d'après l'étude in situ de ce Badgir.

4.5 Expérience II

4.6 Badgir, jardin de Dolat-Abad ; Yazd, zone désertique

Le climat de cette région est chaud et aride. L'analyse sur cette tour a été réalisée en avril 2013 durant environ 60 heures. Cette partie de la recherche porte essentiellement sur l'impact de fontaines et piscines sur le processus de refroidissement dans les bâtiments munis de Badgirs.



Figure 139 : Badgir du jardin de Dolat-Abad

En forme octogonale, cette tour est d'une hauteur de 33,8 m. La section transversale de chaque canal de ce Badgir est isocèle. Chaque canal est profond de 2,4 m et sa section transversale de la prise d'air est de 1,5 m. La pièce qui réceptionne le Badgir est d'une longueur de 6 m, une largeur de 4 m et une hauteur sous plafond à 2,5 m. Un bassin octogonal avec une section de 1,75 m et une profondeur de 0,75 m se trouve au centre de cette pièce.

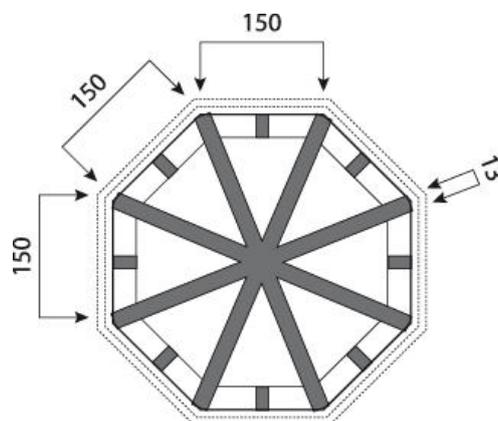
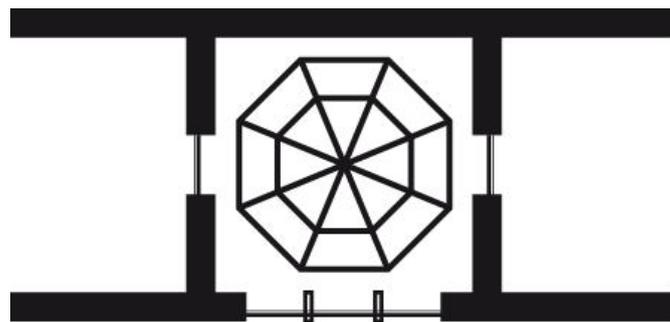


Figure 140 : Plan de la tour, échelle en cm

La présence d'arbres et de verdure à proximité du Badgir joue considérablement sur la chute de la température ambiante. Il y a plusieurs piscines en face des portes et des fenêtres du bâtiment provoquant l'augmentation de l'humidité.

Afin de rendre le flux d'air humide et frais, les artisans ont construit de nombreuses fontaines à l'intérieur des chambres et salons. Les portes et fenêtres qui se trouvent dans le sens de l'écoulement du vent sont ouvertes, tandis que les autres restent fermées. En plus de leur effet d'évaporation considérable, les fontaines absorbent en même temps la poussière.



Figures 141 : Pièce à Badgir du jardin de Dolat-Abad
Figures 142 : Plan de la même pièce

Comme le montre la coupe suivante (Figure 143), l'effet d'évaporation s'effectue dans deux endroits différents. La première fontaine est installée sous le Badgir, tandis que la deuxième se trouve dans la salle voisine que l'on appelle ici la salle royale.

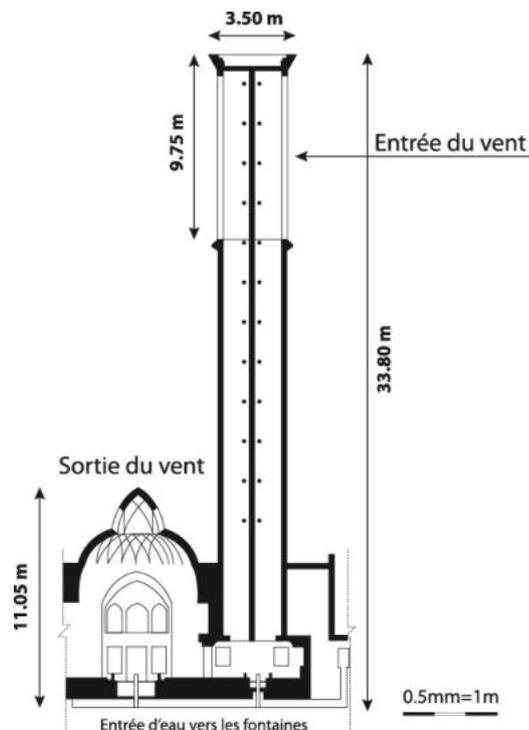


Figure 143 : Coupe sur le Badgir du jardin de Dolat-Abad.
La hauteur de la salle royale se trouve à un tiers de la hauteur du Badgir

L'évaporation d'eau provoque une diminution de la température et une augmentation de l'humidité dans la salle royale munie de Kolah-farangi (lanterne).

À l'aide de nos équipements, nous avons observé dans cette étude que la température de l'air sortant du Badgir en passant par ce processus d'évaporation présente une différence significative par rapport à la température ambiante.

Le Badgir en combinaison avec un système de refroidissement par évaporation offre ainsi des conditions de confort thermique intéressantes. Ce processus démontre que l'augmentation des surfaces humides dans un Badgir améliore l'état de l'air à l'intérieur.

D'après divers essais, nous avons constaté qu'à une vitesse de vent plus faible, la condition de l'air est plus agréable qu'à une vitesse élevée.

En somme, l'utilisation d'une fontaine dans les pièces à Badgir des régions chaudes et arides conduit à une augmentation de l'humidité et une diminution de température.

4.1.2 Caractéristique des bâtiments dans le climat chaud et aride

Lors d'un long séjour à Yazd, nous avons observé de nombreux Badgirs. En plus des analyses portées sur le Badgir du jardin de Dolat-Abad, nous avons étudié d'autres Badgirs. Nous avons aperçu des particularités de l'espace devenues indispensables dans cette région désertique.

Voici quelques principes concernant la construction dans ces régions :

- La création d'espace contenant l'eau, l'ombrage et les patios couverts comptent parmi des éléments prioritaires.
- Protection de la construction contre la poussière sud-ouest et sud-est. Placement de l'entrée de la maison dans le sens inverse des vents.
- Création d'ombrage en plaçant des auvents côté rues et jardins.
- La conception de passages piétons, principalement du nord au sud, est indispensable pour une bonne ventilation.
- Les pièces ont de hauts plafonds. Piscine et fontaines sont situées souvent au milieu de la cour. Les fenêtres à guillotine sont courantes.
- Les meilleurs emplacements pour les espaces clos sont les côtés sud et sud-est. Les pièces à petites fenêtres sont face à la cour centrale. Les fenêtres qui s'ouvrent sur le sud ont des auvents horizontaux et les fenêtres du côté nord possèdent des auvents verticaux.
- Les matériaux utilisés dans ces régions sont adobe, plâtre et bois. Le bois est un élément résistant contre les forces d'étirement de la voûte et de pression du plafond.

4.7 Conclusion

Les résultats montrent qu'avec l'augmentation de la vitesse du vent, le taux d'évaporation des particules d'eau augmente. Il est évident que dans un climat chaud et aride, un Badgir muni d'une fontaine offre des conditions de confort plus agréables.

L'eau joue un rôle important dans la construction des bâtiments. La plupart des fontaines et bassins sont situés dans la cour, de manière à refléter les constructions existantes et doubler leurs vraies dimensions. Dans le cas des maisons traditionnelles, les piscines ont été proportionnées aux dimensions de la cour.

Les piscines ont différentes formes, on en trouve de six côtés, de douze, mais la plupart du temps elles sont rectangulaires. Les piscines ont été souvent construites le long d'un des axes principaux de la maison, de façon à suivre la longueur de la cour.

Les propriétés sonores et aquatiques de l'eau sont d'autres aspects recherchés par la réalisation de ces piscines. L'eau crée un bruit de fond qui agit comme une barrière invisible en bloquant le bruit parvenant de l'extérieur de la maison.



Figure 144 : Piscine centrale du Jardin de Dolat-Abad

4.8 Expérience III

4.9 Le tissu historique de la ville de Bushehr

Sur la tablette en pierre ci-dessous (Figure 145) est inscrite la façon dont un roi élamite ⁷⁰ (6 000 ans av. J.-C.), a construit un château à Rishehr, ancien quartier de Bushehr, situé sur la rive nord du golfe Persique.



Figure 145 : Tablette de pierre retrouvée à Bushehr



Figure 146 : Badgir de la ville de Bushehr en 1802, disparu à ce jour

Le tissu historique de la ville de Bushehr fut fondé en 1736 par Nadir Shah ⁷¹ qui régna de 1736 à 1747. Muhammad Karim Khan, fondateur de la dynastie Zand, permit en 1763 aux Britanniques d'y bâtir une base militaire pour leur flotte de la compagnie des Indes orientales. Le port deviendra au cours du XIXe siècle l'un des plus importants ports du golfe Persique.



Figures 147 : L'ancienne ville de Bushehr se trouve sur une presqu'île

⁷⁰ De la fin du IVe millénaire av. J.-C. au 1er millénaire apr. J.-C.

⁷¹ Nadir Shah, de son vrai nom Nader Khan Qirqlu Afshar, né le 22 octobre 1688 et décédé le 19 juin 1747, était le Shah d'Iran, fondateur de la dynastie des Afsharides, qui régna de 1736 jusqu'à sa mort. Il a été parfois décrit comme le « Napoléon perse ».

4.1.3 Situation géographique et climat de la province de Bushehr

Avec 27 653 km², et 60 km de frontières maritimes, la province de Bushehr est située dans le sud-ouest de l'Iran, sur la côte nord du golfe Persique. Elle est constituée de 7 départements qui sont : Bushehr, Dashti, Daylam, Kangan, Genaveh et Tangistan. La population de cette province en 2010 était de 866 490 habitants.

Il y a deux saisons bien distinctes dans la province de Bushehr, l'hiver, avec un froid modéré commençant généralement à partir de novembre et qui dure jusqu'à mars, et un été très chaud. Le printemps et l'automne sont des saisons très courtes.

La moyenne de la température dans la province est de 24 °C, la plus haute température a été enregistrée à 50 °C, tandis que la plus basse a été enregistrée à 6 °C. La température moyenne du mois le plus froid de l'année a été enregistrée à 15 °C dans la ville de Bushehr, et à partir de la mi-mai jusqu'à la mi-octobre (pour 140 jours), la température a atteint les 40 °C.

La province de Bushehr possède 707 km de côtes donnant sur le golfe Persique. Elle a été l'un des berceaux de la civilisation et est classée à présent la 17^e province de l'Iran. Le plus grand comté de cette province est le Dashtestan occupant 6 366 km².

Le gaz et le pétrole sont les richesses les plus importantes de cette province. 70 % de réserves de gaz ainsi que 13 % de la production globale de pétrole du pays se trouvent dans la province de Bushehr.



Figure 148 : Bushehr, ses maisons et ses Badgirs, il y a 150 ans
(source : bureau de l'urbanisme de la ville de Bushehr)



Figure 149 : Les tours de protection de la ville, construites il y a plusieurs siècles ; disparues à ce jour (source : bureau de l'urbanisme de la ville de Bushehr)

Pour réduire l'humidité et la température, les architectes et bâtisseurs ont construit des maisons compactes, créant des ruelles très étroites. Parfois, les passages sont si étroits que deux personnes ont du mal à passer l'une à côté de l'autre. L'étroitesse de ces ruelles empêche la tombée de la lumière directe du soleil sur les passants.



Figure 150 : Ruelle étroite

La pierre avec laquelle ont été construits ces bâtiments parvient directement du bord de la mer, pratiquement sur place. C'est une pierre poreuse. Pour créer un courant d'air rapide et efficace, le haut des bâtiments se rejoint jusqu'à atteindre une distance de 30 cm. La couleur blanche est déployée sur la plupart des surfaces réfléchissant les rayons lumineux.

4.1.4 Différence d'altitude du terrain de la ville de Bushehr

Nous avons rencontré un phénomène très intéressant concernant le tissu historique de la ville de Bushehr. À l'endroit où la ville a été construite, nous constatons une différence de niveau du sol de l'Est à l'Ouest. Le niveau du sol, du côté Est, est plus haut que du côté Ouest.

En effet, dans la partie Est, là où le niveau du sol est plus haut, les bâtiments sont plus bas. Lorsque nous observons la ville depuis un toit, les hauteurs des bâtiments sont presque au même niveau. Ce phénomène est dû à la topographie locale pour trois raisons :

La première raison est que, si les bâtiments devaient être construits en forme d'escalier, la partie de l'ouest allait absorber plus de chaleur que le niveau normal. Ainsi l'ombre projetée sur les autres bâtiments aurait pu être inférieure.

La deuxième raison est que, vu la fraîcheur du soir, les habitants de Bushehr se servaient du toit pour dormir. Et si nous avions construit en forme d'escalier, un vrai problème de vis-à-vis aurait pu se poser entre familles.

Et la troisième raison est que dans la partie Est de la ville, comme le sol est plus haut, les eaux souterraines par rapport à l'Ouest, sont plus basses. Et pour cette raison, le taux d'humidité parvenant du sol est plus faible. Ce processus a permis de construire des rez-de-chaussée avec des hauteurs de sous plafonds plus bas que dans l'Ouest. Ce qui a permis de garder l'équilibre sur tout le tissu historique de la ville.

Pour la création d'un maximum de courant d'air, de nombreuses ouvertures ont été prévues à cette fin. Certaines fenêtres ont été réalisées en quatre parties distinctes. En cas de présence d'un soleil intense, nous pouvons ouvrir la partie basse et fermer la partie haute de ces fenêtres.

Afin d'éviter un rayonnement fort dans les pièces, des vitres colorées ont été placées pour faire entrer suffisamment de lumière, mais aussi laisser un jeu d'éclairage intéressant.



Figure 151 : Grandes et larges ouvertures à Bushehr



Figure 152 : Vitres colorées des maisons traditionnelles à Bushehr



Figure 153 : Château de Malik à Bushehr

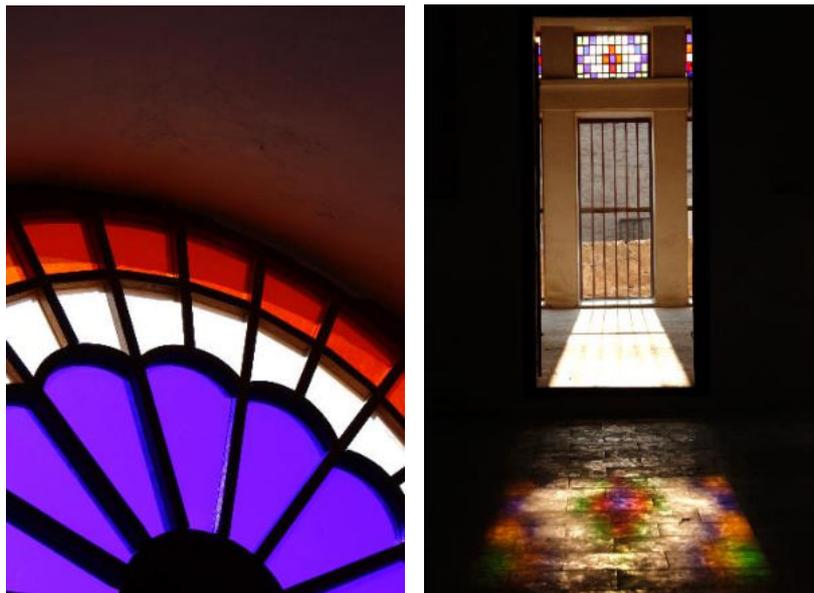


Figure 154 : Jeu d'éclairage et haut plafond dans la partie ouest de la ville



Figure 155 : Jeu de lumière des grandes salles à Bushehr

4.10 Spécifications des maisons traditionnelles à Bushehr

- Les maisons sont construites en direction du Sud-Est avec 30° de déviation vers le sud.
- Afin de pouvoir attraper le vent en hauteur, les bâtiments ont une forme rectangulaire, haute et étendue.
- Les maisons sont en forme de « U » ou de « L ».
- Les toits des maisons sont plats et les gardes de corps sont souvent éliminés pour laisser passer le vent.
- Dans la partie sud et sud-est des maisons, les fenêtres ont une forme horizontale, mais celles du nord sont verticales.
- Les ouvertures sont souvent très étroites et leur nombre est élevé sur les côtés nord et sud.
- Les murs et les toits sont de couleurs claires.
- Les maisons sont linéaires et sont situées souvent face à la mer ; les cours se trouvent du côté sud.
- Les matériaux ont une faible densité, de sorte que les échanges thermiques à travers les parois s'effectuent facilement.
- Pour pouvoir distribuer le vent vers les pièces voisines, les chambres sont construites avec de hauts plafonds.

4.11 Conclusion

L'architecture de la ville de Bushehr a été pensée pour une durabilité et une performance bien particulière à sa région. Ces matériaux se distinguent en un premier temps par leur solidité en infrastructure, ensuite par leurs aspects

techniques et artistiques. Ces matériaux facilitent la création des formes géométriques et esthétiques.

La ville de Bushehr constitue un intéressant terrain d'observation pour étudier le transfert technique au cours de l'histoire. Cette ville témoigne d'une culture technique de plusieurs siècles. Ses aménagements successifs traduisent la recherche d'une harmonie entre les environnements naturels et urbains.

Le but principal de cette partie de recherche a été de tester la performance réelle de certaines demeures et la technologie vernaculaire qui y a été générée.

Ayant travaillé sur cette partie historique de la ville, nous avons constaté que les techniques traditionnelles appliquées aux constructions des siècles passés sont prêtes à être exploitées dans les démarches de l'édification à venir.

Il s'avère de plus en plus évident que nous devrions intégrer les méthodes utilisées de l'ancienne ville vernaculaire aux nouvelles et futures villes.

4.12 Expérience IV

4.13 Le village historique d'Abyaneh, construit en terre d'argile

L'objectif principal de cette observation est de présenter une architecture qui est en harmonie parfaite avec son environnement. Nous y avons effectué un séjour de deux jours.

Le village d'Abyaneh est situé à une altitude de 2 300 m au-dessus du niveau de la mer, au pied du Mont Karkas (3 899 m). Placé sur une pente raide, formée par l'érosion de la rivière Burzrood, on trouve une différence de 70 m entre le point le plus haut et le point le plus bas du village (Figure 156).



Figure 156 : Village d'Abyaneh

Le village d'Abyaneh est l'un des villages historiques Iraniens contenant des œuvres anciennes de la période Sassanide⁷². Les maisons s'harmonisent avec le climat et les terres montagneuses. Mais la plus grande partie de ce qui est resté intact depuis de nombreuses invasions remonte à la période Safavide (1502-1722).

Les habitants étaient des zoroastriens, mais plus tard ils se sont convertis à l'Islam. Le climat d'Abyaneh est frais en été, et très froid pour le reste de l'année. Pour obtenir un maximum d'ensoleillement, le village est situé face à l'Est.

4.1.5 Caractéristiques architecturales d'Abyaneh

Abyaneh est un village construit entièrement en argile rouge et possède une tradition et un style architectural en totale harmonie avec son environnement. Il est probablement l'exemple le plus intéressant de l'interaction homme-environnement en adaptation parfaite à la nature, dans laquelle nous pouvons observer, l'expérience de cette civilisation antique ainsi que la vie et la culture de l'habitat rural en Iran.

⁷² Les Sassanides règnent sur l'Iran de 224 jusqu'à l'invasion musulmane des Arabes en 651. Cette période constitue un âge d'or pour l'Iran, tant sur le plan artistique que politique et religieux.



Figure 157 : Abyaneh, un village en harmonie avec la nature

Ce village possède un tissu compact. Les ruelles sont étroites et se trouvent en pente. Les maisons, construites sur une pente, donnant l'impression qu'elles ont été placées sur les marches d'un escalier géant. Les toits de certaines maisons peuvent servir de cour à d'autres maisons.



Figure 158 : Ruelles en pente et étroites d'Abyaneh

Les maisons d'Abyaneh ont été construites, il y a 1 500 ans, et restent l'une des plus anciennes demeures de l'homme, ayant été totalement conçues en Adobe.



Figure 159 : Matériaux de construction utilisés à Abyaneh (adobe, paille et pierre)

Les maisons ont été construites dans différentes directions ; certaines d'entre elles, influencées par l'architecture préislamique, se trouvent face à l'Est, et d'autres

sont exposées au sud ou vers la Qibla (maison de dieu). Certaines maisons n'ont pas de direction particulière.



Figure 160 : Des maisons situées face à l'Est

La grande mosquée située au centre d'Abyaneh illustre bien les techniques de construction locales. Le sanctuaire de la mosquée possède une niche de prière en bois avec des motifs uniques et des décorations sculptées datant de la période des Seldjoukides (1038-1194).

La plupart de ces bâtiments traditionnels sont fabriqués d'argiles rouges typiques de la région. L'utilisation d'argile en masse a permis de construire des murs épais. Les reculs importants sur le rez-de-chaussée offrent beaucoup d'ombre. L'ombrage a été amplifié par un large toit surplombant le premier étage de chaque maison.



Figure 161 : Balcons et terrasses d'Abyaneh

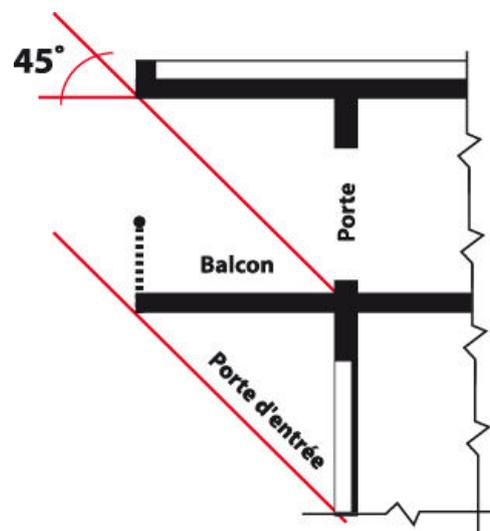


Figure 162 : Construction de terrasses à Abyaneh

Dans cet exemple vernaculaire de l'habitat rural, les éléments de construction et les arrangements spatiaux fonctionnent dans une grande synergie. Ils répondent correctement aux changements de la température à divers moments de la journée ainsi que pendant les différentes saisons de l'année.

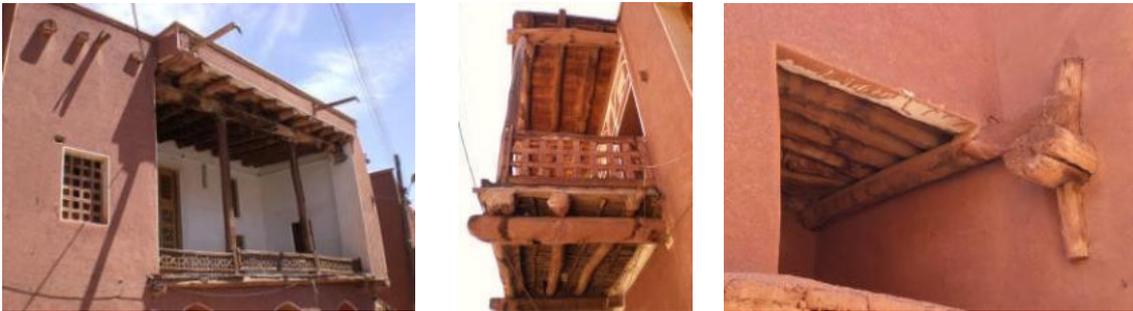


Figure 163 : Structure des maisons à Abyaneh (terre, bois, pierre)

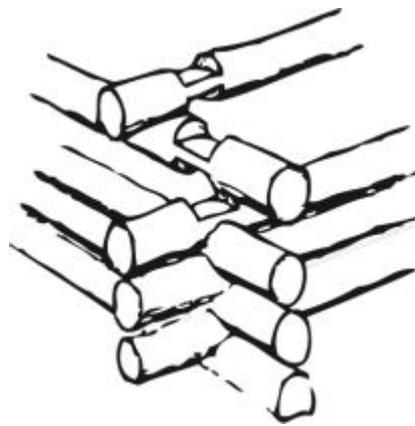


Figure 164 : Exemple d'emboîtement à mi-bois des poutres

D'une manière générale, tous ces bâtiments démontrent une approche de conception unique et uniforme avec un grand respect pour la nature et l'environnement local. Les grands principes de durabilité qui ont été adoptés dans l'architecture vernaculaire d'Abyaneh peuvent être résumés dans les catégories suivantes :

- Utilisation de matériaux de construction locaux ayant une texture uniforme.
- Orientation des bâtiments face au soleil.
- Aménagement des espaces intérieurs en mettant à disposition un maximum de confort.
- Uniformité géométrique de toutes les ouvertures ayant une intégrité visuelle d'éléments décoratifs.
- Plantation de la végétation sur les lieux publics en créant des espaces de plus en plus naturels.

À Abyaneh, nous pouvons observer la conception de la durabilité issue d'une ancienne civilisation iranienne. Les techniques architecturales créatives ont été conçues dans le but de chercher un confort exemplaire. La typologie de ce village est condensée et comprimée de manière à démontrer une forte réduction de l'échange thermique entre l'extérieur et l'intérieur des maisons.



Figure 165 : Écrans perforés permettant le passage rapide du vent ainsi qu'un mini Badgir installé sur un réservoir d'eau (droite)



Figure 166 : Écrans perforés et claustras à Abyaneh ; source, espace persan ; page 81.

Cette technique de l'architecture vernaculaire est une véritable manifestation de l'idée de construction durable, car elle est le résultat de plusieurs siècles de pratique.



Figure 167 : Création d'ombres et d'espaces frais (photos prises en avril 2013)

4.14 Conclusion

En observant ce village, nous apprenons que l'utilisation des matériaux de construction locaux doit être privilégiée, car ces matériaux qui poussent sur place sont nettement adaptés à leurs propres climats. Le matériau local fournit une performance thermique irréprochable.

L'architecture du village d'Abyaneh offre des solutions solides concernant la relation de l'homme avec son environnement. C'est une architecture qui a subsisté durant des siècles et résiste encore aux pires conditions climatiques. Elle a survécu aux divers tremblements de terre. Cette architecture est basée sur les questions comme : le respect de l'environnement et la compatibilité de la construction avec les valeurs sociales, culturelles et économiques de la communauté environnante.

Les constructeurs traditionnels ont présenté de multiples solutions pragmatiques pour le confort humain. Les bâtisseurs ont pu illustrer certaines méthodes de conception passive en assistant aux potentiels de la région. L'inspiration de la nature est présente à travers de nombreuses constructions. Les gens de ce village croient en « eau, air, terre et feu » comme étant les éléments de base de la vie.

CHAPITRE V

Expérimentations, analyses et calculs numériques

5.1 Observation du flux d'air dans un Badgir

Avant de procéder aux analyses du Badgir de la ville de Siraf dans une soufflerie, nous avons fabriqué une première maquette afin de mieux connaître le cheminement et le flux d'air dans les conduits d'une tour à vent.



Figures 168 : Maquette d'essai en soufflerie, échelle 1/50

Nous avons voulu observer le comportement de l'air à l'entrée de la tour par le processus de pression et d'extraction. Il est à rappeler qu'à l'intérieur d'un bâtiment, ce sont ces différences de pression qui favorisent la circulation d'air.

Pour une meilleure visualisation de flux d'air, nous avons réalisé une maquette en Plexiglas transparent, à l'échelle 1/50 (2 cm = 1 m). Nous avons ensuite enfermé la maquette dans une caisse transparente pour pouvoir y envoyer de la fumée.

De nombreux essais ont été enregistrés par une caméra. La figure suivante montre un retour d'air turbulent produit dans la zone inférieure de la tour.

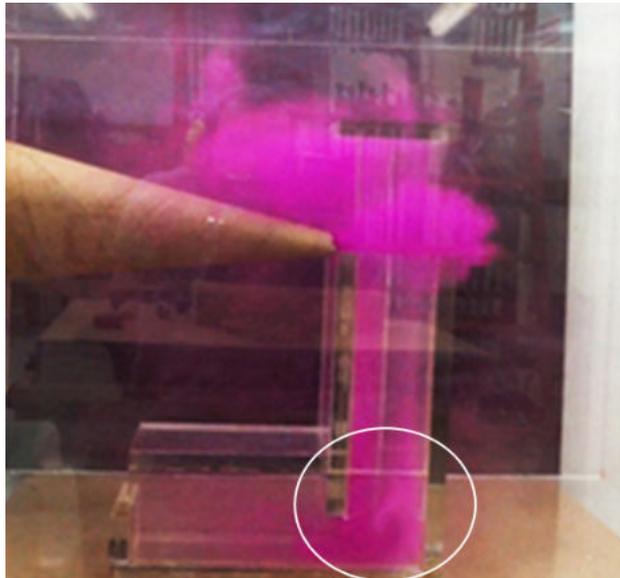


Figure 169 : Un retour d'air turbulent

Résultat

À ce stade, cette expérience a démontré qu'un retour d'air turbulent se produit dès l'arrivée de la fumée vers le bas des conduits. Cet effet permet en réalité d'évacuer l'air chaud placé vers le haut des conduits d'un Badgir.

Le schéma suivant (Figure 170) montre le comportement du vent dans un Badgir.

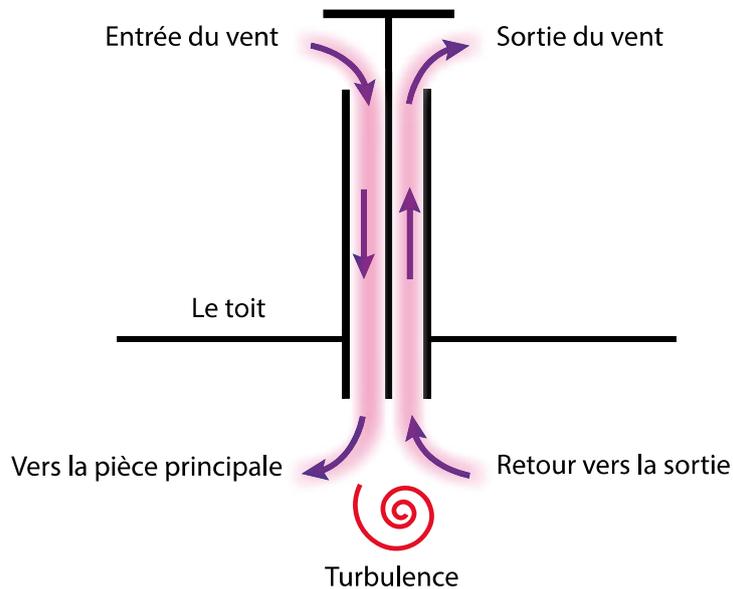


Figure 170 : Le parcours du vent dans un Badgir

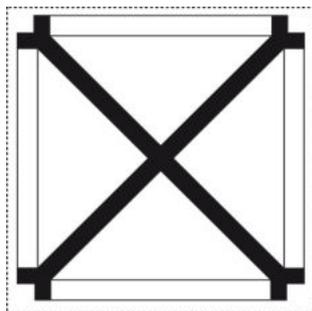


Figure 171 : Les quatre conduits du Badgir

5.2 Masse volumique, pression et inertie thermique

Il est important de rappeler trois points importants concernant les analyses qui vont suivre. Dans un terme simple, la masse volumique est la masse de quelque chose – y compris l'air – divisée par le volume qu'elle occupe. Elle est mesurée en mètre cube. La masse volumique de l'air dépend de sa température, de sa pression et de la quantité de vapeur d'eau dans l'air.

La pression : Les molécules d'azote, d'oxygène et d'autres gaz qui composent l'air entrent en collision les uns avec les autres et se déplacent à grande vitesse. Plus la température est élevée, plus les molécules sont en mouvement. Dès que l'air est chauffé, les molécules s'excitent, ce qui signifie qu'elles poussent plus fort contre leur environnement. L'augmentation de la pression augmente la masse volumique. Imaginez qu'en appuyant sur la poignée d'une pompe à vélo, l'air se comprime : à mesure que la pression augmente, la masse volumique augmente.

L'inertie thermique explique la capacité thermique d'un matériau, décrivant à quel point ce matériau absorbe et emmagasine de l'énergie thermique.

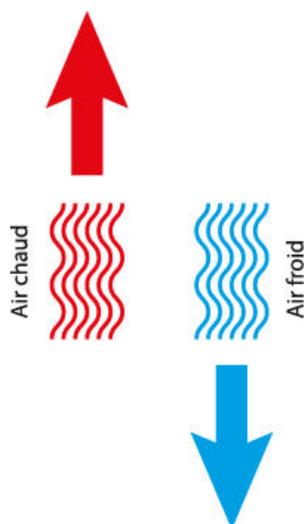


Figure 172 : L'air chaud possède une masse volumique plus faible que l'air froid

5.3 Simulation numérique

5.1.1 Analyse en soufflerie

Afin d'analyser cette tour à vent, nous avons résidé plusieurs jours dans la petite ville de 2 000 habitants de Siraf.



Figure 173 : Badgir de la maison de Nasuri à Siraf

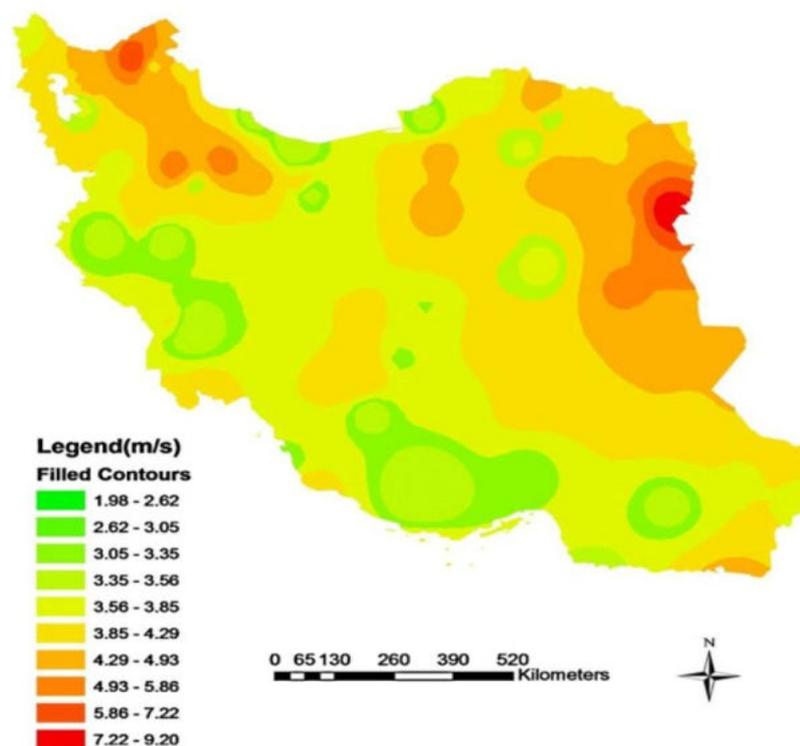


Figure 174 : Moyenne de la vitesse du vent en Iran

Comme matériel de mesure, nous avons utilisé un anémomètre de type T300 de marque TROTEC. Grâce à son propre logiciel connecté à un ordinateur,

l'anémomètre a enregistré toutes les données nécessaires destinées aux analyses numériques.



Figure 175 : Anémomètre utilisé durant nos expériences sur le terrain

Nous avons enregistré plus de 600 pages de calcul. L'anémomètre est resté connecté durant trois jours à un ordinateur, sauvegardant les données : température, débit d'air, ainsi que de vitesse moyenne du vent dominant.

Une fois arrivés à Paris, les responsables de la soufflerie de la Ville-d'Avray de l'université Paris-Ouest ont proposé de fabriquer une maquette destinée aux essais et aux analyses à la soufflerie.



Figure 176 : Soufflerie de la Ville-d'Avray

- 50 m/s
- Test Area : 450*450*700
- 1% turbulence intensity

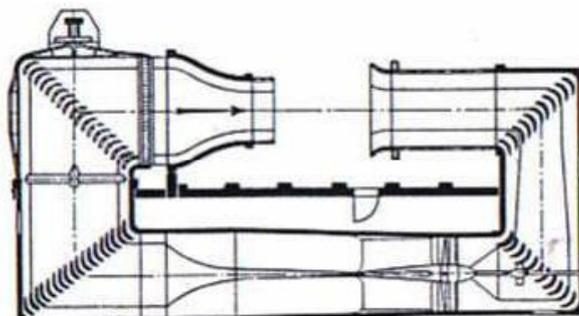


Figure 177 : Dimensions de la soufflerie

Après une étude approfondie avec les responsables de la soufflerie, nous avons décidé de fabriquer une maquette en perforant les parois. Ces passages d'air allaient

nous permettre d'enregistrer la pression et la dépression se produisant dans les quatre conduits de la maquette, et ceci à différents niveaux de la tour.

Mais avant toute chose, il a fallu dessiner l'ensemble de la structure sous le logiciel Rhino pour avoir un aperçu global de la maquette du Badgir.

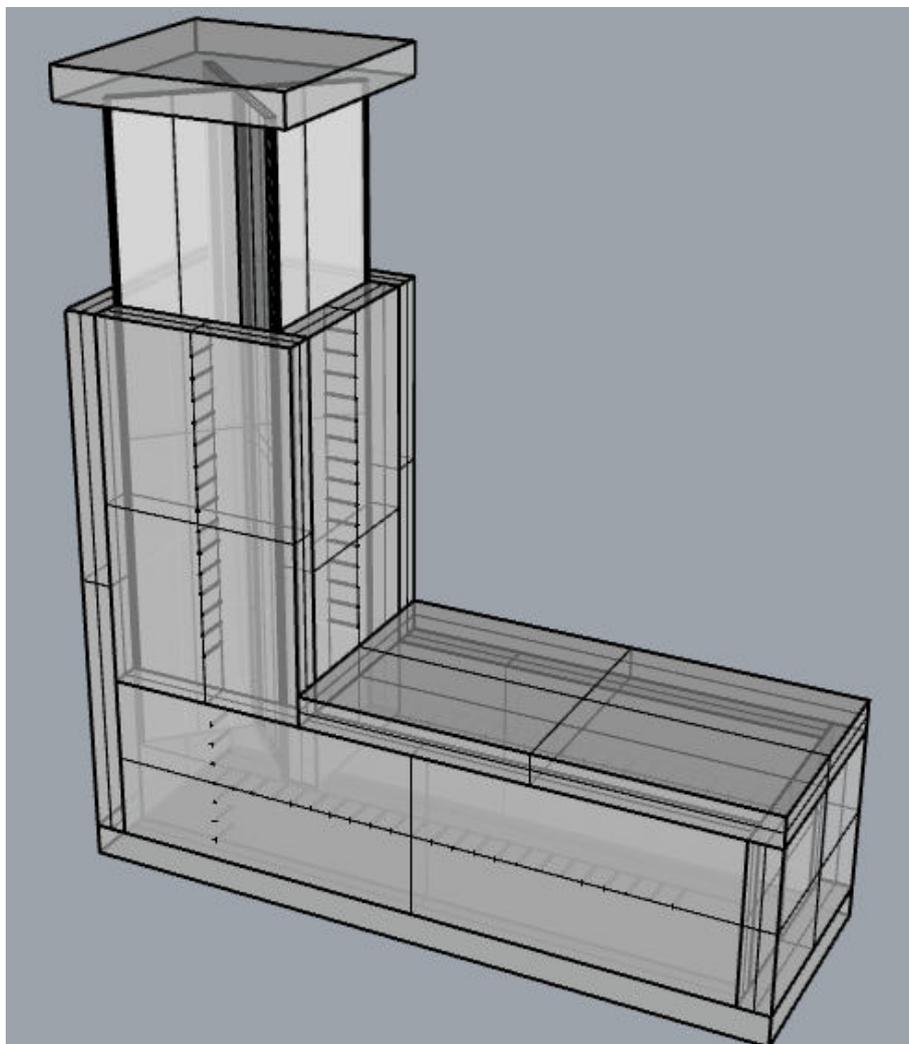


Figure 178 : Dessin de la maquette pour la soufflerie

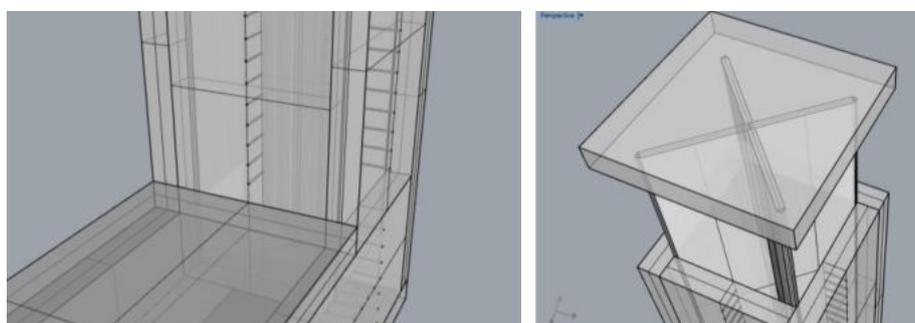


Figure 179 : Dessins des détails de la maquette

Pour la fabrication de la maquette, en ce qui concerne les murs principaux, nous avons choisi du plexi épais de 15 mm, tandis que pour les éléments de séparation

des conduits internes, nous avons opté pour une épaisseur de 5 mm, de manière à respecter l'échelle d'origine du Badgir analysé sur le terrain.

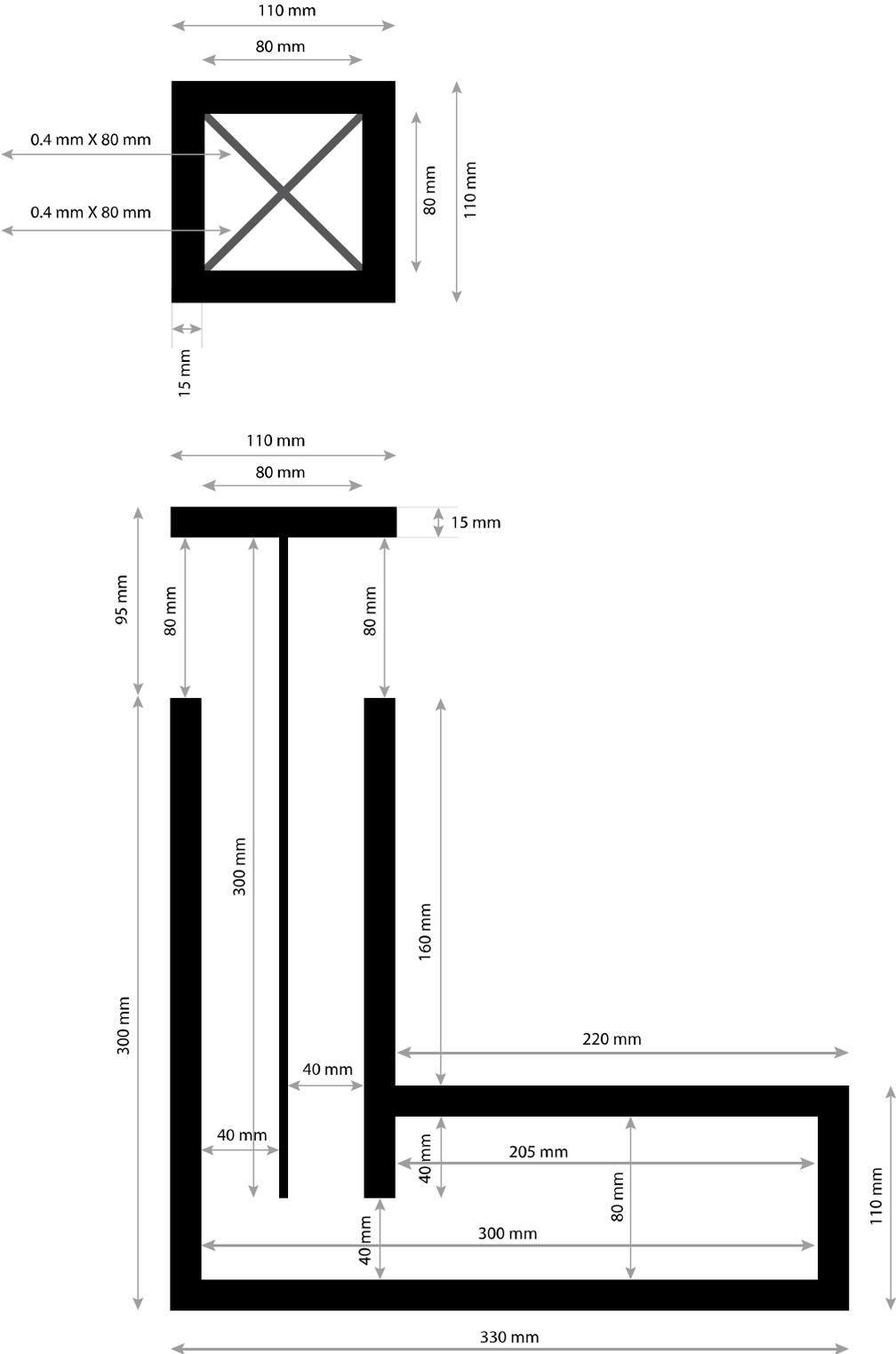


Figure 180 : Plan et coupe de la tour et de la pièce à Badgir (pièce à vivre), échelle 1/50

Afin de pouvoir y brancher des tuyaux reliés à un appareil de mesure, les percements ont été réalisés avec un intervalle précis ; 140 percements destinés aux mesures et analyses recherchées par notre équipe.

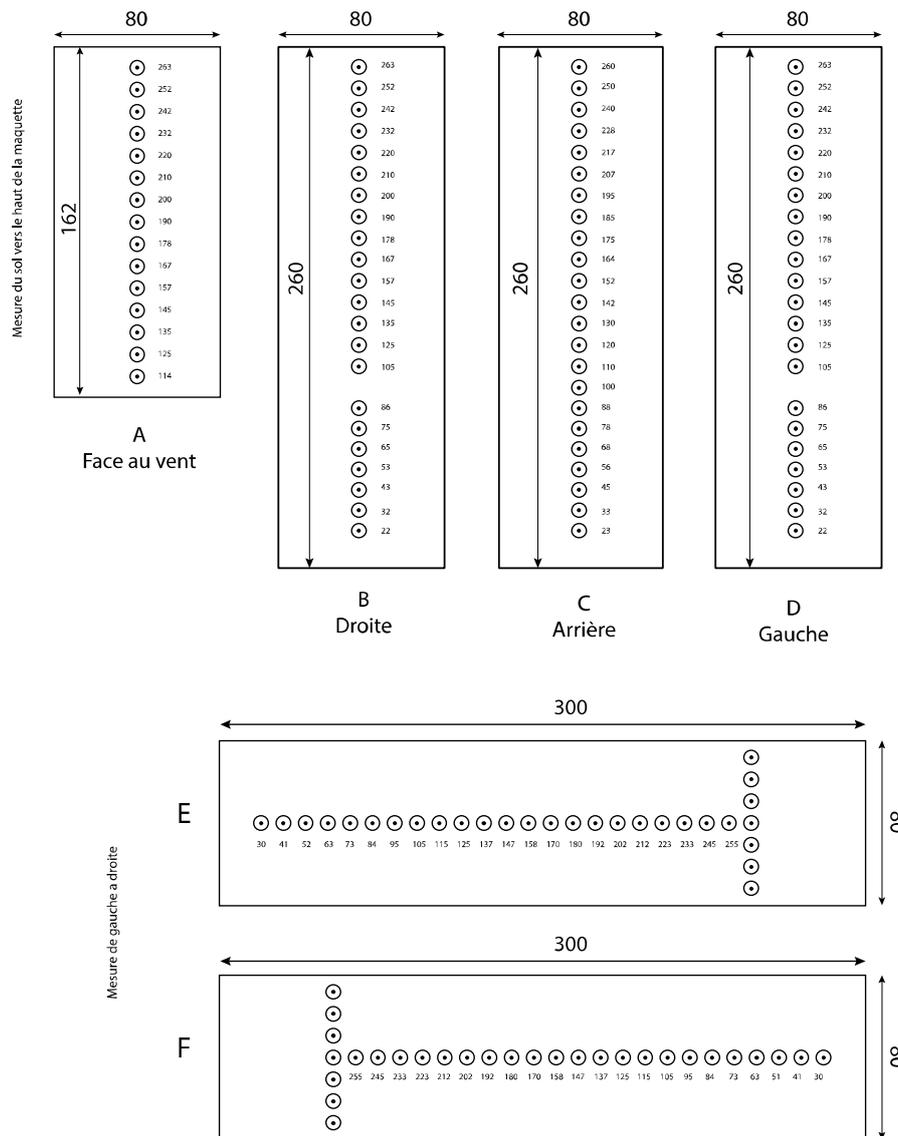


Figure 181 : Percement des parois

Nous avons ensuite introduit un tuyau métallique, court de 20 mm, dans chaque percement. Le côté extérieur des parois a un diamètre de 7 mm, tandis que du côté interne des parois, le percement est de 2 mm. Pour plus de précision, il fallait que l'air puisse traverser un percement assez étroit afin de pouvoir obtenir des taux de pression et d'extraction de plus en plus proches de la réalité.

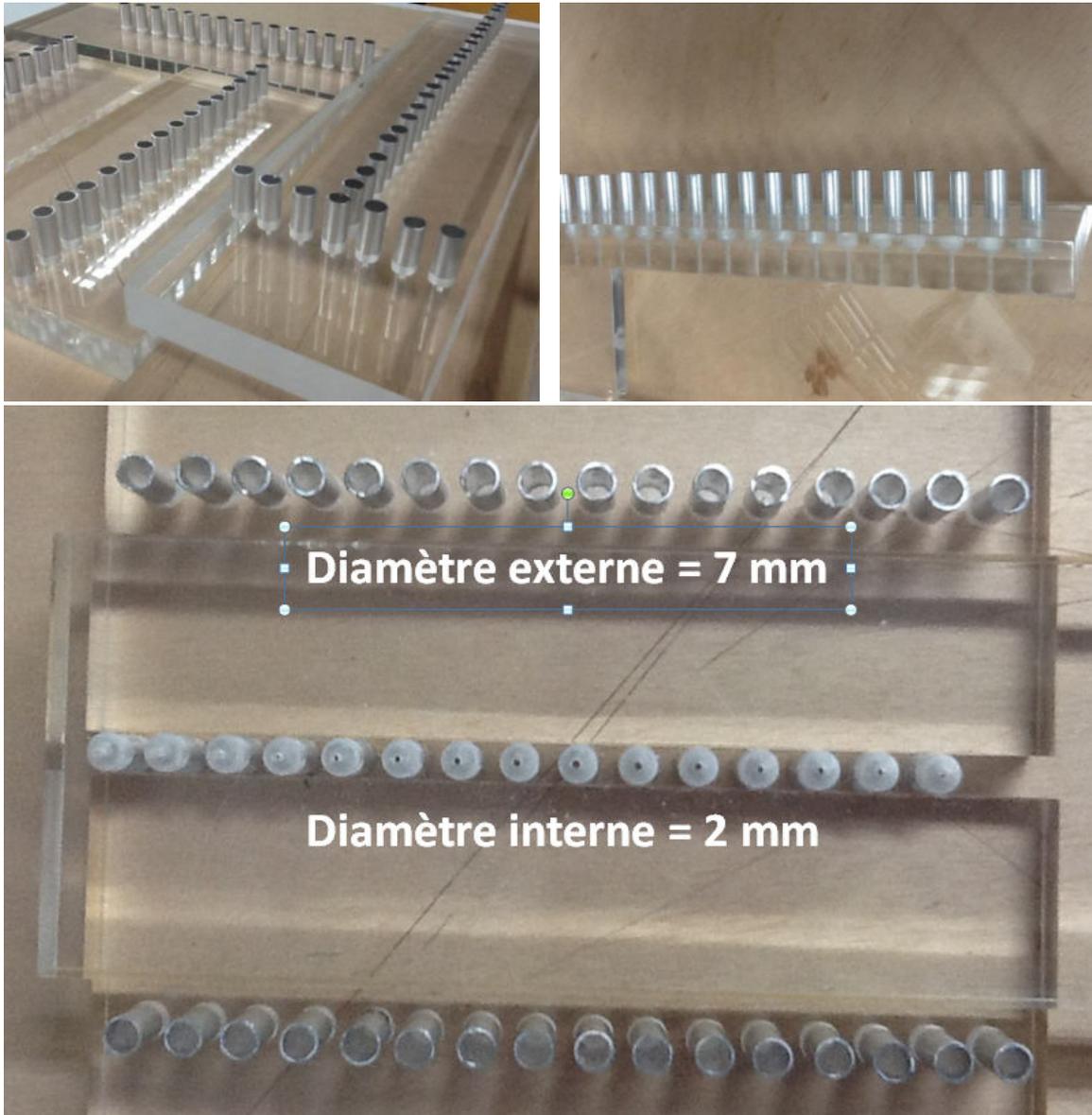


Figure 182 : Côtés externes et internes des percements



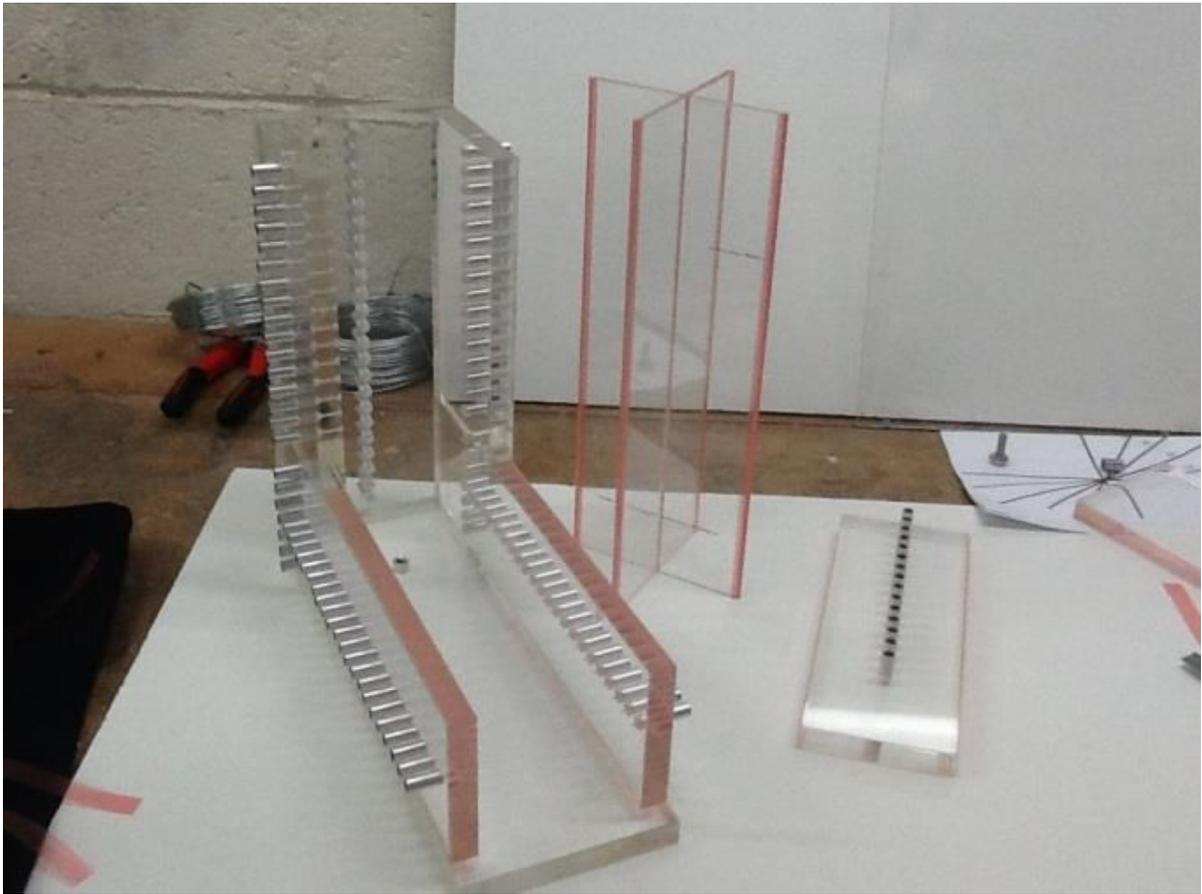


Figure 183 : Assemblage des murs et des parois de la maquette

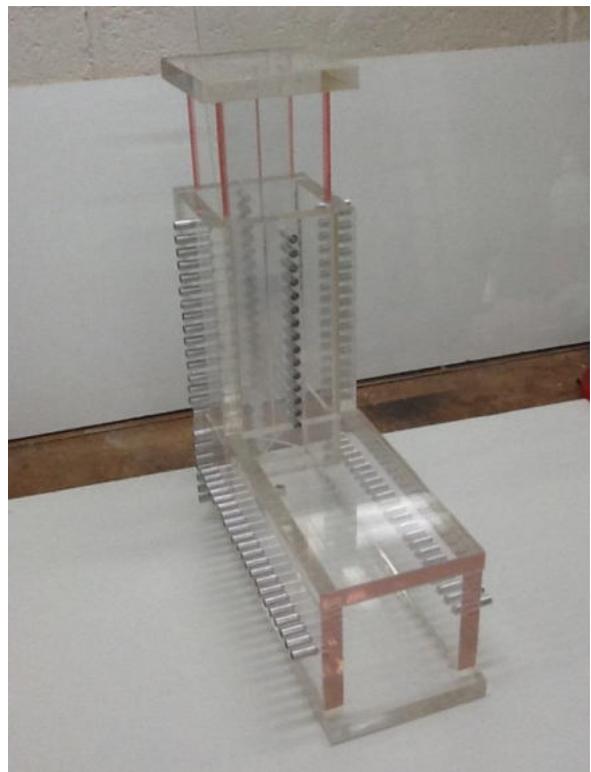


Figure 184 : Maquette finalisée



Figure 185 : Maquette installée dans la soufflerie

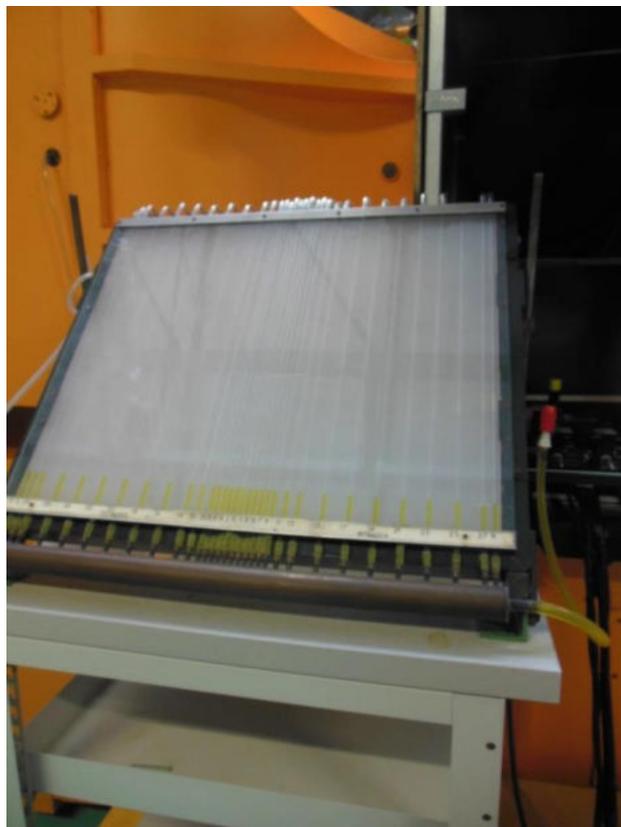


Figure 186 : Appareil de mesure et d'analyse de la soufflerie de la Ville-d'Avray

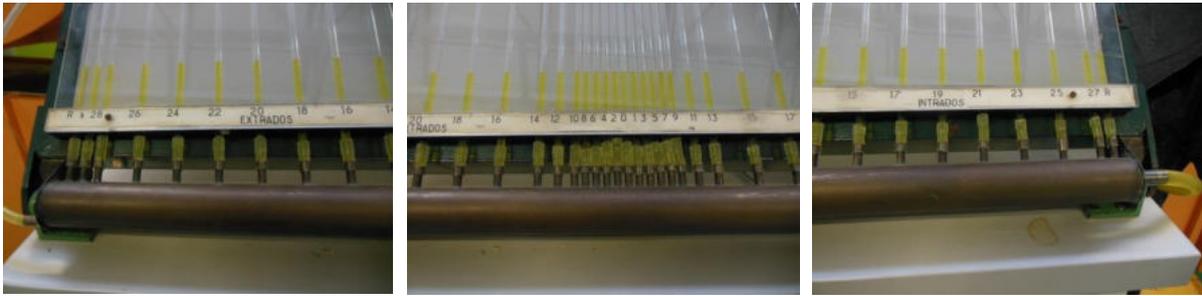


Figure 187 : Détails de l'appareil de mesure

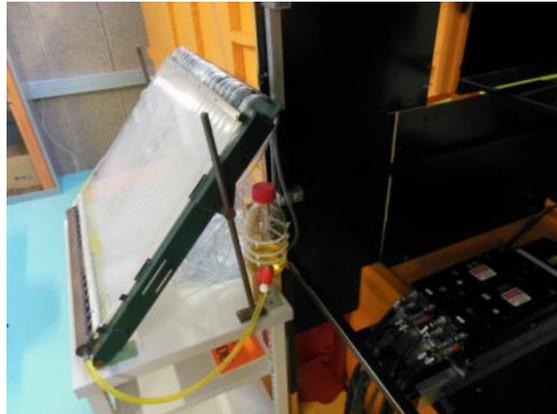


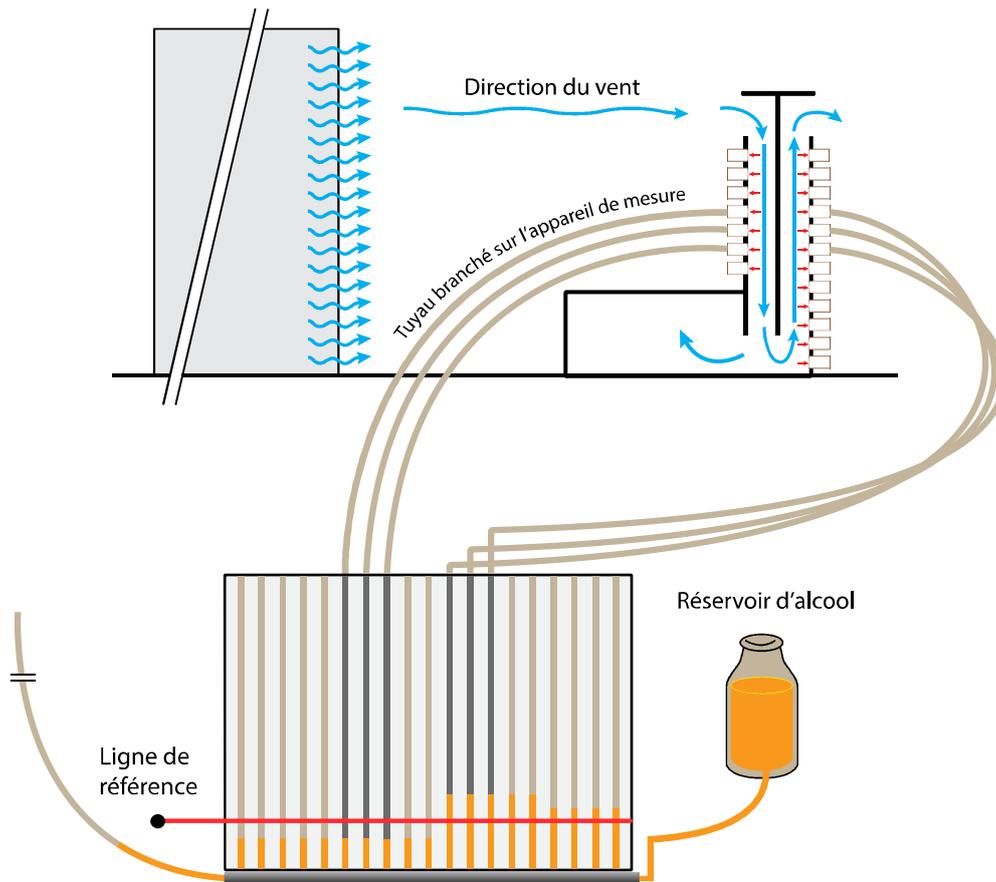
Figure 188 : Réservoir d'alcool et appareil de mesure



Figure 189 :
Chaque tuyau branché sur le Badgir est en même temps
branché sur l'appareil de mesure

Sur l'image suivante (Figure 190), nous pourrions observer la manière dont un conduit se comporte face au vent dominant. La bouche de la soufflerie envoie le vent à 20 m/s (vitesse choisie selon la résistance de la maquette). Un tuyau branché sur le percement transmet la pression ou la dépression qu'il subit vers l'appareil de mesure.

Afin d'introduire les mesures obtenues dans une base de données, à l'aide d'un calque, nous mesurons les distances depuis la ligne de référence ainsi que la pression ambiante. Cette base fournira les données correspondantes à appliquer dans la formule de Bernoulli.



Si le niveau monte, il y a pression sinon extraction

Figure 190 : Fonctionnement de la soufflerie

Pour faire les calculs nécessaires, nous avons considéré les données suivantes :

La densité de l'air, la densité de l'alcool, la vitesse de l'air, l'angle du vent dominant et la pression de l'air ambiant.

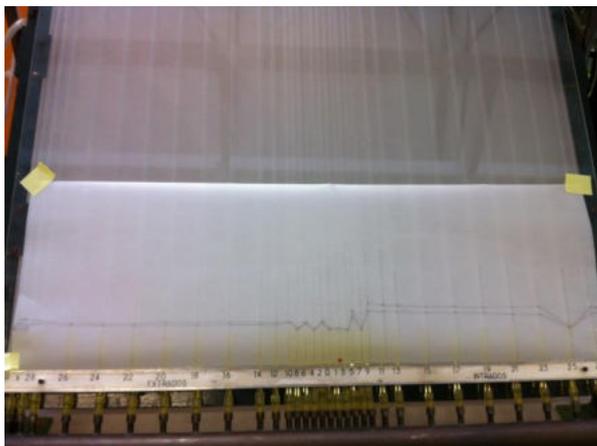


Figure 191 : Relevé de la courbe réalisée sur l'appareil de mesure à l'aide d'un calque

Sur le schéma du haut (Figure 191), nous avons relevé les données en changeant la direction du vent dans plusieurs angles : 0° , 15° , 30° et 45° .

Sur les deux figures qui suivent (Figure 192 et Figure 193), chaque conduit a été numéroté afin de pouvoir les identifier facilement. Nous avons changé la vitesse du vent pour constater les comportements produits dans les conduits. Et c'est ainsi que nous avons observé l'efficacité de certaines vitesses en relation avec le débit, la pression, l'extraction, etc.

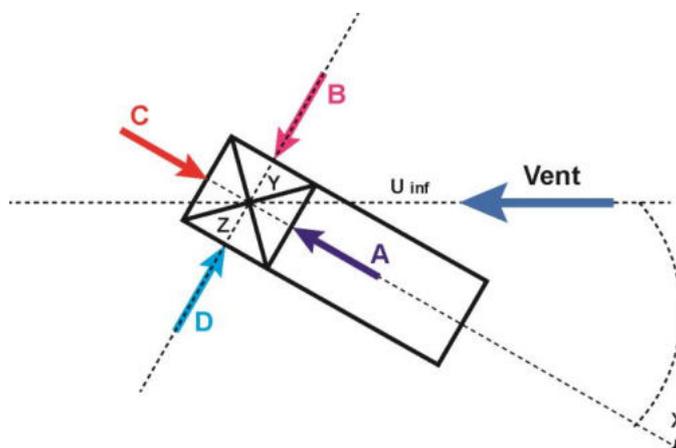


Figure 192 : Essai sous différents angles

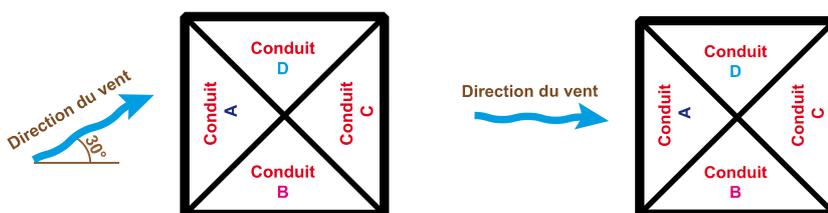
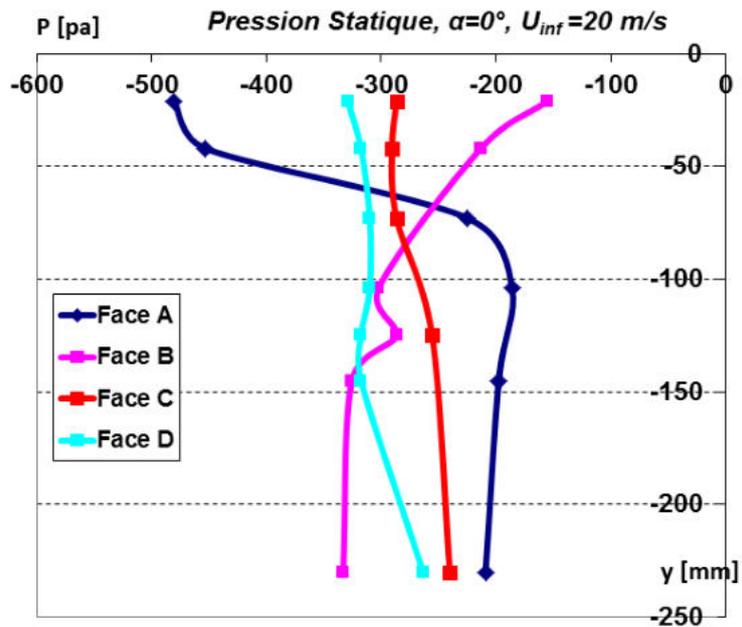


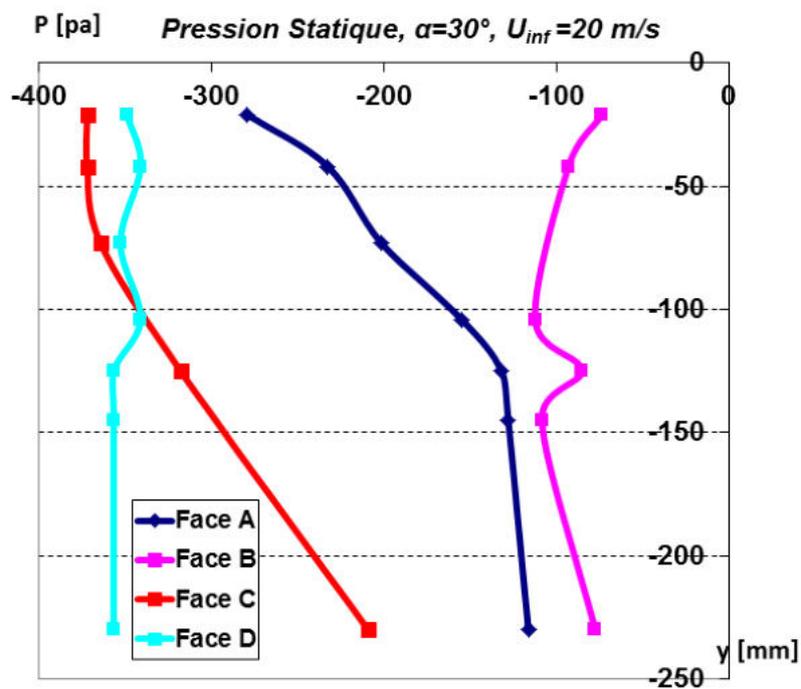
Figure 193 : Plan du Badgir, lorsque la direction du vent est à 30° et à 0°

5.1.2 Angle du vent dominant à 0°



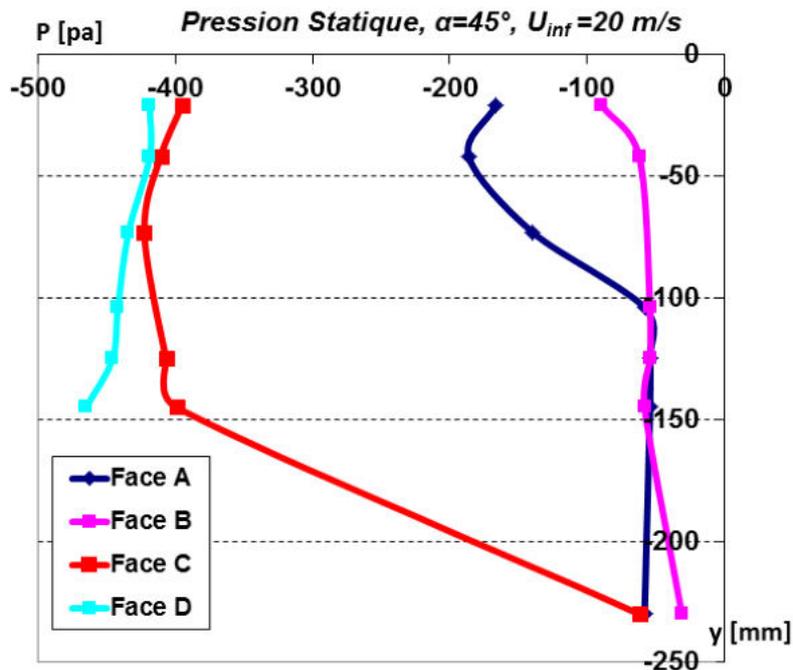
- La pression est plus haute dans les conduits B, C et D que le conduit A.
- Le conduit A aspire de l'air.
- Les conduits B, C et D soufflent.

5.1.3 Angle du vent dominant à 30°



- Les conduits A et B aspirent.
- Les conduits C et D soufflent.

5.1.4 Angle du vent dominant à 45°



- La pression dans les conduits C et D est inférieure aux conduits A et B.
- Les conduits A et B aspirent.
- Les conduits C et D soufflent.

5.1.5 Résultats et analyse des essais effectués en soufflerie

Les analyses en soufflerie ont démontré : lorsque l'angle $\alpha = 0^\circ$ jusqu'à 15° , il y a absence totale de dynamisme dans les conduits, mais quand $\alpha = 30^\circ$ et 45° , les quatre conduits prennent en charge le vent et la tour se met à évacuer l'air.

Pour vérifier l'exactitude et la validité des résultats, nous allons parallèlement comparer les données obtenues avec les calculs numériques sous Fluent.

5.4 CFD (Computational Fluid Dynamics)

Durant ces dernières années, plusieurs méthodes de calcul ont été développées afin de concevoir la performance de la ventilation naturelle, mais la méthode la plus complète reste bien évidemment la CFD (Computation Fluid Dynamics).

Les modèles classiques de calcul fournissaient jadis une description générale de la vitesse d'écoulement d'air, d'où le débit d'air pouvait être calculé manuellement et ne nécessitait pas l'usage d'un ordinateur. Mais, ces modèles ne sont pas utiles pour les zones où le système est muni de différentes entrées et de sorties telles qu'ils se présentent dans le cas des Badgirs.

Afin de calculer la température, la vitesse et la pression, il existe de nombreux codes CFD commerciaux : Fluent, Phoenics, CFX, Flovent, Vortex, etc.

La CFD est un ensemble de logiciels capable de prévoir le mouvement de l'air et de la ventilation à l'intérieur et autour d'un bâtiment. La température et la distribution de l'air interne, les limites de pression, champs de vitesse et champs de pression sont les informations qui peuvent également être analysées par la CFD.

Comme les forces motrices impliquées dans le processus de la ventilation naturelle sont variées, la CFD fournit des informations immédiates dans le domaine simulé.

Avec la CFD, un champ est divisé en plusieurs grilles. Les équations permettent d'analyser chacune de ces grilles dans sa plus petite dimension. Une solution contenant les nombres de Reynolds⁷³ et les équations de Navier-Stokes⁷⁴ est attribuée à chaque grille.

5.5 Gambit (Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit)

Le logiciel Gambit génère des maillages. Le maillage est constitué d'une discrétisation du domaine fluide en petits volumes de contrôle appelés éléments. Pour une meilleure simulation, le maillage doit respecter des critères de qualité utilisant la surface la plus appropriée (triangles, quads, etc.) ainsi que des volumes adéquats (tétraèdre, hexaèdre, prisme et pyramide).

Une fois le domaine d'écoulement défini, il est subdivisé en cellules. L'ensemble des cellules se rejoignent pour former une zone d'écoulement. Les points d'interconnexion entre les bords de chaque maille sont appelés nœuds. Sur chacun

⁷³ Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre sans dimension utilisée en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent).

⁷⁴ En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui sont censées décrire le mouvement des fluides « newtoniens » (liquide et gaz visqueux ordinaires) dans l'approximation des milieux continus.

de ces nœuds, au sein de la zone d'écoulement, diverses équations sont résolues numériquement.

La construction du maillage joue un rôle important dans la précision de la solution CFD. Pour saisir tous les détails et caractéristiques pertinents de ces zones, il est important que les distances entre les nœuds soient suffisamment petites.

Après divers essais effectués sur la simulation des tours à vent, le maillage le plus approprié pour ce type de géométrie a été le « tétraédrique ».

5.6 Fluent

Fluent est un logiciel utilisé en programmation numérique pour la modélisation de flux d'air et de transfert thermique. Ce logiciel est basé sur la méthode des volumes finis⁷⁵ qui est une méthode de calcul très puissante et efficace dans la mécanique des fluides.

Le logiciel Fluent est basé en partie sur les équations de Navier-Stokes (NS). Les équations de NS dans la physique font partie des équations différentielles les plus complexes qui régissent les phénomènes physiques.

Afin de simuler l'écoulement de l'air sous l'influence de divers paramètres tels que la vitesse, la position et la taille des ouvertures, le logiciel Fluent, version 6.3, a été utilisé dans cette étude.

Nous allons à présent mettre à disposition les différentes étapes d'analyses et de calculs qui ont été effectuées numériquement avec Rhino, Gambit et Fluent.

5.7 Mise en place d'un modèle CFD

Avant de commencer à mettre en place un modèle CFD, il est nécessaire de spécifier l'étendue du domaine des modèles comme les conditions aux limites, etc.

Le domaine est l'espace physique dans lequel l'équation sera résolue. La taille du domaine pourrait affecter les résultats de la simulation, par exemple, si le domaine défini est trop faible, il peut affecter le flux et interférer avec les résultats. D'autre part, la définition d'un grand domaine conduira aux processus qui prennent du temps.

La plupart des codes CFD ont un générateur de maillage. Ces générateurs offrent la possibilité de définir la géométrie comme un fil de fer ; ensuite, spécifier le nombre de cellules dans chaque région. La densité des réseaux (nombre de cellules) dans chaque partie affecte la précision globale des résultats.

⁷⁵ En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Généralement, le nombre de cellules découle de la nature du modèle. Par exemple, si la zone avec un grand gradient est simulée, le modèle nécessite plus de densité par rapport à la zone où la surface se trouve plane.

Les conditions aux limites dans le modèle CFD sont généralement décrites par leur type : « entrée », « sortie », « pression à l'entrée », « pression à la sortie », etc. Les conditions initiales sont essentielles pour tous les modèles CFD, mais nous sommes en mesure de configurer manuellement diverses conditions dans un modèle CFD : la vitesse, la pression, le modèle de turbulence, la température et la densité.

Précautions importantes à prendre

Pour vérifier l'exactitude d'une solution dans le modèle CFD, il est nécessaire de vérifier la convergence de la solution. La convergence de la solution peut être confirmée en vérifiant que la valeur de toutes les variables d'une itération se suit. Si un saut est observé, même dans une ou deux variables, ceci prouve un problème de calcul.

5.8 Équations utilisées dans les analyses CFD

Lorsque la température intérieure d'un bâtiment est supérieure à celle de l'extérieur, l'air de l'extérieur étant plus frais pénètre dans le bâtiment et fait sortir l'air chaud. L'inverse se produit, lorsque la température intérieure est inférieure à la température de l'extérieur. Ce processus est aussi exécuté dans le fonctionnement des Badgirs.

Toutes les tours à vent sont en général soumises au même système de forces. Elles produisent différentes formes de pression dans les conduits. Les forces qui génèrent la pression et la circulation dans ces conduits sont en général :

- Le vent
- La différence de pression
- La gravitation

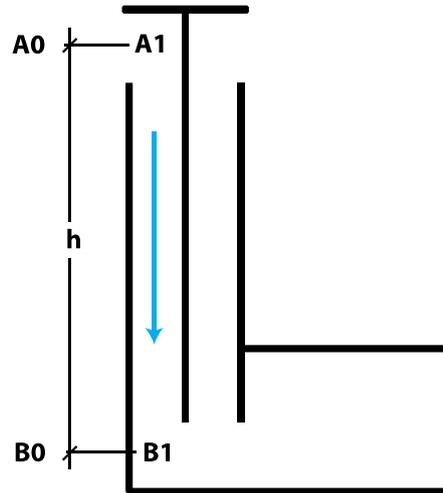


Figure 194 : Image reproduite d'après l'expérience sur le terrain à Siraf, golfe Persique

$$\Delta P_{tour} = \rho_m \frac{v_A^2 - v_B^2}{2} + (P_A - P_B) + (\rho_A - \rho_B) hg - \sum P_{perdues}$$

D'où v_A et v_B sont la vitesse du vent à l'entrée et à la sortie ; le P_A et P_B sont les deux pressions verticales en deux points différents (haut et bas) ; ρ_m , ρ_A et ρ_B sont dans l'ordre la densité moyenne de l'air, la densité de l'air à l'entrée et à la sortie ; h est la longueur du conduit et g représente la force de gravitation.

Chaque force de pression génère un flux d'air vers le haut ou vers le bas à l'intérieur du canal. Et c'est la somme de ces diverses forces qui détermine le fonctionnement de la tour. Le théorème de Bernoulli explique ce phénomène de la manière suivante : « Dans le flux d'un fluide, une accélération se produit simultanément avec la diminution de la pression ».

Formule de Bernoulli :

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho gz + P = Cte$$

Énergie cinétique + énergie potentielle + énergie de pression = constante

ρ = la masse volumique en kg/m^3 .

v = la vitesse du fluide en m/s .

g = la gravité terrestre ($9,81 m/s^2$).

z = le dénivelé vertical du conduit en m .

P = la pression statique en pascal.

ρgz = énergie potentielle.

$\rho \frac{v^2}{2}$ = énergie cinétique.

Le tableau suivant (Figure 195) nous montre la masse volumique de l'air sec en fonction de la température à $p_0 = 101\,325\text{ Pa}$.

θ en $^{\circ}\text{C}$	ρ en kg/m^3	θ en $^{\circ}\text{C}$	ρ en kg/m^3
-10	1,341	+40	1,127
-5	1,316	+45	1,110
0	1,292	+50	1,092
+5	1,269	+55	1,076
+10	1,247	+60	1,060
+15	1,225	+65	1,044
+20	1,204	+70	1,029
+25	1,184	+75	1,014
+30	1,164	+80	1,000
+35	1,146	+85	0,986

Figure 195 : Changement de la masse volumique de l'air selon la température ambiante

Le tableau suivant (Figure 196) montre les épaisseurs de parois des différents matériaux donnant des coefficients de transmission thermique d'environ $1,1\text{ kcal/hm}^2\text{ C}^{\circ}$. Nous pouvons y constater qu'avec environ trois fois moins d'épaisseur, la terre d'argile transmet presque la même quantité de chaleur que le béton.

Matériaux utilisés	Épaisseur (en m)	Transmission thermique (en $\text{kcal/hm}^2\text{ C}^{\circ}$)
Bloc de briques en terre d'argile	0.30	1.10
Brique à double paroi avec des trous	2 x 0.12	1.12
Mur de briques avec des trous	0.38	1.03
Briques silico-calcaires	0.51	1.25
Hourdis brique silico-calcaires	0.51	1.16
Chaux	0.51	1.10-1.35
Béton	1.00	1.20

Figure 196 : Quantités de chaleur transmises par divers matériaux

Hormis le théorème de Bernoulli qui a été employé en soufflerie, plusieurs autres groupes d'équations ont été utilisés durant nos analyses numériques sous Fluent comme la masse volumique, la quantité de mouvement, l'équation de continuité et l'énergie.

Comme mentionné précédemment, le logiciel Fluent (employé pour les analyses des Badgirs), se sert des formules de Navier-Stokes. « *Les équations de Navier-Stokes sont censées décrire les écoulements des fluides. Elles modélisent un fluide comme un milieu continu, c'est-à-dire caractérisé par des grandeurs physiques définies en tout point de l'espace et à tout instant* »⁷⁶. Imaginons l'air qui entre dans un canal verticalement (ici, dans les Badgirs, Figure 197) ; on devrait être capable de calculer son comportement sur tous les points de ce canal (A1, A2, A3, A4,...), tout en considérant la viscosité et les obstacles qui causent la diminution ou l'augmentation de la vitesse sur son trajet, etc.

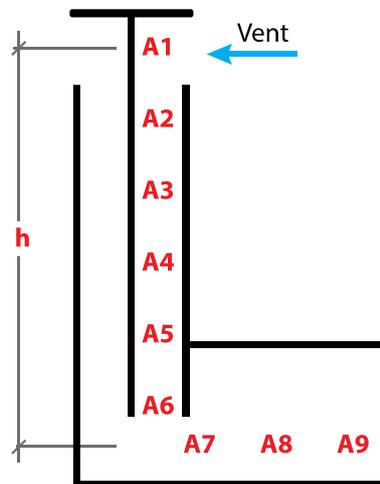


Figure 197 : Calcul du comportement du vent à tous les niveaux de la tour par les équations de Navier-Stokes

La formule qui suit correspond aux calculs de cette analyse spécifique étant la détermination du débit de fluide dans un Badgir tout en sachant que l'angle du vent dominant se trouve entre 30° et 45°. Nous avons essayé avec une vitesse de vent entre 4 et 20 m/s. La température a sans cesse varié. Le débit d'air dans notre géométrie a pu être décrit seulement en utilisant la masse et la quantité de mouvement tout en appliquant des conditions aux limites appropriées. L'énergie cinématique (k) et le taux de dissipation de l'énergie cinématique de turbulence sont aussi définis.

κ = Turbulence kinetic energy

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right)$$

⁷⁶ <http://images.math.cnrs.fr/Turbulences-sur-les-equations-des.html>

ε = Dissipative rate of the turbulence kinematics energy

$$\varepsilon = -\frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)$$

5.1.6 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre sans dimension, utilisée en mécanique des fluides. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent).

$$\text{Re} = \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu}$$

Pour des formes, comme carrées, rectangles ou des conduits angulaires dont la hauteur et la largeur sont similaires, la dimension et les caractéristiques du flux interne sont considérées comme étant un diamètre hydraulique, D_h , qui est défini comme suit :

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

Dans le cas de notre Badgir à section carrée, si nous considérons les valeurs $V = 4 \text{ m/s}$, $\rho = 1,183 \text{ 9 kg/m}^3$, $L = D_h = (4 \times (3 \times 3)) / (4 \times 3) = 3 \text{ m}$ et $\mu = 18,27 \text{ } \mu \text{ Pa.s}$, le Nombre de Reynolds vaut alors $7,77 \times 10^5$. Ce nombre de Reynolds montre qu'il y a présence de turbulence. Ce calcul explique l'utilisation du modèle turbulence k- ε standard dans Fluent.

5.9 Analyse numérique d'un Badgir

Le Badgir à 4 faces, inspiré de celui de la maison de Nasuri situé dans la ville de Siraf a été étudié sous Fluent. Pour obtenir des résultats précis, nous avons légèrement modifié les dimensions d'origine de ce Badgir. Les lames de cette tour sont positionnées en forme de « X ». Les premières analyses ont été effectuées sans portes et fenêtre afin de connaître le comportement du vent au niveau de la vitesse, pression et extraction dans l'ensemble de la structure. Mais par la suite, nous avons désigné différents emplacements de portes et fenêtres afin d'étudier la vitesse et le débit d'air à l'entrée et à la sortie du Badgir.

Afin d'obtenir des résultats le plus précis possible, les essais sous Fluent ont été effectués à de multiples reprises. La géométrie 3D a été générée en fonction du prototype expérimental utilisé en soufflerie.

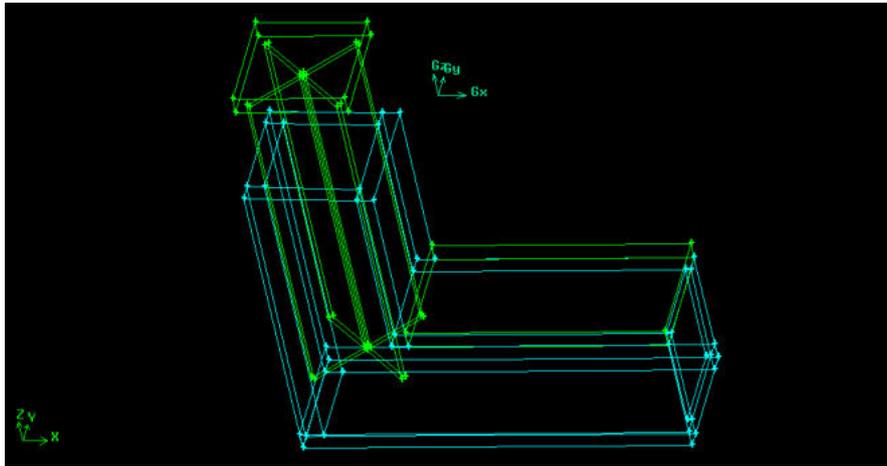


Figure 198 : Dessin de la maquette, réalisée avec Gambit, destiné à l'application des conditions aux limites

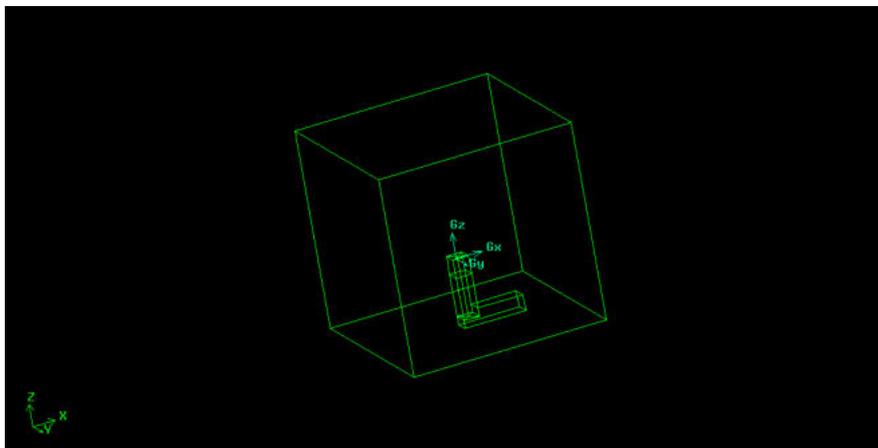


Figure 199 : Simulation du domaine du Badgir

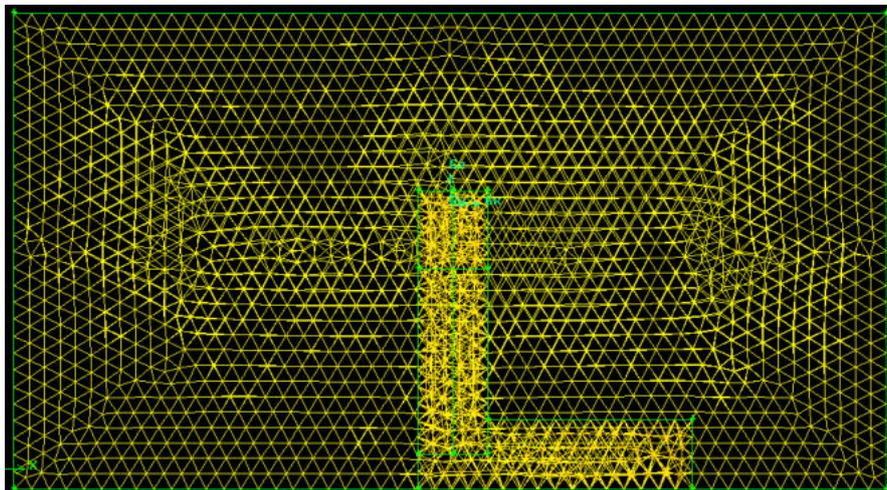


Figure 200 : Soustraction des Meshs

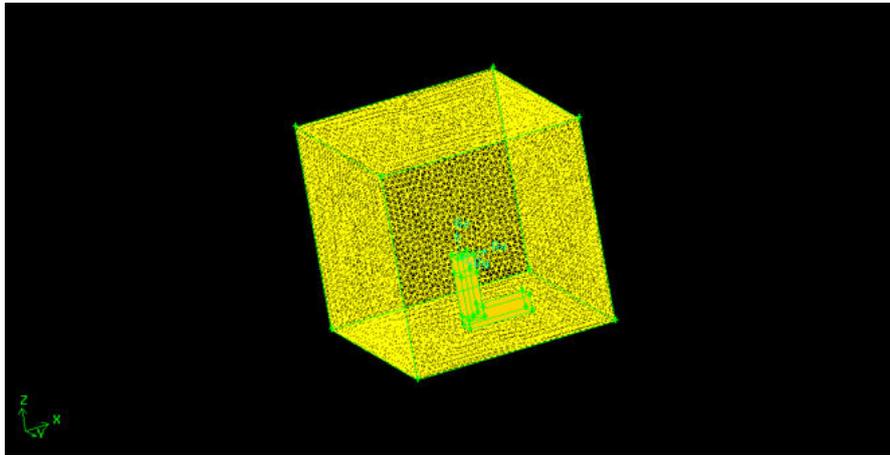


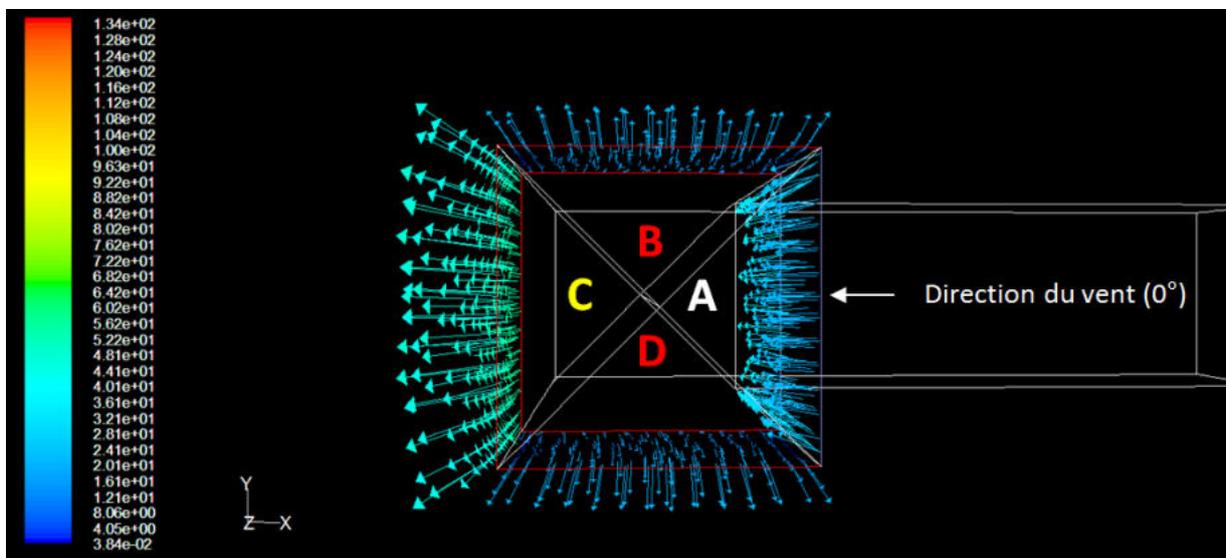
Figure 201 : Badgir et son domaine en 3 dimensions

5.1.7 Analyses sous Fluent

Nous avons importé les « meshes » réalisées avec Gambit dans Fluent. Ensuite, il a fallu fixer les paramètres initiaux à l'intérieur ainsi qu'autour du Badgir. Le modèle de turbulence et les conditions aux limites ont été soigneusement mis en place. Nous avons choisi la vitesse absolue. L'écoulement a été considéré comme incompressible et la densité de l'air fut supposée être constante. La vitesse du vent a été spécifiée à l'entrée et tout au long des parois. Le modèle turbulence k- ϵ standard a été adoptée. Les analyses ont été effectuées en appliquant la fonction murale correspondant aux briques de boue ou à de la terre d'argile.

Des simulations numériques ont été réalisées avec une vitesse de vent entre 3 à 20 m/s. Quatre différents angles ont été pris en considération : 0° , 15° , 30° et 45° . Pour observer les résultats dans Fluent, deux directions y ont été définies, Z et X. Les résultats et les contours ont été dessinés sur ces deux surfaces. À l'aide de ces deux processus, nous avons pu savoir si la partie de la tour soufflait ou aspirait l'air.

5.1.8 Direction du vent à 0°



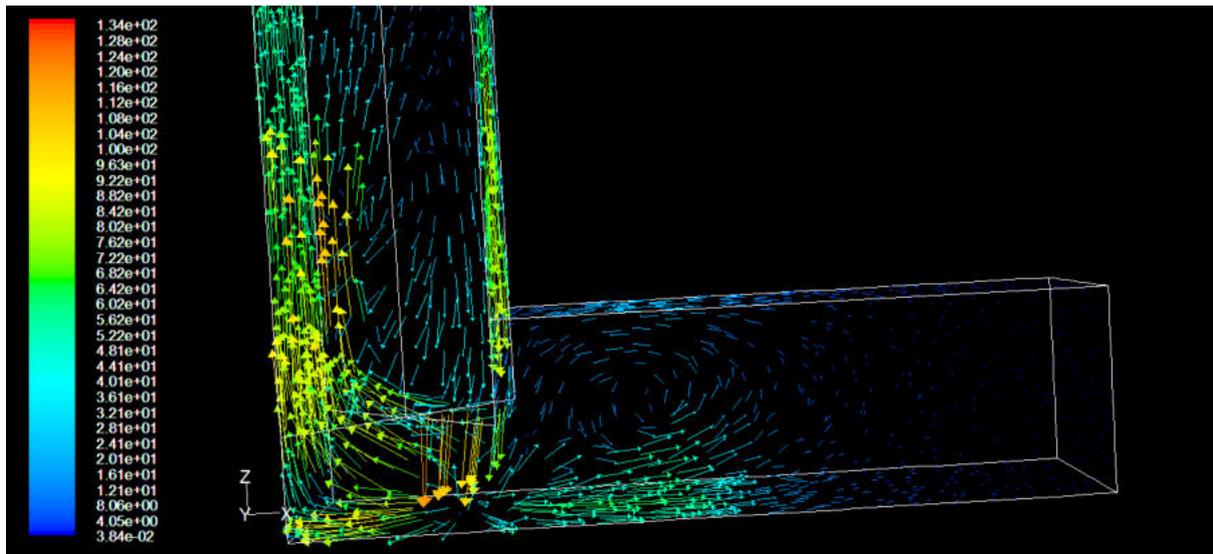
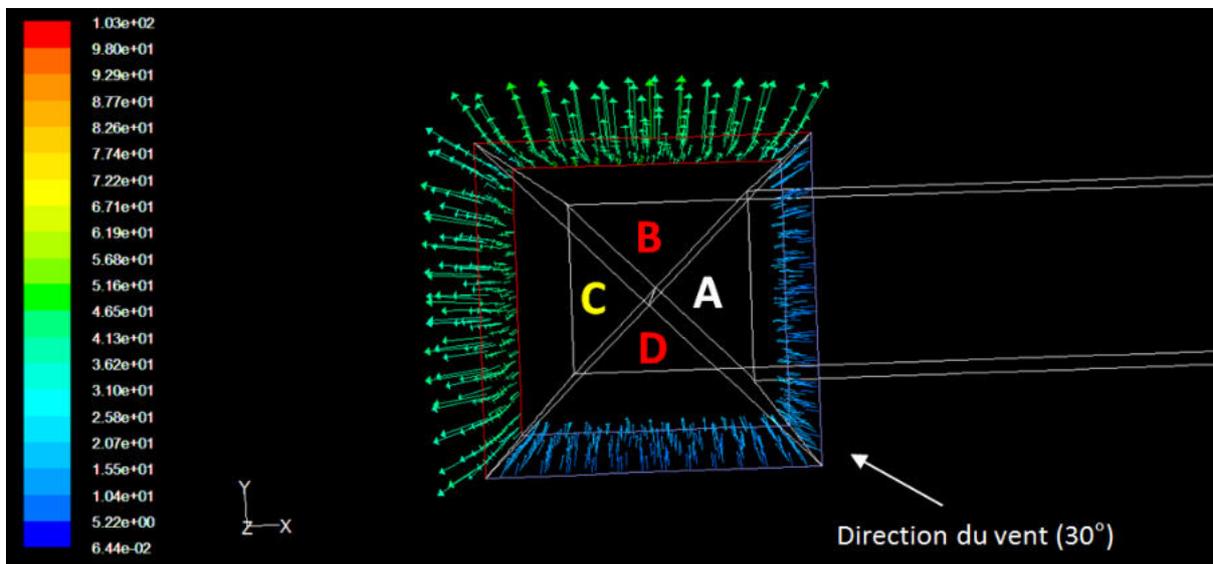


Figure 202 : Le conduit A aspire, le B et D extraient peu, le C est en état d'extraction maximale

Résultat

En observant ces schémas, nous constatons qu'avec un angle à 0° , l'extraction se produit dans les conduits B et D de manière presque régulière. Le conduit C qui se trouve face au conduit A (entrée du vent) est en dépression maximale.

5.1.9 Direction du vent à 30°



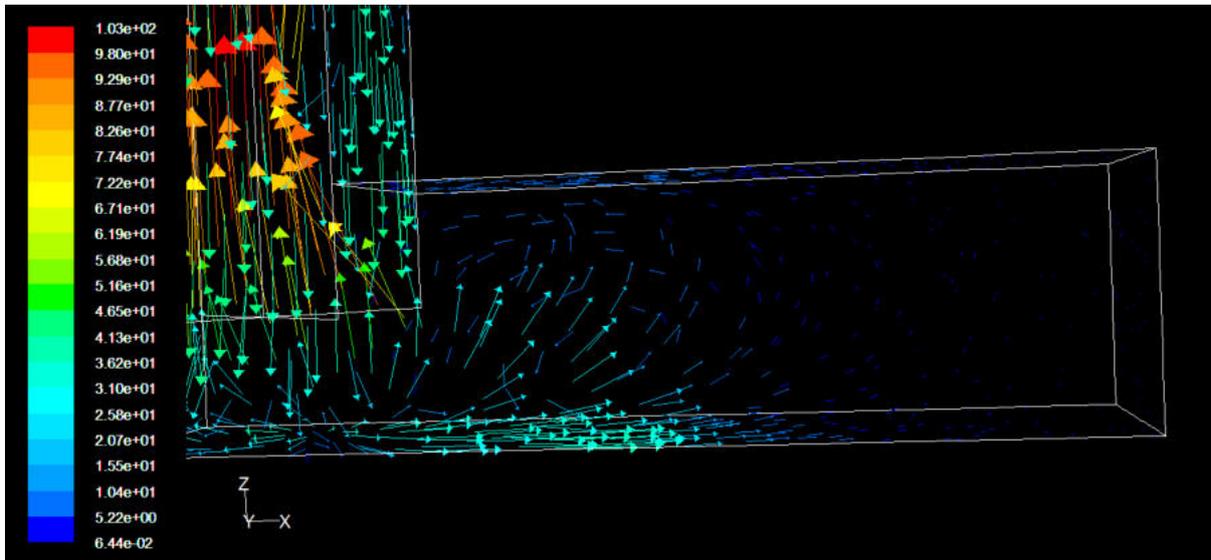


Figure 203 : À 30°, la vitesse reste supérieure dans les conduits B et C

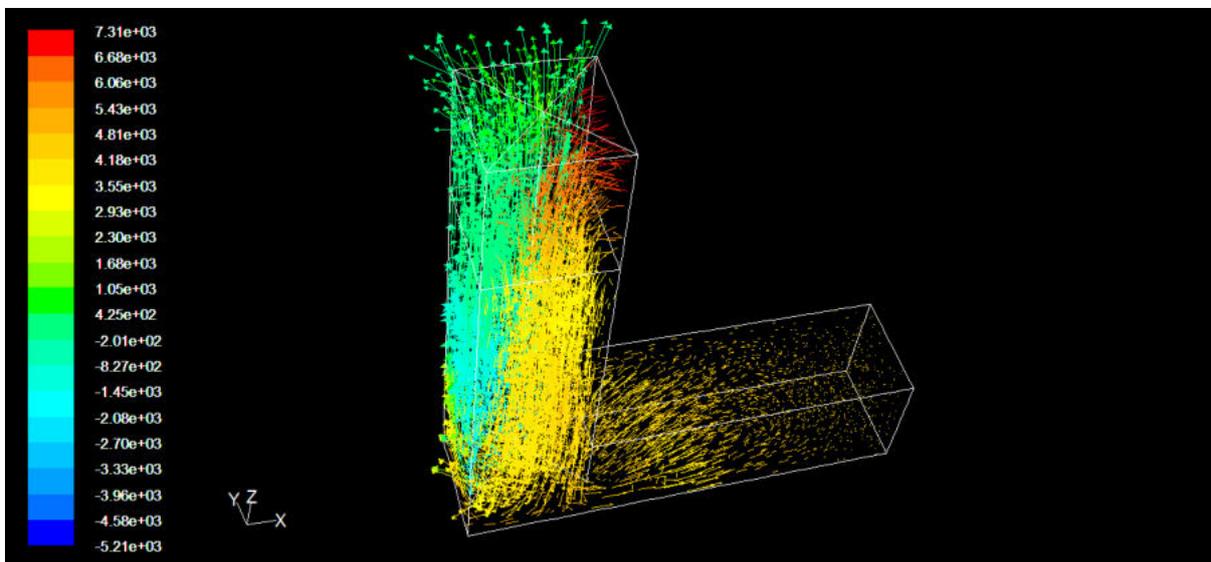


Figure 204 : Les conduits A et D réceptionnent, tandis que B et C évacuent l'air

À 30°, nous observons la présence de plus de mécanismes. Une partie de l'air est distribuée dans la pièce à Badgir, tandis que le restant est dirigé vers les conduits B et C évacuant l'air vers l'extérieur.

5.1.10 Résultat des essais numériques

Nous venons de constater que le débit d'air augmente lorsque l'angle varie de 10° à 40° et qu'il diminue lorsque l'angle est inférieur à 10° ou dépasse 40°. L'angle de 30° reste l'angle favori pour cette expérience. En effet à 30°, dès que le conduit A reçoit le vent dominant, les trois autres conduits rentrent aussitôt en mode d'extraction pour évacuer l'air.

D'après nos observations sous Fluent, lorsque l'angle de la direction du vent est à 30°, la vitesse de l'air au niveau des sorties équivaut à la vitesse du vent externe.

Mais lorsque l'ouverture de sortie est située dans la partie supérieure, la vitesse de l'air à la sortie diminue et elle est à environ 80 % de la vitesse du vent extérieur.

Nous avons pu constater l'impact des ouvertures sur la vitesse du vent. La taille des ouvertures et leurs emplacements par saison peuvent certainement nous permettre de contrôler le taux de ventilation. La superficie des ouvertures (portes et fenêtres) peut aussi fournir la quantité d'air qui s'écoule dans le bâtiment.

Les trois facteurs importants sont ainsi l'angle du capteur de vent, l'emplacement et les dimensions des sorties.

5.1.11 Comparaison des analyses de la soufflerie et les analyses numériques

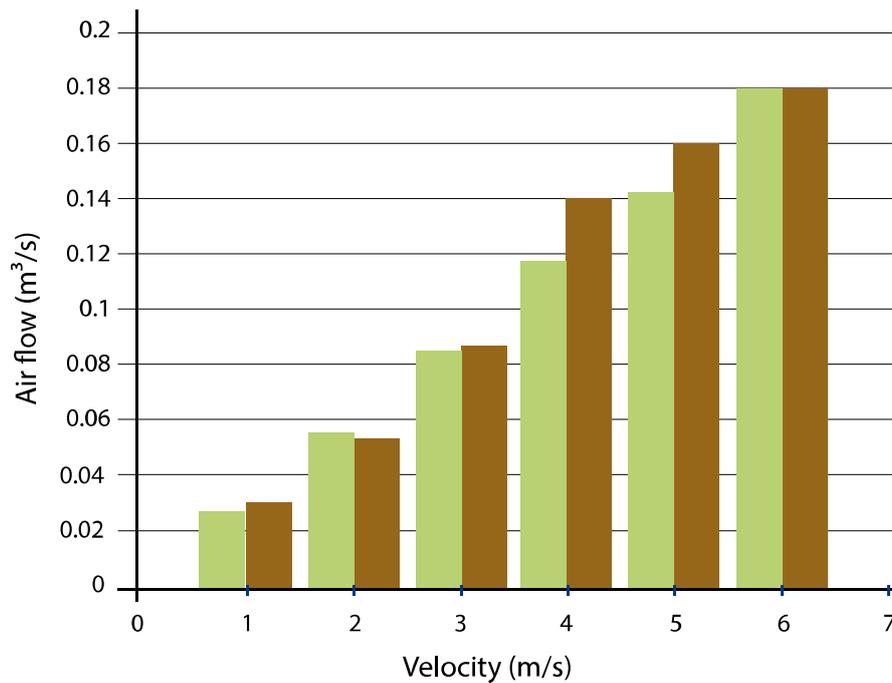


Figure 205 : Comparaisons des essais en soufflerie et des analyses effectuées sous Fluent

Dans le modèle analysé avec Fluent ainsi que dans le modèle destiné aux expériences en soufflerie, le conduit A, agit comme celui qui alimente l'air, tandis que les conduits B, C et D sont identifiés comme les canaux en mode d'extraction. Dans les deux analyses, il y a une relation directe entre la vitesse du vent externe et le débit d'air dans les conduits du Badgir. En augmentant la vitesse du vent externe, le débit total d'air est également augmenté.

Nous avons conclu que la simulation CFD et les résultats de modélisation analytique ont un bon accord avec les résultats expérimentaux en soufflerie.

Les résultats obtenus prouvent que les arêtes vives d'un Badgir carré créent une grande région de séparation de l'écoulement et fournissent une différence de pression beaucoup plus élevée à travers le dispositif que sur un Badgir en forme de cercle.

Les analyses montrent clairement que l'introduction des éléments d'évaporation au sommet des Badgirs se révèle très efficace. Ces éléments ne réduisent en aucun cas le débit d'air de la tour. Plus l'air circule à travers le bâtiment avec une vitesse convenable, plus l'effet d'évaporation s'améliore.

5.1.12 Combinaison d'un système de ventilation hybride

Un système de ventilation hybride combine les avantages d'une ventilation naturelle et ceux provenant d'un système mécanique. Nous savons que dans la ventilation naturelle, la différence de la masse volumique d'air est utilisée pour faire circuler l'air à travers un bâtiment. Il est donc à rappeler que la ventilation hybride

est le résultat d'une ventilation naturelle, en employant des forces mécaniques seulement quand les forces naturelles ne sont pas suffisantes.

Un système de ventilation hybride peut être décrit comme un système qui exploite les différentes caractéristiques de la ventilation naturelle ainsi qu'un système mécanique à différents moments de la journée ou saisons de l'année. Nous pouvons ainsi proposer l'utilisation de principes de base d'un Badgir intégré avec une cheminée solaire.

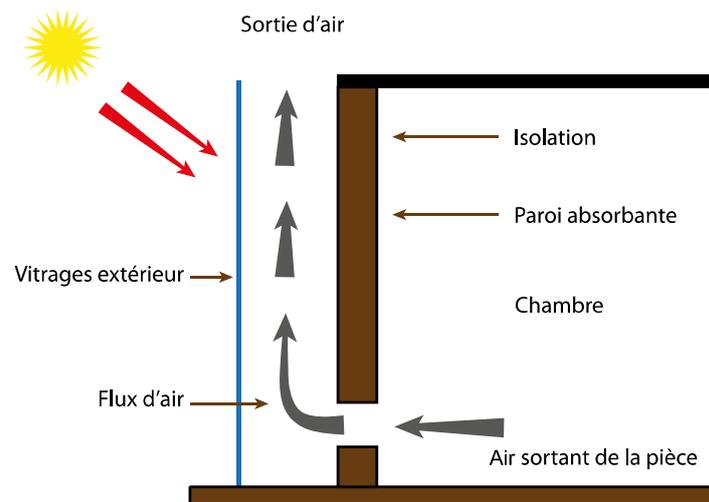


Figure 206 : Cheminée solaire vitrée à géométrie verticale

Les Badgirs ont été notamment utilisés dans un environnement avec des vents dominants existants. Mais dans un climat sans vent, où aucun vent significatif n'existe, l'utilisation d'une cheminée solaire peut être une bonne configuration pour mettre en œuvre la ventilation naturelle dans les bâtiments.

Une cheminée solaire est essentiellement un arbre vertical qui chauffe avec l'énergie solaire et améliore la ventilation naturelle d'un bâtiment.

Afin de créer un environnement de qualité, nous avons identifié comment un Badgir et une cheminée pourront techniquement être fusionnés. Une étude pourra être effectuée afin d'évaluer dans quelle mesure le projet Badgir-cheminée peut satisfaire l'ensemble des expériences du développement d'un système correctement ventilé.

Possédant un passage vertical, une cheminée solaire crée une différence de pression en utilisant l'énergie solaire pour chauffer l'air. Suite à une convection l'air passe à travers un conduit. Cette convection d'air chaud est capable d'améliorer la ventilation naturelle des bâtiments et de créer un refroidissement passif.

La cheminée solaire peut être intégrée à un tube souterrain. Si l'air entrant passe par un tuyau souterrain, les effets de refroidissement peuvent être

considérablement augmentés. Le schéma suivant montre que, lorsque la cheminée solaire se réchauffe par le rayonnement solaire, l'air réchauffé cherche à s'échapper par le passage de la cheminée, il sera alors remplacé par l'air refroidi provenant du canal souterrain.

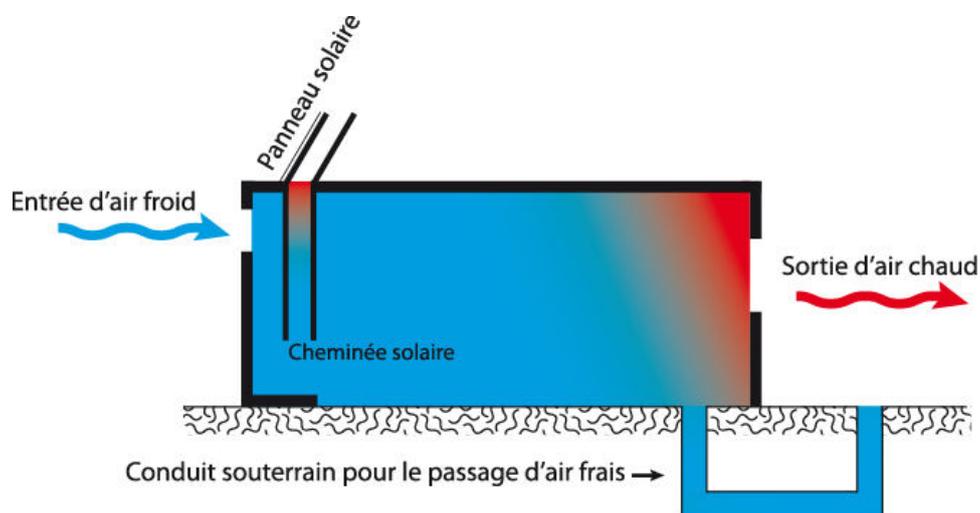


Figure 207 : Combinaison de cheminée solaire, panneau solaire et conduits d'eau souterrains

5.1.13 Combinaison d'un Badgir et d'un éolien vertical

Le but principal de cette recherche a été l'utilisation du vent, de l'eau et de l'énergie solaire afin de réduire la température à l'intérieur d'un bâtiment tout en y augmentant l'humidité. Nous pouvons ainsi présenter une structure de nature suivante.

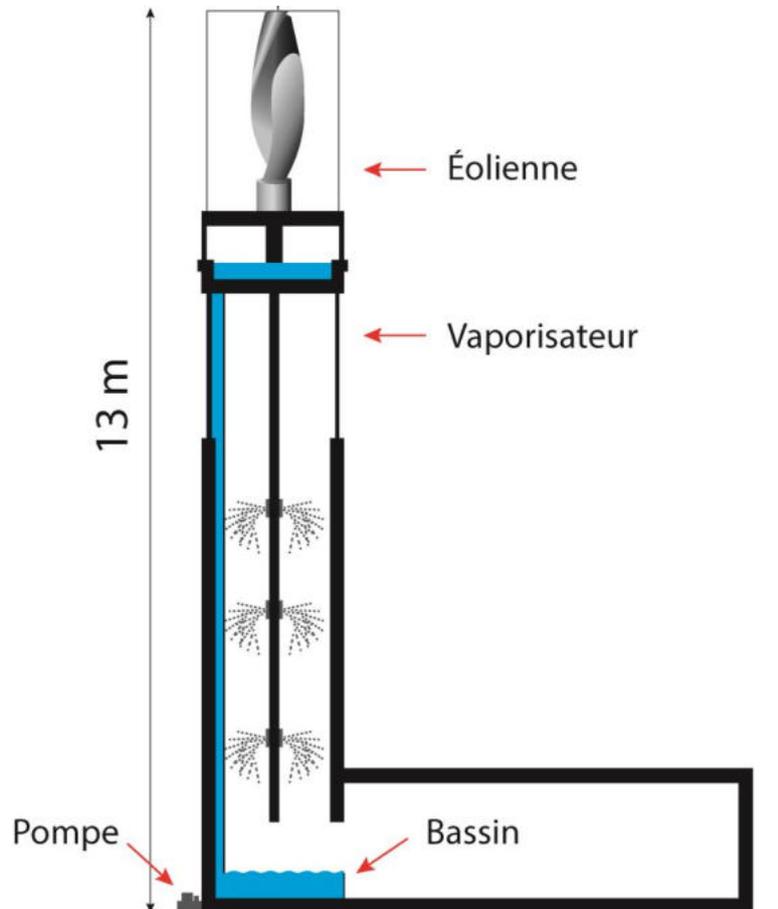


Figure 208 : Intégration de l'éolien dans un Badgir

Sur ce schéma, nous proposons l'installation d'un éolien sur la partie la plus haute d'un Badgir. L'éolien produira de l'électricité qui mettra le petit moteur en marche afin de renvoyer l'eau vers le haut de la tour, pour ensuite la récupérer et la renvoyer et ainsi de suite. Cette installation nécessite plus d'étude en termes de structure.

5.10 Conclusion générale

Pour acquérir des résultats utiles à l'avenir, il fallait valider les hypothèses et évaluer l'importance de chaque paramètre par des mesures expérimentales précises. Des essais en soufflerie ont permis, en comparant des résultats acquis in situ et in vitro sur modèles réduits, d'apprécier la pertinence des méthodes de mesure.

La simulation CFD a permis de confirmer les débits d'air induits relevés dans la tour à vent. Les coefficients de pression autour de toutes les surfaces d'un modèle ont été quantifiés sur différents angles.

Les expérimentations en soufflerie et les modélisations numériques ont conduit à des comptes rendus similaires. Nous avons acquis des réponses satisfaisantes afin de pouvoir améliorer les performances des capteurs pour un usage futur.

Sur la base de multiples comparaisons de nos essais sous CFD, nous avons constaté quelques faiblesses autour des Badgirs traditionnels. Par exemple, nous avons observé qu'une partie de l'air s'échappe par des canaux opposés avant de descendre par la colonne principale. Ou encore que la quantité d'énergie stockée par les parois internes paraissait insuffisante au regard des besoins naturels d'une journée très chaude. Malgré les fontaines, on ne parvient pas à atteindre un potentiel complet de refroidissement par évaporation. Mais, il convient de rappeler que la conception des Badgirs a été traditionnellement fondée sur l'expérience personnelle des bâtisseurs ainsi que sur la position sociale des propriétaires. Ce processus a ainsi joué un rôle important sur la hauteur des tours, le nombre des passages d'air, le placement des ouvertures et le placement de la tour par rapport à l'ensemble de l'édifice.

Les chapitres soulèvent la prise de conscience de l'importance du vent et des possibilités d'améliorer la performance des capteurs de vent. Cette étude apportera de nouvelles opportunités pour l'utilisation de ce système de refroidissement passif, riche patrimoine de nos ancêtres.

Les tours à vent peuvent être utilisées comme une solution durable, mais pour économiser de l'énergie, de nombreux éléments doivent être pris en compte : les cheminées solaires, les eaux souterraines, les cours centrales, les toits en forme de dôme, les fontaines, ainsi que l'enveloppe totale du bâtiment. En respectant la bonne utilisation de ces dernières consignes, une économie de 50 % à 70 % par rapport aux habitats classiques pourra être atteinte.



Figure 209 : Badgir de la maison de Nasuri



Figure 210 : Badgir situé face à la mer



Figure 211 : Expérimentations sur le terrain, Siraf, Golfe persique



Figure 212 : Lames et conduits du Badgir de Siraf



Figure 213 : Installation de la maquette à la soufflerie



Figure 214 : Soufflerie de la Ville-d'Avray, université Paris-Ouest

Liste des figures

Toutes les images sans la mention (source) ont été réalisées par l'auteur.

FIGURE 1 : ÉMISSIONS DE CO ₂ DES INDUSTRIES MANUFACTURIÈRES ET DE LA CONSTRUCTION (EN MILLIONS DE TONNES) EN IRAN	8
FIGURE 2 : TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE DE L'IRAN (SOURCE : IRANCARTO)	13
FIGURE 3 : ÉNERGIE UTILISÉE PAR LE SECTEUR DU COMMERCE (SELON LES STATISTIQUES IFCO, 2008)	14
FIGURE 4 : ÉMISSIONS DE CO ₂ DE DIVERS SECTEURS D'ACTIVITÉS EN IRAN (2006)	15
FIGURE 5 : QUALITÉ DE L'AIR À TEHRAN EN 2006	15
FIGURE 6 : DES COOLERS PLACÉS AU PIED DES TOURS À VENT	16
FIGURE 7 : FONCTIONNEMENT D'UN COOLER À EAU	17
FIGURE 8 : DÉSERTS ET LACS EN IRAN (SOURCE : IRANCARTO)	18
FIGURE 9 : PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES EN IRAN (SOURCE : IRANCARTO)	19
FIGURE 10 : DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE EN IRAN (SOURCE : IRANCARTO)	20
FIGURE 11 : DÉSERTS ET DISSYMMÉTRIE DU PEUPEMENT (SOURCE : IRANCARTO)	20
FIGURE 12 : LOGEMENTS CONSTRUITS EN MATÉRIAUX DURABLES EN IRAN (SOURCE : IRANCARTO)	21
FIGURE 13 : RUELLES ÉTROITES, OMBRE ET SOLEIL DE LA VILLE DE BUSHEHR AU BORD DU GOLFE PERSIQUE	21
FIGURE 14 : ANGLES DU RAYONNEMENT SOLAIRE	22
FIGURE 15 : JARRE PERFORÉE DESTINÉE À RAFFRAÎCHIR L'EAU, KASHAN, IRAN	23
FIGURE 16 : ESPACE FERMÉ AVEC DE L'EAU LIQUIDE ET PARTICULES DE GAZ (VAPEUR D'EAU)	24
FIGURE 17 : FLUX D'AIR AVEC ET SANS CAPTEUR DE VENT	25
FIGURES 18 : LA PRESSION NÉGATIVE ET LA PRESSION POSITIVE.	25
FIGURE 19 : PASSAGE DU VENT DANS UN BÂTIMENT	26
FIGURE 20 : PRESSION HAUTE, PRESSION BASSE	26
FIGURE 21 : COUPE TRANSVERSALE DE LA COUR ET DU JARDIN D'UNE MAISON TRADITIONNELLE	28
FIGURE 22 : DIRECTION DES BRISÉS MARINS S'INVERSANT ENTRE LE JOUR ET LA NUIT	29
FIGURE 23 : AUGMENTATION DE LA VITESSE DU VENT PAR LES OBSTACLES	29
FIGURE 24 : ZONES DE HAUTES ET DE BASSES PRESSIONS	30
FIGURES 25 : OMBRAGE DES RUELLES DE LA VILLE DE YAZD (GAUCHE) ET DE KASHAN (DROITE)	31
FIGURE 26 : LES OBJECTIFS DE LA THÈSE	33
FIGURE 27 : MAISON DE NEBAMU, XIX ^e DYNASTIE (1300 AV. J.-C.), ÉGYPTÉ	34
FIGURE 28 : FONCTIONNEMENT DE LA CIRCULATION D'AIR À L'INTÉRIEUR DE LA LANTERNE	36
FIGURE 29 (GAUCHE) : MALQAF DE LA MAISON ROYALE DU SCRIBE NAKHT FIGURE 30 (DROITE) : LA PENTE DU MALQAF À 30°	37
FIGURE 31 : COUPE ET PLAN DU BADGIR D'AFGHANISTAN (SOURCE : MAHYARI, 1996)	37
FIGURE 32 : MODÈLE DE BADGIR DU PAKISTAN, PENTE À 45° (SOURCE : MAHYARI, 1996)	37
FIGURE 33 : MODÈLE DE BADGIR EN IRAK	38
FIGURE 34 : MAISON D'AMERHA À KASHAN CONTENANT QUATRE BADGIRS ET CINQ COURS	39
FIGURE 35 : MAISON D'ATTARHA À KASHAN POSSEDANT TROIS BADGIRS	39
FIGURE 36 : MAISON DE KARKHANEHCHI À KASHAN CONTENANT DEUX BADGIRS DE TYPES CIRCULAIRES	40
FIGURE 37 : LA MAISON AKHBARI À KASHAN POSSEDE UN SEUL BADGIR	40
FIGURE 38 : LES POUTRES TRAVERSANT LA STRUCTURE SERVAIENT D'ÉCHAFAUDAGE ET D'ENTRETIEN DU BADGIR	40
FIGURE 39 : POUTRES EN BOIS UTILISÉES POUR LA CONSTRUCTION DES MAISONS ET DES BADGIRS	41
FIGURE 40 : LA POUTRE ABSORBE L'HUMIDITÉ QUI SE PRODUIT À L'INTÉRIEUR ET L'ENVOIE VERS L'EXTÉRIEUR	41
FIGURE 41 : DASHT-E LUT ET DASHT-E KAVIR (SOURCE : IRANCARTO)	42
FIGURE 42 : 5 BADGIRS COUVRANT UN RÉSERVOIR D'EAU, YAZD	43
FIGURE 43 : LES BÂTIMENTS CONSTRUITS EN BRIQUE CRUE (SOURCE : IRANCARTO)	44
FIGURE 44 : LES QANAT EN IRAN (SOURCE : IRANCARTO)	44
FIGURE 45 : POSITION DES BADGIRS À L'ARRIÈRE DES FAÇADES	46
FIGURE 46 : POSITION DES BADGIRS FACE À LA DIRECTION DES VENTS DOMINANTS	46
FIGURE 47 : FAÇADE DE DEUX MAISONS FACE AU SUD POSSEDANT DES BADGIRS À L'ARRIÈRE	46
FIGURE 48 : HAUTEUR DES BADGIRS À YAZD SAISIE À PARTIR DU TOIT DES BÂTIMENTS	47
FIGURE 49 : DIRECTION DU VENT DANS LES RÉGIONS DU CENTRE (GAUCHE) ET DU SUD (DROITE)	47
FIGURE 50 : LE GOLFE PERSIQUE (SOURCE : IRANCARTO)	48
FIGURE 51 : LE GOLFE PERSIQUE (SOURCE : IRANCARTO)	48
FIGURE 52 : LES ÎLES DU GOLFE PERSIQUE (SOURCE : IRANCARTO)	49
FIGURE 53 : HYDROCARBURE ET ÉLECTRICITÉ DANS LE GOLFE PERSIQUE (SOURCE : IRANCARTO)	50
FIGURE 54 : BATHYMETRIE DU GOLFE PERSIQUE (SOURCE : IRANCARTO)	50

FIGURE 55 : LES ZONES DE PRODUCTION DE PETROLE DANS LE GOLFE PERSIQUE (SOURCE : IRANCARTO)	52
FIGURE 56 : PROPORTION DES TOURS PAR RAPPORT A LA « PIECE A BADGIR ».....	53
FIGURE 57 : EMLACEMENT DES BADGIRS DANS DIFFERENTES PARTIES DE LA MAISON.....	53
FIGURE 58 : DIRECTION DU VENT DOMINANT A BANDAR LENGEH.....	53
FIGURE 59 : MAISON A UN SEUL BADGIR. MAISON DE FEKRI, BANDAR LENGEH ; A DEUX BADGIRS.....	54
FIGURE 60 : BAADKESH (BADGIR HORIZONTAL)	54
FIGURE 61 : CAPTEUR HORIZONTAL DANS LE CORPS DU BATIMENT.....	54
FIGURE 62 : CAPTEUR HORIZONTAL AUTOUR DU TOIT	55
FIGURE 63 : VOLETS EN BOIS DES BAADKESH.....	59
FIGURE 64 : SHUFRAS, ELEMENT CRENELE AUTOUR DES TOITS	59
FIGURE 65 : TAREMI	60
FIGURE 66 : SHENASHIR	61
FIGURE 67 : FENETRE CONSTRUITE EN PLUSIEURS PARTIES DISTINCTES	61
FIGURE 68 : COUR CENTRALE ET FONTAINE (REGION CHAUDE ET HUMIDE)	62
FIGURES 69 : FENETRES DONNANT SUR LA COUR (REGION CHAUDE ET HUMIDE)	63
FIGURE 70 : MAISON A TROIS COURS.....	63
FIGURE 71 : CHANDAL (POUTRES EN BOIS), DANS LES RUELLES DE LA VILLE DE BUSHEHR.....	64
FIGURE 72 : TOITS PLATS REALISES AVEC DU CHANDAL, FEUILLES DE PALMIER ET DE TERRE D'ARGILE.....	64
FIGURES 73 ET 74 : PIERRE DE MER (SANGUEH MARJANI)	65
FIGURES 75 : MURS CONSTRUITS EN PIERRE DE MER, EPAIS DE 60 A 70 CM.....	65
FIGURES 76 : CHANDAL (BOIS POREUX).....	66
FIGURE 77 : TEXTURE CLAIRE DES MURS A BUSHEHR.....	66
FIGURE 78 : BADGIR CONSTRUIT SUR UNE MAISON	67
FIGURE 79 : EMLACEMENT DES BADGIRS DANS DIVERS AXES DE LA MAISON.....	67
FIGURE 80 : AB-ANBAR (RESERVOIR)	68
FIGURE 81 : YAKHCHAL (GLACIERE) DANS LA VILLE DE MEYBOD	69
FIGURE 82 : YAKHCHAL, COUPE ET PLAN	69
FIGURES 83 : QANAT	70
FIGURE 84 : CARAVANSERAIL SITUE EN PLEIN DESERT, ENTRE KASHAN ET YAZD, REGION DESERTIQUE.....	71
FIGURES 85 : BADGIR DE LA MOSQUEE DE BARDESTAN, LA REGION DU GOLFE PERSIQUE	72
FIGURE 86 : BIROON ET ANDAROOON, ET L'EMPLACEMENT DES BADGIRS.....	73
FIGURE 87 : PORTE A DEUX HEURTOIRS, FEMME ET HOMME	74
FIGURE 88 : PAROIS INTERNES EN FORME DE « X »	76
FIGURE 89 : FONCTIONNEMENT D'UN BADGIR PAR PRESSION D'AIR	76
FIGURE 90 : FONCTIONNEMENT DU BADGIR EN JOURNEE ET DURANT LA NUIT	78
FIGURE 91 : UTILISATION DE JARRES DANS LES CONDUITS D'AIR	80
FIGURE 92 : LES ELEMENTS QUI COMPOSENT UN BADGIR	81
FIGURE 93 : CAGE ET COLONNE D'UN BADGIR.....	81
FIGURE 94 : STRUCTURE DE BADGIR.....	81
FIGURE 95 : CONSTRUCTION D'UN BADGIR.....	82
FIGURE 96 : LAMES D'UN BADGIR.....	83
FIGURE 97 : CAGE DU BADGIR.....	84
FIGURES 98 : LAME EN FORME DE « X », VILLE DE YAZD	84
FIGURE 99 : LAME EN FORME DE « + », LA VILLE DE YAZD	84
FIGURE 100 : LAME EN FORME DE « H », VILLE DE YAZD.....	85
FIGURE 101 : ASPECT 3D DES LAMES EN FORME DE « H », VILLE DE YAZD	85
FIGURE 102 : LAME EN FORME DE « K », VILLE DE YAZD	85
FIGURE 103 : LAME EN FORME DE « I », LA VILLE DE YAZD	86
FIGURE 104 : DIFFERENTS TYPES DE LAMES	86
FIGURE 105 : BADGIR A UNE FACE.....	86
FIGURE 106 : BADGIR A DEUX FACES	87
FIGURE 107 : BADGIR A HUIT FACES	87
FIGURE 108 : BADGIR A QUATRE FACES.....	88
FIGURE 109 : TYPOLOGIE DES BADGIRS EXISTANTS AU 19 ^E SIECLE (SOURCE : SUSAN ROAF, 1988).....	88
FIGURE 110 : SCULPTURE DESTINEE A L'ESTHETIQUE DES CAGES DES BADGIRS, YAZD	89
FIGURE 111 : ÉLEMENTS SCULPTES SUR LES CAGES DES BADGIRS	89
FIGURE 112 : RANGÉE D'ÉLEMENTS DÉCORATIFS RÉPÉTÉS	89

FIGURE 113 : TOIT EN FORME DE DOME, MAISON A YAZD, CENTRE DESERTIQUE.....	90
FIGURES 114 : SARDAAB ET PANJ-DARI (PIECE A CINQ PORTES) A YAZD, MAISON TABATABAI	93
FIGURE 115 : TEMPERATURE ET L'HUMIDITE DE LA MAISON TABATABAI RELEVES EN AVRIL 2013	94
FIGURE 116 : FONCTIONNEMENT D'UN KOLAH FARANGUI	94
FIGURES 117 : KOLAH FRANGUI DE LA MAISON DE BOROOJERDI A KASHAN	95
FIGURE 118 : LA MAISON DE BOROOJERDI POSSEDE TROIS COURS	95
FIGURES 119 : PISCINES CONSTRUITES AU MILIEU DE LA COUR, MAISON DE LARIHA, YAZD.....	96
FIGURE 120 : TOIT DE LA MAISON DANS LE GOLFE PERSIQUE (GAUCHE) ET DANS LE CENTRE DESERTIQUE (DROITE).....	97
FIGURE 121 : BADGIR DE BANDAR LENGEH (REGION DU GOLFE PERSIQUE).....	97
FIGURE 122 : BADGIR DE LA VILLE DE YAZD (REGION CHAUDE ET ARIDE)	98
FIGURE 123 : LES LIEUX CHOISIS POUR NOS RECHERCHES SUR LE TERRAIN (SOURCE : IRANCARTO).....	100
FIGURE 124 : BADGIR DE SIRAF (REGION CHAUDE ET HUMIDE) FIGURE 125 : BADGIR DU JARDIN DE DOLAT-ABAD (REGION CHAUDE ET ARIDE).....	101
FIGURE 126 : MAISON TRADITIONNELLE A BUSHEHR FIGURE 127 : VILLAGE D'ABYANEH, SITUE EN HAUTE ALTITUDE.....	101
FIGURE 128 : LA VILLE DE SIRAF (GOLFE PERSIQUE)	102
FIGURES 129 : LA VILLE DE SIRAF, 2013.....	103
FIGURES 130 : MAISON DE NASURI ET SON BADGIR.....	104
FIGURE 131 : PLAN, COUPE ET FAÇADE DU BADGIR DE LA MAISON DE NASURI A SIRAF	105
FIGURE 132 : FONTAINE SOUS LE BADGIR DE LA MAISON DE NASURI LARGEUR = 1,14 M, LONGUEUR = 3,38 M, PROFONDEUR EST DE 1,53 M FIGURE 133 : DIMENSIONS DES FENETRES	105
FIGURE 134 : DIRECTION DU VENT DOMINANT A SIRAF	106
FIGURE 135 : DIFFERENCE DE TEMPERATURE ENTRE L'EXTERIEUR ET L'INTERIEUR DU BADGIR DE NASURI EN AVRIL 2013, SANS PRESENCE D'EAU DANS LA FONTAINE.....	107
FIGURE 136 : PIERRE AVEC LAQUELLE A ETE CONSTRuite LA MAISON DE NASURI	107
FIGURE 137 : STRUCTURE ET EPAISSEUR DES MURS ET PLANCHERS DE LA MAISON DE NSURI.....	107
FIGURE 138 : SALLE AUX LARGES OUVERTURES DE LA MAISON DE NASURI	108
FIGURE 139 : BADGIR DU JARDIN DE DOLAT-ABAD	109
FIGURE 140 : PLAN DE LA TOUR, ECHELLE EN CM.....	109
FIGURES 141 : PIECE A BADGIR DU JARDIN DE DOLAT-ABAD FIGURES 142 : PLAN DE LA MEME PIECE	110
FIGURE 143 : COUPE SUR LE BADGIR DU JARDIN DU DOLAT-ABAD. LA HAUTEUR DE LA SALLE ROYALE SE TROUVE A UN TIERS DE LA HAUTEUR DU BADGIR	110
FIGURE 144 : PISCINE CENTRALE DU JARDIN DE DOLAT-ABAD	112
FIGURE 145 : TABLETTE DE PIERRE RETROUVEE A BUSHEHR	113
FIGURE 146 : BADGIR DE LA VILLE DE BUSHEHR EN 1802, DISPARU A CE JOUR	113
FIGURES 147 : L'ANCIENNE VILLE DE BUSHEHR SE TROUVE SUR UNE PRESQU'ILE	113
FIGURE 148 : BUSHEHR, SES MAISONS ET SES BADGIRS, IL Y A 150 ANS (SOURCE : BUREAU DE L'URBANISME DE LA VILLE DE BUSHEHR) 114	
FIGURE 149 : LES TOURS DE PROTECTION DE LA VILLE, CONSTRUITES IL Y A PLUSIEURS SIECLES ; DISPARUES A CE JOUR (SOURCE : BUREAU DE L'URBANISME DE LA VILLE DE BUSHEHR).....	115
FIGURE 150 : RUELLE ETROITE.....	115
FIGURE 151 : GRANDES ET LARGES OUVERTURES A BUSHEHR	116
FIGURE 152 : VITRES COLOREES DES MAISONS TRADITIONNELLES A BUSHEHR	117
FIGURE 153 : CHATEAU DE MALIK A BUSHEHR	117
FIGURE 154 : JEU D'ECLAIRAGE ET HAUT PLAFOND DANS LA PARTIE OUEST DE LA VILLE	117
FIGURE 155 : JEU DE LUMIERE DES GRANDES SALLES A BUSHEHR.....	118
FIGURE 156 : VILLAGE D'ABYANEH.....	120
FIGURE 157 : ABYANEH, UN VILLAGE EN HARMONIE AVEC LA NATURE	121
FIGURE 158 : RUELLES EN PENTE ET ETROITES D'ABYANEH.....	121
FIGURE 159 : MATERIAUX DE CONSTRUCTION UTILISES A ABYANEH (ADOBE, PAILLE ET PIERRE)	121
FIGURE 160 : DES MAISONS SITUEES FACE A L'EST.....	122
FIGURE 161 : BALCONS ET TERRASSES D'ABYANEH	122
FIGURE 162 : CONSTRUCTION DE TERRASSES A ABYANEH.....	122
FIGURE 163 : STRUCTURE DES MAISONS A ABYANEH (TERRE, BOIS, PIERRE).....	123
FIGURE 164 : EXEMPLE D'EMBOITEMENT A MI-BOIS DES POUTRES	123
FIGURE 165 : ÉCRANS PERFORES PERMETTANT LE PASSAGE RAPIDE DU VENT AINSI QU'UN MINI BADGIR INSTALLE SUR UN RESERVOIR D'EAU (DROITE)	124
FIGURE 166 : ÉCRANS PERFORES ET CLAUSTRAS A ABYANEH ; SOURCE, ESPACE PERSAN ; PAGE 81.	124
FIGURE 167 : CREATION D'OMBRES ET D'ESPACES FRAIS (PHOTOS PRISES EN AVRIL 2013)	125
FIGURES 168 : MAQUETTE D'ESSAI EN SOUFFLERIE, ECHELLE 1/50.....	126

FIGURE 169 : UN RETOUR D’AIR TURBULENT.....	127
FIGURE 170 : LE PARCOURS DU VENT DANS UN BADGIR.....	127
FIGURE 171 : LES QUATRE CONDUITS DU BADGIR	128
FIGURE 172 : L’AIR CHAUD POSSEDE UNE MASSE VOLUMIQUE PLUS FAIBLE QUE L’AIR FROID.....	128
FIGURE 173 : BADGIR DE LA MAISON DE NASURI A SIRAF.....	129
FIGURE 174 : MOYENNE DE LA VITESSE DU VENT EN IRAN.....	129
FIGURE 175 : ANEMOMETRE UTILISE DURANT NOS EXPERIENCES SUR LE TERRAIN	130
FIGURE 176 : SOUFFLERIE DE LA VILLE-D’AVRAY	130
FIGURE 177 : DIMENSIONS DE LA SOUFFLERIE	130
FIGURE 178 : DESSIN DE LA MAQUETTE POUR LA SOUFFLERIE	131
FIGURE 179 : DESSINS DES DETAILS DE LA MAQUETTE	131
FIGURE 180 : PLAN ET COUPE DE LA TOUR ET DE LA PIECE A BADGIR (PIECE A VIVRE), ECHELLE 1/50.....	132
FIGURE 181 : PERCEMENT DES PAROIS.....	133
FIGURE 182 : COTES EXTERNES ET INTERNES DES PERCEMENTS	134
FIGURE 183 : ASSEMBLAGE DES MURS ET DES PAROIS DE LA MAQUETTE.....	135
FIGURE 184 : MAQUETTE FINALISEE	135
FIGURE 185 : MAQUETTE INSTALLEE DANS LA SOUFFLERIE.....	136
FIGURE 186 : APPAREIL DE MESURE ET D’ANALYSE DE LA SOUFFLERIE DE LA VILLE-D’AVRAY	136
FIGURE 187 : DETAILS DE L’APPAREIL DE MESURE	137
FIGURE 188 : RESERVOIR D’ALCOOL ET APPAREIL DE MESURE.....	137
FIGURE 189 : CHAQUE TUYAU BRANCHE SUR LE BADGIR EST EN MEME TEMPS BRANCHE SUR L’APPAREIL DE MESURE	137
FIGURE 190 : FONCTIONNEMENT DE LA SOUFFLERIE	138
FIGURE 191 : RELEVÉ DE LA COURBE REALISEE SUR L’APPAREIL DE MESURE A L’AIDE D’UN CALQUE.....	139
FIGURE 192 : ESSAIE SOUS DIFFERENTS ANGLES	139
FIGURE 193 : PLAN DU BADGIR, LORSQUE LA DIRECTION DU VENT EST A 30° ET A 0°.....	139
FIGURE 194 : IMAGE REPRODUITE D’APRES L’EXPERIENCE SUR LE TERRAIN A SIRAF, GOLFE PERSIQUE.....	145
FIGURE 195 : CHANGEMENT DE LA MASSE VOLUMIQUE DE L’AIR SELON LA TEMPERATURE AMBIANTE.....	146
FIGURE 196 : QUANTITES DE CHALEUR TRANSMISES PAR DIVERS MATERIAUX	146
FIGURE 197 : CALCUL DU COMPORTEMENT DU VENT A TOUS LES NIVEAUX DE LA TOUR PAR LES EQUATIONS DE NAVIER-STOKES	147
FIGURE 198 : DESSIN DE LA MAQUETTE, REALISEE AVEC GAMBIT, DESTINE A L’APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES.....	149
FIGURE 199 : SIMULATION DU DOMAINE DU BADGIR.....	149
FIGURE 200 : SOUSTRACTION DES MESHES.....	149
FIGURE 201 : BADGIR ET SON DOMAINE EN 3 DIMENSIONS.....	150
FIGURE 202 : LE CONDUIT A ASPIRE, LE B ET D EXTRAIENT PEU, LE C EST EN ETAT D’EXTRACTION MAXIMALE	151
FIGURE 203 : À 30°, LA VITESSE RESTE SUPERIEURE DANS LES CONDUITS B ET C.....	152
FIGURE 204 : LES CONDUITS A ET D RECEPTIONNENT, TANDIS QUE B ET C EVACUENT L’AIR	152
FIGURE 205 : COMPARAISONS DES ESSAIS EN SOUFFLERIE ET DES ANALYSES EFFECTUEES SOUS FLUENT.....	154
FIGURE 206 : CHEMINEE SOLAIRE VITREE A GEOMETRIE VERTICALE	155
FIGURE 207 : COMBINAISON DE CHEMINEE SOLAIRE, PANNEAU SOLAIRE ET CONDUITS D’EAU SOUTERRAINS	156
FIGURE 208 : INTEGRATION DE L’EOLIEN DANS UN BADGIR.....	157
FIGURE 209 : BADGIR DE LA MAISON DE NASURI	159
FIGURE 210 : BADGIR SITUE FACE A LA MER	159
FIGURE 211 : EXPERIMENTATIONS SUR LE TERRAIN, SIRAF, GOLFE PERSIQUE	160
FIGURE 212 : LAMES ET CONDUITS DU BADGIR DE SIRAF	160
FIGURE 213 : INSTALLATION DE LA MAQUETTE A LA SOUFFLERIE.....	161
FIGURE 214 : SOUFFLERIE DE LA VILLE-D’AVRAY, UNIVERSITE PARIS-OUEST	162

Glossaire

Badgir (persan) : capteur de vent.

Barjeel (arabe) : capteur de vent.

Caravansérail : entrepôts, magasins, ateliers et auberge combinés dans un seul bâtiment. Entouré de hauts murs, cet endroit a été toujours protégé avec une cour derrière une porte verrouillée. Il y avait des pièces en forme de cellule placées sous les arcades autour de la cour, telles que chambres individuelles ou petits appartements.

Hammam : bain public avec des intérieurs voûtés. Les dômes laissent entrer une lumière naturelle.

Iwan ou Ivan (en persan : Hall) : bordée sur trois côtés, c'est une salle voûtée munie de niches. Elle peut être construite de plusieurs mètres en hauteur. Les Sassanides ont souvent construit ces salles en forme de dôme (Palais Royal de Firuzabad), utilisé comme salle de trône, salon, ou destinées à l'enseignement et la prière.

Malqaf (arabe) : capteur de vent.

Mousharabieh (arabe) : structure construite en bois filtrant le rayonnement solaire.

Qa'a : salle de réception particulièrement répandue parmi les Mamelouks en Égypte.

Sardab : le sous-sol ou la cave, qui ne servent pas que pour conserver des provisions, mais aussi de salle de repos durant les mois chauds d'été.

Sarooj : Le sable, le calcaire et le sel sont broyés dans un procédé de fabrication complexe, mélangés à l'eau et au blanc d'œuf, séchés et cuits dans un four.

Talar : la salle se trouvant derrière le Tarma. Sa différence avec Iwan, c'est qu'elle n'était pas accessible directement depuis les chambres.

Tarma (Tarmeh en persan) : balcon ouvert avec des piliers.

Bibliographie

- Badawy, A. (1958). « Architectural Provision against Heat in the Orient ».
- Bahadori M.N. and Dehghani A., (2008). « Iranian Masterpiece of Engineering », Nashr Ketab Daneshgahi.
- Bahadori, M.N, (1985). “An Improved Design of Wind Towers for Natural Ventilation and Passive Cooling”.
- Bahadori, M.N, (1994). “Viability of wind towers in achieving summer comfort in the hot arid regions of the Middle East”.
- Bahadori. M.N, (1977). “Natural cooling in hot arid regions, Solar Energy Application in Buildings”, edited by A.A.M.
- Bahadori. M.N. « Thermal performance of adobe structure with domed roofs and moist internal surface, Solar Energy ».
- Beamon. S. and S. Roaf, (1990). « The Ice-houses of Britain », Routledge, London.
- Bonine. M. (1980). “Yazd and its hinterland : A Central Place system of dominance in the central Iranian plateau”, University of Marburg Geography and History Series, Heft 83.
- Coles. A and P. Jackson, (1996). “Tower House in Dubai”, Art and Architectural Research.
- Curzon, G. N. (1892). “Persia and the Persian question”, London: Longmans, Green & Co.
- Elmualim, A., (2004). “Modeling of Windcatcher for Natural Ventilation”, National Renewable Energy Laboratory, Denver, Colorado. USA.
- Elmualim, A., (2006). “Dynamic Modeling of a Windcatcher/Tower for Natural Ventilation, Building Service Engineering”.
- Fathy, Hassan, (1986). “Natural Energy and Vernacular Architecture”, Chicago: The University of Chicago Press.
- Francis Allard, (1998). “Natural Ventilation in Buildings: a design handbook”, European Commission Directorate General for Energy Altener Program.
- Ghobadian, V., (1998). “Climatic Analysis of the Iranian Traditional Buildings”, Tehran: Tehran University.
- Golijani. N., (2008). “Historiology of the Architecture of Iran”, Tehran University Publications.
- Habibi. M., (2007). “Intellectual Trends in the Contemporary Iranian Architecture and Urbanism”, Tehran, Cultural Research Bureau Publication.
- Hartl. M. (1989). “Qanats of the Najafabad Valley”.
- Honari. M. (1989). “Qanats and human ecosystems in Iran”.
- Ipatova V.M., (2012). « Convergence of Numerical Solutions of the Data Assimilation Problem for the Atmospheric General Circulation Model ».
- Kasmaei. M., (2004). “Climate and Architecture”, Khak Publications.
- Kiani. M., (2007). “Iranian Architecture (Islamic Period)”, Tehran, TEH: S.A.M.T. Publication.
- Lambton. A. K.S. (1989). “The origin, diffusion and functioning of the qanat”.
- Madanipour. (1996). “Design of Urban Space: An inquiry into a socio-spatial process”. John Wiley, Chichester, UK.
- Mahmoudi.M, (2005). “Wind tower as a natural cooling system in Iranian architecture”.
- Mahmoudi.M, (2007). “Wind catcher symbol of the image city in Yazd”.
- Mahmoudi.M, S.M. Mofidi, (2007). « Analysis on typology and architecture of wind catcher and finding the best type ».
- Meamarian. G, (1996). “Iranian Architecture”, Tehran: University of Science and Technology Press.
- Meir. I. and S. Roaf (2003). « Between Scylla and Charibdis: In search of the sustainable design paradigm between vernacular and Hi-Tech ».

Memarian. G., (2001). "Introduction to Iranian Architecture", Iran University of Science and Technology Publications.

Michel Wuttman, (2001). "The Qanats of Ayn-Manâwîr, Kharga Oasis, Egypt".

Moradi. A., (2008). "Twelve Lessons on Restoration", Center for Architecture & Urban Studies and Restoration Publications.

Nejad A.T., (2011). "Storm of Inattention against Windcatchers in Yazd", Jam e Jam Newspaper.

Nicol, J.F. and Roaf, S. (2007). "Adaptive thermal comfort and passive architecture", in Santamouris, M. (ed) *Advances in Passive Cooling*, London.

Niroumand, H., (2008). "Thermal Insulating", Naghoos, Tehran, Iran, p. 40–54 Oxford.

Roaf, S. (1990). "The significance of thermal thresholds in the performance of some traditional technologies", *Proceedings of the North Sun Conference*, Reading, Pergamon.

Roaf, S. (1990). "The traditional technology trap", *Dialog*, vol. 25, pp. 26–33.

Roaf, S. (1992). « The problems of air conditioned buildings, *Proceedings of the World Renewable Energy* ».

Roaf, S., (1982). "Wind Catchers, Living With the Desert", (ed: Beazley, E.), England: Air & Philips press.

Roaf, S. (1989). "The Windcatchers of Yazd", Phd, Oxford Polytechnic.

Roaf. S. (1989). "Settlement form and qanat routes in the Yazd province, Kariz and Khattara", edited by P. Beaumont, M.Bonine and K.Mclachlan.

Roaf. S. (2008). "designing for 3 degrees of climate change", *Proceedings of the SBO8 Conference*.

Roaf. S. (2008). "The Traditional Technology Trap: More lessons from the Windcatchers of Yazd", *Proceedings of the PLEA Conference*, Dublin, october.

Roaf. S. (2009). "Adapting Buildings and Cities for Climate Change", Architectural Press, Oxford.

Roaf. S., A.Horsley and R. Gupta, (2004). « Closing the Loop: Benchmarks for Sustainable Buildings ».

Roaf. S., M.Fuentes and S. Thomas, (2007). "Ecohouse, a Design Guide", Architectural Press.

Roaf.S, (1990). « The significance of thermal thresholds in the performance of some traditional technologies ».

Rutstein, H., Kroll, J. "Footsteps of Marco Polo".

Sanjoy Mazumdar. "The zoroastrian house and the islamic house, a comparative cultural analysis". University of California, Irvine.

Sir John Chardin (Jean-Baptiste Chardin), Ronald W. Ferrier. "A Journey to Persia": Jean Chardin's portrait of a seventeenth-century empire.

Stack, E. (1882). "Six months in Persia".

Tavassoli, M., (1974). "Architecture of hot arid climate", Tehran: Tehran University.

Thundil Karuppa Raj R. and Ramsai R. "Numerical study of fluid flow and effect of inlet pipe angle in catalytic converter using CFD".

Vetr M.G., (2006). "Investigating Vulnerability of the Tallest Windcatcher around the Globe, Yazd Dolat-Abad garden against Wind and Earthquake", *First International Conference on Seismic Retrofitting*.

Wolfgang R., (1984). "Turbulence Models and their Application in Hydraulic": A state-of-the art Review. International Association for Hydraulic Research.

Zomorshidi. H., (1988). "Vault and Arch in Iranian Architecture", Keyhan Publication.

Zomorshidi. H., (2006). "Iran, Architecture-Understanding of Iranian Masonry Construction Materials", Azadeh Publications.

Zomorshidy. H, (1999). "Iranian architecture", Tehran, edition Amir Kabir.

Enquête sur les Badgirs de Dubaï : A.M El-Shorbagy, (2001), Professeur en Architecture, Effat University.

Webographie

<http://www.irancarto.cnrs.fr>

<http://www.warterhistory.org>

<http://www.iranicaonline.org>

<http://www.mhu.gov.ma/>

<http://www.worldenergy.org/>

http://siteresources.worldbank.org/DATASTATISTICS/Resources/mna_wdi.pdf

<http://www.epa.gov/greenbuilding/pubs/about.htm>

<http://www2.tavanir.org.ir/info/stat84/sanatfhtml/s6.htm>

<http://www.moe.gov.ir/>

<http://www.saba.org.ir/fa/home>

<http://archnet.org>

<http://www.mecaflux.com/Bernoulli.htm>