Morphogenèse des moulins à vent d'Iran, techniques de gestion du vent de manière architectonique

Kambiz Moshtaghe Gohari

▶ **To cite this version:**

Kambiz Moshtaghe Gohari. Morphogenèse des moulins à vent d'Iran, techniques de gestion du vent de manière architectonique. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1079 . tel-01970718

HAL Id: tel-01970718

https://theses.hal.science/tel-01970718

Submitted on 5 Jan 2019

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.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

malaquais

THÈSE

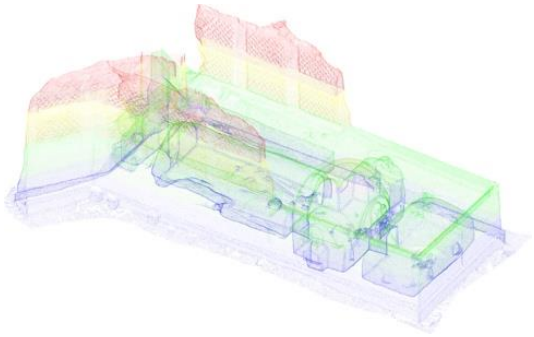
En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS-EST

Discipline: *Architecture*

Présentée par : *Kambiz MOSHTAGH-GOHARI*

Soutenu Le : 12 Janvier 2018



Morphogenèse des moulins à vent d'Iran,

Un technique de gestion du vent de manière architectonique

JURY :

M. Maurizio Brocato, Professeur à l'ENSA Paris-Malaquais, Directeur

M. André Guillèrme, professeur émérite au CNAM, Rapporteur

Mme. Antonella Mastrorilli. Professeur à l'ENSA Lille, Rapporteur

M. Seyed-Amir Mansouri, professeur à l'université de Teheran, Examinateur

M. Bruno Chanetz, directeur de recherche ONERA, Examinateur

ECOLE DOCTORALE VILLE ET ENVIRONNEMENT

Laboratoire de Recherche : G.S.A. Géométrie, Structure et Architecture, l'École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais

A la *mémoire* de ***Joël Sakarovitch***.

Remerciements

Je tiens à remercier le Professeur ***Maurizio Brocato***, qui a dirigé cette thèse avec une attention remarquable.

Je tiens à remercier également tous ceux qui m'ont reçu et aidé en Iran pour la collecte des données et l'élaboration de ce travail.

Table de Contents

Remerciements **3**

Introduction générale **10**

Un point de vue architectural **11**

Problématique **12**

Méthodologie **15**

Partie I **18**

Chapitre I **19**

Moulin à eau à axe vertical **19**

Introduction **20**

Le moulin à eau, son origine et sa diffusion **20**

Le moulin à eau iranien, un moulin à eau à axe vertical **28**

Le rôle du moulin à eau à axe vertical dans l'invention du moulin à vent **32**

Typologie des moulins à eau à axe vertical iraniens **34**

Moulin à eau à axe vertical du Khorasan **38**

Architecture de Moulin à eau à axe vertical du Khorasan **41**

Entrée **44**

Espace intérieur **46**

Canalisation et réservoir d'eau **47**

Meule et le mécanisme technique **50**

Une recherche sur les Moulins à eau à axe vertical du Khorasan **57**

Chapitre II 68

Sistan 68

Sistan en Iran 69

Sistan, géographie physique 71

Hirmand et Hamoun 73

Le vent de 120 jours 77

Chapitre III 81

Moulin à vent ..... Error! Bookmark not defined.

L'ingénierie du vent et le savoir-faire de l'Antiquité 82

L'origine d'application du vent dans les mécanismes techniques selon les historiens 83

La roue éolienne une technologie parallèle d'application du vent 96

Le trace de la roue éolienne au Sistan 103

Une recherche sur terrain sur les puits du Sistan 107

Les puits de la région de Zahak 111

Les puits de la région de Hirmand 118

Méchanisme probable pour la roue d'irrigation du Sistan 126

L'application du vent pour déplacement des collines de sable 139

Quelques remarques sur le dessin d'Al-Dimashqi 140

Diffusion de moulin à vent 142

Trois hypothèses existants sur la diffusion de moulin à vent en Europe 145

Moulin a vent et le Royaume de Sicile 148

Une hypothèse probable sur l'apparition du moulin à vent en europe 155

Une nouvelle ère de l'application de moulin à vent à axe vertical en Iran et le destin d'une invention technique au plateau d'Iran 157

Chapitre IV 175

Le moulin à vent à axe vertical persan 176

Architecture 176

Espace architectural du moulin à vent à axe vertical 179

Rez-de-chaussée 179

Premier étage 181

Construction 182

Mécanisme technique 186

Détails du mécanisme technique du moulin à vent à axe vertical 194

***Sarpol* ou *sargazak* 194**

***Kaleh-sur* ou *kaloussi* 195**

***Qalandarak* 196**

***Tirpol* ou *tir-e amoudi* 199**

***Parreh*, *bazou* (*bahou*) et *godg-bazou* 201**

La meule 206

***Navdouni* et *asbak* 209**

***Tavarreh*, *mikh*, *mouchteh*, *kharak* et *gisse* 210**

Fabrication 221

Mise en marche d'un moulin à vent 222

Affiler une vieille meule ou *chekange* 223

Réglage de la meule lorsque le vent souffle à différentes vitesses 224

Chapitre V 225

Typologie 225

Une typologie pour la classification morphologique 226

Le premier type, disparu, ou premier type du Sistan 226

La version syrienne du premier type de moulin a vent 228

Le troisième type, type « Hérat » ou type rond 229

Le quatrième type, type Khorasan ou type en chaîne 233

Le cinquième type, type à deux ouvertures du Sistan 236

Chronologie à partir des types de moulins existants..... 238

Notre chronologie, fondée sur des éléments de preuve architectoniques, techniques et historiques 241

Partie II..... 243

Analyse et Modélisation 243

Chapitre VI..... 244

Analyse Morphologique 244

Une méthodologie comparative ..... Error! Bookmark not defined.

Morphologies de l'architecture des moulins à vent persan. Error! Bookmark not defined.

Géométrie constructive des moulins à vent persan ..... Error! Bookmark not defined.

Chapitre VII..... 279

Analyse Numérique et Modélisation..... 279

Introduction..... 280

Définition de la vitesse du vent..... 280

Pression du vent..... 280

Vitesse de base du vent 280

Modèle géométrique 281

4 paramètres CFD..... 283

Résultats de la simulation CFD - pression sur les murs 289

Pression calculée à V = 110 km/h 290

As-Hozdar-corp 295

As-Shakiban-Corp 300

Pression calculée à V = 30 km/h 304

As-Hozdar-corp 309

As-Shakiban-Corp 313

Pression calculée à V = 14 km/h 317

As-Neh-Corp 317

As-Shakiban-Corp 323

Résultats de simulation CFD - pression sur les lames 328

Optimisation de la position de la lame Hozdar 333

As-Hozdar-Corp avec lames étendues 337

Pression calculée à V = 30 km/h 343

Pression calculée à V = 14 km/h 349

As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées 356

Pression calculée à V = 110 km/h 356

Pression calculée à V = 30 km/h 362

Pression calculée à V = 14 km/h 368

Chapitre VIII 375

Fabrication et Réalisation 375

Introduction 376

Préparation de la documentation sur le terrain et bibliographique 378

Etude de Cas ; Le moulin à vent N° 1 du Hozdar Error! Bookmark not defined.

Scan Laser de Moulins à vent No 1 du Hozdar ... Error! Bookmark not defined.

Plans et façade-coupe de Moulins à vent N°1 du Hozdar 393

Chantier de l'année 2004 ..... Error! Bookmark not defined.

Chantier de l'année 2007 ..... **404**

Chantier de l'année 2016 .....Error! Bookmark not defined.

Une caractéristique particulière de meule des moulins à vent du Sistan .....Error! Bookmark not defined.

Le plan prospectif .....Error! Bookmark not defined.

Conclusion **421**

Une théorie sur l'origine et la diffusion du moulin à vent **422**

Annex **436**

Moulins à vent No 2 du Hozdar **437**

Scan Laser de Moulins à vent No 2 du Hozdar **447**

Moulins à vent No 3 du Hozdar **462**

Scan Laser de Moulins à vent No 3 du Hozdar **466**

Moulins à vent No 1et 2 du Qaleh-Rostam (Jumels) **483**

Scan laser des Moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam (Jumels) **489**

Moulins à vent No 3 du Qaleh-Rostam **503**

Scan laser de Moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam **507**

Notes **517**

Sources bibliographiques **527**

Introduction générale

« Le passé est un pays étranger : ils font les choses différemment là-bas »[1]

L.P. Hartly

Nous avons souhaité nous pencher sur l'histoire des premiers moulins à vent. Plusieurs raisons à cela : une grande partie de l'histoire du moulin à vent demeure obscure et entre autres ; deux choses sont mal connues : la première concerne la date où le moulin à vent à axe vertical apparu pour la première fois en Iran[2] (Perse antique), et la deuxième son évolution, les différents types de cette invention. Dernière raison justifiant la nécessité de notre recherche : il n'y a pas encore d'hypothèse claire permettant d'établir un lien entre les différents types des moulins a vent a axe vertical et présentant une chronologie datée et documentée de l'évolution des types différents, en particulier le moulin à vent à axe vertical iranien.

Les sources d'énergie comme le vent – et le moulin à vent est considéré comme une technologie médiatrice entre le vent et la société humaine. *R. J. Forbes*[3], l'historien de la technologie allemand, défendait l'idée que les « moteurs primaires » étaient la « clé de voûte de la technologie ». En utilisant comme critère ces « moteurs primaires », il distingue cinq périodes dans l'histoire de la technologie de l'humanité : l'ère de l'utilisation du muscle d'humain, l'ère de l'utilisation du muscle animal, l'ère de

---

[1]- **HARTLEY, Leslie Poles**. (30 Décembre 1895 au 13 Décembre 1972), connu sous le nom L. P. Hartley, était une romancière britannique et auteur de nouvelles. Ses romans les plus connus sont la trilogie ***Eustache*** *et* ***Hilda*** *(1947)* et ***The Go-Between*** *(1953)*. Ce dernier a été transformé en un film 1970, réalisé par Joseph Losey avec un casting de stars, dans une adaptation de Harold Pinter. Sa première phrase: «*The past is a foreign country: they do things differently there* ", est devenue presque proverbiale.

[2]- En 1934, Reza Pahlavi, premier roi de la dynastie Pahlavi fondée en 1925, demanda aux représentations diplomatiques étrangères d'appeler son pays « Iran » au lieu de « Perse ». Le nom « Perse » est un nom historique qui était utilisé par les occidentaux pour nommer l'Iran depuis la Grèce antique.

[3]-**(en)FORBES, R. J**. «*Food and Drink* », Edition Charles Singer et al, "*History of Technology"*, 2: pp 46-103, 3: pp 1-26.

l'énergie fournie par l'eau, l'ère de l'énergie créée par la vapeur et l'ère de l'énergie atomique. Dans sa classification, Forbes n'a pas inclus l'ère de l'énergie du vent ; nous verrons que cette ère est le chaînon manquant entre l'ère de l'énergie hydraulique et l'ère de l'énergie fournie par la vapeur. Avec l'utilisation de l'énergie éolienne, cette ère devient par ailleurs la plus longue de l'histoire de l'utilisation des énergies.

Parmi les technologies connues en matière de production d'énergie dans l'Antiquité figure la technologie du moulin à vent, qui a des liens directs avec les deux ères longues et importantes en matière d'utilisation de l'énergie : l'ère de l'énergie hydraulique et l'ère de l'énergie fournie par la vapeur.

Malgré tout ce que l'on sait sur l'histoire du moulin à vent européen, l'origine et la diffusion de cette invention technique ne sont pas claires. *Maurice Daumas*[4] écrit que : « L'origine et la diffusion du moulin à vent posent encore aux historiens de nombreux problèmes et de non moins nombreuses énigmes ». Il manque une chronologie des divers types de moulins à vent dans les diverses civilisations ; par conséquent, une théorie présentant cette diversité architecturale et technique dans le plateau d'Iran fait défaut encore aujourd'hui. La diffusion du moulin à vent dans le monde antique, y a compris l'Iran, pose également question. Une partie importante de cette thèse sera donc consacrée à répondre à ces questions, particulièrement en Iran, dans le but d'éclaircir autant que possible l'origine et la diffusion de cette invention architecturale et technique.

Un point de vue architectural

Le mécanisme technique des différents types de moulins à vent et leur évolution est problématique. Mais comme certains d'autres machines et mécanismes techniques que l'on connaît aujourd'hui, la forme physique joue un rôle essentiel en matière de fonctionnalité du système technique du moulin à vent. Il faut noter que, dans le cas des mécanismes similaires qui ont un lien direct avec des fluides comme l'air et l'eau, l'enveloppe du bâtiment et coque architecturale deviennent très importants. Dans le cas des moulins à vent iraniens, cet aspect fonctionnel a été étudié par des architectes et des techniciens anciens. Ces études permettent de constater la présence d'organes architectiniques variés, ceux qui ont évolué comme des différentes parties de ce

[4]- **DAUMAS, Maurice.** « *Histoire générale des techniques* », Presse universitaire de France, Paris, p 34

mécanisme technique qui augmentent le rendement du système. A cause de cette dépendance bilatérale, nous ne pouvons pas analyser la morphogénèse des différents moulins à vent sans avoir une connaissance du mécanisme technique des moulins à vent à axe vertical et de l'histoire de leur évolution physique. Nous avons également besoin d'une documentation précise sur les différents types de moulins à vent à axe vertical ; cette documentation devrait nous permettre d'analyser les différents organes architecturaux qui ont un rôle dans le fonctionnement et dans l'augmentation de l'efficacité et du rendement du système technique du moulin. Notre étude sur la diffusion de cette invention nous présente également l'adaptation et la modification de la forme architecturale et morphologique des moulins à vent à axe vertical en fonction de la géographie et du climat des régions où ils se trouvent.

L'analyse morphologique et architectonique de différents types de moulins à vent à axe vertical nous permettra par ailleurs de comparer les différents types de moulin à vent à axe vertical sur le plateau iranien, de classer les moulins à vent existants et de fournir une chronologie claire des différents types de structures apparues au cours de l'histoire. D'autre part, cette étude peut considérer comme une preuve tangible soutenant notre hypothèse sur l'histoire du moulin à vent à axe vertical. Grâce à cette analyse morphologique et architectonique , nous pourrons enfin étudier la géométrie, les méthodes de construction, les formes les plus abouties et l'évolution tardive du moulin à vent iranien.

Problématique

Aujourd'hui, nous pouvons trouver tellement de différences architecturales et techniques entre les types actuels de moulins à vent du Khorasan et du Sistan que certains de ces moulins peuvent se présenter comme des *«nouvelles genres »*. Dans le cas du Sistan, cela est évidemment justifiable.

Si les historiens s'accordent à dire que l'Iran est le territoire natal des moulins à vent, ils n'expliquent cependant jamais, ni comment cette invention a vu le jour, ni les développements techniques nécessaires à cette création, ni le nombre de décennies qu'il a fallu pour arriver à la forme la plus aboutie de ces moulins à vent. D'autre part, il existe deux types de moulins à vent verticaux, selon que les pales sont placées au-dessous ou au-dessus de la chambre de la meule. Si les historiens occidentaux présentent ces deux types de moulins à vent, ils n'en donnent pas de chronologie et n'explicitent pas les

rapports entre eux. Or, tout autant que le renversement de l'axe qui s'est opéré en Europe, le passage des pales du dessous au-dessus de la chambre de la meule est fondamental dans l'histoire des innovations techniques des moulins à vent à axe verticale.

Aujourd'hui, d'après certains historiens, et compte-tenu des preuves existant sur les sites ainsi que de la situation géographique, climatique et économique des régions qui ont des moulins à vent en Iran, nous pouvons montrer que le Sistan est le territoire natal du moulin à vent à axe vertical. Voici nos hypothèses actuelles :

1. L'idée d'utiliser le vent comme source d'énergie dans un mécanisme technique pourrait avoir été appliquée pour la première fois au Sistan vers le II^{e} siècle sur le moulin à vent. Les inventeurs se sont dans doute directement inspirés du moulin à eau iranien du Khorasan, doté d'une roue à axe vertical. Ce mécanisme clé a également donné naissance à la roue éolienne.
2. C'est le moulin à vent à pales inférieures du Sistan qui expliquerait le passage du moulin à eau iranien au moulin à vent iranien. Ce moulin à vent à pales inférieures serait « le chaînon manquant », expliquant le passage du moulin à eau gréco-iranien au moulin à vent iranien. En effet, le moulin à eau iranien est également à axe vertical, contrairement au moulin à eau romain. Le passage du moulin à eau au moulin à vent aurait alors, dans un premier temps, uniquement consisté à modifier le fluide moteur, sans toucher au mécanisme même qui permet le transfert de l'énergie. La connaissance des deux mécanismes clés que sont le moulin à eau à axe vertical et la roue éolienne a permis l'apparition du moulin à vent à axe vertical en Iran.
3. De notre point de vue, le moulin à vent à pales inférieures pourrait être apparu dans un premier temps au Sistan vers la fin du II^{e} siècle. Il y a une chronologie claire entre les deux types de moulins à vent verticaux, le moulin à vent à pales inférieures précédant celui à pales supérieures.
4. La roue éolienne avait été utilisée pour puiser l'eau du puits mère (*madar-tchâh*) de la chaîne de puits ; ces puits avaient formé un système d'irrigation particulier dans l'ancien Sistan. L'apparition de la roue éolienne peut expliquer l'émergence d'une société féodale dans la région, société dont la famille Souren-e Pahlo est la plus illustre représentante. Selon nous, cette époque est la seule ère de féodalisme en Iran. Sous les Arsacides, les féodaux exercèrent un pouvoir politique sans précédent sur la société iranienne. Ils

perdirent leur pouvoir à la suite de la révolte de Mazdak[5], sous la dynastie suivante des Sassanides.

5. Du point de vue du mécanisme technique, nous avons trois différents types de moulins à vent à axe vertical ; du point de vue de leur morphologie architecturale, nous en avons quatre. La chronologie qui lie ces différent types est claire, en particulier celle concernant le moulin à vent à pales inférieures, précédant celui à pales supérieures. La modification de la position des pales, une correction technique, une évolution architecturale, nous donne la possibilité de les classer différemment. Mais dans chaque type de classification, il y a au moins deux types principaux qui ont pu être inventés au Sistan : le premier type et le dernier.
6. Il y a très probablement un rapport analogique entre les différents types de moulins à vent à axe vertical en Iran, qui les situe dans une chronologie. Mais les différents types sont bien localisés selon leur fonction et leur rendement idéal face au vent, et ont donc chacun une forme qui leur est propre.
7. Le vent de 120 jours étant plus rapide au Sistan qu'au Khorasan, la taille des moulins à vent du Sistan a été agrandie et surtout deux trous ont été percés dans leur façade nord. Il est possible que ce nouveau progrès dans l'architecture des moulins à vent à axe vertical ait augmenté leur rendement.
8. De tous les types de moulins à vent iraniens, le type de moulin à vent qui se trouve aujourd'hui uniquement au Sistan peut être considéré comme le dernier type et le type le plus sophistiqué des moulins à vent à axe vertical. C'est seulement sur ce genre de moulin à vent que nous constatons la présence d'une double entrée pour le vent sur la façade nord et d'une meule en terre cuite, et que nous remarquons que la forme et la taille sont différentes par rapport aux autres moulins à vent à axe vertical.
9. Le terme « réservoir à grain de l'Iran » apparaît deux fois à propos de la région du Sistan : une fois à la période sassanide, une fois à la période séfévide. Nous défendons l'idée selon laquelle l'apparition de la roue éolienne et du moulin à vent à la période sassanide et l'évolution du moulin à vent de type Khorasan au Sistan (qui a donné naissance au

[5] Notre étude comparée entre l'histoire ancienne et l'histoire des techniques au Sistan est nécessaire car de tels systèmes techniques d'avant-garde ont normalement des effets socio-économiques. Dans un cas comme celui de la roue éolienne, fabriquée en bois, on peut comprendre l'absence d'indices techniques et archéologiques grâce à l'histoire comparée, en nous penchant notamment sur les événements socio-économiques, voire politiques de la période.

moulin à vent à entrée double) eurent un rôle déterminant dans le développement agricole de ce territoire, d'où ce terme de « réservoir à grain ».

10. L'idée d'utiliser le vent pour les besoins agricoles et industriels, et surtout l'idée de fabriquer des moulins à vent s'est propagée dans le monde antique grâce au moulin à vent à axe vertical persan (iranien) et à la situation géographique de l'Iran dans le monde antique. La diffusion du mécanisme technique s'est accélérée grâce au dynamisme de l'empire islamique et de l'empire mongol d'une part, et grâce à l'État normand de Sicile d'autre part.

Méthodologie

Ce travail de recherche étant interdisciplinaire, nous empruntons la méthodologie utilisée dans les différents domaines qui lui sont liés : l'archéologie, l'architecture et l'histoire. La méthodologie que nous choisissons de suivre ici s'articule autour de trois parties, reliées par un lien logique.

La première partie traite de la documentation et de la datation. Nous souhaitons établir une chronologie précise qui pourrait compléter les connaissances sur le passé des moulins à vent. Notre objectif pour cette partie du projet, est de :

1. Rassembler les données historiques existantes sur le moulin à vent persan ; ces données seront tirées de sources primaires mais aussi d'ouvrages écrits par des géographes arabes entre les IX^{e} et XIII^{e} siècles. Elles nous aideront à émettre une hypothèse sur la création et la diffusion du moulin à vent à axe vertical dans le monde antique.
2. Présenter une étude morphologique et une documentation fournie sur les moulins à eau du Khorasan et sur les puits d'irrigation du Sistan.
3. Mener une campagne de relevés très précis sur le terrain pour les moulins à vent verticaux.
4. Rassembler une documentation complémentaire en Iran dans les pays voisins (pays situés autour du plateau iranien, comme l'Afghanistan).
5. Obtenir une classification et une datation des différents genres de moulins à vent selon une étude historique et des analyses morphologiques et techniques.

Dans la deuxième partie, nous utiliserons les données collectées pour proposer une analyse morphologique et technique. Avec les données collectées sur le terrain, notre objectif pour cette partie du projet sera de :

1. Réaliser une analyse morphologique et technique pour classer les différents types de moulins à vent selon leurs caractéristiques et leurs détails uniques.
2. Présenter une analyse géométrique basée sur nos relevés afin de trouver la géométrie constructive de chaque type de moulins à vent à axe vertical.
3. Procéder à une analyse aérodynamique des principaux types de moulins à vent à axe vertical afin de les comparer du point de vue de la coque architectonique et de la fonction de la pale.

Dans la troisième partie, nous nous concentrerons sur la modélisation et la réalisation d'un projet. Notre objectif pour cette partie sera de :

1. Modéliser le mécanisme technique d'une roue éolienne pour montrer le rapport entre ce mécanisme et le moulin à vent persan.
2. Réaliser le mécanisme technique d'un moulin à vent du Sistan afin de l'installer dans l'un des six moulins à vent qui subsiste au Sistan.
3. Mener à bien le projet de restauration d'un moulin à vent du Sistan et le mettre en fonction au cours de la période du vent de 120 jours - une première depuis la disparition de ce mécanisme au Sistan.

La première partie de cette thèse est donc consacrée à l'histoire du moulin à vent à axe vertical et à ses différents types en Iran et dans les pays voisins.

Il nous faudra dater chaque type de moulin à vent le plus justement possible pour aboutir à une chronologie datant l'invention. Pour ce faire, nous pourrons profiter de la présence des archéologues qui effectuent des fouilles au Sistan.

La deuxième partie est consacrée à l'analyse morphologique et architectonique de ces types de moulins à vent verticaux, du premier type au dernier type. Cette analyse pourra peut-être nous expliquer les différences architectoniques existantes, surtout celles concernant les divers détails qui se sont ajoutés à la base commune des moulins à vent. Dans cette partie nous allons classer les détails, les organes et les techniques complémentaires, en représentant la base principale du moulin à vent à axe vertical. Cette

analyse nous fournit également les informations nécessaires pour comparer les différents types selon leur enveloppe. Ce travail nous permettra de créer une chronologie de la morphologie de ces moulins à vent et nous aidera à justifier notre chronologie historique.

La troisième partie de cette thèse sera consacrée aux travaux de chantier. Nous participons à des chantiers de restauration de moulins à vent du Sistan depuis 2006. Le premier chantier a eu lieu en septembre de cette même année, sur le grand moulin à vent de Hoz-Dar. Le deuxième chantier a eu lieu en 2009 ; il a été consacré à la restauration du petit moulin à vent de Hoz-Dar. Depuis le début de cette thèse, nous avons pu revenir plusieurs fois dans la région pour collecter des informations. Depuis l'hiver 2015, nous fournissons les matériaux et les équipements nécessaires à un nouveau chantier. Ce chantier, qui a pour objectif la mise en place du système technique du petit moulin à vent, nous permet de vérifier si nos informations et nos travaux sur les moulins à vent en Iran peuvent permettre à l'un de ces moulins à vent abandonnés de fonctionner.

Notre connaissance du système technique et de l'architecture de ces moulins à vent peux nous aider à mettre enfin en fonction le premier moulin à vent du Sistan, pays natal de ce mécanisme, après des décennies d'abandon. D'après les études que nous avons menées, il y a au moins un dizaine de moulins à vent abandonnés et démolis dans différentes régions du Sistan. L'un des fruits de notre thèse pourrait être le savoir-faire acquis grâce à notre travail de recherche. Ce savoir-faire pourrait permettre la restauration et la mise en fonction des moulins à vent du Sistan et de leur roue éolienne. Il pourrait également appuyer le dossier de candidature de ce mécanisme technique au patrimoine mondial de l'UNESCO.

Partie I

Genèse

Chapitre I

Moulin à eau à axe vertical

Introduction

« Les inventions fondamentales paraissent très souvent incroyablement simples. Depuis l'époque néolithique au moins les hommes ont tenté d'utiliser à des fins pratiques les mouvements de l'air atmosphérique »[6] .

Mais la question est la suivante : comment les habitants d'un lieu sont-ils parvenus à inventer un mécanisme comme le moulin à vent ? Comme il n'existait évidemment pas de politique de recherche scientifique et d'appareils tels qu'on les connaît aujourd'hui, chaque nouveau mécanisme mettait un temps considérable avant de voir le jour et était normalement créé sur la base des inventions précédentes. Si, dans l'Antiquité, les sciences ne connaissaient pas le développement qu'elles connaissent aujourd'hui, les populations locales avaient néanmoins un savoir « global » sur le climat et leur territoire, qui leur donnait la possibilité d'intervenir successivement dans la nature de leur périphérie.

Le moulin à eau à axe vertical a très probablement existé à l'ouest de l'Iran vers la fin du I^{er} siècle. En Iran, la diffusion de ce mécanisme dépendait de la situation agricole et topographique des différentes régions.

Le moulin à eau, son origine et sa diffusion

En général, on rencontre trois types de moulins à eau : le moulin à eau à axe vertical, le moulin à eau à axe horizontal et le moulin à eau flottant. L'origine du moulin à eau à axe vertical est le moulin à main roulant. Ce type de moulin à eau se trouve plutôt dans des régions montagneuses et en altitude, et là où coulent de petits cours d'eau ou des fontaines. La différence d'altitude permet à l'eau en quantité limitée de trouver la force nécessaire pour faire tourner la roue du moulin. C'est une petite roue horizontale qui est connectée à la meule supérieure par un axe vertical et tourne grâce à la force de l'eau. Le moulin à eau à axe vertical n'est pas un mécanisme efficace : son rendement est le

---

[6]- **WHITE Lynn**, 1980, p. 46

plus bas de tous les types de moulins à eau : l'efficacité de ce type de moulin à eau est de 5 à 15 %. (figure 1-1).

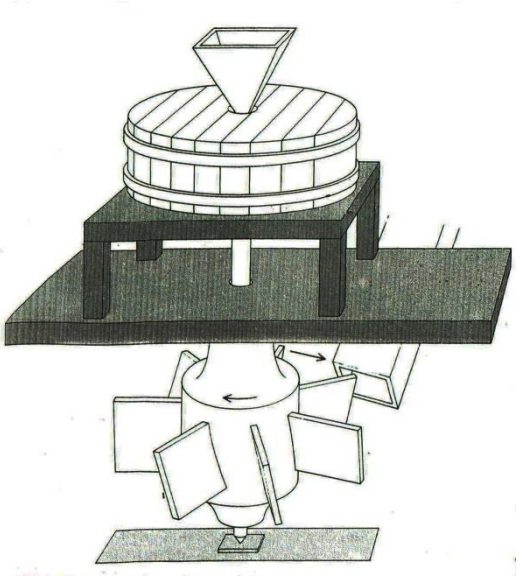


Figure 1-1 : le moulin Norois, roue à eau munie d'une rangée horizontale de palettes, par opposition aux roues vitruviennes comme celle de Poncelet (qui avaient leurs palettes disposées en rangée verticale) fut l'ancêtre des moteurs hydrauliques à axe verticale et grande vitesse de rotation qui furent mis en service en Europe au cours du XVIIIe siècle. La roue représentée ici actionnait la meule d'un moulin à blé.

Source : Norman SMITH[7].

Les principes du moulin à eau à axe horizontal, ont été perfectionnés au début de Ie chrétienne par l'ingénieur-architecte romain *Marcus Vitruvius Pollio*[8]. « On trouvait la roue classique à axe horizontal, appelée roue vitruvienne, du nom de Marcus Vitruvius Pollio, ingénieur et architecte romain du Ier siècle avant J.-C. Cette roue avait évolué pour donner trois types classiques : la roue « en-dessus » ou à augets, qui recevait l'eau à sa partie supérieure ; la roue « de poitrine » ou de côté, de type intermédiaire ; la roue « en-dessous » ou roue à aubes. Dans les années 1750, une série d'expériences intelligemment conçues et soigneusement réalisées par l'ingénieur-constructeur anglais John Smeatson (1724-1792) avaient montré que les roues « en-dessus» avaient un

[7]- **SMITH, Norman.** 1980, p58

[8]- **Marcus Vitruvius Pollio**, (90-20 B.C.) connu sous le nom de Vitruve, est un architecte romain qui vécut au Ier siècle av. J.-C., c'est de son traité, *De Architectura*, que nous vient l'essentiel des connaissances sur les techniques de construction de l'Antiquité classique.

rendement d'au moins 60 %, le double par conséquent de celui des roues du type « en-dessous »[9].

Selon Wolf, ce type de moulin à eau s'est répandu à Athènes, en Athènes et, au IVe siècle, à Byzance via l'empire romain. Wolf indique également qu'un Iranien du nom de Metrodrous, diffusa ce mécanisme jusqu'en Inde.

Pour les moulins à eau à axe horizontal (figure 1-3), on peut trouver deux origines principales : ceux qui résultent à la création de deux types différents de moulin à vent à axe vertical. Comme la base du mécanisme technique de ces deux types majeurs de moulins à eau provient de deux types différents de roue verticale, celle qui utilise le courant d'eau « au-dessous » et celle qui utilise le courant d'eau « au-dessus ». Selon Terry S. Reynolds, le premier type de roue verticale qui utilise le courant de l'eau « au-dessous » vient de l'évolution naturelle de la noria[10] ; elle date du premier siècle avant notre ère en Italie (figure 1-2).

Figure 1-2 : Noria de Hamma, Syrie. Source: Terre Entière[11].

[9]- **SMITH, Norman**. « *Histoire de machine*, *L'histoire de la turbine à eau* », Scientific American, Paris, 1980, p55

[10] - La « noria », une grande roue verticale de 15-25 mètres de diamètre, équipée de pales radiales qui tournent grâce au courant de l'eau passant en bas de la roue. (figure 3-8) Une série de seaux, de pots en bois ou en bambou, ou de poteries sont attachés à la jante de la roue. A mesure que le dispositif tourne, ces pots se remplissent d'eau en bas de la roue et sont portés vers le haut de la roue où ils se vident dans une cuve. Les pots vides retournent ensuite en bas de la roue et le processus se poursuit par la force du courant de l'eau. La hauteur d'élévation de l'eau de certaines norias atteint 30 mètres.

[11]- Site internet de Terre Entière: http://www.terreentiere.com

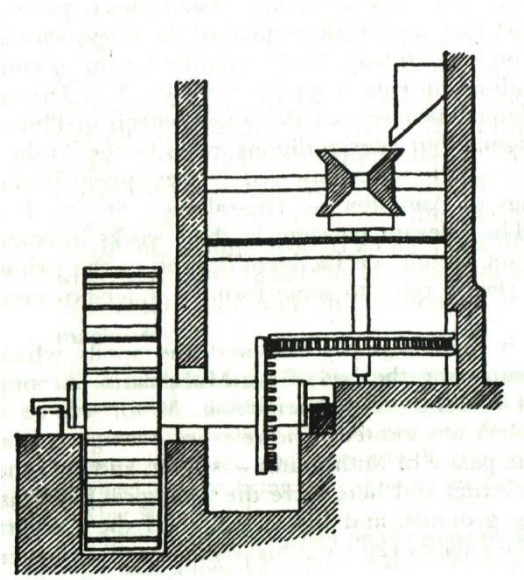


Figure 1-3 : coupe du mécanisme d'un moulin à eau à axe horizontal avec la roue « de poitrine ». Source : Terry S.REYNOLDS[12].

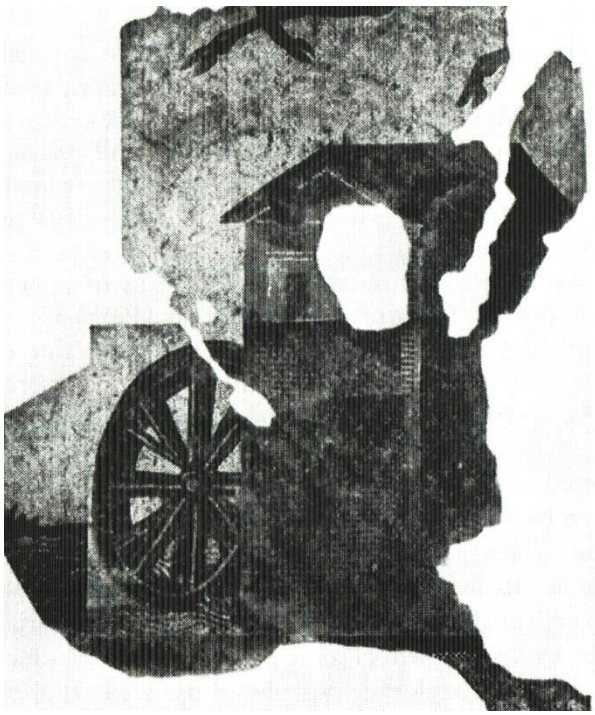


Figure 1-4 : mosaïque d'une roue verticale avec le courant d'eau « au-dessous » sur un mur du grand palais de Constantinople, Ve siècle de notre ère. Source : Terry S. REYNOLDS[13].

[12]-**REYNOLDS Terry S.**, 1983, p15

[13]-**REYNOLDS Terry S.**, 1983, p19

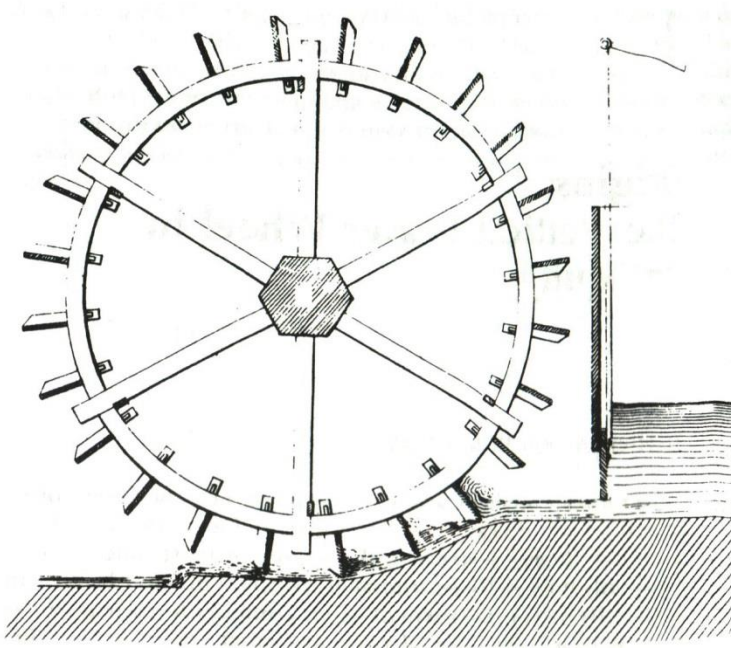


Figure 1-5 : moulin à eau à axe horizontal. Source : Terry S. REYNOLDS[14].

L'efficacité de cette roue était proche de 15 - 30 %, c'est-à-dire qu'elle pouvait transformer près de 15 - 30% de la puissance de l'eau en puissance mécanique dans l'axe horizontal de la roue (figure 1-5).

Si la roue verticale prend l'eau en haut – le modèle « en-dessus » –, elle peut tourner par le poids de l'eau et la gravité. Le deuxième type de roue verticale est un modèle évolué de levier à eau[15] (figure 1-6); cette roue est représentée sur une peinture murale romaine datant du troisième siècle. Une autre trace : à Barbegal (France) où le dispositif hydraulique daterait des années 300 (figure 1-8). Le moulin à eau qui utilise une roue de ce modèle peut normalement parvenir à un niveau d'efficacité de 50 à 70 % (figure 1-9).

[14]- Ibid, p10

[15]- Un levier à eau ou, en anglais, *spoon tilt-hammer* bascule de haut en bas. Ce mécanisme utilise parfois la puissance d'une chute d'eau. Bras de levier est équipé d'un « seau » en forme de cuillère à une extrémité et, à l'autre extrémité, un contrepoids est utilisé pour écraser les grains ou couper le bois. Lorsque l'eau chute dans le conteneur, un bras de levier baisse et l'autre se lève. Lorsque le conteneur baisse l'eau sort et, de ce fait, le bras équipé par le contrepoids descend avec une force suffisante pour écraser les grains.

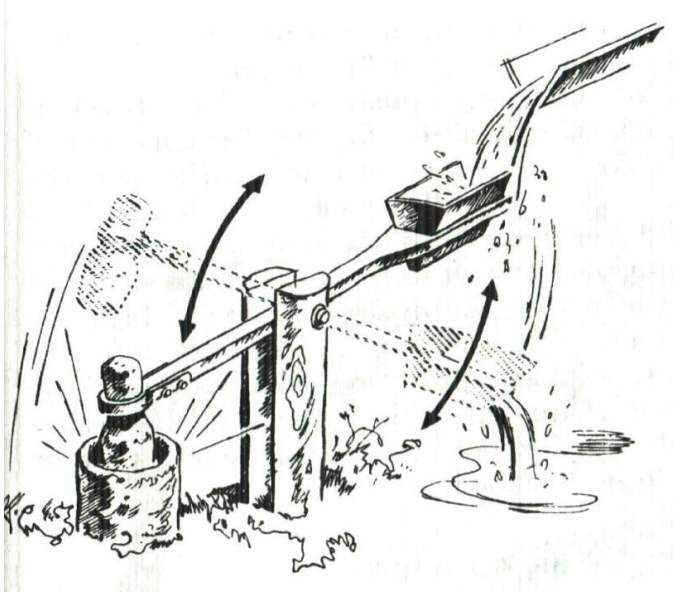


Figure 1-6 : levier de l'eau. Source : Terry S.REYNOLDS[16].

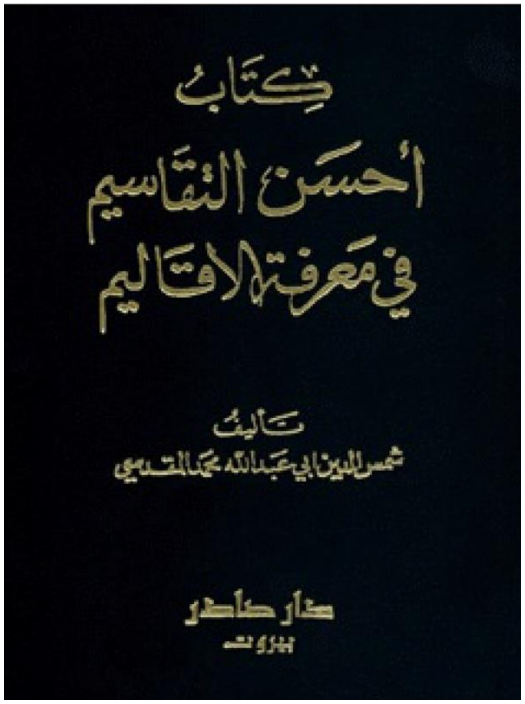
Le moulin à eau flottant est un moulin à axe vertical dont la roue tourne grâce au courant d'eau « au-dessous ». Ce type de moulin à eau est normalement installé sur des bateaux naviguant sur des rivières. Selon Procope de Césarée, écrivain romain du VIe siècle, c'est Bélisaire, général romain, qui utilisa pour la première fois ce type de moulin à eau. Il le fit lors de l'attaque de Rome par les Goths en 537 de notre ère, alors que les attaquants avaient coupé les aqueducs qui approvisionnaient les moulins du *Janiculum* [17] en eau (figure 1-10). Selon des historiens, ce type de moulin à eau était très demandé au Xe siècle. Al-Moqadassi[18], géographe et historien arabe du Xe siècle, nota que ce type de moulin à eau était beaucoup utilisé autour des grandes rivières de Mésopotamie, ce qui, selon lui, était très surprenant[19].

[16]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p13

[17]- Ibid, 1983, p33

[18]-**Al-Maqdisi** (en arabe : المقدسى),est un voyageur et geographe arabe, né à Jerosalem en 945 ou en 946. Il est l'auteur, sous le titre de *Ahsan at-Taqasim fi Ma`rifat il-Aqalim* (*La meilleure répartition pour la connaissance des provinces*), d'une description de l'empire musulman au IVe-Xe siècle, dont il existe deux traductions partielles en français. Après avoir notamment étudié le droit durant son adolescence, Al-Maqdisī entame une série de voyages qui le mèneront jusqu'au Khorasan en passant par L'Arabie. Il meurt aux alentours de l'an 1000.

[19]- **WOLF Hanse**, 2006, p252-3



حرمه ،، و لا لبلدهم رئيس، و لا لفقيههم

أحسن التقاسيم، ص: ۴۱۱

مجلس،، أهل مباراة و تعصّب، و مماراة و تقلّب،، ترى أهل البلد حزبين، و فى الصحابة فريقين ،، الّا انه خزانة البصرة و مفرخ فارس و أصفهان و به قياسر حسنة و اخباز نظيفة و آدام و به تجتمع الخزوز و الديباج و اليه تحمل البضائع و الأموال و هو مغوثة و فرجة للتجار، و منهل عامر لكلّ مارّ ، و اسمه كبير فى الأقاليم و الأمصار، شتاؤه طيّب و الخريف لو لا الذباب، و الربيع أيضا لو لا براغيث كالثعالب، و هو مع ذلك رقيق بالضعيف فى الثياب، يكون مثل الرملة ذو جانبين الّا ان الجامع و معظم الأسواق فى الجانب القارسىّ و الجانب العراقى جزيرة خلقها عمود النهر على ما ذكرنا من فسطاط مصر بينهما قنطرة هندوان من الآجر عليها مسجد يشرف على النهر حسن و قد كان عضد الدولة هدمها و بناها مع المسجد بناء عجيبا لتضاف اليه فأبى الناس ان يستوها الّا قنطرة هندوان و على هذا النهر دواليب عدّة يديرها الماء تسقى التواخير ثم يجرى الماء فى قنىّ متعالية الى حياض فى البلد و بعض يجرى الى البساتين و يمدّ العمود من خلف الجزيرة نحو صيحة الى شاذروان قد بنى من الصخر عجيب ينبخر الماء عنده و ثم قوارات و عجائب و الشاذروان يردّ الماء و يفرّقه ثلاثة انهار تمدّ الى ضياعهم و تسقى مزارعهم و هم يقولون لو لا الشاذروان ما عمرت الأهواز و لا انتفع بانهارها و فى الشاذروان أبواب تفتح إذا كثر الماء لولاها لغرقت الأهواز و تسمع للماء المنحدر صوتا يمنع من النوم أكثر السنة و زيادته تكون فى الشتاء لانّه من الامطار لا من الثلوج و نهر المشرقان يشقّ فى أسفل البلد الّا انه يجفّ عامّة السنة و ينبخر الماء بموضع يسمّونه الدّورق و الأهواز بهذه الأنهار

أحسن التقاسيم، ص: ۴۱۲

طيّبة و السفن تذهب و تجيء و تعبر مثل بغداد و يفترق الأنهار فى أعلى البلد و تجتمع بأسفله فى موضع يقال له كارشتان و من ثم تركب السفن الى البصرة و لهم طواحين على الماء عجيبة و سوق الأربعاء على شعبة من هذا النهر ذات جانبين بينهما قنطرة من خشب تجرى تحتها السفن و الجانب العراقى اعمر و فيه الجامع و حصن مهدىّ عامرة بها تجتمع انهار الاقليم كلّها ثم تفيض الى البحر و بها حصن بناه مهدىّ و هى ثغر لقربها من البحر و هناك رباطات و عياد الجامع على الشطّ و بها مجتمع الطرق، و سائر المدن على انهار لها جزر و مدّ و بها نخيل و مزارع و اعمر سواد الأهواز نحو سوق الأربعاء و ما يدخل فى ذلك الصقع الدّورق قصبة عامرة متطرّفة من نحو العراق على نهر ذات رستاق واسع و سوق كبير و خصائص و خيرات حسنة الوضع و معدن الخيش و هى أصغر من السوس و سوقها متشعّب و الجامع على طرفه شرقيهم من النهر و اليها يقصد حجّاج فارس و كرمان ميرابان ذات جانبين و لها أسواق عامرة فى كلّ جانب جامع و ميرابان لها رستاق واسع على نهر يصل اليه المدّ و الجزر و به قرى كثيرة و اعمال نفيسة و جبى عمل واسع ذو قرى عامرة و انهار و نخيل و منها كان ابو علىّ رأس المعتزلة و من الناس من جعل عبّادان من هذه الكورة و انّما هى من العراق فان قيل انّما جعلناها من هذا الإقليم لاتّفاقهم فى اللسان و لأنّ لها نظائر فى هذا الاقليم فى القافية ألا ترى انّك تقول عبّادان مثل ما تقول باسبان ميرقبان البذان فالجواب

أحسن التقاسيم، ص: ۴۱۳

اما اتّفاقهم فى اللسان فليس بحجّة لان سواد البصرة كلّهم عجم و اما موافقتها هذه المدائن فى آخر أساميها فان لها أيضا نظائر من مدن البصرة فى هذا المعنى مثل بدران رومان و شقّ عثمان، فان قيل ما قضاه أوّل لأنّ هنا ترجيحا ليس معكم و ذاك انها توافق الإقليم أيضا فى هذه العلّة ألا ترى انّك تقول خوزستان فالجواب يجب ان تجرى العلّة فى جميع المعلولات و تعمّ سائر النظائر فتقول انّ شامان و سليمانان أيضا من خوزستان، فان ارتكب ذلك قيل له فما تنكر على قائل يقول ان عبّادان من جزيرة العرب لأنّ لها نظائر فيها و هى عمان تجران سمران فإذا لم يجز ان نجعلها من الجزيرة من أجل هذه العلّة علمت انّها لا تشبه بدليس لمّا قسناها على تفليس لانّا لم نجد يأقور موضعا على هذه القافية و وجدنا بالزحاب عدّة من مدن و قرى رامهرمز قصبة كبيرة بها أسواق عامرة و خيرات كثيرة و

Figure 1-7 :-Ahsan at-Taqasim fi Ma`rifat il-Aqalim , Edition Dar-Sader, Beirut,2005, p139

« Et les navires vont et viennent et expriment, comme Bagdad. Les rivières se séparent au sommet du pays et se réunissent en bas, dans un endroit qui s'appelle Carshenan puis les navires vont à Basra ou il y a des moulins a eau étranges et un marché mercredi sur une branche de cette rivière avec deux pont de bois à deux coté et des bateaux qui passent entre eux[20]. »

[20]- **Al-Maqdisi**, *Ahsan at-Taqasim fi Ma`rifat il-Aqalim* (*La meilleure répartition pour la connaissance des provinces*), Edition Dar-Sader, Beirut,2005, p139

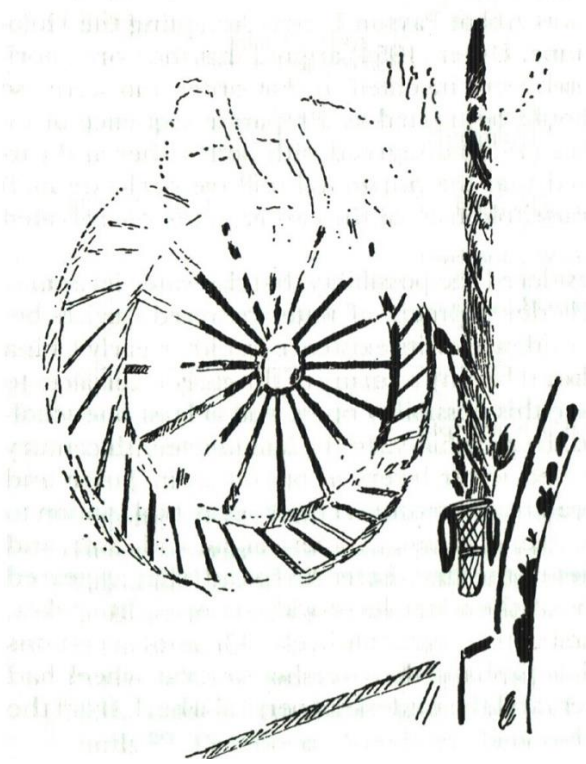


Figure 1-8 : dessin d'une roue verticale, la roue « au-dessus » ou à augets. Cette esquisse est basée sur la peinture murale d'une catacombe chrétienne romaine datant du IIIe siècle de notre ère. Source : Terry S.REYNOLDS[21].

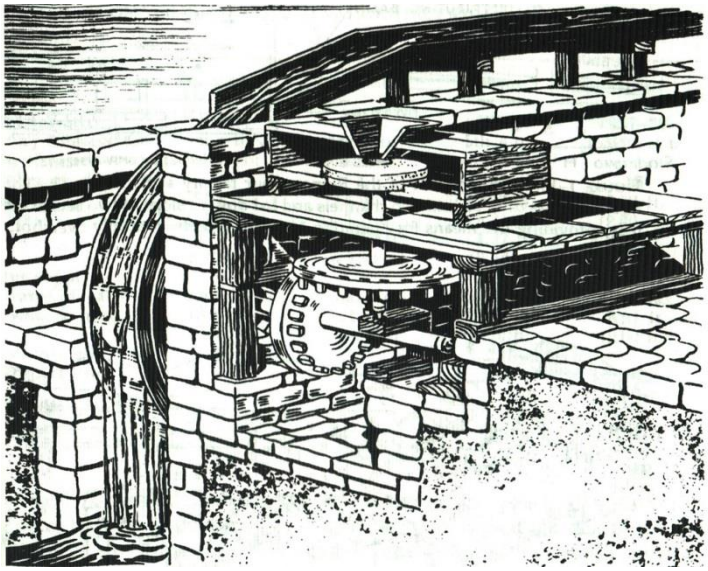


Figure 1-9 : moulin à eau à axe horizontal romain avec une roue « en-dessus », installé dans une Agora athénienne vers le V^{e} siècle. Source: Terry S.REYNOLDS[22].

[21]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p19

[22]-Ibid, 1983, p39

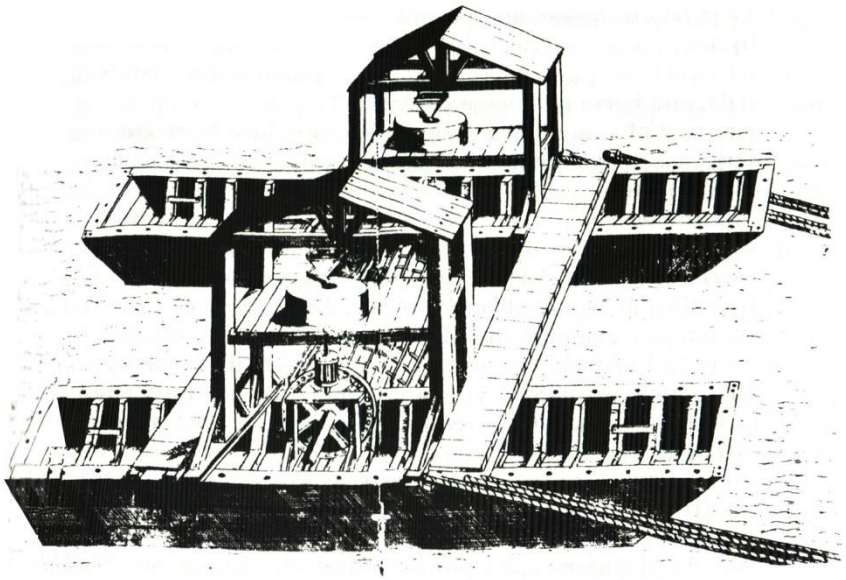


Figure 1-10 : moulin à eau flottant. Source : Terry S. REYNOLDS[23].

Le moulin à eau iranien, un moulin à eau à axe vertical

Le moulin à eau à axe vertical qui s'est répandu sur le plateau iranien, la péninsule de l'Inde et en Asie mineure est parfois nommé moulin à eau irano-indien. Selon Wolf, c'est Strabo [24] qui mentionne pour la première fois l'existence d'un moulin à eau de ce type, un *hydraleta*, qui fut installé par Mithridate dans son palais de Cabeira, au nord de l'Asie Mineure.[25] Mithridate, ou Mehrdâd VI [26] , était l'un des rois de la dynastie parthe (Arsacide) qui régna en Iran entre 247 avant J._C. et 224 de notre ère. Strabo explique :

[23]-Ibid, 1983, p33

[24]- **Strabo** ou **Strabon d'Amasia**, (58 B.C.-25 A.D.), géographe et historien grec, né à Amasée en Cappadoce vécut aux Ier siècles avant et après JC. Il écrivit en grec une *Histoire de Rome*, aujourd'hui perdue, qui continuait celle de Polybe, et une *Géographie universelle* en 17 livres, qui nous sont heureusement parvenus.

[25]- **(per)WOLF Hanse**, 2006, p252-253

[26]- **Mithridate VI Eupator,** (120 – 63 B.C.), en persan **Le Sixième Mehrdâd**, plus connu sous le nom de Mithridate le Grand. Il est le fils aîné du roi du Pont Mithridate V Évergète. Le conflit avec les Romains est inévitable (première guerre de Mithridate). Ceux-ci en effet ont rétabli en 92 av. J.-C. Ariobarzane Ier de Cappadoce sur son trône. En 88 av. J.-C., après la conquête de la Bithynie, Mithridate fait une entrée triomphale à Éphèse et soulève les Grecs d'Asie. Il ordonne le massacre des Romains établis en Asie Mineure, massacre qui fait environ 80 000 victimes, puis passe en Grèce où son lieutenant Archélaos est accueilli en libérateur.

« C'est à Cabeira que le palais de Mithridate fut construit ainsi que le moulin à eau (hydraleta), et là il y avait des jardins zoologiques et, à proximité, des terrains de chasse et des mines. »[27]

Si le moulin à vent de Cabeira avait été construit avec le palais en 120 avant notre ère, ce passage pourrait être la preuve la plus ancienne de l'utilisation du moulin à eau dans l'histoire. Mais pour Reynolds il est plus sûr de dater ce moulin à vent des années 65 avant J._C., à l'époque où Pompée s'est emparé du palais, voire de quelques années plus tard, lorsque Strabo a visité le lieu[28]. De son côté, Wolf estime que ce type de moulin à eau à axe vertical, adapté aux terrains en altitude, est arrivé en Chine au IIIe et IVe siècle, via des Iraniens ou des Grecs qui vivaient dans la ville de Balkh (figure 1-11).

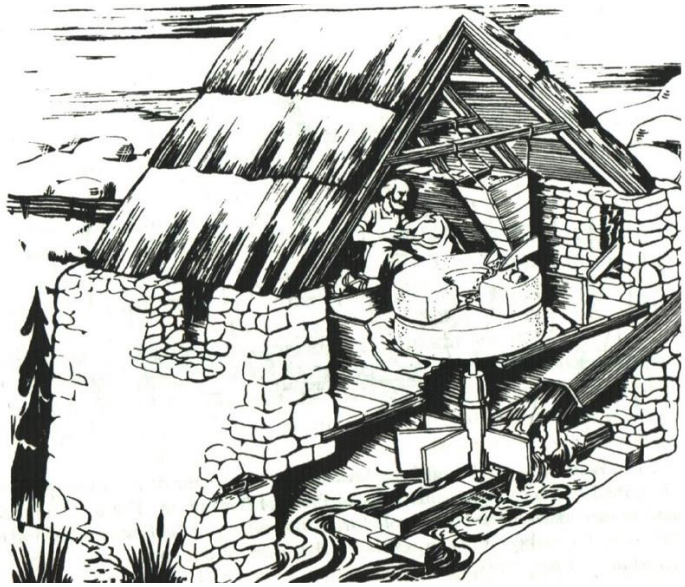


Figure 1-11 : moulin à eau à axe vertical. Source : Terry S.REYNOLDS[29].

Antipater[30] de Thessalonique est un autre observateur de la même période que Strabo. C'est lui qui composa une ode[31] au moulin à eau. Cette ode, tout comme le passage qui figure dans la *Géographie* de Strabo, désigne clairement un moteur à eau. Mais, selon

[27]- **(en) STRABO**, « *Geographica* », Horace Leonard Jones, London, 1928, p428-429

[28]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p17

[29]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p15

[30]- **Antipater de Thessalonique** est un auteur d'épigrammes du Ier siècle, de la ville grecque de Thessalonique.

[31]- **Ode**, dans la littérature grecque, une ode, est un poème lyrique en strophes, accompagné de musique. Par extension, une ode est un poème célébrant un personnage ou évènement : un vainqueur des Jeux olympiques, par exemple.

Reynolds, il n'est pas possible d'en identifier le type spécifique. Tout comme dans le texte de Strabo, elle ne fournit pas assez d'information pour cela.

Josef Needham pense que le moulin à eau à axe vertical a été inventé en Chine vers le Ier siècle avant J._C., voire plus tôt. Cette assertion est fondée sur des références anciennes mentionnant des outils métallurgiques propulsés par l'eau[32] (figure 1-12). Ce moteur à eau utilisait apparemment une roue horizontale. D'après lui, le moteur à eau s'est diffusé de la Chine vers d'autres régions du monde. Il pense que la roue horizontale a pu arriver en Asie Mineure vers le Ie siècle avant J._C., celle-là même à laquelle Strabo faisait référence à Cabeira. Pour Reynolds, ces nouvelles références chinoises ont la même ambiguïté que d'autres sources gréco-latines. On ne peut pas être sûr que ce qu'elles présentent soit une roue à eau horizontale, un moulin à eau à axe horizontal ou tout simplement un levier à eau[33].

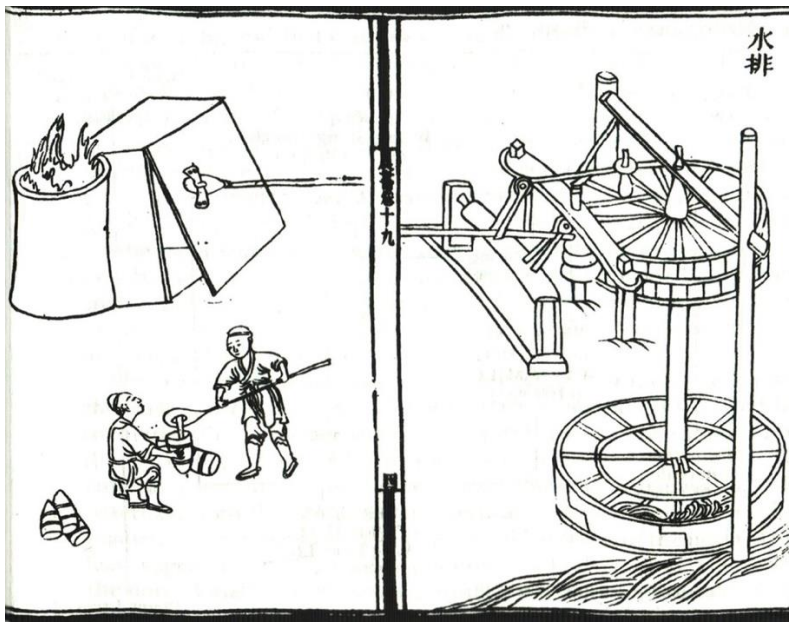


Figure 1-12 : un levier à eau chinois qui utilisait pour un outil de métallurgie, vers 1313 de notre ère.
Source : Terry S. REYNOLDS[34]

En ce qui nous concerne, nous pensons que le moulin à eau à axe vertical est une invention gréco-iranienne apparue en Asie Mineure au Ie siècle avant J._C. Comme

[32]- **NEEDHAM Josef**,1965, p405-406

[33]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p18

[34]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p23

Hanse Wolf, nous supposons que la machine à eau que Strabo a mentionnée dans sa Géographie était un moulin à eau à axe vertical parce que :

1. Le plus ancien moulin à main a été découvert par des archéologues en Syrie[35], pays se situant au Proche-Orient dans la même zone que l'Asie Mineure. Il est donc plus raisonnable de penser que, dans le cours de l'évolution du moulin, le moulin à eau à axe horizontal soit apparu en Asie Mineure, et ceci d'autant plus qu'il est le plus simple des différents types de moulins.
2. L'empire parthe qui, à l'époque de Mithridate, régna de l'Asie Mineure au plateau du Pamir, était la seule unité politique cohérente entre la partie occidentale et la partie orientale du monde antique. Seul un tel empire pouvait diffuser une telle invention dans les civilisations indienne et chinoise à partir des IIe et IIIe siècles. N'oublions pas que ce fut cet empire qui, pour la première fois, donna naissance à la route commerciale internationale est-ouest, la fameuse Route de la soie.
3. D'autre part, le moulin à eau observé par Strabo dans le palais de Mithridate était probablement utilisé uniquement pour les besoins intérieurs du palais du roi parthe, et pas plus. Nous savons que le moulin à eau à axe vertical est plus productif que le moulin à main et beaucoup moins efficace que le moulin à eau à axe horizontal. Cela veut dire que dans un palais royal, qui abritait un nombre important d'habitants, un moulin à main n'était pas très efficace alors qu'un moulin à eau à axe horizontal l'était trop. Seul un moulin à eau à axe vertical pouvait être utile pour les besoins ordinaires ; c'était une machine qui avait un rendement se situant à la moyenne des différents types de moulins.
4. Par ailleurs, les moulins à eau à axe horizontal sont utilisés plutôt en plaine sur des courants puissants et permanents ; or la topographie et les caractéristiques des terres d'Asie Mineure correspondent mieux aux moulins à eau à axe vertical.
5. De même, il manque chez Reynolds et Needham des analyses sur la situation de l'agriculture en Asie Mineure et sur le plateau iranien autour du Ie siècle avant J._C. L'empire parthe qui était engagé dans une série de guerres longues contre l'empire romain à l'ouest et contre des nomades d'Asie centrale ne pouvait assurer la stabilité nécessaire à l'épanouissement de l'agriculture. Et ceci d'autant plus que l'Asie Mineure

[35] - Hanse WOLF écrit dans son livre, *Artisanats anciennes d'Iran :* « Les archéologues ont également trouvé le plus ancien moulin à main du monde en Syrie ; il date du XIe siècle avant J._C. Ils ont découvert une paire de meules dont la pierre supérieure était munie d'une poignée qui permettait de faire tourner le moulin à la main ».

changeait régulièrement de mains entre les deux principaux empires de l'époque. Le grain produit ne pouvait donc pas être aussi considérable qu'un genre de moulin à eau avec une telle production considérable comme celui du moulin à eau à axe horizontal soit nécessaire.

Pour conclure, on peut dire que le moulin à eau à axe vertical a été inventé très probablement dans le royaume parthe(Arsacide), quelque part en Asie Mineure (il est d'ailleurs cité pour la première fois par Strabo à Cabeira) ou sur le plateau iranien vers le Ie siècle avant J._C. Il est cependant diffusé par des Iraniens en Inde et en Chine grâce au commerce transfrontalier de l'époque.

Le rôle du moulin à eau à axe vertical dans l'invention du moulin à vent

Dans toutes les régions montagneuses du nord et de l'ouest, ce type de moulin à eau fut utilisé dès l'Antiquité, en particulier dans le Khorasan, en Azerbaïdjan et dans le Fars. Le Khorasan historique, pays natal des Parthes, englobait les vastes territoires de l'Asie centrale jusqu'à Hérat et était voisin de la province historique du Sistan. Les échanges entre ces deux provinces étaient nombreux, surtout sur les plans économique et culturel. Le Sistan de cette époque connaissait en effet une période de fort développement socio-économique. Il est très probable que les peuples du Sistan connaissaient le moulin à eau à axe vertical depuis le I^{er} siècle, mais comme les archéologues n'ont trouvé aucune trace de moulin à eau sur le territoire actuel du Sistan, nous ne pouvons pas dire que ce mécanisme était en état de fonctionnement dans cette région à l'époque.

Comme nous allons montré prochainement le Sistan est un plateau sur la plus grande partie de sa surface mais il est évident qu'à l'extrême est du Sistan historique (aujourd'hui en Afghanistan), là où il y a des chaînes de montagnes, des moulins à eau pouvaient être installés pour les besoins agricoles tout comme dans d'autres territoires iraniens. Il faut également noter que l'un des points de passage du moulin à eau de l'Iran vers l'Inde fut très probablement le territoire actuel de l'Afghanistan qui, à l'époque, était sous la domination des empires iraniens. Il est vrai que, parmi les différents types de moulins à eau, le moulin à eau à axe vertical a l'efficacité la plus faible. Mais dans les régions montagneuses où coulent des rivières et des fontaines, une chaîne de moulins à eau de ce type pouvait être suffisante pour les besoins de l'économie agricole locale. Un problème apparaît lorsque la production de grains est trop importante et que le manque de montagnes et de terrains en altitude ne fournit pas les bases nécessaires à l'installation

de moulins à eau à axe vertical. C'est exactement le cas du Sistan de cette époque. La province a un secteur agricole qui connaît une production à l'échelle de l'Empire et qui souffre du manque de courants d'eau et de terrains en altitude.

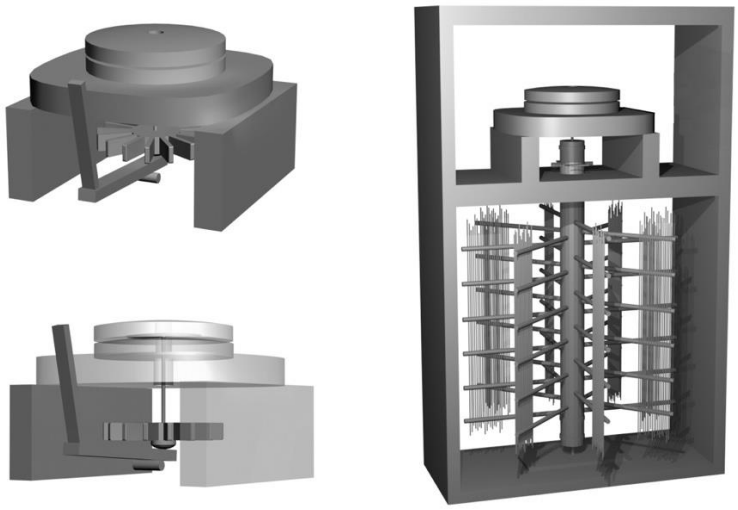


Figure 1-13 : comparaison du mécanisme du moulin à eau à axe vertical et du premier type de moulin à vent à axe vertical.

A l'époque de l'Antiquité, différents obstacles rendaient le transport de grains à grande échelle impossible. Pour résoudre le problème de l'absence de moulins à eau sur le plateau du Sistan, les techniciens sistanis auraient donc inventé le moulin à vent en étudiant le mécanisme du moulin à eau à axe vertical. Il faut noter que, l'une des caractéristiques climatiques du Sistan est le «vent de 120 jours » qui souffle presque tout l'été juste après la saison des récoltes. La vitesse du vent dans cette région atteint parfois 22,40 m/sec (50 mph)[36]. Cette source d'énergie durable, qui fournit la force nécessaire pour faire tourner des roues éoliennes, donne aux sistanis l'idée de remplacer l'eau de leurs moulins par le vent. Nous pensons que le premier moulin à vent fut inventé sur la base du mécanisme du moulin à eau à axe vertical mais avec quelques corrections et quelques nouvelles pièces afin d'adapter cette machine au comportement de la nouvelle source d'énergie, le vent. Hypothèse de ceci est fondée sur fait que pour créer un moulin à vent ils avaient besoin d'une roue beaucoup plus grande que celle du moulin à eau. Naturellement donc, la canalisation d'eau se transforme en une ouverture qui se trouve sur un coté du mur face au courant du vent. La hauteur de cette ouverture était la même

[36]- **(en) HILL Richard Leslie**, 1994, p.13

que celle de la roue éolienne de sorte que à tout moment une pale de la roue éolienne se place face au courant du vent. La taille de la roue avait été considérablement agrandie et le vent soufflait fort mais, selon Al-Dimashqi[37], géographe arabe du XIIIe siècle, ce moulin avait encore besoin d'être installé sur les terrains assez hauts ou d'être construit au sommet des minarets ou des tours des palais ou des châteaux.

Typologie des moulins à eau à axe vertical iraniens

Comme nous l'avons indiqué précédemment, d'après les différents documents dont nous disposons, la présence du moulin à eau à axe vertical sur le plateau iranien est avérée dès le Ie siècle. De toutes les provinces iraniennes, le Khorasan et le Khuzestân sont celles qui possèdent le plus grand nombre de moulins à eau car ce sont celles qui sont le plus développées du point du vue agricole. Dans ces deux régions agricoles, il existe deux principaux types de moulin à eau.

Le premier type est le moulin à eau à axe vertical de Chuchtar. La ville de Chuchtar appartient à la province du Khuzestân. Elle possède une chaîne de moulins à eau à axe vertical installée sur un canal de dérivation des eaux baptisé Gargar. Le deuxième type de moulin à eau à axe vertical s'est répandu dans presque toutes les régions montagneuses et désertiques de l'Iran. Ce moulin utilise l'eau des fontaines et des qanâts. Nous parlons ici de « type de base » ou tout simplement de « type Khorasan ». Les deux types de moulin à eau ont un système technique plus ou moins identique, mais dans le cas du moulin à eau de Chuchtar, grâce au puissant courant d'eau, la roue du moulin à eau fonctionne directement avec le courant d'eau ; dans le mécanisme technique de ce moulin, un réservoir à eau ne semble donc pas nécessaire. Le courant d'eau du canal Gargar alimente les différents moulins à eau de la chaîne.

Les bases techniques et l'espace intérieur de ces deux types de moulin à eau sont les mêmes, ils divergent seulement sur quelques points de détail. Pourtant, les moulins à eau à axe vertical de Chuchtar sont uniques : on les trouve seulement dans cette ville. Dans l'Antiquité (vers les IIIe et IVe siècles), grâce à ses moulins à eau, Chuchtar était devenue une ville industrielle. Le système hydraulique de Chuchtar a été enregistré en 1998 à

[37]- **Sheikh Shamsuddin Abu Abdullah Muhammad ibn Abi Talib Ansari Damashqi** (1256-1327). C'était spécialiste d'agriculture et de géographie. Né à Damas, il était connu pour sa vive intelligence. Il est l'auteur du *Nokhbat Al-Dahr* (Choix de l'âge, sur les merveilles de la terre et de la mer).

l'inventaire du patrimoine historique iranien. Pour l'Unesco, ce complexe est le dixième site d'importance en Iran ; il a été enregistré au patrimoine mondial en 2009 sous le nom de « système hydraulique antique de Chuchtar » et porte le numéro 1315[38].

Dans ce travail de recherche, nous nous concentrons notamment sur le moulin à eau de type Khorasan et sur son influence sur le moulin à vent du Sistan.

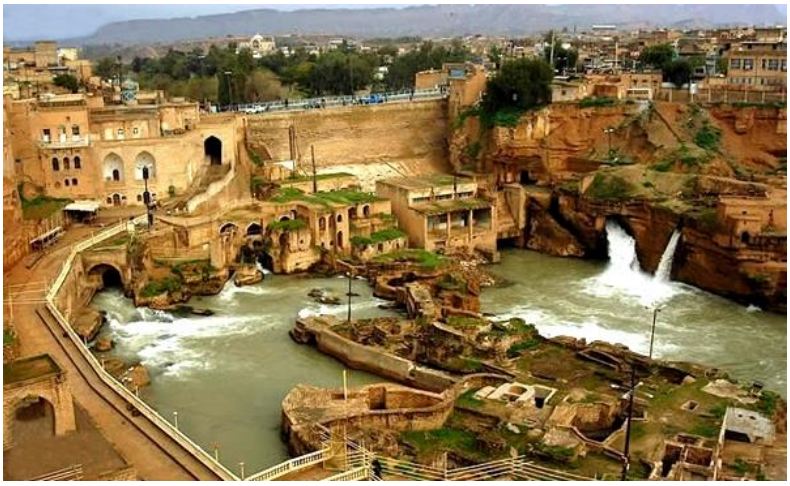


Figure 1-14 : quartier industriel de Chuchtar, avec ses canalisations d'eau.

Figure 1-15 : moulin à eau et cascades, à la sortie d'eau des moulins à eau de Chuchtar.

[38]- Hamchahri on line, consulté le 19Mars 2014: http://hamshahrionline.ir/details/153620

Figure 1-16 : moulin à eau et cascades, à la sortie d'eau des moulins à eau de Chuchtar.

Figure 1-17 : espace intérieur et roue d'un moulin à eau de Chuchtar.

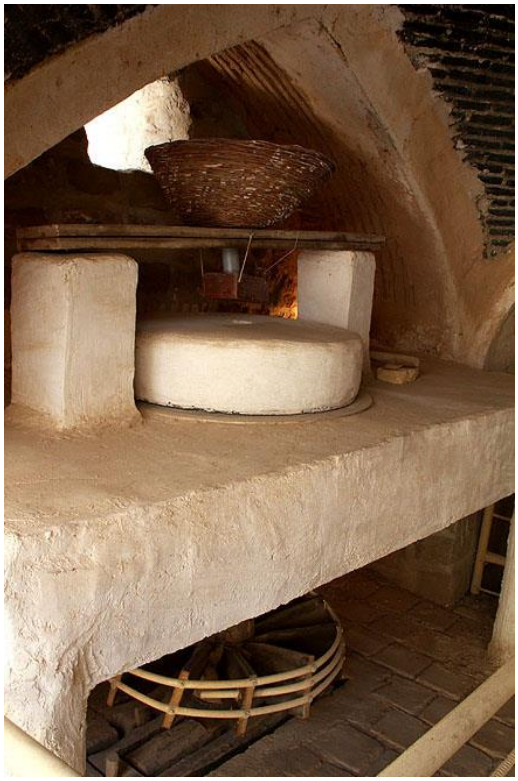


Figure 1-18 : mécanisme technique d'un moulin à eau de type « Chuchtar ».

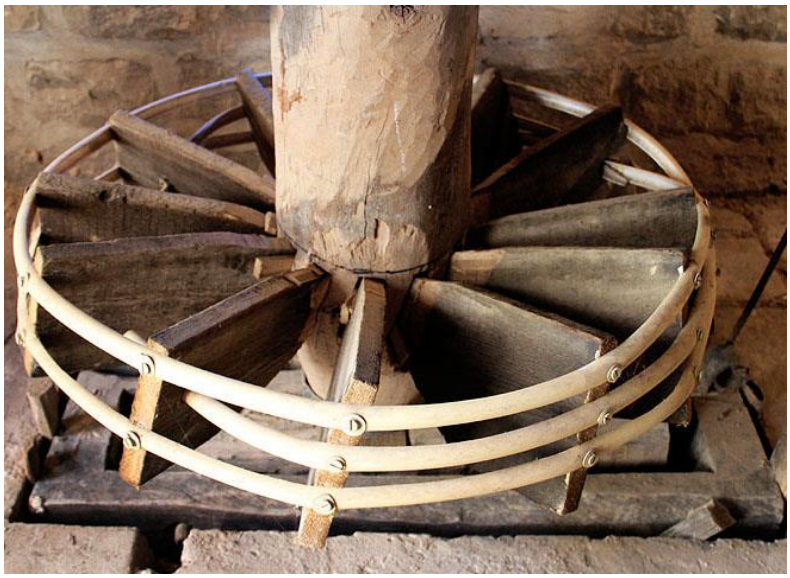


Figure 1-19 : espace intérieur et roue d'un moulin à eau de Chuchtar.

Moulin à eau à axe vertical du Khorasan

Le moulin à vent de type « Khorasan » est un type de moulin à eau à axe vertical ; c'est le plus abouti sur le plateau iranien. Les régions agricoles disposant de fontaines ou de sources d'eau en altitude connaissent bien ce type de structure et son mécanisme technique. Dans les régions désertiques, où il y a possibilité de créer des qanâts, on trouve également des moulins à eau de ce type, qui fonctionnent normalement avec deux canaux se trouvant l'un sur l'autre. Parmi les provinces du Fars, de l'Azerbaïdjan et du Khorasan, la province du Khorasan regorge encore de villes et villages utilisant ce type de moulin à eau pour leurs besoins. Presque tous les terrains en altitude du sud au nord du Khorasan disposent de ce type de moulin. Parmis tous les moulins à eau du Khorasan les moulins à eau des villages et villes comme ; Eshaq-Âbâd, Aqazadeh, Bardeskan, Tizâb, Tchâh-Fâliz, Bejestan, Salâmi, Kâkhk, Kâkou, Kalât, Bochrouyeh et Kâchmar sont en état de marche.

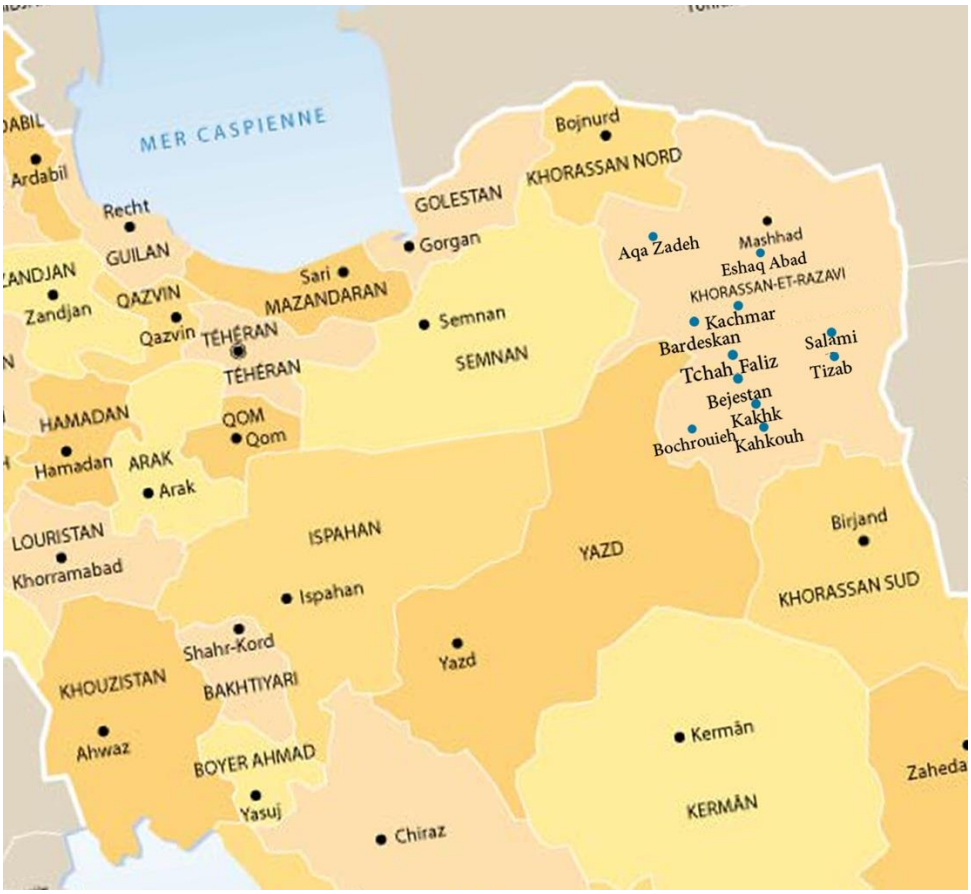


Figure 1-20. Carte des moulin a eau de Khorasan en état de marche.

Figure 1-21. deux moulins à eau à axe vertical sur un seul courant d'eau, à Tag-e Zau, Khorasan.

On voit parfois plusieurs moulins à eau de ce type installés sur un seul courant d'eau. L'eau qui faisait tourner la roue du premier moulin entrait dans le réservoir du deuxième et du troisième… et ainsi une chaîne de moulins à eau profitait de ressources limitées en eau sur le plateau iranien. Hamdollah Mostofi[39], historien iranien du XIVe siècle, a rapporté l'existence d'une quarantaine de moulins à eau fonctionnant avec un seul courant d'eau dans la vallée du Khorasan. Selon lui, la vitesse du courant était considérable : avant qu'un meunier ne finisse de coudre le sac de farine, le moulin moulait 80 kg de blé [40] (figure 1-22). L'existence du mécanisme du moulin à eau au Khorasan, l'une des provinces iraniennes les plus grandes et des plus développées du point du vue agricole, est évidente à cette époque.

[39]- **Hamdollah Mostofi,** historien et géographe iranien de la période Il-Khanid (1281-1344), auteur de tarik-e gozida, Zafar-nama et Nuzhat al-Qulub (source; Encyclopedie Iranica)

[40]- **(per) WOLF, Hanse**. 2006, p.254

بعد از خرابش چون اردشیر بابکگان درمغازه شهر « نه »[1] بساخت شاپوربن‌اردشیر حاکم خراسان بود از پدر آن شهر را درخواست کرد و او مضایقه نمود . شاپور را غیرت آمد و آنرا[2] تجدید عمارت کرد و نه شاپور نام نهاد تشاپور اسم علم آن شد وعرب نیسابور خواندند . دور باروش پانزده هزار گام است و برشیوهٔ رقعهٔ شطرنج هشت قلعه درهشت قطعه نهاده اند[3] و اکاسره را عادت بودی که شهرهارا برشکل جانوران واشیاء ساختندی . شاپور ذوالاکتاف درزیادتی عمارت آن شهر سعی نمود و دارالامارهٔ خراسان از[4] عهد اکاسره تا آخر عهد طاهریان در بلخ و مرو بودی و چون دولت به بنی‌لیث رسید عمروبن لیث[5] درنیشاپور دارالامارت ساخت و نیشاپور دارالملك خراسان شد . درسنهٔ خمس و ستمایه[6] آن شهر بزلزله خراب شد هم در آن حوالی شهری دیگر ساختند و شادیاخ خواندند . دوربارویش شش هزار و نه‌صد گام‌بود درسنهٔ تسع و ستمین وستمایه آن نیز بزلزله خراب شد بدوشهٔ دیگر شهری ساختند که‌اکنون ام‌البلاد خراسان آنست . دریش کوهی نهاده است برجانب‌قبله . دور باروش پانزده هزار گام است و آبش ازقنوات و ینابیع و بعض قنوات[7] ضیاع[8] در میان شهر گذرد و در شیب مساکن و در آنجا عمارات و حوضخانه ها[9] ساخته باشند و آب رود ازکوهی میآید که در شمال شرقی نیشاپور است و آن کوه بغایت بلندست و از کوه تا نیشاپور دو فرسنگ بیش نیست و درین دو فرسنگ برین رودخانه چهل آسیا ساخته اند و آب چنان تیز آید که یك خروار گندم در دلو آسیا میکنند بمقدار سر دو جوال دوختن آن یك خروار آرد شده میباشدچنانکه درازگوش در دنباله هم میرسد . برجانب شمال برقبّهٔ کوه بمسافت پنج فرسخ بر کربوه بر آید[10] چشمه‌ییست که چشمهٔ سبز میکوبند و آبی شور بن و سبز بیرون

۱ - ج، ۲ ، ۲ - چ، و آنجا ۳ - د، نهاده بودند ۴ - چ، در ۵ - د، عمرولیث . ۶ - چ، للشایة (صحت من یاحاشیه معلوم‌نگشت) ۷ - سه نسخهٔ اخیر درد، بیست ۸ - د، ، س، صناع ۹ - د، حوضهاجهان . ۱۰ - چ، برآید که .

Figure 1-22. Nuzhat al-Qulub, p182.

Architecture de Moulin à eau à axe vertical du Khorasan

Mis à part la chaîne de moulins à eau de Chuchtar, considérée comme un cas particulier, normalement les autres moulins à eau à axe vertical, y compris tous les moulins à eau à axe vertical de type « Khorasan », ont une architecture particulière. Compte tenu de la nature des courants d'eau sur le territoire iranien, la plupart des moulins à eau iraniens sont installés soit sous terre soit au-dessus d'un aqueduc. Mais en général les moulins à eau iraniens adoptent deux formes architecturales majeures connues : la forme du couloir et la forme en croix. Nous présentons ici deux exemples : le moulin à eau de Salâmi et le moulin à eau de Tchâh-Fâliz. Ces deux moulins à eau sont de la famille des moulins à eau du Khorasan et se trouvent au sud de la province du Khorasan.

Figure 1-23 : réservoirs jumeaux du moulin à eau de Salâmi ., Source : l'organisation d'héritage culturelle du Khorasan-e Razavi.

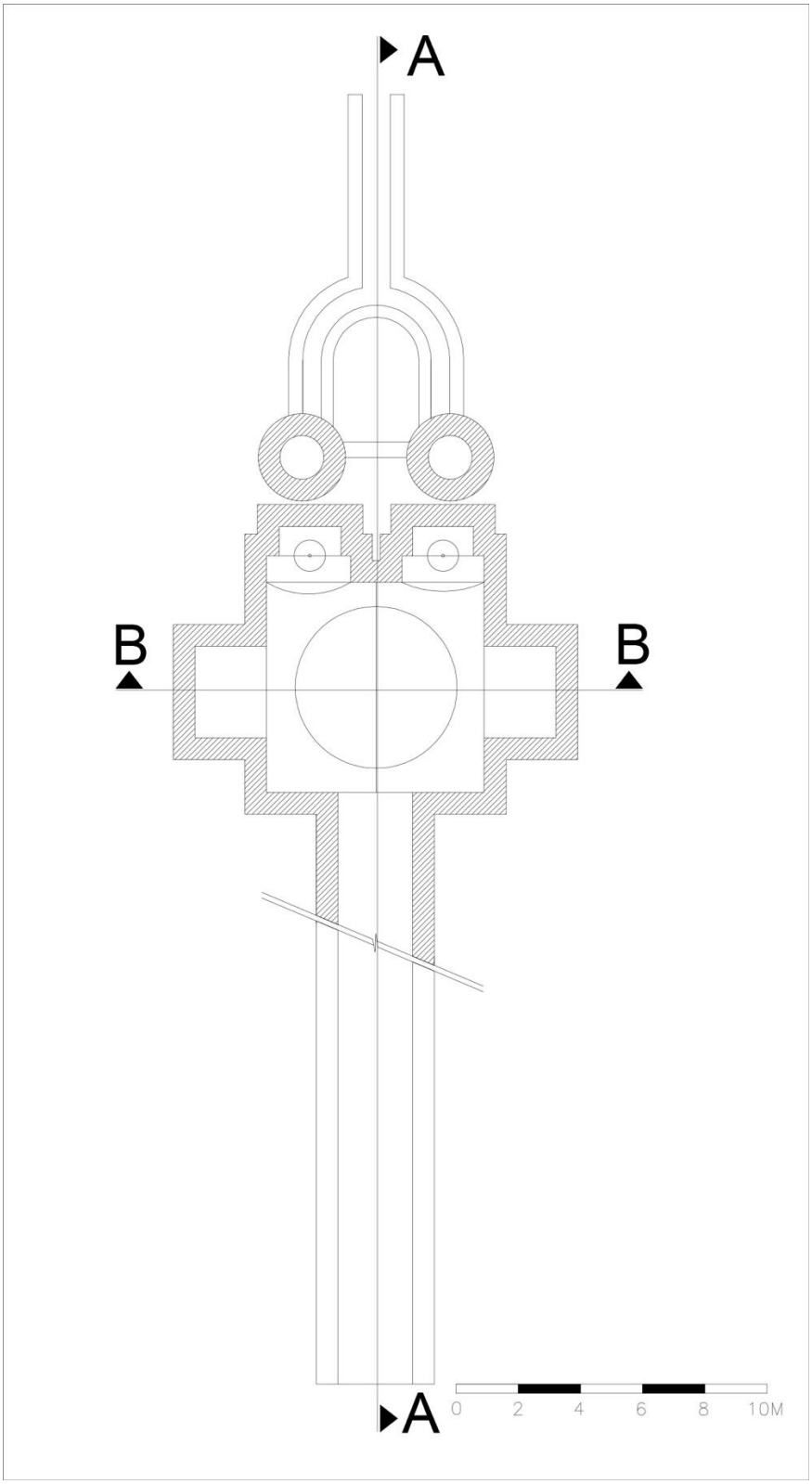


Figure 1-24 : Plan du moulin à eau de Salâmi

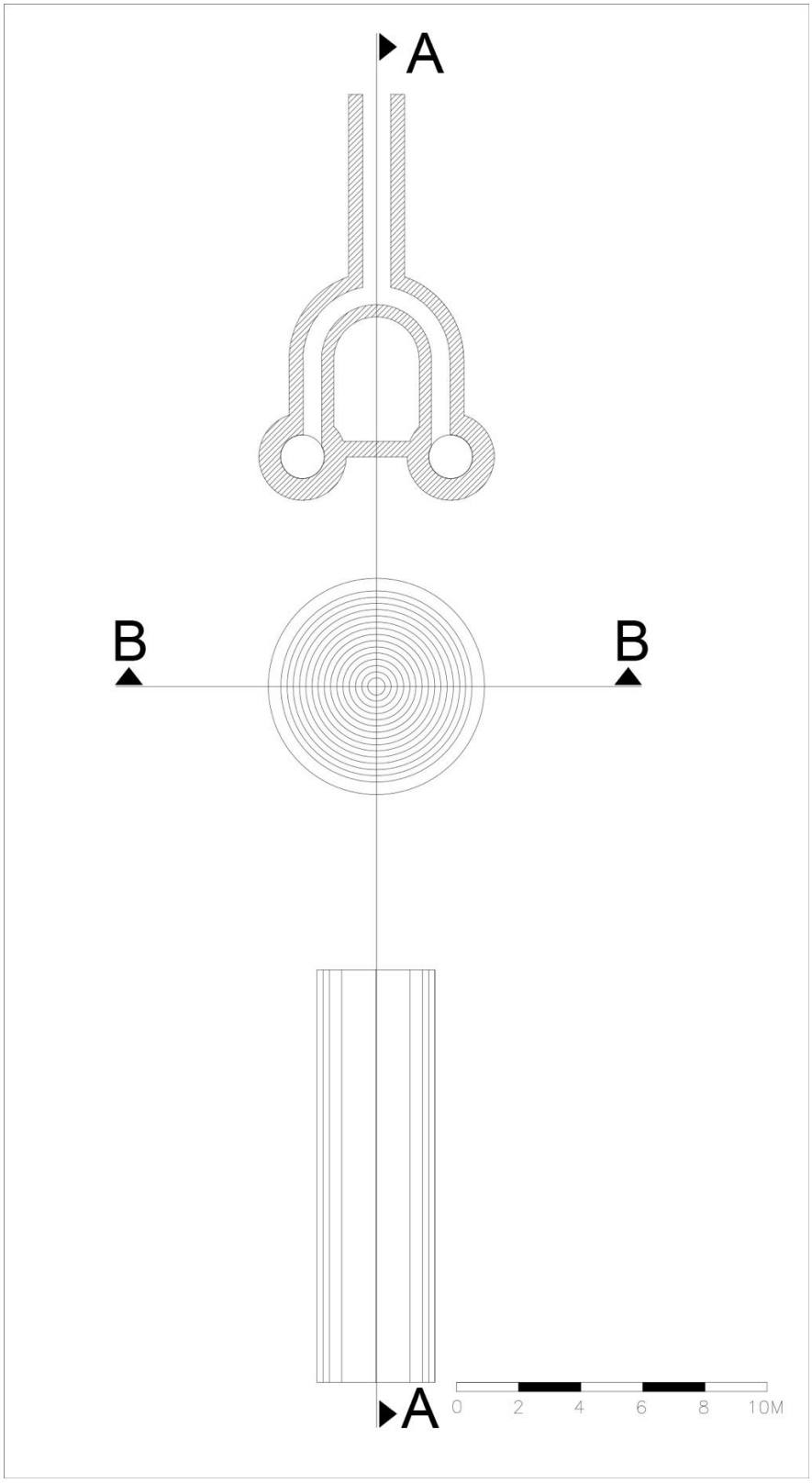


Figure 1-25 : Plan du moulin à eau de Salâmi

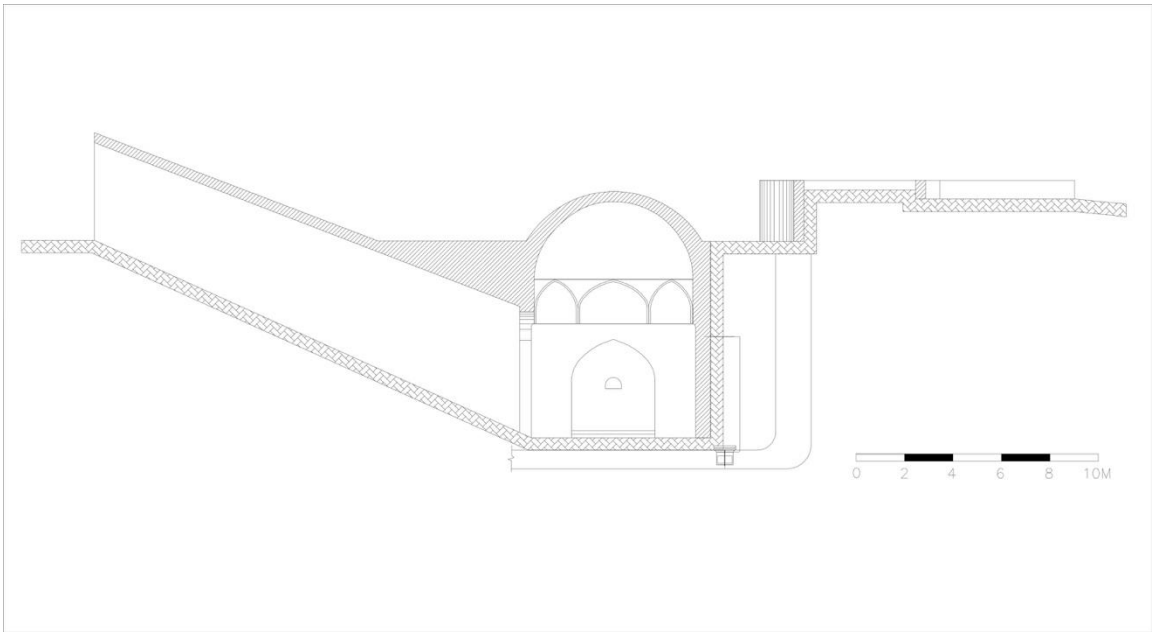


Figure 1-26 : coupe longitudinale du moulin à eau de Salâmi

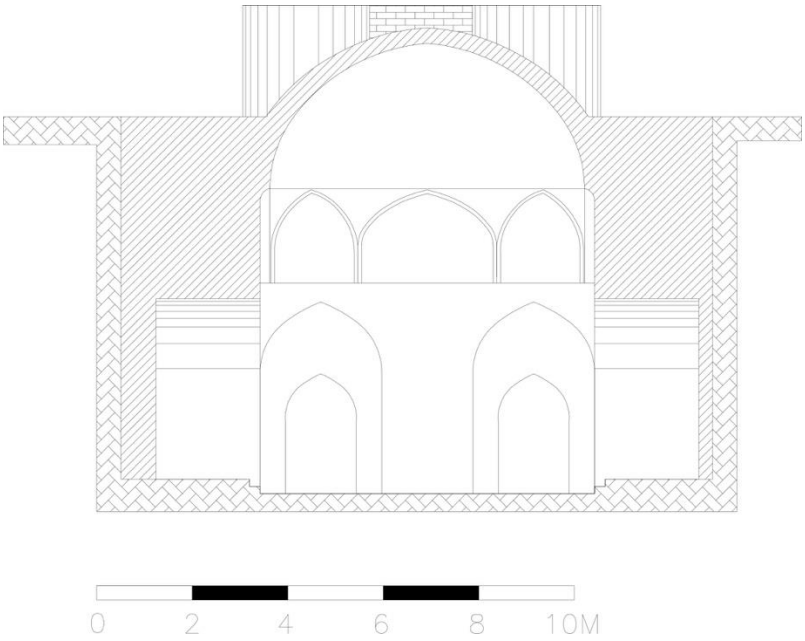


Figure 1-27 : coupe transversale de moulin à eau de Salâmi.

Entrée

La nature des courants d'eau à la surface et l'importance de la colonne d'eau dans le réservoir d'un moulin à vent obligea parfois les meuniers à installer le moulin plusieurs mètres sous terre. Dans la plupart des cas, l'espace intérieur, la chambre de la meule et l'autre chambre

du moulin à eau se trouvaient donc sous terre. Seuls un escalier et une entrée reliait ce type de moulin à l'espace extérieur. L'entrée et l'escalier étaient construits en briques et normalement ce travail de construction était de qualité, de façon à ce que l'entrée du moulin soit bien visible ; c'était le seul signe extérieur de la présence de ce mécanisme.

Figure 1-28 : La seul manifestation d'un moulin à eau sur la surface de terre, moulin à eau de Tchâh-Fâliz.

Figure 1-29 : Deux autres types d'entrées, moulin à eau de N° 1 et N° 2 du Ferdaus.

Figure 1-30 : Une entrée pour un moulin à eau sous la terre, moulin à eau N° 4 du Bauchravieh, Khorasan du sud

Figure 1-31 : Entré et le couloire d’accé , moulin à eau de Tchâh-Fâliz.

Espace intérieur

L’espace intérieur d’un moulin à eau de type Khorasan comprend normalement deux chambres principales : la chambre de la meule et la chambre du réservoir pour la farine. Mais dans la plupart des cas ces deux espaces sont intégrés et nous n’avons qu’un seul espace, organisé pour les deux besoins initiaux de ce type de moulin. Cela dit, plusieurs moulins à eau disposent d'espaces complémentaires comme un espace pour la pesée et un réservoir pour les meules.

Figure 1-32 : Chambre de meule et espace réservée pour la farine produit dans le moulin à eau N° 4 du Bauchravieh, Khorasan du sud

Figure 1-33 : Espace réservée pour le meule et l'espace de peser dans le moulin à eau N° 4 du Bauchravieh, Khorasan du sud

Canalisation et réservoir d'eau

La canalisation d'eau est considérée comme l'une des infrastructures initiales de chaque type de moulin à eau. Dans le cas du moulin à eau du Khorasan, la canalisation d'eau est construite dans la continuité des courants d'eau. Cette canalisation oriente les courants d'eau vers un moulin à eau en particulier ou vers une chaîne de moulins à eau. Le réservoir d'eau est construit au bout de la canalisation. C'est lui qui fournit un courant d'eau sous pression vers les pales tournantes du moulin à eau. Le diamètre du cylindre d'une colonne d'eau varie entre 1 et 2,5 mètres ; la hauteur de la colonne peut atteindre 10 mètres selon la situation climatique, le niveau d'eau, la topographie du terrain et la puissance nécessaire. Les matériaux utilisés pour la construction du réservoir sont variés. Pour quelques réservoirs, qui sont en fait plutôt des puits creusés dans la terre, comme dans le cas du moulin à eau de Tchah-Faliz, c'est la terre qui résiste à la pression de l'eau et un mur de briques simple peut être suffisant pour le revêtement de la surface intérieure. Mais dans le cas où les moulins à eau ont un réservoir externe, les meuniers utilisent des matériaux lourds et étanches, et construisent des murs épais de briques ou de pierres pour contrôler la très forte pression exercée par l'eau dans le réservoir d'eau.

Figure 1-34 : canalisation et réservoir d'eau d'eau du moulin à eau de Kâkou qui sont construit avec le pierre, Sarayan, Khorasan du Sud.

Figure 1-35 : canalisation et réservoir d'eau d'eau du moulin à eau N° 1 du Ferdaus qui sont construit avec le brick, Ferdaus, Khorasan-e Razavi.

Figure 1-36 : réservoir d'eau du moulin à eau N° 2 du Ferdaus, Ferdaus, Khorasan-e Razavi.

Figure 1-37 : réservoir d’eau du moulin à eau N° 2 du Ferdaus, Ferdaus, Khorasan-e Razavi.

Figure 1-38 : Coupe de réservoir du moulin à eau détruit du Kakhk, Kakhk, Khorasan du Sud.

Meule et le mécanisme technique

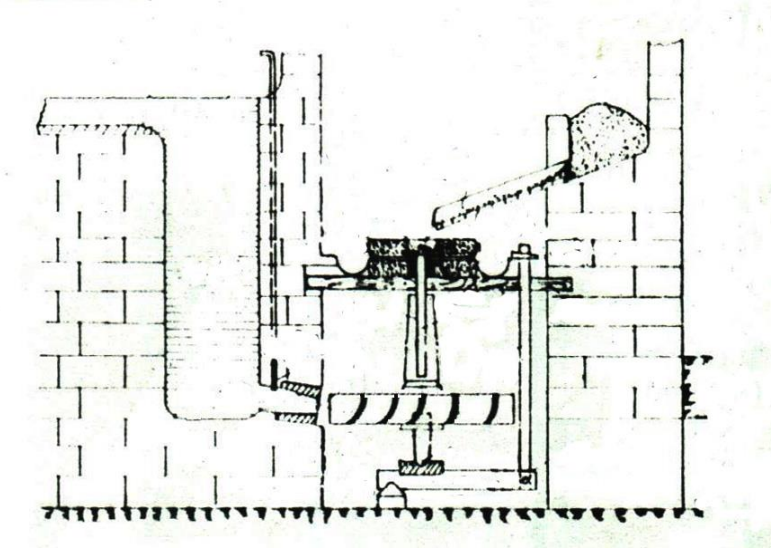


Figure 1-39. mécanisme d'un moulin à eau à axe vertical. Source : Hanse WOLF[41].

Le mécanisme de ce type du moulin à eau est considéré comme un mécanisme de base pour l'invention du moulin à vent. Nous avons donc besoin de le définir clairement : chaque moulin à eau a un réservoir d'eau qui, selon la puissance voulue, a une hauteur de 6 à 10 mètres et un diamètre de 1,50 mètre, ce qui peut fournir la pression nécessaire pour créer un « jet d'eau » concentré sur les pales d'une roue verticale (figure 1-29).

Une canalisation conduit l'eau du réservoir vers la roue verticale, l'eau sort d'un trou qui est creusé normalement dans une pièce de bois et dont le diamètre peut varier selon la hauteur d'eau du réservoir aux différentes saisons. Par exemple, si la hauteur du réservoir est de 8 mètres, le meunier utilise une pièce de bois qui a un trou de 12 cm de diamètre ; dans cette situation, la meule tourne à 164 tours par minute, génère une force égale à 10 chevaux et peut produire 200 kg farine par heure. Dans les mois où le niveau d'eau est plus faible, les meuniers utilisent des trous dont les diamètres sont de 10, 8,75 et 7,5 cm, ce qui génère une force égale à 8,5, 6,1 et 4,5 chevaux respectivement. Avec ces différents réglages, la meule tourne à 160, 155 et 151 tours par heure respectivement et la farine produite est de 176, 125 et 90 kg[42].

[41]- Ibid.

[42]- Ibid, p.253

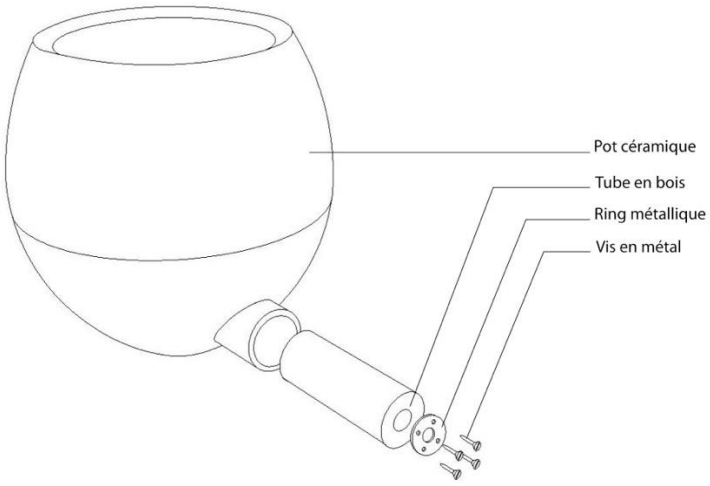


Figure 1-40. mécanisme du jet d'eau d'un moulin à eau à axe vertical.

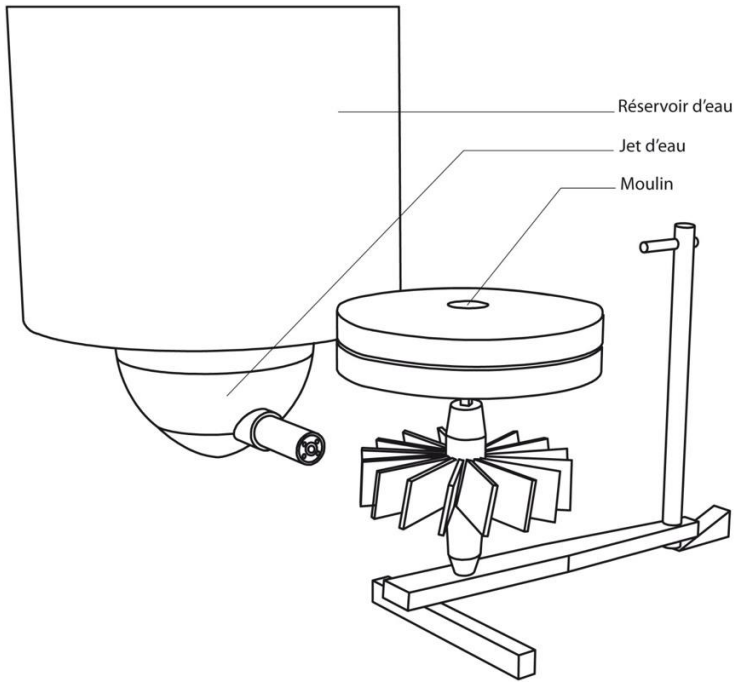


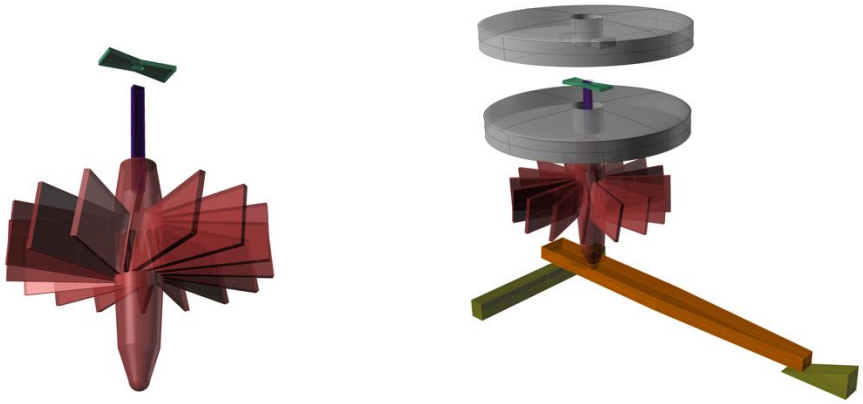
Figure 1-41.mécanisme technique d'un moulin à eau à axe vertical de Khorasan

Figure 1-42 : Le pot d’eau (ou tamboucheh), un produit céramique pour transfer d’eau de réservoir d’eau vers la tube de bois de jet d’eau , Moulin à eau de Tchah-Faliz , Khorasan-e Razavi.

Figure 1-43 : pièces de jet d’eau et bouchon utilisé pour couper le courant d’eau du moulin à eau du Kâkou, Sarayan, Khorasan du Sud.

Figure 1-44. La place d'instalation de tube de bois de jet d'eau et pierre inferieur de meule dans le moulin à eau de Tchâh-Fâliz.

Figure 1-45 : Lame métallique qui s'installe sur l'axe vertical et sa place dans le gap de pierre supérieure du moulin à eau du Kâkouh, Sarayan, Khorasan du Sud.



1 2

Figure 1-46.1-La Turbine d’eau, Mikh et Tavarreh d’un moulin à eau à axe vertical de Khorasan

2-Kharak, Turbin d’eau, Mikh, Tavarreh, et la meule d’un moulin à eau à axe vertical de Khorasan

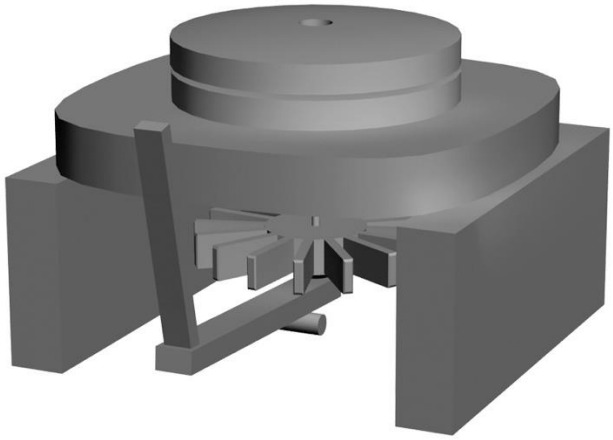


Figure 1-47. Un mécanisme technique complet d’un moulin à eau à axe vertical de Khorasan

Figure 1-48 : La roue d’eau dans le moulin à eau moulin à eau N° 1 du Bauchravieh , Khorasan du Sud.

Figure 1-49.La sorti de jet d’eau, la roue d’eau et le mécanisme contrôle de jet d’eau dans les moulins à eau de Kakouh et Barkalât, Khorasan du sud

Figure 1-50. Le meule, le réservoir de blé dans le moulin à eau de Barkalât, Khorasan du sud

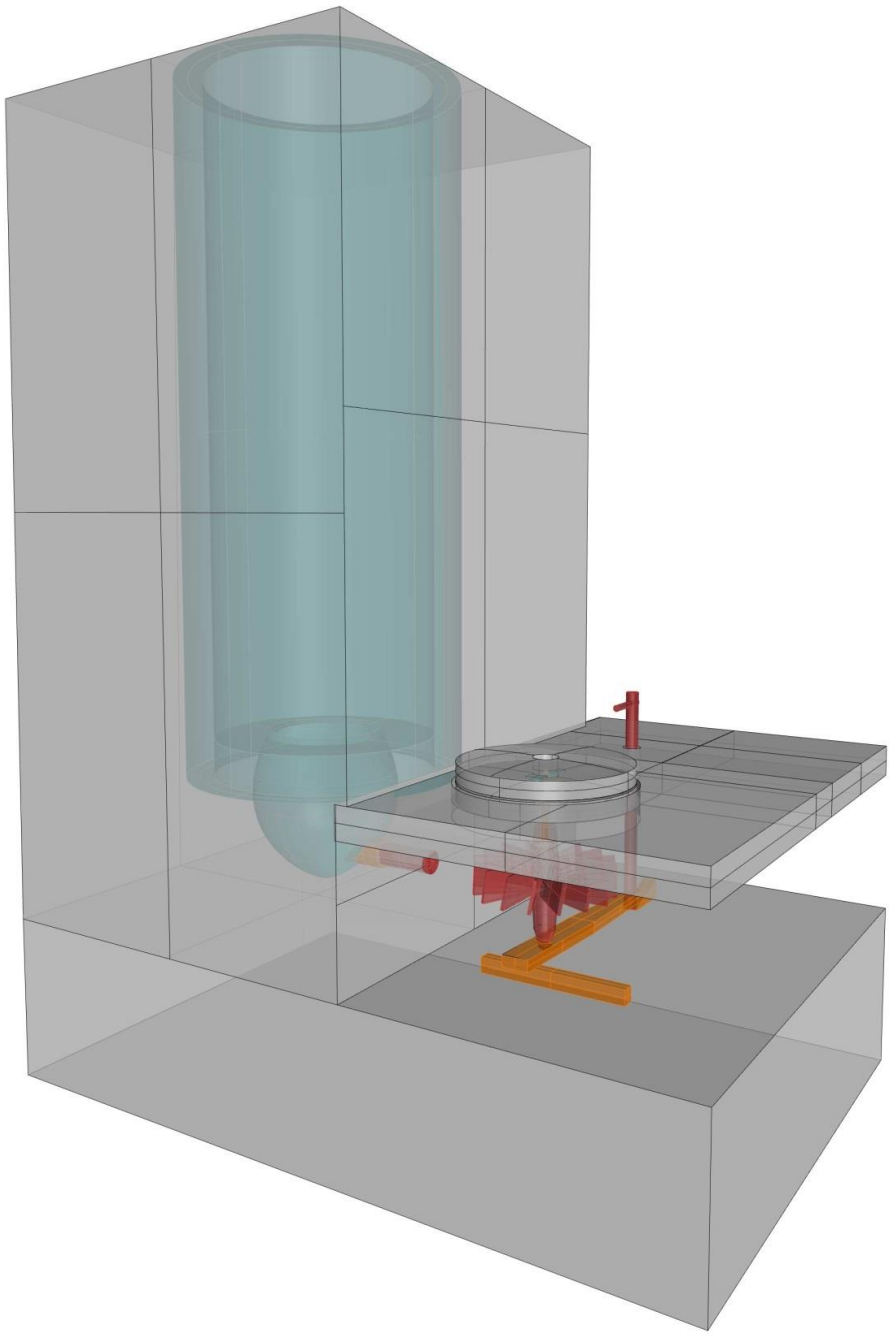


Figure 1-51. Le réservoir d’eau et le mécanisme technique d’un moulin à eau à axe vertical de Khorasan

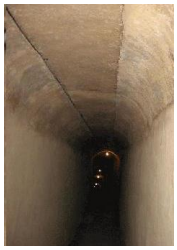
Une recherche sur les Moulins à eau à axe vertical du Khorasan

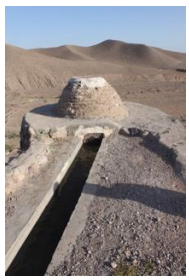
Au cours de notre recherche sur l'origine du moulin à vent à axe vertical, nous avons eu besoin d'informations plus précises sur les moulins à eau à axe vertical du Khorasan. Nous avons donc mené une campagne de relevés sur les moulins à eau du Khorasan et du Khorasan du Sud. Grâce à ce vaste travail, nous avons pu étudier les caractéristiques d'une série de moulins à eau à axe vertical. Cette étude nous a permis d'ajuster notre hypothèse selon laquelle le moulin à vent à axe vertical fut inspiré du moulin à eau à axe vertical. Dans un cas, dans le village de Tizab, il existait même un moulin à eau *et* un moulin à vent, ce qui tend à prouver que le moulin à vent s'est inspiré du moulin à eau. Cela dit, le sujet de thèse n'est pas le moulin à eau. Nous disposons d'une assez riche documentation sur le moulin à eau à axe vertical iranien du Khorasan mais nous ne présenterons que de brefs éléments ainsi qu'un exemple de ce type de moulin pour examiner ses différents espaces et son mécanisme technique.

Compte-tenu de la morphologie d'un moulin à eau à axe vertical, nous nous pencherons ici sur la longueur de la canalisation, la largeur maximum des espaces connectés, la hauteur moyenne de l'espace de travail de chaque moulin à eau ainsi que sur l'état actuel de ces moulins à eau ; nous et certaines citations particulier sur chacun.

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Tagezou Gonabad/Kakhk/Tagezou N: 37°99’520" E:64°48’451"	45 m 6m 8.5m	Période Qadjar Abandonné	Ce sont deux moulins à eau installés dans une vallée en altitude, sur un courant d’eau.	
Tizâb Khaf/Tizab N: 34°47'9.84" E: 59°51'8.20"	30m 5m 4m	Période Safavide Abandonné	Selon certains habitants, ce moulin à eau est abandonné depuis près d’une décennie.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Tchah-Faliz Gonabad/Bejestan/Tchah-Faliz N: 34°47'1.92" E: 58°22'17.80"	15m 3m 6m	Période Safavide Abandonné	Ce moulin à eau a fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	
Dorouneh Kachmar/Bardeskan/Dorouneh N: 35°6'30.77" E:57°59'45.60"	120 m 6m 6m	Période Qadjar Abandonné	C'est un moulin à eau de la période Qadjar, qui fut rebâtit à la période Pahlavi.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Rigâd Kachmar/Bardeskan/Rigâd N:35°16'20.09" E: 58°14'15.17"	250m 5m 8m	Période Qadjar Abandonné	Le réservoir d'eau dans ce moulin à eau a été gravement abimé	 
Sar-Asiab No1 Gonabad/Barakou/Sar-Asiab N: 37°97'07" E: 63°19'40"	40m 5m 4m	Période Qadjar Abandonné	Ce moulin à eau a fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	

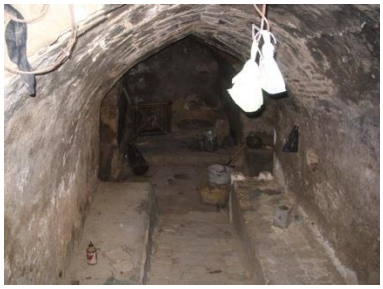
Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Sar-Asiab No2 Gonabad/Barakou/Sar-Asiab **N: 37°97'06"** **E: 63°15'61"**	23 m 4.5m 4.3m	Période Qadjar Abandonné	C'est un moulin à eau de la période Qadjar, qui fut rebâtit à la période Pahlavi.	
Kakou Ferdows/Sarayan/Kakou **N: 33°52'1.42"** **E: 58°34'46.70"**	150m 8m 3m	Période Qadjar En état de marche	Ce moulin à eau a fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	 

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Baqestan Gonabad/Baqestan **N: 34°07'45"** **E: 58°20'43"**	12.7 m 10.5m 6.5m	Période Safavide Abandonné	Ce moulin fut construit avec un matériau composé de pierres et de terre crue.	
Ferdows No1 Ferdows/Ferdows **N: 34° 0'40. 12"** **E:58°11.47'07""**	50m 12m 4m	Période Qadjar Dans le bon état	C'est un moulin à eau qui fut restauré par le propriétaire, mais qui n'est pas en état de fonctionnement.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Zangi Bochravieh/Bochravieh N: 33°50'56.95" E:57°25'10.16"	200m 12.5m 12m	Période Safavide Dans l'état de marche	C'est un moulin à eau qui fut restauré par le propriétaire.	
Mirza Ferdows/Bochravieh/Ali-Djamal N:33°45'57.68" E: 57°26'24.82"	50m 15m 4m	Période Safavide Abandonné	Ce moulin à eau a également fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Aqa Ferdows/Bochravieh N: 33°53'39.97" E: 57°28'22.21"	50m 10m 3m	Période Safavide Restauré	C'est un moulin à eau qui fut restauré par le propriétaire.	
Dahaneh Bochravieh/Bochravieh/Raqé N 33°55'58.60 " E: 57°27'12.71"	200m 12.5m 12m	Période Safavide Dans l'état de marche	C'est un moulin à eau qui fut restauré par le propriétaire.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Sorouch Ferdows/Bochravieh/Ali-Djamal N: 33°55'26.93 " E: 57°24'16.21 "	40m 20m 3m	Période Safavide Dans l'état de marche	Ce moulin à eau a également fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	
Sangi Ferdows/Bochravieh N: 33°56'8.23" E: 57°23'17.46"	67m 12m 5m	Période Qadjar En état de marche	Ce moulin à eau a également fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Cheikhi Bochravieh/Bochravieh **N: 33°58'36.56"** **E: 57°21'14.10"**	45m 6m 3m	Période Safavide Dans l'état de marche	C'est un moulin à eau qui fut restauré par le propriétaire.	
Barkalat Birdjand/Barkalat **N:32°56'46.29"** **E: 59°17'49.89"**	35m 7m 4m	Période Safavide Dans l'état de marche	Ce moulin à eau a également fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	

Nom de Moulin à eau Région/Ville/Village Coordonnées	Longueur Largeur Hauteur	Antiquité Etat de Marche	Caractéristique Physique	Photo
Fakhroud Birdjand/Darian/Fakhroud N:32°57'56.34" E: 59°17'3.74 "	150m 8m 3m	Période Qadjar Abandonné	Ce moulin a été gravement endommagé.	
Afin Qaen/Afin N:33°45'51.08 " E: 59°16'47.26"	250m 12m 5m	Période Qadjar Abandonné	Ce moulin à eau a également fonctionné aux périodes Qadjar et Pahlavi.	

Chapitre II

Sistan

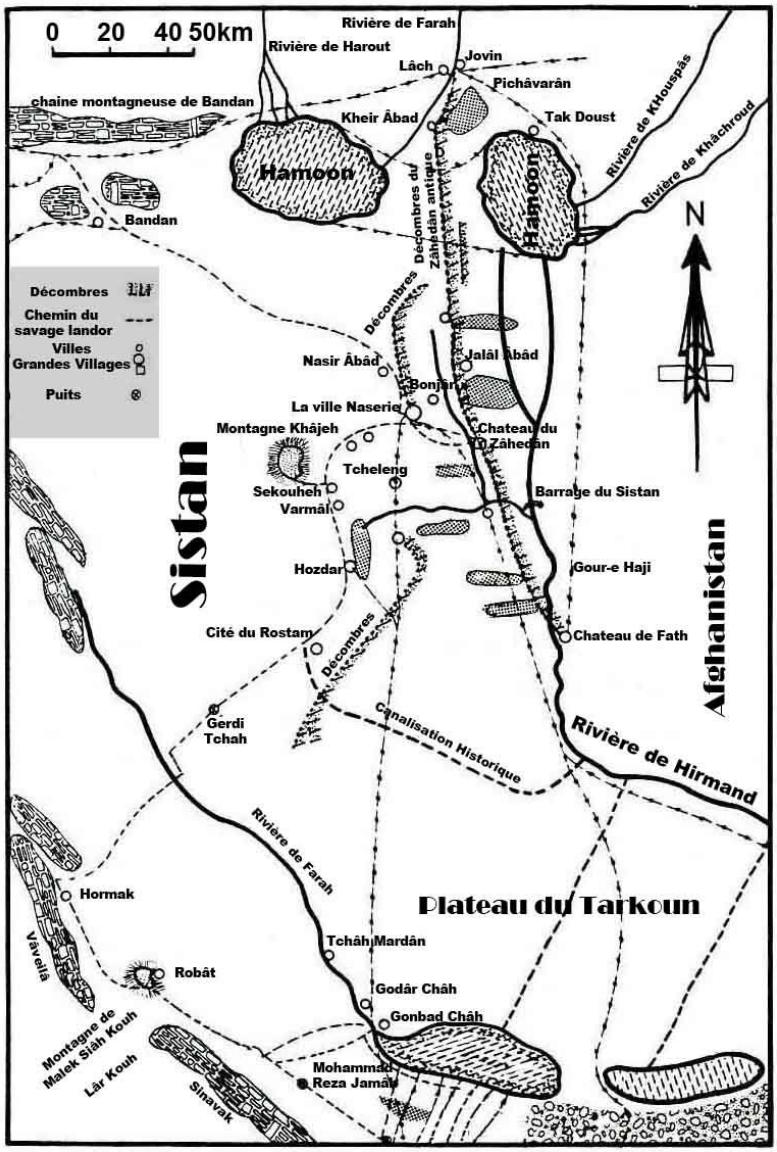
Sistan en Iran

Sistan était toujours un de provinces importantes d'Iran au niveau économique tant qu'au niveau politique. Dans deux périodes historiques différents il prend le rôle de producteur en masse de graine du pays, ce qui devint possible grâce à la rivière du Hirmand. Le grand Sistan historique a été partagé entre l'Iran et l'Afghanistan depuis l'arbitrage de Mac-Mahon en 1905[43], cette partition du territoire a causé également au partage de la rivière Hirmand, ses sources et les trois lacs constitué la lac Hamoun, un partage qui est toujours un sujet polémique pour les enjeux permanent aux deux côté de frontière sur la question d'eau. Alors que la partie restée du Sistan en Iran n'est pas autant vaste que la partie restée en Afghanistan mais selon arbitrage de Mac-Mahon les plus nombreux points habitables, les terres fertiles et le plupart des sites historiques ont restés en Sistan principal, il s'agit du Sistan d'Iran. Le territoire du Sistan constitue aujourd'hui une partie de province de Sistan-Baloutchistan et se trouve au nord de cette province dont sa chef-lieu est la ville de Zâhedân.

Carte 2-1: Sistan en Iran . Source : Sience Po[44].

43

44- http://cartographie.sciences-po.freniran-d-coupage-administratif-1996.jpg



Carte 2- 2 : carte du Sistan selon Henry Savage Landor[45], dessinée vers 1902. Source : Hassan Ahmadi[46].

[45]- **Arnold Henry Savage Landor**, est un peintre, explorateur, écrivain et anthropologue anglais. Il voyagea d'abord en Amérique du Nord puis en Extrême-Orient et publia le compte-rendu de son séjour parmi les peuplades primitives Ainous des iles Kouriles. Le récit de son expédition, véritable « best-seller » à la fin du XIX[er] siècle, fut publié dans la prestigieuse revue Le Tour du monde. Dans son livre Le pays désiré se trouve une série de rapports sur le Sistan.

[46]- **(per) AHMADI, Hassan**, 1999, p.586

Sistan, géographie physique

«La construction de barrages contre l'eau et le sable mais aussi contre les criminels est essentielle au Sistan. Si les trois types de barrages sont bâtis, nulle région au monde ne sera aussi fertile et stable que le Sistan»[47].

Le Sistan se trouve aujourd'hui à l'est de l'Iran et au nord de la province du Sistan et Baloutchistan. C'est une plaine plate et fertile située entre 30° et 18‘ et 31° et 20‘ de latitude nord et 61° et 10‘ et 61° et 50‘ de longitude sud par rapport au méridien de Greenwich. Le Sistan est à 600 kms de la mer d'Oman et son altitude par rapport au niveau de la mer varie entre 475 et 500 mètres. Le territoire mesure 171 kms de long et 168 kms de large et est limité au nord par l'Afghanistan, au nord-ouest par le désert du Lout et la ville de Birjand au Khorasan, et au sud par la ville de Zâhedân. La terre du Sistan est constituée d'alluvions de la rivière Hirmand ; à son point le plus bas, se trouvent quelques lacs d'eau douce appelés «hamouns». A quelques 40 kms au sud-est de la ville de Zâbol, capitale actuelle du Sistan iranien, se trouvent trois cavités naturelles portant le nom de Tchah-Nimeh et dont les réserves en eau sont utilisées aujourd'hui pour l'irrigation au moment des sècheresses.

Pour définir la géographie physique du Sistan, on peut dire que le plateau du Sistan est constitué d'un ensemble de deltas qui se sont créés sur des milliers d'années grâce au changement de direction de la rivière Hirmand, qui divise la région en deux parties, selon un axe nord-sud. Le plateau du Sistan, qui constitue une partie du grand plateau iranien, est bordé par de hautes montagnes. Les principales phénomènes géographiques du Sistan sont la plaine, les lacs, le delta et la rivière ; chacun et chacune ont joué un rôle important dans l'histoire de cette région. McMahon[48], officier anglais chargé de la mission de partage du Sistan entre l'Iran et l'Afghanistan au début de XXe siècle (1903-1905), a bien décrit la géographie physique du Sistan :

> « La superficie du territoire du Sistan est aujourd'hui de 7006 mille carré dont 2847 mille carré se trouve en Iran et 4159 mille carré en Afghanistan. La fertilité unique de la terre du Sistan et le volume d'eau incroyable charrié par la rivière Hirmand font de cette région l'une des plus riches du pays sur le plan agricole… Bien que les habitants ne soient pas très laborieux et que leurs outils agricoles soient rudimentaires, ils ont une production importante, produisent plus qu'ils n'en ont besoin et pourraient produire encore davantage. Sous le contrôle d'un gouvernement compétent, la province du Sistan, avec un peu d'effort, serait comparable à l'Egypte. Comme elle était très fertile auparavant, elle le sera sans doute encore[49]».

---

[47]- **(per) Auteur inconnu**, « *Histoire du Sistan* »,ecrit vers XIII siècle et corrigé par Mohammad Taghi Bahâr, Edition Moien, Téhéran, 2002, p.64

[48]- **Sir Arthur Henry MacMahon** (1862 - 1949) est un homme politique britannique. Il présida la commission qui délimita la frontière entre Iran et Afghanistan entre 1903-1905. Il négocia également avec le chérif Hussein lors de la rébellion arabe contre l'empire ottoman durant la Première Guerre mondiale.

[49]- **(per) AHMADI, Hassan**. « *Géographie historique du Sistan, voyage avec les carnets du voyage* », Publié par auteur, Téhéran, 1999, p.369

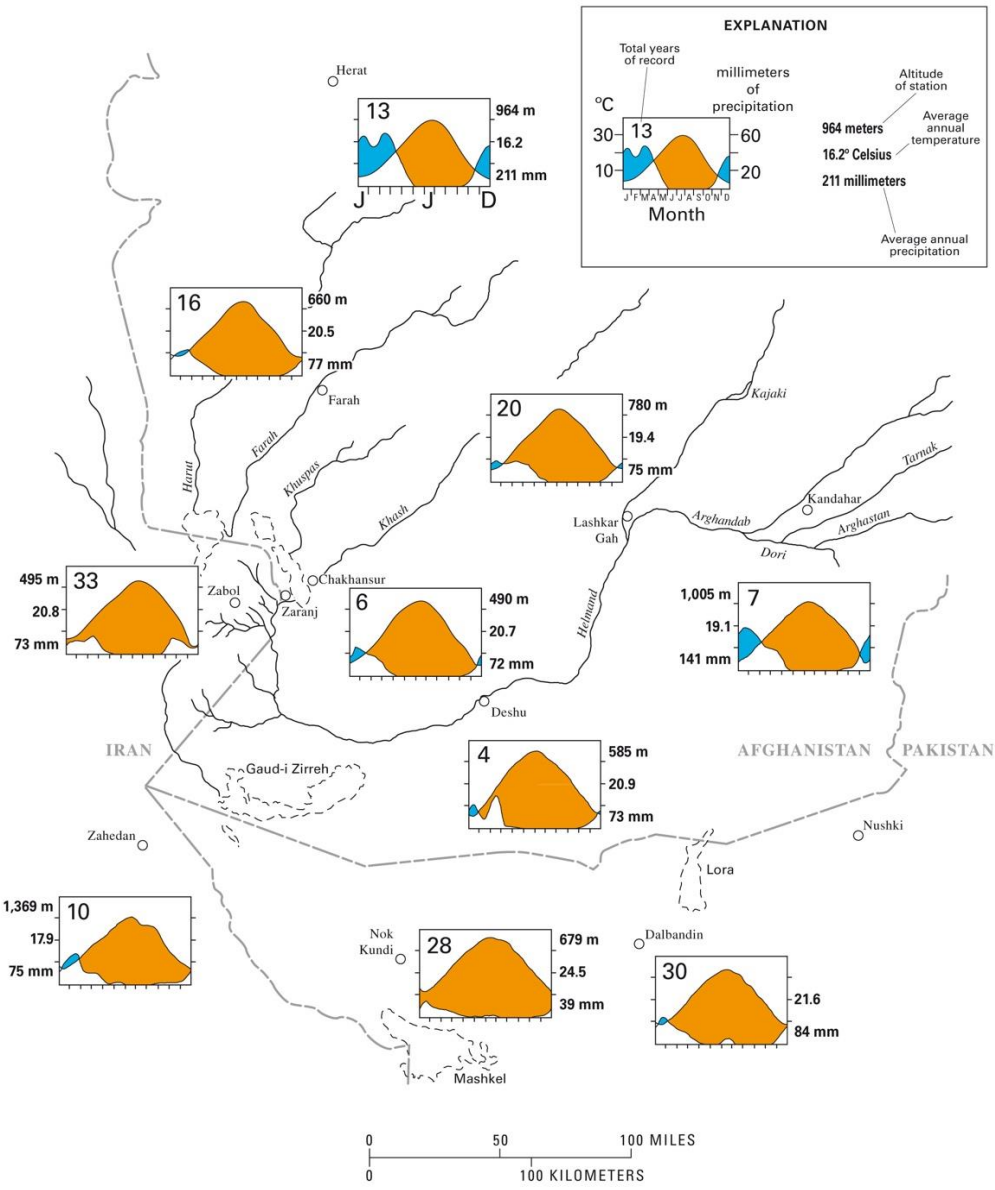


Figure 2-1 : diagramme climatique de bassin du Hirmand. Source : John W. Whitney[50].

« Mis à part quelques terres en altitude et quelques collines couvertes de pierres et de sable, la province du Sistan est un territoire plat, dont la majeure partie de la surface est désertique, hors quelques zones habitées. Au Sistan, aucun obstacle ne masque la ligne d'horizon, mis à part, un peu partout, d'anciennes constructions abandonnées. Aucun territoire n'a autant de constructions en ruine. La plupart de ces bâtiments ont été construits en terre crue, rarement en brique. Ces constructions en terre crue ont néanmoins tenu debout pendant des siècles. Comment ? Les murs ont en fait une épaisseur importante et la terre de la région est idéale pour la construction de tels ouvrages en terre crue. D'autre part, le plateau

[50]- **(en)WHITNEY, John W.** *« Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghnistan* », U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2006, p.17

du Sistan reçoit peu de pluie. Le seul point en altitude est le Kouh-e Khajeh, une colline de basalte qui s'élève à environ 609 mètres au-dessus du niveau de la mer. [51]»

Hirmand et Hamoun

Comme nous l'avons expliqué, la fertilité et la destruction du Sistan sont très dépendantes de trois problèmes de base liés à ce territoire. Le premier, le problème des ennemis et le rôle déterminant du Sistan au niveau local et national, a été décrit précédemment. Autre problème à résoudre : la gestion de l'eau de la rivière Hirmand. L'Hirmand est la principale rivière du Sistan. Elle prend sa source dans une chaîne montagneuse située à proximité de Kaboul, puis coule sur une distance de 1200 kms, du centre de l'Afghanistan jusqu'au lac Hamoun.

Le volume d'eau qui parvient au Sistan en période de sècheresse atteint au minimum 55 m^3 par seconde, ce qui montre la taille de cette rivière ; en période d'inondations « normales », le volume d'eau est de 1400 à 2000 m^3 par seconde ; en période de grandes inondations, qui surviennent de temps en temps, entre 17000 et 20000 m^3 d'eau coulent sur le plateau du Sistan, ce qui montre par ailleurs le rôle dévastateur qu'a pu avoir l'Hirmand pour les civilisations locales au fil des siècles. Ces chiffres confirment à quel point l'Hirmand est importante : au sud de l'Asie, entre le Tigre et l'Indus, elle est le plus grand des cours d'eau ; elle crée un grand delta à proximité du lac Hamoun, là même où se développèrent certaines civilisations antiques du Sistan. Le cours de cette rivière a changé plusieurs fois au cours des siècles. Ce changement permanent ne serait pas étranger au déplacement des sociétés et des cultures locales. La Cité Brulée[52], (Chahr-e-Soukhteh), site historique le plus important du Sistan, a été fondée au bord du delta de la rivière Hirmand. La Cité Brûlée a probablement pu se maintenir du quatrième au deuxième millénaire avant notre ère grâce à cette rivière [53].

---

[51]- Ibid, p.370

[52]- «**Chahr-e-Soukhteh**», (littéralement **la cité brûlée**), est l'un des plus remarquables emplacements archéologiques du monde, située, sur la rive de la rivière «Hirmand», au bord de la route reliant la ville de «Zâhedân» à «Zâbol», à 55 kilomètres, au sud de «Zâbol». Fondée, à l'aube de l'ère urbaine, la cité fut bâtie sur l'une des avancées du delta du Sistan, dominant de quelques mètres les plaines environnantes. Dès le 3e millénaire avant notre ère, les habitants y cultivaient la terre. Cette chaîne de petites collines, qui juxtapose les plus anciennes terres du delta de «Helmand», remonte à l'âge de bronze.

[53]- **(per) SEYED SADJADI, Seyed Mansour.** 1995, p199

Figure 2-2 : deux traces principales au bord de la rivière Hirmand sur un point joint de rivière d'Arghandab au Hirmand, la premier trace est formée par les courants d'eau la deuxième par l'érosion du vent. Source : John W. Whitney[54].

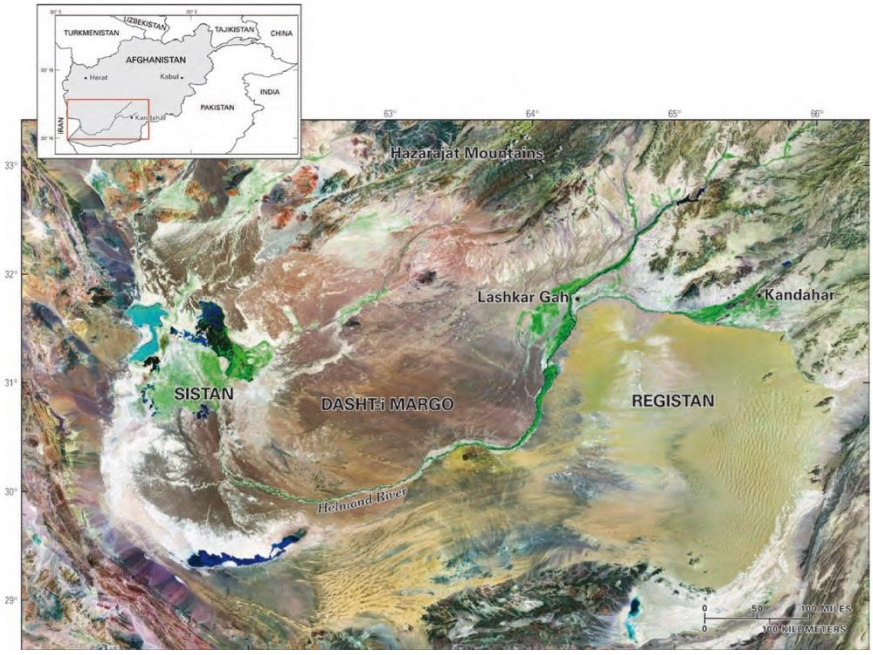


Figure 2-3: image satellite de bassin de la rivière Hirmand. Source : John W. Whitney[55].

La « fécondité » du Sistan est donc très dépendante du contrôle de cette rivière. C'est pour cela que les barrages ont une fonction essentielle, d'autant que les grandes inondations et les sècheresses périodiques sont des menaces réelles et permanentes pour chaque période de fertilité du Sistan. Selon des sources historiques, au moment de l'invasion de Tamerlan, la ville de Zarang, capitale post-islamique du Sistan, fut encerclée par des troupes mongoles. Comme les sistanis résistaient, Tamerlan ordonna de faire détruire le barrage du Sistan. Le résultat fut

[54]- **(en)WHITNEY, John W.** *« Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghnistan* », U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2006, p.5

[55]- **(en) WHITNEY, John W.** « Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghnistan », U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2006, p.2

catastrophique : non seulement la ville de Zarang, considérée comme l'une des plus grandes villes iraniennes de l'époque, est abandonnée pour toujours mais la situation socio-économique du Sistan sera complètement bouleversée pendant plusieurs siècles. Compte-tenu des caractéristiques du plateau du Sistan, compte tenu également du mouvement permanent du sable qui se déplace sous l'action du vent ainsi que de la présence de sédiments charriés par l'eau, le bassin de la rivière Hirmand s'est modifié au cours du temps. Sur le plateau du Sistan, la destruction et l'abandon de villes et villages et même de civilisations situées au bord de la rivière est donc un phénomène normal, dû au déplacement du bassin de l'Hirmand.

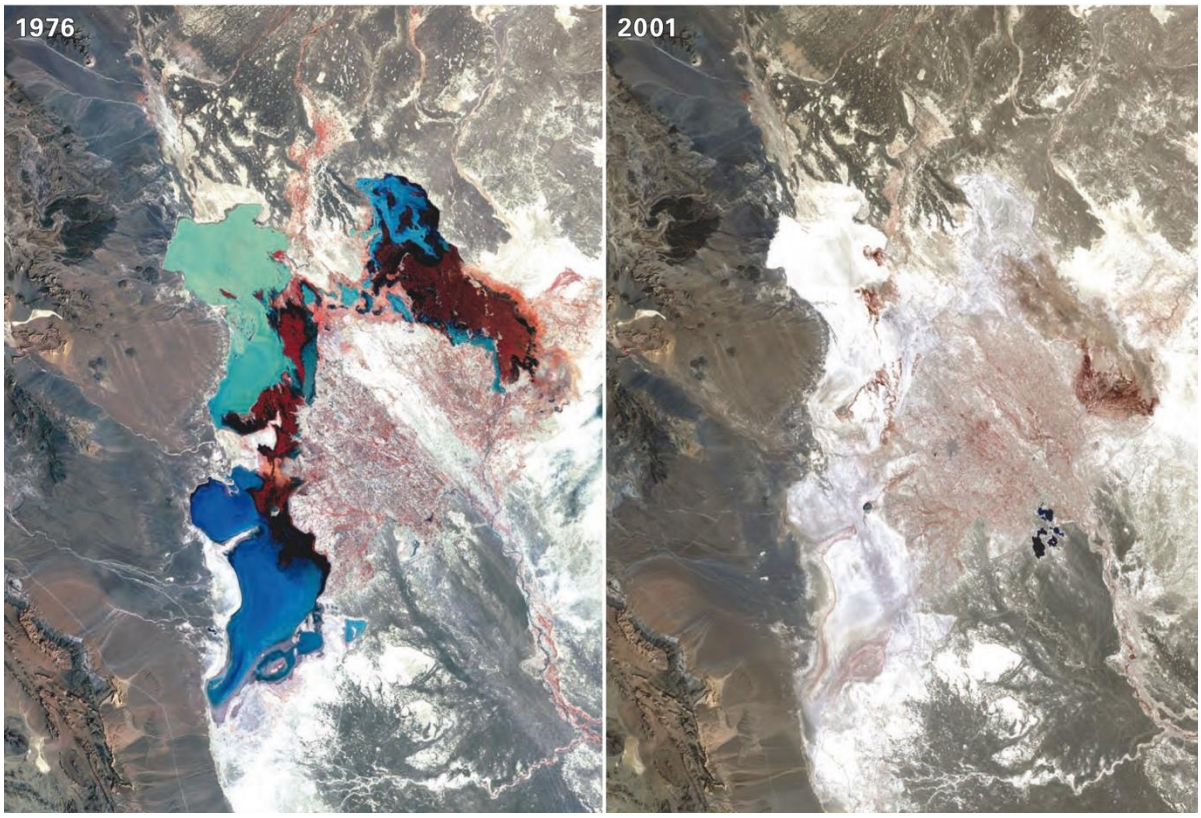
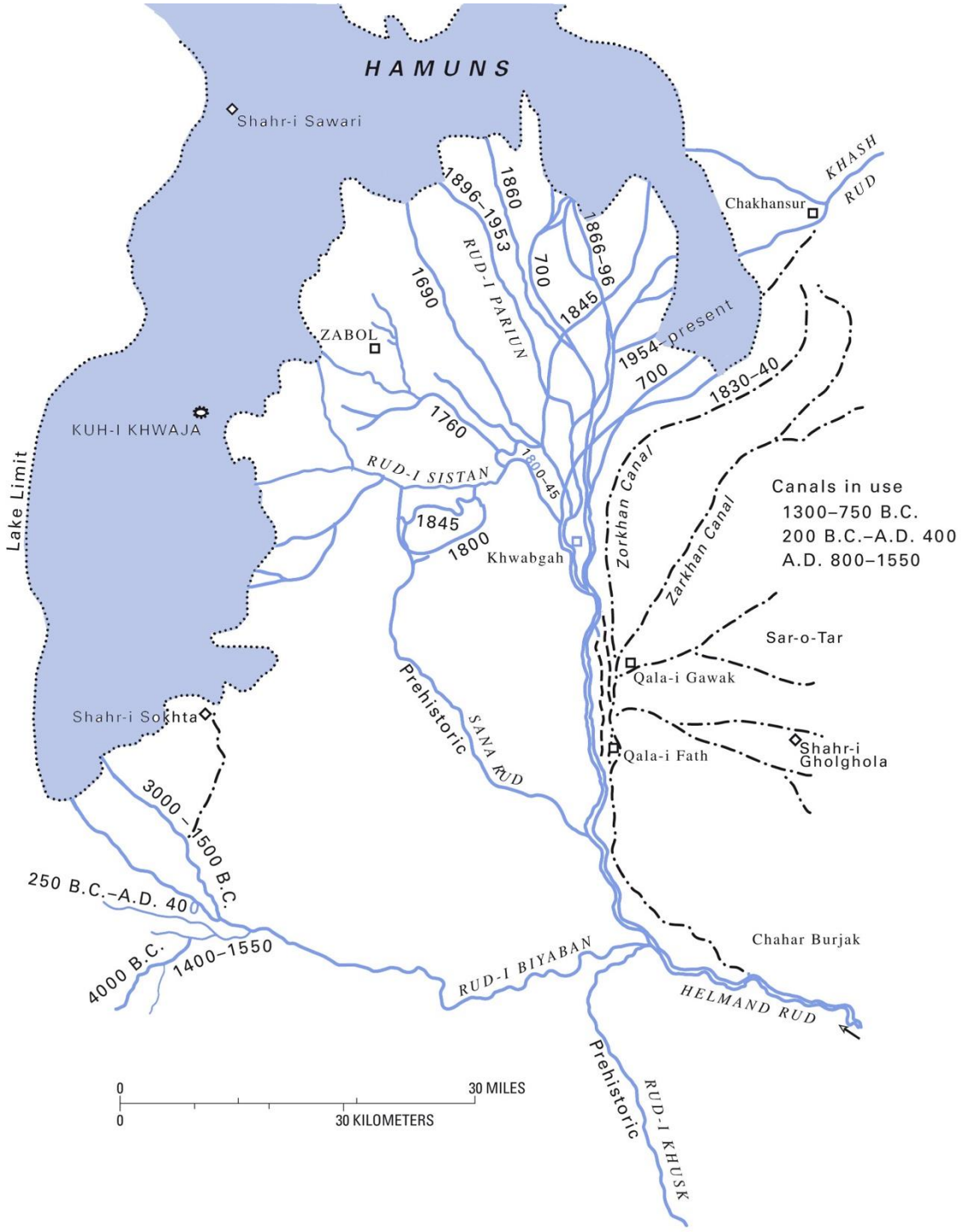


Figure2-4 : image satellite du delta du Sistan et du lac Hamoun en 1976 et 2001. Source : John W. Whitney.

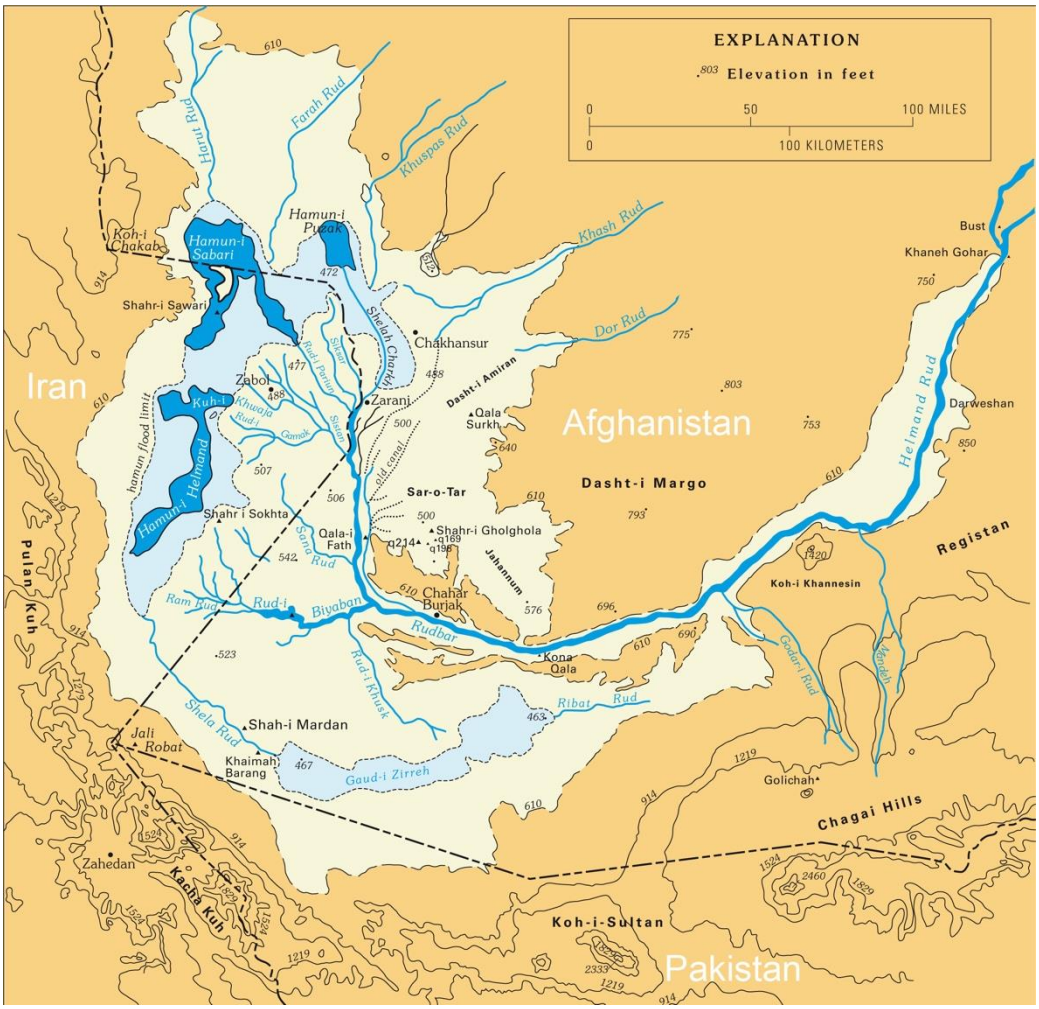


Carte 2-3: changement de direction du Hirmand et ses branches au cours de l'histoire. Source : John W. Whitney[56].

La Cité Brulée, dans le désert de Loutak, témoin d'une civilisation très ancienne, ainsi que la ville de Hozdar,(Carte pour son deplacement) une cité séfévide abandonnée vers le XVIIIe siècle à 5 km de cette dernière, sont deux exemples de villes désertées pris dans deux périodes

[56]- **(en) WHITNEY, John W.** « *Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghnistan* », U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2006, p.29

différentes de l'histoire du Sistan. Les six moulins à vent qu'il nous reste du dernier type du Sistan ont été découverts autour de la ville abandonnée de Hozdar.



Carte 2-4 : géographie du bassin du Hirmand. Source : John W. Whitney[57].

Autre caractéristique géographique propre au plateau du Sistan, qui a toujours influencé la vie des peuples de la région : la présence du lac Hamoun, partagé aujourd'hui en trois parties. Ces trois lacs constituent l'une des plus grandes étendues d'eau de cette région d'Asie. Ils portent le nom de Hamoun. Le Hamoun de l'Hirmand est en Iran, le Hamoun de Saberi est moitié en Iran, moitié en Afghanistan et le Hamoun du Parian ou le grand Hamoun se trouve aujourd'hui en Afghanistan. (figure 2-6) Dans l'Antiquité, ces trois lacs n'en formaient qu'un mais au cours des siècles, à cause des sécheresses et des barrages construits en Afghanistan, il se scinda en trois.

Le vent de 120 jours

Autre phénomène propre au plateau du Sistan : le vent de 120 jours, l'un des vents les plus forts d'Asie. Selon McMahon, si on veut donner à un territoire le nom du pays du vent, c'est

[57]- **(en) WHITNEY, John W.** « *Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghnistan* », U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2006, p.3

le Sistan qui est tout désigné pour le porter. Ce vent souffle en été, à partir de la fin du mois de mai ou de la mi-juin jusqu'à la fin du mois de septembre. Sa direction est toujours nord –sud et nord ouest-sud est et sa vitesse atteint 112 kms par heure. Il souffle avec un son étrange et transporte de la poussière. Le vent de 120 jours n'est pas ressenti dans les régions montagneuses de l'ouest et du nord-ouest du Sistan ; à Lâch et Jovin, il est plus fort ; à Herat il est moins fort qu'au Sistan[58].

Ce vent n'est pas présent sur la route commerciale Noushki-Rabat (frontière du Sistan avec le Baloutchistan pakistanais). La vitesse et la force du vent du Sistan, qui souffle toujours dans la même direction, est considérable, et cela depuis des siècles. Il en a laissé la trace partout. Il semble que toute chose soit influencée et endommagée par le vent. C'est donc pour cela que toutes les vieilles ruines du Sistan sont construites avec un angle identique par rapport au vent. Les murs avants et devants sont bâtis contre le sens du vent et les façades latérales parallèlement au vent. Il ne pousse aucun arbre, à cause de la force du vent. On peut donc dire que sur la majeure partie du Sistan il n'existe pas d'arbres, sauf dans certaines régions comme Miankangi et Nâdali où la vitesse du vent ralentit. Les villages et les lieux habités d'aujourd'hui ont des murs qui les protègent du vent ; les décombres anciens ont les mêmes murs protecteurs. Pourtant, les traces du vent sont visibles dans tous ces décombres : le vent a rongé et évidé le bas des murs, exactement comme un courant d'eau l'aurait fait. Les anciens murs qui avaient été construits face au vent ont été complètement détruits ; il ne reste que les murs latéraux. Le vent a couvert de sable beaucoup de terres du Sistan ; la majorité des villes anciennes sont dissimulées sous des monceaux de sable. Non seulement le vent couvre les terres de sable mais il enterre les villages habités sous des nuages de poussière. Cela dit, il arrive aussi que le vent nettoie les terres du sable qui les avait recouvertes et les prépare pour la culture. Nous avons noté précédemment que le fait que les habitants connaissent le comportement du vent les a aidés à utiliser la puissance du vent pour déplacer les monceaux de sable. Des traces d'érosion sur la surface du sol dues au vent sont visibles surtout au sud-ouest du Sistan. Dans cette région, le vent a tout déraciné. Il ne reste que la terre nue. Pourtant, des vestiges montrent avec certitude que, dans le passé, ces territoires nus furent très fertiles et qu'ils étaient parsemés de villes et villages riches et peuplés[59]. Il est donc raisonnable de penser que les habitants de ce territoire ont cherché et sont parvenus à maîtriser la force du vent pour leurs besoins.

---

[58]- Ibid, p.387

[59]- **(per) AHMADI, Hassan**, 1999, p.391

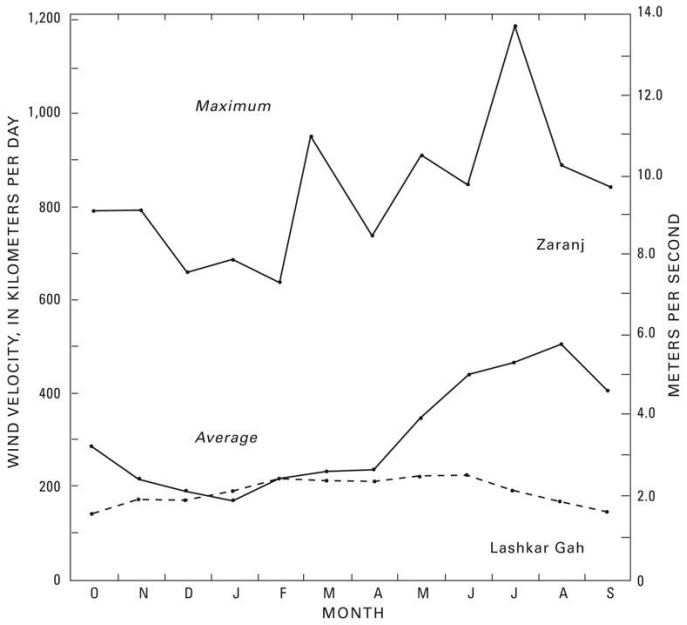
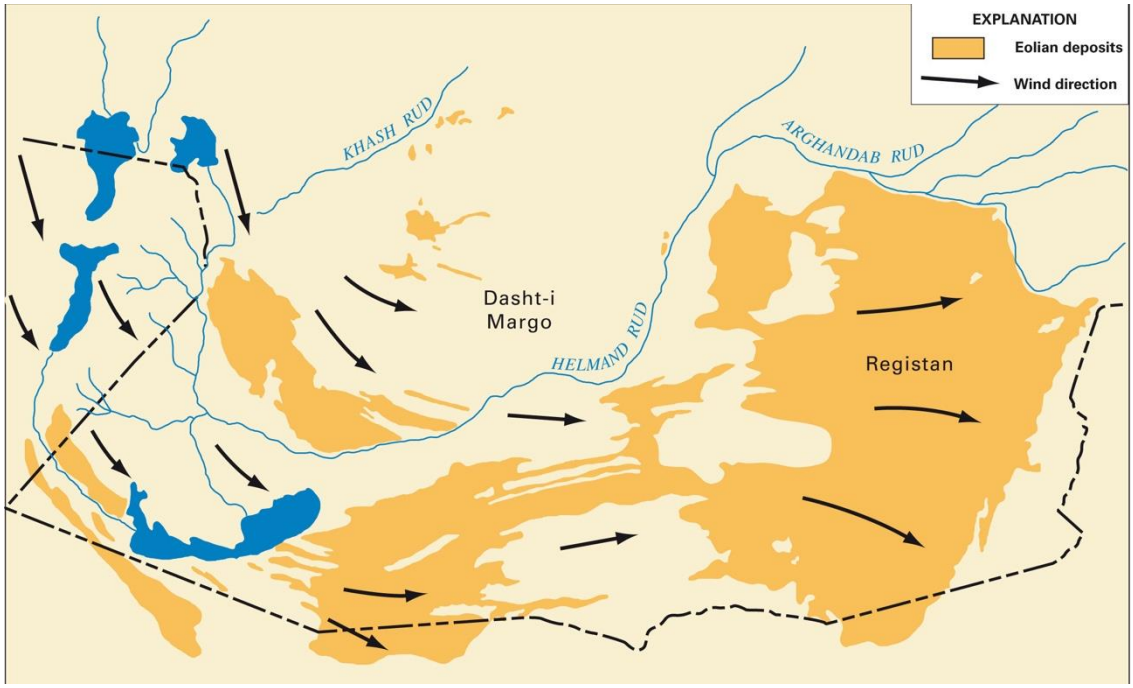


Figure 2-5 : diagramme mensuel de la vitesse du vent pour la ville du Zaranj, à la frontiere irano-afghane. Source : John W. Whitney[60].



CArte 2-5 : direction du vent autour du bassin du Hirmand. Source : John W. Whitney[61].

[60]- **(en) WHITNEY, John W.** « *Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghnistan* », U.S. Geological survey, Reston, Virginia, 2006, p.19

[61]- Ibid, p.13

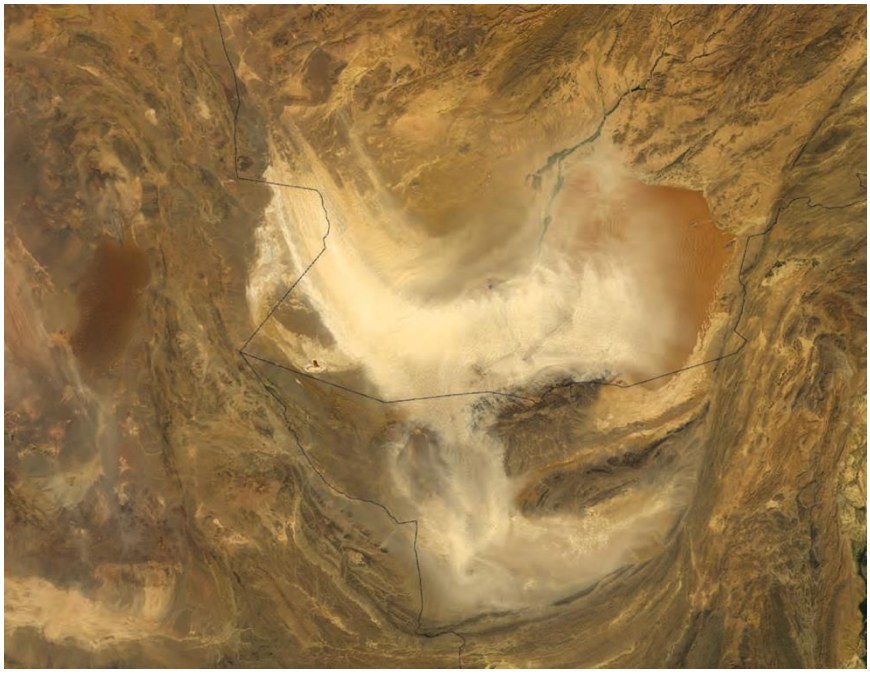


Figure 2-6 : image satellite de tempête du sable au Sistan, le 13 septembre 2003. Source : John W. Whitney

Chapitre III

Création - diffusion

L’ingénierie du vent et le savoir-faire de l’Antiquité

Certains croient aujourd’hui que les progrès techniques représentent des applications pratiques de découvertes scientifiques antérieures. Dès l’Antiquité, les architectes ont utilisé la géométrie pour créer des formes efficaces. Auparavant comme en architecture antique, la science et technique étaient séparées. La science résultait d’un effort en grande partie théorique pour comprendre la Nature, tandis que la technique était une tentative exclusivement pratique d’utiliser la Nature à des fins humaines ; science et technique interagissaient alors rarement[62]. Mais avec la fameuse déclaration de Francis Bacon, «savoir, c’est pouvoir», l’homme entra dans le siècle des Lumières.

Les voiles, qui assuraient la propulsion des bateaux grâce à la force des vents, figurent peut-être parmi les plus anciennes utilisations de l’énergie éolienne. Mais l’utilisation du vent dans la société humaine est plus vaste et plus variée. Elle va des « tours du vent » iraniennes au moulin à vent de différents types en passant par l’orgue, l’appareil le plus complexe imaginé par l’homme, et la roue éolienne pour l’irrigation. Ces mécanismes furent tous très importants voire déterminants pour le progrès de l’homme au cours des siècles précédents. Aujourd’hui, nous n’avons accès à qu’une partie des connaissances et des technologies de l’Antiquité sur le vent. Certaines ont été abandonnées, d’autres ont été oubliées du fait des catastrophes naturelles ou humaines. Mais celles qui nous sont restées sont suffisamment claires pour que l’on voie le niveau d’utilisation de l’énergie du vent par les civilisations précédentes. Mis à part les outils et les mécanismes qui ont été construits, il y avait parfois une connaissance pure sur le comportement du vent sous tel ou tel climat local, ce qui pouvait donner aux experts du sujet la possibilité de s’emparer de la force du vent pour leurs divers besoins.

Le moulin à vent a vu le jour au Sistan pour deux raisons majeures : le manque de terrains en altitude et la vitesse du « vent de 120 jours »

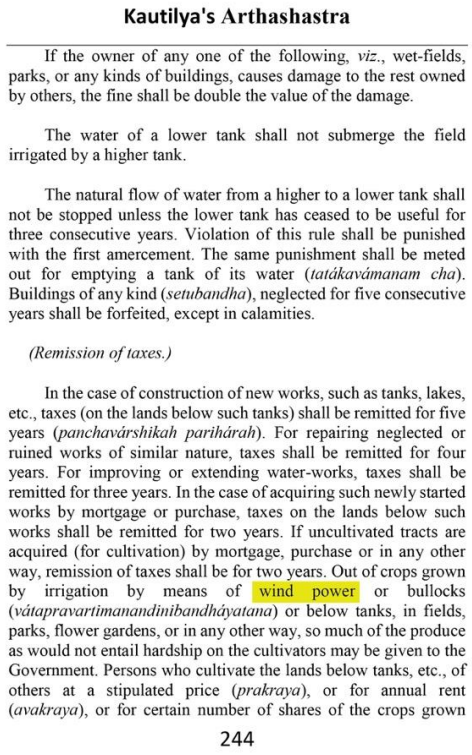
---

[62]- **WHITE Lynn**, 1980, p. 46

L'origine d'application du vent dans les mécanismes techniques selon les historiens

le texte le plus ancien témoignant de l'existence du moulin à vent figure dans un livre indien intitulé Arthaśāstra qui fut écrit vers 400 avant J._C. Certaines parties de ce livre concernent la manière de monter de l'eau [63] :

« If uncultivated tracts are acquired (for cultivation) by mortgage, purchase or in any other way, remission of taxes shall be for two years. Out of crops grown by irrigation by means of ***wind power*** *or bullocks (vátapravartimanandinibandháyatana) or below tanks, in fields, parks, flower gardens, or in any other way, so much of the produce as would not entail hardship on the cultivators may be given to the Government.*[64] *»*



Kautilya's Arthashastra

If the owner of any one of the following, *viz*., wet-fields, parks, or any kinds of buildings, causes damage to the rest owned by others, the fine shall be double the value of the damage.

The water of a lower tank shall not submerge the field irrigated by a higher tank.

The natural flow of water from a higher to a lower tank shall not be stopped unless the lower tank has ceased to be useful for three consecutive years. Violation of this rule shall be punished with the first amercement. The same punishment shall be meted out for emptying a tank of its water (*tatákavámanam cha*). Buildings of any kind (*setubandha*), neglected for five consecutive years shall be forfeited, except in calamities.

(Remission of taxes.)

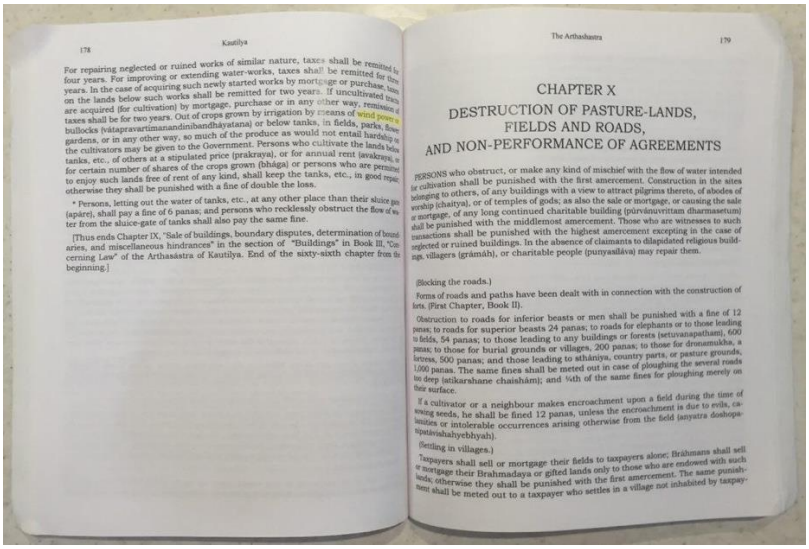
In the case of construction of new works, such as tanks, lakes, etc., taxes (on the lands below such tanks) shall be remitted for five years (*panchavárshikah parihárah*). For repairing neglected or ruined works of similar nature, taxes shall be remitted for four years. For improving or extending water-works, taxes shall be remitted for three years. In the case of acquiring such newly started works by mortgage or purchase, taxes on the lands below such works shall be remitted for two years. If uncultivated tracts are acquired (for cultivation) by mortgage, purchase or in any other way, remission of taxes shall be for two years. Out of crops grown by irrigation by means of wind power or bullocks (*vátapravartimanandinibandháyatana*) or below tanks, in fields, parks, flower gardens, or in any other way, so much of the produce as would not entail hardship on the cultivators may be given to the Government. Persons who cultivate the lands below tanks, etc., of others at a stipulated price (*prakraya*), or for annual rent (*avakraya*), or for certain number of shares of the crops grown

244

Figure 3-1 : Photo du page concernant le texte sur l'energie du vent dans le livre antique deArthaśastra

[63]- **WOLF Hanse**. *«Artisanats anciens d'Iran », Presse scientifique et culturelle, Téhéran, 2006.*

[64]- (en) SHAMASASTRY R. « *Kautilya's Arthashastra; The Wat of Financial Management and Economic Goverance», Bottom of the Hill Publishing, New York, 2010*



178 Kautilya

For repairing neglected or ruined works of similar nature, taxes shall be remitted for four years. For improving or extending water-works, taxes shall be remitted for three years. In the case of acquiring such newly started works by mortgage or purchase, taxes on the lands below such works shall be remitted for two years. If uncultivated lands are acquired (for cultivation) by mortgage, purchase or in any other way, remission of taxes shall be for two years. Out of crops grown by irrigation by means of wind power, bullocks (vátapravartimanandinibandhávatana) or below tanks, in fields, parks, flower gardens, or in any other way, so much of the produce as would not entail hardship to the cultivators may be given to the Government. Persons who cultivate the lands below tanks, etc., of others at a stipulated price (prakraya), or for annual rent (avakraya), or for certain number of shares of the crops grown (bhága) or persons who are permitted to enjoy such lands free of rent of any kind, shall keep the tanks, etc., in good repair; otherwise they shall be punished with a fine of double the loss.

* Persons, letting out the water of tanks, etc., at any other place than their sluice gate (apáre), shall pay a fine of 6 panas; and persons who recklessly obstruct the flow of water from the sluice-gate of tanks shall also pay the same fine.

[Thus ends Chapter IX, "Sale of buildings, boundary disputes, determination of boundaries, and miscellaneous hindrances" in the section of "Buildings" in Book III, "Concerning Law" of the Arthaśástra of Kautilya. End of the sixty-sixth chapter from the beginning.]

The Arthashastra 179

CHAPTER X
DESTRUCTION OF PASTURE-LANDS, FIELDS AND ROADS, AND NON-PERFORMANCE OF AGREEMENTS

PERSONS who obstruct, or make any kind of mischief with the flow of water intended for cultivation shall be punished with the first amercement. Construction in the sites belonging to others, of any buildings with a view to attract pilgrims thereto, of abodes of worship (chaitya), or of temples of gods; as also the sale or mortgage, or causing the sale or mortgage, of any long continued charitable building (púrvánuvrittam dharmasetum) shall be punished with the middlemost amercement. Those who are witnesses to such transactions shall be punished with the highest amercement excepting in the case of neglected or ruined buildings. In the absence of claimants to dilapidated religious buildings, villagers (grámáh), or charitable people (punyasíláva) may repair them.

(Blocking the roads.)

Forms of roads and paths have been dealt with in connection with the construction of forts. (First Chapter, Book II).

Obstruction to roads for inferior beasts or men shall be punished with a fine of 12 panas; to roads for superior beasts 24 panas; to roads for elephants or to those leading to fields, 54 panas; to those leading to any buildings or forests (setuvanapathani), 600 panas; to those for burial grounds or villages, 200 panas; to those for dronemukha, a fortress, 500 panas; and those leading to sthaniya, country parts, or pasture grounds, 1,000 panas. The same fines shall be meted out in case of ploughing the several roads too deep (atikarshane chaishám); and ¼th of the same fines for ploughing merely on their surface.

If a cultivator or a neighbour makes encroachment upon a field during the time of sowing seeds, he shall be fined 12 panas, unless the encroachment is due to evils, calamities or intolerable occurrences arising otherwise from the field (anyatra doshopapátavishahyebhyah).

(Settling in villages.)

Taxpayers shall sell or mortgage their fields to taxpayers alone; Bráhmans shall sell or mortgage their Brahmadaya or gifted lands only to those who are endowed with such lands, otherwise they shall be punished with the first amercement. The same punishment shall be meted out to a taxpayer who settles in a village not inhabited by taxpayers.

Figure 3-2 : Photo du page concernant le texte sur l'energie du vent dans le livre antique de Arthaśastra

Ce livre est un texte de politique économique et de stratégie militaire. Les écrivains de ce livre ont été identifiés : il s'agirait de Kautilya et Vishnugupta, les deux noms se référant traditionnellement à Chânkaya (350-283 avant J._C.), penseur qui enseigna à l'Université de Takshashila et devint premier ministre de l'empire maurya. La date de 350-283 avant J._C. est la plus ancienne que l'on puisse donner pour cette invention technique. Cela dit, des historiens la remettent en question, s'interrogeant sur la cohérence du texte et sur la date précise à laquelle ce document très ancien fut écrit.

L'identification de Kautilya ou Vishnugupta avec Mauryan, ministre de Chânakaya, fait penser que l'Arthaśastra daterait du IVe siècle avant J._C. Mais certains liens avec les *Smṛiti* et d'autres références anachroniques au IVe siècle avant J._C. [65] situent l'écriture de ce texte plutôt entre le IIe et le IVe siècle. *Thomas R. Trautmann*[66] et *I. W. Mabbett*[67] estiment que l'écriture de l'Arthaśastra ne pouvait remonter avant le II^e^ siècle[68]. Quant à la plupart des spécialistes, ils situent l'écriture de ce livre entre le IV^e^ siècle avant J._C. et le II^e^ siècle et pensent que ce texte a été influent jusqu'au XII^e^ siècle,

---

[65]- **(en)TRAUTMANN Thomas R**. « *Kauṭilya and the Arthaśāstra: A Statistical Investigation of the Authorship and Evolution of the Text* ». Leiden: E.J. Brill, 1971

[66]- **TRAUTMANN Thomas R**. est un historien américain et professeur de département d'histoire en université Michigan, ses recherches sont concentrées sur l'Inde antique.

[67]- **MABBETT I.W**. Historien en Université de Monash, en Australlie, il est aujourd'hui professeur émérite d'université d'Aichi Bunkyo à Nagoya au Japon.

[68]- **(en)MABBETT I. W.** (April 1964). «*The Date of the Arthaśāstra*». Journal of the American Oriental Society (Journal of the American Oriental Society, Vol. 84, No. 2, p162–169.

date à laquelle il a disparu. Il fut redécouvert en 1904 par R. Shamasastry, qui l'a publié en 1909, puis il a été traduit en anglais pour la première fois en 1915.

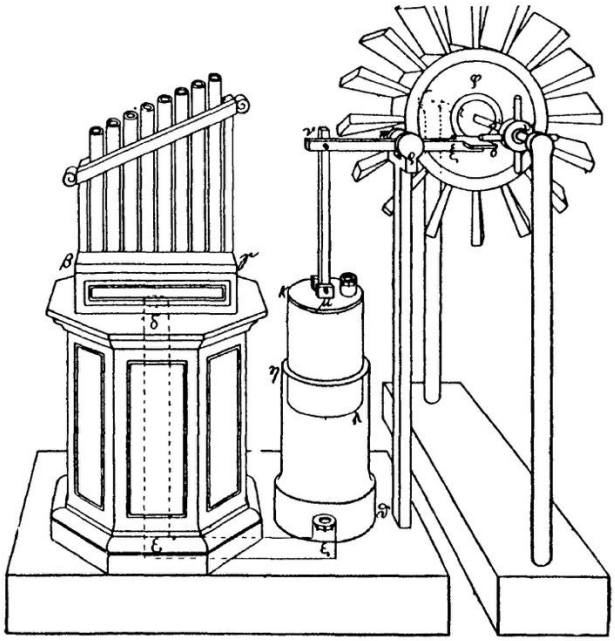


Figure 3-3 : Hérons éolienne organe, une de première machine à propulsion par le vent[69]

Héron d'Alexandrie avait imaginé un petit moulin à vent qui, selon lui, pouvait actionner un orgue. Ce mécanisme était techniquement irréalisable et il n'eut donc aucune influence. Pour les spécialistes actuels de l'histoire des techniques, il ne s'agit que d'une élucubration en chambre d'un inventeur de génie. Autre outil ancien qui utilisait la force du vent : la roue de prière tibétaine. Mais l'origine de cette invention est obscure. Les cylindres de prière conçus pour opérer un mouvement rotatif automatique ne semblent pas apparaître avant le règne de K'ri-srong-Ide-brtsan de 755 à 797 lorsque le Bouddhisme conquit le Tibet [70] (figure 3-4).

[69]- Dietrich Lohrmann, "Von der östlichen zur westlichen Windmühle", *Archiv für Kulturgeschichte*, Vol. 77, No. 1,1995, p25

[70]- **(en)HILL Richard Leslie**, « *Power from wind : A history of windmill technology* », Cambridge University Press, 1994, p14

Figure 3-4 : roue du vent pour la prière au Tibet. Source : webecoist[71].

La première fois que nous trouvons la trace d'un moulin à vent dans des documents écrits c'est dans l'*Chronique de Tabari* ou *L'Histoire des prophètes et des rois* (850)[72]. L'auteur raconte l'assassinat d'Omar ibn al-Khattab, deuxième calife orthodoxe de l'islam, en 644. Ce fut le premier assassinat politique du monde musulman. Il fut perpétré par un Perse, un technicien nommé Pirouz Nahavandi (Abu La'u La'u). Ce dernier avait été mis en esclavage par des troupes arabes pendant la guerre de Nahavand ; or Pirouz qui était un chrétien originaire des plateaux iraniens, s'était vanté de pouvoir construire un moulin à vent :

« Abu La'u La'u, qui était chrétien, dit à Omar : toi, Chef des croyants, aide-moi dans mes affaires avec Moqair Ibn-Chobeh, il me demande un impôt très élevé.

Omar demanda : de combien est ton impôt ?

Abu La'u La'u répondit : deux dirham par jour.

Omar reprit : quelle est ton activité ?

Abu La'u La'u répondit : je suis menuisier, peinture et forgeron.

---

[71]- Site internet de Webecoist: http://webecoist.momtastic.com/2008/11/16/wind-turbine-power-generators/6-wind-powered-tibetan-prayer-wheel/

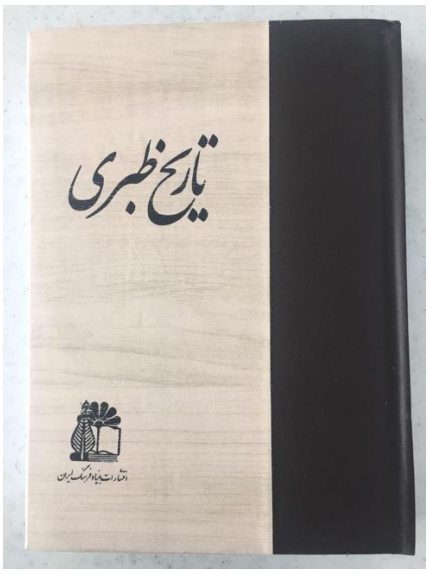
[72]- ***Chronique de Tabari, histoire des prophètes et des rois*** (Arabe: تاريخ الرسل والملوك *Tarikh al-Rusul wa al-Muluk*) relate l'histoire du monde antique selon d'un historien mosulman depuis la création jusqu'à la naissance de Mahomet, puis l'histoire du monde musulman dans le territoire aquis par les croyants de cette religion pendant les trois premiers siècles de l'hégire. Ce livre est ecrit par Abu Ja'far Muhammad Ibn Jarir Tabari le famus historien du monde Arabe.

Omar répliqua : à mon avis, ton impôt n'est pas trop élevé compte-tenu de tout ce que tu fais.

Et il poursuivit : il paraît que tu peux construire un moulin qui peut fonctionner avec le vent.

Abu La'u La'u répondit : si je reste vivant, je construirai un moulin dont tout le monde à l'est et à l'ouest parlera. Puis il partit.

Omar reprit : cet esclave m'a déjà menacé.[73] »



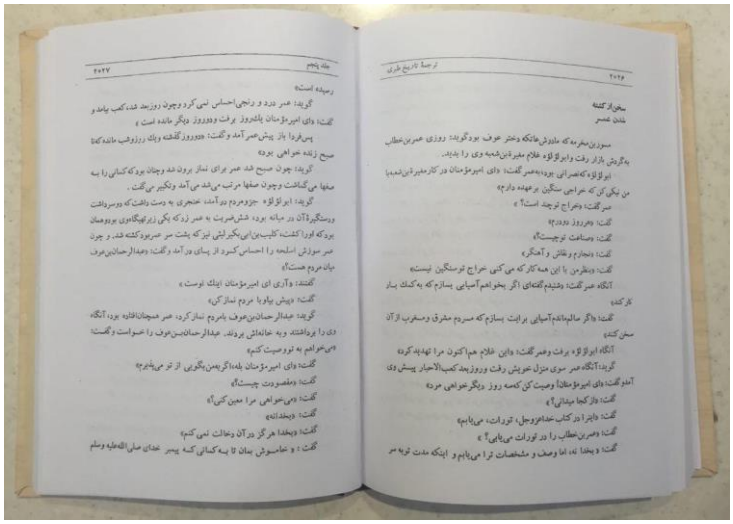
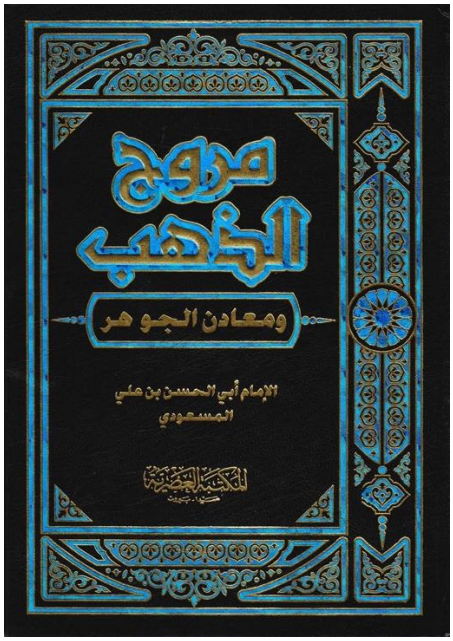


Figure 3-5: Assassinat d'Omar par Pirouz le menuisier, dans l'*Histoire des prophètes et des rois* page 2026.

[73]- Tabari al-Imam Abu Ja'far Muhammad Ibn Jarir (persan : محمد بن جریر طبری), *Chronique de Tabari, histoire des prophètes et des rois* (Arabe: تاريخ الرسل والملوك *Tarikh al-Rusul wa al-Muluk*), Edition de foundation de culture d'Iran, Téhéran, 1973, p. 2526.

Au VIIe siècle, le savoir-faire du moulin à vent persan intéressait les Arabes, mais la question de savoir quand cette transmission eut lieu n'a pas encore été éclaircie : Pirouz était un charpentier et n'a jamais construit le moulin à vent promis. La même histoire est racontée par un autre géographe arabe, Al-Mas'udî, au X[e] siècle [74].



252 ذكر نسبه ولمع من أخباره وسيره ٢٥٢

من حرب جلولاء وتكريت، وإن عتبة قدم البصرة وهي يومئذٍ تدعى أرض الهند فيها حجارة بيض فنزل موضع الخريبة.

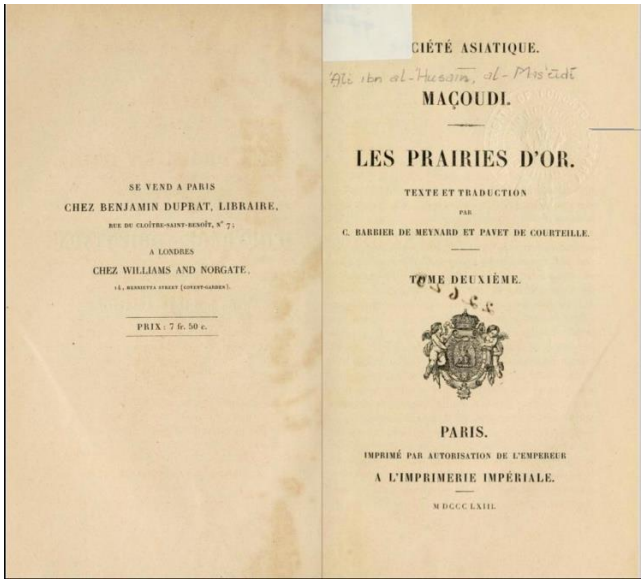
تمصير الكوفة

ومَصّر سعد بن أبي وقاص الكوفة في سنة خمس عشرة، ودلهم على موضعها [ابن] نفيلة الغساني، وقال لسعد: أدلك على أرض ارتفعت عن البر وانحدرت عن الفلاة، فدلّه على موضع الكوفة اليوم.

أبو لؤلؤة غلام المغيرة بن شعبة

قال المسعودي: وكان عمر لا يترك أحداً من العجم يدخل المدينة، فكتب إليه المغيرة بن شعبة: إن عندي غلاماً نقاشاً نجاراً حداداً فيه منافع لأهل المدينة، فإن رأيت أن تأذن لي في الإرسال به فعلت، فأذن له، وقد كان المغيرة جعل عليه كل يوم درهمين، وكان يدعى أبا لؤلؤة، وكان مجوسياً من أهل نهاوند، فلبث ما شاء الله، ثم أتى عمر يشكو إليه ثقل خراجه، فقال له عمر: وما تحسن من الأعمال؟ قال: نقاش، نجار، حداد، فقال له عمر: ما خَراجُك بكثير في كنه ما تحسن من الأعمال، فمضى عنه وهو يتذمر، قال: ثم مر بعمر يوماً آخر وهو قاعد، فقال له عمر: ألم أُحدَّث عنك أنك تقول: لو شئت أن أصنع رحاً تطحن بالريح لفعلت، فقال أبو لؤلؤة: لأصنعنّ لك رحا يتحدث الناس بها، ومضى أبو لؤلؤة، فقال عمر: أما العلج فقد توعّدني آنفاً، فلما أرْمَع بالذي أوعد به أخذ خنجراً فاشتمل عليه ثم قعد لعمر في زاوية من زوايا المسجد في الغَلَس، وكان عمر يخرج في السحر فيوقظ الناس [للصلاة]، فمر به، فثار إليه فطعنه ثلاث طعنات إحداهن تحت سرته وهي التي قتلته، وطعن اثني عشر رجلاً من أهل المسجد فمات منهم ستة وبقي ستة، ونحر نفسه بخنجره فمات، فدخل عليه ابنه عبد الله ابن عمر وهو يجود بنفسه، فقال له: يا أمير المؤمنين، استخلف على أمة محمد؛ فإنه لو جاءك راعي إبلك أو غنمك وترك إبله أو غنمه لا راعي لها للمّة وقلت له: كيف تركت أمانتك ضائعة؟ فكيف يا أمير المؤمنين بأمة محمد؟ فاستخلف عليهم، فقال: إن أستخلف عليهم فقد استخلف عليهم أبو بكر، وإن أتركهم فقد تركهم رسول الله ﷺ، فيئس منه عبد الله حين سمع ذلك منه.

وكان إسلام عمر قبل الهجرة بأربع سنين [وكان يخضب بالحناء والكتم].


CIÉTÉ ASIATIQUE.

'Ali ibn al-Husain, al-Mas'udi

MAÇOUDI.

LES PRAIRIES D'OR.

TEXTE ET TRADUCTION

PAR

C. BARBIER DE MEYNARD ET PAVET DE COURTEILLE.

TOME DEUXIÈME.

SE VEND A PARIS

CHEZ BENJAMIN DUPRAT, LIBRAIRE,

RUE DU CLOÎTRE-SAINT-BENOÎT, N° 7.

A LONDRES

CHEZ WILLIAMS AND NORGATE,

PRIX : 7 fr. 50 c.

PARIS.

IMPRIMÉ PAR AUTORISATION DE L'EMPEREUR

A L'IMPRIMERIE IMPÉRIALE.

M DCCC LXIII.

Figure 3-6 : Assassinat d'Omar par Pirouz, dans *Muruj adh-dhahab wa-ma'adin al-jawhar*, (*Les prairies d'or et les mines de gemmes*), page 252.

[74]- **Al-Mas'ûdi** (arabe : علی بن حسین مسعودی Abu al-Ḥasan 'Ali ibn al-Ḥusayn ibn 'Ali al-Mas'udi), né à Bagdad à la fin du ix[e] siècle, mort à Fostat en septembre 956, est un encyclopédiste et polygraphe arabe, à l'apogée de l'islam classique. Ses *Muruj adh-dhahab wa-ma'adin al-jawhar* ou *Prairies d'or et mines de pierres précieuses* resteront jusqu'au milieu du xv[e] siècle le manuel de référence des géographes et des historiens de langue arabe ou persane. (Wikipédia)

Al-Mas'udî décrit également l'importance des moulins à vent dans le territoire du Sistan dans son livre *Les Prairies d'or* , c'est une des première citation sur l'origine des moulin à vent persan:

« …, Le Sistan est le territoire du vent et de la poussière. Dans ce territoire c'est le vent qui fait tourner les moulins et extrait l'eau de la terre pour irriguer les jardins. Aucun lieu dans le monde (Seul dieu le sait) ne bénéfice de plus de vent pour ses besoins que ce territoire… »

Ibn Hawkal[75] et Istakhri[76], deux géographes persans, vécus au milieu du Xe siècle, citent également les moulins à vent de la province du Sistan .

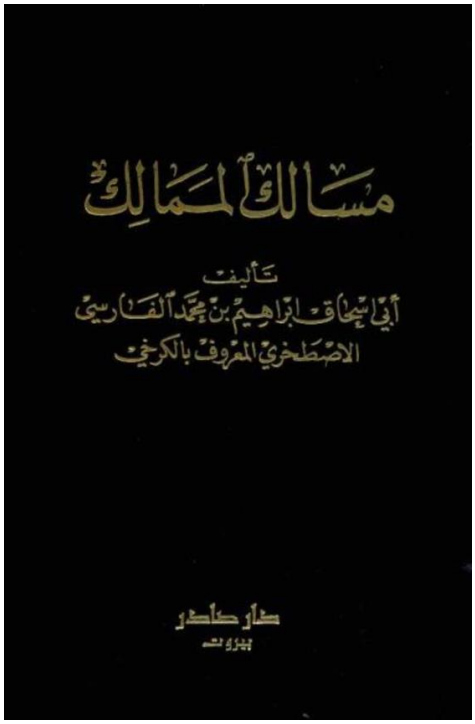


Figure 3-7 : *Al-Massâlek et Al-Mamâlek*, ouvrage d'Estakhri, géographe du X[e] siècle, dans lequel il y a une citation sur les moulins à vent du Sistan.

Dans son livre *Al-Massâlek et Al-Mamâlek,* Estakhri écrit :

[75]- Mohammed Abul-Kassem ibn Hawqal, est un voyageur, chroniqueur et géographe persan du X[e] siècle. Il est l'auteur de *Surat al-Ardh* (*La Configuration de la Terre*), un ouvrage de géographie.

[76]-**Abul Qasim Ubaidullah ibn Abdullah ibn Khurdad-bih** ou **Istakhri** (mort en 957) est un géographe persan de l'époque médiévale. Ses ouvrages de géographie *Al-masalik wa al-mamalik* (*Les itinéraires et les royaumes*) et *Al-Aqalim* (*Les climats*) figurent parmi les ouvrages de l'époque médiévale en langue arabe connus.

« … la terre du Sistan est salée et son climat est chaud. On y trouve des dattiers. Il ne neige jamais. La terre est plate et la région dépourvue de montagnes. Au Sistan, le vent souffle puissamment. Aussi construit-on des moulins à vent pour moudre le blé. »

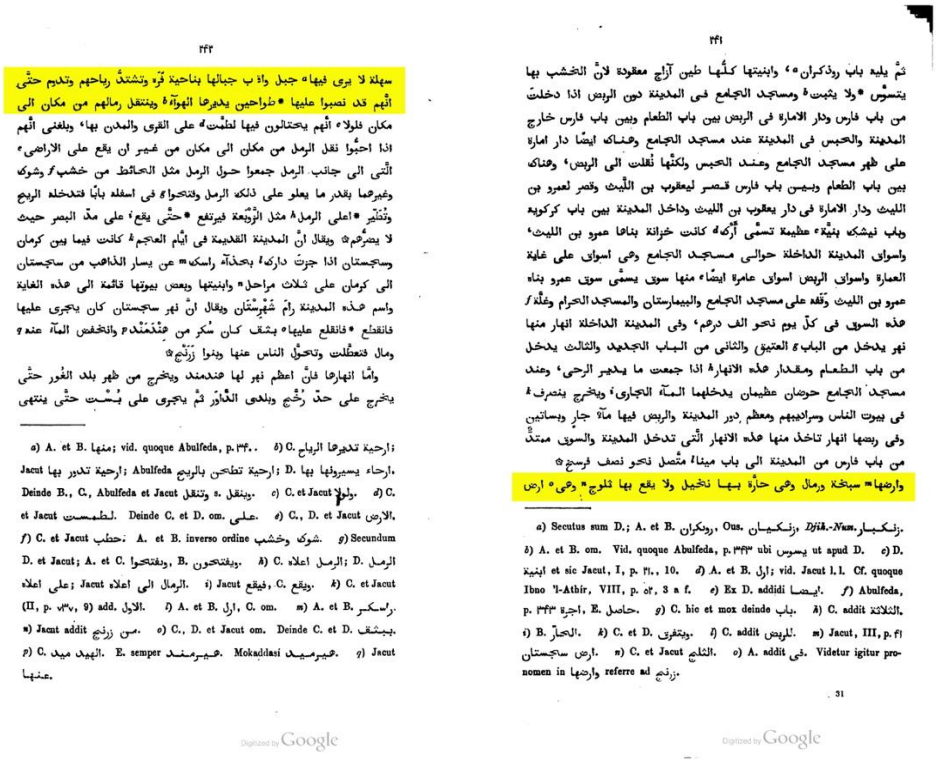


Figure 3-8 : Pages 241-242 où Estakhri, géographe du X^{e} siècle, écrit sur les moulins à vent du Sistan.

Ibn Hawkal également écrit dans son livre ; *Sourat Al-Arz* :

« … et c'est une ville avec un climat chaud, où poussent des dattiers ; elle n'est pas montagneuse. Il n'y a pas de neige en hiver et un vent fort souffle en permanence. Ils construisent des moulins à vent. »

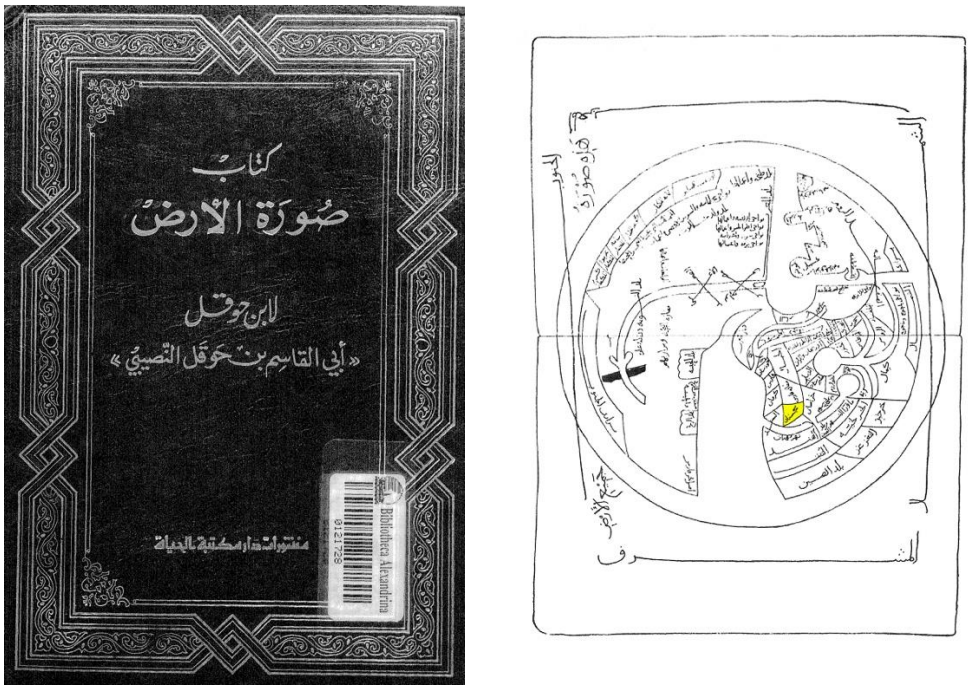


Figure 3-9: *Surat al-Ardh*, ouvrage écrit par Ibn Hawkal, géographe du X[e] siècle, et carte du monde sur laquelle on peut trouver la position du Sistan (Sajestan) en jaune.

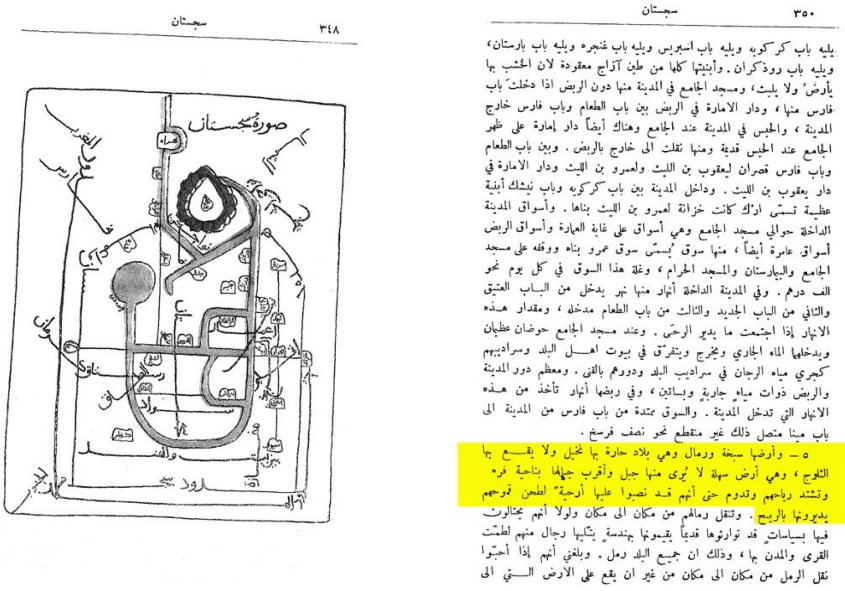
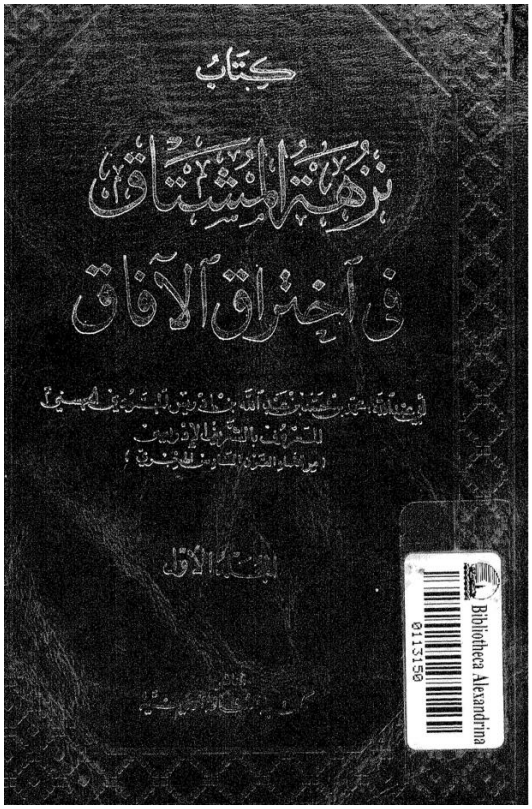


Figure 3-10 : Page 348 sur laquelle figure une carte du Sistan du X[e] siècle et page 350 sur laquelle se trouve le texte d'Ibn Hawkal sur les caractéristiques climatiques du Sistan et ses moulins à vents.

Deux siècles plus tard, dans son livre *Nuzhat al Mushtâq*, le géographe arabe Al-Idrisi[77] (vers 1099 - vers 1165) donna une autre indication sur le moulin à vent du Sistan :



ومنها إلى رباط أبي علي بن رستم مرحلة ومن رباط أبي علي إلى حصن دزة مرحلة وهو حصن حصين لكنه صغير ومن حصن دزة إلى قاشان وهي مدينة مرحلتان في مفاوز وعثار معطلة ومن مدينة قاشان إلى قرية المجوس مرحلة وأهل هذه القرية مجوس ومنها إلى مدينة قم مرحلة ومدينة قم مدينة حسنة تحيط بها العمارات وأكثر هذه المفازة التي بينها وبين قرية المجوس عامرة بقرى وعمارات ومن مدينة قم إلى قرية كاج مرحلة وقرية كاج خربة وهي قليلة الساكن والمساكن ومياهها من الأمطار ومن كاج إلى دير الجص مرحلة في غير عمارة ودير الجص حصن حصين مبني بالجص والأجر أهل عامر بالناس والأجناد ومن دير الجص إلى مدينة دزة مرحلة وهي مدينة متوسطة القدر وبها منبر ولها عمارات ومزارع ولها ماء جار في نهير وهذه المرحلة محاذية لجبل كركس كوه وجبل سياه كوه ومن دزة إلى الري مرحلة والري مدينة كبيرة وسيأتي ذكرها في موضعها على التمام بحول الله تعالى.

وطريق آخر من إصبهان إلى الري على المفازة بين جبلي كركس كوه وسياه كوه تسير على الطريق الأول إلى دير الجص ثم تعرج على اليمين فتعدل بك الطريق إلى ما بين جبلي كركس كوه وسياه كوه ومن كركس كوه إلى دير الجص اثنا عشر ميلا وبعد ما بين الجبلين سبعة وعشرون ميلا ثم ترجع الطريق على اليسار إلى دزة وبينهما أحد وعشرون ميلا ثم إلى الري فهذه جميع الطرقات التي في هذه المفازة وقد جئنا بها على الكمال والتمام حسب الجهد والطاقة وبالله التوفيق.

ولنذكر الآن ما في هذا الجزء من بلاد سجستان فنقول إن مدنها زرنج وكس ونه والطاق والقرنين وخواش وفره وجزة وبست ورودان وسروان وزالقان وبغين ودرغش ونل وبشلنك وبنجواي وكيك وغزنة والقصر وسيوي واسفجاي وجنامان. ومدينتها العظمى تسمى زرنج وهي مدينة كبيرة عامرة الأسواق وأسواقها دائرة بالمسجد الجامع الذي بها ولها أرباض عامرة وفي كل مكان منها أسواق على غاية العمارة ولها سور حصين وخندق دائر بالحصن ولها على أرباضها حصون دائرة وخنادق وفي الخندق المستدير بسور الحصن ماء نابع ينبع من مكانه وتقع فيه جمل من فصول المياه التي في المدينة وللمدينة نفسها خمسة أبواب وللربض ثلاثة عشر بابا وبناؤها بالطين ازاج معقودة لأن الخشب بها يتسوس فلا يقيم ومسجدها الجامع في المدينة دون الربض وفي داخل المدينة نفسها ثلاثة أنهار منها نهر يدخل من الباب المسمى بالباب العتيق والنهر الثاني يدخل على الباب الجديد والنهر الثالث يدخل على باب الطعام وهي كلها صغار وهي مفرقة في دور المدينة وبساتينها وحماماتها وأرض زرنج سبخة رملية في سهل متصل لا يرى بها شيء من الجبال وهي حارة ولا يقع بها الثلج البتة واكثرها بها الرياح العواصف الدائمة حتى إنهم قد صنعوا أرحاء تطحن بالريح لكثرة رياحهم والرمل في اكثر الأحوال يضر بهم.

وهذه الأنهار التي تأتي المدينة وتشق أعراضها هي مستخرجة من نهر هيذمند وهو نهر عظيم يخرج من ظهر الغور حتى يصل حد رخج وبلدي الداور ثم يجري على بست حتى ينتهي إلى سجستان ثم يقع في بحيرة زرة.

وزرة هذه بحيرة يتسع الماء فيها وينتقص بقدر زيادة الماء ونقصانه وعليها قرى ومزارع وطولها يكون نحو من تسعين ميلا من ناحية كرين على طريق قوهستان إلى قنطرة كرمان على طريق فارس وهي عذبة الماء ويصاد فيها سمك كثير وهي عامرة من نواحيها إلا ما كان مما يلي المفازة فأما النهر الذي يخرج من هيذمند فيمر إلى ناحية نيشك فلا يصل منه شيء إلى هذه البحيرة. وسجستان ناحية وفيها زرنج وغيرها وهي حصينة كثيرة الطعام والتمور والأعناب وأهلها مياسير ويقارضون التجار بفواضل أموالهم ويتصل بالجنوب من سجستان ناحية بالس وموضعها بين سجستان وناحية السند ومدينتها سيوي غير أن الوالي يسكن منها موضعاً يسمى القصر وبينهما نحو مرحلتين.

ورخج اسم الإقليم ومدينتاه بنجواي وكيك وموضع هذا الإقليم هو بين بلدي الداور وبالس والداور اسم إقليم خصيب وهو ثغر للغور وبغين وخلج وبشلنك وبلد الداور اسم إقليم ومدينته تل وله من المدن أيضاً درغش وهما على ضفتي نهر هيذمند غير أن بغين وخلج وبشلنك ناحية تتاخم الغور.

والخلج صنف من الأتراك وصلوا على قديم الزمان إلى تخوم الهند ونواحي سجستان والغور فنزلوا بها وعمروها واتخذوها أوطاناً وهم أصحاب أغنام وأبقار وخيل ونعم كثيرة وهم على زي الأتراك وحياتهم.

ومن المدن المجاورة لزرنج الطاق وهي على مرحلة من زرنج وهي على يمين المار إلى خراسان وهي مدينة صغيرة متحضرة ولها رستاق واسع كثير الخصب وبها أعناب كثيرة وفواكه ونعم يتسع فيها أهل سجستان.

ومنها القرنين وهي مدينة متوسطة ولها سور وأسواق وهي كانت في سالف الدهر دار رستم الشديد ودار ملكه وبها أثر مربط فرسه ولها قرى ورساتيق وهي على مرحلة من سجستان على يسار الذاهب إلى بست.

ثم مدينة خواش وهي أكبر من القرنين وأشمخ منهما ولها سور تراب وبها سوق نافقة وأمتعة وترف أحوال وهي من القرنين

115

Figure 3-11: *Kitâb Nuzhat al Mushtâq*, livre d'Al-Idrisi, géographe du XII[e] siècle et le texte concernant la situation géographique, climatique et les moulin à vents du Sistan.

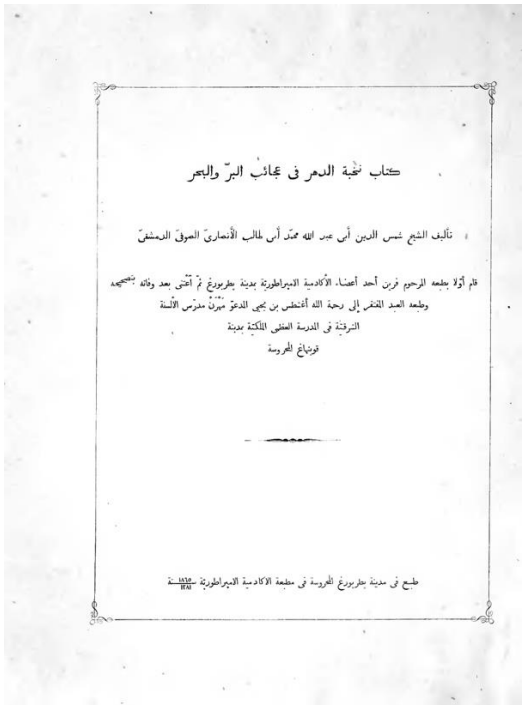
« [...] nous allons passer à ce que la présente section embrasse de relatif au Sedjestan. Nous disons donc que les (principales) villes de cette provinces sont Zarendj, Kirouïeh, el-Tâc, el-Fars, Khawas, Courra, Djerra, Bost, Zerdan, Zalecan, Baghneïn, Darghach, Derthel, Bechenk, Bendjewaï, Kemk, Gharia, el-Cassr, Chiwa, Esfendjaï et Hamam.

La principale ville (du Sedjestan) s'appelle Zarendj. Elle est grande, bien bâtie, commerçante. Ses bazars entourent la grande mosquée. Ses faubourgs sont populeux et remarquables par la belle construction des marchés. La ville est entourée de bonnes murailles et de fossés, ainsi que les faubourgs. [...] Le sol du pays est en général sablonneux et plat (on n'y voit aucune montagne), et le climat chaud. Il n'y tombe jamais

[77]- **Al Idrissi** était un géographe arabe du XII[e] siècle. Selon les sources existantes, il a grandi à Cordoue sous l'empire Almoravide et serait mort en 1165 en Sicile. Il est l'auteur d'un livre de géographie illustré par des cartes intéressantes, *Kitâb Nuzhat al Mushtâq* (*Livre de divertissement pour celui qui désire parcourir le monde*), aussi connu sous le nom de *Livre de Roge*r, parce que rédigé à la demande de Roger II, roi normand de Sicile. Comme nous allons le montrer, ce livre peut nous donner des indications sur le voyage du moulin à vent à axe vertical persan de l'empire islamique vers l'Europe.

de neige, mais des vents violents y soufflent avec une telle continuité, que, pour moudre le grain, on y a construit des moulins mus par cette force. Les habitants de ce pays sont fréquemment incommodés par le sable. »

En XIII[e] siècle un autre témoignage de la présence de moulins à vent en Iran est présenté par Al-Dimashqi, géographe arabe du XIII[e] siècle, dans son livre *Nokhbat Al-Dahr*. Il explique le mécanisme d'un moulin à vent persan du XIII[e] siècle qui, selon lui, fut utilisé au Sistan. Il présente également le seul dessin qui existe de ce type de moulin et en montre les différentes parties. Ce dessin est très précieux du point de vue de l'analyse du mécanisme et des différents composants de cette machine à cette période-là .


كتاب نخبة الدهر فى عجائب البرّ والبحر

تأليف الشيخ شمس الدين أبى عبد الله محمّد أبى طالب الأنصارىّ الصوفىّ الدمشقىّ

قام أوّلا بطبعه المرحوم قرن أحمد أعضاء الأكادمية الامبراطورية بمدينة بطربورغ ثمّ أعتنى بعد وفاته بتصحيحه وطبعه العبد المفتقر إلى رحمة الله أفتنطس بن يحيى الدمنّ مدرّس الألسنة الشرقيّة فى المدرسة العظمى الملكيّة بمدينة قوبنهاغ المحروسة

طبع فى مدينة بطربورغ المحروسة فى مطبعة الاكادمية الامبراطورية سنة ١٨٤٥

Figure 3-12 : L'ouvrage *Nokhbat Al-Dahr* écrit par le géographe arabe du XIII[e] siècle *Al-Dimashqi* est le seul document présentant un croquis du mécanisme d'un moulin à vent à axe vertical persan.

C'est grâce à ces documents que le peut imaginer le mécanisme et la forme architecturale du premier type de moulin à vent à axe vertical, type qui n'existe plus au Sistan. Sans les informations d'Al-Dimashqi sur ce premier type, notre recherche sur le passé de cette invention unique resterait incomplète. L'image que ce géographe arabe nous a en effet transmise peut-être considérée comme le chaînon manquant du processus de création du moulin à vent sous l'influence du moulin à eau à axe vertical. Le mécanisme qui apparaît sur ce dessin, où les pales sont placées au-dessous de la chambre de la meule, est très différent de celui que l'on trouve sur les moulins à vent iraniens

actuels, où les pales sont placées au-dessus de cette chambre. Bien que concomitante à la disparition de l'ancienne forme du moulin à vent iranien, il n'existe cependant pas de preuve tangible que l'apparition de la forme actuelle du moulin ait purement et simplement remplacé l'ancienne.

Dans son livre *Nokhbat Al-Dahr*, Al-Dimashqi écrit :

« Lorsque les habitants du Sistan veulent construire un moulin qui fonctionne avec le vent, ils construisent un bâtiment haut comme un minaret ou profitent du sommet d'une montagne ou d'une colline ou bien de la tour d'un château, et construisent un bâtiment sur l'autre. Dans la partie supérieure de la structure est installée la meule qui tourne et moud. Dans la partie inférieure se trouve la roue qui tourne. Quand la roue tourne, la meule supérieure tourne également. Quand les deux structures sont prêtes, ils font quatre ouvertures comme celles qu'ils font au-dessus des châteaux de sorte que la partie la plus ouverte se trouve à l'extérieur et la partie la plus fermée à l'intérieur. Grâce à ces ouvertures, le vent pénètre avec force et prend la pale du moulin, quelle que soit la direction du vent, du fait des quatre ouvertures dans les quatre directions. Quand le vent entre par l'ouverture qui lui est destinée, il croise sur son parcours une bobine qui ressemble à celle sur laquelle le tisserand enroule le fil. L'appareil a douze pales qu'on pourrait diminuer à six. Elles sont couvertes d'un tissu de coton blanc, comme on recouvre de tissu une lanterne, mais avec une différence : le tissu est partagé entre les différentes pales de façon à ce que chacune soit recouverte séparément. Le tissu présente une bosse que le vent remplit et par laquelle la pale est poussée vers l'avant. Le vent remplit ensuite la suivante et la pousse, puis la troisième. Ainsi, la bobine tourne et sa rotation fait bouger la meule et permet de moudre le grain. Ce type de moulins peut être bâti sur des châteaux et dans les régions qui n'ont pas d'eau mais où le vent souffle abondamment. » .

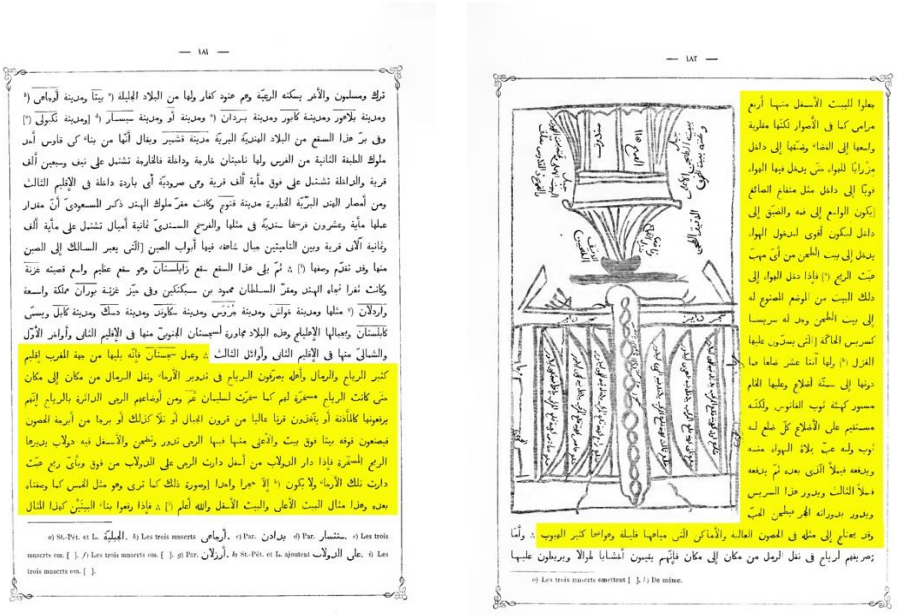


Figure 3-13 : Pages 182-183 de l'ouvrage *Nokhbat Al-Dahr* où *Al-Dimashqi*, géographe arabe de XIII[e] siècle, décrit le mécanisme d'un moulin à vent à axe vertical avec la chambre de la meule au-dessus de la pale.

Selon Wolf, ce type du moulin à vent fut utilisé jusqu'en 1952 en Afghanistan [78] (probablement au Sistan d'Afghanistan), un point de vue qui n'a été confirmé ni par d'autres spécialistes ni par des preuves sur le terrain.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, ce moulin a clairement été inventé à partir du moulin à eau à axe vertical donc il fallait qu'il fonctionne bien sur le territoire du Sistan où il n'y a pas de terrains en altitude. Mise à part la description d'Al-Dimashqi il n'y a aucun autre écrit de géographes parlant de l'installation de ce moulin sur les collines et minarets ou sur les tours des châteaux du Sistan. Pour nous, il semble donc que la force du vent au Sistan ait été suffisante pour faire tourner les pales de ce type du moulin même s'il était installé à basse altitude et à même le sol. C'est seulement comme cela que l'on peut expliquer l'utilisation de cette invention sur un territoire plat et désertique comme le Sistan. Avec la description et les détails transmis par Al-Dimashqi, nous pouvons présenter la simulation graphique d'un moulin à vent de premier type au Sistan.

78- (per) WOLF, Hanse. « *Artisanats anciennes d'Iran »,* Presse scientifique et culturel, Téhéran, 2006, p.256

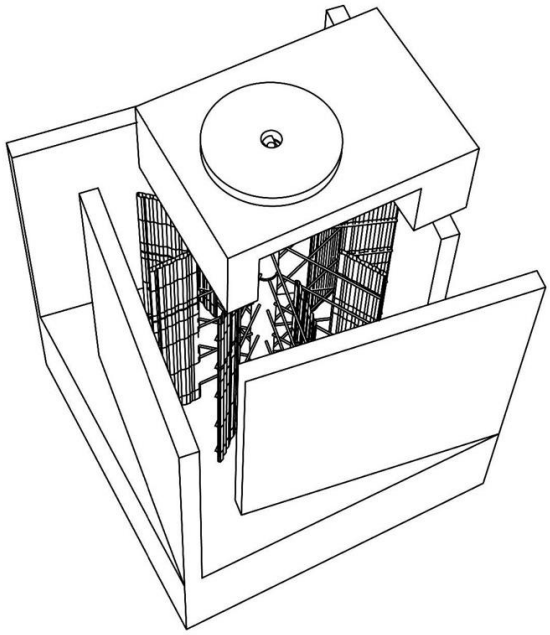


Figure 3-14: coupe d'un moulin à vent du premier type selon la définition d'Al-Dimashghi. Une proposition imaginaire dessinée par Kambiz M.GOHARI selon le dessin d'Al-Dimashghi

Naturellement, le moulin à vent iranien à axe vertical a évolué et a été modifié au cours des siècles selon les besoins, les territoires et les nouveaux savoir-faire. Mais nous savons également que jusqu'au XIII^{e} siècle et d'après le dessin d'Al-Dimashqi, le mécanisme du moulin à vent iranien utilisé hors d'Iran en était encore à un stade primaire : la roue éolienne se situait au-dessous des meules, le moulin devait donc être construit sur des terrains en altitude, sur des minarets, où il pouvait utiliser des vents forts et permanents. On sait également que de telles conditions n'étaient pas toujours faciles à réunir : à l'époque antique, des territoires comme le Sistan, où soufflait un vent fort dans une direction permanente, étaient vraiment rares.

La roue éolienne une technologie parallèle d'application du vent

Une des technologies anciennes oubliées par les habitants des territoires de l'est de l'Iran – et dont le Sistan était le lieu de naissance – est la roue éolienne pour l'irrigation. Dans son ouvrage *Les Prairies d'or*, Al-Mas'udî décrit également le Sistan comme une terre où l'on utilise le vent pour l'irrigation :

« Dans ce territoire c'est le vent qui fait tourner les moulins et extrait l'eau de la terre pour irriguer les jardins. ».

De même, l'écrivain anonyme de *l'Histoire du Sistan* [79], un livre qui fut écrit entre le XIe et le XIVe siècle, désigne ainsi la roue éolienne pour l'irrigation au Sistan :

« … et d'autre c'est qu'ils construisent le moulin que le vent fait tourner et qui fait la farine, bien que dans les autres villes ce soient les chevaux qui fassent ce travail ou qu'ils le fassent à la main. Ils fabriquent également les mêmes roues pour puiser de l'eau du puits pour les jardins et pour les fermes au moment où il y a moins d'eau ; ils profitent également beaucoup du vent ».

Contrairement aux roues d'irrigation, il n'existe qu'une seule mention de l'utilisation des moulins à vent de type iranien, ceci à proximité de la Chine. Elle figure dans le livre d'Al-Idrisi, *Nuzhat al Mushtâq.* L'auteur écrit :

« [...] De l'île de Senf à celle de Malaï, 12 journées, à travers des îles et des rochers qui s'élèvent au-dessus de la mer. L'île de Malaï est très vaste. Cette île s'étend d'ouest en est ; du côté occidental, elle rejoint l'embouchure maritime du Zengitarum et se prolonge du côté oriental vers l'Aquilon jusqu'à atteindre le littoral de la Chine. C'est la plus longue des îles sous le rapport de l'étendue, la plus considérable sous le rapport de la culture, la plus fertile dans ses montagnes, renfermant les domaines les plus vastes. On se livre dans cette île au commerce le plus avantageux, et il s'y trouve des éléphants, des rhinocéros, et diverses espèces de parfums et d'épiceries, telles que le clou de girofle [...]. Dans les montagnes sont des mines d'or d'une excellente qualité ; c'est le meilleur de la Chine. Les habitants de cette île possèdent des maisons et des châteaux construits en bois, transportés par eau aux lieux de leur destination ; ils ont aussi des moulins à vent (litt. des meules tournant par le vent), où ils réduisent en farine le riz, le blé et les autres céréales dont ils se nourrissent. »

Selon les indications figurant dans ce texte concernant le climat, les animaux et les bateaux-maisons, surtout la position probable de l'île de Vaq-vaq à proximité de ce dernier, si l'île existait vraiment, on peut imaginer qu'elle se trouvait quelque part dans l'océan indien ou en mer de Chine. C'est la seule mention de moulin à vent - un moulin situé à proximité du territoire chinois. À l'inverse, on a plusieurs témoignages, indications et même photos de l'utilisation de la roue éolienne en Chine. Ce texte nous montre que l'idée d'utiliser du vent

[79]- **(per) Auteur inconnu**, « *Histoire du Sistan* », Corriger par Mohammad Taghi Bahâr, Edition Moeen, Téhéran, 2002, p.12

pour faire fonctionner des appareils clés pour la société humaine comme le moulin était parvenue à cette époque à la frontière de la Chine.

Figur3-15 : Localisation de l'île de Vaq-Vaq dans le livre *Nuzhat al Mushtâ* écrit par Al-Idrisi, géographe arabe du XII[e] siècle.

وأموال زاكية ومياه جميع الأخوار حلوة لكن المد يدخلها من البحر والجزر يكون منها أيضاً في كل يوم وليلة مرتين وفي
هذه المراقي أسواق وتجار وخرج ودخل ومراكب وبضائع تحمل وأخرى تحط وبهذه البلاد الأمن المتصل وفي ملوكها العدل
وهو سنتهم وعليه يعولون فلذلك اتصلت عمارتهم وحسنت بلادهم وقل جزعهم وكثر أملهم واتسعت أيديهم في الأموال
والحالات الحسنة وجميع أهل الهند والصين يقتلون السارق ويؤدون الأمانة وينصفون من أنفسهم من غير احتياج إلى حاكم
أو مصلح كل ذلك منهم طبعاً وسجية وأخلاقاً خلقوا بها وطبعوا عليها وللملك قامرون في طاعتة جزيرتان تنسبان إلى بلاده
واسم إحداهما جزيرة بوصا واسم الثانية جزيرة لامية وفيها قوم ألوانهم إلى البياض وفي نسائهم جمال بارع وفيهم نجدة
وبأس شديد وربما قطعوا على الناس في مراكب لهم سابقة الجري وإنما يفعلون ذلك إذا كانوا مع الصينيين في خلاف ولم
تكن بينهم هدنة. ومن جزيرة الموجه إلى جزيرة السحاب مسير أربعة مجار أو أكثر من ذلك وجزيرة السحاب سميت بهذا
الاسم لأنه ربما طلع من ناحيتها سحاب أبيض يظل المراكب فيخرج منها لسان رقيق طويل مع الريح العاصفة حتى يلتصق
ذلك اللسان بماء البحر فيغلي له ماء البحر ويضطرب مثل الزوبعة الهائلة فإن أدركت المركب ابتلعته ثم ترتفع تلك السحاب
فتمطر مطراً فيه قذى البحر ولا يدرى أستقت السحاب ذلك من البحر أم كيف هذا وهي جزيرة بها تلول رمل إذا مستها النار
انسكبت وعادت فضة خالصة وفيما يليها من جهة جزائر الواق واق مواضع مقطوعة بالجبال والجزائر فلا يصل السالك
إليها لامتناع بلادها وصعوبة مسالكها وسكانها مجوس لا يعرفون ديناً ولا اتصلت بهم شريعة ونساؤهم يكشفن رؤوسهن
ويجعلن فيها الأمشاط المتخذة من العاج المكللة بالصدف وربما كان في رأس المرأة منهن عشرون مشطاً وغير ذلك
ورجالهم يغطون رؤوسهم بشبه القلانس وتسمى بلغة الهند البعارى وهم متحصنون بجبالهم لا يصلون إلى أحد ولا يتصل بهم
أحد ولكنهم يشرفون على البحر ويتطلعون إلى المراكب وربما تكلموا معهم بكلام لا يفهم منهم وهم مقيمون في بلادهم بهذه
الحالة التي وصفناهم بها وتتصل بهذه الجزائر جزائر الواق واق ولا يعرف ما بعدها وربما وصل أهل الصين إليها في
الندرة وهي جزائر عدة ولا عامر بها إلا الفيلة وطيرها كثير جداً وبها شجر حكى المسعودي عنها أموراً لا تقبلها العقول من
جهة الأخبار عنها لكن الله على ما شاء قدير.

ومن جزيرة صنف إلى جزيرة ملاي مسافة اثني عشر يوماً بين جزائر وجبال شارعة في البحر وهذه الجزيرة معترضة من
المغرب إلى المشرق ولكنها تتصل مع جهة المغرب بساحل الزنوج وتمر مع المشرق وفي جهة الشمال معترضة اعتراضاً
مؤرباً إلى أن تماس ساحل الصين وهي أطول الجزائر [illegible] وأكثرها عمارة وأخصبها جبالاً وأوسعها مملكة وأنفعها تجارة
وبها الفيلة والكركدن وضروب الأفاويه والعطر مثل القرنفل والفلفلة والسنبل والهرنوة والجوزبوا وفيها جبال فيها معادن
ذهب عجيب بالغ الطيب وهو أفضل ذهب يكون ببلاد الصين ولأهل هذه الجزيرة بيوت وقصور ينحتونها على الخشب على
مراكب تعوم على وجه الماء وهم ينقلونها حيث أرادوا ولهم أرحاء تدور بالرياح وفيها يطحنون الأرز والحنطة وسائر ما
يتخذونه لمعايشهم.

ومن جزيرة المايد في الشرق إلى جزيرة صنجي مسير ثلاثة أيام خفاف وهي جزيرة عامرة فيها خصب ومياه عذبة وأهلها
ألوانهم بين البياض والسمرة يحملون في آذانهم أقراط النحاس للرجل قرط واحد وللمرأة قرطان وأكلهم الأرز والقصب كثير
عندهم والنارجيل وفي بلادهم معادن الذهب المذكورة في الكثرة والجودة وبهذه الجزيرة أيضاً أصنام عدة على ضفة البحر
كل صنم منها رافع يده اليمنى كأنه يشير إلى الناظر إليه أن ارجع إلى حيث جئت فليس خلفي أرض تسير إليها ومن هذه
الجزيرة يسار إلى جزائر السيلا وهي كثيرة متقاربة بعضها من بعض وفيها مدينة تسمى الكوه من دخلها من المسافرين
استوطنها ولم يرد الخروج عنها لطيب ثراها وكثرة خيرها والذهب بها كثير جداً حتى أن أهلها يتخذون سلاسل كلابهم
وأطواق قرودهم من الذهب ويأتون بالقصص المنسوجة فيبيعونها وكذلك في جزائر الواق واق مثل ذلك أعني من الذهب
الكثير وإن التجار يدخلون إليها مع الطلاب ويسبكون الذهب فيها ويخرجونه من هناك مسبوكاً وقد يخرجون ترابه فينيبونه
في بلادهم على الصنعة المعروفة بينهم وفي جزائر الواق واق الأبنوس الذي لا يفوقه شيء في الجودة. وأيضاً فإن هذا
البحر الصيني مع ما يليه من بحر الصنف وبحر دارلارى وبحر هركند وبحر عمان يوجد بها المد والجزر وقد حكوا عن
بحر عمان وبحر فارس أن المد والجزر يكونان فيهما مرتين في اليوم والليلة وحكى ربانيو البحر الهندي والبحر الصيني أن
المد والجزر يكونان مرتين في السنة غمرة بعد في شهور الصيف شرقاً ويجزر ضده البحر الغربي ثم يرجع المد غرباً ستة
أشهر وقد ذكر في المد والجزر أقوال كثيرة وجب لنا أن نذكر بعضها بالوجيز من القول مع استيفاء المعنى فأما
أرسطوطاليس وأرشميدس فإنهما قالا في ذلك إن المد والجزر يحدثان عن الشمس إذا حركت الريح البحار وموجها فإذا
انتهى ذلك إلى البحر المسمى أطلنطيقس وهو البحر المحيط كان عنه المد وإذا صارت هذه الريح في النقصان والسكون كان
عنها الجزر وأما ساطوطس فإنه يرى أن علة المد والجزر تكون بامتلاء القمر وزيادته وأن الجزر يكون بنقصانه وهذا كلام
يحتاج إلى الزيادة فيه والبيان عما أتى به الفلاسفة مجملاً فنقول إن المد والجزر الذي رأيناه عياناً في بحر الظلمات وهو
البحر المحيط بغربي الأندلس وبلاد برطانيه فإن المد يبتدئ فيه في الساعة الثالثة من النهار إلى أول الساعة التاسعة ثم تأخذ
في الجزر ست ساعات مع آخر النهار ثم يمد ست ساعات ثم يجزر ست ساعات هكذا يمد في اليوم مرة وفي الليل مرة
ويجزر في اليوم مرة وفي الليل مرة أخرى وعلة ذلك أن الريح تهيج هذا البحر في أول الساعة الثالثة من النهار وكلما
طلعت الشمس في أفقها كان المد مع زيادة الريح ثم تنقص الريح عند آخر النهار لميل الشمس إلى الغروب فيكون الجزر
أيضاً وكذلك الليل أيضاً تهيج الريح في صدره وتركد مع آخره وزيادة الماء في المد يكون في ليلة ثلاث عشرة وليلة أربع
عشرة وليلة خمس عشر وليلة ست عشرة ففي هذه الليالي المذكورة يفيض المد فيضاً كثيراً ويصل إلى أمكنة لا يصل إليها

19

Figure 3-16 : Page 19 du livre de *Nuzhat al Mushtâq* dans lequel on peut trouver une indication claire sur l'utilisation du moulin à vent sur une île située à proximité de la côte sud de la Chine.

Nous pensons que cela est dû au mécanisme et à l'architecture du moulin à vent iranien d'avant le XVIe siècle, peu adaptable avec la topographie et le climat de la Chine.

Comme ce mécanisme était fabriqué essentiellement avec du bois, demander à voir aujourd'hui un exemplaire du XIIIe siècle ne semble pas très raisonnable. Mais grâce à la roue d'irrigation chinoise, nous pouvons retrouver une image, même vague, de ce qu'elle pouvait être à l'époque.

Après l'invasion des Mongols, le ministre de Gengis Khan, Yeh-lu Chu-Tsai, un savant chinois, émit l'idée de rapporter le moulin à vent et la roue éolienne des territoires conquis, l'Iran, vers les territoires chinois, sous contrôle des Mongols à cette époque. Comme Joseph Needham l'a écrit, nous pouvons encore voir aujourd'hui des roues d'irrigation qui fonctionnent au bord de certaines grandes rivières de Chine[80].

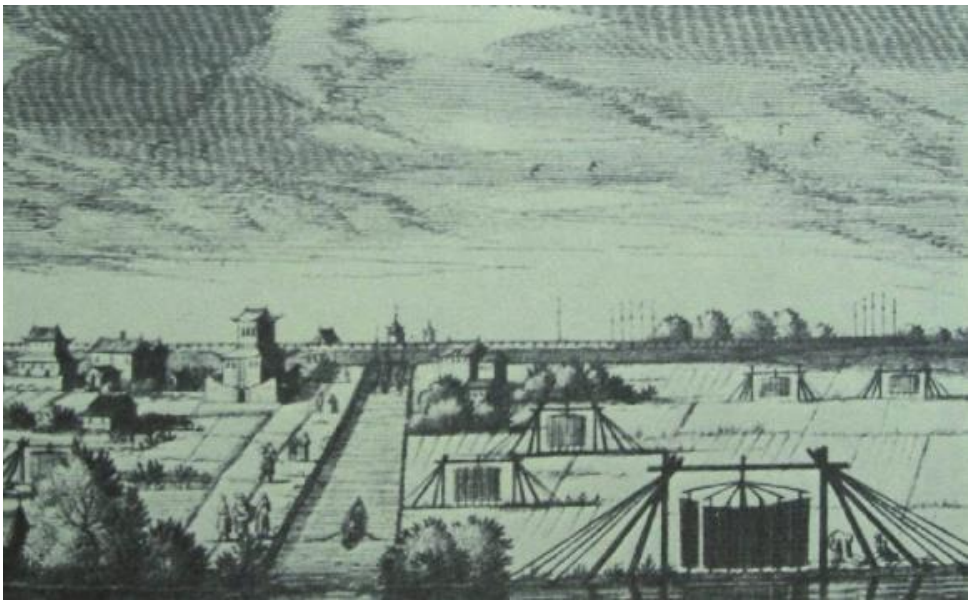


Figure 3-17 : Dessin de moulins à vent chinois par un peintre allemand, 1659. Source : Needham Joseph[81].

Baichun Zhang écrit : « Yeluchucai [probablement le même Yeh-lu Chu-Tsai] (1190-1244), un membre de l'administration mongole de la Chine, composa un poème sur des moulins à vent qu'il avait vus à Samarcande »[82]. Avant le XIII[e] siècle, une machine destinée à élever l'eau (*water-lifting*) est mentionnée au chapitre III d'un livre intitulé *Shaoxi Ji*, écrit au XII[e] siècle par Yizhi Liu (1078-1161) sous la dynastie des Song du

[80]-**(per) WOLF, Hanse**. « *Artisanats anciens d'Iran* », Presse scientifique et culturelle, Téhéran, 2006, p. 255.

[81]- **NEEDHAM, Joseph.** « *Science and Civilisation in China* » (volume IV : 2), *Cambridge University Press*, 1965, London, fig. 688.

[82] - **NEEDHAM, Joseph.** « *Science and Civilisation in China* » (volume IV : 2), *Cambridge University Press*, 1965, London, p. 560.

Sud en Chine[83]. Au XVII[e] siècle, les moulins à vent étaient mentionnés dans d'importants livres d'enseignement technique chinois comme *Nongzheng Quanshu* (*Livre d'agriculture*, 1639) de Guangqi Xu's et *Tiangong Kaiwu* de Yingxing Song's écrit en 1637 et traduit sous le titre de *Compétences naturelles pour exploiter des choses* (*Natural Skills Exploiting Things*)[84].

Les descriptions concernant le moulin à vent chinois sont généralement très brèves et rares dans les sources historiques chinoises. Mais un document comme le dessin présenté par Changyi Lin (écrivain sous la dynastie Qing), au chapitre 13 de son livre *Yan Gui Xu Lu* (figure 4-7) décrit l'agencement et la fonction d'un moulin à vent chinois.

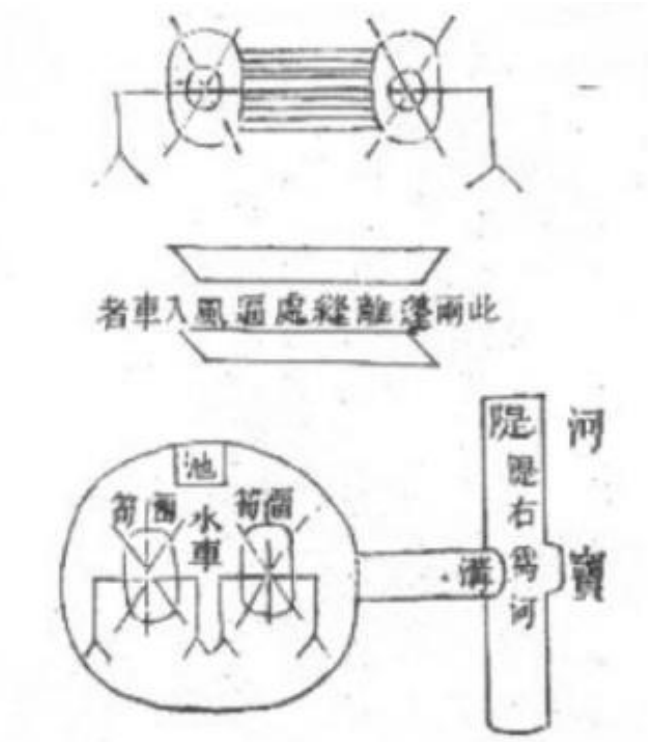


Figure 3-18 : Schéma ancien sur l'agencement d'un moulin à vent à axe vertical. Source : Baichun Zhang.

Sous la dynastie Ming (1368-1644), le moulin à vent était devenu très populaire dans les régions du sud-est de la Chine. Mais en réalité ce moulin à vent chinois n'en était pas un. C'était une roue éolienne à axe vertical que les villageois utilisaient pour élever l'eau pour leurs besoins d'irrigation dans les régions agricoles ou pour produire du sel à partir de l'eau de mer. Il est probable que le moulin à vent et la roue éolienne furent importés

[83]- **ZHANG, Baichun**. « *Ancient Chinese Windmills* », Actes du Symposium international d'histoire des machines et des mécanismes, Edition Springer, 2008, p. 204.

[84]-*Ibid.*

ensemble de Perse, mais le moulin à vent de premier type n'a pas fonctionné sous le climat chinois. La roue éolienne a donc été baptisée du nom de ce mécanisme. Il est clair que la roue éolienne s'est adaptée au nouveau climat, celui de la côte sud de la Chine. Ici également, comme sur le dessin d'Al-Dimashqi, la roue éolienne utilise le vent provenant des quatre directions mais elle n'a pas de mur périphérique.

Au début des années 1950, il y avait seulement 600 moulins à vent à axe vertical dans les régions de Hangu-Saishang et de Tangda, sur la côte de la mer de Bohai. En 1959, il y avait plus de 200 000 moulins à vent (machines à élever l'eau) à axes vertical et horizontal (figure 3-19) dans la province de Jiangsu. Il y avait également 3735 moulins à vent dans les fermes de sel de Huai du Nord en 1958, qui soulevaient quatre cent millions de mètres cubes d'eau par an. Depuis la fin des années 1960, l'énergie électrique et les produits pétroliers ont pris la place des moulins à vent en Chine, mais ce type de moulin à vent fonctionne encore dans certaines régions de la Chine comme le Yancheng, Jianhu, Dafeng, Funing, Xiangshui, Sheyang et Ganyu[85].

Figure 3-19 : Une roue éolienne dans la ville d'Ancheng, au nord de la province de Jiangsu, en Chine. Elle peut irriguer 66 acres de terre agricole.[86]

Il est possible que le moulin à vent chinois soit le descendant du moulin à vent persan, mais il y a des différences significatives entre les deux mécanismes. D'abord, le moulin à vent

[85]- **ZHANG, Baichun**. « *Ancient Chinese Windmills* », Actes du Symposium international d'histoire des machines et des mécanismes, Edition Springer, 2008, p. 211.

[86]- Southern Taiwan University of Science and Technology (STUST) : http://amc.stust.edu.tw/en/node/t01

chinois n'est pas un vrai moulin à vent, c'est une roue éolienne d'irrigation ou tout simplement une roue éolienne pour élever l'eau. Ensuite, la roue éolienne est installée à même le sol, sans mur périphérique. Dernière différence : les pales de cette roue sont des voiles, comme celles qui sont utilisées sur les bateaux chinois. L'utilisation de voiles pour la roue éolienne nous rappelle les mots d'Al-Dimashqi sur le moulin à vent qui a été défini par lui.

Figure 3-20 : Logo de l'Institut de recherche sur les machines anciennes de l'Université des sciences et des technologies du sud de Taiwan.[87]

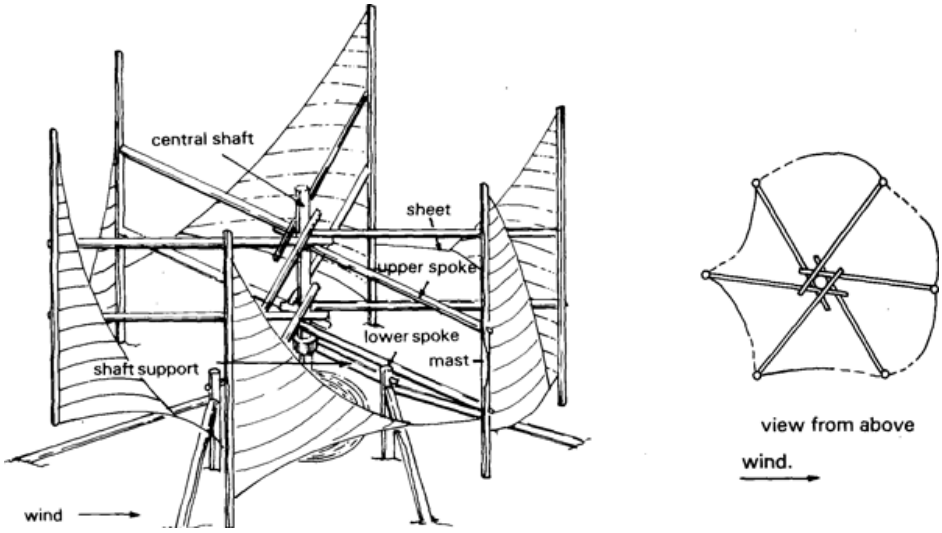


Figure 3-21 : Croquis d'un mécanisme proche de la roue d'irrigation chinoise qui, selon le site de la FAO[88] (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), se trouve sur l'île de Turks-et-Caïcos, dans les Antilles.

[87]- *Ibid.*

[88]- Site de la FAO : http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/AH810E10.htm

Figure 3-22 : Maquette de la roue éolienne chinoise pour l'irrigation.

Le trace de la roue éolienne au Sistan

Aujourd'hui néanmoins, il n'existe aucune trace de la roue éolienne dans la région mis à part une série de puits, considérés par des archéologues et des chercheurs de l'Université du Sistan et Baloutchistan comme des puits d'irrigation par des roues éoliennes[89]. Reza Mehrafarin défende la thèse que la série de puits découverts dans la région de Zahak, au Sistan, pouvaient être utilisés pour l'installation de roues éoliennes pour l'irrigation (figure 4-5). Ces puits, dont le diamètre atteint 4,10 m ont des murs intérieurs complètement couverts de briques, ce qui leur donnait la stabilité nécessaire pour l'installation d'un tel mécanisme d'irrigation avec un mouvement permanent. Ces caractéristiques mettent ces puits dans une catégorie différente de celle d'autres puits découverts sur ce plateau. Il est donc probable que la roue éolienne fut utilisée au Sistan

[89]- **(per) MOUSAVI HAJI Seyed Rasoul, MEHRAFARIN Reza**, « Observation méthodologique et archéologique du Sistan », vol 13, Zâhedân, Université du Sistan et Baloutchistan.2008, p.1045

au cours de ce siècle. Grâce à des céramiques et à des objets retrouvés dans des puits et à proximité, Mehrafarin date l'un de ces puits, le puits du Khammak, de la fin du II^{e} siècle. Pour lui, ce puits appartient à la période de développement agricole du plateau du Sistan, que l'on peut situer vers la fin du règne de la dynastie parthe et au début du règne de la dynastie sassanide[90].

Une hypothèse que nous pouvons proposer sur l'absence de la roue d'irrigation dans ce territoire est le chaos temporaire créé par les invasions des tribus turcophones d'Asie Centrale sur les territoires iraniens. A elle seule, l'attaque de Tamerlan sur le Sistan au XIV^{e} siècle détruisit complètement la plupart des petites localités situées autour du lac Hamoun, dont la ville de Zâhedân-e Kohneh, qui était l'une des cités les plus peuplées. Habituellement, lors d'une telle attaque meurtrière et dévastatrice, mis à part le nombre considérable d'habitants qui mouraient ou s'exilaient, des techniques, des savoir-faire et des mécanismes locaux se perdaient, ceci pour différentes raisons : mort des techniciens et des savants, vol des technologies du peuple dominé au profit du peuple dominant ou, très simplement, oubli d'un savoir-faire ou d'un mécanisme efficace du fait de l'absence de besoin pendant une longue période.

Figure 3-23 : Tchah-e Khammak, puits qui bénéficiait d'une roue éolienne pour l'irrigation, Sistan, vers le IIe siècle de notre ère. Source : Reza MEHRAFARIN[91].

[90]- **(per)MEHRAFARIN, Reza**. « *Vérification et l'analyse archéologique de la région Zahak du Sistan* », Sous la direction de Seyed Mansour Seyed Sadjadi, Texte imprimé, Thèse du doctorat en Archéologie, Université de formation des enseignants (Tarbiat-e Modares), Téhéran, 2004, pp. 223-228

[91]- Ibid, p.227

Le vent de 120 jours, suffisait pour que les roues éoliennes puissent tourner au sol. C'est exactement ce que l'on voit dans l'installation des roues d'irrigation. Nous pensons également que la roue éolienne est une invention « fille » du moulin à vent : pour nous, c'est d'abord le moulin à vent qui fut inventé avec ses caractéristiques et sa roue éolienne à axe vertical et, plus tard, cette roue fut utilisée séparément pour élever l'eau des puits comme une noria. La roue d'irrigation iranienne et son savoir-faire furent oubliés au Sistan à cause des guerres et de la destruction de l'économie agricole. Mais le type importé en Chine est resté, a évolué et a été modifié en fonction du climat et de l'état des techniques propre à ce pays.

Nous avons poursuivi les recherches entamées par des collègues archéologues sur les puits d'irrigation du Sistan pour vérifier s'ils constituent un système particulier de chaîne de puits connectés pour capter l'eau comme le qanât iranien avec une différence pour élever l'eau du grand puits central, mâdar-tchâh. Dans l'état actuel, nous nous sommes intéressés à la région de Zahak, qui surplombe la rivière Hirmand. Là, se trouve une chaîne de petits et grands puits. Nous avons essayé de vérifier et d'approfondir l'hypothèse selon laquelle d'installation des roues d'irrigation sur les grands puits du Sistan. C'est une recherche archéo-technique qui a besoin d'une part d'éléments en matière de stéréotomie et de chronologie archéologique et d'autre part d'une modélisation et d'une réalisation technique. Parmi les puits mentionnés, nous avons trouvé de grands puits qui peuvent être classés dans la même catégorie que le puits de Khamak fouillé par Reza Mehrafarin.

Figure 3-24 : Pièces de poterie retrouvées autour du puits n° 2 de Khamak.

Figure 3-25 : Tchâh-e Khamak n° 2, un autre puits qui pouvait être doté d'une roue éolienne pour l'irrigation.

Une recherche sur terrain sur les puits du Sistan

Nous avons mené une recherche sur les puits du Sistan tout d'abord pour comprendre et documenter cet ancien mécanisme d'irrigation et ensuite pour vérifier l'hypothèse présentée par M. Mehrafarin selon laquelle une roue éolienne pouvait être installée sur les puis centraux, les *mâdar-tchâh*. Cette étude visait à identifier les puits des périodes préislamique et islamique sur la plaine du Sistan, en particulier ceux des régions nord et est. Nous avons concentré notre attention sur des localités comme Zahak et Hirmand, et surtout sur la région de Qorqori. Nous avons retrouvé les puits de ces régions grâce aux indications données par la population locale. Nous nous sommes intéressés à certains secteurs comme Qorqori en raison de leur grand nombre de puits. Nous avons enregistré des informations de base comme leur position géographique, leur profondeur et leur diamètre (pour ceux qui n'étaient pas bouchés par des débris), et nous avons également noté leurs caractéristiques physiques. Dans les cas où il y avait des briques autour des puits, nous avons mesuré et enregistré la taille de ces briques. Et enfin nous les avons photographiés.

Les images présentées des puits de différentes montrent qu'à certains endroits autour des puits se trouvent des morceaux de poterie, du verre et du métal qui nécessitent d'être identifiés. Dans l'ensemble de la zone d'étude, 32 puits ont été identifiés. La plupart d'entre eux sont à sec et recouverts de sédiments apporté par le vent. Mais dans certaines endroits, on peut encore trouver des puits en cours d'utilisation. Certains de ces puits sont très endommagés et sont fouillés illégalement.

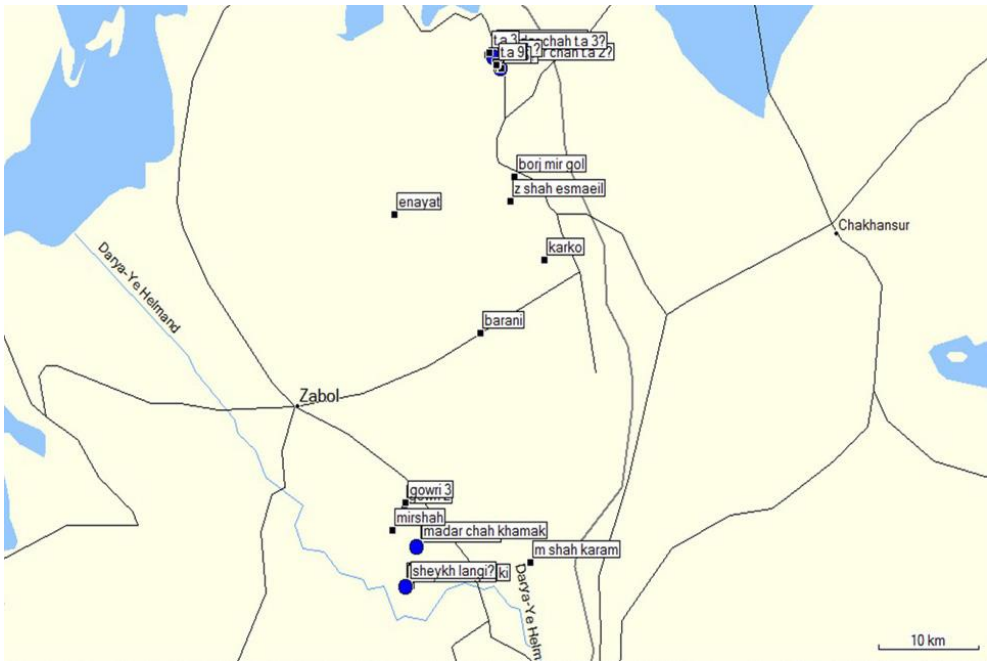
Nous avons observé un bon nombre de puits au Sistan mais normalement le Sistan n'a pas connu de système d'irrigation solide utilisant les puits. Cette recherche peut être intéressante si nous pouvons montrer qu'un tel système existait dans certaines régions en altitude. Compte-tenu du fonctionnement de certains de ces puits jusqu'alors, une recherche anthropologique pourrait être également très utile. Nous mènerons cette recherche dont les buts sont les suivants :

1. Établir une chronologie des puits à travers l'étude de la stéréotomie, de la typologie des poteries, des matériaux et des céramiques trouvés.
2. Étudier les manières de construire et les styles de construction des puits de la plaine du Sistan.
3. Établir des méthodes de localisation des puits.

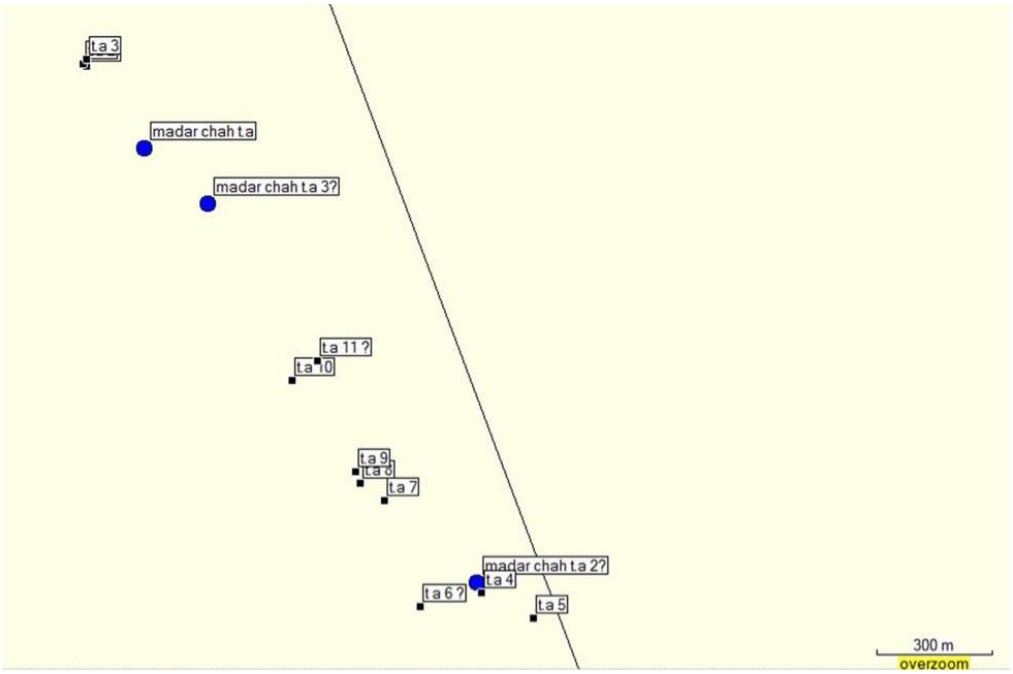
4. Comprendre la continuité et la connexion des puits les uns avec les autres, ainsi que leur relation avec d'autres éléments de l'architecture industrielle ou agricole.
5. Trouver les manières dont une roue éolienne s'installe sur le puits central, *mâdar-tchâh*.
6. Découvrir le mécanisme probable de la roue éolienne du Sistan.

Carte 3-1 : Carte de la région du Sistan principal (l'autre partie du Sistan se situe en Afghanistan) à la frontière avec l'Afghanistan et le Pakistan.

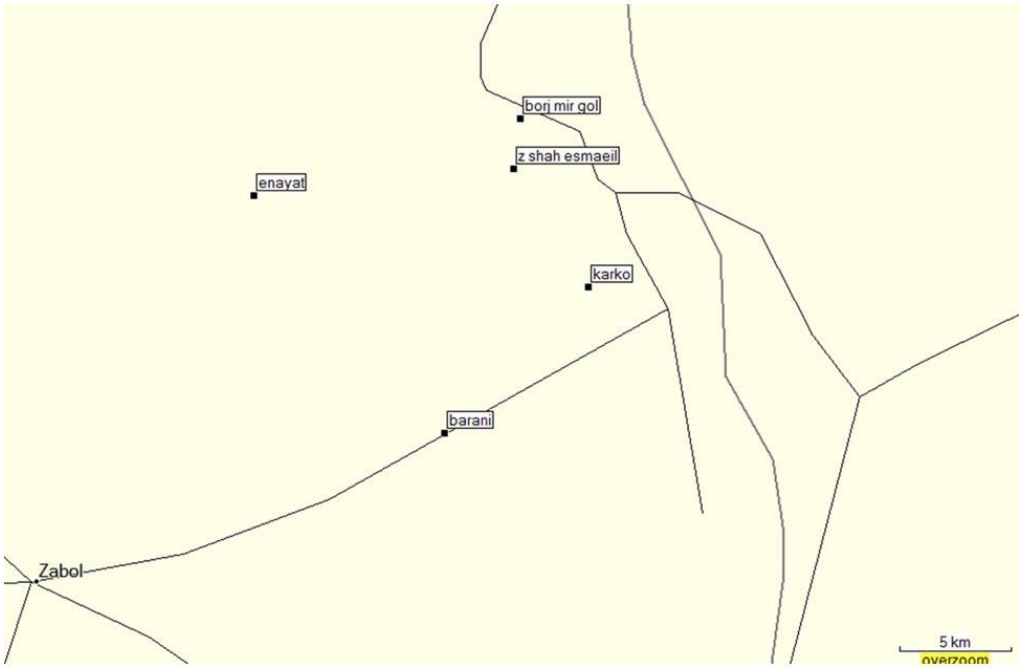
Carte 3-2 : Carte des régions étudiées pour notre étude des puits du Sistan.



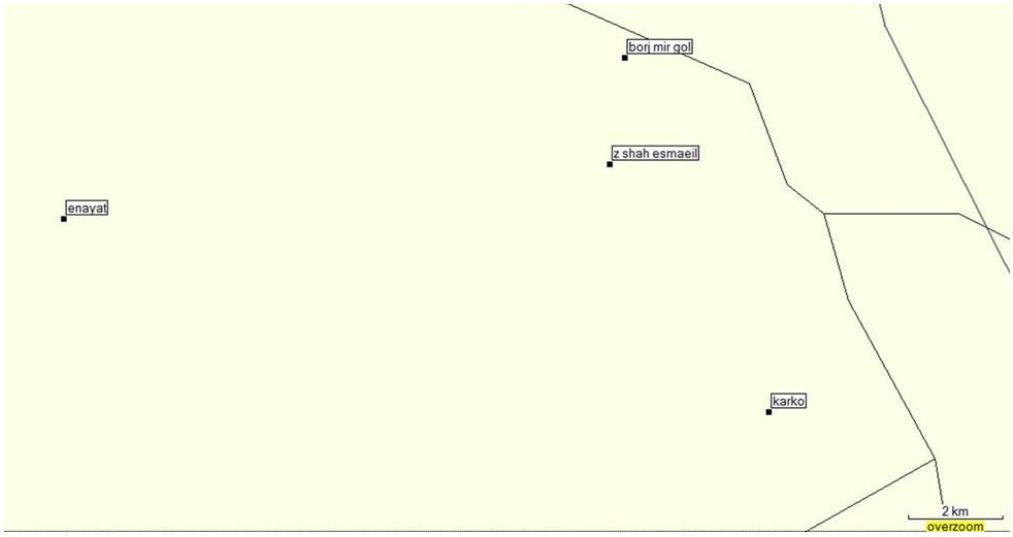
Carte 3-3 : Carte des puits du Sistan observés en première phase de recherche. Source : Projet de recherche sur les puits de Sistan, Rouhollah Chirazi et Kambiz M. Gohari.



Carte 3-4 : Carte des puits du Sistan observés en première phase de recherche. Source : Projet de recherche sur les puits de Sistan, Rouhollah Chirazi et Kambiz M. Gohari.



Carte 3-5 : Carte des puits du Sistan observés dans la région de Qorqori. Source : Projet de recherche sur les puits du Sistan, Rouhollah Chirazi et Kambiz M. Gohari.



Carte 3-6 : Carte des puits du Sistan observés dans la région de Qorqori. Source : Projet de recherche sur les puits du Sistan, Rouhollah Chirazi et Kambiz M. Gohari.

`

Les puits de la région de Zahak

La ville couvre une superficie de 950 km^2 ; elle située au sud-est de Zabol. Sur le plan administratif, la région est constituée d'une ville, de deux cantons, central et Jazinak, et de quatre villages, Zahak, Khajeh Ahmad, Jazinak et Khamak. Ce dernier village regroupe lui-même 203 petits villages habités. Dans cette région, nous avons 15 puits dont voici ledescriptif :

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et caractéristiqus physiques	Photo
Puit No 1 Zahak/Jazinak/Cheikh-Langi **N: 30°89’325”** **E:061°60’756”**	Inconnu 150cm Terre Agricole	Facteur Humain Sans poterie	Modifié / Béton et brique ancienne / Avec de l’eau / En contact avec d’autres puits	
Puit No 2 Zahak/Jazinak/Cheikh-Langi **N: 30°89’281”** **E:061°60’683”**	Inconnu Inconnu Terre Agricole	Facteur Humaine Sans poterie	En contact avec les puits n° 1 et 3 / À 80 mètres du puits n° 1/ Il est rempli	
Puit No 3 Zahak/Jazinak/Cheikh-Langi **N:30°89’424”** **E:061°60’563”**	Inconnu Inconnu Terre Agricole	Facteur Humaine et Naturel Sans poterie	En contact avec les puits n°1 et 2 / À 150 mètres des puits n°1 et n° 2 / Il est rempli	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et caractéristiques physiques	Photo
Puit No 4 Zahak/Jazinak/Cheikh-Langi **N: 30°89'262"** **E:061°60'658"**	Inconnu Inconnu Terre Agricole	Facteur Naturel Brick et le tube céramique	En contact probable avec d'autres puits / Il est rempli / Plusieurs indices archéologiques	
Madar-Tchah (Puit Central) Hirmand/Qorqori/Khamak **N: 30°55'301"** **E:061°37'065"**	Inconnu 2 mètre Arbustes tamaris	Facteur Humaine et Naturel Sans poterie	Actuellement un fossé / À l'ouest du village de Khamak / Au sud de ce fossé se trouvent des briques et des poteries	
Sous puit de Khamak Hirmand/Qorqori/Khamak **N: 061°62'062"** **E:30 °92'478"**	Inconnu Inconnu Plants sauvages	Facteur Humaine et Naturel Sans poterie	Il est encerclé par un mur de terre cru	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Puit No 1 de Gouri Zahak/Jazinak/Gouri **N: 30°57'256"** **E:061°36'192"**	Inconnu Inconnu Terre Agricole	Facteur Humaine et Naturel Limité	*Il a été détruit en raison de la construction d'une route / Sur place on trouve des poteries rouges et des briques*	
Puit No 2 de Gouri Zahak/Jazinak/Gouri **N: 30°57'239"** **E:061°36'214"**	Inconnu 160 cm Sans Végétation	Facteur Naturel Poteries dispersés	Plusieurs pièces de poteries de la période arsacide dispersées sur une surface de 250-300 mètres de diamètre / À 50 mètres du puits n° 1 de Gouri	
Puit No 3 de Gouri Zahak/Jazinak/Gouri **N: 30°57'376"** **E:061°36'233"**	Inconnu 150 cm Plants sauvages	Facteur Humaine et Naturel Sans poterie	Il est à 100-150 mètres du site archéologique de Gouri / Il est rempli	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Puit de village de Mirchah Zahak/Jazinak/Mirchah **N: 30°56’172”** **E:061°35’338”**	Inconnu 140 cm Sans Végétation	Facteur Humaine Sans poterie	Sur la surface il y a un brick de **30×16×5** cm/Il est rempli	
Puit de la maison de M.Isphahani Zahak/Jazinak/Chemain de Cheikh-Langi au Zahak **N: 30°89’332”** **E:061°61’185”**	Inconnu Inconnu Sans Végétation	Facteur Humaine Sans poterie	Avec de l’eau / Selon les habitants, il y avait des briques dans le mur intérieur de ce puits	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Puit de la maison de M.Chahraki Zahak/Jazinak/ Chemain de Cheikh-Langi au Zahak **N: 30°53’363”** **E:061°36’455”**	6-7 mètre 54 cm Sans Végétation	Facteur Humaine Sans poterie	Ce puits est en bon état par rapport aux autres puits de la région / Sa bouche est serrée et construite en briques.	
Puit de village de Mohamad Chah karam Zahak/Central/ Mohamad Chah karam **N: 30°91’263”** **E:061°73’769”**	Inconnu Inconnu Sans Végétation	Facteur Humaine Dispersion moyen des Poteries	Site et cimetière historique / Autour du puits se trouvent des poteries rouges de la période arsacide.	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Puit de mausolée de Chah Ismail Zahak/Jazinak/ Mausolée de Chah Ismail **N: 31°12'177"** **E:061°43'027"**	50 cm 95 cm Sans Végétation	Facteur Humaine et Naturel Sans poterie	*Au nord du mausolée, à l'ouest du nouveau cimetière / Des rangées de briques sont visibles*	
Puit de Sardar Seif Al-Din Chahraki Zahak/Jazinak **N: 30°53'377"** **E:061°36'478"**	3mètre 70 cm Sans Végétation	Facteur Humaine Sans poterie	Ce puits se trouve dans la maison de M. Seif Al-Din / Sans eau / La partie haute de ce puits est déformée	

Les puits de la région de Hirmand

Cette région est divisée en deux sous-régions : Centrale et Qorqori. Elle se situe à l'est de la ville de Zabol et au nord de ville de Zahak. Le nombre de puits observé sur ce territoire s'élève à 17, dont voici la liste :

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Madar-Tchah de Village de Takht-e Edâlat Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N: 31°19'248"** **E:061°48'491"**	Inconnu Inconnu Plants sauvages	Inconnu Dispersion moyen des Poteries	*Site historique de Takht-e Edâlat / Ce puits se situe à l'ouest du site historique / Il est rempli.*	
Madar-Tchah sud de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N: 31°31'314"** **E:061 °70'608"**	Inconnu 6-6.30 mètre Sans Végétation	Facteur Humaine et Naturel Dispersion Moyen des Poterie	D'après la dispersion des poteries cela peut être un *mâdar-tchâh* au sud de Takht-e Edâlat / Ce puits se situe à 30 mètres sous le puits du sud	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Madar-Tchah No3 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori /Takht-e Edalat **N: 31°19'202"** **E:061°41'554"**	Inconnu 5.5 mètre Sans Végétation	Facteur Humaine Dispersion considerable des Poterie	En connexion avec d'autres puits	
Sous puit No1 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori /Takht-e Edalat **N: 31°19'317"** **E:061°41'436"**	Inconnu Inconnu Plants sauvages	Facteur Naturel Pas beaucoup de poterie	Il n'y a pas de bouche de puits, mais selon certains habitants c'est un sous puits caché sous du sable.	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Sous puit No2 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N:31°19'319"** **E:061°41'431"**	Inconnu Inconnu Plants sauvages	Facteur Naturel Pas beaucoup de poterie	Il n'y a pas de bouche de puits, mais selon certains habitants c'est un sous puits caché sous du sable / En connexion avec d'autres puits.	
Sous puit No3 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N: 31°32'563"** **E:061 °69'544"**	Inconnu Inconnu Plants sauvages	Facteur Humaine Pas beaucoup de poterie	Il n'y a pas de bouche de puits, mais selon certains habitants c'est un sous puits caché sous du sable.	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Sous puit No4 de Takht-e Châh Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N:31°18’474”** **E:061°42’224”**	2.5 mètre 70 cm Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considerable des Poteries	Ce puit se situe au sud de site historique de Takht-e Chah/ Excavtion illégal des gens a abimé le mur de ce puit	
Sous puit No5 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N: 31°31’259”** **E:061 °64’707”**	Inconnu 90 cm Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considerable des Poterie	Ce puit se situe au-dessus d’un colis/ Il est rempli/ Quelques rangs de brick est visible	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Sous puit No7 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori /Takht-e Edalat **N: 31°31'534"** **E:061 °70'356"**	6-7 mètre 65 cm Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considérable des Poterie	Ce puits se situe à l'est du site historique de Takht-e Edâlat / À l'ouest de ce puits il y a un four qui a été fouillé illégalement / Certaines parties de ce puits sont détruites / La taille de la brique utilisée est de ***40×22×45***	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Madar-Tchah No9 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori /Takht-e Edalat **N: 31°18’577”** **E:061°42’100”**	Inconnu Inconnu Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considerable des Poterie	Site historique de Takht-e Edâlat / En connexion avec d’autres puits / Ce puits a été fouillé illégalement / La taille de la brique utilisée est de 20x5x?	
Madar-Tchah No10 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori /Takht-e Edalat **N: 31°31’815”** **E:061 °70’103”**	70 cm 95 cm Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considerable des Poterie	Site historique de Takht-e Edâlat / En connexion avec d’autres puits / À 30 mètres au nord de ce puits se trouve un four / La taille de la brique utilisée est de **35×18×5**	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Sous puit No11 de Takht-e Edalat Hirmand/Qorqori/Takht-e Edalat **N: 31°31’860”** **E:061 °70’174”**	Inconnu Inconnu Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considerable des Poterie	Site historique de Takht-e Edâlat / En connexion avec d’autres puits / Ce puits se situe au nord-est du site historique de Takht-e Edâlat et à l’est du puits n° 10 / Il est rempli / À proximité de ce puits se trouve un colis qui est probablement un four / La taille de la brique utilisée est de ***33×14×5***	
Puit de Karkouyeh Hirmand/Central/Karkouyeh **N: 31°15’771”** **E: 06°175’290”**	1.80 mètre 80 cm Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Dispersion considerable des Poterie	Ce puits se situe au sud du temple du feu de Karkouyeh	

Nom de Puit Région/Ville/Village Coordonnées	Profondeur Diamètre Végétation	Erosion Dispersion des Poterie	Indices et Caractéristique Physique	Photo
Puit de Borj Mir Gol Hirmand/Village de Mir Gol **N: 31°22’523”** **E:061 °72’085”**	Inconnu Inconnu Sans Végétation	Facteur Humaine Sans beaucoup des Poterie	Ce puits se situe au nord-ouest de Borj-e Mir Gol	
Puit de village de Barani Hirmand/Central /Barani **N: 31°05’554”** **E:061°41’068”**	4 mètre 1.5 mètre Sans Végétation	Facteur Naturel et Humaine Sans beaucoup des Poterie	Ce puits se situe à 200 mètres au sud du village de Bârâni / Avec de l’eau	

Méchanisme probable pour la roue d'irrigation du Sistan

Comme nous l'avons indiqué précédemment, il n'y aucune trace tangible de roue éolienne au Sistan, ce qui est assez compréhensible car le système de cette roue est probablement fabriqué en bois et le bois n'est pas un matériau qui traverse les siècles. La seule chose qui puisse nous donner une idée de la fonction de la roue éolienne au Sistan c'est l'ancien système d'irrigation, avec ses chaînes de petits et de grands puits (*mâdar-tchâh*). D'autre part, le mécanisme de la roue éolienne chinoise est considéré comme le descendant direct de la roue éolienne du Sistan, nous exigeons donc de trirer certains cours techniques et fonctionnels de ce mécanisme dont il y a une connaissance suffisante sur les trois parties principales : les pales, le chaft (gear) et le mécanisme pour élever l'eau. Toutefois, n'oublions pas qu'il y a sans doute des différences et des caractéristiques propres à chacun de ces systèmes et qu'il faut les mettre à jour en modélisant et en fabriquant des modèles de taille appropriée.

Figure 3-26 : variante chinoise de la roue à vent horizontal. Roue pour pomper l'eau. Source : Baichun Zhang

Tout d'abord, en été au Sistan, le vent de 120 jours souffle en permanence. Il faisait fonctionner les moulins à vents de la région, alors il serait sans doute suffisamment puissant pour faire tourner une roue éolienne servant à élever l'eau. Selon nous, il n'est pas faux d'imaginer que la roue éolienne avait des similarités avec le moulin à vent du

Sistan. Quand on observe bien les *mâdar-tchâh* du village de Takht-e Edâlat, on peut d'ailleurs voir les traces bien visibles d'un mur périphérique. De notre point de vue, il pourrait s'agir d'un mur qui avait été construit autour de la roue éolienne et qui pouvait avoir une ouverture en façade nord, comme pour tous les moulins à vent du Sistan.

Figure 3-27 : Les *mâdar-tchâh* du village de Takht-e Edâlat, ville de Hirmand, région de Qorqori.

Nous proposons donc d'entourer la roue éolienne d'un mur de terre crue. Cet ouvrage est constitué de deux murs à l'est et à l'ouest, et d'un mur au nord dans lequel il y a une ouverture contre le vent de 120 jours. Au sud, ne se présente aucun obstacle au courant du vent. L'axe vertical est fixé en haut avec un travers de bois exactement comme dans le cas des moulins à vent du Sistan. Par contre, en bas, l'axe vertical est assis sur une pièce de bois fixée sur deux travers parallèles. Les pales sont fabriquées en bambou local comme les pales d'un moulin à vent du Sistan. Nous proposons ces images comme notre concept imaginé :

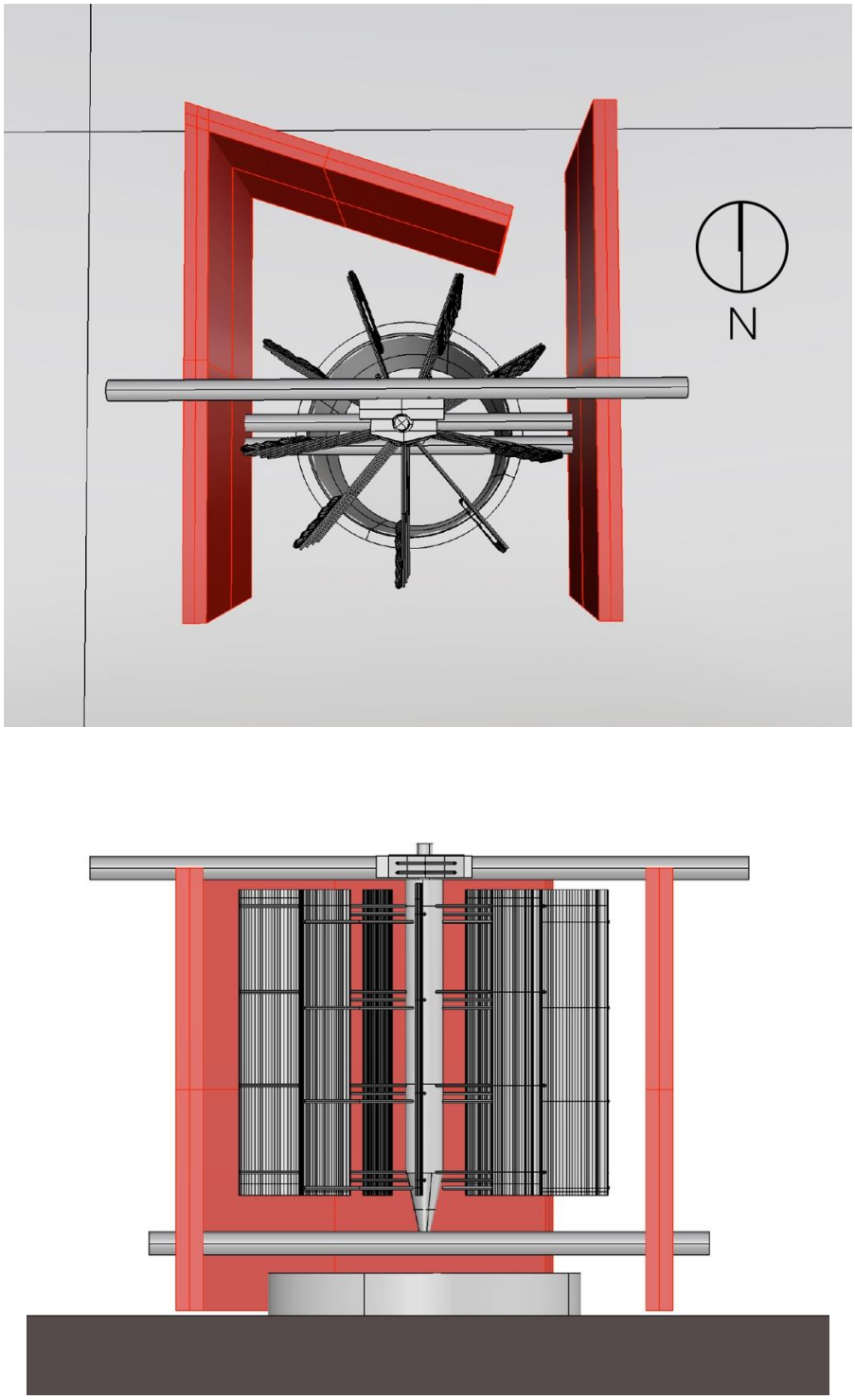


Figure 3-28 : Plan, façade nord et sud, d'une roue éolienne, d'après des comparaisons avec l'architecture et le mécanisme des pales du moulin à vent du Sistan.

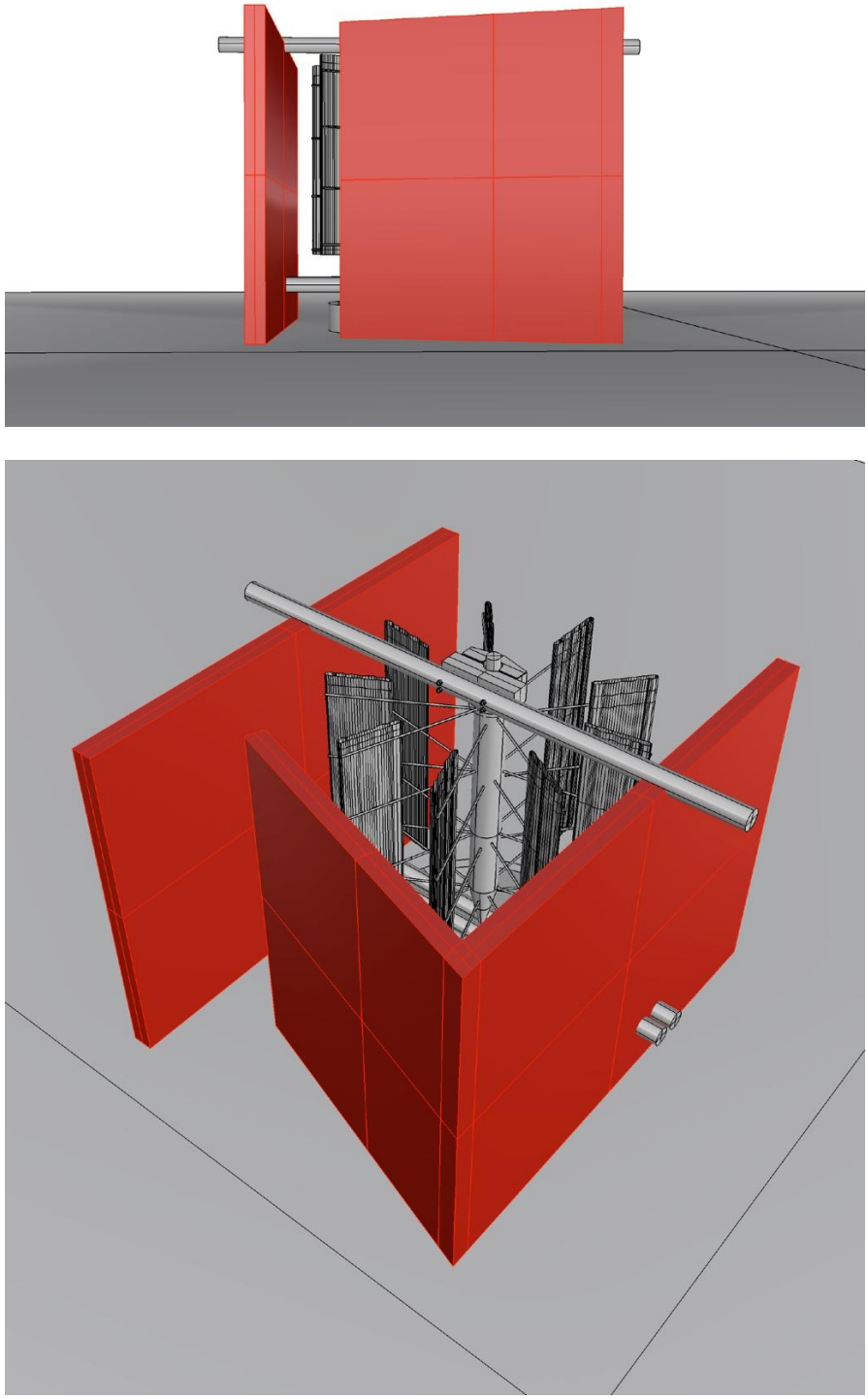


Figure 3-29 : L’enveloppe a et l’installation des pales sur la roue éolienne du Sistan.

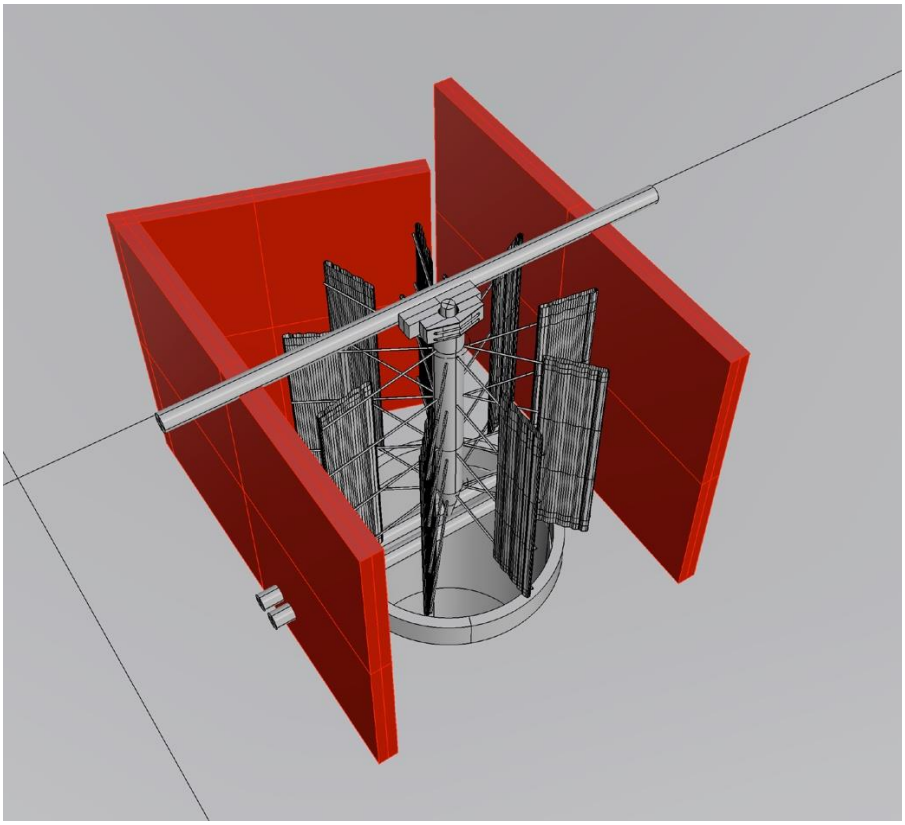


Figure 3-30 : L'enveloppe a et l'installation des pales sur la roue éolienne du Sistan.

Mais le problème principal est de proposer un mécanisme pour élever l'eau avec la force produite par cette roue éolienne. Comme nous l'avons dit, il n'y a pas de traces de ce mécanisme au Sistan et pas même un croquis simple. Pour esquisser le mécanisme de la machine imaginée, nous utilisons donc ici deux autres modèles :

1- le mécanisme de la roue éolienne chinoise

2- le mécanisme pour élever l'eau par noria

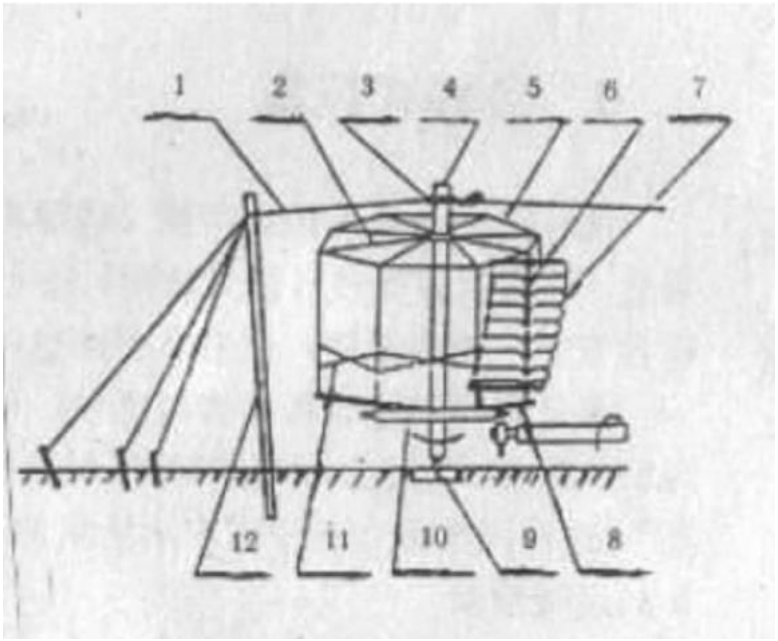


Figure 3-31 : La structure basique d'un grand moulin à vent chinois dessinée dans les années 1950 par Li Chen[92].

Généralement, un moulin à vent chinois est constitué de trois parties principales : la voile ou pales en bambou, un *shaft* ou axe vertical tournant et un *gear* ou engrenage pour changer la direction de l'axe tournant. Les ouvrages techniques de la Chine ancienne donnent de trop brèves explications et peu de détails quant à la construction de la structure. On trouve néanmoins dans l'essai *Shuiche Xing* une description de l'action d'une machine à élever l'eau qui fonctionnait grâce à une roue éolienne dont le diamètre était de 3 zhang (environ 10 mètres). Ce moulin à vent fut utilisé au Lingling. Au chapitre 36 d'une autre source, le livre *Yanfa Tongzhi* (*Information générale sur la manière de produire le sel*), Qingyun Zhou présente la structure et les techniques de construction d'un moulin à vent chinois. Dans cet ouvrage, il dit qu'un moulin à vent fonctionnant avec la force du vent utilise une roue éolienne de 8 mètres de diamètre et de 6,7 mètres de haut.

Compte-tenu du diamètre moyen des *mâdar-tchâh* (puits centraux) du Sistan - entre 5 et 6,50 mètres - nous utilisons ces informations et présentons le même diamètre et la même hauteur que ce moulin à vent chinois pour notre prototype de roue éolienne du Sistan.

[92]- ZHANG, Baichun. *« Ancient Chinese Windmills», Acte de Symposium international d'histoire de machines et mécanismes, Edition Springer,2008, p206*

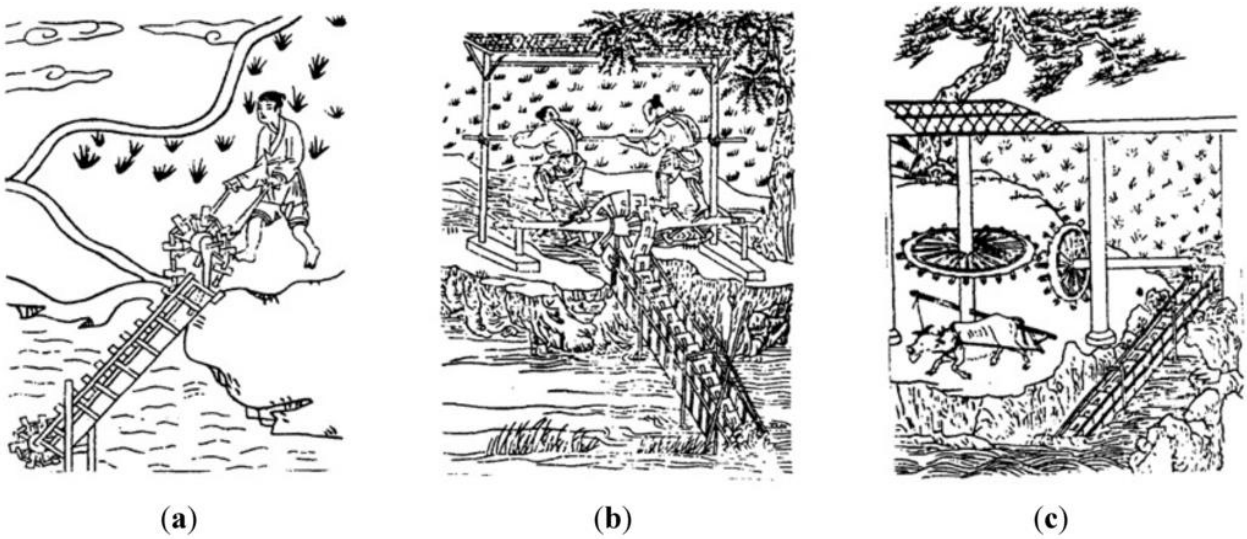


Figure 3-32 : Le mécanisme d'instrument pour élever l'eau utilisé dans les moulins à vent chinois, d'après les sources historiques chinoises, qui utilise différentes sources d'énergie.

Compte-tenu du diamètre moyen des *mâdar-tchâh* (puits centraux) du Sistan - entre 5 et 6,50 mètres - nous utilisons la description de Qingyun Zhou sur la taille de la roue éolienne chinoise et utilisons ici les mêmes diamètre et hauteur pour notre prototype de roue éolienne du Sistan.

Mais le vrai problème est de proposer un mécanisme pour élever l'eau qui puisse fonctionner avec le mécanisme de la roue éolienne du Sistan et la profondeur des *mâdar-tchâh* du Sistan. Sur la figure 3-32, nous présentons un mécanisme chinois pour élever l'eau qui fonctionne bien avec des sources d'énergies différentes. Nous pensons que le mécanisme pour élever l'eau dans la roue éolienne d'irrigation du Sistan ne pouvait pas être tellement diffèrent. La seule inquiétude, c'est l'angle d'installation de ce mécanisme par rapport au niveau d'eau des puits, car dans les exemples chinois il n'y a plus de 30° d'inclination par rapport au niveau horizontal.

Figure 3-33 : Un moulin à vent à axe horizontal chinois fournissant de l'énergie pour un dispositif de levage d'eau. Source : Baichun Zhang.

Figure 3-34 : Réglage des dents des *gears* d'un moulin à vent chinois. Source : Baichun Zhang.

En profitant du mécanisme d'une pompe à chaîne, un instrument efficace et ancien pour élever l'eau verticalement, comme ce qui est présenté sur la figure 4-6, nous préférons composer ce mécanisme avec notre roue éolienne. Il faut noter que la noria était toujours un autre choix pour élever l'eau du bas niveau sous l'Antiquité, mais ici, à cause du diamètre des puits et surtout de la position de la roue éolienne, l'installation d'une roue de noria est difficile voire presque impossible. Nous travaillons donc sur le choix de *washer pump*.

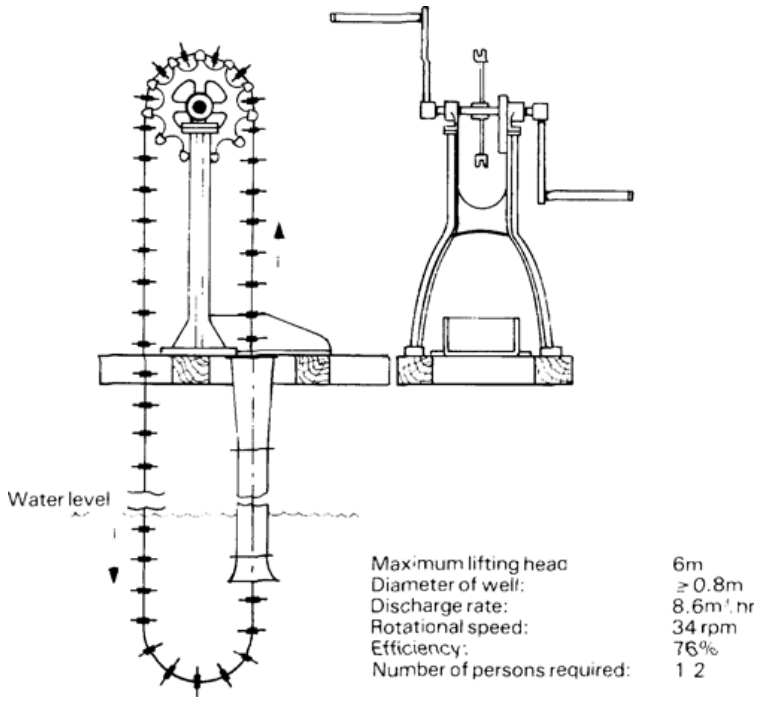


Figure 3-35 : « Chinese Liberation Wheel chain and washer pump » ; Source : fao[93]

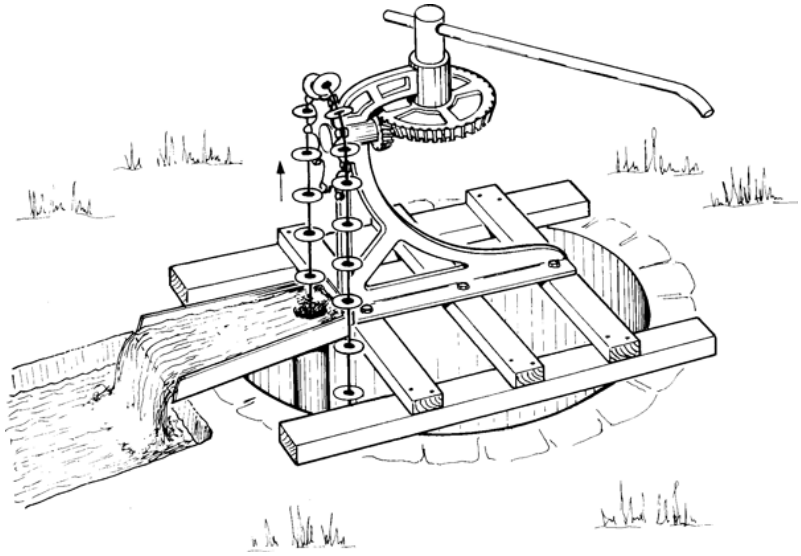


Figure 3-36 Vue d'une pompe de rondelle manuelle. Source : FAO[94].

Nous proposons donc l'installation d'une pompe de rondelle à axe horizontal qui puisse élever l'eau du *mâdar-tchâh*. En raison du nombre limité de matériaux disponibles sous l'Antiquité, la fabrication d'un tube solide n'était pas imaginable à la période où fonctionnait

[93]-Natural Resources Management and Environment Department of FAO (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture): http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/AH810E06.htm

[94]-ibid

la roue éolienne au Sistan. Nous utilisons donc le concept de la pompe de rondelle chinoise qui fonctionne encore sur le moulin à vent chinois, avec une coupe rectangulaire.

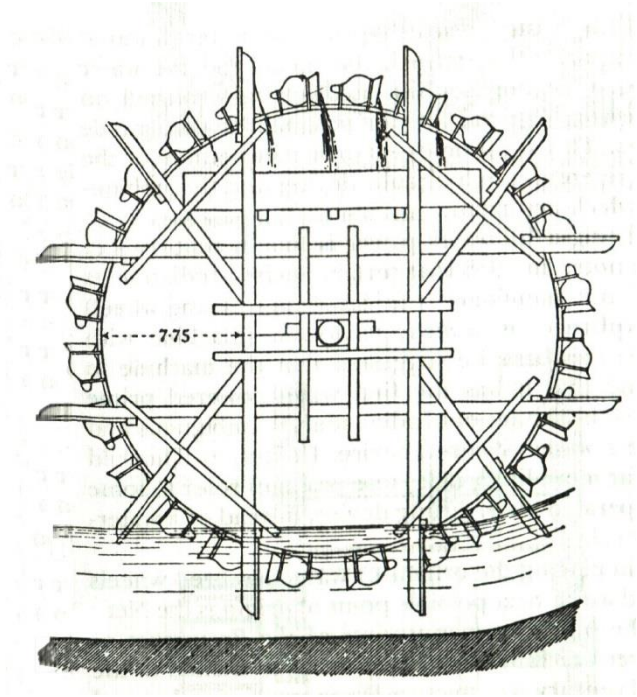


Figure 3-37 : Noria. Source : Terry S. REYNOLDS[95].

Pour changer la direction de l'axe tournant, il faut utiliser au moins deux *gears*. Ces roues aident à fournir la force nécessaire pour élever l'eau. Nous allons fabriquer ces roues en bois en suivant les exemples chinois. Il y a des principes à respecter, comme le nombre égal de dents de chacune des roues et l'utilisation d'un bois bien solide. Au Sistan, le savoir-faire de la fabrication de cette roue éolienne est oublié depuis des siècles. La renaissance de cette technique rencontrera donc sans doute des problèmes imprévus.

[95]- **REYNOLDS Terry S.**, 1983, p13

Figure 3-38 : Roues dentées et roues motrices non utilisées. Source : Baichun Zhang.

Nous présentons ici le concept complété de roue éolienne qui, selon nous, a pu exister au Sistan vers la fin du II^{e} siècle pour l'irrigation des terrains en altitude par rapport à la rivière Hirmand. Nous proposons ici le mécanisme imaginé d'une roue éolienne d'irrigation du Sistan, qu'il faut fabriquer afin de bien vérifier son fonctionnement sur les *mâdar-tchâh* du Sistan.

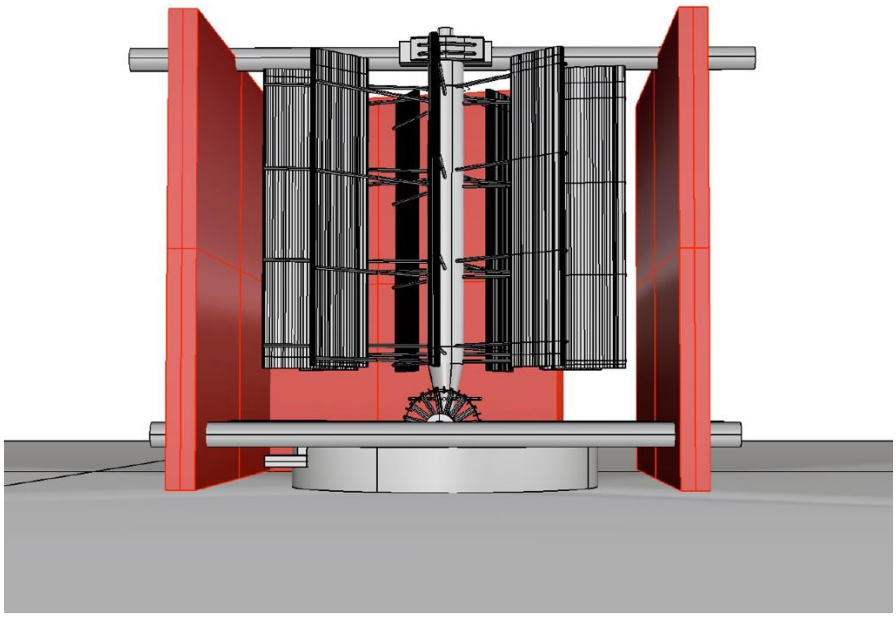


Figure 3-39 : La façade sud de notre prototype pour la roue éolienne d'irrigation au Sistan.

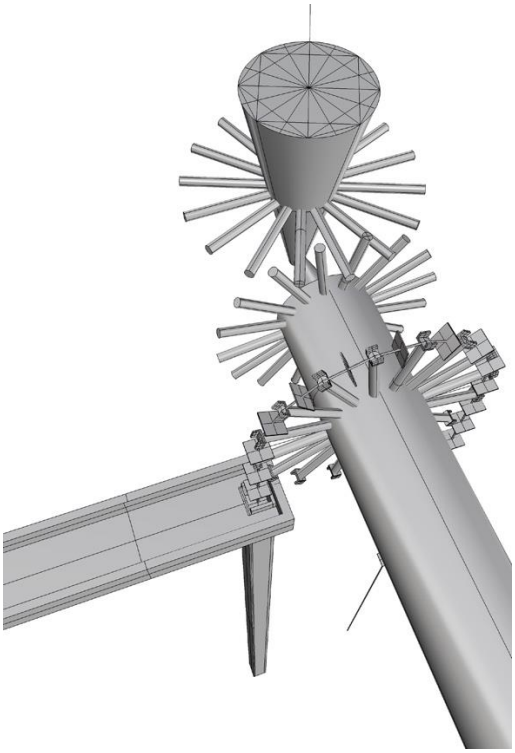


Figure 3-40 : La pompe de rondelle proposée pour élever l'eau du *mâdar-tchâh*.

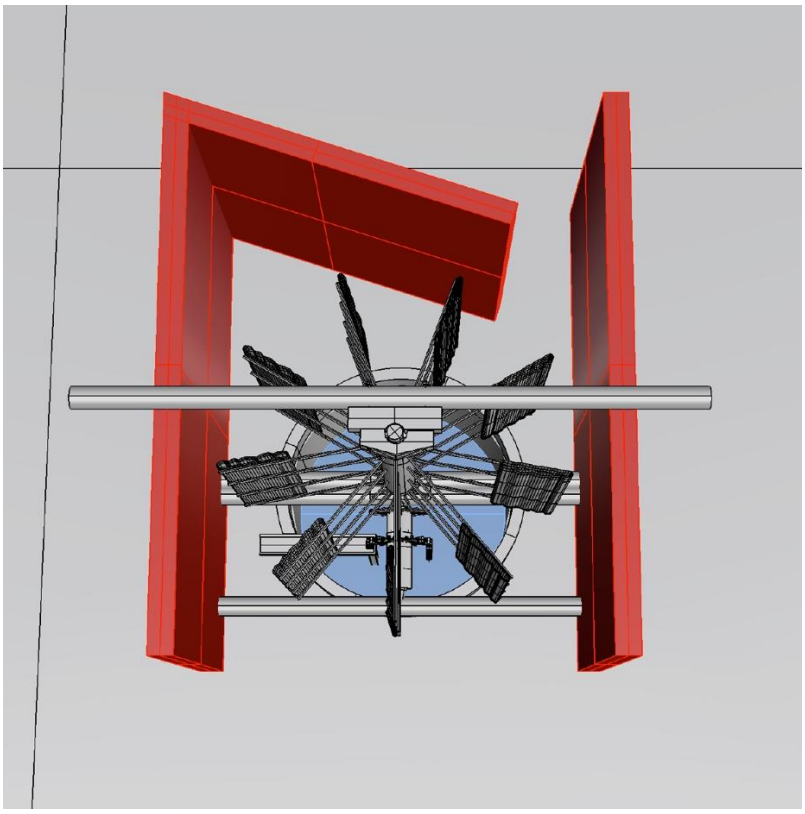


Figure 3-41 : Le plan de notre prototype pour la roue éolienne d'irrigation au Sistan.

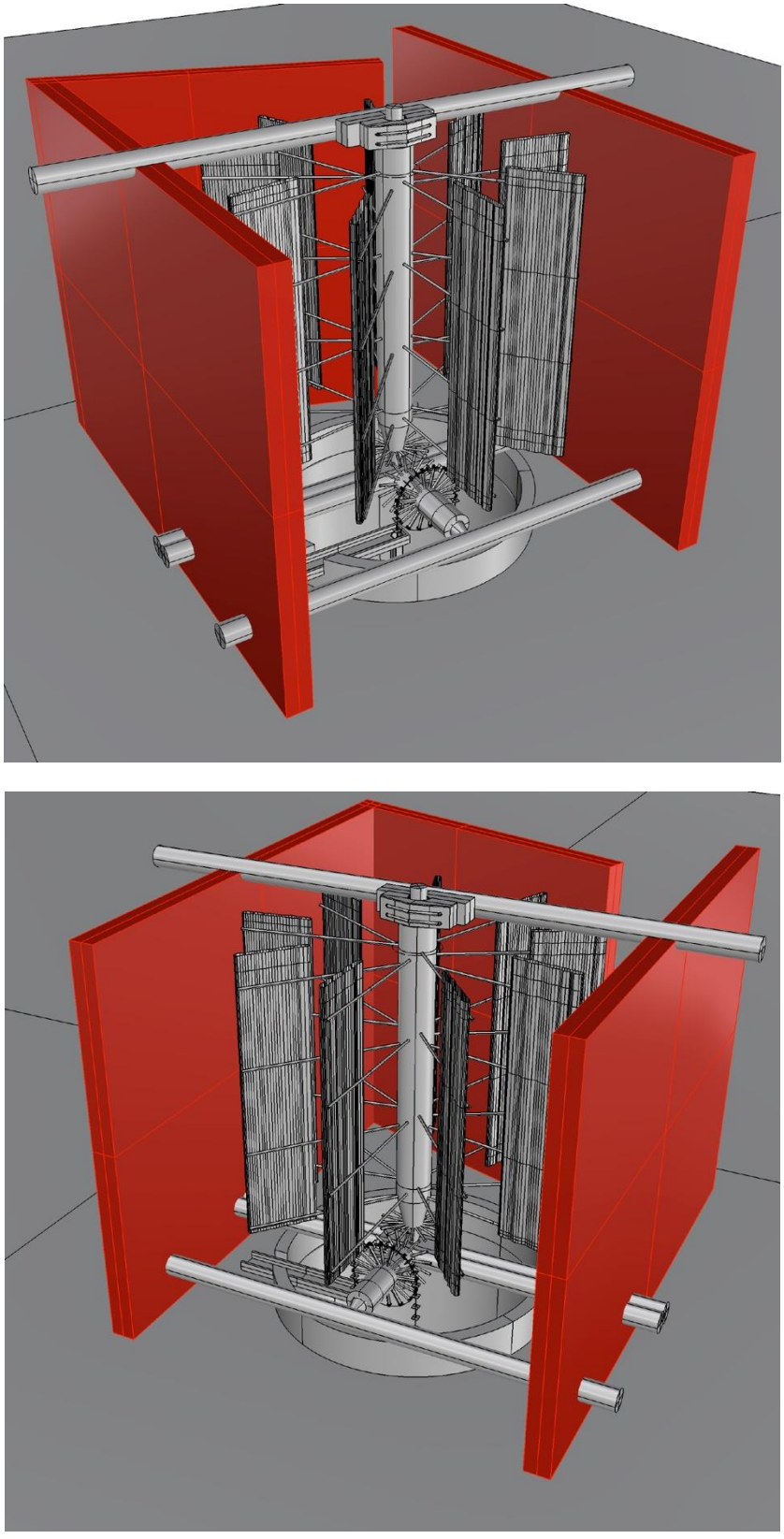


Figure 3-42 : Les perspectives de notre prototype pour la roue éolienne d’irrigation au Sistan.

L’application du vent pour déplacement des collines de sable

Nous pouvons encore trouver des indications sur d’autres techniques d’utilisation du vent dans la société ancienne du Sistan en Iran. Istakhri, géographe iranien du X^{e} siècle, expose une ancienne technique pour déplacer le sable au Sistan. Cette technique nous montre le niveau de connaissance des habitants d’une région sur le climat local, ses menaces et les possibilités qu’il offre. Il écrit dans son livre ; *Al-Massâlek et Al-Mamâlek* :

> « … Des nuages de sable sont portés par des bourrasques de vent d’un lieu à un autre. Si on n’empêche pas le déplacement du sable, ce sable risquerait de se déposer sur la ville. Quand le nuage de sable se rapproche de la ville, les gens se réunissent et construisent un mur de bois autour du sable mais plus haut que le nuage. Ils gardent des ouvertures au-dessous du mur où le vent entre, prend le sable, le ramène jusqu’en haut du mur, le fait sortir et tomber dans un lieu où il n’y a aucune perte pour eux. »[96]

Ibn Ḥawqal, autre géographe iranien de la même époque, écrit dans son livre *Sourat Al-Arz* :

> « … Ces vents transportent les sables d’un point à un autre. Les peuples de ce territoire protègent leur territoire du danger du sable roulant en utilisant le savoir des anciens qui est fondé sur la géométrie. Si cette protection n’existait pas, le sable roulant aurait détruit les villes et les villages. J’ai entendu dire que lorsqu’ils veulent déplacer le sable d’un point à l’autre sans que le sable ne se répande sur des terres périphériques, ils installent des murs de bois à proximité des nuages de sable et font une ouverture en dessous de ces murs. Le vent entre par cette ouverture et transporte le sable vers le ciel comme une tornade. Ainsi, les gens peuvent déplacer le vent là où ils le souhaitent. »[97]

Ibn Ḥawqal expose une ancienne technique pour déplacer le sable au Sistan. Ce savoir-faire aida les populations locales à nettoyer les villes et les villages du sable amassé après chaque grande tempête. Mais la question est la suivante : « comment cette technique fonctionnait-elle ? » Nous allons essayer de vérifier les informations historiques en réalisant le mécanisme. Mais afin de mieux comprendre l’idée générale et les détails de ce mécanisme, relisons les mots d’Istakhri :

---

[96]- Istakhri, *Al Massâlek et Al-Mamâlek*, Edition Brill, Leyden,1870, p.242

[97]- Ibn Ḥawqal, *Sourat Al-Arz*, Edition d’Hayat, Beyrout, 1992, pp.350-351

« Quand le nuage de sable se rapproche de la ville, les gens se réunissent et construisent un mur de bois autour du sable mais plus haut que le nuage. Ils gardent des ouvertures au-dessous du mur où le vent entre, prend le sable, le ramène jusqu'en haut du mur, le fait sortir et tomber dans un lieu où il n'y a aucune perte pour eux. »[98]

Ibn Ḥawqal également dit :

« J'ai entendu dire que lorsqu'ils veulent déplacer le sable d'un point à l'autre sans que le sable ne se répande sur des terres périphériques, ils installent des murs de bois à proximité des nuages de sable et font une ouverture en dessous de ces murs. Le vent entre par cette ouverture et transporte le sable vers le ciel comme une tornade. Ainsi, les gens peuvent déplacer le vent là où ils le souhaitent. »[99]

Figure 3-43 : Simulation de la technique d'installation de murs en bois contre le sens du vent pour déplacer les amas de sable.

Quelques remarques sur le dessin d'Al-Dimashqi

Si nous analysons les écrits de Al-Dimashqi, il semblerait que le moulin qu'il décrit ne soit pas exactement celui qui était utilisé au Sistan.

Le mécanisme décrit par le géographe a quatre ouvertures, sur les quatre côtés, vers les quatre directions, ce qui permet au moulin à vent de bénéficier des vents soufflant dans toutes les directions. Selon lui donc, sur le territoire du Sistan, le vent souffle dans quatre

---

[98]- **(per) FARCHAD, Mehdi**., « *L'histoire d'ingénierie en Iran* », Edition Balkh liée à la fondation de Neyshabur, Téhéran, 1997, p.99

[99]- Ibid.

directions. C'est pour cela que les bâtisseurs font quatre ouvertures dans quatre directions. Or nous savons sans doute depuis longtemps qu'au Sistan le vent vient seulement du nord et du nord-ouest. Tous les moulins à vent qu'il nous reste sur le territoire du Sistan sont d'ailleurs orientés dans cette direction. Comment donc le premier type de moulin à vent au Sistan pourrait-il avoir quatre ouvertures tournées vers les quatre directions alors qu'aucun vent important ne vient d'une autre direction que le nord ? (figure 3-44)

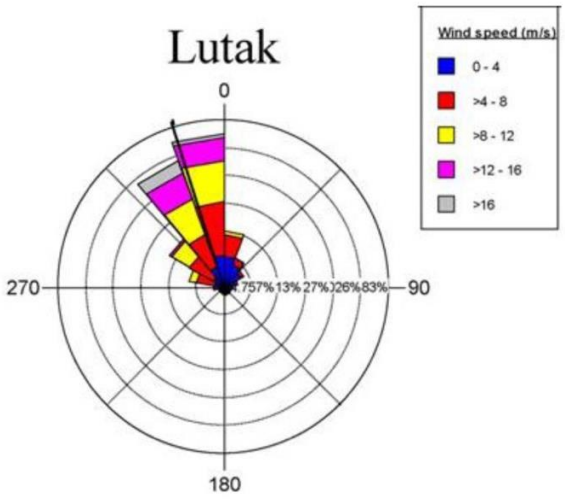


Figure 3-44 : Rose des vents de la région du Loutak, où il existe encore six moulins à vent du Sistan appartenant au dernier type. Source : Organisation météorologique de la Province du Sistan et Baloutchistan.

Nous pensons que le dessin d'Al-Dimashqi et sa description détaillée du mécanisme de cette invention ont appartenu à un type de moulin à vent venant du Sistan mais qui s'est adapté à la situation climatique de pays d'accueil comme la Syrie, où ce géographe en a vu un exemple de près. La moindre puissance du vent et l'absence d'un vent majeur expliquent que ce type de moulin à vent se soit imposé, s'adaptant ainsi aux vents moins forts soufflant de directions différentes. C'est également pour cela que l'installation du moulin sur des points en altitude – collines et tours – était prévue par les bâtisseurs. Nous avons dit que, dans l'Antiquité, on ne connaissait pas de territoire où le vent était aussi puissant qu'au Sistan et où il pouvait faire tourner un tel moulin à vent. Le moulin venant du Sistan connut donc une série de modifications, surtout dans sa morphologie, afin de pouvoir tourner avec des vents moins forts soufflant de directions différentes. Cette illustration ne pouvait donc sûrement pas représenter un moulin à vent utilisé au Sistan.

En revanche, grâce à cette illustration, on a bien compris que, probablement, tous les types de moulins à vent à axe vertical jusqu'à cette date furent construits sur le même principe, avec une meule dans la structure supérieure et une roue éolienne dans la partie inférieure. Il faut attendre le XVI^{e} siècle et l'arrivée de la dynastie des Séfévides pour voir le type évolué du moulin à vent à axe vertical.

Diffusion de moulin à vent

L'utilisation du premier type de moulin à vent au Sistan et sur les territoires périphériques du plateau iranien s'est certainement prolongée jusqu'au XIII^{e} siècle et l'invasion mongole. Mais le processus d'expansion du premier type de moulin à vent à axe vertical en dehors du Sistan demeure obscur à cause de son efficacité et de son potentiel limité, mais l'illustration d'Al-Dimashqi a pu être utilisée par certains historiens comme une preuve justifiant l'existence de ce type du moulin à vent dans les régions périphériques de l'Iran. Hanse Wolf mentionne également l'existence de ce type de moulin en Afghanistan jusqu'en 1952[100]. N'oublions pas que même Pirouz, le charpentier iranien qui fut arrêté par les Arabes et qui avait promis de construire un moulin à vent pour le deuxième calife de Médine, n'avait pas réussi à tenir sa promesse. Cet échec était probablement dû à l'impossibilité de faire fonctionner ce type de moulin dans le désert d'Arabie saoudite puisque le mécanisme ne peut tourner qu'avec le vent fort qui souffle au Sistan. Autre explication possible ; Appareil à double fonction, le moulin à vent pouvait aider les Arabes dans leurs conquêtes mais aussi dans la vie civile. Le moulin à vent aurait alors eu un rôle important dans la société arabe. Or, à l'époque, les Arabes étaient considérés comme les envahisseurs des territoires iraniens. Il n'est donc pas impossible que Pirouz ait refusé de bâtir de moulin à vent pour le calife arabe, car le chef militaire iranien Hormozân (qui fut pris au cours de la bataille de Nahavand, comme Pirouz) l'avait persuadé que cette invention persane serait probablement utilisée à des fins militaires lors de prochaines guerres menées par les musulmans.

Avec la découverte de vestiges archéologiques au Sistan et surtout de puits pour l'irrigation avec roue éolienne, dont la date remonterait, selon Reza Mehrafarin, au II^{e}-III^{e} siècle, on peut dater l'apparition du moulin à vent à axe verticale de genre Iranien au II^{e} siècle, entre la chute de la dynastie arsacide et l'arrivée de la dynastie sassanide.

---

[100]- **(per) WOLF, Hanse**. 2006, p.257

Le moulin à vent à axe vertical s'est rapidement répandu dans le monde arabe. Wolf écrit par exemple : « En Egypte, le mécanisme principal qui était utilisé pour moudre la canne était le moulin à vent. Au XI^{e} siècle, le moulin à vent fut diffusé jusqu'aux îles de la Mer Egée, en Espagne et au Portugal. Il avait encore le voile, mais l'axe de la pale avait déjà été modifié d'un angle de 30° par rapport à la ligne d'horizon »[101]. Il ajoute que la modification de l'angle de l'axe de la roue éolienne qui sera finalement de 0° par rapport à la ligne d'horizon est utilisé par certains historiens pour dire que le moulin à vent de type européen est une invention indépendante du moulin à vent à axe vertical iranien et qu'il n'y a donc pas de lien entre ces deux types principaux de moulins à vent.

L'historien anglais Edward Kealey fait partie des spécialistes qui avancent cette thèse. Dans *Harvesting the Air*[102] , il dit : « La technologie du moulin à vent est une technologie indigène de l'Europe, originaire du sud de l'Angleterre ». Il poursuit : « Il est probable que le "post mill" soit pré daté de l'an 1000 en Normandie ». Il explique ensuite que ce mécanisme est techniquement unique et qu'il n'a aucun lien avec le moulin à vent persan. Il ajoute : « Cette machine est donc une invention européenne et non pas orientale »[103]. Hanse Wolf pense que le raisonnement présenté par certains spécialistes comme Kealey n'est pas très convaincant. Selon lui, il est au contraire probable que les meuniers européens, qui avaient une connaissance suffisante du mécanisme du moulin à eau de Vitruve, aient remplacé la roue à eau par une roue éolienne. Cela veut dire qu'ils avaient adapté les principes du moulin à eau de Vitruve. Cette adaptation leur donna deux avantages. Le premier : l'adaptation du mécanisme du moulin de Vitruve avec la pale horizontale et le second : l'accélération de la vitesse de la meule grâce au changement appliqué de nouvelle proportion des roues dans le mécanisme du moulin à eau de Vitruve. Par conséquent, en regardant la longue histoire de la création et de l'évolution du moulin à vent, ce raisonnement s'appuie sur de solides preuves.

Au XIII^{e} siècle, la technologie du moulin à vent vertical et de la roue éolienne pour l'irrigation est rapportée en Chine par des Mongols. Les roues éoliennes pour l'irrigation existent encore sur la côte est de la Chine, au nord du fleuve Yang-tsé, ainsi que dans la

---

[101]- **WOLF Hanse**, 2006, p257

[102]- **(en)KEALEY, Edward J.** "*Harvesting the Air: Windmill Pioneers in Twelfth Century England*", University of California Press, 1992, 320 p

[103]- **(en) GIPE, Paul**. « *Wind Energy Comes of Age* », John Wiley & sons, New York, 1995, p 118-119

région de Thangku et Taku, à proximité de Tientsin[104]. Elle font fonctionner des chaînes de pompes à engrenage pour soulever de l'eau salée pour les marais salants ou de l'eau douce pour l'irrigation. Selon Needham, vers l'année 1230, Yehlu Ch hu-Tsai fut arrêté par Gengis Khan et devint son ministre. C'était un savant, un administrateur et un mathématicien ; dans ses mémoires figure une description précise du moulin à vent persan avec un commentaire qui montre son intérêt pour l'utilisation de cet outil en Chine[105].

Dans son ouvrage Histoire générale des techniques, Maurice Daumas pense que le premier moulin à vent de type européen (à axe horizontal) a eu lieu au X^{e} siècle en Espagne : « En Espagne, des moulins à vent auraient tourné dans la région de Tarragone dès le X^{e} siècle » [106]. Selon Hanse Wolf, le moulin à vent fut donc introduit en Europe *via* l'Espagne, ceci grâce aux Arabes, et c'est dans un décret gouvernemental que nous constatons pour la première fois la trace de ce moulin à vent au nord de l'Europe. Selon ce décret, qui date de 1105, la région d'Arles, en France, imposait les moulins à vent à 5 % alors que les moulins à eau ne payaient que 3 % d'impôts (apparemment à cause de leur rendement plus bas par rapport aux moulins à vent). La présence d'un moulin à vent en Normandie française est rapportée en 1180[107]. En Angleterre, on en a relevé plusieurs également à toute fin du XII^{e} siècle. L'ouvrage *The Windmill Psalter,* écrit en 1270 à Canterbury, présente la première illustration d'un moulin à vent de type européen[108], le post mill. En Belgique, les premiers exemples de moulins à vent datent de la même époque. Pour Daumas, cela prouve que « c'est réellement à cette époque que ce nouvel instrument a fait son apparition ». La diffusion du moulin à vent à axe horizontal au Proche-Orient n'a pas pris beaucoup de temps. Selon Edward J. Kealey, « les Croisés rapportèrent le moulin à vent de type européen en Terre sainte en 1191 ; les historiens pensent que ce sont les Croisés germaniques qui construisirent le premier moulin à vent en Syrie au cours de la troisième croisade»[109] (figure 3-45).

---

[104]- **HILL, Richard Leslie**. 1994, p15

[105]- **HILL Richard Leslie**, 1994, p14

[106]- **DUMAS Maurice**, « *Histoire Générale des Techniques* », Presse universitaire de France, Paris, 1962. p 470

[107]- **(en) GIPE, Paul,** *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & sons, New York, 1995. p118

[108]- **WOLF Hanse**, 2006, p258

[109]- **GIPE Paul**, 1995, p 118-119

Dans les années 1190, le pape célestin III tenta de prélever un impôt sur les moulins à vent, preuve de leur prolifération [110]. Au XIII^{e} siècle, le moulin à vent a gagné la Hollande, le Danemark et la Bohême ; au XIV^{e} siècle, il est arrivé en Pologne et en Suède. L'expansion du moulin à vent fut d'ailleurs au milieu du XIV^{e} siècle encore tout à fait relative : il ne semble prendre son véritable essor qu'au XV^{e} siècle. Au cours de ces siècles, circulaient également certains dessins ou mécanismes de moulins à vent à axe vertical, un type de moulin qui, en Europe, n'était pas autant répandu que le moulin à vent à axe horizontal, principal type de moulin en service.

Figure 3-45 : moulin à vent européen à axe horizontal installé dans un parc à Jérusalem, Source : Musa Sorour[111].

Trois hypothèses existants sur la diffusion de moulin à vent en Europe

Comme nous l'avons vu ci-dessus, au moins trois hypothèses importantes sont avancées pour essayer d'expliquer comment est apparu le moulin à vent en Europe :

- Hanse Wolf défend l'idée que le moulin à vent à axe vertical de type persan s'est diffusé d'Egypte aux îles de la mer Egée avant d'arriver en Espagne et au Portugal vers le XI^{e} siècle. Selon lui, au cours de ce trajet, l'axe de la pale a été modifié d'un angle de 30° par rapport à la ligne d'horizon, ce qui arrive finalement à 0° par rapport à la ligne d'horizon. C'est donc ainsi que le moulin à vent à axe horizontal européen a vu le jour.

[110]- **WHITE Lynn**, 1980, p51

[111]- **Musa Sroor**, directeur du Département d'histoire et d'archéologie et responsable de la formation en histoire du Master de l'Université de Birzeit à Ramallah au Palestine.

Cette hypothèse sur la diffusion du moulin à vent à axe vertical sur la côte orientale de la mer Méditerranée puis en Egypte et sur les îles de la mer Egée nous semble très sérieuse. Mais elle n'explique pas comment l'angle de l'axe du moulin à vent a été changé et elle ne décrit pas le mécanisme technique lié à ce changement. Selon le dessin d'Al-Dimashqi, jusqu'au XIII^{e} siècle, la roue éolienne de ce moulin à vent était installée au-dessus de la chambre de la meule ; le changement d'angle de cet axe à 30° et 0° nous semble donc très difficile voire impossible. Ce dessin montre bien en plus qu'il y a eu des modifications sur ce type de moulin par rapport au type d'origine au Sistan, mais ces modifications ont plutôt concerné la forme architecturale du moulin à vent et non son mécanisme technique. Nous pensons que Wolf a décrit un chemin probable de diffusion du moulin à vent vers l'Europe mais n'a pas réussi à montrer comment apparaît le moulin à vent à axe horizontal à partir du moulin à axe vertical.

- Une autre hypothèse est présentée par Maurice Dumas et Lynn White. Ces derniers défendent la thèse selon laquelle le moulin à vent à axe vertical apporté par les Arabes se diffusa en Europe depuis l'Espagne. Dumas précise que la région de Tarragone, près de Barcelone, aurait accueilli les premiers moulins à vent, qui auraient tourné dès le X^{e} siècle. La diffusion des moulins à vent en Europe depuis l'Espagne et le Portugal est possible mais aucune preuve tangible n'a été trouvée, ni sur le terrain, ni dans les documents anciens. Le rapport de 1105 concernant l'impôt sur les moulins à vent dans la région d'Arles, dans le sud de la France, peut faire penser que les premiers moulins à vent européens tournèrent sur la côte méditerranéenne bordant l'Espagne. Mais cette hypothèse laisse sans réponse d'autres questions d'ordre historique et social. N'oublions pas que la première mention d'un moulin à vent à axe horizontal apparaît en 1180 en Normandie. Pour expliquer l'apparition du moulin à vent à axe horizontal en Europe il faudrait une hypothèse plus cohérente et fondée sur de solides preuves historiques et techniques.
- Edward Kealey défend la thèse selon laquelle le moulin à vent à axe horizontal est une invention européenne et plutôt anglaise. Pour lui, il s'agirait d'une invention complètement indépendante de celle du moulin à vent à axe vertical persan. Le « postmill » serait prédaté d'au moins un siècle avant les moulins à vent de Normandie. Mais il n'explique pas pourquoi et comment cette invention est apparue sur le sol anglais alors que la roue de Vitruve et les besoins du secteur agricole pour cette machine existaient depuis les Romains. Pour étayer son hypothèse, il cite une série de documents

remontant au XII[e] siècle en Angleterre, mais son travail souffre, nous semble-t-il, d'un manque de preuves d'ordre historique, technique et social. Richard L. Hill, autre historien anglais qui a travaillé sur le sujet, défend la même thèse. Il écrit : « Avec l'apparition du premier moulin à vent en Angleterre vers l'année 1150, il ne semble pas que le moulin à vent à axe vertical persan ait eu une influence directe sur le moulin à vent occidental, simplement parce qu'il avait besoin d'un vent plus fort pour tourner »[112]. Mais Hill non plus ne présente aucune preuve pour expliquer l'apparition de ce type de moulin à vent sur le sol anglais.

Ces hypothèses sur la diffusion du moulin à vent à axe vertical hors de son territoire natal et l'apparition du moulin à vent à axe horizontal en Europe ont été formulées aujourd'hui. Mis à part l'hypothèse présentée par les historiens anglais, les autres avancent l'idée d'un chemin de transmission démarrant en Iran et aboutissant en Normandie en passant par la Syrie, l'Egypte, les iles de la mer Egée et l'Espagne. Ces hypothèses semblent plus sérieuses que celle soutenant que le mécanisme est apparu du côté anglais de la Manche, indépendamment du moulin à vent à axe vertical persan. Mais elles souffrent d'un manque d'arguments clairs et documentés sur la diffusion du moulin à vent des côtes de la Méditerranée vers la Normandie et, de ce fait, manquent de solidité. C'est peut-être à cause de ce manque de solidité que les historiens anglais ont présenté une hypothèse alternative sur l'origine du moulin à vent européen à axe horizontal. Nous soutenons ici en partie l'hypothèse d'historiens comme Wolf et Dumas sur la diffusion du moulin à vent hors du plateau iranien. Mais pour mieux comprendre comment cette invention clé de l'époque s'est diffusée, il nous faut une hypothèse qui puisse expliquer clairement comment s'est noué le lien entre la côte méditerranéenne et la côte normande en concernant également la citation d'autres historiens comme Wolf et Dumas. Avant de présenter notre hypothèse il nous faut revenir sur une question importante, à laquelle les historiens n'ont pas toujours prêté attention : le rôle capital du moulin à vent dans les rivalités de pouvoir entre les puissances d'antan. Nous pensons que cela peut nous aider dans notre recherche sur la diffusion du savoir-faire du moulin à vent de l'Iran vers l'Europe.

---

[112]- **HILL Richard Leslie**, 1994, p?

Moulin a vent et le Royaume de Sicile

Nous défendons la thèse selon laquelle le savoir-faire du moulin à vent à axe vertical persan est arrivé en Normandie via le Royaume de Sicile fondé par Roger II. Ce royaume vit le jour après plusieurs incursions de Normands dans la région. Notre étude concernant ce chemin de diffusion s'appuie sur l'ouvrage du géographe arabe Al-Idrisi (1099-1166). Ce dernier vivait en Sicile sous le règne de Roger II. Son livre *Nuzhatul-Mushtaq* nous donne des indications géographiques et sociales très intéressantes sur la situation de la Sicile au XII^{e} siècle.

La période située entre 1050-1200 est considérée comme « une période de transition dans l'histoire européenne et germanique »[113]. Comme nous l'avons indiqué précédemment, connaître l'histoire de l'Europe à cette époque est essentiel pour comprendre comment la dynamique du pouvoir a influé sur la situation socio-économique, religieuse et scientifique du continent. Les conflits entre musulmans et chrétiens, les enjeux entre l'empire et le Pape qui passaient sur la scène politique de l'Europe sont les plus remarquables :

« De perspective européenne nous pouvons adresser au développement de communes urbaines, le schisme entre les églises orientales, occidentales et les croisés et surtout le développement des universités[114]. »

L'Islam conquiert le monde chrétien et gréco-romain peu après la mort de Mahomet. Sous les Omeyyades, l'expansion de l'Islam se poursuit, les conquêtes territoriales s'étendent très vite à l'Afrique de Nord à la fin du VII^{e} siècle et au sud de l'Espagne au début du VIII^{e} siècle.

« Sous les Romains et les Byzantins, la Sicile n'était qu'une province périphérique, une province qui produisait essentiellement du blé. Au cours du IX^{e} siècle, la Sicile fut conquise par une dynastie arabe, les Aghlabides, qui régnait en Ifriqiya − aujourd'hui la Tunisie. En théorie, elle était vassale du calife de Bagdad ; en pratique, elle était indépendante. Au X^{e} siècle, les Aghlabides furent renversés par les Fatimides chiites, qui fondèrent en 916 la ville de Mahdia (al-Mahdiyya) sur la côte, au sud de Monastir. Après la conquête de l'Égypte en 969 et le transfert du gouvernement dans la nouvelle cité du

---

[113]- **(en) HOUBEN Hubert**, *Roger II of Sicily, A Ruler between Est and West*, Cambridge University Press, 2002, p1

[114]- *ibid*

Caire en 973, l'Ifriqiya et la Sicile furent gouvernées par des gouverneurs fatimides (émirs). L'émirat de Sicile devint héréditaire avec l'émergence de la dynastie des Kalbites, installée à Palerme. Sous les dynasties arabes de Sicile, la production agricole s'intensifia et de nouvelles méthodes furent introduites : terrasses et fossés pour l'irrigation, amincissement de la terre (thinning of the soil) et changement dans la rotation des cultures. En plus du blé, furent cultivés du riz, du coton, du papyrus, des agrumes, des dattes et de la canne à sucre. La production de soie et de coton se développa grâce à des travailleurs expérimentés. L'ile dans laquelle les Arabes musulmans et les Berbères vivaient aux côtés des Juifs et des Chrétiens devint un centre du commerce méditerranéen aux X^{e} et XI^{e} siècles. Les 200 années de souveraineté arabe eurent des conséquences profondes sur la composition ethnique et religieuse de la population. La diffusion de l'islam se fit *via* l'assimilation culturelle. Les taxes supplémentaires qui pesaient sur les non musulmans n'étaient pas très lourdes mais suffisamment élevées pour encourager les couches les plus pauvres de la société à se convertir à l'Islam. Apparemment, il n'y eut pas d'immigration massive des Arabes : les Arabes et les Berbères constituaient seulement la classe dirigeante… [115]»

A partir du XI^{e} siècle, le christianisme occidental contre-attaque l'Islam. Les chrétiens reprennent surtout le contrôle de la Méditerranée, des territoires qui avaient été conquis par les Arabes. Le rôle des Normands dans la nouvelle domination chrétienne en Europe occidentale est très important. Venus de Scandinavie, les Normands s'étaient installés en Normandie au X^{e} siècle. Ils furent largement assimilés par le franc-christianisme. Ils participèrent aux croisades et – point intéressant pour nous – installèrent un nouvel Etat en Italie du sud et en Sicile où les premiers Normands étaient arrivés vers l'an 1000 en revenant de pèlerinage à Jérusalem[116]. Ils conquirent par ailleurs l'Angleterre où ils s'installèrent durablement :

« Dans le même temps, ils conquirent l'Angleterre où un autre royaume normand vit le jour. Les circonstances qui permirent la création de ce royaume sont très différentes de celles au sud de l'Italie bien qu'il y ait certaines similitudes [117]. »

---

[115]- ibid pp.12,13

[116]- ibid p.8

[117]-ibid p.1

Il faut également évoquer la création de la Principauté d'Antioche par le Normand Bohemond en 1098, qui dura aussi longtemps que le plus connu royaume latin de Jérusalem[118]. D'autre part, sujet important du point de vue germanique, le Royaume de Sicile fut rattaché à l'empire romano-germain par les empereurs de la dynastie Staufen.

Après plusieurs incursions en Sicile entre les années 1060-1091, les Normands y fondèrent un Etat sous l'autorité de Roger I^{e} (1040-1101). Le souverain mit en place un comté en Calabre et en Sicile, ce qui lui permit de devenir un allié stratégique des Maisons régnantes d'Europe grâce à la situation géopolitique unique de son territoire, à la croisée des mondes musulmans et méditerranéens. Roger I^{er} passa d'un personnage aventureux à l'un des princes les plus respectés d'Europe.

« Vers la fin du XI^{e} siècle, Roger I^{er} était sans aucun doute le personnage le plus important des territoires du sud de l'Italie [119].»

Le successeur de Roger I^{er}, Roger II de Sicile (1095-1154) hérita de son père d'un patrimoine considérable. Royaume de Sicile du sud de l'Italie au début du XII^{e} siècle et son fondateur Roger II ont toujours été un sujet d'étude très intéressant pour les historiens européens. Comme Erich Caspar l'écrit dans sa monographie sur Roger II datée de l'année 1904, « Roger II était celui dont la Sicile déchirée par les conflits avait besoin»[120]. Cet historien allemand vit dans l'arrivée aux commandes de la monarchie normande sicilienne :

« Le spectacle historiquement attirant d'un pouvoir jeune et puissant, arrivant très vite au pouvoir : il émergea rapidement des décombres d'Etats décadents, conquit d'abord le territoire de ses voisins immédiats, fut confronté à des oppositions de plus en plus fortes, exerça une influence croissante sur un territoire encore plus vaste et affirma finalement son autorité après de dangereux combats contre un grand nombre d'ennemis. Cela le fit entrer dans le cercle des souverains « établis », il était en position de discuter d'égal à égal avec les autres puissances européennes [121]».

---

[118]- ibid p.2

[119] -ibid p.21

[120]- ibid p.2

[121]- ibid

Autre point important, Roger II avait des liens familiaux avec une puissante dynastie européenne :

« Conséquence du mariage de Henri VI avec Constance de Sicile en 1186, Roger II devint le grand père de Frederic II du coté maternel et, dans le même temps, de Frédéric I Barberousse du côté paternel. La monarchie fondée par Roger II est considérée par les spécialistes britanniques comme faisant partie d'un « Commonwealth » normand et par les Français comme un curieux chapitre de l'histoire de la noblesse française hors de France[122].

A la croisée des cultures latino-occidentale, byzantine orientale et islamique orientale, les Normands de Sicile intéressèrent un grand nombre d'historiens, de géographes et de chercheurs, dont al-Idrisi (1100-1065). Ce géographe arabe de l'époque de Roger II écrivit un livre très intéressant sur la Sicile de l'époque :

« C'est en 1139 qu'il s'installe à Palerme, appelé par Roger II, et entreprend un travail d'enquête et de compilation géographique qui va durer dix-huit ans. Selon lui, Palerme est vouée à prendre le relais de Bagdad et à devenir le pôle savant d'un monde arabe sans frontière. C'est donc naturellement en arabe qu'al-Idrisi écrira son livre, à la gloire de Roger, souverain sage et serviteur du savoir. Il commence la rédaction proprement dite en 1154, six mois avant la mort du roi. Le Livre sera achevé sous Guillaume I, probablement vers 1157. Il serait mort vers 1165[123] »

Figure 3-46 : Statue d'Al-Idrisi à Ceuta, en Espagne.

[122]- ibid

[123]- La géographie d'al-Idrisi, dossier BNF, dernier consultation 26/03/2014: http://classes.bnf.fr/idrisi/

Figure 3-47 : Universite de Yale[124].

Dans son fameux livre *Nuzhat al-mushtaq fî ikhtiraq al-âfâq* (Divertissement pour qui désire parcourir les différentes parties du monde), il écrit : « à Calatubo près d'Erice à l'extrémité sud-ouest de l'île, il existe une carrière d'où l'on extrait la pierre pour des moulins fonctionnant avec de l'eau et pour ceux que l'on appelle "persans" [125] » (figure 3-48).

[124]- http://findit.library.yale.edu/catalog/digcoll:177851

[125]- **MALANIMA Paolo**. *Pre-Modern European economy: one thousand years (10th-19th centuries)*. BRILL, 2009, p.75

ولنبتدأ حصن في أعلى حجر محدق به البحر والنهر ولا يدخل إليها إلا من باب واحد بشمالها وبها مرسى تسافر المراكب إليه وتحمل الأوساق منه وبها عمارة وسوق ولها عمل واسع وأرضها زكية المزارع ونهرها المنصب بحرها يسمى الوادي الملح وبه سمك طيب الطعم كثير شحم لذيذ المأكل ومن لنبتدأ إلى كركنت مرحلة وهي خمسة وعشرون ميلا. وكركنت مدينة متحضرة من أشرف الحواضر عابرة بالوارد والصادر قلعتها حصينة سامية ومدينتها حسنة زاهية قديمة العمران مشهورة في جميع البلدان بل هي من أعظم الحصون منعة وأجل البلاد رقعة يسعى إليها من سائر الآفاق ويجتمع بها السفن والرفاق ديارها سامية في الديار ومحلاتها تفتن النظار وبها أسواق جامعة لأصناف الصنائع وضروب المتاجر والمبائع و بها حدائق وجنات رائقات وأصناف كثيرة من الثمرات أزلية أولية تدل اثارها على سلطنة علية وتحمل كل ما وصل إليها من عظام السفن ما يتجاوز أوساقها في الأيام القلائل لاتساع ما بها من مواد الطوائل وبها جنات وغلات مشهورات وهي على ثلاثة أميال من البحر ومن كركنت إلى الشاقة مرحلة على البحر وهي خمسة وعشرون ميلا.

والشاقة بلدة على ساحل البحر مشرفة فرجة وبها عمارة وأسواق ودبار كثيرة وهي في هذا الزمان أم الأقاليم التي تليها والأعمال التي حولها ومرساها أبدا معمور والمسافر إليها من إفريقية واطرابلس أبدا كثير وعملها هو عمل قلعة البلوط.

وقلعة البلوط حصن منيع ومعقل شامخ عالي الذرى صعب الارتقاء ذو بواد شريفة خصيبة وضياع طيبة عجيبة وأصناف من الثمار غريبة وبها عيون وأودية عليها كثير من الأرحاء وكان بها خلق كثير تنقلوا في هذا الوقت إلى الشاقة ولم يبق بالحصن إلا رجال قلائل وهم يحرسونه عن يريده ومن هذه القلعة إلى البحر اثنا عشر ميلا ومنه إلى الشاقة تسعة أميال وكذلك من قلعة كركنت إلى قلعة البلوط مرحلة كبيرة ومن الشاقة إلى مازر مرحلتان خفيفتان وبينهما رحل كبير يعرف بالأصندام على البحر.

ومازر مدينة فاضلة شاخصة كاملة لا شبه لها ولا مثال في شرف المحل والحال إليها الإنتهاء في جمال الهيئة والبناء وما اجتمع فيها من المحاسن التي لم تجتمع في غيرها من المواطن وهي ذات أسوار حصينة شاهقة ودبار حسنة فائقة بها أزقة واسعة وشوارع وأسواق عامرة بالتجارات والصناتع وحمامات فاضلات وخانات واسعات وبساتين وجنات طيبات المزدرعات يسقر إليها من جميع الآفاق ويتجهز منها بوافرات الأوسق وإقليمها كثير الإتساع يشتمل على منازل جليلة وضياع وبأصل سورها الوادي المعروف بوادي المجنون توسق منه المراكب وتشتو فيه القوارب ومن مازر إلى مرسى علي ثمانية عشر ميلا.

مرسى علي كان مدينة قديمة أزلية من أشرف بلاد صقلية وكانت قد خربت ودمرت فعمرها القومس رجار الأول وسور عليها سورا فحصلت ذات عمارة وأسواق وجباية ولها إقليم واسع وعمل شاسع وسفر أهل بلاد إفريقية إليها كثير وشرب أهلها من آبار عذبة في ديارها مع مياه من العيون التي حولها ولها فنادق وحمامات وبساتين ومزارع طيبات ومنها إلى طرابنش مرحلة وهي ثلاثة وعشرون ميلا.

وطرابنش مدينة أزلية قديمة المحل على ساحل البحر والبحر يحدق بها من جميع جهاتها وإنما يسلك إليها على قنطرة على باب مشرقيها ومرساها بالجانب الجنوبي منها وهو مرسى ساكن غير متحرك يشتي به أكثر السفن في الشتاء آمنة من جميع الأنواء هاد موجه عند هيجان البحار ويصاد به من السمك ما يفوق المقدار ويصاد بها السمك الكبير أيضا المعروف بالثن بشباك كبار ويصاد بحرها المرجان السني وعلى بابها سباح الملح البحري ولها إقليم واسع الأجناب ممتد الأطناب أرضها من أكرم الأرضين في الزراعات كثيرة الفوائد والغلات وطرابنش في ذاتها ذات أسواق رحبية ومعائش خصيبة.

وبقربها جزيرة الراهب وجزيرة البلاسة وجزيرة مليطمة ولكل واحدة من هذه الجزائر مرسى وآبار ومحتطب وطرابنش يسافر إليها ومنها في أيام الشتاء لجودة مرساها واعتدال بحرها وهوائها.

ومن طرابنش إلى جبل حامد نحو من عشرة أميال وهو جبل عظيم شامخ الذروة عالي التهمة حصين منيع من الإرتقاء إليه وفي أعلاه أرض سهلة للزراعة ومياهه كثيرة وله حصن غير محروس ولا منظور إليه ومنه إلى الحمة عشرون ميلا. والحمة قلعة حصينة شاهقة متكوزة من أحسن القلاع والبحر بشمالها على ثلاثة أميال أو نحوها ولها مرسى بني عليه حصن يعرف بالمدارج والمراكب مارة به وراجعة إليه ويصاد به التن بالشباك وإنما سميت هذه القلعة بالحمة لأن فيها حمة حامية يخرج ماؤها من جرف قريب منها ويستحم الناس فيها وماؤها معتدل السخونة عذب رطب وبقربها أنهار وأودية عليها أرحاء و بها بساتين وجنات وأبنية ومتنزهات وكثير من الثمرات ولها عمل واسع ورباع طيبة المزارع وهي من طرابنش على مرحلة خفيفة.

ومن قلعة الحمة إلى قلعة أوبي عشرة أميال وهو حصن منيع وبلد فسيح له عمل واسع طيب المزارع كثير المنافع وبينه وبين البحر نحو أربعة أميال وله مرسى يسافر إليه ليوسق الطعام الكثير منه وكذلك يوسق منه سائر الحبوب وبه معدن تقطع منه أحجار الأرحاء المائية والفارسية وهذه الأقلعة من الحمة على عشرة أميال ومن قلعة أوبي إلى برطنيق اثنا عشر ميلا.

وبرطنيق بلدة جميلة وطيبة حسنة المنظر بهية وبها رباع زكية يعمل بها القطن الكثير والحناء وغير ذلك من أصناف القطاني وبها مياه غزيرة وعليها أرحاء كثيرة والحصن المنسوب إليها بمكان يعرف بجبان يطل عليها ولها مرسى يعرف بالركن وفي شمالها على نحو ميلين.

ومن برطنيق إلى شنس وهو منزل واسع بأكناف جبل مطل عليه وتليه أرض متسعة طيبة المنابت حسنة المراعي كثيرة الفواكه والبحر منها على شمالها على أربعة أميال أو نحوها.

ومن شنس إلى قربنش ثمانية أميال وهي بلدة طيبة جميلة حصينة وبها أصناف من الفواكه كثيرة وبها سوق كبيرة وأكثر ما بالحواضر من الأسواق والحمامات والديار الواسعات ومنها يحمل كثير من اللوز واللين الناشف والخرنوب وتوسق به المراكب والقوارب ويتجهز به إلى كثير من البلاد ومياهها غزيرة متدفقة في كل ناحية حتى أن أكثرها بداخل الجنات وبها حصن محدث على ربوة مطلة على البلد والبحر منها بشمالها على نحو ميل منها ومنها إلى المدينة العظمى المسماة بلرم اثنا عشر ميلا.

فهذه خمسة وثلاثون بلدا على البحر خاصة و أما ما سوى ذلك من البلدان البرية فهي كثيرة بين حصون وقلاع ومحال وأصقاع وها نحن لها ذاكرون قلعة قلعة وحصنا حصنا إن شاء الله.

وأول ذلك نبدأ بالخروج من المدينة إلى قصريانة في وسط الجزيرة.

وذلك أن من المدينة إلى منزل الأمير مع الشرق ستة أميال وهو معقل جليل وحصن حصين وله مياه وأرضون ومزارع كثيرة ومنه إلى الخزان ستة أميال وهو حصن في أعلى جبل من أجمل القلاع وأفضل البقاع وحالها أشرف حال وله عمارة وأرحال ومنه يخرج النهر المسمى وادي الأمير وأصله من الخزان فينزل مع الخنادق وتجتمع به مياه فجانة وتبقى فجانة شمالاً وبين فجانة وجلقة تسعة أميال وتجتمع المياه تحت مرناو وتبقى مرناو على اليمين وبينها وبين فجانة ميل ونصف ويتصل إلى تحت منزل الأمير وتبقى منزل الأمير شمالاً وبينها وبين الوادي ميل وبين مرناو ومنزل الأمير ستة أميال ومنه إلى البحر ميل كبير ومن الخزان إلى جلقة نصف مرحلة وهو نحو من عشرة أميال وكذلك من منزل الأمير إلى جلقة مثل ذلك من الأميال وهي مرحلة.

وجلقة بلد مليح وإقليم فسيح وعمل كبير وضياع ومنازل مياهها متدفقة وغدرانها مغدوقة ومزارعها واسعة وجهاتها شاسعة ومن الخزان إلى بيقوا خمسة عشر ميلا.

وبيقوا حصن عال ومعقل مغلق الإقفال له مياه جارية وحروث زاكية وبينه وبين وادي السلة النازل إلى ثمة ميل وله مزارع متصلة وخيرات مشتملة وحروث كثيرة ونعم وافرة ومن بيقوا إلى بثراثة تسعة أميال. وبثراثة حصن مانع وقلل رائع ممتنع الهجات له مزارع وغلات وأرض تتصل عمارتها ببيقوا المتقدم ذكرها.

ومن الخزان إلى جاطوا نحو من خمسة عشر ميلا وحصن جاطوا عالي المكانة زائد الحصانة وإليه الإنتهاء في صحة المزارع وسعة الأرجاء وبه سجن مطبق يودع فيه من سخط الملك عليه وليس بهذا الحصن مياه جارية ولا حوله أنهار متدانية.

ومن جاطوا إلى طرزي تسعة أميال وهو حصن علم ومعقل أزلي القدم وثيق جدا وله مزارع وأرضه تتصل من جهة الشمال بأرض جاطوا وتتصل أرضه من جهة الجنوب بحصن قرليون وبينهما نحو من ثمانية أميال وبين قرليون وقلعة الطريق شمالاً تسعة أميال عربية وهي ثلاثة إفرنجية. وقرليون حصن حصين منيع ومعقل مشيد رفيع وله عمارات متصلة ويتصل به نهره المنسوب إليه ومن قرليون إلى راية ثمانية أميال عربية وكذلك بين قرليون وجاطوا خمسة أميال إفرنجية ومن قرليون إلى برزوا شرقا عشرة أميال.

وبرزوا حصن حسن البقعة شديد المنعة ذو ربض مسكون ومياه جارية وعيون ومزارع ممتدة الأطناب وخيرات متوفرة الإكتساب ومنه إلى قصر نوبو نحو من اثنتي عشر ميلا وكذلك من قصر نوبو إلى قرليون عشرون ميلا. وقصر نوبو محل حسن الجهات شامل المنافع والخيرات وله مزارع وغلات ومياه جاريات ومن قصر نوبو غربا إلى راية نحو عشرة أميال وكذلك من برزوا إلى راية عشرة أميال وكذلك من قرليون أيضا إلى راية ثمانية أميال فبرزوا شمالا وقصر بونو شرقا وقرليون غربا وراية جنوبا.

152

151

Figure 3-48 : Pages 151-152 du livre *Nuzhat al-mushtaq fî ikhtiraq al-âfâq* où al-Idrisi écrit sur un moulin qualifié de "persan".

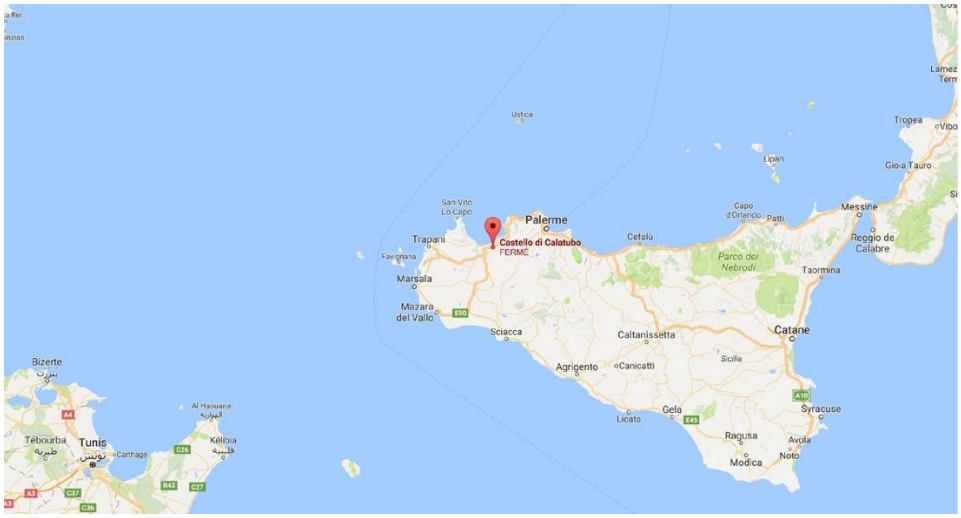


Figure 3-49 : Position probable de la ville de Calatubo, en Sicile actuelle.

Jusque là, le seul moulin connu sous le nom de moulin persan était le moulin à vent à axe vertical. Le rapport d'al-Idrisi sur l'existence de moulins persans vers l'année 1156-1157 en Sicile est un élément de preuve très intéressant qui peut être pris en compte pour retracer l'histoire de la diffusion du moulin à vent iranien en Europe et pour résoudre la question de l'apparition d'un nouveau type de moulin à vent, à axe horizontal. Compte tenu du dynamisme des Normands en Europe et au Proche-Orient au XII^{e} siècle et surtout

du rôle d'intermédiaire joué par le Royaume de Sicile parmi les grandes puissances européennes de l'époque, nous pouvons avancer une hypothèse alternative sur l'apparition du premier moulin à vent à axe horizontal en Europe

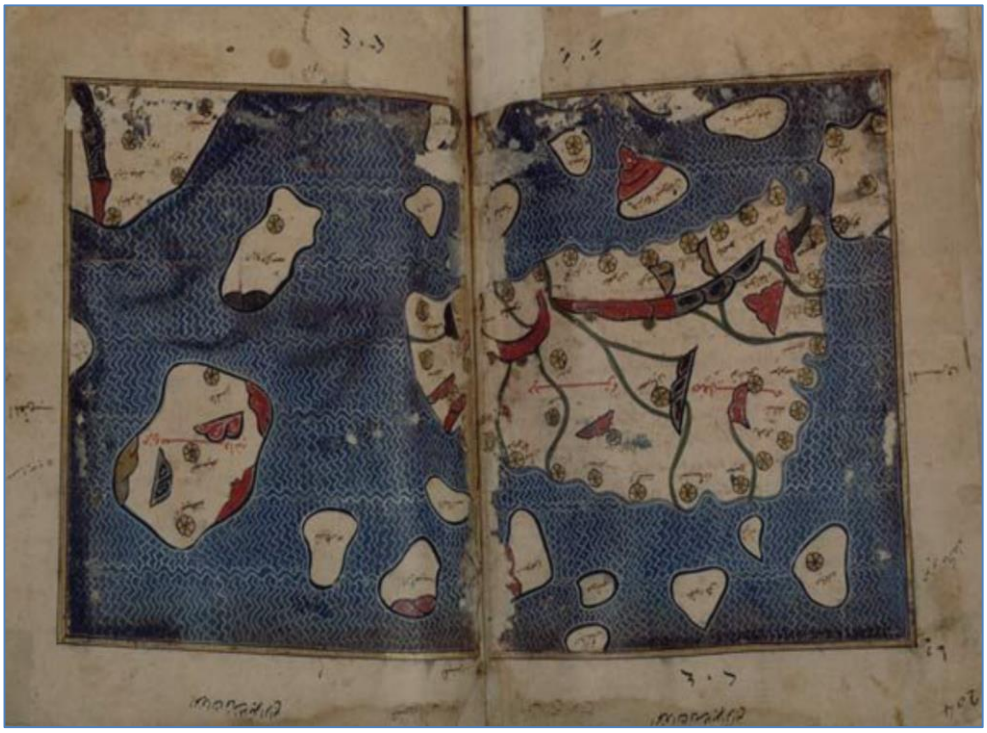


Figure 3-50 : îles de la Méditerranée (4e climat 2e section), Source : Al-Idrîsî, dossier BNF[126].

Figure 3-51 : îles de la Méditerranée (4e climat 2e section), Source : Al-Idrîsî, dossier BNF[127].

[126]- Copie maghrébine du début XIVe siècle, manuscrit sur papier, 352 feuillets, 26 x 21 cm, BNF.

[127]- Copie maghrébine du début XIVe siècle, manuscrit sur papier, 352 feuillets, 26 x 21 cm, BNF.

Figure 3-52 : Carte sur le monde (4e climat 2e section), Source : Al-Idrîsî, dossier BNF[128].

Une hypothèse probable sur l'apparition du moulin à vent en europe

Comme nous l'avons expliqué précédemment, les historiens Edward Kealey et Richard L. Hill défendent la thèse selon laquelle le moulin à vent européen à axe horizontal est une invention européenne. De même, pour l'historien Michael Harveson, il n'y a aucune preuve que le moulin à vent persan soit à l'origine du moulin à vent européen Au contraire, des historiens comme Hanse Wolf, Maurice Dumas et Lynn White avancent l'hypothèse d'une transmission transméditerranéenne du moulin à vent, qui serait ensuite arrivé dans le nord de la France *via* l'Espagne. Cette dernière hypothèse s'appuie sur plusieurs documents et preuves solides, dont le croquis de Al-Dimashqi, l'un des témoignages historiques les plus connus. Mais l'hypothèse de ces historiens comporte aussi des points obscurs, qui font peser le doute sur la cohérence théorique de leur démonstration. Il manque notamment des informations sur le parcours du savoir-faire du moulin à vent en Europe et sur la proximité des dates d'apparition du premier moulin à vent européen à axe horizontal en Normandie française, en Angleterre et au Proche-Orient. Et surtout il manque des documents techniques et architecturaux sur le type persan à axe vertical et sur le type européen à axe horizontal.

Nous défendons la thèse selon laquelle la diffusion transméditerranéenne du moulin à vent à axe vertical bâti selon les mêmes concepts qu'au Sistan s'est certainement étendue jusqu'en Sicile. Et très probablement jusqu'en Espagne, grâce aux conquêtes arabes,

[128]- Copie maghrébine du début XIVe siècle, manuscrit sur papier, 352 feuillets, 26 x 21 cm, BNF.

même si malgré nos recherches sur place à Tarragone nous n'avons pas de preuve pour étayer cette dernière hypothèse.

Le livre d'al-Idrisi atteste de la présence du moulin à vent au XII^{e} siècle dans le Royaume normand de Sicile. En nous appuyant sur le livre du géographe arabe du XIII^{e} siècle Al-Dimashqi, dans lequel figure le croquis d'un moulin à vent à axe vertical persan, nous avançons l'idée que le type de moulin à vent qui s'est diffusé sur la côté méditerranéenne était probablement très proche du type à axe vertical. Comme nous l'avons montré précédemment, le dessin d'Al-Dimashqi présente vraisemblablement un modèle modifié du moulin à vent de type Sistan qui fut diffusé hors du plateau iranien et adapté aux vents moins puissants des côtes de la Méditerranée. Selon nous, il est possible que le type de moulin local existant en Méditerranée à cette époque ait été celui dessiné par Al-Dimashqi. Selon nous également, ce moulin pouvait exister en Sicile au XII^{e} siècle.

Nous sommes d'accord avec l'hypothèse avancée par Hanse Wolf et Maurice Dumas sur la diffusion transméditerranéenne du moulin à vent. Mais ensuite nos points de vue divergent. Nous pensons que c'est la Sicile et les Normands qui ont joué le rôle principal dans la diffusion du moulin à vent dans le nord de l'Europe. Nous défendons la thèse selon laquelle les Normands apportèrent le savoir-faire du moulin à vent à axe vertical en Normandie et en Angleterre. Nous avons raconté l'histoire de l'arrivée du savoir-faire du moulin à vent persan dans la péninsule arabique à l'époque de la conquête musulmane, et l'enthousiasme du calife Omar, pour cette technologie. Le moulin à vent pouvait être utilisé dans le secteur agricole et surtout dans le domaine militaire, pour de futures conquêtes. Pour nous, le transfert immédiat du savoir-faire du moulin à vent dans les territoires où les Normands avaient de l'influence comme la Normandie, l'Angleterre et Antioche s'est d'abord fait pour des raisons agricoles puis pour des raisons de stratégie militaire. Avec les Normands, nous pouvons expliquer la proximité des dates d'apparition du moulin à vent européen à axe vertical en Normandie en 1180, en Angleterre vers 1150 et en Syrie et en Israël en 1190. En effet, comme nous l'avons expliqué, les Normands étaient à l'origine ou avaient participé au pouvoir dans différents pays, en Angleterre, en Normandie et même dans la Principauté d'Antioche. La participation des Normands et des croisés germaniques à la première croisade (entre 1096 et 1099) explique l'arrivée du moulin à vent sur les champs de bataille contre les musulmans. Mais ce type de moulin diffusé dans le nord de l'Europe et au Proche-Orient

était le type européen à axe horizontal. Selon nous, à cause de la moindre puissance du vent sur les côtes nord de l'Europe par rapport au bassin méditerranéen et surtout au Sistan, il est très probable que le concept apporté en Sicile n'ait pas bien fonctionné sauf que l'axe de la roue éolienne tourne suffisamment vers la ligne d'horizon afin de retrouver le vent maximum.

Le besoin urgent d'utiliser cette machine et l'esprit qui encourageait à adapter les technologies importées au climat local et à la situation du territoire d'accueil a poussé les techniciens du nord de l'Europe à trouver une solution. Selon nous, ces derniers ont ainsi modifié un système déjà connu, le moulin à eau de Vitruve, afin de l'équiper d'une roue éolienne qu'ils ont installé à la place de la roue à eau. Très simplement donc, l'arrivée du concept de moulin à vent persan au nord de l'Europe et le problème d'adaptation de ce mécanisme à la situation climatique a donné naissance à un nouveau type de moulin à vent dont le fonctionnement était basé sur le mécanisme du moulin à eau de Vitruve. Ce moulin peut également être considéré comme une nouvelle invention.

Ce mécanisme s'est rapidement diffusé dans tous les territoires normands : en Angleterre, en Normandie et jusqu'à Antioche. Un peu plus tard, la technologie conquiert l'Europe : les Pays-Bas en 1190, l'Allemagne en 1222, le Danemark en 1259 et la Pologne au XIV^{e} siècle[129]. C'est une hypothèse qui aurait besoin d'être étayée par des recherches supplémentaires, et surtout des recherches dans les archives, mais elle est considérée comme un point de départ. C'est peut être une piste de recherche nécessaire sur une diffusion transméditerranéenne qu'on pourrait suivre dans un prochain travail de recherche.

Une nouvelle ère de l'application de moulin à vent à axe vertical en Iran et le destin d'une invention technique au plateau d'Iran

En 1501, Shah Ismail Safavi, fondateur de la dynastie séfévide, fut couronné à Tabriz. A partir de cette date, une nouvelle ère de développement débuta en Iran. De nouveau, une autorité forte, d'origine iranienne, qui se définissait par sa culture florissante, une religion officielle et une armée puissante voyait le jour au Moyen-Orient. Au cours cette période, les échanges commerciaux et les relations transfrontalières de l'Iran reprirent et ouvrirent de nouvelles portes vers l'Orient et l'Occident. Les séfévides n'étaient pas aussi

[129]- **(en) GIPE, Paul,** *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & sons, New York, 1995.p118

riche que les Mongols en Inde mais c'était la dynastie la plus riche qui soit parvenue au pouvoir depuis l'invasion mongole en Iran[130]. Pour plusieurs raisons, les Séfévides étaient les héritiers des traditions artistiques brillantes de la dynastie des Timourides (1405-1447) de Hérat, au Khorasan. Dans son ouvrage *Une nouvelle enquête sur l'art persan*[131]. Arthur Pope a bien montré la qualité du travail des métaux en Iran à l'époque séfévide. Grâce à la puissante autorité de cette dynastie et au développement économique du pays, une nouvelle ère de productivité agricole débuta au Sistan et le moulin à vent joua de nouveau un rôle important.

Ici on peut travailler sur deux pistes possibles : la première qui marche sur le développement économique et culturel à l'époque séfévide et l'apparition de nouveaux savoir-faire qui ont entrainé une correction importante du mécanisme du moulin à vent à axe vertical. Selon cette hypothèse, une modification de la morphologie de cette invention serait apparue au Sistan. Elle serait tellement révolutionnaire que c'est à partir de cette époque que l'on peut considérer le moulin à vent à axe vertical comme une invention indépendante de son ancêtre, le moulin à eau. La deuxième possibilité c'est l'évolution du moulin à vent de premier type de Sistan au Khorasan particulièrement sous la dynastie timouride de Hérat. Cette hypothèse s'appuie sur des exemples existants de moulins à vent à axe vertical à Hérat et Khafe, moulins qui disposaient d'un mécanisme plus avancé que le moulin à vent de premier type au Sistan mais moins développé que le moulin à vent de dernier type au Sistan. Cela veut dire que le changement concernant la chambre de la meule, qui était indispensable, n'a été effectué que sous la dynastie timuride au Khorasan grâce au développement artistique et technique de cette période, et à cause du manque du vent prospéré à la fonction de ce type du moulin à vent. Le besoin est donc le père d'invention (proverbe iranien). Avec cette hypothèse, on peut expliquer que le moulin à vent n'a pas disparu du Sistan, contrairement à la roue éolienne après la destruction du Sistan par Tamerlan au XIII^{e} siècle. Selon nous, comme le savoir-faire du moulin à vent fut apporté par Tamerlan et ses successeurs au Khorasan, ce mécanisme s'est reproduit et s'est même développé pour bien s'adapter au climat et au vent des territoires conquis. Après la dynastie timuride, il est revenu au Sistan, se présentant comme un nouveau mécanisme technique avec une nouvelle forme architectonique. Pour

---

[130]- **(per) SAVORY, Roger**. « *Iran under the Safavids* », Traduit en person par Kambiz Azizi, Edition Markaz, Téhéran, 2012, p.190

[131]- **(en) POPE, Arthur.** « *A New Survey Of Persian Art From Pre-Historic Times to the Present*», Edition Charles Scribner's Sons, New York, , 1931

cette hypothèse, nous disposons d'une indication qui peut être très utile, elle est donnée par Al-Idrisi dans son ouvrage *Nuzhat al-mushtaq fî ikhtiraq al-afaq* :

« … et cette rivière est la meilleur rivière de Soqd qui vient de Samarcande et les habitants de Boukhara disposent d'un grand nombre de moulins à vent et de jolies minarets et de beaux jardins avec des arbres fruitiers, et de vastes fermes… »

فيها من الصناع والفعلة والتجارات سواء ومن مدينة جاركان إلى مدينة القلعة مرحلة وهي مدينة عامرة منيعة في آخر الراشت مما يلي جبل الأتراك على جبل عال وهم من الأتراك متحذرون والراشت أقصى خراسان من ذلك الوجه وهي مدينة بين جبلين كان منها مدخل للترك إلى القارة فأغلق الفضل بن يحيى بن خالد بن برمك هناك باباً وجعل عليه من يحرسه ثم تداولت الملوك حراسته إلى الآن.

ومما يلي الوخش والختل وخان والشقينة في بلاد الترك وبين وخان والتبت ثمانية عشر يوماً وبوخان معادن الفضة التي لا نظير لها في الكثرة والطيب وفي أوديتها ذهب تبر يسيل مع الماء في وقت جري السيول فيجمعونه هناك ويخرجرنه إلى البلاد ويقع منا المسك والرقيق والشقينة مدينة من مدائن الأتراك الخرلخية وبينها وبين وخان خمسة أيام وهي تتاخم الوخش. وبجوار مدينة الصغانيان بلاد كثيرة عامرة فمنها مدينة باسند وبينهما مرحلتان وهي مدينة عامرة أقطارها زاهرة وعمارتها متصلة وخيراتها ومرافقها كثيرة ومن الصغانيان إلى بوراب مرحلة بين مشرق وجنوب وهي مدينة حسنة كثيرة التجارات والعمارات وأهلها مياسير وبها طرز وصناعات وبين بوراب وباسند مرحلة ومن الصغانيان أيضاً إلى ريكدشت ثلاثة أميال وهي مدينة صغيرة ومنها إلى زينور مرحلة شرقاً. ومن الترمذ أيضاً الطريق إلى بخارا وهي إحدى عشرة مرحلة وذلك أنك تخرج من الترمذ إلى هاشم جرد وهي مدينة صغيرة مرحلة ومنها إلى رباط دارنك ومنها إلى باب الحديد وهي مدينة صغيرة متحضرة ومن باب الحديد إلى كندك مرحلة وكندك مدينة صغيرة متحضرة شبيهة بباب الحديد في الصناتع والأعمال والمتصرفات ومنها إلى الديذكي مرحلة ومنها إلى سوبخ مرحلة وسوبخ أيضاً مدينة حسنة نبيلة المباني والأسواق محتوية على منافع ومن سوبخ إلى نسف مرحلة.

ومدينة نسف كبيرة في مستو من الأرض لها سور وربض كبير عامر يحيط به السور ولها أربعة أبواب وفي المدينة قهندز ليس بالحصين ولها بالربض مسجد جامع وأسواقها في الربض مجتمعة متصلة بين دار الإمارة والمسجد الجامع وليس لها كثير قرى ونواح والجبال منها على نحو مرحلتين شرقاً مما يلي كش ومنها في الجانب الغربي مفازة متصلة بنهر جيحون لا جبل فيها ولها نهر واحد يجري في وسط المدينة ودار الإمارة عليه ويتصل هذا النهر بها من كش فإذا خرج عن المدينة سقى الزارع منها وليس بنسف ورساتيقها ماء جار إلا هذا النهر وينقطع جريه في السنين المحيلة ولهم مياه نابعة جارية تسقي الكثير من بساتينهم ومباقلهم والغالب على مدينة نسف الخصب والسعة والخفض والدعة وبها يجتمع طريق سمرقند بهذه الطريق ولها منبران سوى المدينة ويسمى أحدهما بزدة والثاني كسبة وهما مدينتان صغيرتان عامرتان فيهما مساجد ومنابر وجماعات ومن مدينة نسف إلى مايمرغ مرحلة ومنه إلى ميانكال مرحلة ومنه إلى فراجون مرحلة وهي قرية عامرة ومنها إلى بخارا مرحلة.

والطريق أيضاً من آمل إلى النهر ثلاثة أميال فتعبر في المراكب إلى مدينة فرير في الضفة الشرقية من النهر وهي مدينة عامره حسنة المباني طريفة الشوارع والمسالك ولها زراعات وبساتين وهي في نفسها حصينة ومن فرير إلى مدينة بيكند مرحلة وهو متوسط الطريق إلى بخارا وهي مدينة متوسطة لها عمارات وسوق قائمة ومزارع وغلات ولها سور حصين ومسجد جامع مزخرف بنيانه وقبلته في تزخرفها وحسنها لا يعلم بناء مثلها وهي مدينة منفردة بذاتها ومن بيكند إلى بخارا مرحلة. وبخارا مدينة تشف على المدن كبرا وتزهي على المحاسن نظرا فرجة الأرجاء والجهات كثيرة الأشجار والثمرات وهي مدينة في مستو من الأرض وبناؤها خشب مشبك ويحيط بهذا البناء المشبك من القصور والبساتين والمحال والسكك المفترشة والقرى المتصلة ما يكون طوله ستة وثلاثين ميلا في مثلها ويحيط بها كلها سور يجمع هذه القصور والمساكن والمحال التي تعد من القصبة ويسكنها من يكون من أهل القصبة شتاءً وصيفاً وداخل هذا السور سور آخر يكون عرضه نحو ثلاثة أميال في مثلها وداخل هذا السور مدينة حسنة نحو ثلاثة أميال في مثلها وداخل هذا السور مدينة حسنة متقنة لها سور مجصص ولها قهندز خارج المدينة متصل بها ومقدار هذا القهندز يكون كالمدينة الصغيرة وفيه قلعة ومسكن حسن وقصور يروق الأبصار إطلاعها ويربع الألباب اختراعها وينزلها الولاة من ولد سامان لحسن مصانعها وغرائب اتقانها ووثاقة بنيانها ولمدينة بخارا ربض طويل عريض عامر الديار فسيح المجالات وأكثر أسواقها في هذا الربض وفيها مسجد جامع عديم المثال كثير الاحتفال وموضعه على باب القصبة في المدينة وبخارا من الخلائق ما لا يحصى لهم عدد ولا يحيط بهم خبر وجلة أهلها أملياء أغنياء مياسير أولو أموال طائلة وأحوال صالحة وتجارات واسعة ويشق ربضها نهر الصغد ويخترق أكثر أزقتها وشوارعها وأسواقها وهذا النهر هو فاضل نهر الصغد الجاني إليها من سمرقند ولأهل بخارا عليه طواحين ارحاء عدة وبضفتيه المنازه والبساتين والجنات والحدائق الملتفة الأشجار والمزارع الممتدة ويسقط فاضله في بركة كبيرة في ناحية بيكند وعلى قرب من فرير وتسمي هذه البركة بسامجن وللمدينة سبعة أبواب حديد ولبخارا رساتيق كثيرة وأعمال مشهورة وقرى جليلة وضياع وأكثرها بل كلها تحت الحائط الذي قدمنا ذكره وليس فيما يحيط به هذا الحائط من داخله جبل ولا مفازة ولا أرض غير عامرة وأقرب الجبال إليها جبل وركة وهو حجارة مصفحة ومنه يجلب إلى بخارا الحجر الكثير تفرش به سطوح الدور والشوارع وقد يجلب منه طين الأواني وأحجار الجص وقد يحرق ما صغر من حجره فيتخذ منه الجير للبنيان والسطوح وفي بخارا بساتين وجنات يأتي منها ألوان الفواكه التي لا يعدلها شيء من الفواكه. ولبخارا عدة مدن في داخل حائطها وفي خارجه فأما المدن التي في داخل الحائط فالطواويس وهي أكبر منبراً في هذه الناحية وبمجكث وزندنة ومغكان وخجادة وهذه كلها من داخل الحائط وأما المدن التي هي خارج الحائط فمنها بيكند وفربر وكرمينية وخديمكن وخرغانكث ومنيامجكث وأكبر هذه المدن المذكورة الطواويس وهي مدينة عامرة لها سوق في وقت من السنة معلوم ويقصد إليه الناس

124

Figure 3-53 : Page 124 de livre *Nuzhat al-mushtaq* écrit par Al-Idrisi

Comme Al-Idrisi écrit : à cette époque en XII^{e} siècle ils y avaient beaucoup de moulin à vent dans la ville de Boukhara, sachant que la fameuse ville de Boukhara est près de Samarkand une des capitales de la dynastie Timuride. Ces deux villes sont deux villes importantes de la grande province du Khorasan et si dans cette époque la technologie de moulin à vent est arrivé au Boukhara c'est possible à dire que même après la destruction de Sistan et l'abandon de savoir-faire de moulin à vent et la roue éolienne dans ce territoire, le mécanisme de moulin à vent a été protégé au Khorasan et a été développé

pendant des siècles prochaines. C'est le même mécanisme qui a été revenu au Sistan lorsque la situation de Sistan a été amélioré au période Safavide. Cela n'est pas arrivé pour la roue éolienne car le territoire chinois était très loin de l'Iran surtout que la chine n'était pas une extension culturelle et politique de l'Iran.

Selon nous, soit le deuxième type de moulin à vent apparu au Khorasan ou au Sistan cela a été fait entre les XII^{e} et XVI^{e} siècles et il constitue la base de tous les futurs types de moulins à vent à axe vertical iraniens jusqu'à aujourd'hui.

Ceci dit, la diversité territoriale et climatique a permis l'apparition d'autres types de moulins à vent à axe vertical dont les principaux exemples seront présentés dans cette recherche. Il faut noter que tous les moulins à vent persans que l'on peut trouver aujourd'hui en Iran ont été construits dans la période séfévide-qâdjâr, entre les XVI^{e} et XIX^{e} siècle. La date la plus ancienne que l'on puisse donner à un moulin à vent dont les bâtiments sont encore visibles est la période séfévide. Nous n'avons aucun exemple de moulin à vent persan qui ait été construit selon le concept précédant, le premier type. Par ailleurs, nous savons bien que jusqu'au XIII^{e} siècle, d'après les archives iraniennes, arabes et chinoises, le principal type de moulin à vent persan était celui dont la chambre de la meule était située au-dessous de la chambre de la roue éolienne. L'apparition d'autres types de moulins à vent, avec une forme et un mécanisme différents, ne pouvait pas être possible sauf si un événement d'ordre politique, technique ou socio-économique était survenu en Iran, un événement majeur comme l'arrivée au pouvoir d'une nouvelle dynastie, ou si les différents secteurs du pays avait connu un développement important.

La période la plus florissante de l'empire séfévide est celle du règne du Shah Abbas Ier (1588-1629). C'est lui qui initia une série de réformes importantes dans l'armée et développa les infrastructures, les routes commerciales, l'art et l'industrie en Iran. Les relations internationales du gouvernement étaient en phase d'expansion à l'époque séfévide, mais c'est sous le règne de Shah Abbas Ier que différents types de collaboration et d'échange entre l'Iran et les Occidentaux se sont développés, surtout que c'est au cours de cette période que la fameuse Route de la soie s'est développée. Cette route commerciale partait de Chine et allait jusqu'à à Venise en passant par l'Iran et l'empire ottoman. C'est probablement grâce à ces vagues d'échanges commerciaux, techniques et politiques de l'empire séfévide au plan international qu'une autre preuve montrant la création d'un nouveau type de moulin à vent à axe vertical sous le règne des Séfévides est apparue dans la collection des dessins de Fausto Veranzio, en XVI^{e} siècle. Dans ce

livre, bizarrement, on voit quelques modèles d'avant-garde de moulins à vent à axe vertical dont les pales se situent au-dessus des meules, comme dans le cas du moulin à vent à axe vertical iranien. Nous savons bien que jusqu'au XVII^{e} siècle Venise monopolisait le commerce des côtes orientales de la Méditerranée ; il n'est donc pas surprenant que des connaissances sur le nouveau type de moulin à vent à axe vertical aient été diffusées en Europe par des commerçants vénitiens.

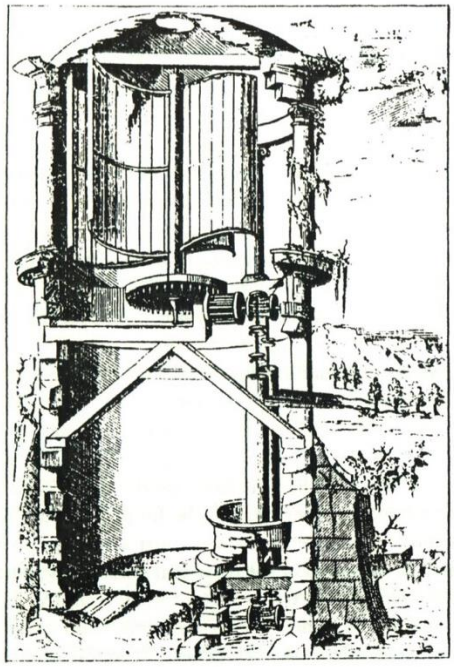
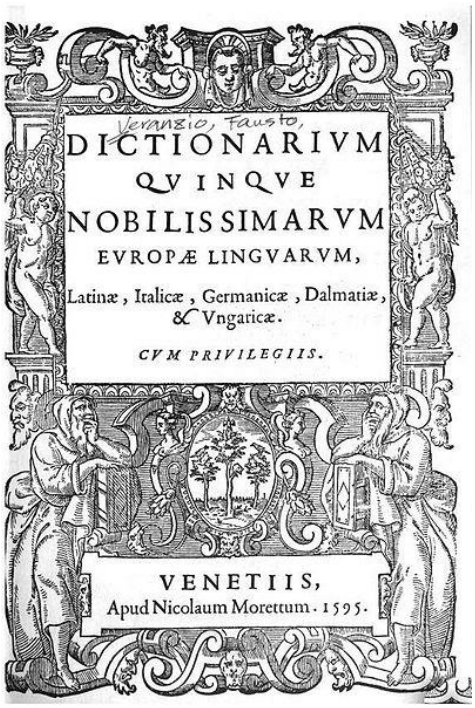


Figure 3-54 : la plus ancienne illustration d'une roue du vent à axe vertical publiée par Besson en 1578. Source : Richard L. Hill[132].

A nouveau, l'arrivée du moulin à vent à axe vertical en Europe s'est faite par l'Italie mais cette fois *via* le nord du pays et grâce aux routes commerciales transméditerranéennes mises en place par les Vénitiens. L'idée de la roue éolienne à axe vertical pour une noria vient de Mariano Jacopo Taccola italien de la région de Sienne ; elle apparaît sous la forme d'un schéma, qui daterait des années 1438 - 1450[133], époque de la Renaissance. Cela dit, l'idée d'utiliser une roue éolienne à axe vertical pour un moulin remonte très probablement aux dessins de Fausto Veranzio.

[132]- **HILL Richard Leslie**, 1994, p16

[133]- **HILL Richard Leslie**, 1994, p16

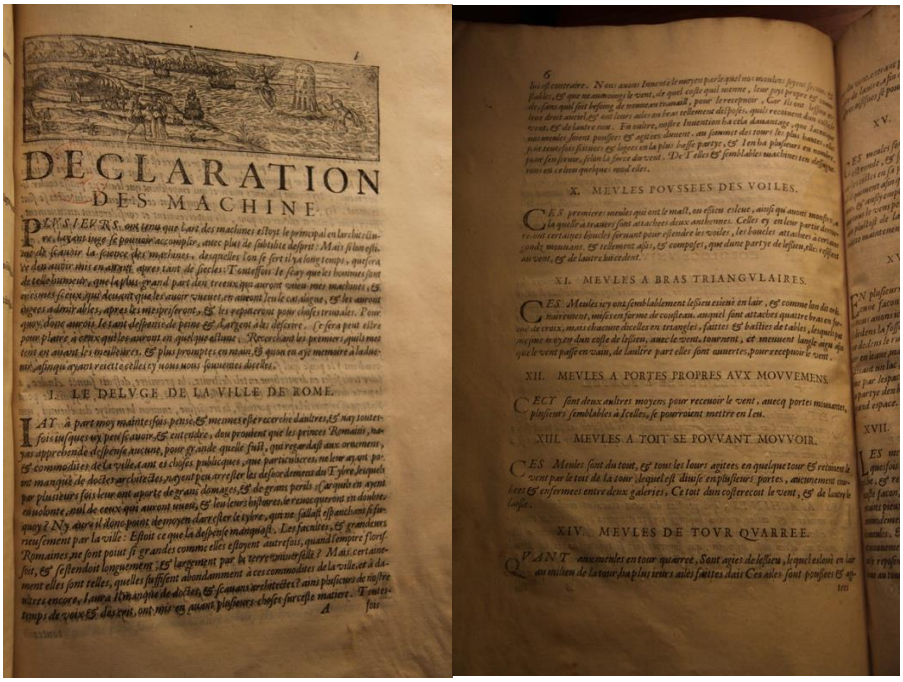

Veranzio, Fausto,

DICTIONARIVM
QVINQVE
NOBILISSIMARVM
EVROPÆ LINGVARVM,
Latinæ, Italicæ, Germanicæ, Dalmatiæ, & Vngaricæ.

CVM PRIVILEGIIS.

VENETIIS,
Apud Nicolaum Morettum. 1595.

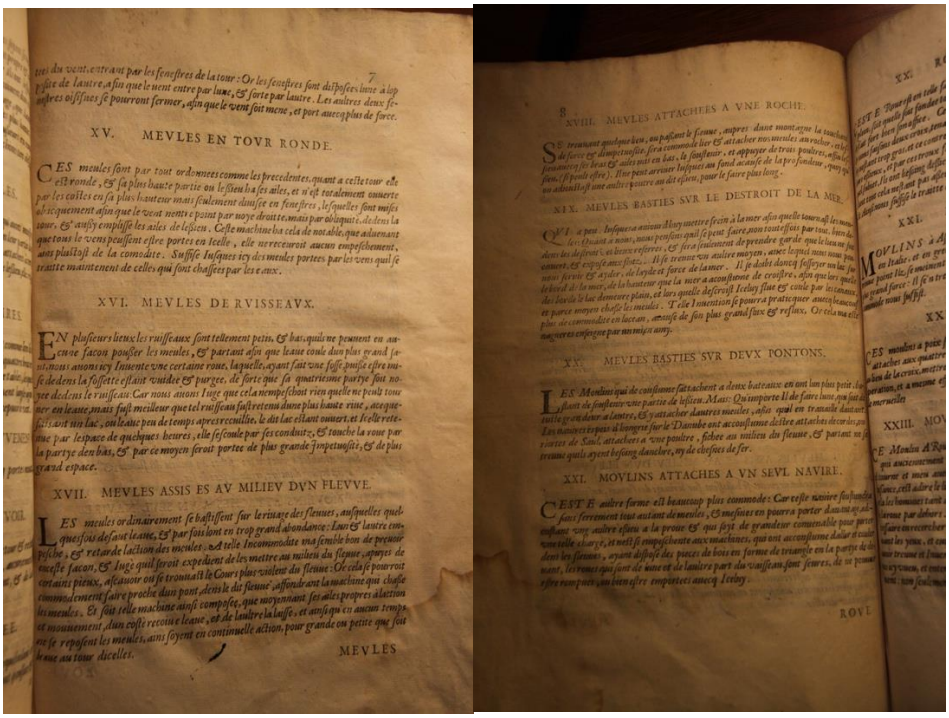
Figure 3-55 : Un livre de Veranzio sur les machines publié en 1559.


DECLARATION
DES MACHINE

PLVSIEVRS ont tenu que l'art des machines n'estoit le principal en la chose ci-ne, laquelle ils pouuoient accomplir, auec plus de subtilité desirer: Mais selon eux de sçauoir la faueur des machines, desquelles l'on se sert si à long temps, que sera de telle humeur, que la plus grand part des treuues qui auront esté nos machines, & ceux mes sieux qui deuant qu'elles auoir veuës en auront leu le contraire, & les auront iugées admirables, apres les mesprisera, & les reputera pour choses triuiales. D'auquel donc auons les tant desseins de peinte & d'argent à la desserre, ce sera peut-estre pour plaire à ceux qu'elles auront en quelque estime. Reserchant les premiers, qui nous tient en auant les meilleures, & plus prompres en main, & qu'on en aye memoire à la deuotion, afin qu'ayant exacte celles-ci nous nous souuenions des-les.

I. LE DELVGE DE LA VILLE DE ROME.

IAY à part moy maintes fois pensé, & moues esperecherche d'autres, & n'ay toutefois iusques ici peu sçauoir, & entendre, dou prouient que les princes Romains, n'ayans apprehende de despense aucune, pour grande quelle fust, qu'regardast aux ornements, & commodites de la ville, aux choses publiques, que particulieres, ne leur ayant pas vne manque de dresser choses telles, qu'ayent pu arrester les desordremens du Tybre, lequels par plusieurs fois leur ont aporté de grans damages, & de grans perils, si'aquis en ayent eu volonté, nul de ceux qui auront veues, & leu leurs histoires, ne enuiquerent en doubte quey? Ny auoit il donc point de moyen dur-rester le tybre, qui ne fallust esperchemps plus rieusement par la ville: Estoit ce que la despense manquast. Les faceries, & grandeurs Romaines ne sont point si grandes comme elles estoyent autrefois, quand l'empire florissoit, & s'estendoit longuement, & largement par la terre: mais est-ce ainsi



XV. MEVLES EN TOVR RONDE.

CES meules sont par tout ordonnees comme les precedentes, quant a celle tour elle est ronde, & sa plus haute partie ou lesseu la fes ailes, et n'est totalement couverte obliquement afin que le vent nente point par voye droitte, mais par oblique: dedens la quelle tous le vens peussent estre portes en telle, elle ne recevroit aucun empeschement, ains plustost de la comodite. Suffise iusques icy des meules portees par les vens qui se reatte maintenent de celles qui sont chassees par les eaux.

XVI. MEVLES DE RVISSEAVX.

EN plusieurs lieux les ruisseaux sont tellement petis, & bas, quils ne peuuent en aucune facon pousser les meules, & partant afin que leaue coule dun plus grand fait, nous auons icy Inuente une certaine roue, laquelle, ayant fait une fosse pusse estre mise dedens la fossette estant vuidee & purgee, de sorte que sa quatrieme partye soit noyee dedens le ruisseau. Car nous auons Iuge que cela nempeschoit rien quelle ne peult tourner en leaue, mais fust meilleur que tel ruisseau fust retenu dune plus haute riue, acequel fait un lac, ou leaue peu de temps apres recueillie, le dit lac estant ouuert, et feelle retenue par lespace de quelques heures, elle se coule par ses conduitz, & touche la roue par la partye den bas, & par ce moyen serout portee de plus grande impetuosite, & de plus grand espace.

XVII. MEVLES ASSIS ES AV MILIEV DVN FLEVVE.

LES meules ordinairement se bastissent sur le riuage des fleuues, ausquelles quelquesfois defaut leaue, & par fois ont en trop grand abondance: Leur & lautre empesche, & retarde laction des meules. A telle Incommodite ma semble bon de pourueoir en ceste facon. & Iuge quil seroit expedient de les mettre au milieu du fleuue, apuyes de certains ptens, asauoir ou se trouuera le Cours plus violent du fleuue. Or celuy se pourroit commodement faire proche dun pont, dedis le dit fleuue, affondrant la machine qui chasse les meules. Et soit telle machine ainsi composee, que moyennant ses ailes propres laction et mouuement dun coste receoiue leaue, et de lautre la lasse, et ainsi qu'en aucun temps ne se reposent les meules, ains soyent en continuelle action, pour grande ou petite que soit leaue au tour dicelles.

MEVLES

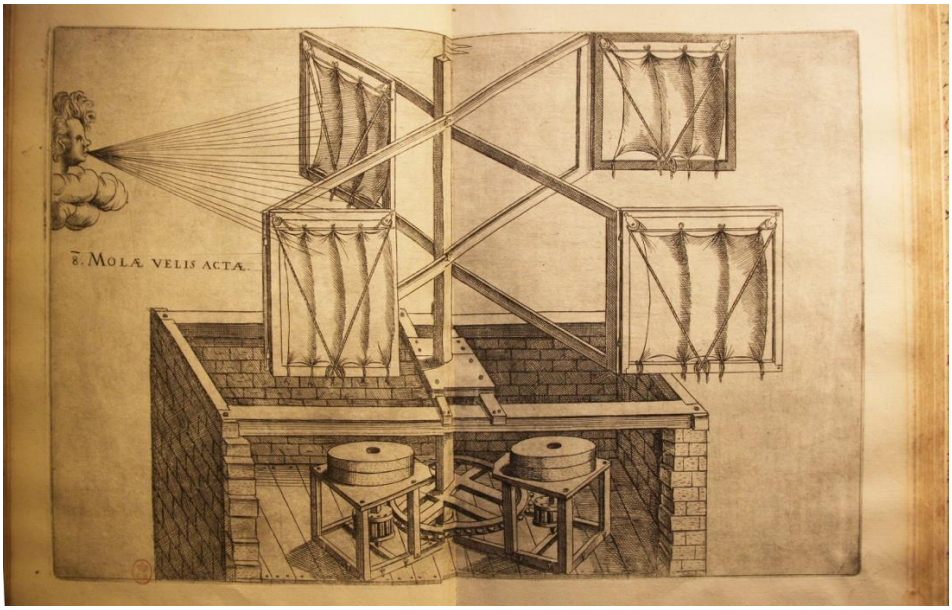


Figure 3-58 : un moulin à vent à axe verticale, dessiné par Veranzio en XVI[e] siècle. Source : Machinae Novae[134].

134- Ibid., p9

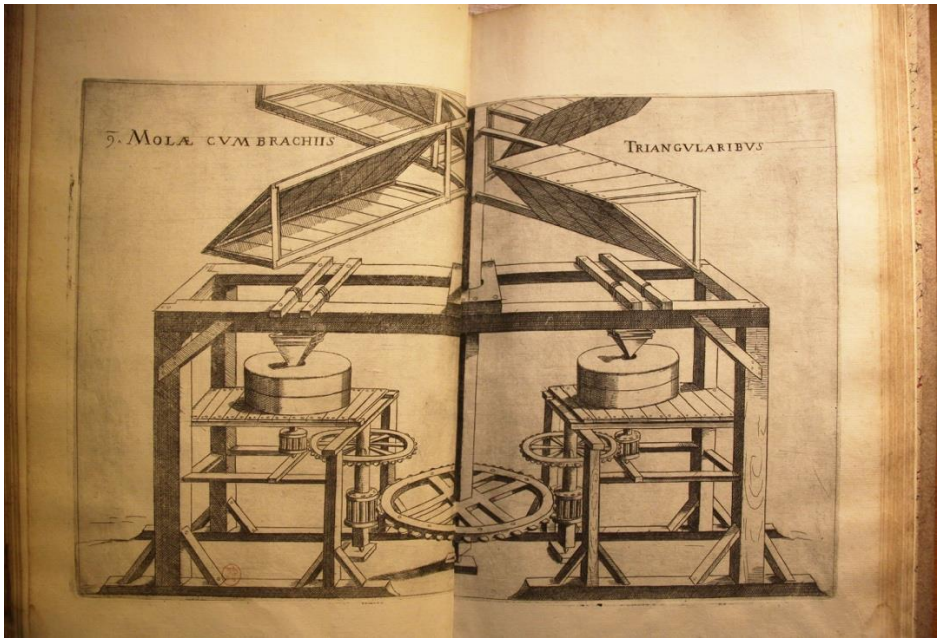


Figure 3-59: moulin à vent à axe vertical, installé dans une tour, dessiné par Veranzio au XVI^{e} siècle.

Source : Machinae Novae[135].

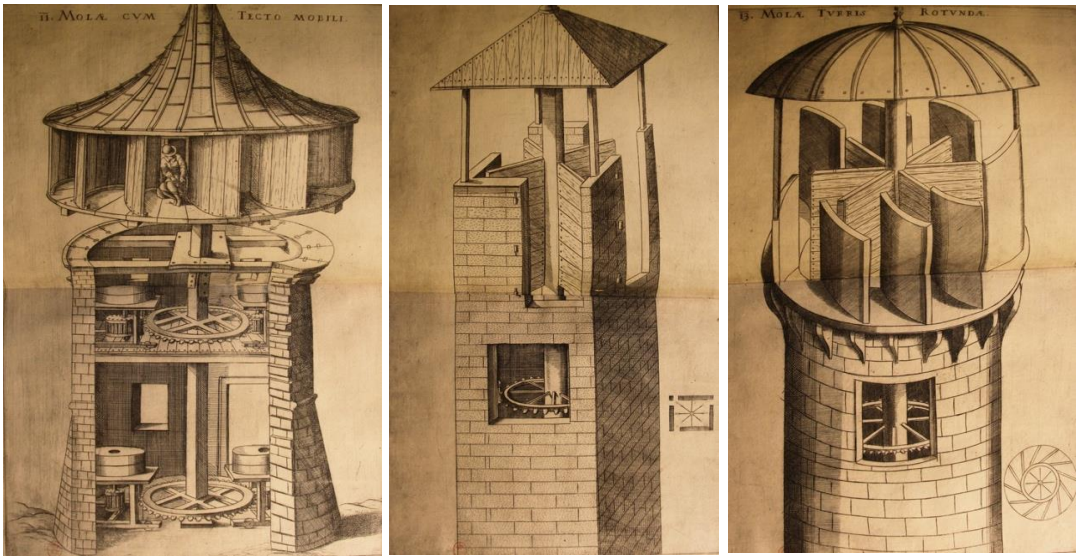


Figure 3-60 : moulin à vent à axe vertical, installé dans une tour, dessiné par Veranzio au XVI^{e} siècle.

Source : Machinae Novae[136].

En 1595, Fausto Veranzio, ingénieur originaire de Venise, dessina cinq types différents de moulins à vent qui selon lui étaient plus efficaces que le moulin de type européen (figure 3-52) - (figure 3-55), qu'il jugeait peu pratique « à cause de l'axe placé

[135]- **VERANZIO Faustus**, «*Machinae Novae* », manuscrit de la Bibliothèque nationale de France, vers le XVII^{e} siècle, p 12

[136]- **VERANZIO Faustus**, «*Machinae Novae* », manuscrit de la Bibliothèque nationale de France, vers le XVII^{e} siècle, p 12

horizontalement, qui souvent doit tourner ici et là, selon la direction du vent – donc tout le moulin doit tourner et se retourner facilement, et reposer et être porté par une seule charnière. Alors, dans de tels moulins, les meules sont fixées dans la partie supérieure, c'est-à-dire à une place contraire à leur nature »[137] . Une question intéressante se pose : comment un tel concept, si différent des moulins à vent de l'époque est-il apparu chez des ingénieurs européens ? Pourquoi Veranzio et pourquoi à Venise ? Y aurait-il un rapport entre la Route de la soie dont Venise était l'extrême destination occidentale et les idées qui venaient du Moyen-Orient ? N'est-il donc pas possible que le même type de diffusion en matière de technologie se soit produit pour le même moulin à vent quatre siècles plus tôt grâce au dynamisme de l'empire musulman et de l'État normand de Sicile ?

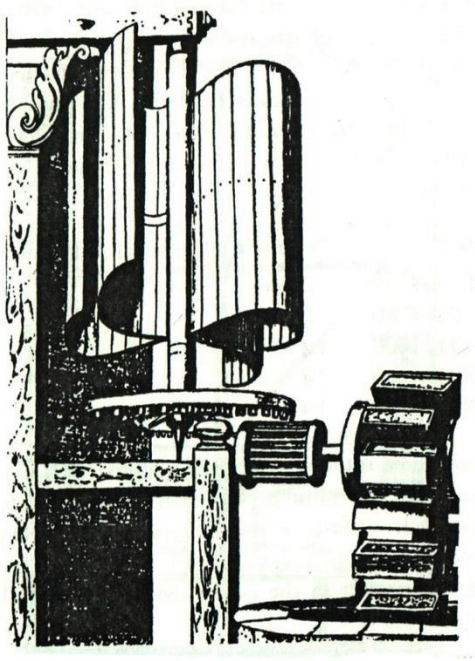


Figure 3-61 : illustration d'une roue éolienne à axe vertical dessinée par W. Blith en 1652, probablement la plus ancienne image de ce type publiée en Angleterre. Source : Richard L. Hill[138].

Le concept de moulin à vent à axe vertical connut un vrai développement en Angleterre grâce à Stephan Hooper, qui utilisa de nouveaux matériaux comme l'acier.

Les moulins à vent conçus par Hooper sont considérés comme les prototypes les plus sophistiqués des moulins à vent dessinés et construits depuis le XVI^{e} siècle en Europe.

---

[137]- Ibid, 1994, p17

[138]- Ibid.

Au premier regard le moulin à vent de Hooper nous fasse penser à la roue d'irrigation irano-chinoise[139].

L'une des dernières inventions européennes que l'on puisse situer dans la continuité de la roue éolienne à axe vertical est peut-être le tournebroche à fumée. Le premier brevet de Stephen Hooper concerne également le pompage de l'eau[140] et montre une pompe à chaîne entraînée à partir d'un axe horizontal et qui trouvent sa puissance avec l'énergie du vent. On ne sait pas bien si ce mécanisme correspondait au même type de pompe qui fut installée au Royal Dockyard à Sheerness où Hooper avait bâti l'un de ses moulins avant 1792[141].

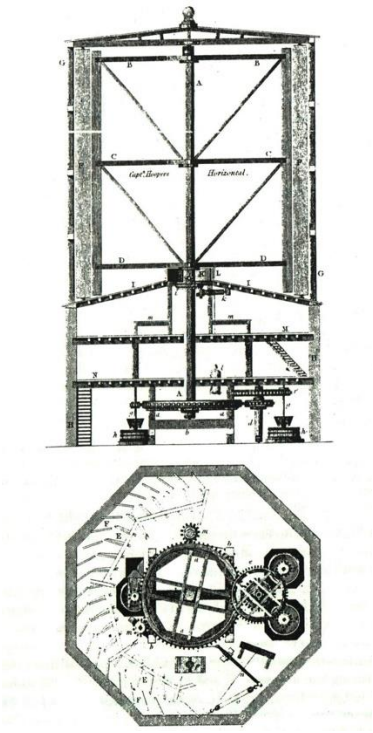


Figure 3-62 : coupe d'un moulin à vent à axe verticale de Stephan Hooper selon *Cyclopedia* de Rees.

Source : Richard L. Hill[142].

Les tournebroches à fumée ont souvent été liés aux moulins à vent à axe vertical, bien qu'en fait, comme le vent ou la fumée souffle le long de leurs axes et appuie sur toutes

---

[139]- Comme nous l'avons expliqué précédemment, la roue d'irrigation chinoise a une origine iranienne bien qu'elle ait disparu de la région du Sistan après l'invasion des Mongols au XIIIe siècle. L'histoire de ce mode d'irrigation commence d'ailleurs en Chine à la même époque. Il est donc préférable de la nommer « roue d'irrigation irano-chinoise ».

[140]- Ibid., p18

[141]- **(en) WAILES, R.** , « *Berney Arms Windmill* », H. M. S. O. London, 1957, pp. 135-6

[142]- **(en)HILL Richard Leslie**, 1994, p19

les pales de manière égale, ils doivent être considérés comme des moulins à vent à axe vertical. Comme ce mécanisme fonctionne avec du feu, c'est le premier type de moteur thermique et donc la première machine qui tourne avec une source d'énergie artificiellement produite. Des conduits coniques au-dessus des feux de cuisine concentraient le flux de gaz avant qu'il ne parvienne au tournebroche. Léonard de Vinci (1452-1519) a dessiné un tournebroche à fumée avec quatre pales nichées dans l'étranglement d'une cheminée (figure 3-63).

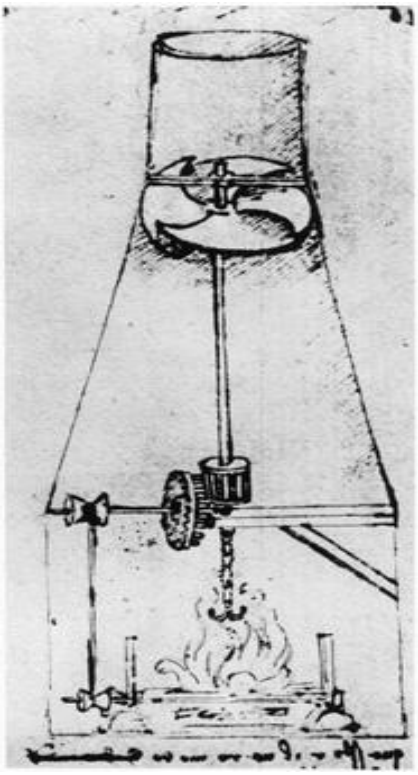


Figure 3-63 : dessin d'un tournebroche à fumée dessinée par Léonard de Vinci. Source : Science & society, picture library[143].

Il était relié grâce à une tige verticale et, grâce à un engrenage, faisait tourner l'axe horizontal d'un grill qui se trouvait sur le feu[144]. Par la suite des mécanismes parus plus tard comme celui de Vittorio Zonca, montrent différents types de tournebroches à fumée. Erasmus Darwin développa ce principe qui prit la forme d'un moulin à vent. (Figure 3-59). Il écrivit pour la Société des arts en 1768 :

[143]- Science & society, picture library: http://www.ssplprints.com/image/129787/leonardo-da-vinci-da-vinci-design-for-an-airscrew-operated-smoke-jack-1480-1482

[144]- **(en) MATHE, J.** *« Leonardo's Inventions »*, Miller Graphics, Geneva, 1980, p.62

« J'ai construit récemment un modèle de moulin à vent horizontal [à axe vertical] qui montre une puissance trois fois supérieure à n'importe quel moulin à vent vertical et dont la voilure est du même diamètre. Ce moulin à vent est par ailleurs plus facile à manœuvrer et devrait faire l'objet de moins de réparations car il a moins de rouages : il a seulement un axe vertical au-dessus duquel où la voilure est installée. Ce modèle a un diamètre de trois feets et je ne devrais pas choisir de dépenser de l'argent pour l'agrandir sauf si par chance…la Société m'accordait une prime pour m'aider à en construire un plus grand ».[145]

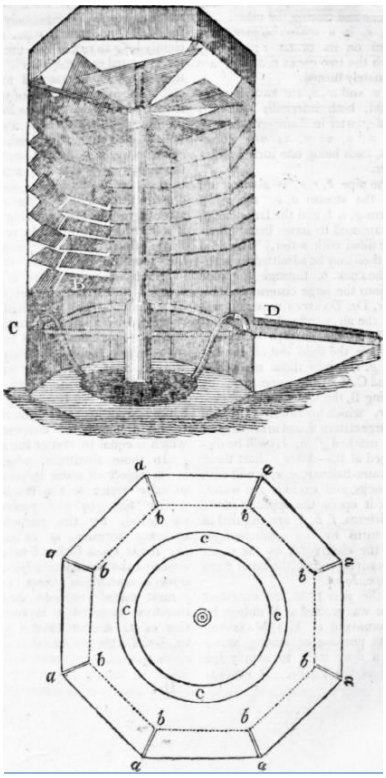


Figure 3-64 : tournebroche d'Erasmus Darwin. Source : *Chest of books*[146].

Un dessin postérieur à ce moulin à vent montre qu'il avait un rotor à six lames, comme un tournebroche à fumée installé sur un long axe vertical à l'intérieur d'une tour. La paroi hexagonale avait des obturateurs horizontaux qui pouvaient être ouverts du côté où soufflait le vent et qui fonctionnaient comme des déflecteurs horizontaux pour orienter le vent vers le haut de la tour et sur les pales de la roue. Le vent pouvait passer à travers les lames des obturateurs et faire tourner la roue horizontale. Erasmus Darwin pensait

[145]- **(en) Schofield, R. E.**, *« The Lunar Society of Birmingham, A Social History of Provincial Science and Industry in Eighteenth Century England »*, Clarendon Press, Oxford, 1963, p.74

[146]- Site internet de «chest of books»: http://chestofbooks.com/reference/The-Domestic-Encyclopaedia-Vol4/Water.html#.UiVwfzBXv7c

tellement à son invention que 21 ans plus tard, il ajouta un dessin de ce moulin à vent dans son ouvrage *Phytologia*, mais il semblerait qu'aucun autre exemplaire n'ait été construit[147].

Beaucoup de moulins à vent à axe vertical furent construits aux Etats-Unis à partir des années 1860. Parmi des premiers figurent celui de F. & D. Strunk, de Janesville (Wisconsin), qui fit breveter un dessin en 1866, et la même année, celui de J. C. Fay, de New York. Comparativement, les productions à grande échelle ne débutèrent pas avant les années 1880 puis ralentirent. Comme leurs équivalents, ils furent utilisés pour pomper l'eau et faire tourner les machines[148]. En Angleterre, la « Rollason's Wind Motor Company » de Londres fabriquait également des moulins à vent à axe vertical dans les années 1890.

En fait, le moulin à vent à axe vertical est loin d'avoir disparu. La turbine à vent à axe vertical pour produire l'électricité fut un sujet de recherche en Angleterre jusqu'au milieu des années 1970. La correction et l'optimisation de la coupe et de la forme des pales pour arriver à un maximum de vitesse au détriment du couple de démarrage furent l'une des orientations de ces recherches. Dans ce nouveau concept de roue verticale, le rotor est monté au-dessus d'un couple de démarrage vertical, ce qui donne l'avantage de pouvoir laisser tous les équipements de production lourds à la base de tour ; ainsi, sans ce poids, la tour peut être plus légère. Une turbine de ce type fut fabriquée en Sardaigne en 1985 et une autre de 17 mètres de diamètre avec une puissance nominale de 100 kW dans les Iles Scilly en 1987. Elles ont deux lames verticales portées par une barre transversale horizontale[149]. La turbine du vent la plus grande de ce type a été construite à Carmarthen Bay, en Galles du sud ; elle a été commandée en août 1990[150].

---

[147]- **HILL Richard Leslie**, 1994, p.21

[148]- **(en) Baker, T. L.**, «*A Field Guide to American Windmills*», University of Oklahoma Press, 1985, p.14

[149]- **(en) NACFAIRE, H.** *« Grid-Connected Wind Turbines* », Elsevier Applied Science, London, 1988, pp. 12-15 & 112-15

[150]- **HILL Richard Leslie**, 1994, p.23

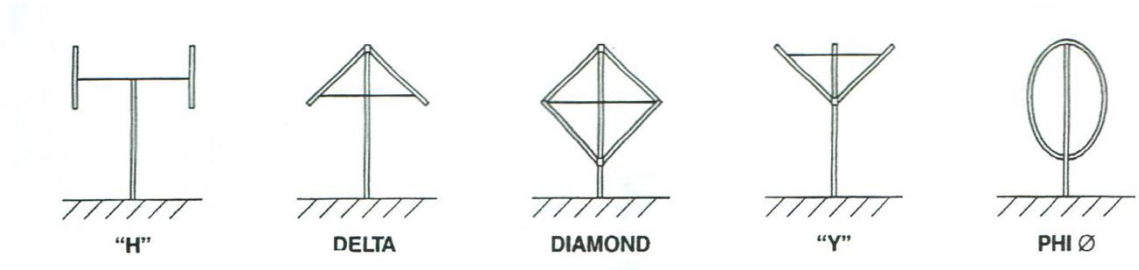


Figure 3-65 : configuration des éoliennes à axe vertical dont le modelé « Φ » est le plus connu. Source : Paul GIPE[151].

La roue éolienne à axe vertical a aujourd'hui une autre représentante : l'éolienne à axe vertical de Darrieus. En 1920, D. G. M. Darrieus inventa une éolienne moderne à axe vertical. Dans le domaine de l'éolienne, on se souvient du nom de cet ingénieur français quand on voit le symbole grec « Φ ». C'est en effet la forme de l'une des éoliennes les plus connues qu'il ait dessiné. Il a également dessiné et fabriqué d'autres types d'éoliennes dont le type conventionnel à deux pales (figure 3-60). Contrairement aux éoliennes qui doivent se réorienter lorsque le vent change de direction, les éoliennes à axe vertical sont omnidirectionnelles, elles peuvent accepter le vent de n'importe quelle direction. L'éolienne du type Darrieus repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif, effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion.

Ces éoliennes permettent également d'installer des équipements lourds comme le générateur au niveau de la terre, où il est plus facile de faire les services nécessaires. Par conséquent, grâce à la variété considérable des applications mécaniques et électriques, les éoliennes à axe vertical sont plus faciles à utiliser parce qu'elles transmettent directement la puissance au niveau du sol (figure 3-61). Nous voyons donc que le concept de moulin à vent et de roue éolienne à axe vertical, comme son équivalent à axe horizontal, continuent d'être utilisés dans la société humaine pour fournir l'énergie de la ressource durable qu'est le vent. La roue éolienne, comme la roue hydrolique, est peut-être l'un des rares mécanismes au service de l'homme qui n'ait pas encore été abandonné ; il est même en train de jouer à nouveau un rôle déterminant dans l'économie et l'industrie du XXI^{e} siècle.

On peut considérer l'éolienne à axe vertical de type « Darrieus » comme la descendante du moulin à vent à axe vertical, mais ce dernier est plutôt une roue éolienne.

---

[151]- **GIPE Paul**, 1995, pp. 172-173

Figure 3-66 : les éoliennes à axe vertical de type Darrieus, moins encombrantes que les éoliennes tripales, sont bien adaptées à une utilisation urbaine. Source : CDE[152].

L'histoire du moulin à vent à axe vertical en Europe s'achève donc par les moulins à vent de Stephan Hooper. Mais la fin de l'histoire du moulin à vent à axe vertical persan est différente.Au Sistan, l'utilisation du moulin à vent connut des heures de gloire et des heures sombres à cause des événements sociaux et climatiques qui secouèrent la région. Cela dit, sur ce territoire, le mécanisme fut utilisé presque sans interruption pendant des siècles. L'abandon des villes et des villages du Sistan à cause des sècheresses périodiques et des profondes ruptures civilisationnelles consécutives aux invasions de troupes étrangères ou aux changements climatiques (dus au comportement de la rivière Hirmand, au vent et au tempêtes de sable) n'ont pas fait disparaitre le savoir-faire des bâtisseurs de moulins à vent du plateau du Sistan. Même au moment du chaos et de la faillite, les moulins à vent fonctionnaient pour moudre le grain, ceci malgré la baisse démographique. C'est possible que le savoir-faire du moulin à vent s'est donc toujours conservé au Sistan ; cela dit, pendant une période assez longue, entre les XIII^{e} et XVI^{e} siècles, l'attaque des Mongol et l'apparition des séfévide il ne connut pas le développement que l'on aurait pu attendre. Nous défendons qu'à l'ère moderne l'utilisation des moulins à vent de l'Iran fut freinée par l'apparition des moulins à moteur ou des moulins électriques. Mais l'enquête que nous avons menée au Khorasan, terre qui abrite encore des chaînes de moulins à vent en bon état, nous montre que la vraie raison derrière la disparition des moulins à vent dans la société agricole iranienne est très

[152]- Site internet de « Connaissance des énergies » : http://www.connaissancedesenergies.org/qu-est-ce-que-le-petit-eolien

particulière. Notre recherche qui nous a conduit chez des boulangers du Khorasan-e Razavi, et plus précisément dans des villages situés autour de la ville de Khâf, nous a fournit des informations que nous avons complétées par des documents écrits datant du début du XX^{e} siècle. Contrairement à ce qu'il s'est passé au Khorasan, l'utilisation des moulins à vent au Sistan a été moindre à partir du XVIII^{e} siècle. Cette moindre utilisation est liée à l'abandon de grandes zones habitables proches du lac Hamoun, comme la ville de Rostam, et de la région de Hozdâr, après l'évolution du bassin du Hirmand et la diminution de l'étendue du lac Hamoun, autre catastrophe climatique sur le plateau du Sistan. Au cours de notre enquête concernant la date et la raison précise de l'abandon des moulins à vent en Iran nous n'avons pas trouvé un seul moulin à vent en état de marche. Résultat : nous n'avons pas pu retrouver la culture de la meunerie ou de la boulangerie liée à la mémoire du moulin à vent au Sistan. Pour approfondir notre enquête, nous avons donc décidé de nous interroger sur la date à laquelle les moulins à vent du Khorasan ont cessé de produire de la farine pour les meuniers et les boulangers des villages qui disposent de moulins à vent à la périphérie de la ville de Khâf. Nous avons finalement découvert que les événements qui mirent un terme à l'utilisation des moulins à vent en Iran furent la Première guerre mondiale et la famine qui suivit. La situation de crise obligea le gouvernement iranien à monopoliser les réserves de blé du pays – une production stratégique – ainsi qu'à contrôler tout le processus de fabrication de la farine, ainsi que la commercialisation de ces produits.

Le pain a toujours été la ressource alimentaire principale des Iraniens. Chez les classes les plus pauvres, 40 % à 50 % des calories nécessaires à l'organisme sont apportées par une ration de pain quotidienne de 350 à 370 g[153], Pour cette raison, la production et le prix du pain ont toujours eu une importance sociopolitique. Depuis l'Antiquité les gouvernements iraniens essaient d'intervenir sur le marché du pain pour contrôler le système de production et de commercialisation de ce produit stratégique, surtout en période de famine temporaire. Les famines en Iran ont toujours été l'un des problèmes les plus importants ; au cours des siècles précédents, elles ont parfois provoqué une basse démographique. Des personnes âgées se souviennent d'ailleurs encore des terribles famines du début du XX^{e} siècle.

[153]- **MOHSENIN M.** « *Une introduction sur le prix de pain* », les nouvels de l'économie, Téhéran, 1994, pp.56-60

La plus ancienne trace d'intervention du gouvernement iranien dans la gestion du pain se trouve dans le testament de Darius I à son fils Xerxès. Darius décrit la technique de construction d'un réservoir à blé qu'il tenait des Egyptiens. Il conseille à son fils de poursuivre la construction des réservoirs à blé afin que la société ne soit pas touchée par la famine en cas de sècheresse. Dans le *Livre des Rois*, Ferdowsi évoque les tentatives du dernier roi sassanide Yazdgard III pour baisser le prix du pain qui avait augmenté à la suite d'une famine. Mais en Iran le premier poste gouvernemental destiné à superviser le prix du pain fut sans doute créé sous les Séfévides.

Selon une tradition ancienne, une partie de l'impôt réclamée par le gouvernement était payable en grains, surtout en période de sècheresse, en plus le loyer des terrains agricoles du gouvernement était la même chose. Ces revenus permettaient donc au gouvernement d'intervenir sur le marché du blé et du pain en période de famine. Cette politique se poursuivit avec plus ou moins d'intensité jusqu'à la période Qajar. Cela dit, le gouvernement ne monopolisait pas la production de farine. La plus grande famine de l'histoire d'Iran survint entre 1917 et 1919, au cours de la Première guerre mondiale. Pendant cette période, plusieurs régions du pays furent occupées par les troupes anglaises et russes. L'autorité centrale était par ailleurs affaiblie à cause de conflits tribaux. Le nombre d'Iraniens qui périrent au cours de cette famine n'est pas clairement établi mais certains spécialistes comme Mohammad Gholi Majd évoquent le chiffre incroyable de 10 millions de morts[154]. Sachant qu'avant cette famine, l'Iran comptait environ 20 millions d'habitants. Par conséquent, comme les sources historiques en témoignent, c'est la moitié de la population qui aurait perdu la vie. Selon Majd, ce fut la plus grande famine de l'histoire de l'Iran et la plus grande catastrophe de l'histoire du pays, plus grave encore que l'invasion mongole. La Couronne a en effet acheté d'énormes stocks de blé sur le marché iranien pour nourrir son armée et, dans le même temps, a empêché Téhéran d'importer du blé de Mésopotamie et des Etats-Unis. De plus, Londres ne versait pas les revenus du pétrole dus à l'Iran. Par ailleurs, du côté iranien, les marchants de blé et les boulangers conservaient leurs marchandises dans des silos afin de les vendre plus cher. L'ensemble de ces tristes événements, ainsi que les conseils de certains experts étrangers, et surtout le prix fou atteint par le blé finirent par convaincre le gouvernement d'intervenir sérieusement sur le marché du blé et de la farine. Résultat : à l'automne 1918,

---

[154]- **MAJD, Mohammad Gholi.** "*The Great Famine and Genocide in Persia, 1917-1919*", University press of America, 2003, 162p.

une organisation de surveillance de la production alimentaire fut créée et dirigé par un expert belge qui commença à mettre de l'ordre sur le marché de la farine. C'est à partir de cette date qu'avec l'intervention du gouvernement dans le processus de production du blé et de la farine le rôle du secteur privé fut strictement limité. Les moulins privés en général et les moulins à vent en particulier touchaient autant que ces dernières furent complètement abandonnées dans les régions qui les avaient vu naître.

C'est donc au début du XX^{e} siècle que les autorités iraniennes s'obligèrent à monopoliser l'achat et la vente du blé du pays, et plus précisément à partir de 1936, date à laquelle le gouvernement annonça sa politique officielle en matière de contrôle de la production de blé et du cours du pain. Cette politique se fit de plus en plus stricte, jusqu'à aujourd'hui. L'abandon des moulins à vent du Khorasan et du Sistan est la conséquence de cette politique. En effet, le blé produit est d'abord stocké dans les silos du gouvernement, puis selon une procédure précise, transféré vers des usines sélectionnées pour produire la farine nécessaire au pays. Dans une telle situation, et avec de telles contraintes dictées par l'Etat, les moulins à vent du secteur privé avaient peu de chance de survivre. C'est donc pour cela que la plupart des chaînes de moulins à vent à axe vertical iraniens furent complètement abandonnées jusqu'au milieu du XX^{e} siècle. Seuls quelques moulins à vent furent utilisés pour la consommation personnelle des villageois dans certains lieux situés à la périphérie du territoire comme la ville de Khâf au Khorasan-e Razavi.

Chapitre IV

Moulin à vent à axe vertical

Le moulin à vent à axe vertical persan

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, de nombreux types de moulins à vent à axe vertical ont vu le jour depuis l'Antiquité, mais seul le moulin à vent à axe vertical persan nous intéresse. Le manque d'informations sur l'origine ce moulin à vent dans les sources scientifiques nous a poussé à nous pencher sur son histoire. Par ailleurs, nous pensions que les données résultant de notre recherche sur le terrain pourraient se révéler très utiles pour d'autres activités scientifiques, en particulier pour la restauration des moulins à vent encore debout au Sistan, ainsi que pour la réalisation des roues éoliennes et du mécanisme technique. Il faut savoir qu'il n'y a plus trace des roues éoliennes et des mécanismes techniques et que les moulins à vent du Sistan sont gravement endommagés.

Architecture

Le moulin à vent persan a une forme exceptionnelle dans l'architecture iranienne. Ceci est dû au rôle spécifique de ce bâtiment, dont l'enveloppe est complètement adaptée à la fonction et en constitue, d'une certaine façon, une partie du mécanisme technique. Dans l'histoire de l'architecture iranienne, nous avons des exemples d'éléments architecturaux « spécialisés ». C'est le cas des tours du vent. Mais les moulins à vent sont très probablement les seuls bâtiments entièrement bâtis pour leur fonction. Autre point exceptionnel : ils sont les seuls bâtiments dotés d'un mécanisme rotatif, donc dynamique. Du fait de leur originalité, les moulins à vent de Hozdar (Sistan) sont classés parmi les bâtiments les plus remarquables de l'histoire architecturale iranienne. Ils peuvent également être considérés comme les premiers bâtiments industriels iraniens.

Mis à part les deux premiers types de moulins à vent persans, le premier type et le type « méditerranéen », pour lesquels nous manquons d'informations du point de vue architectural, les autres types ont une base architecturale quasi identique. Si nous prenons la chaîne de moulins à vent à axe vertical de type « Khorasan » comme base architecturale des trois types de moulins à vent persans, nous pouvons obtenir les trois types existants de moulins à vent persans en y ajoutant des éléments et en effectuant une série de modifications sur le corps du moulin. Les éléments ajoutés à cette base sont les murs sur la façade du moulin exposée au vent, qui créent une sorte de capteur orientant le vent vers la roue éolienne. Dans le type « Hérat », il s'agit d'un mur courbe situé derrière la chambre de la roue éolienne, autour de la roue éolienne. Dans le moulin à vent de type « Khorasan », il s'agit d'une ouverture simple

dans la façade exposée au vent, installée au bout d'une paroi basculant vers l'intérieur de la chambre de la roue éolienne.

Comme nous l'avons dit, le moulin à vent de type « Sistan » est considéré comme le moulin à vent le plus sophistiqué des moulins à vent persans. C'est grâce à l'apparition d'un déflecteur de vent dans le capteur que ce moulin se distingua des types précédents. L'ajout d'un mur diagonal dans le capteur a en effet fait apparaitre un nouvel élément dans la morphologie de cette invention ancienne, un élément qui n'existait pas sur les autres types de moulins à vent persans. Grâce à ce nouvel élément, le capteur du moulin à vent a deux ouvertures. La première, la plus grande, oriente le courant du vent sur la première pale de la roue éolienne, qui se situe directement face au courant du vent. La seconde oriente le courant du vent sur la deuxième pale, qui est en attente. Avec la position du déflecteur dans le capteur, une ouverture au vent se crée, elle a un angle de 45° par rapport à l'axe du courant du vent. C'est l'utilisation de deux courants de vent sur les deux pales successives qui fait tourner la roue éolienne. Nous n'avons aucune trace des roues éoliennes et des mécanismes techniques des moulins à vent de ce type. Mais, selon nous, cette roue éolienne avait 12 pales. Elle était donc certainement la plus grande des roues existantes au Khorasan et à Hérat. Par ailleurs, ce moulin à vent avait une taille plus importante que les autres situés à Hérat et dans le Khorasan. Pour nous, cela montre qu'il était beaucoup plus puissant que les autres types de moulins. Sa grande taille et sa grande roue éolienne à 12 pales peuvent justifier cette hypothèse. Avec la force habituelle du vent, les habitants de la région de Hozdar ont été obligés de trouver une solution pour faire fonctionner une si grande machine. Ils ont donc inventé le déflecteur de vent pour qu'il puisse orienter le courant du vent vers deux pales ou plus en même temps.

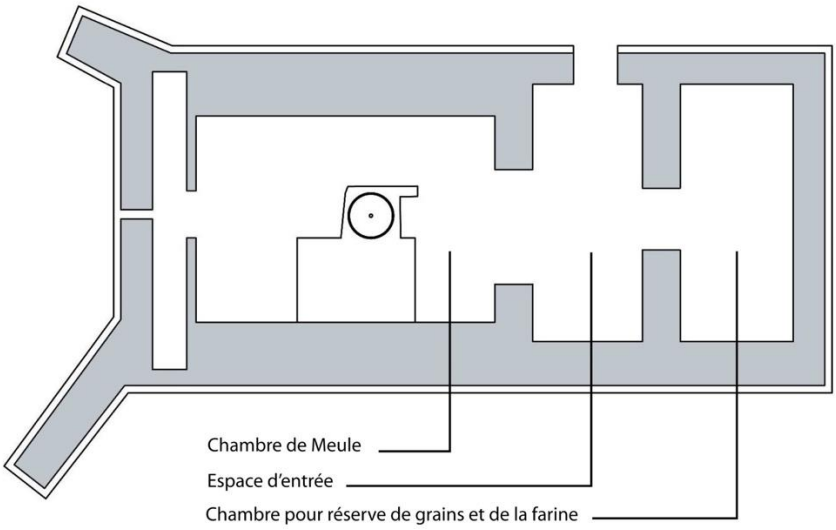


Figure 4-1 : les différents espaces d'un moulin à vent persan de type « Sistan ».

Un moulin à vent persan est généralement constitué d'une chambre longue dans laquelle se trouve un espace pour la meule et un espace pour le grain et la farine. Dans certains moulins à vent comme ceux du Khorasan, ces deux espaces sont intégrés. Parfois, ces deux espaces forment deux chambres indépendantes reliées par un espace d'entrée. C'est le cas par exemple des moulins à vent de type « Sistan » à Hozdar (figure 5-26). Normalement, il n'y a qu'une seule ouverture comme la porte d'entrée dans l'enveloppe du moulin à vent, au premier étage, et l'espace intérieur est éclairé par l'ouverture où se loge l'axe de la roue éolienne. Mais les grands moulins à vent du Sistan ont aussi quelques petites ouvertures pour des espaces intérieurs.

Il faut savoir qu'il est bon de limiter les ouvertures dans le bâtiment d'un moulin à vent, surtout sous un climat comme celui du Sistan, parce que le vent emporte toujours avec lui une quantité de sable considérable. Pour protéger du sable la chambre de la meule et l'espace de stockage du grain et de la farine, on limite donc le nombre d'ouvertures. Cela dit, la plupart des moulins à vent persans ont une petite ouverture dans la façade exposée au vent : le vent entre dans le moulin à travers cette ouverture et aide ainsi le meunier à nettoyer plus facilement son espace intérieur. Le premier étage du moulin à vent persan est dédié à la roue éolienne. Les murs de cette chambre sont disposés différemment selon les types de moulins à vent persans. Deux murs parallèles à la direction du vent croisent un mur perpendiculaire au vent qui, dans le cas du moulin à vent de Hérat et du moulin à vent du Sistan se transforme en entonnoir pour mieux capter le vent et accroître ainsi sa vitesse et sa force, en effet une sorte de capteur de vent.

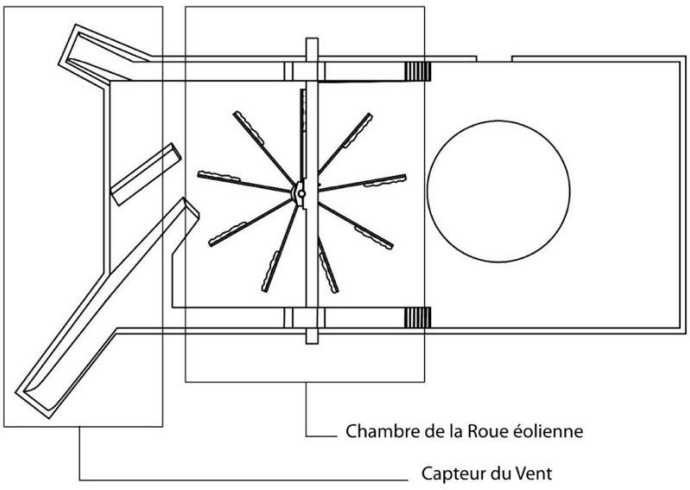


Figure 4-2 : premier étage, dans lequel se trouve le capteur de vent et la roue éolienne d'un moulin à vent persan de type « Sistan ».

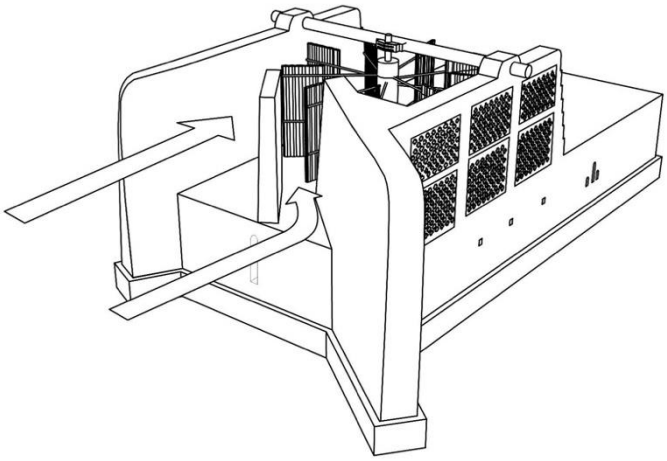


Figure 4-3 : rôle du déflecteur dans le fonctionnement d'un moulin à vent persan de type « Sistan ».

Espace architectural du moulin à vent à axe vertical

Un moulin à vent a deux niveaux : le rez-de-chaussée et le premier étage.

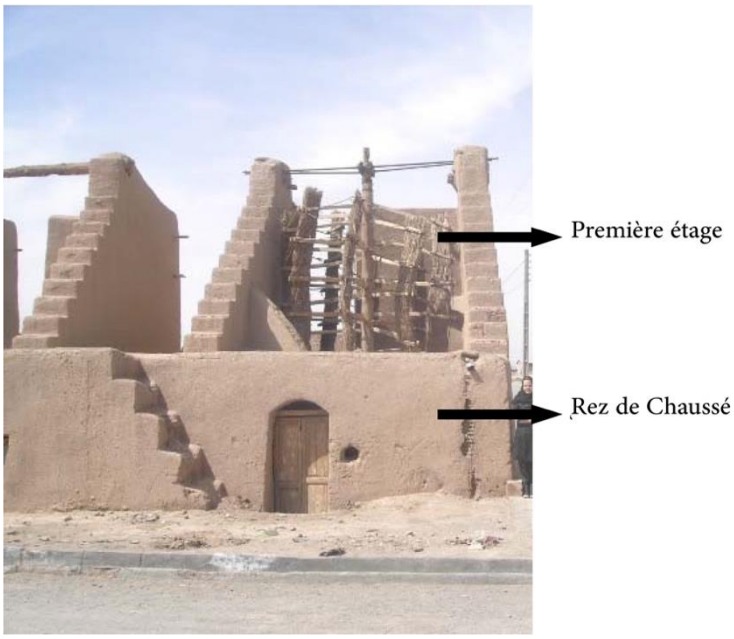


Figure 4-4 : espace architectural du moulin à vent à axe vertical, village de Khâncharaf, Khorasan du Sud.

Rez-de-chaussée

Le rez-de-chaussée ou la chambre de la meule, *asse-khâneh* : il s'agit d'une pièce voûtée au-dessus de laquelle tournent les pales de la roue éolienne. Elle a une porte en bois. La

meule et le mécanisme s'installent dans cet espace. La hauteur de cette chambre atteint normalement 3 mètres. Elle est composée des espaces suivants :

- Un réservoir pour la farine ou *kondak-e ard* : il s'agit d'un espace où la farine produite par la meule s'accumule *via* un petit passage situé à coté de la pierre inférieure. En général, dans la langue locale, on utilise les mots *kondak* ou *parkho* pour désigner ce réservoir.

Figure 4-5 : *kondak* de la farine dans un moulin à vent du village de Khâncharaf.

- Un *kondak* pour le blé : il s'agit d'un espace situé au-dessus du *kondak* pour la farine. Il est rempli de blé. Cet espace a une ouverture dans sa partie inférieure, laissant passer le blé vers le passage qui alimente la meule en blé. Il existe un autre réservoir à blé désigné aussi *kondak* à blé. Il s'agit d'un réservoir rectangulaire de 1 x 1,5 mètre, situé sur le sol de l'espace intérieur du moulin à vent. On y met le blé avant de le transférer avec une mesure vers le *kondak* à blé qui se trouve au-dessus de la meule. L'espace intérieur de ces deux *kondaks* à blé est recouvert d'une couche de plâtre.

Figure 4-6 : *kondak* à blé dans un moulin à vent du village de Khâncharaf.

- L’espace terminal de la chambre de la meule : cet espace est utilisé pour rayonner la meule. Après quelques mois, la meule ne fonctionne plus comme au premier jour. Les meuniers la libèrent et la posent sur un espace surélevé pour la rayonner avec un outil nommé *ketnak,* outil qui sert à creuser des rainures ou rayons dans la pierre.
- Le *takht* : il s’agit d’un espace surélevé se trouvant dans un coin de la chambre de la meule, construit avec le matériau maçonnerie. Cet espace permet au meunier de se reposer. Dans certains moulins à vent, un espace est également prévu pour l’installation d’une balance, utilisée pour peser la farine produite.

Premier étage

C’est un espace à demi fermé, constitué de deux murs parallèles à la direction du vent et d’un mur exposé au vent dans lequel se trouve une ouverture destinée à faire passer le vent. Un travers de bois tenant l’axe vertical du moulin à vent est assis sur les deux murs parallèles. Le mur qui a l’ouverture face au vent est utilisé pour orienter le vent vers la roue éolienne du côté gauche (pour les moulins à vent du Khorasan et de Hérat) ou du côté droit (pour les moulins à vent du Sistan), de façon à ce que la meule ne tourne que dans un sens. Ce mur a un angle de 25° à 45° par rapport à la façade nord, pour que le vent entre avec le plus de force possible dans l’espace de la roue éolienne. Il y a des différences morphologiques et techniques entre les différents types de moulins à vent à axe vertical. Ces différences concernent la forme et la méthode de construction du premier étage. Les moulins à vent de type Khorasan et Hérat ont des similitudes dans leur conception architecturale et technique mais aussi des différences importantes, et les différences entre le premier étage de ces deux derniers moulins d’une part et celui du moulin à vent de type Sistan d’autre part sont encore plus grandes.

Figure 4-7 : le premier étage ou la chambre de la roue éolienne dans deux types de moulins à vent. À gauche, un moulin à vent de type Khorasan dans le village de Khargerd ; à droite, un des moulins à vent du Sistan à Hozdar.

Construction

Le principal matériau utilisé pour la construction des moulins à vent persans est la terre crue, qui permet de bâtir en pisé, et le mortier, qui permet de jointer. La terre crue peut présenter des différences du point de vue des proportions et de la qualité selon les régions mais la plupart du temps elle est composée d'argile, de sable, de paille et d'eau. La combinaison de ces matériaux dépend de la région où la structure est bâtie, mais aussi de la résistance mécanique nécessaire et de la technique de pisage.

Normalement, on utilisait des matériaux de construction situés à proximité du lieu où le moulin à vent était bâti. On ne pouvait pas faire venir de loin des matériaux lourds. Parfois donc, de petites différences apparaissent entre les moulins à vent d'un type particulier bâtis non loin les uns des autres. Il s'agit de villages et même de quartiers, afin d'augmenter la résistance du bâtiment construit avec des matériaux parfois moins résistants et de moins bonne qualité. Dans l'architecture iranienne, les bâtiments importants ont pour la plupart une structure complète, de la fondation au plafond. Mais la plupart des moulins à vent que nous avons vus en Iran n'ont pas de fondation. Normalement, ils sont construits sur des sols denses et résistants. Le bâtiment repose sur quelques couches de briques jointes avec un mortier de chaux et de sable, de manière à empêcher l'eau d'abîmer les murs de terre crue.

Figure 4-8 : couches de briques au-dessous des murs porteurs d'un moulin à vent persan de type « Sistan ».

Les murs des moulins à vent sont entièrement construits en pisé, avec de la terre crue comme matériau structurel. L'épaisseur des murs varie selon le rôle qu'on leur assigne et selon la taille du moulin à vent. Par exemple, l'épaisseur des murs porteurs des moulins à vent du Sistan atteint parfois un mètre ou plus, mais les murs porteurs de la plupart des moulins à vent ont une épaisseur oscillant entre 35 et 60 cm. C'est en fait la taille du moulin à vent qui détermine l'épaisseur des murs. Pour les moulins à vent de taille moyenne comme ceux du Khorasan et de Hérat, on utilise des voûtes simples de type « asemâneh » ou « âhang ». Pour les grands moulins à vent on utilise parfois plusieurs types de voûtes, dont certaines sont des coupoles et sont pourvues de dômes assez sophistiqués comme dans le cas des moulins à vent du Sistan (figures 5-44 et 5-45).

Figure 4-9 : murs porteurs et voûtes détruites d'un moulin à vent persan de type « Sistan » à Hozdar.

Un moulin à vent est un bâtiment fonctionnel, bâti à proximité des fermes et des terrains agricoles. Il a seulement besoin d'un espace pour la chambre de la meule et d'un espace pour une réserve limitée de grain et de farine, réserve pour laquelle l'entrée du moulin semble suffisante. S'agissant des moulins à vent de type Sistan, nous constatons qu'ils sont de grande taille, que la chambre de la meule est vaste, qu'ils ont un espace spécifique pour la réserve de grain et de farine et qu'ils disposent d'une large entrée. Tous ces éléments semblent indiquer que ce type de moulin avait une production et donc une puissance plus importante que les autres types de moulins.

La structure d'un moulin à vent est protégée par les couches d'un mortier de terre crue et de paille. Ce mortier doit être refait au moins tous les cinq ans, selon les précipitations annuelles de la région où il se trouve. La datation d'un moulin à vent persan en fonction de ses éléments constitutifs peut poser des difficultés à cause des différentes phases de restauration et de rénovation qu'il a pu connaître au cours de son histoire dans un site agricole, surtout si la situation agricole du lieu de construction du moulin à vent est stable. Mais dans certains cas comme celui des moulins à vent de type Sistan à Hozdar, la technique de construction, très pointue, rappelle le haut degré de technicité et de qualité des édifices de l'époque séfévide. Ce brillant savoir-faire se maintiendra jusqu'au milieu de la période Qadjar.

Figure 4-10 : structure des murs parallèles à la direction du vent d'un moulin à vent persan de type Hérat dans le village de Chekiban.

Figure 4-11 : couches protectrices pour l'étanchéité d'un moulin à vent persan de type Hérat.

Figure 4-12 : couches d'étanchéité sur les surfaces extérieures d'un moulin à vent persan de type Hérat dans le village de Chekiban.

Mécanisme technique

Techniquement, le mécanisme du moulin à vent à axe vertical est constitué de deux parties qui se rejoignent au niveau de la meule supérieure. La première partie est la roue éolienne ; la seconde est la meule. Les cinq types de moulins à vent à axe vertical utilisent en fait trois différents types de mécanismes techniques. Les pales de la roue éolienne des cinq types sont fabriquées avec des matériaux différents, en fonction de ce qui était disponible localement et du climat de la région, mais le concept reste le même. Concernant le fonctionnement du mécanisme de la meule, nous voyons des différences qui semblent être des détails. Mais ces différences sont en fait importantes car elles ont un impact notable sur le transfert du mouvement de la roue éolienne à la meule. La classification des mécanismes techniques que nous allons présenter – et qui a donné trois systèmes différents – sera fondée sur la façon dont est transférée la puissance de la roue éolienne à la meule.

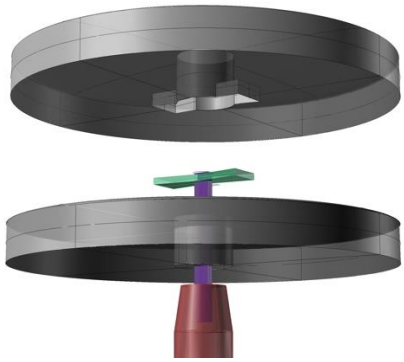


Figure 4-13 : mécanisme technique du moulin à vent de premier type.

L'avancée clé dans le processus d'évolution technique et morphologique du moulin à vent à axe vertical concerne la façon de transférer le mouvement de l'axe de la roue éolienne à la meule supérieure. Le problème initial du moulin à vent de premier type a toujours été le transfert de la puissance de la roue éolienne à la meule, puisque ce moulin était conçu sur le même principe que le moulin à eau ; comme dans ce dernier, la meule était installée directement sur l'axe vertical, sans intermédiaire. Par ailleurs, la roue éolienne était placée au-dessous de la meule et supportait le poids des meules (figure 4-13). Autre fonction de la roue éolienne : la modification de la distance entre les deux pierres du moulin. Dans ce modèle, une seule pièce du mécanisme technique avait donc trois fonctions clés : produire et transférer l'énergie rotative, supporter le poids de toutes les principales pièces lourdes et régler la distance entre les pierres pour moudre le grain correctement. Comme on peut s'y attendre, un tel mécanisme

posait de nombreux problèmes aux meuniers : ils peinaient à régler la distance entre les deux pierres et à réparer la roue éolienne ; le changement des pierres de la meule semblait en revanche plus facile pour ce type de moulin que pour les types suivants. Nous savons que les mécanismes techniques des moulins à vent de premier type et de type méditerranéen furent très influencés par celui du moulin à eau à axe vertical. Même si aujourd'hui nous n'avons aucun exemple de ces deux types de moulins à vent, nous pouvons essayer d'imaginer leur mécanisme en nous appuyant sur le fonctionnement du mécanisme technique du moulin à eau à axe vertical ainsi que sur les écrits d'Al-Dimashqi.

Libérer la roue éolienne de son emplacement non idéal impliquait de trouver une solution pour le transfert du mouvement rotatif de l'axe vertical à la meule. Cette solution fut finalement trouvée en changeant le rôle de chaque partie du mécanisme le long de l'axe vertical. Les techniciens séfévides ou timurides ont partagé ces fonctions entre les différentes pièces du mécanisme technique vertical. Ils ont d'abord mis la meule supérieure sur un axe vertical où une lame métallique a pris son poids (figure 4-14).

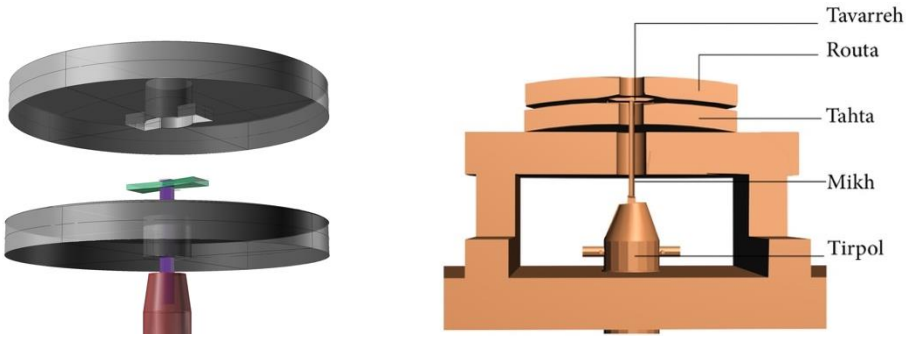


Figure 4-14 : détail du mécanisme technique probable du moulin à vent de premier type au Sistan, clairement comparable au mécanisme du moulin à eau à axe vertical du Khorasan.

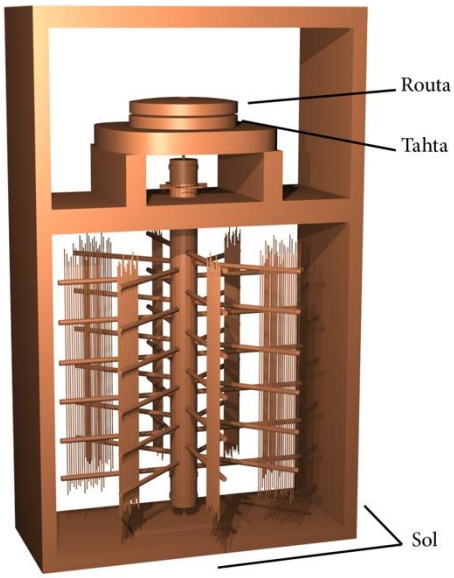


Figure 4-15 : mécanisme technique probable du moulin à vent de premier type au Sistan selon les informations données par des historiens de l'Antiquité.

Cette lame métallique a une partie supérieure qui fonctionne comme une poignée et qui est prise par l'arbre de l'axe de la roue éolienne. Mais le poids de la roue éolienne pèse sur la lame et par la suite sur l'axe vertical au-dessous de la lame. Les techniciens séfévides ou timurides ont donc séparé le mécanisme vertical en trois parties principales et presque détachées : la première est la meule inférieure et son axe vertical ; la seconde est la pierre supérieure et la lame métallique ; la troisième est la roue éolienne et l'axe rotatif. Ces trois parties se croisent sur la lame métallique qui prend la pierre supérieure.

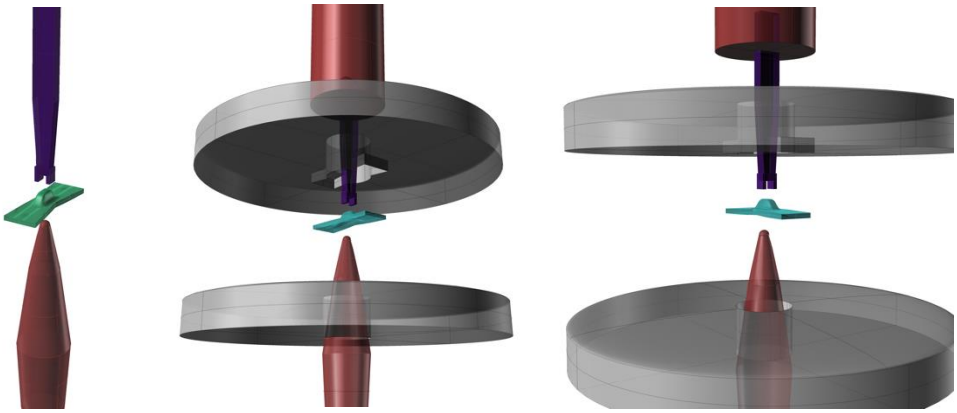


Figure 4-16 : mécanisme technique des premiers moulins à vent après le changement de place de la roue éolienne.

En fait, la fabrication d'un nouvel arbre installé au centre de la partie inférieure de l'axe vertical du moulin qui pouvait en même temps prendre le poids de la meule supérieure et transférer l'ensemble du poids de la roue éolienne et de la meule à l'axe inférieur a donné au

moulin à vent la possibilité d'avoir une efficacité maximum par rapport à celui de type précédent et également une nouvelle forme. Cette réalisation technique eut une conséquence importante : le changement de place de la chambre des meules et de la chambre de la roue éolienne. Le fonctionnement du mécanisme de ce type de moulin à vent a permis de le fabriquer en trois parties différentes et de l'installer plus facilement sur une grande diversité de terrains, moins en altitude.Avec ce nouveau système d'attache des pièces rotatives – roue éolienne et pierre supérieure –, pour réparer la roue éolienne ou changer les pierres, il suffisait de soulever la roue éolienne afin de libérer la meule. Pour régler la distance entre les deux pierres, il fallait taper contre la pièce de bois triangulaire située au-dessus de la traverse de bois. Cette pièce prenait à son tour tout le poids du mécanisme technique du moulin à vent à axe vertical.

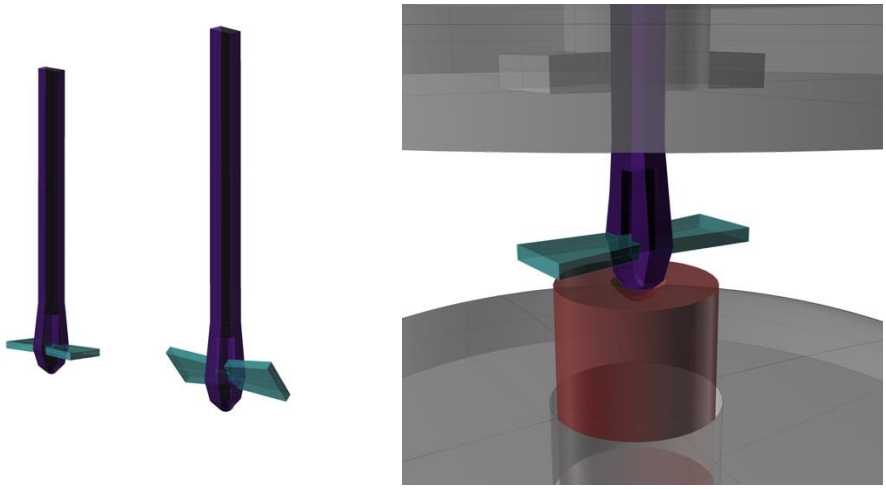


Figure 4-17 : lame *(tavarreh)* et axe vertical *(mikh)* dans le nouveau mécanisme technique.

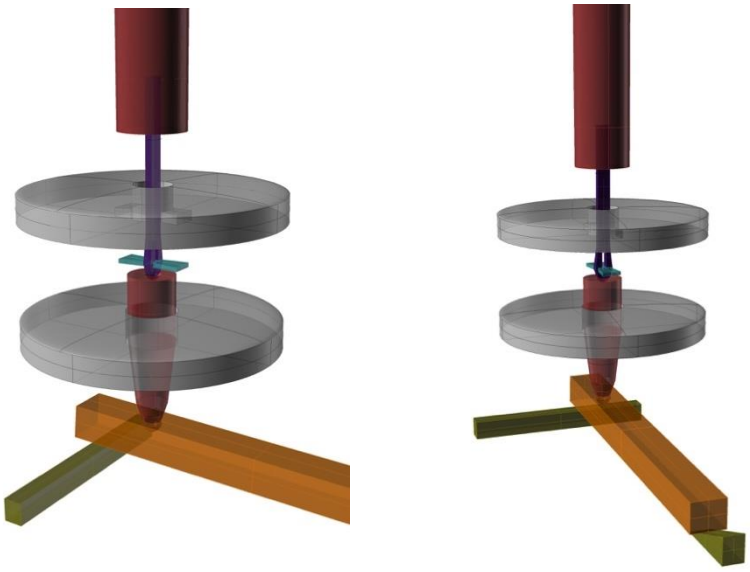


Figure 4-18 : mécanisme technique du moulin à vent à axe vertical de type Sistan.

Dernier progrès technique pour le mécanisme du moulin à vent : l'apparition d'une nouvelle façon de relier l'axe vertical à la lame métallique. Grâce au changement de la forme et à l'installation d'un nouvel axe portant le poids de la meule, le mécanisme technique de cette catégorie de moulin à vent devint plus simple et plus pratique. Le point clé de ce progrès technique réside dans la suspension de la lame métallique et de la pierre supérieure grâce à une nouvelle forme donnée à l'axe vertical, transférant la rotation de la roue éolienne à la pierre tournante. Dans la version précédente, l'axe vertical, installé au-dessous de l'axe de la roue éolienne, reposait tout simplement sur la lame métallique ; dans la version corrigée du mécanisme, la lame transformée passe par une ouverture percée dans l'axe vertical de sorte qu'elle est désormais suspendue ; la pierre supérieure, qui repose sur cette lame, transfère son poids sur l'axe vertical (figure 4-17).

Cet axe vertical modifié a une tête sphérique qui se loge dans la bouche d'une pièce de bois verticale qui prend tout le poids du mécanisme technique, les meules et la roue éolienne. Pour savoir pourquoi cette correction survit dans le mécanisme technique, il faut en noter les avantages. D'une part, l'usure de la tête de la pièce en bois est considérablement diminuée – dans la version précédente, l'usure posait problème et entraînait souvent un disfonctionnement de la meule et une baisse de la qualité de la farine. Grâce à cette modification le problème est progressivement résolu. D'autre part, la nouvelle combinaison de la lame métallique et de l'axe vertical, qui renforce également le lien entre la lame métallique et l'axe vertical, entraine une augmentation du rendement du moulin à vent par l'intégration de toutes les pièces tournantes en une seule structure (figure 4-18). Donc, ici, contrairement à la version précédente, le mécanisme technique est scindé en deux parties principales, la partie fixe et la partie mobile. Grâce à cette correction technique, le réglage de la distance entre les deux meules devient par ailleurs plus facile.

Nous défendons la thèse selon laquelle cette modification s'est produite au Sistan vers le XVIII^{e} siècle, lorsque le dernier type de moulin à vent à axe vertical est apparu. Les moulins à vent de ce type – nous en avons trouvé six autour du village abandonné de Hozdar – ont perdu leur mécanisme technique car il était fabriqué en bois ; il est naturellement impossible d'en retrouver des traces trois siècles plus tard. Mais on trouve dans le village de Khâncharaf[155] une

[155]- Village situé près de Nehbandân, ville autrefois considérée comme faisant partie du Sistan. Dans cette ville se trouve une chaîne de ce type de moulins à vent bien restaurée. Les différences entre le mécanisme technique de ces moulins à vent et les moulins à vent du Khorasan nous laissent penser que ces moulins à vent furent très probablement construits dans le style des moulins à vent du Sistan, d'autant que le principal matériau utilisé

série de moulins à vent fonctionnant avec ce mécanisme avancé, ce qui laisse supposer que le dernier type de moulin à vent du Sistan bénéficiait également de ce progrès technique, bien que sa morphologie architectonique unique fût très en avance par rapport aux types précédents. L'intégration de pièces mobiles représenta un progrès remarquable pour le moulin à vent à axe vertical, mais le progrès le plus important – il faut le noter – a trait à l'évolution morphologique. Nous avons signalé précédemment l'originalité du corps architectonique du moulin à vent, particulièrement celui de type Sistan. Grâce aux écrits d'Al-Dimashqi nous savons que le mécanisme technique de tous les moulins à vent à axe vertical jusqu'au XIII^{e} siècle était sûrement celui du premier moulin à vent.

La deuxième partie du mécanisme technique du moulin à vent à axe vertical est la roue éolienne. Les roues éoliennes peuvent être conçues selon des modèles différents ; cela est dû à la diversité de chaque région en matière de matériaux. Mais ce qui les différencie vraiment, c'est le nombre et la forme de leurs pales. Nous pouvons classer les roues éoliennes des différents types de moulins à vent à axe vertical en quatre grandes catégories : la roue éolienne de type méditerranéen, la roue éolienne de type Hérat, la roue éolienne de type Khorasan et la roue éolienne de type Sistan et Khorasan du Sud. Nous n'avons aucune trace de roue éolienne de type méditerranéen. Mais selon les écrits d'Al-Dimashqi, il s'agissait d'une roue à 12 pales qui fonctionnait comme une voile, et dont le nombre de pales pouvait descendre à 6.

D'après le géographe, pour fabriquer les pales on utilisait une sorte de tissu de coton qui recouvrait complètement chacune d'elle. Quand le vent soufflait fort, il suffisait d'ôter les tissus de certaines pales pour diminuer le nombre de pales actives. Les deux autres types ont neuf pales, mais dans le type Hérat chaque pale se divise en deux parties, ce qui augmente sa résistance et l'empêche de casser sous la force du vent. Cette technique de fabrication est d'autant plus nécessaire que les pales de ce type sont fabriquées avec une seule rangée de bambou fin (figure 4-20).

pour la fabrication des pales de la roue éolienne de ce type de moulin est une sorte de bambou très fin qui se trouve notamment au bord du lac Hamoun, dans le Sistan actuel.

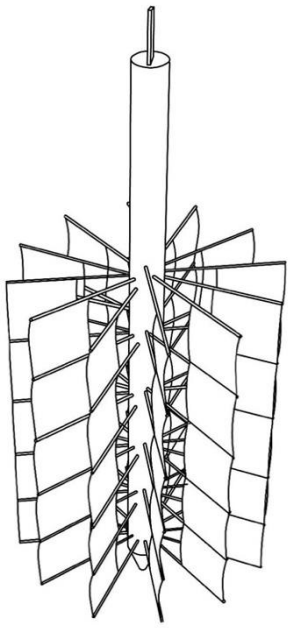


Figure 4-19 : roue éolienne avec des pales en tissu dans le mécanisme technique du moulin à vent décrit par Al-Dimashqi sur la côte méditerranéenne.

Figure 4-20 : 1. Roue éolienne du moulin à vent de type Hérat dans le village de Chekiban.
2. Roue éolienne du moulin à vent de type Khorasan dans le village de Nachtifan.

La fabrication d'une roue éolienne avec des pales légères permet au moulin à vent de fonctionner avec des vents moins forts qu'au Sistan et au Khorasan. Le troisième type de roue éolienne a également huit pales. Au Khorasan, on utilise des pièces de bois longues et très fines. Dans le cas du quatrième type, au Sistan, les pales sont fabriquées avec plusieurs couches de bambou, ce qui leur donne une épaisseur et les rend résistantes face au vent fort du plateau. Ce type de fabrication est similaire sur les moulins à vent du Khorasan du Sud, en particulier ceux de la ville de Nehbandân et du village de Khâncharaf.

Nous avons peu d'informations sur la roue éolienne qui était utilisée pour le moulin à vent de type Sistan (les six moulins à vent à axe vertical de Hozdar). Mais d'après la taille de ce moulin à vent et les traces laissées sur les murs intérieurs de la chambre de la roue éolienne, nous pensons que ce moulin à vent, comme le moulin à vent de type méditerranéen, avait une roue éolienne à douze pales, ce qui lui donnait suffisamment d'énergie pour faire tourner la meule qui, selon nous, était l'une des plus grandes de sa catégorie.

Dans les moulins à vent de types Hérat et Khorasan, la distance entre les deux murs parallèles de la chambre de la roue éolienne oscillait entre 3,5 et 4 mètres ; dans le cas du moulin à vent de type Sistan à Hozdar cette distance atteint 7,5 mètres, ce qui montre que le diamètre de la roue éolienne était de 7 mètres ou plus ; les traces d'érosion sur la surface intérieure des deux murs peuvent d'ailleurs justifier cette hypothèse (figure 4-21). Comme nous l'avons indiqué précédemment il est très probable que les matériaux utilisés dans la fabrication de cette roue éolienne étaient ceux qui avaient été utilisés pour les moulins à vent de la ville de Nehbandân et du village de Khâncharaf, au nord du Sistan actuel. Notre méconnaissance du mécanisme technique de ces moulins à vent, la volonté actuelle de l'OHCAT[156] de les faire enregistrer au patrimoine mondial de l'UNESCO et donc l'urgence de les restaurer nous ont obligés à lancer une analyse numérique et une modélisation technique de façon à trouver l'endroit où leur roue éolienne aurait pu être installée, sa taille, sa forme ainsi que les matériaux accessibles pour la fabrication de son mécanisme.

Figure 4-21 : trace de la roue éolienne sur les murs d'un moulin à vent de type Sistan à Hozdar et distance entre les deux murs parallèles au courant du vent.

[156]- Organisation de l'héritage culturel, de l'artisanat et du tourisme.

Détails du mécanisme technique du moulin à vent à axe vertical

Les éléments constitutifs du mécanisme technique du moulin à vent ont des rôles différents ; leur coordination entraîne le fonctionnement du moulin à vent. Cette partie dynamique du moulin à vent est constituée de divers organes : *sarpol* ou *sargazak*, *kaleh-sur* ou *kaloussi*, *qalandarak*, *tirpol* ou *tir-e amoudi*, *pale* ou *parreh*, *bazou* ou *bahou*, *godg-bazou* ou *pochtiban*, *tahta*, *routa*, *sar-takht* ou *tavareh*, *tah-tir* ou *mouchteh* et *kharak* ou *cho-takht*.

Sarpol ou *sargazak*

Le travers de bois situé sur les deux murs parallèles et prenant l'axe vertical rotatif est appelé *sargazak* au Khorasan du Sud et *sarpol* ou *kharpol* au Khorasan-e Razavi, notamment dans les villes de Khâf et de Nashtifân. Ce travers est fabriqué avec des arbres sauvages ou cipres ; il mesure de 5,5 à 6 mètres, il est parfois en forme de Y. La forme en Y évite que le mouvement rotatif de l'axe vertical fasse tourner ou remplace cette traverse. Elle évite aussi que la force supplémentaire qui, de temps en temps, est imposée par l'axe rotatif casse le *kaleh-sur*. La forme en Y du *sargazak* ou *sarpol* est donc importante. Cela dit, nous avons plusieurs exemples de moulins à vent dans différentes régions qui ne sont pas pourvus de *sarpol* en forme de Y, surtout au Khorasan du Sud.

Figure 4-22 : un *sarpol* ou *sargazak* simple installé sur deux murs parallèles dans le village de Sangân.

Figure 4-23 : un *sarpol* en forme de Y dans le village de Khâncharaf.

Kaleh-sur ou *kaloussi*

Le *kaleh-sur* ou *kaloussi* est une partie du mécanisme technique qui tient l'axe rotatif. Il est nommé *kaloussi* au Khorasan-e Razavi et *kaleh-sur* au Khorasan du Sud. Cet organe est constitué de deux pièces de bois d'une taille de 50-60 centimètres. Dans chacune, il y a une partie évidée de la forme d'un demi-cylindre. Lorsque ces deux parties se rejoignent grâce à deux boulons ou deux clous en bois, elle surgisse la place de l'axe vertical de la roue éolienne. Ces deux pièces sont normalement fabriquées en bois de mûrier, les clous étant en bois de pistachier sauvage, le *baneh*. Pour attacher l'axe vertical au *sargazak* ou *sarpol,* on utilise le *kaleh-sur* que l'on fixe au *sarpol* avec des visses et des boulons métalliques. Autrefois, ces deux pièces s'attachaient avec des clous en bois. On fait pénétrer les clous en bois dans des trous percés dans les deux pièces, puis on fait une rainure sur la partie des clous qui sortent des trous. Enfin, grâce à des petits *wedges* ou pièces de bois, on fixe les deux parties (figure 4-24).

Dans certains cas, sur les moulins à vent de Khâf et Nashtifân par exemple, le *kaloussi* est un trou cylindrique vertical creusé dans le *sarpol* ; les deux pièces s'attachent grâce à un tube métallique ou une pièce ronde en bois disposés au centre de l'axe vertical (figure 4-25).

Figure 4-24 : *kaleh-sur* et son attache à l'axe vertical dans l'un des moulins à vent détruits du Khorasan du Sud. Ici, la tête déformée du *tirpol* entre dans l'espace vide du *kaleh-sur*.

Figure 4-25 : *kaleh-sur* ou *kaloussi* fabriqué pour le moulin à vent de Chekiban près de Hérat. Le *tirpol* s'attache grâce à une autre pièce de bois nommée *qalandarak*.

Qalandarak

Il existe essentiellement deux façons d'attacher le *tirpol* au *sarpol*. Au Sistan et au Khorasan du Sud, on affile la tête d'un *tirpol* pour le loger dans le *kaleh-sur* ; au Khorasan-e Razavi et à Hérat, les charpentiers utilisent un autre élément nommé *qalandarak*. Il s'agit d'une pièce de bois dont la tête est cylindrique et la taille cubique. Les charpentiers la fixent sur le *tirpol* avec des boulons et des anneaux métalliques. Le *qalandarak* est en fait un axe grâce auquel le *tirpol* tourne dans le *sarpol*. Dans certaines régions comme *Sangân*, au Khorasan-e Razavi, on utilise un tube métallique court logé au centre de la partie supérieure du *tirpol*. Ce tube entre dans l'espace évidé du *kaleh-sur* ou *kaloussi* et se fixe avec des boulons. Il y a une différence entre les moulins à vent du Khorasan-e Razavi et les moulins à vent de Hérat sur la

forme et la fixation du *kaleh-sur* ou *kaloussi*. Au Khorasan-e Razavi, le *kaloussi* est un trou cylindrique creusé dans l'épaisseur du *sarpol* pour y mettre le *qalandarak* (figure 4-26). C'est dans cette région que l'on voit l'utilisation d'un tube métallique pour le *qalandarak* (figure 4-27).

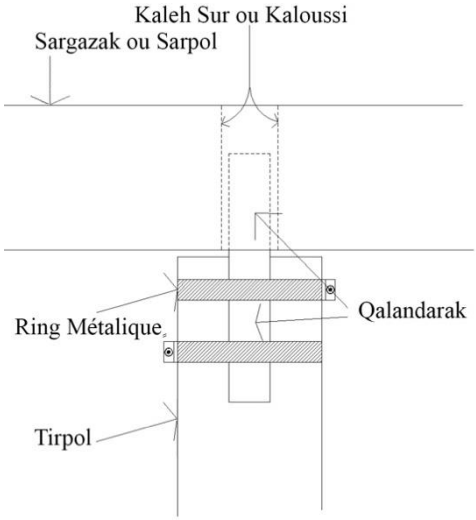


Figure 4-26 : détail de la fixation du *tirpol* au *sarpol* dans les moulins à vent du Khorasan-e Razavi.

Figure 4-27 : *kaloussi* et *qalandarak* dans l'un des moulins à vent du village de Sangân.

Dans les moulins à vent de type Hérat, le *kaleh-sur* s'attache au *sarpol* différemment. Comme nous l'avons montré précédemment, dans le cas du moulin à vent de Chekiban le charpentier fabrique le *kaleh-sur* à partir de deux pièces dans lesquelles il a prévu de creuser un espace cylindrique et l'attache au *sarpol* avec des clous en bois (figures 4-28 et 4-29).

Figure 4-28 : un *qalandarak* installé dans l'axe du *tirpol* d'un moulin à vent de type Hérat à Chekiban.

Figure 4-29 : *tirpol* d'un moulin à vent de type Hérat attaché au *sarpol* grâce à un *qalandarak*.

Les *kaleh-surs* des moulins à vent du Khorasan du Sud sont identiques mais on les attache au *sarpol* avec de longs boulons et des visses (figure 4-30). Il faut également rappeler que sur les moulins à vent du Khorasan du Sud, les charpentiers n'utilisent pas d'élément comme le *qalandarak* mais affilent la tête du *tirpol* de manière à ce qu'il entre dans le *kaleh-sur*. Ici donc, c'est le *tirpol* qui tourne directement dans le *kaleh-sur*.

Figure 4-30 : *kaleh-sur* et *tirpol* d'un moulin à vent de Khâncharaf, au Khorasan du Sud.

Figure 4-31 : *kaleh-sur* d'un moulin à vent de Khâncharaf, au Khorasan du Sud.

Figure 4-32 : *kaleh-sur* et *tirpol* de l'un des moulins à vent de Khâncharaf. Ici on utilise deux tubes métalliques parallèles à la place du *sarpol*.

Tirpol ou *tir-e amoudi*

Le *tirpol* ou *tir-e amoudi* est la partie de l'axe vertical rotatif sur laquelle sont attachées toutes les pales. Dans la plupart des régions, cet axe est connu sous le nom de *tirpol*. Il relie le *sarpol* à la pierre supérieure de la meule et la fait fonctionner. Sa longueur varie entre 8 et 10 mètres selon la hauteur du moulin à vent ; son épaisseur oscille normalement entre 35 et 50 centimètres. L'épaisseur du *tirpol* doit être identique dans la partie supérieure et dans la partie inférieure. Comme on ne dispose pas toujours d'une telle pièce, on construit le *tirpol* en deux ou trois parties. Ainsi que nous le montrons sur la figure 5-42, ces pièces sont reliées les unes aux autres par des clous en bois et maintenues à l'extérieur par des anneaux métalliques. Pour fabriquer un *tirpol* on utilise en principe du bois de cipre, connu localement sous le nom de *najou.*

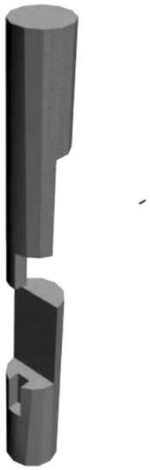


Figure 4-33 : manière dont sont attachées les différentes pièces d'un *tirpol*.

Figure 4-34 : fabrication de chacune des pièces d'un *tirpol*.

Figure 4-35 : manière dont s'agencent les pièces fabriquées.

Figure 4-36 : croquis de la façade d'un *tirpol* ; *tirpol* abandonné dans un moulin à vent de Nehbandân et détail des ouvertures où viennent se loger les *bazous* de la roue éolienne.

Parreh, *bazou* (*bahou*) et *godg-bazou*

La roue éolienne d'un moulin à vent est constituée de neuf pales. Ce chiffre peut se monter à douze et descendre à six. La pale est connue en persan sous le nom de *parreh*. Dans des régions comme le Sistan et Nehbandân, les locaux nomment parfois un moulin à vent selon le nombre de ses pales ou *parrehs.* Au Sistan, on parle de l'*asiab-e do parreh* ce qui signifie « moulin à vent jumeau » ou doté de deux roues éoliennes. On utilise donc de temps en temps le mot *parreh* pour désigner la roue éolienne. Chaque pale ou *parreh* s'attache à l'axe vertical séparément. Par ailleurs, chaque pale était considérée comme une unité pouvant devenir la propriété de tel ou tel. Dans certains villages, des personnes étaient propriétaires d'une ou plusieurs pales. Aujourd'hui, cela pose problème lorsqu'on doit restaurer les moulins à vent. Trouver un accord entre tous les propriétaires d'un moulin à vent est parfois difficile voire impossible, car dans la plupart des cas les principaux propriétaires sont morts et les parts ont été divisées entre leurs héritiers.

Chaque *parreh* s'attache à l'axe vertical ou *tirpol* par au moins cinq ou sept *bazous* également appelés *bahou* dans certains régions. Les *bazous* sont de petits travers horizontaux d'une longueur de 175 cm et d'une épaisseur de moins de 7 cm. Ils transfèrent la force du vent à l'axe vertical et le font tourner. Ces cinq *bazous* tiennent ensemble les matériaux utilisés pour fabriquer le corps d'une pale, qui diffèrent selon les régions. Mais le détail de leur fixation est presque toujours identique.

Figure 4-37 : morceaux de bois appelés *bazou* ou *bahou* utilisés pour attacher les pales à l'axe vertical.

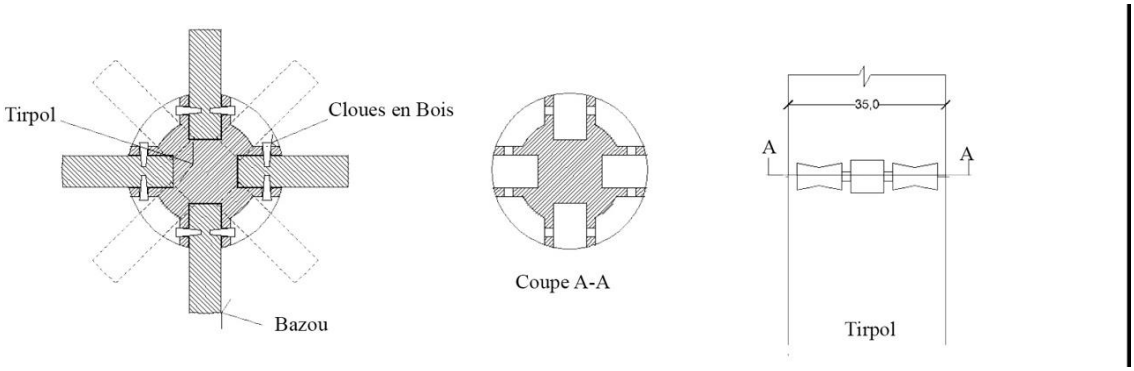


Figure 4-38 : coupe et vue de face d'un *tirpol*, et manière dont on attache les *bazous* au *tirpol*.

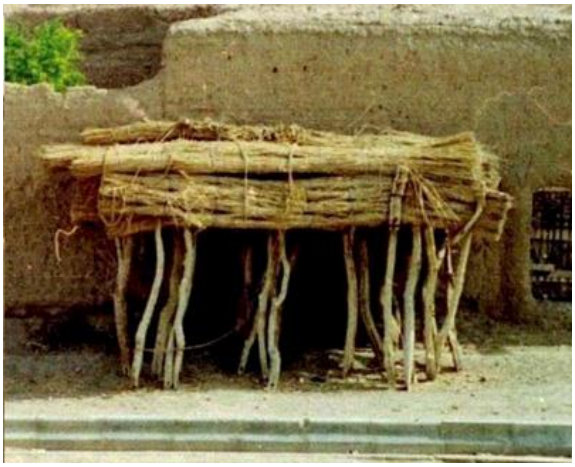


Figure 4-39 : normalement, une pale se fabrique avec cinq ou sept *bazous*, qui se fixent à l'axe vertical tournant.

Figure 4-40 : autre façon de fabriquer une pale, cas du moulin à vent de Chekiban près de Hérat : on fixe d'abord les *bazous* sur l'axe vertical puis on attache la pale fabriquée avec du bambou fin.

La fabrication d'une pale ou *parreh* dépend de la situation climatique et géographique de la région, et de ses ressources en matériaux. Au Sistan et au Khorasan du Sud, on dispose cinq *bazous* sur le sol, à 50 cm les uns des autres, et on les recouvre de bambous poussant à proximité appelés *kholak*. On utilise également de fines branches de tamarinier comme structure entre les *bazous* et les bambous, et pour le tissage de ces objets on utilise les feuilles de ce bambou. Résultat : les pales sont lourdes et épaisses, bien adaptées à la force du vent de la région (figure 4-41).

Figure 4-41 : pales, *parrehs*, fabriquées avec du *kholak* et des branches de tamarinier au Sistan et au Khorasan du Sud.

Au Khorasan-e Razavi en revanche, les *bazous* s'installent directement sur le *tirpol*. Les têtes des *bazous* qui seront fixées à l'axe vertical sont d'abord affilées en forme de trapèze pour qu'elles se logent correctement dans les trous creusés sur le corps du *tirpol*. Ces trous,

appelés *kom*, sont rectangulaires ; ils ont une taille de 5,4 x 5,9 cm sur la surface du *tirpol* et de 5,4 x 5 cm au fond. Des deux côtés du *kom*, il y a un autre trou ; lorsque les *bazous* se logent dans les *koms*, un clou en bois pénètre dans cette ouverture de façon à ce que le *bazou* et le *tirpol* soient bien fixés.

La fixation des *bazous* à l'axe vertical commence à 30 cm du sol (plafond de l'étage inférieur) et finissent en haut à 30 cm du *sarpol*. Les autres *bazous* s'installent à 50 cm les uns des autres, entre le premier et dernier *bazou*. Au Khorasan-e Razavi, les charpentiers utilisent de grandes planches de bois pour disposer la pale sur les *bazous*. Elles ont une largeur de près de 14 cm, une épaisseur de 1 cm et une longueur atteignant 6 mètres, en effet de la largeur de la roue éolienne. Dans cette région, on laisse un petit espace entre les planches de bois formant la pale. Chaque pale ou *parreh* s'installe grâce à au moins 4 ou 5 de ces planches (figure 4-42).

Figure 4-42 : La roue éolienne telle qu'elle est conçue au Khorasan-e Razavi, à Nashtifân. Elle est fabriquée avec de fines planches de bois.

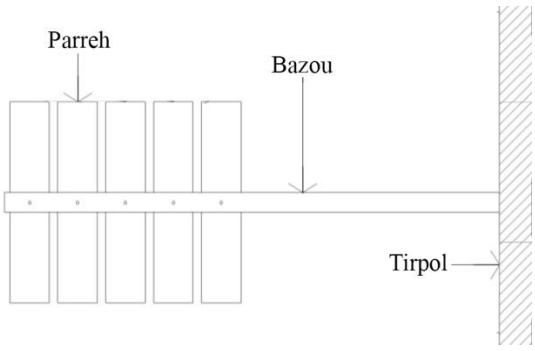


Figure 4-43 : croquis d'une pale de la roue éolienne d'un moulin à vent de Nashtifân.

La fabrication des pales est différente à Hérat et en Iran. Les pales de la roue éolienne des moulins à vent de type Hérat sont composées de deux pièces, mais elles sont attachées au *tirpol* comme on le fait au Khorasan. Les charpentiers installent d'abord les *bazous* sur le *tirpol*,

puis ils ajoutent les pales, fabriquées séparément avec de fines branches de bambous. Ces branches de bambous sont jointes avec de la peau de chameau.

Figure 4-44 : roue éolienne d'un moulin à vent de type Hérat à Chekiban : chaque pale est composée de deux demi pales.

Figure 4-45 : demi pale, fabriquée avec de fines branches de bambou jointes avec de la peau de chameau, moulin à vent de Chekiban.

Pour fixer toutes les pales ou *parrehs* aux *bazous*, on utilise une pièce de bois sur la partie terminale de chaque *bazou* nommée *pochtiban* (« support »), *rouband* ou *godg-bazou.* Ce morceau de bois mesure 85 cm de long. Sa largeur varie en fonction de chaque type de moulin à vent. Le corps de la pale, qui est fabriqué avec les matériaux indiqués ci-dessus, se loge entre le *bazou* et *godg-bazou.* Il est fixé par des clous en bois. Pour fixer ces clous, on crée une rainure sur leur longueur et leur épaisseur, puis on les fait passer par des trous percés sur le *bazou*, le *godg-bazou* et la pale. Enfin, pour bien attacher les trois pièces, on fait entrer des petits *wedges* en bois dans la rainure terminale créée sur les clous. Ainsi peut-on les attacher aussi solidement que l'on veut (figure 4-45).

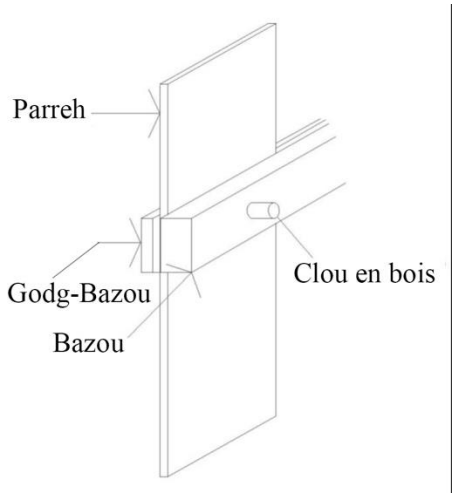


Figure 4-46: croquis montrant la fixation du *bazou*, du *godg-bazou* et du *parreh* dans la structure d'une pale.

Figure 4-47 : photos de la roue éolienne et de sa structure, moulins à vent de Khâncharaf et de Chekiban.

La meule

La meule est constituée de deux pierres rondes d'un diamètre variant entre 1,5 et 2 mètres et d'une épaisseur de près de 20 cm. La pierre supérieure porte le nom de *routa* et la pierre inférieure *tahta.* Le diamètre du *routa* est parfois inférieur à celui du *tahta* ; il en est de même pour son épaisseur. Au centre de ces deux pierres, se trouve une ouverture de forme cylindrique et d'un diamètre de 20 cm. Elle est connue au Khorasan-e Razavi sous le nom de *galougah* et au Khorasan du Sud sous le nom de *galouyeh.* Notons également la présence de motifs circulaires en forme de zigzags, qui seront utiles pour autre élément nommé *navdouni.*

Figure 4-48 : zigzags et *galouyeh* d'un *routa*, pierre supérieure de la meule d'un moulin à vent abandonné de Nehbandân, au Khorasan du Sud.

Figure 4-49 : *routa* et *tahta* de la meule d'un moulin à vent du Khorasan du Sud. Ici, le diamètre du *tahta* est clairement supérieur à celui du *routa*, mais l'épaisseur est presque la même.

La pierre utilisée pour la meule est normalement du granite. Il provient de mines différentes, en fonction de la géographie des lieux. Le Khorasan-e Razavi et le Khorasan du Sud, régions non dépourvues d'espaces montagneux, comptent plusieurs mines de granite qui furent utilisées pour la fabrication des meules. Le Sistan au contraire est une région de plaines et souffre d'une absence de mines productives et en particulier de mines de granite. Pour la fabrication de la meule, le Sistan a donc dû recourir à un autre matériau : la terre cuite, choix unique, qui témoigne de l'intelligence des techniciens du Sistan.

Autour de ces moulins à vent se trouvent beaucoup de fragments de meules en terre cuite. Nous ne savons pas si dans l'Antiquité, lorsque le premier moulin à vent fut inventé, on fabriquait la meule de la même manière, mais il est clair que c'est cette méthode qui fut utilisée

pour les moulins à vent subsistant sur le territoire actuel du Sistan. Nous avons également trouvé plusieurs fours autour de chaque moulin, surtout dans la région de Hozdar ; ils sont encore en bon état. La couverture intérieure de ces fours était également cuit, elle est devenue rouge sous l'action de la haute température. Les fragments trouvées nous montrent que les techniciens du Sistan chauffaient la terre crue jusqu'à la température de fusion. Cette température permettait à la meule de se solidifier et de intégrée, même si cette solidité n'atteint pas celle du granite. Compte-tenu de la présence de plusieurs fours à côté des moulins à vent de Hozdar, il semblerait que la meule se cassât assez fréquemment pendant la rotation. Apparemment, les techniciens étaient obligés de refabriquer régulièrement des meules. Autre problème sérieux qui obligeait les meuniers à construire un four pour chaque moulin à vent pour logistique de cette invention et : la forte érosion et la corrosion des deux pierres de la meule qui tournaient à une vitesse considérable. Il faudrait des tests supplémentaires pour bien présenter la combinaison des matériaux utilisés dans ce type de meule, ce qui n'est pas l'objet de notre recherche. Mais selon nous, le matériau utilisé pour cette fabrication est très probablement de la terre crue de la même région. Un fait notable : le haut niveau de technicité antique de cette région, qui a toujours aidé les techniciens à trouver une solution brillante à des problèmes qui semblaient insolubles et qui fut également à la source même de l'invention du moulin à vent.

Figure 4-50 : fragments d'une meule cassée, retrouvés à côté du petit moulin à vent de Hozdar.

Figure 4-51 : four situé à proximité du petit moulin à vent de Hozdar.

Figure 4-52 : espace intérieur d'un four à proximité du petit moulin à vent de Hozdar.

Navdouni et *asbak*

Le *navdouni* ou *chorrouneh* est une pièce de bois en forme de U permettant de relier directement le *kondak* à blé et le *galouyeh* pour alimenter la meule. Au-dessous du *navdouni* se trouvent deux petites bases nommées *asbak ou lok-lokeh.* Le *navdouni* est fixé au plafond du moulin à vent grâce à un câble fin appelé *cheytounak.* Le *navdouni* vibre grâce à la pièce appelée *asbak.* C'est le mouvement de la meule qui crée une vibration car les zigzags sur le *routa* se sont frappé aux bases d'*asbak* et cela devient la source principale de la vibration, ce qui fait marcher le blé dans le *navdouni* depuis le *kondak* à blé vers le *galouyeh* du *routa.*

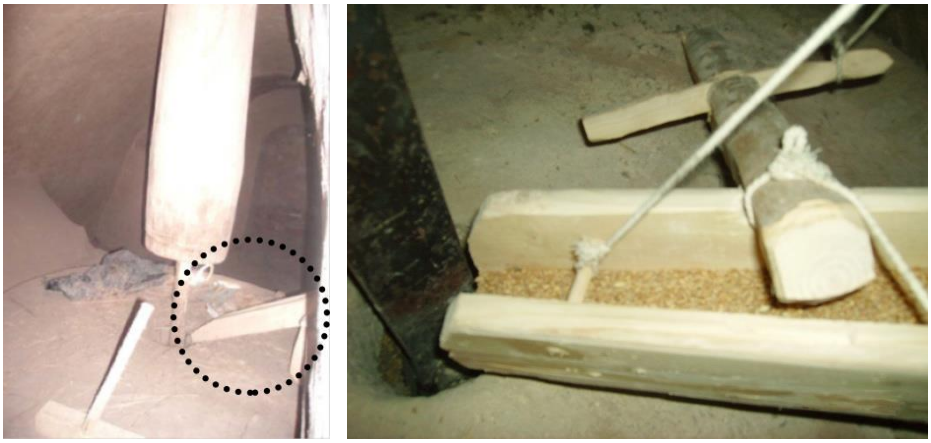


Figure 4-53 : *navdouni* dans l'un des moulins à vent de Khâncharaf, au Khorasan du Sud. La pièce de bois sur la photo de droite porte le nom de *daneh-kech* ; elle est utilisée par le meunier pour accélérer manuellement le mouvement du blé dans le *navdouni*.

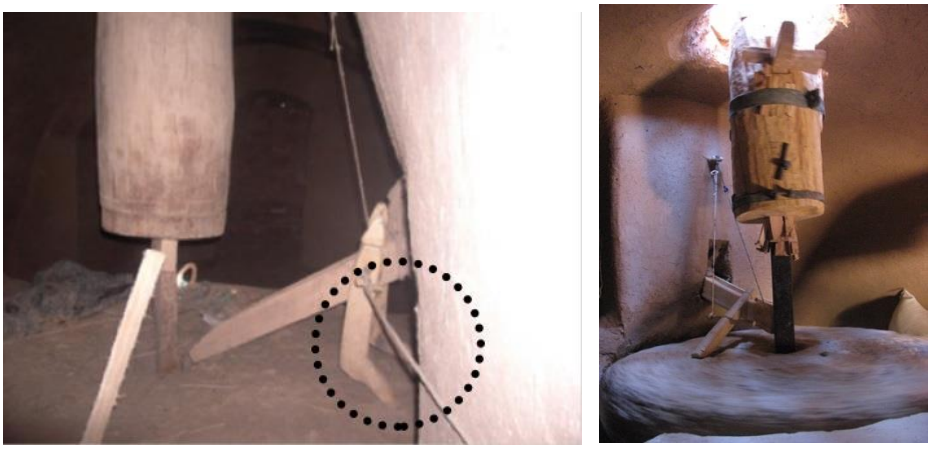


Figure 4-54 : à gauche, *asbak*, *cheytounak* et *navdouni* dans un moulin à vent de Khâncharaf ; à droite, les mêmes éléments et le *kondak* à blé dans le moulin à vent de Chekiban.

Tavarreh, *mikh*, *mouchteh*, *kharak* et *gisse*

Le *sar-takht* ou *mikh* est une longue pièce métallique rectangulaire d'une longueur oscillant entre 50 et 70 cm et d'une épaisseur allant de 5 à 7 cm. Une partie de cet élément entre dans le *tirpol* et se fixe par des boulons et un anneau métallique périphérique. La tête de cette pièce métallique est déformée pour s'adapter au *tavarreh* (figure 4-55).

Tavareh, tabareh ou *kojeh* est une pièce métallique en forme de papillon. Sa longueur varie entre 36 et 50 cm selon les pierres de la meule. Sa largeur, dans sa partie la plus étroite au centre, atteint 6-7 cm et dans ses parties les plus larges, de chaque côté, 10-12 cm. L'épaisseur du *tavarre*h varie normalement entre 2 et 3 cm .

Figure 4-55 : à gauche, *mikh* ou *sar-takht* installé dans l'axe vertical d'un moulin à vent de Nashtifân au Khorasan-e Razavi. À droite, la même pièce à Chekiban près de Hérat.

Nous connaissons trois types de *tavarrehs* : les premier et deuxième types sont très proches du point de vue de la forme mais différents du point de vue de l'installation sur le *sar-takht*. Le premier *tavarreh*, qui était très probablement utilisé dans le moulin à vent de premier type, avait un système technique très proche du moulin à eau à axe vertical. Il s'installait sur le *mikh* qui monte vers l'axe vertical de la roue éolienne. Un trou de forme cubique percé en son centre laissait entrer la tête du *mikh*, légèrement plus étroite que le trou. Après l'installation du *tavarreh* sur le *mikh*, la pierre du *routa* avait au centre de sa surface inférieure un espace vide en forme négative de papillon. Elle assistait sur le *tavarreh* comme dans le mécanisme du moulin à eau à axe vertical. Ainsi le *routa* était-il presque suspendu sur le *tahta* et tournait par la force de la roue éolienne installée au-dessous à cette époque.

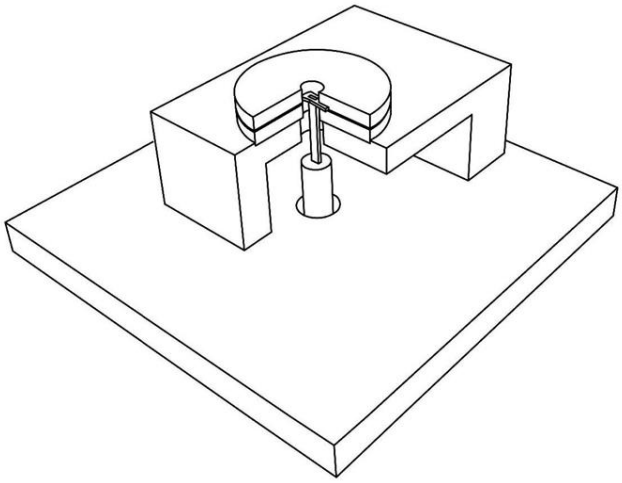


Figure 4-56 : croquis montrant la façon d'attacher le *tavarreh* au *mikh* dans le premier type de moulin à vent. Ce système ressemble beaucoup à celui du moulin à eau à axe vertical.

Figure 4-57 : *tavarreh* et *routa* d'un moulin à eau à axe vertical dont l'espace vide destiné à l'installation du *tavarreh* est clairement visible. Selon nous, un moulin à vent de premier type avait très probablement le même système technique.

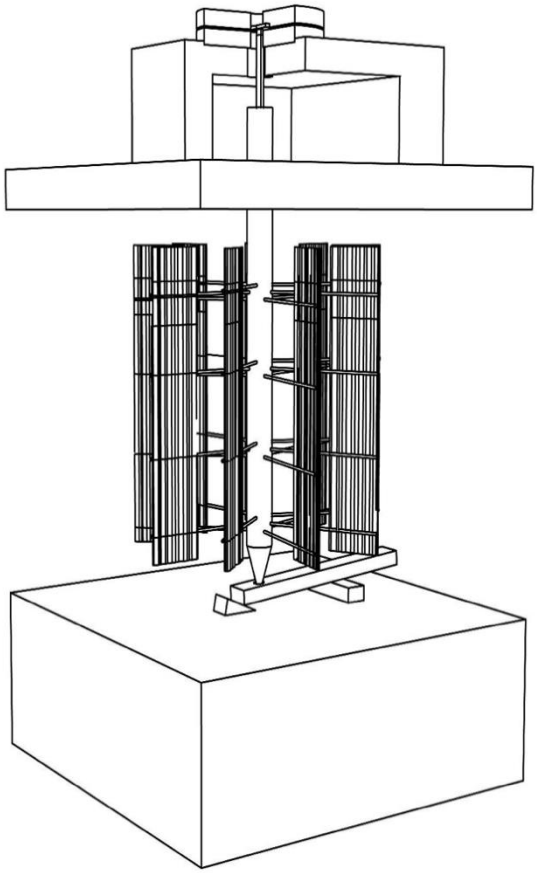


Figure 4-58: croquis imaginaire du système technique d'un moulin à vent de premier type.

Le *tavarreh* de deuxième type est utilisé sur les moulins à vent de Hérat et du Khorasan-e Razavi. Il est la clé du changement de place de la roue éolienne, transférée de la chambre inférieure à la chambre supérieure. C'est une modification capitale. La roue éolienne installée en-dessous de la meule ne fonctionnait pas bien. Mais les meuniers avaient des difficultés à lui trouver une place en hauteur. La question était la suivante : si on l'installe au-dessus de la meule comment la pierre supérieure peut-elle tourner ?

Dans le mécanisme du moulin à eau, le *routa* (pierre supérieure) était assis sur un axe vertical métallique qui partait de la roue tournante, la turbine à eau. Le *tavarreh* entrait dans l'espace vide situé sur la surface inférieure du *routa*, restait fixe et faisait tourner le *routa*. Comme le *routa* était suspendu sur l'axe vertical de la turbine à eau, il fonctionnait très facilement avec la force de la turbine à eau. Le problème était en fait de trouver une façon de suspendre le *routa* et en même temps de transférer la rotation de la roue éolienne au *routa* pour le faire tourner. Deux découvertes se sont probablement révélées très utiles pour résoudre le problème. C'est d'abord l'apparition du *mouchteh*, une pièce de forme conique fabriquée en bois de *seroun* ou *benouch* (arbres locaux). Il mesure 40-50 cm de haut, son diamètre oscille

entre 3 et 4 cm sur sa partie la plus fine, et entre 13 et 15 cm sur sa partie la plus large. Sa tête passe par un petit trou d'un diamètre d'environ de 5 cm, là où le *tavarreh* et le *routa* sont assis. Il est lui-même assis sur une pièce de bois appelée *chotakht* ou *kharak*, sur laquelle on lui creuse un emplacement pour qu'il se fixe bien et ne bouge pas sous la force verticale.

Comme la façon et la direction du transfert de la rotation de la roue éolienne a été modifié, la forme du *tavarreh* a aussi subi une modification importante. Le *tavarreh* a toujours eu la forme d'un papillon mais le trou en son centre a évolué : à l'intérieur, il a pris une forme demi sphérique et à l'extérieur, dans la direction de la roue éolienne, il a pris la forme d'une poignée. Le *tavarreh* et le *routa* étaient assis sur la tête du *mouchteh* et les deux tournaient grâce au transfert du mouvement de la roue éolienne par le *sar-takht* ou *mikh.* Le *mikh* a également été modifié de façon à pouvoir prendre la poignée du nouveau *tavarreh*. À cette époque, l'ensemble de ce mécanisme était révolutionnaire : jusqu'au XIII^{e} siècle, les charpentiers avaient fabriqué le système technique des moulins à vent à axe vertical plus ou moins à l'identique du système du moulin à vent premier. C'est exactement la même chose que le dessin d'*Al-Dimachqi,* le géographe du XIII^{e} siècle le justifie.

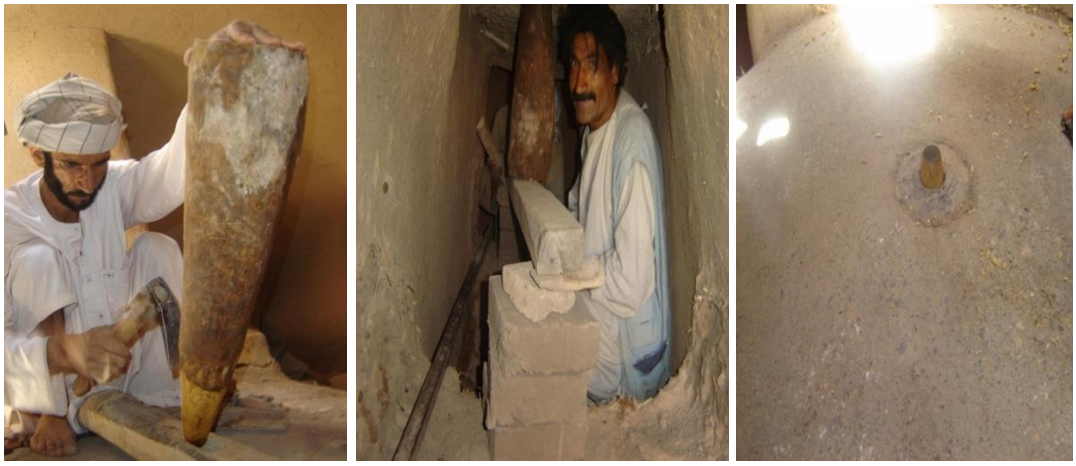


Figure 4-59 : fabrication et installation d'un *mouchteh* dans l'ouverture centrale du *tahta*, moulin à vent de Chekiban près de Hérat.

Figure 4-60 : installation du *tavarreh* et du *routa* sur le *mouchteh*, moulin à vent de Chekiban près de Hérat.

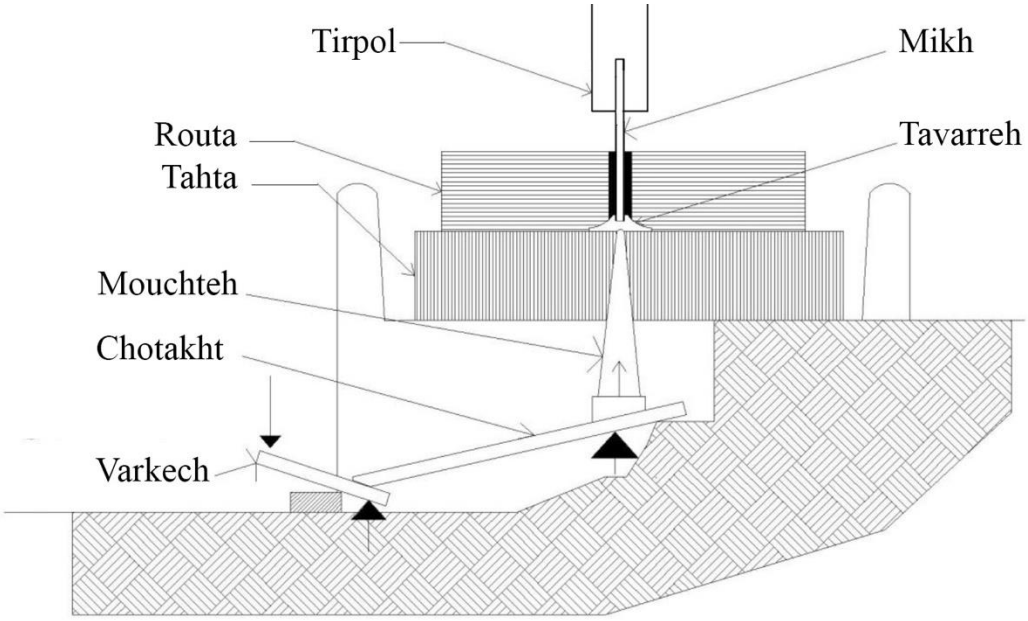


Figure 4-61 : coupe montrant la façon dont sont agencés le *mouchteh*, le *tavarreh*, le *mikh*, le *routa*, le *tahta* et le *tirpol* dans les moulins à vent de types Hérat et Khorasan-e Razavi.

Figure 4-62 : installation du *kharak*, du *mouchteh* et du *tahta* sur le moulin à vent de Chekiban près de Hérat.

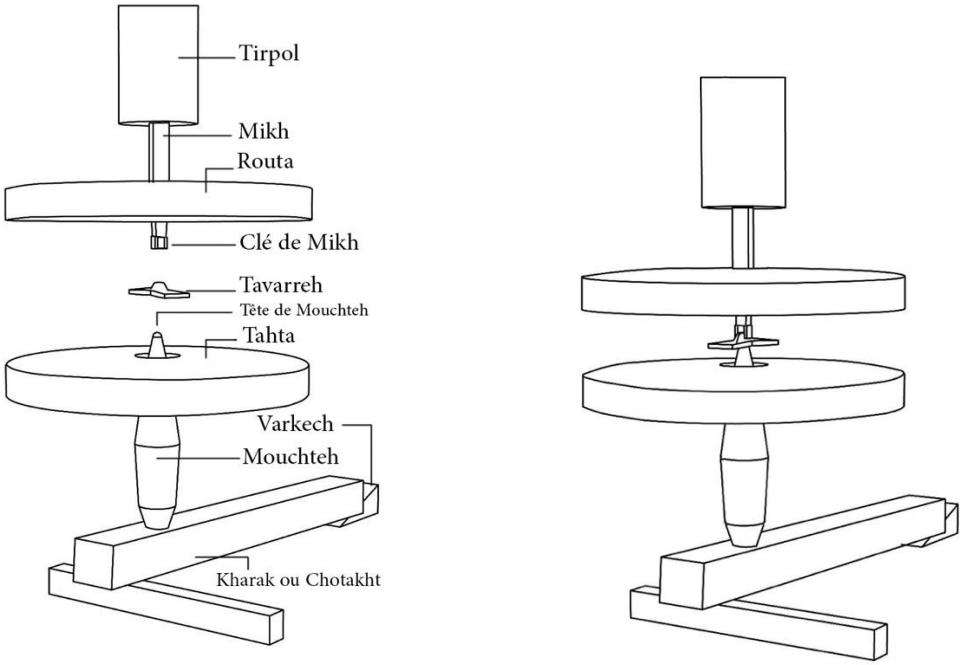


Figure 4-63 : Deux croquis montrant la façon dont sont agencés le *mouchteh*, le *tavarreh*, le *mikh*, le *routa*, le *tahta* et le *tirpol* sur un moulin à vent de types Hérat et Khorasan-e Razavi.

L'évolution technique la plus importante touchant le mécanisme du moulin à vent à axe vertical a pu voir le jour grâce à l'évolution du *tavarreh* et au changement de la place de la roue éolienne. Mais l'évolution du *tavarreh* et la correction du mécanisme technique du moulin à vent à axe vertical n'était pas terminée. Un troisième type de *tavarreh* a vu le jour, subissant une toute dernière modification. Cette fois-ci, il est intégré dans le corps du *mikh* ou *sar-takht*, ces deux éléments devenant une pièce technique bien qu'ils puissent être séparés lorsque les meuniers veulent changer ou affiler le *routa* (la pierre supérieure).

Dans le mécanisme précèdent, la tête du *mouchteh* se casse rapidement. En cause, le poids du *routa* mais aussi la roue éolienne, dont l'effet de rotation intensifie l'usure de la tête de la pièce. Le moulin à vent devait donc s'arrêter de fonctionner pour que l'on change le *mouchteh.* Les charpentiers ont cherché une solution à ce problème et ont finalement décidé d'intégrer le *tavarreh* au *mikh*. Dans cette technique, on garde le trou du *tahta*, mais son diamètre augmente et devient identique à celui du *routa* (près de 20 cm). La forme du *mouchteh* est toujours conique mais on l'installe en sens inverse : on met la partie épaisse dans le trou du *tahta*. Sur cette partie, on évide une demi sphère, là où la tête du *mikh* va se loger et tourner. Pour que le *mikh* tourne bien dans cet espace vide, on déforme sa tête, qui devient une demi sphère, et on pose un tissu adipeux (graisse de chèvre). Ces deux éléments facilitent le mouvement du *mikh* sur la pièce de bois, *mouchteh* nommée ici *tah-tir*. Normalement, les charpentiers fabriquent le *mouchteh* avec un bois solide comme le jujubier et lui donnent toujours une forme conique. Le *mikh* subit une modification très importante : on perce un trou dans le corps de la pièce pour faire entrer le *tavarreh* qui a été transformé et a pris la forme d'un H. Le trou creusé sur le *mikh* a une longueur identique à la largeur du *tavarreh*, de façon à ce qu'il puisse y entrer facilement. La façon d'installer le *routa* sur le *tahta* est un peu différente du système précèdent.

Il faut d'abord faire passer le *mikh* dans le trou du *routa* puis faire passer le *tavarreh* dans le trou du *mikh*. Ensuite, on met la tête du *mikh* sur le *tah-tir*, dans l'espace vide. Le *routa* s'appuie sur le *tavarreh* et ce dernier est assis sur le *tah-tir* par le nouveau *mikh*. Ce mécanisme est apparu au Sistan. On le trouve aujourd'hui uniquement dans cette région et au Khorasan du Sud. Grâce à ce système, le poids de tous les éléments fixes et rotatifs du mécanisme technique sont placés sur le *tah-tir* par le *mikh*. Nous notons donc trois progrès importants dans ce système technique. En premier lieu, le *tavarreh* est libéré du poids de la roue éolienne, il ne supporte que le poids de la pierre supérieure de la meule, le *routa*. Avec ce changement, la meule tourne facilement et le réglage de la distance entre les deux pierres devient plus facile. En deuxième lieu, le poids de la roue éolienne est transféré au *mouchteh* par le *mikh*, ce qui fait sortir le *tavarre*h et le *rout*a de l'axe vertical du transfert du poids et de la rotation. Grâce à cela, l'axe vertical ne connaît plus d'intermédiaire. L'inversion du sens du *mouchteh* le fait évoluer ; cet élément est alors appelé *tah-tir*. Grâce à cette manière d'installer la pièce conique, la tête de la pièce en bois ne s'écrase plus sous le poids du système technique du moulin à vent d'autant que la tête du *tah-tir* est encerclée dans le trou du *tahta.* Grâce à l'épaisseur du *tahta* (20 cm),

on a un anneau protecteur large qui évite que la tête de *tah-tir* ne se détruise sous la pression du poids de la meule et de la roue éolienne.

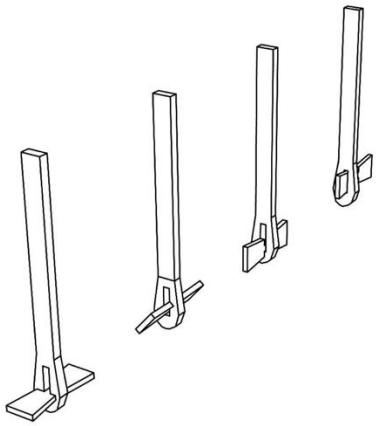


Figure 4-64 : manière de faire entrer un *tavarreh* dans l'ouverture d'un *mikh* de dernière génération.

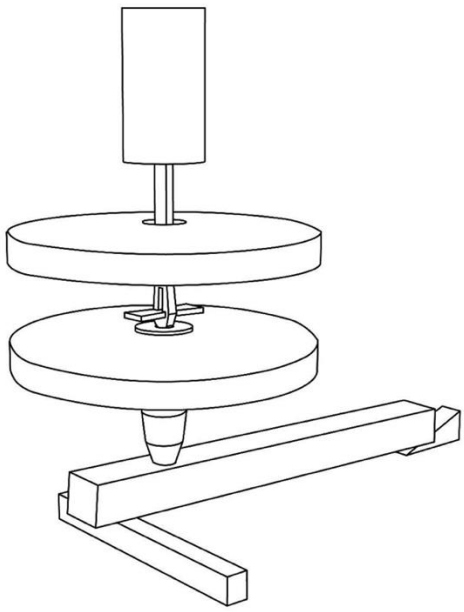


Figure 4-65 : croquis montrant la façon d'installer le *mikh*, le *tavarreh* et le *rout*a sur un moulin à vent du Khorasan du Sud et du Sistan.

Figure 4-66 : Fixation du *mikh* et du *tavarreh* avant et après l'installation.

Le *tah-tir* ou *mouchteh* qui passent par le trou du *tahta* sont assis sur une planche de bois assez épaisse, fabriquée à partir d'une solide pièce en bois de *baneh* ou de *khandjak*. Cette pièce de bois de 30 x 30 et d'une longueur de 2 mètres est appelée *kharak* au Khorasan du Sud et *cho-takht* au Khorasan-e Razavi. En fait, on associe plutôt le *kharak* au *tah-tir* et le *cho-takht* au *mouchteh*. Pour le *kharak*, les charpentiers utilisent normalement un morceau de bois en forme de Y sur lequel ils disposent la partie basse et conique du *tah-tir*. Cette pièce de bois supporte tout le poids du système technique du moulin à vent à axe vertical. Les charpentiers mettent le *kharak* sous la meule et l'installent soit sur le sol soit sur un petit travers de bois. La partie qui sort de l'espace inférieur de la meule est assise sur une autre pièce de bois appelée *varkech* ou *telam* ; elle peut également être un *wedge*. Le *kharak* a également un autre rôle important : il permet de régler la distance entre le *routa* et le *tahta* pour moudre différents types de grains.

La méthode consiste à mettre un levier au-dessous du *kharak*, qui se trouve déjà sur le *varkec*h ou *balechtak*, puis de le lever grâce à un support appelé *varbandak*. Le levier fait progressivement monter le *kharak* et de même le *tah-tir*, le *routa* et la roue éolienne qui montent de 2 à 3 mm. En même temps, on avance le *varkech* ou le *wedge* légèrement vers la meule de façon à ce que ce changement de hauteur soit fixé. On répète cette action autant qu'il le faut jusqu'à ce que la distance entre les deux pierres corresponde à ce qui est désiré.

Figure 4-67 : combinaison du *mouchteh* et du *chotakht*, et du *tah-tir* et du *kharak* sur les moulins à vent de types Khorasan-e Razavi et Khorasan du Sud.

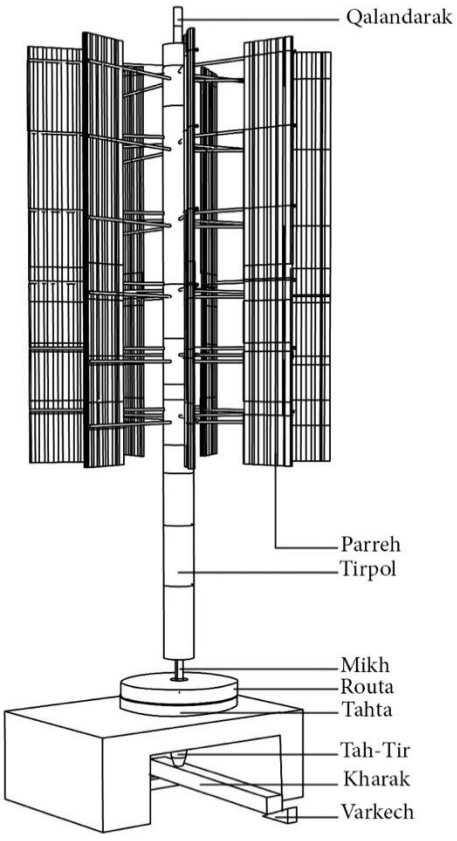


Figure 4-68 : croquis du système technique du moulin à vent avec *tavarreh* suspendu et *tah-tir* sur le dernier type de moulin à vent.

Fabrication

Pour la fabrication de la meule du moulin à vent, on utilise du granite. Ce granit provient de mines parfois très éloignées des sites où se trouvent les moulins. La pierre de la meule est le seul matériau que l'on ne trouve pas toujours sur place. Les surfaces supérieures et inférieures de la pierre supérieure ont la forme d'une courbe et la même courbe forme la surface supérieure de la pierre inférieure. Lorsque ces deux morceaux de pierre sont l'un contre l'autre, les courbes se fixent l'une sur l'autre et, grâce aux deux courbes et au mouvement rotatif de la pierre supérieure, le grain peut passer du centre de la meule à l'entrée et se transformer en farine à la périphérie de la pierre inférieure dans un mouvement en spirale. Les pièces métalliques utilisées pour le mécanisme du moulin à vent – la lame et l'axe métallique vertical du bout de la roue éolienne – sont en acier forgé.

1 2

Figure 4-69 : Deux charpentiers âgés qui gardent la mémoire des techniques traditionnelles propres au moulin à vent à axe vertical. 1- *Molla* à Chekiban près de Hérat. 2- M. Abdi à Gond au Khorasan du Sud.

Les pièces de bois sont normalement en cyprès ou *tabrizi* (peuplier). On trouve ces types de bois dans les villages et au bord des fermes, qui se protègent ainsi des vents forts. L'une des pièces de bois utilisées pour l'axe vertical au-dessous de la pierre de la meule est parfois fabriquée en jujubier. On la plonge longuement dans l'huile afin qu'elle montre davantage de résistance face au poids du système technique et face aux insectes.

L'axe principal de la roue éolienne atteint parfois 9 voire 12 mètres. On doit trouver une pièce de bois suffisamment longue ou bien assembler deux ou trois pièces de bois différentes pour bâtir un axe capable de tourner correctement à une vitesse importante pendant une longue durée. La plupart du temps, un seul arbre ne peut suffire à fabriquer une pièce de bois d'une telle hauteur. Pour la fabrication des pales de la roue éolienne, on utilise

normalement du bambou provenant de différentes régions. Les moulins à vent du Khorasan-e Razavi ont des pales fabriquées avec de fines pièces de bois.

Figure 4-70 : *bazous* et installation de ces *bazous* sur le *tirpol* d'un moulin à vent de type Hérat

Figure 4-71 : installation des pales ou *parrehs* sur les *bazous* avec différents matériaux, moulins à vent de Hérat et Nachtifan.

Mise en marche d'un moulin à vent

Après l'installation de la meule et de la roue éolienne, et après le réglage de la distance entre les deux pierres par le meunier, le moulin à vent est prêt à fonctionner. Notons néanmoins que ce moulin ne fonctionne qu'à la saison où souffle le vent, c'est-à-dire en été, entre les mois de mai et septembre.

Pour que le moulin produise de la farine, on lui apporte du grain dans de grands sacs, puis on verse ce grain dans le réservoir prévu à cet effet : le *kondak* à blé sur le sol en bas. De ce *kondak*, le grain est transféré avec des seaux dans le *kondak* à blé situé en haut, à côté de la meule. Le grain passe par un trou situé dans la partie inférieure du *kondak* à blé et entre dans le *navdouni*. Ce dernier le transvase vers le *galouyeh* du *routa*. L'origine de la vibration du *navdouni* vient du mouvement de l'*asbak* sur les surplombs zigzagues au-dessus de la pierre

du *routa*. Le changement d'inclinaison du *navdouni* modifie le volume de grain transféré par le *navdouni* vers le *galouyeh*.

La farine produite prend la direction du *kondak* à farine *via* deux rainures situées des deux côtés du *tahta* et s'accumule dans les sacs de farine. Le meunier doit être un professionnel afin que la distance entre les deux meules soit bien réglée. Dans le cas contraire, le grain ne se moud pas bien et il sort sous la forme de *qolour* : une sorte de blé écrasé qui n'est pas utilisable pour le pain. On ne l'utilise que pour une soupe traditionnelle appelée *halim*.

Figure 4-72 : *qolour*, grain mal écrasé par le premier moulin mis en fonction à Hozdar.

Affiler une vieille meule ou *chekange*

Après un certain temps, la meule ne fonctionne plus correctement et ne produit plus une farine utilisable pour la consommation principale : le pain. Dans ce cas, on sollicite les bras de nombreux travailleurs et on utilise deux charpent de bois comme le levier ils lèvent la roue éolienne, séparent le *mikh* du *tirpol* puis retirent le *routa* qu'ils mettent contre le mur en position semi verticale. Grâce à un marteau spécial appelé *ketnak*, ils dessinent des rainures sur la surface inférieure du *routa* puis l'aiguisent. Ils pourront ensuite l'utiliser pendant longtemps. Cette technique est connue chez les meuniers sous le nom de *chekandg*.

Figure 4-73 : désinstallation de la roue éolienne et du *routa* pour l'affiler.

Réglage de la meule lorsque le vent souffle à différentes vitesses

Pour changer la vitesse du moulin à vent en fonction de la vitesse du vent, on modifie la distance entre les deux pierres de la meule. Lorsque la vitesse du vent est grande, on diminue la distance. Ce procédé s'appelle « alourdir la meule ». Lorsqu'en revanche la vitesse et la force du vent est faible, on augmente la distance entre les deux pierres et la meule tourne alors lentement. Ce procédé s'appelle « alléger la meule ».

Chapitre V

Typologie

Une typologie pour la classification morphologique

Dans la famille des moulins à vent persans à axe vertical, nous pouvons compter cinq types de moulins différents, dont trois types existent encore sur le plateau iranien. Une typologie peut être élaborée selon des caractéristiques architecturales et morphologiques ou encore selon des particularités matérielles et de construction. Ici, notre raisonnement de classification se fonde sur une autre caractéristique : le mécanisme technique. Nous en connaissons au moins trois types. Dans cette recherche, nous présenterons ces trois types de mécanismes techniques mais la typologie finale fondera sur des caractéristiques architecturales et de construction.

Le premier type, disparu, ou premier type du Sistan

Le premier type de moulin à vent à axe vertical iranien n'existe plus. Notre présentation ici se fonde sur notre étude des moulins à eau iraniens ainsi que sur le dessin et les écrits d'Al-Dimashqi, géographe arabe du XIII^{e} siècle, qui a bien décrit l'un des moulins à vent qu'il voyait au bord de la mer Méditerranée. Comme on l'exige il y aurait plusieurs incertitudes entre notre étude sur le moulin à eau et le moulin à vent iranien d'une part et ce rapport d'autre part. Nous devons donc trouver les critères et la forme probable du premier moulin à vent du Sistan en comparant toutes ces informations.

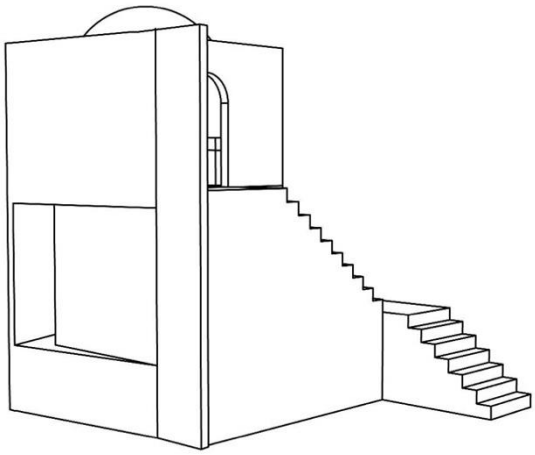


Figure 5-1 : forme probable d'un moulin à vent à axe vertical persan de premier type.

Les bâtisseurs de moulins à vent au Sistan utilisaient probablement une espèce de bambou fin qui poussait au bord du lac Hamoun, de la rivière Hirmand et de canalisations d'eau connues sous le nom de *kholak*. Nous n'avons pas trouvé trace du mécanisme technique faisant tourner les moulins à vent du plateau du Sistan. Mais dans la ville de Nehbandân ainsi que dans le village de Khânsharaf situé à proximité, il reste des chaînes de moulins à vent dont le mécanisme technique comporte des différences avec d'autres types de moulins à vent existants. Or la ville de Nehbandân et les villages périphériques étaient autrefois considérés comme faisant partie du territoire du Sistan. Par ailleurs, la taille probable du moulin à vent de premier type ne pouvait pas être plus grande que celle des moulins à vent existants (mis à part les six moulins à vent du village de Hozdar au Sistan).

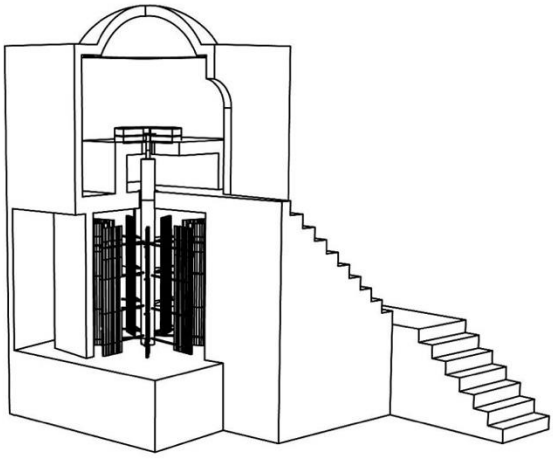


Figure 5-2 : coupe et mécanisme technique d'un moulin à vent à axe vertical persan de premier type.

La roue éolienne d'un moulin à vent à axe vertical de premier type a probablement fonctionné avec six ou neuf pales maximum, comme les autres moulins à vent en Iran. Or Al-Dimashqi décrit un moulin à vent probablement de grande taille, d'une échelle similaire à celle des moulins à vent du cinquième type, les grands moulins à vent de Hozdar.

Nous devons nous contenter d'imaginer ce moulin à partir d'un document et d'un dessin laissé par le géographe Al-Dimashqi. Selon lui, ce type du moulin à vent persan, que nous qualifions ici de « premier type », est un moulin à vent à axe vertical fonctionnant avec une roue éolienne située au-dessous de la chambre de la meule. Le géographe arabe donne beaucoup de détails sur ce moulin. Mais si nous tenons compte de la situation climatique et du savoir-faire local au Sistan, et surtout des caractéristiques et des matériaux utilisés pour les types de moulins à vent ultérieurs, il semblerait que la forme architecturale du premier type ait été différente de celle décrite par Al-Dimashqi. Al-Dimashqi écrit par exemple : « ils font quatre ouvertures comme celles qu'ils font au-dessus des châteaux »[157]. Or nous avons montré qu'au Sistan le vent souffle en provenance d'une seule direction, le nord. Il est donc très probable que le moulin à vent de premier type a eu une seule ouverture, face au vent. Autre différence probable entre les écrits d'Al-Dimashqi et le moulin à vent de premier type : le nombre de pales de la roue éolienne et les matériaux utilisés pour leur fabrication.

> « L'appareil a douze pales qu'on pourrait diminuer à six. Elles sont couvertes d'un tissu de coton blanc, comme on recouvre de tissu une lanterne, mais avec une différence : le tissu est partagé entre les différentes pales de façon à ce que chacune soit recouverte séparément. Le tissu présente une bosse que le vent remplit et par laquelle la pale est poussée vers l'avant. Le vent remplit ensuite la suivante et la pousse, puis la troisième [158] ».

Ces informations et surtout le dessin présenté dans le livre *Nokhbat al-dahr* nous ont donné quelques indications pour imaginer le moulin à vent de type méditerranéen.

La version syrienne du premier type de moulin a vent

Le moulin à vent qu'Al-Dimashqi décrit était très probablement l'un des moulins à vent à axe vertical qui s'était diffusé hors du plateau iranien et qui se trouvait plutôt sur la côte

---

[157]- **(per) WOLF, Hanse,** 2006, p. 257.

[158]- *Ibid*.

orientale de la mer Méditerranée. Nous pouvons le considérer comme un descendant du premier type de moulin à vent à axe vertical. Puisque ce type de moulin à vent persan se trouvait sur les côtes orientales et très probablement sur les côtes sud de la mer Méditerranée et en Sicile, nous le nommerons « méditerranéen ». Si nous tenons compte des quatre ouvertures décrites par Al-Dimashqi sur les murs périphériques de la chambre de la roue éolienne, ce type de moulin à vent pouvait en effet être installé au bord de la mer. Là, il utilisait les vents maritimes et terrestres qui soufflent régulièrement de la côte vers la mer dans la journée et de la mer vers la côte la nuit, avec une force suffisante pour faire tourner une roue éolienne telle que celle qui est décrite par le géographe. De même, ce moulin à vent pourvu de quatre ouvertures pouvait utiliser d'autres vents prenant une orientation perpendiculaire à la direction générale du vent. Nous défendons la thèse selon laquelle le type de moulin à vent à axe vertical méditerranéen était un type côtier qui fonctionnait avec le vent provenant de la mer pendant la journée et avec celui qui soufflait en sens inverse la nuit. Une roue fonctionnant avec douze pales avait besoin d'une chambre environ deux fois plus grande que celle prévue pour le moulin à vent de premier type, qui utilisait très probablement une roue éolienne dotée au maximum de huit pales.

C'est la faible puissance du vent maritime par rapport au vent de 120 jours qui poussa les bâtisseurs de moulins à vent de type méditerranéen à construire une chambre plus grande que celle du premier type pour la roue éolienne, ceci afin d'augmenter le « volume » de vent pénétrant dans les ouvertures. Quand à ces ouvertures, elles avaient la forme d'un entonnoir, de façon à intensifier la vitesse du vent faisant tourner la roue éolienne. Si nous examinons la différence entre les tours du vent iraniennes situées au centre du pays et celles situées sur la côte sud de l'Iran, nous pouvons comprendre que changer l'échelle du capteur de vent a pour but d'accélérer la vitesse et donc la force du vent pénétrant dans la chambre de la roue éolienne. Comme nous allons le montrer dans le cas du quatrième type, la technique du changement d'échelle mais aussi l'ajout d'éléments à la base principale du moulin à vent permet d'augmenter la puissance de cette invention.

Le troisième type, type « Hérat » ou type rond

Le troisième type, qui apparaît très probablement au XVI^{e} siècle, est un nouveau modèle de moulin à vent persan qui, grâce à un changement portant sur la chambre de la roue éolienne et la chambre de la meule, a un rendement beaucoup plus élevé par rapport au premier modèle.

Dans ce nouveau modèle, la roue éolienne se trouve au-dessus de la chambre des meules. Avec cette transformation, le moulin à vent à axe vertical prend une nouvelle forme, plus fonctionnelle, et devient plus facile à bâtir dans des lieux où soufflent des vents moins forts, c'est-à-dire hors du Sistan. Nous avons déjà présenté notre hypothèse concernant la date d'apparition de ce modèle de moulin à vent persan. Nous pensons que c'est à partir du XVI^{e} siècle que ce type voit le jour sur le plateau iranien. Aujourd'hui, on trouve ce troisième type de moulin à vent persan, que nous nommerons ici type « Hérat », seulement à Hérat et dans des villages périphériques comme Chekiban et Khadjeh-Qaleh, au nord de l'Afghanistan. Il se trouve par ailleurs isolé au milieu des domaines agricoles. La distance qui le sépare des lieux habitables en fait un type singulier de moulin à vent à axe vertical. Il s'est diffusé du Sistan, au sud, et vers Hérat, au nord. Sa morphologie a été modifiée de façon à ce qu'il ait une efficacité maximum.

Nous avançons deux hypothèses concernant l'origine de cette évolution technique. Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'art timouride est un chapitre majeur de l'art islamique ; c'est une période de grand épanouissement sur les plans architectural et technique. À côté de Samarcande, capitale de la dynastie timouride, Hérat était une ville importante aux yeux Châh Rokh Timouri, fils de Tamerlan. D'importantes communautés d'artistes et d'artisans spécialisés y résidaient. Les moulins à vent actuels, situés dans des villages à la périphérie de Hérat, les écrits crédibles concernant les autres moulins à vent qui existaient dans cette même ville, ainsi que le mécanisme technique intermédiaire qui leur est propre – mécanisme classé entre le moulin à vent de premier type et de dernier type – sont autant d'indications permettant d'avancer que l'un des lieux probables où les chambres de la meule et de la roue éolienne du moulin à vent ont pour la première fois été changées est la ville de Hérat. Si on s'accorde sur le fait que le point de départ de la création du nouveau système technique est la période timouride, nouvelle ère culturelle et technique, on peut dater du XIV^{e} siècle l'apparition du nouveau type de moulin à vent et surtout le changement concernant la chambre de la meule. Autre hypothèse sur ce type de moulin à vent : il serait apparu sur le territoire du Sistan. Comme le Sistan est le pays de plusieurs découvertes intéressantes et différentes en matière de savoir-faire sur le moulin à vent, il n'est pas du tout impossible que le changement concernant les chambres de la meule et de la roue éolienne soit apparu là-bas. Des créations utiles y ont vu le jour : le premier type de moulin à vent, la meule fabriquée en terre cuite, le *tavarreh* et le *mikh* avancés, le déflecteur sur la façade exposée au vent. Si on fait l'hypothèse que le changement des chambres a eu lieu au Sistan, il se serait produit plutôt vers

le XVI^{e} siècle, après l'arrivée des Séfévides au pouvoir. Grâce à la stabilité politique qui a marqué à leur règne, l'agriculture a en effet pu se développer et les moulins à vent ont alors connu des avancées techniques et plus précisément des changements concernant les chambres des organes clés de leur mécanisme technique.

Après la chute des Séfévides en 1736 – chute consécutive à une invasion de nomades afghans – les relations socio-économiques et techniques entre la province du Khorasan et Hérat, jusqu'alors partie du territoire iranien, se détériorèrent. Après le Traité de Paris signé en 1857 et la création de l'Afghanistan, Hérat fut rattachée à l'Afghanistan. Il est très probable qu'à cause de cette partition territoriale, le troisième type de moulin à vent persan qui était arrivé à Hérat resta en marge et ne connut pas les modifications réalisées ultérieurement sur les autres moulins à vent du Khorasan. Nous adressons ici particulièrement à la fonction urbaine de cette génération de moulins à vent, qui se met en place un peu plus tard, selon nous au milieu du XVIII^{e} siècle.

Ce type de moulin à vent utilise le mécanisme technique général des moulins à vent existants, mais avec le *tavarreh* du deuxième type.

Figure 5-3 : moulin à vent de type Hérat situé à Chekiban, un village près de Hérat.

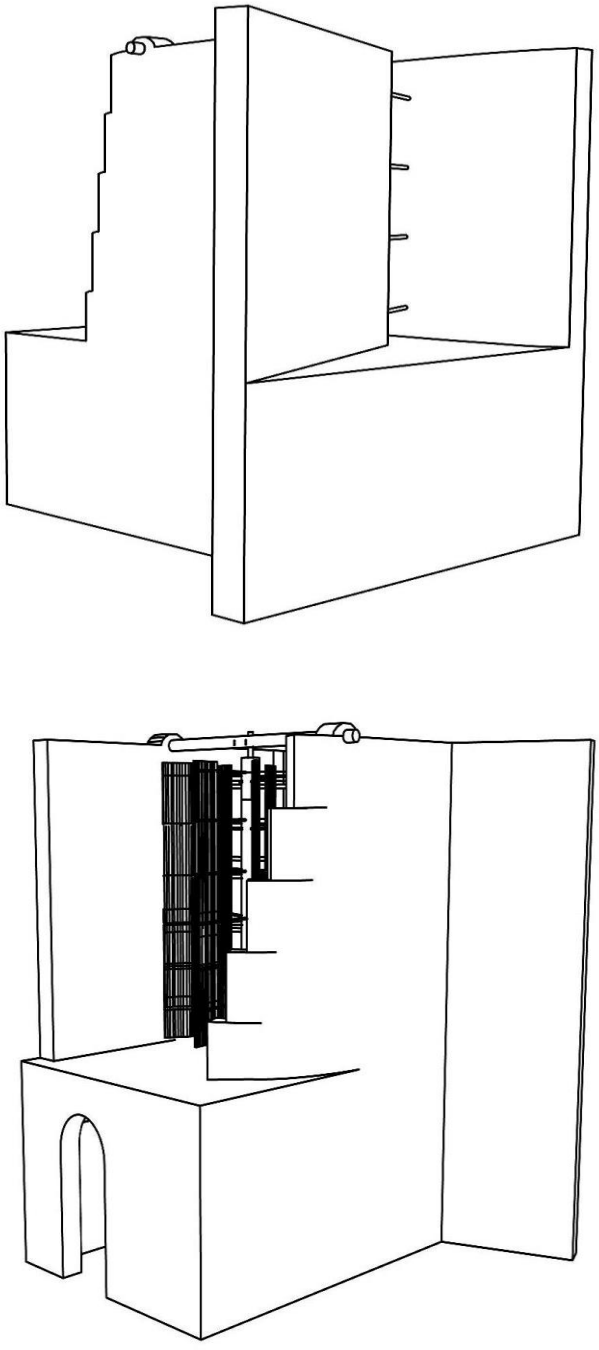


Figure 5-4 : moulin à vent de type Hérat.

Le quatrième type, type Khorasan ou type en chaîne

Le quatrième type de moulin à vent persan est un type urbain, que l'on trouve souvent en bordure des villes et villages, face au vent permanent. Ces moulins à vent sont reliés les uns et aux autres, constituant ainsi une chaîne. Ce quatrième type de moulin, que nous nommerons moulin à vent de type « Khorasan » (figure 5-5), est probablement apparu un peu plus tard que le moulin à vent de type « Hérat ». Nous pensons qu'il vit le jour en Iran probablement au milieu du XVIII^{e} siècle. Il fut majoritaire dans toutes les régions qui ont des moulins à vent, particulièrement au Khorasan-e Razavi, et au Khorasan du Sud. Au Khorasan du Sud, dans la ville de Nehbandân et dans le village de Khancharaf, en bordure du Sistan, nous trouvons les seuls moulins à vent de ce type. Leur mécanisme technique ne ressemble pas du tout à celui des moulins à vent du Khorasan. Dans cette région, qui faisait autrefois partie du Sistan, on peut voir ce type de moulin à vent doté du dernier mécanisme technique, plus sophistiqué que celui du moulin à vent visible dans les autres parties du Khorasan-e Razavi et à Hérat. Comme ce type de moulin à vent s'est diffusé en masse dans l'est du grand Khorasan[159], nous le nommerons moulin à vent de type « Khorasan ».

Figure 5-5 : chaîne de moulins à vent persans de type Khorasan à Nashtifan.

[159]- Province du Khorasan avant son découpage en trois provinces : le Khorasan du Nord, le Khorasan-e Razavi et
le Khorasan du Sud.

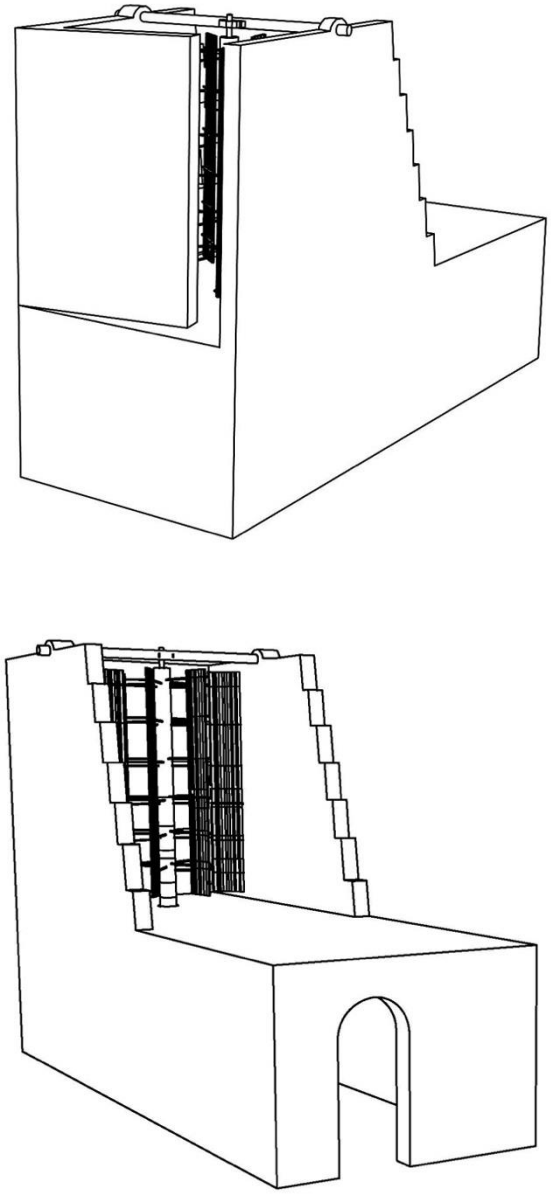


Figure 5-6 : moulin à vent persan de type Khorasan.

Le quatrième type englobe presque tous les moulins à vent du Khorasan-e Razavi et du Khorasan du Sud. On les trouve alignés, telle une chaîne, en bordure des quartiers d'une ville ou d'un village, protégeant ainsi les habitations du vent fort (figure 5-6). L'obligation de les aligner, d'en faire un « mur » face au vent a modifié la morphologie de ce type de moulin à vent à axe vertical : à la différence du moulin à vent de Hérat, dont le corps est déformé pour améliorer le rendement, la chaîne composée de ce type de moulins à vent se présente comme une muraille protectrice face au vent, dans laquelle il y a des ouvertures rectangulaires. La fonction supplémentaire de ce moulin à vent à axe vertical le distingue du moulin à vent de

type « Hérat », bien que le mécanisme technique soit similaire. Mis à part le Sistan, et Hérat et ses villages périphériques, toutes les villes et tous les villages du Khorasan-e Razavi et du Khorasan du Sud qui utilisent ces moulins à vent les disposent en chaîne.

Tel un ensemble de bâtiments de grande hauteur, ils fonctionnent comme une muraille face aux vents défavorables. Les moulins à vent du village de Nashtifan sont des exemples parfaits de ce quatrième type de moulins à vent. La ville de Hérat (actuellement située en Afghanistan) se trouve à seulement 50 kms de Nashtifan (Iran) ; l'existence de deux catégories distinctes de moulins à vent à axe vertical du deuxième type nous montre donc que la distance d'ordre socio-économique et technique due à la partition du territoire irano-afghan a entraîné une rupture dans le développement d'une invention telle que le moulin à vent à axe vertical. Il faut noter également qu'à cause des caractéristiques géographiques propres au plateau iranien, deux villages proches peuvent parfois avoir deux climats différents. Or le climat a une forte influence sur la morphologie de cette invention architecturale et technique.

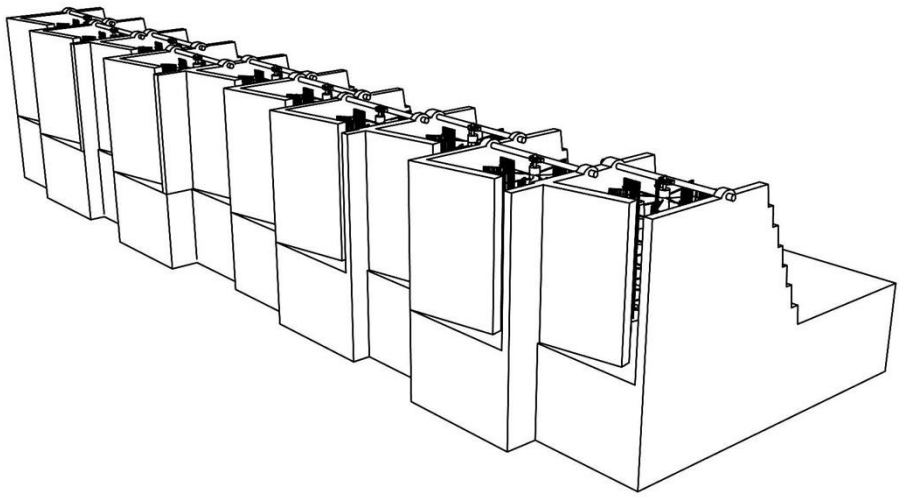


Figure 5-7 : chaîne de moulins à vent persans de type Khorasan.

Nous pensons que c'est probablement ce type de moulin à vent qui s'est répandu dans les territoires du nord, surtout au Khorasan, au milieu du XVIII^{e} siècle. Là en effet souffle le même type de vent qu'au Sistan, avec néanmoins un comportement et une vitesse différente de ce que l'on observe au Sistan. Les changements techniques et morphologiques de ce type de moulin ont permis son utilisation en masse au Khorasan malgré la présence dans cette région de moulins à eau dont les mécanismes principaux étaient destinés à moudre le grain, avant l'apparition des moulins à vent de quatrième type. Sur la question du mécanisme technique, il

faut noter que mis à part les moulins à vent de Nehbandân et des villages situés à sa périphérie au Khorasan du Sud, les moulins à vent observés dans d'autres villes et villages du Khorasan du Sud et du Khorasan-e Razavi utilisent le même mécanisme technique, celui du moulin à vent de type Khorasan.

Le cinquième type, type à deux ouvertures du Sistan

Selon nous, le cinquième type de moulin à vent à axe vertical est également le dernier type de moulin à vent à axe vertical (figures 5-8 et 5-9). Nous avons trouvé six moulins à vent de ce type dans le village abandonné de Hozdar, qui se situe dans le désert du Loutak, au centre du Sistan actuel. Ce village date de l'époque séfévide ; il fut abandonné vers la fin du XVIII^{e} siècle [160]. A la même période, différents types de moulins à vent à axe vertical (premier type excepté) existaient au Sistan, mais nous n'avons trouvé aucun exemple du dernier type de moulin à vent à axe vertical en dehors de ce village. Les moulins à vent de Hozdar sont par ailleurs les seuls exemples de moulins à vent existant aujourd'hui sur le plateau du Sistan. Nous appellerons ce type de moulin à vent type « Sistan ». Ce moulin est considéré comme le plus évolué et le plus complexe de tous les types de moulins à vent présentés jusqu'ici. Mais il n'eut malheureusement pas la chance de se répandre en dehors du Sistan. D'après des documents historiques, des vestiges découverts sur le terrain (fermes et jardins en ruine) ainsi que des traces témoignant de l'avancée du lac Hamoun à proximité du village, il semble que le village de Hozdar jouissait d'une situation agricole remarquable et qu'un moulin à vent à axe vertical puissant fut nécessaire. Pour répondre aux besoins du village, le moulin à vent à axe vertical subit une dernière évolution architecturale et technique.

Ce moulin à vent persan est le plus grand de tous. Pour obtenir davantage de puissance que dans les modèles précédents, il faut augmenter la taille du moulin afin de faire entrer un volume de vent plus important par le capteur. L'augmentation de la taille du moulin à vent permet d'utiliser une roue éolienne plus grande, avec davantage de pales. Aujourd'hui, il n'existe plus aucune trace du mécanisme technique de ce type de moulin à vent mais nous pensons que sa roue éolienne comprenait au moins douze pales, comme pour le moulin de type méditerranéen qui a besoin d'un courant de vent puissant. Selon nous, l'ajout d'un nouvel

[160]- **Mousavi Haji Seyed Rasoul, Mehrafarin Reza**, Observation méthodologique et archéologique du plateau du Sistan, Vol 13, Université du Sistan et Balouchistan, Zahedan 2008, pp. 1005-1007.

élément dans le corps du dernier type de moulin à vent à axe vertical persan était destiné à pousser les pales de la roue éolienne plus fort encore. Ce nouvel élément architectural, un déflecteur scindant le courant du vent, oriente une partie du courant du vent sur la pale qui se situe face au courant du vent et l'autre partie du vent derrière la pale qui va arriver face au courant du vent. Par conséquent, un seul courant de vent pousse deux pales successivement, ce qui accroît potentiellement la puissance nécessaire pour faire tourner la roue éolienne. Autre élément pouvant expliquer l'agrandissement de la taille de ce type de moulin à vent : le ralentissement de la vitesse du vent dans la région. Pour palier ce ralentissement, on aurait augmenté la taille de l'ouverture au vent et donc la puissance du vent. Mais les records de vitesse du vent dans cette région prouvent que le Sistan en général et le Hozdar en particulier utilisent l'un des courants de vent les plus forts en Iran, en moyenne de 13 km/s. Nous défendons la thèse selon laquelle l'agrandissement de la taille de ce type de moulin à vent a été voulu pour produire de la farine en masse dans cette région qualifiée plusieurs fois dans l'histoire de réservoir à blé.

. Il le fut si vite que le savoir-faire du moulin à vent à axe vertical de dernier type n'eut pas le temps de se diffuser hors de la région de Hozdar. C'est exactement pendant ce court laps de temps entre l'apparition du moulin à vent de dernier type et l'abandon du village de Hozdar, que nous pensons qu'il vit le jour, vers le milieu du XVIII^{e} siècle. Parmi les six moulins à vent de ce type dans le désert du Loutak et à la périphérie du village de Hozdar, il y a trois moulins à vent de grande taille, un moulin à vent jumeaux et un petit moulin à vent de ce type, le type « Sistan ».

Figure 5-8: grand moulin à vent de Hozdar, un exemple de moulin à vent persan de type Sistan.

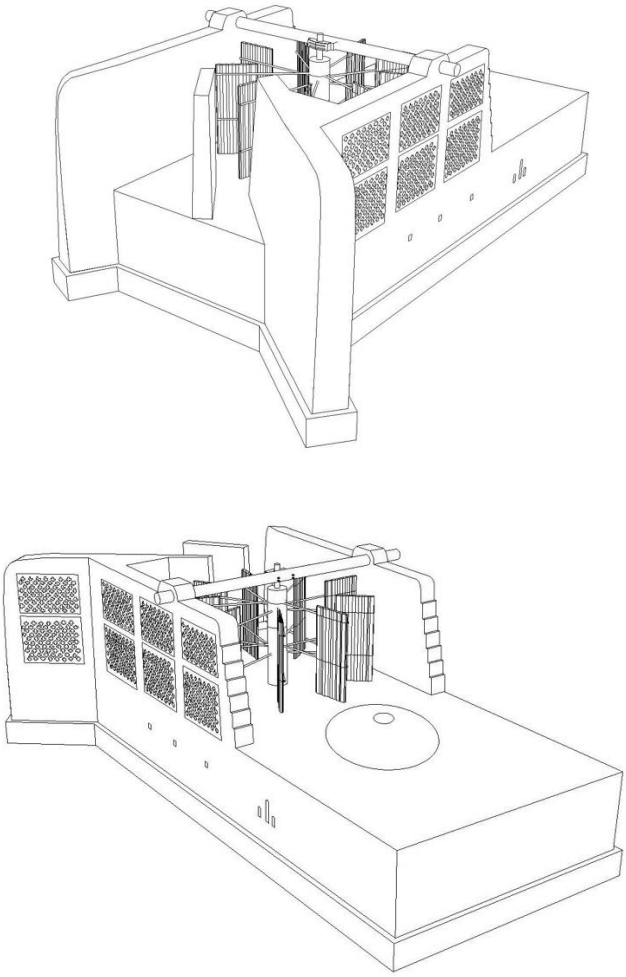


Figure 5-9 : moulin à vent persan de type Sistan.

Chronologie à partir des types de moulins existants

Si nous voulons établir la chronologie des types de moulins à vent à axe vertical iraniens existants, il faut compter les moulins à vent des villes et villages du Khorasan-e Razavi, du Khorasan du Sud, de Hérat en Afghanistan et les moulins à vent abandonnés du Sistan. Puisque nous n'avons aucune trace du moulin à vent de premier type sur le territoire iranien, nous ne le présentons pas dans la chronologie des types de moulins existants. Pour établir cette chronologie, nous avons retenu comme sources les moulins à vent en état de marche et les moulins à vent détruits ou abandonnés des régions indiquées ci-dessus.

La chronologie que nous présentons est plutôt un premier classement réalisé grâce à la documentation réunie jusqu'ici. Nous présenterons bien sûr par la suite une chronologie précise

qui s'appuiera sur nos analyses historiques, archéologiques et morphologiques. Parmi tous les moulins à vent situés dans les régions mentionnées ci-dessus, seuls les moulins à vent du Khorasan-e Razavi sont en état de marche, et pour être plus précis les moulins à vent de Nashtifan, qui sont encore utilisés pour des besoins locaux limités et pour des raisons touristiques. Après le Khorasan du Sud, Hérat dispose de deux moulins à vent dont l'un, le moulin à vent de Chekiban, a été récemment restauré grâce à l'intervention à titre gracieux de l'un des architectes de la fondation Agha Khan lors de sa mission de restauration du château de Hérat[161].

D'autres moulins à vent sont en assez bon état, notamment ceux du village de Khânsharaf près de la ville de Nehbandân, mais ils ne sont pas en état de marche. D'autres encore ont été détruits ou abîmés, mais peuvent nous renseigner sur la façon dont ils ont été conçus sur le plan architectural et parfois même nous donner des informations sur leur mécanisme technique. Parmi ces moulins à vent, ceux de Hozdar et de Qaleh-Rostam diffèrent le plus de l'ensemble des moulins à vent du Khorasan et de Hérat. Si nous essayons d'établir une chronologie des moulins à vent selon leur état physique, les moulins à vent du Sistan seraient les plus anciens et ceux de Nashtifan les plus récents (tableau 5-1).

Cette chronologie peut également se fonder sur les écrits des géographes et des historiens irano-arabes depuis les IX^{e} et X^{e} siècles présentant le Sistan comme le territoire natal des moulins à vent du monde. Mais derrière cette chronologie se cache un sérieux problème, qui se révèle très important lorsqu'on analyse l'évolution des moulins à vent à axe vertical. Comme nous l'avons expliqué précédemment, une part déterminante du processus d'évolution des moulins à vent concerne le mécanisme technique. Il s'agit notamment de l'étape transformant la façon de relier la lame métallique (*tavarreh*) à l'axe vertical, auparavant séparés en deux parties, et par la suite constituant une pièce unique mais détachable.

Selon nos recherches, cette modification est survenue lors de la dernière phase de l'évolution technique des moulins à vent à axe vertical ; dans une chronologie correcte, cette modification du mécanisme technique appartiendrait au dernier type de moulin à vent à axe vertical. Dans le cas d'une chronologie établie selon les types existants, on s'attendrait à voir ce mécanisme technique sur les moulins à vent de la famille du Khorasan-e Razavi, et en

[161]- M. Arash Boustani, architecte chargé de la restauration du château de Hérat, a trouvé par hasard les deux moulins à vent abandonnés dans des villages situés à la périphérie de la ville de Hérat ; il est intervenu pour leur restauration en collaboration avec des habitants de la région. Le projet a été réalisé en août 2007, dans le village de Chekiban.

particulier sur les moulins à vent de Nashtifan, qui sont encore en bon état. Or on trouve ce mécanisme sur les moulins à vent de la famille du Khorasan du Sud, et en particulier sur ceux du village de Khânsharaf. Ce village a toujours une chaîne de moulins à vent dans un état acceptable mais les moulins ne fonctionnent plus ; d'autre part il est très proche du Sistan actuel et constituait autrefois une partie du Sistan historique. Cette chronologie n'est donc pas sans poser problème et nous a vite semblée erronée.

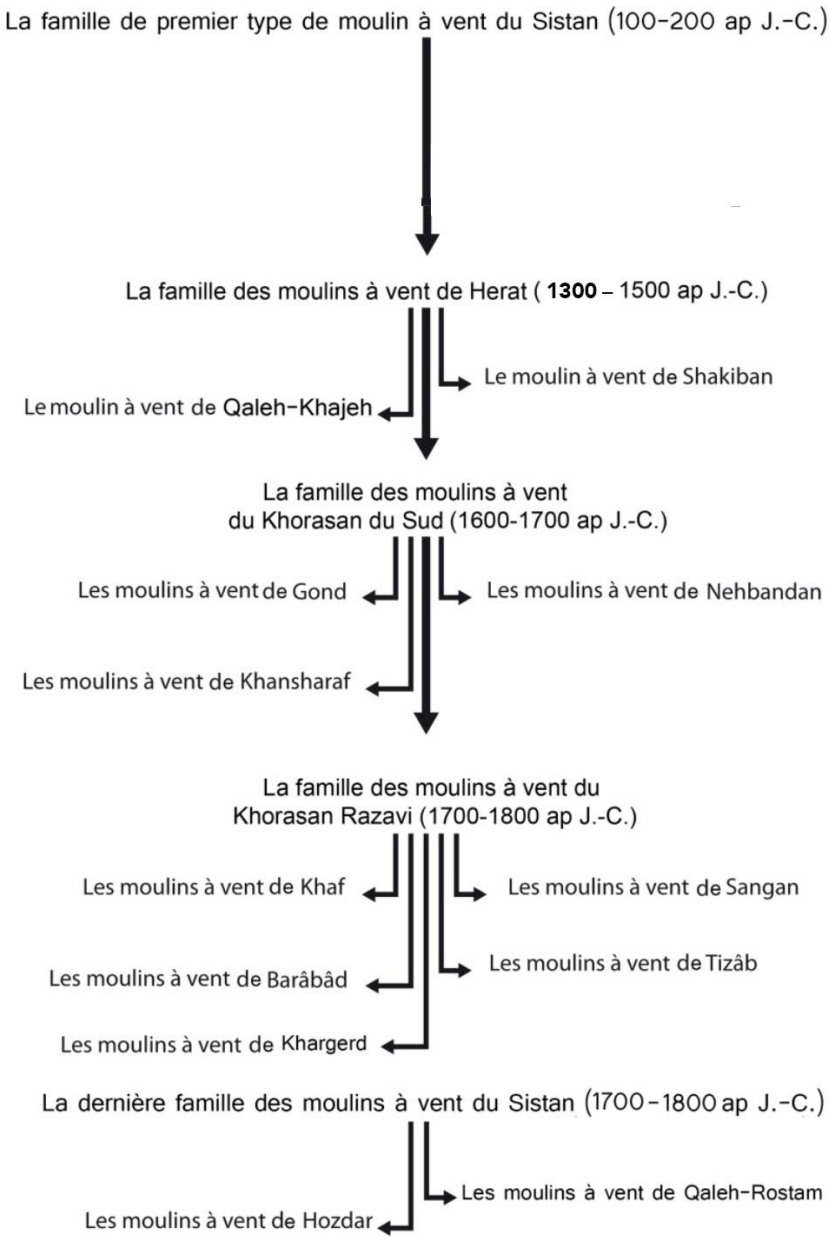


Tableau 5-1 : chronologie des moulins à vent à axe vertical iraniens selon les types existants.

Notre chronologie, fondée sur des éléments de preuve architectoniques, techniques et historiques

La chronologie que nous présentons ici est probablement proche de celle de l'histoire du moulin à vent à axe vertical et de l'évolution de cette invention ; il s'agit d'une chronologie détaillée et datée, fondée sur nos recherches et nos analyses historiques. Cette chronologie prend en compte les types existants et les types disparus de moulins à vent à axe vertical. Pour dresser une chronologie cohérente, il nous faut partir de la source d'inspiration du moulin à vent à axe vertical, le moulin à eau à axe vertical. Cependant, notre chronologie commence avec la meule rotative et se termine avec le dernier type de moulin à vent à axe vertical, le moulin à vent de Hozdar. Dans cette chronologie, la roue éolienne trouve également sa place et nous avons la possibilité de préciser la date d'apparition de chaque type de moulin grâce à nos analyses historiques. Selon nos recherches, tous les types existants et disparus de moulins à vent à axe vertical (sauf certains types modifiés en dehors du territoire iranien) ont été inventés et ont évolué sur le territoire du Sistan. Il existe des traces des trois derniers types de moulins à vent ainsi que des photos. Dans notre chronologie, nous allons baptiser les différents types de moulins à vent à axe vertical avec le nom des régions où ils se trouvent aujourd'hui et avec une numérotation allant de un à cinq. En revanche, nous allons donner le nom des régions d'installation actuelles ou précédentes de ces moulins à vent aux différentes catégories auxquelles appartient chaque type de moulin à vent à axe vertical, par exemple, la catégorie « Hérat » ou la catégorie « Khânsharaf » (figure 5-10). Cette chronologie est à lire en parallèle avec notre théorie sur l'origine et l'évolution du moulin à vent à axe vertical iranien, qui est l'aboutissement de notre enquête de terrain et de nos recherches et analyses historiques, et qui sera présentée en conclusion.

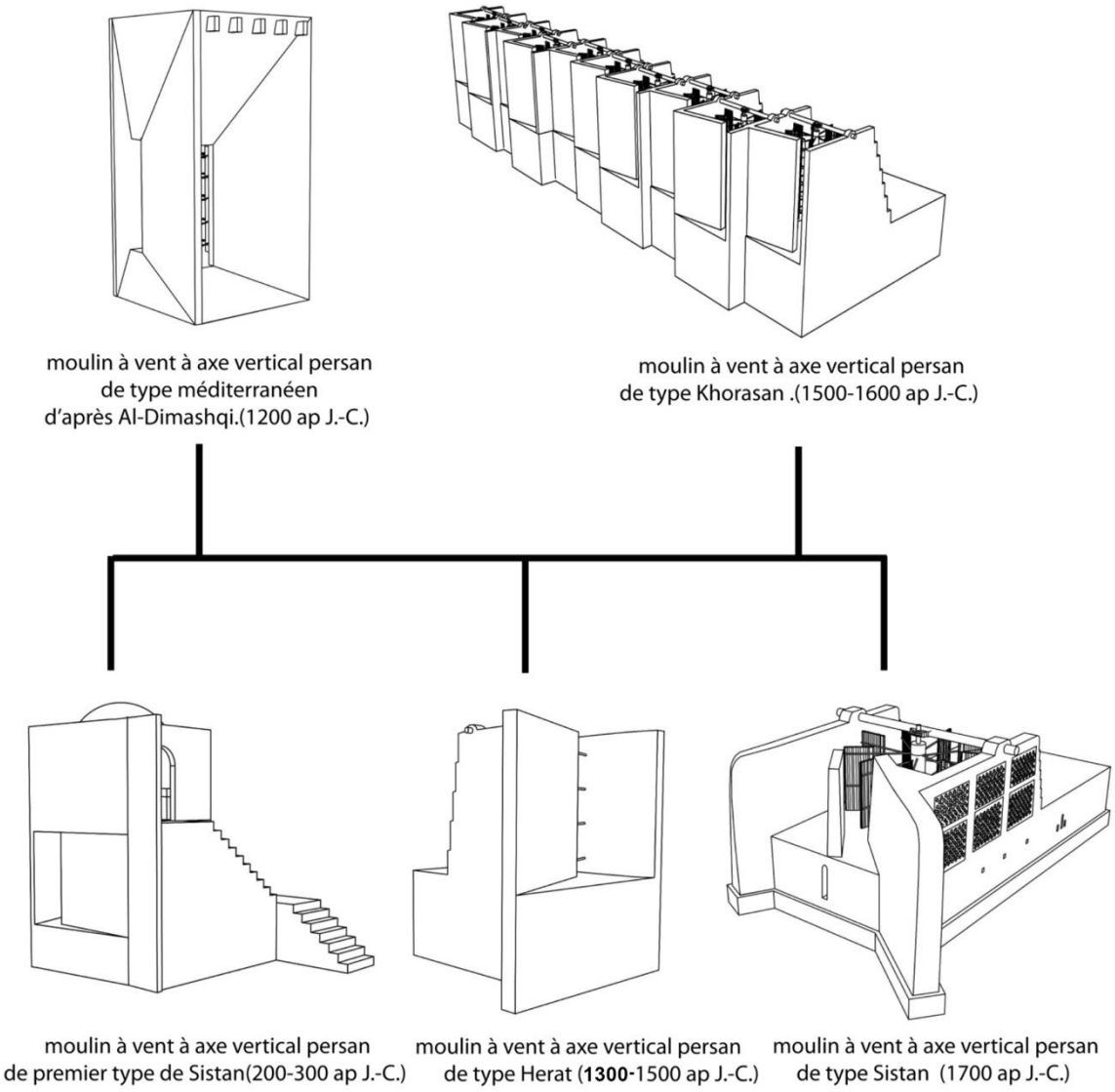


Figure 5-10 : chronologie des moulins à vent à axe vertical iraniens d'après nos recherches.

Partie II

Analyse et Modélisation

Chapitre VI

Analyse Morphologique

Une méthodologie comparative

Des configurations architecturales adaptées à la vitesse et à la puissance du vent dans les différentes régions ont émergé sur le plateau iranien, d'où la diversité des formes et des architectures des moulins à vent. Ces variations de formes et de corps, comparé à un ensemble de comparaisons, illustrent clairement comment la structure et la coque architectonique d'un moulin à vent iranien s'adaptent à la géographie et au climat et peuvent évoluer pour maximiser le rendement.

Dans ce chapitre, nous indiquons la position de tous les types de moulin à vent en Iran et en Afghanistan (Hérat), nous les présentons en images et nous tentons d'établir une comparaison physique et surtout morphologique entre les différents types. Nous pensons qu'il est possible d'extraire des principes basés sur ce travail comparatif. Ces principes peuvent donner un éclairage sur la conception et l'adaptation des moulins à vent iraniens à leur contexte géographique et climatique.

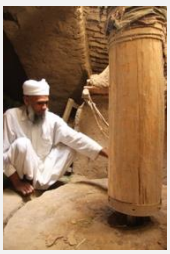
Dans la première partie du chapitre, différentes régions du plateau oriental de l'Iran sont décrites ainsi que certaines de leurs caractéristiques générales. Ensuite, nous procédons à une étude méthodologique, et les caractéristiques des indicateurs et leurs caractéristiques communes et distinctes sont présentées. De plus, dans la classification typologique présentée précédemment, leur géométrie est analysée analytiquement.

Nous avons constaté que les moulins à vent du sud-est de l'Iran et en particulier du Sistan et du sud du Khorasan ont subi de sévères dommages. Or nous sommes dans l'obligation de les restaurer pour les faire enregistrer au patrimoine mondial de l'UNESCO. La réparation et la restauration des cas endommagés est donc envisagée. Dans le cas des moulins à vent n° 1, 2 et 3 du Hozdar au Sistan, nous mettrons en place le mécanisme technique.

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent de Khadjeh-Qameh *Afghanistan/Herat /Village de Khadjeh-Qaleh* ***N : 34°25'44.53"*** ***E : 61°29'15.08"***	8,42 m 8,12 m 8,32 m	 	Seul moulin à vent qui reste dans ce village. L'enveloppe du bâtiment est en bon état, une partie du mécanisme technique est encore utilisable.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	Roue éolienne Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Shakiban *Afghanistan/Herat /Village de Shakiban* ***N : 34°23'41.29"*** ***E :61°47'29.41"***	8,68 m 8,28 m 8,48 m	 	Seul moulin à vent qui reste dans ce village. Grâce à la mise en place d'un chantier de restauration, il est aujourd'hui en état de marche.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	Roue éolienne Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Nashtifan *Iran/Khorasan-e Razavi/Village de Nashtifan* ***N : 34°25'55.66"*** ***E : 60°10'30.23"***	3,6-4.3 m 10,3-13,5 m 8-10 m	 	Trois chaînes de moulins à vent encore en place dans ce village. Grâce à des chantiers de restauration, ils sont aujourd'hui en état de marche	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent de Sangan *Iran/Khorasan-e Razavi/Village de Sangan* ***N : 34°23'38.97"*** ***E : 60°15'31.93"***	9 m 14 m 9 m	  	Une chaîne de moulins à vent encore en place dans ce village. L'enveloppe du bâtiment est en bon état, ainsi que le mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photo*
Moulin à vent de Barabad *Iran/Khorasan-e Razavi/Village de Barabad* ***N:34°25'14.45"*** ***E: 60°14'8.77"***	7.70 m 13.90 m 8.20 m	 	Ces sont deux chaines de moulin à vent de genre de khorasan qui est gravement abimé et il n'y que certains parts de mécanisme technique de ces moulins à vent	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Tizab *Iran/Khorasan-e Razavi/Village de Tizab* ***N : 34°47'9.84"*** ***E : 59°51'8.20"***	6,45 m 11,45 m 7,08 m	 	C’est une chaîne de moulins à vent de type Khorasan très endommagée. Seules subsistent certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Tabass-e Massina *Iran/Khorasan du Sud/Village de Tabas-e Massina* ***N : 32°48'34.40"*** ***E : 60°13'22.48"***	7,32 m 14,43 m 8,87 m	-	C'est une chaîne de moulins à vent de type Khorasan très endommagée. Seules subsistent certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Khounique-e Olia *Iran/Khorasan du Sud/Village de Khounique-e Sofla* ***N : 31°45'5.16"*** ***E : 60° 0'43.67"***	6,05 m 11,34 m 6,14 m	 	C'est une chaîne de moulins à vent de type Khorasan très endommagée. Seules subsistent certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Khounique-e Sofla *Iran/Khorasan du Sud/Village de Khounique-e Olia* ***N : 31°28'12.87"*** ***E : 60° 6'0.21"***	7,56 m 10,67 m 5,23 m	 	Moulin à vent de type Khorasan, complètement détruit. Seules subsistent certaines parties du mécanisme technique.	

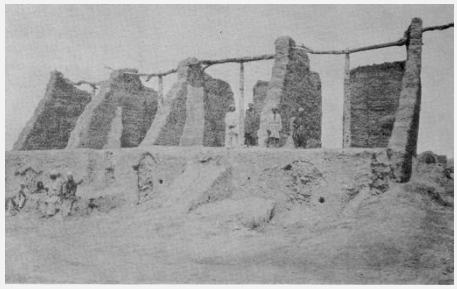
Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Hamand *Iran/Khorasan du Sud/Village de Hamand* ***N : 32°56'18.05"*** ***E : 58°26'11.51"***	6,34 m 11,45 m 6,34 m	 	Moulin à vent de type Khorasan, complètement détruit. Seules subsistent certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Tchahar Farsakh *Iran/Khorasan du Sud/Village de Tchahar Farsakh* ***N : 31°41'46.82"*** ***E : 59°50'13.75"***	5,05 m 11,75 m 6,13 m	-	C'est une chaîne de moulins à vent de type Khorasan très endommagée. Seules subsistent certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Khansharaf *Iran/Khorasan du Sud/Village de Khansharaf* ***N : 31°33'44.46"*** ***E : 60° 6'6.77"***	6,21 m 12,88 m 7,05 m	-	Chaîne de moulins à vent de type Khorasan, complètement restaurée. Le mécanisme technique est en état de marche.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Roumeh *Iran/Khorasan du Sud/Village de Roumeh* ***N : 33°26'34.32"*** ***E : 59°11'17.44"***	9 m 14 m 9 m	–	Chaîne de moulins à vent de type Khorasan très endommagée. Ne subsistent que certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent de Gond *Iran/Khorasan du Sud/Village de Gond* ***N : 31°39'15.32"*** ***E : 9°59'23.03"***	7,23 m 10,57 m 7,23 m	 	` Moulin à vent de type Khorasan complètement détruit. Ne subsistent que certaines parties du mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Nehbandan *Iran/Khorasan du Sud/Ville de Nehbandan* ***N : 31°32'18.38"*** ***E : 60° 2'32.31"***	6,38 m 13,47 m 7,32 m	 	Moulin à vent de type Khorasan complètement détruit. Ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique. Il reste une chaîne de ce type de moulin à vent dans un quartier de la ville de Nehbandan.	 

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent n° 1 de Hozdar *Iran/Sistan/Village de Hozdar* ***N : 30°32'30.45"*** ***E : 61°16'36.66"***		 	Moulin à vent de type Sistan, réparé au cours de nos chantiers de restauration de ces dernières années. Malheureusement, il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique. Nous avons donc entièrement fabriqué le mécanisme technique, que nous avons installé dans le moulin à vent. C'est le premier de ce type en état de fonctionnement au Sistan.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent n° 2 de Hozdar *Iran/Sistan/Village de Hozdar* ***N : 30°32'50.50"*** ***E : 61°16'32.93"***		 	Moulin à vent de type Sistan, réparé au cours de nos chantiers de restauration de ces dernières années. Malheureusement, il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent n° 3 de Hozdar *Iran/Sistan/Village de Hozdar* ***N : 30°32'17.28"*** ***E : 61°16'12.20"***	14,32 m 27,12 m 9,16 m	 	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent *n° 1 et n° 2* *de Qaleh-Rostam* *Iran/Sistan/Village de Qaleh-Rostam* ***N : 30°33'7.64"*** ***E : 61°15'9.80"***	18,73 m 21,12 m 10,06 m	 	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent n° 3 de Qaleh-Rostam *Iran/Sistan/Village de Qaleh-Rostam* ***N : 30°33'19.09"*** ***E : 61°14'38.31"***	6,23 m 12,43 m 10,22 m	 	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent *Région/Ville/Village* *Coordonnées*	*Largeur* *Longueur* *Hauteur*	*Roue éolienne* *Meule*	*Caractéristiques physiques*	*Photos*
Moulin à vent n° 1 de Hirmand *Iran/Sistan/Ville de Hirmand* ***N : 31° 4'12.95"*** ***E : 61°38'6.77"***	14,24 m 10,70 m 7,29 m	-	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent Région/Ville/Village Coordonnées	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent n° 2 et 3 de Hirmand *Iran/Sistan/Ville de Hirmand* **N : 31° 4'12.95"** **E : 61°38'6.77"**	21,63 m 15,54 m 14,17 m	-	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent Région/Ville/Village Coordonnées	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent n° 1 de Khamak *Iran/Sistan/Village de Khamak* **N : 30°52'25.52"** **E : 61°37'45.68"**	5,75 m 6,91 m 4,61 m	-	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent Région/Ville/Village Coordonnées	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent n° 2 de Khamak *Iran/Sistan/Village de Khamak* **N : 30°52'24.56"** **E : 61°37'46.89"**	4,86 m 8,41 m 3,78 m	-	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent Région/Ville/Village Coordonnées	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent de Varmal *Iran/Sistan/Village de Varmal* **N : 30°45'5.00"** **E : 61°20'22.87"**	5,37 m 8,34 m 6,22 m	-	Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent Région/Ville/Village Coordonnées	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques Physiques	Photos
Moulin à vent n° 1 de Zahedan-e Kohneh *Iran/Sistan/Site historique de Zahedan-e Kohneh* **N : 31° 3'10.79"** **E : 61°38'52.80"**	9,04 m 14,83 m 9,72 m		Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Nom du moulin à vent Région/Ville/Village Coordonnées	Largeur *Longueur* Hauteur	*Roue éolienne* Meule	Caractéristiques physiques	Photos
Moulin à vent n° 2 de Zahedan-e Kohneh *Iran/Sistan/Site historique de Zahedan-e Kohneh* **N : 31° 3'12.76"** **E : 61°38'49.16"**	6,22 m 10,89 m 7,11 m		Moulin à vent de type Sistan complètement détruit. Il ne subsiste aucune trace de son mécanisme technique.	

Morphologies de l’architecture des moulins à vent persans

L’étude de l’ensemble des moulins à vent à axe vertical iraniens nous montre clairement qu’ils ont une base architectonique commune. Selon nous, c’est le type Khorasan qui peut être considéré comme la base commune. D’un point de vue architectural, ce modèle se retrouve dans d’autres types de moulins, avec quelques différences techniques et architectoniques (comme la direction et la forme de l’entrée et de la sortie du vent).

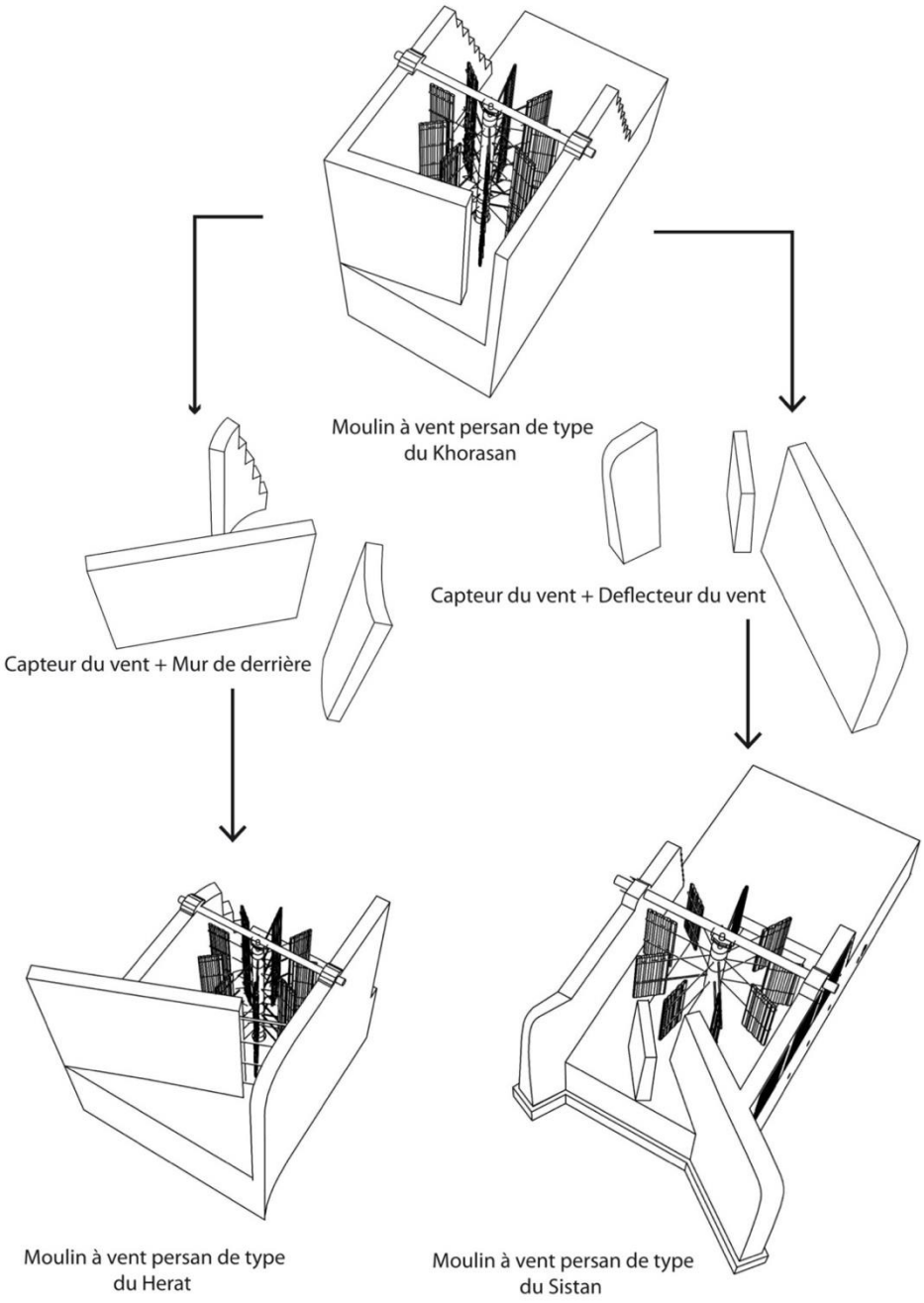


Figure 5-28 : diagramme montrant les différences architecturales entre les trois principaux types de moulins à vent persans.

Géométrie constructive des moulins à vent persans

Au cours de notre étude sur les moulins à vent, nous avons trouvé la géométrie constructive de chacun des types de moulin à vent. Nous savons que sur le plateau iranien la situation climatique et l'utilisation de matériaux instables comme la terre crue provoquent une forte érosion des bâtiments. Dans cette situation, la géométrie constructive est d'un grand secours pour la réparation, la restauration et même la reconstruction des bâtiments.

Nous présentons ici la géométrie constructive de chaque type de moulin à vent iranien selon nos études sur la morphologie des différents types de moulins sur le plateau iranien. C'est la première fois que cette analyse géométrique est réalisée. Elle est concrètement très utile sur nos chantiers de restauration car, dans la plupart des cas, nous devons reconstruire une grande partie de la structure et des espaces architectoniques des moulins à vent abandonnés du Khorasan mais aussi du Sistan. Dans ces travaux, la géométrie constructive nous aide à respecter la proportion des bâtiments et à reproduire l'espace détruit de chaque type de moulin à vent.

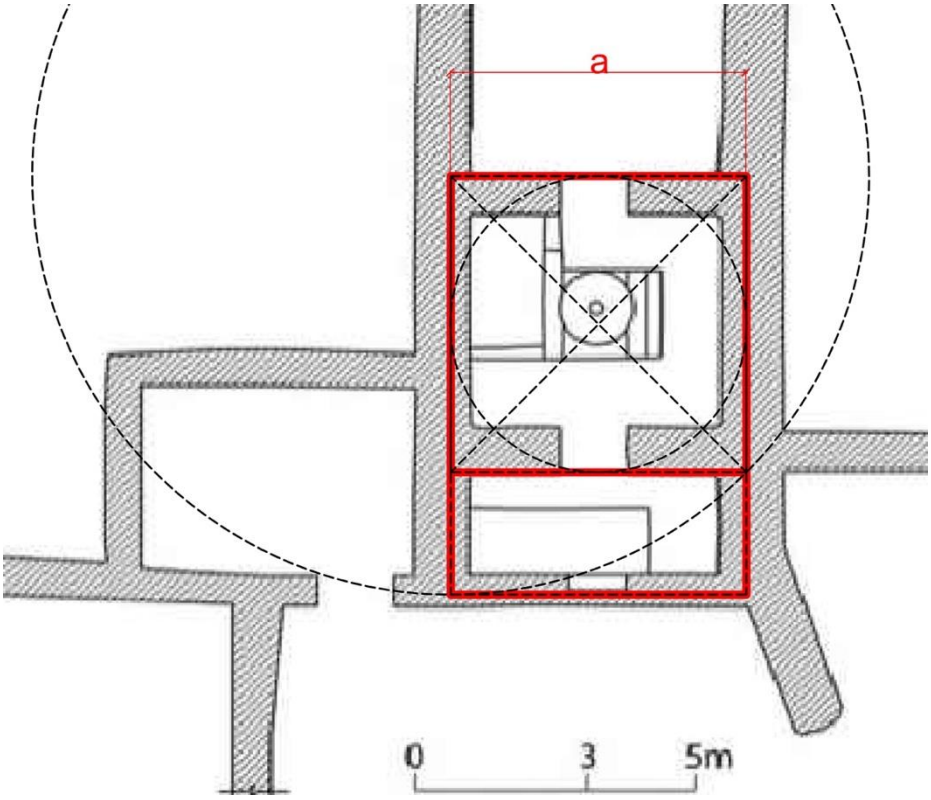


Figure 6-1 : Géométrie constructive du plan d'un moulin à vent de type Hérat dans le village de Shakiban.

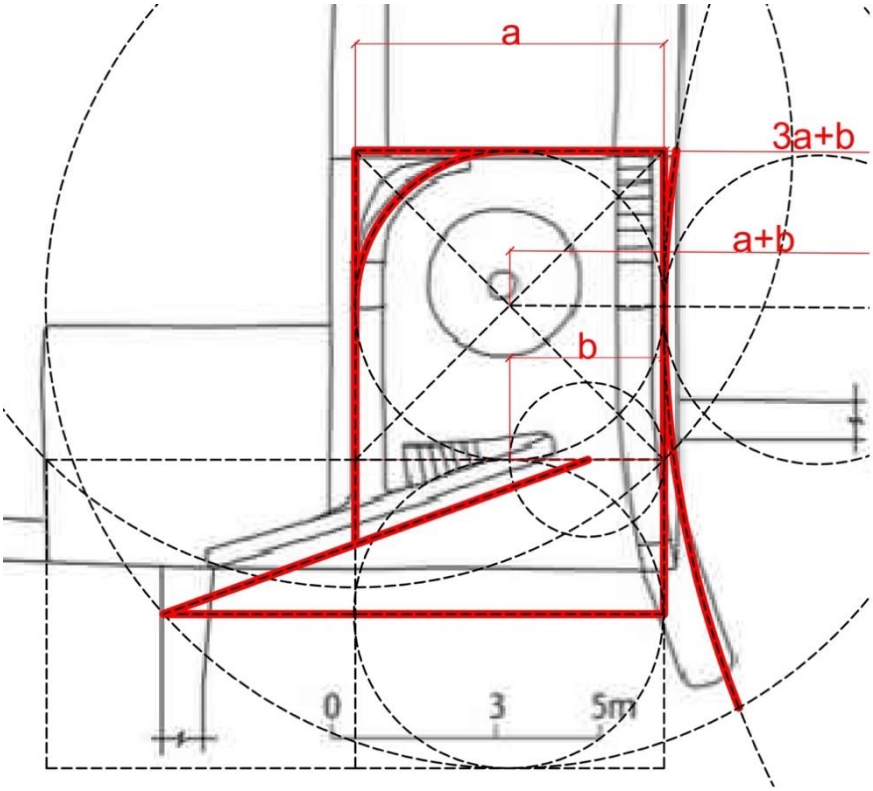


Figure 6-2 : Géométrie constructive du plan d'un moulin à vent de type Hérat dans le village de Shakiban.

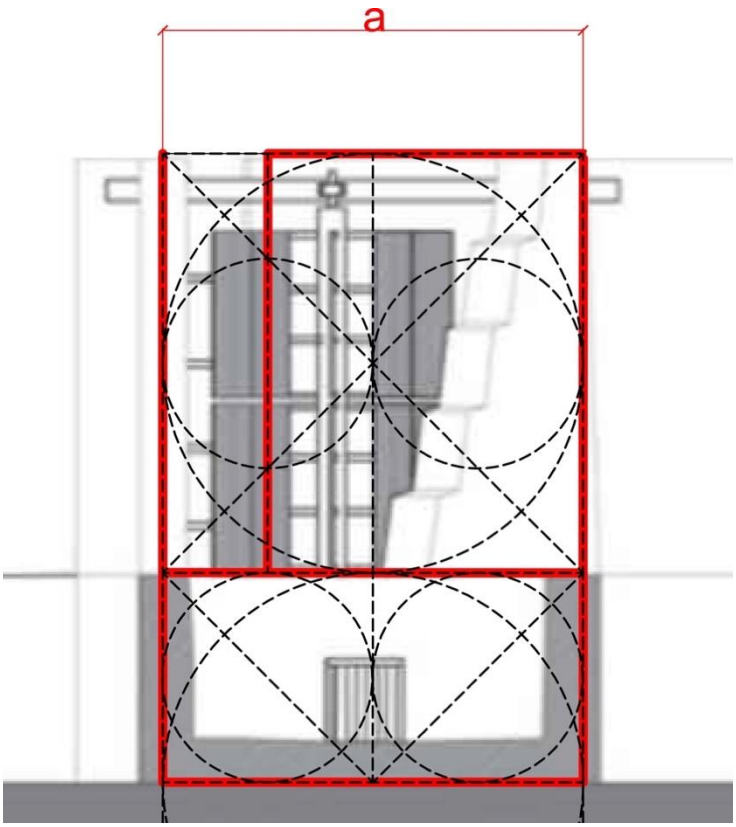


Figure 6-3 : Géométrie constructive de la façade sud d'un moulin à vent de type Hérat dans le village de Shakiban.

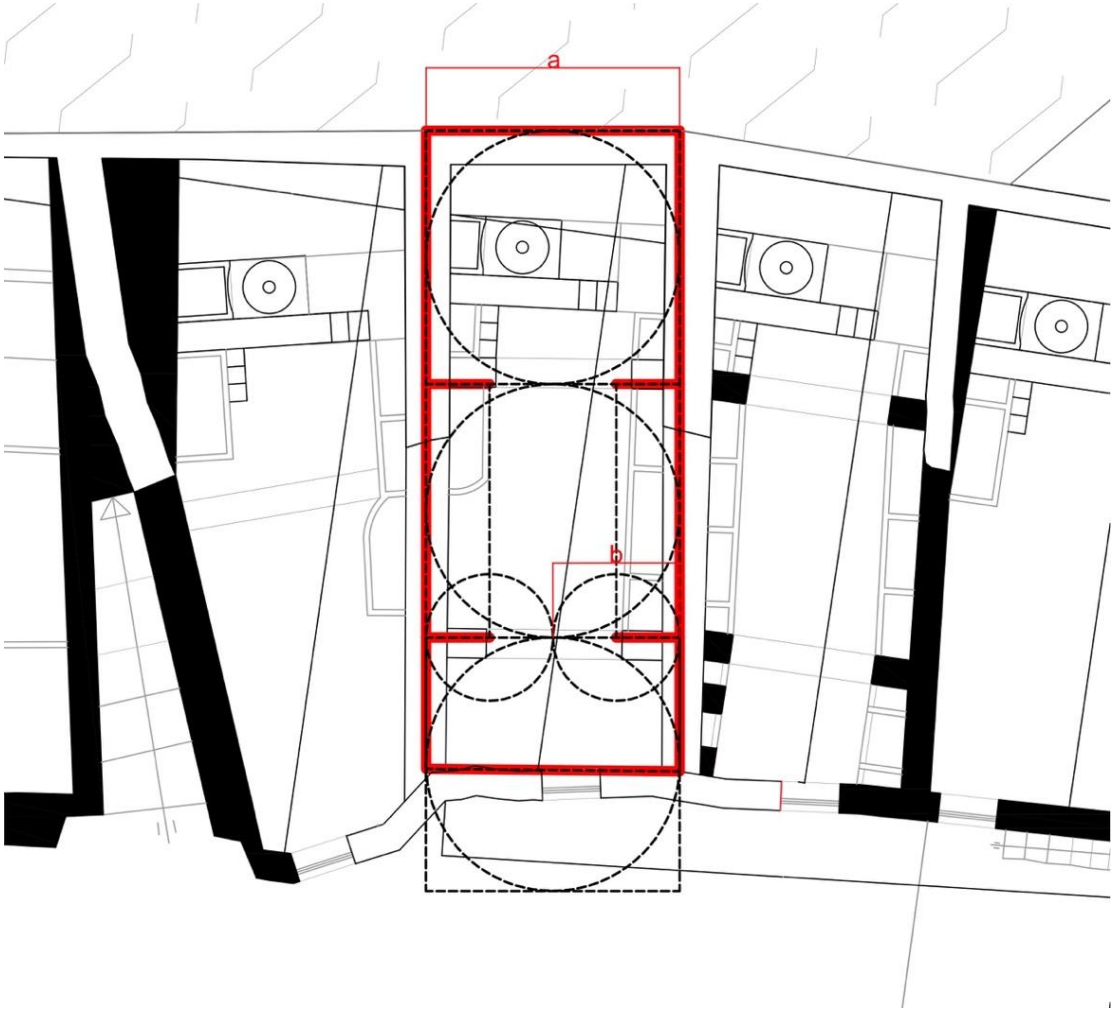


Figure 6-4 : Géométrie constructive du plan d'un moulin à vent de type Khorasan dans le village de Nashtifan.

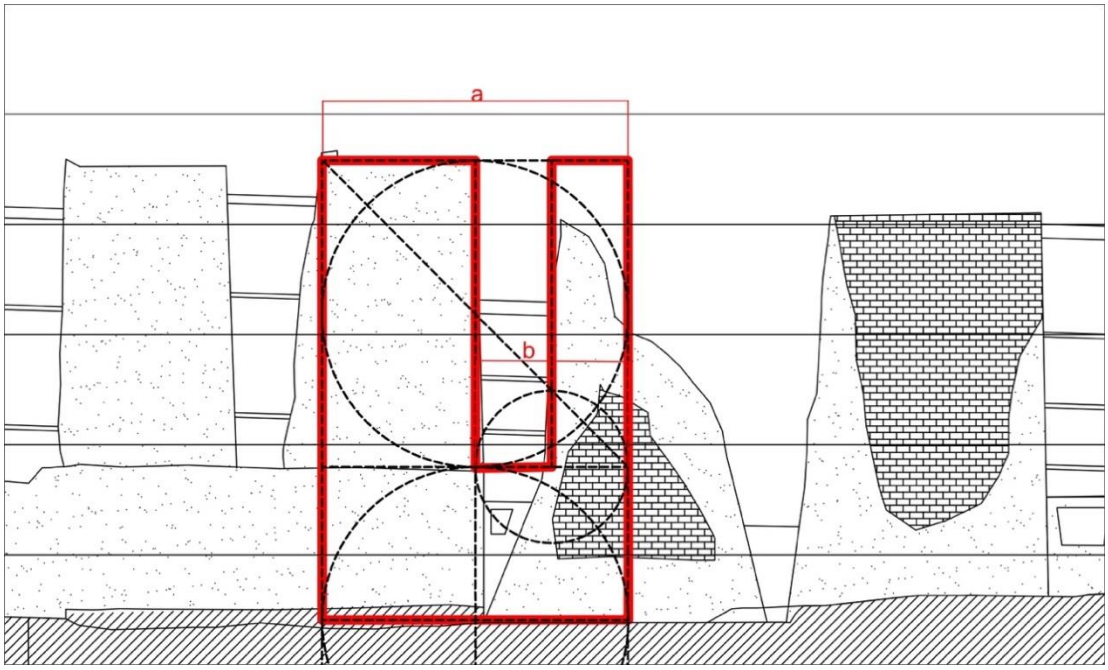


Figure 6-5 : Géométrie constructive de la façade d'un moulin à vent de type Khorasan dans le village de Nashtifan.

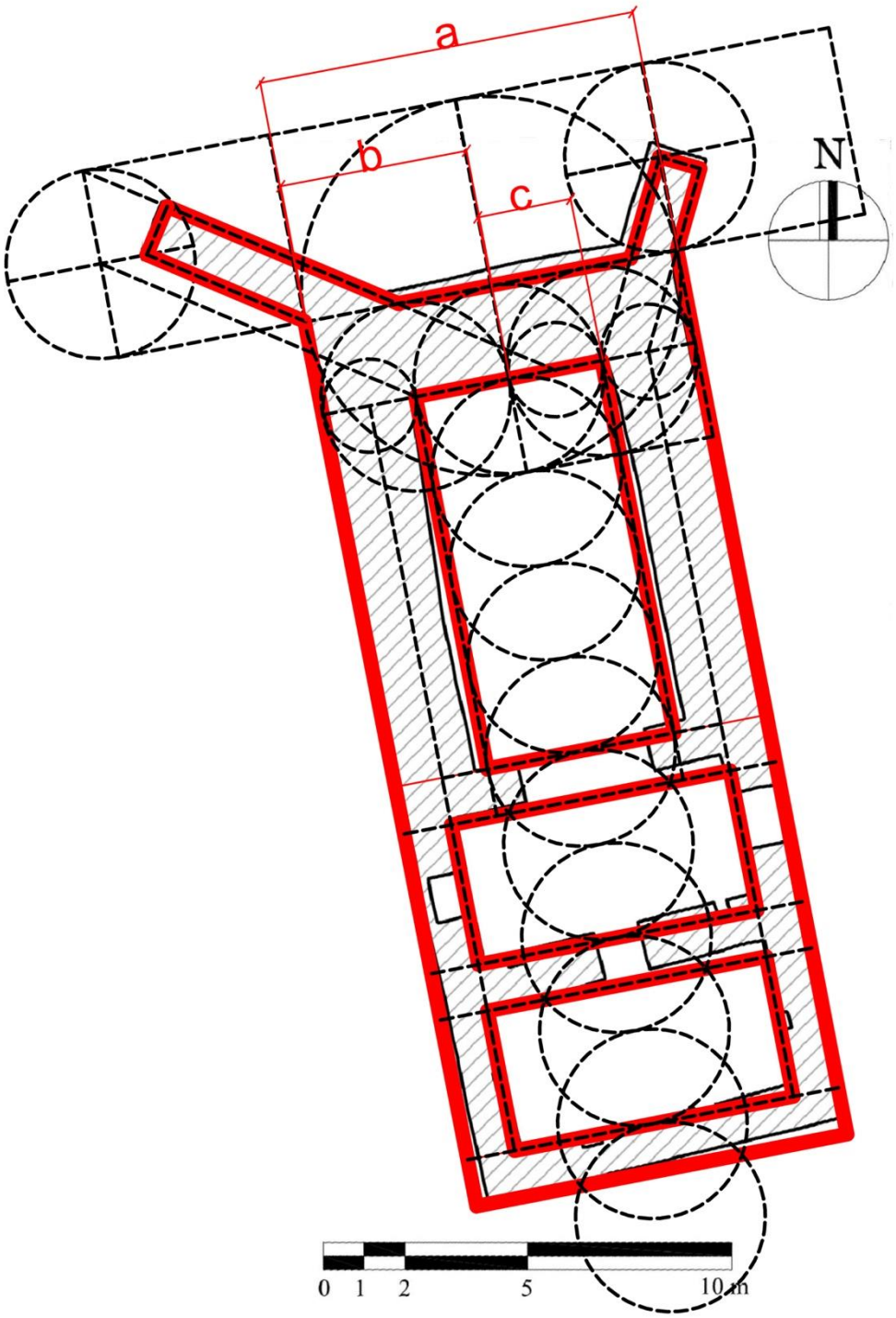


Figure 6-6 : Géométrie constructive du plan d'un moulin à vent de type Sistan dans le village détruit de Hozdar.

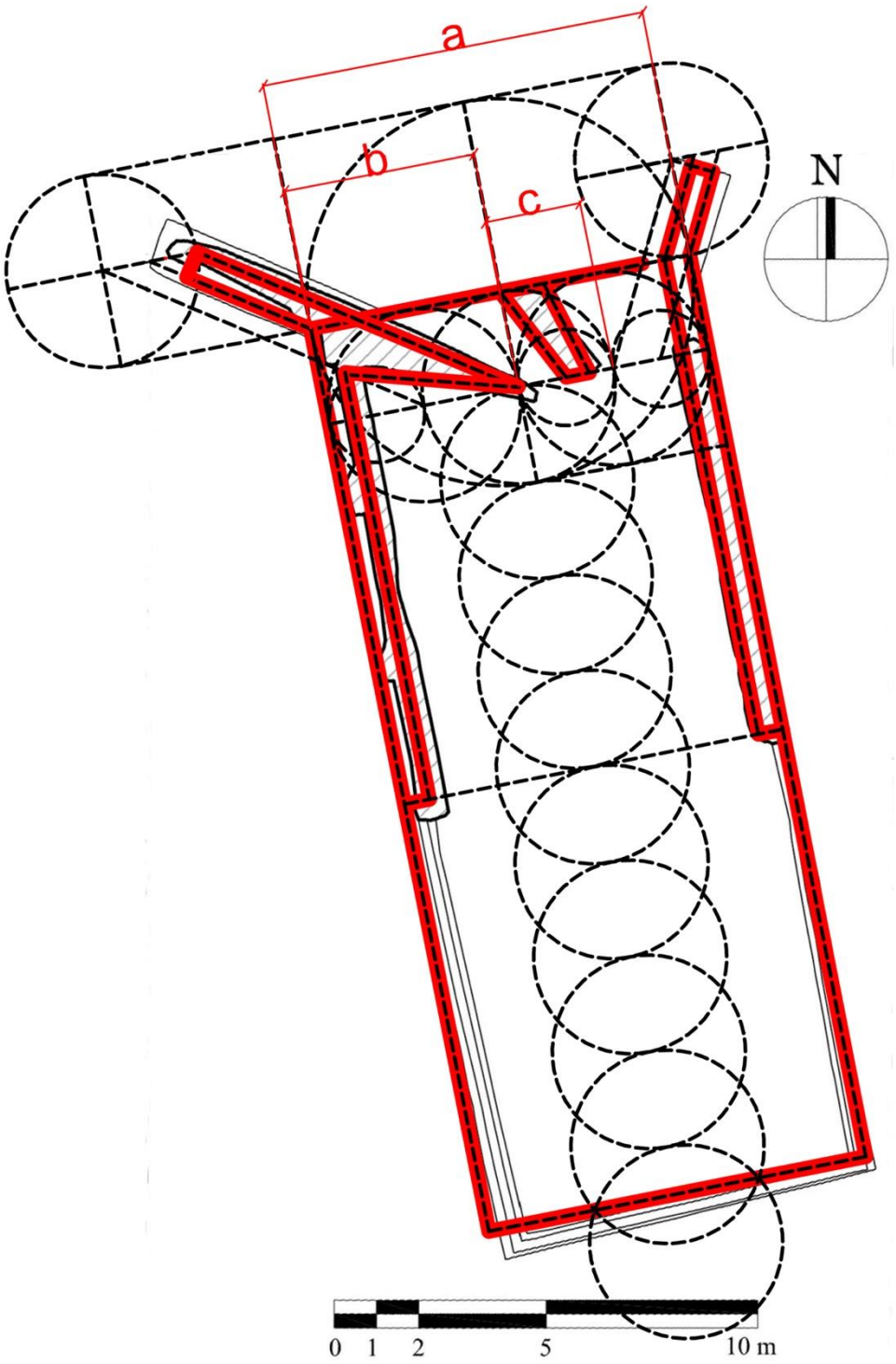


Figure 6-7: Géométrie constructive du plan d'un moulin à vent de type Sistan dans le village détruit de Hozdar.

Chapitre VII

Analyse Numérique et Modélisation

Introduction

L'objet de la présente étude est de décrire la méthodologie et les résultats de l'analyse CFD pour déterminer la pression du vent sur les parois et les pales de trois géométries différentes de moulins à vent persans. On a déjà fait une autre analyse numérique qui a été réalisé en collaboration avec le centre de recherche ONERA, l'article correspondant de cette recherche est présenté en annexe de cette thèse.

Compte tenu de l'importance et de la forme particulière de ce bâtiment, l'analyse CFD peut fournir la distribution de la pression correcte provoquée par le vent sur les murs des bâtiments. L'analyse CFD (Computational Fluid Dynamic) est capable de créer une soufflerie virtuelle pour analyser les effets du vent sur les surfaces de la structure. Cette étude inclut les résultats de la première analyse (avec une vitesse du vent de 30 km/h et 110 km/h) et les résultats de l'analyse supplémentaire avec une vitesse du vent de 14 km/h et la modification de la position de la lame de l'un des moulins à vent de Hozdar.

L'analyse présenté dans ce chapitre est réalisée grâce à la collaboration avec la société de DIBA, une société iranienne spécialisée en toile tendu et la société italienne de Maffeis Engineering.

Définition de la vitesse du vent

Pression du vent

Pour déterminer la pression du vent sur la structure, l'analyse CFD donnera la répartition de la pression sur les murs et les pales des moulins à vent en utilisant la forme géométrique exacte des bâtiments et les conditions de vent mesurées sur le site.

Vitesse de base du vent

Sur le site, le vent souffle 120 jours. Il s'agit d'un vent d'été puissant soufflant de la fin du mois de mai à la fin du mois de septembre. La direction du vent est assez constante. La vitesse habituelle du vent est d'environ 30-40 km/h ou moins ; elle dépasse rarement 100-110 km/h.

Pour l’analyse, trois conditions typiques seront utilisées pour déterminer la pression du vent sur les structures :

- La vitesse maximale du vent enregistrée, avec une vitesse de Vmax = 110 km/h = 30,6 m/s ;

- La vitesse moyenne du vent, avec une vitesse de Vmean = 30 km/h = 8,3 m/s ;

- La vitesse minimale du vent pour la rotation de la lame Vmin = 14 km/h = 3,9 m/s.

La direction du vent est assez constante et le moulin à vent a été conçu pour fournir une pression du vent maximale sur les pales afin d’augmenter la puissance éolienne. Pour l’analyse CFD, la direction du vent est considérée comme parallèle à l’axe longitudinal des moulins à vent.

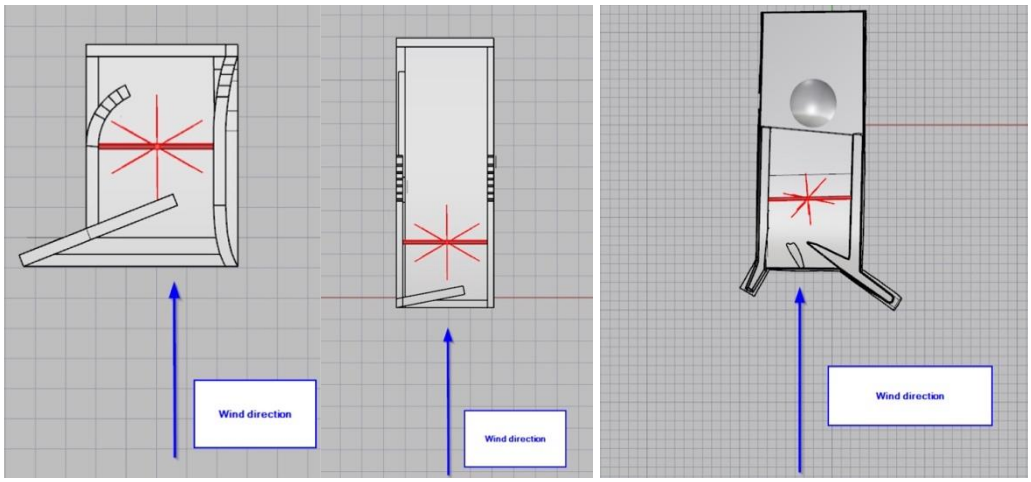


Figure 7-1: Direction du vent pour l’analyse CFD.

Modèle géométrique

La géométrie du moulin à vent est basée sur les modèles Rhinoceros suivants :

- As-Shakiban-Corp.3dm

- As-Hozdar-Corp.3dm

- As-Neh-Corp.3dm

Le modèle 3D du bâtiment a été simplifié pour représenter uniquement les principales formes du bâtiment et les lames.

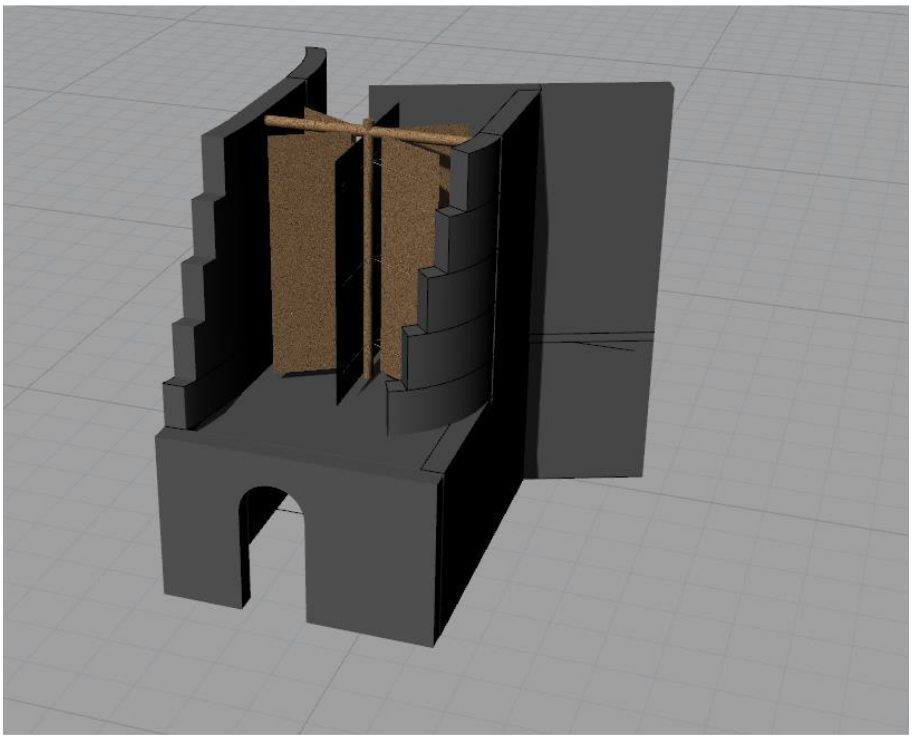


Figure 7-2: As-Shakiban-Corp.3dm

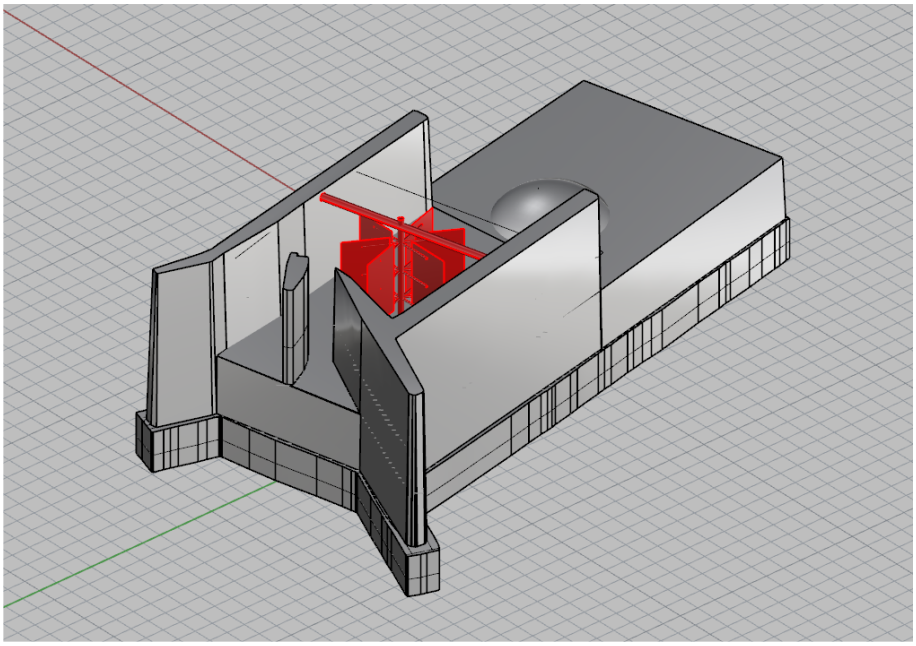


Figure 7-3 : AS-Hozdar-Corp.3dm

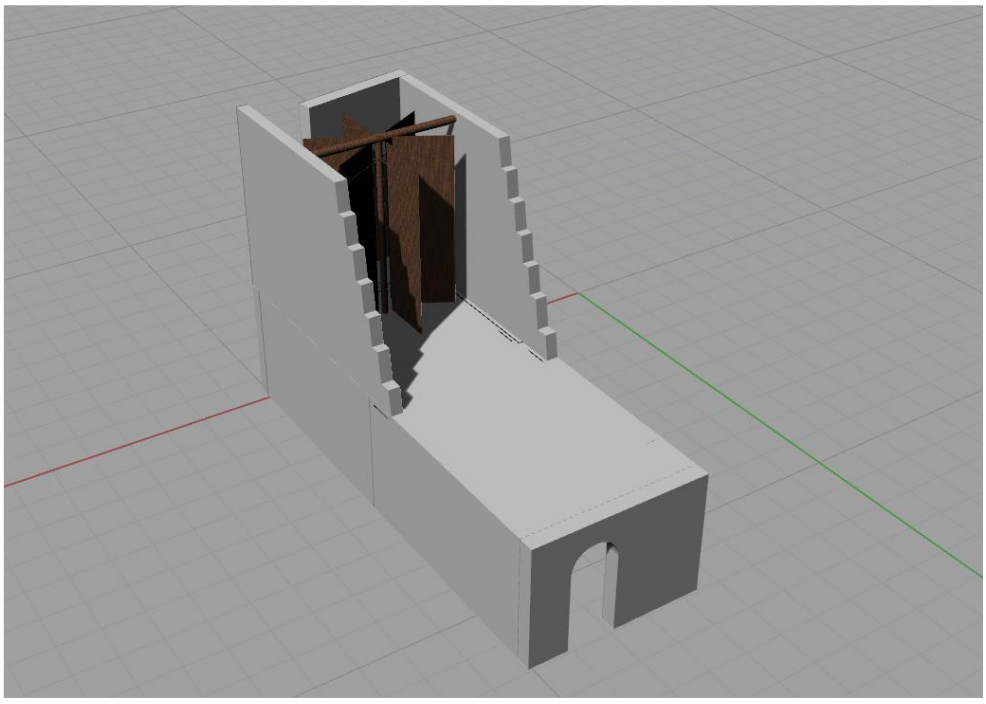


Figure 7-4 : As-Neh-Corp.3dm

La topographie du terrain est plate, sans obstacles autour des moulins à vent.

4 paramètres CFD

Le logiciel utilisé pour les simulations CFD est TDYN. Il est fabriqué par l'éditeur de logiciels Compass IS. Les paramètres pour les simulations sont choisis sur la base

de nombreuses publications scientifiques tels le *Guide de bonnes pratiques pour la simulation CFD des flux dans l'environnement urbain*, écrit par Franke et al., COST action 732, mai 2007 et "Application de CFD pour la simulation des performances d'un bâtiment pour l'environnement extérieur : un aperçu", par Blocken et al., *Journal de simulation des performances d'un bâtiment*, vol. 4, n° 2, juin 2011, p. 157-184.

Avec la CFD, il est possible de réaliser une soufflerie virtuelle contenant la géométrie réelle des moulins à vent. En ce qui concerne la soufflerie réelle, le facteur de blocage doit être inférieur à 5 %, ou les simulations peuvent donner des valeurs de pression plus élevées que le cas effectif. Le facteur de blocage est obtenu par le ratio de la section transversale du bâtiment et de la section de la soufflerie. Pour l'analyse CFD, le facteur de blocage est inférieur à 1,3 %. La taille de la soufflerie virtuelle est basée sur la dimension maximale du bâtiment, environ 30 m. La région contenue dans la soufflerie virtuelle est appelée domaine de calcul et ses extensions sont :

- longueur de la soufflerie virtuelle : 870 m
- largeur de la soufflerie virtuelle : 420 m
- hauteur de la soufflerie virtuelle : 240 m
- rayon du cylindre intérieur : 45 m
- hauteur du cylindre intérieur : 45 m

Le cylindre interne est une région autour du bâtiment où la grille de calcul est fine, avec des petits éléments pour obtenir un résultat plus précis concernant le flux d'air sur la structure.

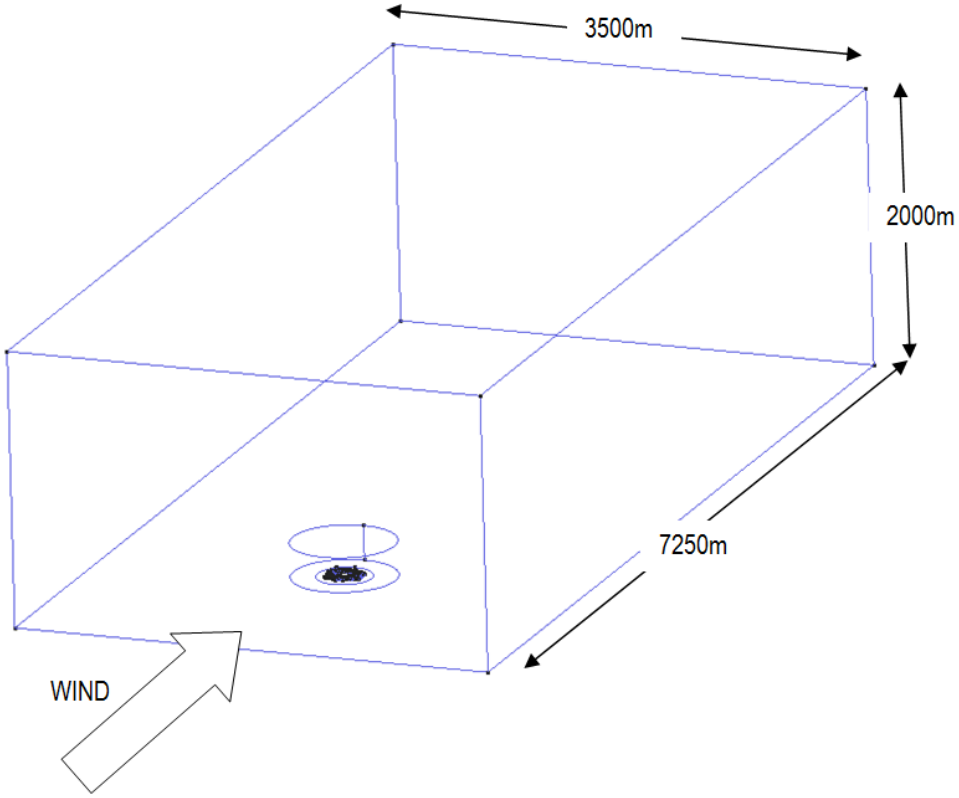


Figure 7-5 : Taille du domaine de calcul.

La condition limite utilisée pour les simulations sur la surface externe du domaine de calcul est montrée dans l'image suivante.

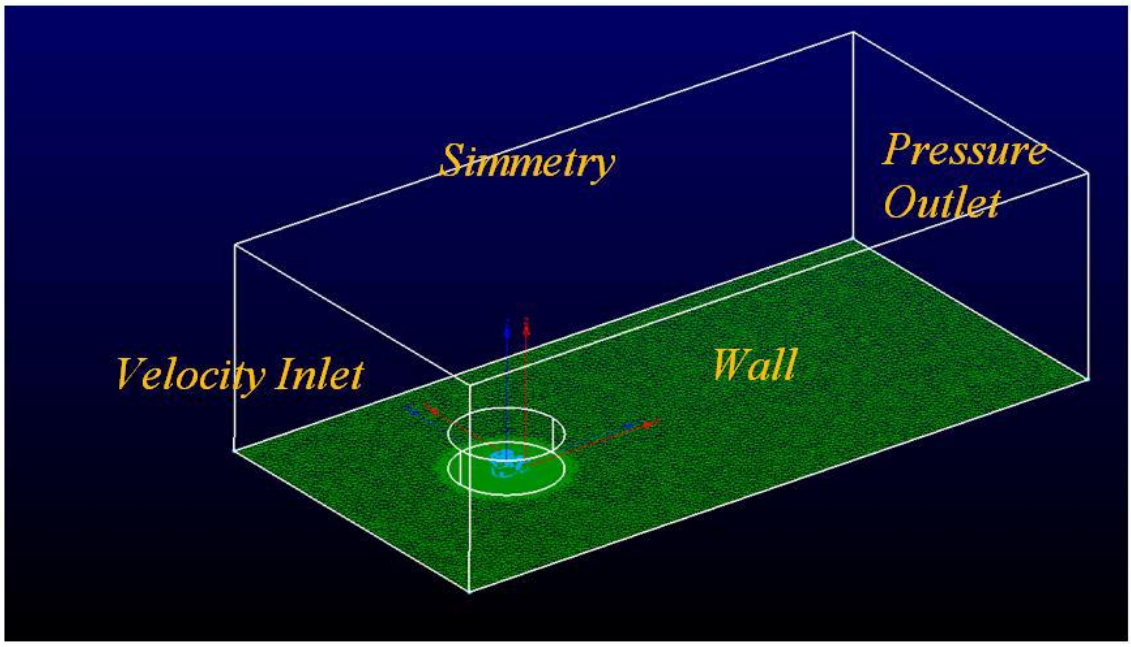


Figure 7-6 : Condition limite sur les surfaces des domaines CFD.

- La vitesse d'entrée est la condition mathématique pour l'entrée du flux dans la soufflerie virtuelle. La vitesse à l'entrée a une vitesse du vent égale à 30,6 m/s (à la vitesse maximale) et 8,3 m/s (au minimum), avec un profil vertical constant.

- Le mur : la surface sur le sol de la soufflerie virtuelle et la surface du bâtiment sont solides ; la condition mathématique pour cette surface est qu'elle soit non glissante de sorte que la vitesse du vent à la surface soit nulle.

- Symétrie : les surfaces latérales et supérieures de la soufflerie ont les conditions limites de symétrie pour que la composante de vitesse normale à la surface soit nulle.

- Pression à la sortie au bout de la soufflerie : ces conditions limites sont égales à définir le flux d'air qui va à l'air libre, à la pression atmosphérique.

Pour la simulation CFD, l'air était considéré comme un fluide incompressible, avec une densité ρ = 1,17kg/m^3 et une température à 25 ° C. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle ILES, (Implicit Large Eddies Simulations), tel que suggéré par la communauté scientifique et l'éditeur du logiciel. Les schémas de discrétisation temporelle et spatiale sont du 4ème ordre et les équations de pression et de vitesse résiduelles sont fixées à 10 ^-5.

Les images suivantes décrivent la grille de calcul (maillage) utilisée pour les simulations CFD.

La taille de chaque élément du maillage de calcul varie avec la distance des surfaces des moulins à vent. Les éléments de la grille sur la surface du bâtiment ont une dimension maximale de 0,05 m à 0,1 m, mais varient pour s'adapter à la forme et à la taille de la surface. L'élément le plus grand se trouve sur la surface externe du domaine de calcul. Le facteur de croissance entre deux éléments adjacents est inférieur à 1,3. La grille de calcul a un total de plus de 1 million d'éléments tétraédriques.

Différentes typologies de maillage ont été testées pour vérifier les insensibilités des résultats de la taille du maillage.

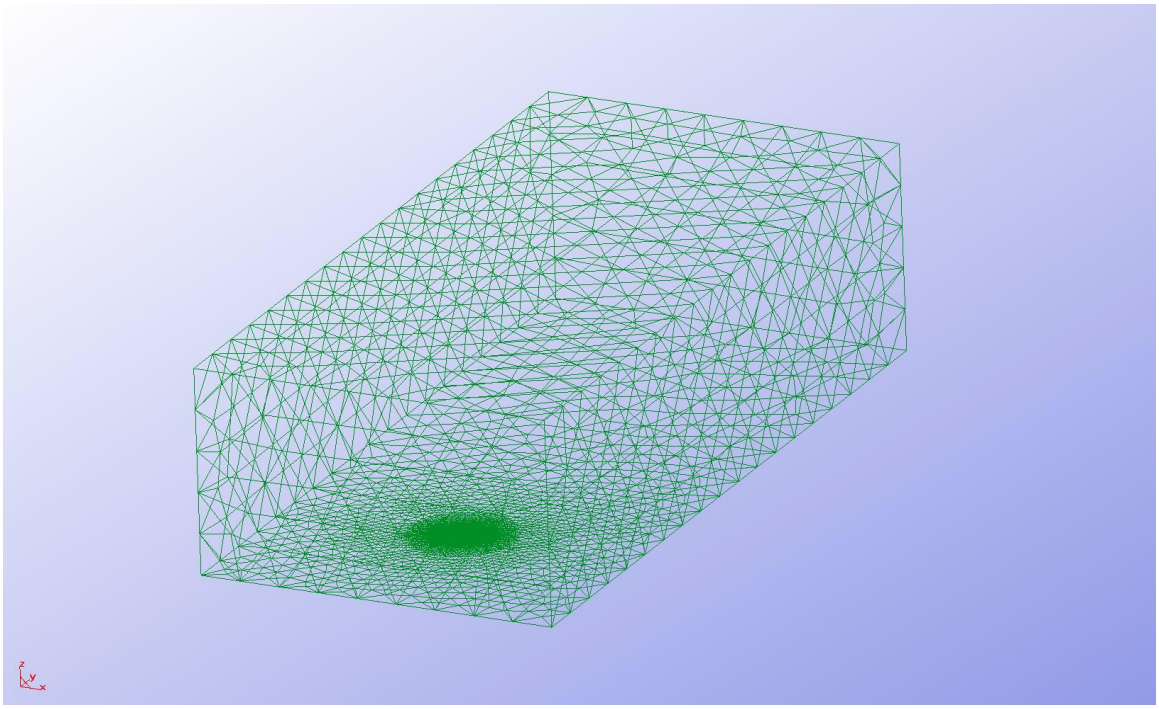


Figure 7-7 : Vue d’ensemble de la grille de calcul.

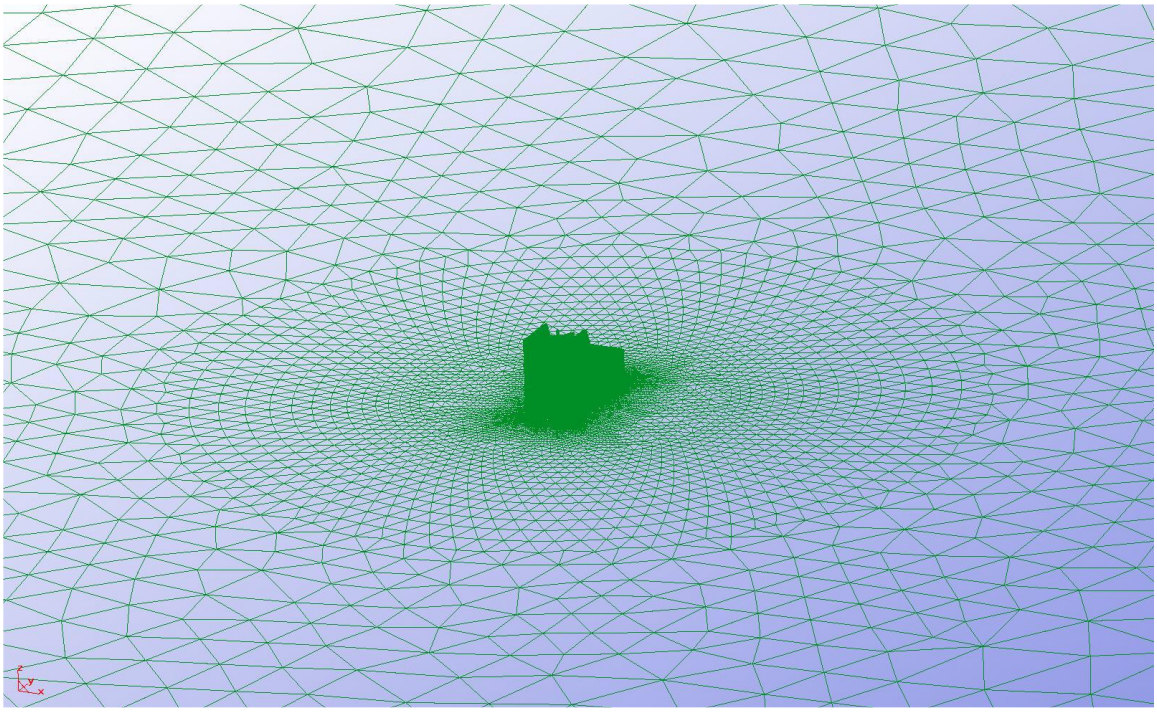


Figure 7-8 : Particularités de la grille de calcul près de la structure.

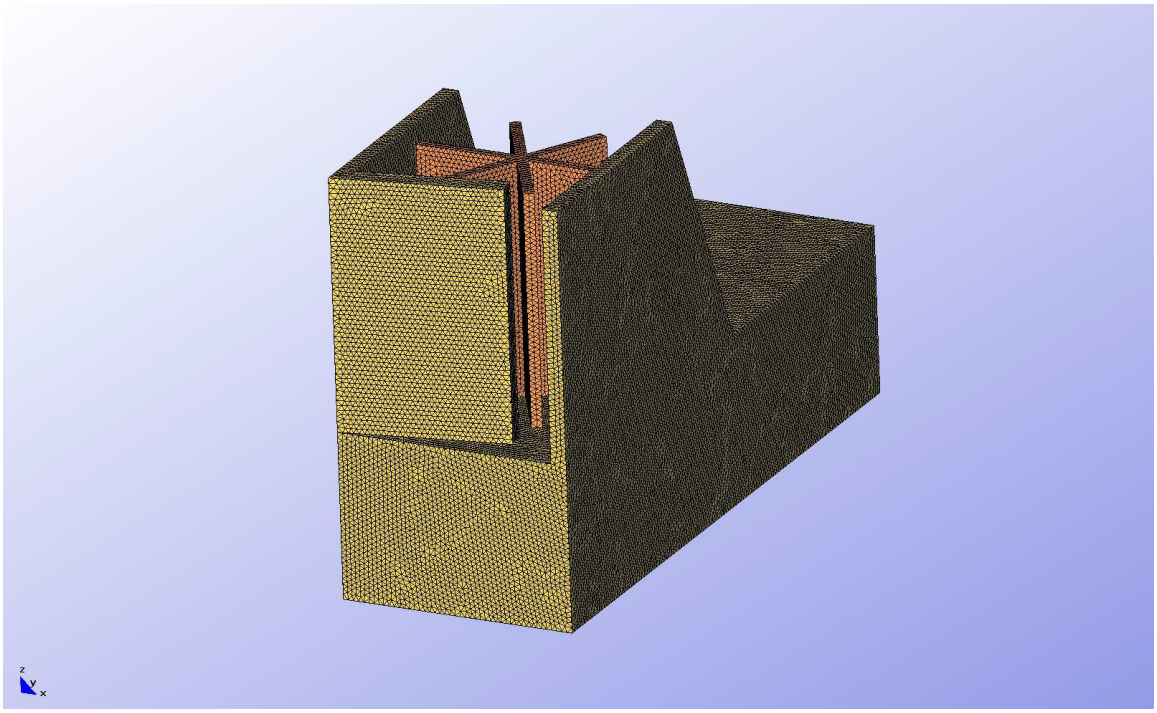


Figure 7-9 : Grille de calcul sur les surfaces du moulin à vent (As-Neh-Corp).

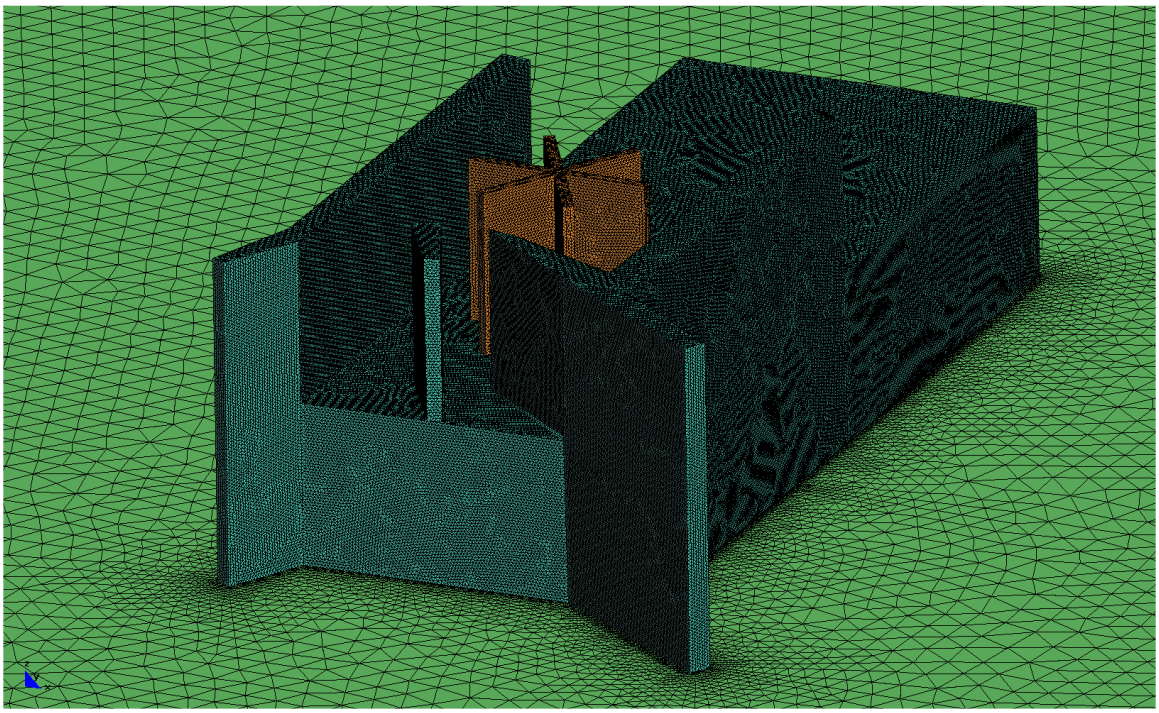


Figure 7-10 : Grille de calcul sur les surfaces du moulin à vent (AS-Hozdar-corp).

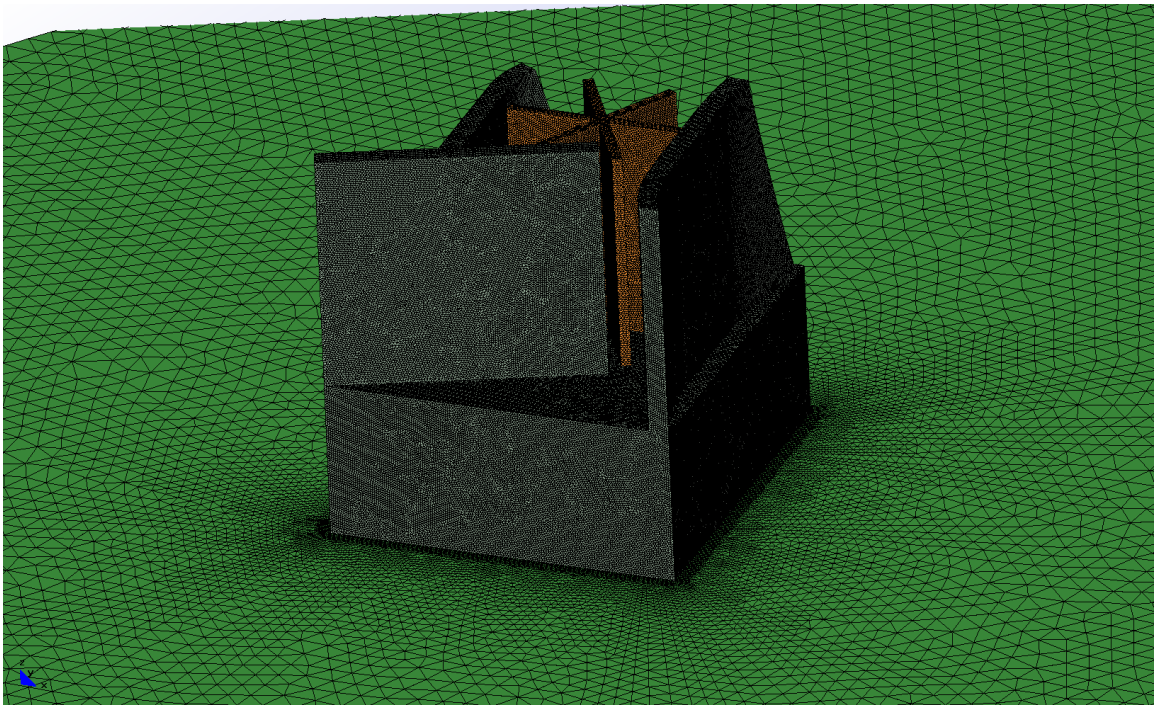


Figure 7-11 : Grille de calcul sur les surfaces du moulin à vent (As-Shakiban-Corp).

Résultats de la simulation CFD - pression sur les murs

Les images suivantes donnent la distribution moyenne de la pression du vent sur les surfaces des murs et des pales des trois moulins à vent. Puisque la simulation CFD analyse 20 secondes de vent sur le bâtiment, les images suivantes montrent seulement une valeur moyenne de la simulation.

Les valeurs de la pression du vent fournies avec les images suivantes doivent être considérées comme la valeur moyenne de la pression du vent sur les structures.

Ces valeurs sont différentes de ce que suggère le code standard (Eurocode EN 1991 : 1-5, ASCE, ...) car les simulations ne permettent pas d'analyser les effets dus aux pics de pression du vent eux-mêmes dus à l'intensité de la turbulence du flux d'air.

Pour ces raisons, la répartition de pression suivante NE DOIT PAS être utilisée pour une conception structurelle du bâtiment conformément aux codes standards. Pour la conception structurelle du bâtiment, une évaluation plus approfondie doit être

effectuée, basée sur les résultats de l'analyse afin d'obtenir les coefficients de pression pouvant être utilisés avec les codes standards.

Les valeurs de pression dans la simulation suivante sont fournies en Pa et doivent être considérées comme des pressions externes agissant dans la direction normale du mur. Les distributions de pression fournies dans cette étude sont sous la forme d'une pression externe, positive quand elles produisent une force de pression sur la surface et négative lorsqu'elles produisent une force d'aspiration sur la surface.

Les pressions sur les lames sont décrites dans le paragraphe suivant.

Pression calculée à V = 110 km/h

As-Neh-Corp

Vitesse du vent : 110km / h = 30,6 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-A_01

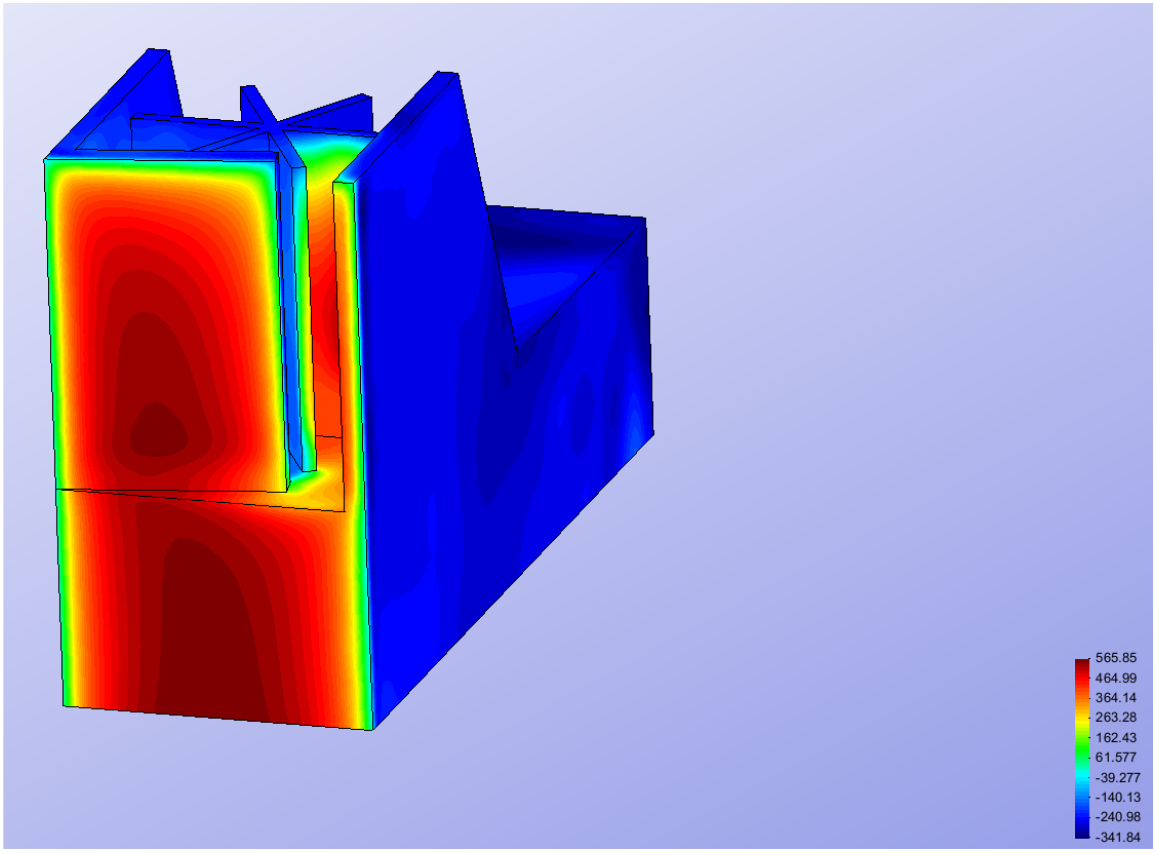


Figure 7-12 : Vue isométrique (1) d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

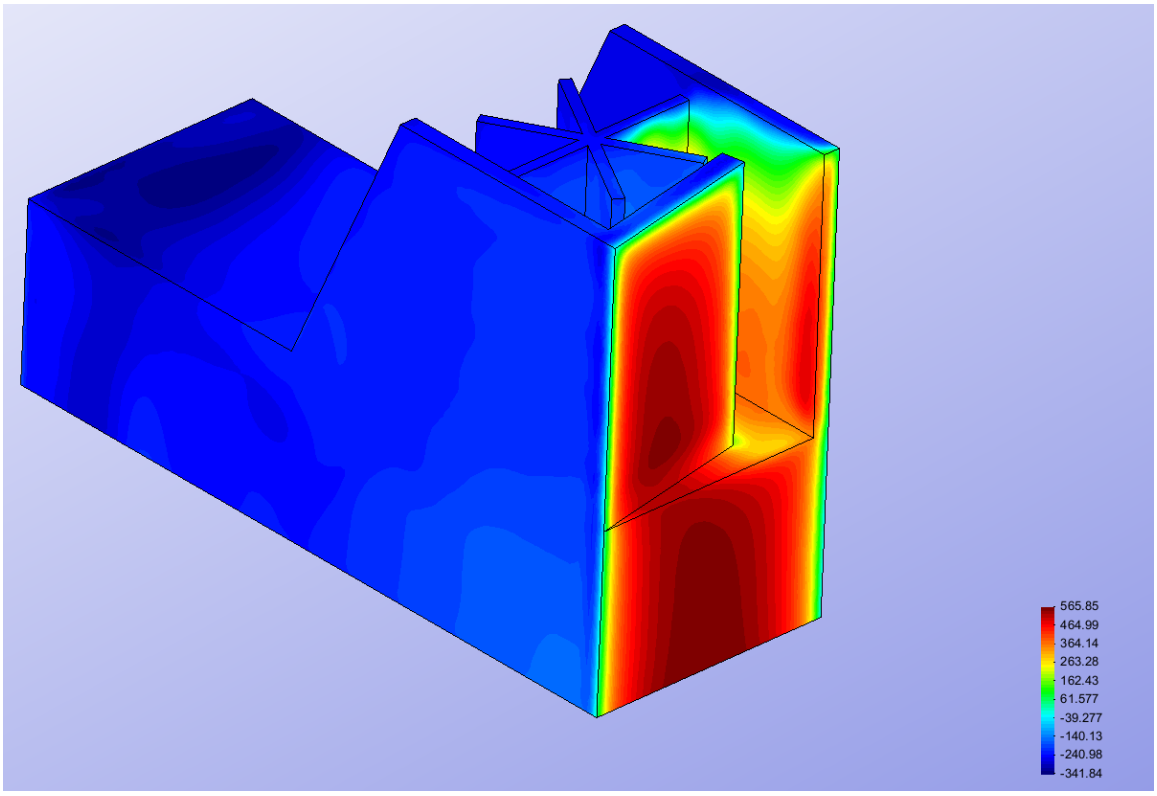


Figure 7-13 : Vue isométrique (2) d’As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

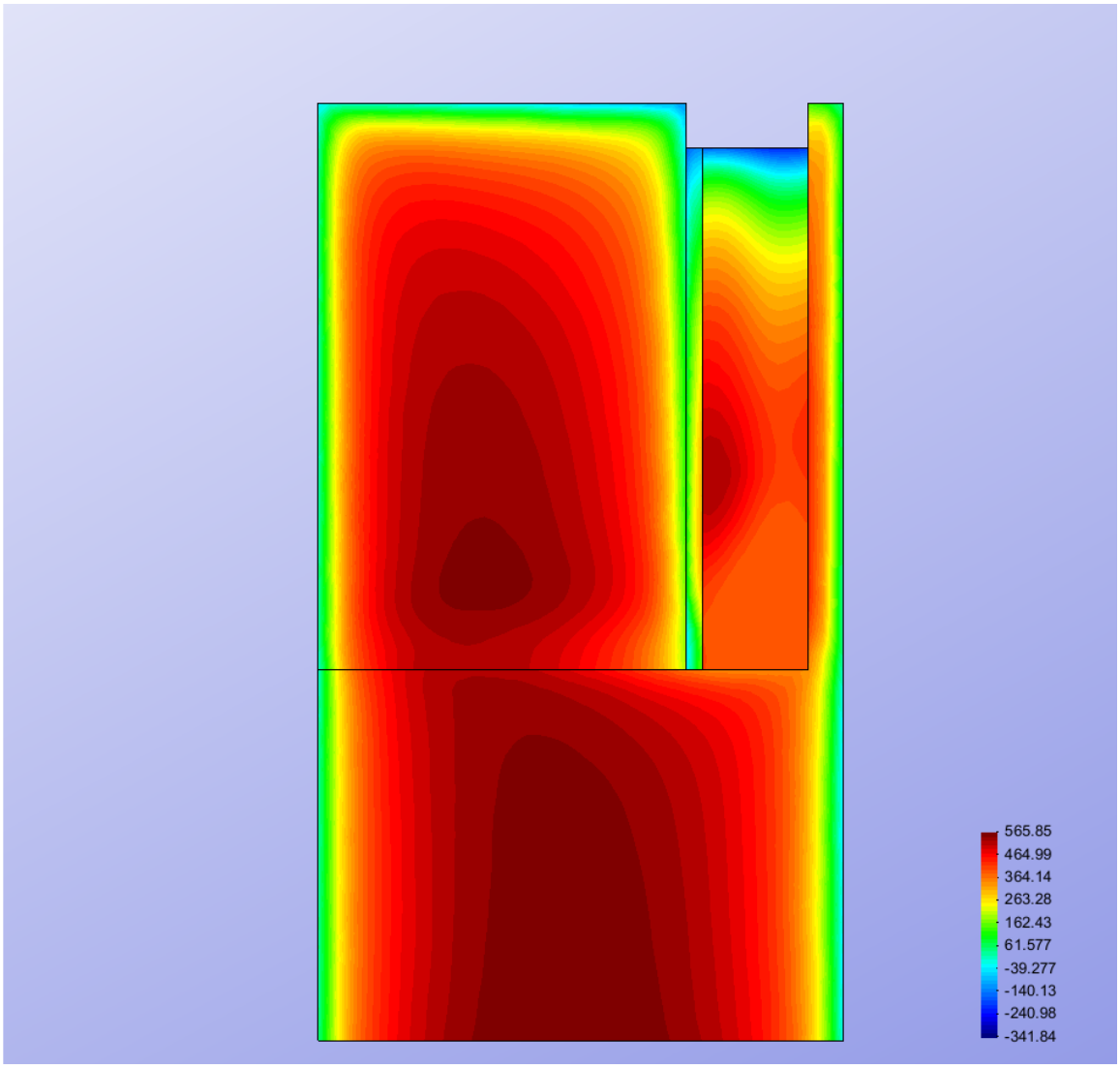


Figure 7-14 : Vue de face d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

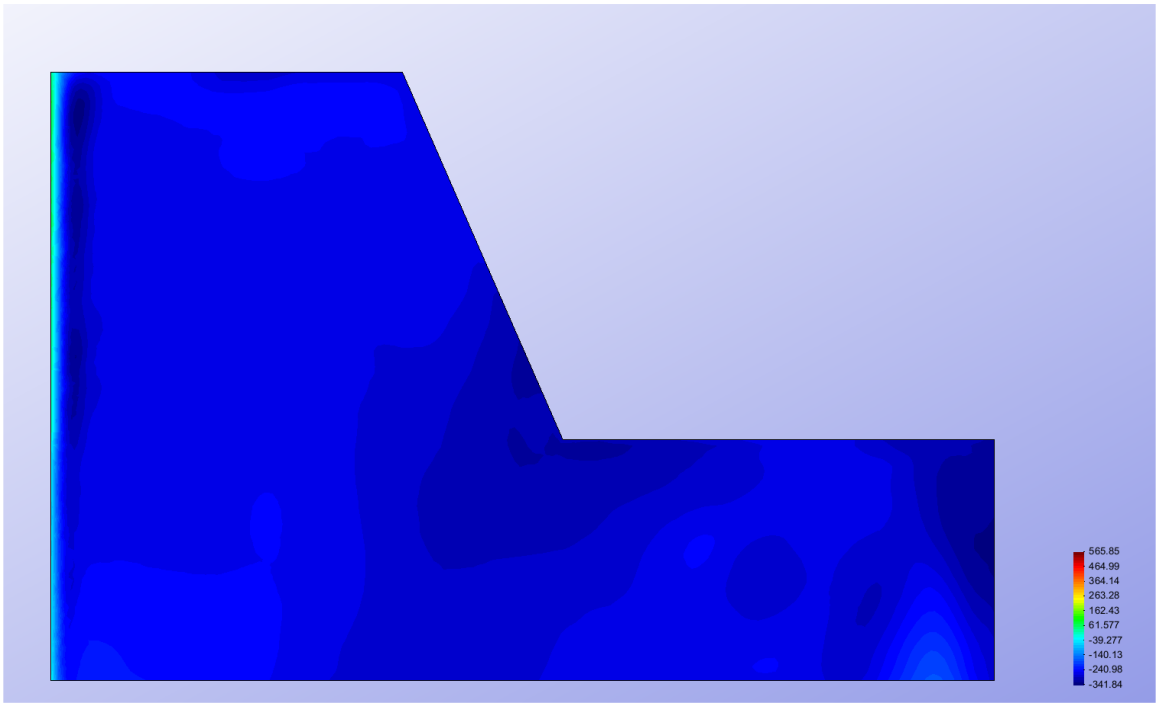


Figure 7-15 : Vue latérale d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de gauche à droite.

Figure 7-16 : Vue latérale d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de droite à gauche.

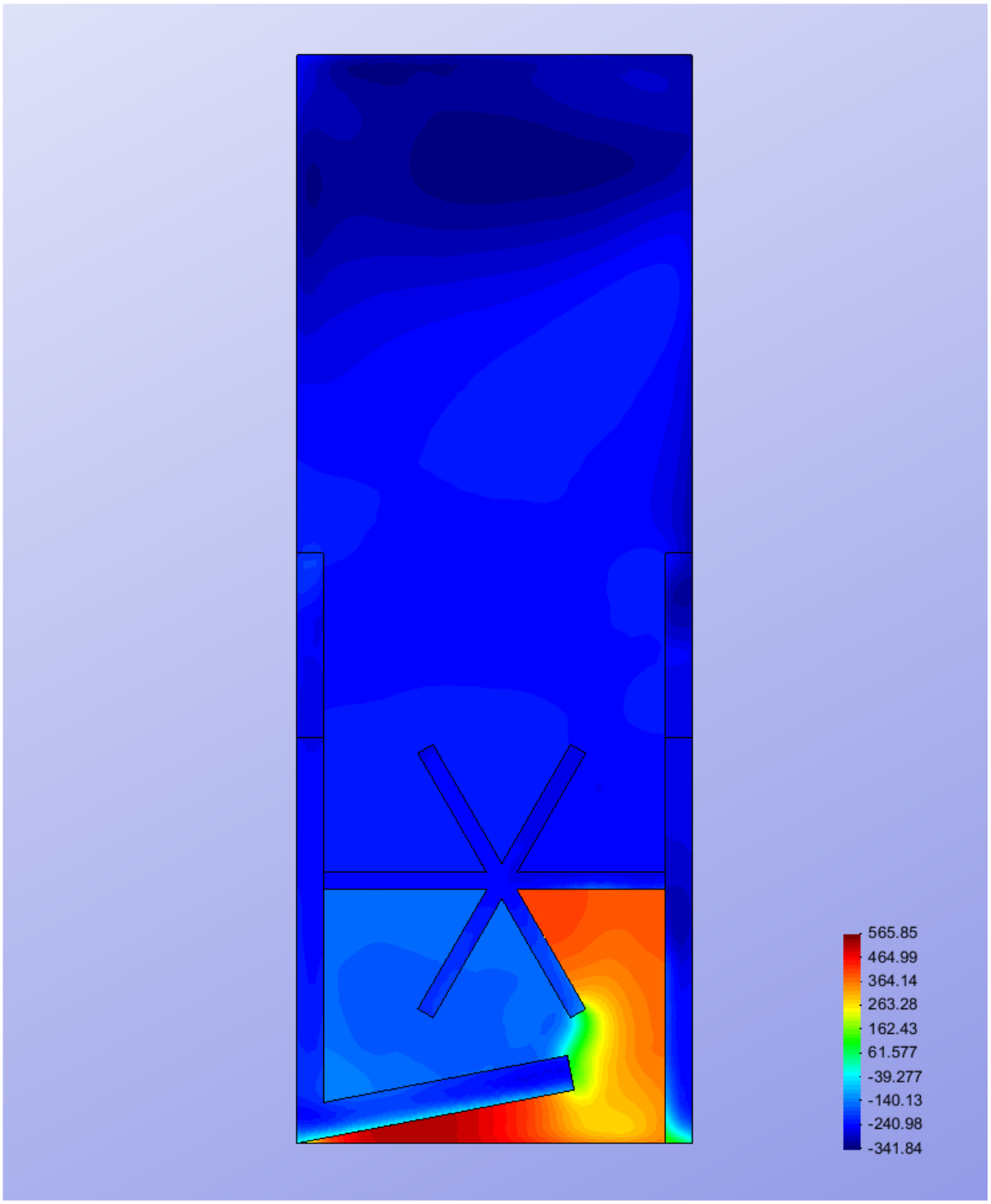


Figure 7-17 : Vue supérieure d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

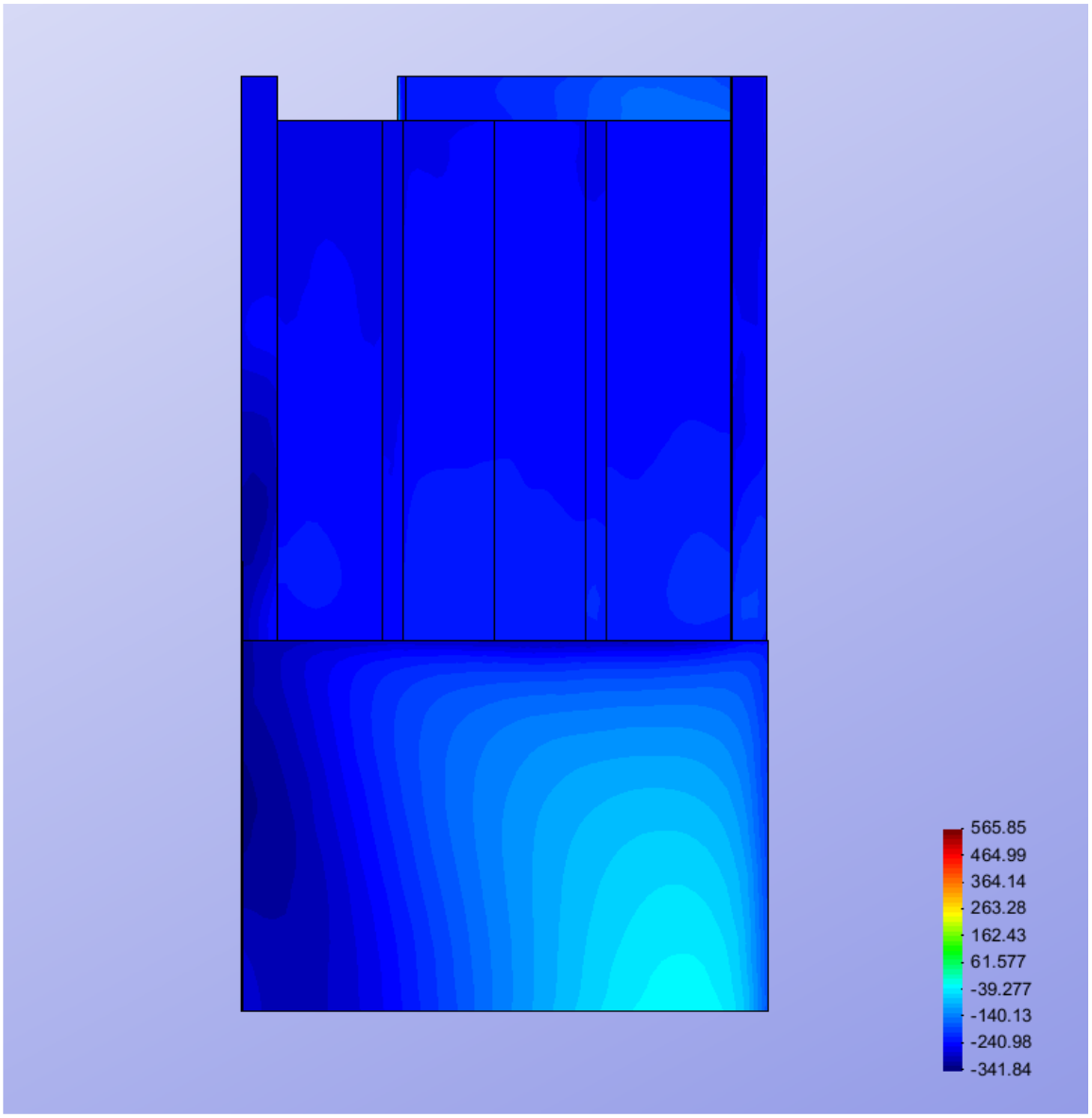


Figure 7-18 : Vue arrière d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

As-Hozdar-corp

Vitesse du vent : 110 km/h = 30,6 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-B_01

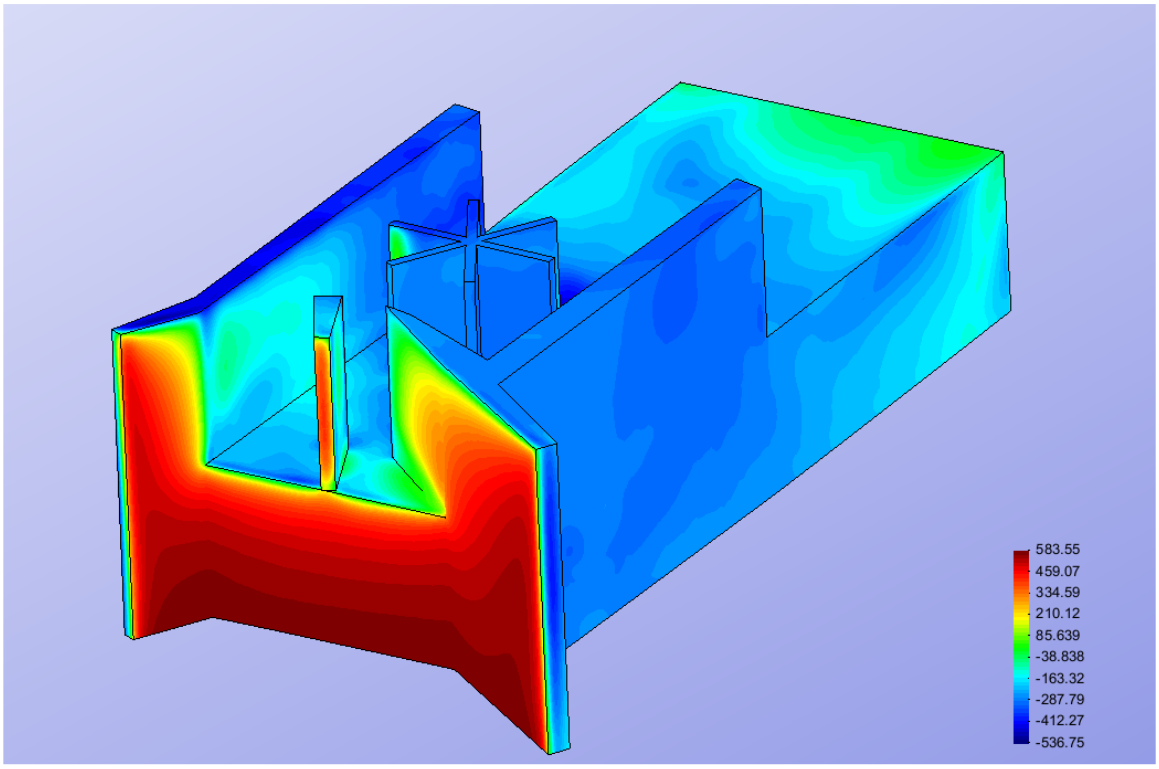


Figure 7-19 : Vue isométrique d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

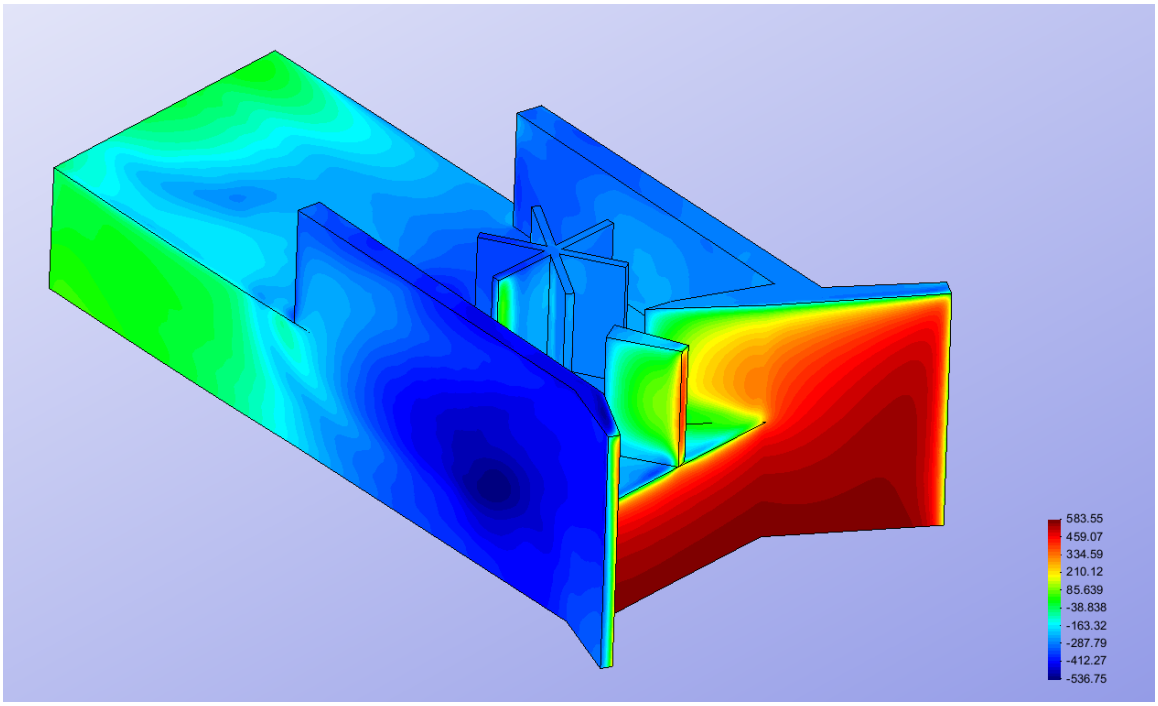


Figure 7-20 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

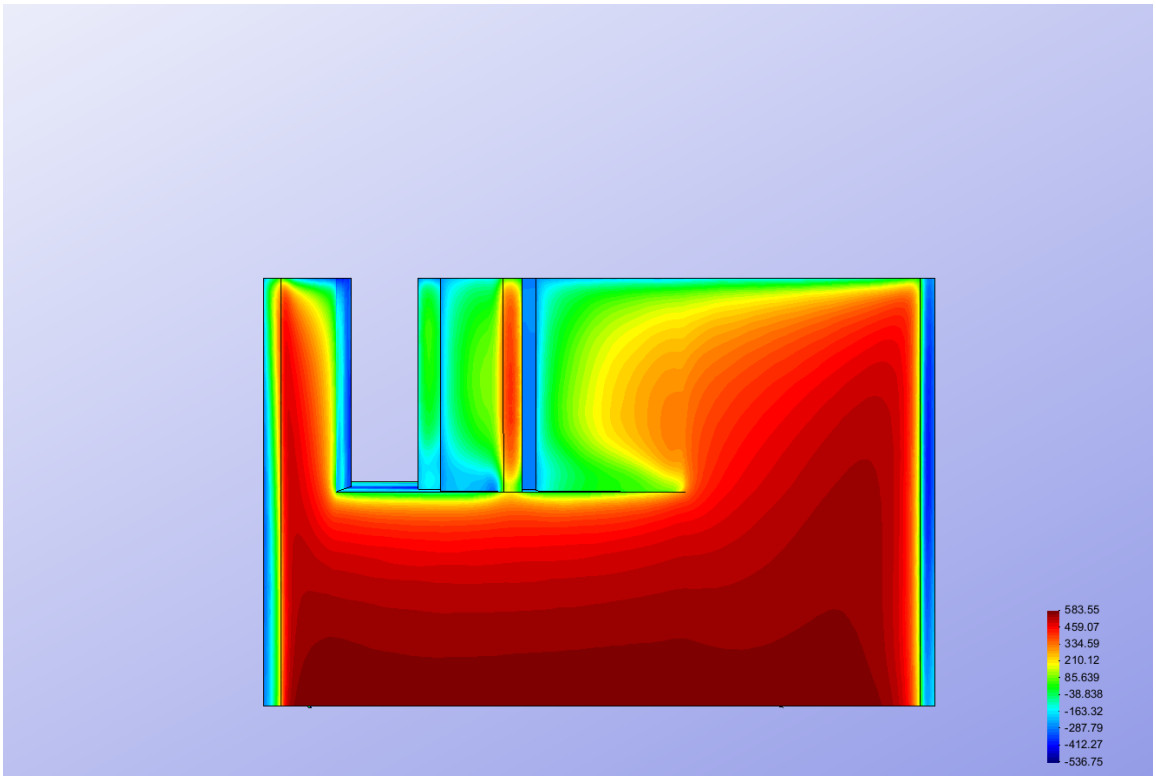


Figure 7-21 : Vue de face d’As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

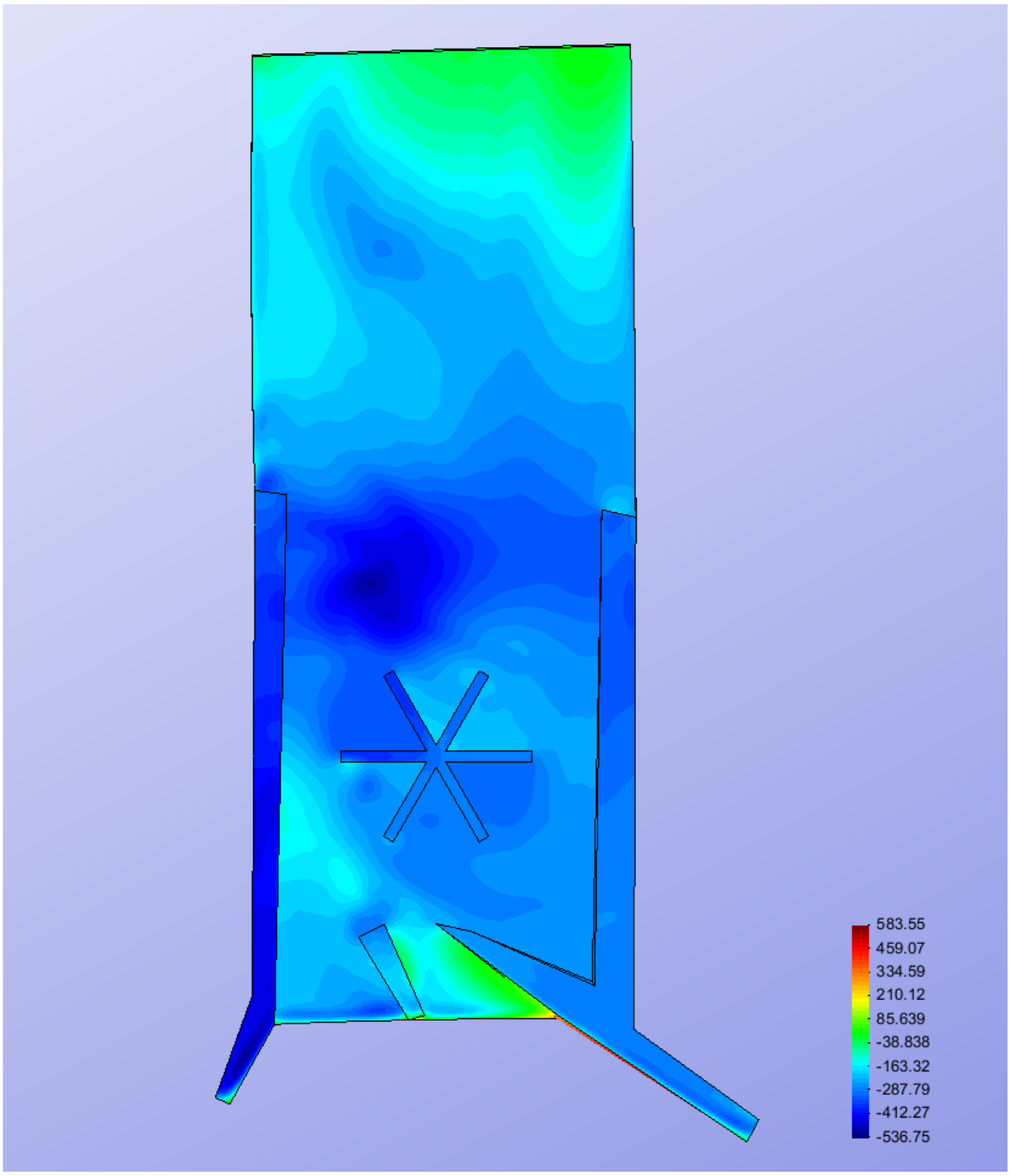


Figure 7-22: Vue de dessus d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

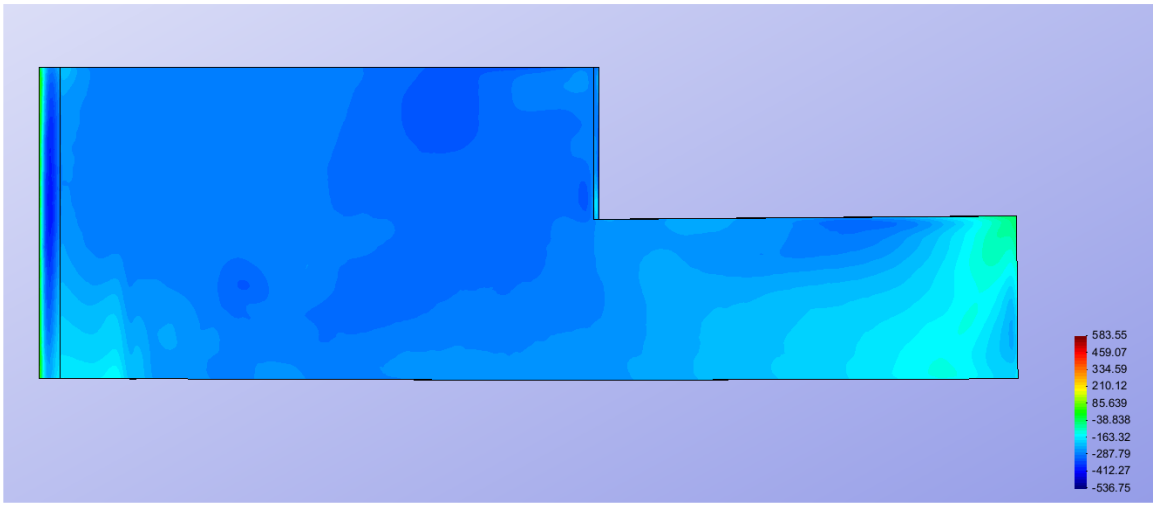


Figure 7-23 : Vue latérale d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s, soufflant de gauche à droite.

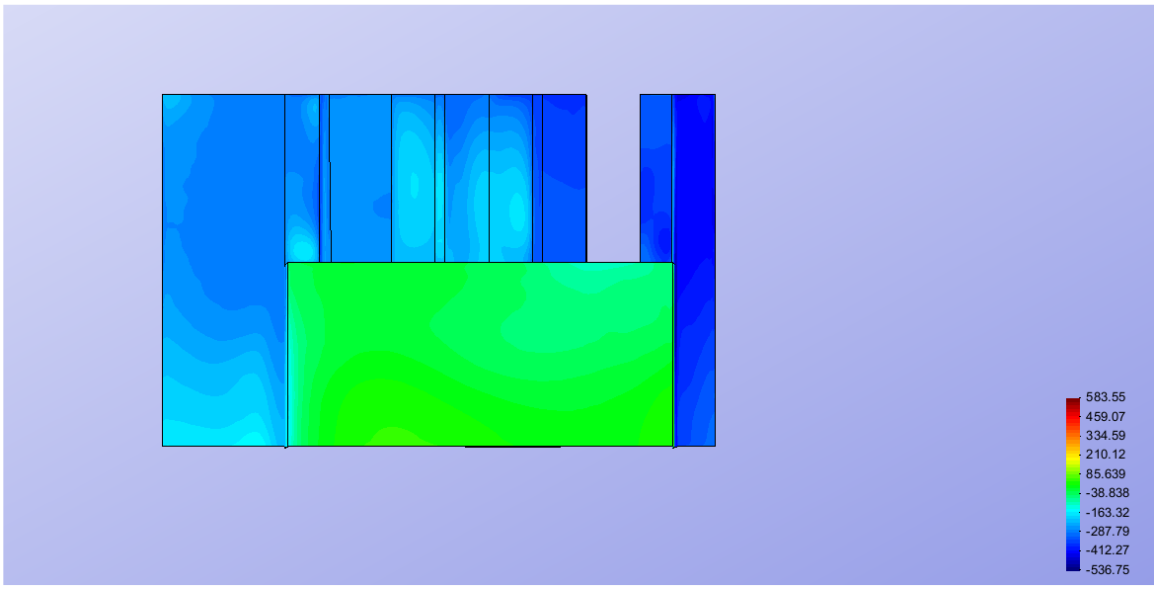


Figure 7-24 : Vue arrière d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

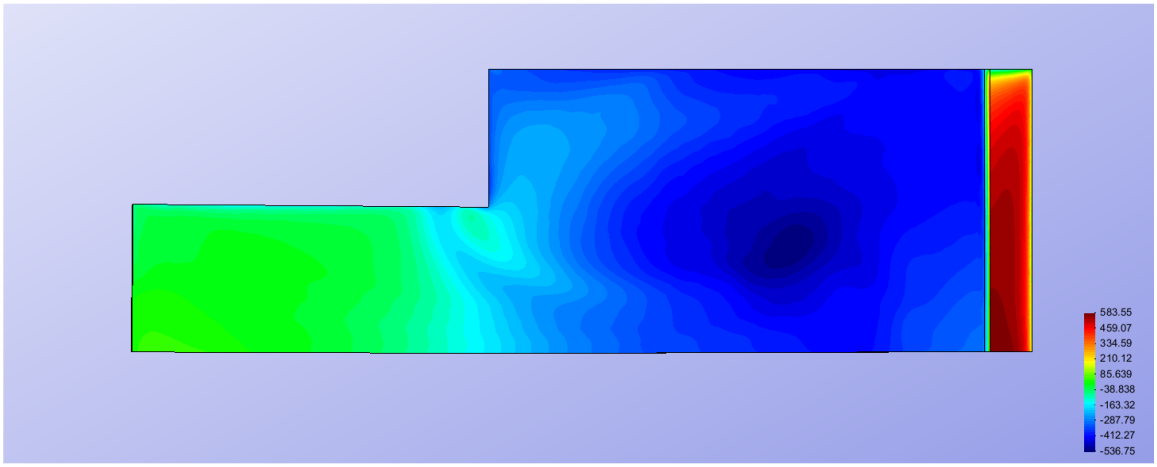


Figure 7-25 : Vue latérale d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 30,6 m/s, soufflant de droite à gauche.

As-Shakiban-Corp

Vitesse du vent : 110 km/h = 30,6 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-C_01

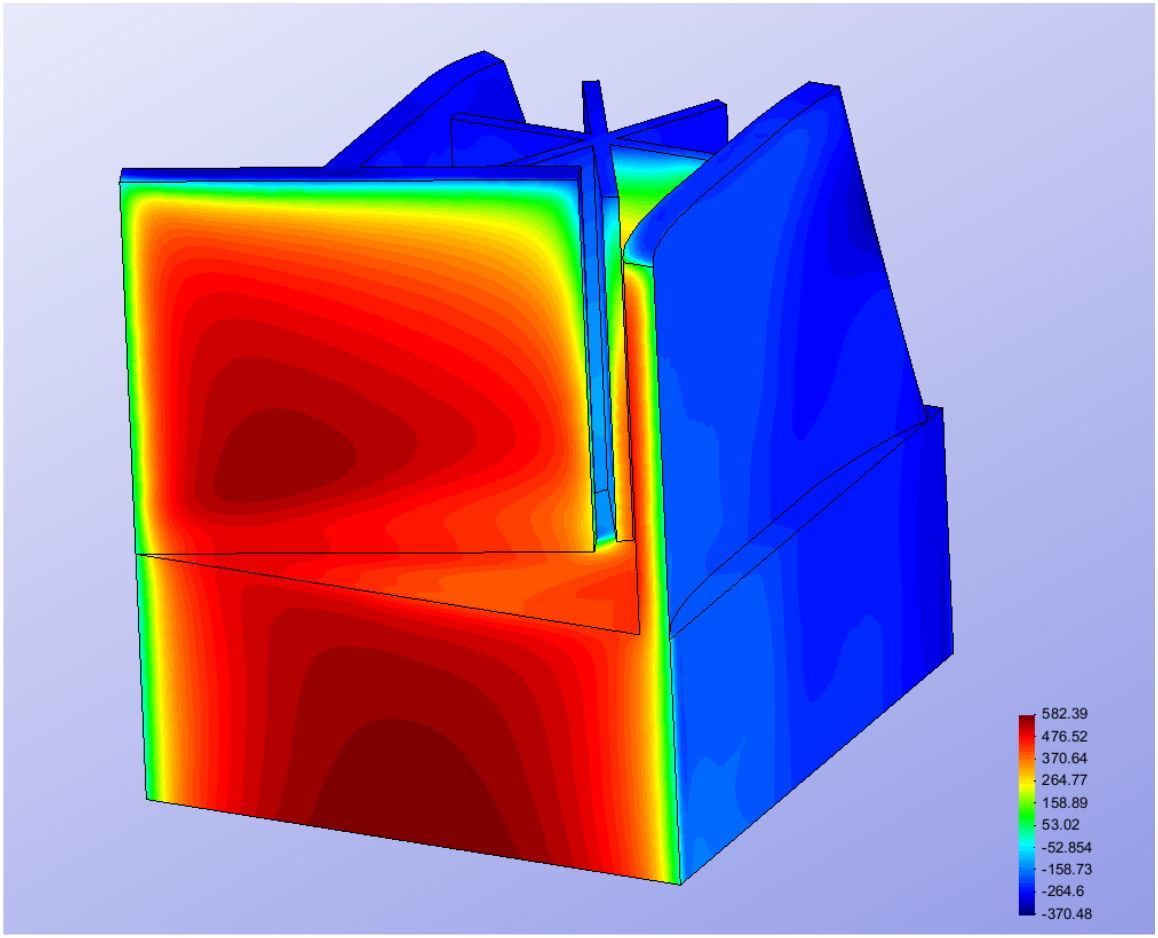


Figure 7-26 : Vue isométrique (1) d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

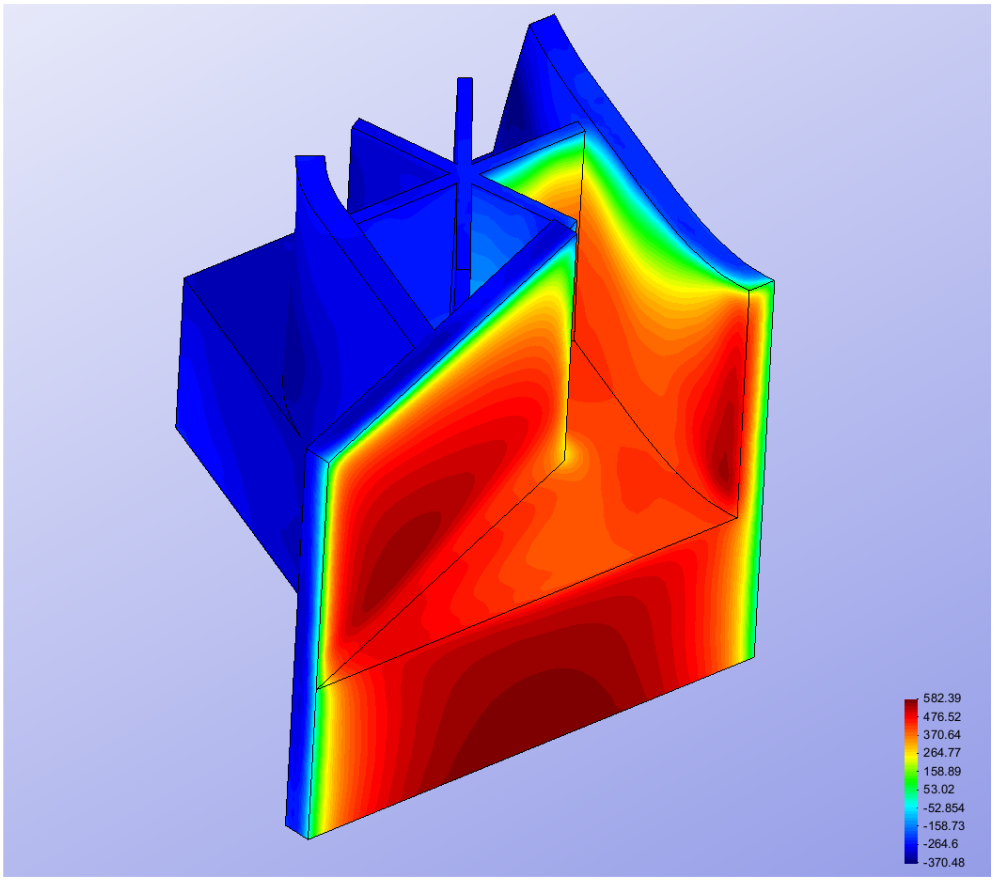


Figure 7-27 : Vue isométrique (2) d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

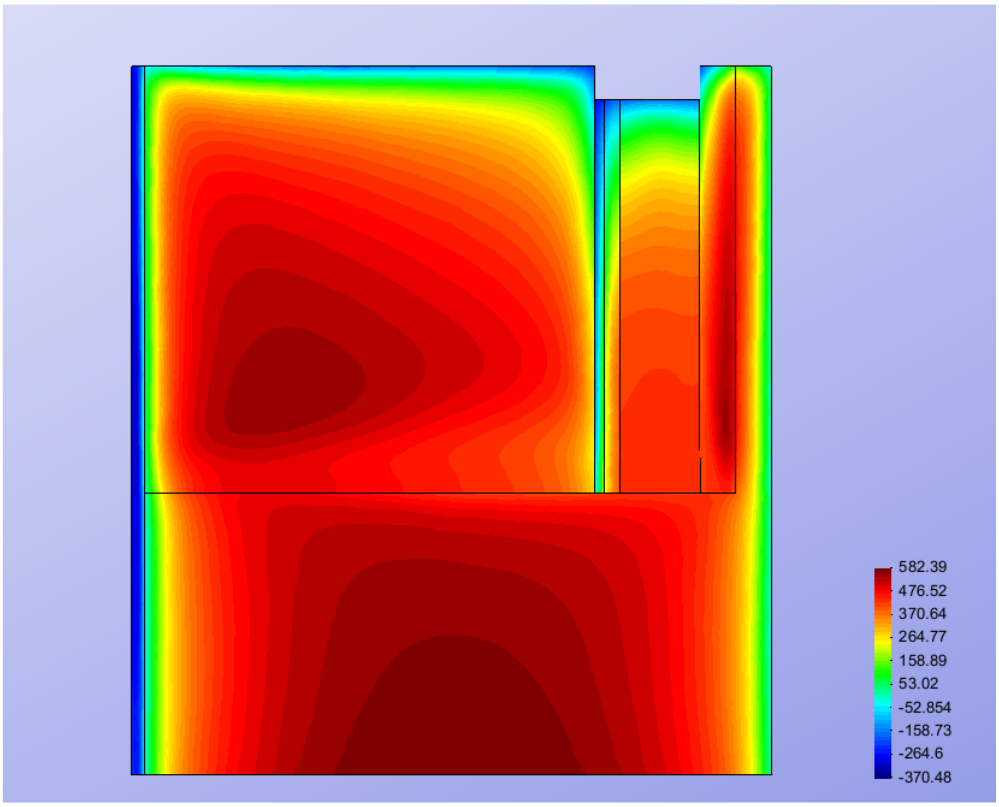


Figure 7-28 : Vue de face d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

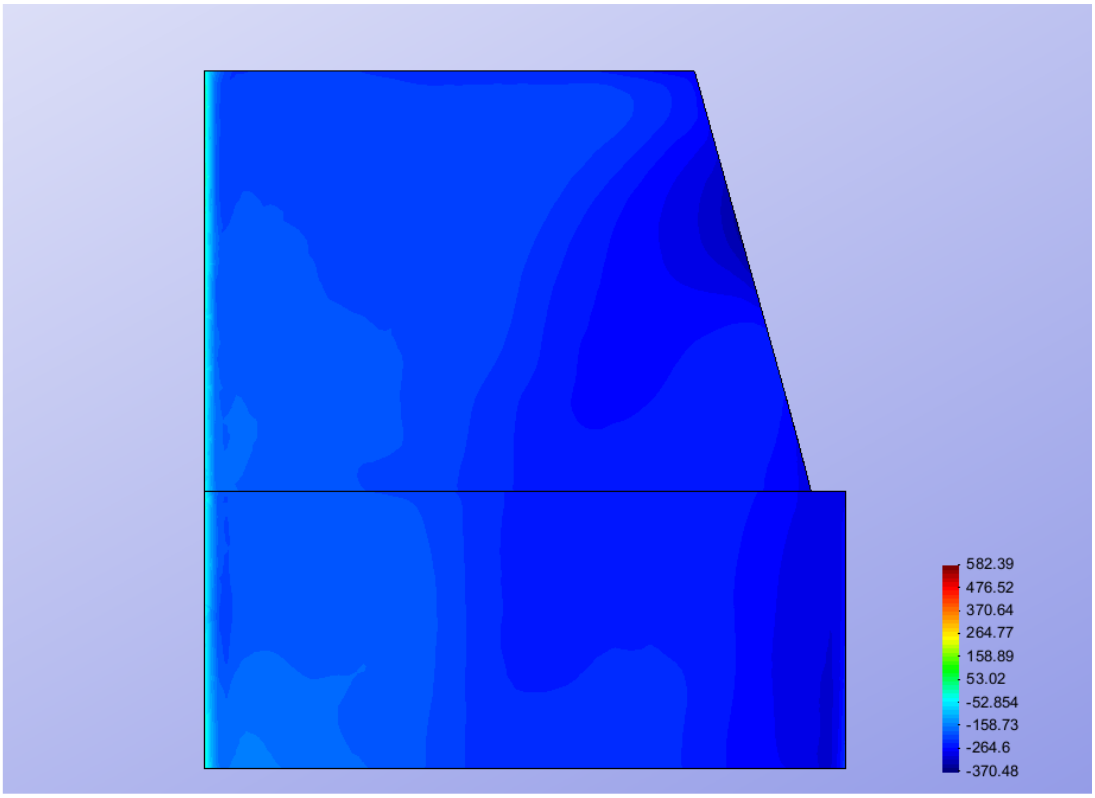


Figure 7-29 : Vue latérale d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de gauche à droite.

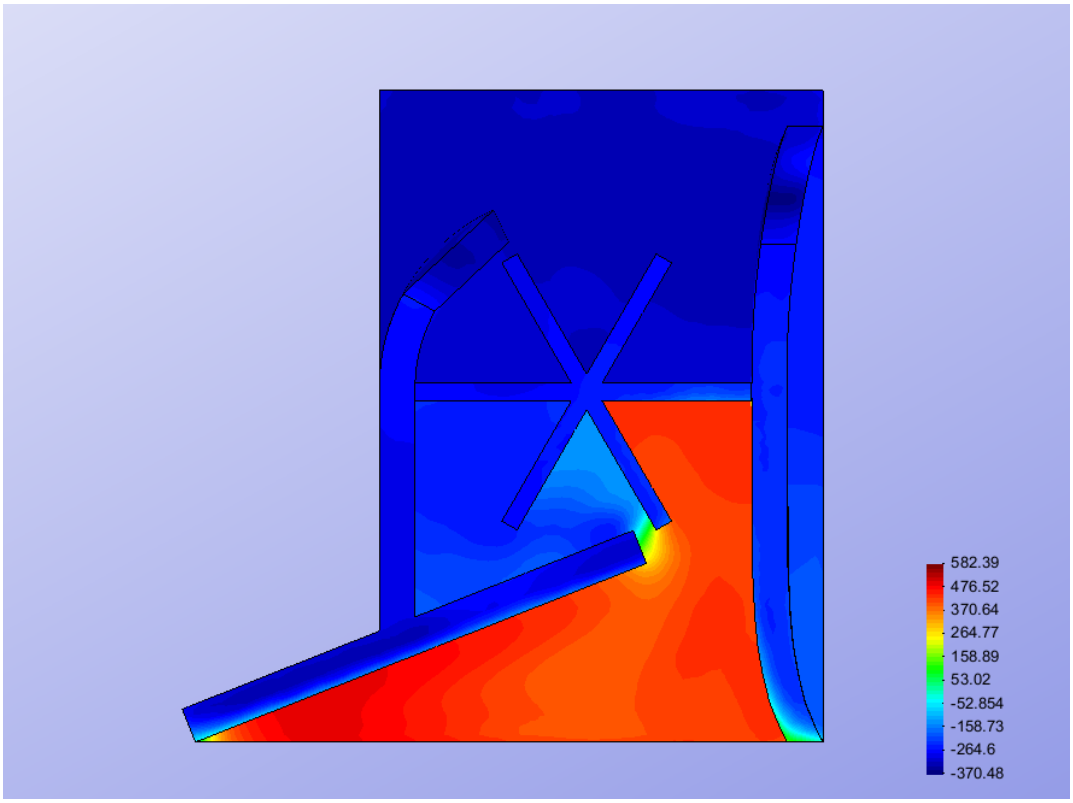


Figure 7-30 : Vue de dessus d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

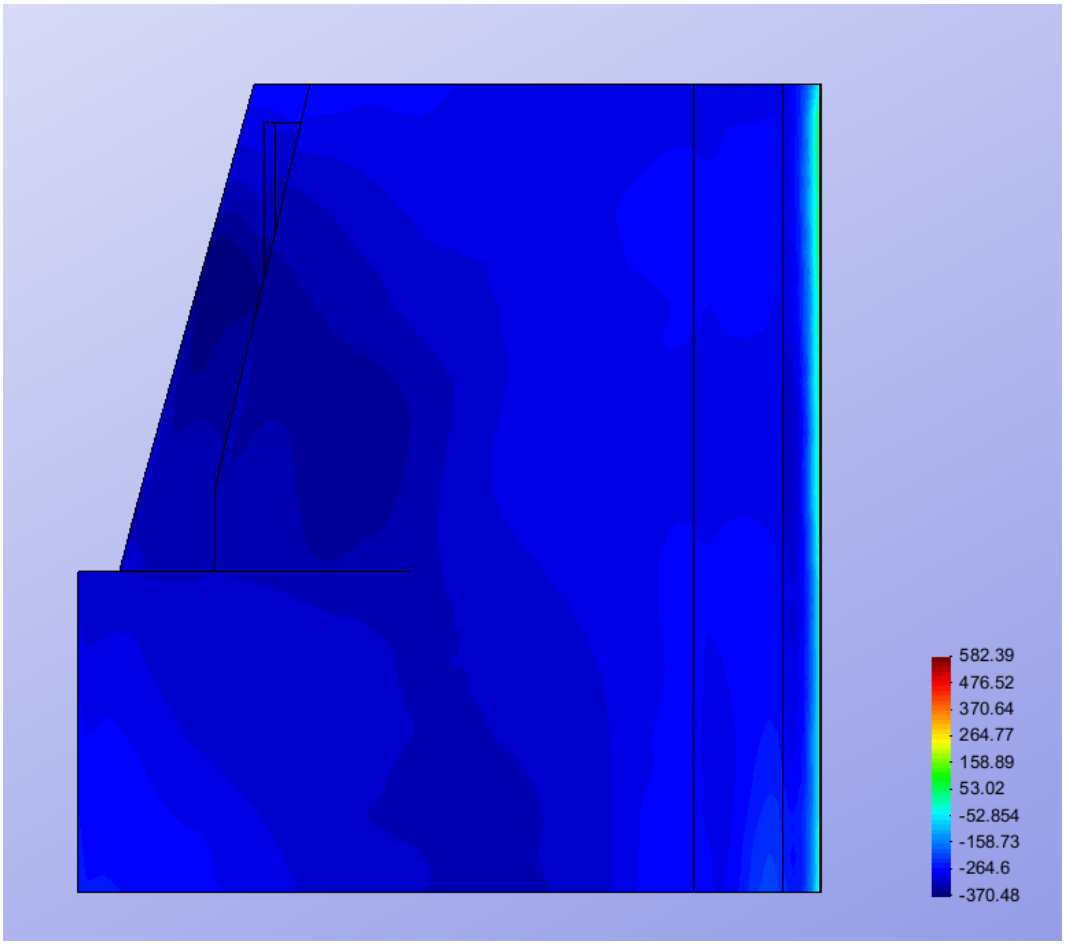


Figure 7-31 : Vue latérale d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de droite à gauche.

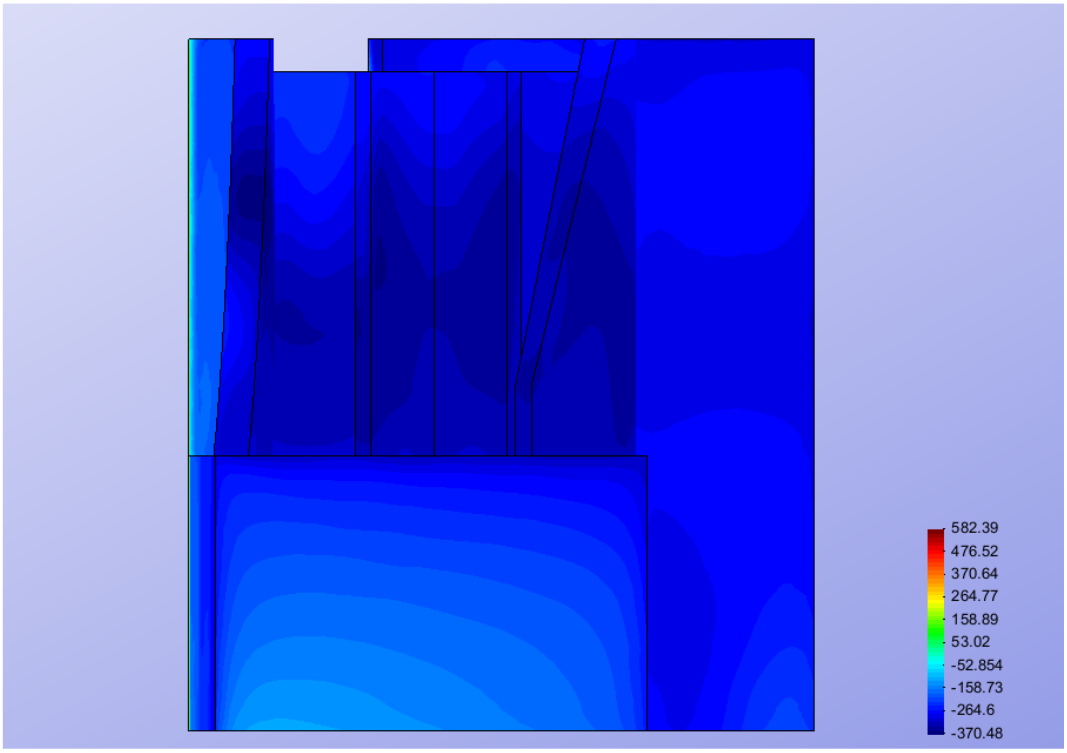


Figure 7-32 : Vue arrière d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 30,6 m/s.

Pression calculée à V = 30 km/h

As-Neh-Corp

Vitesse du vent : 30 km/h = 8,3 m/s

Code de simulation: DIB-064-DD-CF151-A_02

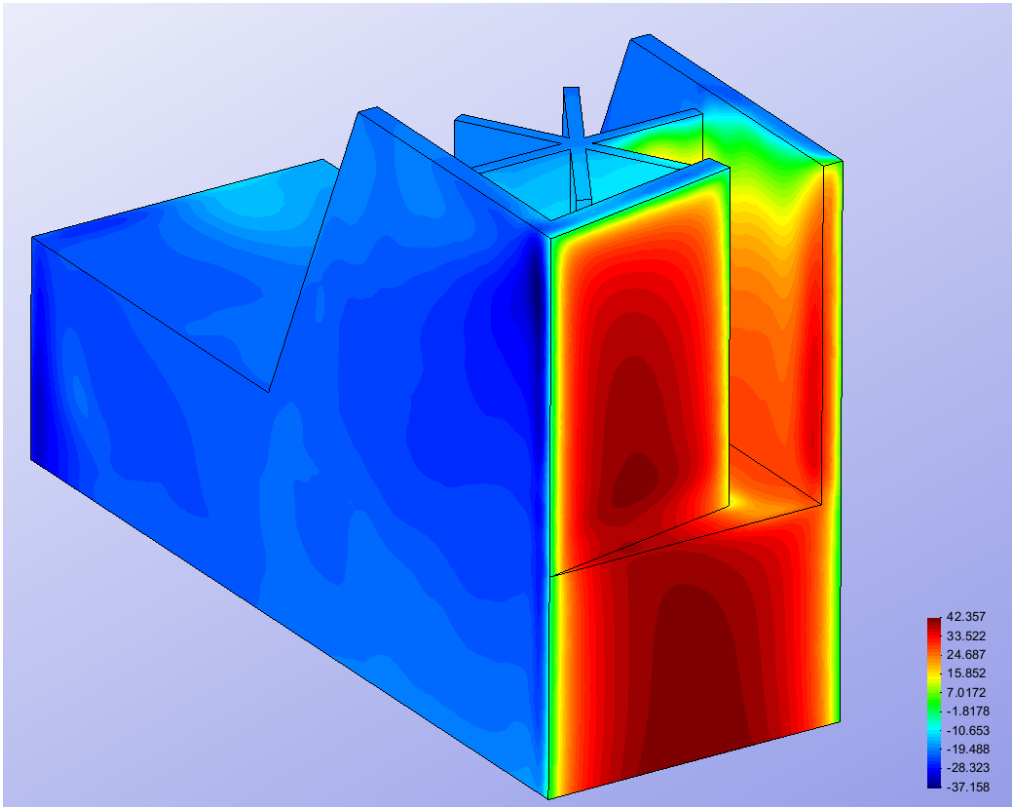


Figure 7-33 : Vue isométrique (1) d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

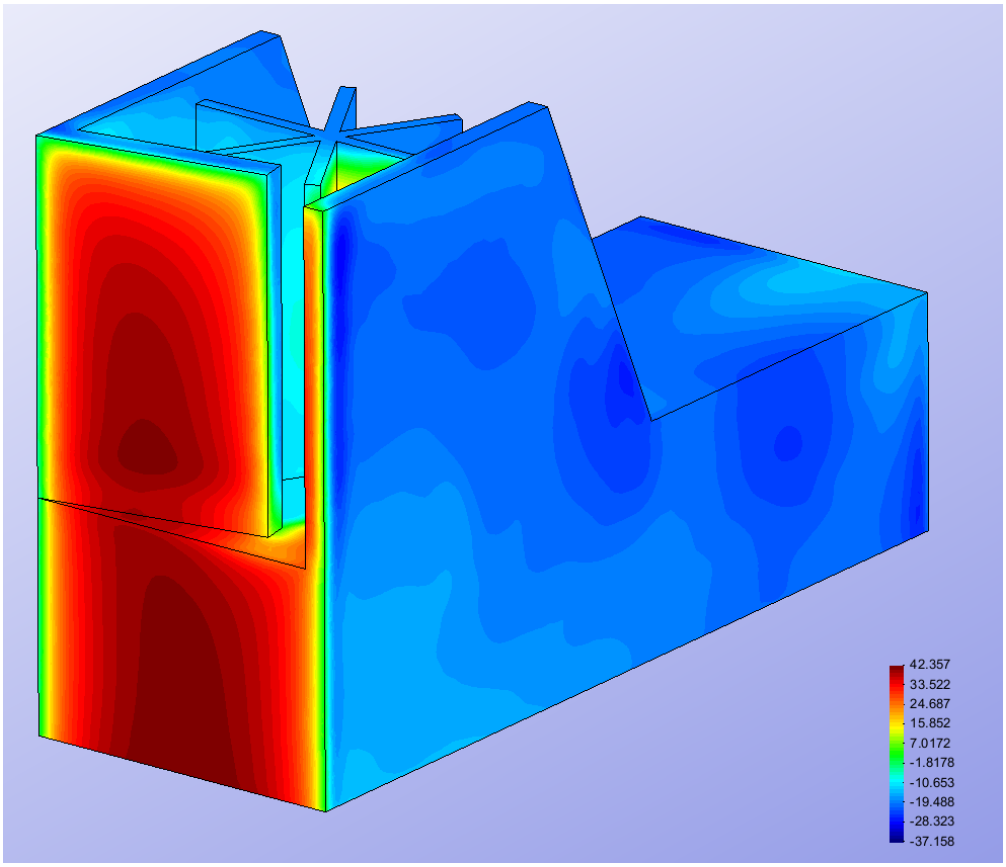


Figure 7-34 : Vue isométrique (2) d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

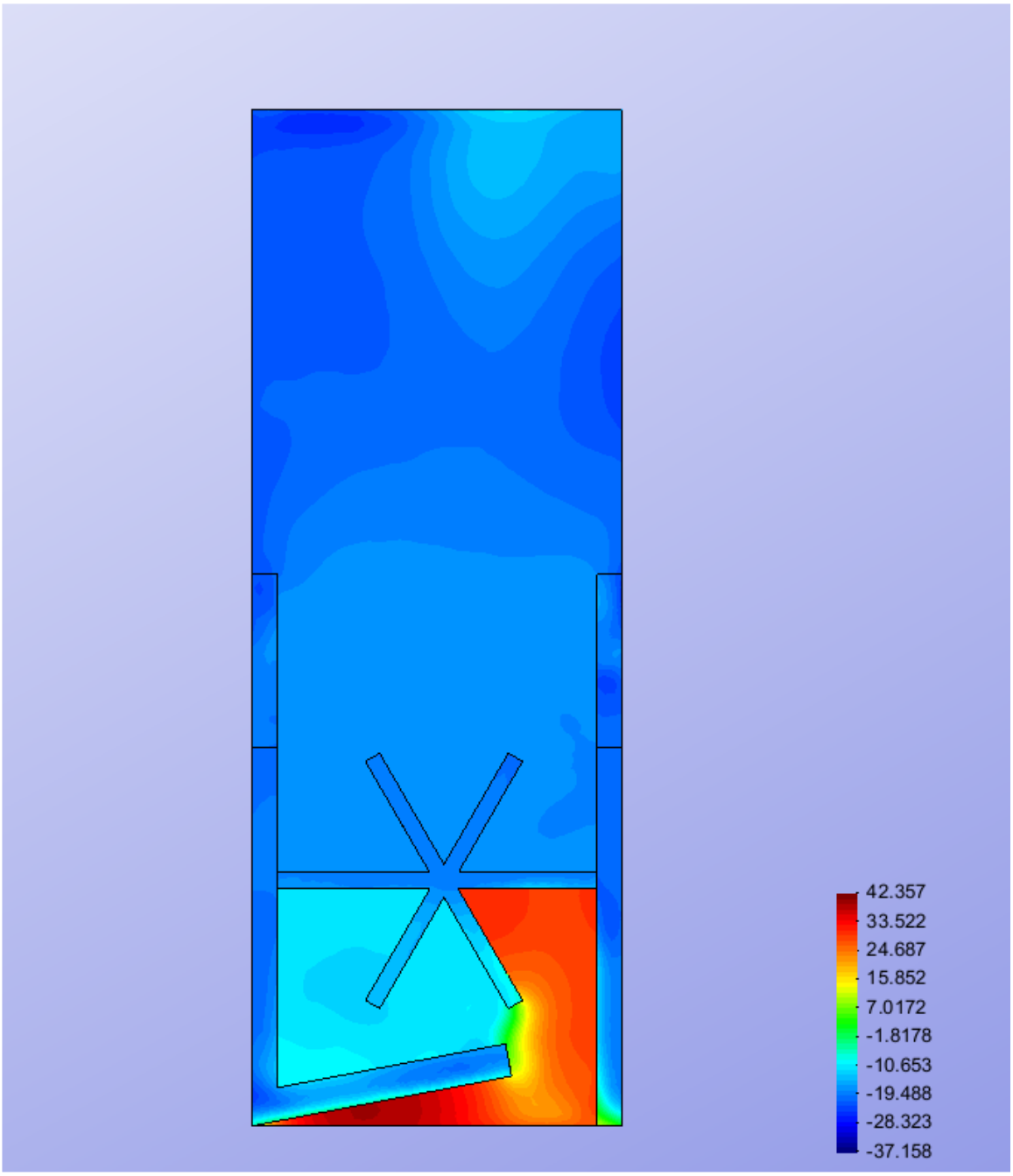


Figure 7-35 : Vue de dessus d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

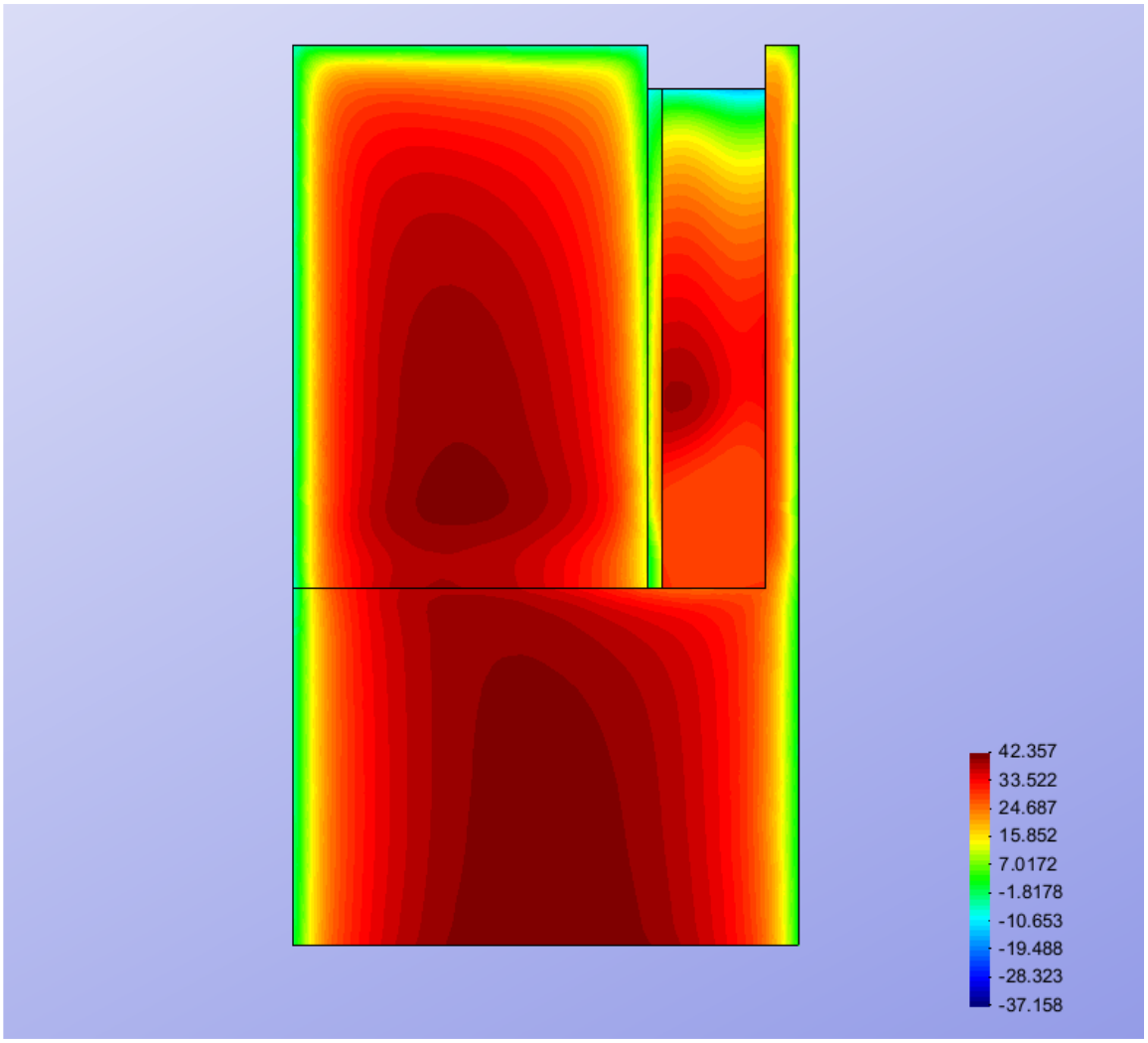


Figure 7-36 : Vue de face d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

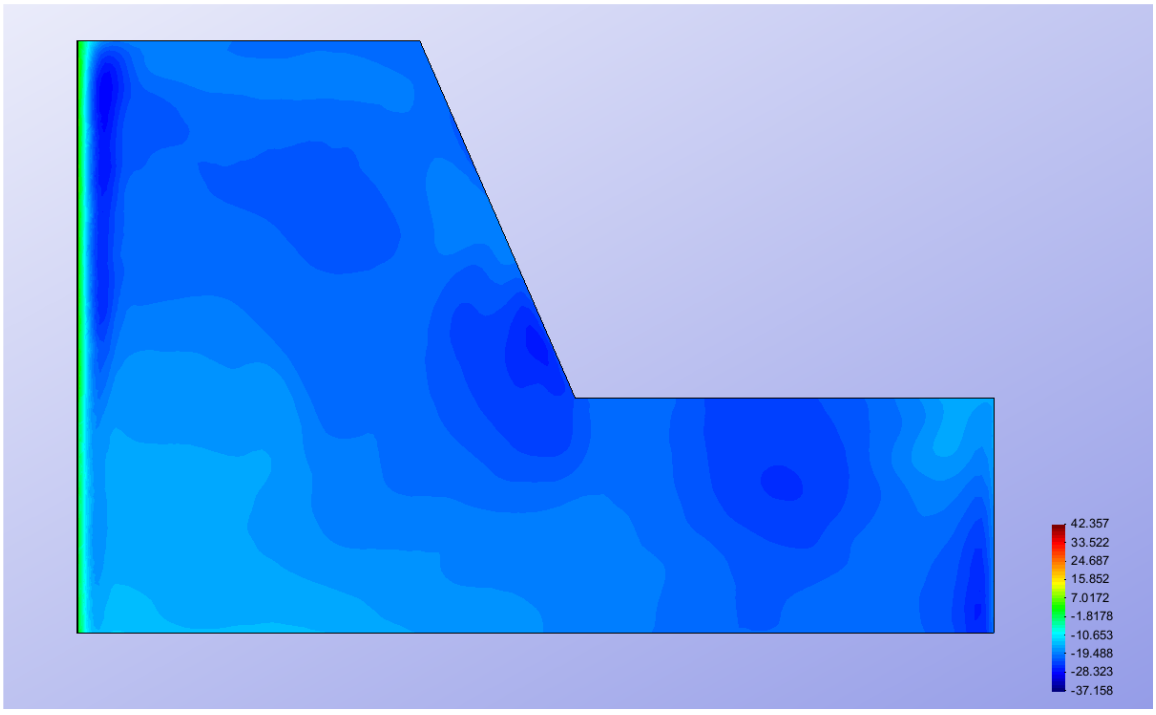


Figure 7-37 : Vue latérale d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de gauche à droite.

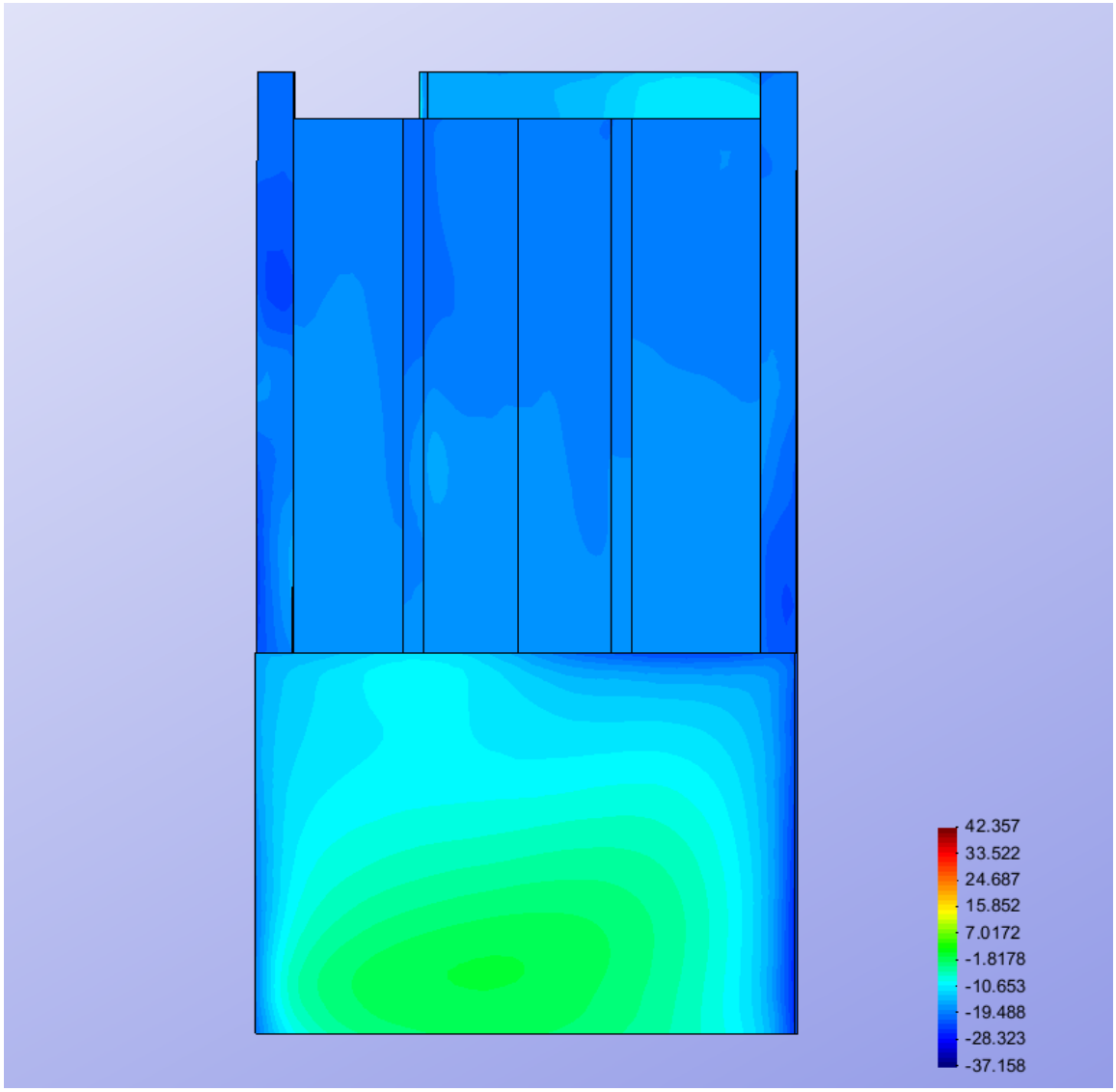


Figure 7-38 : Vue arrière d’As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

Figure 7-39 : Vue latérale d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de droite à gauche.

As-Hozdar-corp

Vitesse du vent : 30 km/h = 8,3 m/s

Code de simulation: DIB-064-DD-CF151-B_02

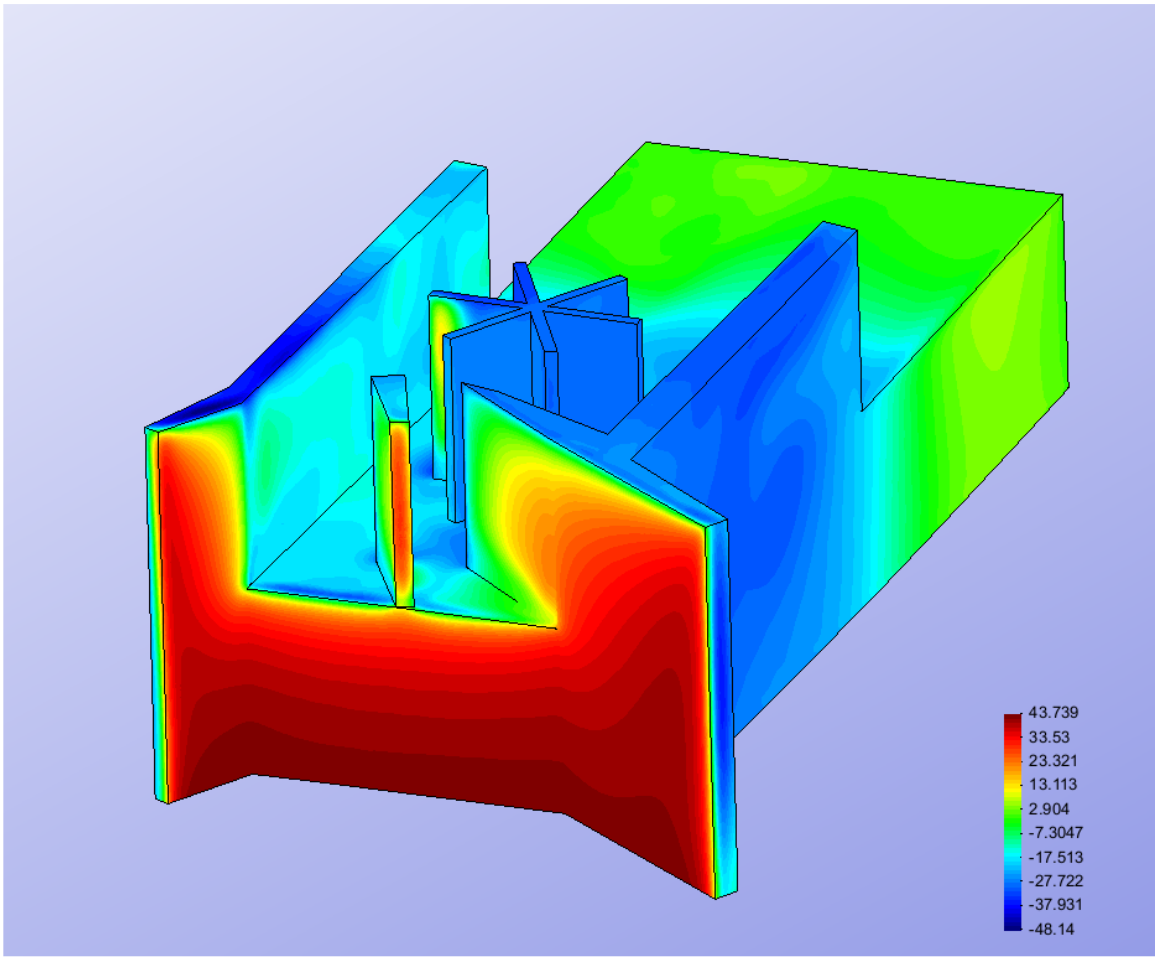


Figure 7-40 : Vue isométrique d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

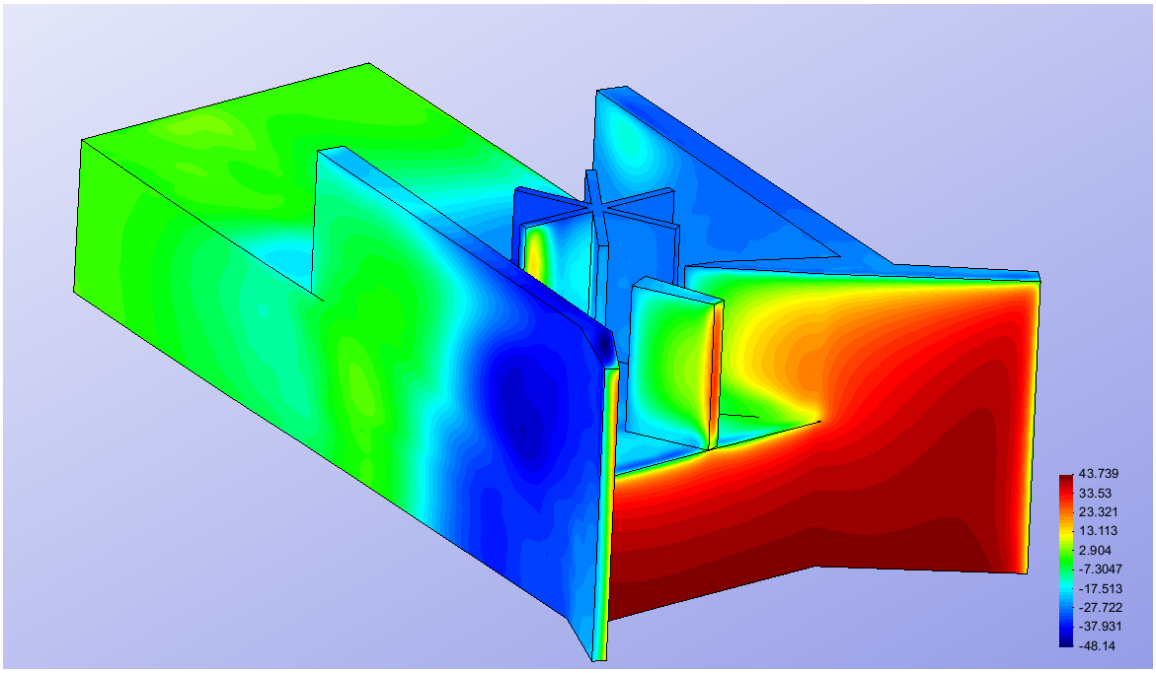


Figure 7-41 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

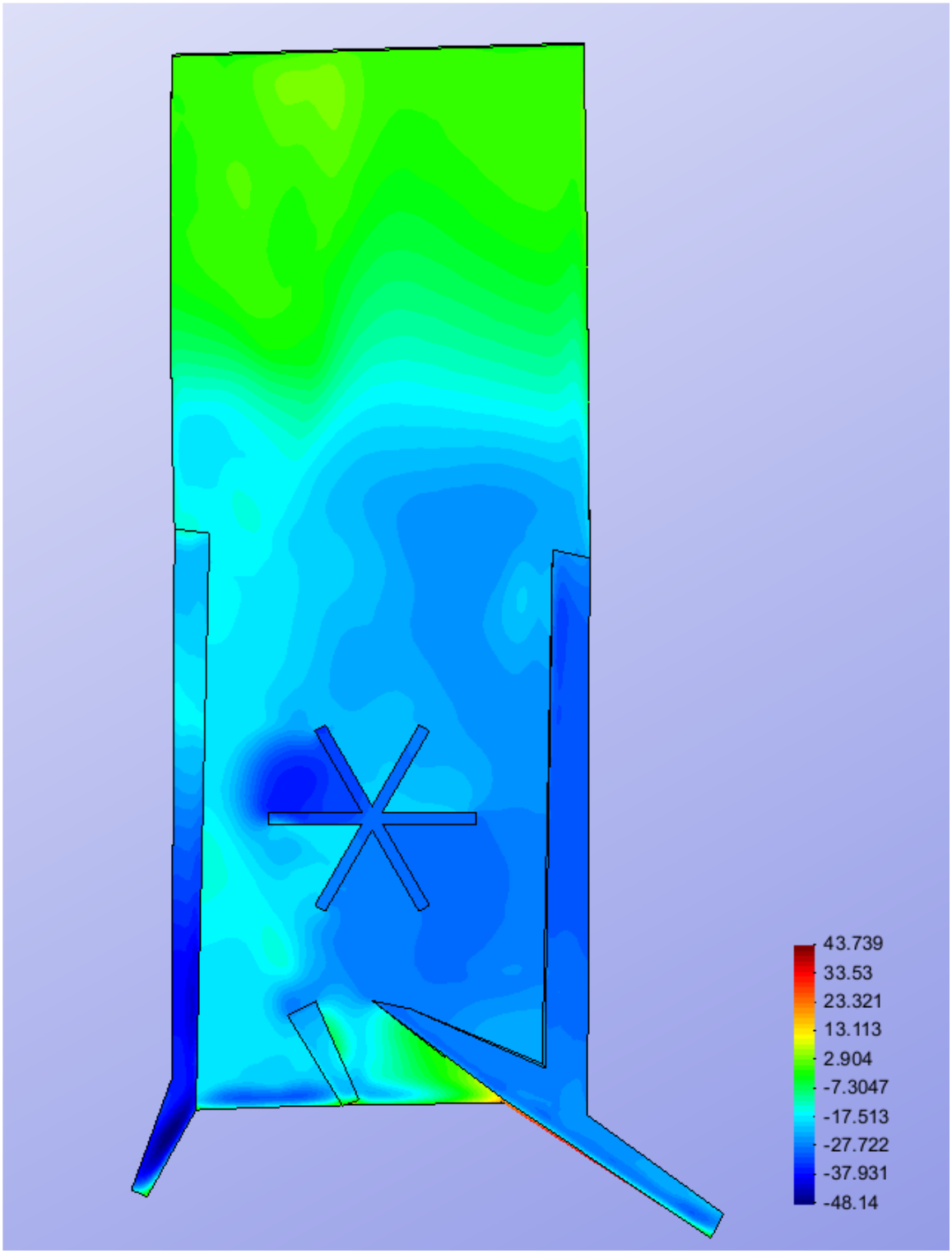


Figure 7-42 : Vue de dessus d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

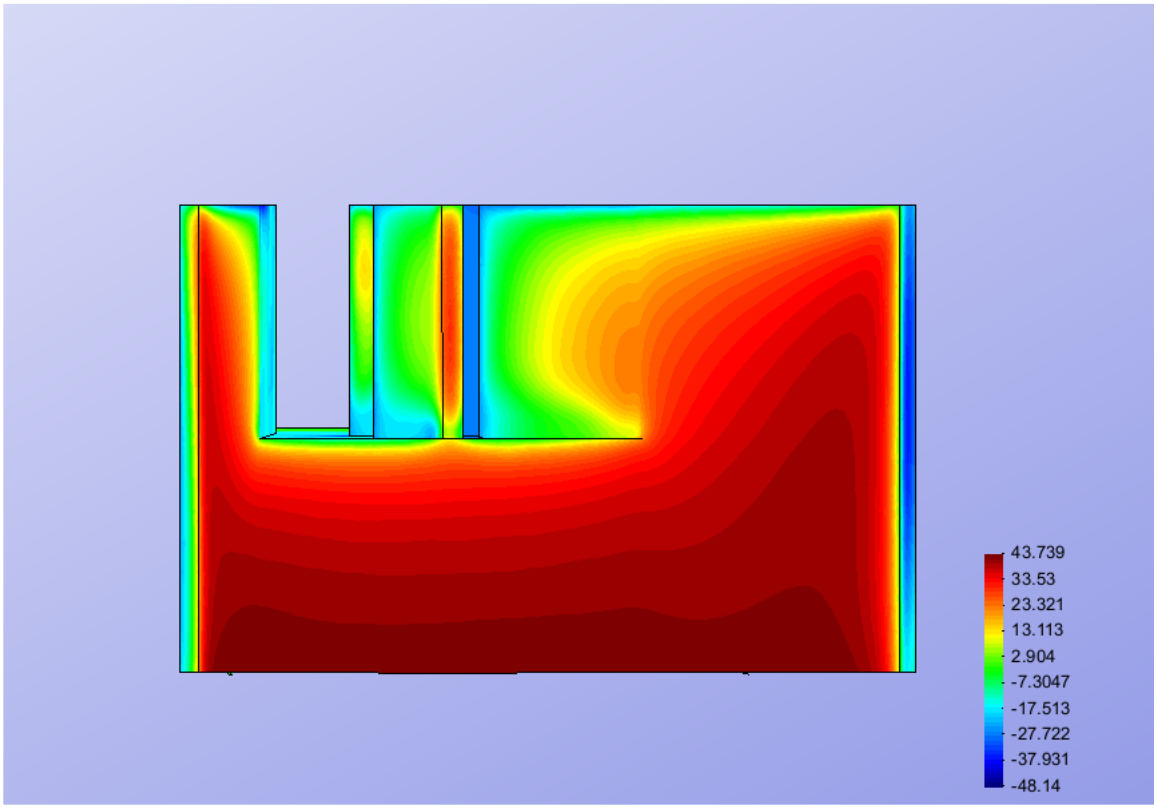


Figure 7-43 : Vue de face d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

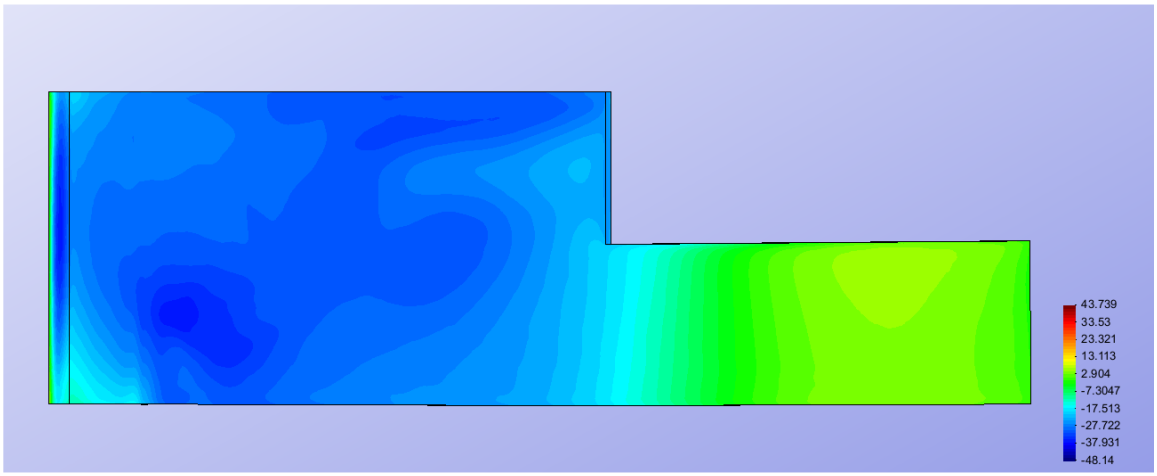


Figure 7-44 : Vue latérale d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de gauche à droite.

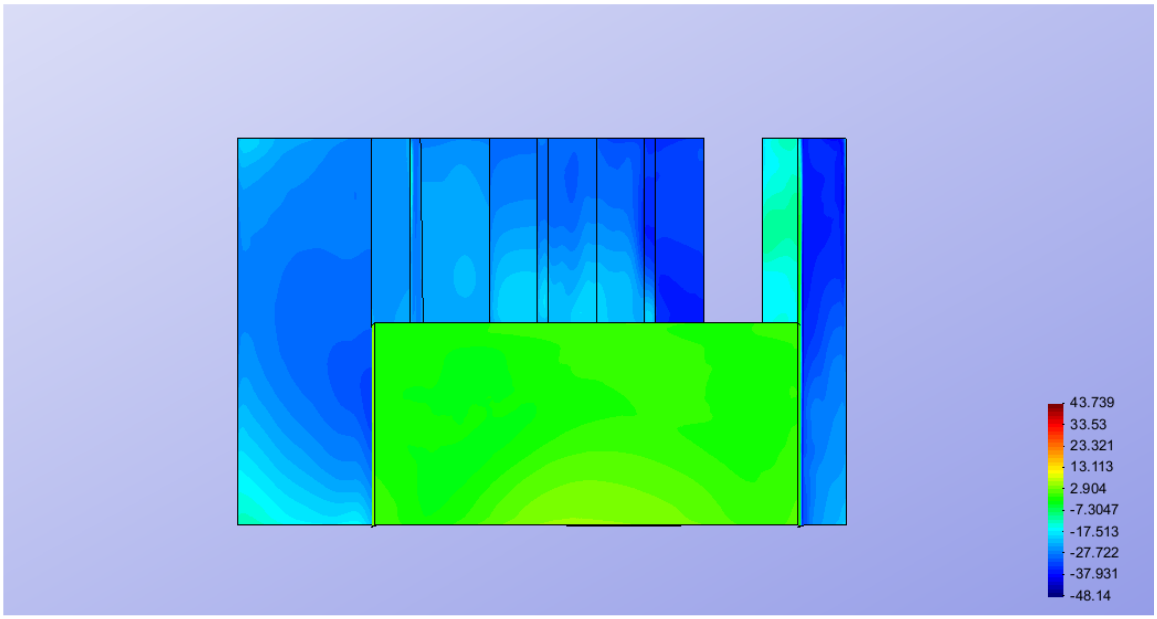


Figure 7-45 : Vue arrière d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

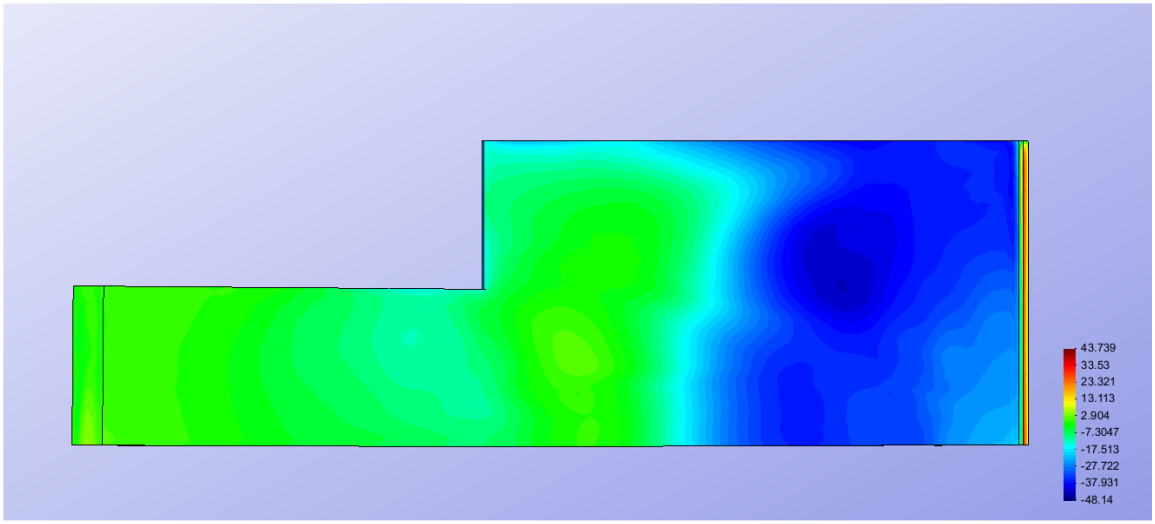


Figure 7-46 : Vue latérale d'As-Hozdar-corp, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de droite à gauche.

As-Shakiban-Corp

Vitesse du vent : 30 km/h = 8,3 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-C_02

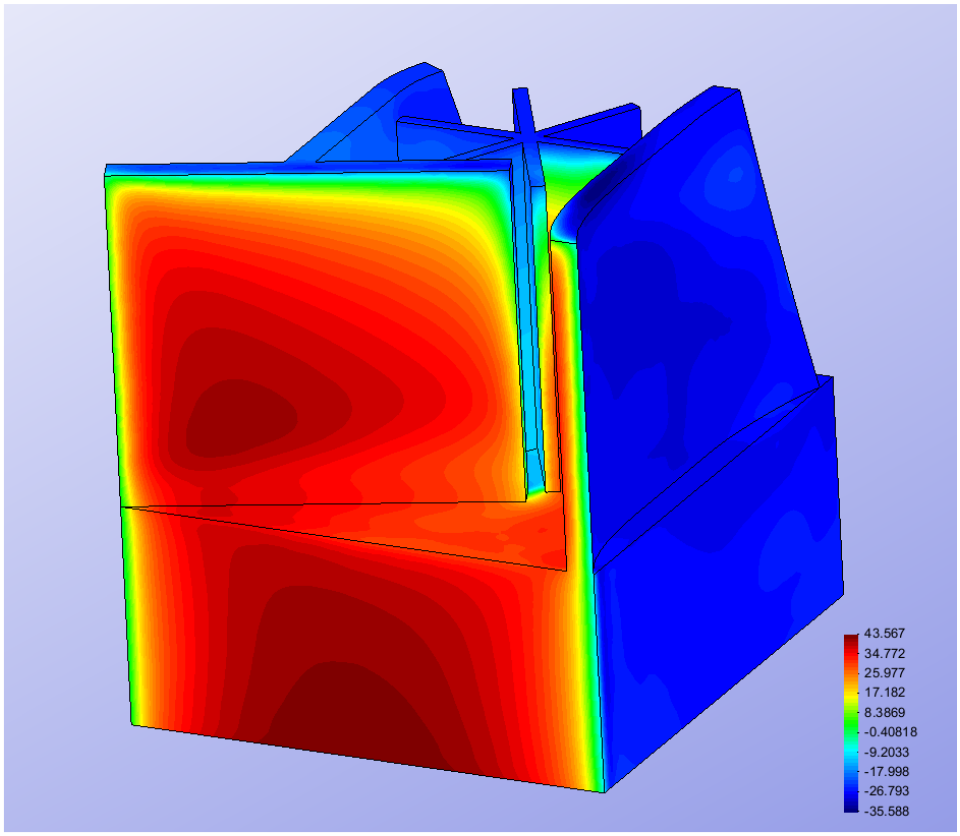


Figure 7-47 : Vue isométrique (1) d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

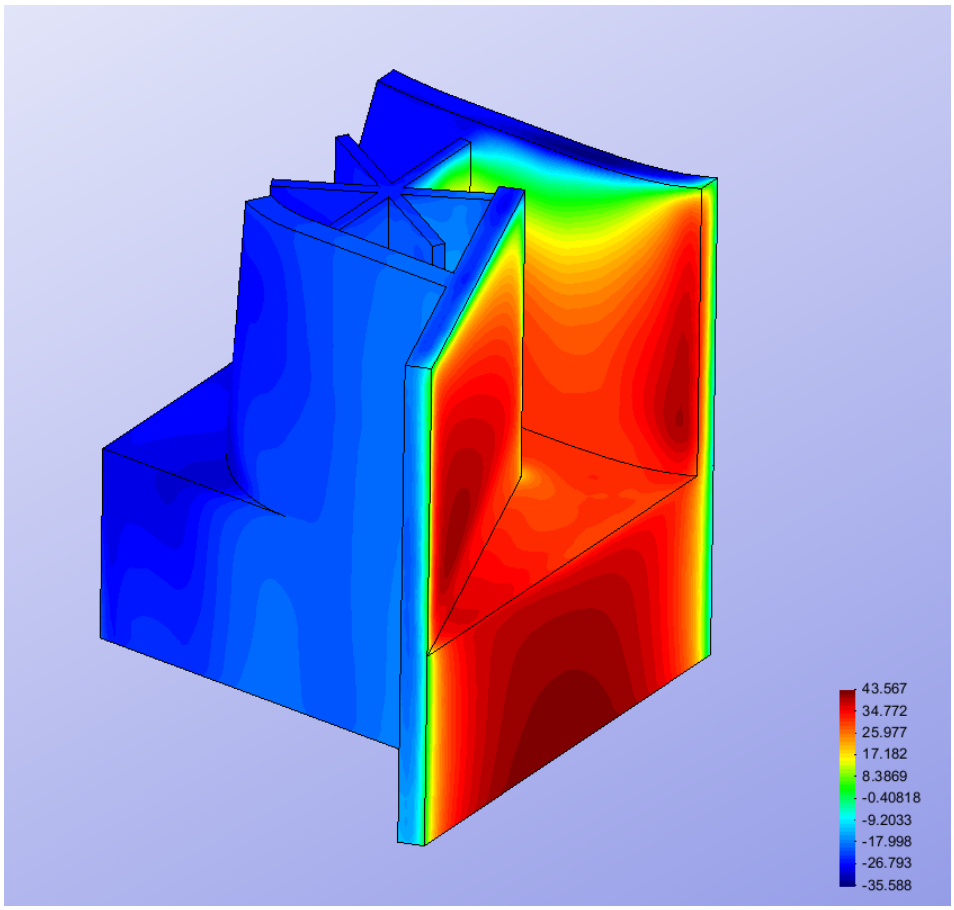


Figure 7-48 : Vue isométrique (2) d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

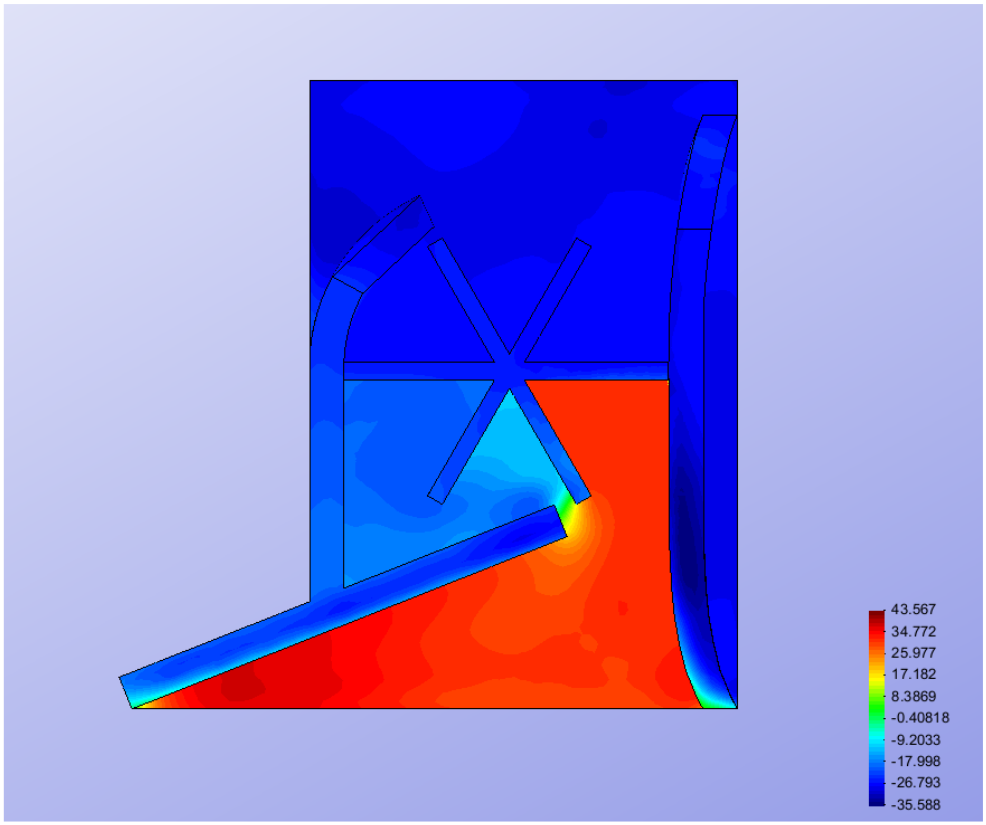


Figure 7-49 : Vue de dessus d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

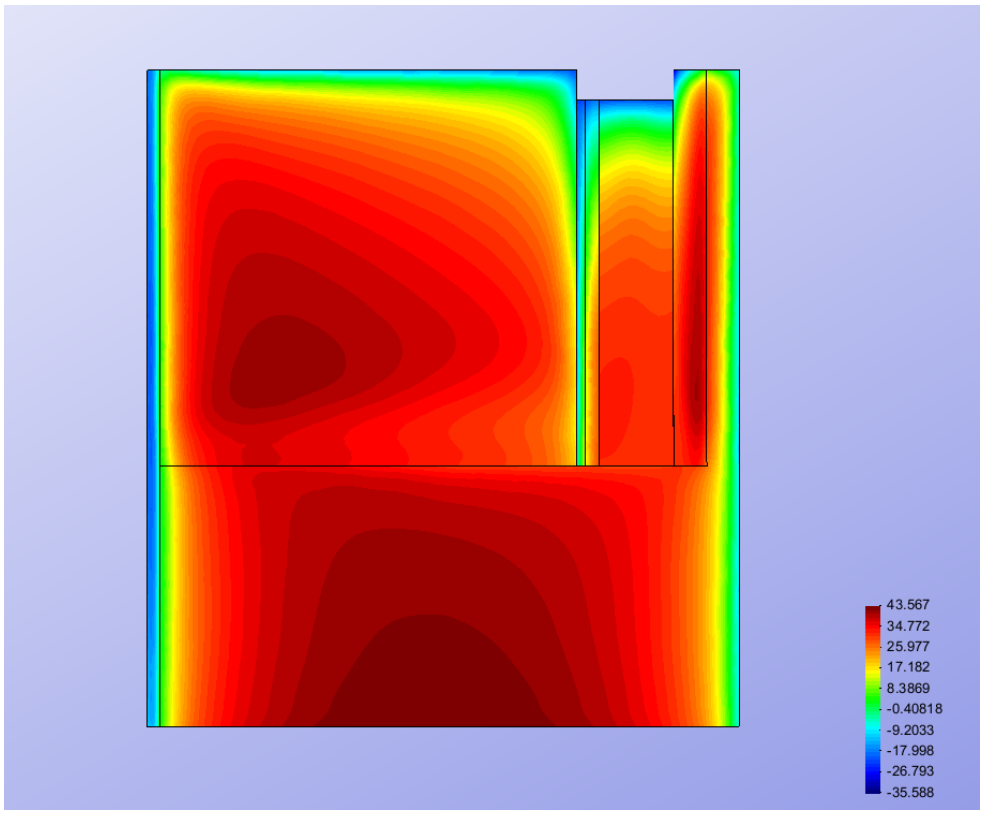


Figure 7-50 : Vue de face d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

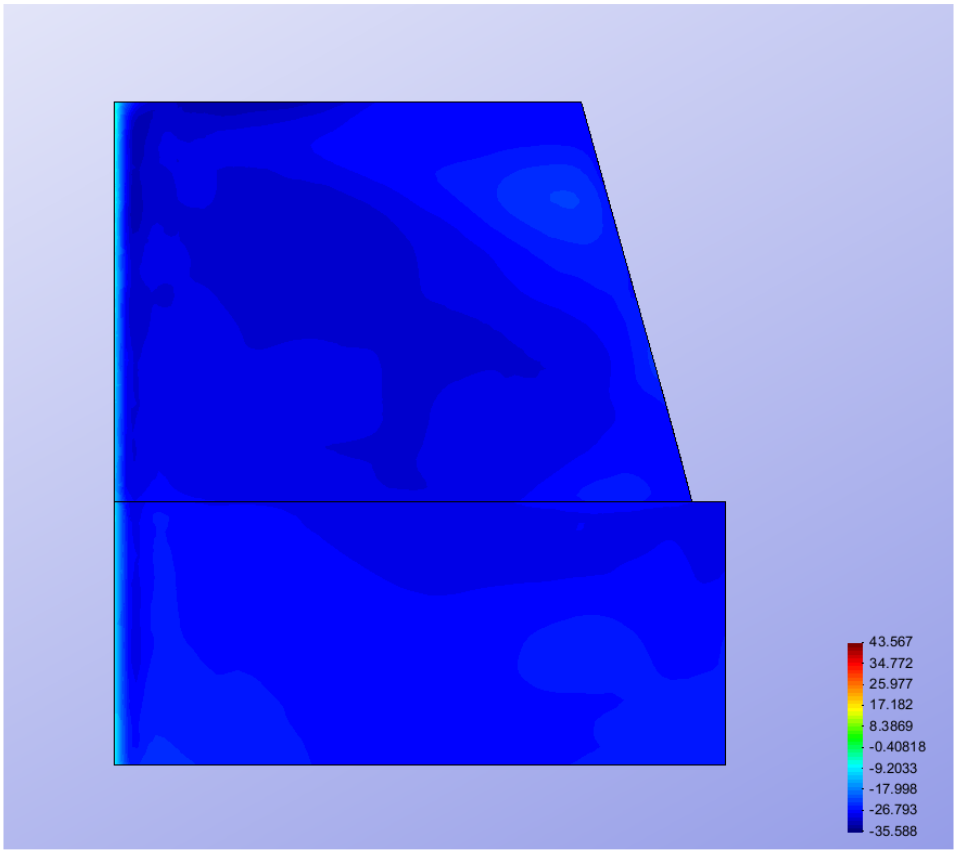


Figure 7-51 : Vue latérale d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de gauche à droite.

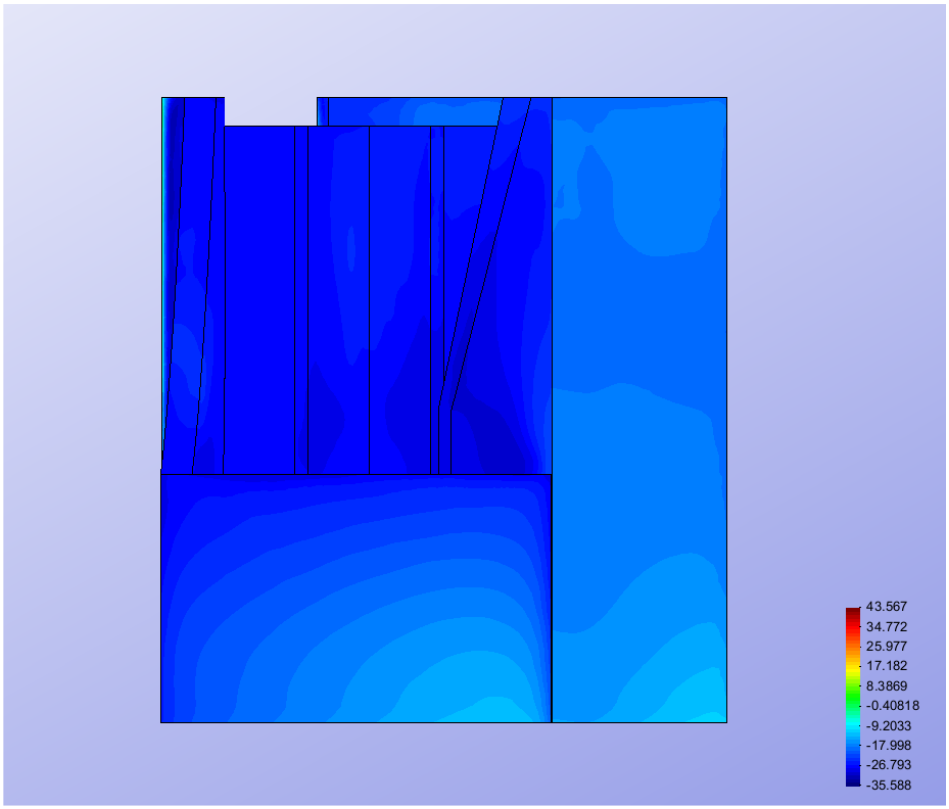


Figure 7-52 : Vue arrière d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s.

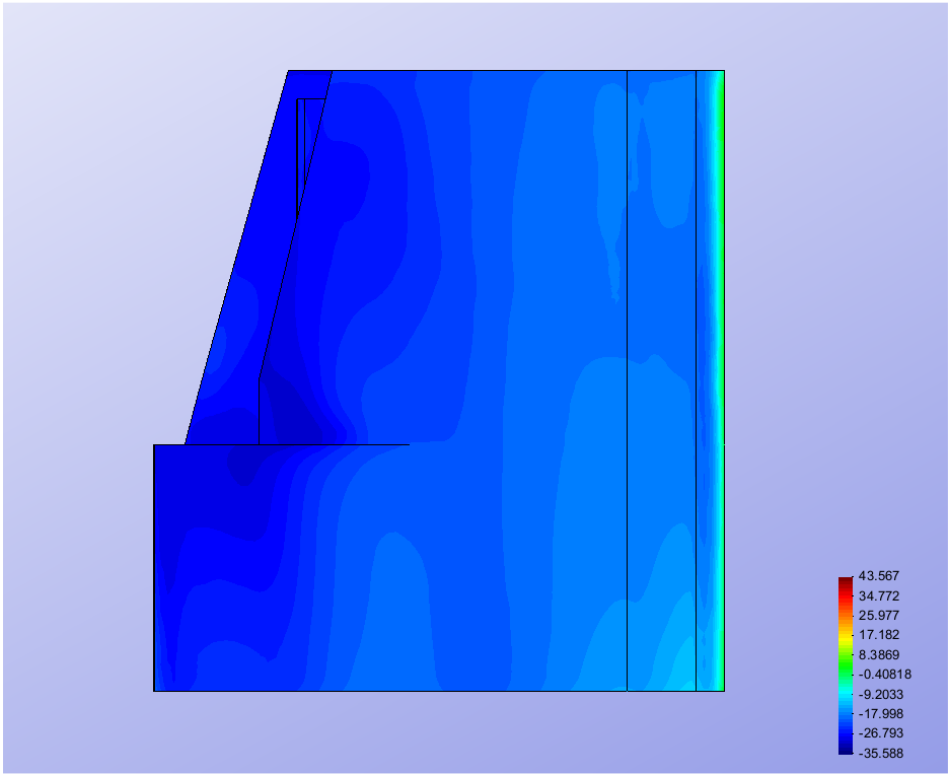


Figure 7-53 : Vue latérale de As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de droite à gauche.

Pression calculée à V = 14 km/h

As-Neh-Corp

Vitesse du vent : 14 km/h = 3,9 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-A_03

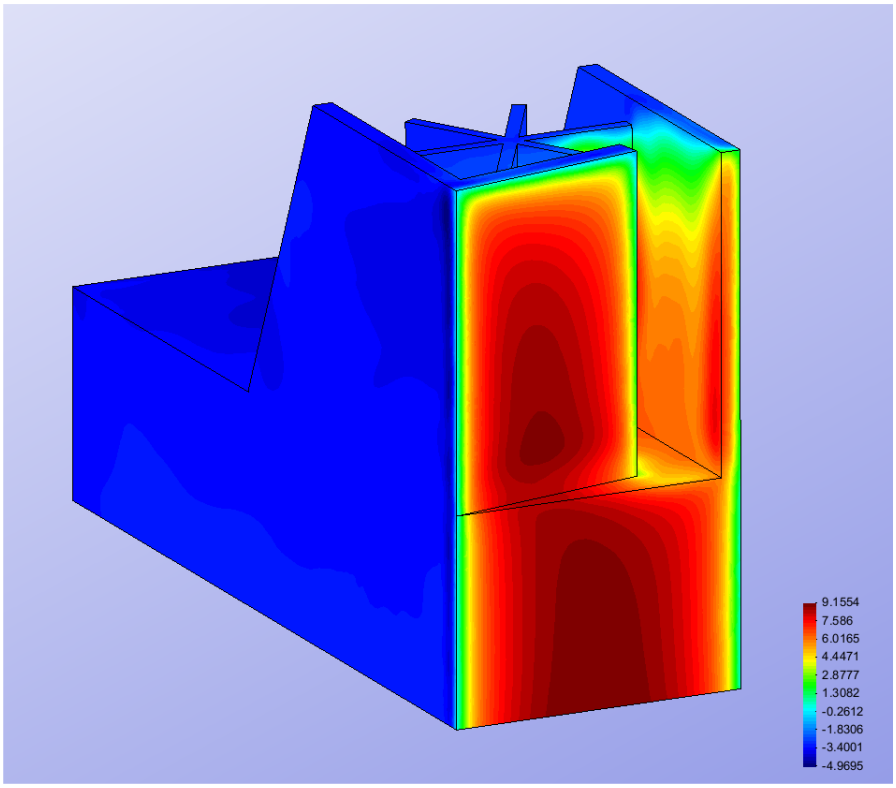


Figure 7-54 : Vue isométrique (1) de As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

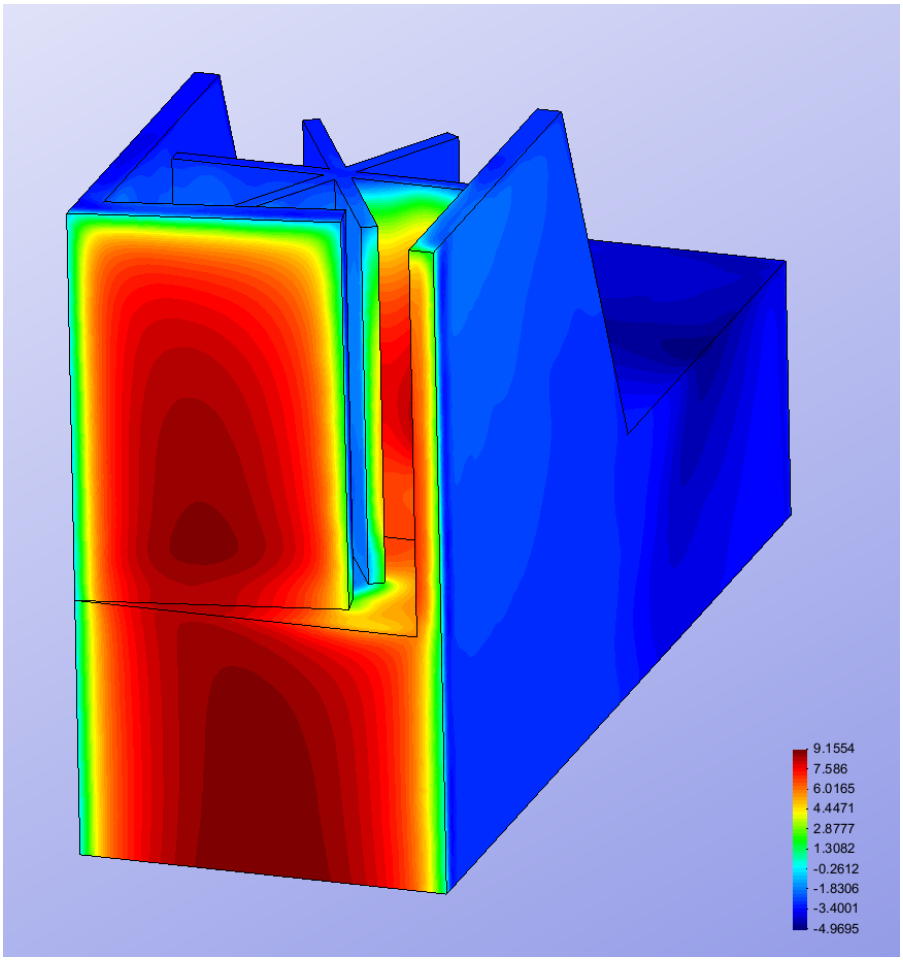


Figure 7-55 : Vue isométrique (2) de As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

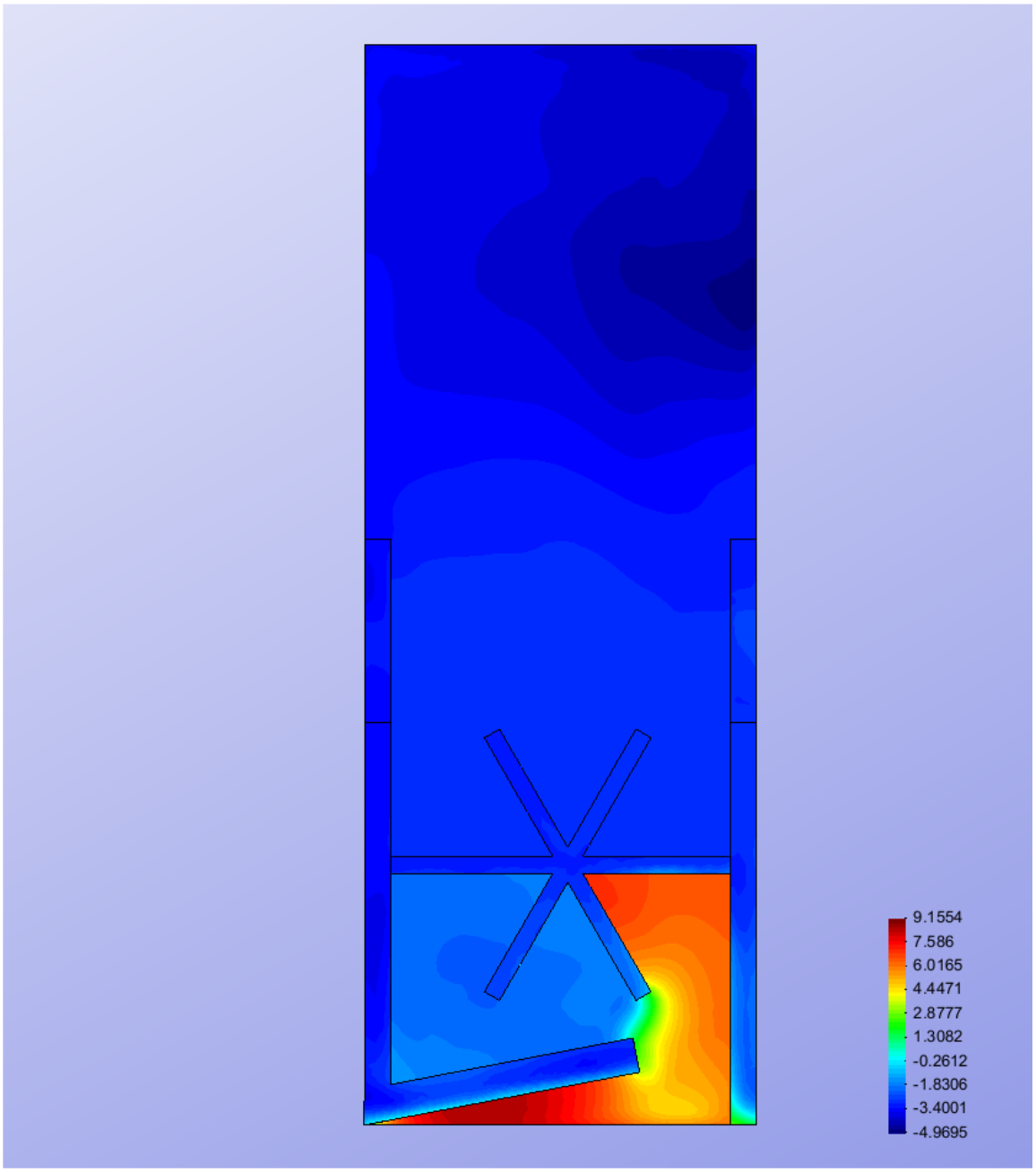


Figure 7-56 : Vue de dessus d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

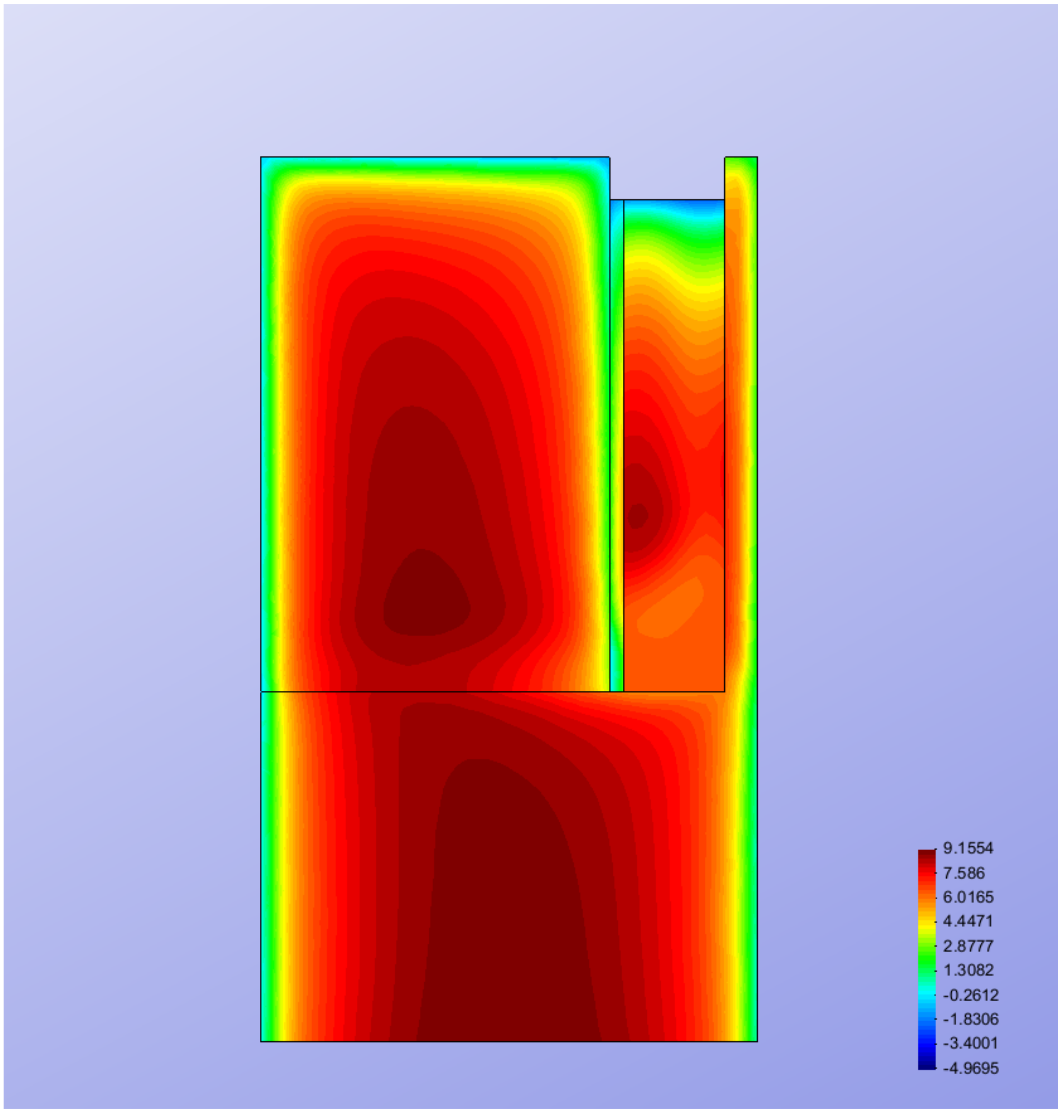


Figure 7-57 : Vue de face d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

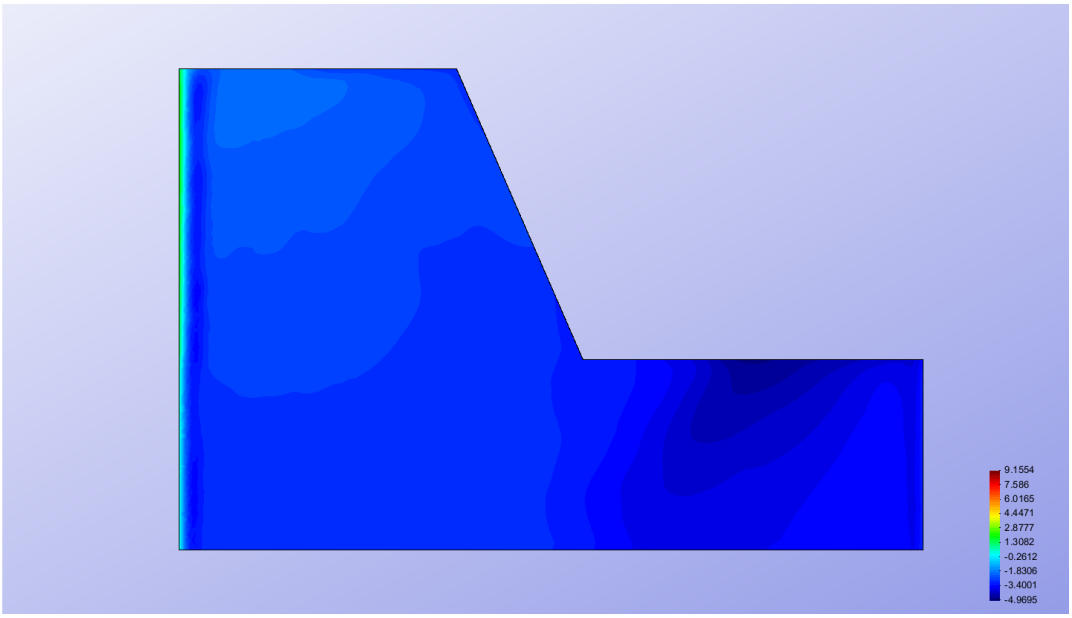


Figure 7-58 : Vue latérale d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de gauche à droite.

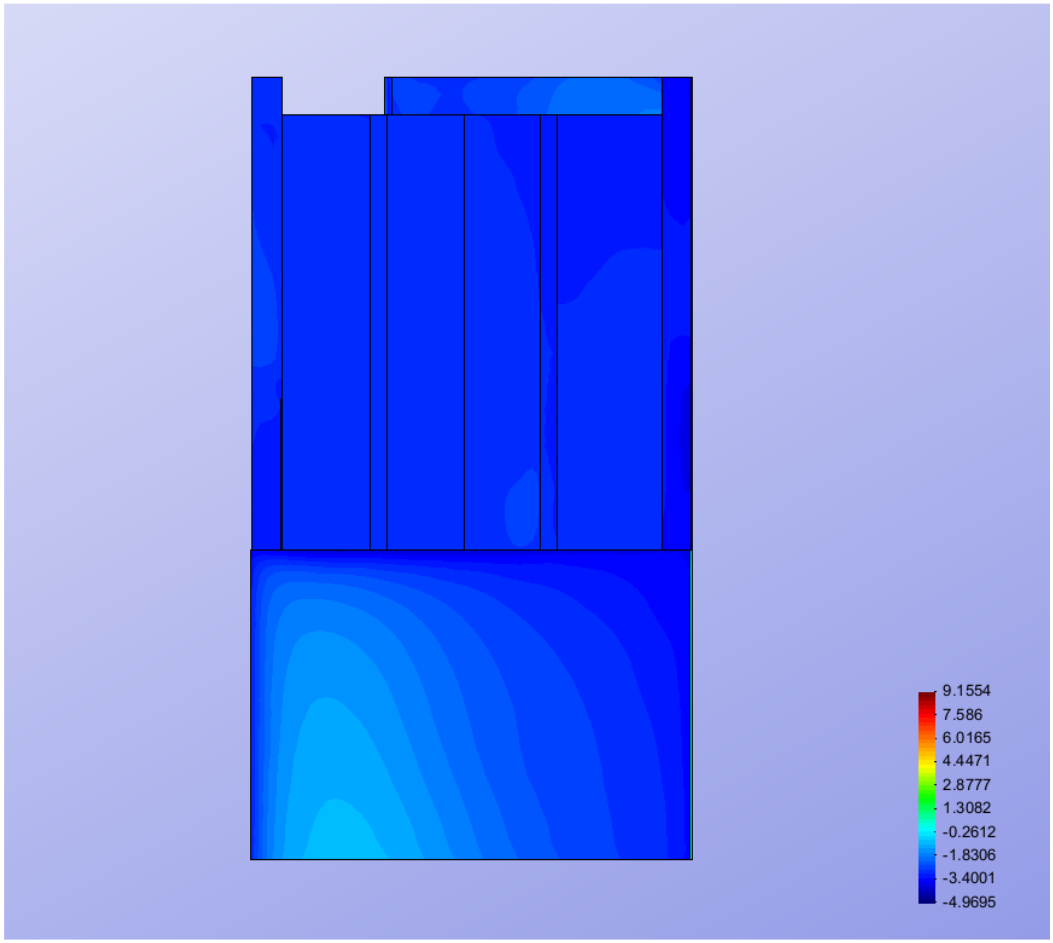


Figure 7-59 : Vue arrière d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

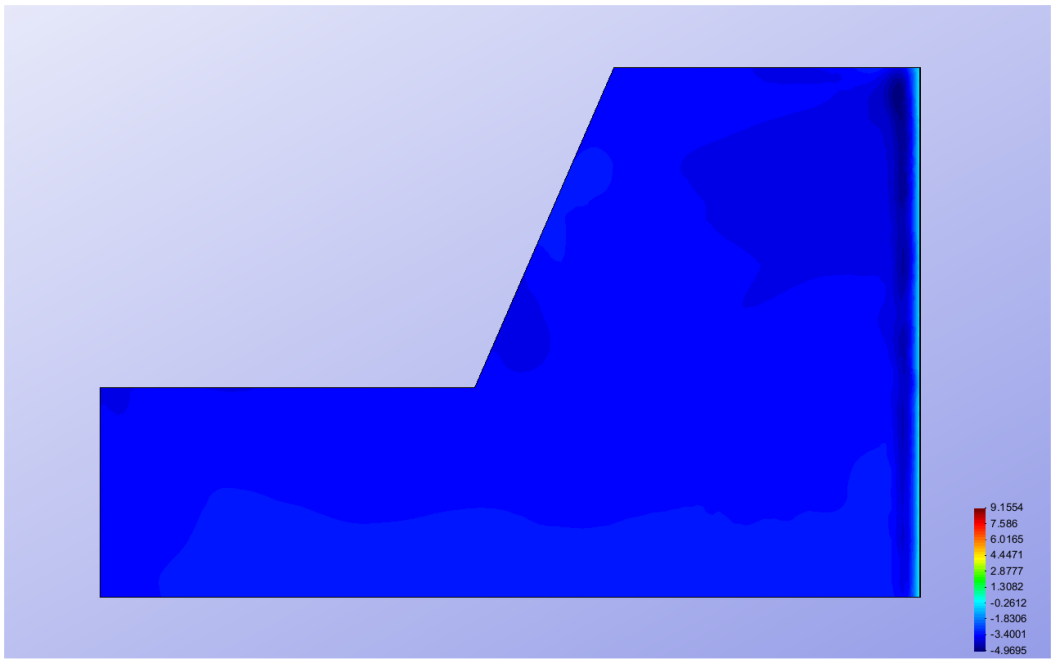


Figure 7-60 : Vue latérale d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de droite à gauche.

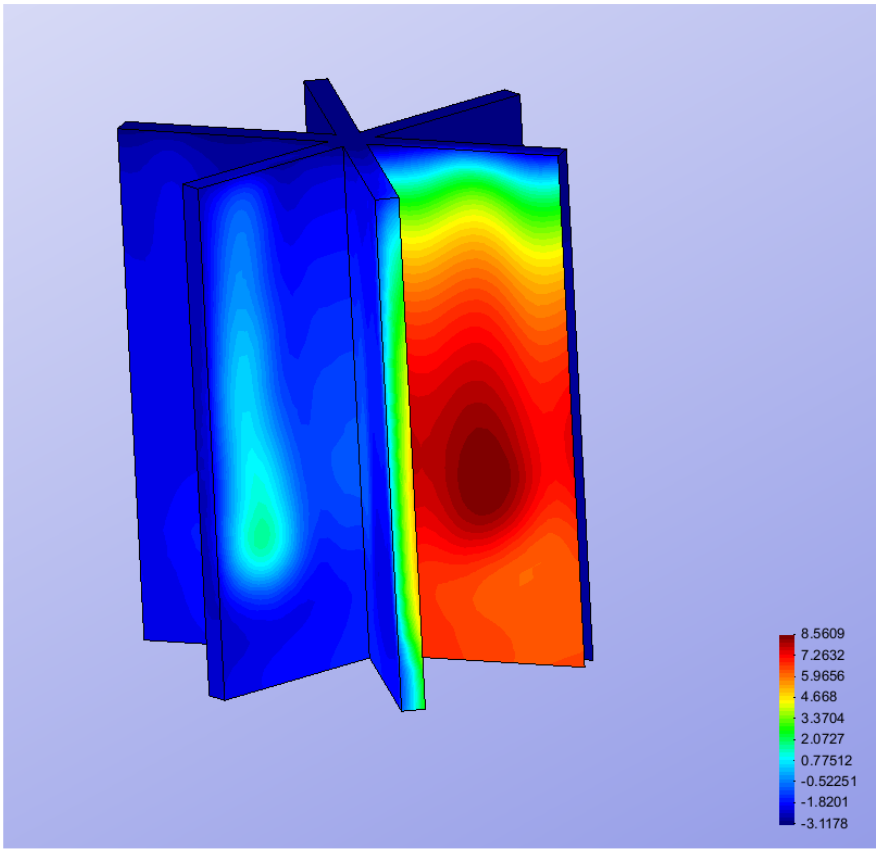


Figure 7-61 : Pression du vent sur les pales, vue de face d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

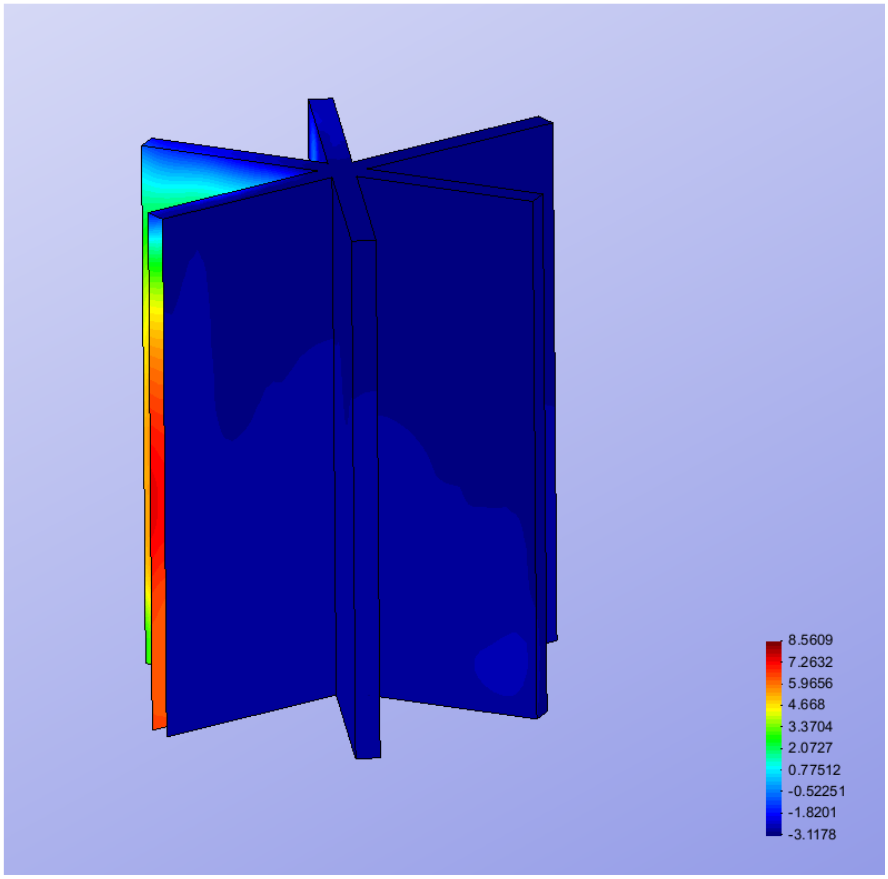


Figure 7-62 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Neh-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

As-Shakiban-Corp

Vitesse du vent : 14 km/h = 3,9 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-C_05

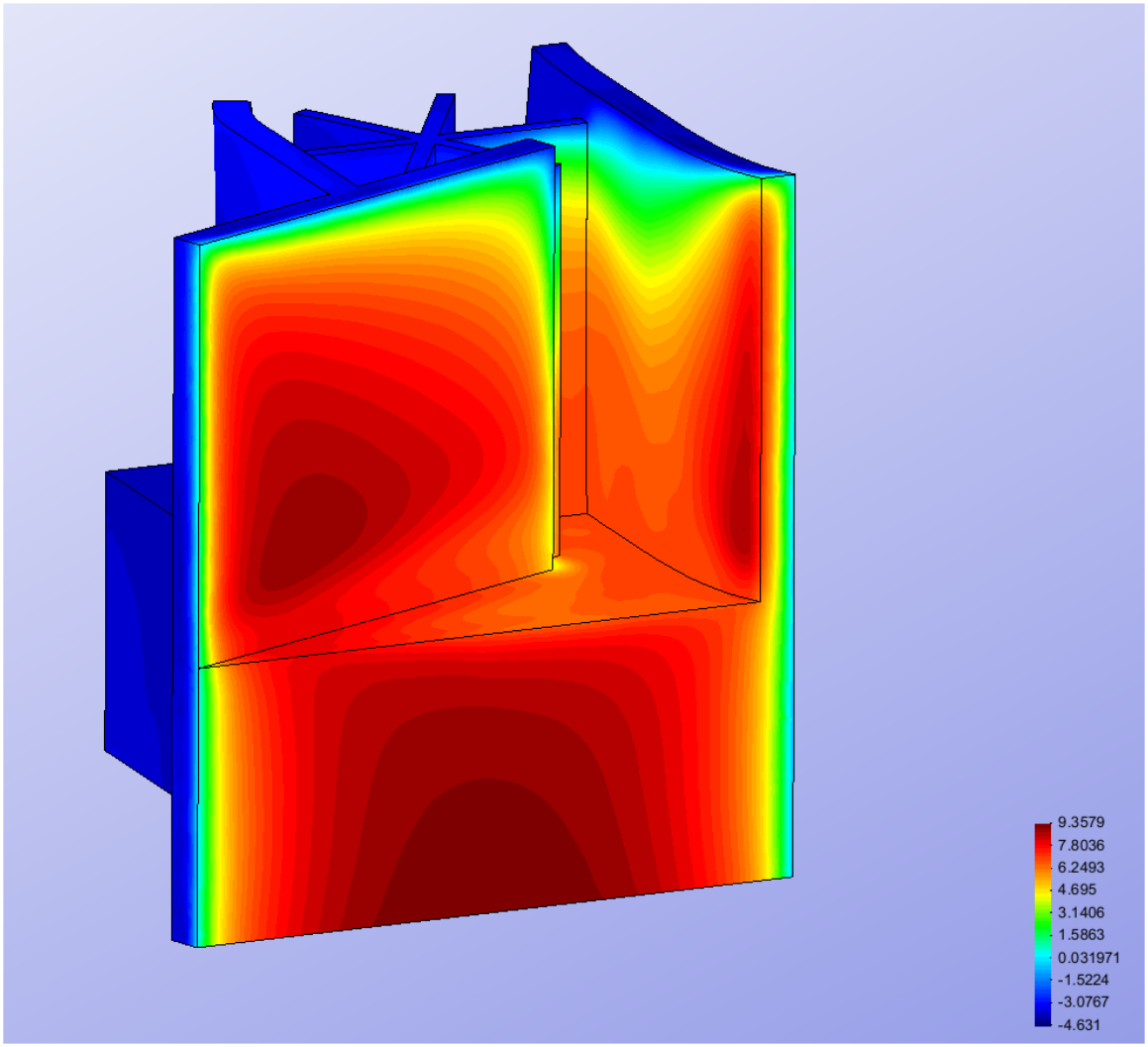


Figure 7-63 : Vue isométrique (1) d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

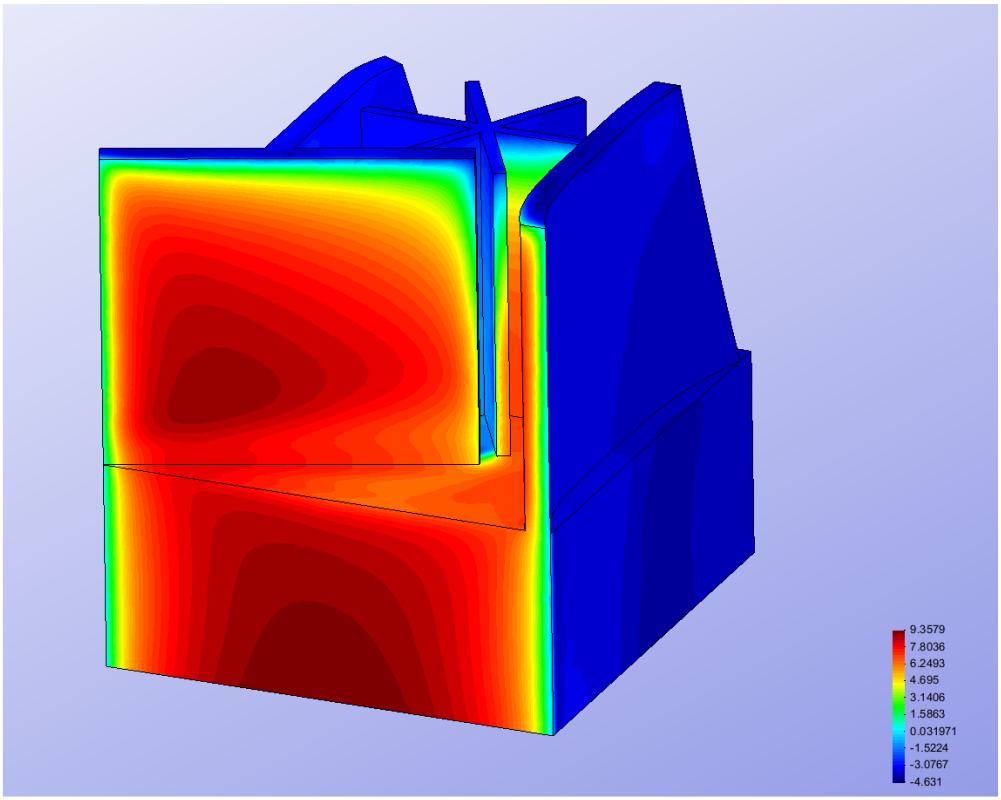


Figure 7-64 : Vue isométrique (2) d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

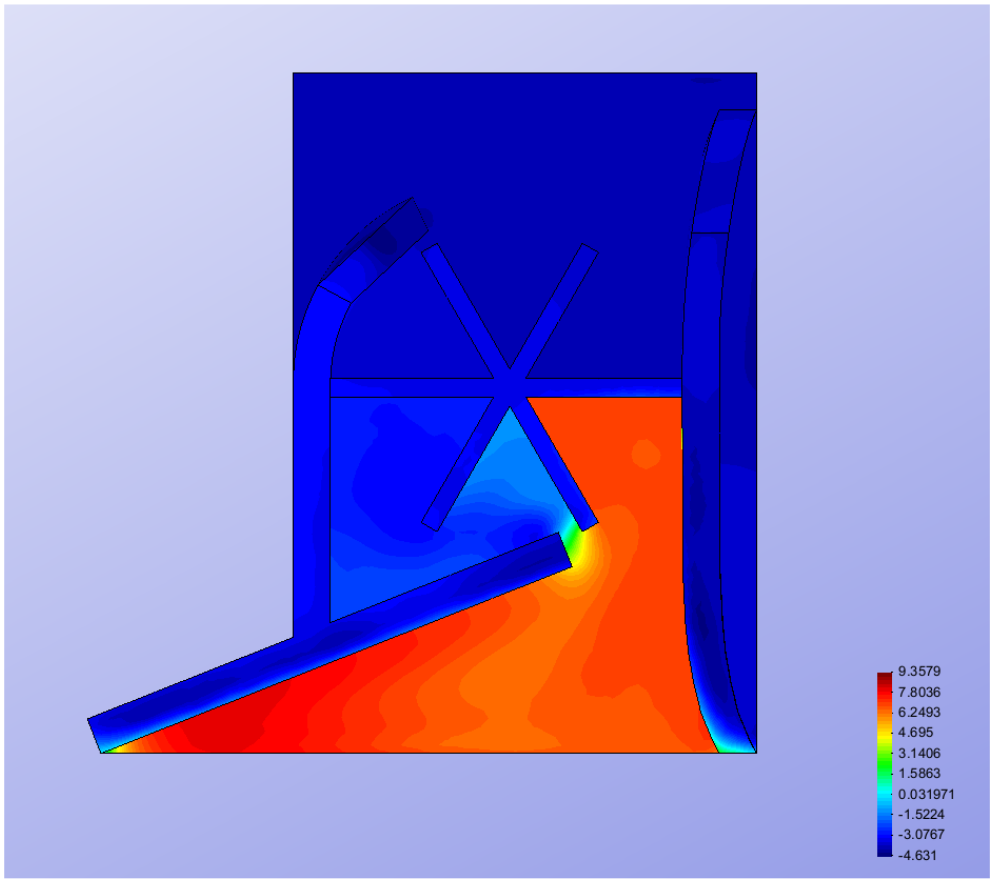


Figure 7-65 : Vue de dessus d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

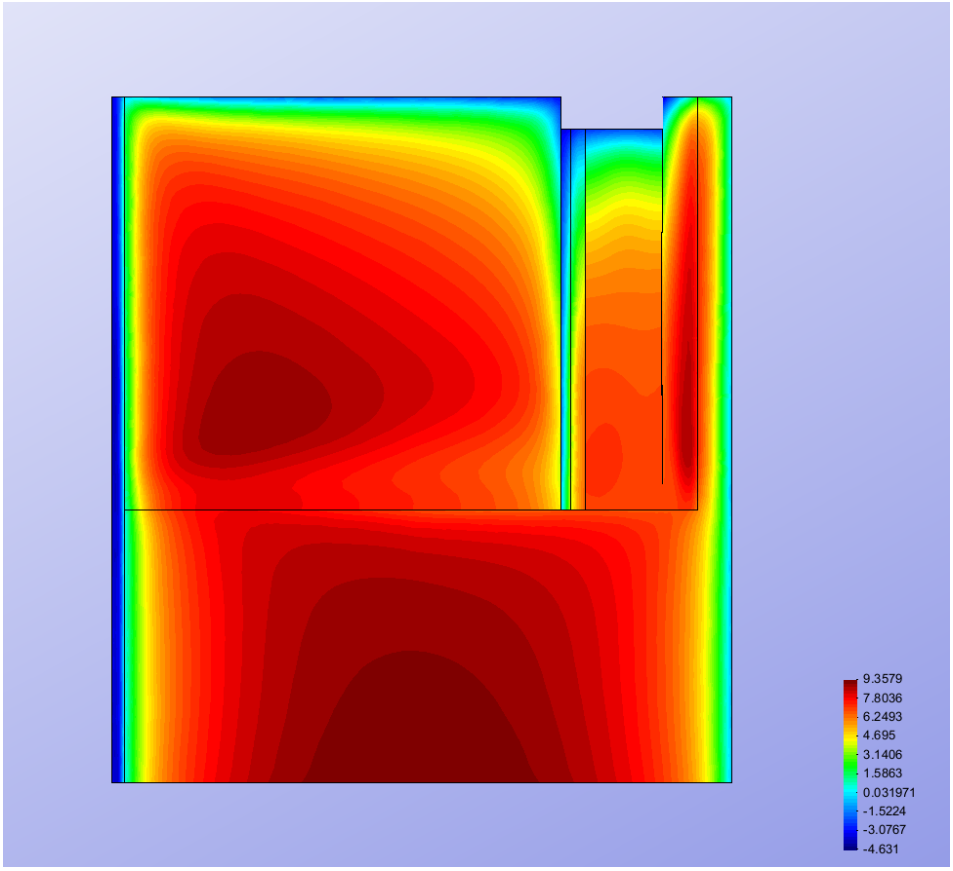


Figure 7-66 : Vue de face d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

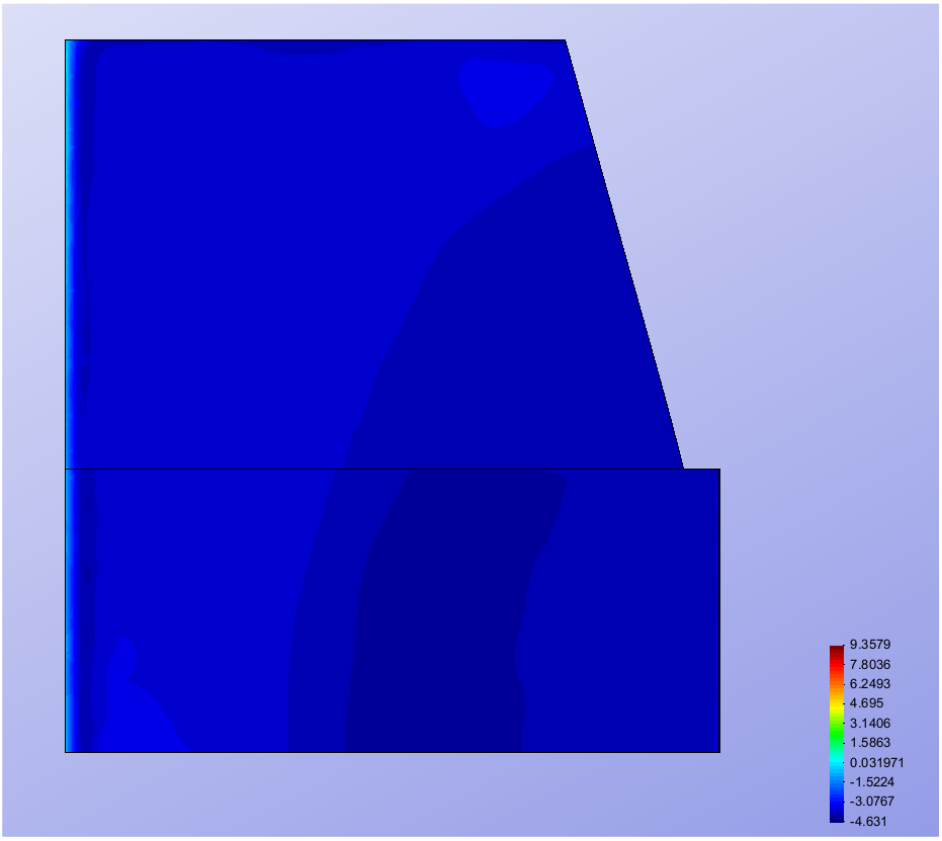


Figure 7-67 : Vue latérale d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de gauche à droite.

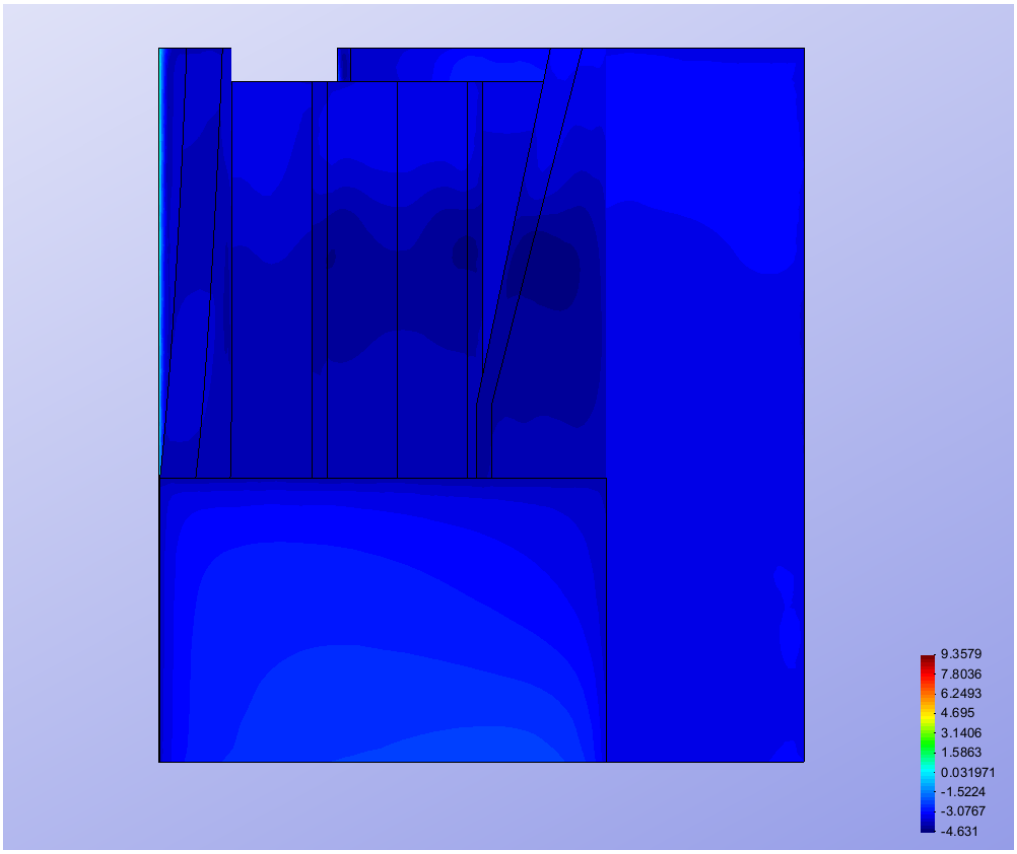


Figure 7-68 : Vue arrière d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

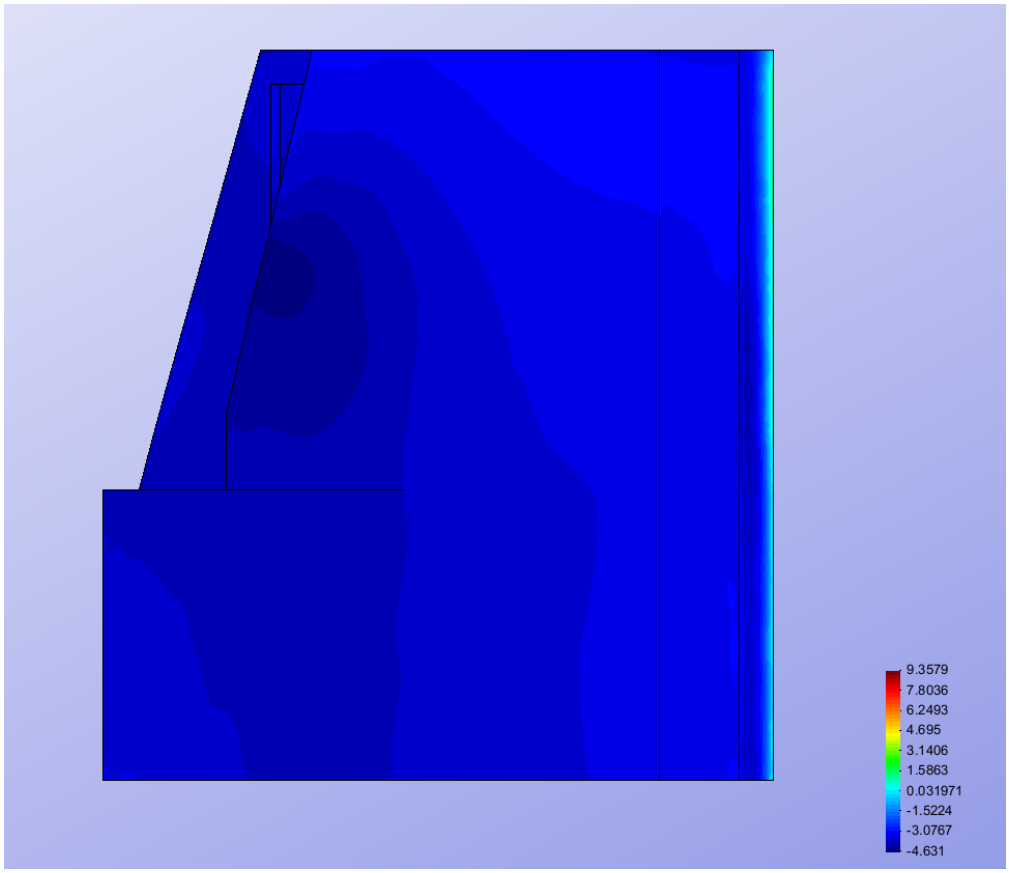


Figure 7-69 : Vue latérale d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de droite à gauche.

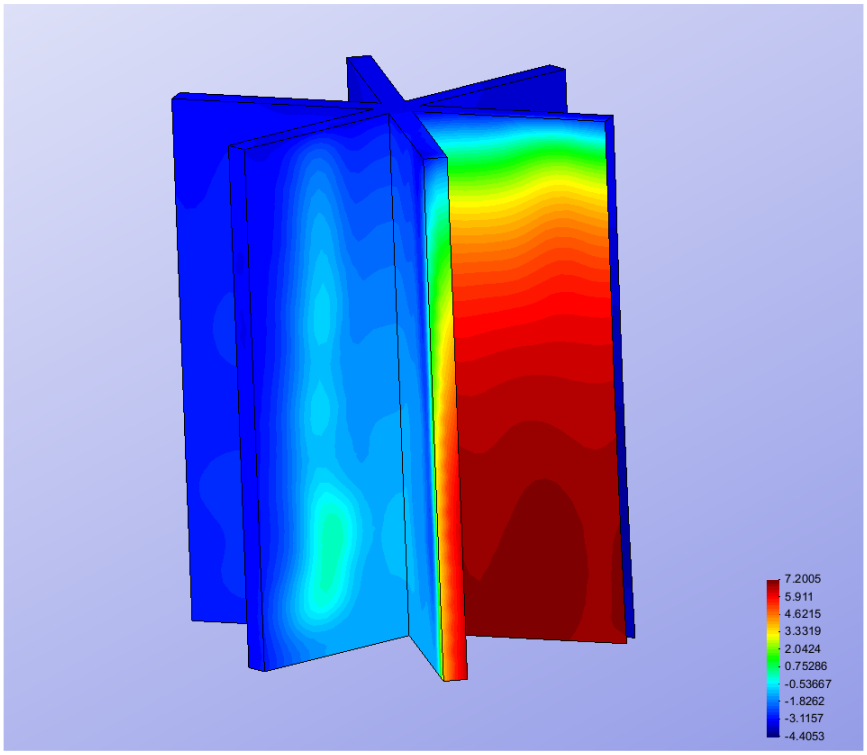


Figure 7-70 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

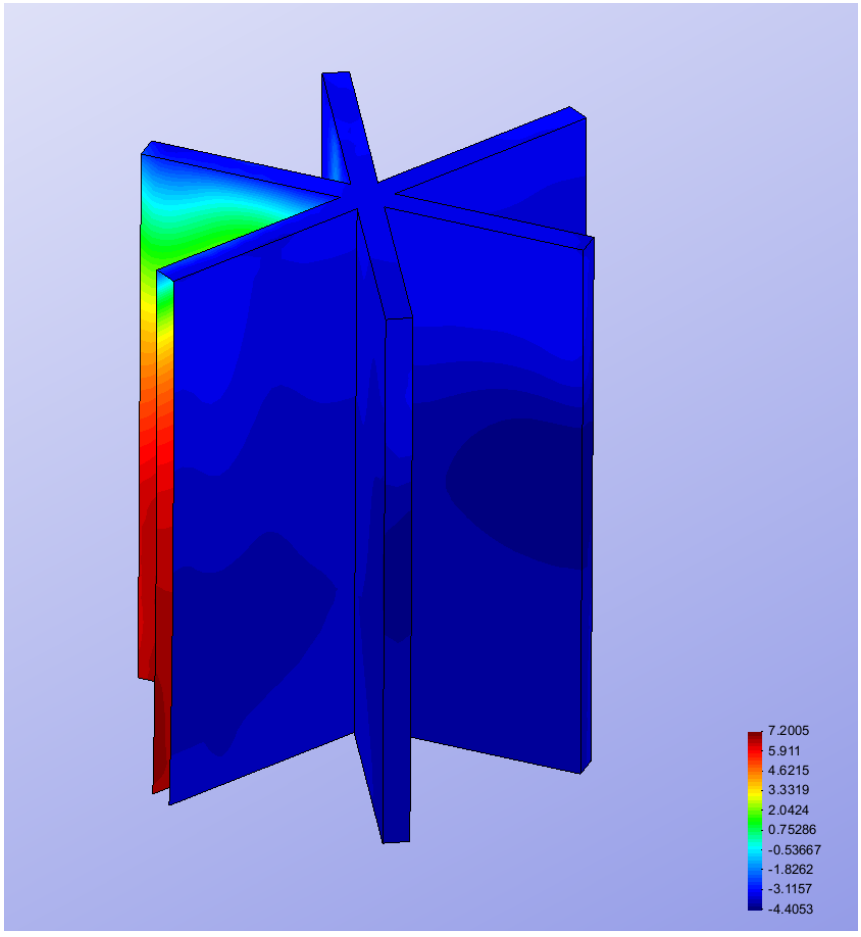
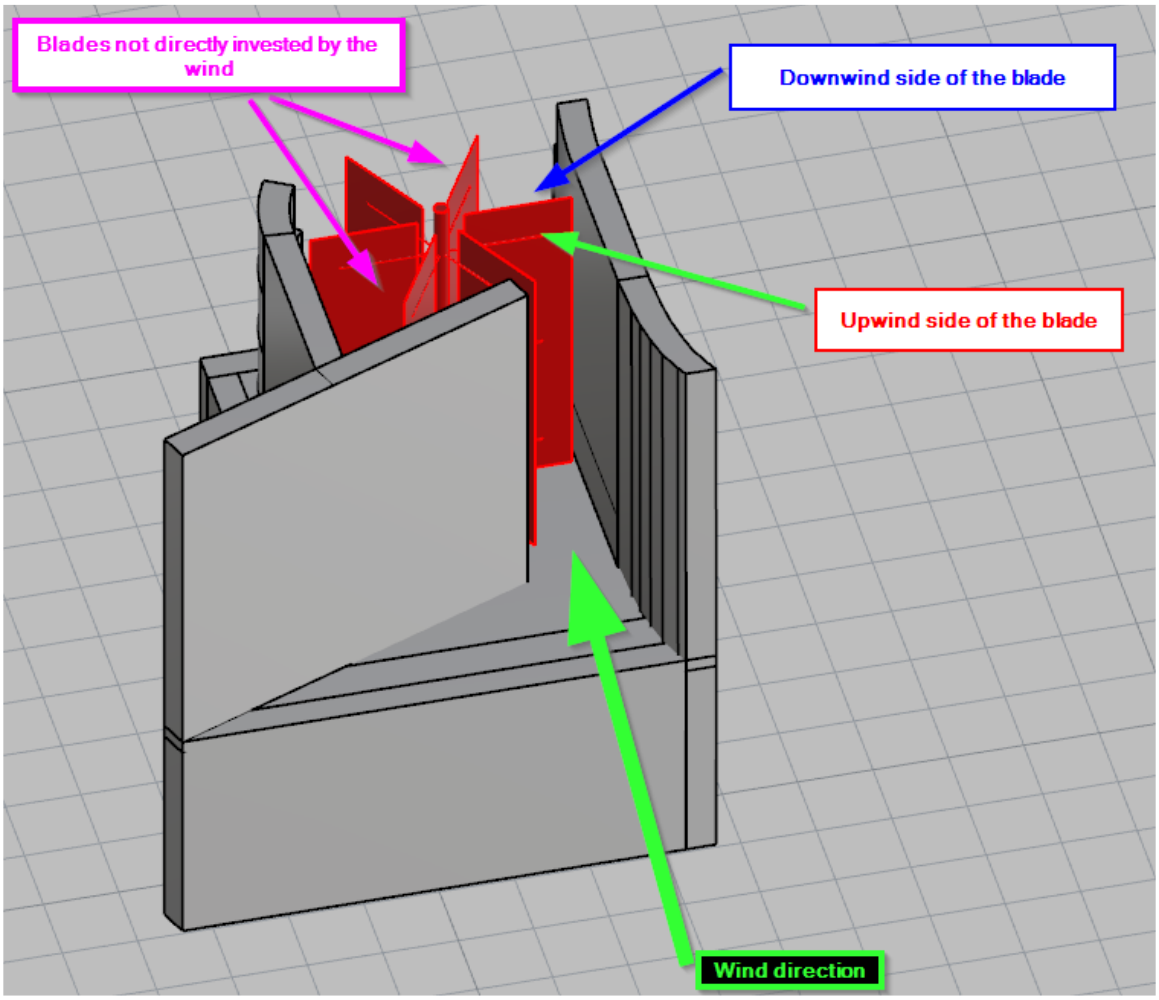


Figure 7-71 : Pression du vent sur la pale, vue arrière d'As-Shakiban-Corp, vitesse du vent = 3,9 m/s.

Résultats de simulation CFD - pression sur les lames

La géométrie des lames a été simplifiée pour l'analyse, avec une surface plane. La pression a été mesurée sur les deux faces des lames, comme une pression normale. Pour la forme particulière du moulin à vent, une seule pale à la fois est directement exposée au vent, avec une pression nette due à la différence de pression positive du côté vent arrière et la pression négative du côté vent arrière (voir schéma ci-dessous) avec une pression nette maximale de p = 800 Pa (à V = 110 km/h), p = 60 Pa (à V = 30 km/h) et p = 11,7 Pa (à V = 14 km/h). Pour les autres pales, où le vent ne peut pas agir directement en raison de la géométrie du bâtiment, la différence de pression entre les deux côtés est négligeable et la lame entraîne un équilibre de la pression du vent. La différence de pression sur la lame chargée et les autres fournissent la force de torsion nécessaire à la rotation de l'éolienne.



.

Figure 7-72 : Description de la pression du vent agissant sur les lames.

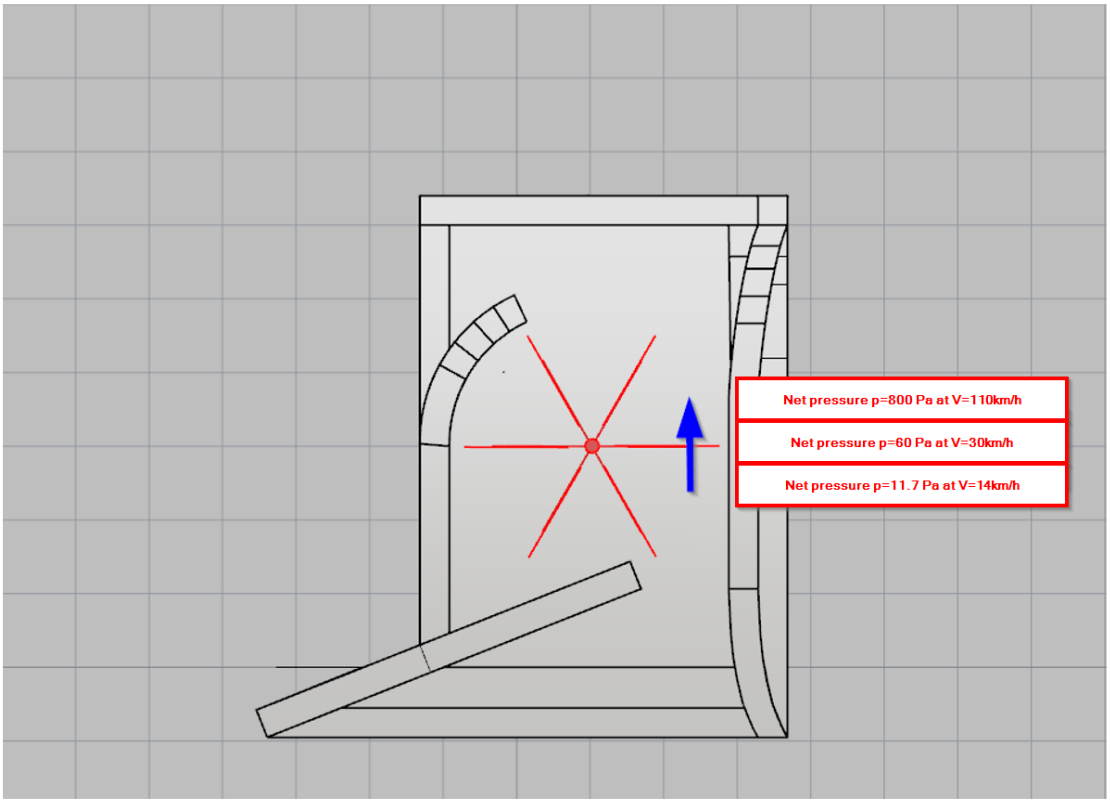


Figure 7-73 : Description de la pression nette exercée sur la lame directement exposée au vent. La pression nette maximale sur les pales donne p = 800 Pa (à V = 110 km/h), p = 60 Pa (à V = 30 km/h) et p = 11,7 Pa (à V = 14 km/h).

Cet effet est visible dans la simulation concernant le moulin à vent d'As-Neh-Corp et d'As-Shakiban-Corp, où la pression maximale a été mesurée. Pour la géométrie d'As-Hozdar-corp cet effet est limité car la lame n'est pas parfaitement alignée avec les ouvertures dans les murs. Dans les images suivantes, il est possible de visualiser la pression maximale du vent mesurée sur les lames.

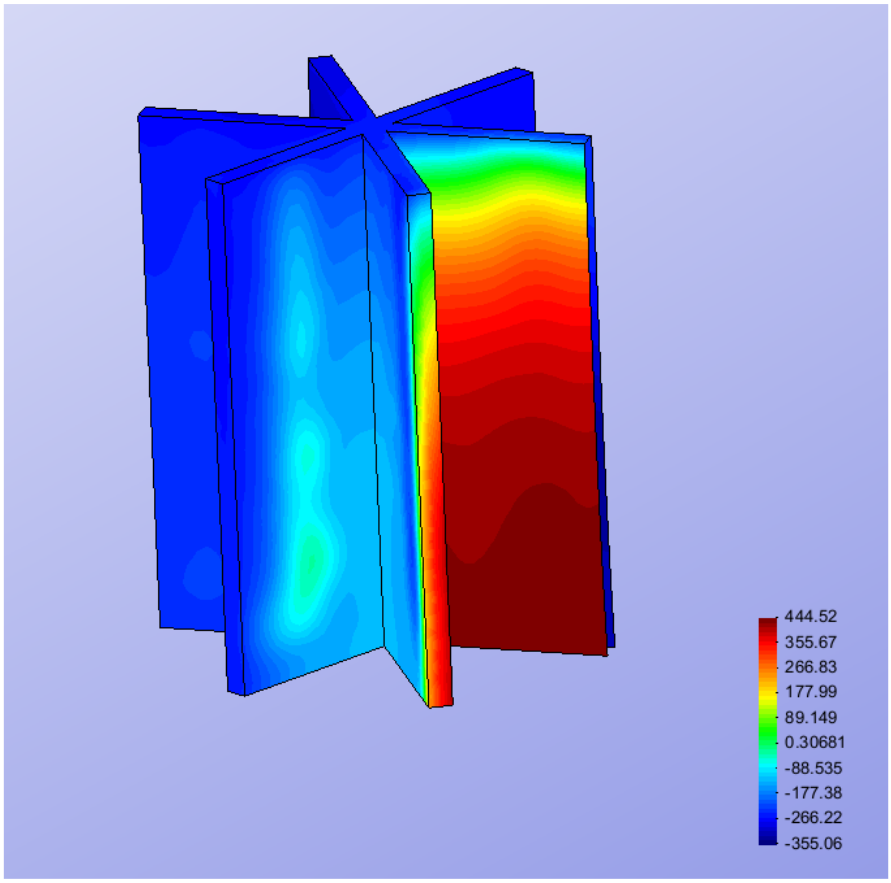


Figure 7-74 : Vue isométrique (1) de la pression maximale du vent sur les pales, vitesse du vent = 30,6 m/s.

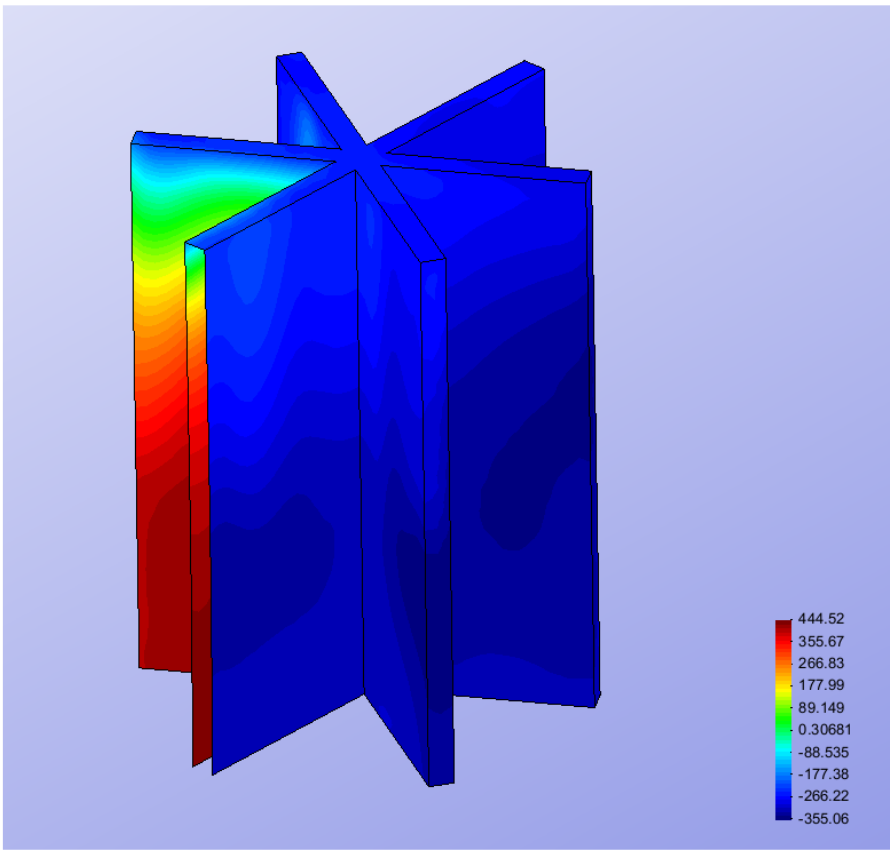


Figure 7-75 : Vue isométrique (2) de la pression maximale du vent sur les pales, vitesse du vent = 30,6 m/s.

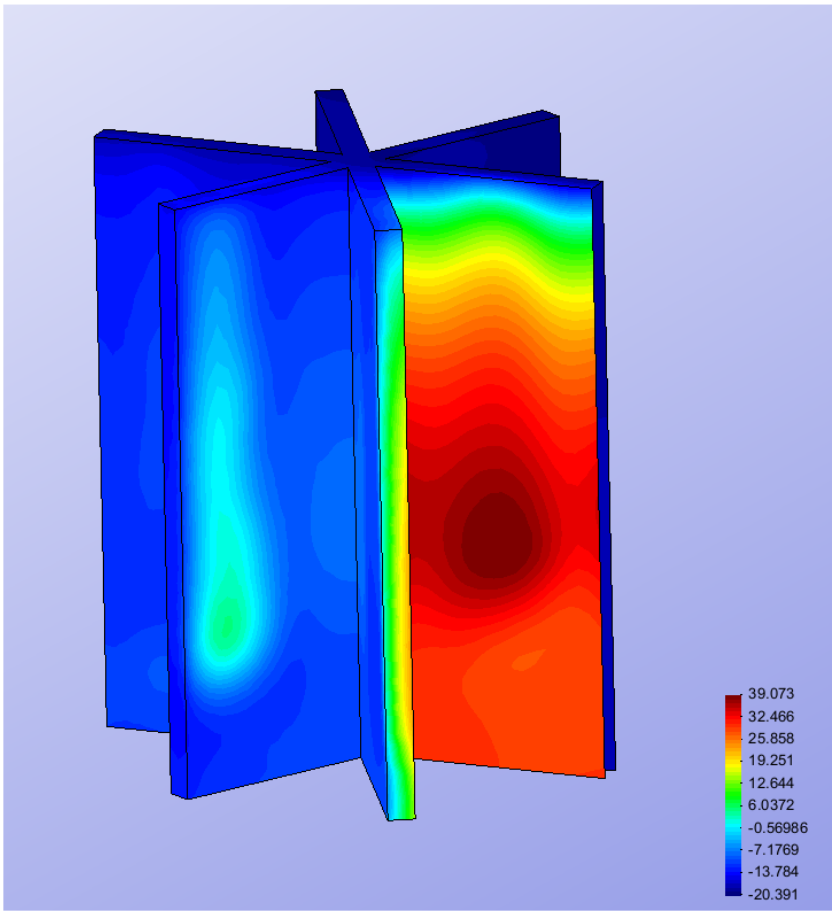


Figure 7-76 : Vue isométrique (1) de la pression maximale du vent sur les pales, vitesse du vent = 8,3 m/s.

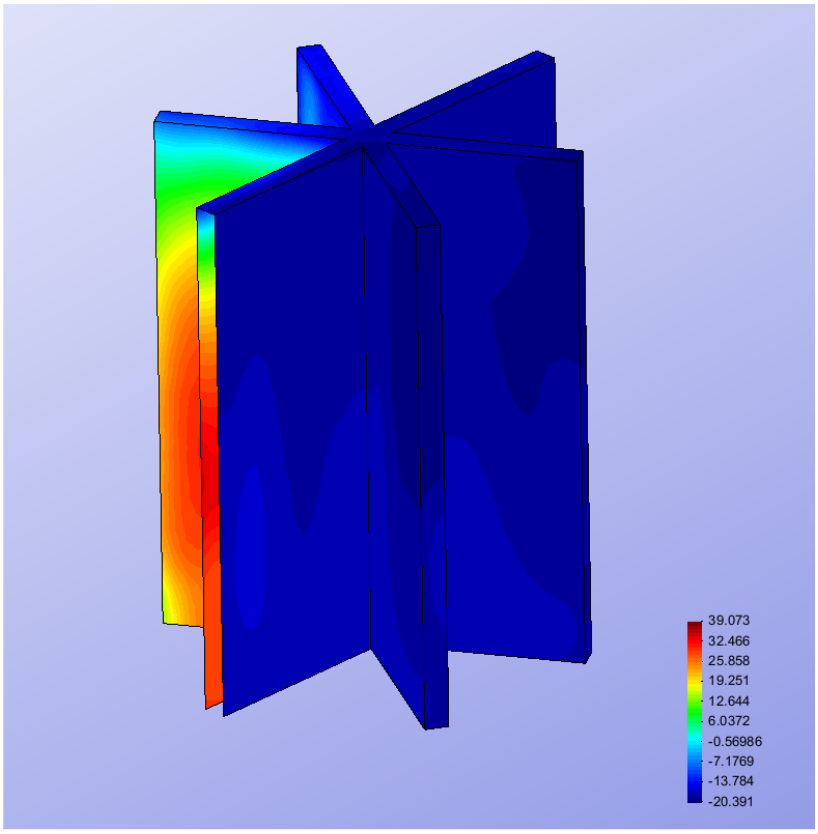


Figure 7-77 : Vue isométrique (2) de la pression maximale du vent sur les pales, vitesse du vent = 8,3m/s.

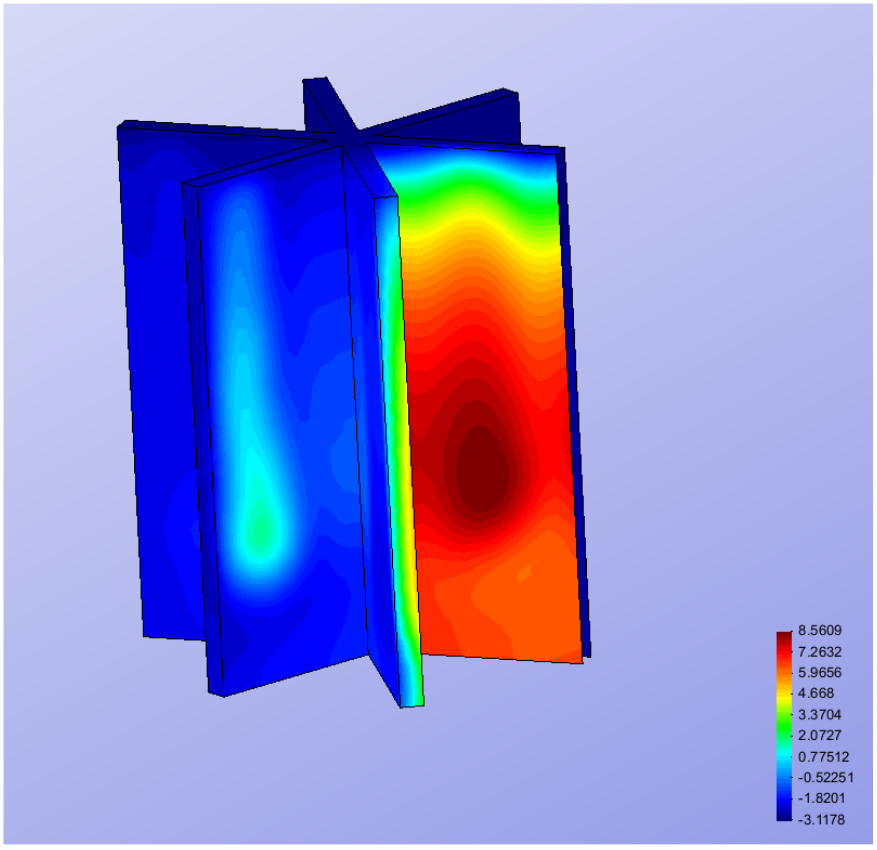


Figure 7-78 : Vue isométrique (1) de la pression maximale du vent sur les pales, vitesse du vent = 3,9 m/s.

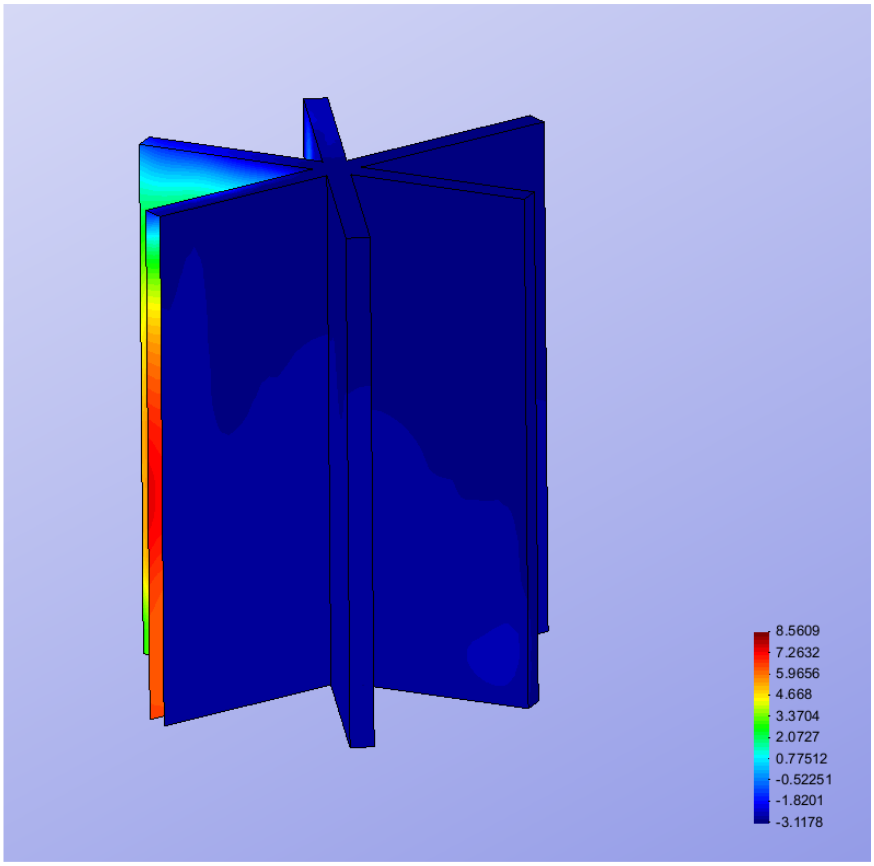


Figure 7-79 : Vue isométrique (2) de la pression maximale du vent sur les pales, vitesse du vent = 3,9 m/s.

Optimisation de la position de la lame Hozdar

La position réelle des lames dans les moulins à vent de Hozdar ne peut pas bénéficier pleinement de l'augmentation de la vitesse du vent à cause de la forme particulière de la façade des moulins à vent. Comme on peut le voir sur les images suivantes, le flux du vent est accéléré par l'entrée de l'air dans la façade qui divise le flux du vent en deux courants différents. L'inclinaison des murs de la façade réoriente la direction du flux du vent principal vers la gauche, comme le montre l'image suivante. La position réelle de la lame est centrée dans le toit du bâtiment mais résulte en dehors du flux accéléré.

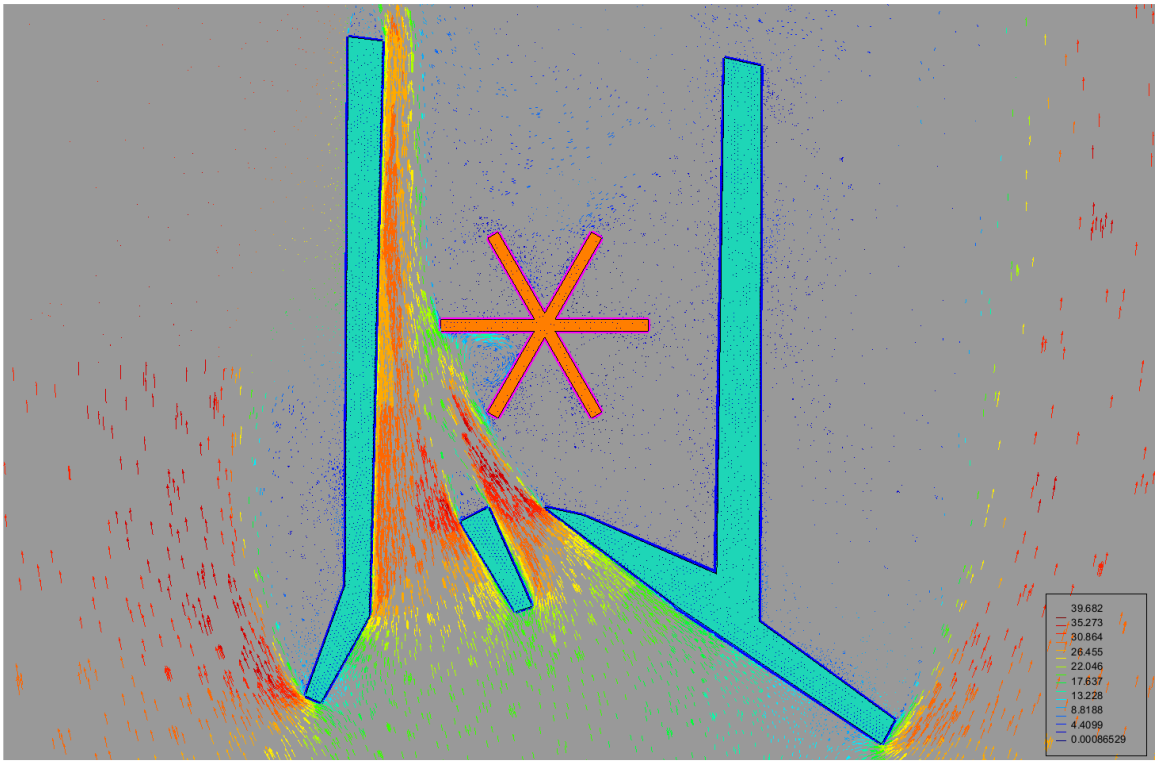


Figure 7-80 : Effets sur le flux du vent dû à l'entrée de l'air de la façade. Le flux est accéléré, divisé en deux flux différents et dévié vers la gauche.

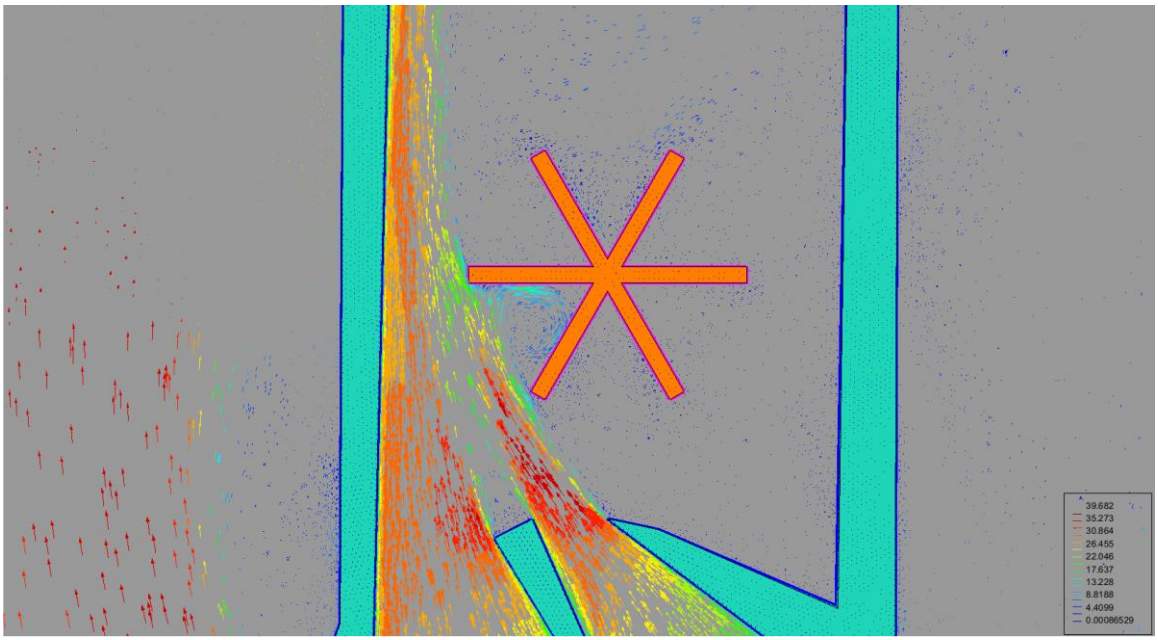


Figure 7-81 : Détail de l'image précédente.

Pour tirer le meilleur parti du flux accéléré, les pales de la turbine doivent être placées dans le flux où l'air circule à la vitesse la plus élevée. L'image suivante propose deux solutions différentes :

- Étendre les pales pour atteindre le débit accéléré, sans déplacer l'axe de la turbine;
- Rapprochez la turbine de la façade, avec la lame à l'intérieur du flux de vent.

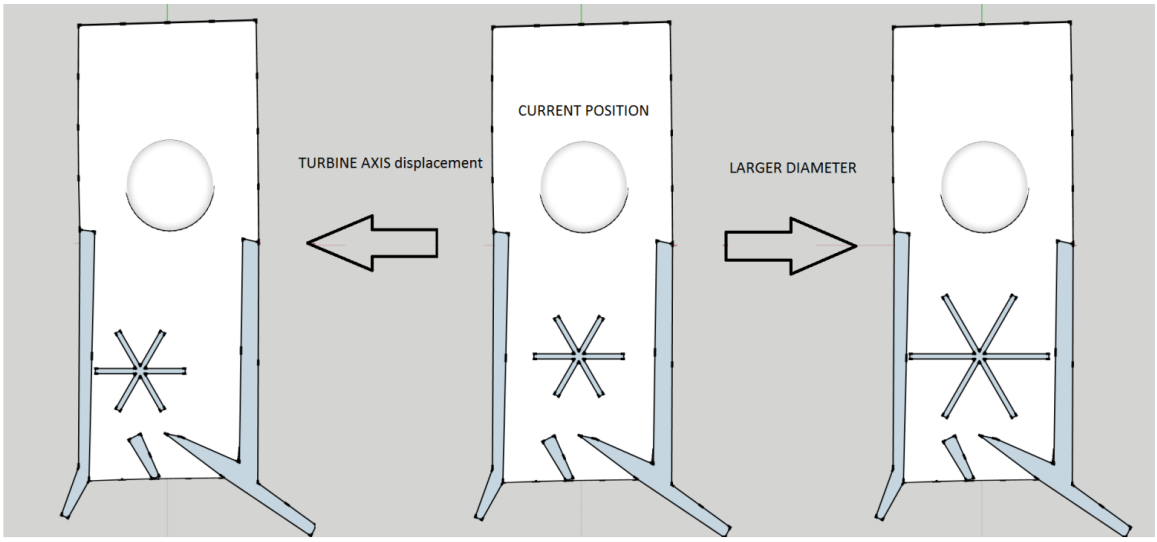


Figure 7-82 : Solution proposée pour augmenter l'efficacité de l'éolienne.

Avec la première solution, la structure existante du bâtiment ne sera pas modifiée car la colonne centrale de la turbine peut rester dans la position réelle. Seules les lames doivent être étendues d'environ 1,5 m de rayon. Comme on peut le voir dans l'image suivante, la turbine étendue peut atteindre les deux flux de vent et la puissance sera augmentée proportionnellement à l'augmentation de la surface totale des pales.

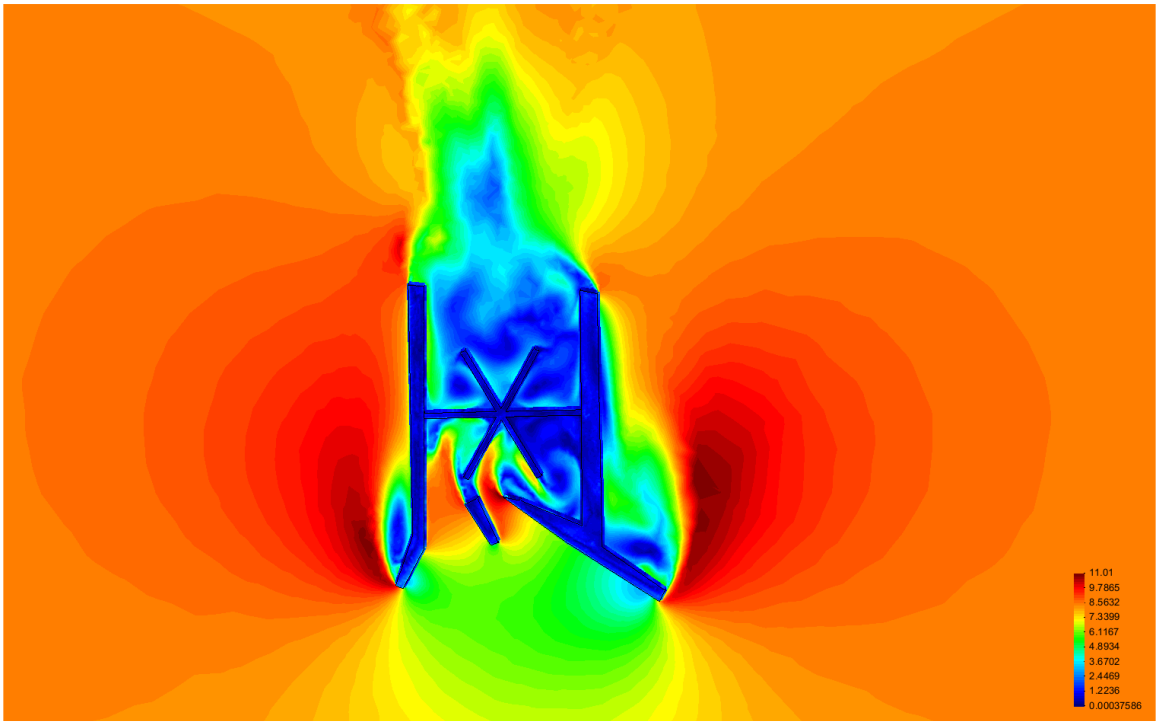


Figure 7-83 : Distribution de la vitesse du vent avec la géométrie des pales étendues.

Avec la deuxième solution, les lames existantes doivent être déplacées vers une meilleure position. Cela nécessite une modification des structures existantes du bâtiment en raison de la modification de la position de la colonne de la turbine. De plus, la pierre du moulin située à la base du mât principal doit être déplacée en fonction du mouvement de la turbine. Pour l'analyse suivante, la lame a été déplacée de 1,5 m vers la façade et de 1 m latéralement vers le mur. La nouvelle position apparaît dans l'image suivante.

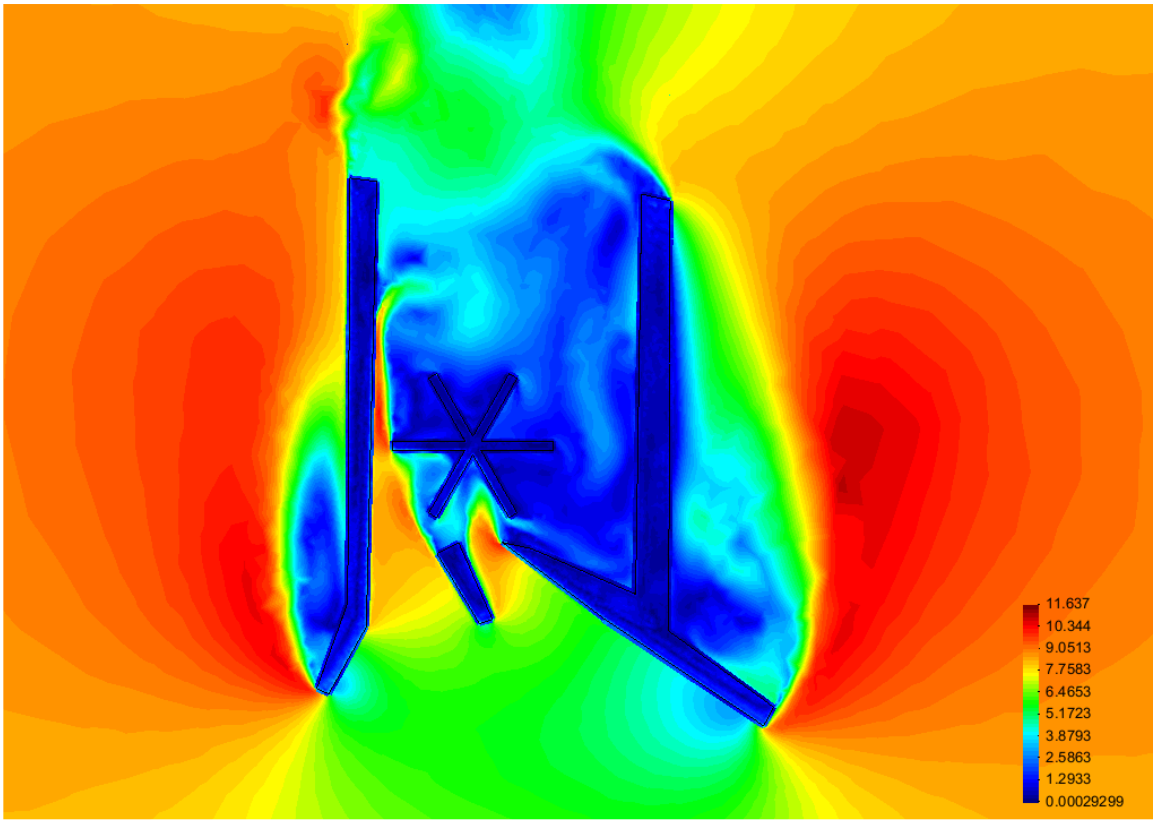


Figure 7-84 : Distribution de la vitesse du vent avec la géométrie des lames déplacées.

À partir de l'analyse de la répartition de la pression du vent sur la géométrie proposée, il est possible de vérifier que les deux solutions auront un impact positif sur la répartition de la pression sur les pales, par rapport à la géométrie existante. Pour les deux géométries proposées, la pression nette maximale sur les pales est comparable à la pression nette maximale mesurée sur les pales des moulins à vent de Neh et de Chabiban. Pour le choix des solutions, de nombreux autres facteurs doivent être évalués, comme l'implication structurelle due au mouvement de la colonne, l'impact économique ou visuel. Concernant la pression maximale du vent sur les pales (cadre de cette analyse), les deux solutions sont acceptables. Dans les pages qui suivent, toutes les images sont recueillies avec la répartition de la pression sur les lames et sur les murs pour les deux solutions à la vitesse du vent de 14 km/h, 30 km/h et 110 km/h.

As-Hozdar-Corp avec lames étendues

Pression calculée à V = 110 km/h

Vitesse du vent : 110 km/h = 30,6 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-D_03

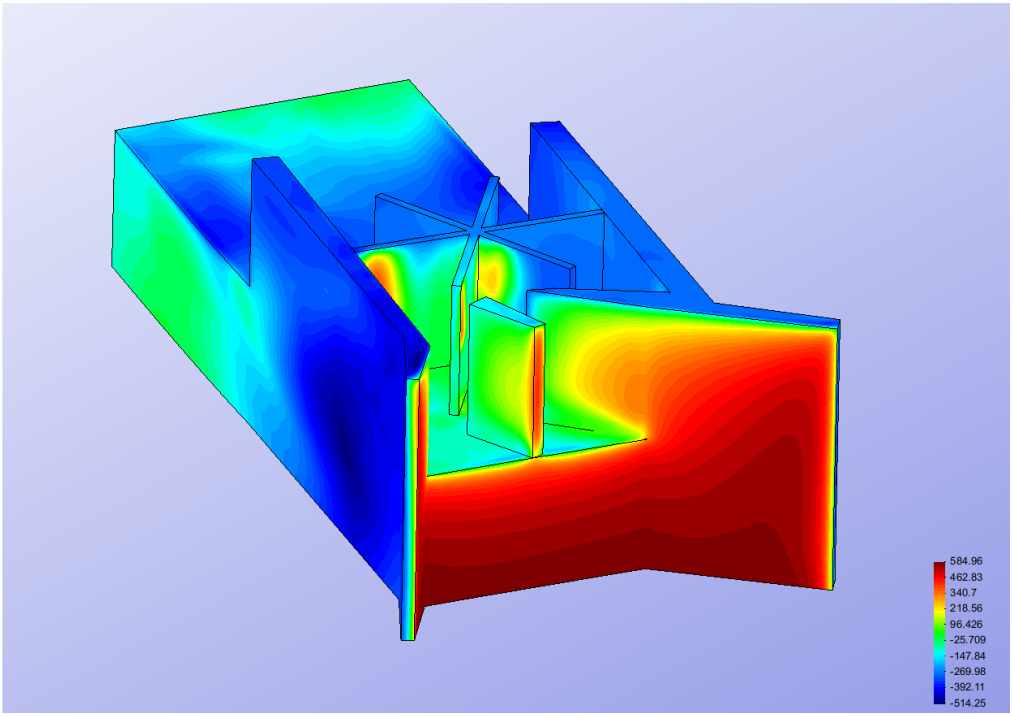


Figure 7-85 : Vue isométrique (1) d'As-Hozdar -Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

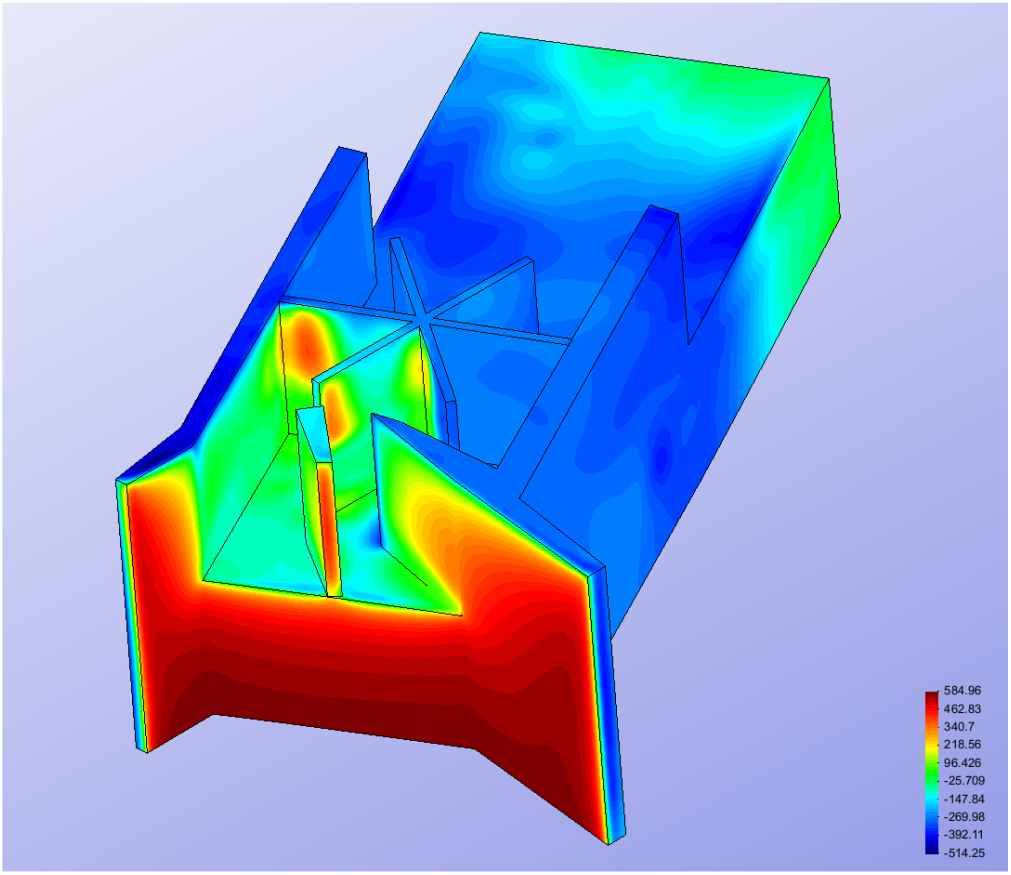


Figure 7-86 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar -Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

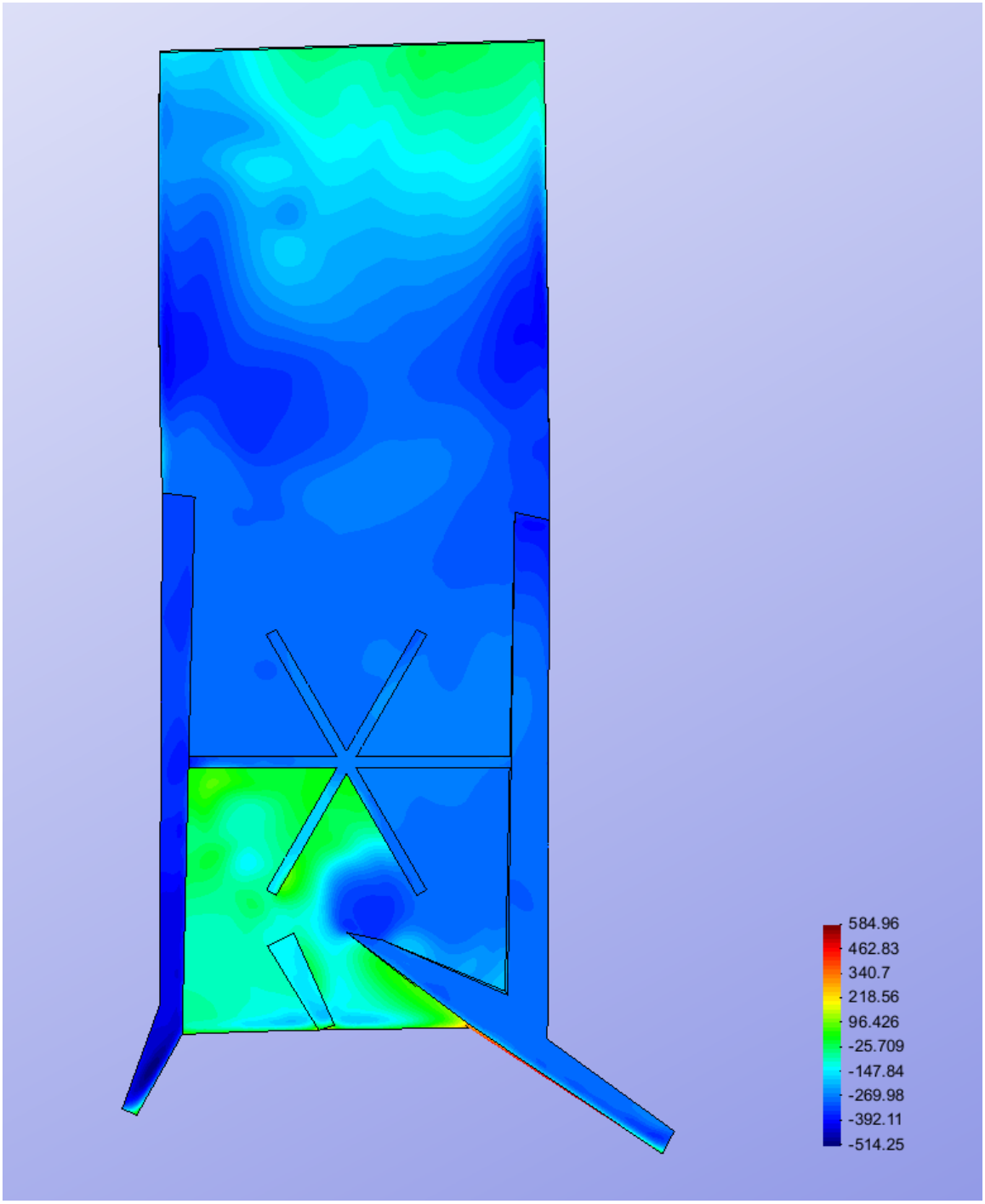


Figure 7-87 : Vue de dessus d'As- Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

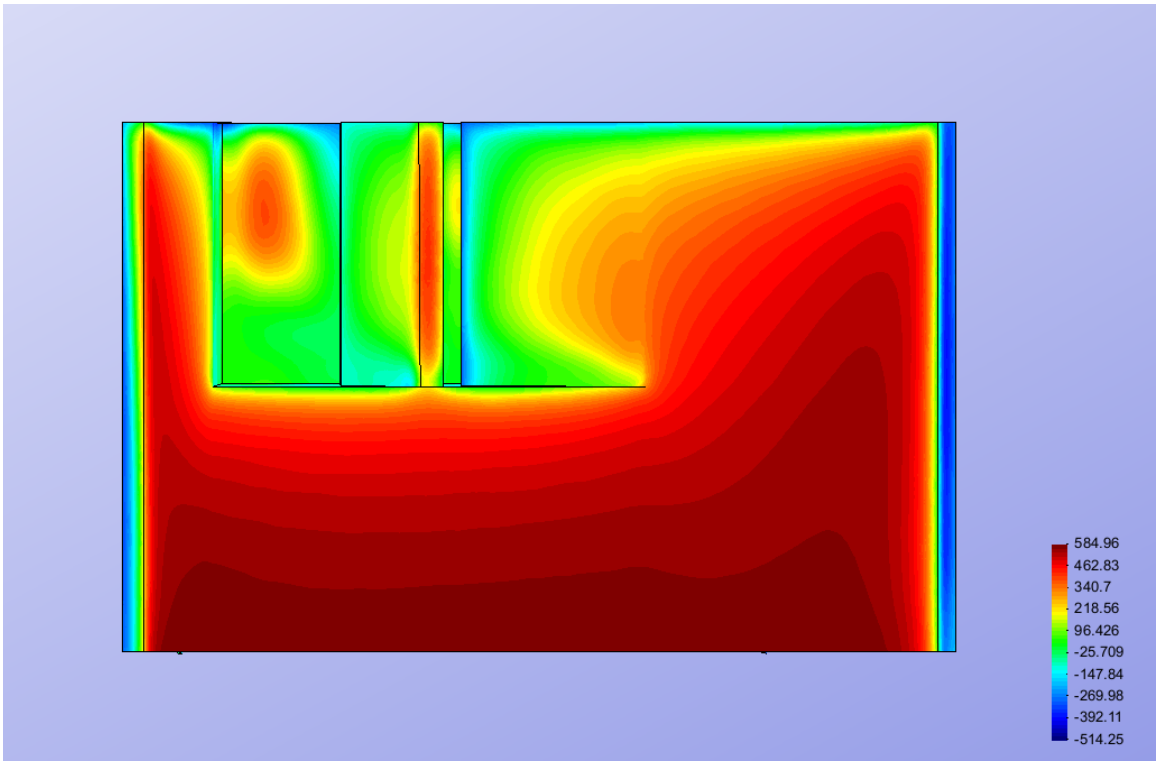


Figure 7-88 : Vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

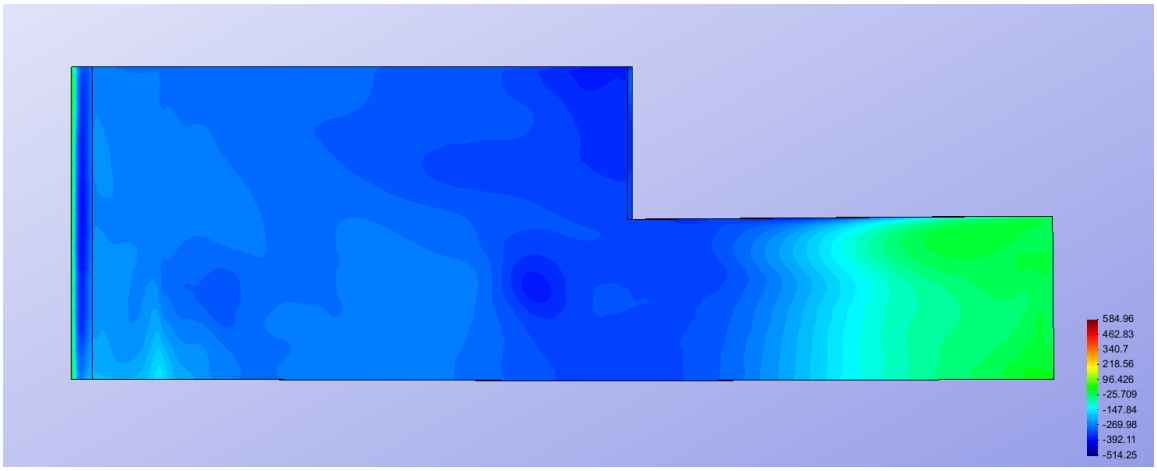


Figure 7-89 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de gauche à droite.

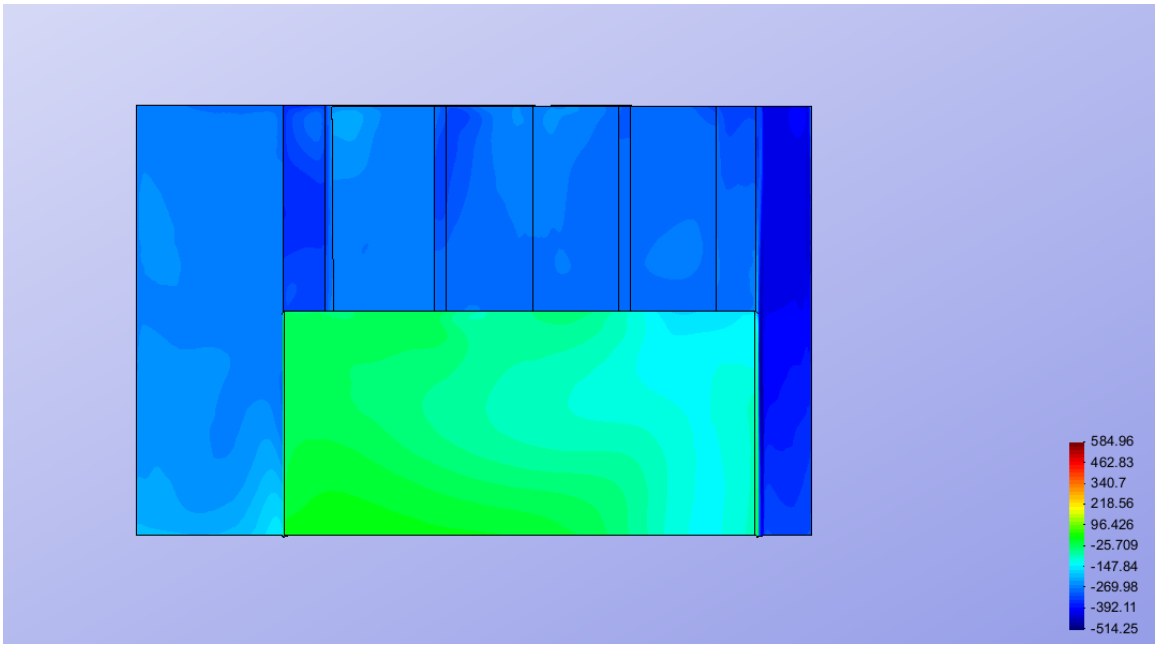


Figure 7-90 : Vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

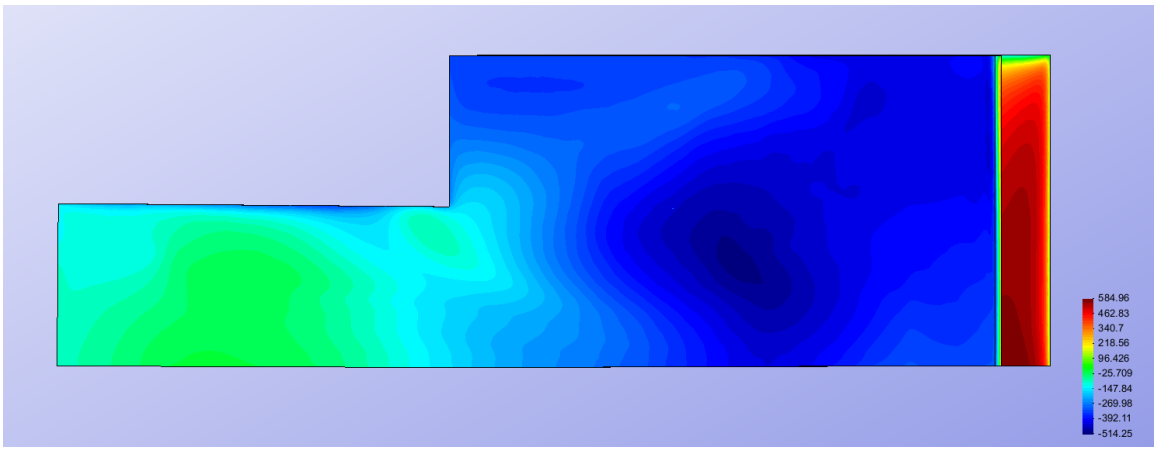


Figure 7-91 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de droite à gauche.

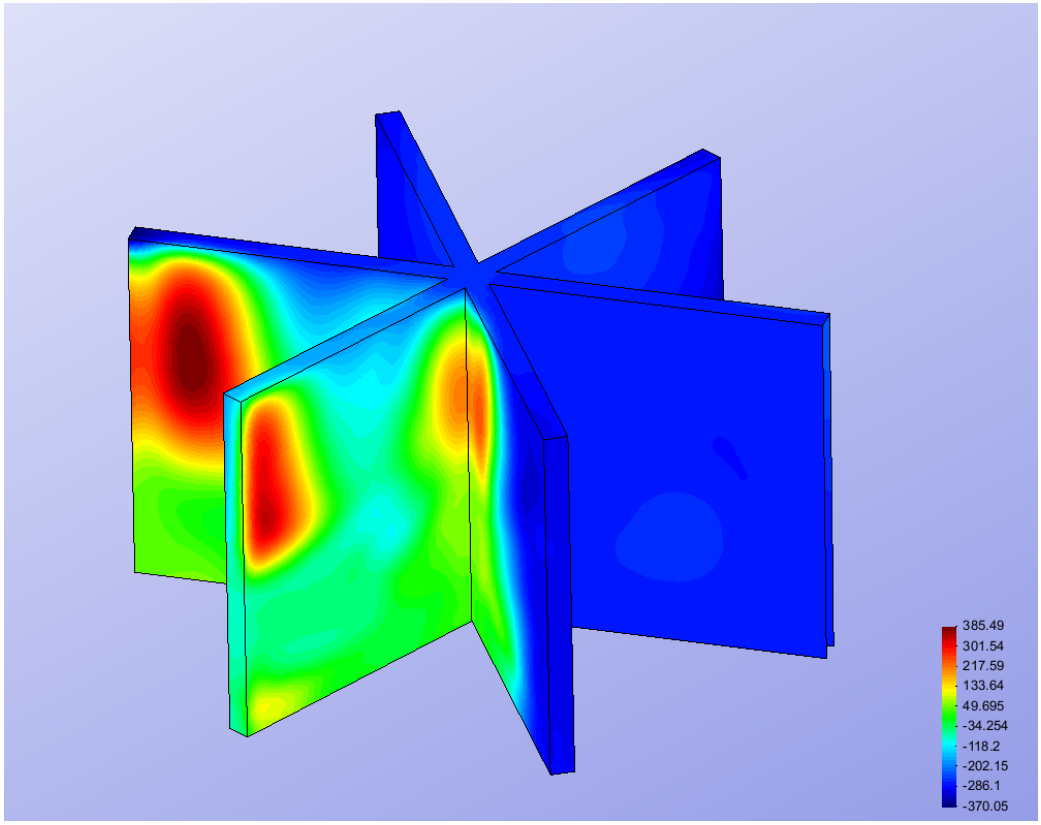


Figure 7-92 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

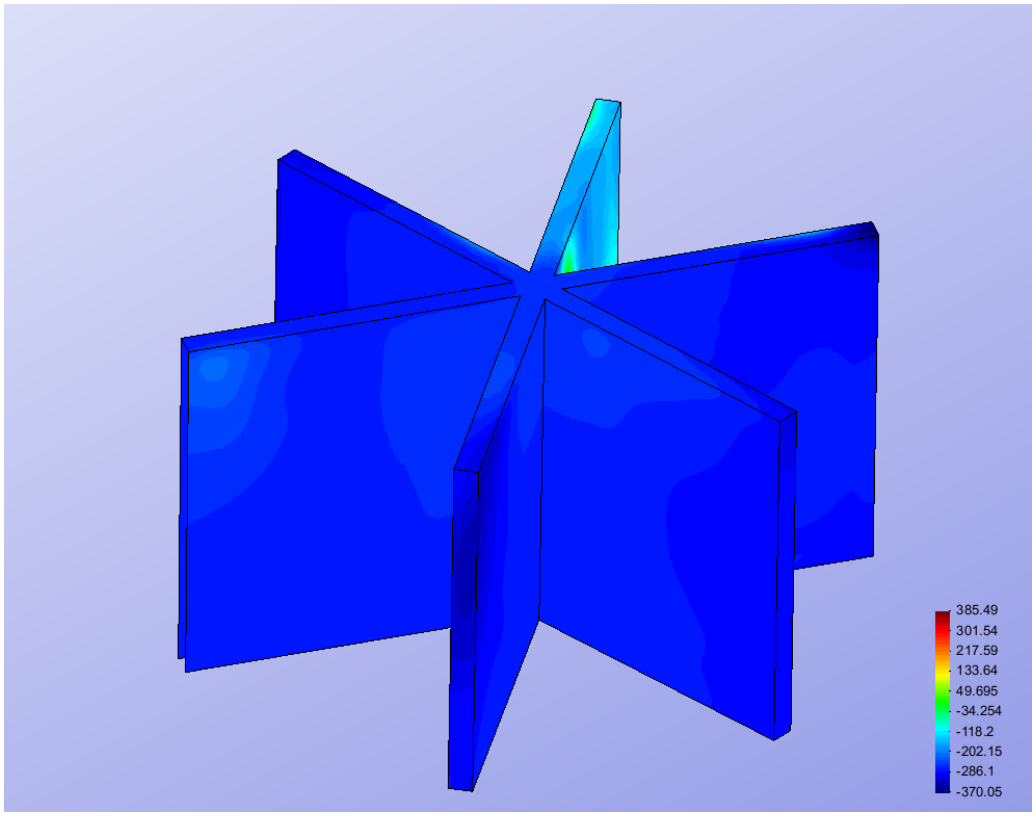


Figure 7-93 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

Pression calculée à V = 30 km/h

Vitesse du vent : 30 km/h = 8,3 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-D_02

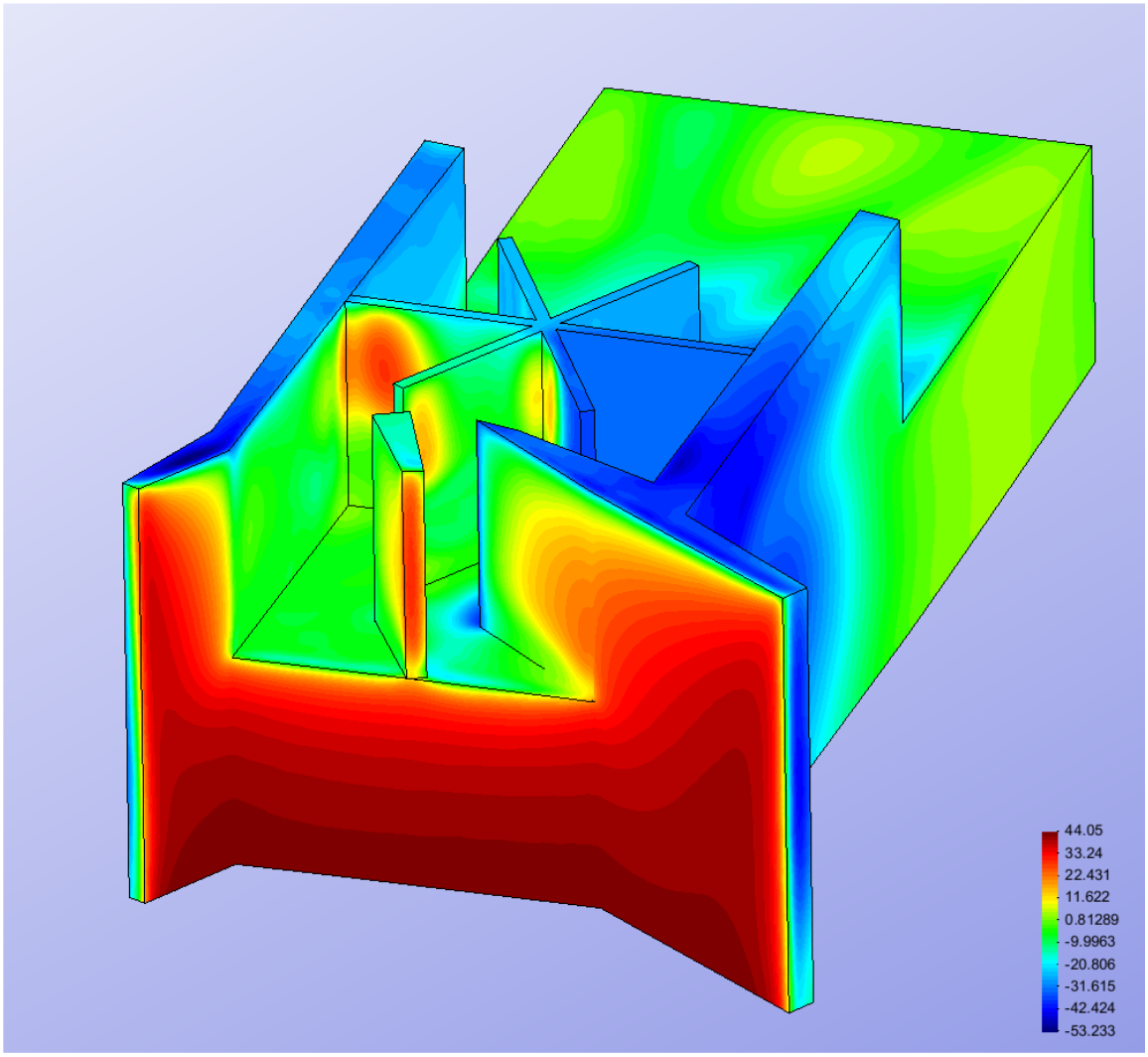


Figure 7-94 : Vue isométrique (1) d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

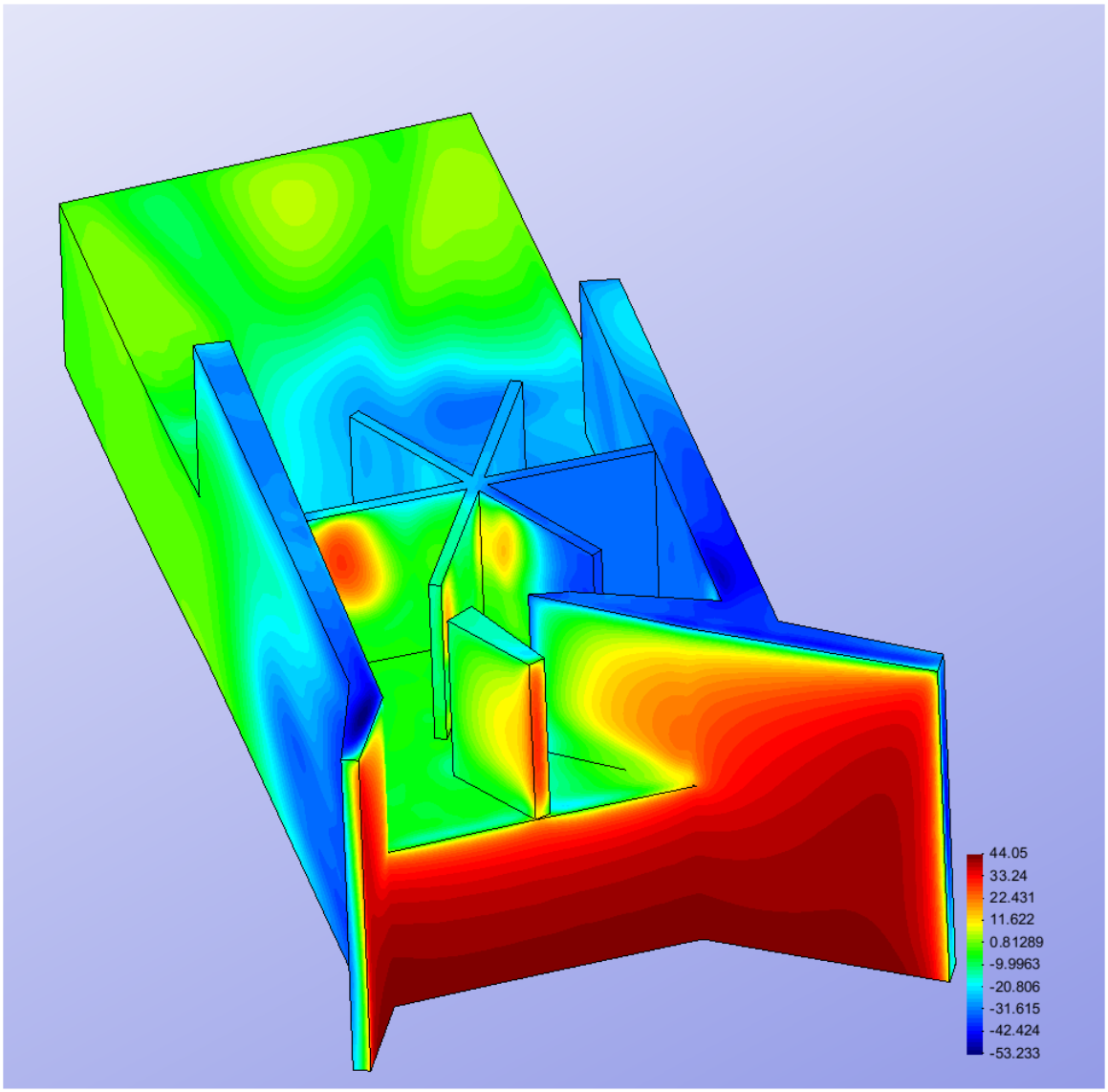


Figure 7-95 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

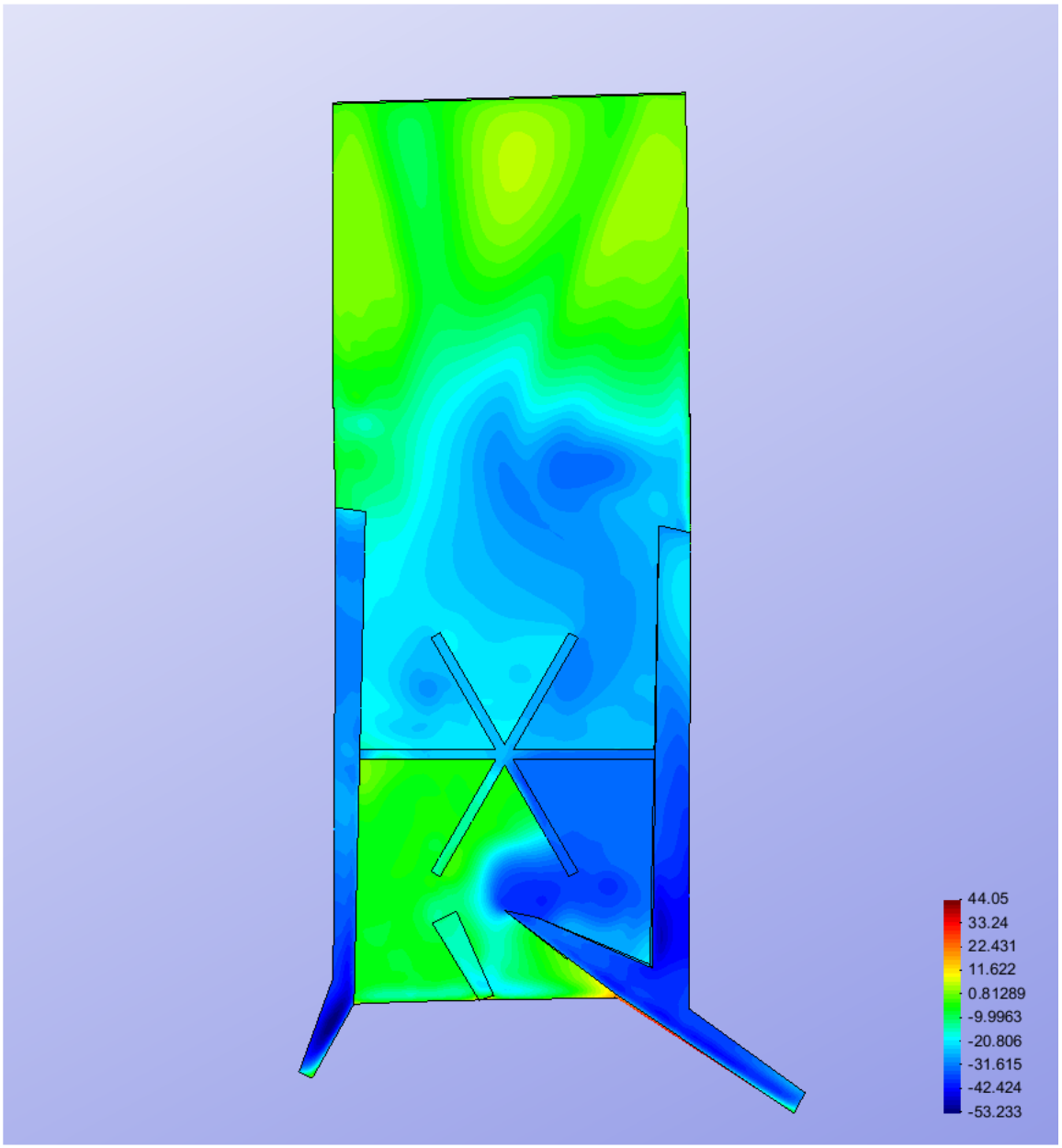


Figure 7-96 : Vue de dessus d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

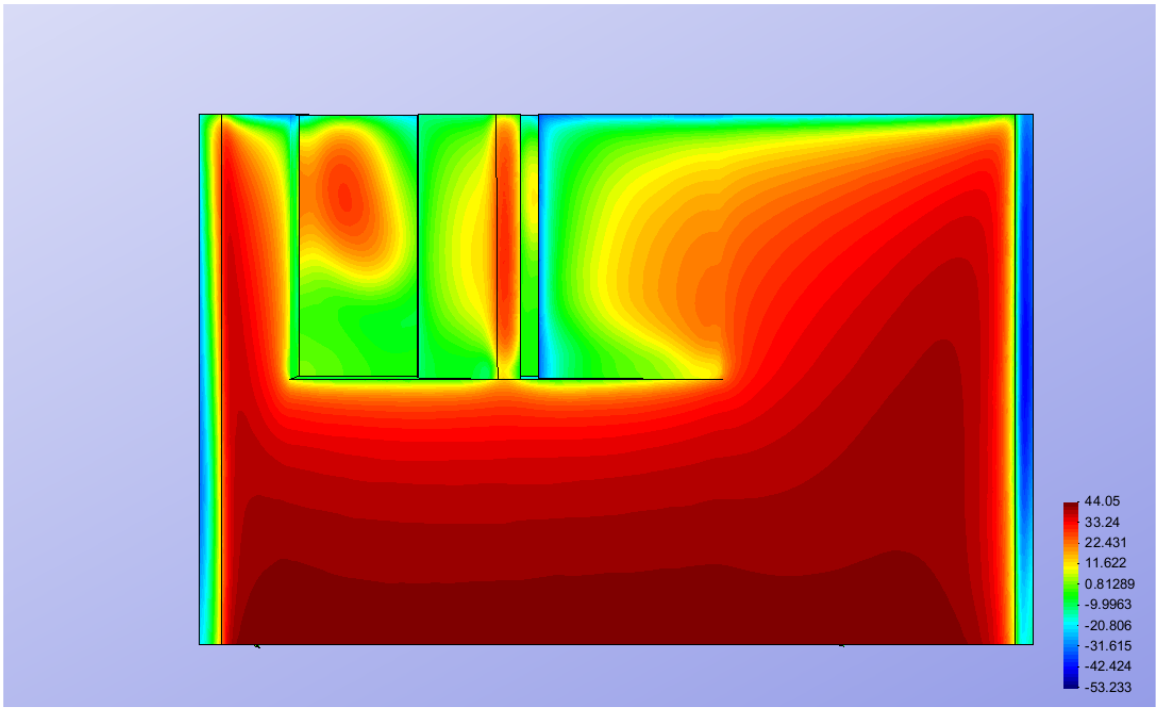


Figure 7-97 : Vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

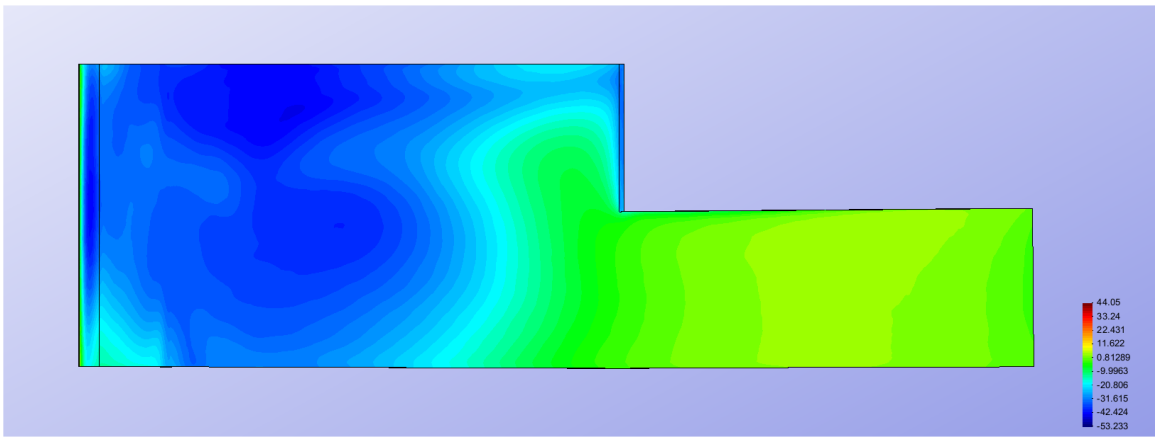


Figure 7-98 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de gauche à droite.

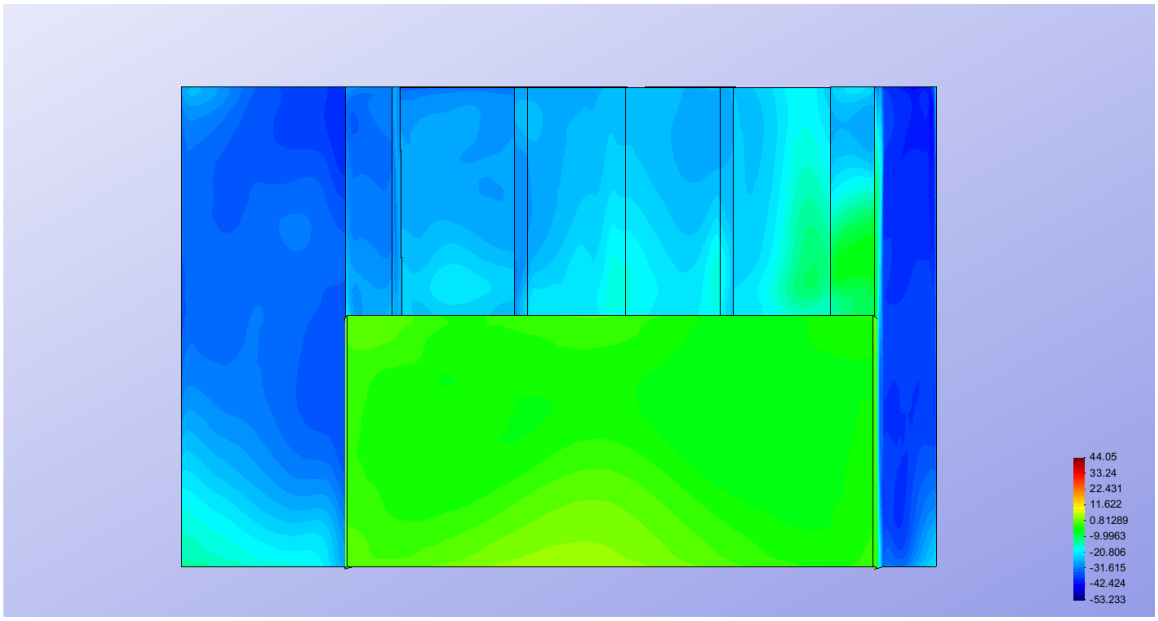


Figure 7-99 : Vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

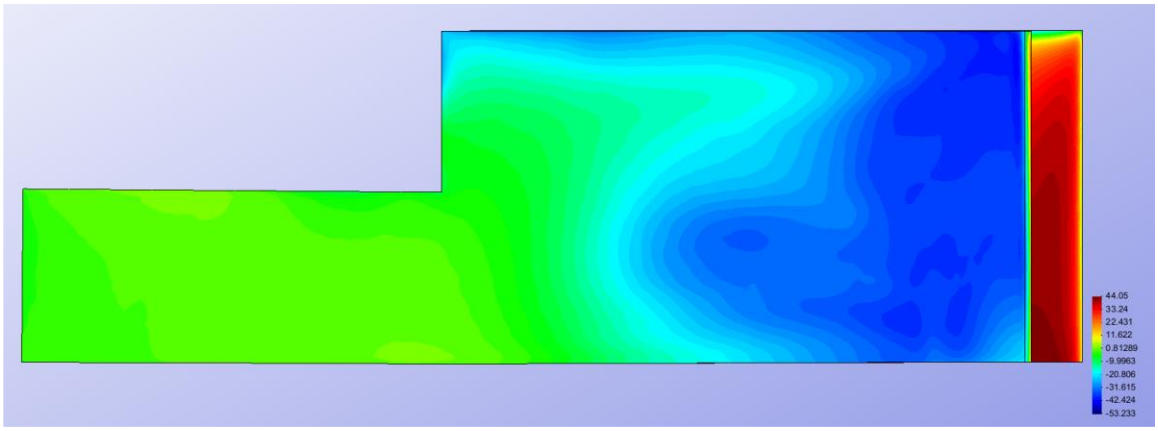


Figure 7-100 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de droite à gauche.

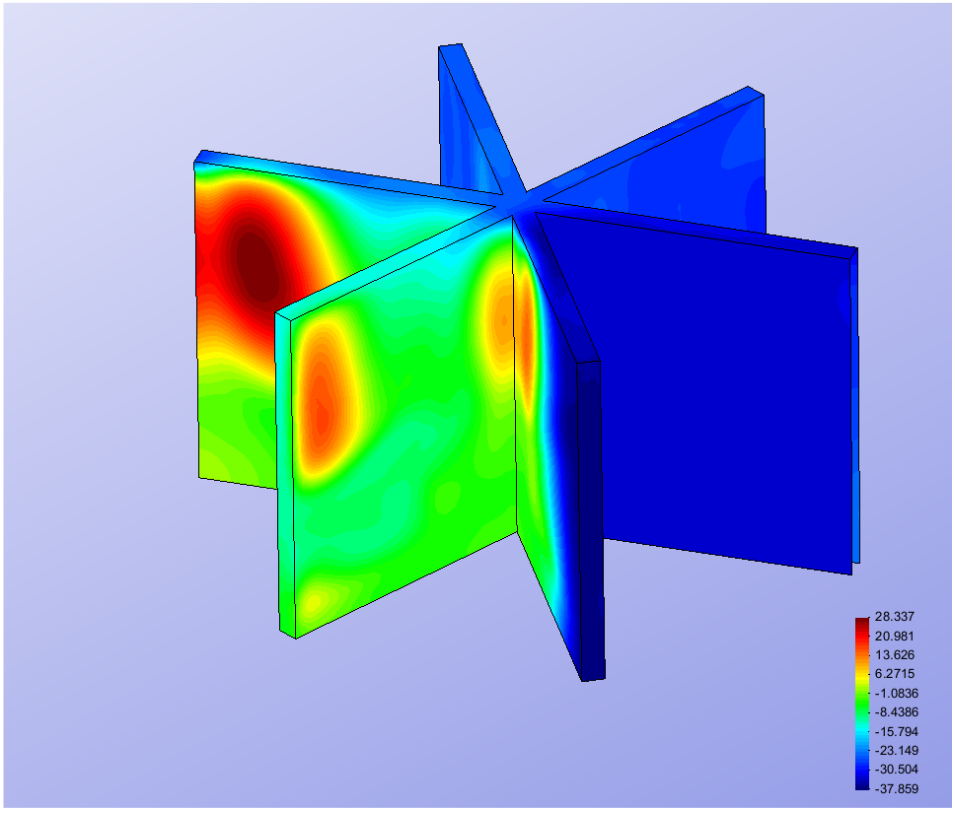


Figure 7-101 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

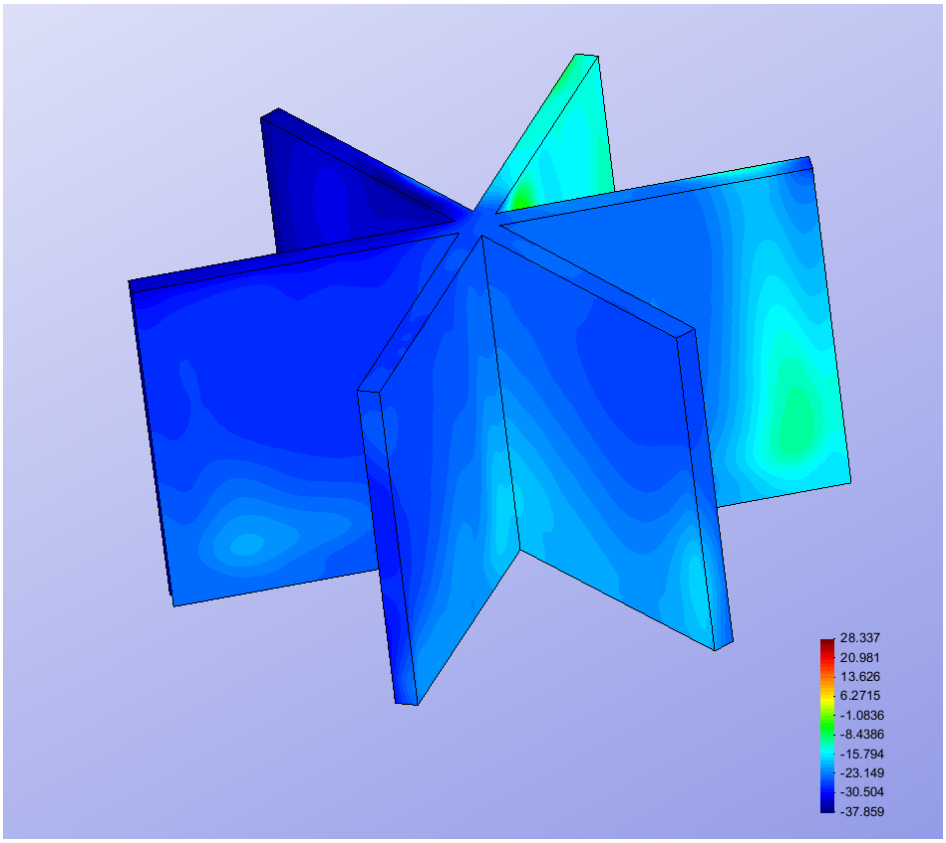


Figure 7-102 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

Pression calculée à V = 14 km/h

Vitesse du vent: 14 km/h = 3,9 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-D_01

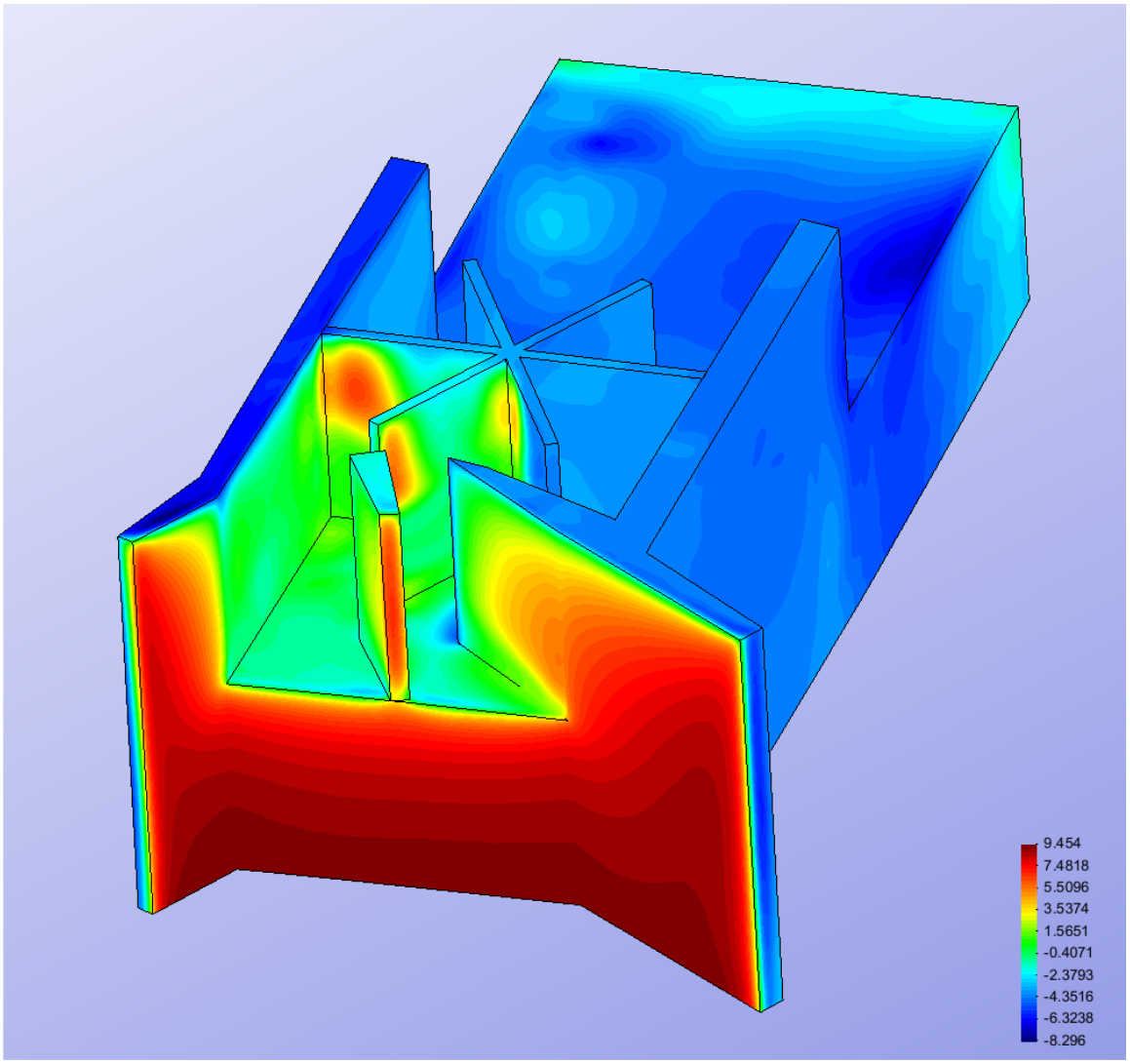


Figure 7-103 : Vue isométrique (1) d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

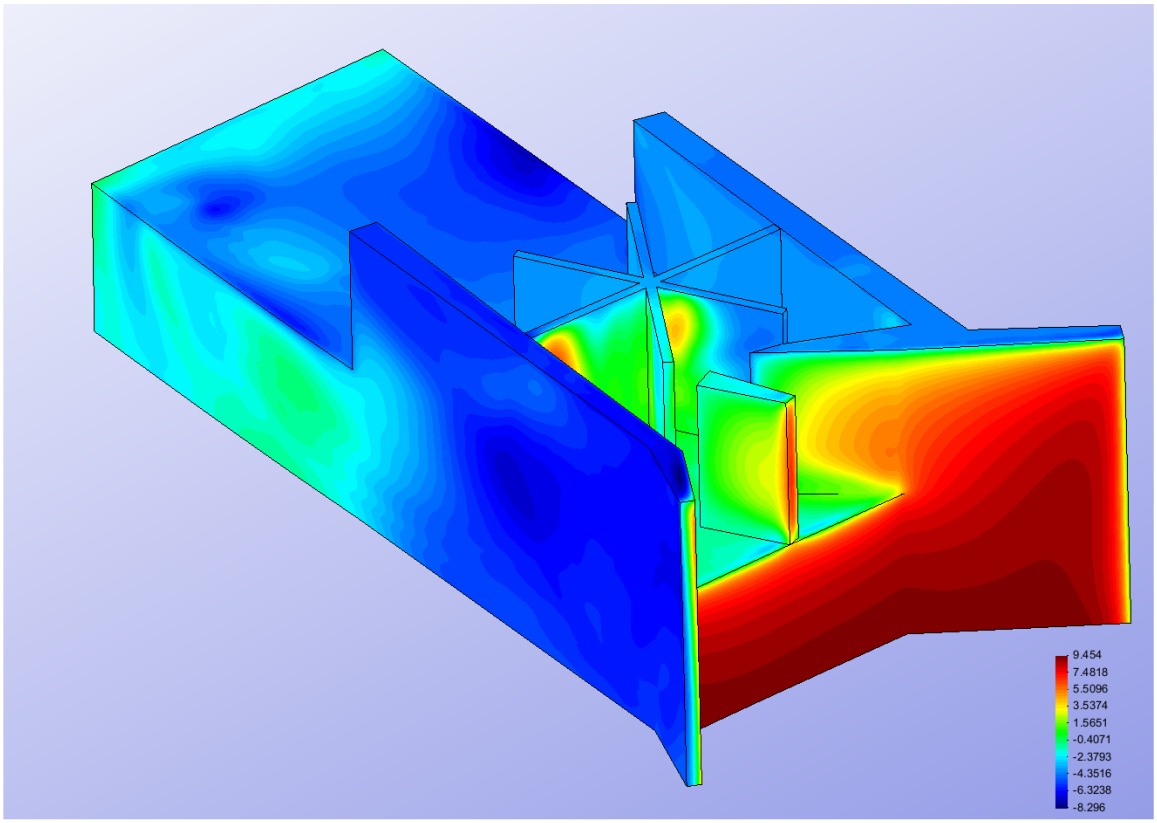


Figure 7-104 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

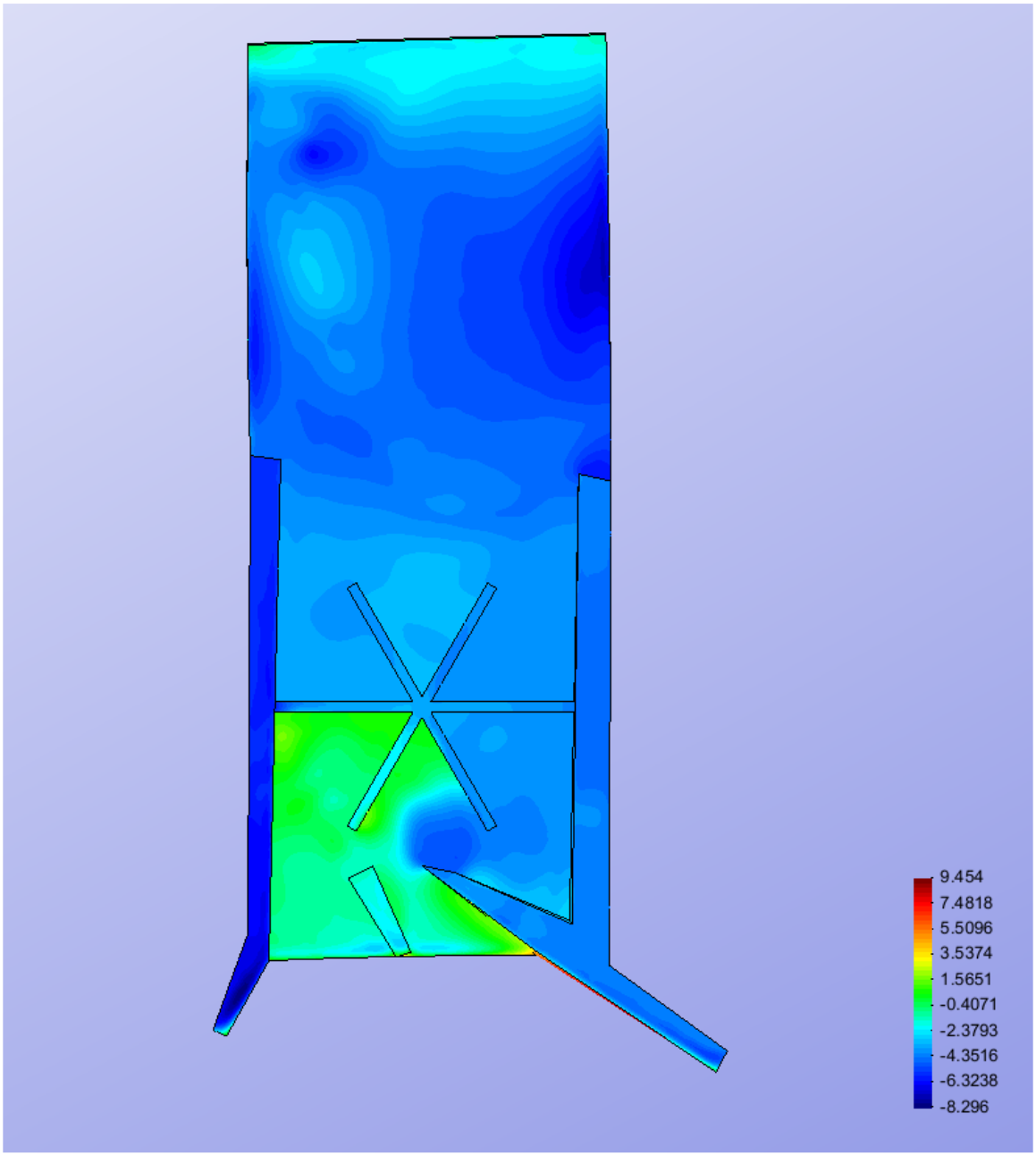


Figure 7-105 : Vue de dessus d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

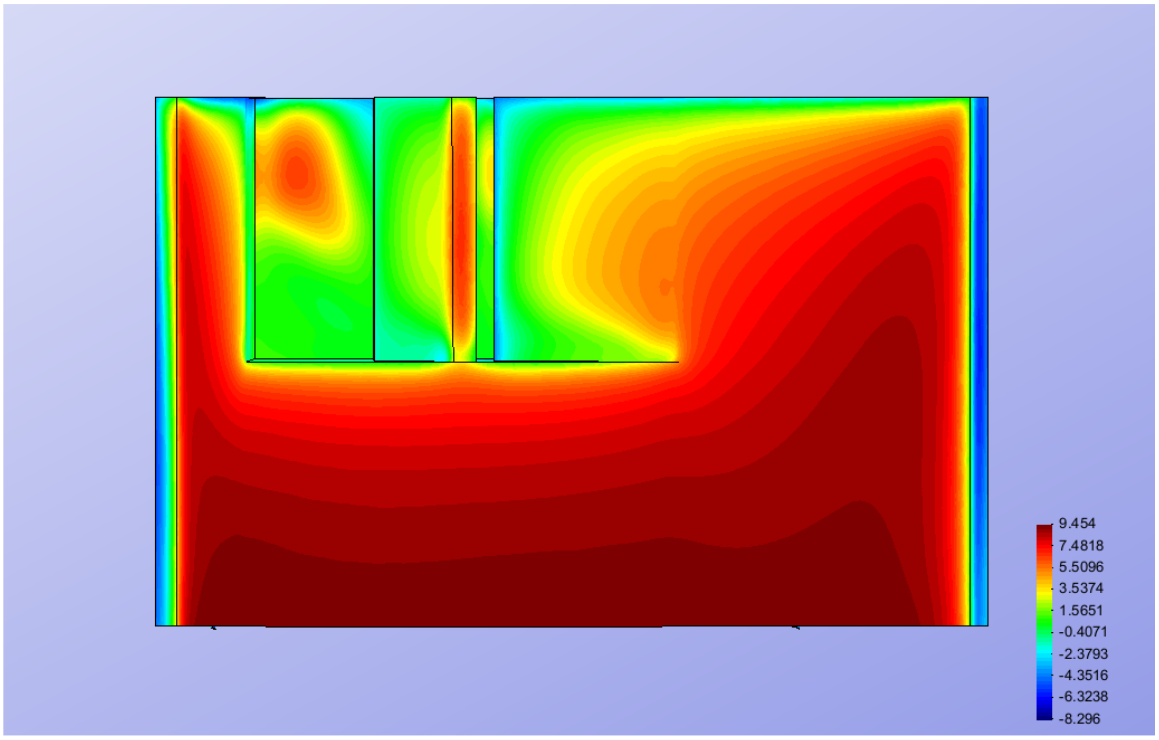


Figure 7-106 : Vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

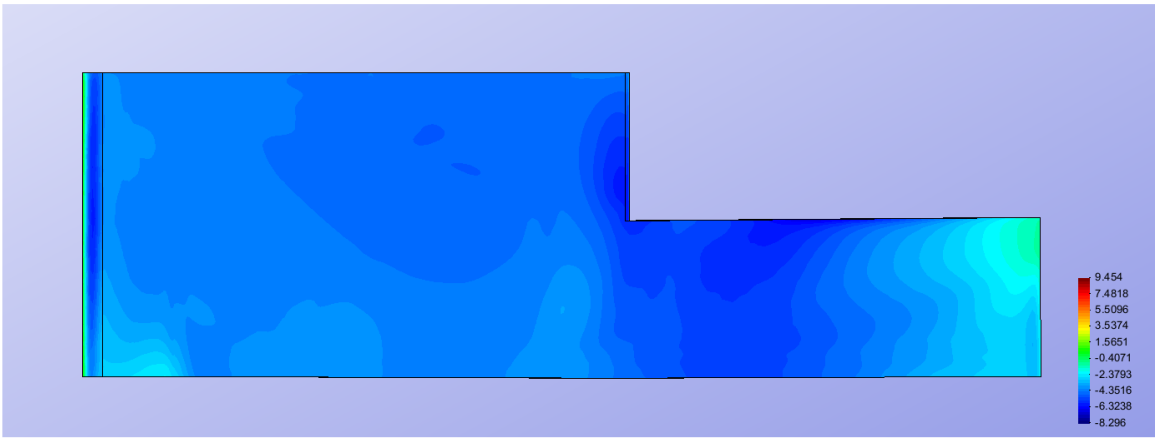


Figure 7-107 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de gauche à droite.

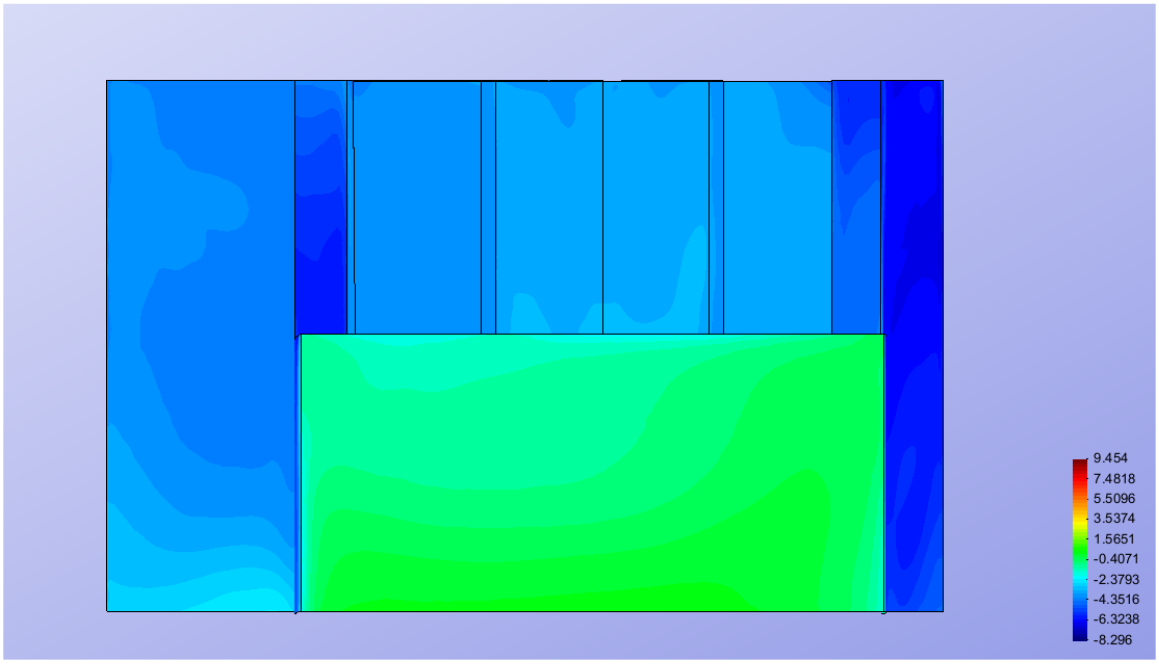


Figure 7-108 : Vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

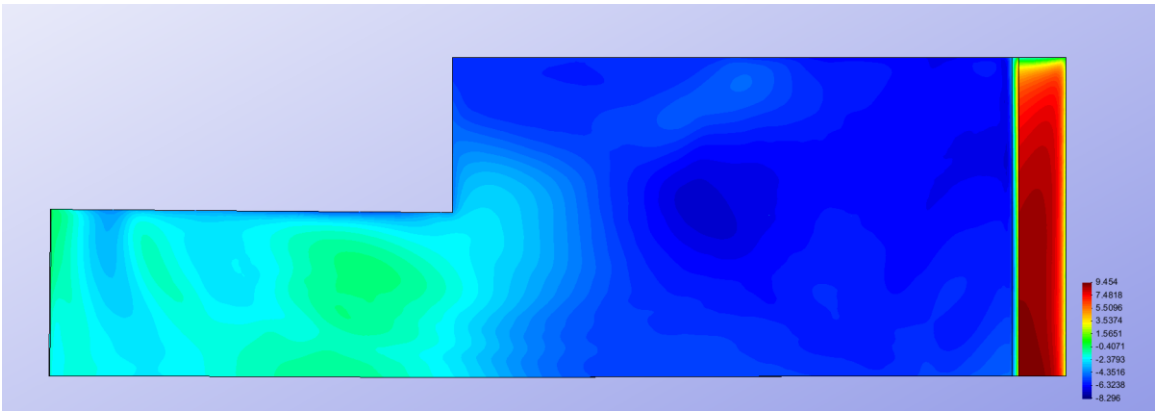


Figure 7-109 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de droite à gauche.

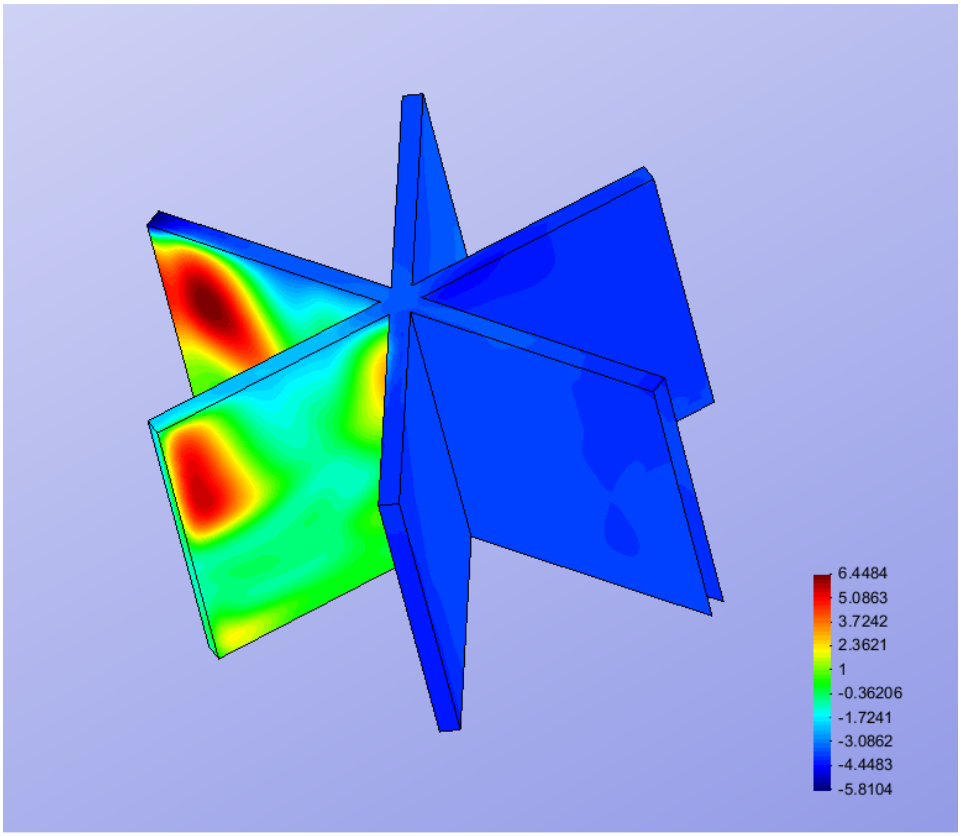


Figure 7-110 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

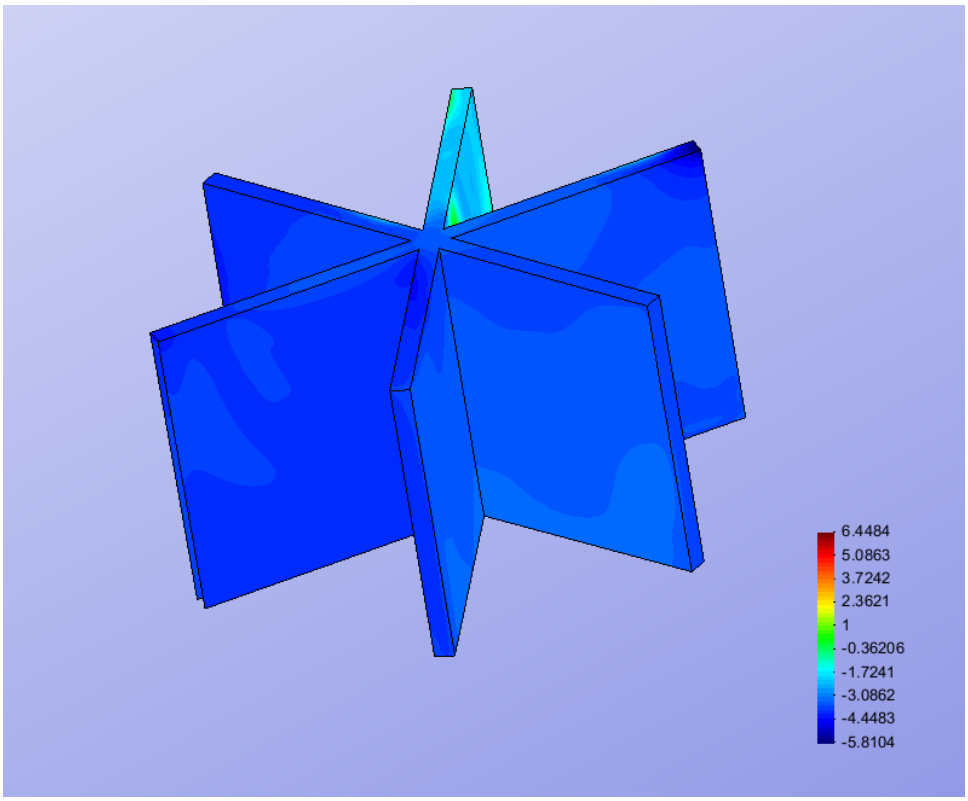


Figure 7-111 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames allongées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées

Pression calculée à V = 110 km/h

Vitesse du vent : 110 km/h = 30,6 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-E_03

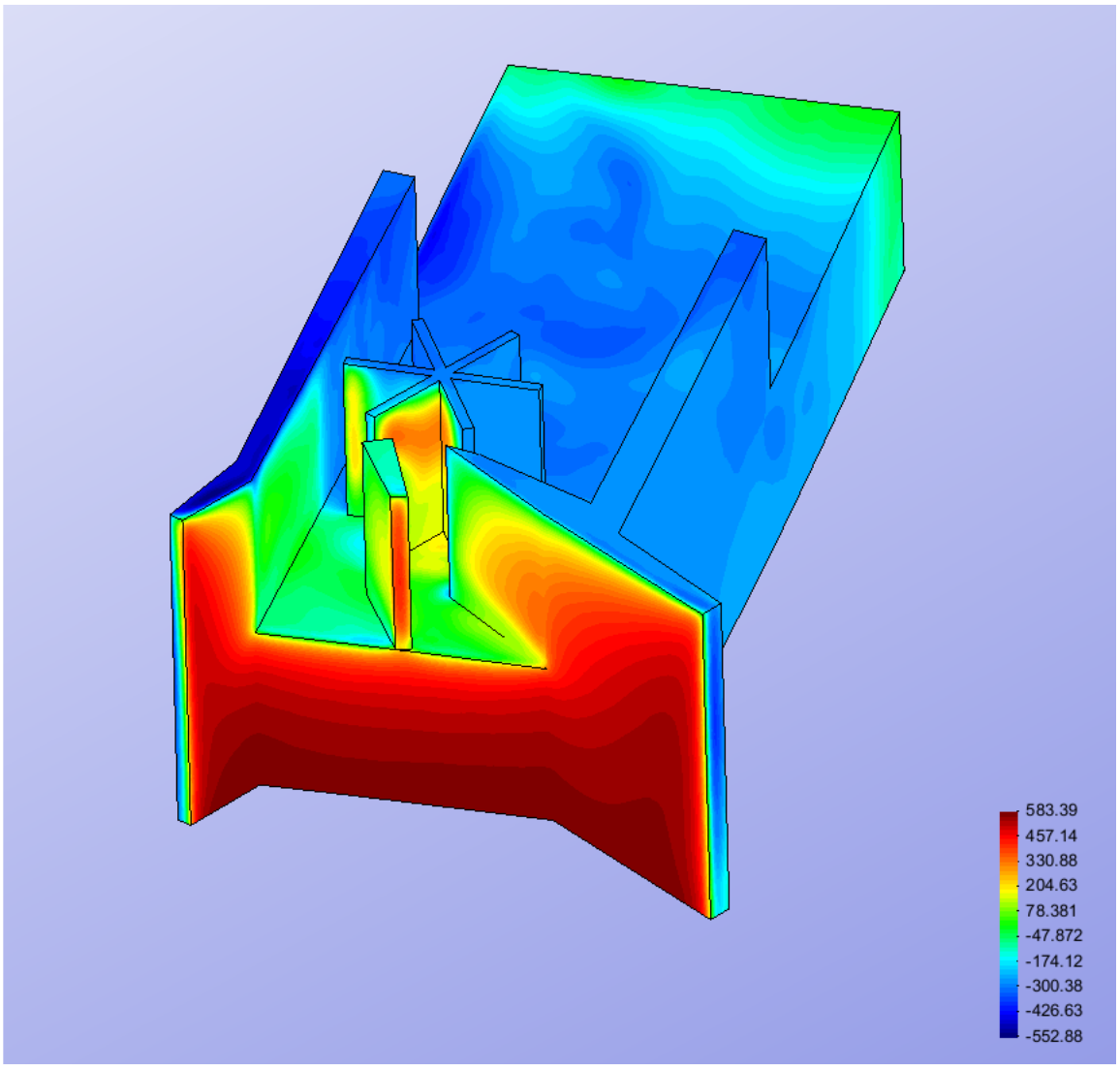


Figure 7-112 : Vue isométrique (1) d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

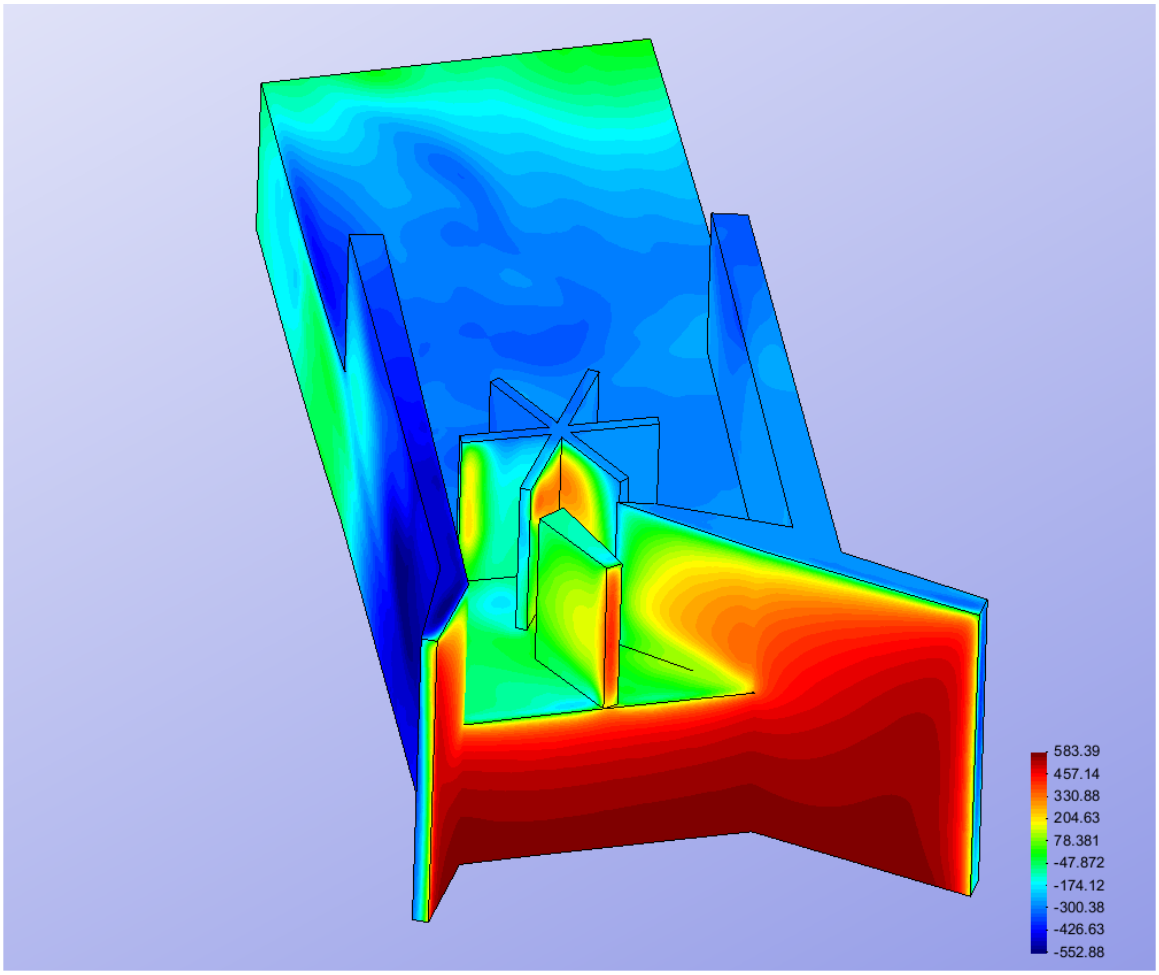


Figure 7-113 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar -Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

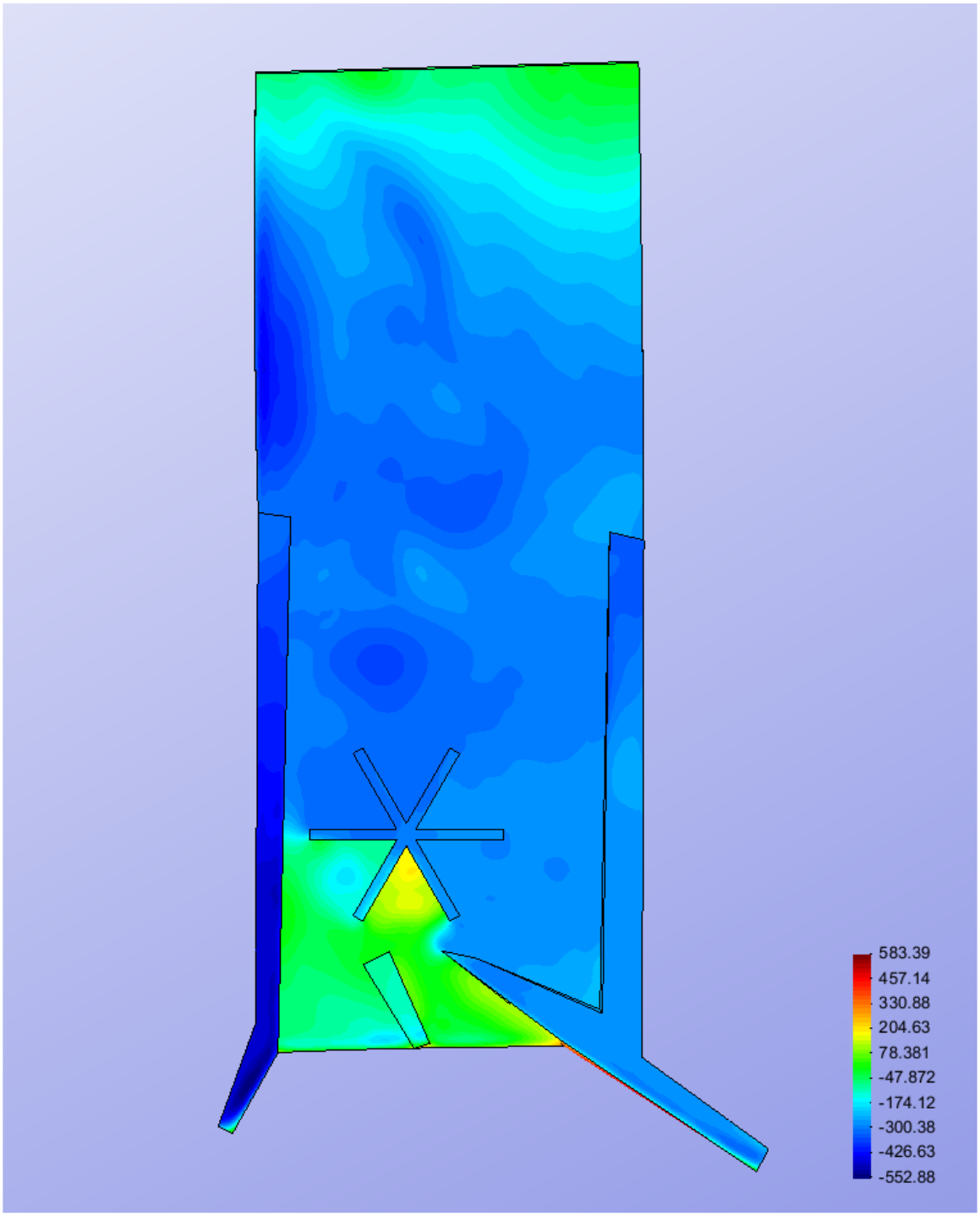


Figure 7-114 : Vue de dessus d'As- Hozdar -Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

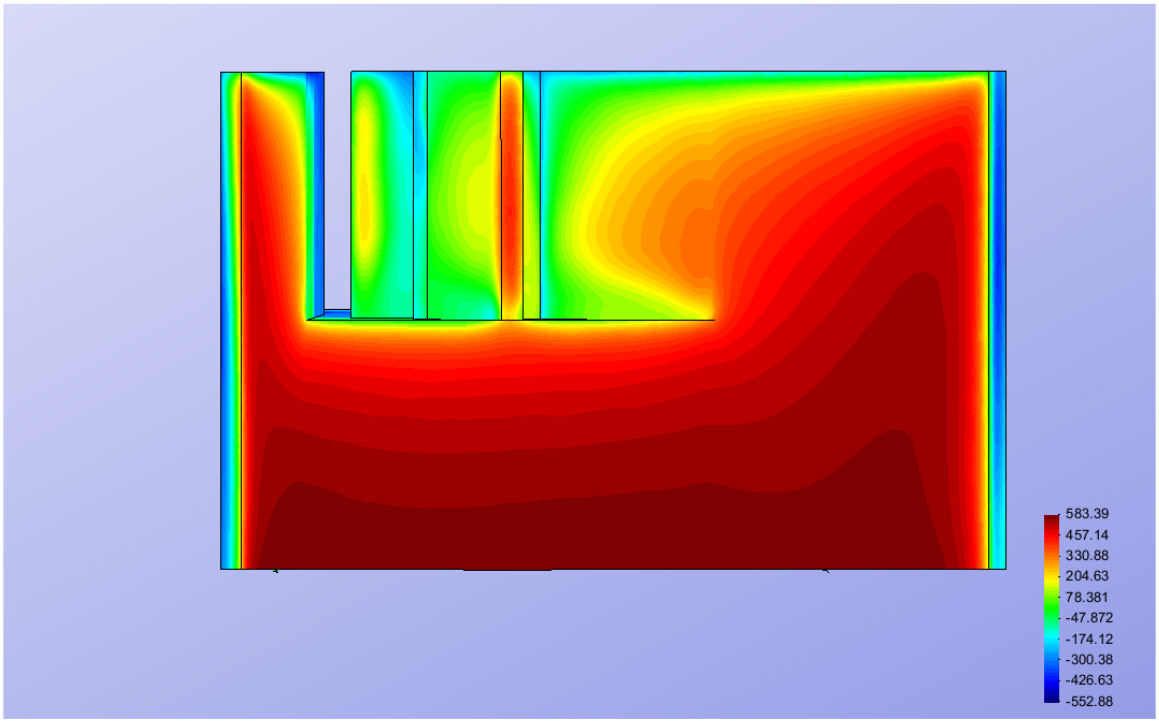


Figure 7-115 : Vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

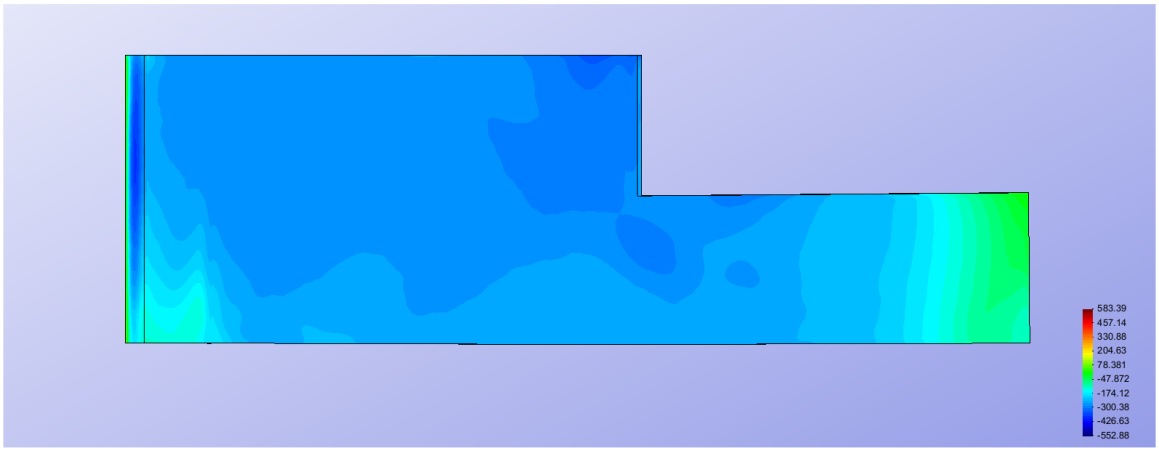


Figure 7-116 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de gauche à droite.

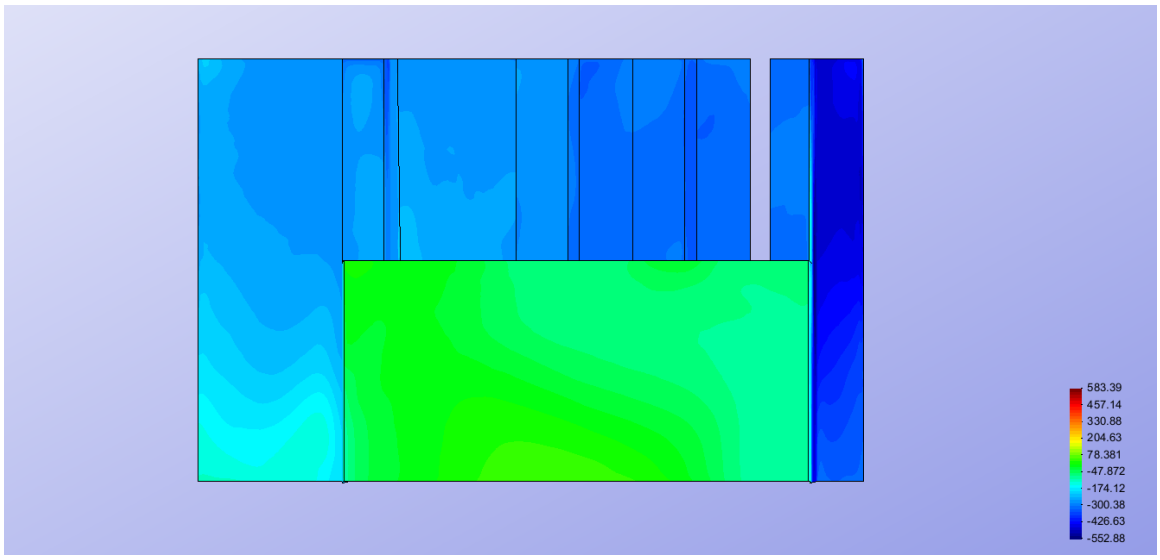


Figure 7-117 : Vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

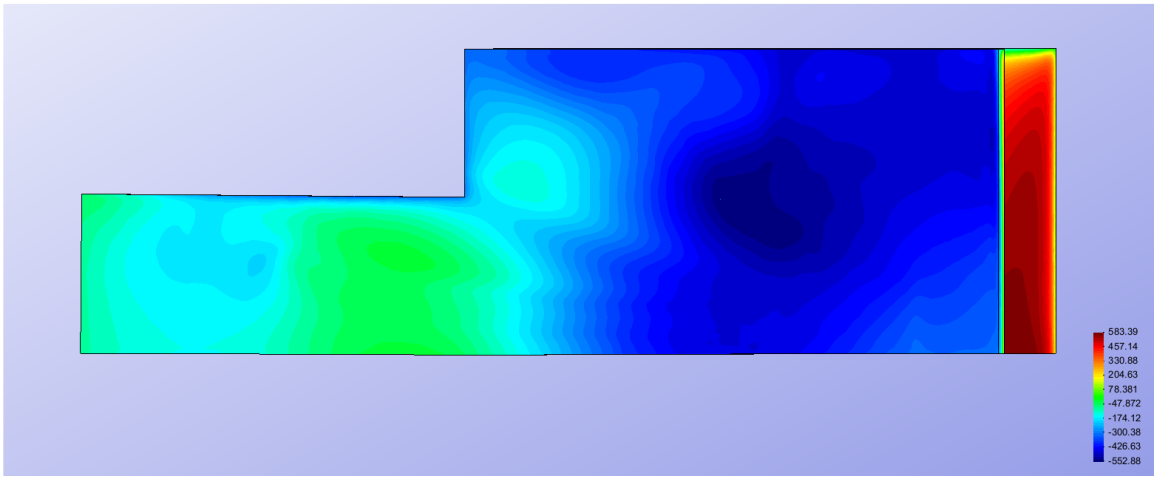


Figure 7-118 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s soufflant de droite à gauche.

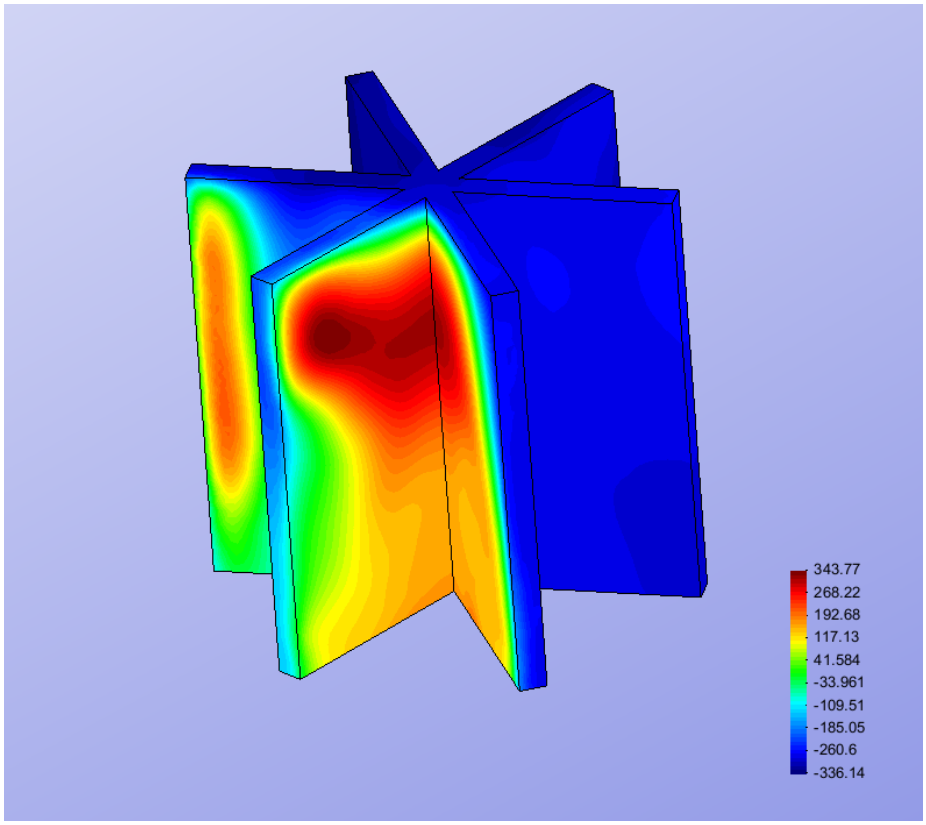


Figure 7-119 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Hozdar -Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

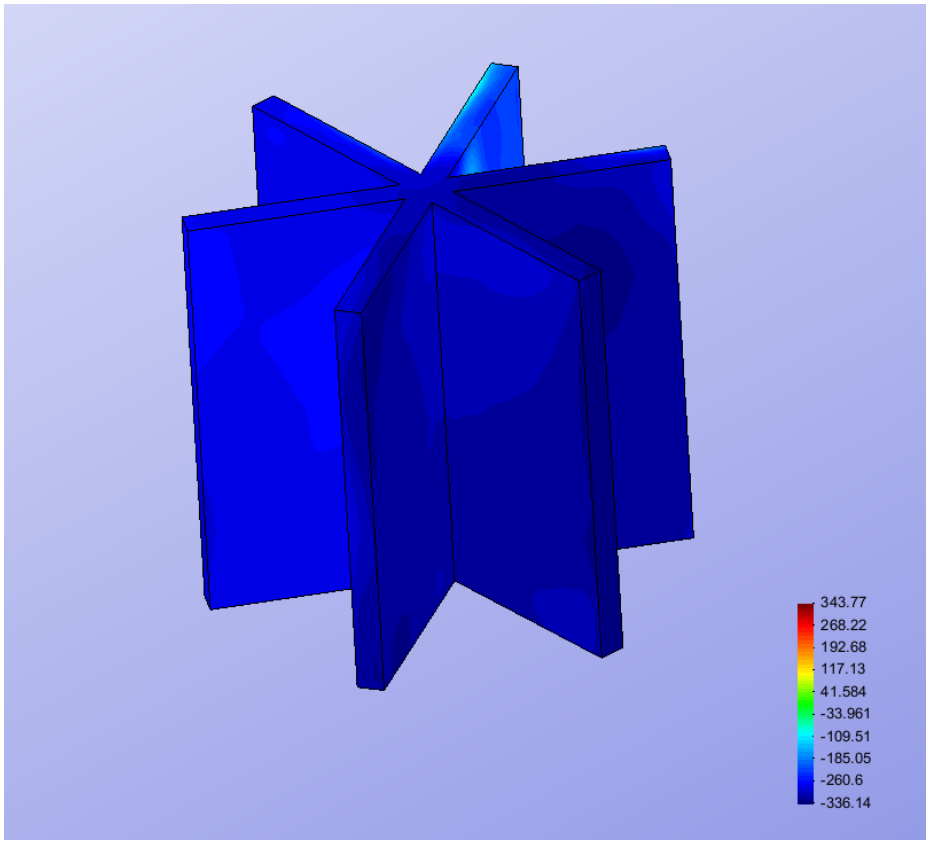


Figure 7-120 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 30,6 m/s.

Pression calculée à V = 30 km/h

Vitesse du vent : 30 km/h = 8,3 m/s

Code de simulation : DIB-064-DD-CF151-E_02

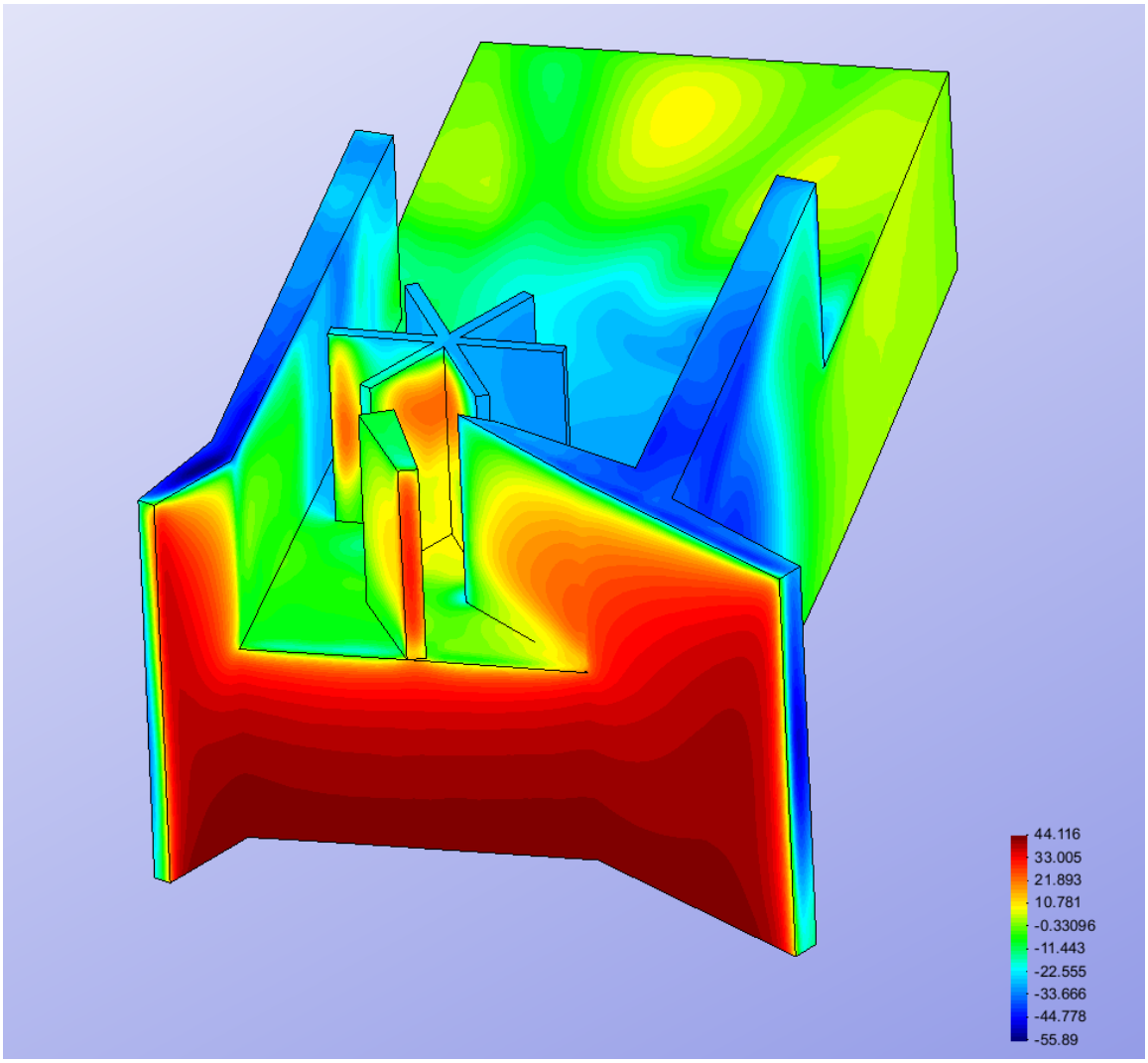


Figure 7-121 : Vue isométrique (1) d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

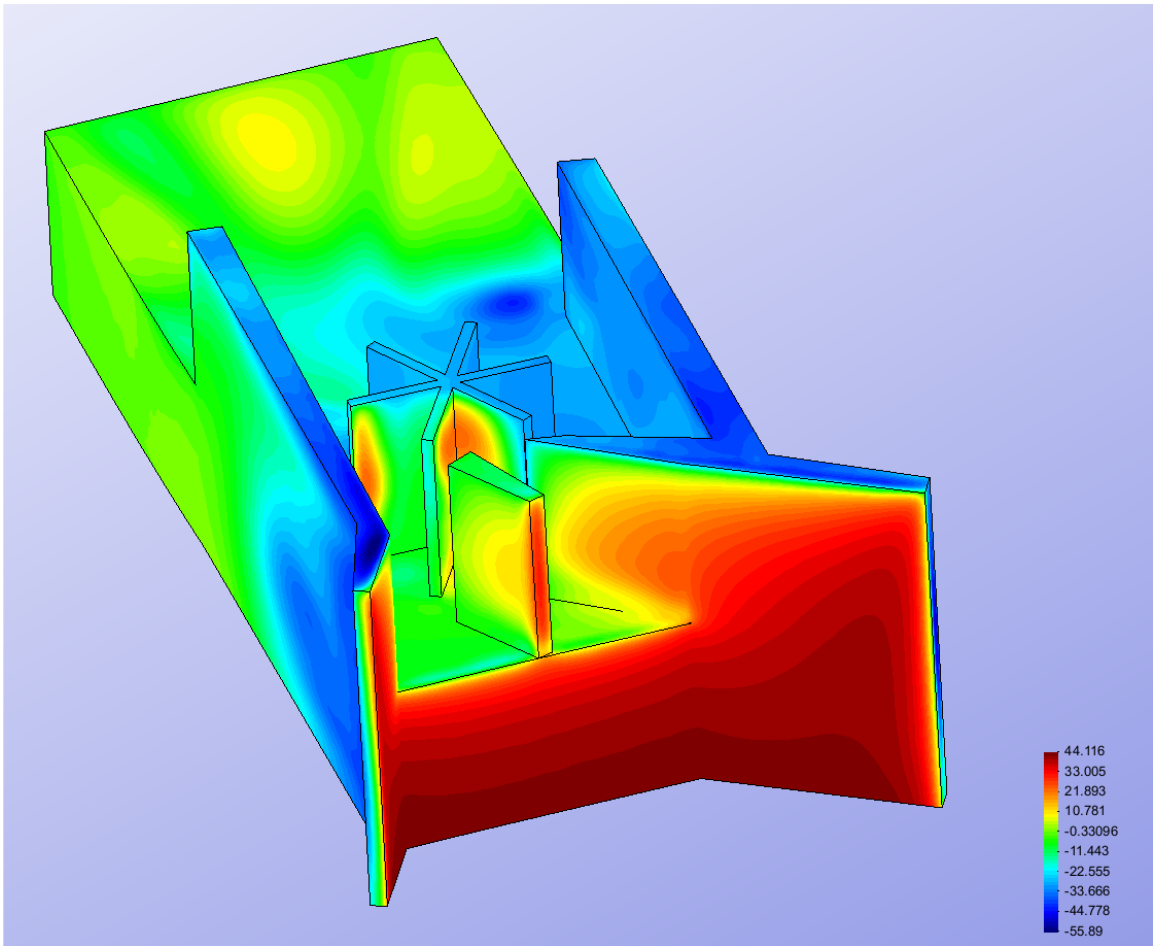


Figure 7-122 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

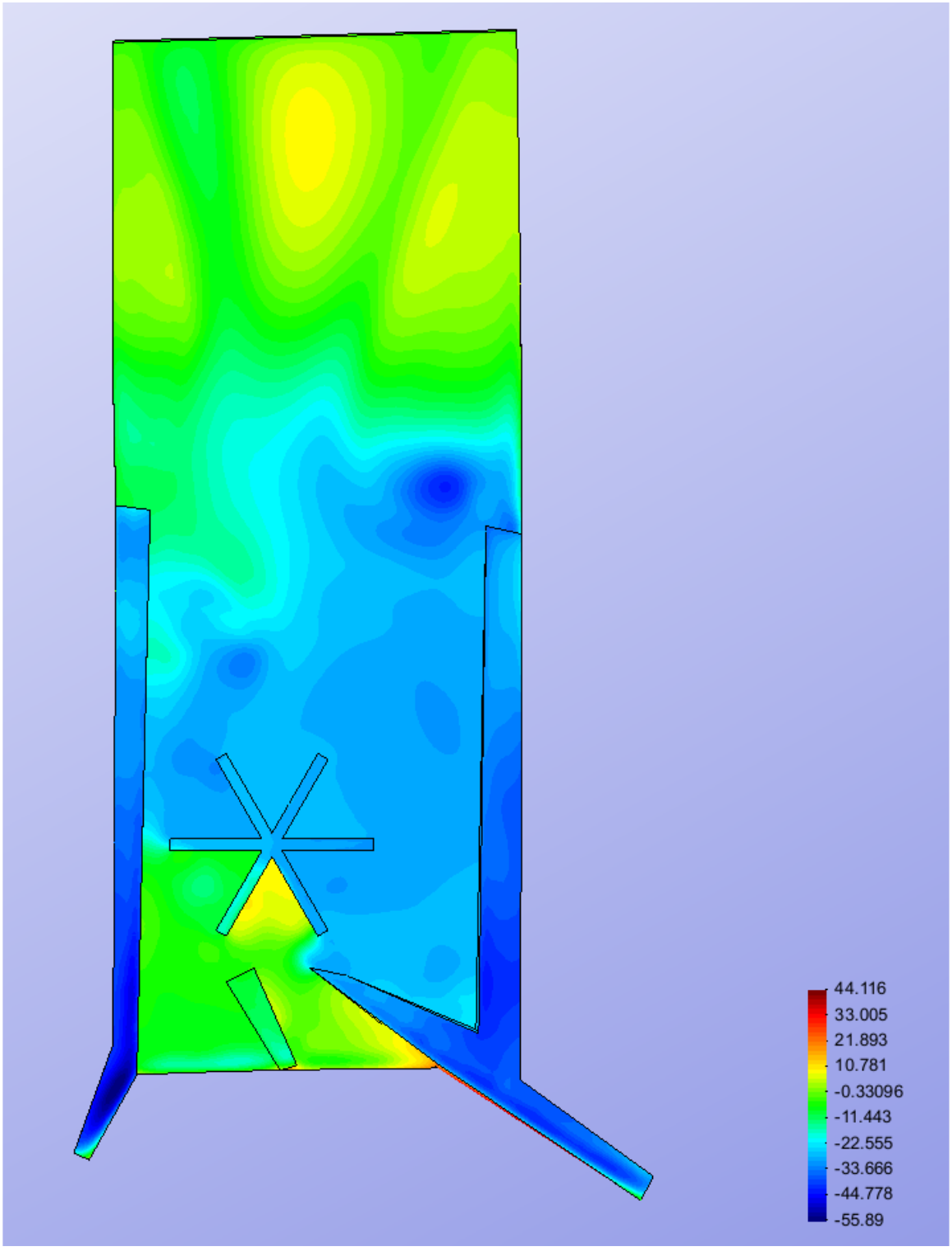


Figure 7-123 : Vue de dessus d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

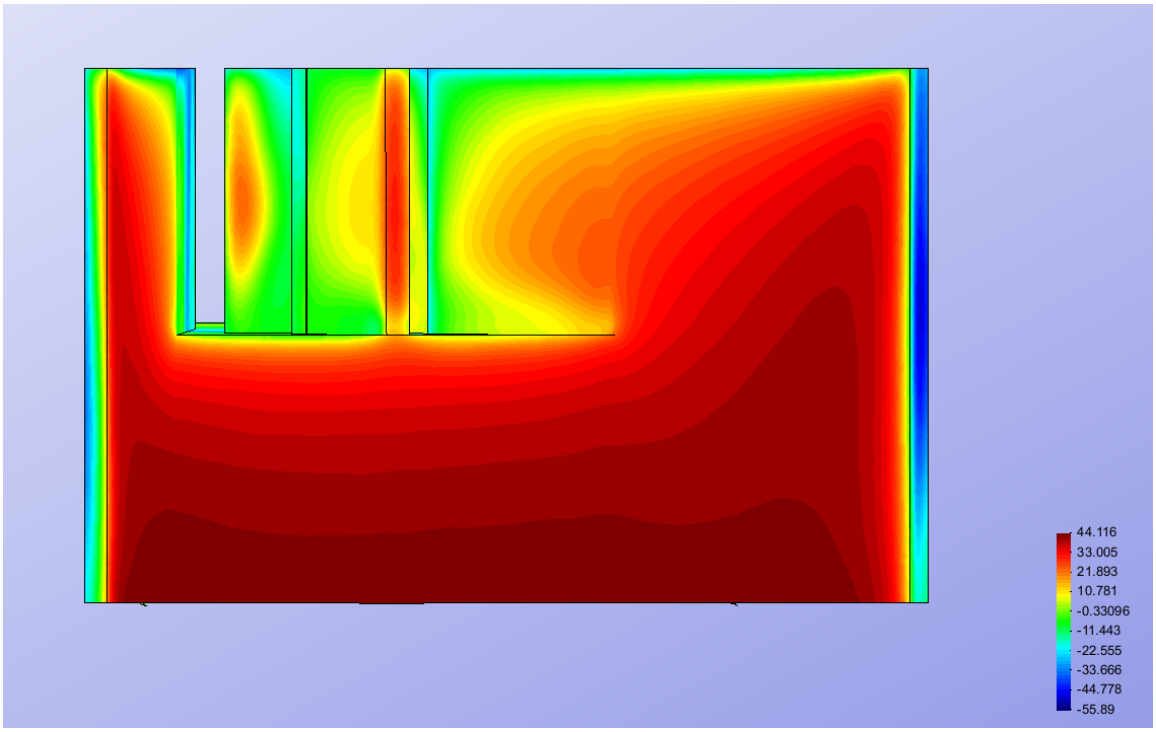


Figure 7-124 : Vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8.3 m/s.

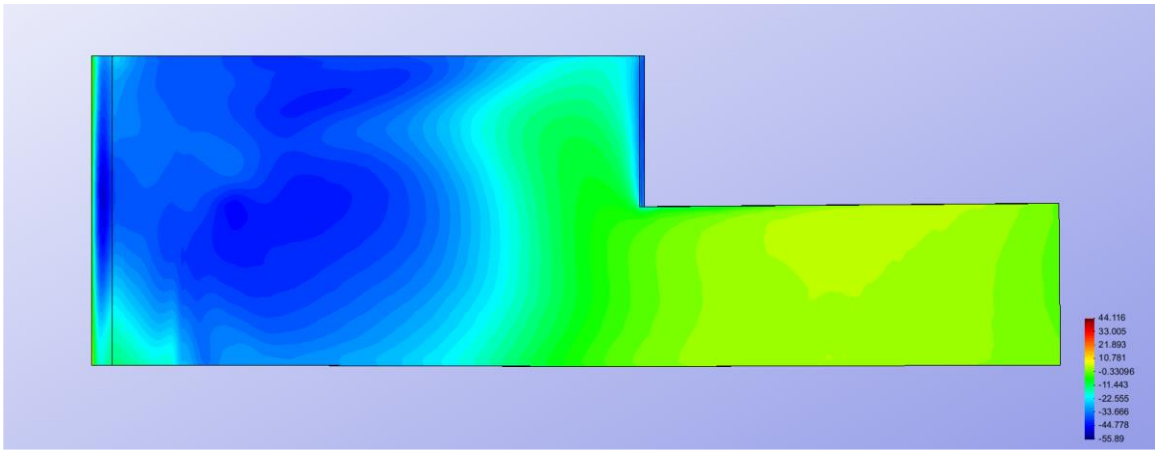


Figure 7-125 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de gauche à droite.

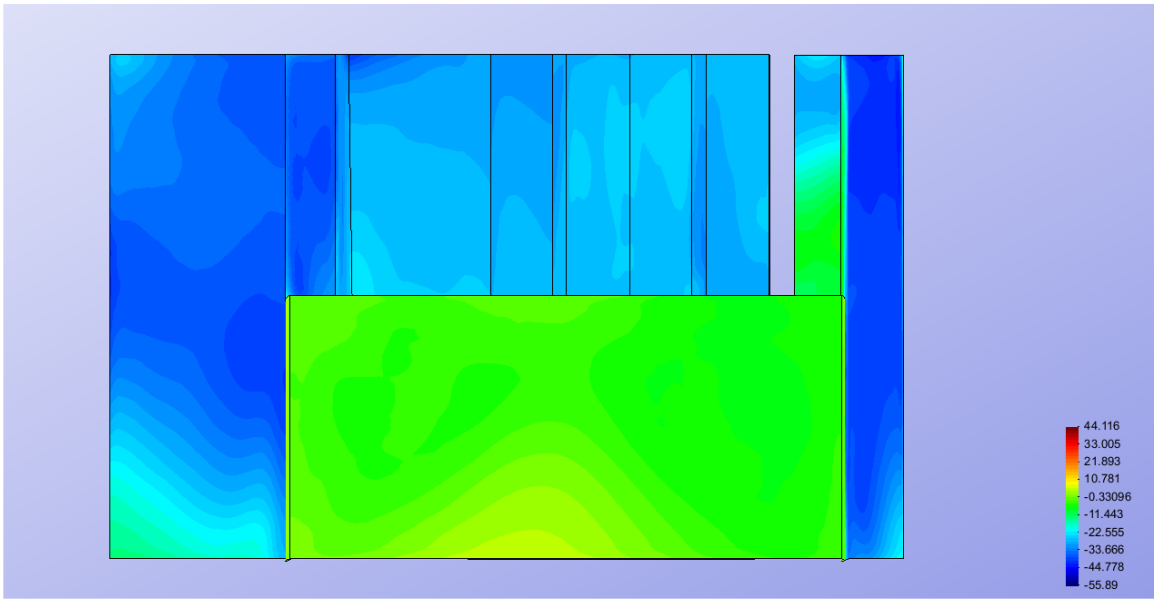


Figure 7-126 : Vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

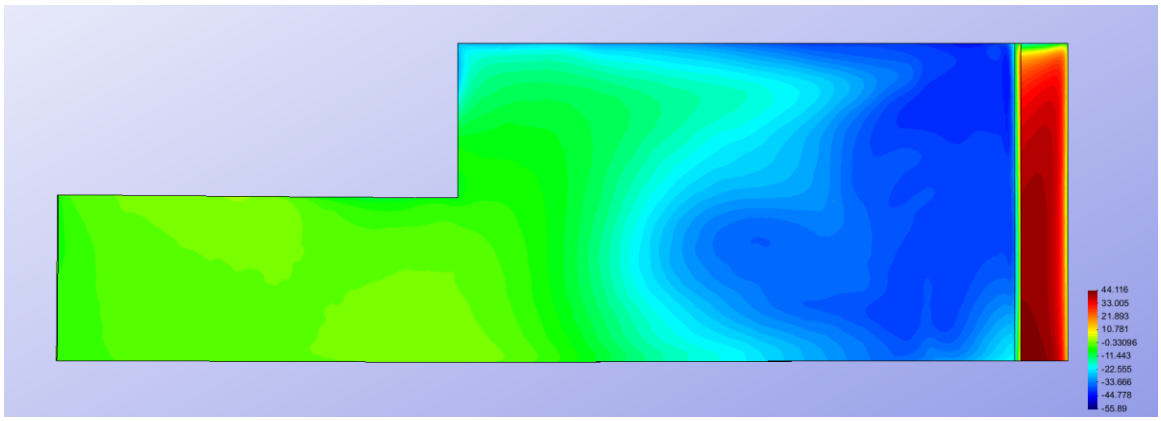


Figure 7-127 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s soufflant de droite à gauche.

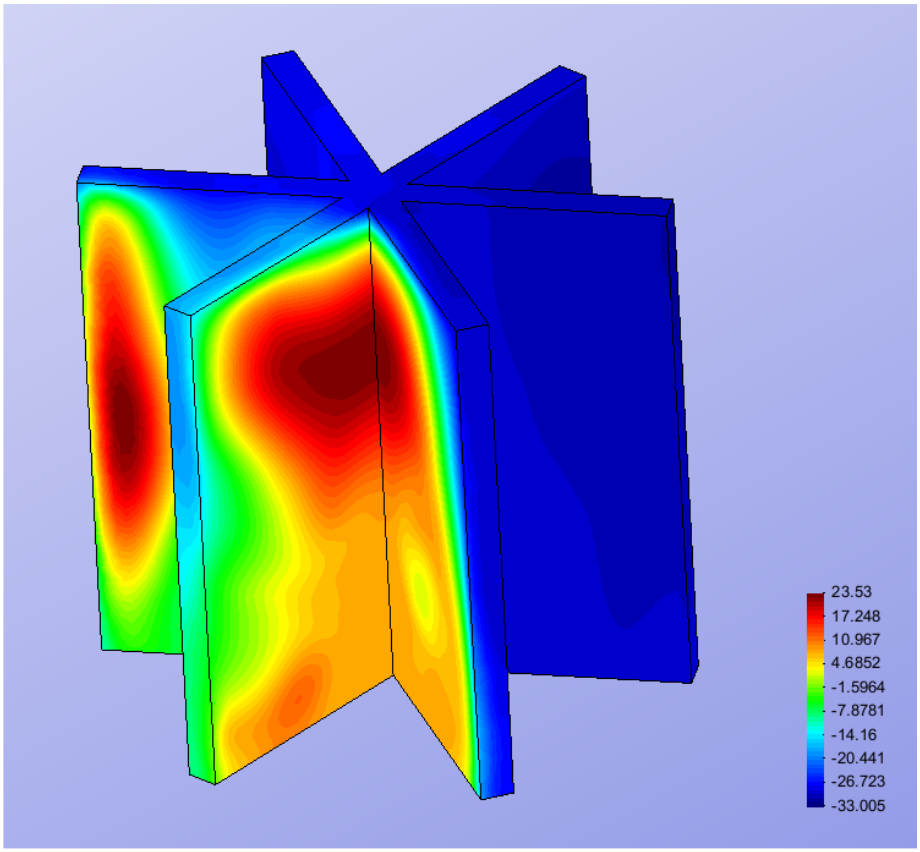


Figure 7-128 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

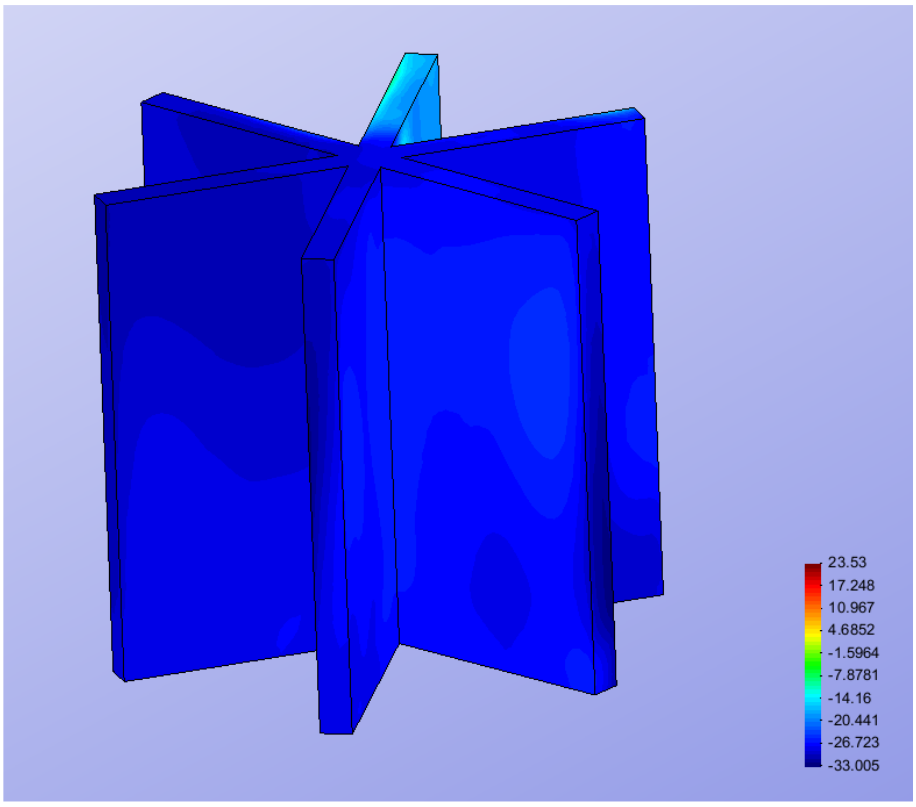


Figure 7-129 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Hozdar -Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 8,3 m/s.

Pression calculée à V = 14 km/h

Vitesse du vent : 14 km/h = 3,9 m/s

Code de simulation: DIB-064-DD-CF151-F_01

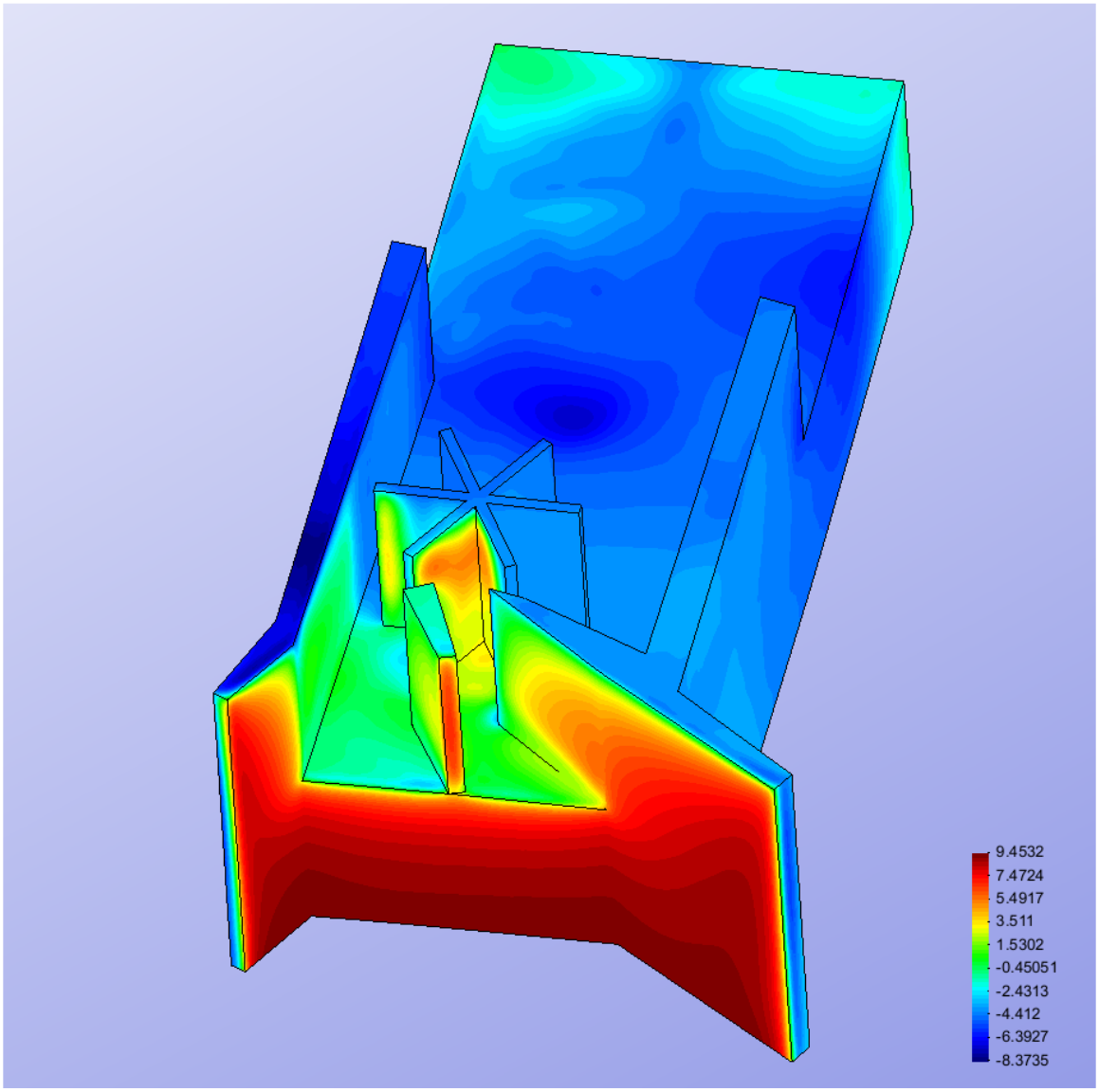


Figure 7-130 : Vue isométrique (1) d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

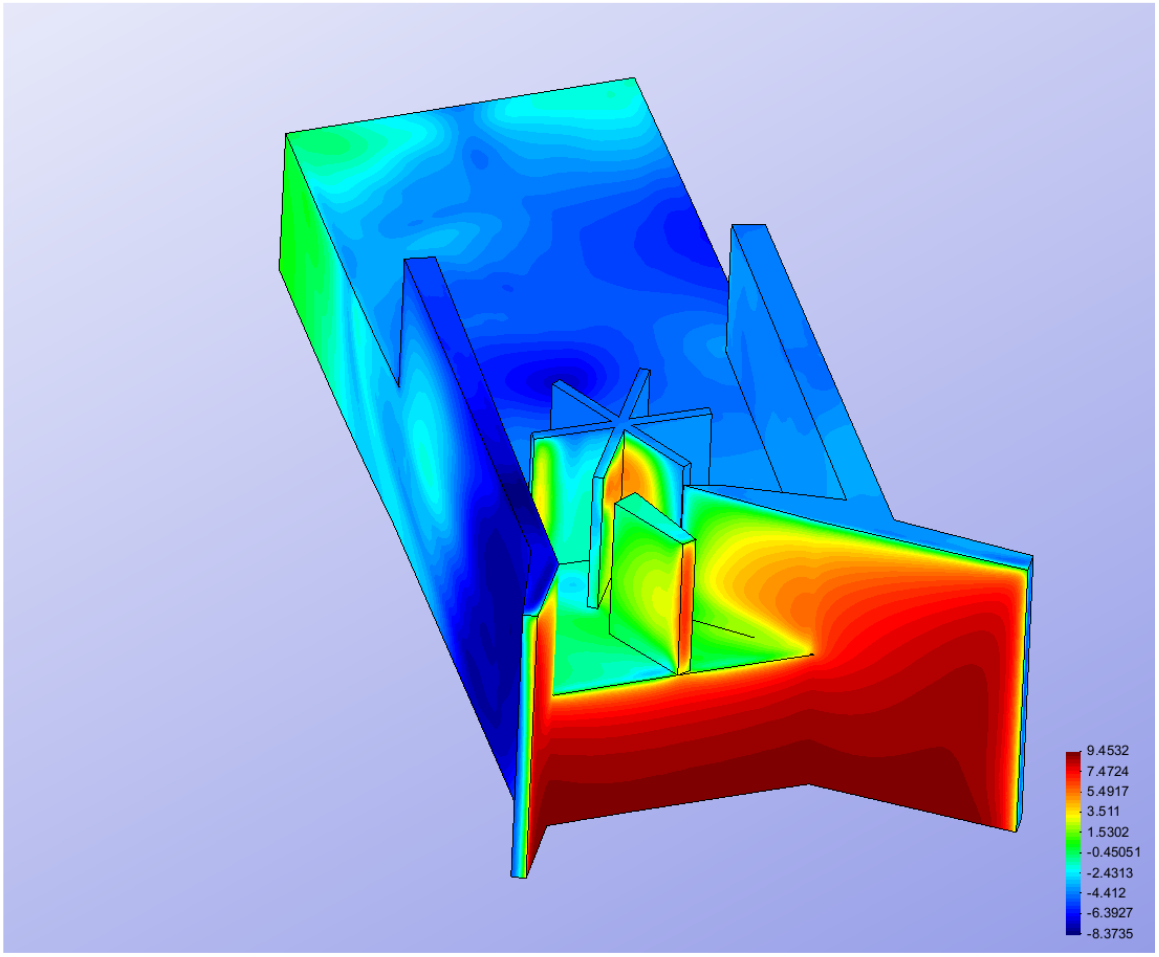


Figure 7-131 : Vue isométrique (2) d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

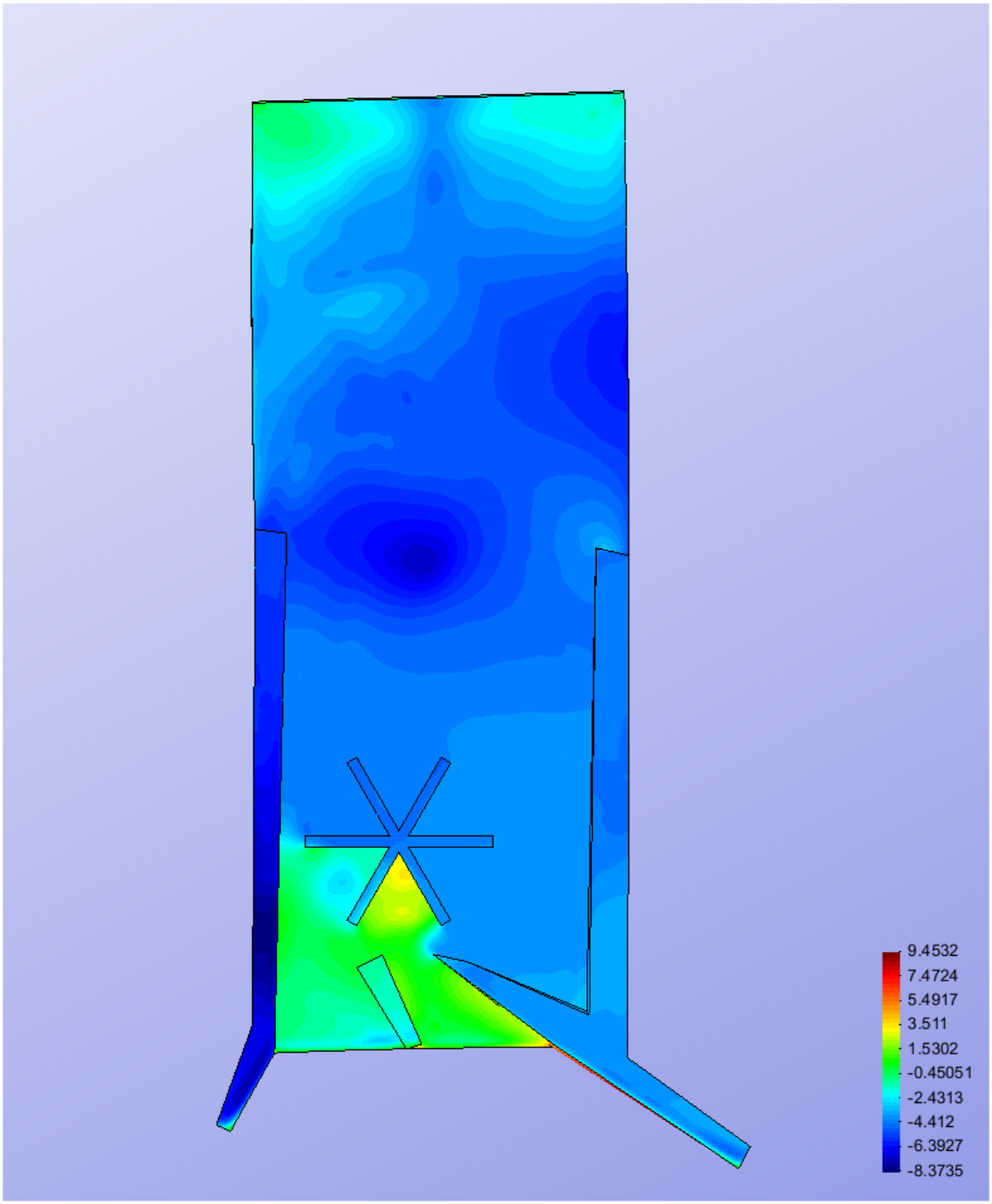


Figure 7-132 : Vue de dessus d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

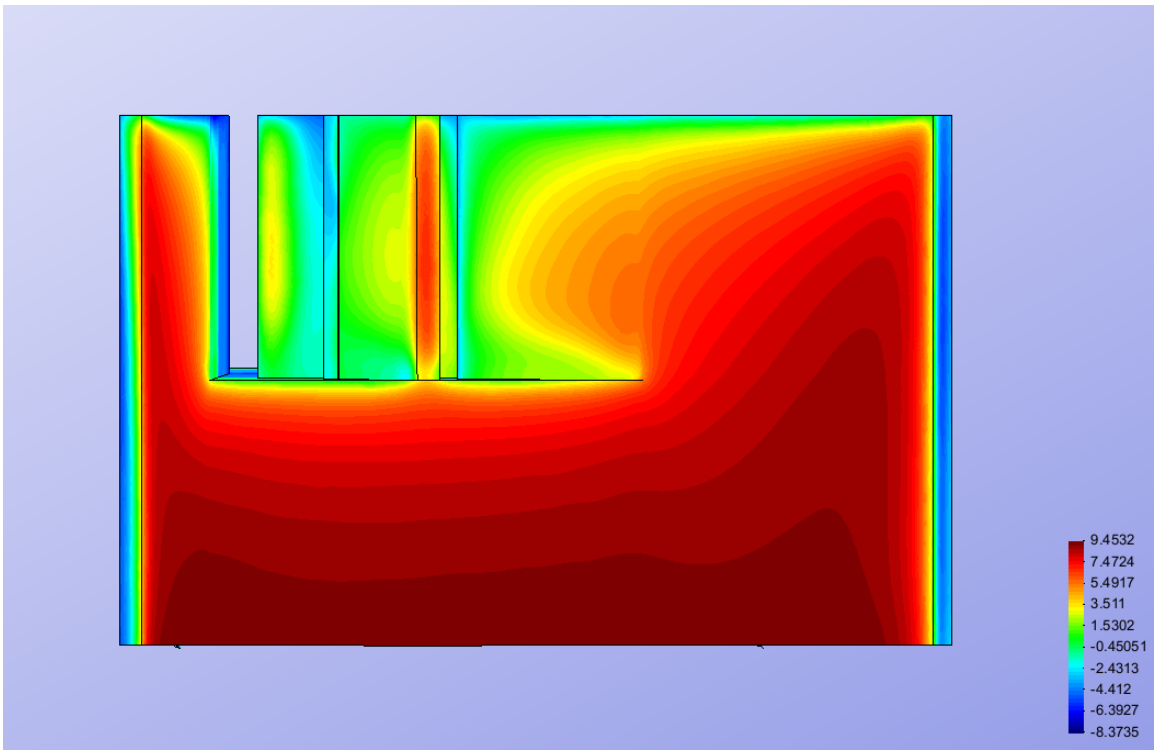


Figure 7-133 : Vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

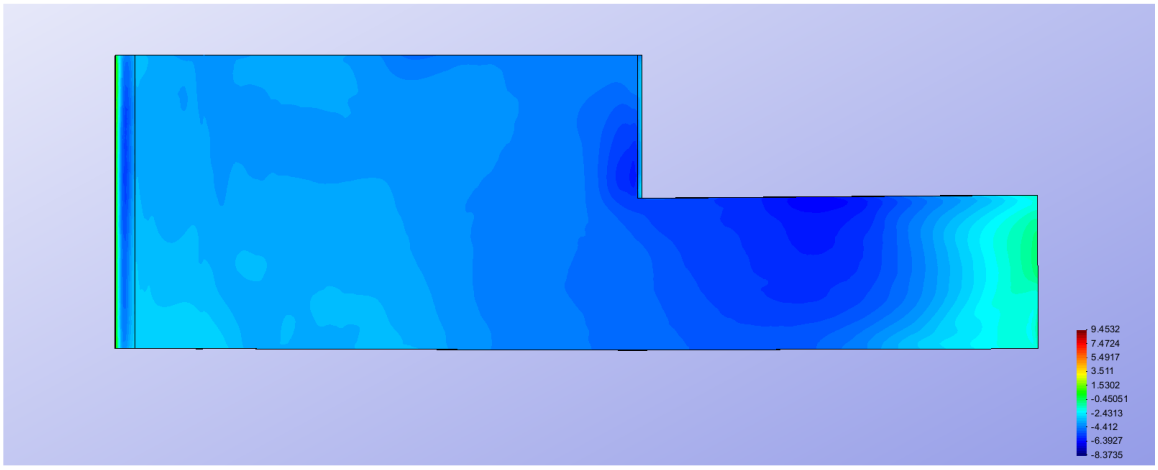


Figure 7-134 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s soufflant de gauche à droite.

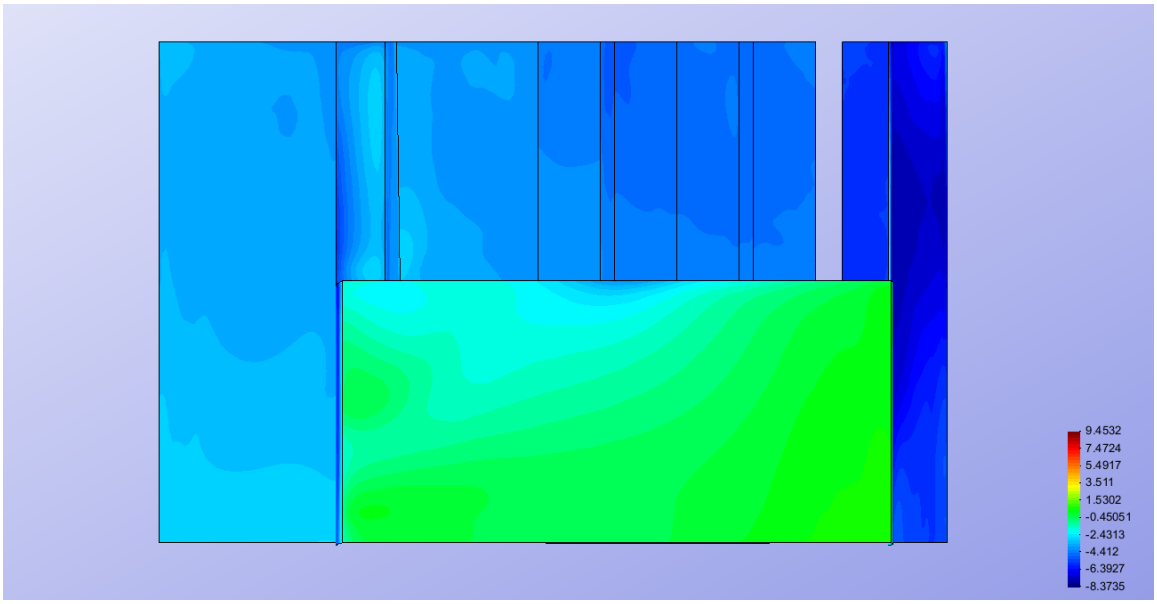


Figure 7-135 : Vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

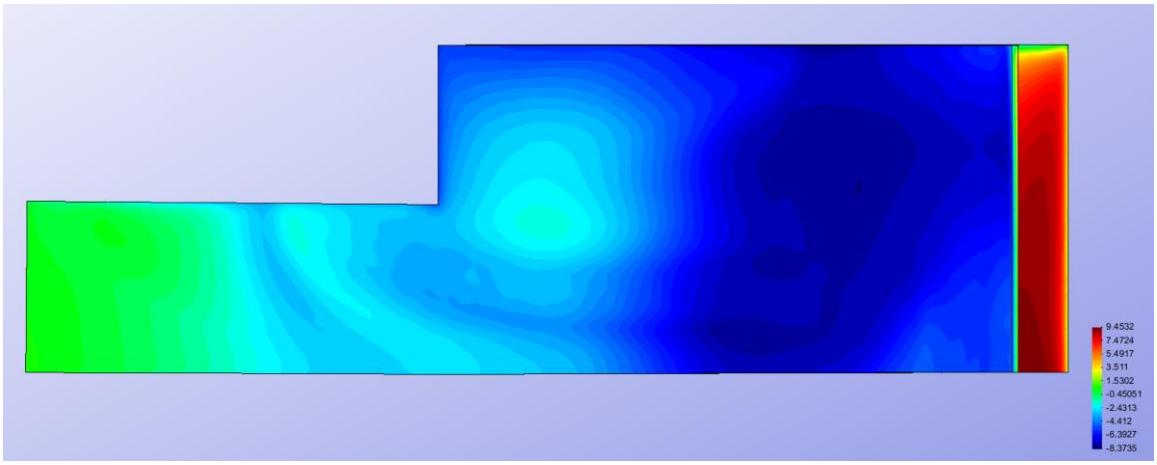


Figure 7-136 : Vue latérale d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 /s soufflant de droite à gauche.

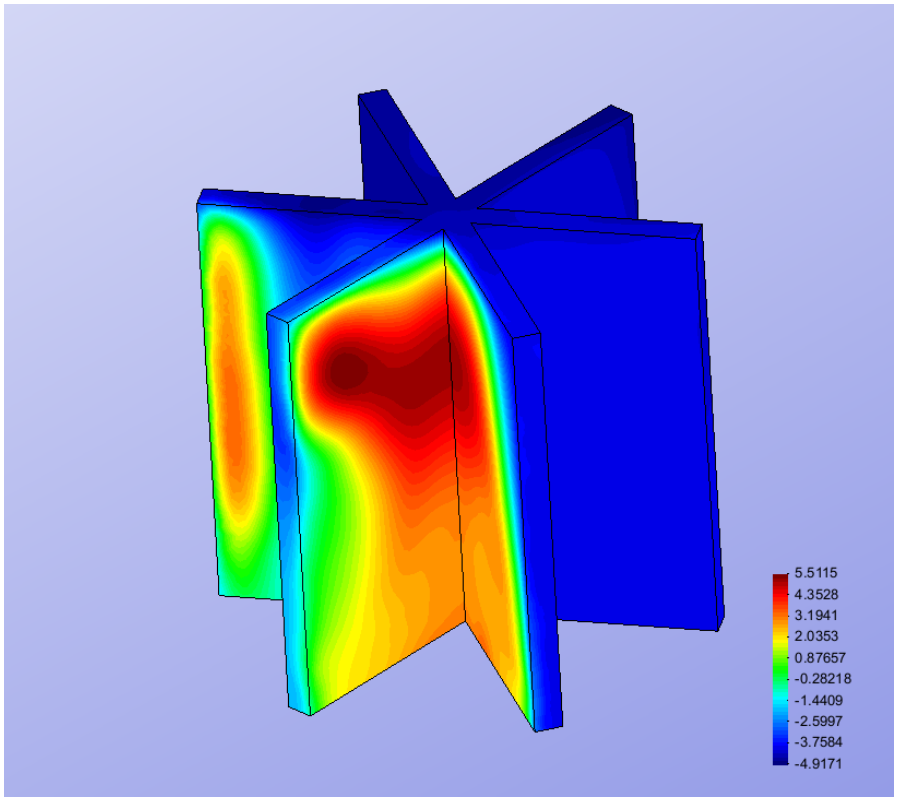


Figure 7-137 : Pression du vent sur la lame, vue de face d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

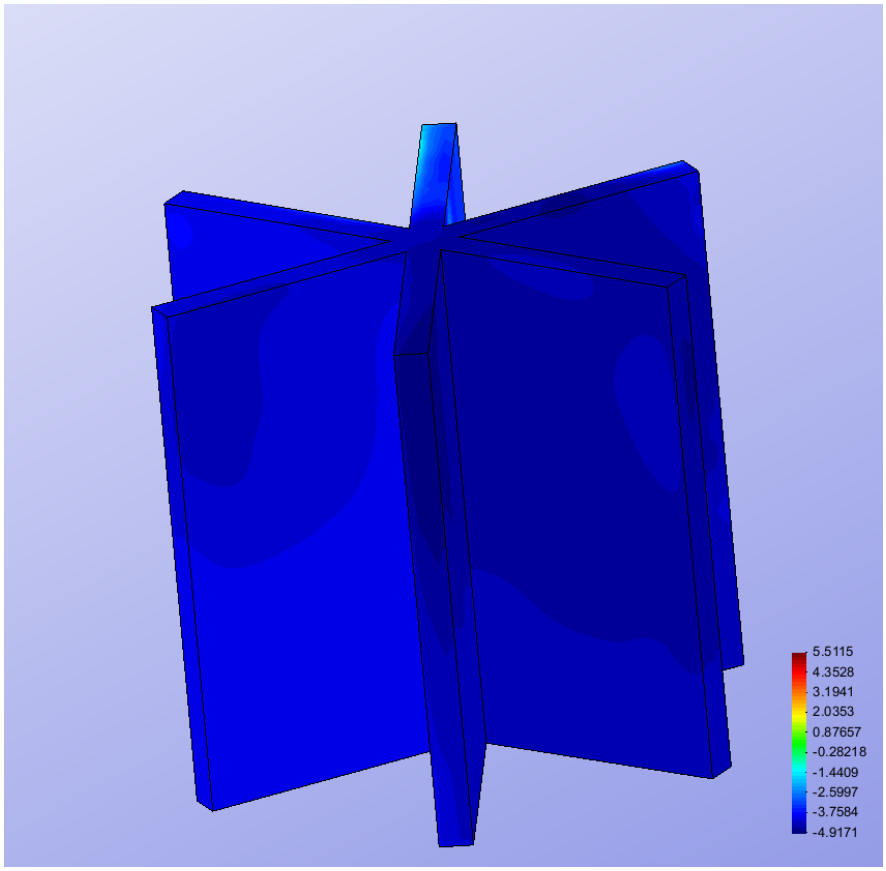


Figure 7-138 : Pression du vent sur la lame, vue arrière d'As-Hozdar-Corp avec des lames déplacées, vitesse du vent = 3,9 m/s.

Partie III

Réalisation

Chapitre VIII

Fabrication et Reconstruction

Introduction

Cette recherche a pour origine un chantier de conservation et de restauration d'un moulin à vent du Sistan en 2004. En 2001, nous nous sommes familiarisés avec la région de Hozdar. Au cours des deux années suivantes, nous avons cherché des moyens d'intervention pour conserver les moulins. La région est en effet la seule qui abrite des moulins à vent de type Sistan. C'est donc une région très importante, à faire découvrir au niveau international.

Un de moyens permettant de faire connaître le mécanisme des moulins à vent de type Sistan au plus grand nombre est de le faire inscrire sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco. Selon le règlement de l'Unesco, chaque pays a le droit de présenter annuellement un œuvre naturelle et une œuvre culturelle. Des documents valorisant le site et l'œuvre doivent être rassemblés pour que l'œuvre puisse être qualifiée pour être présentée à l'assemblée des pays membres de l'organisation. Ensuite les pays membres votent. Mais avant cela, une phase de négociation sérieuse s'engage entre le pays candidat et les autres pays.

Jusqu'ici, l'Iran a fait enregistrer 22 œuvres, héritages culturels et naturels, sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco. La province du Sistan et Baloutchistan a deux œuvres enregistrées. La première est culturelle, il s'agit du site archéologique de Chahr-e Soukhteh, et la seconde est naturelle : le désert du Lout. Aujourd'hui le dossier des moulins à vent en Iran est considéré comme un dossier intéressant. Il a une chance de qualification et d'enregistrement sur la liste du patrimoine mondial.

Cela dit, pour la visite sur place des "examinateurs" de l'Unesco nous sommes obligés de présenter des exemples de cette œuvre en bon état. Dans le cas du moulin à vent du Sistan, il nous faut présenter des moulins en état de marche. Les moulins à vent du Hozdar, contrairement aux moulins à vent qui se trouvent au Khorasan-du-Sud, au Khorasan-Razavi et à Hérat, sont très abîmés. Pour la présentation du dossier à l'Unesco il faut les restaurer, voire les reconstruire, de façon à ce que le dossier de candidature soit le plus solide possible. Il nous fallait donc entreprendre un chantier de restauration des moulins à vent de Hozdar le plus vite possible.

En 2004, nous avons démarré le projet de conservation et de restauration de ces moulins à vent. Les étapes programmées étaient les suivantes :

- relevé précis des bâtiments avec un moyen technique à jour (Scan Laser)

- recherche de documentation historique et technique précise
- étude de la structure et de l'architecture des bâtiments afin de bien choisir la méthode d'intervention sur chaque moulin à vent du Hozdar
- programmation d'un chantier de conservation des bâtiments
- programmation et ouverture d'un chantier de restauration et de réparation structurel, architectural et technique

En 2004, nous avons commencé à préparer les documents nécessaires à la présentation d'un dossier de candidature des moulins à vent de l'Iran à l'Unesco. Mais nous avions d'abord besoin de mettre en route très rapidement un chantier de conservation des moulins à vent.

Nous avons choisi de nous attaquer au moulin à vent du Hozdar n° 2, gravement abîmé cette année par une inondation saisonnière sur le plateau du Sistan. Au cours de ce chantier, nous avons trouvé par hasard le seul moulin à vent de taille moyenne du Hozdar. Il était situé à proximité du moulin à vent n° 1, dissimulé sous une colline de sable. Le projet de conservation urgente de ce moulin à vent donc été initié, parallèlement au premier. En 2007, nous nous sommes concentré sur ce dernier moulin. Après une série d'études sur le bâtiment, un relevé précis a été fait. Rapidement après avoir rassemblé de la documentation, nous avons commencé le chantier de restauration du moulin à vent n° 1.

Au terme de ce chantier, nous avions complètement restauré la structure et la coque architectonique du bâtiment. Il restait néanmoins à restaurer le mécanisme technique, qui avait besoin d'études supplémentaires.

En 2008, après discussion avec Joël Sakarovitch, l'idée d'une recherche universitaire sur le sujet du moulin à vent d'Iran a été définie au laboratoire GSA où j'avais présenté mon dossier de candidature pour une thèse de doctorat. Ce projet de recherche a finalement été enregistré comme thèse en architecture en 2009, à l'école doctorale de la Ville et de l'environnement. Cette thèse s'articule en trois parties : étude historique, modélisation numérique, analyse géométrique et réalisation technique.

Après la disparition de Joël Sakarovitch, la thèse a été dirigée par un nouveau directeur, M. Maurizio Brocato. Le premier lecteur du manuscrit de cette recherche,

en 2013, nous a montré que cette étude avait encore besoin d'indications plus précises et plus claires dans les trois champs définis. Nous avons donc approfondi nos recherches et avons travaillé sur terrain pour réaliser le mécanisme technique, l'installation de la meule et de la roue éolienne des moulins à vent n° 1 et n° 2 du Hozdar, selon notre modélisation numérique récente.

Préparation de la documentation sur le terrain et bibliographique

Pour préparer le plan de réhabilitation et organiser la zone précise des moulins à vent du Hozdar, nous avons tout d'abord observé les programmes d'action, les plans d'intervention, le processus de planification et la façon de recueillir et d'accéder à l'information de base. Pour ce travail, nous avons organisé des équipes pour recueillir des données sur le terrain séparément.

La première partie du travail de documentation a consisté, avant toute chose (y compris avant la collecte de données sur les moulins à vent du Hozdar) à faire des recherches bibliographiques. Malheureusement, mis à part notre travail de cette année-là, il y avait peu de ressources fiables sur les moulins à vent du Sistan. Résultat : nous n'avions pas de plan topographique présentant les moulins à vent du plateau du Sistan et permettant de localiser les sites. Nous avons donc été obligés d'utiliser le logiciel "Google Earth" pour les localiser.

Figure 8-1: Rout Zabol-Zahedân et le village abandonné de Qaleh-Matchi où se trouvent les trois moulins à vent du Hozdar (Source: Google Earth).

Figure 8-2: Fort de Rostam et le village abandonné de Qaleh-Rostam où se trouvent les trois moulins à vent
de Qaleh-Rostam (Source: Google Earth).

L'étude sur le terrain est l'axe central de notre recherche. Une étude précise sur les moulins à vent, leur structure et leur architecture, leur mécanisme technique et leur matériaux a été nécessaire. Pour réaliser cette étude, une équipe de cartographie a été créée, parallèlement à notre équipe de recherche et à une autre équipe dédiée à la restauration. Nous avons effectué un relevé mécanisé grâce à la technique du scan laser, et une série de plans et de coupes ont été produits.

Des croquis de certaines zones dessinés à la main ont également été prévus afin de déterminer la forme des espaces cachés. Dans le même temps, pour améliorer la précision des travaux, les détails des coques extérieures et des dommages sur les briques ont été pris sur le terrain. Ces plans ont été divisés en trois parties : une présentation générale, la photographie des dommages, et de structure et l'architecture.

À cause de la situation climatique critique du Sistan, la cartographie a été réalisée en plusieurs jours, en raison de la sensibilité du travail et de l'importance des bâtiments, il a fallu effectuer toutes les cartes et impressions avec la précision et la

sensibilité nécessaires. Dans ce but, nous avons utilisé des caméras équipées de scan laser.

Figure 8-3: Utilisation d'un scanner laser pour la collecte d'informations.

La cartographie de la collection des moulins à vent est réalisée par un scanner laser de haute précision qui permet la préparation de modèles tridimensionnels avec des volumes supraconducteurs à l'échelle d'un à un. Il nous présente non seulement des modèles tridimensionnels mais aussi la topographie du site de l'étude.

Figure 8-4: Installation d’un scanner laser pour la collecte de données.

Figure 8-5 et 8-6: Installation d’un scanner laser pour la collecte de données.

Apres l’installation de la caméra dans différentes stations à l’intérieur et à l’extérieur des bâtiments, des observations précises ont été faites à l’intérieur et à l’extérieur des bâtiments.

Nous avons obtenu une cartographie complète de la zone de localisation des moulins à vent. Puis plusieurs points ont été pris et stockés dans plusieurs couches.

Tous ces points ont été marqués avec trois positions x, y et z. Nous avons utilisé ce modèle tridimensionnel pour déterminer leur position à différentes altitudes. Le nombre considérable de couches de points nous a permis d'éviter de faire des erreurs pendant le travail sur une couche spécifique.

Les lignes de la zone extérieure et les principales lignes internes ont constitué les premiers dessins obtenus à partir des points. Grâce à la précision de ces zones, les lignes de chacun des espaces ont progressivement tracé. De plus, les points de base (*base points*) qui existaient sur la carte ont été coïncidés sur l'un et l'autre.

Figure 8-7: Installation d'un scanner laser pour collecter des données et utilisation d'une caméra
de cartographie (TOTALE STATION) pour faire défiler et contrôler les points de contrôle.

Les premières sorties obtenues à partir d'applications de scanner laser comprennent un nuage de points, des moulins de vent, qui ne sont pas faciles à analyser. Mais en utilisant un logiciel complémentaire, il est possible de produire des sorties personnalisées telles que façade, coupe, plan et... avec un nombre infini.

Autre avantage du scanner laser : il peut simultanément photographier et relever des points. Dans les étapes avancées du travail, il a la capacité de faire correspondre les points avec l'image, chaque point relevé prenant sa couleur d'origine.

Les images obtenues à partir du scanner laser ont de nombreuses autres utilisations, y compris la possibilité de produire des images échelées (Ortho Photo). Ces images sont telles que chaque point de l'image est perpendiculaire à l'angle de vue, de sorte qu'il est possible d'analyser un bâtiment avec une extrême précision ou d'utiliser des images existantes pour dessiner et faire correspondre l'image avec la carte.

En outre, du fait que les images obtenues à partir du scanner laser ont un chevauchement de 30 % l'un et l'autre et que la distance focale et l'ouverture dans toutes les images sont les mêmes, elle peut également fournir des images panoramiques à 360 degrés.

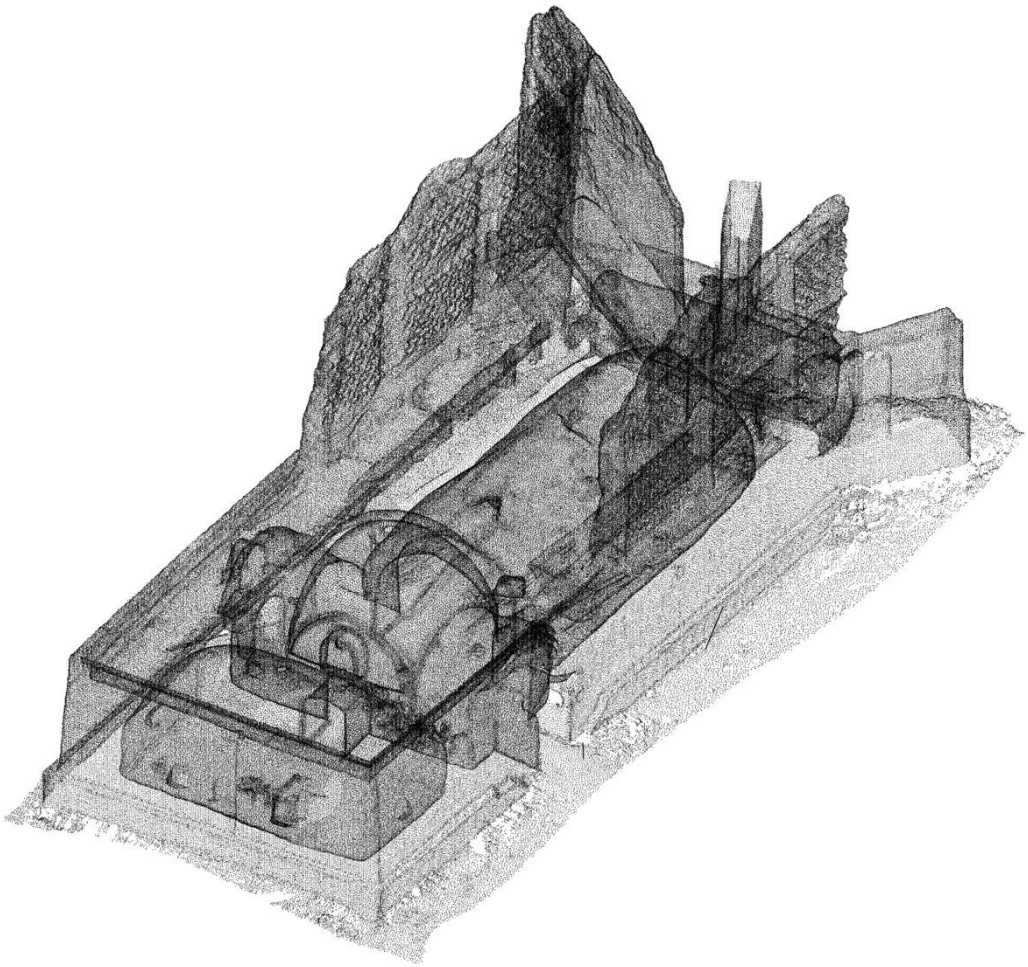


Figure 8-8: Le nuage de points du moulin à vent n° 1. Cette image apparaît grâce à l'installation de 15 caméras, à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment.

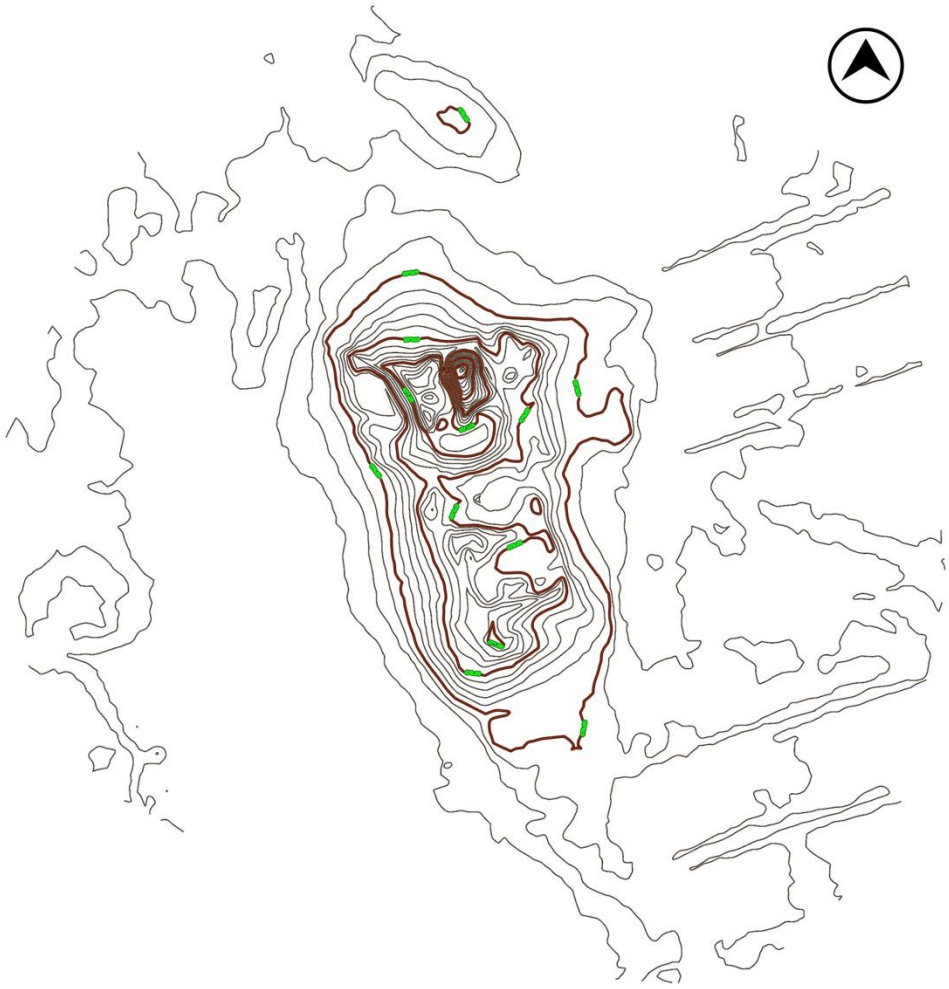


Figure 8-9: Préparation de lignes topographiques à partir de matériaux endommagés et des zones avoisinantes (carte topographique du moulin à vent n°6).

Figure 8-10: Illustration d’une photo ortho du moulin à vent n°1.

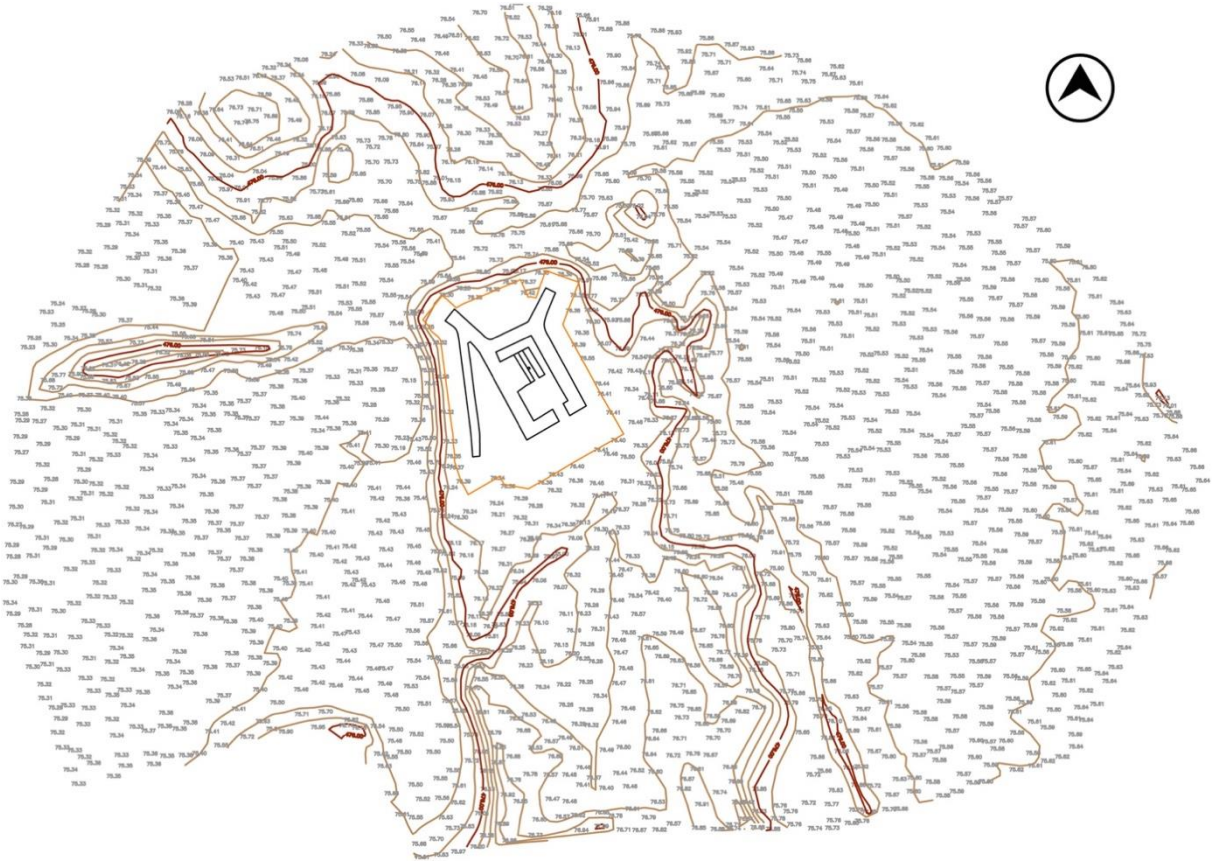
Chapitre IX

Chantier de restauration

Étude de cas : le moulin à vent n° 1 du Hozdar

Le moulin à vent n° 1 du Hozdar est notre premier terrain d'essai en matière de documentation, de conservation, de restauration et de réhabilitation. Il s'agit d'un moulin à vent de type Sistan, unique du point de vue de la taille si on le compare à ceux qui se trouvent sur le site de Hozdar et Qaleh-Rostam. Nous avons commencé à travailler sur ce moulin à vent en 2004. Alors qu'un chantier était en cours pour la conservation et la restauration du grand moulin à vent n° 2 du Hozdar, une colline de sable a attiré notre attention : sa forme nous paraissait singulière. Après une série de sondages, nous avons découvert un petit moulin à vent de type Sistan. C'est curieusement le seul exemple de ce type du point de vue de la taille. Au cours de cette année, parallèlement au chantier de restauration du moulin à vent n° 2 du Hozdar, nous avons retiré le sable autour du petit moulin à vent n° 1 et nous avons procédé à quelques travaux de conservation d'urgence et de restauration.

Nous présentons ici les documents produits par le scanner laser ainsi que des croquis et des photos des activités de chantier de 2004.



Carte 8-1 : Localisation du moulin à vent n° 1 du Hozdar dans la topographie du site. Source : OHAT.

Figure 8-11 : Façade nord du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Figure 8-12 : Façade nord-ouest du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Figure 8-13 : Façade ouest du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Figure 8-14 : Façade sud du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Scan laser du moulin à vent n° 1 du Hozdar

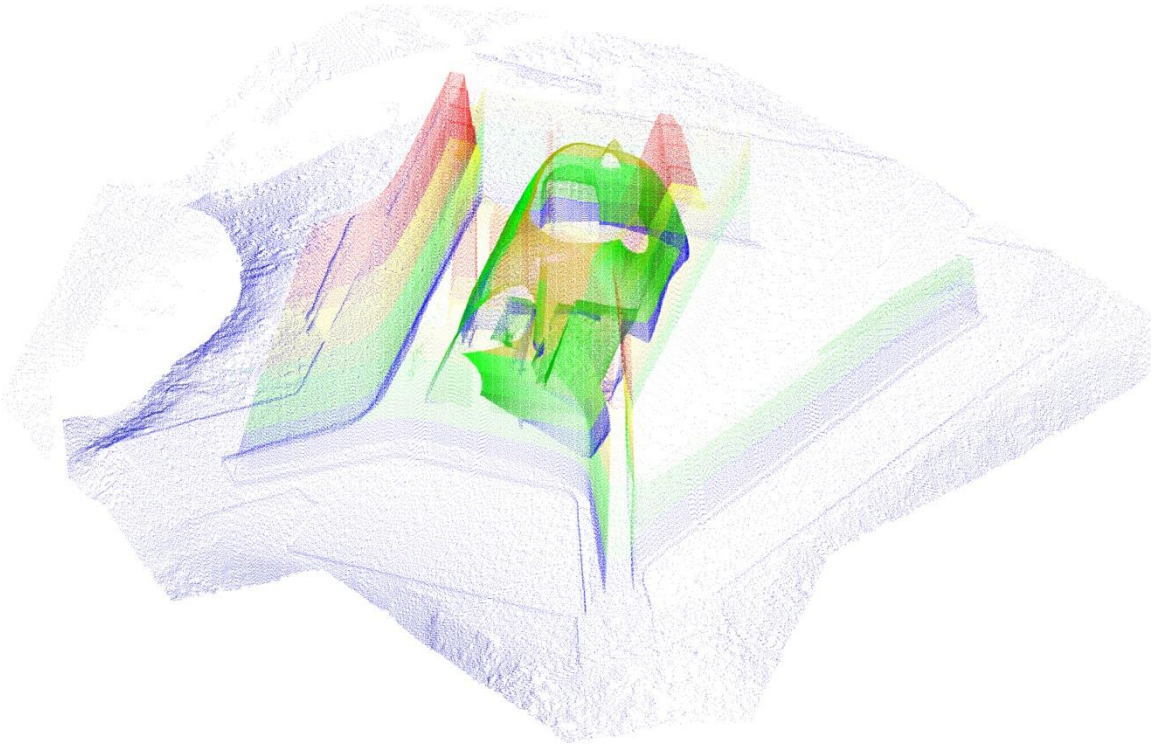


Figure 8-15 : Scan laser du volume nord-ouest du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

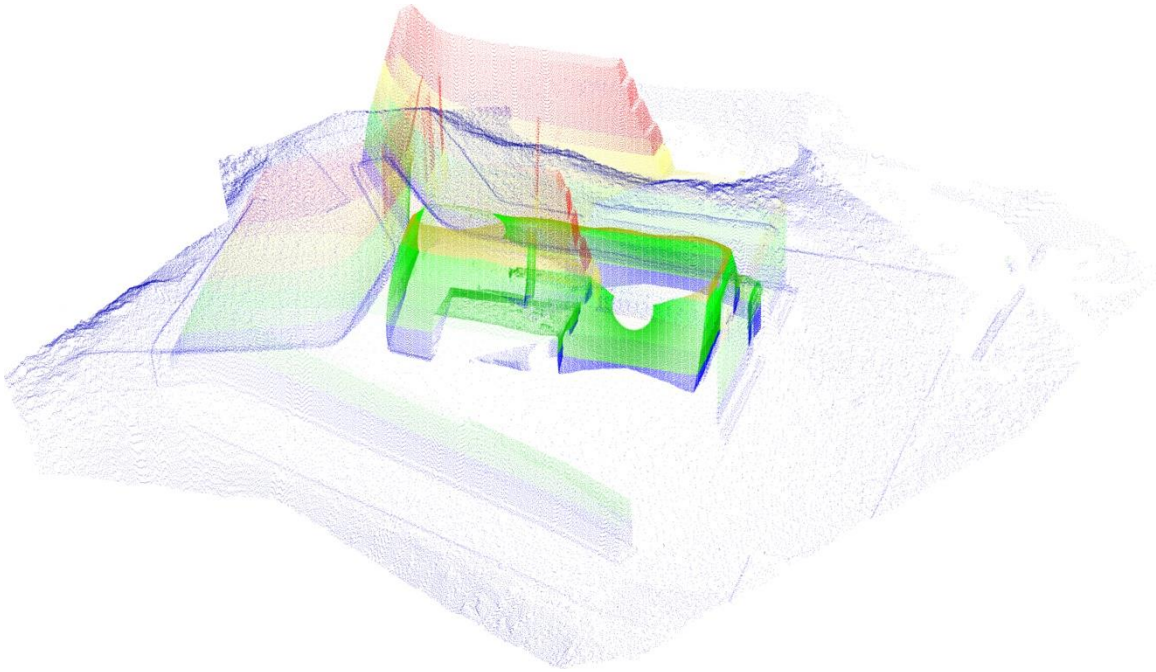


Figure 8-16 : Scan laser du volume sud-ouest du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

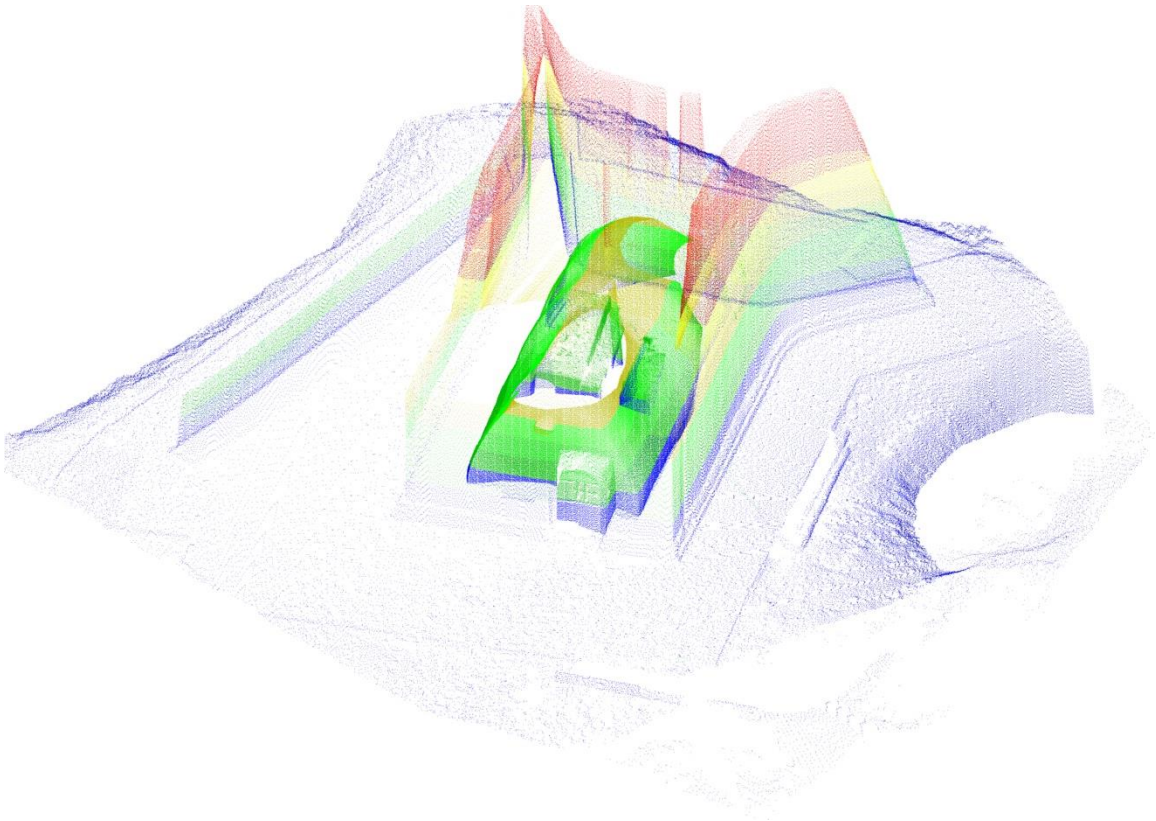


Figure 8-17 : Scan laser du volume sud-est du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

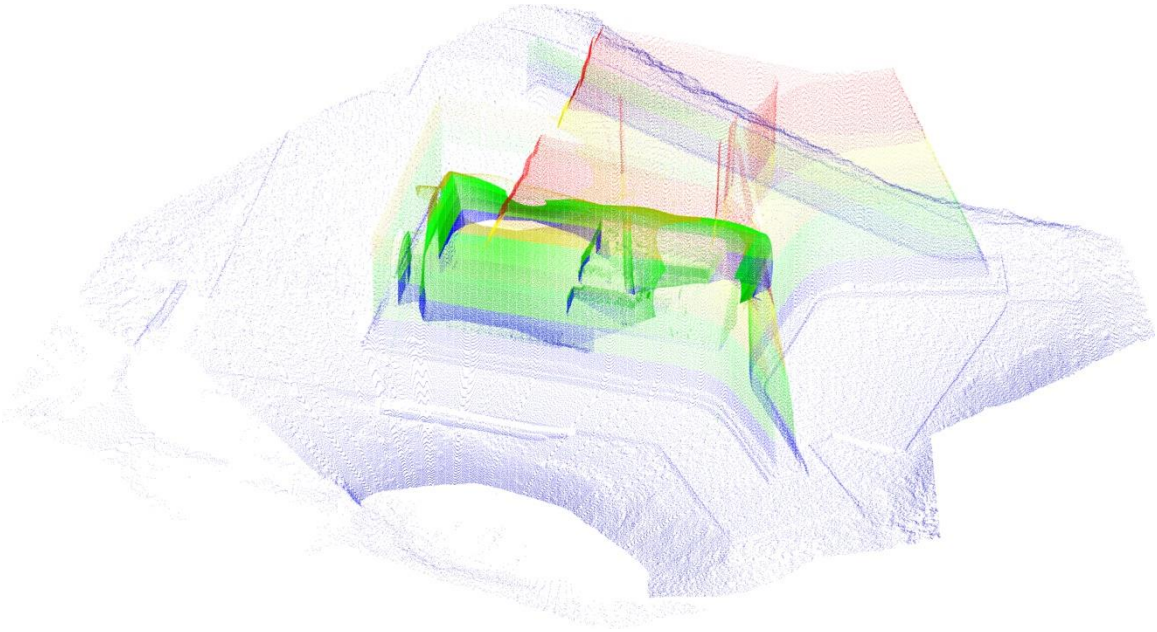


Figure 8-18 : Scan laser du volume nord-est du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

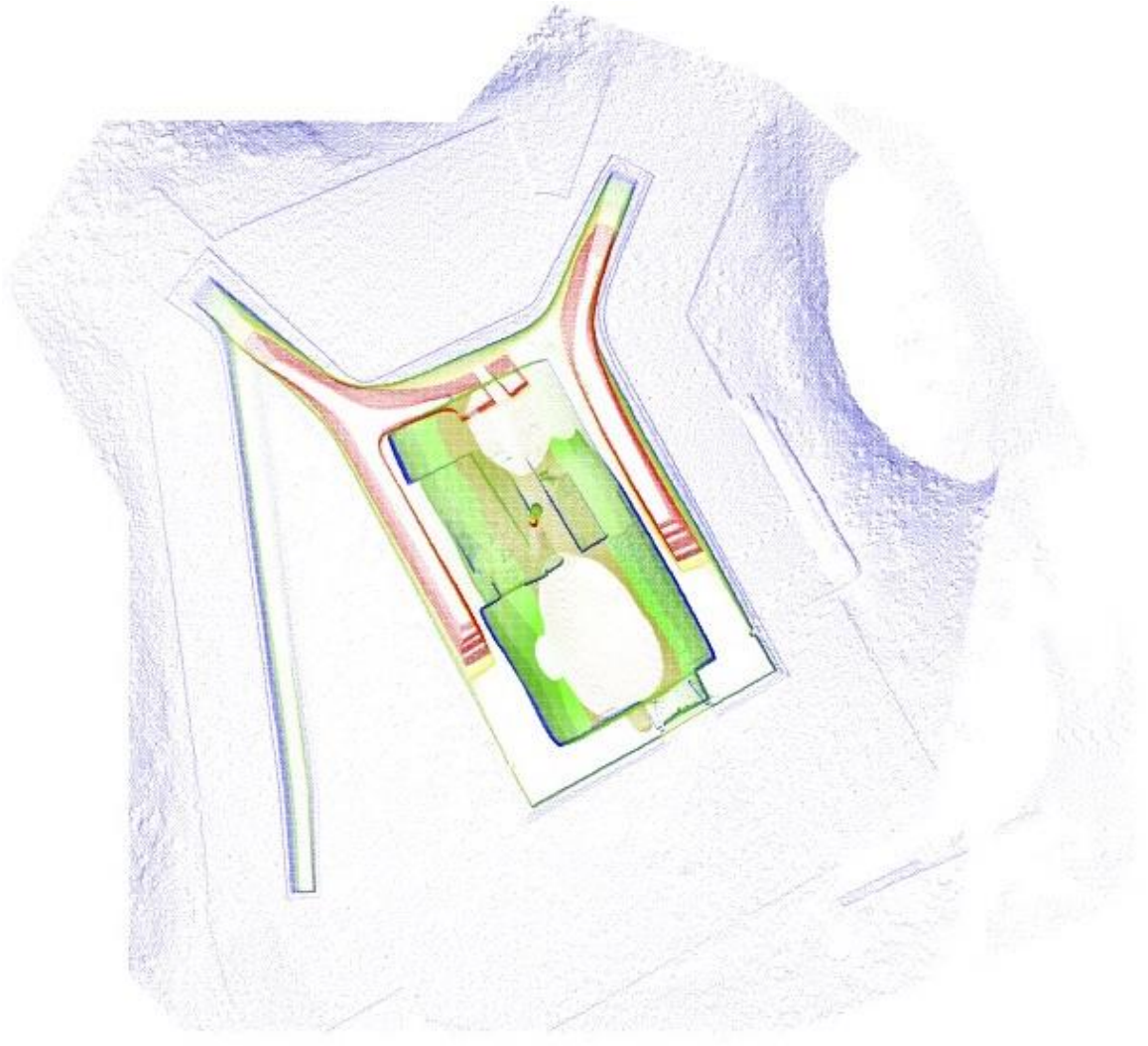


Figure 8-19 : Scan laser du plan du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

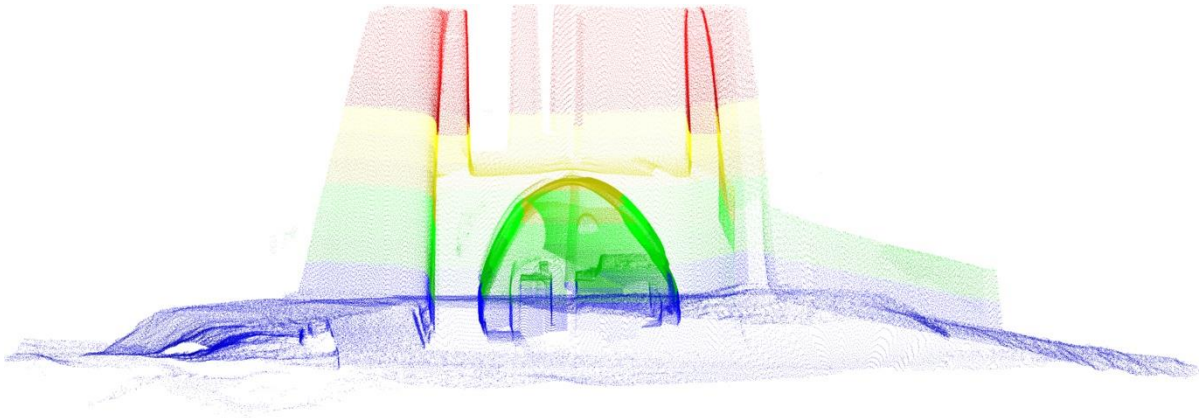


Figure 8-20 : Scan laser de la façade nord du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

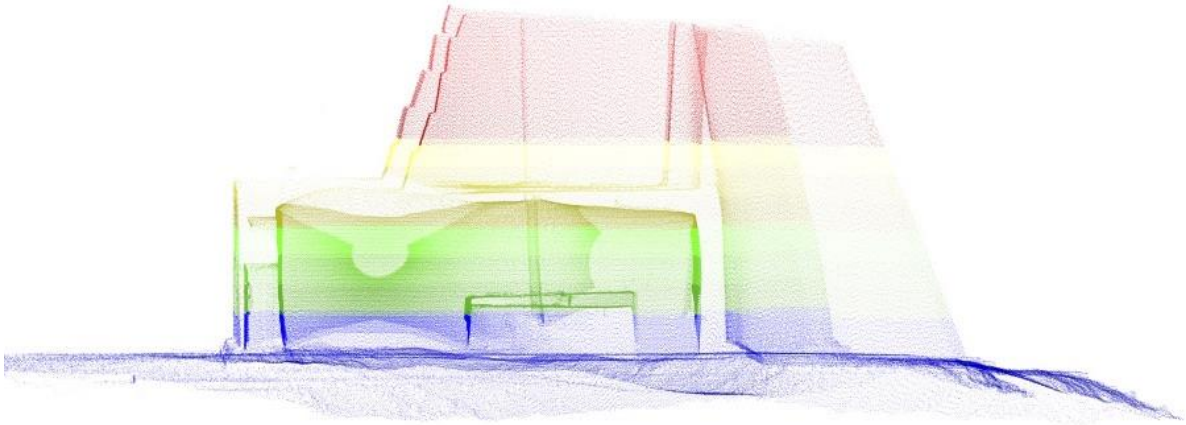


Figure 8-21 : Scan laser de la façade est du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

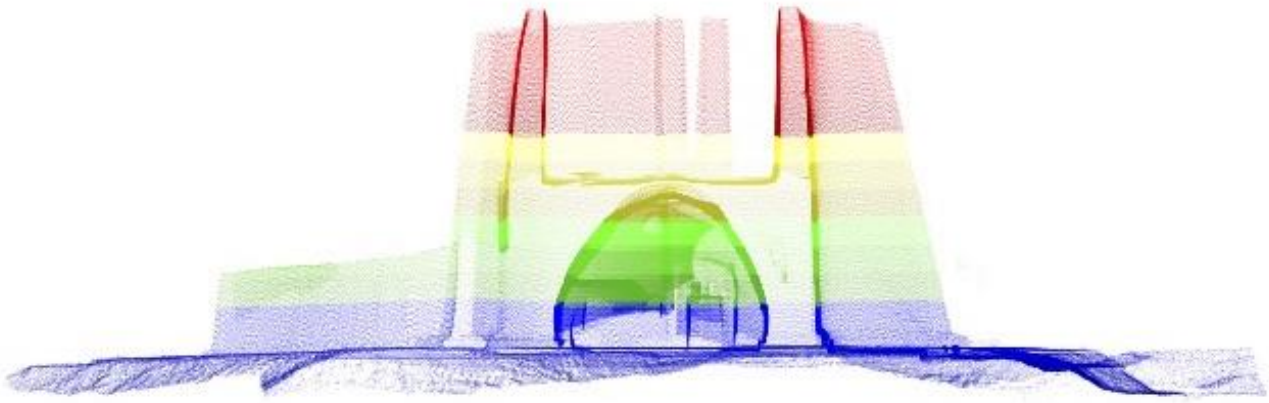


Figure 8-22 : Scan laser de la façade sud du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

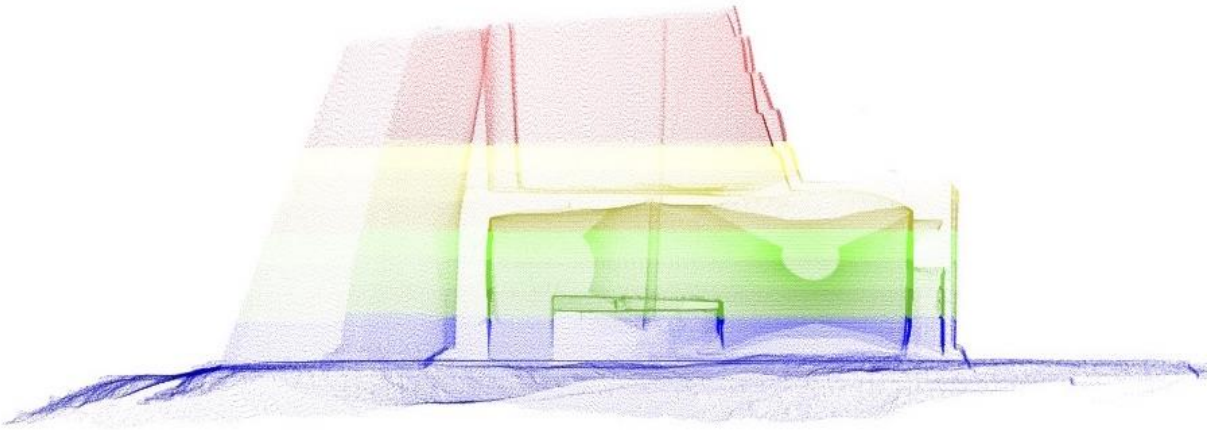


Figure 8-23 : Scan laser de la façade ouest du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Source : OHAT.

Plans et façade - coupe du moulin à vent n° 1 du Hozdar

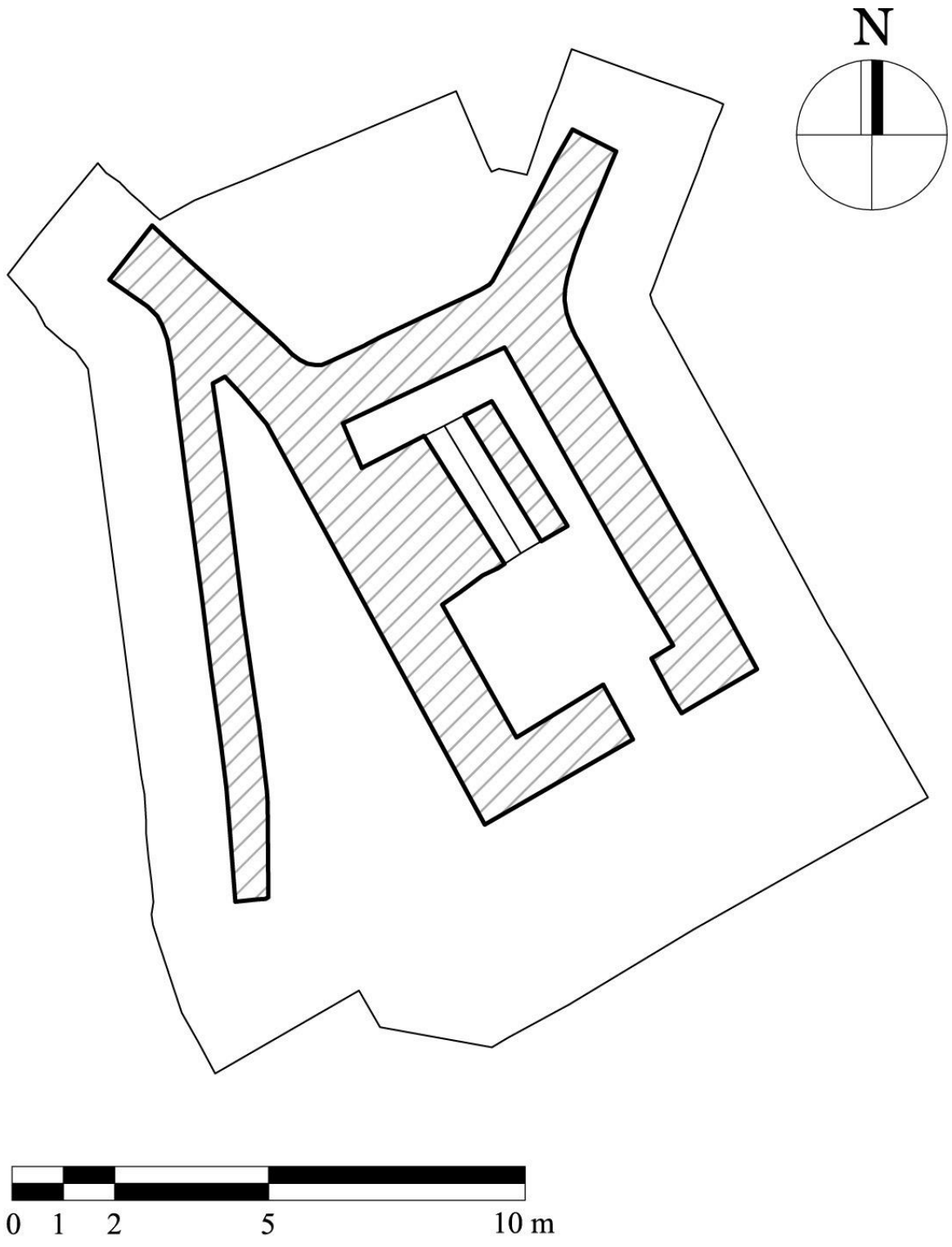


Figure 8-24 : Plan RDC du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

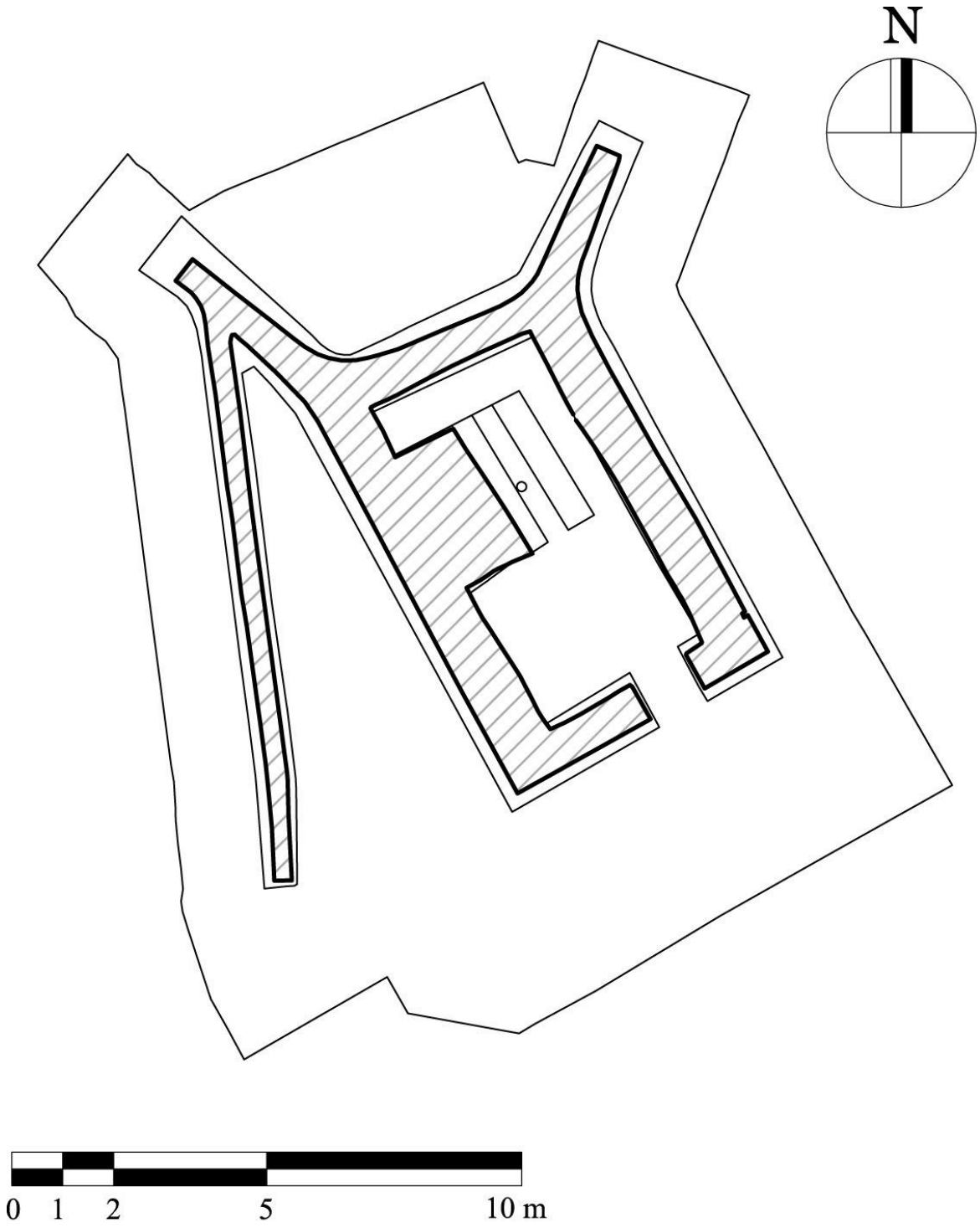


Figure 8-25 : Plan RDC à hauteur d'1 mètre du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

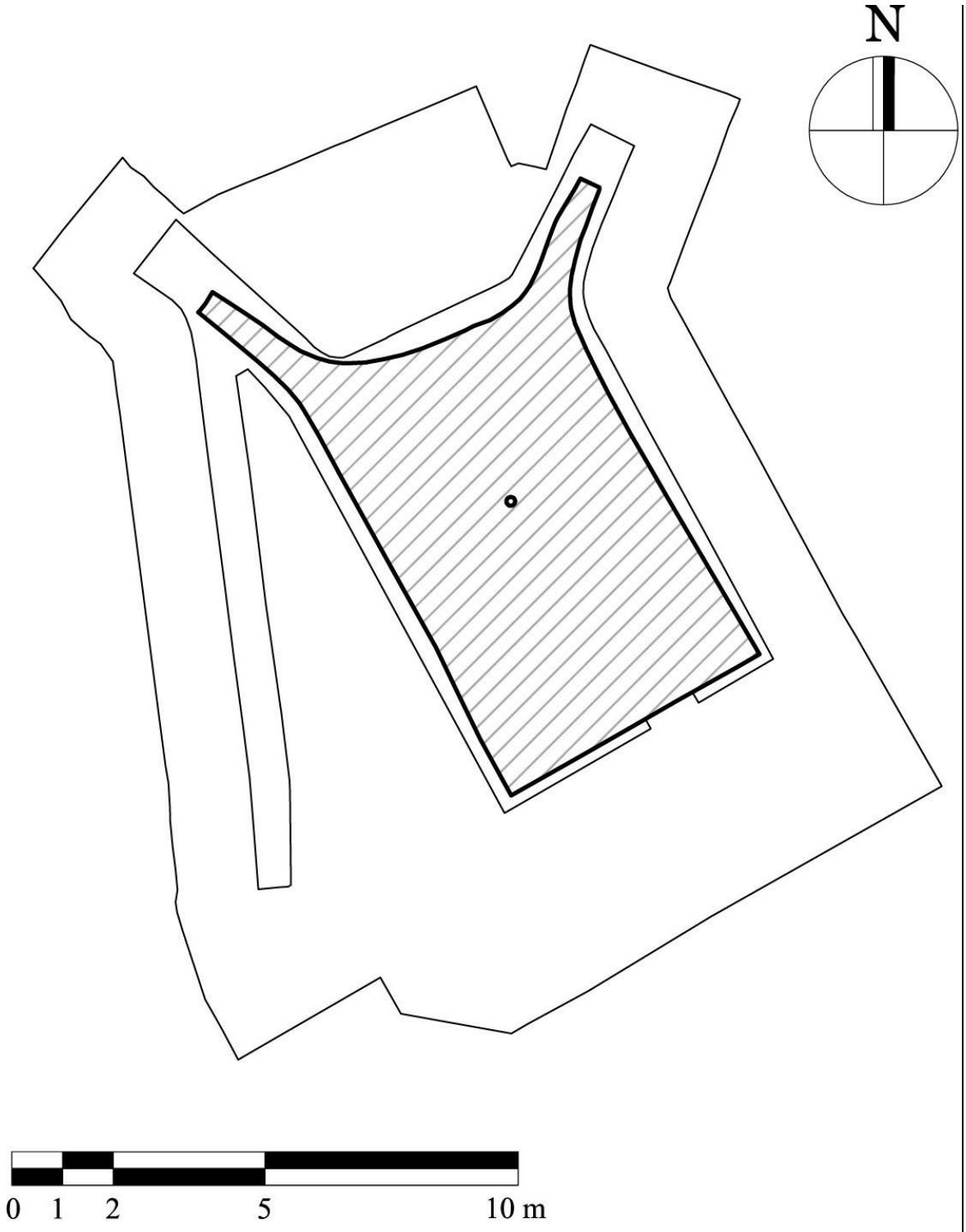


Figure 8-26 : Plan RDC à hauteur de 2 mètres du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

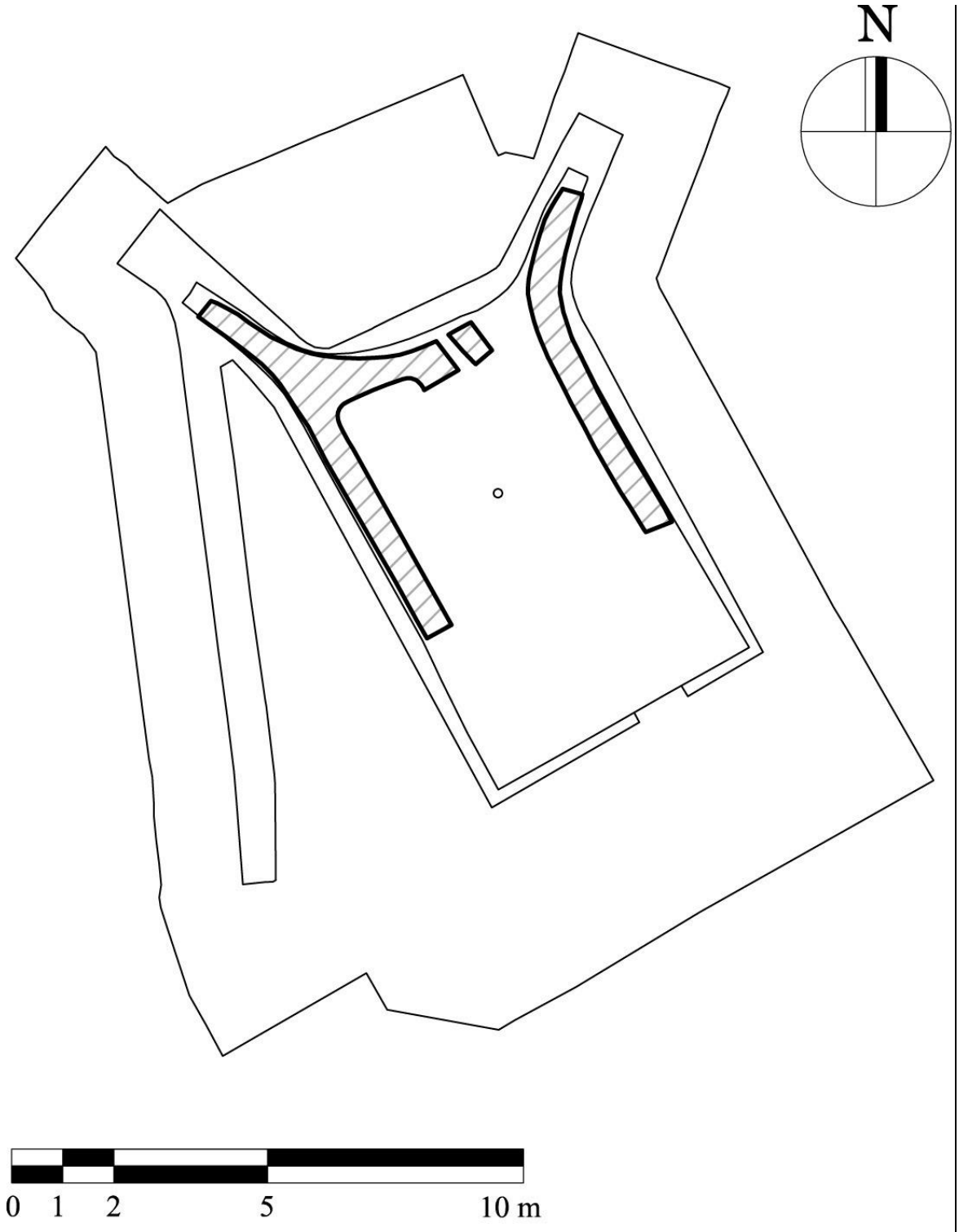


Figure 8-27 : Plan RDC à hauteur de 3 mètres du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source :

OHAT.

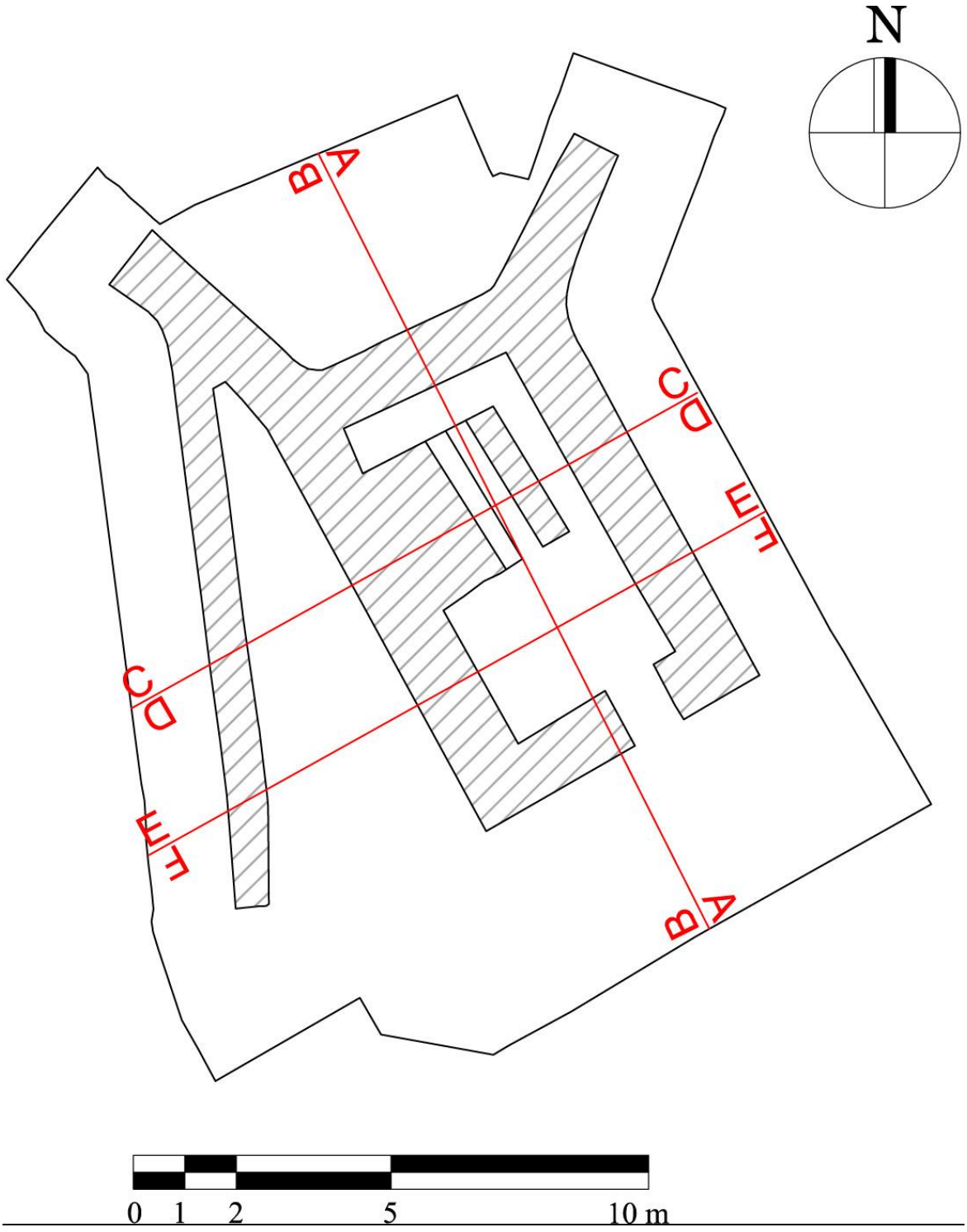


Figure 8-28 : Plan RDC et lignes de coupe du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

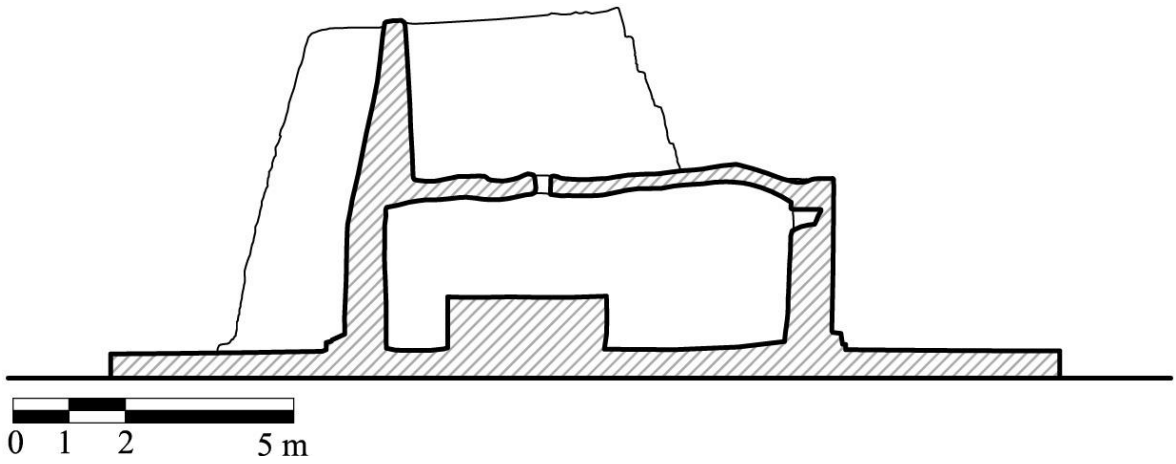


Figure 8-29 : Coupe A-A du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

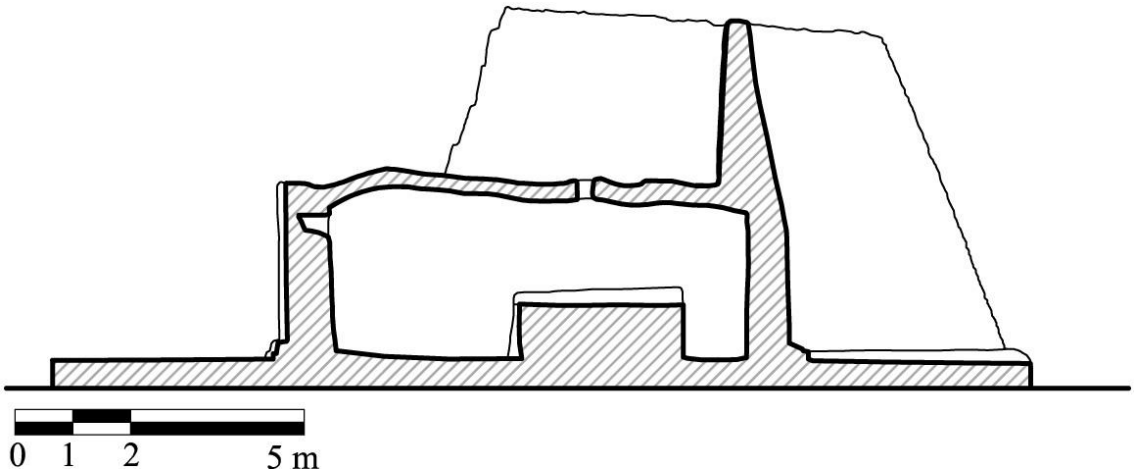


Figure 8-30 : Coupe B-B du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

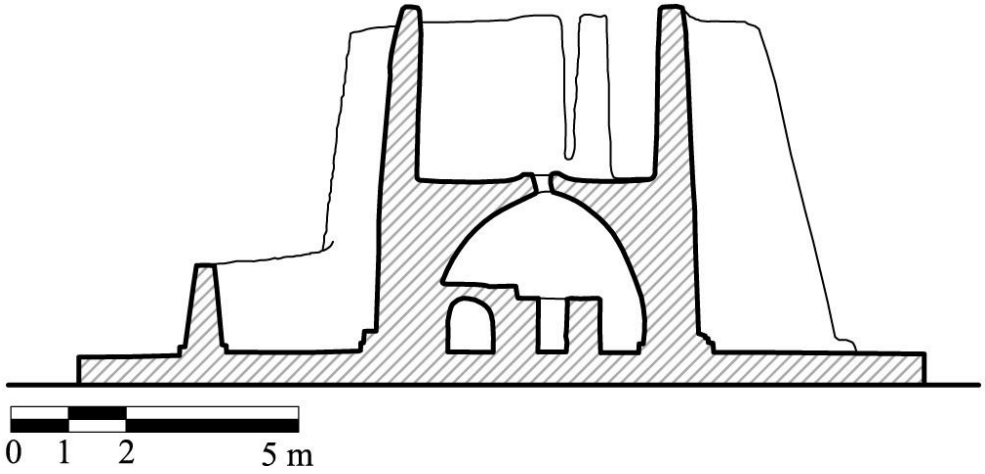


Figure 8-31 : Coupe C-C du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

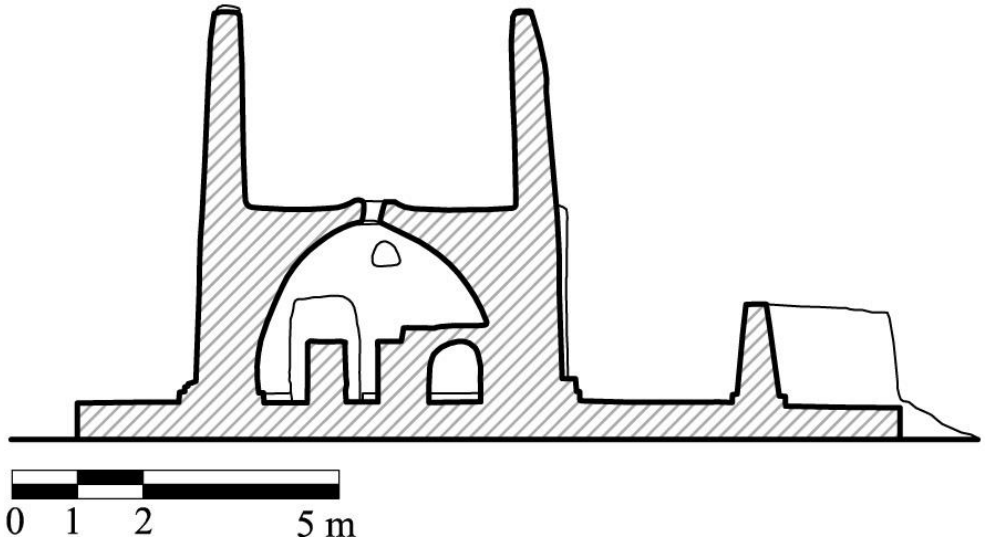


Figure 8-32 : Coupe D-D du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

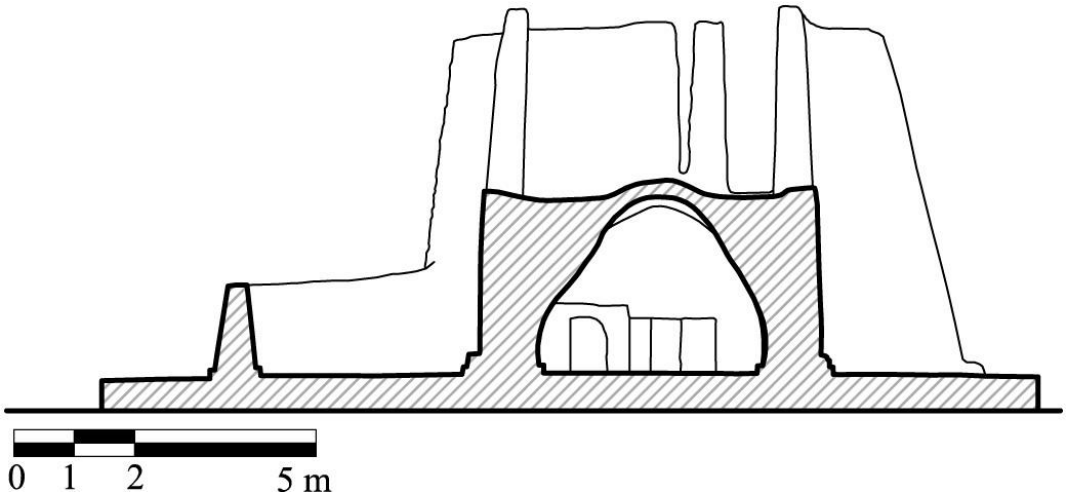


Figure 8-33 : Coupe E-E du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

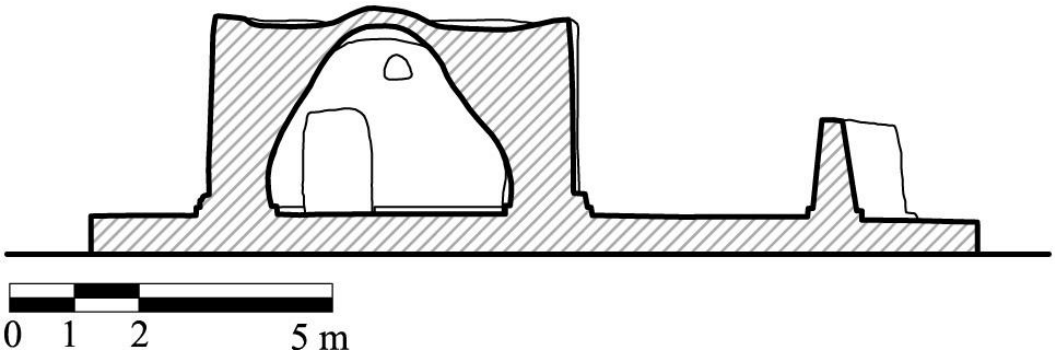


Figure 8-34 : Coupe F-F du moulin à vent n° 1 du Hozdar d'après le scan laser. Source : OHAT.

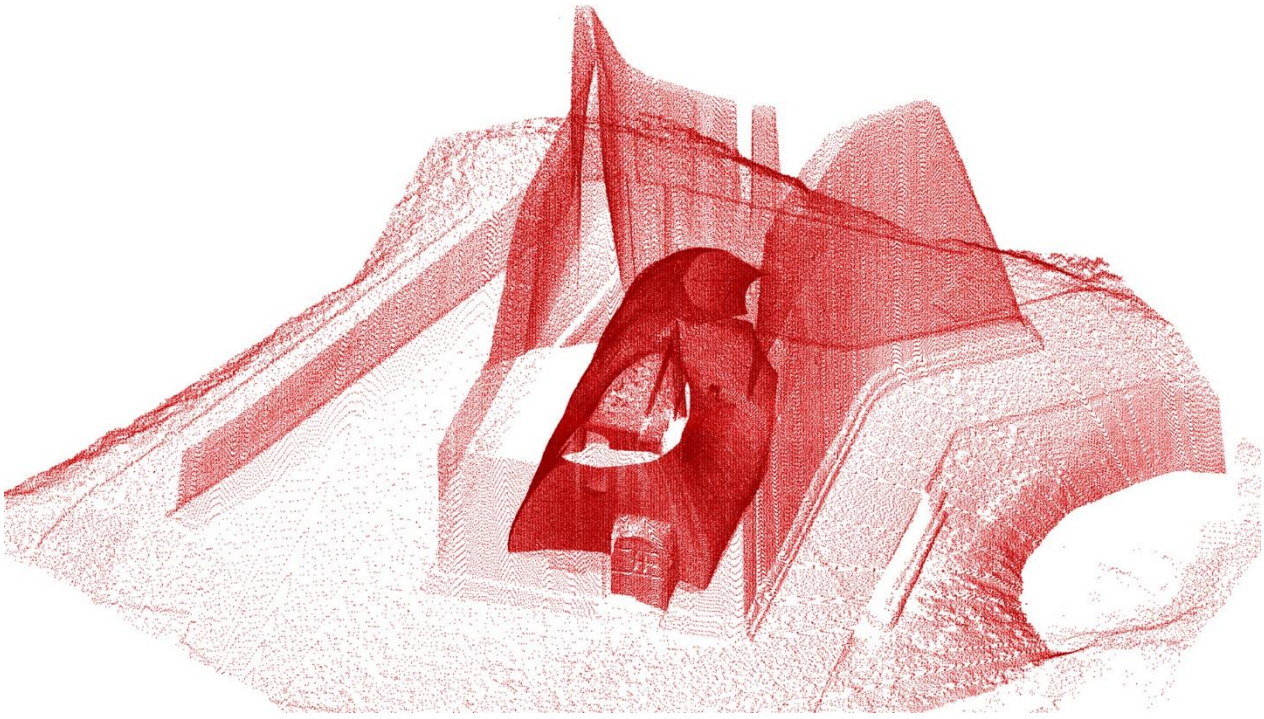


Figure 8-35 : Nuage de points du moulin à vent n° 1. Cette image est produite grâce à l'installation de 11 caméras à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment. Source : OHAT.

Chantier de l'année 2004

Le premier effort de restauration de ce moulin à vent est fait en 2004, au cours de la restauration du moulin à vent n° 2. Comme nous l'avons indiqué précédemment, c'est au cours du chantier de restauration du moulin à vent n° 2, dans la région du Hozdar, que nous avions découvert les traces d'un autre moulin à vent.

Nous n'avions pas prévu de budget pour lancer un second projet de restauration et surtout nous n'avions aucune documentation concernant ce moulin à vent. Nous ne pouvions donc pas installer de chantier pour le stabiliser à ce moment-là. Nous nous sommes alors concentrés sur la connaissance de ce nouveau moulin à vent, avant d'entreprendre quelques travaux de conservation d'urgence que nous présenterons par la suite.

Figure 8-36 : Efforts de documentation à conservation du moulin à vent n° 1 du Hozdar.

Figure 8-37 : Déflecteur détruit et exemple réparé du moulin à vent n° 1 du Hozdar après notre intervention en 2004.

Chantier de l'année 2007

En 2007, nous avons pu monter un chantier de restauration du moulin à vent n° 1 du Hozdar. Nous avons en effet conclu un contrat entre nous et l'Organisation du patrimoine culturel, de l'artisanat et du tourisme du Sistan et Baloutchistan (OHAT). Nous avons alors eu le budget nécessaire à la conservation et à la restauration de l'espace intérieur, de l'enveloppe du bâtiment et d'une partie du site de ce moulin à vent.

Après six mois d'études, de travail de documentation et de chantier, les murs, la chambre de la meule, la chambre éolienne et le site autour de bâtiment ont été réparés, et le bâtiment a été restauré.

Le mécanisme technique de tous les moulins à vent du Sistan a disparu à cause de l'érosion. Toutes les pièces de bois ont également été détruites à cause du climat sec et chaud de la région. La fabrication et l'installation du mécanisme technique nécessitait donc des recherches de terrain et bibliographiques. Au cours de cette période, nous nous sommes donc concentrés uniquement sur la structure et l'architecture du moulin à vent.

Il restait donc à étudier le mécanisme technique des moulins à vent du Sistan, ce que nous avons fait en 2016. Entre le chantier de 2007 et le chantier de 2016 nous avons travaillé sur l'histoire du moulin à vent à axe vertical iranien dans le cadre de notre recherche doctorale. Une partie de notre recherche était axée sur le mécanisme technique du moulin à eau à axe vertical, du moulin à vent à axe vertical et sur la roue éolienne d'irrigation du Sistan pour laquelle nous sommes parvenus à présenter un mécanisme provisoire en vue d'une installation dans le moulin à vent n° 1 du Hozdar.

Figure 8-39: Efforts de restauration et de conservation du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Figure 8-40 : Efforts de restauration et de conservation du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Figure 8-41 : Efforts de restauration et de conservation du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2007.

Chantier de l’année 2016

Comme nous avons indiqué précédemment, au cours du chantier de conservation et de restauration de l’année 2007, nous sommes intervenus sur la structure et l’architecture du moulin à vent n° 1 et avons effectué tous les travaux nécessaires. Seul le mécanisme technique restait à installer. Or la meule et la roue éolienne restaient des mécanismes obscurs pour nous. Nous avons finalement dessiné et fabriqué un mécanisme technique provisoire que nous avons testé sur le moulin à vent n° 1. Comme nous n’avions aucune trace des meules utilisées dans les moulins à vent du Sistan, nous avons emprunté une meule sur un moulin à vent du Khorasan du Sud, qui nous a permis de tester le mécanisme technique fabriqué. La roue éolienne que nous avons réalisée est très proche de celle du moulin à vent de Khancharaf. La combinaison meule et roue éolienne a été finalement installée à l’été 2016 et nous sommes parvenus à moudre du blé au cours de la période où souffle le vent de 120 jours au Sistan.

Figure 8-42 : Fabrication du mécanisme technique pour le moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2016.

Figure 8-43 : Fabrication du mécanisme technique pour le moulin à vent n° 1 de Hozdar en 2016.

Figure 8-44 : Transport du mécanisme technique pour le moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2016.

Figure 8-45 : Préparation du moulin à vent n° 1 du Hozdar pour l'installation du mécanisme technique en 2016.

Figure 8-46 : Préparation du moulin à vent n° 1 du Hozdar pour l'installation du mécanisme technique en 2016.

Figure 8-47 : Préparation du moulin à vent n° 1 du Hozdar pour l'installation du mécanisme technique en 2016.

Figure 8-48: Préparation du moulin à vent n° 1 du Hozdar pour l'installation du mécanisme technique en 2016.

Figure 8-49 : Mise en fonction du mécanisme technique du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2016.

Figure 8-50 : Fin de l'installation du mécanisme technique du moulin à vent n° 1 du Hozdar en 2016.

Une caractéristique particulière de la meule des moulins à vent du Sistan

Comme nous l'avons expliqué, la meule du moulin à vent du Sistan, contrairement à celle du moulin à vent du Khorasan, n'est pas fabriquée en pierre. Comme dans cette région le terrain n'est pas montagneux et la distance entre les villages du Sistan est importante, le transport de meule vers le Sistan était autrefois impossible. La meule céramique est donc propre aux moulins à vent du Sistan. Selon nous, elle a été fabriquée dans la région grâce à un four spécial dont nous avons retrouvé un exemple à proximité du moulin à vent n° 1. Autour de ce four se trouvaient des morceaux de meules abandonnées du type Sistan.

Cette meule est moins résistante que celle fabriquée en granite ; elle se brise bien plus sous la pression de la roue éolienne. Elle est par ailleurs bien plus sensible à l'érosion que la meule en granite. La construction d'un four dans une région où se trouvent des moulins à vent semblait donc nécessaire. Nous pensons que l'existence de ce four, à coté du moulin à vent n° 1 du Hozdar, est un élément tangible appuyant notre hypothèse.

Nous pensons que le matériel et la méthode de fabrication de la meule au Sistan était très particulier et unique par rapport d'autres types de moulins à vent à axe vertical en Iran.

Figure 8-51 : Four pour la meule du moulin à vent n° 1 du Hozdar et morceaux de meules abandonnées.

Plan prospectif

Notre première tentative de mise en fonction d'un moulin à vent du Sistan dans le Hozdar est un succès. Nous avons pu moudre du grain comme les populations du Sistan autrefois. Cela dit, plusieurs questions restent en suspens. La première question concerne la forme, la taille et le matériau de la meule de ce type de moulin à vent. Pour en savoir plus, il faudrait mener un travail de recherche et d'expérimentation supplémentaires. Une autre question importante concernent la forme, la taille et d'autres détails de la roue éolienne propre au moulin du Sistan. Cette réflexion est d'autant plus cruciale qu'à la fin de l'été précédent, la roue éolienne du moulin à vent n° 1 du Hozdar a été brisée par les rafales du vent de 120 jours au Sistan.

Notre plan prospectif aura donc une problématique claire, axée sur trois points dont deux (le matériau de la meule et la position exacte de la roue éolienne dans sa chambre face au vent) sont communs à tous les moulins à vent de la région. Le troisième point de notre plan prospectif concernera le moulin à vent n° 1 : nous porterons notre attention sur sa roue éolienne détruite par le vent.

Nous avons déjà commencé à travailler sur ces trois axes. Notre analyse numérique sur les positions probables de la roue éolienne dans la chambre de la roue éolienne nous montre la place probable de cette roue dans le moulin à vent n° 2, notre prochain candidat à la réparation. Autre problème : comment augmenter la résistance de la roue éolienne du moulin à vent n° 1 face à la force du vent de 120 jours ? Comme nous le montrons sur les photos suivantes, nous avons essayé de remplacer l'axe de bois par un axe métallique entouré de pièces de bois afin d'augmenter la résistance de la roue éolienne du moulin à vent n° 1 du Hozdar.

Comme nous l'avons indiqué, selon une hypothèse, la meule du moulin à vent de type Sistan pourrait être fabriquée en céramique. Des recherches précises sur le matériau et sur le four prospéré de ce type de meule restent à mener. Ce travail recherche aura besoin de la collaboration de chimistes et d'ingénieurs pour fabriquer la meule de chacun des moulins à vent du Hozdar et du Sistan.

Le dossier d'enregistrement des moulins à vent d'Iran sur la liste du patrimoine mondial est en cours. Il nous faut restaurer les moulins à vent du Sistan pour les présenter aux examinateurs de l'Unesco, en espérant que ce patrimoine historique et culturel iranien sera accepté comme candidat à la nomination mondiale.

Figure 8-52 : Correction du système technique et test du nouveau mécanisme avant de l'installer à la place de la roue éolienne endommagée du moulin à vent n° 1.

Figure 8-53 : Détails du nouveau système du moulin à vent n° 1.

Conclusion

Une théorie sur l'origine et la diffusion du moulin à vent

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la géographie du monde iranien et la position du plateau iranien au Moyen-Orient donne une importance géopolitique unique à ce plateau qui, jusqu'à ce jour, a toujours été au centre de l'attention mondiale. L'attention qu'on a porté à l'Iran et sa position au centre du monde antique ont fait de cette zone géographique un pont civilisationnel reliant les extrémités de deux pôles, l'Orient et l'Occident. Ce pont et les populations qui y vivaient furent la source et la cause de la diffusion de plusieurs découvertes, dont la technologie du moulin, qui fut l'une des plus remarquables.

Les moulins de différents types (excepté le moulin à eau de Vitruve) sont connus des Iraniens depuis le premier siècle avant J.-C. Mais certains types de moulins, tels les moulins à vent, étaient géographiquement localisés en fonction des caractéristiques propres à chaque zone agricole du territoire ; ainsi seules certaines régions bien précises ont pu voir fonctionner certains types de moulins. L'installation d'un type moulin dans une région particulière réorganise la société agricole de cette région différemment autour de la question du blé et de la farine. Le plateau iranien est un plateau aride dont les points habitables sont connus depuis l'Antiquité. Pendant des siècles – et jusqu'à la période moderne – la taille des sociétés agricoles iraniennes fut limitée par le volume d'eau charrié par les qanâts (réseaux d'eau souterrains), par les rares rivières saisonnières ou apporté par les fontaines. Nous avons montré que le moulin à eau à axe vertical gréco-iranien fut inventé en Asie Mineure ou sur le plateau iranien vers le premier siècle avant notre ère. Il se diffuse cependant dans toutes les régions iraniennes qui bénéficient de ressources en eau, particulièrement dans les régions montagneuses du nord et de l'ouest. En fonction des sources d'eau utilisées, fontaines ou qanâts, la disposition des moulins à eau varie. Mais les moulins à eau fonctionnent toujours avec le même mécanisme technique. Ce mécanisme technique atteint un rendement de 5 à 15 %, ce qui est relativement faible mais suffisant pour les besoins de la société agricole villageoise.

Les principales plaines agricoles du plateau iranien étaient celles du Sistan et du Khuzestân. Elles bénéficiaient en effet des plus grands cours d'eau irrigant le plateau iranien, dont la rivière Hirmand, au Sistan, que nous avons présentée. Les sociétés agricoles de la plaine du Khuzestân utilisaient normalement deux types de moulins à eau, le moulin à eau à axe vertical et le moulin à eau flottant. Pour fonctionner, ces deux types de moulins à eau avaient besoin de cours d'eau situés en altitude et à débit considérable, des éléments inexistants sur la plaine du Sistan. Il est donc normal qu'il n'existe ni témoignage historique ni trace archéologique d'un système hydraulique comme le moulin à eau dans cette région. Les spécificités du milieu naturel du Sistan étaient problématiques pour une société agricole. Mais la région bénéficiait de caractéristiques climatiques autres, et notamment du vent fort des 120 jours. Le mécanisme du moulin à eau à axe vertical gréco-iranien donna l'idée, réalisable et unique, d'inventer un mécanisme basé sur la puissance du vent : le moulin à vent à axe vertical.

Nous avons montré précédemment que le moulin à eau à axe vertical existe sur le plateau iranien depuis le I^{er} siècle avant notre ère. L'utilisation de ce type du moulin à eau au nord du Sistan, dans la province du Khorasan, a permis aux habitants du Sistan de bien l'étudier avant de le modifier et d'utiliser son mécanisme technique pour un nouveau moulin. Depuis le troisième millénaire avant J.-C., le Sistan est un territoire fertile doté d'une culture agricole. D'après les découvertes archéologiques effectuées sur le célèbre site de Shahr-e Soukhte, au Sistan, la civilisation de la « Ville brulée » était comparable à la civilisation mésopotamienne : pendant des siècles, les habitants de cette ville ont eu une culture agricole. Depuis l'Antiquité, la plaine du Sistan a donc connu des périodes d'essor de la production agricole. Mais à cause du comportement de la rivière Hirmand et des périodes de guerre et d'instabilité, le Sistan a aussi connu plusieurs ruptures d'ordre socio-économiques, qui ont entraîné l'abandon de plusieurs zones du territoire. Au cours de l'histoire, le Sistan a joué plusieurs fois le rôle important de réservoir à grains de l'empire perse, notamment pendant les périodes arsacide et sassanide. C'est à la fin de la période ashkanide et au début de période sassanide que le Sistan acquiert une importance sans précédent non seulement sur le plan économique – et plus précisément en matière agricole –, mais aussi sur le plan politique grâce à sa société féodale

dont la famille la plus puissante porte le nom de Suren de Pahlav. Nous pensons que l'essor de la production agricole au Sistan eut deux effets : d'une part, elle imposa l'utilisation d'un type de moulin au rendement important et, d'autre part, elle entraîna l'apparition d'une famille féodale puissante comme les Suren de Pahlav. Une des raisons essentielles qui expliquerait le rôle déterminant joué par cette famille dans les dynasties arsacide et sassanide aurait été l'utilisation de la roue éolienne. Nous avons expliqué que la nature de la rivière Hirmand et du plateau du Sistan ne permettait d'irriguer que les terres proches du cours d'eau, voire au même niveau. C'est grâce à la roue éolienne que les cultivateurs du Sistan ont pu exploiter des terres situées plus loin ou en altitude. Puisque les eaux souterraines qui coulent sous le plateau du Sistan sont proches de la surface, les roues éoliennes puisaient facilement l'eau des puits, qui n'étaient eux-mêmes pas très profonds. L'extension de la surface cultivée sur le plateau du Sistan, rendue possible grâce à l'utilisation de la roue éolienne, donna à la famille féodale de Suren un pouvoir qui rivalisait avec celui des rois arsacide et sassanide. Sachant que cette roue éolienne est considérée comme une invention qui découle de celle du moulin à vent à axe vertical, nous pensons que c'est sûrement vers le deuxième siècle que le moulin à vent fut inventé sur le plateau du Sistan. Les découvertes archéologiques justifient cette hypothèse de datation socio-historique. Selon les travaux de l'archéologue Reza Mehrafarin qui portent sur les puits du plateau du Sistan, plusieurs puits situés assez loin de la rivière Hirmand étaient sûrement utilisés pour l'irrigation de terres agricoles par la roue éolienne. Selon lui, le puits de Tchah-e Khammak est un exemple de puits du II^{e} siècle qui bénéficiaient d'une roue éolienne pour l'irrigation. La datation archéologique faîte par Mehrafarin correspond à notre analyse concernant les raisons qui expliquent le renforcement du pouvoir de familles féodales du Sistan comme la famille Suren de Pahlav, la plus connue. Pour nous, il est maintenant évident que le moulin à vent est né au Sistan vers le II^{e} siècle et son mécanisme est le mécanisme modifié du moulin à eau à axe vertical.

Le mécanisme particulier du moulin à vent de premier type ne permit pas son utilisation hors du plateau du Sistan, malgré les efforts produits pour diffuser ce moulin à vent à axe vertical dans les pays orientaux et occidentaux. Selon nous, ce ne fut possible qu'après l'apparition du deuxième type de moulin à vent à axe

vertical, vers le XVI^{e} siècle, grâce aux progrès techniques et scientifiques sous les Séfévides ayant entraîné un changement de place de la chambre de la roue éolienne et de la chambre de la meule. Entre l'invasion arabe et l'annexion de l'Iran à l'empire islamique d'une part et l'arrivée de la dynastie des Séfévides d'autre part, l'Iran fut confronté à plusieurs vagues de chaos et de destruction socio-économique. Le Sistan devint presque inhabitable à la suite de l'attaque destructrice de Tamerlan, vers le XIV^{e} siècle. Ces vagues d'invasion ont naturellement considérablement affaibli les territoires iraniens sur le plan socio-économique, ont entraîné l'abandon de l'agriculture et la perte de savoir-faire. Il n'est donc pas anormal de constater un arrêt de l'évolution et du développement du moulin à vent pendant plusieurs siècles. Mais comme nous l'avons noté précédemment, avec l'arrivée des Séfévides et la reprise du développement agricole du pays, le Sistan est redevenu un producteur de grains majeur. Pour répondre à ce développement de la production agricole, l'ancien mécanisme du moulin à vent à axe vertical a été corrigé et développé dans une façon fondamentale, et après le changement de place de la chambre de la roue éolienne et de la chambre de la meule, le moulin à vent a démarré un nouveau rôle dans l'économie agricole de l'Iran.

D'autres indications permettent de justifier la date d'apparition du deuxième type de moulin à vent à axe vertical en Iran. Comme nous l'avons signalé, différents essais furent tentés pour diffuser le moulin à vent à axe vertical iranien hors du plateau du Sistan vers d'autres régions et pays, mais sans succès. Les historiens nous ont donné deux exemples. Premier exemple, celui du charpentier iranien Pirouz qui voulait construire un moulin à vent de premier type pour le deuxième calife musulman ; ses efforts n'aboutirent à aucun résultat mais son nom resta gravé dans l'histoire de l'Islam après l'assassinat du deuxième calife, Omar, au VII^{e} siècle. Deuxième exemple, celui de Gengis Khan, au XIII^{e} siècle, qui tenta de diffuser le moulin à vent et la roue éolienne en Chine ; la roue éolienne ne fut utilisée qu'au bord du fleuve Yang-Tsé, ce qui montre que, malgré l'intérêt des Mongols pour l'utilisation du moulin à vent à axe vertical, ce moulin à vent ne diffusait pas en Chine, contrairement à la roue éolienne.

D'après la seule illustration qu'il nous reste d'un moulin à vent du Sistan au XIII^{e} siècle, – dessin du géographe arabe Al-Dimashqi –, à cette date, le moulin

à vent de cette région n'avait connu qu'un développement primaire. Selon l'illustration présentée par le géographe, au XIII^{e} siècle, le changement de place de la chambre de la roue éolienne et de la chambre de la meule n'était pas encore effectué. Nous pouvons donc comprendre pourquoi un moulin à vent de ce type ne fut pas utilisé en Chine à cette époque. Il fallut attendre l'arrivée des Séfévides pour que le deuxième type de moulin à vent voie le jour, grâce au développement agricole du territoire.

Nous avons présenté un autre signe justifiant l'apparition du deuxième type de moulin à vent à axe vertical au XVI^{e} siècle : les illustrations de Fausto Veranzio, ingénieur vénitien du XVII^{e} siècle. Dans son livre *Machinae Novae*, Veranzio présente cinq prototypes de moulins à vent à axe vertical, clairement proches du moulin à vent à axe vertical iranien de deuxième type. Du fait des relations économiques étroites établies entre l'Iran et Venise depuis l'arrivée des Séfévides et des échanges qui s'opéraient *via* la Route de la soie, il ne serait pas étonnant qu'un ingénieur vénitien se soit inspiré d'inventions orientales. Nous pouvons donc dire, avec moins de doute, que c'est au XVI^{e} siècle, sous le règne des Séfévides, que le deuxième type de moulin à vent à axe vertical fut inventé, sachant que c'est aussi sous le règne de cette dynastie que l'Iran postislamique connut sa plus forte urbanisation et sa plus forte expansion commerciale.

Plus tard, un autre type de moulin à vent apparut, un type de moulin à vent « urbain » qui pouvait également fonctionner comme un mur protecteur face aux vents forts. C'est probablement au début du XVIII^{e} siècle que ce moulin à vent vit le jour, au nord du Sistan, avant de se diffuser dans la province du Khorasan. Nous avons découvert deux exemples de moulins à vent de deuxième type dans des villages situés à la périphérie de Hérat, qui nous ont orientés vers cette datation. Sachant que la région de Hérat fut, jusqu'au XVIII^{e} siècle, un territoire iranien, comment peut-on expliquer l'existence de deux types différents de moulin à vent à 150 kms l'un de l'autre alors que les moulins à vent du Khorasan sont similaires aux moulins à vent du nord du Sistan (particulièrement de la région de Nehbandan) à 457 kms les uns des autres ? Nous pensons que la seule raison qui puisse expliquer cette différence est la date à laquelle Hérat se sépare de l'Iran. Cette séparation débuta au début du XVIII^{e} siècle et s'acheva

en 1875 par le Traité de Paris qui consacra officiellement l'annexion de Hérat par l'Afghanistan. Depuis le XVIII^{e} siècle et jusqu'à la séparation officielle de Hérat de l'Iran, plusieurs conflits éclatèrent entre les autorités iraniennes et le gouverneur de Hérat, qui aboutirent à une rupture sociale entre les deux régions. Nous pensons qu'à cause de cette rupture, d'ordre social, la société agricole de Hérat n'utilisa pas le nouveau type de moulin à vent et les modifications morphologiques qui avaient été apportées au deuxième type de moulin à vent à axe vertical. Selon nous, le troisième type de moulin à vent à axe vertical apparut au début du XVIII^{e} siècle, au nord du Sistan, et fut cependant diffusé au Khorasan.

Le quatrième et dernier type de moulin à vent fut également inventé sur le plateau du Sistan, au milieu du XVIII^{e} siècle. Ce type de moulin à vent, avec ses murs modifiés et un déflecteur placé à l'entrée de son couloir à vent, est considéré comme le type le plus sophistiqué de moulin à vent à axe vertical. C'est un type très particulier que l'on trouve seulement dans la région de Hozdâr, au sud du Sistan. D'après des recherches archéologiques effectuées dans cette zone, la communauté agricole qui s'y était épanouie a soudainement interrompu ses activités à cause de la modification du bassin du Hirmand, vers la fin du XVIII^{e} siècle. Dans ses travaux de recherche sur le plateau du Sistan, Seyed Rasoul Mousavi Haji estime que le village séfévide fut abandonné vers la fin du XVIII^{e} siècle. Dans cette bourgade et à sa périphérie, nous pouvons noter l'existence de six moulins du quatrième type, les seuls exemples que nous ayons au Sistan. L'utilisation du moulin à vent à axe vertical s'est poursuivie à l'est de l'Iran jusqu'au XX^{e} siècle, mais à part de modernisation qui a fait marginaliser les appareille traditionnel de production de la farine, la Première guerre mondiale et la grande famine qui suivit obligea le gouvernement iranien à contrôler la production de blé et de farine. Tous les moulins privés furent alors exclus du processus de production de farine. La Première guerre mondiale et la stratégie du gouvernement iranien mit donc un terme à l'utilisation du moulin à vent en Iran. Il existe encore des chaînes de moulins à vent en état de marche au Khorasan, surtout dans les villages situés à la périphérie de la ville de Khâf, mais il est évident que cette invention clé de la civilisation humaine ne joue plus aucun rôle dans la société agricole iranienne, et particulièrement dans les régions

orientales de l'Iran, au Sistan et au Khorasan où le vent de 120 jours souffle encore puissamment.

Nous espérons que la théorie que nous souhaitons présenter maintenant est suffisamment cohérente pour expliquer avec clarté l'origine du moulin à vent à axe vertical et préciser la date d'apparition de chacun des types appartenant à cette famille de moulin, du II^{e} au XVIII^{e} siècle. Voici notre théorie sur le moulin à vent à axe vertical, autrement dit sur le moulin à vent persan :

« le moulin à vent à axe vertical est une machine liée au vent, une inspiration directe du moulin à eau à axe vertical. Cette machine fut inventée au II^{e} siècle au Sistan, une province économiquement et stratégiquement importante dans l'Iran antique. Dans le mécanisme technique de ce moulin, la roue à eau du moulin à eau se transforme en une grande roue éolienne qui s'installe à la même place que la roue à eau, c'est-à-dire au-dessous de la meule. Cette installation, problématique, limita l'utilisation du moulin à vent à axe vertical, qui ne se diffusa pas dans les régions situées hors de l'Iran et même dans toutes les régions iraniennes où souffle le vent de 120 jours comme dans la grande province du Khorasan. La roue éolienne destinée à l'irrigation fut inventée au moment où apparut le moulin à vent à axe vertical, vers le II^{e} siècle, au Sistan. Cette invention permit l'enrichissement sans précédent de familles féodales de la province. Plusieurs périodes de chaos et d'invasions bouleversèrent ensuite la situation socio-économique du Sistan. Résultat : depuis l'apparition de cette machine jusqu'au XVI^{e} siècle, le seul type de moulin à vent visible dans la région était celui dont la chambre de la roue éolienne se situait au-dessus de la chambre de la meule. Ce type de moulin ne pouvait pas se diffuser hors du plateau du Sistan à cause de son mécanisme technique particulier. Au XVI^{e} siècle, une puissante dynastie parvint au pouvoir, les Séfévides, qui centralisèrent à nouveau le pouvoir. C'est essentiellement cette centralisation qui explique la période d'épanouissement commercial, architectural et agricole que connut l'Iran à l'époque. Un deuxième type de moulin à vent apparut au cours de cette période. Grâce au changement de place de la roue éolienne et de la meule, il put fonctionner en dehors du plateau du Sistan. Une correction technique sur l'axe rotatif du moulin permit cette correction déterminante dans le mécanisme technique de ce moulin à vent. A partir de cette date, le moulin à vent à axe

vertical se diffuse au Khorasan et à Hérat. La diffusion de ce type de moulin à vent et le besoin d'adapter la morphologie de la machine à différentes situations climatiques et géographiques locales entraînèrent l'apparition de deux autres types de moulins : le troisième type, adapté au climat du nord du Sistan, et que l'on peut trouver aujourd'hui dans la ville de Nehbandan, et le quatrième type, adapté à la situation climatique du sud du Sistan, et que l'on peut encore trouver dans la région de Hozdâr. Les troisième et quatrième types sont apparus au XVIII^{e} siècle. Le moulin à vent du troisième type peut être lié, telle une chaîne, à d'autres moulins, protégeant ainsi la ville des vents forts. Le quatrième type, morphologiquement très évolué, permet d'utiliser le vent de manière optimale : il est muni d'un déflecteur entre deux ouvertures face au vent pour augmenter son rendement. L'ère du moulin à vent en Iran s'achève officiellement en 1936 par la création d'une organisation gouvernementale destinée à contrôler et à diffuser la production de blé et de farine. »

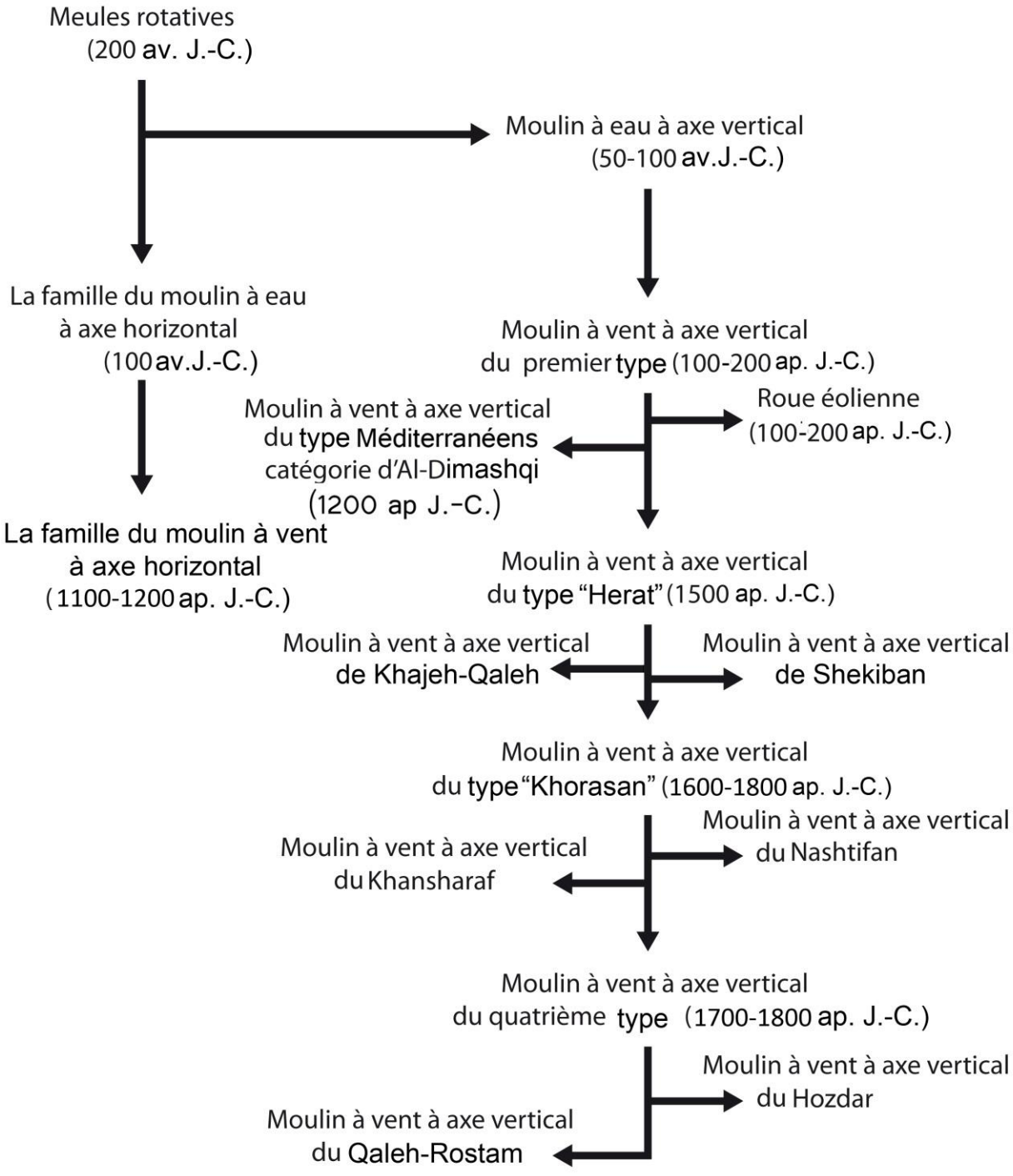


Tableau 1 : chronologie des moulins à vent à axe vertical iraniens selon nos recherches.

Moulin à vent comme un des premières machines et un des premiers bâtiments industriels

Dans cette thèse, nous nous sommes surtout penchés sur l'histoire du moulin à vent à axe vertical. Mais dans la partie consacrée à sa diffusion, nous nous sommes efforcés de déterminer le chemin qu'a pu emprunter cette invention clé de l'Iran et de l'empire islamique de cette époque en direction de l'Europe. En nous appuyant sur les hypothèses de Hanse Wolf, Maurice Dumas et Lynn White, nous sommes parvenus à esquisser une hypothèse alternative sur la diffusion du moulin à vent en Europe et en particulier sur l'origine des moulins à vent européens à axe horizontal.

Nous avons défendu la thèse selon laquelle le moulin à vent à axe vertical bâti selon les mêmes concepts que le moulin à vent du Sistan s'est diffusé à travers la mer Méditerranée jusqu'en Sicile. La carrière qui fournissait la pierre nécessaire aux moulins à vent persans et à laquelle Al-Idrisi fait référence dans son livre montre que ce type de moulin à vent existait dans le Royaume normand de Sicile au XII^{e} siècle. Nous avons observé le dessin d'Al-Dimashqi et montré qu'il y avait probablement des différences avec le concept original des moulins à vent de Sistan de l'époque. Avec ces éléments, nous avançons l'idée selon laquelle le type de moulin à vent présenté par le géographe arabe est un type particulier de moulin à vent à axe vertical qui s'est diffusé sur la côte méditerranéenne et qui est très probablement arrivé en Sicile vers le XII^{e} siècle.

Nous partageons l'idée de Hanse Wolf et Maurice Dumas sur la diffusion transméditerranéenne du moulin à vent mais nous ajoutons des éléments à leur hypothèse initiale. Selon nous, c'est la Sicile et les Normands qui ont joué le rôle principal dans la diffusion du moulin à vent en Europe. Nous défendons la thèse selon laquelle les Normands apportèrent le savoir-faire du moulin à vent à axe vertical en Normandie et en Angleterre. Pour nous, le transfert immédiat du savoir-faire du moulin à vent vers les territoires contrôlés par les Normands comme la Normandie, l'Angleterre et Antioche s'est d'abord fait pour des raisons agricoles puis pour des motifs de stratégie militaire. Nous pensons que c'est à cause de la moindre puissance du vent sur les côtes nord de

l'Europe par rapport au bassin méditerranéen et surtout par rapport au Sistan que le concept arrivé en Sicile n'a pas bien fonctionné. Le besoin urgent d'utiliser cette machine encouragea les habitants de la région à adapter la technologie importée au climat local et à la situation du territoire d'accueil. Par ailleurs, le rendement du moulin à vent à axe vertical n'était pas suffisant pour les besoins agricoles de l'Europe de l'époque. Le rendement d'un moulin à vent à axe vertical est égal ou légèrement supérieur à celui d'un moulin à eau à axe horizontal de type Vitruve. Il est donc très probable que l'urgence ait poussé les habitants à utiliser un système déjà connu, le moulin à eau de Vitruve, et de l'équiper d'une roue éolienne qu'ils ont installée à la place de la roue à eau. Très simplement donc, l'arrivée du moulin à vent persan au nord de l'Europe et le problème d'adaptation de ce mécanisme à la situation climatique de la région a donné naissance à un nouveau type de moulin à vent dont le fonctionnement était basé sur le mécanisme du moulin à eau de Vitruve. Ce nouveau type de moulin à vent s'est rapidement diffusé dans tous les territoires normands : en Angleterre, en Normandie et jusqu'à Antioche. Un peu plus tard, la technologie a conquis l'Europe : les Pays-Bas en 1190, l'Allemagne en 1222, le Danemark en 1259 et la Pologne au XIV^{e} siècle[162].

Autre raison pouvant expliquer la diffusion rapide de cette invention technique : le besoin urgent qu'avait l'Europe de l'époque, qui connaissait un développement socio-économique rapide, de trouver de nouvelles sources d'énergie.

« Entre le VII^{e} et le X^{e} siècle, l'Occident acquit sa suprématie en ayant une agriculture plus productive et en développant des techniques militaires supérieures »[163].

Le moulin à vent apparaît donc comme une solution pour pallier le manque de puissantes sources d'énergie. Par ailleurs, au cours de la même période, les rivalités de pouvoir entre puissances européennes s'intensifient. Or la stratégie militaire doit tenir compte des sources d'énergie à utiliser dans différentes situations de guerre, et en particulier en situation de siège :

« Les moulins à vent prirent une importance stratégique car on édifiait rarement les châteaux forts directement au bord des rivières ou des fleuves ; de nombreux moulins à

---

[162]- **(en) GIPE, Paul,** *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & sons, New York, 1995.p118

[163]- **WHITE, Lynn**. « *Histoire de machines* », Edition française de Scientific American, Paris, 1980, p 53

vent furent ainsi installés dans les forteresses seigneuriales pour produire de la farine même en temps de siège. »[164]

Les termes « machine » ou « moteur » furent parfois utilisés pour le moulin à eau et pour certaines autres inventions techniques de l'Antiquité, mais c'est probablement le moulin à vent qui peut être considéré comme la première machine de notre ère. La raison la plus évidente est la suivante : le moulin à vent démocratisa l'utilisation de l'énergie en Europe bien avant l'énergie hydraulique, qui était la propriété des grands seigneurs féodaux. Par ailleurs, l'installation d'un moulin à eau coûtait normalement plus cher que l'installation d'un moulin à vent. Il fallait en effet un barrage, des canalisations et d'autres éléments techniques :

« Le moulin à eau à axe horizontal a été cher à construit, surtout pour installation les infrastructures nécessaires comme le barrage et les canalisations il y avait besoin d'une fortune. »[165]

Dans les plaines, où les sites qui permettaient l'implantation de moulins à eau étaient rares, le moulin à vent apporta une nouvelle source d'énergie mécanique, d'une valeur inestimable. Dans aucune autre société la présence permanente de tels engins à moteur ne devait susciter autant de progrès mécaniques. Le moulin à vent constitue non seulement une nouvelle source d'énergie, mais aussi l'un des fondements sur lesquels s'est édifiée la culture technologique de la civilisation contemporaine, en particulier la civilisation occidentale.

« Comme la voile libéra les esclaves des galères qui naviguaient en mer Méditerranée, la diffusion des moulins à vent dans les campagnes anglaises au XII^{e} siècle plaça le pouvoir entre les mains de personnes qui en étaient autrefois dépourvu et libéra les femmes du travail qui consistait à moudre le grain à la main. Au XII^{e} siècle comme aujourd'hui, l'obstacle essentiel au développement de l'énergie du vent n'était pas les limites que présentaient la technologie mais la résistance de ceux qui avaient beaucoup à perdre. Le terrain, les forêts, l'eau étaient la propriété des féodaux. Mais ils ne pouvaient mettre la main sur le vent. L'Eglise et les seigneurs féodaux avaient peur de perdre leur

---

[164]- *ibid*, p 51

[165]- **(en) REYNOLDS, Terry S.,** «*Stronger Than a Hundred Men*: *A History of The Vertical Water Wheel*», John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, 1983. pp.5-6

lucratif droit de mouture au profit de roturiers qui pouvaient profiter de la gratuité de la puissance du vent. Selon les historiens, le moulin à vent a fourni une technologie pour la « libération de la théologie » de l'époque et les dévots s'en sont allés prêcher la bonne parole. Cette technologie s'est enracinée à une époque de rébellion contre la tyrannie des monopoles féodaux. Pour un entrepreneur, le vent avait plus d'un avantage : il y avait plus de sites disponibles pour les moulins à vent que pour les moulins à eau et les utilisateurs n'étaient pas liés aux cours d'eau sur lesquels la plupart des sites de choix avaient déjà été pris. Le moindre coût d'un moulin à vent par rapport à un moulin à eau encouragea sa diffusion, à une époque où la population urbaine en augmentation avait besoin d'une nouvelle source d'énergie. Pour Jaap de Blecourt, l'utilisation des moulins à vent a fait entrer les Pays-Bas dans un âge d'or. Les moulins à vent sont « assortis » au paysage rural hollandais parce qu'ils sont *la* source d'énergie disponible au cours du XVII^{e} siècle. La remarque de Belcourt rejoint la perception commune des Hollandais : les moulins à vent appartiennent au paysage de la Hollande au point que nous ne pouvons imaginer le paysage sans eux. C'est seulement avec l'énergie du vent que les polders ont pu être drainés et que les Pays-Bas sont devenus tels qu'on les connaît aujourd'hui. Dès 1850, quasiment 90 % de l'énergie utilisée dans l'industrie de la Hollande était fournie par le vent. Les 700 moulins à vent installés dans le district de Zaan, au nord d'Amsterdam, constituaient le cœur de ce qui deviendra le centre manufacturier du pays. En 1896, en pleine révolution industrielle, le vent pompait encore 41 % des polders des Pays-Bas »[166].

L'ensemble des effets produits par l'utilisation massive du moulin à vent en Europe entre les XII^{e} et XVII^{e} siècles nous permet de qualifier cette invention de première machine du monde. N'oublions pas qu'une vraie machine est d'abord être un mécanisme qui peut transformer une source d'énergie en une autre pour effectuer un travail. Elle doit par ailleurs être accessible à la grande majorité de la population ce qui, selon nous, est le cas du moulin à vent.

Dans certains pays comme les Pays-Bas, le moulin à vent – premier bâtiment industriel – a fourni l'énergie nécessaire à diverses activités industrielles. C'est seulement après l'apparition de la machine à vapeur que le moulin à vent a joué un rôle moins important

dans la société européenne. N'oublions pas que même la machine à vapeur de James Watt a utilisé le mécanisme technique du moulin à vent, ce qui montre que la technologie de l'ère préindustrielle et celle de l'ère industrielle s'enchaînent. A l'aube de l'émergence des premières usines, c'était les espaces extensionnels des moulins à vent qui étaient utilisés pour la production de différents articles. Selon nous, ils peuvent être considérés comme les premiers bâtiments industriels.

Annex

Moulins à vent No 2 du Hozdar

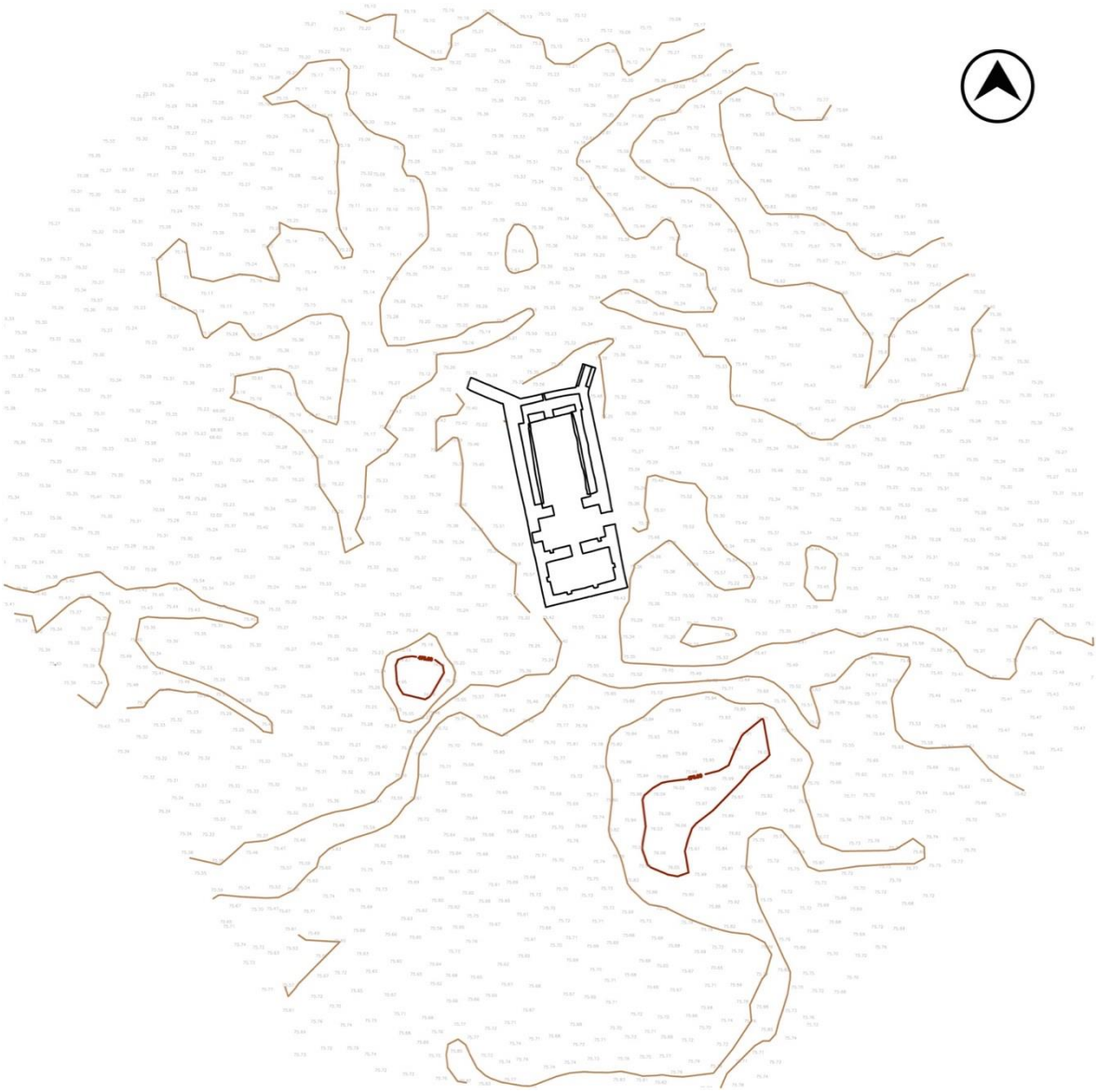


Figure 1: Localisation de moulin à vent No 2 du Hozdar dans la topographie de site, Source : OHAT

Figure 2: Façade nord de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

.

Figure 3: Façade nord-est de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 4: Façade est de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 4: Façade sud de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 5: Façade ouest de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 6: Façade nord-ouest de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 7: Photo extérieur de déflecteur de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

.

Figure 8: Photo intérieur de déflecteur de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 9: Photo intérieur de déflecteur et les murs périphériques de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 10: Photo intérieur de l’espace intérieure et la dôme détruite de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2004

Figure 10: Façade nord de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Figure 11: Façade nord-est de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Figure 12: Façade est de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Figure 13: Façade sud de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Figure 14: Photo intérieur de chambre éolienne de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Figure 15: Photo intérieur de déflecteur de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Figure 16: Photo de détails constructives dans l’espace intérieure de moulin à vent No 2 du Hozdar en 2016

Scan Laser de Moulins à vent No 2 du Hozdar

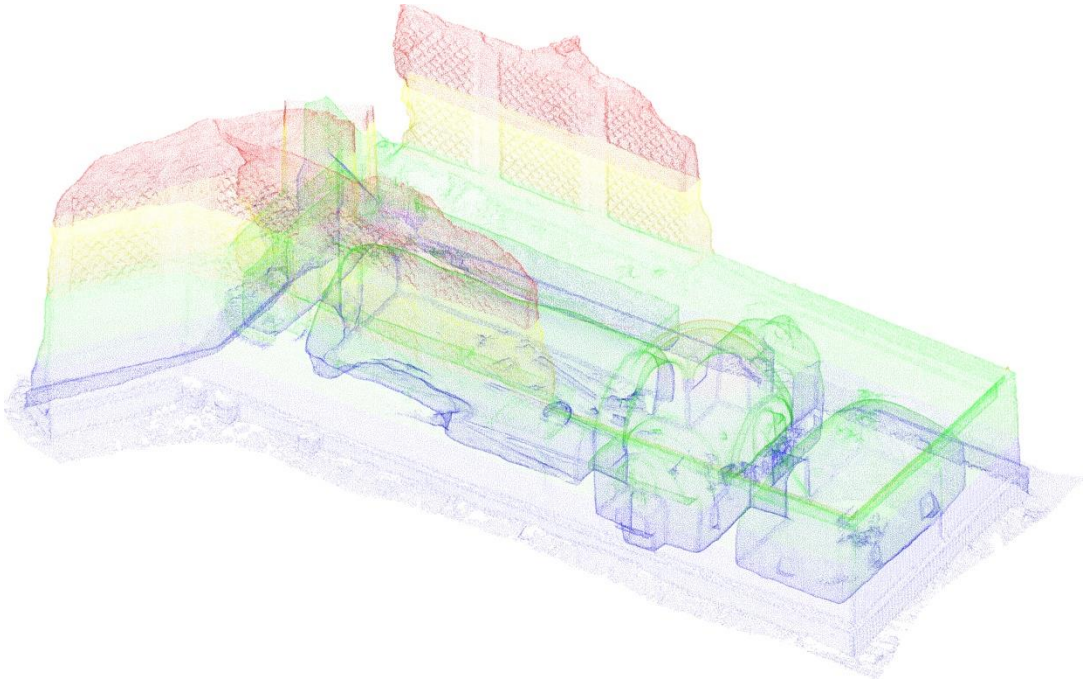


Figure 17: Scan laser de volume sud-ouest de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

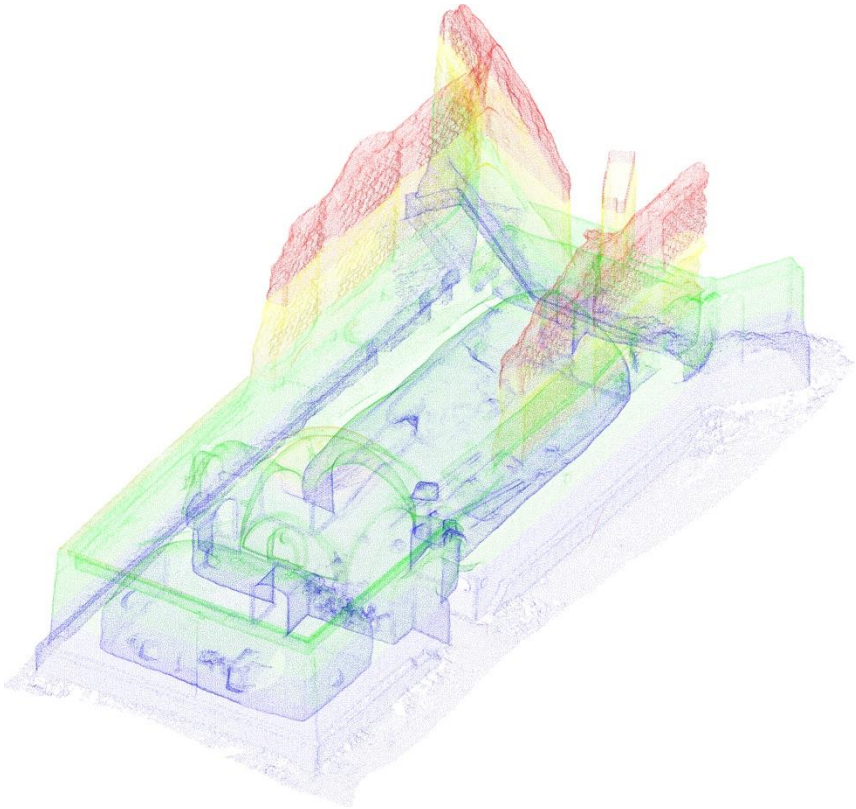


Figure 18: Scan laser de volume sud-est de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

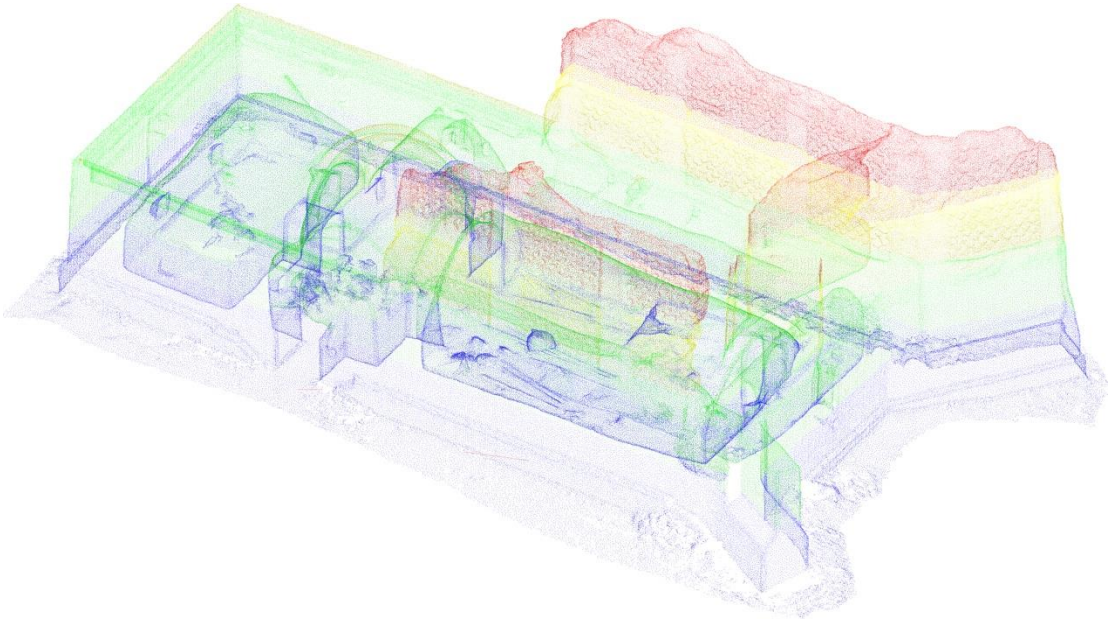


Figure 19: Scan laser de volume nord-est de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

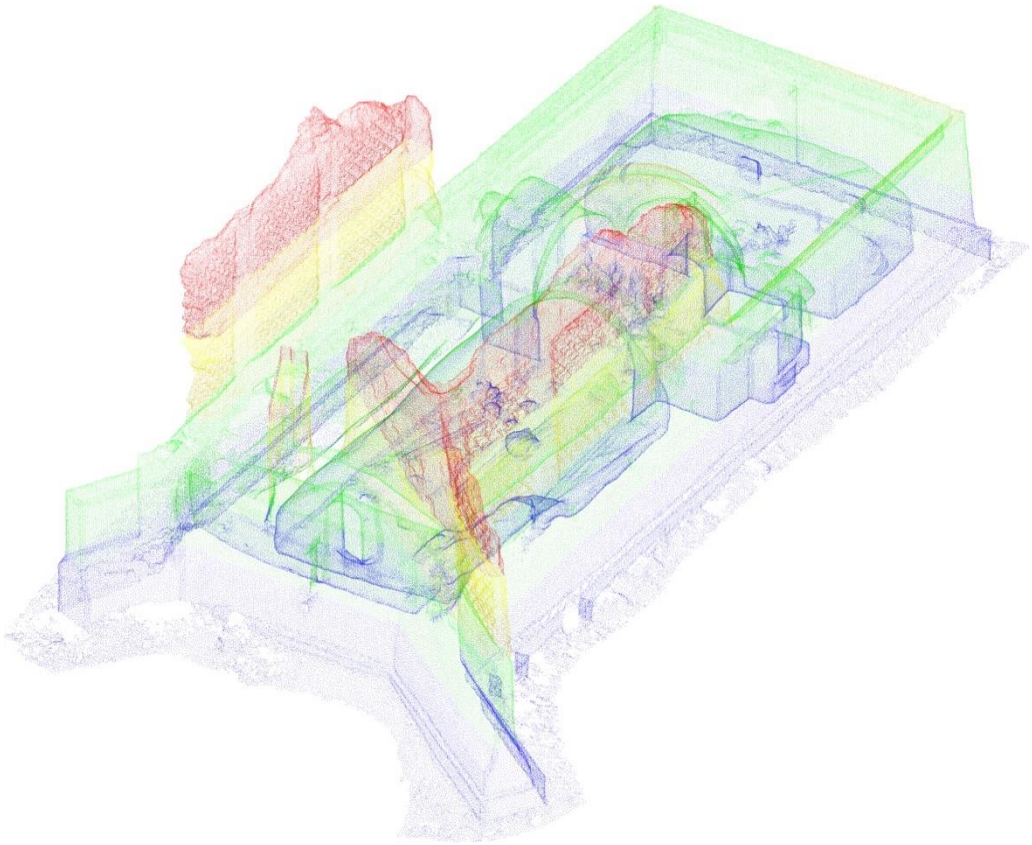


Figure 19: Scan laser de volume nord-ouest de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

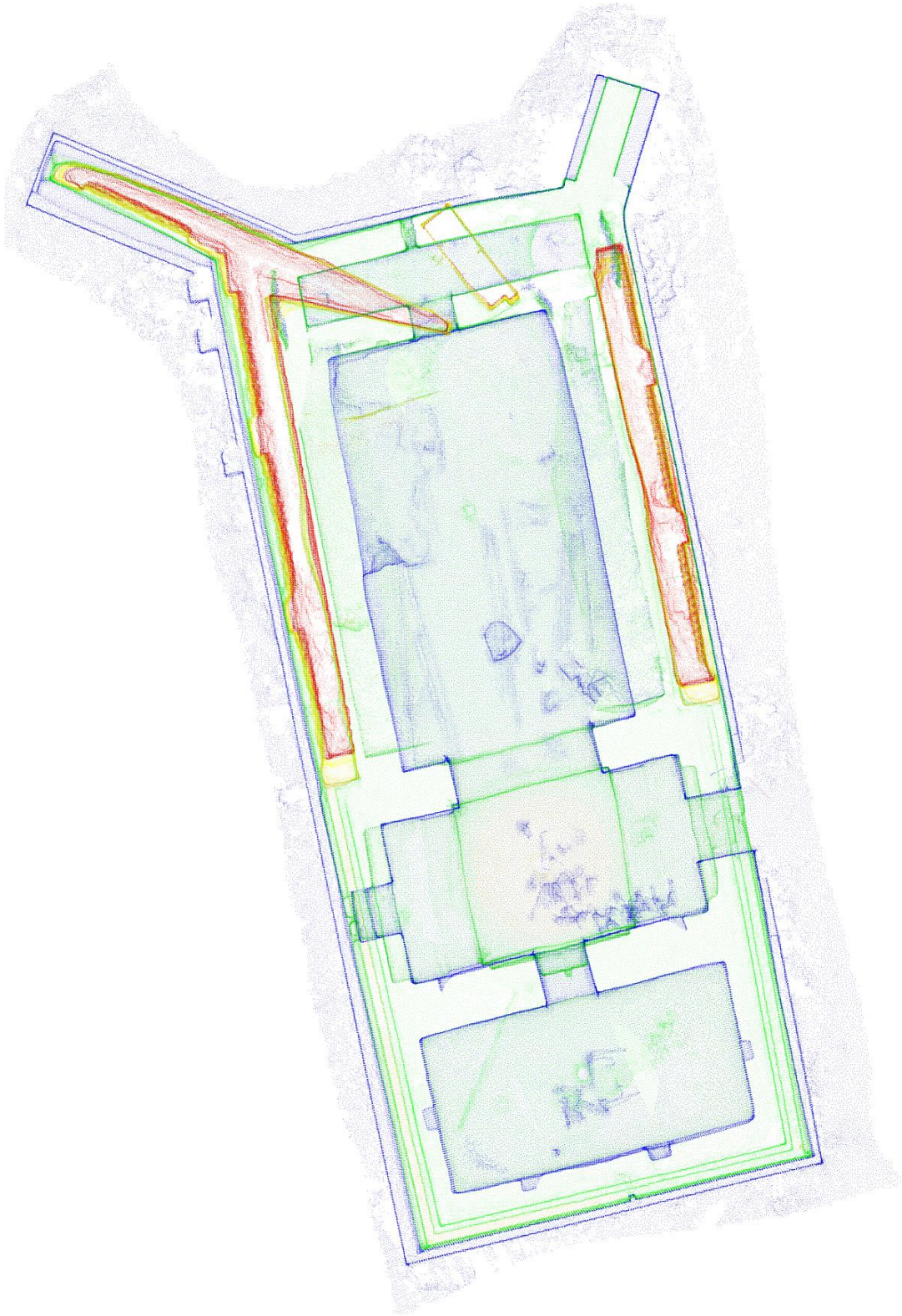


Figure 20: Scan laser de plan de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

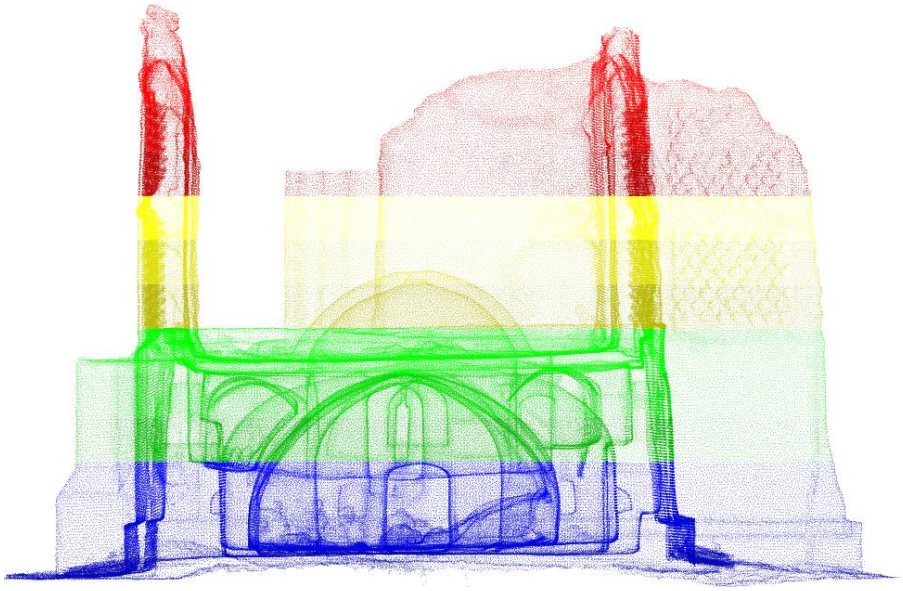


Figure 21: Scan laser de façade nord de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

.

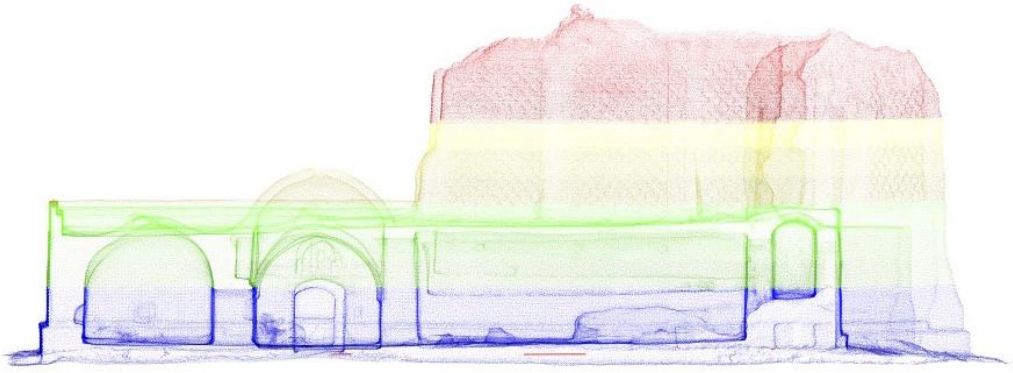


Figure 22: Scan laser de façade est de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

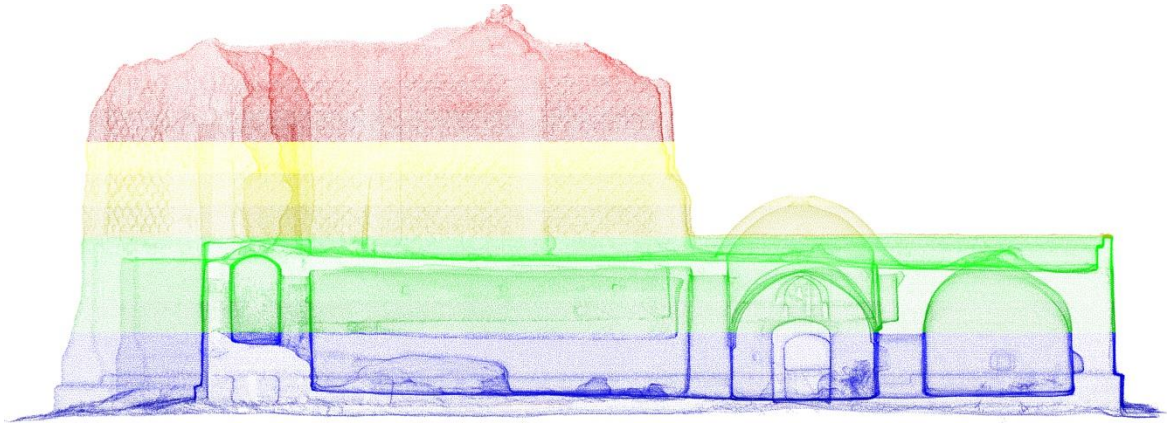


Figure 23: Scan laser de façade ouest de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

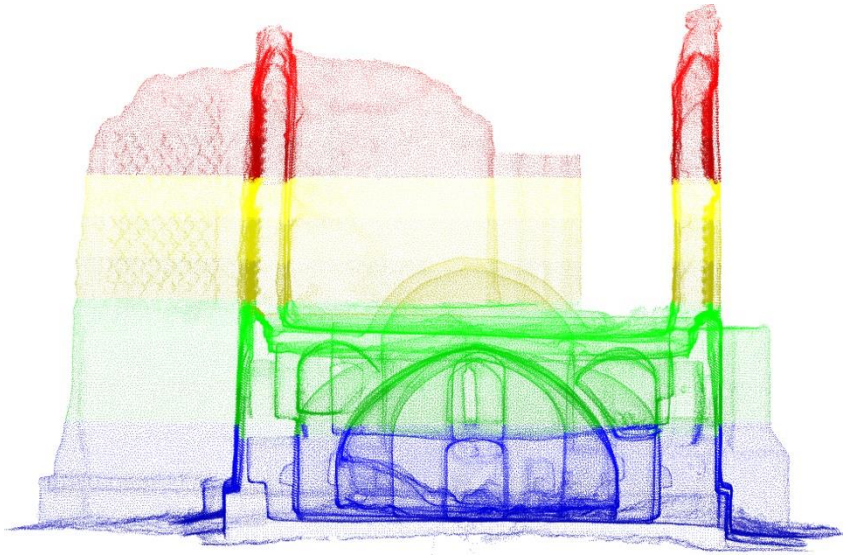


Figure 24: Scan laser de façade sud de moulin à vent No 2 du Hozdar, Source : OHAT

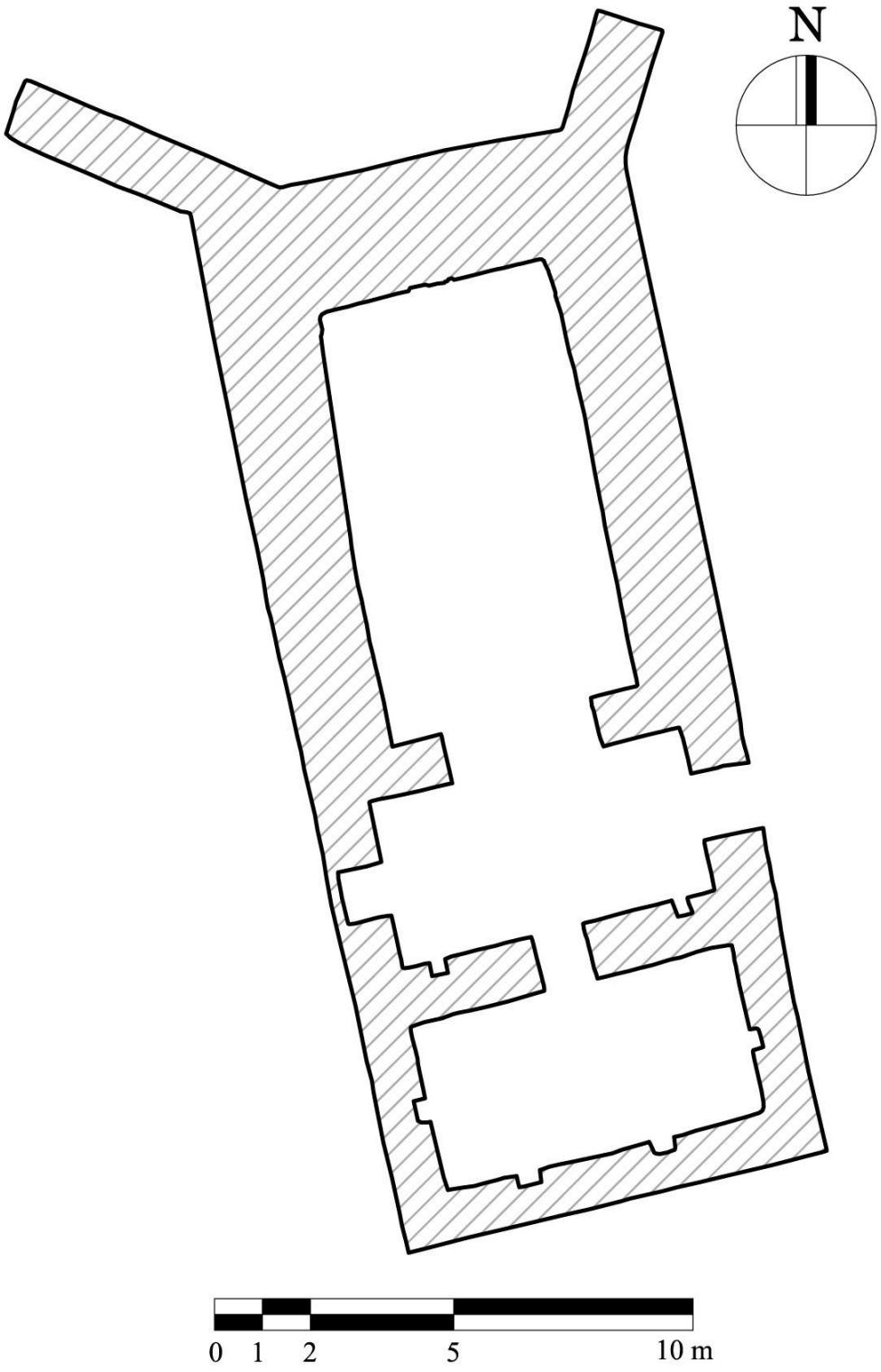


Figure 25: Plan RDC de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

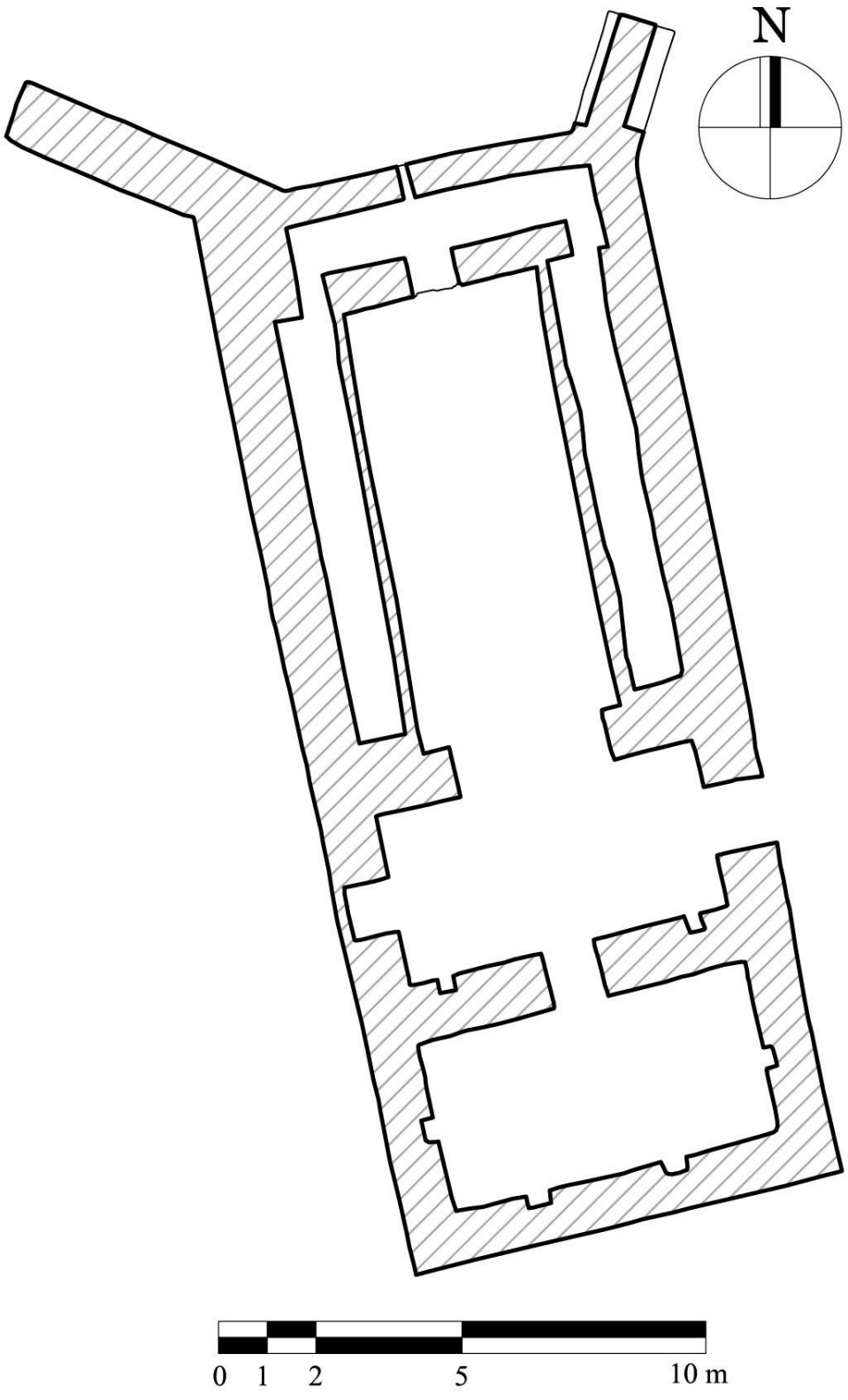


Figure 26: Plan RDC en hauteur de 2 mètre de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

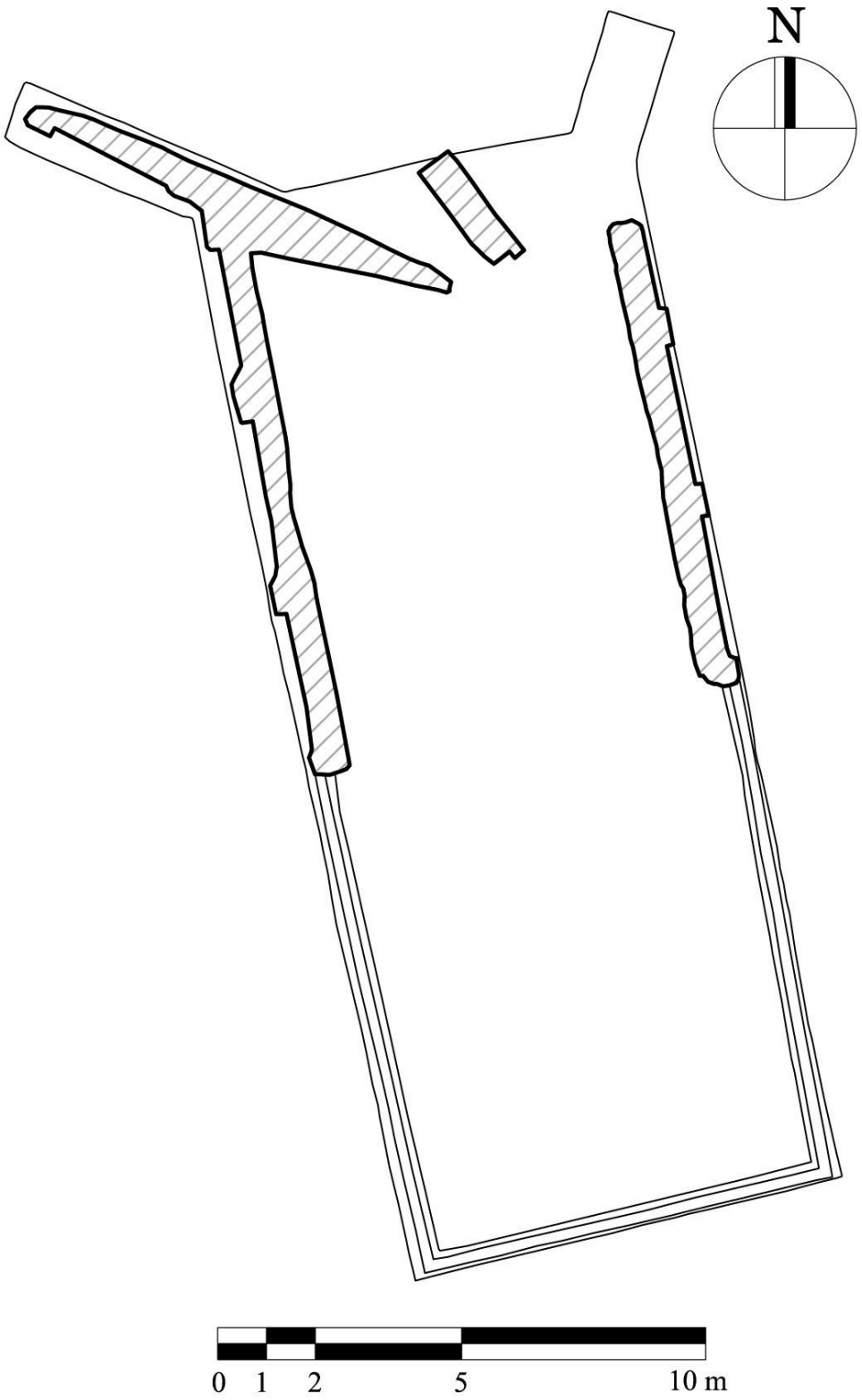


Figure 27: Plan de la chambre d'éolien de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

.

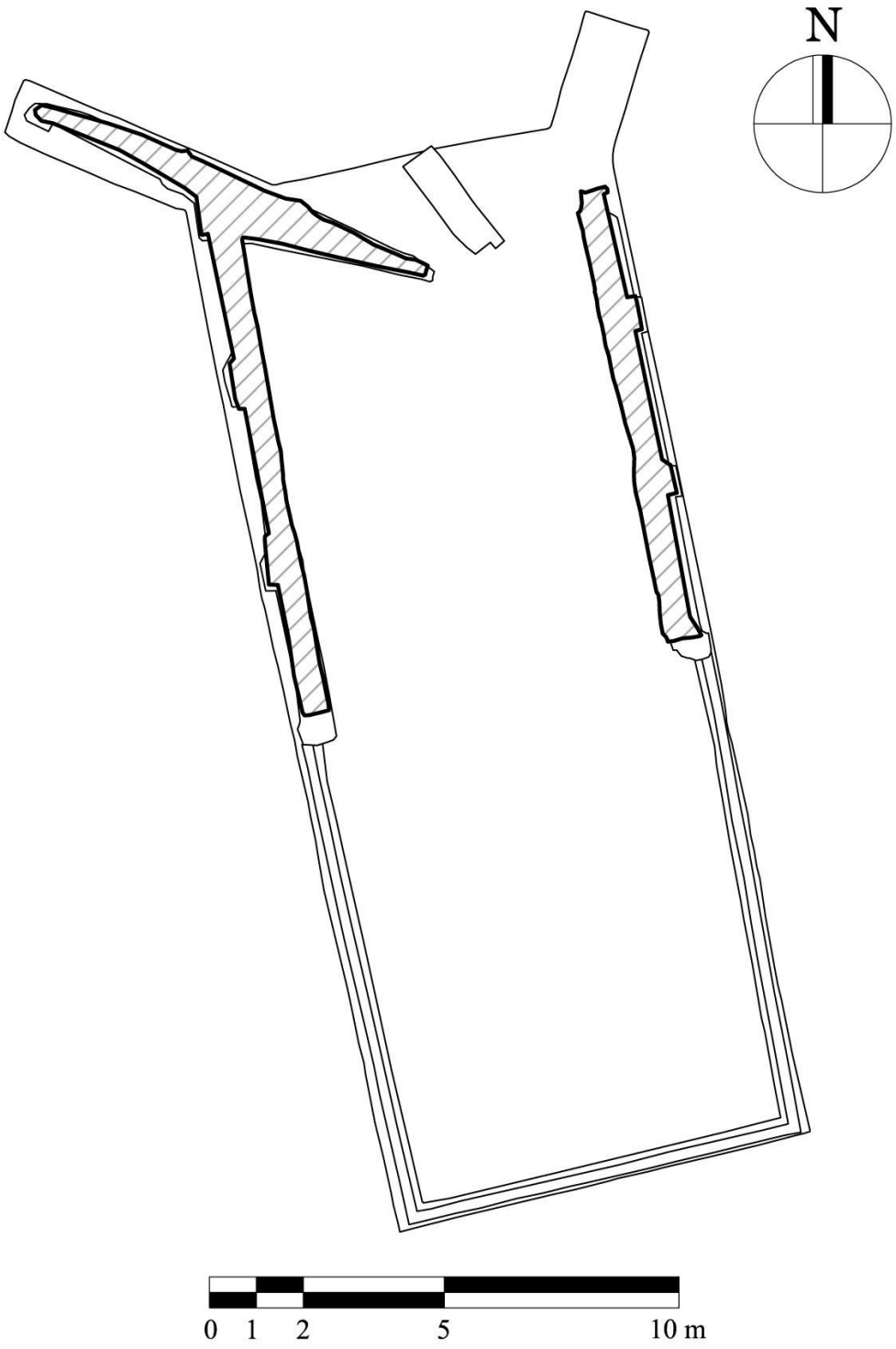


Figure 27: Plan en hauteur de 2 mètre de la chambre d'éolien de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

.

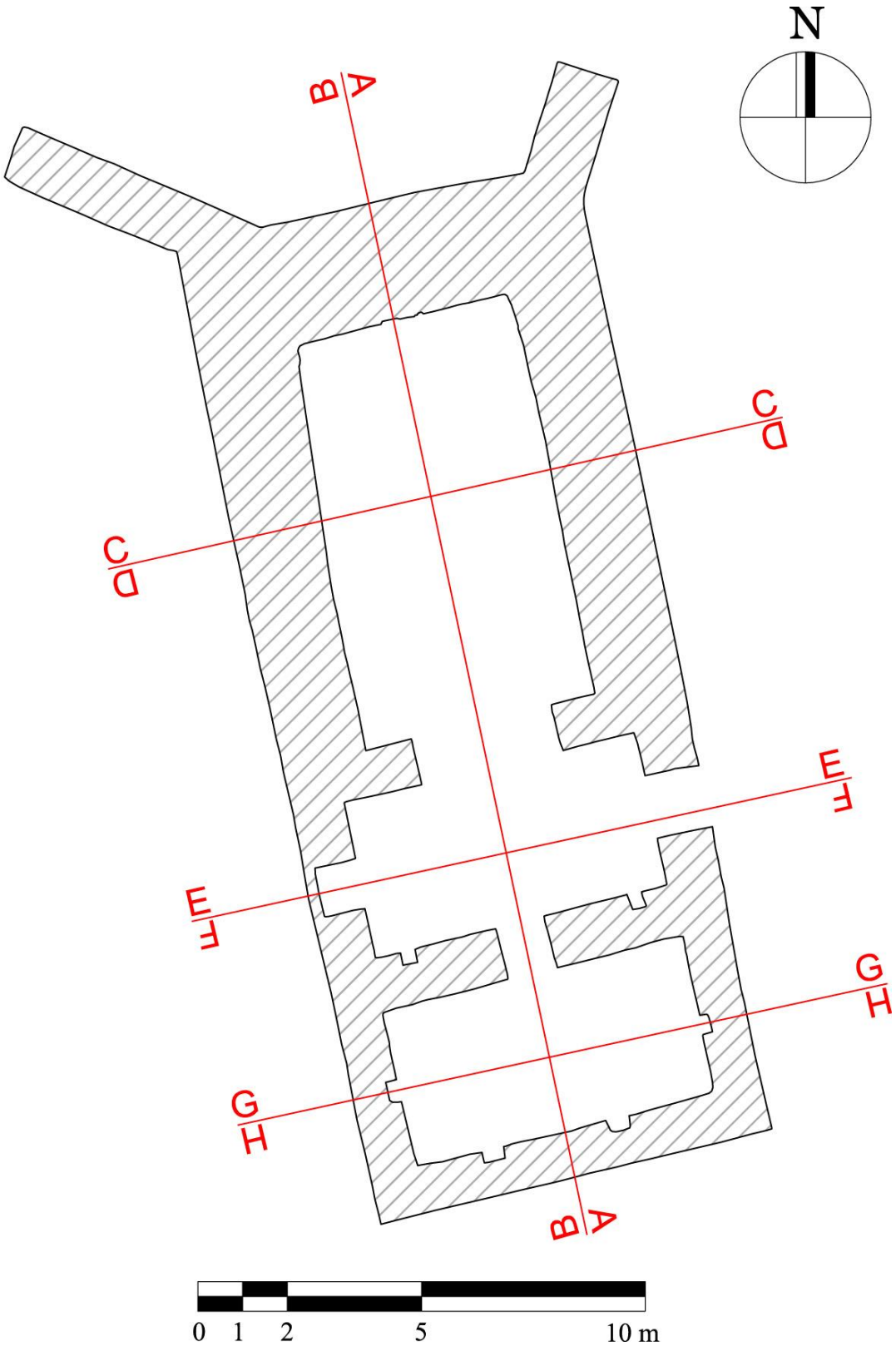


Figure 28: Plan et les lignes de coupe de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

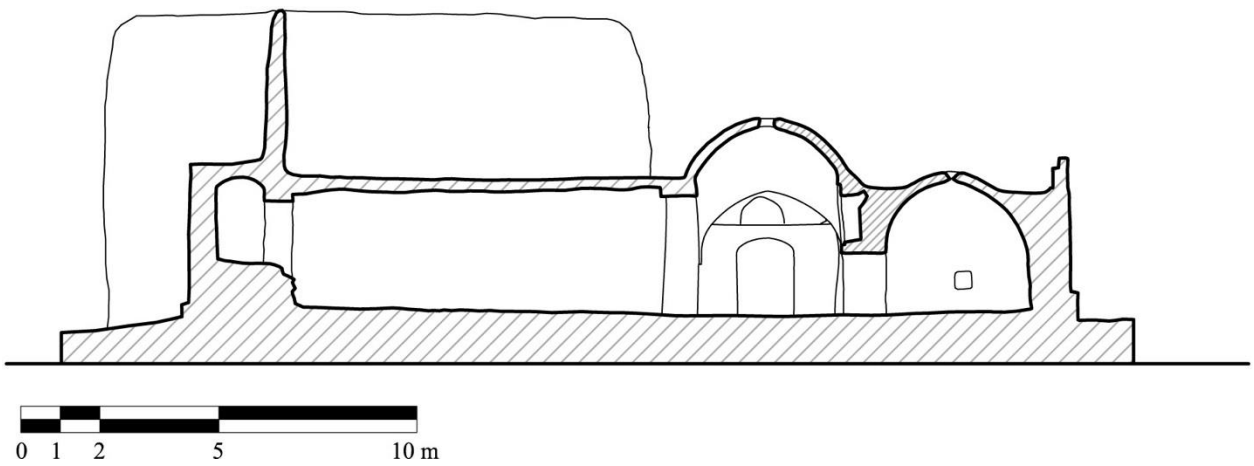


Figure 29: Coupe A-A de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

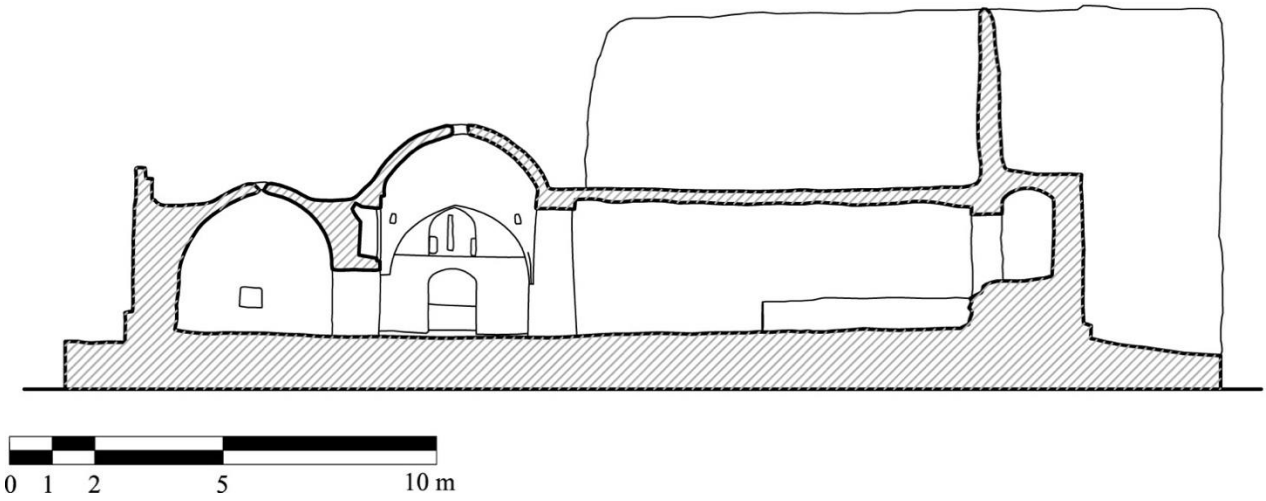


Figure 30: Coupe B-B de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

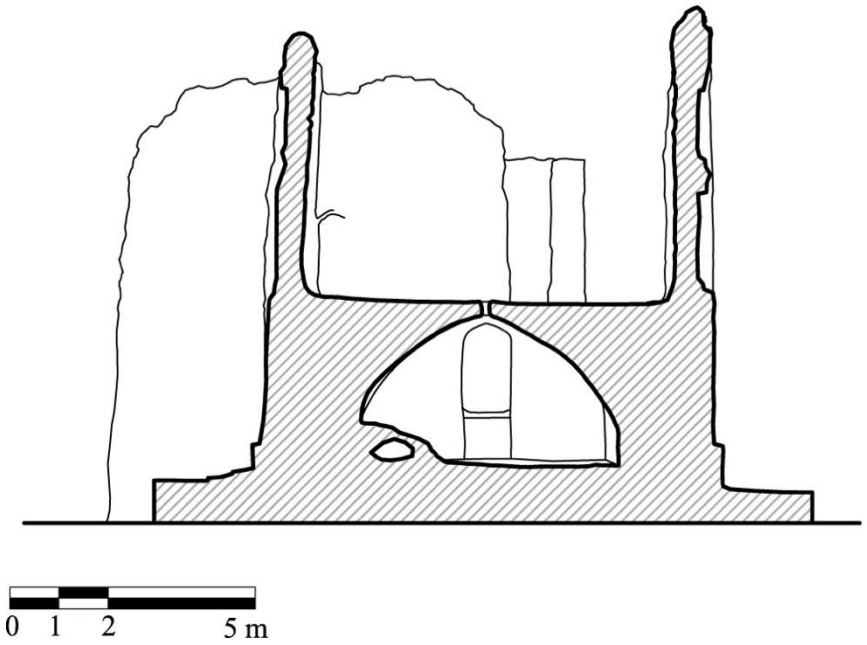


Figure 31: Coupe C-C de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

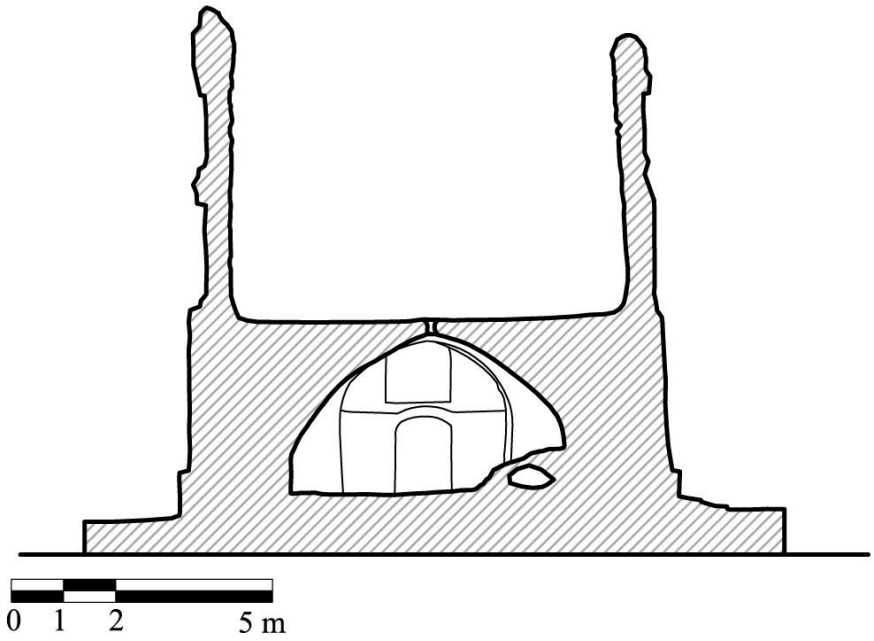


Figure 32: Coupe D-D de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

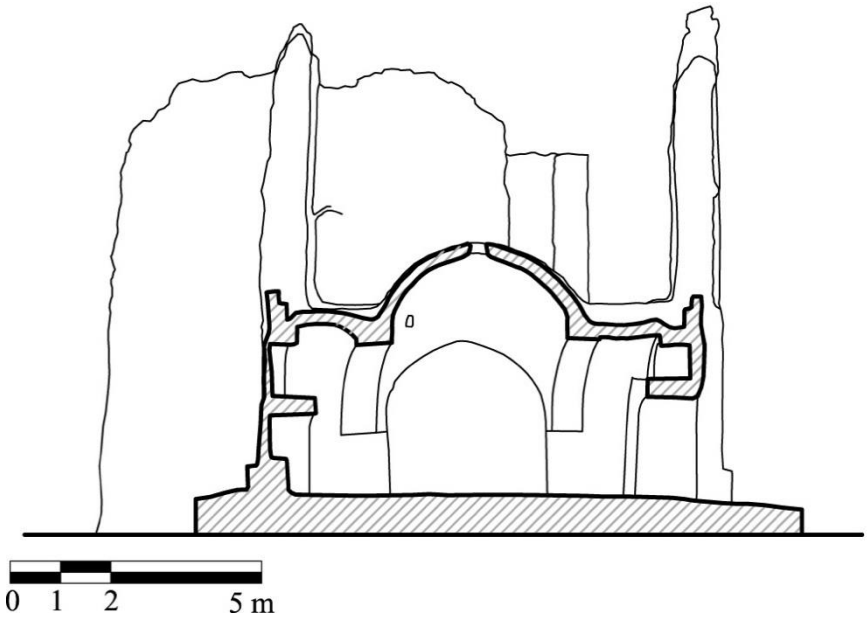


Figure 33: Coupe E-E de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

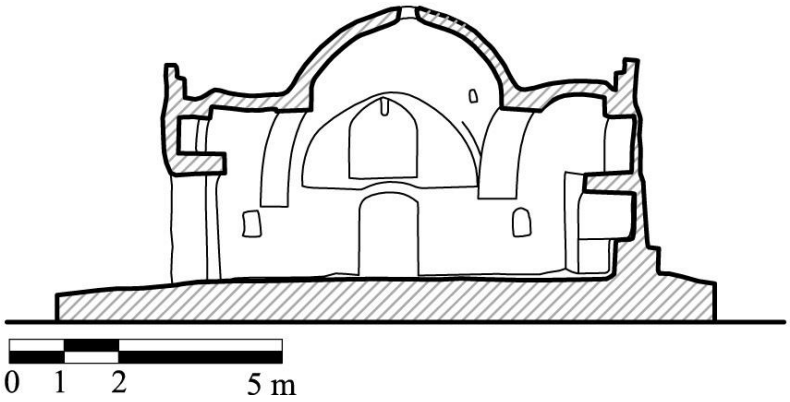


Figure 34: Coupe F-F de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

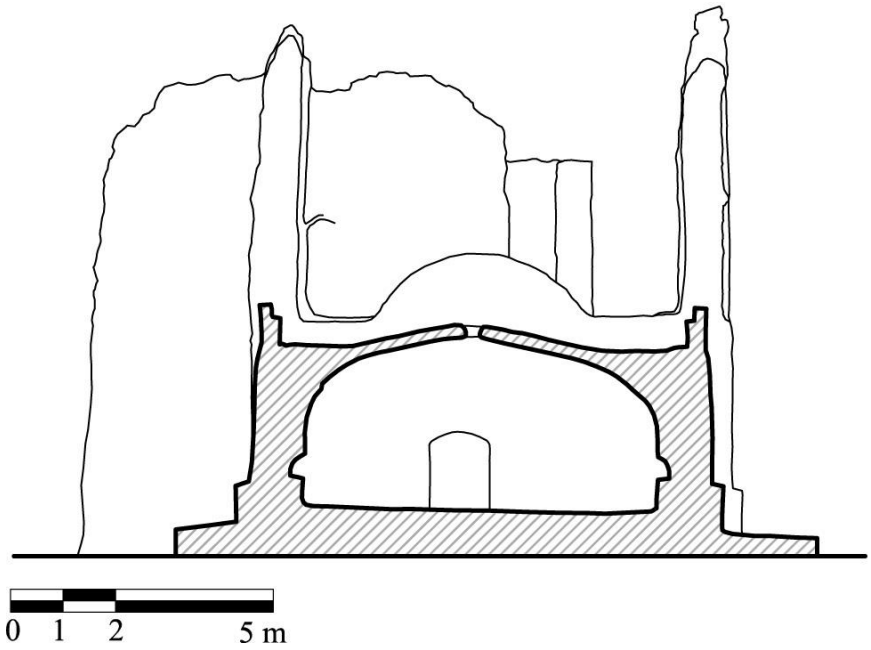


Figure 34: Coupe G-G de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

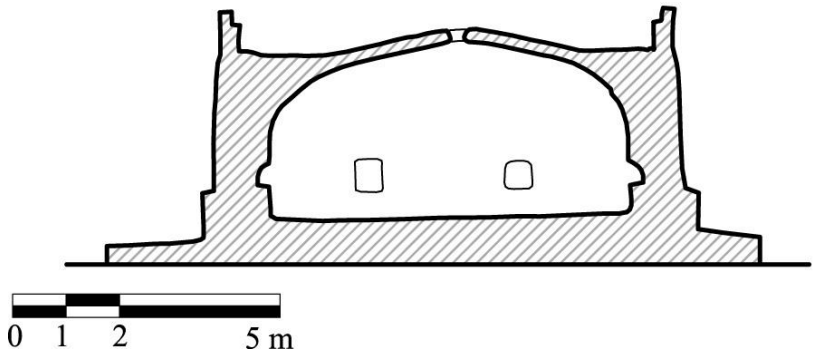


Figure 35: Coupe H-H de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

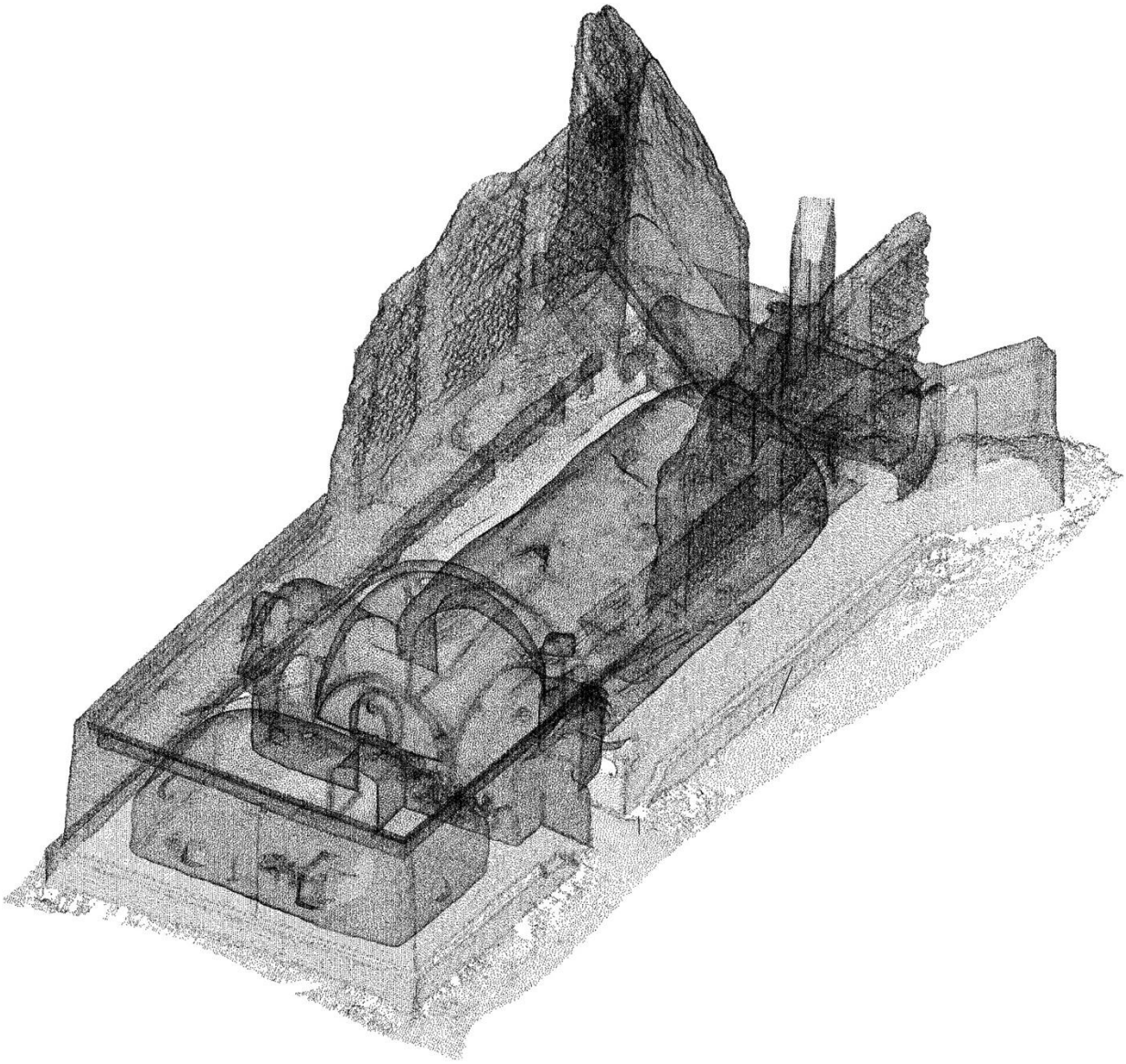


Figure 36: Perspective de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

Moulins à vent No 3 du Hozdar

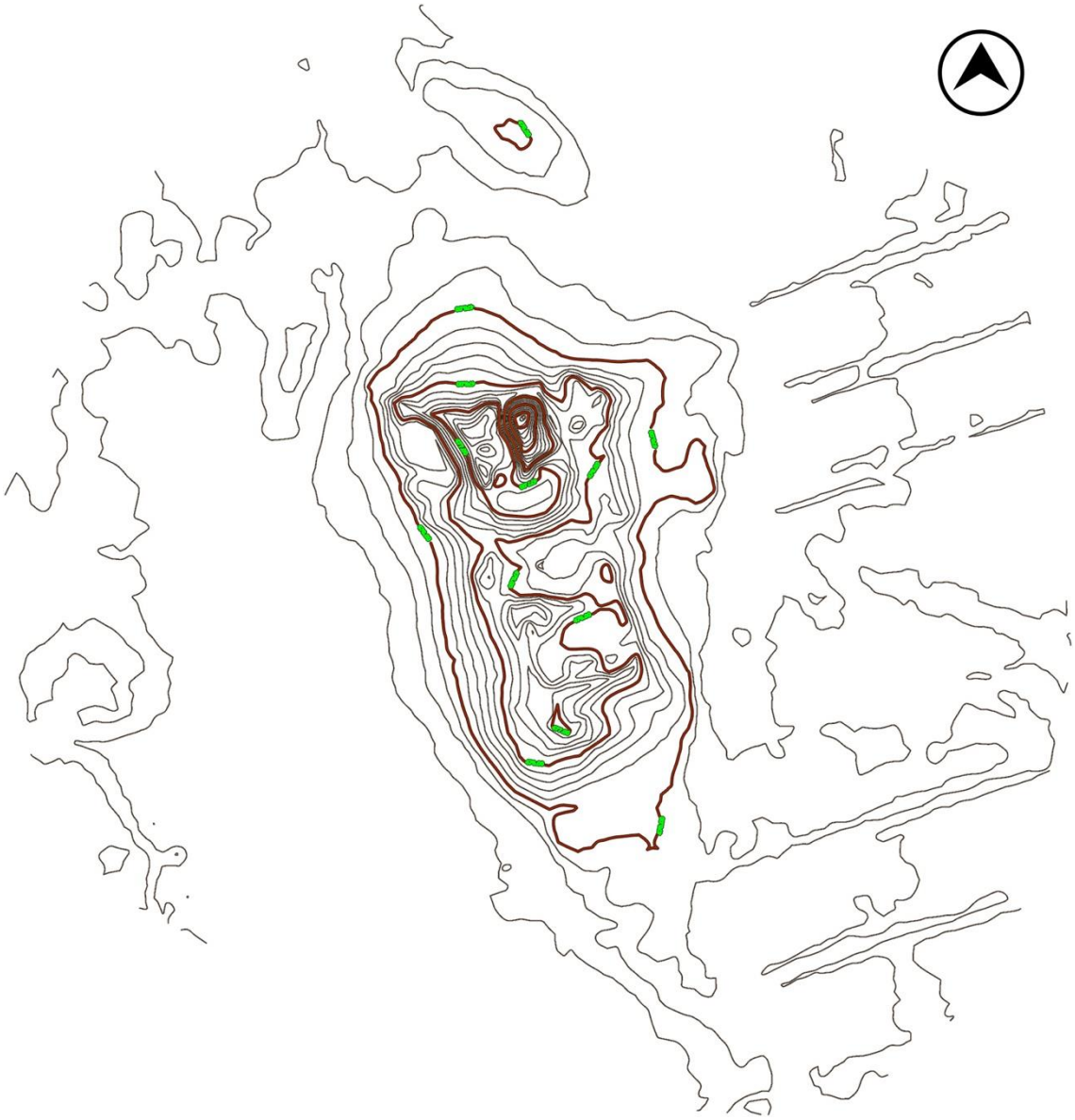


Figure 37: Localisation de moulin à vent No 3 du Hozdar dans la topographie de site, Source : OHAT

Figure 38: Façade nord de moulin à vent No 3 du Hozdar en 2016

Figure 39: Façade est de moulin à vent No 3 du Hozdar en 2016

Figure 40: Façade sud de moulin à vent No 3 du Hozdar en 2016

Figure 40: Façade ouest de moulin à vent No 3 du Hozdar en 2016

Figure 41: Photo d’espace intérieur et la dôme détruite de moulin à vent No 3 du Hozdar en 2016

Scan Laser de Moulins à vent No 3 du Hozdar

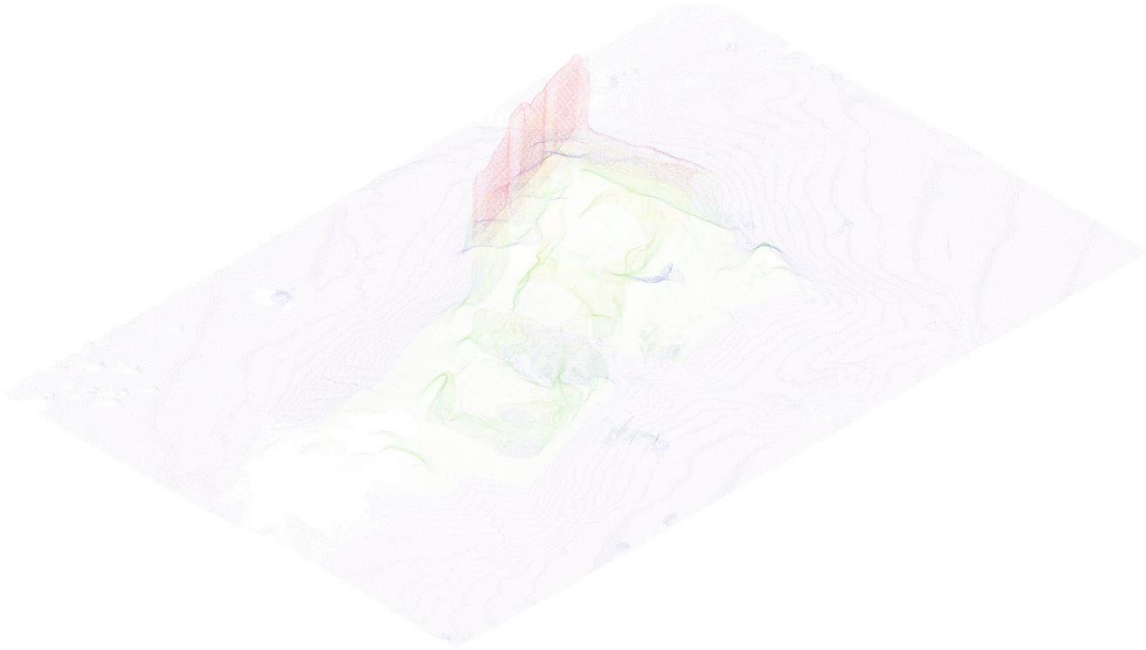


Figure 42: Scan laser de volume sud-est de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

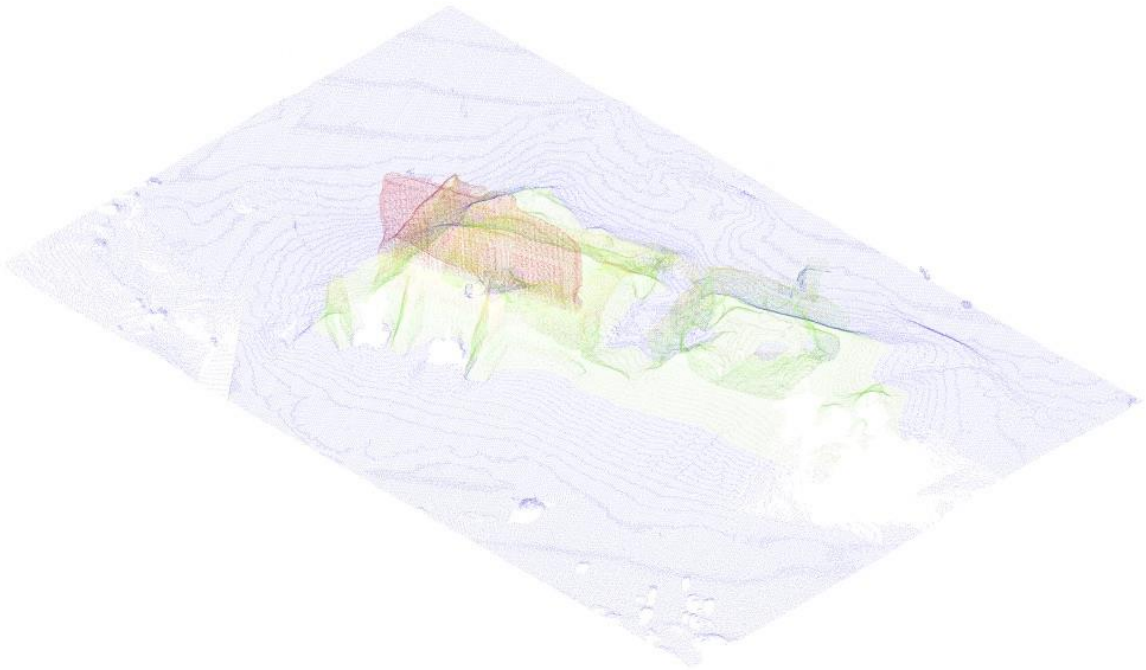


Figure 43: Scan laser de volume sud-ouest de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

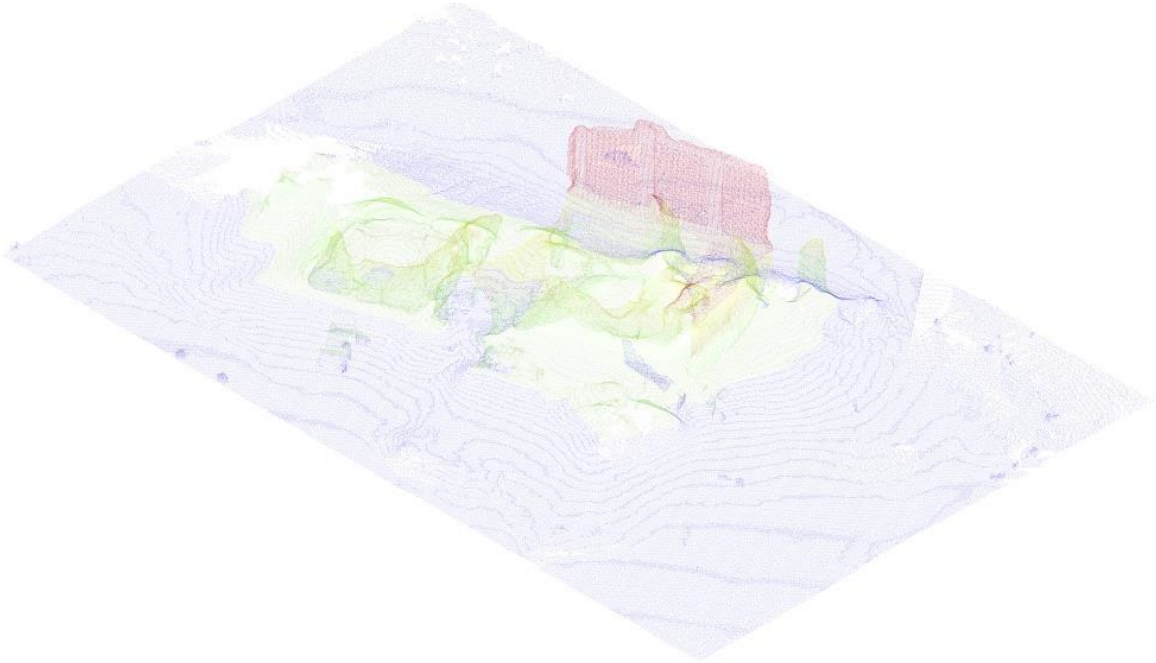


Figure 44: Scan laser de volume nord-est de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

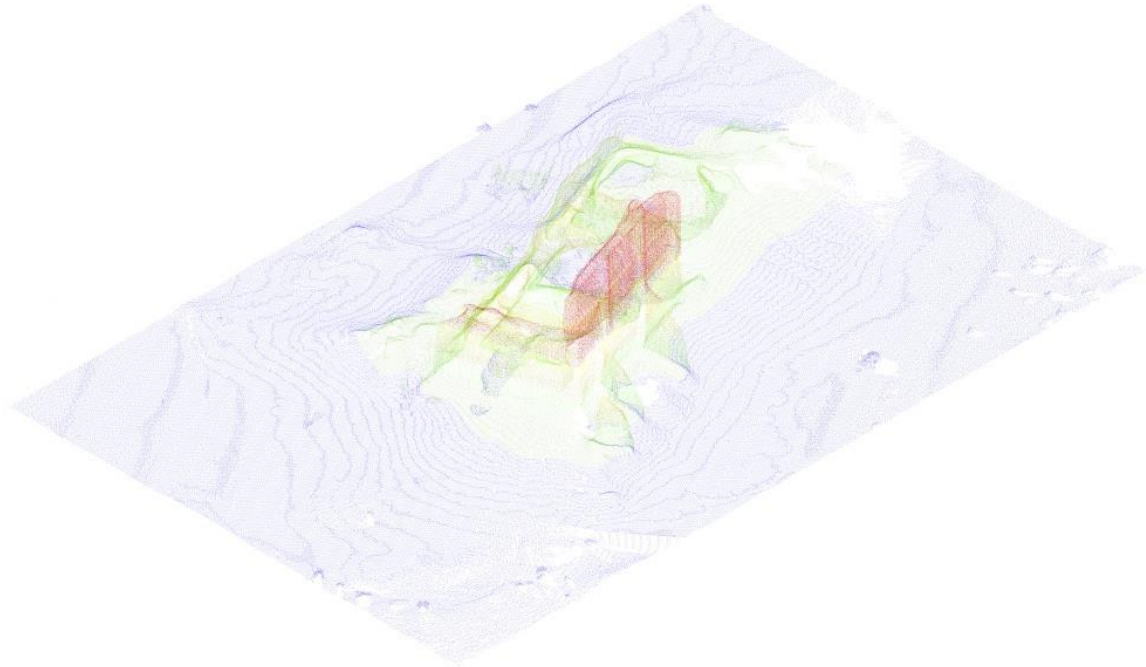


Figure 45: Scan laser de volume nord-ouest de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

Figure 46: Scan laser de plan de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

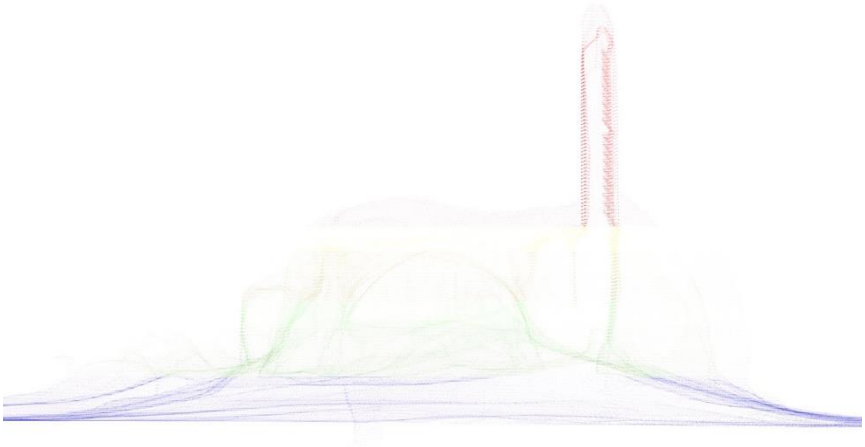


Figure 47: Scan laser de façade nord de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

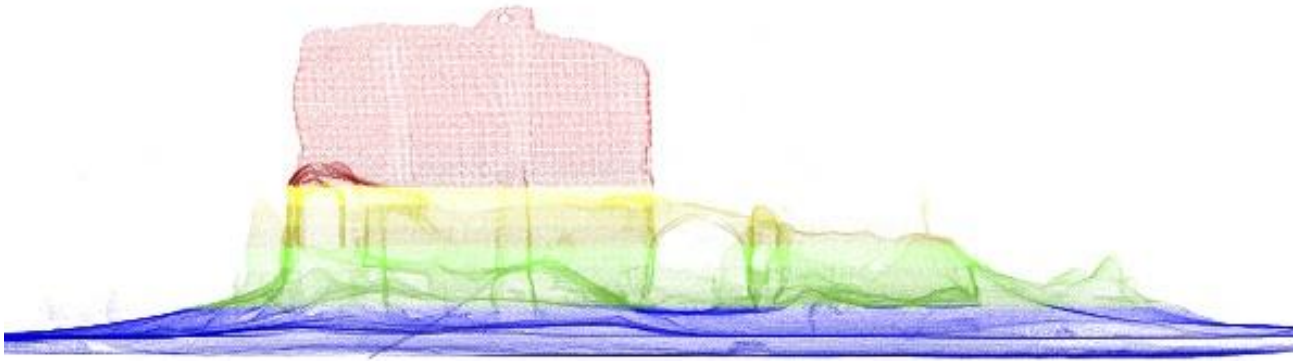


Figure 48: Scan laser de façade ouest de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

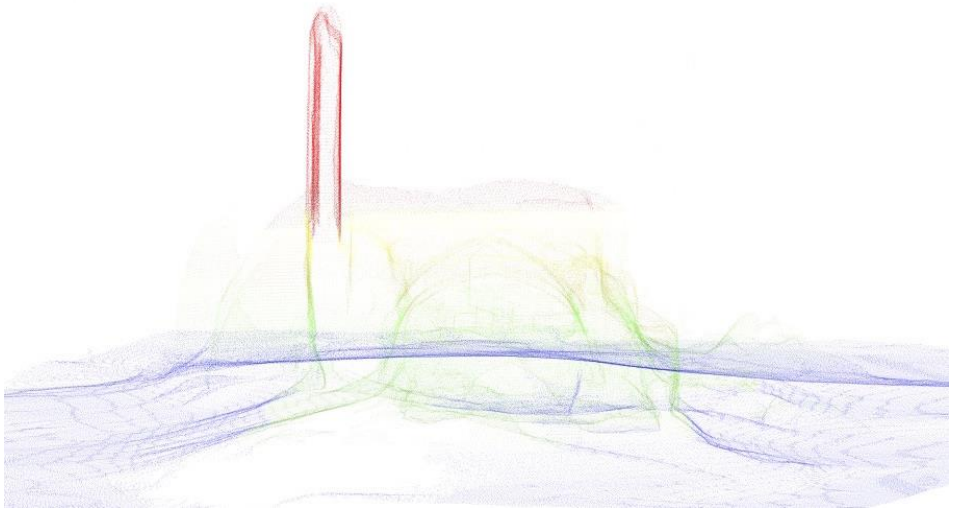


Figure 49: Scan laser de façade sud de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

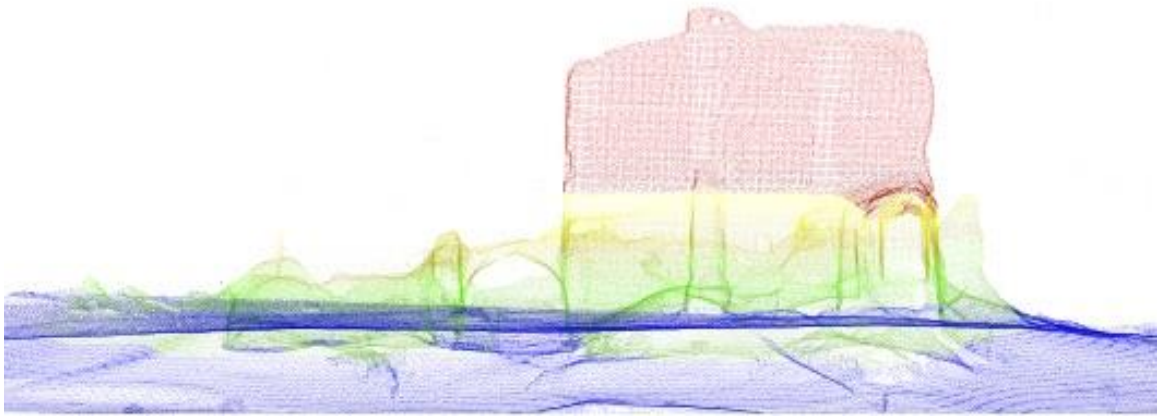


Figure 50: Scan laser de façade ouest de moulin à vent No 3 du Hozdar, Source : OHAT

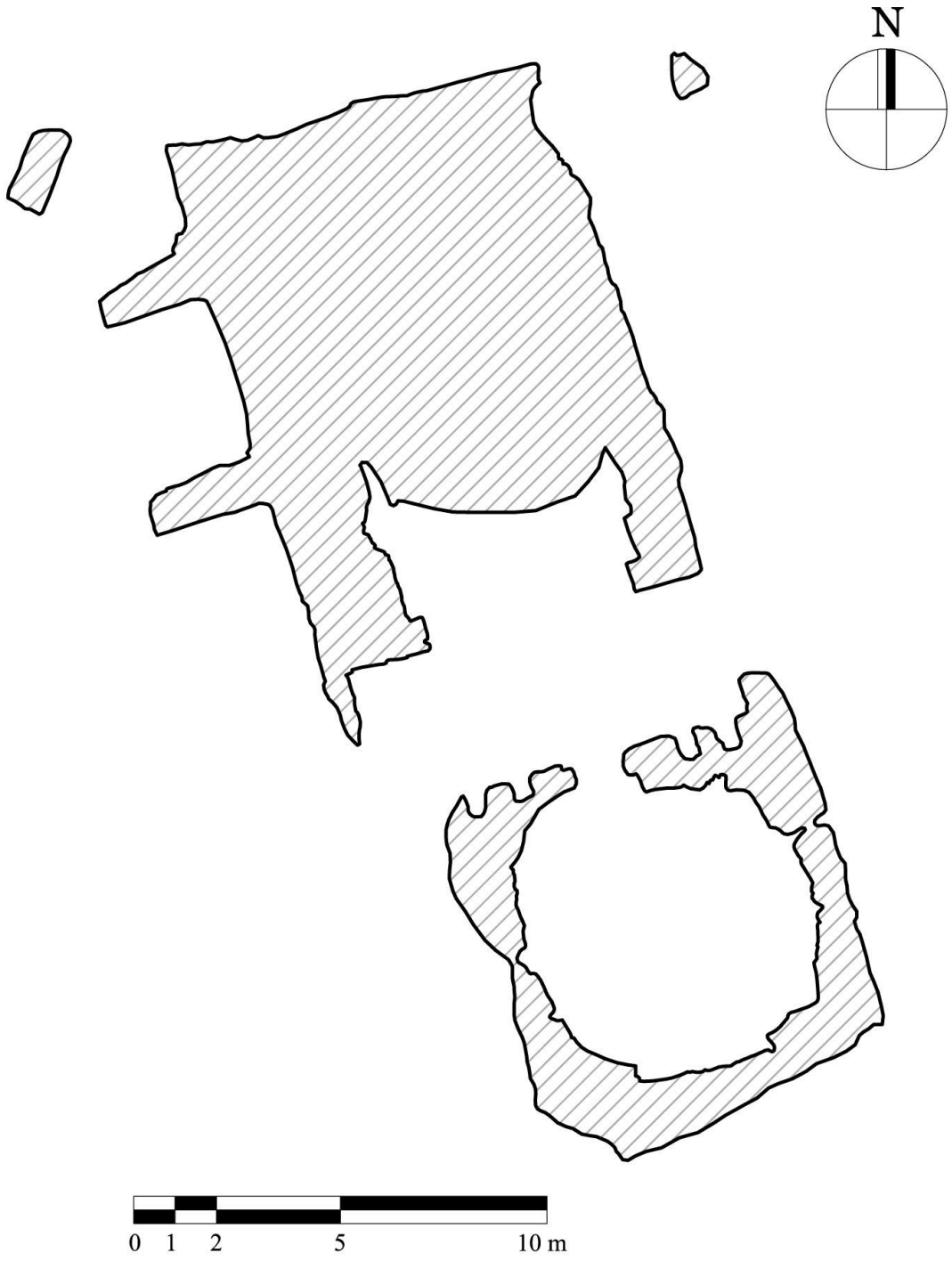


Figure 51: Plan RDC de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

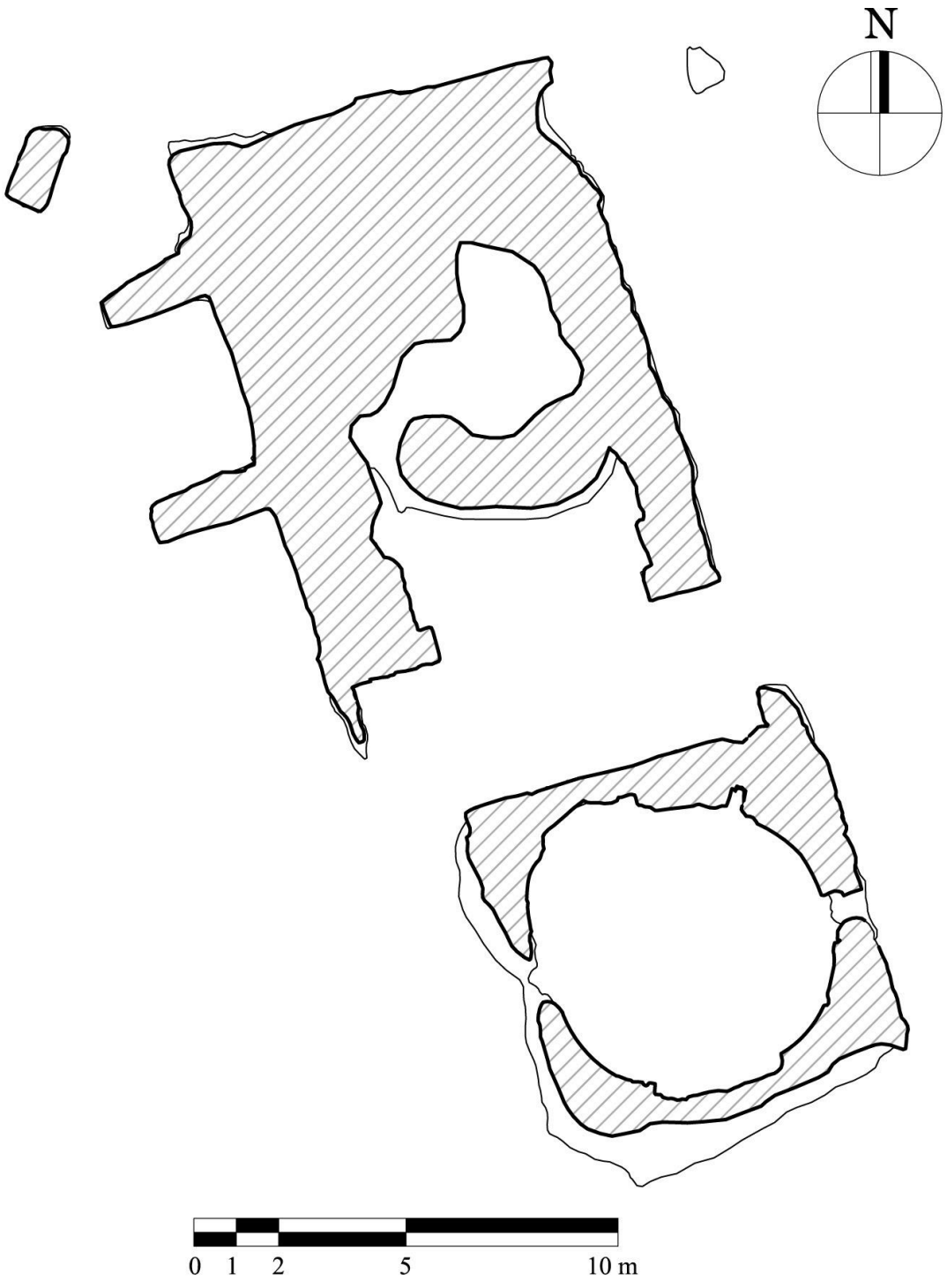

N
0 1 2 5 10 m

Figure 52: Plan RDC en hauteur de à 0.5 mètre de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

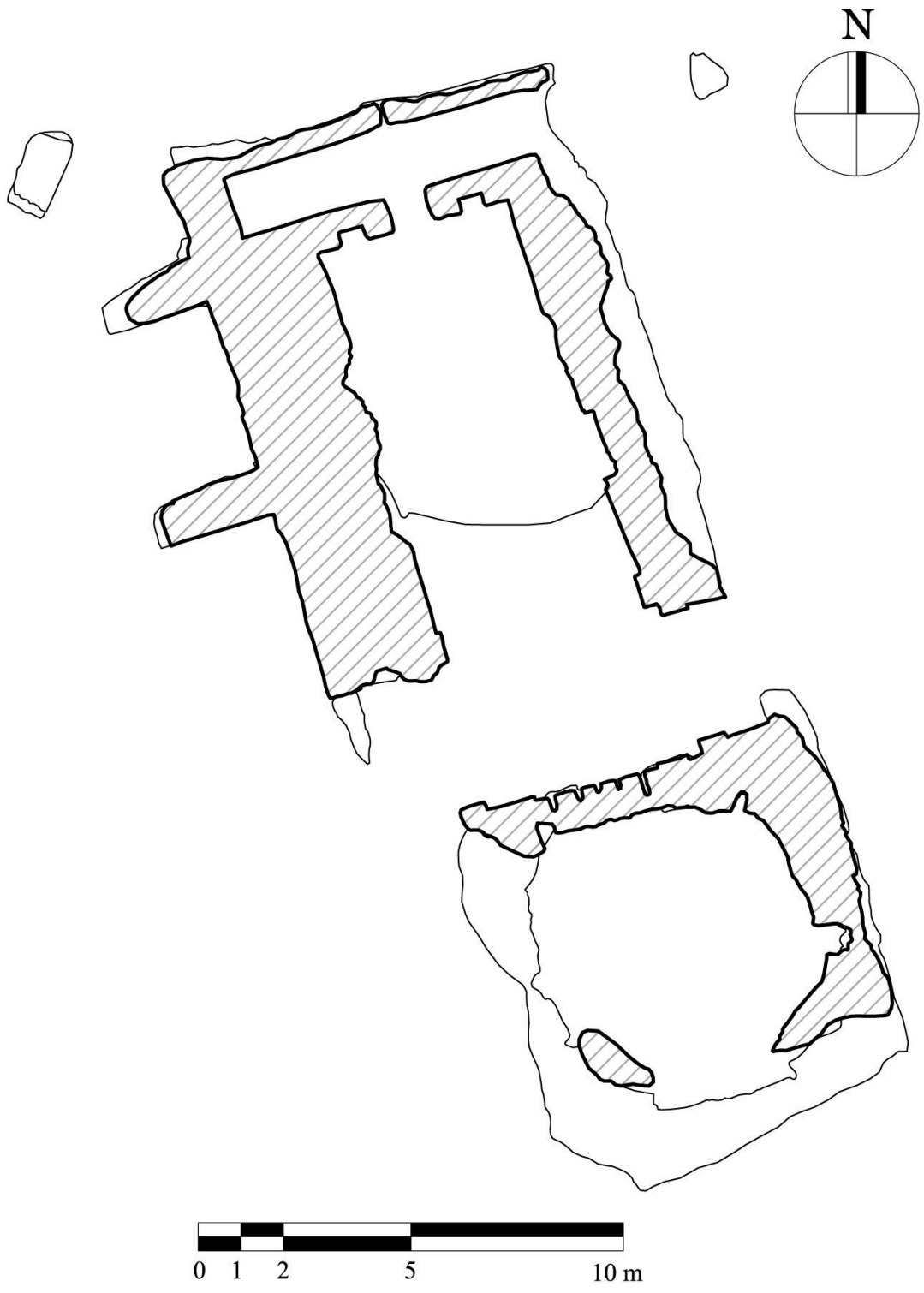


Figure 53: Plan RDC en hauteur de à 1 mètre de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

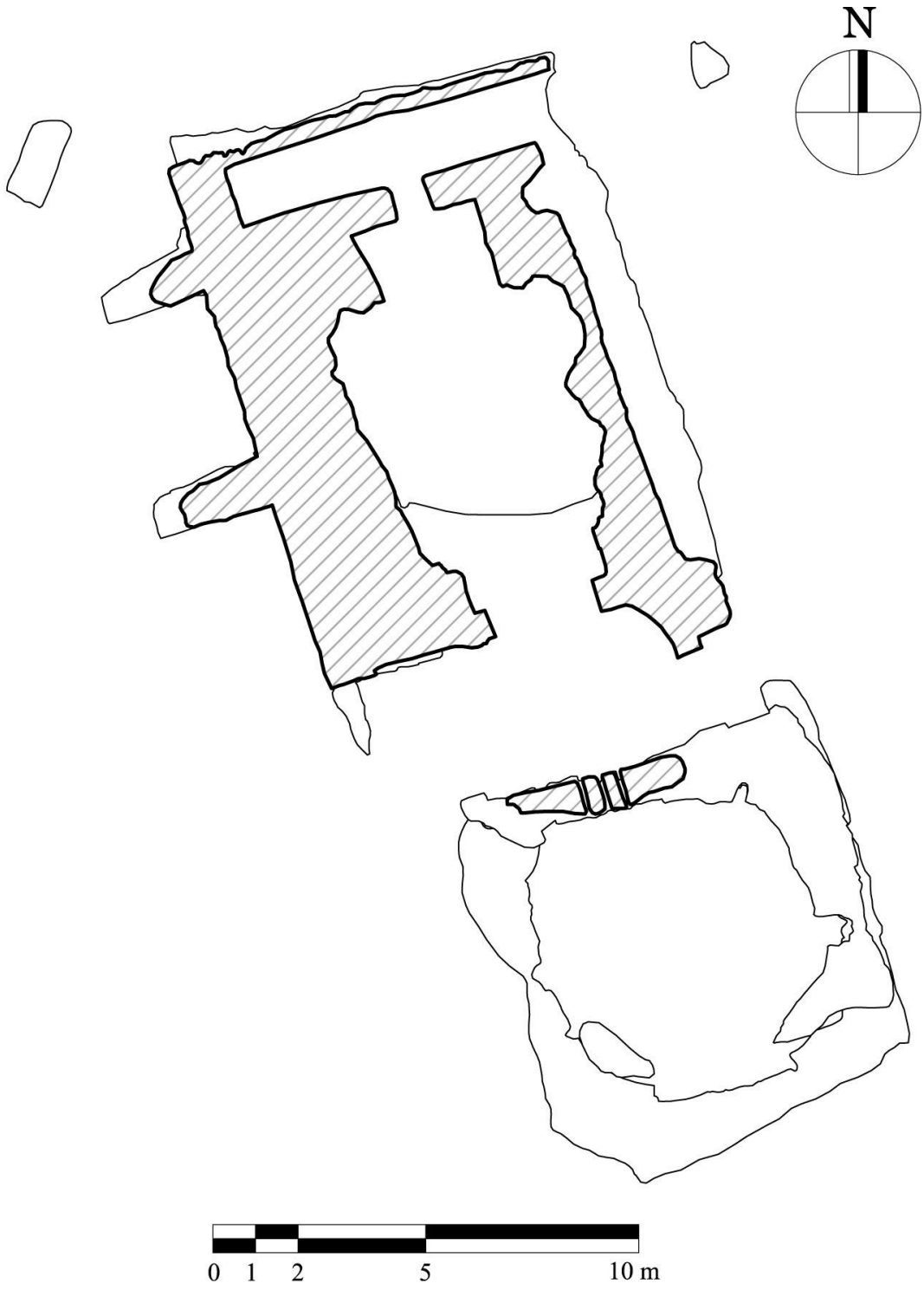


Figure 54: Plan RDC en hauteur de à 2 mètre de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

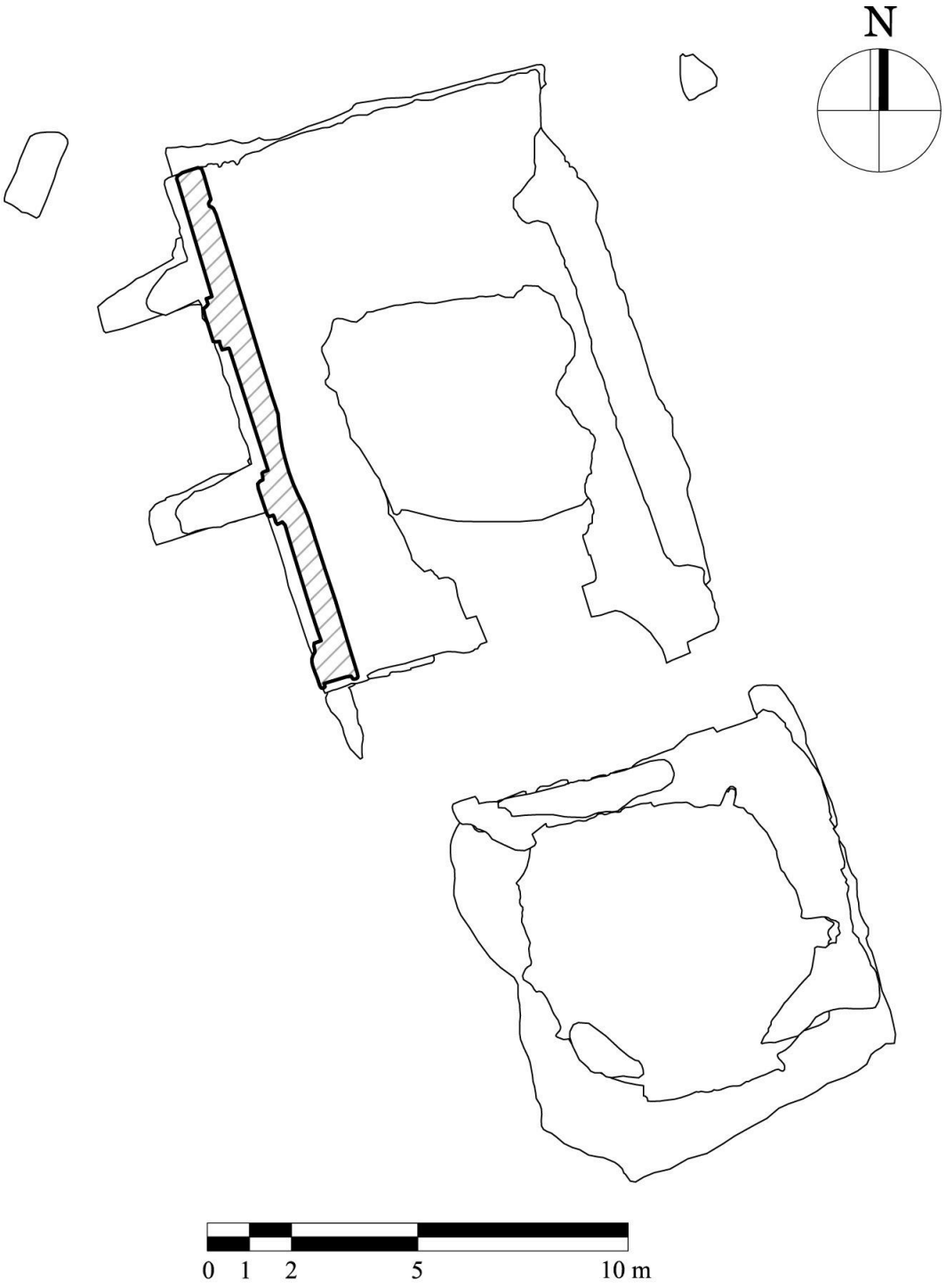


Figure 55: Plan RDC en hauteur de à 2.5 mètre de moulin à vent No 2 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

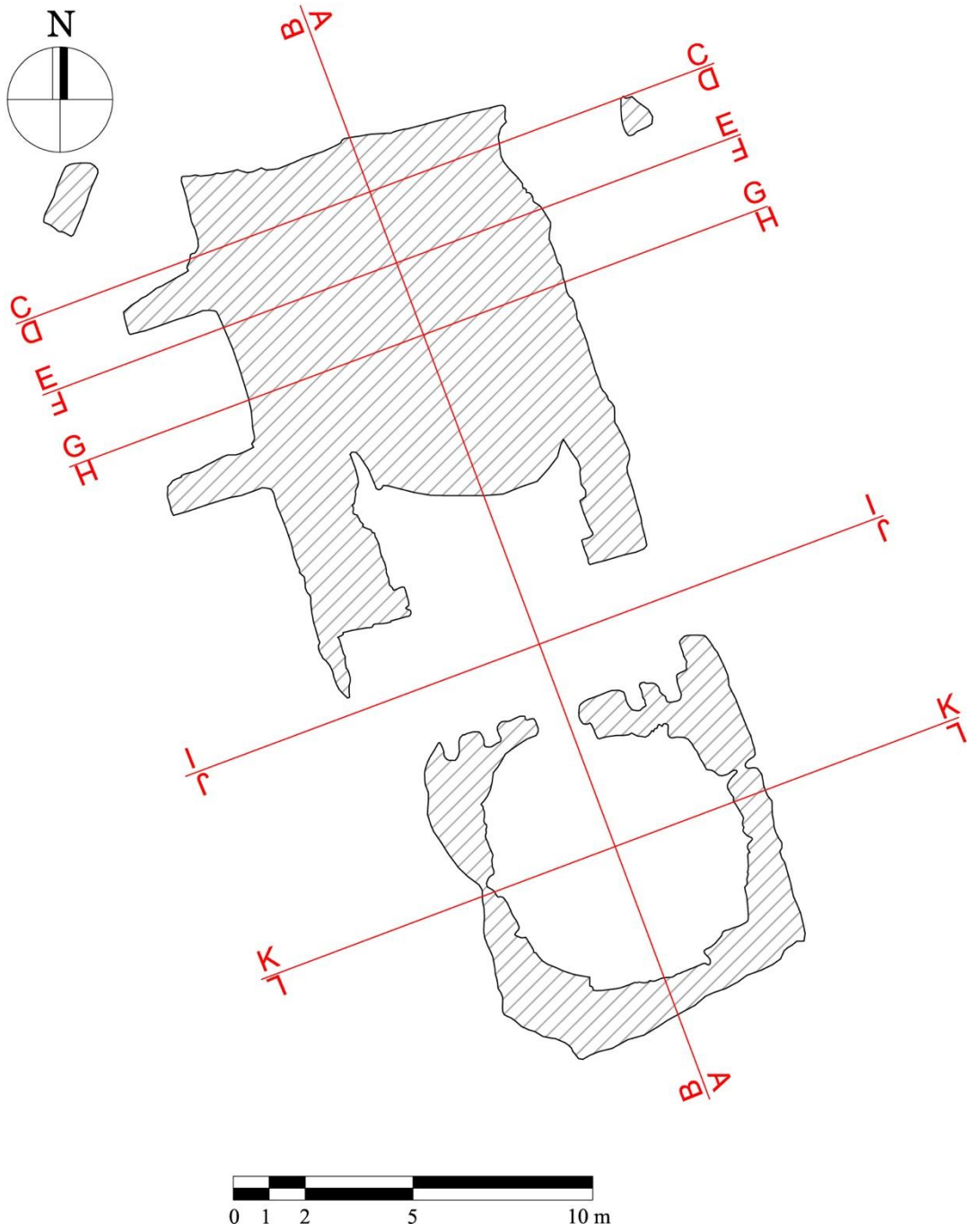


Figure 56: Plan RDC de moulin à vent No 2 du Hozdar et les lignes de coupe selon scan laser, Source : OHAT

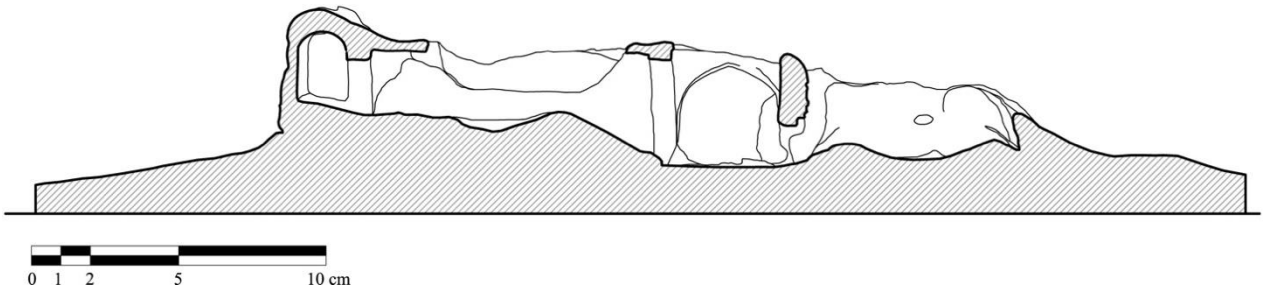


Figure 57: Coupe A-A de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

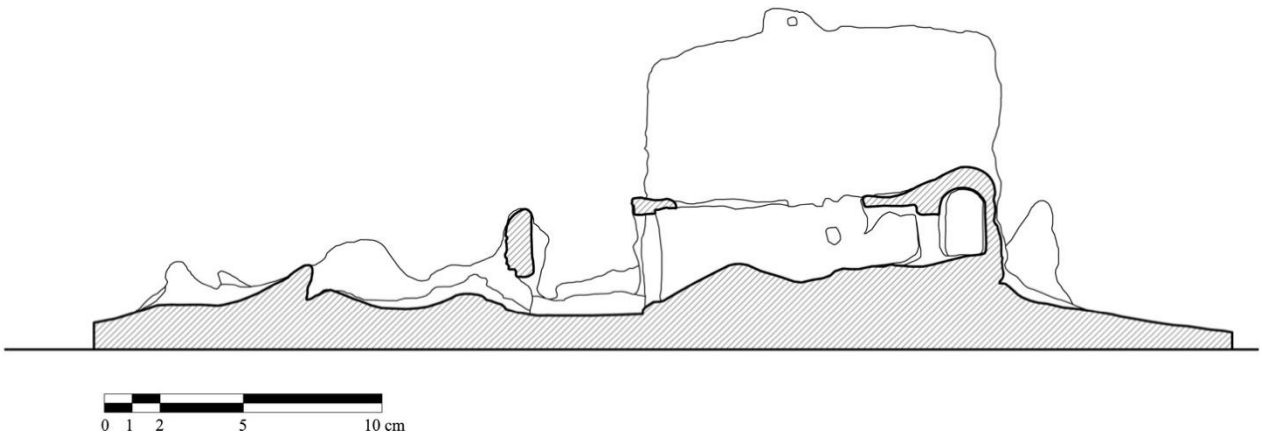


Figure 58: Coupe B-B de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

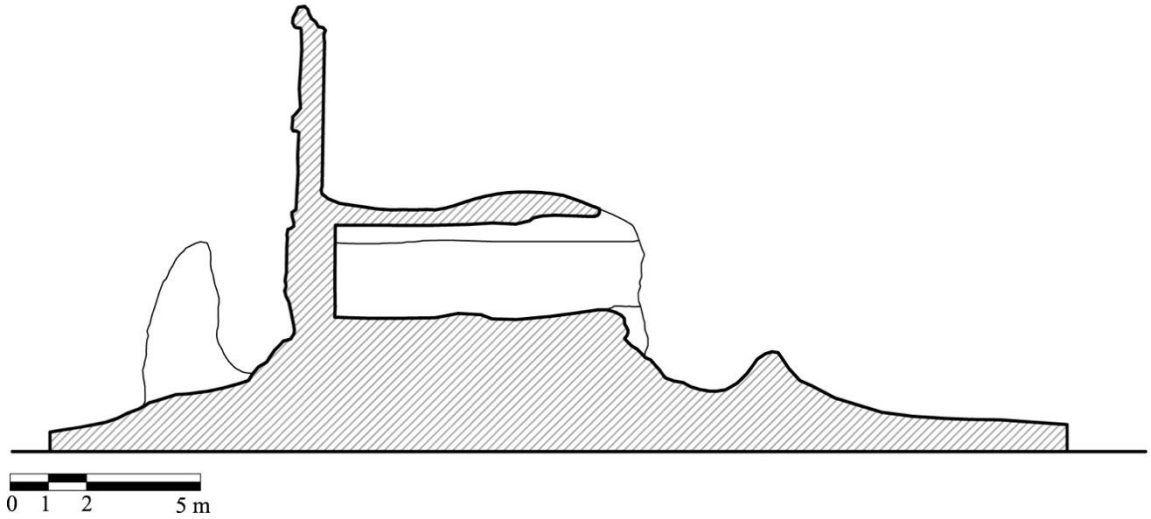


Figure 59: Coupe C-C de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

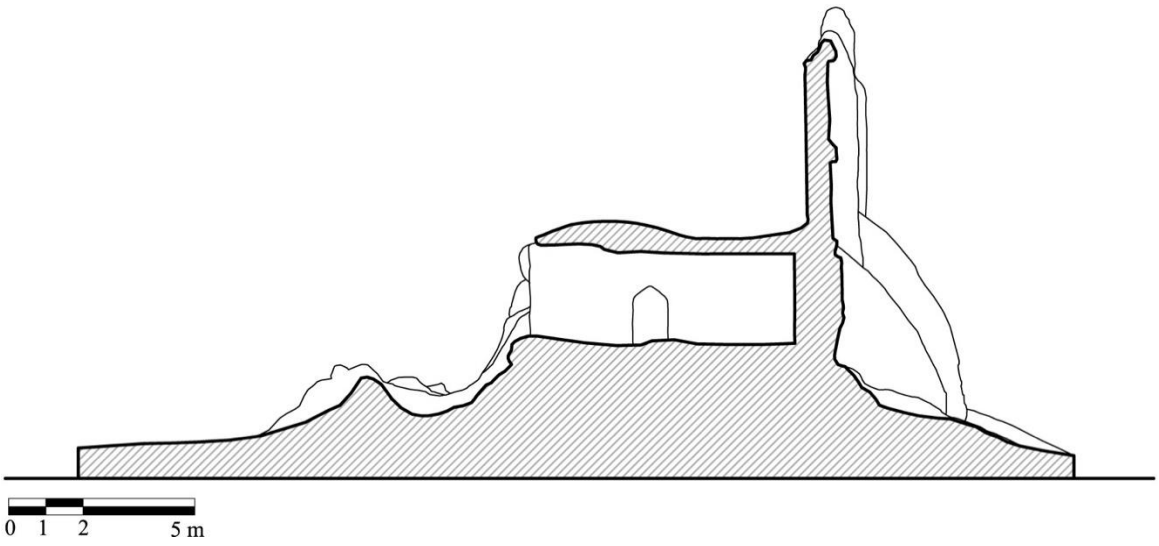


Figure 60: Coupe D-D de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

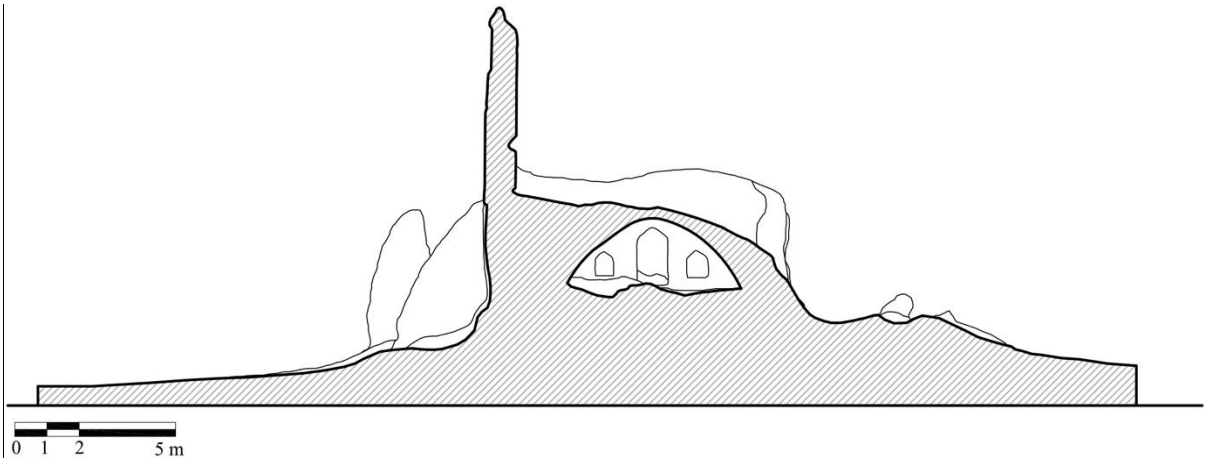


Figure 61: Coupe E-E de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

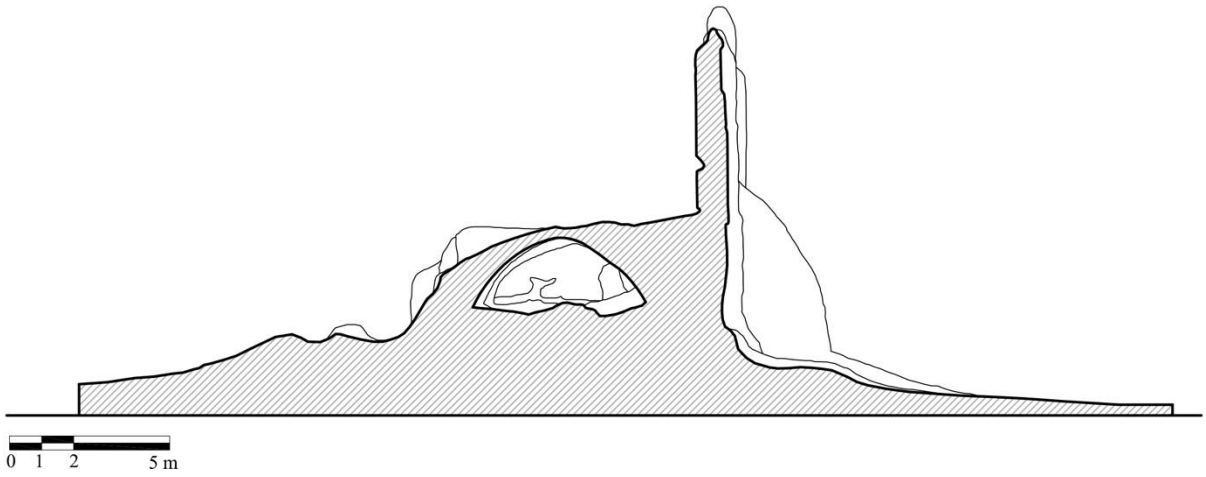


Figure 62: Coupe F-F de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

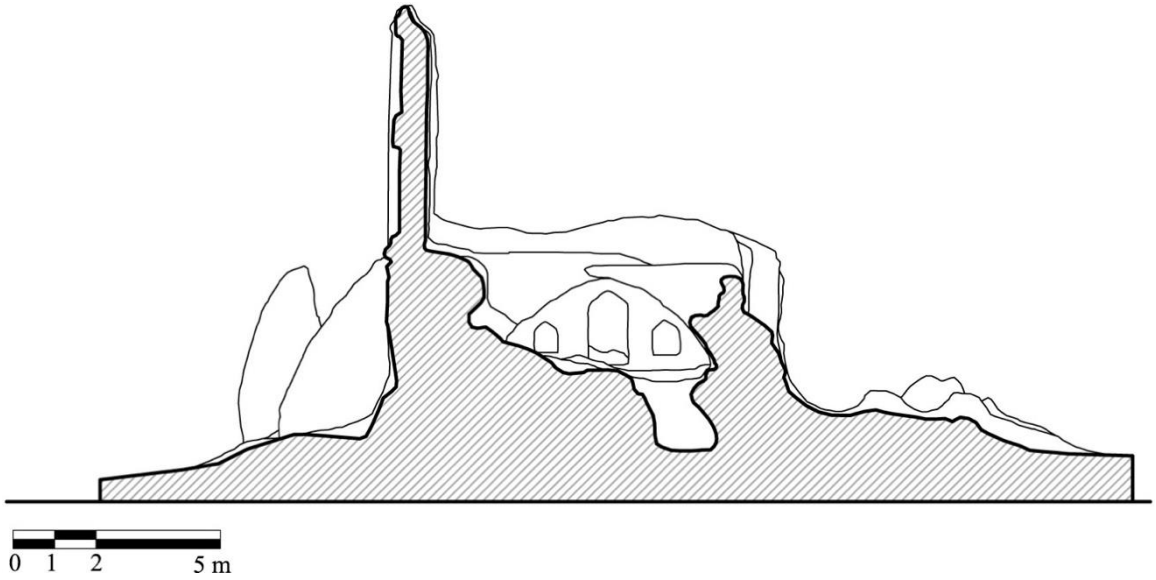


Figure 63: Coupe G-G de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

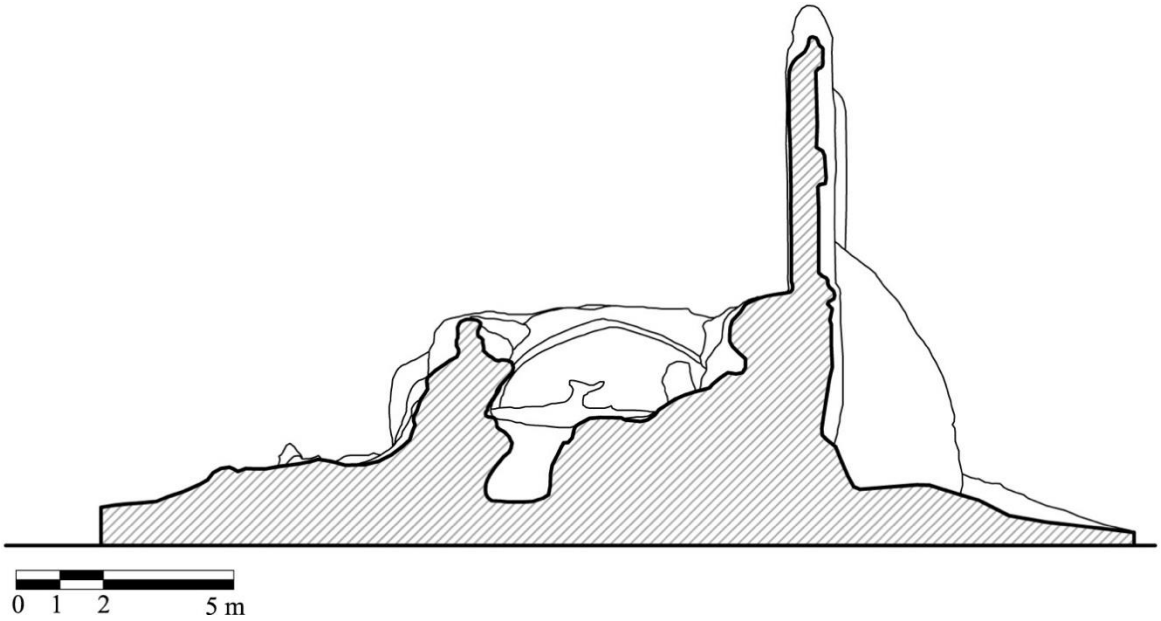


Figure 64: Coupe H-H de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

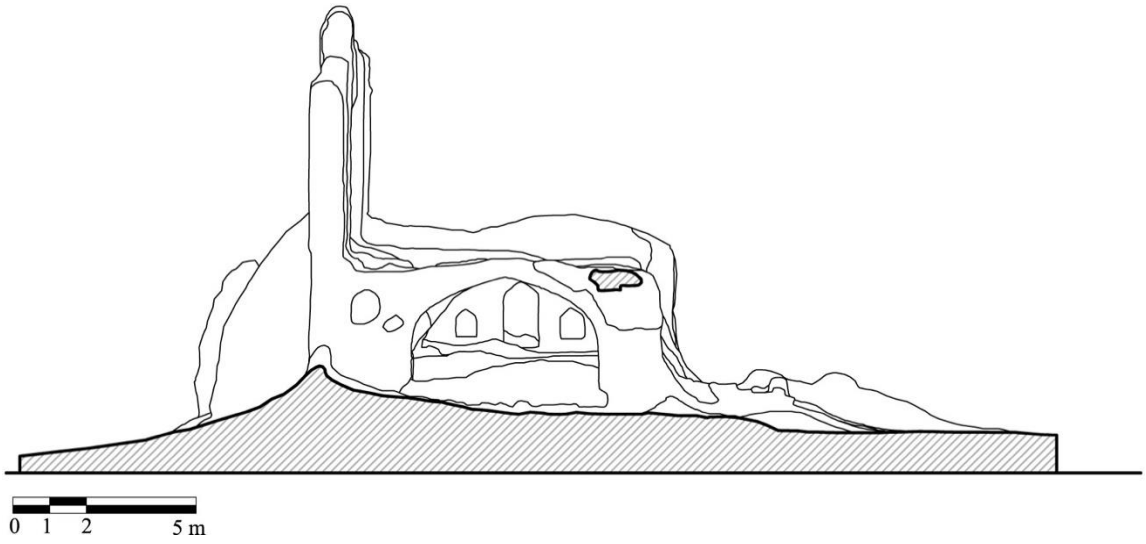


Figure 65: Coupe I-I de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

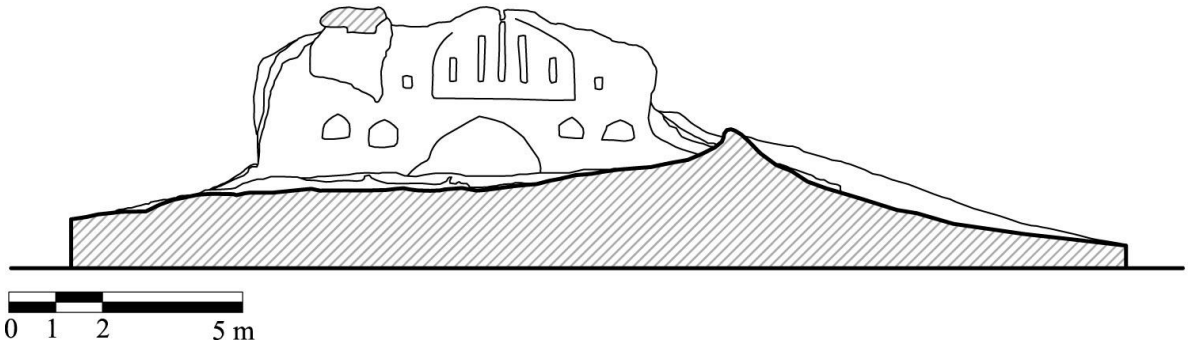


Figure 66: Coupe J-J de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

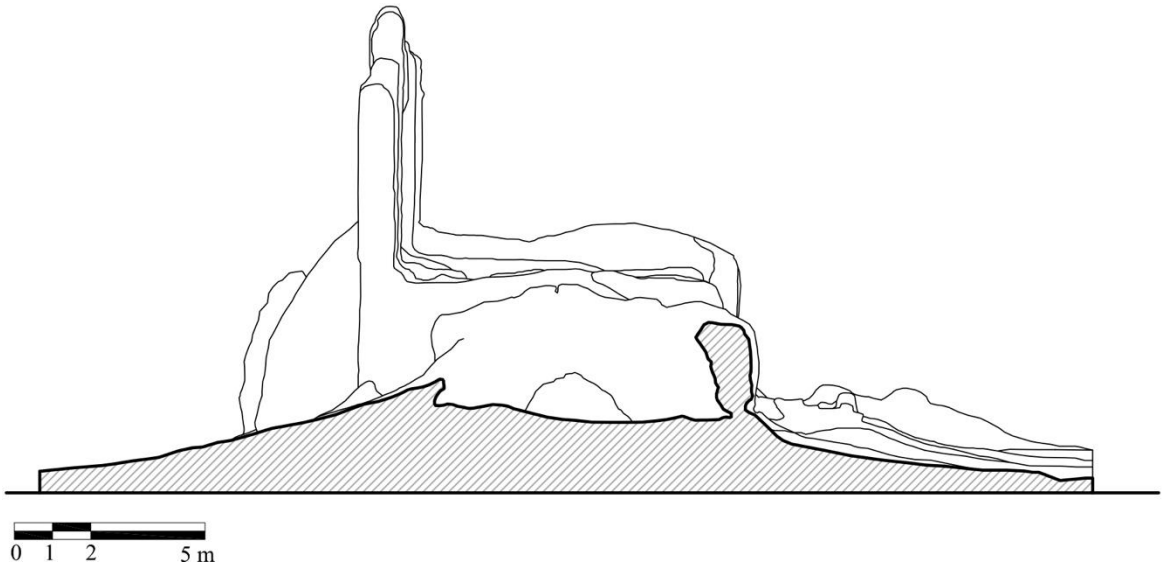


Figure 67: Coupe K-K de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

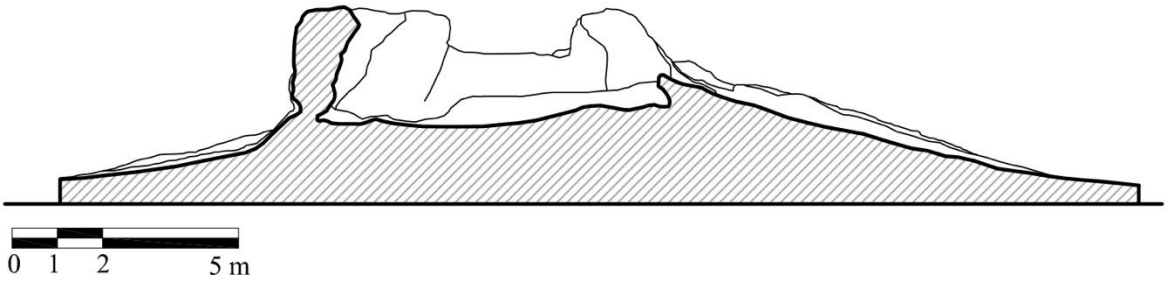


Figure 68: Coupe L-L de moulin à vent No 3 du Hozdar selon scan laser, Source : OHAT

Moulins à vent No 1et 2 du Qaleh-Rostam (Jumels)

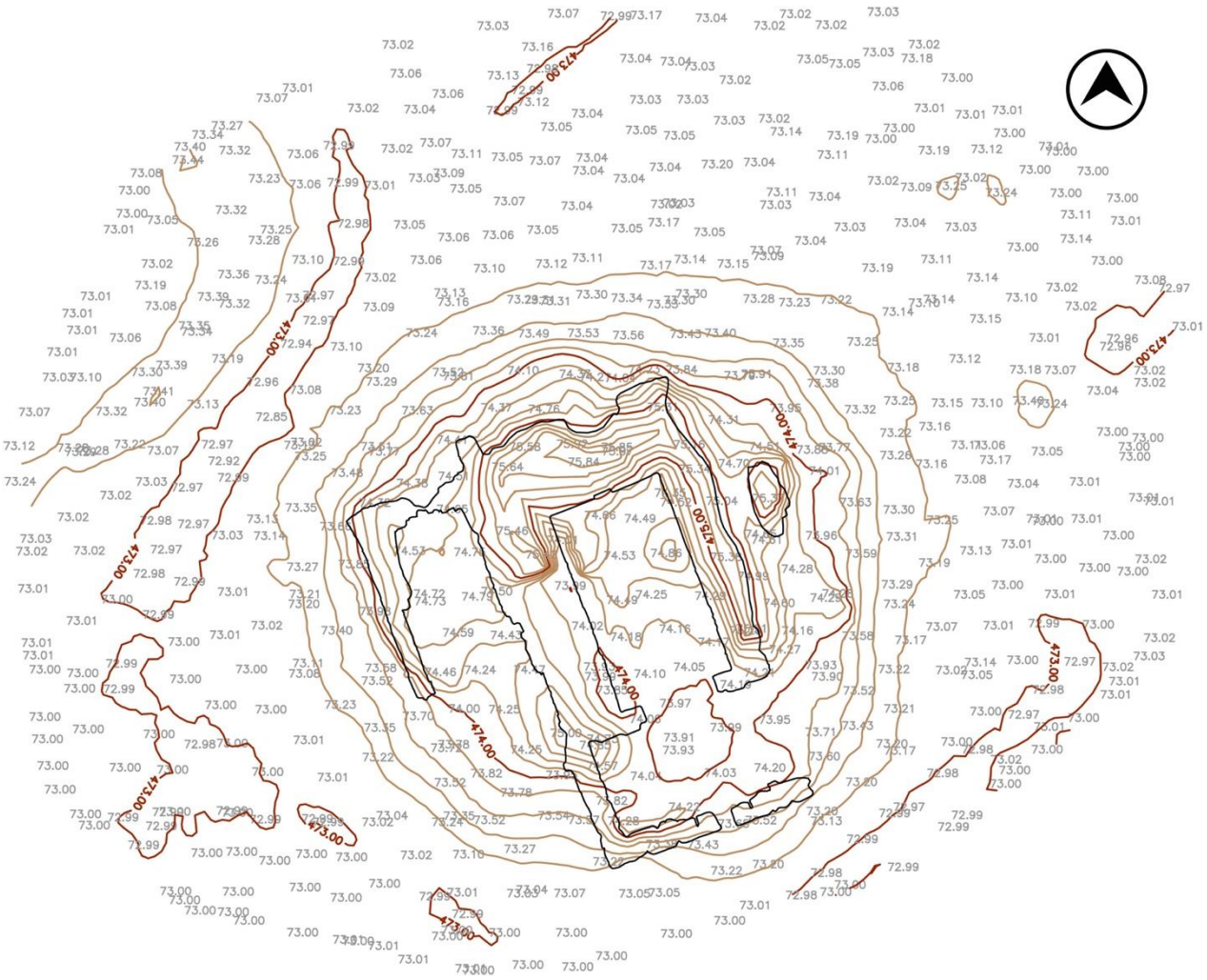


Figure 69: Localisation de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam dans la topographie de site, Source : OHAT

Figure 71: Façade nord de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 72: Façade ouest de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 73: Façade sud de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 74: Façade est de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 75: Photo d’espace intérieur et la dôme détruite de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 76: Photo d’espace intérieur et la dôme détruite de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 77: Photo d’espace intérieur de moulin à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam en 2016

Scan laser des Moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam (Jumels)

Figure 78: Scan laser de volume sud ouest des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

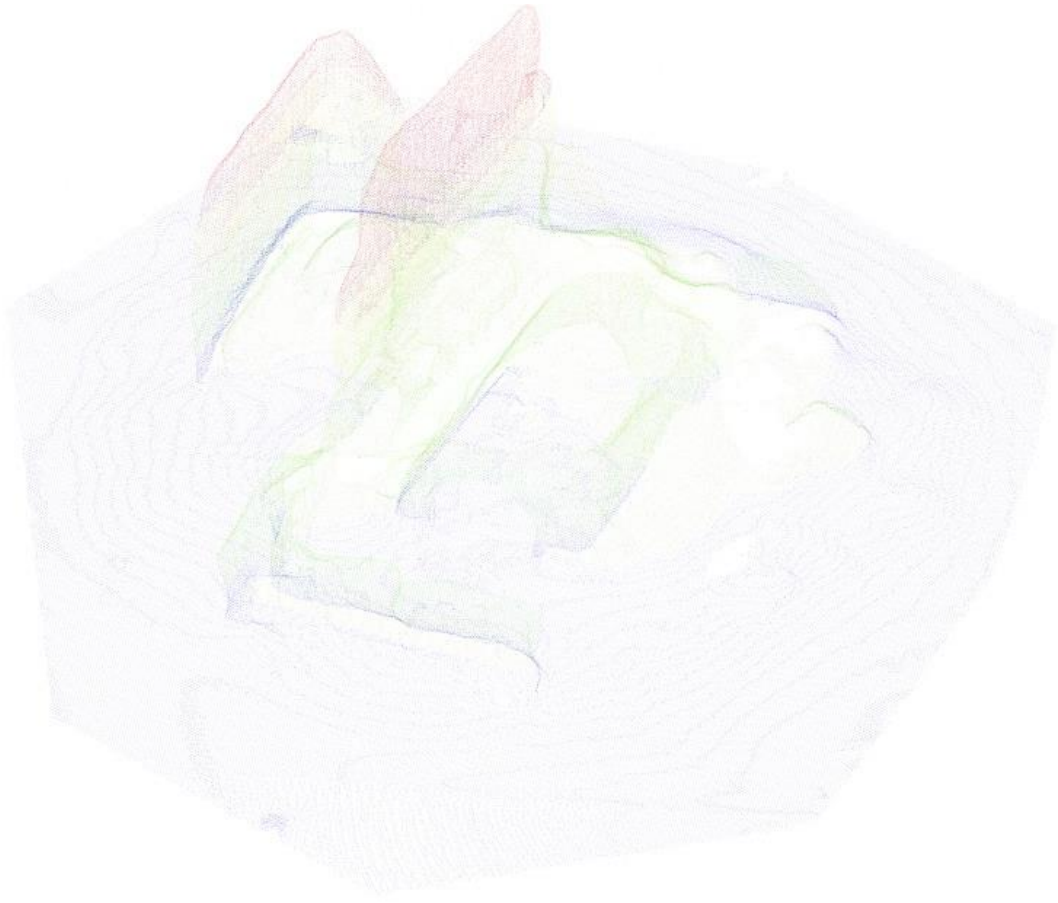


Figure 79: Scan laser de volume sud est des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

Figure 80: Scan laser de volume nord est des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

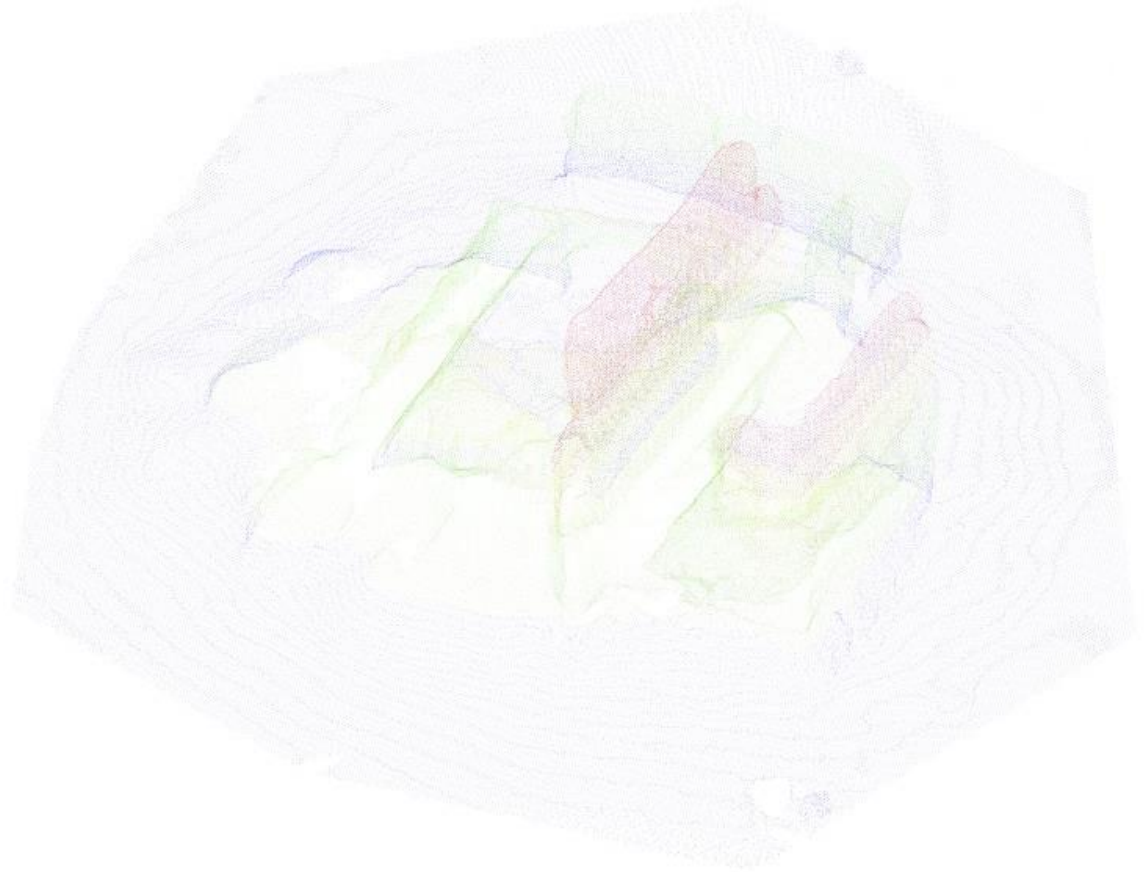


Figure 81: Scan laser de volume nord ouest des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

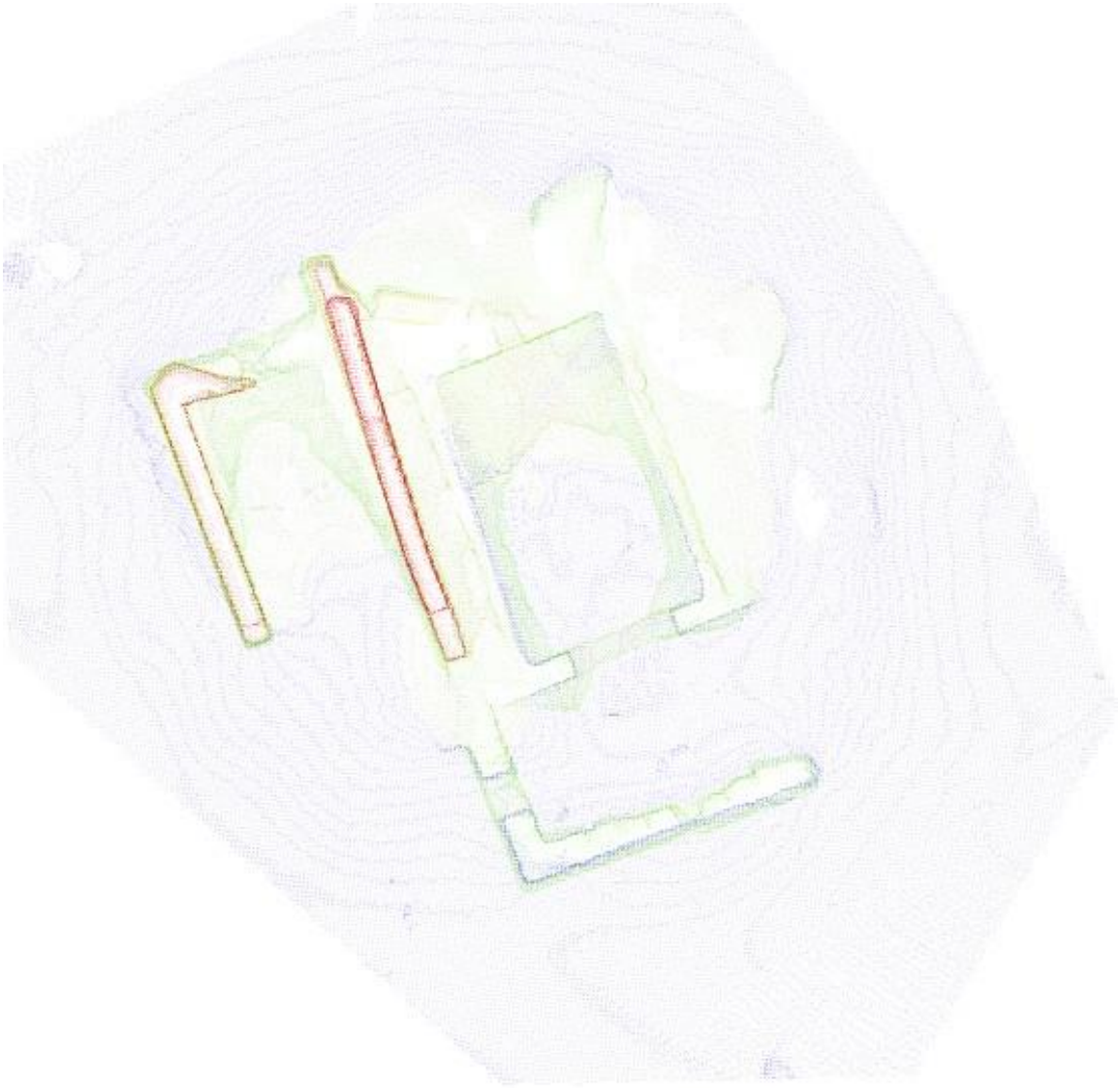


Figure 82: Scan laser de plan des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

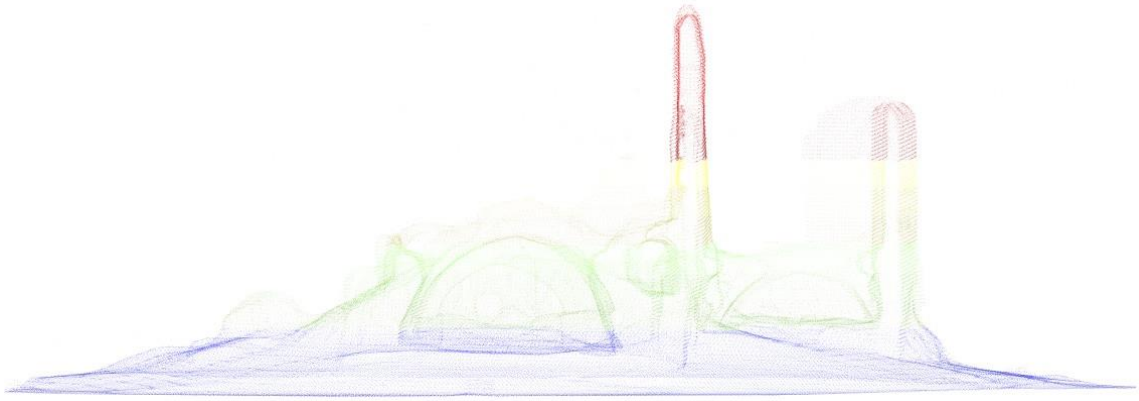


Figure 83: Scan laser de façade nord des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

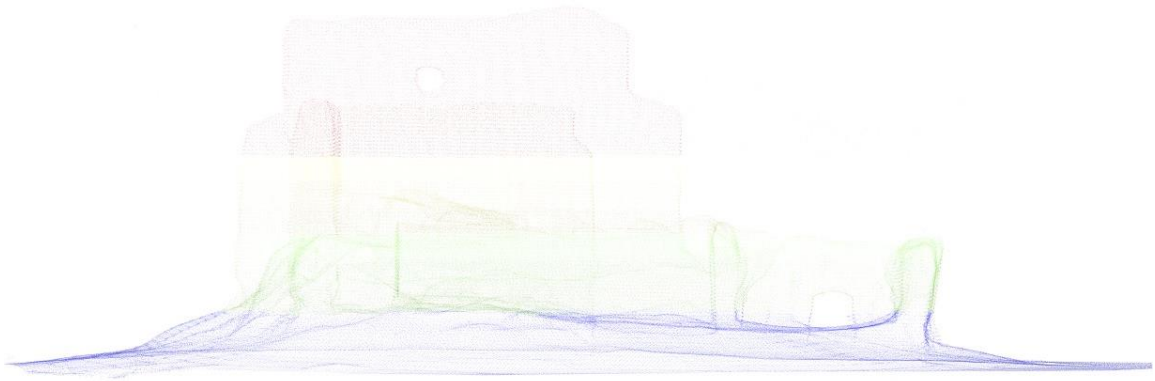


Figure 84: Scan laser de façade ouest des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

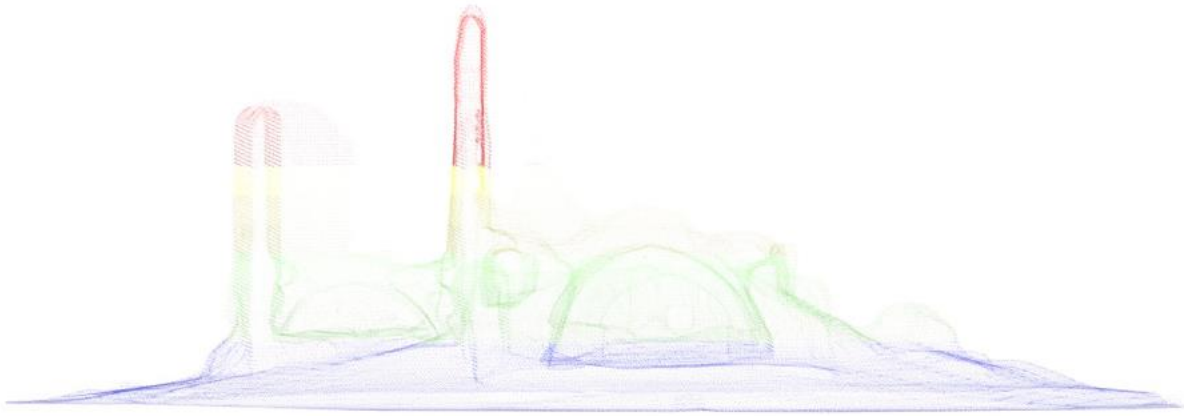


Figure 85: Scan laser de façade sud des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

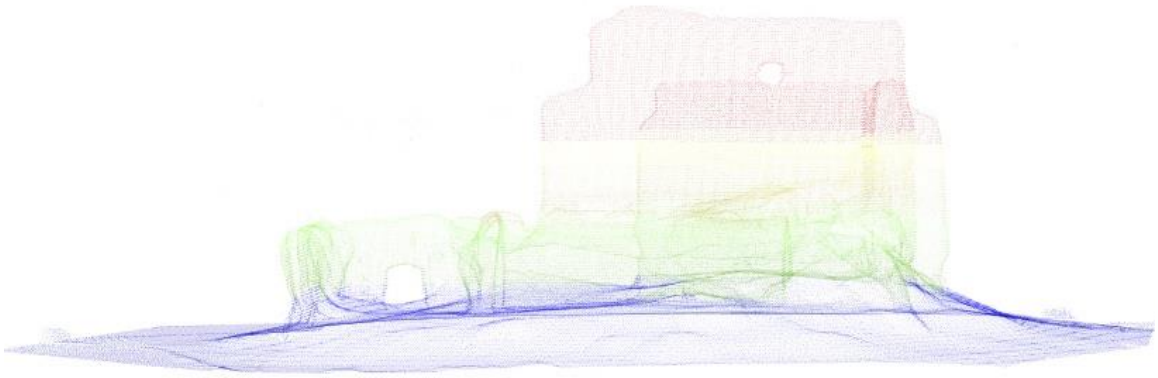


Figure 86: Scan laser de façade est des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

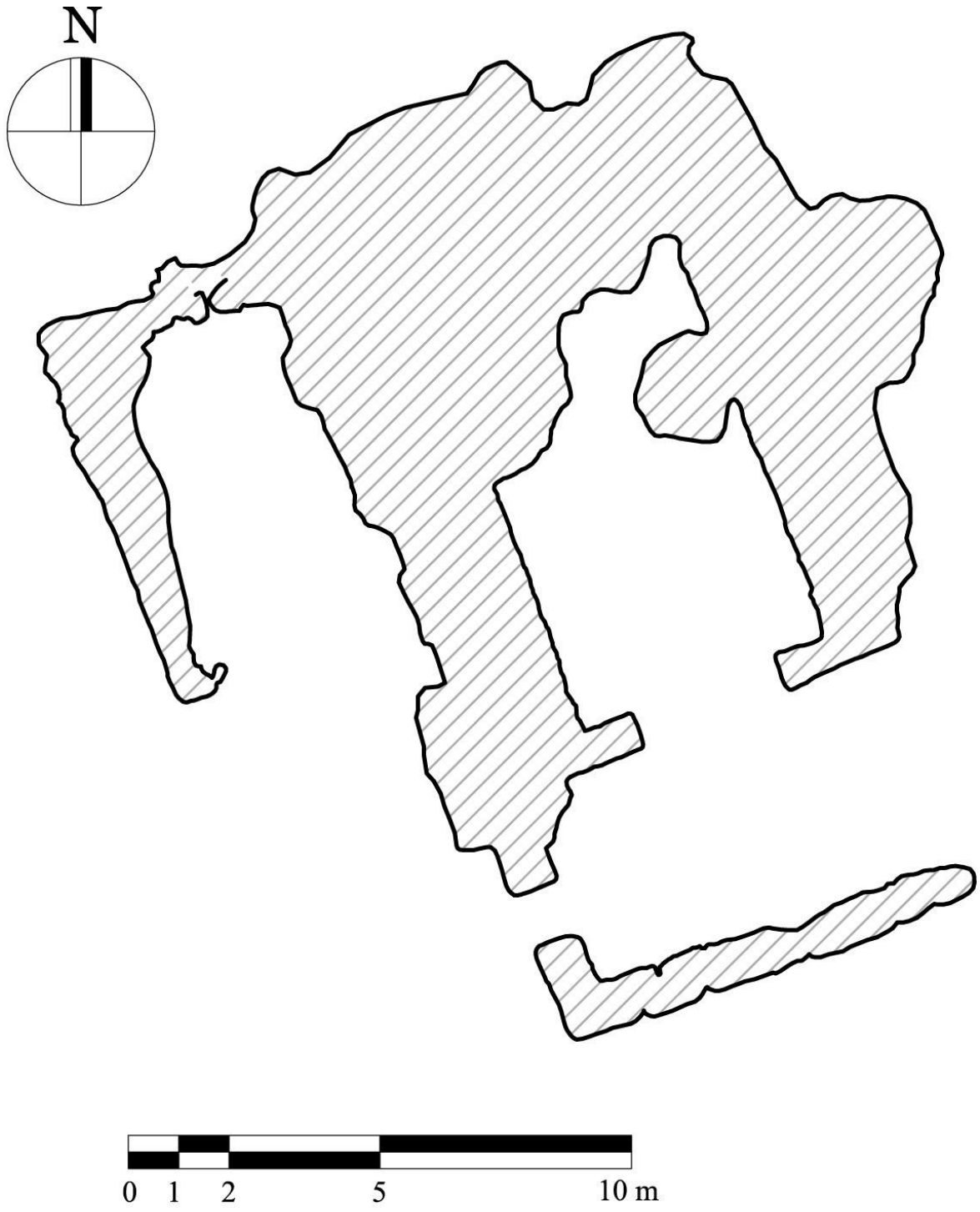


Figure 87: Plan RDC des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

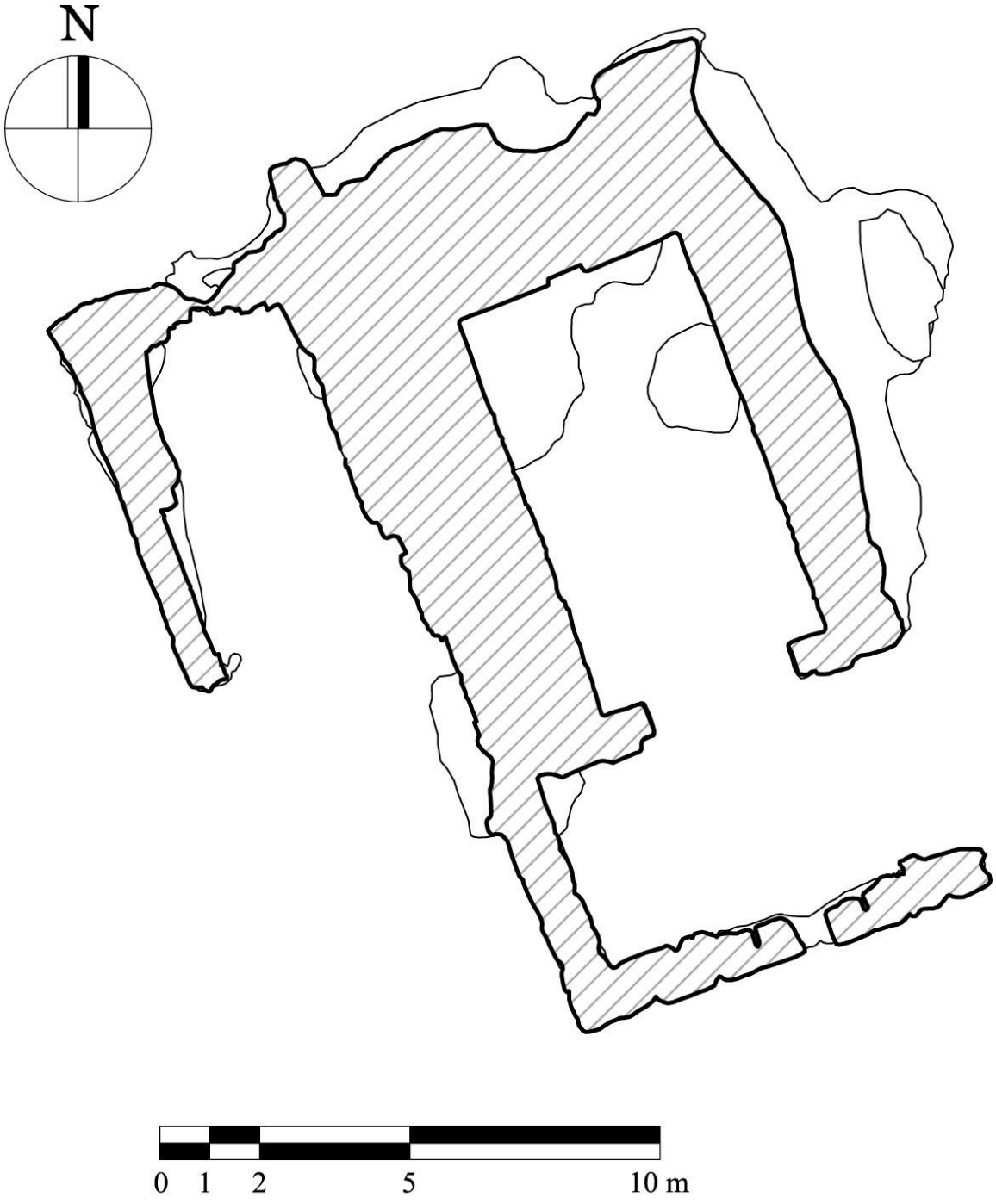


Figure 88: Plan RDC en hauteur de 1 mètre des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

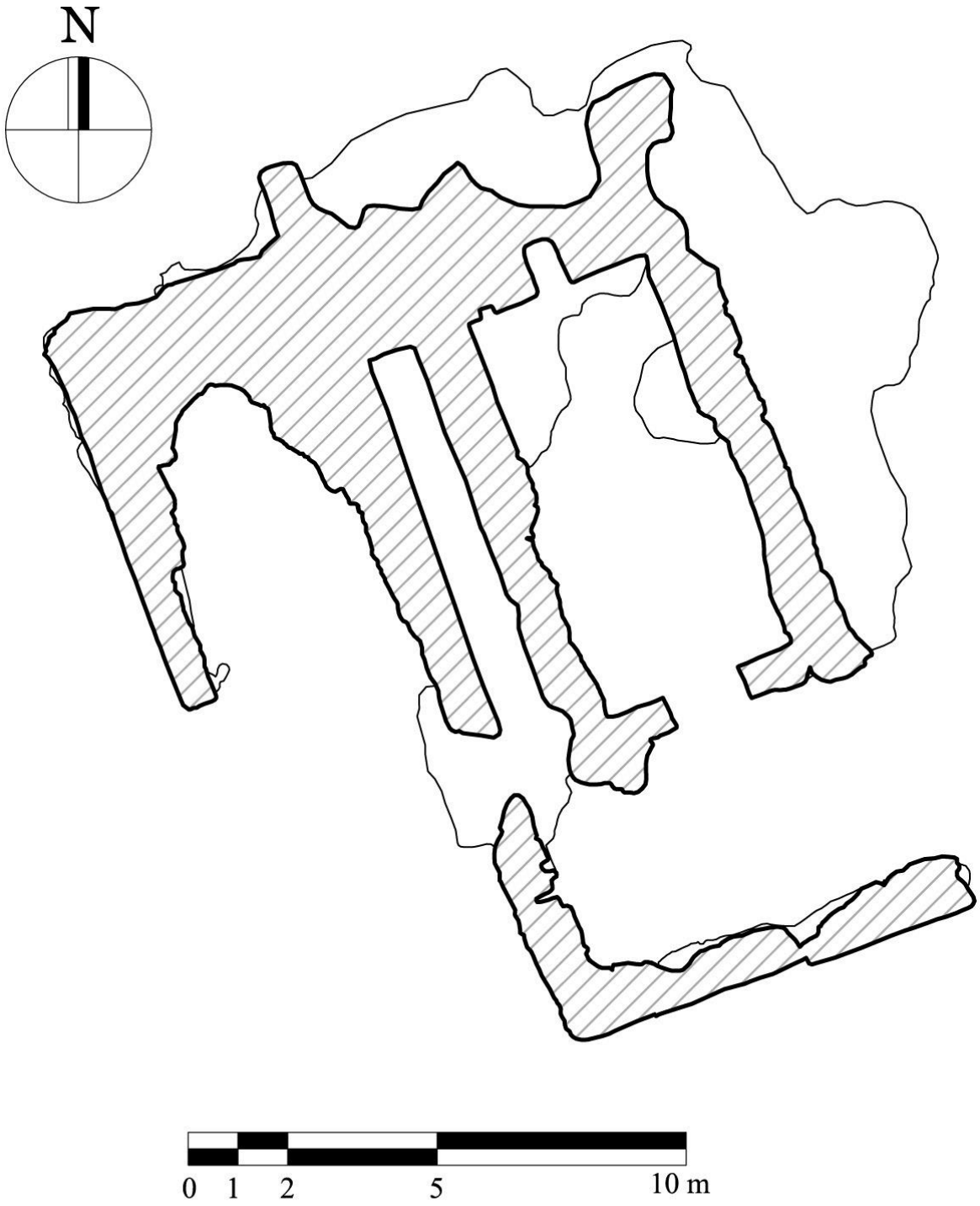


Figure 89: Plan RDC en hauteur de 2 mètre des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

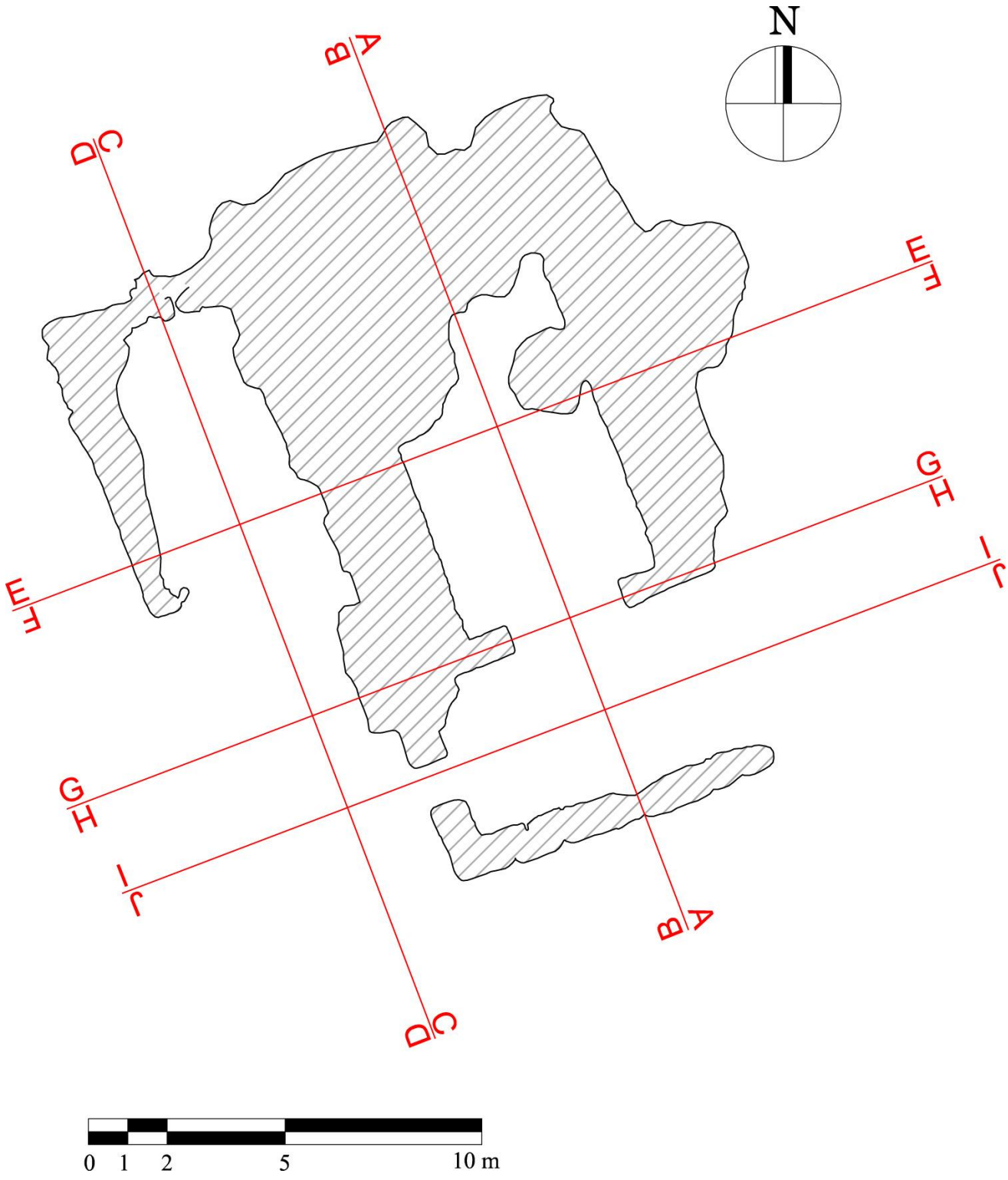


Figure 90: Plan RDC des moulins à vent No 1 et 2 et les lignes de coupe du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

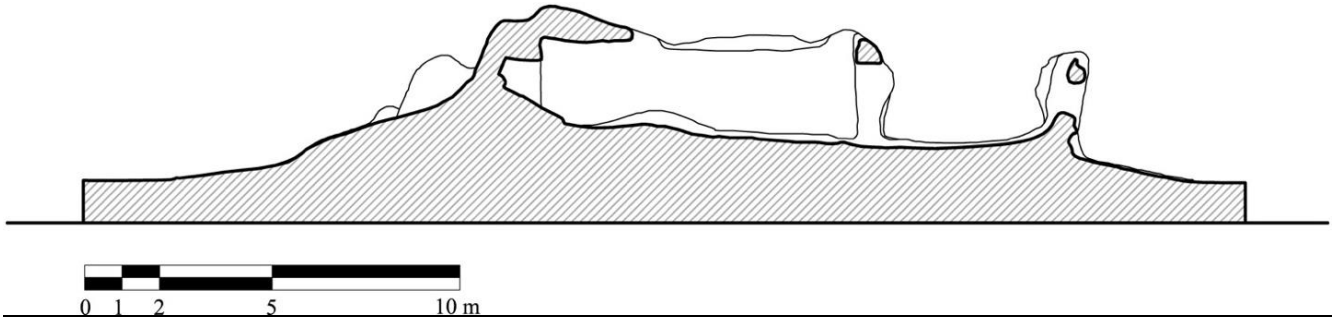


Figure 91: Coupe A-A des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

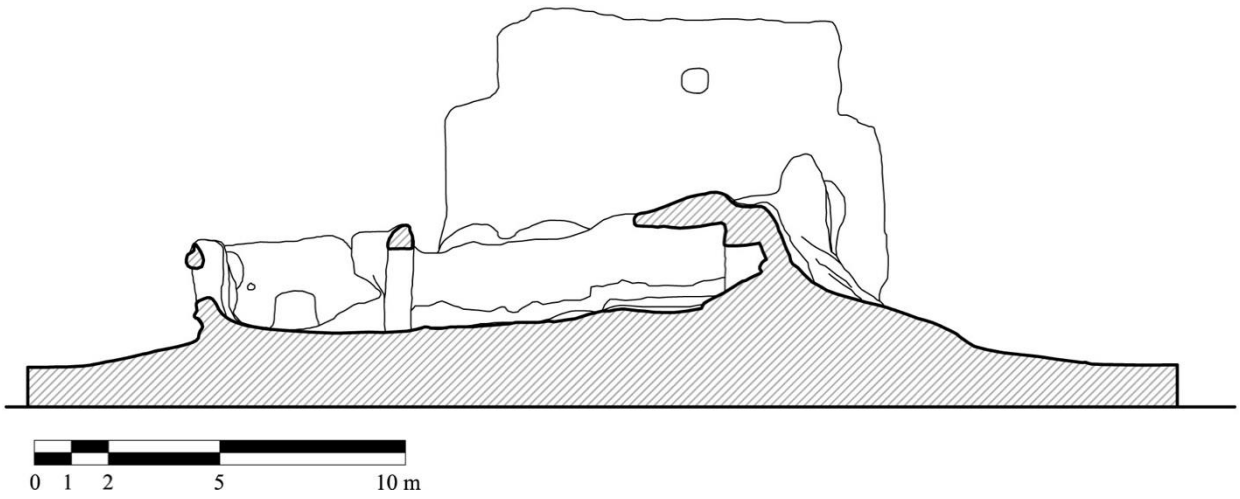


Figure 92: Coupe B-B des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

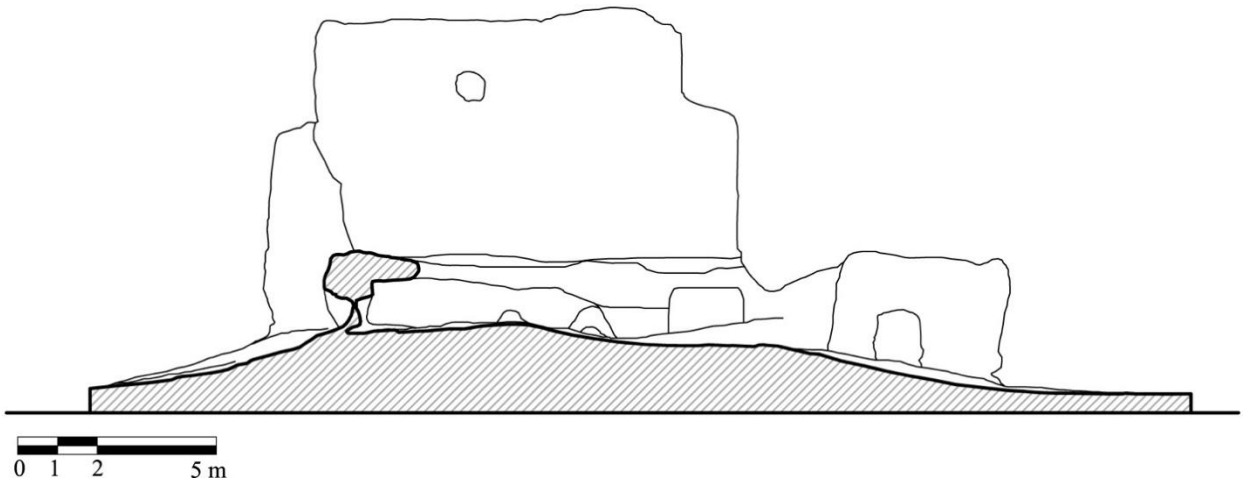


Figure 93: Coupe C-C des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

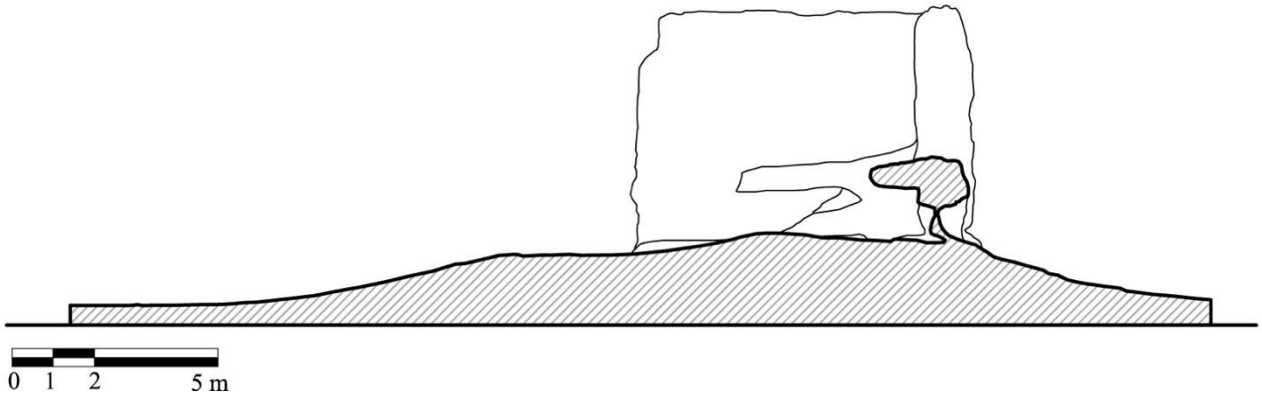


Figure 94: Coupe D-D des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

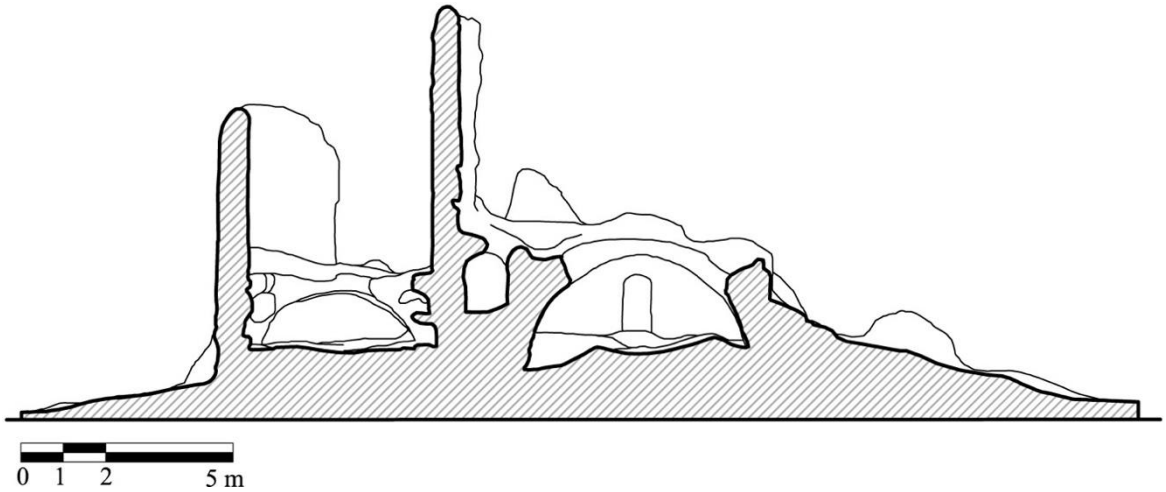


Figure 95: Coupe E-E des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

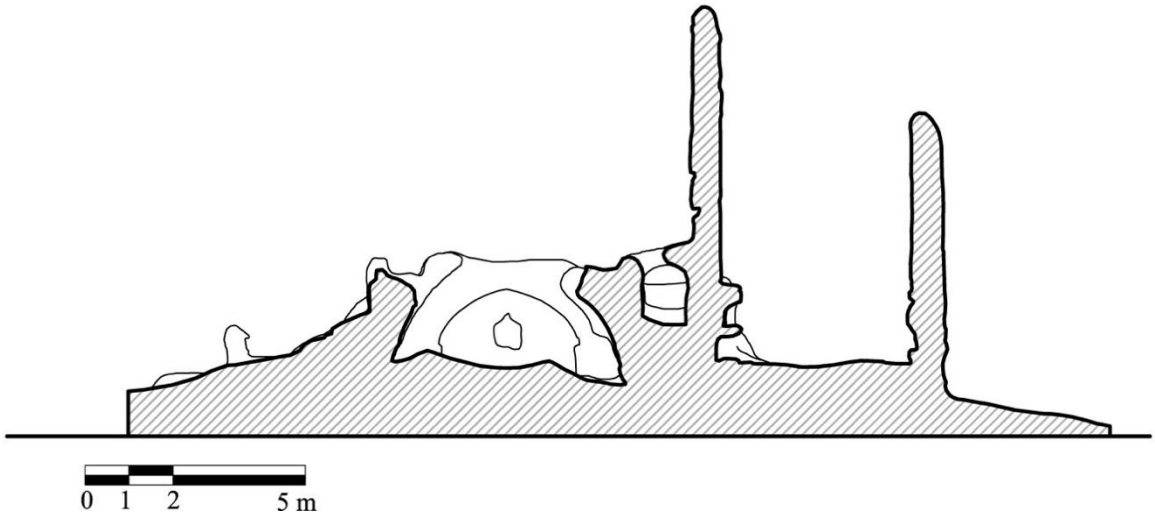


Figure 96: Coupe F-F des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

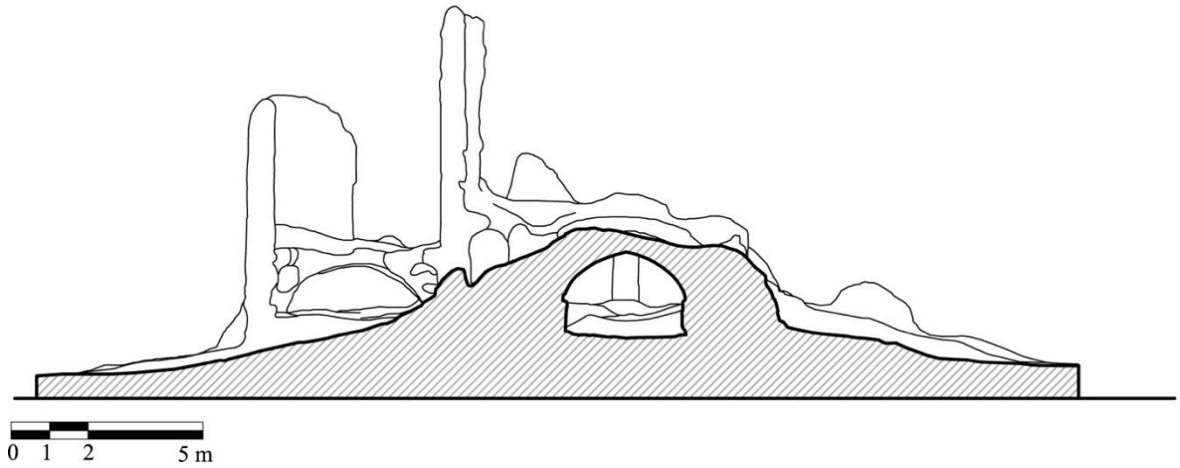


Figure 97: Coupe G-G des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

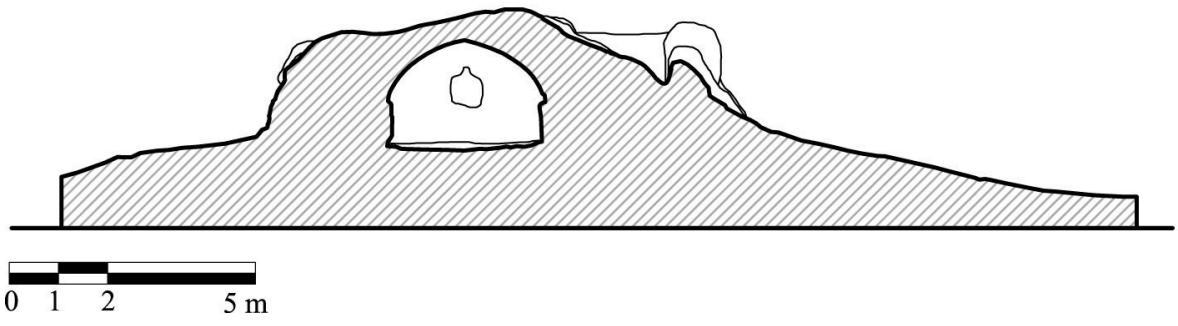


Figure 98: Coupe H-H des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

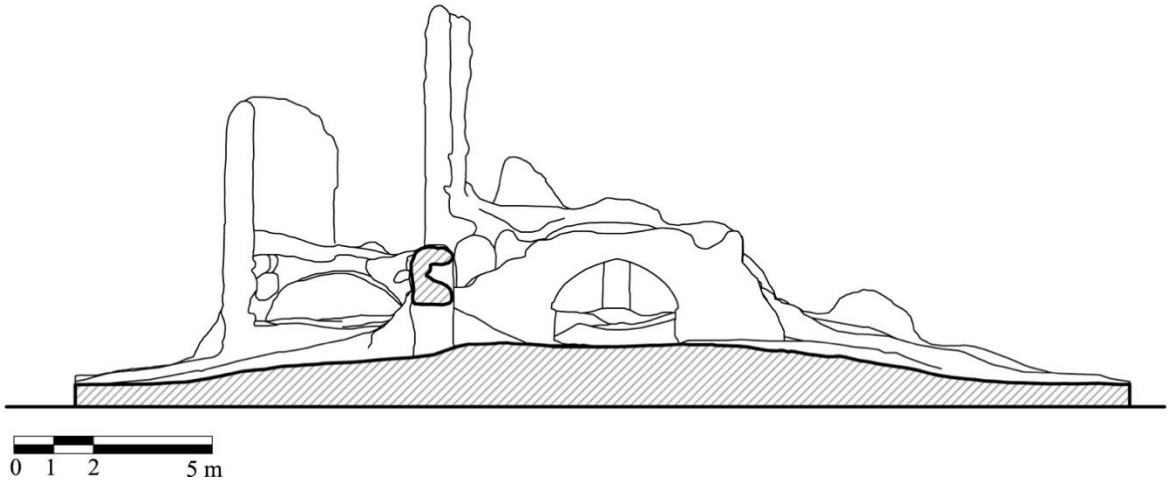


Figure 99: Coupe I-I des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

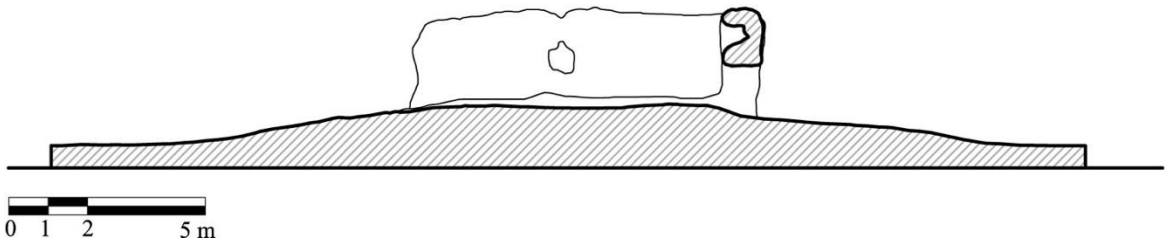


Figure 100: Coupe J-J des moulins à vent No 1 et 2 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

Moulins à vent No 3 du Qaleh-Rostam

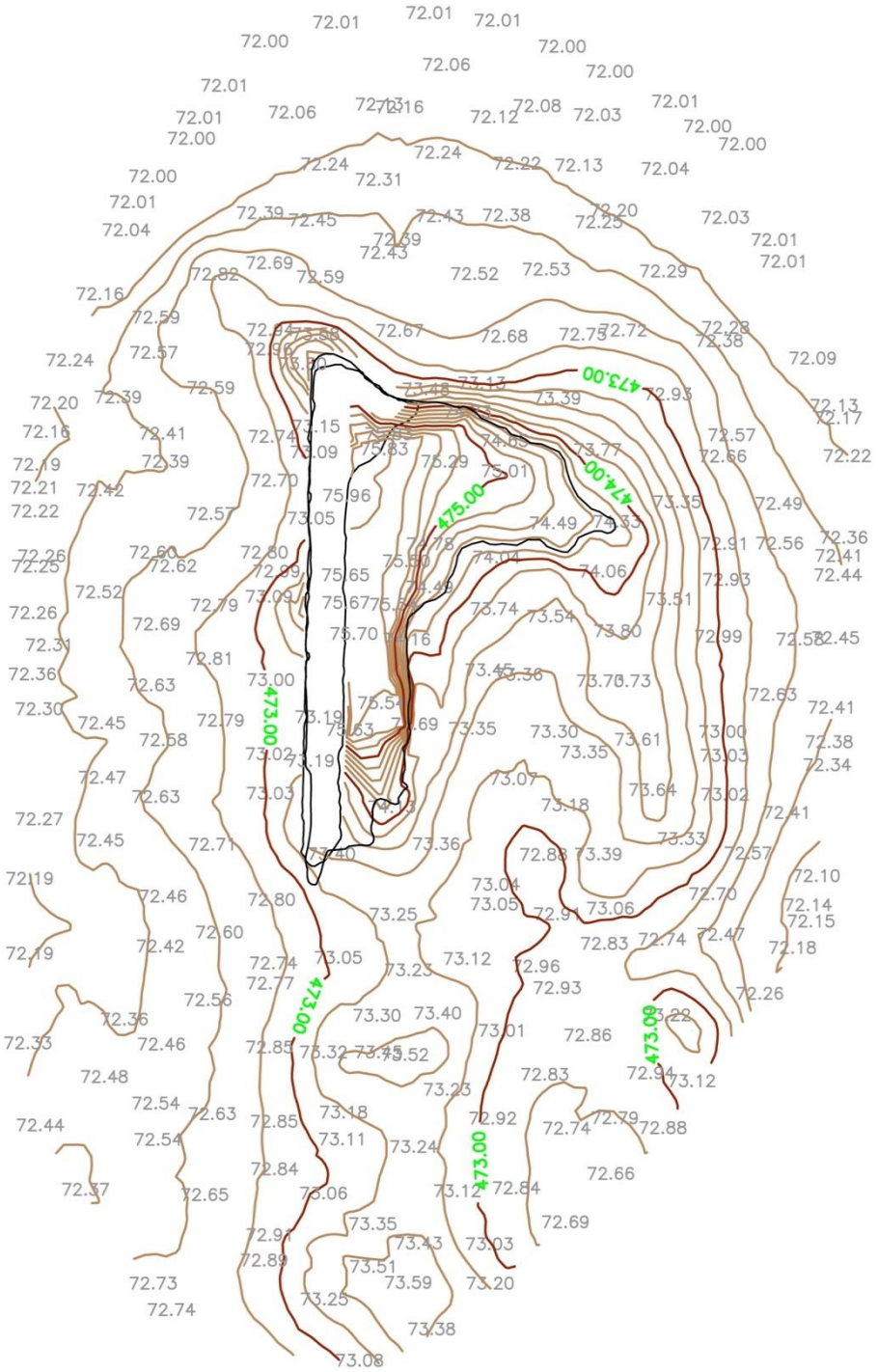


Figure 101: Localisation de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam dans la topographie de site, Source : OHAT

Figure 102: Façade nord de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 103: Façade ouest de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 104: Façade sud de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam en 2016

Figure 105: Façade est de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam en 2016

Scan laser de Moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam

Figure 106: Scan laser de volume sud ouest de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

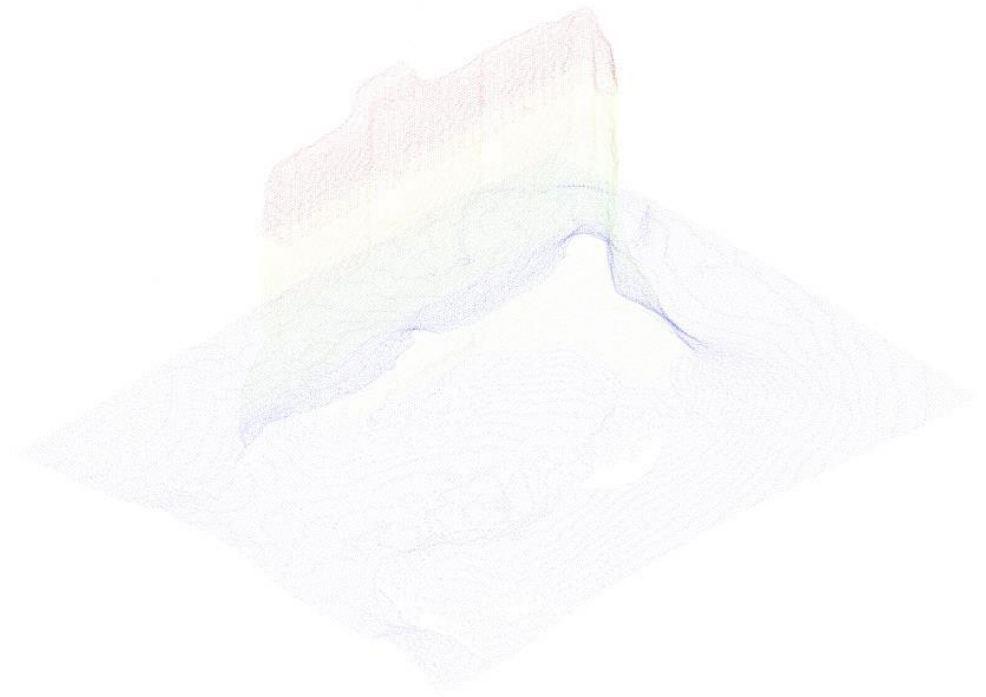


Figure 107: Scan laser de volume sud est de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

Figure 108: Scan laser de volume nord est de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

Figure 109: Scan laser de volume nord est de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

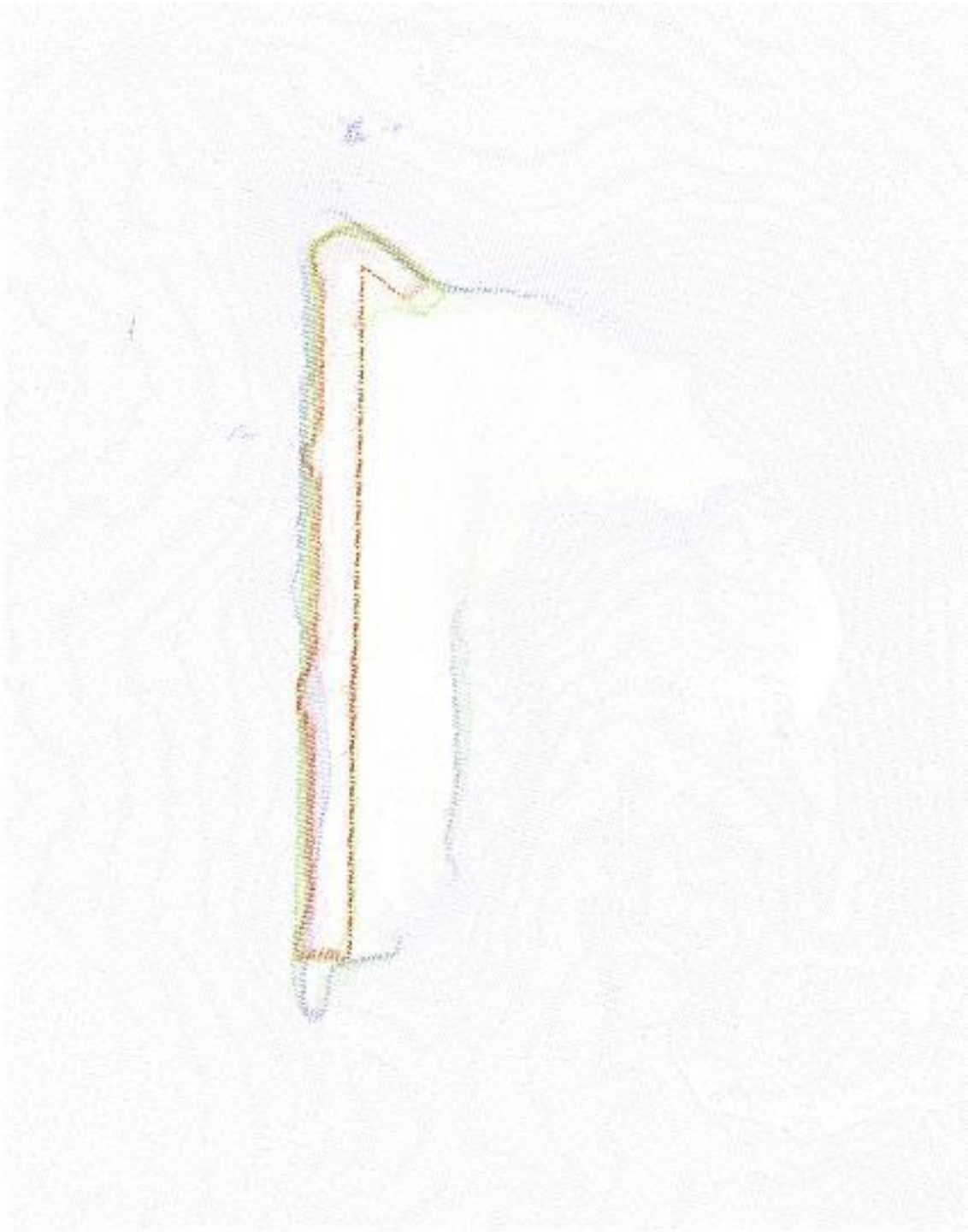


Figure 110: Scan laser de plan de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

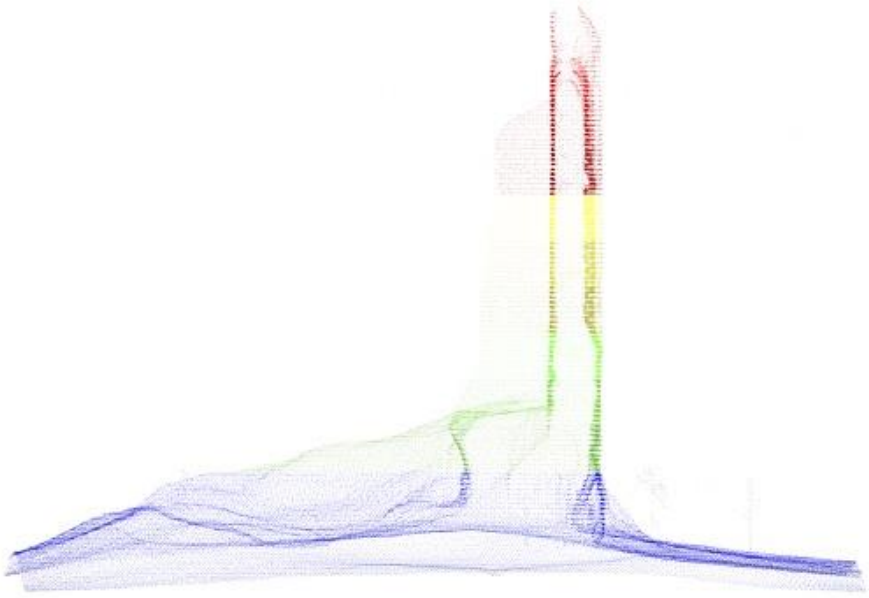


Figure 111: Scan laser de façade nord de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

Figure 112: Scan laser de façade est de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

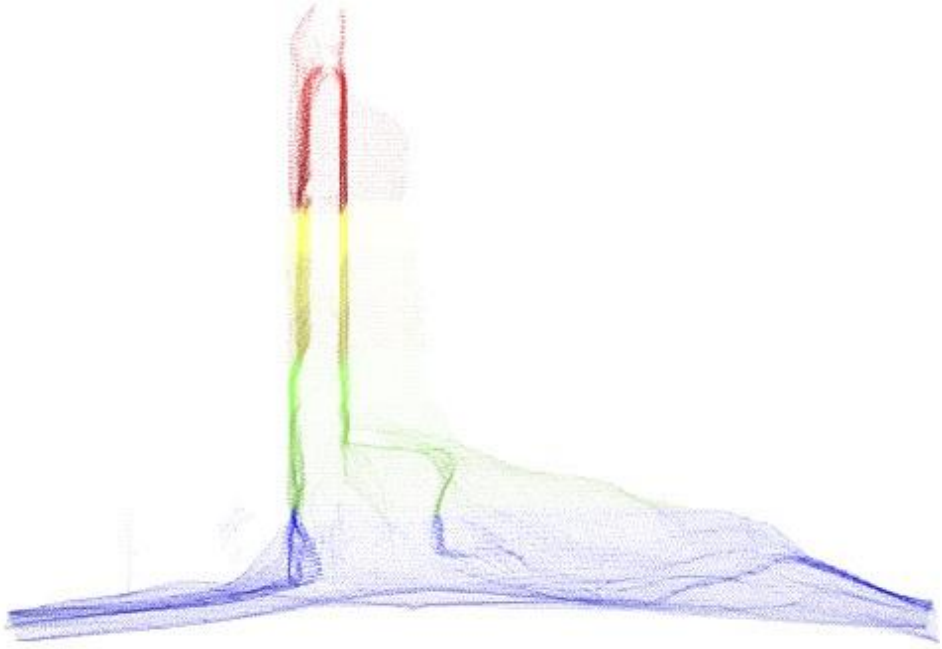


Figure 113: Scan laser de façade sud de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

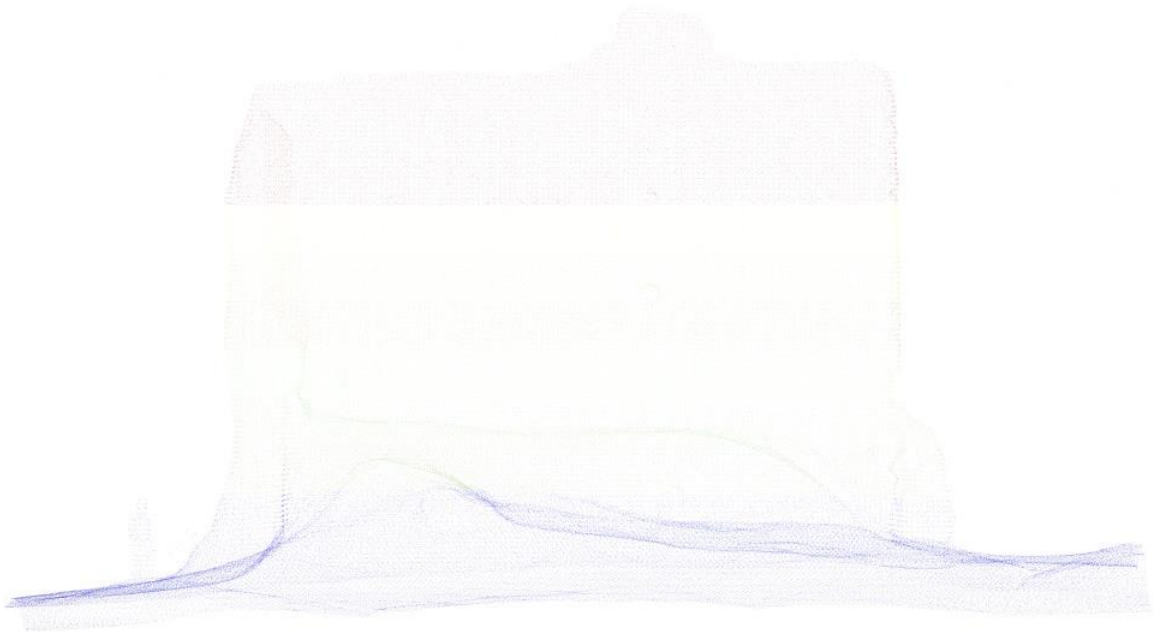


Figure 114: Scan laser de façade ouest de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam, Source : OHAT

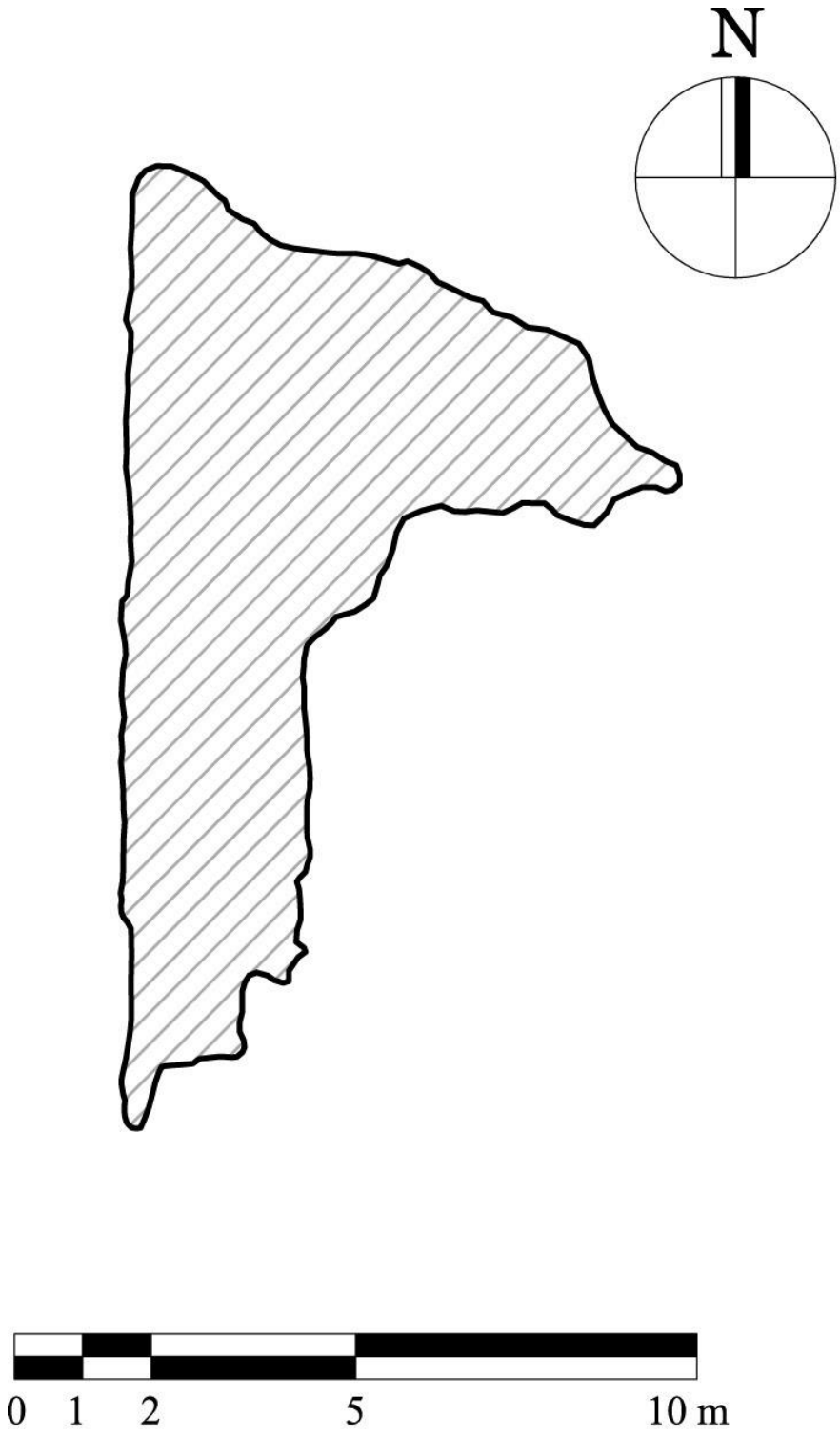


Figure 115: Plan RDC de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

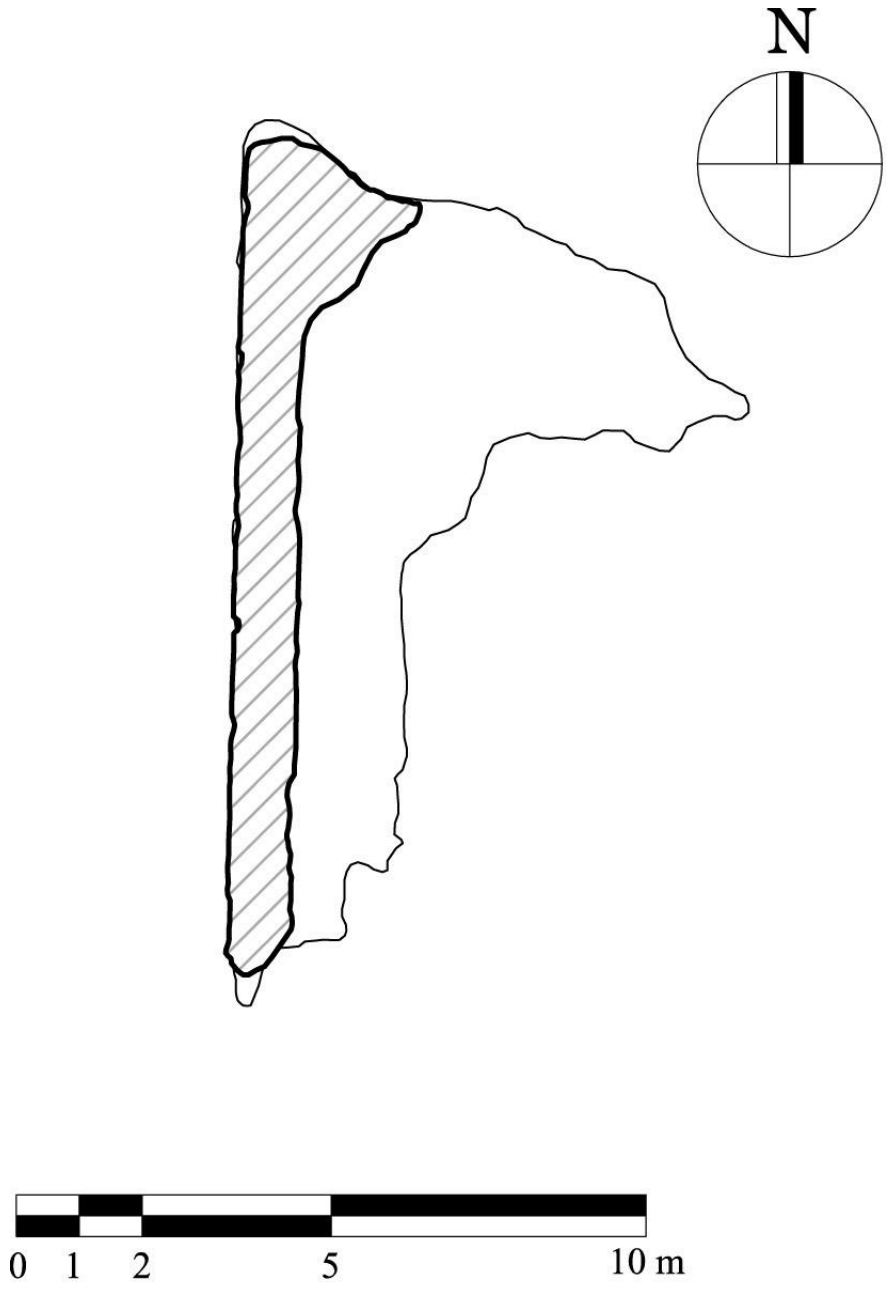


Figure 116: Plan RDC en hauteur de 1 mètre de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

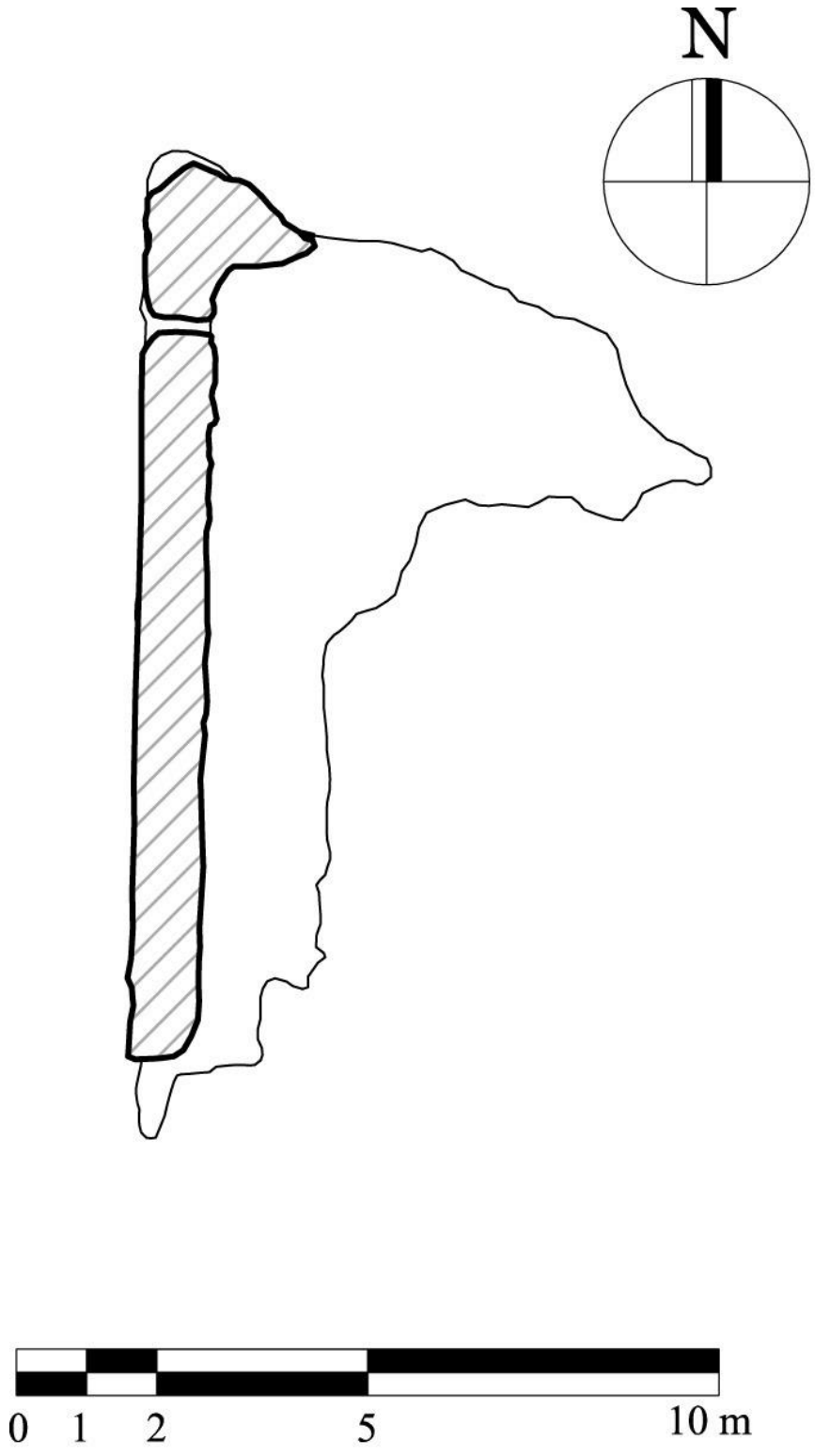


Figure 117 Plan RDC en hauteur de 2 mètre de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

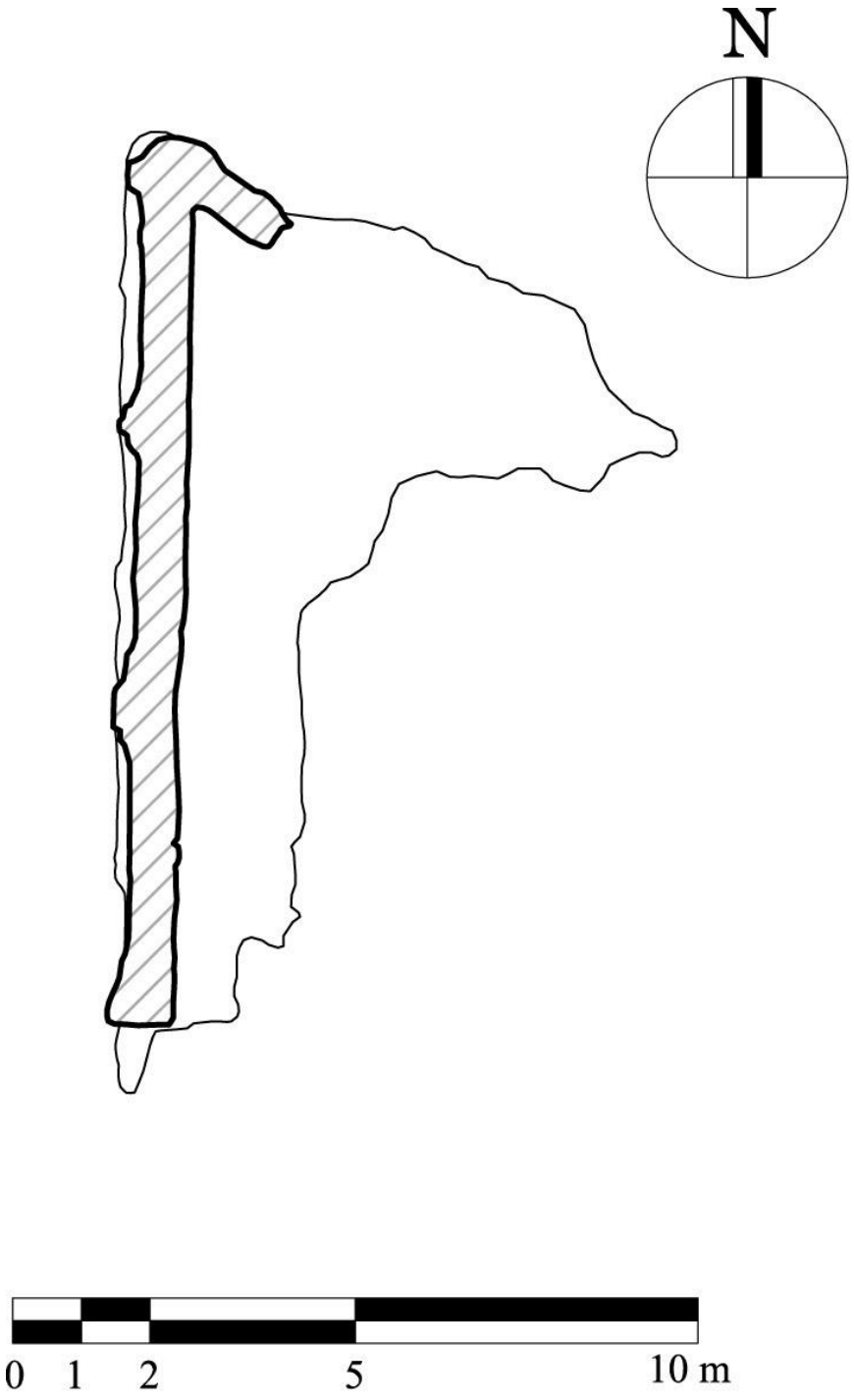


Figure 118: Plan RDC en hauteur de 3 mètre de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

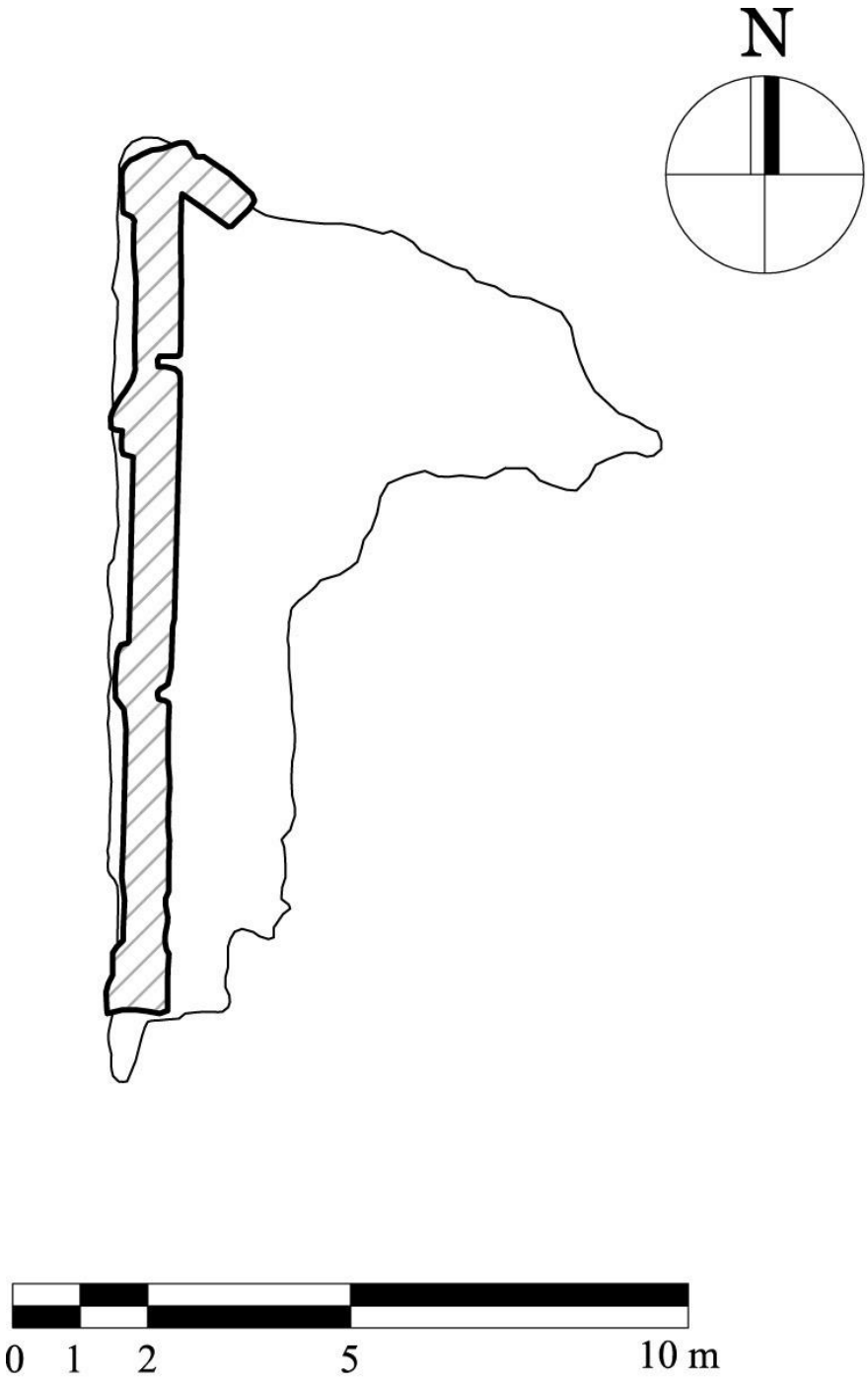


Figure 119: Plan RDC en hauteur de 4 mètre de moulin à vent No 3 du Qaleh-Rostam selon scan laser, Source : OHAT

Notes

1 - **HARTLEY, Leslie Poles** (30 décembre 1895 - 13 décembre 1972), connu sous le nom L. P. Hartley, était une romancière britannique et auteure de nouvelles. Ses romans les plus connus sont la trilogie *Eustace and Hilda* (1947) et *The Go-Between* (1953). Ce dernier roman fut adapté au cinéma en 1970 par Harold Pinter, pour le film de Joseph Losey, avec un casting de stars. Sa première phrase, « *The past is a foreign country: they do things differently there* », est devenue presque proverbiale.

2 - **DAUMAS, Maurice** (Béziers, le 19 décembre 1910 - Paris, le 18 mars 1984) est un chimiste et historien français, l'un des pionniers de l'histoire des techniques en France. Il consacra une partie essentielle de son travail à l'archéologie des techniques et au patrimoine industriel français. Dans son fameux livre intitulé *Histoire générale des techniques* publié en 1962, il présente le moulin à vent persan comme la première machine du monde.

3 - **(en) UBBELOHDE, A. R.,** *Man and Energy*, George Braziller, New York, 1955, p 113.

4 - **(en) FORBES, R. J.,** « Food and Drink », *in A History of Technology*, ed. Charles Singer et al., Oxford, 1956, vol. 2, pp. 46-103 et vol. 3, pp. 1-26.

5 - **(en) OSTWALD, Wilhelm**, « The Modern Theory of Energetics », *in The Monist*, vol. 17, 1907, pp. 481-515.

6 - **(en) MAC CURDY, George G.,** *Human Origins: A Manual of Prehistory*, vol. 2, D. Appleton & Co., New York, 1924, p 76.

7 - **(en) WHITE, Leslie,** « The Energy Theory of Cultural Development », *in Readings in Anthropology*, ed. Morton H. Freid, New York, 1959, 2, pp 46-139.

8 - **(en) COTTRELL, Fred.,** *Energy and Society*: *The Relation between Energy*, *Social Change, and Economic Development,* Greenwood Press Publishers, Westport, Connecticut, 1970, p 124.

9 - **(en) REYNOLDS, Terry S.,** *Stronger Than a Hundred Men*: *A History of The Vertical Water Wheel*, John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, 1983, p 87.

10 - **DAUMAS, Maurice,** *Histoire générale des techniques*, Presses universitaires de France, Paris, 1996, p 34.

11 - **(per) POURPIRAR, Naser**, *Douze siècle de silence*, Edition Carang, Téhéran, 2002, vol. 1, p 9.

12 - *Ibid*., p. 33.

13 - **(per) SEYED SADJADI, Seyed Mansour,** *Archéologie et Histoire du Baloutchistan*, Edition de l'Organisation de l'Héritage Culturel, Téhéran, 1995, p. 197.

15 - **L'Empire sassanide** (226-651) est le second empire persan et le nom de la quatrième dynastie iranienne. 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.

16 - **Les Saffârides** (867-903), l'un des premiers « gouvernements » iraniens indépendants après l'Islam, fut fondé par Yaqub Leis Saffari (840-879), au Sistan. Ce dernier annexa de grandes provinces iraniennes comme le Khorassan, Kerman et le Fars. Il allait se battre contre le calife de Bagdad lorsqu'il tomba malade sur le chemin de la conquête de la capitale abbasside ; son gouvernement indépendant ne parvint donc pas à libérer les territoires iraniens de l'emprise des califes arabes.

17 - **Les Seldjoukides** (1037-1194) sont les membres d'une tribu turque qui émigra du Turkestan vers le Proche-Orient avant de régner sur l'Iran et l'Irak actuels ainsi que sur l'Asie mineure entre le milieu du XI^{e} siècle et la fin du XIII^{e} siècle.

18 – **L'Empire mongol** ou Empire **turco-mongol** (1206-1243/1294), le plus grand empire continu ayant jamais existé, fut fondé au début du XIII^{e} siècle par Gengis Khan, ses fils et ses petits-fils ainsi que leurs armées. Il couvrit à son apogée, à la fin du XIII^{e} siècle, jusqu'à environ 33 millions de kilomètres carrés, s'étendant de la mer Méditerranée au Pacifique et de la Sibérie à l'Inde et à l'Indochine.

19 - **Tamerlan** (1370-1405) ou Timour le boiteux, est un guerrier turco-mongol du XIV^{e} siècle, conquérant d'une grande partie de l'Asie centrale et occidentale, fondateur de la dynastie des Timourides qui se perpétua jusqu'en 1857.

20 - **L'Empire safavides** (1501-1736) succéda aux Timourides. Les Safavides furent la première dynastie iranienne totalement indépendante à régner sur l'Iran depuis près de 1000 ans.

21 - **Nâdir Chah** (1688-1747) Après l'invasion et la suprématie afghane, assez brève, Tahmasp Quli, un chef de tribu Afshar, se mit à la tête d'une armée au nom des descendants des Safavides, chassa les AfgHanse du territoire iranien puis, en 1736, prit le pouvoir sous le nom de Nâdir Shâh. Il reconquiert alors tout le territoire iranien depuis la Géorgie et l'Arménie jusqu'à l'Afghanistan et organise des campagnes militaires qui le mènent jusqu'à Delhi en 1739.

22 - Après les guerres russo-iraniennes (1804-1813) et deux traités (Golestan, en 1812 et Turkmanchai en 1828) très défavorables pour les Perses, l'Iran perd tous ses territoires du Caucase au nord de l'Araxe.

23 – Dans la seconde moitié du XIX^{e} siècle, l'Iran fut obligé d'abandonner des territoires en Asie centrale au profit des Russes. La Russie souhaitait en effet étendre son territoire à partir du nord de l'Iran à cause de la rivalité qui l'opposait à la Couronne britannique en Asie.

24 – Au cours des conflits irano-russes sur les territoires iraniens en Asie-Centrale, la Grande Bretagne a envoyé des troupes en Iran pour empêcher Téhéran de récupérer Hérat et les autres territoires d'Afghanistan qui avaient été perdus depuis les Safavides ; la perte d'Hérat fut entérinée par le Traité de Paris en 1857.

25 – **Le COMTE DE GOBINEAU, Joseph Arthur** (1816-1882) est un diplomate et écrivain français. Il est l'auteur d'une œuvre littéraire romantique, d'essais polémiques et de travaux historiques et philologiques sur l'Iran ancien.

26 - **COMTE DE GOBINEAU, Joseph Arthur,** *Trois ans en Asie,* Edition Amir-Kabir, Téhéran, 1976, p. 223.

27 - Si on considère les pays du Caucase et de l'Asie centrale, ce plateau concerne aujourd'hui les pays suivants : l'Iran, l'Afghanistan, le Pakistan, l'Azerbaïdjan, l'Arménie, la Géorgie, le Turkménistan, l'Ouzbékistan, le Tadjikistan et le Kirghizstan.

28 - **(per) DIAKONOV, Mikhail Mikhailovich,** *History of ancient Persia*, Edition scientifique et culturelle, Téhéran, 2003, p. 4.

29 - *Ibid*., p. 4.

30 - **BINOCHE, Bertrand (dir.),** *Les équivoques de la civilisation*, Champ Vallon, Seyssel, 2005, p. 56.

31 - **POURPIRAR, Naser,** *op. cit*., p. 18.

32 - **La géopolitique** « désigne tout ce qui concerne les rivalités de pouvoirs ou d'influence sur des territoires et sur les populations qui y vivent » ; elle est donc l'étude des rapports de forces entre divers acteurs sur un espace plus ou moins défini.

33 - **La géostratégie** est l'étude de la fabrication des espaces par la guerre. Elle implique la géographie de chaque État, et sa situation historique et politique en regard de ses voisins, examinés par le biais d'études stratégiques. Son étude relève de la géopolitique, bien que son point de vue se réduise aux aspects militaires et leurs conséquences sur l'enjeu des ressources naturelles, fréquemment objet de conflits d'intérêts.

34 - http://www.ladocumentationfrancaise.fr/cartes/territoires-et-amenagement/c000969-l-iran-dans-son-contexte-regional

35 - **Les Afsharides** (1736-1749) : le XVIII^{e} siècle s'annonce pour l'Iran comme une ère de troubles et de conflits. La chute des Séfévides devant les AfgHanse de Mir Mahmoud Hotaki (1722) entraîne plusieurs années d'effusion de sang, de massacres et de pillages. C'est durant cette période qu'un militaire, « Nader », du clan Qirqlu de la tribu des Afshars, accède au pouvoir en libérant le pays de la domination afghane.

36 - Site internet du Musée de Mayo :
http://db.museumsofmayo.com/WebX?50@81.tIsWn4oanxV.0@.ee86f74

37 - **(en) MCGOWAN, Kathryn**. « A Brief History of Flour »,
http://blog.kathrynmcgowan.com/2009/12/14/a-brief-history-of-flour/

42 - Wessex Archaeology Images :
http://wessexarchaeology.photoshelter.com/image/I0000abbBzbmrfkA

43 - Collection numérique de la bibliothèque de l'Université de Stellenbosch :
http://digital.lib.sun.ac.za/handle/10019.2/359

44 - **WOLF, Hanse,** 2006, p. 251. Titre du livre + édition ?

45 - **(per) KARIMIAN SARDASHTI, Nader,** *La culture de l'eau et l'irrigation traditionnelle*, Comité national de l'irrigation et du drainage, Téhéran, 1999, p. 112.

46 - **Le Saṃsâra** signifie « transition » mais aussi « transmigration », « courant des renaissances successives ». Dans le bouddhisme, il s'agit du cycle des existences conditionnées, c'est-à-dire les états de l'existence sous l'emprise de la souffrance, de l'attachement et de l'ignorance. Ces états sont conditionnés par le karma.

47 - **(per) POURDAVOUD**, « Une page de l'histoire de l'arme en Iran, Falakhan », *Revue d'observation historique*, nº 53-58, 1968, p. 16.

48 - **(en) MUMFORD, Lewis,** *Technics and Civilisation*, Harcourt, Brace & Company, New York, 1934, p. 149.

49 - (**en) REYNOLDS, Terry S.,** *Stronger Than a Hundred Men, A History of the Vertical Water Wheel*, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, 1983, p. 1.

50 - Site sur l'archéologie dinosoria.com : http://www.dinosoria.com/invention_brouette.htm
51 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 13.
52 - REYNOLDS Terry S., *Ibid.*

55 - **SMITH, Norman**, « Histoire de machine. L'histoire de la turbine à eau », *in Scientific American*, Paris, 1980, p. 55.

56 - **SMITH, Norman,** 1980, p. 58.
57 - **REYNOLDS Terry S.,** 1983, p. 15.
58 – *Ibid.*, p. 19.
59 – *Ibid.*, p. 10.
60 – *Ibid.*, p. 33.
61 - **WOLF Hanse**, *op. cit*., p. 252-3.
62 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 19.
63 – *Ibid.*, p. 39.
64 – *Ibid.*, p. 33.

65 - **Strabo** ou **Strabon d'Amasia** (58 av. J.-C. - 25 ap. J.C.), géographe et historien grec, né à Amasée en Cappadoce vécut aux I^er^ siècles avant et après JC. Il écrivit en grec une *Histoire de Rome*, aujourd'hui perdue, qui continuait celle de Polybe, et une *Géographie universelle* en 17 livres, qui nous sont heureusement parvenus.

66 - **(per) WOLF Hanse**, *op. cit*., p. 252-253.

67 - **Mithridate VI Eupator** (120 - 63 av. J.-C.), en persan **Mehrdâd VI,** plus connu sous le nom de Mithridate le Grand. Il est le fils aîné du roi du Pont Mithridate V

Évergète. Le conflit avec les Romains est inévitable (première guerre de Mithridate). Ceux-ci en effet ont rétabli en 92 av. J.-C. Ariobarzane Ier de Cappadoce sur son trône. En 88 av. J.-C., après la conquête de la Bithynie, Mithridate fait une entrée triomphale à Éphèse et soulève les Grecs d'Asie. Il ordonne le massacre des Romains établis en Asie Mineure, massacre qui fait environ 80 000 victimes, puis passe en Grèce où son lieutenant Archélaos est accueilli en libérateur.

68 - **(en) STRABO**, *Geographica*, Horace Leonard Jones, London, 1928, p. 428-429.

69 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 17.

70 - **Antipater de Thessalonique** est un auteur d'épigrammes du Ier siècle, de la ville grecque de Thessalonique.

71 - Dans la littérature grecque, une ode est un poème lyrique en strophes, accompagné de musique. Par extension, une ode est un poème célébrant un personnage ou événement : un vainqueur des Jeux olympiques, par exemple.

72 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 15.
73 - **NEEDHAM, Josef,** 1965, p. 361. Titre du livre + édition ?

74 - **Philo** ou **Philon d'Alexandrie** est un philosophe juif hellénisé, contemporain des débuts de l'ère chrétienne (Alexandrie, vers -20 av. J.-C. - vers 45 ap. J.-C.).

75 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 23.

76 - **Lucrèce** (en latin Titus **Lucretius Carus**) est un poète philosophe latin du Ier siècle av. J.-C., (peut-être 98-55), auteur d'un seul livre inachevé, le *De rerum natura* (*De la nature des choses*, qu'on traduit le plus souvent par *De la nature*), un long poème passionné qui décrit le monde selon les principes d'Épicure.

77 - **NEEDHAM Josef**, *op. cit*., pp. 405-406.
78 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 18.

86 - Sachant qu'ici le moulin à eau horizontal est celui à axe vertical et le moulin à eau vertical est celui à axe horizontal.

87 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 22.
88 - **WHITE Lynn**, 1980, p. 46. Titre du livre + édition ?

82 - **(en) PAYSON USHER Abbott,** *A History of Mechanical Inventions*, Harvard University Press, Cambridge, 1954, p. 161.

83 - **(en) MORITZ Ludwig Alfred,** *Grain-mills and Flour in Classical Antiquity*, Clarendon Press, Oxford, 1958, p. 134.

84 - Sachant qu'ici le moulin à eau horizontal est celui à axe vertical et le moulin à eau vertical est celui à axe horizontal. Répétition ?

85 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 22.

86 - Sachant qu'ici le moulin à eau horizontal est celui à axe vertical et le moulin à eau vertical est celui à axe horizontal. Répétition ?

87 - **REYNOLDS Terry S.,** *op. cit*., p. 22.
88 - **WHITE Lynn**, *op. cit*., p. 46.

89 - **(per) FARCHAD, Mehdi,** *Histoire de l'ingénierie en Iran*, Edition Balkh liée à la fondation de Neyshabur, Téhéran, 1997, p. 99.

90 - Ibid.

91 - **(en) TRAUTMANN Thomas R.,** *Kauṭilya and the Arthaśāstra: A Statistical Investigation of the Authorship and Evolution of the Text*, E.J. Brill, Leiden, 1971.

92 - **TRAUTMANN Thomas R.** est un historien américain, professeur au département d'histoire de l'Université du Michigan. Ses recherches sont consacrées à l'Inde antique.

93 - **MABBETT I.W.,** historien à l'Université de Monash, en Australie, est aujourd'hui professeur émérite à l'Université d'Aichi Bunkyo, à Nagoya au Japon.

94 - **(en) MABBETT I. W.,** « *The Date of the Arthaśāstra* », Journal of the American Oriental Society (Journal of the American Oriental Society, vol. 84, nº 2, avril 1964), pp. 162-169.

95- Site internet de WebEcoist : http://webecoist.momtastic.com/2008/11/16/wind-turbine-power-generators/6-wind-powered-tibetan-prayer-wheel/

96 - **(en) HILL Richard Leslie,** *Power from wind: A history of windmill technology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994, p. 14.

97- *Ibid*., p. 11.
98 - **(per) WOLF Hanse**, *op. cit*., p. 257.
99 - *Ibid.*, p.12.

100 - **(per) Auteur inconnu**, *Histoire du Sistan*, corrigé par Mohammad Taghi Bahâr, Edition Moien, Téhéran, 2002, p. 12.

101 - **(per) MOUSAVI HAJI Seyed Rasoul, MEHRAFARIN Reza**, *Observation méthodologique et archéologique du Sistan*, vol 13, Zâhedân, Université du Sistan et Baloutchistan, 2008, p.1045.

102 - **(per) MEHRAFARIN, Reza,** *Vérification et analyse archéologique de la région de Zahak au Sistan*, sous la direction de Seyed Mansour, Seyed Sadjadi, texte imprimé, thèse du doctorat en archéologie, Université de formation des enseignants (Tarbiat-e Modares), Téhéran, 2004, pp. 223-228.

103 - *Ibid.*, p. 227.
104 - **WOLF Hanse**, *op. cit*., p. 257.

105 - **(en) KEALEY, Edward J.,** *Harvesting the Air: Windmill Pioneers in Twelfth Century England*, University of California Press, 1992, 320 p.

106 - **(en) GIPE, Paul,** *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & sons, New York, 1995, pp.118-119.
107 - **HILL, Richard Leslie,** *op. cit*., p. 15.

108 - **WOLF, Hanse,** *op. cit*., p. 257.
109 - **HILL Richard Leslie**, *op. cit*., p. 14.
110 - **DUMAS Maurice**, *Histoire Générale des Techniques*, Presses universitaires de France, Paris, 1962.
111 - **WOLF Hanse**, *op. cit*., p. 258.
112 - **GIPE Paul**, 1995, p. 118-119. Titre du livre + édition ?
113 - **WHITE Lynn**, *op. cit*., p. 51.
114 - **HILL Richard Leslie**, *op. cit*., p. 16.
115 - *Ibid.*, p. 17.
116 - **HILL Richard Leslie**, *op. cit*., p. 16.

117 - **VERANZIO Faustus**, *Machinae Novae*, manuscrit de la Bibliothèque nationale de France, vers le XVII^{e} siècle, p. 12.

118 - *Ibid*., p. 13.
119 - *Ibid*., p. 11.
120 - *Ibid*., p. 8.
121 - *Ibid*., p. 9.
122 - *Ibid*.
123 - (en) HILL Richard Leslie, *op. cit*., p. 17.

124 - Comme nous l'avons expliqué précédemment, la roue d'irrigation chinoise a une origine iranienne bien qu'elle ait disparu de la région du Sistan après l'invasion des Mongols au XIII^{e} siècle. L'histoire de ce mode d'irrigation commence d'ailleurs en Chine à la même époque. Il est donc préférable de la nommer « roue d'irrigation irano-chinoise ».

125 - ?????
126 - *Ibid*., p. 18.
127 - **(en) WAILES, R.,** *Berney Arms Windmill*, H. M. S. O., London, 1957, pp. 135-6.
128 - (en) HILL Richard Leslie, *op. cit*., p. 19.

129 - Science & Society Picture Library: http://www.ssplprints.com/image/129787/leonardo-da-vinci-da-vinci-design-for-an-airscrew-operated-smoke-jack-1480-1482

130 - **(en) MATHE, J.,** *Leonardo's Inventions*, Miller Graphics, Geneva, 1980, p. 62.

131- **(en) SCHOFIELD, R. E.**, The Lunar Society of Birmingham. A Social History of Provincial Science and Industry in Eighteenth Century England, Clarendon Press, Oxford, 1963, p.74.

132 - Site internet de « Chest of books »: http://chestofbooks.com/reference/The-Domestic-Encyclopaedia-Vol4/Water.html#.UiVwfzBXv7c

133 - **HILL Richard Leslie**, *op. cit*., p. 21.

134 - **(en) BAKER, T. L.,** *A Field Guide to American Windmills*, University of Oklahoma Press, Norman, 1985, p.14.

135 - **(en) NACFAIRE, H.,** *Grid-Connected Wind Turbines*, Elsevier Applied Science, London, 1988, pp. 12-15 et pp. 112-15.

136 - **HILL Richard Leslie**, *op. cit*., p. 23.
137 - **GIPE Paul**, *op. cit*., pp. 172-173.

138 - Site internet de « Connaissance des énergies » : http://www.connaissancedesenergies.org/qu-est-ce-que-le-petit-eolien

139 - **WHITE Lynn**, *op. cit*., p. 46.
140 - **(per) WOLF, Hanse,** *op. cit*., p. 254.
141 – *Ibid*., p. 253.
142 - *Ibid*.
143- (en) HILL Richard Leslie, *op. cit*., p.13.

144 - **Antiochos XIII Asiaticus,** « l'Asiatique » (85-64 av. J.-C.) est l'un des derniers Séleucides. Il règne sur la Syrie de 68 à 64 av. J.-C.

145 - **Marcus Licinius** (115-53 av. J.-C.) est un général et politicien romain qui joua un rôle essentiel dans le passage de la République à l'Empire. Crassus est désigné gouverneur de la Syrie romaine, il fait usage de la Syrie comme d'une plate-forme afin de lancer sa campagne militaire contre l'empire parthe, le traditionnel ennemi oriental de Rome. Sa campagne est un échec retentissant, s'achevant par sa défaite et sa mort à la bataille de Carrhes.

146 - **(per) CLIFFORD BATHWORTH, Edmond**, *Histoire du Sistan*, traduite en persan par Hassan Anoucheh, Edition Amir Kabir, Téhéran, 1998, p. 15.

147 - **Le Shâh Nâmeh** ou **Châhnâmeh** en persan, ou *Livre des rois* est un poème épique retraçant l'histoire de l'Iran (Grand Iran) depuis la création du monde jusqu'à l'arrivée de l'Islam, en plus de 60 000 distiques, écrit aux alentours de l'an 1000 par Ferdowsi. Ce livre est considéré comme la référence de la mythologie perse.

148 - Site officiel de Mahmoud FARSHTCHIAN : http://www.farshchianart.com/

149 - **(per) MOUSAVI HAJI Seyed Rasoul, MEHRAFARIN Reza,** *Une introduction à la géographie historique du Sistan*, Organisation de l'Héritage Culturel de l'Iran, Zâhedân, 2009, p. 32.

150 - **(per) Auteur inconnu**, *op. cit*., p. 64.

151 - **(en) WHITNEY, John W.,** *Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2006, p. 17.

152 - **Sir Arthur Henry MacMahon** (1862 - 1949) est un homme politique britannique. Il présida la commission qui délimita la frontière entre Iran et Afghanistan entre 1903-1905. Il négocia également avec le chérif Hussein lors de la rébellion arabe contre l'empire ottoman durant la Première Guerre mondiale.

153 - **(per) AHMADI, Hassan,** *Géographie historique du Sistan, voyage avec les carnets du voyage*, publié par l'auteur, Téhéran, 1999, p. 369.

154 – *Ibid.*, p. 370.
155 - (en) WHITNEY, John W., *op. cit*., p. 5.

156 - **Chahr-e-Soukhteh**, (littéralement **la cité brûlée**), est l'un des sites archéologiques les plus remarquables du monde, situé sur la rive de la rivière Hirmand, au bord de la route reliant les villes de Zâhedân et Zâbol, à 55 kilomètres, au sud de Zâbol. Fondée à l'aube de l'ère urbaine, la cité fut bâtie sur l'une des avancées du delta du Sistan, dominant de quelques mètres les plaines environnantes. Dès le 3e millénaire avant notre ère, les habitants y cultivaient la terre. Cette chaîne de petites collines, qui juxtapose les plus anciennes terres du delta du Hirmand, remonte à l'âge de bronze.

157 - (per) SEYED SADJADI, Seyed Mansour, *op. cit*., p. 199.
158 - (en) WHITNEY, John W., *op. cit*., p. 2.
159 - *Ibid.*, p.29.
160 - *Ibid.*, p. 3.
161 – *Ibid.*, p. 387.

162 - **Arnold Henry Savage Landor** est un peintre, explorateur, écrivain et anthropologue anglais. Il voyagea d'abord en Amérique du Nord puis en Extrême-Orient et publia le compte-rendu de son séjour parmi les peuplades primitives Ainous des iles Kouriles. Le récit de son expédition, véritable « best-seller » à la fin du XIXe siècle, fut publié dans la prestigieuse revue *Le Tour du monde*. Dans son livre *Le pays désiré* se trouve une série de rapports sur le Sistan.

163 - **(per) AHMADI, Hassan**, *op. cit*., p. 586.
164 - (en) WHITNEY, John W., *op. cit*., p. 19.
165 – *Ibid.*, p.13.
166 - (en) WHITNEY, John W., *op. cit*., p. 21.
167 - **(per) AHMADI, Hassan**, *op. cit*., p. 391.

168 - **(per) MEHRAFARIN, Reza,** Vérification et analyse archéologique de la région de Zahak au Sistan, op. cit., p. 76.

169 - **(per) DANDAMAYEV M. A.,** *L'Iran à l'époque des premiers rois achéménides*, traduit en persan par Rouhi Arbab, Presses scientifiques et culturelles, Téhéran, 1994, p. 138.

170 - **(per) MEHRAFARIN, Reza,** Vérification et analyse archéologique de la région de Zahak au Sistan, p. 80.

171 – *Ibid*., p. 81.

172 - **(per) SISTANI Mohammad Azam,** *Le Sistan, territoire des sables et des légendes*, Presse Ariana, vol. 1, Téhéran, 1967, pp. 137-139.

173 - **(per) FRYE, Richard N.,** *L'héritage antique de l'Iran*, traduit en persan par Masoud Rajabnia, Presses scientifiques et culturelles, Téhéran, 1994, p. 299.

174 - **(per) HERTZFELD, Ernest,** « *Histoire antique de l'Iran d'après l'archéologie*, traduit en persan par Ali Asqar Hekmat, Presses de l'association des œuvres nationales, Téhéran, 1975, pp. 101-102.

175 - **(per) HOWARD, Clement,** *L'Iran et la civilisation iranienne*, traduit en persan par Hassan Anousheh, Presses d'Amir Kabir, Téhéran, 2000, p. 143.

176 - **(per) SEKAIE SISTANI, Javad,** *Matikan du Sistan, ensemble d'articles sur le Sistan*, Edition Vajiran, Mashad, 1999, p. 165.

177 - (per) SEYED SADJADI, Seyed Mansour, *op. cit*., p. 201.
178 - **(per) WOLF, Hanse,** *op. cit*., p. 257.
179 - *Ibid*.
180 - *Ibid*.
181 - (per) SEKAIE SISTANI, Javad, *op. cit*., p. 165.

182 - **(per) SAVORY, Roger,** *Iran Under the Safavids*, traduit en persan par Kambiz Azizi, Edition Markaz, Téhéran, 2012, p. 190.

183 - **(en) POPE, Arthur,** *A New Survey Of Persian Art From Pre-Historic Times to the Present*, Edition Charles Scribner's Sons, New York, 1931.

184 - **(per) WOLF, Hanse,** *op. cit*., p. 257.

185 - En persan « nish-e toufan » ou « pic de la tempête », c'est-à-dire où la tempête commence.

186 - Village situé près de la ville de Nehbandan, ville qui faisait autrefois partie du territoire du Sistan et qui a également une chaîne de ce type de moulins à vent mais détruite.

187 - **MOHSENIN M.,** *Introduction sur le prix du pain*, Les nouvelles de l'économie, Téhéran, 1994, pp. 56-60.

188 - **MAJD, Mohammad Gholi,** *The Great Famine and Genocide in Persia, 1917-1919*, University press of America, Lanham, 2003, 162 p.

189 - **RAVANBAKHSH, M.,** *Subvention et son passé en Iran*, Rapports sociopolitiques, Organisation des études et des recherches commerciales, Téhéran, 1991, pp. 83-85.

190 - **AZARI, SH.,** *La famine et l'augmentation du prix du pain entre 1941-1945*, Archive du Document, Téhéran, 1991, pp. 4-17.

191 - **SHEIKHI, A.,** « Une analyse des problèmes du procès du blé-farine-pain, en remarquant sur le rôle de réservation », Revue de la recherche et de fertilisation, Téhéran, 2003, pp. 30-47.

192 - M. Arash Boustani, architecte chargé de la restauration du château de Hérat, a trouvé par hasard les deux moulins à vent abandonnés, dans des villages situés à la périphérie de la ville de Hérat ; il est intervenu pour leur restauration, en collaboration avec des habitants de la région. Le projet a été réalisé en août 2007, dans le village de Shakiban.

Sources bibliographiques

(per) AHMADI, Hassan, Géographie historique du Sistan, voyage avec les carnets du voyage, publié par l'auteur, Téhéran, 1999.

(per) Auteur inconnu, *Histoire du Sistan*, corrigé par Mohammad Taghi Bahâr, Edition Moien, Téhéran, 2002.

AZARI, SH., La famine et l'augmentation du prix du pain entre 1941-1945, Archive du Document, Téhéran, 1991.

(en) BAKER, T. L., *A Field Guide to American Windmills*, University of Oklahoma Press, Norman, 1985.

(en) BASHEAR, Suliman, *Arabs and Others in Early Islam*, Darwin Press, Princeton, 1997.

BIARNES, Pierre, La Route de la Soie. Une histoire géopolitique, Ellipses, Paris, 2008.

BINOCHE, Bertrand (dir.), *Les équivoques de la civilisation*, Champ Vallon, Seyssel, 2005.

BOULNOIS, Lucette, La Route de la Soie. Dieux, guerriers et marchands, Olizane, Genève, 2001.

BRIANT, Pierre (dir.), Irrigation et drainage dans l'Antiquité. Qanâts et canalisations souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce, Collège de France/Thotm Edition, « Persika-2 », Paris, 2001.

BRIANT, Pierre, Histoire de l'Empire perse, de Cyrus à Alexandre, Fayard, Paris, 1996.

(per) CLIFFORD BATHWORTH, Edmond, *Histoire du Sistan,* traduit en persan par Hassan Anoucheh, Edition Amir Kabir, Téhéran, 1998.

COMTE DE GOBINEAU, Joseph Arthur, *Trois ans en Asie,* Edition Amir-Kabir, Téhéran, 1976.

(en) COTTRELL, Fred., Energy and Society: The Relation between Energy, Social Change, and Economic Development, Greenwood Press Publishers, Westport, Connecticut, 1970.

(per) DANDAMAYEV M. A., *L'Iran à l'époque des premiers rois achéménides*, traduit en persan par Rouhi Arbab, Presses scientifiques et culturelles, Téhéran, 1994.

DAUMAS, Maurice, *Histoire générale des techniques*, Presse universitaire de France, Paris, 1962 (tome 1), 1965 (tome 2), 1969 (tome 3), 1979 (tomes 4 et 5).

(per) DIAKONOV, Mikhail Mikhailovich, *History of ancient Persia*, Edition scientifique et culturelle, Téhéran, 2003.

(en) DONNER, Fred, *The Early Islamic Conquests*, Princeton University Press, Princeton, 1981.

(per) FARCHAD, Mehdi, *Histoire de l'ingénierie en Iran*, Edition Balkh liée à la fondation de Neyshabur, Téhéran, 1997.

(en) FORBES, R. J., « Food and Drink », *in A History of Technology*, ed. Charles Singer et al., Oxford, 1956.

(per) FRYE, Richard N., *L'héritage antique de l'Iran*, traduit en persan par Masoud Rajabnia, Presses scientifiques et culturelles, Téhéran, 1994.

GHIRSHMAN, Roman, *L'Iran des origines à l'Islam,* Presses scientifiques et culturelles, Téhéran, 1993.

(en) GIPE, Paul, *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & sons, New York, 1995.

(per) HERTZFELD, Ernest, « *Histoire antique de l'Iran d'après l'archéologie*, traduit en persan par Ali Asqar Hekmat, Presses de l'association des œuvres nationales, Téhéran, 1975.

(en) HILL Richard Leslie, *Power from wind: A history of windmill technology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

(per) HOWARD, Clement, *L'Iran et la civilisation iranienne*, traduit en persan par Hassan Anousheh, Presses d'Amir Kabir, Téhéran, 2000.

(per) KARIMIAN SARDASHTI, Nader, *La culture de l'eau et l'irrigation traditionnelle*, Comité national de l'irrigation et du drainage, Téhéran, 1999.

(en) KEALEY, Edward J., Harvesting the Air: Windmill Pioneers in Twelfth Century England, University of California Press, 1992.

(en) KUHRT, Amélie, The Persian Empire. A Corpus of Sources from the Achaemenid Period, 2 vols., Routledge, London et New York, 2007.

(en) MABBETT I. W., « *The Date of the Arthaśāstra* », Journal of the American Oriental Society (Journal of the American Oriental Society, vol. 84, n° 2), avril 1964.

(en) MAC CURDY, George G., *Human Origins: A Manual of Prehistory*, vol. 2, D. Appleton & Co., New York, 1924.

MAJD, Mohammad Gholi, *The Great Famine and Genocide in Persia, 1917-1919*, University press of America, Lanham, 2003.

(en) MATHE, J., *Leonardo's Inventions*, Miller Graphics, Geneva, 1980.

(per) MEHRAFARIN, Reza, *Vérification et analyse archéologique de la région de Zahak au Sistan*, sous la direction de Seyed Mansour, Seyed Sadjadi, texte imprimé, thèse du doctorat en archéologie, Université de formation des enseignants (Tarbiat-e Modares), Téhéran, 2004.

MOHSENIN M., *Introduction sur le prix du pain*, Les nouvelles de l'économie, Téhéran, 1994.

(en) MORITZ Ludwig Alfred, *Grain-mills and Flour in Classical Antiquity*, Clarendon Press, Oxford, 1958.

(per) MOUSAVI HAJI Seyed Rasoul, MEHRAFARIN Reza, *Observation méthodologique et archéologique du Sistan*, vol 13, Zâhedân, Université du Sistan et Baloutchistan, 2008.

(per) MOUSAVI HAJI Seyed Rasoul, MEHRAFARIN Reza, *Une introduction à la géographie historique du Sistan*, Organisation de l'Héritage Culturel de l'Iran, Zâhedân, 2009.

(en) MUMFORD, Lewis, *Technics and Civilisation*, Harcourt, Brace & Company, New York, 1934.

(en) NACFAIRE, H., *Grid-Connected Wind Turbines*, Elsevier Applied Science, London, 1988.

(en) OSTWALD, Wilhelm, « The Modern Theory of Energetics », *in The Monist*, vol. 17, 1907.

(en) POPE, Arthur, *A New Survey Of Persian Art From Pre-Historic Times to the Present*, Edition Charles Scribner's Sons, New York, 1931.

(per) POURDAVOUD, « Une page de l'histoire de l'arme en Iran, Falakhan », *Revue d'observation historique*, n° 53-58, 1968.

(per) POURPIRAR, Naser, *Douze siècle de silence*, Edition Carang, Téhéran, 2002.

(en) PAYSON USHER Abbott, *A History of Mechanical Inventions*, Harvard University Press, Cambridge, 1954.

RAVANBAKHSH, M., *Subvention et son passé en Iran*, Rapports sociopolitiques, Organisation des études et des recherches commerciales, Téhéran, 1991.

(en) REYNOLDS, Terry S., *Stronger Than a Hundred Men*: *A History of The Vertical Water Wheel*, John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, 1983.

(per) SEKAIE SISTANI, Javad, *Matikan du Sistan, ensemble d'articles sur le Sistan*, Edition Vajiran, Mashad, 1999.

(per) SAVORY, Roger, *Iran Under the Safavids*, traduit en persan par Kambiz Azizi, Edition Markaz, Téhéran, 2012.

(per) SEYED SADJADI, Seyed Mansour, *Archéologie et Histoire du Baloutchistan*, Edition de l'Organisation de l'Héritage Culturel, Téhéran, 1995.

SHEIKHI, A., « Une analyse des problèmes du procès du blé-farine-pain, en remarquant sur le rôle de réservation », Revue de la recherche et de fertilisation, Téhéran, 2003.

(en) SCHOFIELD, R. E., The Lunar Society of Birmingham. A Social History of Provincial Science and Industry in Eighteenth Century England, Clarendon Press, Oxford, 1963.

(per) SISTANI Mohammad Azam, *Le Sistan, territoire des sables et des légendes*, vol. 1, Presse Ariana, Téhéran, 1967.

SMITH, Norman, « Histoire de machine. L'histoire de la turbine à eau », *in Scientific American*, Paris, 1980.

(en) STRABO, *Geographica*, Horace Leonard Jones, London, 1928.

(en) TRAUTMANN Thomas R., *Kauṭilya and the Arthaśāstra: A Statistical Investigation of the Authorship and Evolution of the Text*, E.J. Brill, Leiden, 1971.

(en) UBBELOHDE, A. R., *Man and Energy*, George Braziller, New York, 1955.

VERANZIO Faustus, *Machinae Novae*, manuscrit de la Bibliothèque nationale de France, vers le XVII^{e} siècle.

(en) WAILES, R., *Berney Arms Windmill*, H. M. S. O., London, 1957.

(en) WHITE, Leslie, « The Energy Theory of Cultural Development », *in Readings in Anthropology*, ed. Morton H. Freid, New York, 1959.

(en) WHITNEY, John W., Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2006.

(per) WOLF, Hanse, *Artisanats anciens d'Iran,* Presse scientifique et culturelle, Téhéran, 2006.