

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE POLYTECHNIQUE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
« El Moudjahid Hocine Aït Ahmed »

epau

Thèse

En vue de l'obtention du

Doctorat En Sciences

« Architecture et Urbanisme »

Titre :

**Contribution à un modèle d'adaptation des villes
sahariennes au phénomène d'ensablement :
Cas de la région de Gourara en Algérie**

Présentée et soutenue publiquement par :

MESTOUL Djamel

Le : 24/05/2017

Devant le jury composé de :

Présidente:	Mme Ewa BEREZOWSKA-AZZAG, Professeur, EPAU Alger
Membres:	M. Mohamed MADANI, Professeur, USTO Oran
	M. Yacine BADA, Professeur, Université de Biskra
	Mme Wided BIARA, Maître de conférences A, Université de Béchar
Rapporteur:	Mme Aïcha BOUSSOUALIM, Professeur, EPAU Alger
Directeur de thèse:	M. Rafik BENSALIM, ancien Professeur, EPAU Alger
Co-directeur:	M. Luc ADOLPHE, Professeur, Université de Toulouse

Dust in the wind, all we are is dust in the wind . .

- Scorpions, 2001

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement le Professeur Rafik BENSALÉM. Je lui suis reconnaissant pour ses conseils, qui m'ont permis d'orienter ma thèse aux moments clés, pour le suivi de mon travail, et pour sa grande compétence qui m'a donné le goût de la recherche durant ces années.

Mes remerciements sont aussi adressés chaleureusement au Professeur Luc ADOLPHE pour son suivi au sein du laboratoire LRA.....mais surtout pour m'avoir permis d'explorer ces pistes de recherches... merci pour les idées, les voyages de terrain... et la complicité intellectuelle, et surtout humaine.

Aux membres du laboratoire LAE à leur tête Pr CHABBI-CHEMROUK Naïma et particulièrement au Pr BOUSSOUALIM Aïcha qui a bien voulu accepter de prendre le relais à la place du Pr Rafik BENSALÉM suite à sa démission de la fonction publique. Je lui en suis reconnaissant.

Je remercie l'ensemble du personnel du LRA à leur tête Pr Frédéric BONNEAUD et Mme Annie LOISEAU pour l'accueil, l'amabilité et pour m'avoir offert les capacités de travailler au laboratoire LRA dans les meilleures conditions. A Biao WANG qui a bien voulu accepter de m'initier aux simulations numériques CFD, pour sa générosité intellectuelle, sa patience et sa sympathie inégalée. Merci à tous les collègues chercheurs avec qui j'ai partagé les repas, les pauses et les rigolades, merci à Biao, Booba, Krimo, Messaoud, Tarek et sa femme Karima, Tathiane, Marion, Laura, Maja, et tant d'autres...J'espère que nos relations continueront à s'enrichir professionnellement et humainement.

Aux membres du projet CMEP (ex-Tassili) n°09MDU788 ; Nadia, Samia et Lamia. Aux habitants et collectivités locales de Timimoun, pour leur collaboration et pour l'accueil chaleureux qu'ils nous ont réservé. A Mr BELLATRACH qui a bien voulu accepter de nous accorder un entretien au sein de son agence BERGAM de Cheraga. Au personnel de l'ONM et particulièrement à notre collaborateur Djamel BOUCHERF pour son aide et l'accueil chaleureux qu'il nous réservait à chaque rencontre.

Ma reconnaissance va également aux membres de jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail : Pr. BEREZOWSKA-AZZAG Ewa de l'EPAU, Pr. MADANI Mohamed de l'USTO, Dr. BIARA Wided (Université de Béchar) et Dr. BADA Yacine (Université de Biskra).

Je voudrais également remercier ma famille pour leur soutien inconditionnel. Merci à mes formidables parents car je ne serais pas arrivé jusqu'ici sans la certitude de les savoir à mes côtés.

Enfin, je remercie énormément le gouvernement algérien, les services du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS) ainsi que la Direction de notre école EPAU de m'avoir accordé une bourse de recherche PNE (*Programme National Exceptionnel*) pour la finalisation de la présente thèse.

Résumé en arabe (ملخص)

لسنوات عدة وإلى يومنا هذا يظل القلق قائما بشأن ظاهرة زحف الرمال في منطقة قورارة بجنوب الجزائر. تضاعفت المشاريع في محاولات دون جدوى، لوقف التطور العنيد لهذه الظاهرة وانعكاساته السلبية على المنطقة. قد يعود هذا إلى أمور عدة من أبرزها نهج التبسيط الشديد على مستوى الأذهان لهذه المشكلة. فلا يكفي مثلا زراعة الأشجار بشكل ربما شبه عشوائي لوقف زحف الرمال دون سابق دراسة لحركة وديناميكية الرياح في المنطقة. كما انه لا يمكن لتقنية بدائية جدا كتقنية (Afred) ان تقاوم الوضع الحالي للكّم الهائل لزحف الرمال خاصة، أمام التطور السريع الذي عرفته المدن والقرى على مستوى المنطقة من حيث المساحة. ينبغي إذا وضع الضمانات اللازمة من حيث التخطيط الحضري والعمران لدعم تطور بناء مستدام للمدن في المنطقة والحد من ظاهرة زحف الرمال.

في هذا السياق، ومن خلال هذا البحث نعتزم دعم المهندسين المعماريين والمخططين في التخفيف من ظاهرة زحف الرمال. مبدأ نموذج تكييف المدينة والعمران الذي نقترحه من خلال بحثنا هذا يهدف إلى توجيه الجهات المعنية في مجال التخطيط الحضري والعمران من خلال مجموعة مقترحات وقواعد من حيث التخطيط والتصميم لأشكال البنايات وتكييفها مع ظاهرة زحف الرمال وفق ثلاثة مستويات؛

1. على مستوى المقياس الإقليمي أو (Macro)، "الوقاية" مستحبة وتعتبر عنصرا أساسيا؛ فمن خلال تحديد وتصنيف المناطق وفقا لدرجة التعرض لخطر زحف الرمال - وهذا على أساس بعض العناصر ذات الصلة بالتضاريس، نوع التربة، أنواع الكثبان الرملية، حركة وديناميكية الرياح- قمنا بوضع توصيات وتوجيهات في مجال التخطيط الحضري والعمران لمختلف الحالات التي تم رصدها وتحديدها على مستوى المنطقة.

2. على مستوى مقياس المدينة والبناءات (Mésó/Micro) نرجح عامل "الحماية". يتعلق الأمر، وبصرف النظر عن المكافحة الميكانيكية والبيولوجية، بالطريقة الهوائية أو "أيروديناميكية" الرياح وهدفها هو تعزيز حركة حبيبات الرمل ونقلها خارج المحيط العمراني لمكافحة التراكمات والرواسب الرملية داخل الفضاءات المبنية.

بفضل تصميم CFD قمنا بوضع مجموعة من نسب الأبعاد لنماذج من المباني والأشكال الحضرية التي تدمج "أيروديناميكية" الرياح وبالتالي لها تأثير إيجابي على تحسين تدفق الهواء في النماذج المقدمة. وقد وتم التحقق من صحة فعاليتها على غرار حسابات كم الرواسب من خلال المعادلات الرياضية في هذا المجال.

كلمات البحث: زحف الرمال، الرواسب الرملية، أيروديناميكية النسيج العمراني، الرياح، الشكل الحضري والبناءات، المحيط العمراني.

Résumé

Depuis des années on s'inquiète de l'ampleur du phénomène d'ensablement dans la zone de Gourara au sud de l'Algérie. Les projets se sont multipliés pour essayer, sans grand succès, d'enrayer cette évolution inexorable du phénomène. Ceci est dû peut être à une vision trop simpliste ou fragmentaire du problème ; il ne suffit pas de planter des arbres ou de mettre en place des *dunes-afreg* pour arrêter le sable. L'ensablement se produit de façon insidieuse et latente à partir d'une simple mise en place d'obstacles dans la direction des vents dominants. Certaines incidences majeures de la forme bâtie sur les mouvements éoliens d'ensablement doivent être étudiées et des garde-fous nécessaires sont à mettre en place pour accompagner tout acte d'aménagement ou de construction. Dans ce contexte, et à travers cette recherche nous nous proposons d'accompagner les architectes et urbanistes au rang d'acteurs potentiels de l'atténuation du phénomène d'ensablement. Le principe d'un modèle d'adaptation que nous proposons consiste à orienter, non à diriger, les acteurs d'aménagement à travers la proposition d'un ensemble de règles en matière d'aménagement et de conception de formes bâties, adaptées au phénomène d'ensablement. Et ce, suivant trois échelles d'intervention :

A une échelle macro la « prévention » est privilégiée. Nous avons tenté d'abord d'identifier et classer les zones suivant leur degré d'exposition au risque d'ensablement en se basant sur quelques éléments pertinents tels que ; relief, topographie, nature du sol, types de dunes et régime éolien prédominant. Des recommandations et orientations en termes d'aménagement ont été élaborées pour les différents cas identifiés.

A une échelle méso et micro, la « protection » est recommandée. Elle concerne, hormis la lutte mécanique et biologique, le procédé aérodynamique basé sur la force du vent. Omniprésent dans la région avec des vitesses oscillant entre 6 et 8m/s, le vent pourrait être exploité en l'associant à la morphologie urbaine afin de combattre les dépôts de sable produits par « saltation ». Grâce à la modélisation CFD nous avons défini un ensemble de rapports dimensionnels de formes urbaines intégrant des effets aérodynamiques tel que « Venturi » et « canalisation » susceptibles de favoriser le charriage et le déplacement des grains de sable. Les résultats sont concluants ; une diminution effective du volume sédimentaire au sein des modèles développés a été constatée et vérifiée à l'aide de modèles mathématiques tirés de l'état des savoirs.

Mots clés : bâtiment, bilan sédimentaire, CFD, effets aérodynamiques, ensablement, forme urbaine, saltation, Venturi.

Abstract

For decades, we have been worried about the extent of silting phenomenon in desert area. Concerning the Algerian case of the Gourara area, different projects have been multiplied to try, without success, to stem the inexorable evolution of the phenomenon. Solutions such as planting trees or developing the “afreg-dune” are adopted; however, they seem to be simplistic thus are seen as a partial approach to the problem. The silting occurs insidiously and latently from a single obstacle put in place in the direction of prevailing winds. Any impact on wind silting movements should be investigated to put forward the necessary safeguards to achieve protection from silting in any development or construction.

In this context and through this research, we propose to accompany architects and urban planners to the rank potential actions in mitigating silting phenomenon. The principle of an adaptation model we propose is to guide, not to direct the development actors through a proposed set of rules in terms of planning and design of built forms adapted to the silting phenomenon, according to three levels of intervention:

First at a macro scale, we predict “preventing” rules. We have tried to identify and classify areas according to their degree of exposure to the risk of silting based on relevant elements namely, in site characteristics, such as topography, soil and dunes types, and wind regime. Recommendations and guidance in terms of development have been drawn up for the various areas identified.

Second, at a meso and micro scale, we recommend “protection”. This concerns, except mechanical and biological control, the aerodynamic whose goals is to promote the thrust of the sand grains in saltation movement to fight against deposits inside of the master plan. Through CFD modeling, we managed to establish a set of reports for dimensional models of buildings and urban forms incorporating aerodynamic effect such as the Venturi and Channelling effects. The positive impact on improving the flow of air in the developed models has been proven and validated by calculating the sediment budget via mathematical simulation experiments.

Keywords: aerodynamic effects, building, CFD, saltation, sediment budget, silting, urban form, Venturi.

Table des matières

TABLE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XVI
TABLE DES ÉQUATIONS	XVII
NOMENCLATURE	XVIII
GLOSSAIRE	XIX
INTRODUCTION GENERALE	1
1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	2
2. HYPOTHESES	5
3. METHODOLOGIE	6
4. INTERET DE LA RECHERCHE	12
5. SYNTHESE DES ETATS DE SAVOIRS SUR LA QUESTION D' ENSEMBLEMENT	13
6. CONCEPTS DE LA RECHERCHE	18
7. STRUCTURE DE LA THESE	19
PARTIE I : ZONE D' ETUDE ; CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	23
1. CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA REGION DE GOURARA : CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ET SOCIALES	24
1.1. DELIMITATION DE LA ZONE D' ETUDE : LE GOURARA	25
1.2. LES CONDITIONS CLIMATIQUES	26
1.2.1. <i>La température</i>	26
1.2.2. <i>L' insolation</i>	29
1.2.3. <i>Les pluies</i>	29
1.2.4. <i>L' indice d' aridité</i>	32
1.2.5. <i>L' humidité relative</i>	33
1.2.6. <i>Les vents</i>	34
1.3. LE RELIEF	39
1.3.1. <i>Erg Occidental</i>	39
1.3.2. <i>La plaine (ou hamada)</i>	40
1.3.3. <i>Plateau de Tademaït</i>	40
1.3.4. <i>L' Oued Saoura</i>	41
1.3.5. <i>La sebkha</i>	42
1.3.6. <i>Les méga-obstacles (piémonts)</i>	43
1.3.7. <i>Le couvert végétal</i>	43
1.4. LES DONNEES DEMOGRAPHIQUES ET SOCIOLOGIQUES	46
1.4.1. <i>Introduction</i>	46
1.4.2. <i>La population</i>	46

1.4.3.	<i>L' origine du peuplement de Gourara : du nomadisme à la sédentarisation</i>	49
1.5.	CONCLUSION	50
2.	CHAPITRE II : ESPACE OASIEN ; ORIGINES ET EVOLUTION	52
2.1.	INTRODUCTION.....	53
2.2.	SPECIFICITES DE L' ESPACE OASIEN : ETYMOLOGIES ET DEFINITIONS	53
2.2.1.	<i>Architecture vernaculaire (traditionnelle)</i>	53
2.2.2.	<i>L' oasis</i>	54
2.2.3.	<i>La foggara</i>	55
2.2.4.	<i>La Casbah</i>	56
2.2.5.	<i>Le ksar</i>	57
2.3.	LECTURE TYPO-MORPHOLOGIQUE DU KSAR	59
2.3.1.	<i>Les types de villages</i>	59
2.3.2.	<i>Structure morphologique des ksour du Gourara</i>	60
2.4.	EMERGENCE DE LA VILLE SAHARIENNE ET SON IMPACT SUR L' ECOSYSTEME OASIEN	65
2.4.1.	<i>La ville au Sahara : un modèle exogène</i>	65
2.4.2.	<i>Etalement urbain ; un tissu d' habitat spontané</i>	67
2.5.	CONCLUSION	69
3.	CHAPITRE III : PHENOMENE D' ENSABLEMENT DANS LA ZONE DE GOURARA ; ORIGINES, AGGRAVATION ET GESTION	71
3.1.	LE PHENOMENE D' ENSABLEMENT : ORIGINES ET FORCES D' AGGRAVATION	72
3.1.1.	<i>Les origines</i>	72
3.1.2.	<i>Les facteurs d' aggravation anthropiques</i>	73
3.2.	GESTION DES RISQUES NATURELS EN ALGERIE : L' ENSABLEMENT	80
3.2.1.	<i>Risques naturels : quelques généralités</i>	80
3.2.2.	<i>Gestion des aléas climatiques par la population : de l' adaptation « anticipative » à l' adaptation « réactive »</i>	86
3.2.3.	<i>La gouvernance et la prise en compte du risque d' ensablement en Algérie</i>	88
3.3.	CONCLUSION : POSITIONNEMENT ET OBJECTIFS	95
PARTIE II : CADRE METHODOLOGIQUE		97
4.	CHAPITRE IV : AERAULIQUE ET AERODYNAMIQUE	98
4.1.	LES MOUVEMENTS DE L' AIR DANS LA COUCHE ATMOSPHERIQUE : NOTIONS DE BASE	99
4.1.1.	<i>Echelles des mouvements atmosphériques</i>	100
4.1.2.	<i>La couche limite atmosphérique</i>	101
4.1.3.	<i>Structure du vent</i>	103
4.2.	LE VENT COMME PHENOMENE PHYSIQUE	104
4.2.1.	<i>Le vent comme fluide</i>	105
4.2.2.	<i>Propriétés et types d' écoulement</i>	105

4.3.	COMPOTEMENT DU VENT AUTOUR D'UN OBSTACLE	108
4.3.1.	<i>La couche limite de rugosité</i>	108
4.3.2.	<i>Mécanisme de l'écoulement autour d' un obstacle</i>	111
4.3.3.	<i>Géométrie de l'écoulement autour d' un obstacle : les effets aérodynamiques du bâtiment</i>	113
4.4.	LE VENT DANS UN MILIEU CONSTRUIT ET EN SITE URBAIN	120
4.4.1.	<i>Nature du comportement du vent en milieu urbain</i>	120
4.4.2.	<i>Les paramètres déterminants de la géométrie urbaine dans l' écoulement du vent</i>	121
4.5.	CONCLUSION	128
5.	CHAPITRE V : L' ENSABLEMENT COMME PHENOMENE PHYSIQUE : LES POSSIBILITES D' UNE MODELISATION CFD	131
5.1.	MODE DE DEPLACEMENT	132
5.1.1.	<i>La reptation</i>	133
5.1.2.	<i>La saltation</i>	133
5.1.3.	<i>La suspension</i>	134
5.2.	PRINCIPALES FORMES D' ACCUMULATION DE SABLE.....	134
5.2.1.	<i>Dans la nature</i>	134
5.2.2.	<i>Ensablement autour d' un obstacle isolé</i>	141
5.2.3.	<i>Autour d' un groupement d' obstacles</i>	146
5.3.	MODELE MATHEMATIQUE DE « SALTATION » ET CALCUL DU BILAN SEDIMENTAIRE.....	153
5.3.1.	<i>Equations de mise en mouvement des grains</i>	153
5.3.2.	<i>Calcul du volume sédimentaire</i>	157
5.4.	MODELISATION CFD	159
5.4.1.	<i>Introduction</i>	159
5.4.2.	<i>Méthodes de résolution et modèles de turbulence</i>	163
5.5.	CONCLUSION	170
6.	CHAPITRE VI : ETATS DES SAVOIRS SUR LES METHODES ET TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L' ENSABLEMENT	173
6.1.	INTRODUCTION.....	174
6.2.	LES PROCEDES DE LUTTE MECANIQUE.....	174
6.2.1.	<i>La technique des palissades</i>	174
6.2.2.	<i>La technique de quadrillage</i>	178
6.2.3.	<i>La technique du paillage (le mulching)</i>	180
6.2.4.	<i>La technique aérodynamique</i>	181
6.3.	LES PROCEDES DE LUTTE BIOLOGIQUE.....	186
6.3.1.	<i>Choix des espèces ligneuses et herbacées</i>	186
6.3.2.	<i>Techniques de plantation</i>	187
6.4.	APPROCHE PARTICIPATIVE	189
6.5.	CONCLUSION	191

PARTIE III : EXPERIMENTATION ET RECOMMANDATIONS	193
7. CHAPITRE VII : L' ENSABLEMENT A L' ECHELLE MACRO : DYNAMIQUE D' ENSABLEMENT ET IMPACT SUR LA CONFIGURATION DU TERRITOIRE DANS LE GOURARA	194
7.1. CHOIX DES SITES D' INVESTIGATION	195
7.1.1. <i>Direction des dunes</i>	195
7.1.2. <i>Mécanisme de formation</i>	197
7.1.3. <i>Types de dunes dans la zone de Gourara</i>	200
7.2. MODES D' IMPLANTATION DES KSOUR DANS LA ZONE DE GOURARA	206
7.2.1. <i>Implantations en position d' abri au pied de la corniche de la plaine de Tademaït</i>	206
7.2.2. <i>Implantations sur les theïrat ayant comme assise la hamada</i>	209
7.2.3. <i>Implantations dans les dépressions à l' intérieur de l' Erg</i>	213
7.3. NATURE HYDROGEOLOGIQUE DU GOURARA, PHENOMENE D' ENSABLEMENT ET IMPACT SUR LA TRANSLATION DES OASIS.	215
7.3.1. <i>Introduction</i>	215
7.3.2. <i>Les nappes phréatiques et système d' exploitation ancestral ; les foggaras</i>	215
7.4. CONCLUSION	223
8. CHAPITRE VIII : L' ENSABLEMENT A L' ECHELLE MICRO : MODELISATION CFD ET CALCUL DU BILAN SEDIMENTAIRE	225
8.1. SIMULATION DU COMPORTEMENT DU VENT DANS LE VILLAGE DE M' GUIDEN A TIMIMOUN	226
8.1.1. <i>Présentation du village de M' guiden</i>	226
8.1.2. <i>Le choix du village de M' guiden</i>	229
8.1.3. <i>Protocole et objectifs</i>	229
8.1.4. <i>Validation du modèle de modélisation</i>	230
8.1.5. <i>Résultats de la simulation</i>	238
8.1.6. <i>Synthèse</i>	244
8.2. MODELISATION DE L' EFFET « VENTURI » ET « CANALISATION » DANS UN GROUPEMENT DE BATIMENTS.	246
8.2.1. <i>Introduction</i>	246
8.2.2. <i>Modélisation de l' effet « canalisation »</i>	247
8.2.3. <i>Modélisation de l' effet Venturi</i>	256
8.2.4. <i>Association effet « Venturi-canalisation » dans un groupement de volumes</i>	263
8.3. CALCUL DU VOLUME SEDIMENTAIRE DANS LES MODELES DEVELOPPES	268
8.4. CONCLUSION	275
9. CHAPITRE IX : VERS UN MODELE D' ADAPTATION DE LA VILLE SAHARIENNE AU PHENOMENE D' ENSABLEMENT DANS LA REGION DE GOURARA ; ORIENTATIONS D' AMENAGEMENT ET PROTOTYPES DE FORMES URBAINES ADAPTEES.....	278
9.1. INTRODUCTION.....	279
9.2. ECHELLE MACRO : MESURES DE PREVENTION.....	279

9.2.1.	<i>Délimitation de zones d'abri au pied du plateau de Tademaït</i>	280
9.2.2.	<i>Délimitation de zones d'abri sur la bordure sud de la hamada</i>	282
9.3.	ECHELLE MESO/MICRO : MESURES DE PROTECTION	282
9.3.1.	<i>Délimitation des zones d'action</i>	282
9.3.2.	<i>Mesures de lutte mécanique</i>	285
9.3.3.	<i>Méthode aérodynamique : rapports géométriques et morphologiques</i>	286
10.	CONCLUSION GENERALE	291
10.1.	INTRODUCTION.....	292
10.2.	RETOUR SUR LES RESULTATS.....	294
10.3.	LIMITES ET DIFFICULTES DE LA RECHERCHE.....	296
10.4.	PERSPECTIVES ENVISAGEES.....	297
BIBLIOGRAPHIE		299
A.	DOCUMENTS AUDIOVISUELS.....	318
B.	RAPPORTS INSTITUTIONNELS.....	318
C.	DOCUMENTS D'URBANISME.....	320
D.	TEXTES OFFICIELS.....	320
ANNEXES		I
ANNEXE 1 : ECHELLE DE BEAUFORT		II
ANNEXE 2 : MESURES DE LA LONGUEUR (L) A DIFFERENTS POINTS DU PLAN MASSE DANS LES DEUX MODELES V1 ET V2		IV
ANNEXE 3 : LE PPR_N ; ETAPES D'ELABORATION ET DE MISE EN ŒUVRE		V
ANNEXE 4 : MANUEL DE PRESENTATION DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SELON LES NORMES DE L'APA (AMERICAN PSYCHOLOGICAL ASSOCIATION), 6^{EME} ED. TABLEAU RECAPITULATIF		IX

Table des Figures

FIGURE 1: POSITION DU GOURARA PAR RAPPORT A L'ERG OCCIDENTAL, LE TADEMAÏT ET LA SAOURA.....	25
FIGURE 2: VARIATIONS MOYENNES ANNUELLES DES TEMPERATURES. DONNEES ONM -STATION DE TIMIMOUN (1991-2010)	27
FIGURE 3: VARIATIONS DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES. DONNEES ONM- TIMIMOUN (1991-2010).....	28
FIGURE 4: REPARTITION DES PRECIPITATIONS DANS LA REGION DE GOURARA. SOURCE DUBIEF (1963).	30
FIGURE 5: VARIATION DES MOYENNES MENSUELLES DES PRECIPITATIONS. DONNEES ONM (1991-2010).....	31
FIGURE 6: DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE POUR LA PERIODE (1991-2010).	32
FIGURE 7 : HUMIDITE RELATIVE DANS LA REGION DE GOURARA SOURCE : ONM (1991-2010).	33
FIGURE 8: MOYENNES MENSUELLES DES VITESSES DU VENT DU SITE DE GOURARA. ONM (1991-2010)	34
FIGURE 9: ATLAS DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT DE L'ALGERIE ESTIMEE A 10 M DU SOL. (KASBADJI-MERZOUK, 2006)	35
FIGURE 10: ROSE ANNUELLE DES VENTS DE LA REGION DE TIMIMOUN. SOURCE : ONM 1991-2010.....	36
FIGURE 11: EVOLUTION DE LA VITESSE MOYENNE HORAIRE DU VENT - STATION DE TIMIMOUN (A 10 M DU SOL).	36
FIGURE 12 : FORCES DE VENT DE SABLE. SOURCE : ONM 1985-2005	38
FIGURE 13 : L'ERG OCCIDENTAL. PHOTOS ADOLPHE L. 2011	39
FIGURE 14: LA HAMADA DE TIMIMOUN. PHOTO PRISE DEPUIS LA RN 51 RELIANT TIMIMOUNE A M'GUIDEN.	40
FIGURE 15: PLATEAU DE TADEMAÏT, PHOTO AERIENNE. SOURCE INTERNET ANONYME.	41
FIGURE 16 : LA VALLEE DE LA SAOURA. PHOTOS ADOLPHE L. 2011.....	41
FIGURE 17: SEBKHA DE TIMIMOUN. PHOTO ADOLPHE L. 2011	42
FIGURE 18: RELIEF NON DUNAIRE (MONTICULES) AU NIVEAU DE LA SEBKHA DE TIMIMOUN. PHOTO AUTEUR 2011.....	43
FIGURE 19: PLANTES DE <i>RETAMA-RAETAM</i> ET <i>STIPA-TENACISSIMA (ALFA)</i> DANS LA ZONE DE GOURARA.	44
FIGURE 20: CARTE DE SYNTHESE DU RELIEF DE LA ZONE DE GOURARA.....	45
FIGURE 21 : SCHEMA SYNOPTIQUE DU TRIPTYQUE KSAR-FOGGARA-PALMERAIE.....	54
FIGURE 22: SYSTEME EN PEIGNE POUR LE PARTAGE DE L'EAU AU NIVEAU D'UNE FOGGARA A TIMIMOUN.	55
FIGURE 23: CONSERVATION DES RECOLTES AU SEIN D'UNE CASBAH. (BISSON, 1957, P. 164)	57
FIGURE 24: TYPES DE VILLAGES D'APRES BISSON, 1957, P.167.....	59
FIGURE 25: RAHBA DU KSAR DE TIMIMOUN. PHOTOS ADOLPHE L. 2011.....	62
FIGURE 26: MAISON A QUATRE PILIERS DANS LE KSAR DE KENADSA. BACHMINSKI ET GRANDET (1985).....	63
FIGURE 27: VUE SUR L'INTERIEUR D'UNE MAISON A PILIERS AU KSAR DE TASFAOUT. PHOTO ADOLPHE L, 2010.	64
FIGURE 28: EVOLUTION DE L'ESPACE KSOURIEN D'APRES COTE (1996. P.98).....	67
FIGURE 29: TERROIRS DES PALMERAIES IRRIGUEES PAR FOGGARAS DE LA BORDURE DE LA SEBKHA.	73
FIGURE 30: SCHEMA DE MISE EN PLACE DES AFREGS. PHOTO AUTEUR 2011. LIEU : TIMIMOUN	74
FIGURE 31: KSAR DE BADRIANE, LE SYSTEME «AFREGS» ET LA NOUVELLE EXTENSION A L'Est.	75
FIGURE 32: A DROITE : ENSABLEMENT DU KSAR DE BADRIANE DANS SA PARTIE SUD-EST.	76
FIGURE 33: ENSABLEMENT LOCALISE AU NIVEAU DE LA NOUVELLE EXTENSION DU KSAR DE TAGUELZI.....	77
FIGURE 34: PALMERAIE DE TAGUELZI ENVAHIE PAR LE SABLE. AUTEUR, 2011.....	78
FIGURE 35: INSTALLATIONS AU MILIEU D'UN COULOIR EOLIEN ; CAS DE L'OASIS DE TOUAT INTEBOU A GOURARA.....	79
FIGURE 36: SCHEMATISATION DU RISQUE D'ENSABLEMENT DANS LE KSAR DE BADRIANE (TIMIMOUN).	83
FIGURE 37: SCHEMA DE L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE TERRITORIALE D'APRES PAR BONNET (2001).	87
FIGURE 38: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES BASES COUCHES TROPOSPHERIQUES ET PROFIL DE VITESSE	102

FIGURE 39: SPECTRE DE VAN DER HOVEN – 1957. SOURCE : TURBELIN, (2000).	103
FIGURE 40: DETERMINATION DU COEFFICIENT DE VISCOSITE POUR UN FLUIDE NEWTONNIEN AVEC UN ECOULEMENT LAMINAIRE.	105
FIGURE 41: ILLUSTRATION DES LIGNES DE COURANT POUR UN ECOULEMENT LAMINAIRE.	106
FIGURE 42: DEUX LIGNES DE COURANT DANS UN ECOULEMENT TURBULENT.	106
FIGURE 43 : DESCRIPTION SCHEMATIQUE DE LA COUCHE LIMITE (AYNSLEY ET AL. 1977)	108
FIGURE 44: ECOULEMENT TURBULENT D'APRES GANDEMER (1979).	109
FIGURE 45: VALEUR DE α ET Z_G EN FONCTION DU TYPE DE TERRAIN. (BERANEK, 1984)	110
FIGURE 46: ECOULEMENT D'UN FLUIDE AUTOUR D'UN OBSTACLE. SOURCE : LIEBARD & DE-HERDE, (2006).	111
FIGURE 47: MECANISMES (A) ET (B) LORS DE L'ECOULEMENT DU VENT AUTOUR D'UN BATIMENT.	112
FIGURE 48: IMPACT DE LA FORME DU BATIMENT SUR L'ECOULEMENT D'AIR. (BERANEK, 1984).	113
FIGURE 49: ECOULEMENT ET COUCHE LIMITE AUTOUR D'UN BATIMENT ISOLE. (FERNANDEZ & AL, 2009)	113
FIGURE 50: ÉCOULEMENT AU SILLAGE D'UN CORPS D'APRES COOK, (1985).	114
FIGURE 51: METHODE VISUALISATION DE L'EFFET DE SILLAGE PAR ENDUIT (CSTB). (GANDEMER ET AL, 1976, P.59)	115
FIGURE 52: EFFET DE TROUS SOUS IMMEUBLE. (GAUDEMER ET AL, 1976, P.50)	115
FIGURE 53: EFFET DE COIN. (GAUDEMER ET AL, 1976, P.54)	116
FIGURE 54: EFFET DE TOURBILLON. (GAUDEMER ET AL, 1976, P.62)	116
FIGURE 55: EFFET WISE. (GANDEMER, ET AL, 1976, P.62)	117
FIGURE 56: EFFET DE LIAISON DE DIFFERENCE DE PRESSION ENTRE IMMEUBLES.	117
FIGURE 57: EFFET VENTURI. (GANDEMER ET AL, 1976)	118
FIGURE 58: EFFET DE CANALISATION. (D'APRES GANDEMER ET AL, 1976)	118
FIGURE 59: EFFET COMBINE VENTURI ET CANALISATION. (GANDEMER ET AL, 1976, P.78)	119
FIGURE 60: EFFET DE MAILLE. (D'APRES GANDEMER ET AL, 1976, P.81)	119
FIGURE 61: EFFET DE PYRAMIDE. (D'APRES GANDEMER ET AL, 1976, P.85)	120
FIGURE 62: COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE ET CANOPEE URBAINE.	120
FIGURE 63: LE ROLE DE L'AGENCEMENT DES BATIMENTS SUR LE MODE D'ECOULEMENT DU VENT.	122
FIGURE 64: L'INFLUENCE DES AMENAGEMENTS EN QUINCONCE SUR LE COMPORTEMENT DU VENT.	122
FIGURE 65: LES TROIS REGIMES DE FLUX DEPENDANT DE LA GEOMETRIE DU CANYON (H/D) D'APRES OKE (1988)	123
FIGURE 66: DEPENDANCE DE LA NATURE DU FLUX D'AIR PAR RAPPORT AU PROSPECT (H/D) ET LA GEOMETRIE DU BATIMENT (L/H)	124
FIGURE 67: IMPACT DE L'ETENDUE D'UN TISSU URBAIN SUR LA VITESSE DU VENT.	125
FIGURE 68: IMPACT DE LA VARIATION DES GABARITS SUR LA MODIFICATION DES FLUX D'AIR. (GIVONI, 1989)	126
FIGURE 69: IMPACT DU GABARIT ET DE L'ESPACEMENT ENTRE BATIMENTS DANS L'AUGMENTATION DE LA VITESSE DU VENT.	127
FIGURE 70: GEOMETRIE UTILISEE DANS LA SIMULATION MENEES PAR WIREN, 1985.	128
FIGURE 71: DIFFERENTS MODES DE TRANSPORT EOLIEN. MOREL (2008, P. 105)	133
FIGURE 72 : DEPLACEMENT DES GRAINS DE SABLE SUIVANT UN MODE DE SALTATION. (PETHICK, 1984)	134
FIGURE 73: NEBKAS A FLECHE, SECTEUR DE BAMBA, NORD-MALI. HAUTEUR DES BUISSONS : 30 CM. VENARD (2012, P.29)	135
FIGURE 74 : SCHEMA D'UNE DUNE DE TYPE BARKHANE.	135
FIGURE 75 : ACCUMULATION DUNAIRE EN FORME LINEAIRE (SIF). (MAINGUET, 1995, P. 141).	136
FIGURE 76: DUNES LINEAIRES OU SIFS LOCALISE AU NIVEAU DE L'ERG OCCIDENTAL.	136
FIGURE 77: DUNES PYRAMIDALES REPEREES PRES DE KERZAZ AU GOURARA. PHOTO ADOLPH L, 2011	137
FIGURE 78: DUNE PARABOLIQUE FIXEE PAR LA VEGETATION	137
FIGURE 79: ACCUMULATIONS DUNAIRES EN FORME LONGITUDINALE (SANDRIDGES). F.A.O, 1988	138

FIGURE 80: SCHEMA DE DUNES TRANSVERSALES.	138
FIGURE 81: AKLE (STRUCTURE D'ERG A PLUSIEURS DIRECTIONS DE DUNES).	139
FIGURE 82: ENSABLEMENT AUTOUR D'UN OBSTACLE. (D'APRES LOUIS-DUBREUIL, 1984, P.7).....	141
FIGURE 83 : COMPORTEMENT AERODYNAMIQUE D'UN OBSTACLE. (MAINGUET, 2004).....	142
FIGURE 84 : SCHEMA D'UNE MAISON SUR PILOTIS. (DUCHEMIN, 1958).	143
FIGURE 85 : MOUVEMENT DE SABLE AUTOUR DE LA FORME PROFILEE. (DUCHEMIN, 1958).	143
FIGURE 86: PROFILE D'UNE DUNE EQUILIBREE D'APRES DUCHEMIN (1958).	144
FIGURE 87: SCHEMAS DE MAISON PROFILEE EN ELEVATION D'APRES (DUCHEMIN, 1958).....	144
FIGURE 88 : ESSAI EN SOUFFLERIE- MAQUETTE DE BATIMENT EN FORME PRISMATIQUE D'APRES (DUCHEMIN, 1958).....	145
FIGURE 89 : ESSAI EN SOUFFLERIE - BATIMENT EN FORME PRISMATIQUE (DUCHEMIN, 1958).	145
FIGURE 90: MAQUETTE DE BATIMENT EN FORME TRAPEZOÏDALE D'APRES (DUCHEMIN, 1958).....	146
FIGURE 91: ESSAI EN SOUFFLERIE - CAS DE PETITES CONSTRUCTIONS GROUPEES D'APRES (DUCHEMIN, 1958).....	146
FIGURE 92: SCHEMAS DE MAISONS PROFILEES (DUCHEMIN, 1958) ;	147
FIGURE 93: ESSAI EN SOUFFLERIE ; CAS DE GRANDS BATIMENTS GROUPEES D'APRES (DUCHEMIN, 1958).	147
FIGURE 94: SCHEMA DE LA SOUFFLERIE DIPHASIQUE DE L'IRSTEA (EX-CEMAGREF). NAAIM-BOUVET, 2003.....	148
FIGURE 95: EVOLUTION TEMPORELLE DU VOLUME ADIMENSIONNEL POUR LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS.....	152
FIGURE 96: EVOLUTION TEMPORELLE DU VOLUME ADIMENSIONNEL POUR LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS.....	152
FIGURE 97: SCHEMA DES DIFFERENTS MODES DE TRANSPORT EOLIEN. KOK ET AL, (2012).	155
FIGURE 98: BILAN DE FORCES SUR UN GRAIN. (PONS, 2007)	156
FIGURE 99: RELATION ENTRE VITESSE CRITIQUE D'ARRACHEMENT DU VENT U^* ET LA TAILLE MOYENNE DES GRAINS DE SABLES	157
FIGURE 100: METHODES DE CALCUL CFD ET MODELES DE TURBULENCES ASSOCIES. (WANG, 2015, P.86)	164
FIGURE 101: EXEMPLE D'UNE PALISSADE VEGETALE (DUNE AFREG) ET SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET SON ENTRETIEN.	175
FIGURE 102: PALISSADE D'ARRET. SOURCE F.A.O. (1988)	176
FIGURE 103: SYSTEME A PLUSIEURS PALISSADES D'ARRET. KERR ET NIGRA (1952) D'APRES GUTIERREZ (2012).	176
FIGURE 104: PALISSADE DE DEFILEMENT (OU DIVERSION). SOURCE : F.A.O. (1988)	177
FIGURE 105: ÉVALUATION ET SUIVI DES ACTIONS DE LUTTE CONTRE LA DESERTIFICATION.	179
FIGURE 106: SYSTEME DE QUADRILLAGE EN LOSANGES. WATSON (1990) D'APRES GUTIERREZ (2012).....	180
FIGURE 107: TECHNIQUE DE FIXATION PAR L'ÉPANDAGE DE DOUM (PALMIER NAIN) OU MULCHING. (BARRE, 2008)	181
FIGURE 108 : TECHNIQUE DE PIERRES A TURBULENCE. SOURCE : FAO, (1988).....	182
FIGURE 109: TECHNIQUE DE PIERRES A TURBULENCE : CAS DE GROSSES DUNES. SOURCE : FAO, (1988).....	183
FIGURE 110: TECHNIQUE AERODYNAMIQUE POUR L'ÉVACUATION DE SABLE. SOURCE : F.A.O. (1988).....	183
FIGURE 111: DISPOSITIF DE (GATOAS) DEPOSES PERPENDICULAIRE A LA DIRECTION DU VENT DOMINANT.	184
FIGURE 112: TAS DE REMBLAIS ORIENTES OBLIQUEMENT A LA DIRECTION DU VENT DOMINANT. (SEBAA ET AL, 2009)	185
FIGURE 113: TAS DE REMBLAIS LOCALISES AU NIVEAU DE LA ROUTE RELIANT TIMIMOUN A TALMINE.....	186
FIGURE 114: LOCALISATION DES KSOUR AYANT FAIT CAS D'ÉTUDES DANS LA REGION DE GOURARA.	195
FIGURE 115: EVOLUTION DES BARKHANES EN SLOUK. (CLOS-ARCEUDUC). SOURCE : (DEMANGEOT & BERNUS, 2001, P.197).	197
FIGURE 116: SCHEMATISATION DE LA FORMATION DE DUNES SUITE A ACTION MORPHOLOGIQUE. VENARD (2012, P.27).....	198
FIGURE 117: DICHOTOMIE TOPOGRAPHIQUE HAMADA-ERG DANS LA REGION DE TIMIMOUN. 2011.....	199
FIGURE 118: LIGNES D'ÉCOULEMENT DE SABLE DANS LE SAHARA (D'APRES WILSON 1971 ET MAINGUET, 1978).	199
FIGURE 119: SCHEMA DE LA STRUCTURE DUNAIRE DU GRAND ÉRG OCCIDENTAL. D'APRES VENARD (2012, P.22)	201
FIGURE 120: DUNES PYRAMIDALES (GHOURE) AU NIVEAU DE LA LIMITE OUEST DE L'ÉRG OCCIDENTAL.....	202

FIGURE 121: DUNES PYRAMIDALES. PHOTO PRISE A L'ENTREE DU VILLAGE DE KERZAZ (29°27'43.53"N, 1°26'21.26"O).	202
FIGURE 122: DUNES LINEAIRES (SIFS) AU NIVEAU DE L'ERG OCCIDENTAL (30°03'26.41"N 0°51'49.13"O). 2015	203
FIGURE 123: EXEMPLE DE DUNES LINEAIRES (SIFS) AU NIVEAU DE L'ERG OCCIDENTAL. 2011	203
FIGURE 124: EXEMPLE DE DUNES LONGITUDINALE (SANDRIDGES) AU NIVEAU DE LA LIMITE SUD-OUEST DE L'ERG OCCIDENTAL.....	204
FIGURE 125: DUNES LINEAIRES COMPOSEES DE BARKHANES LOCALISEES AU NIVEAU DE L'ERG OCCIDENTAL.....	205
FIGURE 126: MODELE DE LA GENESE DE DUNE LINEAIRE A PARTIR D'UNE BARKHANE EN FONCTION DE L'INTENSITE DES VENTS.	205
FIGURE 127: LOCALISATION DES Ksour DANS LE GOURARA. BISSON (1957, p.66)	206
FIGURE 128 : SCHEMATISATION DE L'IMPLANTATION D'UN Ksar SUR UN SITE EN POSITION D'ABRI.	207
FIGURE 129: VUE SATELLITAIRE DU Ksar DE TAGUELZI ET TINEKRAM SITUES AU PIED DE LA CORNICHE HAMADIENNE.	208
FIGURE 130: L'ANCIEN Ksar DE TAGUELZI. PHOTOS PRISE DEPUIS LA PALMERAIE. 2011.....	208
FIGURE 131: Ksar DE TAGUELZI ; VUE SUR LA PALMERAIE PRISE D'EN HAUT. 2011.....	208
FIGURE 132: EFFET D'ABRI DES DJEBELS ARCHENU ET OWEINAT EN EGYPT. MAINGUET ET AL. (2004).....	209
FIGURE 133: SCHEMA D'UNE INSTALLATION INTER-DUNAIRE AU SEIN D'UNE THEIRAT. 1 : CONTRE DUNE. 2 : Ksar.....	209
FIGURE 134: SITUATION DES Ksour PAR RAPPORT A L'ERG OCCIDENTAL, LA HAMADA ET LA CONTRE-DUNE. 2014.....	210
FIGURE 135: EXEMPLE D'UNE CONTRE DUNE DANS L'ERG OCCIDENTAL. 2014.	211
FIGURE 136: VUE SUR LA CONTRE DUNE BORDANT LA LIMITE EST DE L'ERG OCCIDENTAL.....	211
FIGURE 137: PREMICES D'ENSABLEMENT AU NIVEAU D'UNE THEIRAT LOCALISEE AU NIVEAU DE L'ERG OCCIDENTAL.....	212
FIGURE 138: SCHEMATISATION DE L'IMPLANTATION AU CŒUR DE L'ERG.....	213
FIGURE 139: Ksar DE TALMINE ; INSTALLATION HUMAINE AU MILIEU DE L'ERG AVEC MISE EN PLACE D'UN SYSTEME AFREGS.	214
FIGURE 140: LOCALISATION DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL SASS DANS LE BAS-SAHARA ALGERIEN.	216
FIGURE 141: CARTE HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE DE GOURARA. SOURCE ANRH.....	217
FIGURE 142: PROFIL HYDROGEOLOGIQUE CC (SUD-EST, NORD-OUEST). SOURCE : ANRH	218
FIGURE 143: LOCALISATION DES OASIS A FOGGARAS DANS LE GOURARA. (BISSON, 1957, p.66).....	219
FIGURE 144: EVOLUTION DE L'OASIS DE TIMIMOUN SUITE AU RABATTEMENT DE LA NAPPE PHREATIQUE. (BISSON, 1957, p. 77).....	220
FIGURE 145: ORGANISATION NEBULEUSE DE JARDINS ET TERROIRS DANS L'ERG OCCIDENTAL. (BISSON, 1985).....	222
FIGURE 146: PLAN DU VILLAGE SOCIALISTE DE M'GUIDEN. RECONSTITUTION DEPUIS GOOGLE-EARTH. ECH : 1/2500.....	227
FIGURE 147: RECONSTITUTION DU MODULE DE BASE (LOGEMENT F3). ECH. : 1/200. SOURCE : AUTEUR 2014.....	228
FIGURE 148: FAÇADE EST DU VILLAGE DE M'GUIDEN (RECONSTITUTION AVEC ARCHICAD V.19 PRO). SOURCE : AUTEUR 2014	228
FIGURE 149: DEFINITION DU DOMAINE DE CALCUL POUR LE VILLAGE DE M'GUIDEN. SOURCE : AUTEUR	232
FIGURE 150: MAILLAGE EN TETRAEDRES DE LA VOLUMETRIE DU VILLAGE DE M'GUIDEN. SOURCE : AUTEUR.....	234
FIGURE 151: ROSE DES VENTS A TIMIMOUN. SOURCE : VASARI-AUTODESK. HTTP://AUTODESKVASARI.COM	235
FIGURE 152: EVOLUTION DU CALCUL EN FONCTION DU NOMBRE D'ITERATIONS. SOURCE : AUTEUR.....	237
FIGURE 153: GRADIENT DE VITESSE A <2M DU SOL AU NIVEAU DU VILLAGE DE M'GUIDEN. SOURCE : AUTEUR	238
FIGURE 154: EFFET DE DECOLLEMENT (ENROLEMENT) PRODUIT AU NIVEAU DES ANGLES VIFS DES BATIMENTS. SOURCE : AUTEUR	239
FIGURE 155: PRESSION STATIQUE (PA) ENREGISTREE AU SEIN DU VILLAGE DE M'GUIDEN. SOURCE : AUTEUR	240
FIGURE 156: IDENTIFICATION DES ZONES DE DEPOT SUR LE PLAN MASSE DU VILLAGE DE M'GUIDEN. SOURCE : GOOGLE-MAPS	241
FIGURE 157: SCHEMATISATION DU PROCESSUS D'ENSABLEMENT DANS LE VILLAGE DE M'GUIDEN. ILLUSTRATION DE L'AUTEUR.	244
FIGURE 158 : SCHEMA ILLUSTRANT LE RAPPORT L/Δ UTILISE DANS L'EXPERIENCE DE NAAM-BOUVET (2003).....	248
FIGURE 159: SIMULATION DE LA VITESSE D'AIR AUTOUR DES VOLUMES TYPE (A), Z<2M. SOURCE : AUTEUR	249
FIGURE 160: ILLUSTRATION EN FLECHE DU COMPORTEMENT DU FLUX D'AIR AUTOUR D'UN VOLUME. SOURCE : AUTEUR	249
FIGURE 161: RESULTAT DU NOUVEAU COMPORTEMENT DU FLUX D'AIR INCIDENT APRES PROFILAGE DES VOLUMES.	250

FIGURE 162: NIVEAU DE PRESSION STATIQUE ENREGISTREE EN AMONT DES VOLUMES AVANT ET APRES PROFILAGE. $Z < 2M$	251
FIGURE 163: VISUALISATION DU NIVEAU DE TURBULENCE (TKE) ENREGISTREE AVANT ET APRES PROFILAGE DES VOLUMES. $Z < 2M$	251
FIGURE 164: VITESSE D'AIR DANS LES DEUX MODELES A $Z < 2M$. SOURCE : AUTEUR	252
FIGURE 165: PROFILE DE LA VITESSE DE L'AIR EN FONCTION DE $x(M)$ DANS LES DEUX MODELES A $Z < 2M$	253
FIGURE 166: NIVEAU DE TURBULENCE DANS LES DEUX MODELES A $Z < 2M$. SOURCE : AUTEUR	253
FIGURE 167 : ETAPES DE DEVELOPPEMENT DU MODELE $H/D=0.25$ SUIVANT UN PLAN EN QUINCONCE. ILLUSTRATION : AUTEUR	254
FIGURE 168: VITESSE DE L'AIR A $Z < 2M$. SOURCE : AUTEUR	255
FIGURE 169: VITESSE D'AIR ENREGISTREE A $Z < 2M$	255
FIGURE 170: NIVEAU DE TURBULENCE (TKE) A $Z < 2M$. SOURCE : AUTEUR	255
FIGURE 171: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ECOULEMENT DANS LE PASSAGE CONVERGENT. SOURCE : BLOCKEN (2004)	256
FIGURE 172: MODELE DE FORME VENTURI DEFINI PAR L, H ET W	257
FIGURE 173: VITESSE D'AIR AU SEIN D'UNE FORME VENTURI POUR PLUSIEURS ANGLES D'INCIDENCE (θ). SOURCE : AUTEUR	258
FIGURE 174: VITESSE D'AIR EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE POUR UNE FORME VENTURI ($L=100M, H=W=12M$).....	259
FIGURE 175: SCHEMAS DES COUPES AB ET CC' PASSANT PAR LE COL-VENTURI.....	261
FIGURE 176: COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA VITESSE D'AIR SUIVANT LE PARCOURS AB. ILLUSTRATION DE L'AUTEUR	262
FIGURE 177: MODELE V1 COMPOSE DE DEUX RANGEES DE FORME VENTURI ORGANISEES EN QUINCONCE.	263
FIGURE 178: LA VITESSE DU FLUX D'AIR AU SEIN DU MODELE V1 ET TRACE DE LA COUPE BRISEE AD.	264
FIGURE 179: TRACE DE LA VITESSE D'AIR SUIVANT LE PARCOURS ABCD A UNE HAUTEUR $Z < 2M$ AVEC $U_0=6M/s$	264
FIGURE 180: COLLISION DU FLUX D'AIR INCIDENT CONTRE L'ARRETE VIF D'UN VOLUME DANS LE MODELE V1.....	265
FIGURE 181: VARIANTE (2) ; FORME VENTURI ASSOCIEE A UN CANAL. ILLUSTRATION DE L'AUTEUR.....	266
FIGURE 182: VITESSE DU FLUX D'AIR ENREGISTREE AU SEIN DU MODELE V2 A $Z < 2M$ DU SOL.....	267
FIGURE 183: VITESSE DU FLUX D'AIR AU SEIN DU MODELE V2 SUIVANT LE PARCOURS ABC A $Z < 2M$	267
FIGURE 184: MODELE V1. GRADIENT DE LA VITESSE D'AIR DANS LA COUCHE DE SALTATION. ILLUSTRATION DE L'AUTEUR.....	269
FIGURE 185: MODELE V2. GRADIENT DE LA VITESSE D'AIR DANS LA COUCHE DE SALTATION ($Z < 2M$).	269
FIGURE 186: MODELE EN PLAN REGULIER AVEC $H/D=3$. GRADIENT DE LA VITESSE D'AIR A $Z < 2M$ (COUCHE DE SALTATION)	269
FIGURE 187: MODELE EN QUINCONCE ($H/D=0,25$). GRADIENT DE LA VITESSE D'AIR DANS LA COUCHE DE SALTATION ($Z < 2M$).	270
FIGURE 188: NIVEAU DE TURBULENCE (TKE) DANS LES QUATRE MODELES TESTES. ILLUSTRATION DE L'AUTEUR.....	270
FIGURE 189: MODELE V1 ; VITESSE D'AIR ET REPARTITION DES RESULTATS DU BILAN SEDIMENTAIRE CALCULE SUR LE PLAN MASSE.	274
FIGURE 190: MODELE V2 ; VITESSE D'AIR ET REPARTITION DES RESULTATS DU BILAN SEDIMENTAIRE SUR LE PLAN MASSE.....	274
FIGURE 191: SITUATION DE LA ZONE PROTEGEE DE L'ENSABLEMENT DANS LE GOURARA. SOURCE : GOOGLE-MAPS.....	280
FIGURE 192: ZONES DESIGNEES AMENAGEABLES AU PIED DU PLATEAU DE TADEMAÏT DE GOURARA.	281
FIGURE 193: REPERAGE DES POINT A, B, C, D, E, F ET G SUR LE PLAN MASSE ET CALCUL DE (L) DANS LES DEUX MODELES (V1 ET V2).....	IV

Liste des Tableaux

TABLEAU 1: DONNEES SUR L'INSOLATION DANS LA STATION DE TIMIMOUN. SOURCE : ONM (1991-2010)	29
TABLEAU 2: REGION DE TIMIMOUN ; DONNEES DU VENT. SOURCE : ONM (1991-2010)	37
TABLEAU 3: ECHELLES DES MOUVEMENTS ATMOSPHERIQUES D'APRES (ATKINSON, 1995, P.3).....	100
TABLEAU 4: VALEURS DE A EN FONCTION DU TYPE DE TERRAIN (BERANEK, 1984)	110
TABLEAU 5: BILAN SEDIMENTAIRE ET TYPES DE DEPOT. MAINGUET, (1995)	141
TABLEAU 6: CARACTERISTIQUES DES PARTICULES. (NAAIM-BOUVET, 2003)	149
TABLEAU 7: CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS MODELES TESTES. (NAAIM-BOUVET, 2003)	149
TABLEAU 8: PHOTOS DES DIFFERENTES DISPOSITIONS TESTEES PAR RAPPORT A L'ACCUMULATION DES GRAINS DE SABLE.	150
TABLEAU 9: AVANTAGES ET LIMITES DES DIFFERENTS OUTILS DE SIMULATION ATMOSPHERIQUE. (WANG, 2015).....	160
TABLEAU 10: COMPARAISON DES DIFFERENTS MODELES DE TURBULENCE PROPOSES SOUS FLUENT. (FEDALA, 2007)	166
TABLEAU 11: PRINCIPALES ESPECES (LIGNEUSES ET HERBACEES) UTILISEES DANS LA LUTTE BIOLOGIQUE CONTRE L'ENSABLEMENT.	188
TABLEAU 12: PHOTOS RELATIVES AUX ZONES DE DEPOT RELEVES SUR LE PLAN MASSE DE M'GUIDEN.....	242
TABLEAU 13: CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES D'UN MODELE COMPOSE DE VOLUMES (TYPE A).....	248
TABLEAU 14: CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES DES MODELES TESTES EN VUE DE LA DEFINITION D'UN RAPPORT H/D	252
TABLEAU 15: VITESSE MIN ET MAX OBTENUS EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE (θ).	259
TABLEAU 16: CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES DES MODELES OBJETS DE MODELISATION.	259
TABLEAU 17: RESULTATS DE LA VITESSE D'AIR OBTENUE A $Z < 2M$ DANS LES CINQ MODELES TESTES.	260
TABLEAU 18: VITESSE DE VENT (ET GRAINS DE SABLE) U (M/s) A $Z=1M$	273
TABLEAU 19: ECHELLE DE BEAUFORT PROLONGEE MONTRANT LES EFFETS INDESIRABLES DU VENT SUR LES PERSONNES.	II
TABLEAU 20: VALEURS DE MESURE DE (L) DANS LES DEUX MODELES V1, V2.....	IV

Table des équations

EQ. (1).....	32
EQ. (2).....	43
EQ. (3).....	104
EQ. (4).....	107
EQ. (5).....	109
EQ. (6).....	110
EQ. (7).....	110
EQ. (8).....	154
EQ. (9).....	156
EQ. (10).....	156
EQ. (11).....	156
EQ. (12).....	157
EQ. (13).....	158
EQ. (14).....	158
EQ. (15).....	159
EQ. (16).....	159
EQ. (17).....	159
EQ. (18).....	167
EQ. (19).....	167
EQ. (20).....	168
EQ. (21).....	168
EQ. (22).....	168
EQ. (23).....	169
EQ. (24).....	236

Nomenclature

Symbole	Nom	Unité
C	Coefficient sans dimension qui dépend du tri du sédiment	
C_Z	Coefficient dépendant de la rugosité du site	
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	Constantes	
d	Diamètre moyen des grains de sables	cm
D	Valeur du grain standard (0,25 mm)	mm
ETP	Evapotranspiration potentielle	mm
I	Indice d'aridité	
I_b	Indice d'aridité bioclimatique	
g	Gravité terrestre (9.81 m/s ²)	m/s ²
k_c	Coefficient de recalage climatique	
k	Facteur caractéristique de la nature du terrain	
k_1	Coefficient égal à 0,1 pour un grain quand le diamètre est supérieure à 200 μ m (soit 0,02mm)	
P	Précipitation moyenne annuelle	mm
P	Pression exercée en un point quelconque du fluide	N/m ²
Q	quantité de sable transporté	kg/m.s
Re	Nombre de Reynolds	
T	Température moyenne annuelle	°C
t	Temps	s
$TKE (k)$	Energie cinétique turbulente	m ² /s ²
$U_{météo}$	Vitesse moyenne du vent obtenue à la station météo	m/s
U	Vitesse de l'air	m/s
U_G	Gradient constant de la vitesse du vent	m/s
U_{ref}	Vitesse mesurée à la station météo	m/s
U_{site}	Vitesse moyenne du vent en site d'étude	m/s
U_Z	Vitesse du vent à une hauteur Z	m/s
U_0	Vitesse moyenne de référence (obtenue à une hauteur Z=10m)	m/s
U_{\square}	Vitesse de frottement ou de cisaillement	m/s
Z	Hauteur de saisie de la vitesse	m
Z_G	Hauteur de la couche limite	m
Z_0	Hauteur de rugosité du site	mm
Lettres grecques		
α	Constant dépendant de la rugosité du site	
θ	Nombre de Shields	
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	m ² /s ³
μ_d	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s
μ_c	Viscosité cinétique du fluide	m ² /s
ρ	Densité de l'air (1,23 kg/m ³)	kg/m ³
ρ_p	Densité des grains de sable	kg/m ³
τ	Contrainte de cisaillement au niveau du grain	Pa
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Nombre de Prandtl turbulent pour k et ε	Pa

Glossaire

Terme	Sens/définition
<i>Abid</i>	désigne un esclave
<i>Afreg</i>	l'afreg est une palissade de palmes plantées dans le sable qui protège un jardin de l'ensablement.
<i>Ahfir</i>	désigne un glacis
<i>Agham</i>	désigne <i>ksar</i> en berbère
<i>Aklé</i>	champ de dune à relief confus, mais où prédominent tout de même les éléments transversaux au vent.
<i>Alab, sing. Elb</i>	grande chaîne dunaire à plus de continuité que le <i>silk</i>
<i>Asqif (ou Skifa)</i>	passage couvert aménagé de banquettes
<i>Barkhane</i>	dune mobile en forme de croissant
<i>Bour</i>	signifie « terre inculte »
<i>Byût (pl. bayt)</i>	chambre (ou pièce)
<i>Bûrj</i>	une tour
<i>Casbah</i>	citadelle et palais d'un souverain. Parties hautes et fortifiées d'une ville.
<i>Cheikh (pl. chioukh)</i>	autorité religieuse
<i>Djérid</i>	branchage de palmier
<i>Erg</i>	massif dunaire
<i>Foggara</i>	galerie souterraine pour capter l'eau.
<i>Habous</i>	bien affecté à un usage pieux.
<i>Hamada</i>	plateau tabulaire rocheux, quelle que soit la nature de la roche qui le supporte.
<i>Harratin</i>	descendant d'esclaves, à la peau noire.
<i>Hassi</i>	puits
<i>Gassi</i>	rue, couloir à fond dur entre chaîne de dunes
<i>Ghourd (ou Oghroud)</i>	grande dune pyramidale à arrêtes sinueuses
<i>Ksar (pl. Ksour)</i>	village traditionnel (Agham en berbère)
<i>Médina</i>	vieille ville
<i>Rahba</i>	place
<i>Sebkha</i>	lac salé et temporaire
<i>segua</i>	canal d'irrigation à ciel ouvert
<i>Sif (pl. Siouf)</i>	crête aiguë et sanieuse ; ne pas confondre avec le « <i>silk</i> »
<i>Silk (pl. Slouk)</i>	mince et long cordon dunaire
<i>Tasskimt</i>	petit balancier servant à exploiter un puits ou une fosse pour l'irrigation
<i>Theïrat</i>	creux inter-dunaires
<i>Toub (tine)</i>	l'argile
<i>Touiza</i>	pratique de solidarité traditionnelle dans le monde rural maghrébin caractérisée par le principe d'entraide.
<i>Zaouïa</i>	confrérie, locaux d'une confrérie
<i>Zériba</i>	enclos à bétail
<i>Zkak</i>	ruelle intérieure dans un <i>ksar</i>

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et problématique

Les zones arides et semi arides dans le monde subissent de manière patente les effets du dérèglement climatique¹ comme cités dans différents écrits afférents dont le plus important est le travail du groupe d'experts intergouvernemental (GIEC, 2007)² sur l'évolution du climat. Dans la plus grande partie des régions arides, et particulièrement en Afrique sèche et Afrique du nord, les changements climatiques ont provoqué une réduction considérable du couvert végétal, favorisant ainsi la mobilisation du sable et son accumulation sur les terres agricoles, les voies de communication et autres infrastructures et installations humaines. Malgré les efforts et actions déployés par les pays concernés, la vulnérabilité face aux conséquences néfastes du "shift" climatique ne cesse de s'aggraver jour après jour. Sachant que l'on assistera à l'horizon 2080 à une augmentation des terres arides et semi-arides de l'ordre de 5 à 8 % dans le monde (GIEC, 2007), nous comprenons aisément l'importance qu'il faut accorder à la question de vulnérabilité face aux catastrophes naturelles qui peuvent en découler (inondation, sécheresse, ensablement...etc.). Par conséquent, un travail de réflexion doit être accordé à la question et de capacités d'adaptation des populations de ces régions.

A l'instar des régions arides dans le monde, la région de Gourara en Algérie est fortement exposée au problème épineux d'ensablement. Ce phénomène dû aux conditions climatiques arides de la région et à sa nature géologique a vu étendre son ampleur ces dernières décennies suite à un ensemble de facteurs d'ordre principalement anthropique.

En effet, au lendemain de l'indépendance le Sahara algérien avait subi une deuxième vague d'urbanisation plus intense que celle connue en période coloniale se résumant à quelques équipements de base (Côte, 1996). Si dans le passé les populations des régions sahariennes ont pu adapter leur habitat (*ksar*) aux conditions extrêmes du milieu désertique et le développement de stratégies de protection contre le risque potentiel d'ensablement (Lakhdari 2015), l'importation du modèle « ville du nord » semblait mal s'accommoder avec la réalité sociale, économique et environnementale (écologique) de la région (Pliez, 2011). Seule façon à l'époque pour faire face à l'explosion démographique qu'a connue la région, ce modèle avait conduit à l'apparition de problématiques nouvelles (bouleversement) dans la relation étroite et

¹ Changements ou dérèglements climatiques désignent un changement du climat attribué directement ou indirectement aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère globale et qui s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables (UNFCCC, 1992).

² Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

séculaire entre *ksar* et palmeraie. A une véritable crise en matière de forme urbaine adaptée au contexte physique s'ajoutent les défauts de l'urbanisme normatif, qui négligent les spécificités de constructibilité des terrains et les contraintes climatiques (Kouzmine, 2012).

L'émergence de l'habitat spontané à son tour, fait partie d'un mouvement général qui est pour une large part la conséquence de la croissance démographique d'une population qui a plus que doublée en un quart de siècle et qui a basculée vers la citadinité. Certaines pratiques à l'image des *afregs*³, conçus au départ comme système inhibiteur du phénomène d'ensablement, s'est avéré au fil du temps plus favorable à la recrudescence du danger qu'à sa réduction (Bisson, 1985). En effet, avec l'émergence de l'habitat spontané l'occupation progressive de l'espace libre entre la dune-afreg et le *ksar* -due à la poussée démographique qui a valu la construction de nouvelles maisons- a conduit à de véritables désastres ; des habitations entières ensevelies par le sable ont été repérées au niveau du village de Badriane lors de notre visite à la région de Gourara en 2011.

Par ailleurs, le système des *afregs* a perdu tout son intérêt avec l'abandon progressif de l'activité agricole (Bisson, 1994). En effet, les mutations récentes qu'a connues l'espace oasien et le passage d'une société ksourienne « paysanne » vers une société urbaine « citadine » fait que la population versée dans le commerce et le travail salarié dans les industries ne s'intéresse plus à l'entretien des *afregs* considéré comme une tâche pénible et coûteuse. Face au manque de moyens matériels et financiers, les habitants estiment que l'entretien des villages est du devoir des collectivités locales⁴.

Les conséquences du phénomène d'ensablement, au plan socio-économique et environnemental sont lourdes, elles se traduisent généralement par une baisse de la production agricole, la migration, le chômage et le manque d'accès aux services de bases (logement, santé, éducation...etc.) (Bison, 1994). Ainsi, la mobilisation par le vent de ce gigantesque gisement de sable formé par l'Erg Occidental constitue une véritable menace à l'ensemble des infrastructures de développement dans la région. La lutte contre l'érosion éolienne dans un contexte de désertification représente un coût non négligeable, en perte et en investissement,

³ Pour éviter l'ensablement de leurs *ksour* et palmeraies, les habitants d'Adrar ont souvent fait recours à la technique des «*afregs*». Cette technique consiste à poser des palissades en palmes pour arrêter l'avancée du sable en formant un amoncellement. Au fil des années, cet amoncellement, fortement entretenu, se transforme en dune artificielle qui forme un rempart empêchant l'avancée du sable.

⁴ Informations recueillies en 2011 lors de notre entretien avec le *Cheikh* de la *Zaouia* de Badriane réalisé dans le cadre du projet CMEP (ex-Tassili) n°09MDU788 (2009-2013), intitulé « Futurs des villes face aux changements climatiques : vulnérabilité et adaptation des sociétés et des milieux oasiens du Touat-Gourara, en Algérie ». Collaboration entre les deux laboratoires LAE-EPAU d'Alger et LRA-ENSA de Toulouse.

pour l'économie de l'Algérie et celles de nombreux autres pays. Selon une estimation du PNUE, en 2004, les pertes annuelles de revenus liées à la désertification sont de l'ordre de 42 milliards de dollars pour l'ensemble des pays concernés⁵ (Venard, 2012).

L'impact de ce phénomène se traduit par une progression rapide qui compromet tout développement urbain et économique ; plusieurs infrastructures routières, hydro-agricoles, oasis et agglomérations sont sous la menace permanente du déplacement massif des dunes qui forment l'Erg occidental (Côte, 2005). Une reconfiguration continue du territoire est constatée ; les populations sont en quête permanente de nouveaux territoires, qui puissent répondre à leur besoin croissant en termes de ressources hydriques (Bisson, 1994). Cette occupation aléatoire du territoire sous forme de nomadisme pose ainsi aux autorités locales d'énormes problèmes, comme celui d'électrification, réalisation de routes, scolarisation des enfants ...etc. Les travaux de désensablement souvent engagés par les collectivités locales, nécessitent des moyens matériels et humains colossaux, et malgré cela le résultat n'est pas forcément fiable et pérenne⁶.

Le phénomène d'ensablement représente pour cette partie du pays un véritable frein pour son développement socio-économique et pour le bien-être des populations (Côte, 2005). Cette vulnérabilité extrême et le besoin de stratégies d'adaptation de secteurs clefs (économie, urbanisation et aménagement...etc.) aux impacts possibles du phénomène d'ensablement représentent de vrais enjeux pour le développement durable du pays.

Face à cette problématique nous nous sommes posés certaines questions essentielles quant à la manière d'intervenir sur ces milieux fragiles afin de pourvoir asseoir une méthodologie adéquate pour cette recherche « originale » et de répondre de la manière la plus optimale à la problématique posée :

Comment peut-on maintenir ces populations dans ces milieux aux ressources limitées et de vulnérabilité extrême face au danger d'ensablement ? Face à cette urbanisation spontanée de l'espace oasien, serait-il possible de concevoir des modèles de villes qui prendront en compte le risque naturel d'ensablement ? Quelles sont les formes (ou modes) d'adaptation possibles que l'on pourra envisager en termes d'aménagement ? Le système afregs est-il vraiment un

⁵ D'après le rapport d'investissement par pays consultable en ligne à l'adresse suivante: <http://www.sirtewaterandenergy.org/docs/reports/Tunisie-Rapport2.pdf>

⁶ Informations recueillies en 2011 lors de notre entretien avec le responsable du service des forêts de la wilaya d'Adrar dans le cadre du projet CMEP (ex-Tassili) n°09MDU788 (2009-2013), intitulé « Futurs des villes face aux changements climatiques : vulnérabilité et adaptation des sociétés et des milieux oasiens du Touat-Gourara, en Algérie ». Collaboration entre les deux laboratoires LAE-EPAU d'Alger et LRA-ENSA de Toulouse.

système pérenne ? Est-il valable et efficace aux multiples variations du relief et de topographie dans la région de Gourara ? Existe-t-il d'autres alternatives de lutte contre l'ensablement ?

2. Hypothèses

Partant d'une démarche hypothético-déductive, nous supposons que :

Hypothèse première

Les barrières de sable appelées localement « *afregs* », conçues initialement pour lutter contre l'avancée de sable semblent participer indirectement à l'aggravation du phénomène d'ensablement dans la région de Gourara.

En effet, la pratique de palissades à base de branches de palmes que l'on appelle localement « *afregs* » renseigne sur un savoir-faire ancestral de lutte contre le phénomène d'ensablement. Ce système et pour le moins que l'on puisse dire est efficace car il a permis à certains *ksour* et oasis d'exister jusqu'à nos jours en plein milieu hostile caractéristique d'ensablement. Néanmoins, d'autres *ksour*, et ce, malgré de s'être dotés de ce système n'ont pas pu résister à la force de la nature. Souvent le sable a eu le dessus et a fait disparaître à jamais des maisons entières dont seuls quelques fragments témoignent aujourd'hui de leur existence. A priori plusieurs questions viennent à l'esprit :

Hypothèse deuxième

Par ailleurs, la morphologie de la forme bâtie et sa géométrie n'est pas sans incidence sur les mouvements éoliens d'ensablement. En effet, le comportement aérodynamique d'un obstacle crée une zone de sillage influant d'une manière directe et significative les champs aérauliques et leurs répartitions (Mainguet, 2003). Selon Bagnold (1941), l'aspect erratique de l'écoulement éolien résultant fera perdre au vent sa vitesse et le contraint à se décharger progressivement des grains de sable transportés. Résultat, l'apparition de zones de dépôt en amont, aval et sur les bords de l'obstacle (bâtiment) est immédiate. Dans ce sens, nous supposons qu'une intégration étudiée d'effets aérodynamiques « spécifiques » dans la conception de la forme bâtie nous permettra de lutter efficacement contre le mécanisme de dépôt de sable au sein du plan de masse.

En effet, en termes d'effets aérodynamiques connus de nos jours, il est avéré que celui de « Venturi » et de « canalisation » portent une incidence incontestable sur l'accélération et la stabilité du régime éolien (Mestoul, 2010). Nous supposons que l'intégration de ces deux effets dans la conception de la forme urbaine pourrait favoriser davantage un écoulement laminaire du flux d'air. Ceci pourra assurer donc une remise en mouvement des grains de sables et leur déplacement sans pour autant être exagérément entravés, ce qui réduira incontestablement le volume sédimentaire au sein du plan de masse.

3. Méthodologie

L'étude du phénomène de l'ensablement dans le Gourara en vue de proposer des solutions pérennes requiert d'abord une compréhension parfaite de la nature climatique et morphologique de la région, des mouvements aérauliques d'ensablement, leur origine et leur fréquence. Par ailleurs, les facteurs anthropiques liés à l'aménagement et au cadre bâti peuvent s'avérer favorables à la production et la prolifération du phénomène, d'où l'intérêt de leur étude afin de créer des savoir-faire utiles à la conception de bâtiments et d'espaces extérieurs urbains propices à la réduction de l'ensablement.

➤ Champs disciplinaires : objet et outils expérimentaux correspondants

Dans le cadre de la présente recherche, la méthodologie a été inspirée par la problématique spécifique relative à la caractérisation des mouvements aérauliques d'ensablement d'une part et leur interaction avec les formes bâties d'autre part et les formes sédimentaire résultantes. Le cadre théorique de recherche dans l'état de l'art de connaissances souligne l'intérêt du caractère interdisciplinaire pour cette recherche. La méthodologie de la présente recherche repose donc sur une confrontation de savoirs disciplinaires issus de l'architecture, de l'urbanisme, de la météorologie, de la géomorphologie, de l'aéraulique et de la Mécanique des Fluides Numériques (MFN). C'est ainsi que nous sommes parvenus à positionner les champs disciplinaires à engager, les structures afférentes, outils et protocoles méthodologiques expérimentaux comme définis et illustré dans le schéma ci-dessous :

- Architecture et urbanisme : nous justifions ce choix par le fait que l'urbanisme est au cœur du débat car c'est le cadre bâtis qui subit les conséquences de l'ensablement.

L'objet est l'étude du cadre morphologique et architectural de la région d'étude dans son ensemble (*oasis, ksar, foggara, ville saharienne...etc.*) qui permettrait de cerner

l'évolution de l'espace oasien, et les types d'habitat que l'on peut y recenser et qui sont les plus vulnérables à la question d'ensablement. Par ailleurs, l'étude du phénomène d'ensablement à une échelle de l'ilot et de la masse bâtie permettra de saisir les paramètres physiques liés à l'espace urbain et au bâtiment ayant une incidence directe sur les mouvements éoliens d'ensablement et qui peuvent s'avérer par conséquent très favorables /et ou défavorables à l'accumulation de sable au sein et autour des masses bâties.

Afin d'atteindre nos objectifs, quelques outils nécessaires ont été adoptés à savoir : cartes satellitaires, documents graphiques (plans, relevés, PDAU...etc.) récupérés au niveau de la DELP⁷ de Charouine et Timimoun ainsi que l'observation in situ via nos visites récurrentes à la région d'étude (2011, 2012 et 2013).

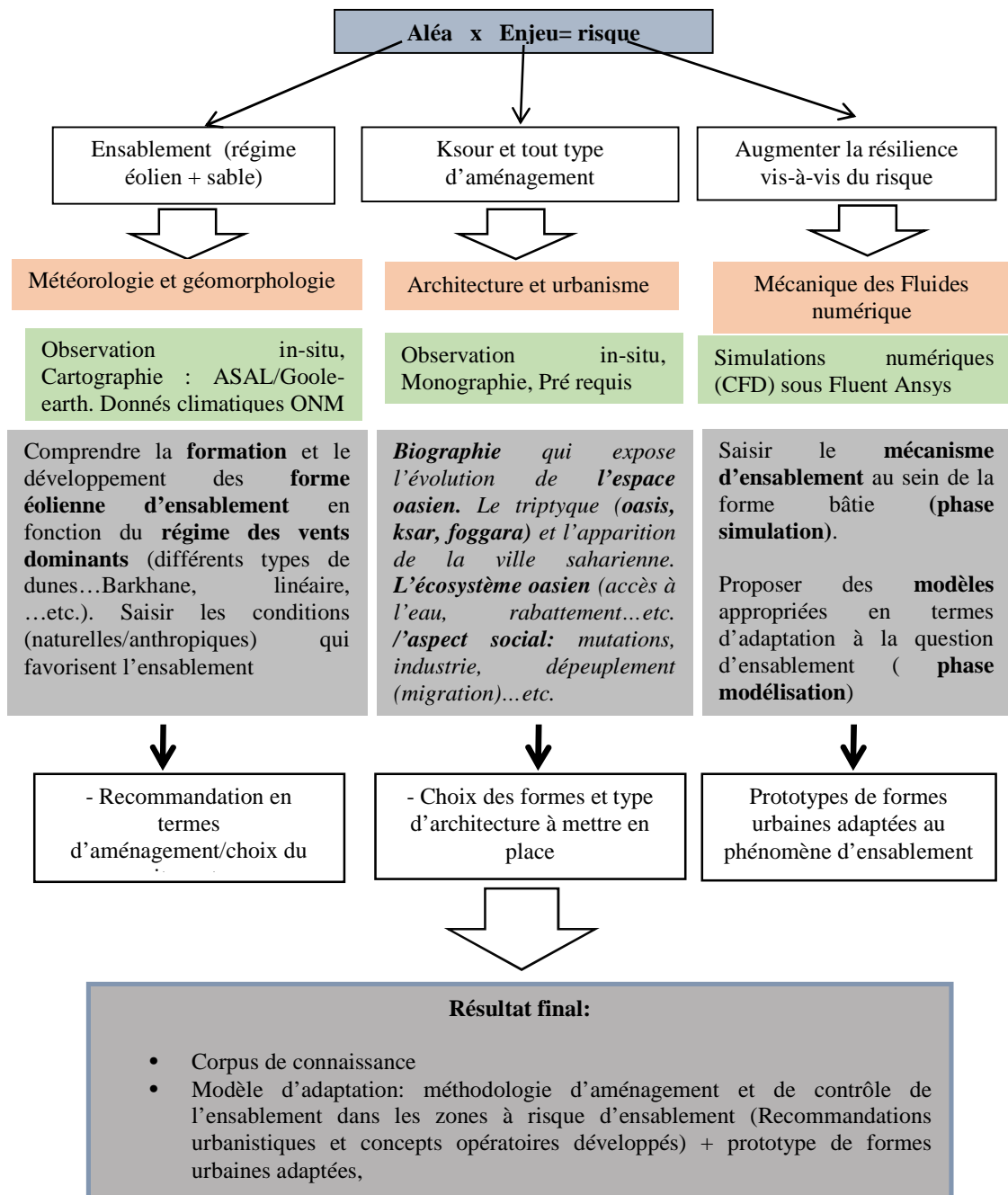
- **Météorologie et géomorphologie** : cela concerne l'étude du cadre physique et environnemental de la région d'étude (topographie, relief, types de dunes...etc.) afin de saisir les éléments physiques pertinents dans la production et la prolifération du phénomène d'ensablement. Par ailleurs, l'étude des formes sédimentaires et leur mécanisme de formation dans la nature serait d'une grande importance afin de pouvoir appréhender le processus d'ensablement, son échelle d'action et le degré de dangers que peut représenter vis-à-vis des différents types d'aménagement présents dans la région d'étude.

Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons fait appel à des outils d'investigation qui renferment à la fois observation *in-situ*, supports cartographiques et satellitaires ainsi que des entretiens exploratoires que nous avons réalisés avec habitants et collectivités locales de la région sur certains aspects liés au phénomène d'ensablements et l'entretien des aménagements locaux.

- **Mécanique des Fluides Numériques (MFN)** : nous avons fait appel à la simulation numérique -sous le Code Fluent- qui une dérivée des MFN afin de saisir le mécanisme d'ensablement en site d'étude et au sein de la forme bâtie. En effet, seule la simulation numérique CFD (Computational Fluid Dynamics) peut nous renseigner sur les champs aérauliques qui peuvent s'établir entre masses bâties et mouvement éoliens d'ensablement.

⁷ Direction du logement et des équipements publics- DLEP.

L'objet serait de saisir les éléments physiques pertinents dans la production de zones de sillage responsable du dépôt des grains de sable autour de la masse bâtie en vue de proposer des solutions appropriées en termes d'adaptation à la question d'ensablement. Afin d'atteindre notre objectif, plusieurs modélisations CFD ont été élaborées sous le code Fluent pour différents types d'agencement de masses bâties en plan masse.



➤ **Le cas d'expérimentation (situation, données, période d'étude...)**

Nous avons choisi comme terrain d'études des espaces sahariens situés aux confins du Grand Erg Occidental. Notre recherche consiste à étudier le phénomène d'ensablement à plusieurs échelles spatiales entre la grande échelle (région du Gourara) et la petite échelle (village de M'Guiden).

La région du Gourara, comme site d'expérimentation se situe dans le triangle délimité par la frange méridionale de l'Erg Occidental au NORD, le plateau du Tademaït à l'Est et l'Oued Saoura à l'ouest. Son chef-lieu, Timimoun, se situe approximativement au centre de ce triangle, par 29°15 de latitude Nord et 0°14 de longitude Est. Le Gourara est un vaste ensemble composé de trois unités topographiques distinctes: Erg/plateau et l'Oued de la Saoura. L'ensemble est jonché de palmeraies, de sebkha, de *hamada* et de quelques formes éoliennes non dunaires relatives à la nature géologique de la région.

Au total, quatorze (14) ksar présenté en fig.114 s'étalant sur toute la région de Gourara ont été sillonnés lors de nos visites sur terrain afin de cerner le phénomène d'ensablement dans son ensemble, son mécanisme d'influence et enfin d'identifier les différentes formes sédimentaires présentes sur place. Trois visites ont pu être établies en saison d'automne durant la période (2011-2013). Le choix de cette saison n'est pas anodin, il s'agit en effet d'éviter les fortes chaleurs en période d'été et les vents de sables qui se manifestent en début du printemps et qui peuvent s'avérer très contraignants pour un travail de terrain. Les ksour ayant fait l'objet de visite se regroupe autour de Timimoun chef-lieu de Gourara dans un rayon de 50km, à l'exception du ksar de M'guiden qui se situe à 140 km à l'Est de Timimoun. Cette étendu si importante couvre pratiquement la région de Gourara et nous permis de cerner le phénomène à une échelle macro. Quant à l'échelle méso et micro, ceux sont le ksar de M'guiden et celui de Badriane qui ont été retenus pour un travail de simulation CFD.

Le choix de ces deux ksour est justifié par le degré d'ensablement atteint, et ce, en dépit de ce qu'ils présentent comme système de lutte contre ce phénomène. Nous considérons que ces deux exemples montrent clairement à quel point les techniques traditionnelles à l'image de la barrière *Afreg* peuvent s'avérer inefficace en raison de la recrudescence du phénomène ces dernières année et ce, suite au shift climatique.

➤ **Étapes de recherche, protocoles méthodologiques expérimentaux et échelles d'approche**

a. Investigation : visites sur site et observation *in situ*

Lors de la phase d'investigation, nous nous sommes rendu compte que la rareté de l'eau dans la région suite aux rabattements des nappes phréatiques a toujours contraint les habitants à chercher de nouveaux territoires. Ce nomadisme en quête de l'eau justifie la présence d'un certain nombre de *ksour* au sein même de l'erg comme Taghouzi, Guentour, Ouled Aissa...etc. Ces endroits sont réputés pour être abondants en eau souterraine mais de par leur nature morphologique (erg, couloir d'ensablement, dépression...etc.) sont considérés comme très vulnérables au phénomène d'ensablement. Cette manière un peu « maladroite » de s'installer dans les endroits les plus fragiles et les plus hostiles sans mesures de protection ne va pas sans conséquences sur les installations humaines. Au sein de l'erg, les dunes finissent toujours par avoir le dessus sur toute forme d'occupation de l'espace.

En ce sens, notre objectif serait de définir à une échelle « macro » des aires protégées qui peuvent accueillir les projets d'aménagements futurs dans la région et de proposer un ensemble de règles et recommandations pour leur implantation et protection. Afin d'atteindre cet objectif nous avons fait recours à l'analyse et l'exploitation des données géomorphologiques et des fonds cartographiques de la région récupérés depuis Google-maps et auprès de l'ANRH⁸.

En outre, l'observation *in-situ* appuyée par les documents graphiques (cartes) et écrits a constitué la base indispensable à notre travail d'investigation. En effet, une connaissance globale préalable des secteurs parcourus sur le terrain avait permis de cerner et d'affiner *in situ* les aires d'ensablement et d'érosion ainsi que leur dynamique. Aussi, à l'issue de cette partie de l'étude, nous avons pu nous faire une idée plus précise du phénomène d'ensablement et les facteurs physiques et anthropiques à l'origine de sa production et sa prolifération. Par ailleurs, les lectures bibliographiques relatives à l'ensablement en général et à la région de Gourara en particulier, notamment ; Dubief (1952-1963), Capot-Rey (1953), Remini (2002-2006), Bisson (1984-1986), Mainguet (1995-2004), Côte (1988-2005), Pliez (2011)...etc. nous ont permis de recueillir les éléments de réponse nécessaires à l'analyse et la discussion des résultats du travail de cartographie et de l'observation *in situ*.

⁸ ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Site web : <http://www.anrh.dz/>

b. De la simulation CFD à la modélisation CFD

Par ailleurs, à une échelle « méso » et « micro » les facteurs anthropiques sont les plus prégnants dans la production et la prolifération du phénomène d'ensablement. Nous avons pu relever l'impact des nouvelles agglomérations à tissu planifié et d'autres sous forme d'habitat spontané dans leur manière d'occuper l'espace sans tenir compte des mouvements éoliens d'ensablement. Le vent étant le vecteur des grains de sable en déplacement, l'objectif était donc de concevoir des modèles de formes bâties qui puissent intégrer la force du vent afin de juguler le mécanisme de sédimentation (sous forme de dunes) au sein de l'espace bâti.

Selon nos investigations effectuées sur le site de Gourara, le problème de déplacement de sable dans la région est dû dans la plupart du temps au mécanisme de saltation. Ce mode de déplacement des grains de sable est le plus difficile à combattre, non seulement parce qu'il se produit à des fréquences régulières d'un régime de vent régulier, mais aussi car il s'effectue dans une couche limite qui va de quelques millimètres à une centaine de centimètre (Fryrear & al., 1991). De ce fait, au moindre obstacle rencontré le vent sera déchargé des grains de sable transportés et donnera des formes d'accumulation que l'on appelle « sédiments », c'est le début d'un véritable processus d'ensablement irréversible à une échelle de l'obstacle.

En ce sens, la modélisation CFD sous le code Fluent a constitué pour nous un outil incontournable pour la conception et la validation des modèles développés. Partant d'une forme urbaine existante (village socialiste de M'guiden) qui subit de plein fouet le phénomène d'ensablement, un travail de simulation CFD pour les mouvements aérauliques a été réalisé afin d'appréhender le mécanisme de formation des dunes au sein de son plan de masse. Hormis la position du village en plein couloir éolien formé par les méga-obstacles (plateau de Tademaït), la forme du village, elle-même, semble contribuer pleinement à la production du phénomène d'ensablement contrairement à ce qui a été avancé dans les écrits⁹ sur la possible immunité du village contre l'ensablement grâce à la configuration en forme spirale de son plan de masse.

Dans l'objectif d'apporter des corrections au comportement aérodynamique de la forme urbaine nous avons fait appel aux quelques rares théories et expériences réalisées dans ce domaine (Bagnold 1941, Karman et Zingg 1953, Duchemin 1958 et Naaim-Bouvet 2003).

⁹ Marouf (2010, p.238) écrit « ce village... son originalité, tient à sa configuration spirale, afin de juguler les vents de sable, qui au lieu de former les dunes contre ses enceintes, évolueraient de façon circulaire autour du village sans l'atteindre »

Plusieurs combinaisons de formes et organisations en plans de masse ont été conçues et testées à travers lesquelles nous avons cherché à développer des modèles qui se révèlent les plus pertinents.

Compte tenu de la nature fluide et dynamique du vent, le facteur le plus crucial dans le contrôle du flux d'air à l'échelle urbaine est la géométrie de l'espace bâti. En effet, les espacements entre les bâtiments modulent grandement le comportement du vent au sein de ces derniers. En effet, la géométrie de la forme urbaine est susceptible d'influer sur la distribution de pression créant de ce fait des zones de pression (négative ou positive), ainsi que des zones de sillage autour des obstacles (masses bâties) rencontrés par le vent dans sa trajectoire. Ce déséquilibre en termes de distribution de pression induit la chute de la vitesse du vent qui à son tour, en se déchargeant des grains de sable, transportés donnera lieu à des zones de dépôt.

Le travail de modélisation a consisté donc à intégrer la force du vent via certaines règles de dimensionnement de sorte à favoriser davantage la circulation de l'air sans entraver le déplacement des grains de sable. Pour appréhender le comportement du vent au sein d'une forme urbaine et saisir les rapports dimensionnels de la géométrie de cette dernière, nous avons fait appel à la modélisation CFD. Cette modélisation a été réalisée via le code Fluent au sein du laboratoire LRA de Toulouse disposant d'une licence pour ce logiciel. Enfin, les résultats de modélisation révèlent que les modèles qui intègrent l'effet « Venturi et canalisation » avec une organisation en quinconce, sont ceux qui présentent les meilleures performances en termes de lutte contre les dépôts de sable.

4. Intérêt de la recherche

La présente recherche découle d'une problématique générale d'une actualité pressante et qui est la résilience des villes face aux changements climatiques. Elle aborde plus particulièrement les moyens d'anticipation et de lutte face au risque d'ensablement des établissements humains dans la région du Gourara. En Algérie, plus qu'ailleurs, ce risque est très présent dans les régions méridionales, et tend à s'étendre à la faveur des changements climatiques et de la poussée démographique.

Tout au long de cette recherche nous nous sommes rendu compte de la gravité d'impact du phénomène d'ensablement sur le développement économique et social de la région de Gourara. En effet, le phénomène d'ensablement ne cesse de mettre en péril plusieurs zones d'aménagement et fragilise de plus en plus l'écosystème. La situation en zones aménagées

(tissu planifié, habitat spontané) est porteuse d'instabilité. L'impact progressif de l'aléa d'ensablement sur les enjeux socio-économiques, notamment l'aménagement urbain, et le déficit enregistré en termes d'outils et stratégies de lutte contre l'ensablement entrave le développement de la zone et la projection de nouveaux centres urbains. Aussi bien la menace existe-t-elle à un degré inférieur auprès des zones non aménagées, et il y va de leur développement futur. Nous comprenons vite l'importance de la prise en compte du phénomène d'ensablement dans le développement urbain durable de la région.

C'est dans cette optique de lutte contre le phénomène d'ensablement que notre présente recherche vient se greffer afin de permettre de mieux appréhender le risque associé à ce phénomène sur les systèmes urbains oasiens, d'en évaluer les capacités d'adaptation et de développer des réflexions d'un point de vue conceptuel et méthodologique en termes d'aménagement urbain.

En plus des méthodes traditionnelles de protection dites de « résistance », l'addition des mesures « préventives » nous permettra de renforcer la résilience du territoire Gourara à travers le passage d'une approche technique, se focalisant sur les facteurs à l'origine de l'aléa d'ensablement, à une approche de la vulnérabilité qui porte le regard tant sur les enjeux que sur les formes organisationnelles. La fragilité de ce territoire représentée par l'ensemble des dommages causés par l'ensablement sur ses enjeux dépend de la situation socio-économique du territoire et également du contexte fonctionnel des institutions politiques et administratives. De cette manière, notre présente recherche pointe aussi les conséquences des décisions qui ont (ou n'ont pas) été prises en amont de la catastrophe, mais également l'aptitude d'une société à être réactive et efficace lors de la gestion de la catastrophe et à se reconstruire.

Enfin, notre recherche a permis mettre en exergue la contribution de la morphologie urbaine dans le renforcement de la résilience face au phénomène d'ensablement, et ce, par l'élaboration de modèles de formes bâties adaptées à partir d'un aérodynamisme étudié.

5. Synthèse des états de savoirs sur la question d'ensablement

Dans le domaine du transport éolien du sable, les travaux de Bagnold font référence. Son ouvrage intitulé « The Physics of blown sand and desert dunes » publié en 1941 est presque systématiquement cité dans les articles scientifiques traitant du sujet. Dans ce livre, Bagnold fait une description du transport de sable, notamment par saltation, de la rétroaction du sable en mouvement sur l'écoulement d'air, de la formation de dunes, de leur morphologie et de leur

déplacement. Depuis la publication de ce livre, notre connaissance sur le transport de grains n'a pas énormément progressée et Bagnold (1941) demeure une œuvre actuelle.

Bagnold, (1941) définit l'ensablement comme phénomène qui se produit quand les grains de sable commencent à se mouvoir suivant l'un des trois modes connus, à savoir : reptation, saltation et suspension. Le mode de saltation étant le plus récurrent permet aux grains de sable de diamètre 50 à 500 micromètre (μm) de se mouvoir pour des distances allant de 1 m à des centaines de mètres. Pethick, (1984) avait centré une grande partie de ses recherches sur le mode de saltation particulièrement très répandu en zone de l'erg. Il admet que pour la production de ce mode, on doit d'abord parler de vent « efficace » caractéristique d'une vitesse dite aussi « efficace » ; comprise entre 4 et 4.5 m/s. Bagnold, (1941) souligne que cette vitesse doit être supérieure au seuil critique d'arrachement afin de permettre aux grains de sable de se mouvoir à travers une série de petits bonds de trajectoire balistique et de se propulser par la suite dans le jet d'ensablement.

Sebaa et al. (2009) dans sa recherche relative à la caractérisation du phénomène d'ensablement dans la région de Gourara et plus particulièrement les dynamiques de l'erg occidental, il souligne que ce dernier est soumis à une dynamique éolienne d'ensablement des aires périphériques. Par conséquent, l'ensemble des oasis et des foggaras situées au sud de l'erg et notamment celles du Touat et du Gourara, se trouvent aujourd'hui menacées d'ensablement rapide puisqu'elles se trouvent sous le vent d'aires exportatrices de sable à budget sédimentaire négatif.

Dans la zone de l'erg le mode de saltation est le plus à craindre, car il permet aux grains de sable de parcourir quelques dizaines de mètres avant de regagner le sol suite à une diminution de la vitesse de l'air en dessous du seuil de portance. Les obstacles, avec leur taille, leur forme et leurs natures (arbres, pentes, reliefs, massifs) introduisent une rugosité qui provoque ainsi une augmentation de la perte de charge et une réduction de la vitesse du vent, favorisant le dépôt de sable et la formation des dunes. Une fois sur le sol, les grains s'accumulent et forment des tas que l'on appelle « sédiments » ou « dunes » en fonction de son volume. Le bilan sédimentaire positif ou négatif dépend fortement de la nature du sol (reg, erg...etc.) et de l'action du vent (érosion ou ensablement).

Mainguet, (2003) nous renseigne sur les formes d'accumulation dans la nature qui peuvent se présenter sous formes de dunes variant d'une simple dune isolée au train barkhanique et dépendent des trois facteurs suivants : degré de mobilité, régime éolien et bilan sédimentaire

(positif/négatif). Mainguet et al., (2006) soutiennent que la formation de dunes est tributaire de ce que le vent dépose et de ce qu'il emporte en chaque point considéré. Lorsque, pour une raison ou une autre, la vitesse du vent diminue, ce processus est déséquilibré au bénéfice du dépôt et l'accumulation commence. Cependant, la vitesse du vent peut augmenter du fait d'une topographie lisse, tel que la hamada. Le processus est déséquilibré au bénéfice de l'érosion, c'est le déplacement de sable qui l'emportera.

L'inventaire des techniques de lutte contre l'ensablement, actuellement en usage dans les différents pays de climat aride fait ressortir a été synthétisé dans les rapports FAO, (1988). Cette diversité est liée à l'expérience propre à chaque pays, des particularités des sites traités et de la disponibilité des matériaux utilisés.

Parmi ces différentes techniques nous avons retenu les systèmes de lutte mécanique tels que les palissades à base de branches de palme que l'on appelle localement *Afreg*. Kerr et Nigra (1952) ont envisagé de rendre ce système encore plus efficace pour lutter contre un déplacement massif de sable. Ils ont proposé alors de placer une série de palissades à différentes distances de l'objet à protéger et espacées entre elles d'environ 1500m. Le quadrillage qui a été développé et amélioré par la suite par Gutierrez (2012), ainsi que le mulching ou le paillage qui consiste en la pose d'une couverture, naturel ou artificiel, d'une façon intégrale ou partielle de la dune font partie aussi de la lutte mécanique. Quant à la lutte biologique, elle fait recours à un matériel végétal adapté aux conditions écologiques du site. Elle se résume en la plantation d'arbres et de plantes afin de freiner, voir dévier l'action éolienne d'ensablement sur certains endroits classés vulnérables. Les travaux de Alali et Benmohammadia (2013) font une bonne référence dans ce sens, car ils renferment un ensemble d'orientation et de recommandation en terme du choix des espèces à mettre en place, et ce, en fonction de la nature des formes sédimentaires et les conditions climatiques et écologiques du site.

Par ailleurs, Sebaa et al. (2009) dans sa recherche propose des solutions qui visent à réduire la fréquence des interventions des équipes d'entretien et créer une stabilité du milieu dunaire et surtout réduire les dépenses publiques. Les résultats obtenus montrent que la méthode aérodynamique avec l'application des savoir-faire locaux tel que la technique du tas de remblai peut constituer une base de travail pour les projets de stabilisation des dunes mobiles.

Quant aux formes d'accumulation au sein d'un espace bâtie et autour d'obstacles, ce sont les paramètres morphologiques de la forme bâtie qui sont déterminants dans la production ou non

du dépôt de sable. Ceci a été démontré aux travers les différents exemples étudiés issus des expériences de Duchemin (1958) et Naaim-Bouvet (2003). En effet, ce que nous retenons de ces deux travaux est le dépôt ou le maintien des grains de sable en mouvement dépend fortement de la forme de l'obstacle, de son agencement et disposition avec les autres obstacles et du niveau de la turbulence générée au sein du plan de masse.

De par les différentes méthodes exposées de lutte contre l'ensablement, c'est surtout celle liée à l'aérodynamique et à la force du vent qui a retenu notre attention. Dans ce sens, la recherche développée par Duchemin (1958) a constitué pour nous un point de départ quant à la question d'accumulation de sable autour d'un obstacle, malheureusement celle-ci demeure très sommaire pour parler d'un modèle de forme adaptée à la question d'ensablement. Dans le même registre, un autre travail a retenu notre attention : il s'agit de celui réalisé par Naaim-Bouvet (2003) sur les écoulements bi-phasiques turbulents de neige. Alors, même si le travail porte sur le déplacement de particules de neige, toutefois et dans ses simulations en soufflerie, Naaim-Bouvet avait opté pour des grains de sable pour simuler l'interaction avec des tas freineur (obstacles) composés de différentes séries de volumes. Cette étude nous a permis de tirer des rapports dimensionnels quant aux volumes qui génèrent le moins de dépôt en amont et en aval mais aussi dans les vides séparant les volumes. Le seul bémol dans cette étude est que Naaim-Bouvet s'est contenté de simuler en soufflerie une seule rangée de volumes faisant variés leur dimensions, et ce, en rapport avec la problématique de départ qui consistait à concevoir une barrière pour faire face au éboulement de neige en montagne.

Notre apport personnel dans le domaine de l'étude du phénomène d'ensablement concerne la formulation et la validation d'hypothèses me permettant de développer des modélisations numériques (CFD) concernant des formes bâties ayant comme caractéristique un comportement aérodynamique « spécifique » permettant de combattre efficacement l'accumulation de sable au sein du plan masse.

S'inspirant d'une recherche élaborée en Magistère (Mestoul, 2010) nous avons ainsi répertorié les paramètres physiques liés à l'espace urbain qui sont à l'origine des effets aérodynamiques pour une meilleure maîtrise des mouvements d'air d'ensablement. A titre d'exemple, à une échelle de l'unité urbaine (ilot) et pour lutter contre les dépôts de sable, il serait intéressant de favoriser le déplacement de sable par la force du vent à travers l'optimisation de la fluidité de l'écoulement d'air au sein du plan de masse. Ceci requiert l'intégration au sein de cette unité urbaine d'effets aérodynamiques tels « Venturi » et/ou « canalisation » que l'on considère

susceptibles d'accélérer le régime éolien et favoriser de ce fait la mise en mouvement des grains de sable et leur déplacement en dehors du périmètre bâti.

La modélisation CFD sous Fluent, sera l'outil méthodologique privilégié dans notre expérimentation relative à l'étude de la nature d'écoulement éolien et son mécanisme d'ensablement au sein de nos modèles de formes bâties.

La Mécanique des Fluides Numérique (MFN), plus souvent désignée par le terme anglais *Computational Fluid Dynamics* (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le mouvement du fluide. La MFN a été développé pour devenir un outil essentiel dans pratiquement toutes les branches de la dynamique des fluides, de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques en passant par le dessin des coques de bateaux. Dans le domaine de la recherche, cette approche est d'un intérêt fondamental car elle permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration) pour chaque point du domaine de calcul, pour un coût global généralement modique par rapport aux expériences correspondantes.

Selon Wang (2014), une étude numérique basée sur la dynamique des fluides informatique CFD est capable de fournir des informations très fiables pour une étude détaillée. Un avantage particulier du CFD est qu'il fournit des données entières de champ d'écoulement à l'encontre de l'essai en soufflerie qui donne accès uniquement à des mesures ponctuelles.

En CFD trois méthodes de simulation de calcul sont proposées qui répondent à des problèmes de situations diverses, allant d'une petite à une grande échelle. La méthode RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) est recommandée pour des écoulements moyennement complexes ce qui s'avère très compatible avec notre cas d'étude. Concernant le modèle de turbulence, nous avons opté pour (k- ϵ) Standard de la méthode RANS. Ce choix est justifié par le fait que ce modèle est le plus couramment utilisé en CFD pour simuler les caractéristiques d'écoulements moyens turbulents ce qui convient parfaitement à notre cas d'étude. Frank et al., (2004) avaient développé sous forme de benchmark les paramètres essentiels à la validation d'un modèle de turbulence de la méthode RANS. La prise en compte de ces paramètre en termes de modélisation sous Fluent participera d'une manière incontournable à minimiser aux maximum les erreurs qui peuvent surgir lors du calcul.

La notion de bilan sédimentaire sablo-éolien a été considérée par Mainguet, (1995) comme un préalable utile pour comprendre les mouvements dunaires et adopter des stratégies adaptées vis à vis des risques liés à l'action éolienne.

Plusieurs formules de prévision de la quantité de sables transportée par le vent ont été obtenues théoriquement et expérimentalement par divers chercheurs depuis 50 ans, (Horikawa *et al.*, 1986 ; Pye et Tsoar, 1990 ; Sherman et Bauer, 1993; Sherman *et al.*, 1996), soit en modèles réduits (soufflerie), soit à partir de mesures *in situ*. Ces formules peuvent prévoir le transport avec un degré d'exactitude raisonnable si le coefficient empirique est bien déterminé.

Parmi les expressions prédictives du flux horizontal issues de travaux de recherche en laboratoire et sur le terrain, nous retenons principalement deux équations (Bagnold 1941 et Karman et Zingg 1953) que nous présentons en chapitre 5. Ces formules que nous utiliserons par la suite dans les calculs des flux potentiels, prennent en compte la granulométrie du sédiment. Elles sont considérées comme les modèles de référence pour la prédiction des flux de transport éolien. Toutefois elles négligent certains éléments (humidité, cohésion des sédiments et température...) et correspondent donc à des conditions environnementales "idéales" (sables secs, absence d'obstacle, surface horizontale).

6. Concepts de la recherche

Suite aux états des savoirs sur la question d'ensablement que nous avons établis, nous avons pu relever quelques concepts fondamentaux sur la question d'ensablement. Il s'agit ici, de préciser ceux qui sont les plus pertinents par rapport à la question de recherche pour être investigués, c'est-à-dire ceux qui représentent un intérêt et contribueront à la compréhension du phénomène d'ensablement.

Partant de la formule définissant le risque : « risque = Aléa x vulnérabilités » nous avons soulevé l'importance d'étudier les différents concepts liés et concomitants à cette définition à savoir : risque, aléa, vulnérabilité, adaptation (anticipative, réactive et planifiés) résilience et enfin gouvernance.

En effet, le risque est une notion composite. Car il est le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. En effet, le concept de l' « aléa » exprime la probabilité d'occurrence de la catastrophe et renvoie à l'étude des paramètres physiques favorables à sa production. Dans

notre présente recherche, comme il s'agit de l'ensablement, les paramètres liés sont d'ordre anthropique, climatique et géomorphologique. Ceci renseigne déjà sur le caractère interdisciplinaire de la méthodologie à engager.

Par ailleurs, le concept de la vulnérabilité exprime le niveau de conséquence prévisible d'un phénomène sur les enjeux qui sont les domaines affectés par le risque et ce, selon la capacité de réponse des sociétés face à des crises potentielles. Il renvoie donc à l'étude d'« adaptation » de la société subissant la catastrophe voir aussi celui de la « résilience ». Le concept de vulnérabilité mérite donc d'être développé afin de cerner les secteurs exposés au risque (cadre bâtis ?) et d'agir sur les facteurs de risque, ceux qui rendent ses secteurs fragiles. De cette façon nous pourrions augmenter la résilience de ces secteurs fragiles afin d'assurer leur durabilité.

Moriniaux, et al, (2003) explique que l'aléa, la vulnérabilité, l'adaptation et la résilience sont des concepts liés dans la mesure où un aléa peut se transformer en catastrophe si le produit du phénomène dommageable et de la vulnérabilité des éléments exposés dépasse un certain seuil de tolérance et d'adaptation.

Par ailleurs, l'adaptation pourrait être subdivisée en trois types distincts à savoir ; « anticipative » et « réactive » chaque l'un de ces deux types dépend des stratégies et des moyens dont disposent les populations. Selon le rapport du GIEC (2007), à ces deux principaux types d'adaptation, s'ajoute l'adaptation « planifiée », résultat d'une décision politique délibérée, basée sur une prise de conscience des changements en cours et à venir, et une bonne évaluation des possibilités d'adaptation selon des critères pertinents (disponibilité, bénéfiques, coûts, efficacité, efficacité et faisabilité). Ce dernier point qui renvoie à la question de « gouvernance », nous impose d'étudier les politiques actuelles en Algérie sur la prise en compte du risque d'ensablement à travers les lois et les textes réglementaires.

7. Structure de la thèse

La présente thèse est structurée en trois parties distinctes bien équilibrées ; la première développe le contexte problématisant, la deuxième précise le cadre méthodologique et enfin la troisième est consacrée à l'expérimentation et aux recommandations.

Dans le chapitre (1), nous avons délimité le champ de notre investigation à la région de Gourara qui subit les plus forts assauts de l'ensablement, exacerbé par l'aridité croissante. Ce

chapitre expose les principales caractéristiques de ce territoire et ses importantes disparités géomorphologiques. Le climat est décrit dans sa globalité et plus particulièrement le vent et ses spécificités qui permettent de comprendre les phénomènes d'ensablement ainsi que les typologies de formes de sédimentation (dunes). Cette description physique est complétée à la fin du chapitre par une analyse sociodémographique, utile pour une compréhension complète des conditions de survie dans cette région hostile.

Le chapitre (2) est consacré à l'étude de l'écosystème oasien traditionnel du Gourara. Il expose la situation actuelle des établissements humains traditionnels qui savaient dans le passé se protéger efficacement contre les phénomènes d'ensablement, mais qui aujourd'hui se trouve confiné par les dunes de sable dans les dépressions de l'Erg. Ce chapitre explique qu'à la faveur des récentes et profondes mutations sociales et politiques dans la région, ces écosystèmes traditionnels sont gravement menacés de disparition par le manque de main d'œuvre et leur dépeuplement au profit des grandes villes.

Le chapitre (3) expose les facteurs d'aggravation d'ordre anthropiques et démontre que dans cette quête d'extension anarchique (nouvelles extensions) le risque d'ensablement est très souvent ignoré par méconnaissance de ce phénomène et a conduit à l'ensevelissement parfois de villages entiers comme le cas du Ksar de Badriane. Dans ce chapitre, nous nous sommes interrogés sur les moyens mis en œuvre par l'Etat et les collectivités locales pour y faire face et nous avons dressé un constat de carence de moyens stratégiques et opérationnels, complètement insuffisants face à l'ampleur de la tâche.

Une deuxième partie de cette recherche composée de trois chapitres (4, 5 et 6) est consacrée au cadre méthodologique. Dans cette partie de thèse, le chapitre (4) décrit les propriétés physiques du vent et de la couche limite atmosphérique qui sont essentielles dans la compréhension des phénomènes aérauliques. Ce chapitre développe ainsi la dynamique d'écoulement autour d'un obstacle isolé ou groupé en synthétisant les travaux de Gandemer, Ansley, Oke, Soliman, Hussain et Givoni qui sont des références en la matière. Partant du principe que la sédimentation s'opère au moment où la vitesse de l'air décroît en dessous d'une limite, nous avons déduit que l'on peut tirer des enseignements essentiels en matière de lutte contre l'ensablement en étudiant l'aérodynamisme des bâtiments et des groupements de bâtiments.

Le chapitre (5) aborde l'ensablement de point de vue physique afin d'étudier les possibilités d'une modélisation CFD de la forme bâtie qui en subit les conséquences. Ce chapitre décrit les

modes de transport du sable (reptation, saltation et suspension), leurs conditions d'apparition, ainsi que les différentes formes d'accumulation (*Barkhane*, *Nebka*, *sifs* et dunes pyramidales) qui dépendent de facteurs locaux, dont le régime et la direction des vents ainsi que les caractéristiques des sédiments. Les rares études associées à cette problématique, (celle de Duchemin en 1958, Karman et Zingg 1953 et Naaim-Bouvet en 2003) y sont présentées et discutées. A la fin de ce chapitre nous avons argumenté notre choix d'avoir opté pour la modélisation CFD sous Fluent, qui sera l'outil méthodologique privilégié dans notre expérimentation et nous avons détaillé le modèle mathématique de saltation à adopter.

Le chapitre (6) qui conclut cette deuxième partie présente les différents procédés de lutte contre l'ensablement et discute leur pertinence. Les techniques de palissade, de quadrillage de paille de désensablement ainsi que les procédés de lutte biologique de fixation de dunes y sont décrites. Les questions de gestion et de gouvernance face à ce risque y sont aussi abordées avec une forte recommandation pour une approche participative.

La troisième partie de la thèse dédiée à l'expérimentation contient trois chapitres (7, 8 et 9) et a été consacrée à l'étude du phénomène d'ensablement dans la région de Gourara à l'échelle macro (régionale) et à l'échelle méso et micro (village ou quartier).

Le chapitre (7) expose sur la base de photos satellitaires et d'observations sur la région de Gourara, les types de formation sédimentaire en fonction de la nature du sol et du vent. Aussi, sont identifiés les trois modes d'implantation récurrents des ksour traditionnels qui préviennent les risques d'ensablement à savoir : 1/En position d'abri au bas de la corniche hamadienne ; 2/Implantations dans les Theirat à l'abri d'une contre dune et 3/Implantation inter-dunaire au milieu de l'Erg dans les dépressions.

L'accent a été mis sur le degré de catastrophe observé au niveau du ksar de Badriane qui dénombre une population de 850 habitants¹⁰ environ et qui se trouve aujourd'hui à moitié enseveli (environ 40% de la surface totale de l'ancien ksar est engloutie sous le sable). Ce cas de figure nous a permis de revenir sur la question de l'efficacité ou non ? du système dit Afreg dans le combat de l'ensablement et le degré de préjudice causé par ce dernier.

Le chapitre (8) aborde la question de l'ensablement à une échelle micro. Une bonne partie de ce chapitre a été consacré à la simulation CFD à partir du village de M'guiden comme cas d'étude. Ce village avec 150 logements et 400 habitants selon les statistiques de 1995¹¹

¹⁰ Source : PDAU de la ville de Timimoun, statistiques de 1995

¹¹ Source : PDAU de la ville de Timimoun, statistiques de 1995

présente quelques formes d'ensablement sur la périphérie qui commencent à s'infiltrer au sein de son plan de masse en forme spirale. Ainsi, dans ce chapitre nous démontrons les erreurs commises dans le choix d'implantation du Ksar de M'guiden qui aurait pu être évitées, moyennant des études préalables similaires (observation des photographies satellitaires, simulation CFD etc.).

Ce chapitre aborde par la suite les possibilités d'une modélisation d'une forme urbaine adaptée à la question d'ensablement. Dans ce sens, et à la fin du chapitre quelques recommandations sont dressées telles qu'un bon profilage des masses bâties, qui exploiteraient les effets de canalisation et/ou de l'effet « Venturi » permettant ainsi de réduire considérablement les zones d'accumulation.

Dans le chapitre (9), toutes les conclusions de la partie (3) sont regroupées sous formes de recommandations de prévention et de protection contre le phénomène d'ensablement. Nous avons scindé dans le chapitre ces recommandations opérationnelles de lutte contre le phénomène d'ensablement suivant trois échelles d'intervention à savoir ; macro, méso et micro. Ainsi, ces recommandation et orientations sont valables pour être conduites et mise en place en amont des opérations d'aménagement comme en aval lorsqu'il s'agit des villages et agglomérations déjà existants et exposés au risque d'ensablement.

Le Chapitre 10 conclut enfin cette thèse dans un retour sur les principaux résultats de cette recherche et en mentionnant les quelques limitations et travaux futurs à envisager.

**PARTIE I : ZONE D'ETUDE ; CONTEXTE ET
PROBLEMATIQUE**

**1. CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA REGION DE GOURARA :
CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ET SOCIALES**

1.1. Délimitation de la zone d'étude : le Gourara

Le Gourara ou « *Tigourarine* » est une région du Sahara central algérien qui se situe dans le triangle formé par la frange méridionale de l'Erg Occidental, la bordure nord-occidentale du plateau du *Tademaït* et l'Oued *Saoura* à l'ouest. C'est un vaste couloir de *sebkha* qui est orienté nord-sud. Son appellation provient du mot « *Gour* » qui signifie habitat fortifié. Son chef-lieu, Timimoun appelé aussi l'oasis rouge, se situe approximativement au centre de ce triangle, par 29°15 de latitude Nord et 0°14 de longitude Est (Greenwich) c'est-à-dire à la latitude de la ville marocaine de Sidi Ifni sur le littoral atlantique et la longitude de la ville algérienne de Mostaganem sur la côte méditerranéenne (Bisson, 1957). (Fig.1)

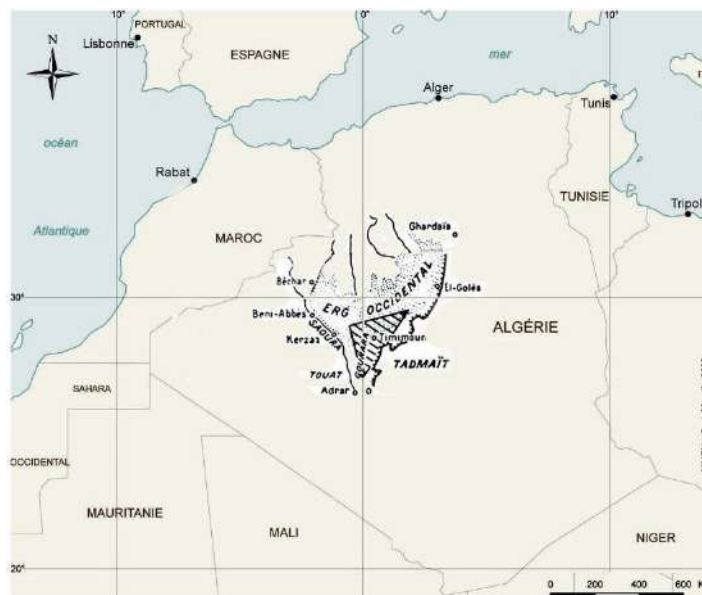


Figure 1: position du Gourara par rapport à l'Erg Occidental, le Tademaït et la Saoura. Source : carte modifiée depuis le site cartomundi.fr (2008)

La région d'étude est un vaste ensemble composé de trois unités topographiques distinctes. Il s'agit de la *hamada*, surface structurale, tendue culminant à des altitudes de 355m au nord et 300m au sud, et de dépressions peu larges inscrites dans cette *hamada* connues sous le nom de *theïrat* signifiant plaine ou zone plate. Le passage de la *hamada* à la dépression s'effectue par l'intermédiaire d'un escarpement de 15 à 20m, correspondant selon le cas soit à un affleurement de banc dure soit à celui de la croûte siliceuse. Le talus rectiligne dans l'ensemble présente dans le détail des indentations (Bisson, 1957). Enfin la dernière unité est le domaine de l'Erg, qui lui-même est un ensemble de dunes coalescentes à perte de vue ; un véritable océan de sable.

1.2. Les conditions climatiques

Un climat est caractérisé par : les vents, l'humidité relative, les pluies, la température et l'évaporation. Nous allons passer en revue les manifestations et l'enchaînement de ces phénomènes dans la région d'étude ; le Gourara.

« La stérilité du Sahara ne tient ni à la nature du sol ni au relief... Ce n'est pas le soleil qui les frappe de mort ; ce n'est pas la mer qui les a dépouillés de leurs plantes ; ce n'est pas le sol infécond qui se refuse à produire : c'est le climat qui les condamne à la stérilité. Qu'ils soient de roc, d'alluvions ou de sable, peu importe, si le ciel ne leur verse pas l'eau nécessaire. Otez à un pays fertile quelques centimètres de pluie annuelle et vous aurez une steppe ; encore quelques centimètres de moins et vous aurez le désert ». (Schirmer 1893, p.1-23)

Au départ, nous nous sommes posé la question de la possibilité de faire une étude climatique régionale de Gourara avec seules les données recueillies à Timimoun étant donné qu'elle s'étend sur plus de 1 degré de latitude ? Selon Bisson (1957), la réponse est oui. Les observations faites à Timimoun et les données climatiques recueillies sur place peuvent donner une idée d'ensemble sur ce que doit être le climat du Gourara parce que d'une part le Gourara est une région aux reliefs très atténués, si bien que, par exemple l'amplitude thermique annuelle de Badriane (276m) ne doit pas être très différente de celle de Timimoun (286m). Parce que d'autre part, à la latitude du 29° parallèle, loin de la mer et la montagne, l'Océan est à 1000 Km, la Méditerranée à 800 km et l'Ahaggar à 700 km, on peut sans trop de risques appliquer les observations sur le régime des vents faites à Timimoun, à l'ensemble de la région de Gourara.

1.2.1. La température

La température à un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique, c'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région. L'analyse des températures présentée ci-dessous, a été établie à partir des données de la station de Timimoun pour la période allant de 1991 à 2010, récupérées auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM)¹².

¹² Office National de la Météorologie (ONM)-Alger. Site web : www.meteo.dz

a. Variations des températures moyennes annuelles

L'analyse des données de la température moyenne annuelle pour la période 1991-2010 montre que l'année la plus chaude est l'année 2010 avec une température moyenne annuelle de 27.37°C et que l'année la plus froide est l'année 1992 avec une température moyenne annuelle de 24.07°C, ainsi, la température moyenne interannuelle est de 25,89°C. Ci-dessous est présentée la répartition des températures, moyenne minimale (T°C min), moyenne annuelle (T°C moy), ainsi que la moyenne maximale (T°C max) pour une série de 20 ans d'observation (fig.2).

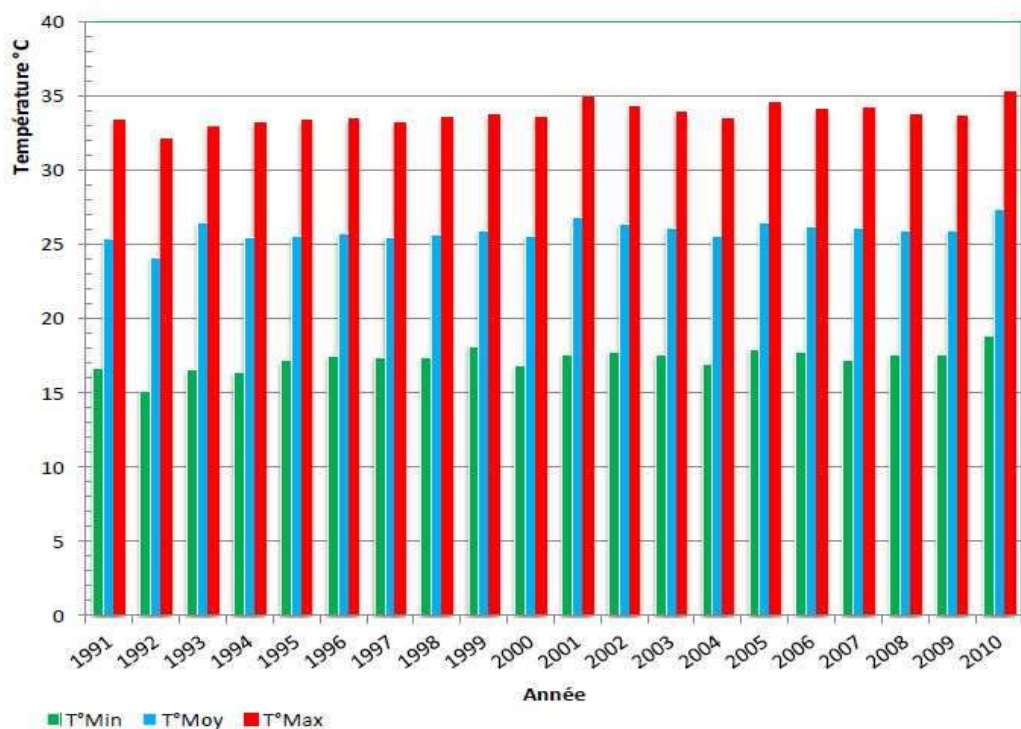


Figure 2: variations moyennes annuelles des températures. Données ONM -Station de Timimoun (1991-2010)

Mais ces chiffres ne sont guère significatifs quand il s'agit de caractériser la température saharienne ; il faut ici considérer la variation diurne et annuelle (saisonnière).

« Le désert est une contrée à température extrême où, en dépit de la latitude, il fait tour à tour plus froid que sur la Méditerranée et plus chaud que sous l'équateur. En d'autres termes, c'est un pays où la variation diurne et annuelle de la température, est très grande ». (Schirmer 1893, p.97)

b. La variation diurne

Il existe de grands écarts de température entre l'hiver et l'été. L'amplitude des variations thermiques annuelles, qui est l'une des particularités du climat des déserts chauds, peut dépasser 55°C au Sahara. En outre, l'amplitude quotidienne, c'est-à-dire la différence entre le maximum diurne et le minimum nocturne, dépasse souvent 35°C.

En effet, dès que le soleil se lève dans le ciel clair. Ses rayons dans cette sèche atmosphère ressentent déjà brûlants à cette heure matinale, et sous l'influence du sable et de la pierre, la couche d'air voisine du sol s'échauffe rapidement à son tour. Ici point d'évaporation active qui entre en jeu pour modérer le soleil. Dès 9 heures du matin, la chaleur est forte, elle ne cesse de monter jusqu'à 3 ou 4 heures de l'après-midi. Et pendant les longs mois d'été, la chaleur arrivée à son maximum vers 1 heure de l'après-midi, ne commence à lentement descendre que vers 5 heures ; elle se maintient longtemps après le coucher du soleil ; malgré l'activité du rayonnement la terre n'arrive pas à se débarrasser de toute la chaleur reçue et les nuits sont chaudes (27°C en moyenne pour le mois de juillet 2010).

c. La variation saisonnière

En valeurs moyennes, la température annuelle est comprise entre 20 à 22°C pour les oasis septentrionales (Biskra et environs) et autour de 25°C pour les oasis à *foggara* (Timimoun et environs). Fig.3

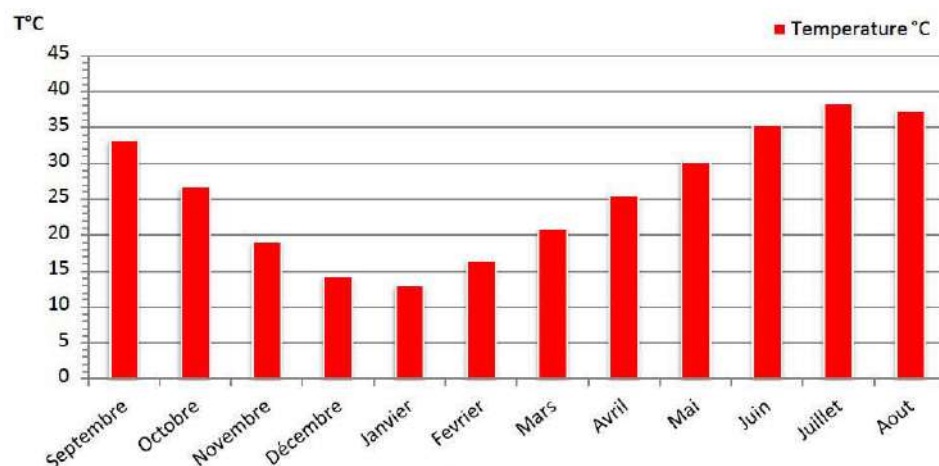


Figure 3: variations des températures moyennes mensuelles. Données ONM- Timimoun (1991-2010)

Durant la saison chaude, les plus fortes températures se localisent dans le Gourara, le Touat et le Tidikelt, où la moyenne des maxima dépasse 35°C dès le mois de mai et 45°C en juillet. Cette saison chaude dure environ quatre mois avec des variations locales importantes. La saison froide couvre environ trois mois, de décembre à février dans la plupart des oasis, voire deux mois à Adrar, In-Salah, et Djanet. Mais cette notion de saison froide est à relativiser, les températures descendent rarement en deçà d'un seuil de 10°C. (Dubost, 1991).

1.2.2. L'insolation

Selon Schirmer (1893, p.97) elle est la conséquence directe de la sécheresse de l'air. Plus l'air est sec, plus on voit augmenter l'insolation, c'est-à-dire la quantité de chaleur versée par le soleil à la terre.

En météorologie, l'insolation signifie la quantité d'énergie solaire reçue, mais aussi peut être synonyme d'ensoleillement, c'est-à-dire la durée d'exposition d'un site au soleil. Ci-dessous en tableau 1 sont présentées les valeurs de l'insolation pour la station de Timimoun (1991-2010).

Tableau 1: Données sur l'Insolation dans la station de Timimoun. Source : ONM (1991-2010)

Mois	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Moy.
Insolation (heure)	9.6	10	11.2	11.6	12	13.2	13	12.4	10.8	9.6	8.7	8.2	10.85

1.2.3. Les pluies

La convergence de différentes disciplines scientifiques (géologie, géographie, botanique et climatologie) a permis une délimitation du Sahara avant tout liée au régime des précipitations (Bisson, 2003). Aujourd'hui il est admis par l'ensemble de la communauté scientifique que la limite septentrionale du Sahara correspond à une ligne représentée par l'isohyète des 100mm de précipitations annuelles. Cette isohyète coïncide de manière relativement précise avec la limite septentrionale de la culture du palmier-dattier, constituant ainsi un critère de délimitation efficace du Sahara au Nord (Capot-Rey, 1953). Fig.4

La pluviométrie au Gourara est très faible (de l'ordre de 20 millimètres). Il s'agit bien entendu de moyennes annuelles, car il peut se passer plusieurs mois sans qu'une goutte de pluie ne tombe, comme il arrive que des pluies violentes s'abattent (21 millimètres en cinq heures en octobre 1950 à Timimoun), provoquant crues et inondations. L'action desséchante des vents (assez fréquents) accentue le déficit hydrique dans cette région où l'eau est déjà très rare.

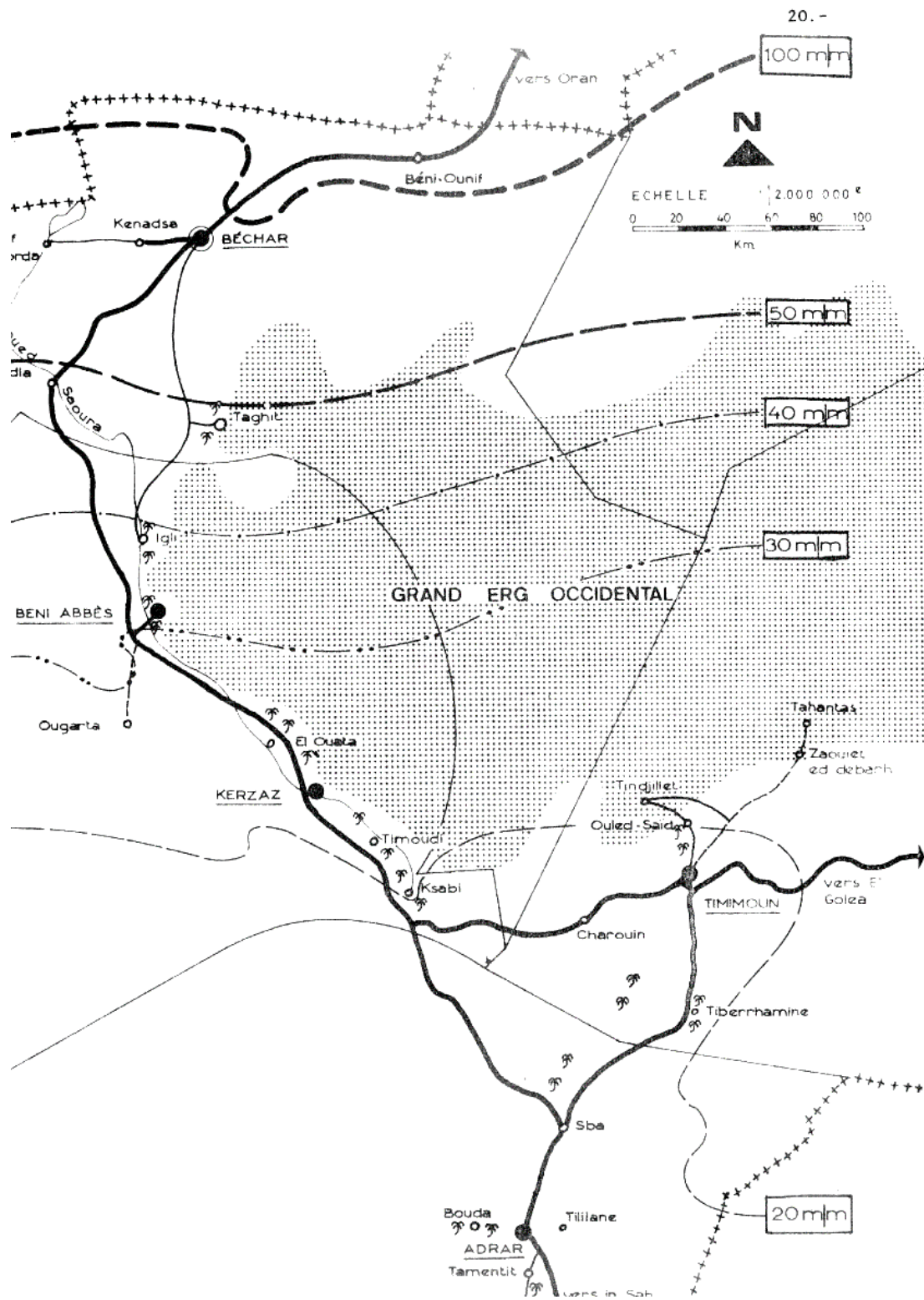


Figure 4: répartition des précipitations dans la région de Gourara. Source Dubief (1963).

L'analyse de la courbe des variations interannuelles des précipitations, sur une période de 20 ans (1991-2010), montre que l'année 1997 a été la plus arrosée avec une précipitation moyenne de l'ordre de 31.09 mm/an et que l'année 1998 est la plus sèche avec une précipitation moyenne de l'ordre de 1.02 mm/an, la précipitation moyenne interannuelle étant de 13.25 mm/an. Fig.5

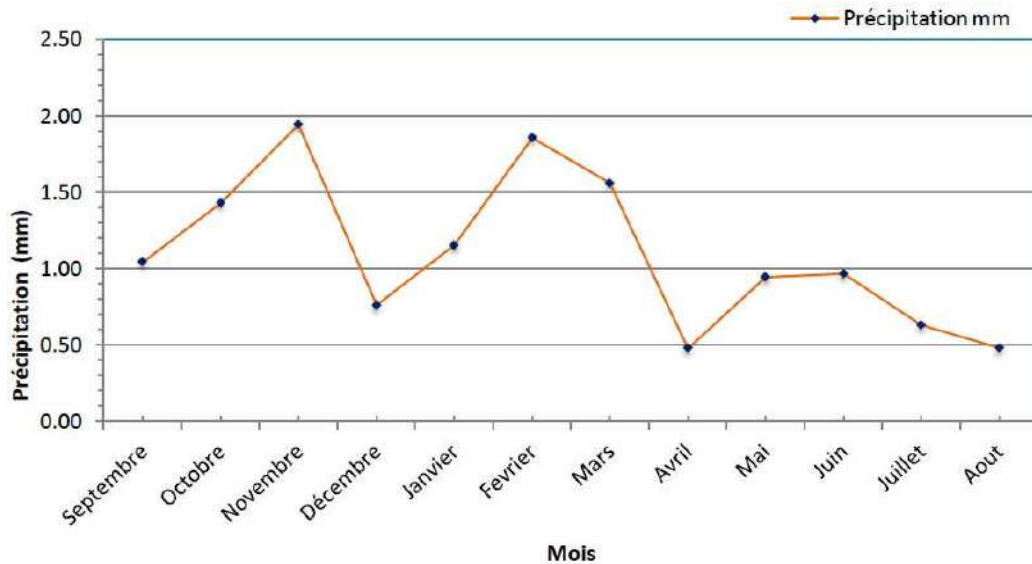


Figure 5: Variation des moyennes mensuelles des précipitations. Données ONM (1991-2010)

Diagramme Ombrothermique de Gaussen¹³

Selon Henri Gaussen (1953), une période donnée est dite aride, quand : $P < 2xT$. Avec ; P : précipitations totales en millimètres sur la période donnée, T : température moyenne en °C sur la période donnée.

Le diagramme ombrothermique est une représentation graphique des températures et quantités de précipitations moyennes mensuelles en un lieu donné. Il comporte un axe horizontal où sont placés les 12 mois de l'année et deux axes verticaux, un pour les précipitations et l'autre pour les températures. L'intérêt du diagramme ombrothermique est qu'il permet d'un seul coup d'œil de caractériser un climat. Dans notre cas l'établissement de ce diagramme nous a permis de constater que la courbe des précipitations passe largement au-dessous de la courbe des températures, cette allure permet de déduire que le climat de la région d'étude est totalement sec car la période sèche s'étale sur toute l'année. Fig.6

¹³ Marcel-Henri Gaussen, est un botaniste et biogéographe français, né à Cabrières-d'Aigues (Vaucluse) le 14 juillet 1891 et mort à Toulouse le 27 juillet 1981,

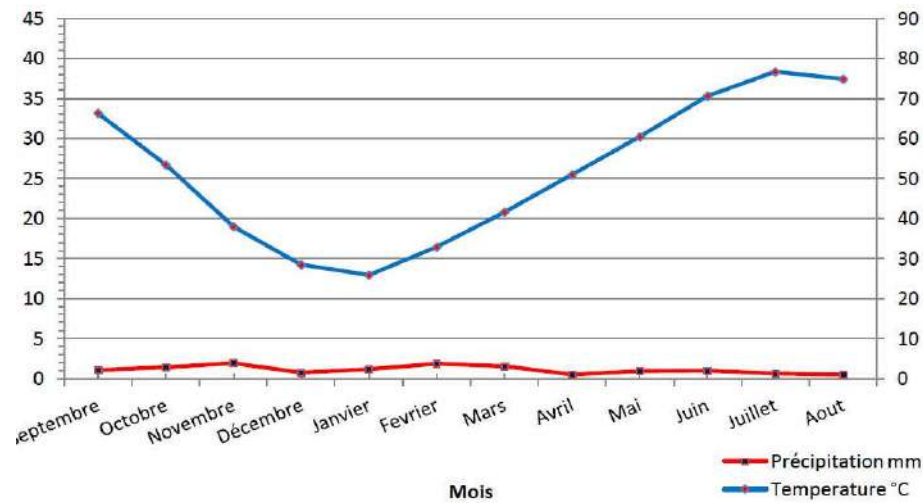


Figure 6: Diagramme ombrothermique pour la période (1991-2010).

1.2.4. L'indice d'aridité

Par aridité on entend état engendré par les mécanismes produisant un déficit en eau dans l'atmosphère et les sols, la faiblesse des précipitations et l'intensité de l'évaporation étant les plus déterminants mais non les seuls. Selon la formule de De Martonne (1926), l'indice d'aridité (I) est défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles :

$$(I) = \frac{P}{T + 10} \quad \text{Eq. (1)}$$

Avec ;

I : Indice d'aridité.

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

T : Température moyenne annuelle (°C).

Suivant les valeurs de (I), De Martonne a établi la classification suivante ;

- $I < 5$Climat hyper-aride
- $5 < I < 7.5$Climat désertique
- $7.5 < I < 10$Climat steppique
- $10 < I < 20$Climat semi-aride
- $20 < I < 30$Climat tempéré

Pour la région de Gourara nous avons $P = 20 \text{ mm}$; $T = 25 \text{ °C}$

Dou ;

$I = 20 / (25+10) = 0.57 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$. Ce qui fait de Gourara une zone à climat hyper aride.

Pour l'établissement de la carte des sols du monde, la FAO¹⁴ utilise un critère quantitatif de différenciation des zones sèches, il s'agit de l'indice d'aridité bioclimatique (I_b).

$$I_b = \frac{P}{ETP} \quad \text{Eq. (2)}$$

Ou ;

P = précipitations annuelles,

ETP = évapotranspiration potentielle¹⁵ exprimée en millimètre par unité de temps.

D'après Mainguet (1995), les zones arides comme le cas de notre région d'étude (le Gourara) disposent d'un indice d'aridité bioclimatique $0.03 < I_b < 0.20$. Ces zones comprennent généralement des secteurs nus ou couverts d'une végétation éparse de plantes vivaces et annuelles ; le nomadisme pastoral y est possible, mais non l'agriculture pluviale.

1.2.5. L'humidité relative

La répartition des résultats de l'humidité est l'inverse de la répartition des résultats de la température. La valeur maximale de l'humidité de l'air est obtenue en hiver (décembre-janvier) et la valeur minimale en été (juin-juillet), l'humidité relative est faible, elle est inférieure à 40%. Fig.7

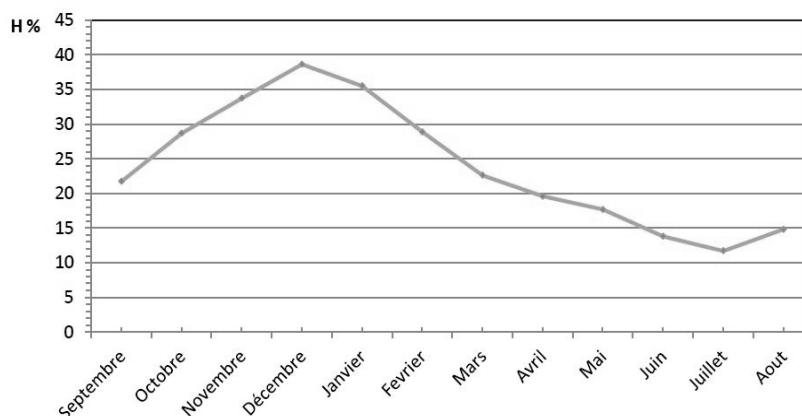


Figure 7 : humidité relative dans la région de Gourara Source : ONM (1991-2010).

¹⁴ Organisation des Nations Unis pour l'alimentation et l'agriculture. <http://www.fao.org/home/fr/>

¹⁵ Évapotranspiration potentielle : quantité d'eau prélevée par l'évaporation du sol et la transpiration d'un couvert végétal.

1.2.6. Les vents

« Les vents sont les véhicules du climat.....Ce sont eux, ou du moins leurs courants inférieurs, qui répartissent la température et les pluies sur le globe. A ce titre ils sont aussi les véritables auteurs du désert. » (Schirmer, 1893, p.21)

L'étude du comportement du vent (vitesse, direction) a été effectuée à partir de données météorologiques récupérées auprès de l'ONM pour la période 1991-2010 pour la station de Timimoun. Les variations de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent pour le site de Timimoun sont représentées en fig.8. Cette figure montre que le site présente un maximum de vitesse moyenne des vents pendant la période juillet-septembre et le mois de mars. Quant au minimum, il se produit durant la période hivernale. Ainsi, les données montrent que le site de Gourara est un site venté durant toute l'année, avec une vitesse moyenne annuelle autour de 6 m/s à 10 m du sol.

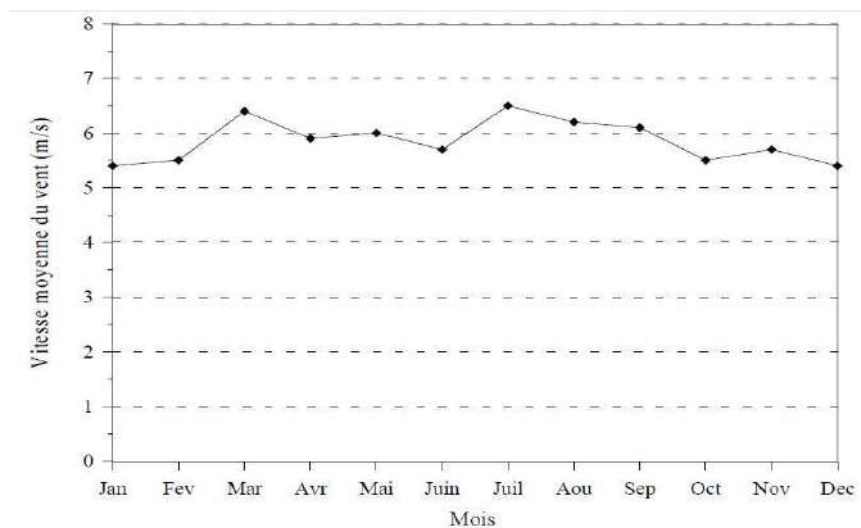


Figure 8: Moyennes mensuelles des vitesses du vent du site de Gourara. ONM (1991-2010)

a. Régime des vents

La région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu dans la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6m/s (fig.9). (Kasbadji-Merzouk, 2006)

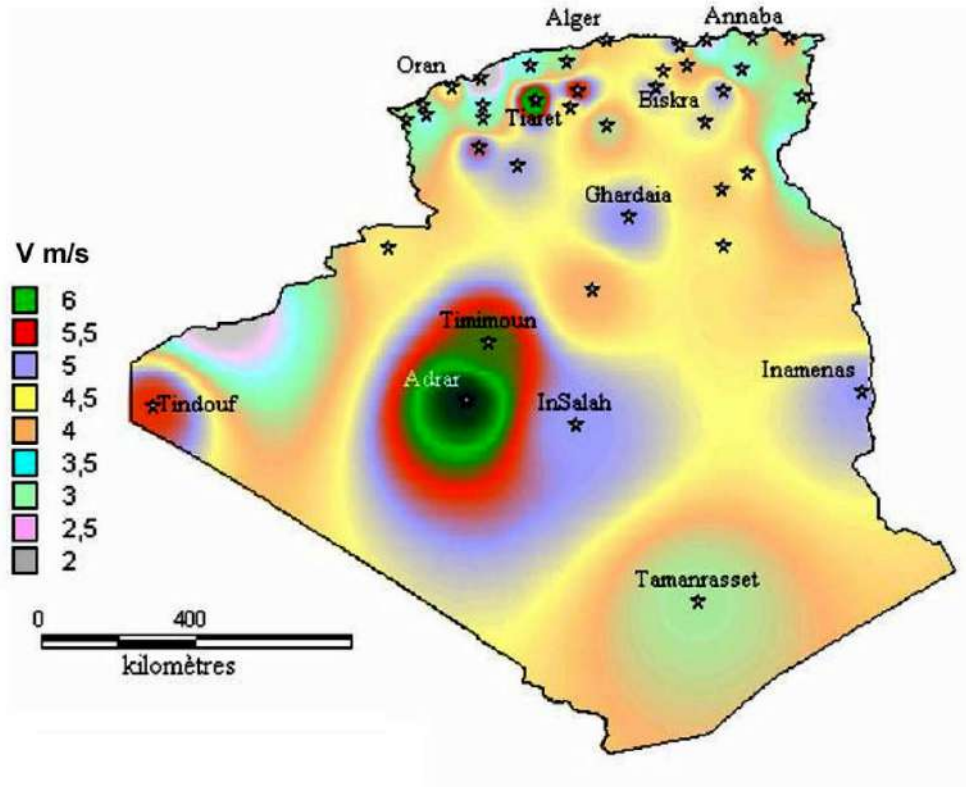


Figure 9: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. (Kasbadji-Merzouk, 2006)

b. Direction

Le secteur dominant est :

- Le secteur Est et secteur Est-Nord-Est compte respectivement 15% et 14%.

Les secteurs prédominants sont :

- Les secteurs Nord-Nord-Est et Nord-Est avec un pourcentage de 9% pour chaque direction.
- Le secteur Ouest et Est-Sud-Est compte 7% pour chaque secteur et 6% pour le secteur Nord.
- Le secteur Sud, Sud-Ouest et Sud-Sud-Ouest avec 5% des observations.

Les faibles secteurs sont :

- Le Sud-Sud-Est repasant 4% de vent et Sud-Est, Ouest-Sud-Ouest et Nord-Nord-Ouest avec un pourcentage de 3% pour chaque direction.
- Enfin, nous avons 2% pour les directions Nord-Ouest et Ouest-Nord-Ouest.

D'après la rose des vents (fig.10), les vents Est-Nord-Est et Est sont visiblement les vents dominants de la région avec une vitesse moyenne pouvant atteindre 6 à 10 m/s. En effet ce dernier est pratiquement présent toute l'année avec une vitesse qui ne descend pas en dessous 3,8 m/s en moyenne.

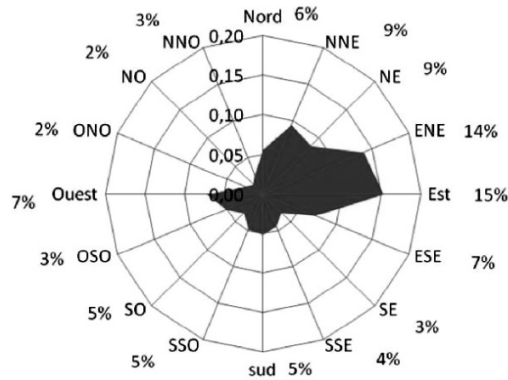


Figure 10: rose annuelle des vents de la région de Timimoun. Source : ONM 1991-2010.

c. Variation journalière

Autre caractéristique de l'activité éolienne est qu'elle est diurne. La nuit, ce sont les vents calmes qui dominent. L'évolution des moyennes tri-horaires de la vitesse du vent dans le site de Timimoun est représentée en figure 11.

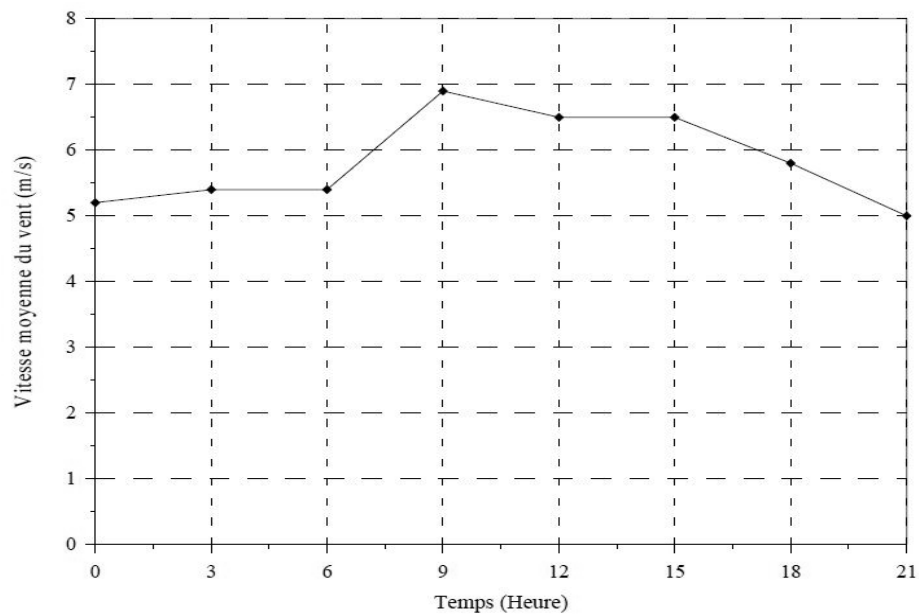


Figure 11: Evolution de la vitesse moyenne horaire du vent - station de Timimoun (à 10 m du sol).

Cette évolution de la vitesse montre, d'une part, une diminution de la vitesse moyenne durant la nuit et une augmentation durant la journée, et d'autre part que le site de Timimoun est plus venté l'après-midi que la matinée. Ainsi, les données donnent une idée sur l'important potentiel du risque d'ensablement du fait que le vent souffle à une vitesse relativement élevée pendant une longue période de la journée. En effet, le vent souffle à une vitesse supérieure à 5 m/s durant les 24h et supérieure à 6 m/s pendant presque 10 heures (plus de 40% du temps).

d. Variation saisonnière

L'action des vents atteint son apogée entre le mois de mars et de mai, c'est en effet durant ce trimestre que le taux d'humidité est le plus faible, ce qui facilite la mobilisation des sables. On relèvera ici le nombre de jours durant lesquels on a enregistré des tempêtes de sable. Tab.2

Tableau 2: Région de Timimoun ; données du vent. Source : ONM (1991-2010)

Mois	Vent Moy. (m/s)	Vent Max. (m/s)	Tempêtes de sable (Jour/Mois)
Janvier	4.4	22	0.2
Février	4.9	26	0.5
Mars	5.3	30	1.5
Avril	5.0	31	1.2
Mai	5.0	28	1.5
Juin	4.8	47	0.5
Juillet	5.7	27	0.5
Août	5.7	28	0.3
Septembre	4.5	27	0.6
Octobre	4.4	24	0.3
Novembre	3.8	26	0.3
Décembre	4.0	31	0.2

Pendant les mois de janvier, février, mars et avril le vent dominant est celui de nord-est mais cette dominance s'atténue au profit de celle d'est : en mai nord-est et est sont à égalité. Dès juin, et jusqu'à septembre, la dominance est d'est, elle est très prononcée en juillet. Puis octobre voit rétablir l'égalité entre vent d'est et ceux de nord-est ; ces derniers redevenant prépondérant à partir de novembre. Quant aux vents de sud-ouest connus pour être des vents de sable, on notera leur fréquence en mars, avril et mai, ça coïncide avec le passage des dépressions sur l'Afrique du Nord.

e. Force du vent

Il revient à l'amiral britannique Francis Beaufort (1774-1857) d'avoir, en 1805, imaginé une échelle que l'on appelle beaufort¹⁶ comportant des critères assez précis pour quantifier la force du vent en mer.

Suite aux données récupérées auprès de l'ONM (fig.12), nous constatons que la dominance est toujours d'Est pour les vents supérieurs à la force 4, 5 et 6 mais que dans chacune des roses la dominance des vents sud-ouest prend de plus en plus de l'ampleur. À partir de la force 7, le secteur nord-est est encore dominant, mais pour les vents de force 8 et 9, c'est-à-dire les vents de tempête, c'est le secteur sud est qui l'emporte.

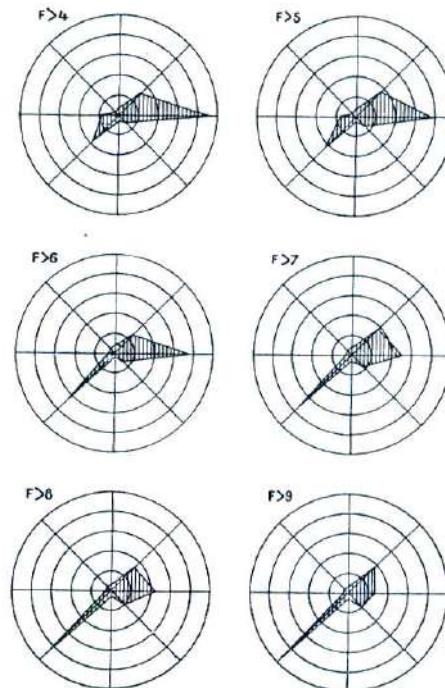


Figure 12 : forces de vent de sable. Source : ONM 1985-2005

Note : Nous reviendrons en chapitre 5 sur l'intérêt de ces constatations pour l'étude de la morphologie dunaire les mécanismes d'ensablement.

¹⁶ Voir annexe 1.

1.3. Le relief

1.3.1. Erg Occidental

C'est une formation sableuse dont les géographes lui ont attribué le toponyme local : l'erg. Puis Occidental par opposition à l'Erg Oriental, qui est une autre formation dunaire se situant plus à l'Est. Constitué d'une succession de chaînes et de dunes assez régulièrement orientées nord-est sud-ouest, l'Erg Occidental possède une morphologie assez différenciée dont les vents ne cessent de modifier l'aspect. C'est pourquoi les géographes considèrent les formations dunaires de l'Erg Occidental comme des sables vifs (Moussaoui, 2002).



Figure 13 : l'Erg Occidental. Photos Adolphe L. 2011

C'est cet Erg Occidental, long de 500km du sud-ouest au nord-est et large de 150 à 200 km avec une couverture de sable près de 100 000 kilomètres carrés qui sépare le Sahara Nord-Occidental de la partie Orientale (Morel, 2008). Il délimite à l'Est la vallée de la Saoura et s'allonge jusqu'au plateau du Tademaït. Son niveau de base est situé à une altitude moyenne de 500 m¹⁷. Sa hauteur est d'environ 70 mètres. Une véritable mer de sable à la morphologie si variée. Des pics succèdent à des dunes paraboliques. Des massifs s'allongent en forme de sabre (d'où l'appellation *Sif*) ou se suivent parfois en chaînes que les autochtones appellent bras (*Drâa*).

Sur le plan topographique ces *Drâas* sont séparés par des couloirs à fond rocheux justement qualifiés, en arabe, par le mot « *Gâsi* » (durs) et des zones en forme plane ressemblant à des

¹⁷ PDAU de la ville de Timimoun (juillet 2004, p.13)

plaines appelées localement « *theirat* », localisées entre les systèmes d'erg, et balayés par le vent dont la direction principale reste le NE-SO. Ce sont ces couloirs et *theirat* qui ont constitué les fameuses pistes caravanières, puis ont donné la naissance à des villages (*ksour*) alternant par cela mouvance et pause au sein de l'Erg Occidental. (Moussaoui, 2002).

1.3.2. La plaine (ou hamada)

Appelée aussi la plaine de M'guiden¹⁸, la *hamada* est un plateau rocailleux tapissée de *reg* uniforme et souvent tronquée par des micro-ergs. Une *hamada* peut être parfois aussi appelée *reg*, bien que ce mot corresponde plus à une plaine rocailleuse des déserts plutôt qu'à un plateau rocailleux (Morel, 2008). Fig.14



Figure 14: la hamada de Timimoun. Photo prise depuis la RN 51 reliant Timimoune à M'guiden. Photo auteur 2011

1.3.3. Plateau de Tademaït

D'une forme tabulaire rocheuse qui couvre une très grande surface, le plateau de Tademaït limite la zone d'étude à l'est. Il est constitué de formations géologiques différentes (Bison, 1957) ;

- Crétacé inférieur du continental intercalaire,
- Crétacé supérieur secondaire marin,
- Mio-Pliocène.

¹⁸ PDAU de Timimoun (1995-2015), p.12



Figure 15: plateau de Tademaït, Photo aérienne. Source internet anonyme.

1.3.4. L'Oued Saoura

L'*oued Saoura* a été défini comme un « événement unique dans tout le Sahara africain » et comparé, pour ce qui est de l'importance géographique et de l'impact sur les civilisations, au Nil d'Egypte (DPC-MCC, 2002)¹⁹. L'*Oued Saoura* est sans nul doute le principal *Oued* dans la région de Gourara. Il longe ce massif dunaire de l'Erg Occidental et permet à toutes ces petites oasis de Gourara d'exister. Quand il est en crue, il coule parfois pendant quinze jours sur environ 400 kilomètres dans le sens méridional et actionne l'*Oued* Messaoud au niveau du Gourara.



Figure 16 : la vallée de la Saoura. Photos Adolphe L. 2011

¹⁹ Direction du patrimoine culturel-Ministère de la Communication et de la Culture (2002) : « Les oasis à *foggaras* et les *ksour* du Grand Erg Occidental. Thèmes Paysages culturels. Unesco-Centre du patrimoine mondial. Réf.1772. Source : <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/1772/>

1.3.5. *La sebkha*

C'est une autre forme des manifestations hydrogéologiques du Sahara, une dépression, sorte de résultante entre la capillarité et l'évaporation. L'eau présente au sous-sol arrive par capillarité à la surface et s'évapore aussitôt du fait de la chaleur. Cela se traduit par des couches d'argiles et de sel souvent épaisses, que l'eau a amené à la surface de la terre. La *sebkha* de Gourara est un lac salé qui s'étend sur près de 80 kilomètres de long sur 2 à 15 kilomètres de large (Bensaad, 2011).

La *sebkha* que l'on traverse pour aboutir à la grande palmeraie des Ouled Saïd située à l'opposé de Timimoun et sa palmeraie est encaissée de 40 à 70 mètres par rapport aux plateaux qui l'environnent qui terminent par des escarpements rocheux sur lesquels sont accrochés des *casbahs* et des dizaines de *ksour* à l'image de *Messine*, *El Gasba*, *Tlalit*...etc. (Bisson, 1957)

Cette pauvreté en eau de surface pousse les habitants à aller la chercher dans le sous-sol où elle se trouve en abondance. Il s'agit d'exploiter les gisements aquifères du Continental Intercalaire. Ce qui explique que c'est le long de cette *sebkha* que se trouve le plus grand nombre des oasis du Gourara et que se concentre la majeure partie de la population. Or, pour ce qui est des villages situés aujourd'hui en plein erg, on suppose que ces endroits étaient formés autrefois d'étendus à fond rocheux (*hamada*) qui sous la mouvance des dunes de sable se sont transformés au fil du temps en des marrées de sable qui aujourd'hui font partie intégrante de l'erg (Bisson, 1957).



Figure 17: *sebkha* de Timimoun. Photo Adolphe L. 2011

1.3.6. *Les méga-obstacles (piémonts)*

Ce sont des édifices non-dunaires (rocailleux) d'une hauteur importante leur permettant d'être, visibles en lambeaux dans la *sebkha* et la partie Est de l'Erg Occidental. Selon la nature du substrat, on peut distinguer d'une part les glacis de dénudation (ou d'ablation) où affleure la roche en place, d'autre part les glacis d'accumulation (ou d'ennoyage) où l'épaisseur des dépôts dépasse plusieurs dizaines de mètres (Morel, 2008). Fig.18



Figure 18: relief non dunaire (monticules) au niveau de la sebkha de Timimoun. Photo auteur 2011

1.3.7. *Le couvert végétal*

Le couvert végétal dans la zone de Gourara est très faible. Les plantes sont rares et se résument à quelques espèces tel que : *Calligonum azel* Maire, *Retama raetam*, *Stipa tenacissima* (Alfa), *Nitraria retusa*, qui sont des espèces saharo-arabique très répandus d'ailleurs dans le Sahara septentrional. Certaines espèces qui menacent de disparaître ayant une importance en matière de diversité biologique ont déjà fait l'objet de classement en zones arides et semi-arides, à travers un projet, impulsé au titre d'un don du fond pour l'environnement mondial (FEM), sous l'égide du Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD) et géré par la Direction Générale des Forêts en qualité d'agence d'exécution en partenariat avec un réseau d'associations algériennes²⁰.

²⁰ Source : <http://www.naturevivante.org/>



Figure 19: plantes de *Retama-raetam* et *Stipa-tenacissima* (Alfa) dans la zone de Gourara. Source internet : <http://www.panoramio.com/photo/4599668>

Les autres types du couvert végétal sont les palmeraies constituées de palmiers dattiers ; elles sont attenantes aux *ksour* et constituent le terroir des habitants. Les palmeraies se situent tantôt sur la bordure occidentale de la plaine de *Tademaït* et de l'oued *Saoura* tantôt au milieu de l'erg dans les *theïrat*. Aujourd'hui, on compte environ 600 ha de palmeraies exploitées dans la région de Gourara (Bensaad, 2011).

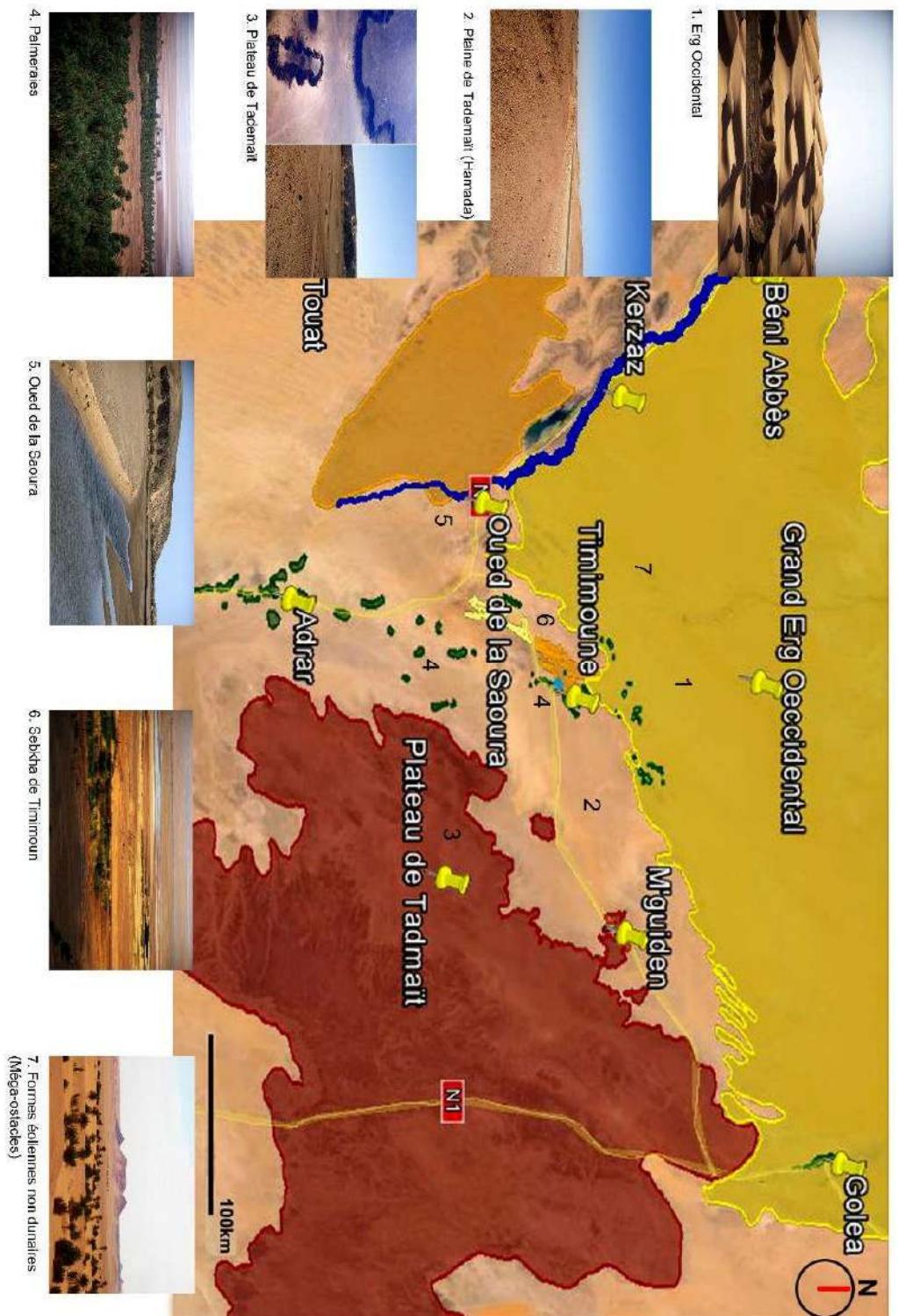


Figure 20: carte de synthèse du relief de la zone de Gourara. Illustration de l'auteur depuis un support Google-maps.

1.4. Les données démographiques et sociologiques

1.4.1. Introduction

Retracer l'histoire de Gourara d'une manière approfondie est une tâche ardue car les renseignements disponibles sur cette région sont très rares. C'est à peine quelques chroniqueurs ou voyageurs qui l'ont mentionné dans leurs récits de voyage vers le Soudan tel qu'Ibn Battûta²¹ (14^{ème} siècle) et Ibn Khaldoun²² (15^{ème} siècle). En effet, la région de Gourara, qui durant longtemps n'a pas été différenciée du Touat²³, a suscité peu de recherches et reste par conséquent largement méconnue. Pourtant, les informations contenues dans certains ouvrages de géographes et historiens arabes du Moyen-âge montrent que le passé du Gourara remonte à un lointain passé. (Bisson, 1957)

Nous nous attachons dans cette partie de la recherche à l'histoire du peuplement de Gourara afin d'appréhender le sens des mouvements de sédentarisation ayant marqué la région. Ceci dans le but de trouver des réponses à certaines questions essentielles à notre recherche ;

Dans un environnement climatique et physique aussi hostile qui marque le Gourara, quelles sont les raisons ou les facteurs qui ont attiré les populations à venir s'y installer ? Qu'en est-il de leurs races et des liens sociaux qui les unissent ?

1.4.2. La population

L'ouvrage de Bisson (1957) décrivait le Gourara sous ses aspects physiques et humains avec suffisamment de précision. Daté de 1957, il évaluait à 25 000 habitants la population de la région (recensement de 1952). Le recensement de 1966 dénombrait 40 215 habitants pour une centaine de *ksour* répartis dans un rayon de 80 km autour de Timimoun. Timimoun, chef-lieu

²¹ Ibn Battûta, de son nom complet Abu Abdallah Muhammad Ibn Abdallah al-Lawati at-Tanji Ibn Battûta, né le 24 février 1304 à Tanger et mort en 1377 à Marrakech, est un explorateur et voyageur qui a parcouru près de 120 000 km entre 1325 et 1349, de Tombouctou au sud, jusqu'à l'ancien territoire du Khanat bulgare de la Volga au nord, et de Tanger à l'ouest jusqu'à Quanzhou en Extrême-Orient.

²² Ibn Khaldoun, de son nom complet Abou Zeid ur-Rahman Bin Mohamad Bin Khaldoun al-Hadrami, né le 27 mai 1332 à Tunis et mort le 17 mars 1406 au Caire, est un historien, philosophe, diplomate et homme politique issu d'une famille andalouse d'origine arabe. Sa façon d'analyser les changements sociaux et politiques qu'il a observé dans le Maghreb et l'Espagne de son époque a fait de lui un précurseur de la sociologie moderne.

²³ Le Touat, situé entre le plateau de Tademaït à l'est et l'erg chech au sud-ouest, il est jalonné de pas moins de 135 *ksour* s'échelonnant sur 200 km du nord au sud. Le Touat a été longtemps un grand axe de communication entre Maghreb et Soudan. Les caravanes transportant les esclaves et l'or du sud, le blé et les étoffes du nord empruntaient cette voie commerciale.

comptant à lui seul 27 514²⁴ habitants recensés en 1987(RGPH). Des estimations ont été faites par la commune afin d'évaluer d'une manière globale les besoins futurs en logements, équipements et particulièrement en surface. Cette estimation a été faite sur la base d'un accroissement annuel de 4.05% de la population, ce qui donne un total de 37 814 habitants pour l'année 1995²⁵.

➤ **Les races**

Les statistiques de 1952 nous apprennent que 61.3% de la population totale de Gourara est berbérophone, tandis que 38.7 % est arabophone (Bisson, 1957). Ces chiffres montrent toute l'importance de l'élément berbérophone au Gourara : en fait plus de 2/3 des *ksour* sont d'un parler berbère appelé le *Zénète*. Cette prédominance Zénète est marquée par l'abondance des noms berbères dans la toponymie : *Aourir* au Deldoul (au nord du Gourara), *Ighzer* sur les bords de la *sebka*, qui sont des villages arabes mais dont les noms sont berbères, pour ne citer que ces deux cas là.

- **Les Zénètes**

Les *Zénètes* du Gourara représentent 28,8% de la population totale et présentent des types physiques qui les distinguent nettement de leurs voisins arabes. C'est d'abord une pigmentation de la peau qui peut aller jusqu'au plus beau noir, conséquence de nombreux mélanges et des liaisons de maîtres blancs avec leurs esclaves noirs.

Dans sa description des caractères anthropologiques de cette race, Leblanc (1934)²⁶ écrit : « *on a l'impression d'un type inférieur, moins dessiné, moins racé que celui des autres groupes, un produit en déchéance depuis longtemps par l'effet de métissage* ».

Dans l'Erg Occidental, les Ouled Ghazi de Talmine qui se disent *Zénètes* sont considérées comme d'anciens juifs. Sans doute s'agit-il des descendants du vieux fond judéo-berbère venus s'établir dans l'Erg Occidental pour la première fois.

Comme nous pouvons le constater, les populations *Zénètes* sont en fait très diverses. Ils sont arabophones et berbérophones, et ont comme langue mère le *Zénète*. Les *Zénètes* sont

²⁴ Source : PDAU d'Adrar et de Timimoun, juillet 2004, Diagnostic général, phase 01.

²⁵ Source : PDAU d'Adrar et de Timimoun, juillet 2004, Diagnostic général, phase 01.

²⁶ Cité dans Bisson, (1957).

nomades et sédentaires à la fois, et ces derniers sont les bâtisseurs des villes. Bellil (2002) considère « *qu'il serait une erreur de dire que les Zénètes sont uniquement nomades, car ils sont les fondateurs des villes* » propos que confirment les écrits d'Ibn Khaldoun (Bisson, 1957).

A l'encontre de la mauvaise réputation qu'on leur a fait, ils se distinguent par cette gaité constante, cette cordialité de l'accueil et un sens artistique remarquable par l'étonnante harmonie des chœurs chantant des Ahellil²⁷ et enfin un gout des fêtes très vif.

- Les Arabes

Les arabes, seule race blanche dans la région représentent au total 24.7% de la population au Gourara. Pura de tout métissage, ce trait les distingue nettement des autres races. Ils le doivent à leur vie longtemps nomade, donc à des contacts moins fréquents avec les populations d'origine noire du Gourara (Bisson, 1957).

Selon Martin (1908), au début du XII^{ème} siècle, des Arabes commencent à nomadiser dans le M'guiden et certains s'installent dans le Tinerkouk, et jusqu'au nord de la *sebkha* de Timimoun. D'ailleurs *Al-Tinilani* prétend, lui, que l'origine des *foggaras* remonterait à une première immigration arabe, au X^{ème} siècle. Cependant, si les Arabes ont pu faire leur apparition dans la région au X^{ème} siècle, leur influence dans le Gourara ne pourra se faire sentir qu'à la fin du XI^{ème} siècle.

- Les Harratins

En 1952, on comptait au Gourara 11.686 *Harratins*, soit 46.5% de la population totale. Et c'est le groupe humain le plus important à l'époque. Les *Harratins* représentent la main d'œuvre au Gourara, autrefois, dans un passé lointain, les esclaves. C'est un groupe qui de point de vue ethnique est distinct de l'ensemble de la population ; les *Harratins* sont reconnaissables à leur traits physiques à caractère négroïdes et surtout de peau de couleur foncé ou très foncée. Ils sont berbérophones - et en ce cas se disent *Zénètes*- ou arabophones selon la langue parlée par leurs maîtres.

²⁷ Ahellil est un genre musical et poétique algérien, emblématique des Zénètes du Gourara. Il est pratiqué lors de cérémonies collectives principalement dans la partie berbérophone du Gourara lors de fêtes religieuses et de pèlerinages. En 2008, l'Ahellil du Gourara a été inscrit sur la liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité.

Il est à signaler que les apports d'esclaves soudanais ont été si importants au cours des siècles que se sont eux qui ont contribué essentiellement à créer les types *Harratin*. Est en effet appelé *Hartani* tout métis d'un blanc et d'une femme noire qui est elle-même, soit une *Abid*, c'est-à-dire fille d'un ancien esclave originaire du Soudan, soit une *Hartania*, c'est-à-dire une femme déjà métissée. Le fils d'un *Hartani* et d'une *Hartania* est naturellement un *Hartani*.

Au total, les Gourari, divers dans leurs origines, et plus ou moins métissés, forment un noyau de sédentaires solidement attachés à leurs pays le Gourara et à ses traditions.

➤ Les classes sociales

En haut de l'échelle se trouvent les *Chorfa*, tous d'origine arabe puisqu'en principe descendants du Prophète (Qsssl). À ce titre, ils jouissent d'un prestige considérable et ont une grande influence sur le reste de la population.

Les *Mrabtins* forment également une aristocratie d'ordre religieux. Ils ont joué dans le passé un rôle politique et religieux assez considérable. Leur origine est très différente puisqu'elle se rattache à cette forme d'islam Nord-Africain qu'est la vénération rendue aux saints locaux. Tous les *Mrabtins* se rattachent à une *zaouïa*, arabe ou berbère ; il y a donc des *Mrabtins* arabes et d'autres *Zénètes*.

Au bas de l'échelle se trouvent les roturiers qui travaillent que l'on appelle « *Harratins* ».

1.4.3. L'origine du peuplement de Gourara : du nomadisme à la sédentarisation

L'origine de l'élément noir remonte-t-elle à un peuplement préhistorique ? Nul ne peut l'affirmer à cause du manque d'études et d'informations sur le sujet. Cependant, le caractère «soudanais» de ce type ethnique permet de penser plutôt que la pratique de l'esclavage - poursuivie jusqu'au début du XX^{ème} siècle- a su alimenter, de façon continue sinon toujours régulière, un courant d'immigration forcée venu de l'Afrique Occidentale.

La localisation des *ksour* arabophones telle qu'elle existe aujourd'hui dans le Gourara date de la deuxième moitié du XII^{ème} siècle. L'histoire nous renseigne que le Gourara semble avoir exercé une attraction sur les régions limitrophes et cela pour deux raisons essentielles. C'est d'abord l'abondance du pâturage qui a pu attirer des populations menant un genre de vie nomade ; il paraît que les populations, *zénètes* ou arabes, ont d'abord nomadisé dans l'Erg

Occidental avant de rejoindre le M'guiden pour se fixer dans les *Ksour*. C'est ensuite l'isolement géographique qui a permis au Gourara de jouer le rôle de zone-refuge aussi bien pour les tribus *Zénètes* fuyant la domination arabe, que pour cet *émir* Zianide «*Abou Hamou*» chassé de Tlemcen en 1372 par les troupes Mérinides. «*Heureux pays n'ayant à subir grâce à son éloignement du Tell ni l'oppression des chefs de province ni la disgrâce des impôts !* » écrit Ibn Khaldoun sur le Gourara. (Bisson, 1957)

Quand on remarque que la plupart de ces *ksour* se situent à la périphérie du M'guiden ; on comprend que le M'guiden a en effet joué tout au long de l'histoire le rôle d'étape intermédiaire dans l'évolution des tribus du nomadisme vers la sédentarisation. Toutes, aussi bien *Zénètes* qu'Arabes ont d'abord nomadisé dans ses riches pâturages avant de s'installer dans les oasis environnant du M'guiden. (Bisson, 1957)

Cependant, dans un passé récent, la libération des esclaves (*Harratins*) qui constituent la main-d'œuvre indispensable à l'exploitation des *foggaras* et la possibilité d'immigrer ont pu accentuer le déclin de certaines oasis. Certains *Harratin* désirant s'installer à leur compte disposent de moyens réduits, il leur est difficile alors de creuser une *foggara* ; la seule façon qu'il leur reste d'acquérir un jardin est de creuser un puits et d'irriguer ce jardin avec l'eau ainsi obtenue. Les oasis atteintes sont précisément celles qui sont placées dans les conditions naturelles les plus défavorables, tant du point de vue de l'irrigation que de l'ensablement. (Bisson, 1957)

En résumé ce sont donc des causes humaines qui contribuent à accentuer le déclin des oasis à *foggaras* mais nous allons voir aussi qu'il n'en demeure pas moins vrai que ce sont des causes naturelles ; rabattement de la nappe et ensablement qui sont à l'origine de cette évolution des oasis à *foggaras* vers les oasis à balanciers ce qui explique le déclin du premier type d'oasis.

1.5. Conclusion

L'étude climatique de la région de Gourara nous a permis de dégager les spécificités climatiques qui caractérisent la région en général et celles qui sont susceptibles d'accentuer les formes de vulnérabilité face aux aléas climatiques notamment, le phénomène d'ensablement. Suite à cette étude climatique de la région, nous avons retenu que le Gourara est un territoire menacé constamment par deux facteurs importants, à savoir : les inondations suite aux averses, l'avancée du sable ou l'ensablement à cause des vents forts très présents dans la région et qui génèrent des mouvements éoliens d'ensablement à longueur d'année.

« *Le Bas-Sahara algérien septentrional présente de fortes contraintes naturelles dans la perspective de l'urbanisation, dont les plus importantes et les plus visibles sont les contraintes climatiques.....les risques liés aux dynamiques éoliennes présentent la plus grande fréquence, et les risques liés aux crues la plus grande ampleur* ». (Côte, 2005, p.71)

En termes de relief, la région d'étude présente un large contraste de paysage : dunes de sable, *hamada* (ou *reg*), palmeraies, dépression, plateaux et monticules. Ces traits donnent au Gourara une physionomie originale. La dominance des dunes de sable est incontestable, ceci est dû d'une part au faible pourcentage du couvert végétal et à la présence de l'Erg Occidental d'autre part. Cette dominance de sable conjuguée aux régimes éoliens fait de la zone de Gourara une région surexposée au risque d'ensablement.

Quant à l'étude des données sociologiques, un autre caractère, cette fois d'ordre humain, fait la grande originalité du Gourara : la présence d'une population sédentaire berbérophone qui a conservé son individualité jusqu'à nos jours. En effet, plus des 2/3 des *ksour* du Gourara parlent un dialecte berbère, le *zenatiya*, les Gourari ayant conservé ce nom plus que millénaire de *Zénètes*. Et s'ils ont pu conserver jusqu'à nos jours leur langue, leurs coutumes, leur folklore, c'est à l'isolement géographique du Gourara que les *Zénètes* le doivent.

L'histoire du peuplement du Gourara nous renseigne que des causes humaines ont contribué à accentuer le déclin des oasis à *foggaras* tel que les mouvements démographiques en masses qui ont marqué le territoire Gourari durant les périodes de guerre et la libération des esclaves (*Harratins*) qui constituaient autrefois la main-d'œuvre indispensable à l'exploitation des *foggaras*, d'où l'abandon de ces dernières et la disparition de certains oasis par ricochet.

2. CHAPITRE II : ESPACE OASIEN ; ORIGINES ET EVOLUTION

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder l'entité « *ksar* » dans son ensemble (*ksar*, *foggara* et palmeraie), ses origines et ses typologies et ses différentes transformations au cours de l'histoire. Nous allons mettre en exergue les fondements d'un savoir-faire ancestral qui a conduit à l'émergence de cette entité en parfaite osmose avec son environnement physique et climatique. D'un détail de la maison à l'échelle du quartier, nous allons voir comment le *ksar* interprète une bonne intégration au site synonyme d'une prise de conscience des aléas climatiques de la part des anciens habitants du Gourara.

Ensuite nous allons exposer les différentes circonstances à la fois politiques économiques et environnementales qui ont dicté les transformations de cette entité vernaculaire durant la période coloniale et postindépendance et qui ont favorisé l'émergence de la ville dite « saharienne » ayant complètement rompu cet équilibre. Nous allons tenter de déceler les incohérences de ces transformations qui ont conduit à ce déséquilibre au niveau de l'écosystème du site qui ne fait qu'aggraver la vulnérabilité face aux aléas climatiques en général et au phénomène d'ensablement en particulier.

2.2. Spécificités de l'espace oasien : étymologies et définitions

2.2.1. Architecture vernaculaire (traditionnelle)

L'architecture traditionnelle est étonnamment diverse. Elle est sans doute originale parce qu'elle émerge du sol même et des ressources de la région où elle se développe, tout en s'adaptant à l'ensemble de ses contraintes. Selon (Merlin & Choay, 2000, p.72) l'adjectif vernaculaire (du latin *vernaculus*, né dans la maison -à propos d'un esclave-, puis indigène) fait partie du lexique de la linguistique où il désigne ce qui appartient à la langue du pays.

Selon (Rapoport, 1972) l'architecture des sociétés traditionnelles, est appelée parfois « architecture vernaculaire », se démarque par le nombre relativement restreint des types et des techniques mis en jeu, dû au fait qu'elle est fortement dépendante des contraintes naturelles (matériaux disponibles, climat, topographie, etc.). Ces types architecturaux reflètent aussi d'innombrables variétés liées à la culture (l'organisation sociale, la religion et le symbolisme, etc.), et peuvent aussi être dépendants des principes hiérarchiques, égalitaires, religieux ou politiques...etc.

Selon la définition du CIAV²⁸, la construction vernaculaire est le moyen traditionnel et naturel par lequel les communautés créent leur habitat. C'est un processus en évolution nécessitant des changements et une adaptation constante en réponse aux contraintes sociales et environnementales. Partout dans le monde, l'uniformisation économique, culturelle et architecturale menace la survie de cette tradition.

2.2.2. L'oasis

Selon Mainguet (2003), l'oasis est un milieu bioclimatique artificiel développé à partir d'un site naturel préexistant qui rompt avec l'aridité environnante en transformant l'ambiance climatique au niveau du sol et dans la basse atmosphère. Pour Dubost (1991), l'oasis est un « terroir multiséculaire élaboré pour l'autosubsistance des groupes humains sédentaires en complémentarité avec le nomadisme pastoral et commercial ». Selon Martin (1908), une oasis est constituée par un groupe de jardins irrigués, plantés de palmiers, et par une zone adjacente de palmeraies non irriguées et non closes, qui porte le nom de *bour* - mot arabe qui signifie « terre inculte ». Les habitations forment, dans chaque oasis, un ou plusieurs villages (en arabe : *ksour*, sing. *ksar*).

Dans cette région, l'oasis est constitué de trois parties principales ; le *ksar*, la *foggara* et la palmeraie. Fondée sur ce triptyque, les oasis ont pris la forme de ville-oasis, dont l'eau et la palmerais servent de support et assurent la fonction de relais dans les grands axes caravaniers du commerce. Fig.21

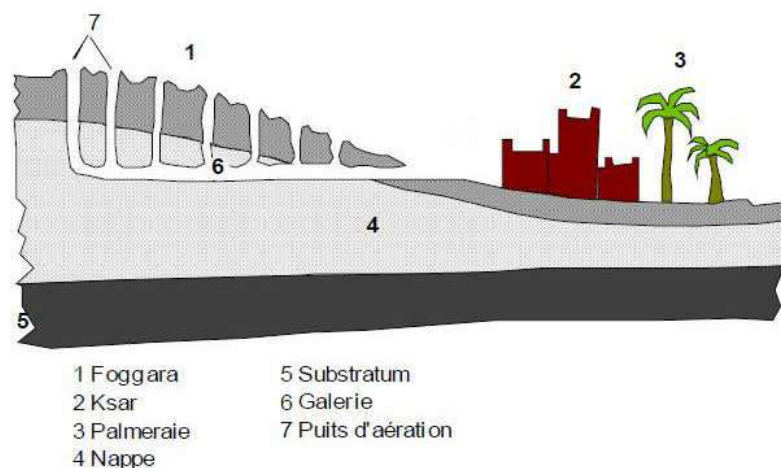


Figure 21 : schéma synoptique du triptyque ksar-foggara-palmeraie.

²⁸ CIAV - Comité International sur l'Architecture Vernaculaire. Site internet : <http://ciav.icomos.org/>

2.2.3. La *foggara*

L'étymologie du mot *foggara*, de l'arabe *fgar* (éventrer), rend compte concrètement de ce qu'est une *foggara* : un chapelet d'évents creusés et reliés par un conduit souterrain (qui éventre littéralement le sol) qui mène l'eau d'une nappe souterraine au terrain à irriguer grâce à une pente appropriée : ainsi est assuré un arrosage par simple gravité d'où tout l'intérêt de la *foggara*.

Dans le Sahara Algérien, les *foggaras* auraient été introduites aux XI^{ème} et XII^{ème} siècle par *El Malik El Mansour* qui aurait creusé la première *foggara* à Tamantit (à 15 km d'Adrar). Ensuite, les *foggaras* ont été développées dans le Touat et Gourara par des tribus arabo-berbères du sud Marocain (*Mrabtine, Chorfa*) sur la base de l'esclavage de la main d'œuvre noire (*Harratin*) locale ou provenant des régions voisines (Mali, Niger et Soudan). (Remini & Hallouche, 2006).

A la périphérie sud du grand Erg Occidental, pour compenser la faible pluviosité, les oasiens ont capté l'eau des nappes profondes afin d'irriguer leurs palmeraies et d'alimenter leurs ksour. Ce sont ces systèmes traditionnels (*foggaras*) de captage et de distribution d'eau qui ont permis aux palmeraies de se développer et de grandir.



Figure 22: Système en peigne pour le partage de l'eau au niveau d'une *foggara* à Timimoun. Photos : Adolphe L. (2011).

Sur le plan technique, les *foggaras* sont des galeries souterraines qui ont été creusées dans les couches des grés du continental intercalaire. Elles pénètrent dans la partie supérieure de la nappe et assurent l'écoulement de l'eau par gravité vers les dépressions basses où sont plantés les palmiers. Ce sont des galeries drainantes, reliées au sol par des bouches d'évacuation suivant une technique archaïque qui remonte au 1^{er} millénaire de notre ère. Le système est partie intégrante du paysage et de l'organisation sociale de la région de Gourara et du Touat.

2.2.4. La Casbah

La *casbah* est une sorte de château fort possédant des tours (*bûrj*) aux quatre coins, assorties de chicanes et reliées par des venelles. Le tout est flanqué d'un rempart entouré d'un fossé extérieur avec glacis (*ahfir*). La situation et le plan de la *casbah* varient en fonction de la topographie des lieux. Elle est soit au milieu du *ksar*, soit à l'extérieur de celui-ci. Elle est en général située en hauteur par rapport au *ksar* qui est bâti au pied de la butte qui sert de socle à la *casbah* (Moussaoui, 2002).

Selon Martin (1908), les oasis sont habitées les unes par des Berbères, les autres par des Arabes ; toutes possèdent en plus des nègres et des métis nombreux pour la main d'œuvre. Chacune comporte au moins un *ksar* ou village, mais dès que cette agglomération atteint seulement une importance moyenne, qu'elle soit arabe ou berbère, elle est munie d'une *casbah*.

Si elle est berbère, le *ksar* est peuplé des habitants de toute condition, depuis les notables jusqu'aux moindres métis ou nègres, et la *casbah*, normalement inhabitée, renferme uniquement les magasins de vivres des habitants du *ksar*, lesquels s'y réfugieront en cas d'exigence de la défense contre une attaque ennemie : elle est un quartier public.

Dans les agglomérations arabes au contraire, la *casbah* est la propriété privée de la famille ou des familles alliées, maîtresses de l'oasis, elles y habitent seules ; le *ksar* est formé par la réunion, auprès de cette *casbah* seigneuriale, des habitations des gens de roture, affranchis, noirs et métis (*Harratin*), qui composent la « clientèle », le personnel agricole ou artisan des seigneurs du lieu ; il s'y joint parfois des commerçants qui vivent sous la même dépendance et la même protection. On peut rencontrer dans une localité plusieurs *casbah* avec ou sans *ksar* attendant, puisque chaque famille de quelque importance peut avoir la sienne ou s'en bâtir une (Bisson, 1957).

La *casbah* possède aussi la fonction d'entrepôt des récoltes, elle contient les greniers des habitants. Chaque grenier individuel est un cube ou un parallélépipède de 3 à 5m. de long sur 2 à 3 de large et 1.5 m de hauteur environ, divisé en compartiments destinés aux dattes de différentes qualités qu'on recouvre de sable, pour mieux les conserver. En outre, dans l'erg, du fait de la dispersion des jardins à cuvettes et des maisons, la *casbah* fait office de centre commercial : c'est à sa porte que les caravanes de passage déposent leurs charges et c'est à l'ombre de ses murailles que se discute l'échange (Bisson, 1957). Fig.23

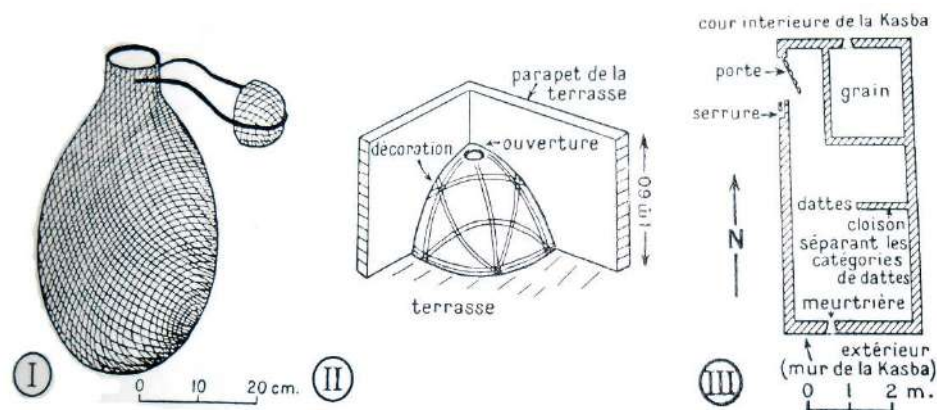


Figure 23: conservation des récoltes au sein d'une casbah. (Bisson, 1957, p. 164)

- I. Jarre en fibre de palme servant à conserver le grain.
- II. Petit grenier placé dans un angle de la terrasse (ensemble enduit d'argile).
- III. Grenier de la casbah de Beni Mehlel.

2.2.5. Le ksar

Le mot se prononce « *gsar* ». C'est une altération phonique de la racine arabe « *qasr* » qui désigne ce qui est court, limité. C'est à dire un espace limité, auquel n'a accès qu'une certaine catégorie de groupes sociaux. C'est un espace confiné et réservé, limité à l'usage de certains. Le *ksar* (pl. *ksour*) est un grenier, mieux encore un ensemble de greniers bien ajustés.

Le terme *ksar* peut désigner aussi l'ensemble du système oasien et ne se limite pas à l'objet architectural et urbain. Il est à la fois l'ensemble des processus à l'origine de sa formation, de son fonctionnement et de sa transformation et le résultat de ces processus. (Arrouf, 2000)²⁹

Se présentant sous forme le plus souvent orthogonale, les *ksour* ont été implantés sur des pitons rocheux pour augmenter les difficultés de leur accessibilité en cas d'attaque par des

²⁹ Cité dans Kouzmine (2012, p.234)

populations nomades. (Mazouz, 2005-a). A l'origine les *ksour* sont nés de la fonction de relais sur les grands axes caravaniers du commerce transsaharien d'autrefois qui pendant près de dix siècles a animé ces vastes espaces entre rive Nord et rive Sud du Sahara. Les premiers *ksour* ont fait leur apparition au XI^{ème} siècle comme le préconisent de nombreux historiens et géographes. Les lectures de l'histoire ont résolu l'apparition du *ksar* par l'invasion hilalienne qui aurait contraint les Berbères, après une longue résistance, à quitter la plaine et les oasis pour se replier dans la montagne et les emplacements fortifiés. Là, sur des pitons quasi-imprenables, et tenant solidement les voies de communication, ils se seraient barricadés dans les villages fortifiés qu'ils auraient fait construire. (Zaïed, 1992) d'après Djeradi (2012).

D'après Djeradi (2012), Ibn Khaldoun (1332-1406) précise que : « *Les premiers ksour datent probablement des I^{er} et II^{ème} siècle avant J.-C. Ils constituent sans doute l'extension progressive jusqu'à l'Atlas saharien du phénomène de sédentarisation des nomades berbères.* ».

Les populations berbérophones puis arabophones sont fixées au Gourara depuis des siècles ; il n'empêche qu'à l'échelle locale leur fixation n'a jamais été immuable, comme en témoignent les innombrables ruines qui se disséminent aux environs des sites aujourd'hui utilisés. (Djeradi, 2012).

« *Cette urbanisation historique a donc une genèse originale. Elle dispose d'une mémoire, à travers les ksour, villageois ou urbains, très vivants ou abandonnés, qui jalonnent encore les paysages sahariens.* » (Côte, 1996,)

Contrairement à une opinion généralement répandue, ces ruines n'attestent pas que le pays était autrefois plus peuplé, mais sont une conséquence de la translation progressive des terroirs sous l'influence d'un facteur marquant dans cet environnement désertique à savoir la rareté de l'eau due au rabattement des nappes phréatiques. En effet, du fait des divers procédés d'irrigation pratiqués par la paysannerie, la localisation des oasis était soumise, jusqu'à récemment, à de fortes contraintes topographiques. Les conditions permettant le bon fonctionnement des systèmes hydrauliques et les oasis qui leur sont associées ne sont pas si fréquentes au Sahara : le choix est fonction de la présence de l'eau dans des secteurs, topographiquement, déprimés. On se fixait là où la nappe était facile à atteindre, puisque l'exhaure se faisait par balancier manuel ou traction animale : ce déterminisme explique la rareté des lieux agricoles et de concentration des groupes de palmeraies ainsi que leur translation en fonction du rabattement des nappes phréatiques dans le temps.

2.3. Lecture typo-morphologique du *ksar*

2.3.1. Les types de villages

Malgré cette uniformité de couleur que donne l'argile rouge du Continental Intercalaire, les villages du Gourara ne se ressemblent pas. Le type le plus fréquent est celui du village comprenant la *casbah* dominant le *ksar*, l'ensemble étant situé immédiatement au-dessus ou auprès de la palmeraie (Bisson, 1957) :

- Au-dessus quand il s'agit des villages de régions au relief assez différencié, (bordure Nord de la *sebkha* par exemple).
- Auprès de la palmeraie quand il s'agit de villages établis sur un *reg* ou dans une *theirat* de l'erg comme à Touat-Intebou ou encore à Talmine ; dans ce cas d'ailleurs le *ksar* est situé au pied même de la *casbah*, au sud-ouest à l'abri du vent d'est-nord-est.

Autre type de village : le *ksar* sans *casbah*. Ici les greniers sont accolés aux maisons ; c'est un cas fréquent, que ce soit sur les bords de la *sebkha* ou dans l'erg.

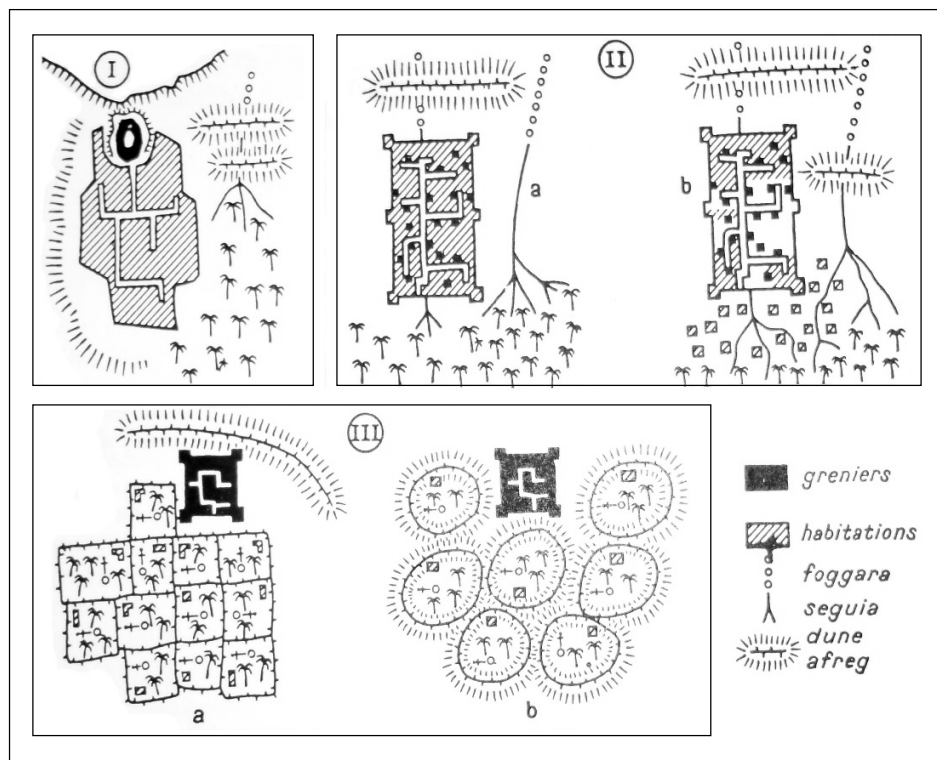


Figure 24: Types de villages d'après Bisson, 1957, p.167.

I- *ksar* et *casbah* (Beni Mehlel, Ighzer...).

II- *ksar* sans *casbah* (greniers accolés aux maisons) : a : état initial, b : évolution actuelle (Ouled Aissa, Azekkour).

III- *casbah* et maisons dispersés (Erg) : a : type Tabelkoza, b : type Guellou.

2.3.2. Structure morphologique des *ksour* du Gourara

Si l'on considère l'oasis comme étant un système, le *ksar* est un élément de ce système et signifie toute agglomération saharienne anciennement de tendance plutôt rurale par opposition aux structures plus importantes que sont les *Médinas*.

« L'archétype du *ksar* reste une structure carrée, ou rectangulaire, parfois circulaire, entourée d'une enceinte aveugle et continue, flanquée de tours de guet aux angles, et percée d'une ou plusieurs portes qui assurent la relation avec le monde extérieur. Le tissu est organisé autour d'un réseau de voirie structuré en ramification, dont les différentes branches traduisent au sol la division du groupement humain et sous-groupes. Les habitations sont continues et généralement mitoyennes sur deux ou trois côtés. Les places des *ksour* (*rahba*) constituent des éléments structurants dans l'espace urbain et servent le plus souvent de lieux de réunions pour des structures sociales traditionnelles » (Mazouz, 2005-a, p.124)

Sur des aspects morphologiques, les correspondances entre *médina* et *ksour* sont très étroites, comme en témoignent les similitudes concernant la centralité des lieux et leur hiérarchisation spatiale, la structure du réseau viaire et l'aspect fortifié de l'ensemble. Néanmoins, les distinctions portent sur la centralité régionale des pôles de peuplement et le rayonnement de leurs activités économiques et politiques.

Dans la littérature géographique saharienne, les villes sahariennes algériennes n'ont jamais été qualifiées de *médinas* au sens propre du terme. Elles ne constituent que l'extension par croissance spatiale des *ksour* et villages composant le fond de peuplement (Kouzmine, 2007). C'est ainsi que la Biskra actuelle s'est formée à partir d'un ensemble de sept villages³⁰ et Ghardaïa des cinq *ksour*³¹ formant la pentapole historique du M'Zab. La *médina*, telle que définie par les éléments précédemment proposés, n'existe donc pas au Sahara algérien.

Sur le plan typo-morphologique, les *ksour* de la région de Gourara se présentent suivant trois types de tissus qui composent l'armature urbaine du groupement à savoir (Kouzmine, 2007) ;

- Tissu ancien (architecture vernaculaire)
- Tissu planifié de l'époque post indépendance (agglomérations, lotissements)
- Tissu non planifié (auto-construction)

³⁰ Bab El-Dharb, Bab El-Feth, Ghedacha, Mcid, Medjniche, Ras El-Gueria et Sidi-Barkat.

³¹ Ghardaïa, Bounoura, Meleuka, El-Ateuf et Béni-Isguen.

Nous tenons à signaler que pendant la période coloniale l'espace oasien, cette entité à part entière car faisant référence au climat aride et d'autre part à son implantation au sein d'étendues vides l'a épargné des dédoublements urbains qu'en ont connu les villes du nord algérien, d'où le manque d'un tissu dit « colonial » dans l'armature des *ksour* en général. Durant la colonisation, l'état français, n'y a implanté que quelques équipements qui ont servi par la suite à l'état algérien comme base de contrôle pour prendre les commandes de la ville » (Côte, 1996).

Les *ksour* généralement ne présentent pas de caractéristiques typologiquement uniformes (Mazouz, 2005-a). Les premières études menées par des officiers militaires français (Martin, 1908 et Echallier, 1972) dans le Sud-ouest, révèlent unité et différences : l'unité apparaît dans la localisation, le processus d'implantation et le modèle d'organisation des rues. La différence est visible essentiellement au niveau de la morphologie de l'unité fondamentale qui compose le *ksar*.

Cette morphologie se présente sous formes compactes, de couleur terre, au sein d'un espace vert (palmeraie). Selon Mahrouf (1994) la forme répond à un principe d'organicité avec diverses échelles d'appropriation de l'environnement ; l'échelle de l'édifice (habitation ou édifice public), l'échelle de l'unité urbaine (l'îlot), l'échelle de la cité (*ksar*) et l'échelle du territoire qui renferme l'ensemble des *ksour* formant l'oasis.

Dans l'ensemble le tissu des *ksour* est basé sur une armature de ruelles étroites et imbriquées dans une hiérarchie spatiale allant de l'espace public à l'espace privé. Les rue semblent avoir des orientations différentes, mais un examen plus attentif montre que deux orientations principales semblent prévaloir : l'axe est-ouest pour la majorité des rues y compris les principales, et un axe nord-sud pour les ruelles et les impasses (Mazouz, 2005-c).

A titre d'exemple, le *ksar* de Timimoun dans la région de Gourara, se présente suivant une organisation compacte concentrée sur la mosquée qui est l'édifice le plus important, associé à une place publique proche appelée (*rahba*) (fig.25). Cette place peut jouer le rôle de place de marché, quand ses dimensions et sa situation à proximité de l'enceinte et d'une porte du *ksar* le permettent » (Bachminski, 1985). Cette place est souvent dotée d'un lieu couvert (*asqif*), dans lequel on a aménagé des banquettes où se retrouvent les hommes à la fin de la journée. L'*asqif* se trouve très souvent à proximité de la porte principale.



Figure 25: rahba du ksar de Timimoun. Photos Adolphe L. 2011

Socialement, les *ksour* sont gérés par des conseils démocratiques formés de notables (*Zénètes ou Arabes*) que constituent les propriétaires de palmiers, alors que les *Harratins* (esclaves noirs travaillant dans les palmeraies) composent la basse classe. La hiérarchie sociale a structuré l'espace ; ces groupes vivent dans des espaces différenciés, les quartiers s'identifient aux habitants : quartier des Notables, quartier des Juifs, quartier des *Harratins*. Malgré les solides hiérarchisations sociales qui pouvaient exister entre les différents groupes sociaux, toutefois les éléments dans la morphologie de l'espace urbain traditionnel amènent à penser ces entités comme caractérisées par une forte cohésion sociale et fonctionnelle.

Le *ksar* se trouve toujours en aval sur le cheminement hydraulique pour favoriser l'acheminement de l'eau par force de gravitation via les *foggaras*. Pour des raisons évidentes d'« économie des eaux », la partie habitat du *ksar* se situe toujours en amont du terroir, permettant ainsi à l'eau de servir d'abord aux besoins domestiques avant d'atteindre la zone de culture sans aucune force motrice autre que la déclivité.

La taille du *ksar* et l'importance de son espace bâti sont fonction des capacités nourricières du terroir. Quand celui-ci en perd, le *ksar* est abandonné ; quand, par contre, le terroir est capable de se développer pour recevoir le surcroît démographique, le *ksar* se démultiplie. Un autre *ksar* vient alors se juxtaposer au premier et ainsi de suite jusqu'à la limite des possibilités du terroir. A ce moment-là, une autre oasis se développe plus loin avec son *ksar* qui pourrait en appeler d'autres. Les contraintes écosystémiques constituent donc le véritable facteur limitant

à l'agglomération humaine. Une oasis est d'autant plus peuplée que l'eau y est abondante et la nature du sol favorable.

Le *ksar* se présente ainsi comme une forme compacte, de couleur terre, horizontale, directement en relation avec un espace vert, la palmeraie, le terroir. La forme s'organise selon un principe où l'on distingue différentes échelles d'appropriation de l'environnement ;

- **La maison**

Les maisons des *ksour* sahariens constituent un bloc compact coupé de nombreux passages et d'impasses, de ruelles étroites et sinueuses que l'on appelle « zkak ». Ce groupement dense de maisons assure aux habitants une protection contre la chaleur excessive, contre les vents intenses de sable et permet de retenir à l'ensemble l'humidité indispensable du sol et de l'air. (Bachminski & Grandet, 1985)

La maison Gourari est très simple, construite en briques crues (*toub*), ou en pierres lorsque l'argile est rare, jointes par la boue séchée, le tout recouvert d'un enduit d'argile. De forme généralement carrée, la typologie des maisons est assez simple obéissant à la même architecture. Les *byût* (les pièces) sont réparties sur un rez-de-chaussée ou rarement un étage autour d'une cour intérieure. Cette cour est en plus très fonctionnelle. Elle peut, selon les circonstances, faire fonction d'étable pour les animaux ou de lieu de dépôt provisoire (Bachminski & Grandet, 1985). Fig.26

Légende :

- 1. *Skifa* (ou *Asqif*)
- 2. Cour
- 3. Pièce principale
- 4. Pièce
- 5. Cuisine
- 6. Rangements
- 7. Patio (éclairage/ventilation)
- 8. Cour-jardin

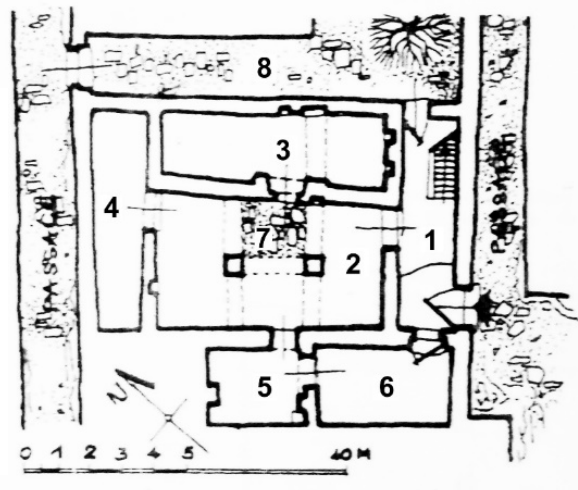


Figure 26: maison à quatre piliers dans le ksar de Kenadsa. Bachminski et Grandet (1985)

Les *byût* (sing. *bayt*) est la cellule de base, généralement plus longue que large, leur largeur étant déterminé par la longueur des poutres de palmier qui ne peuvent excéder 2.5m. Si la pièce est plus large, un pilier supporte alors les poutres en palmier (fig.27). Dans les maisons importantes on rencontre parfois des voutes. La juxtaposition de ces *byût* et leur superposition donnent l'impression, depuis l'extérieur, d'une muraille élevée, sans ouverture, compacte, analogue aux remparts d'un établissement fortifié (Bachminski & Grandet, 1985).



Figure 27: Vue sur l'intérieur d'une maison à piliers au ksar de Tasfaout.
Photo Adolphe L., 2011.

- Des considérations bioclimatiques

Les matériaux de construction assurent un très grand rôle dans le confort thermique. Ceci grâce d'une part à l'épaisseur des murs et d'autre part à leur inertie thermique qui jouent un rôle important dans le déphasage thermique journalier, qui atteint les 12h (Givoni, 1978). Pour réaliser leurs constructions, les usagers utilisent la terre disponible sur site qu'ils façonnent eux-mêmes en *toub* après mélange avec l'eau des *seguias* et malaxage avec leurs pieds. Ils font sécher le produit à l'air libre pour obtenir des pièces de *toub* (*tine*), qui serviront à la construction des murs avec des épaisseurs de 40 à 60cm. Ces derniers sont couverts à leur tour par une couche de terre.

La présence de l'eau et la végétation crée un milieu bioclimatique par l'effet d'évapotranspiration, en créant des brises d'air qui rendent les espaces urbains, et les habitations cléments durant les périodes de grande chaleur. De ce fait, la palmeraie représente un élément de confort climatique. En plus, la forme urbaine compacte de ses groupements, ses rues, ruelles et impasses étroites et sinueuses (*zkak*) créent de l'ombre et minimisent les

surfaces extérieures exposées au rayonnement solaire. L'introversion de l'espace habité à son tour rend l'habitation protégée de toute insolation ou effet de nuisance sonore et climatique (El Ayoubi, 1991)³². La somme de ces facteurs procurent aux *ksour* une parfaite intégration et accommodation dans un milieu aride tant sur le plan climatique que environnemental.

Le constat que l'on peut faire globalement sur l'architecture traditionnelle de *ksour* anciens est qu'elle est durable... sinon, il ne nous serait pas parvenu. Elle est donc à la fois durable au sens de la longévité, mais également au sens de la *soutenabilité* car elle est fondée sur une économie de moyens compatible avec un développement local équilibré. Ce sont le climat et les ressources locales qui dictent les formes, les techniques et les matériaux : tronc de palmier, *djérid* (branches de palmes), terre ou terre cuite, pierre, le choix s'effectue ou s'impose, en fonction de la géologie et du climat (Nomadéis, 2012).

2.4. Emergence de la ville saharienne et son impact sur l'écosystème oasien

L'écosystème est un terme récent, il a été lancé au siècle dernier par Woltereck et unit le préfixe « éco » au mot « système » (Remmert, 1992). Il se définit comme étant l'ensemble des liens d'interdépendance des constituants d'un milieu ambiant. (Mainguet, 2003, p.41)

2.4.1. La ville au Sahara : un modèle exogène

Les cités anciennes héritées des échanges transsahariens, carrefours cosmopolites ont dès la période coloniale amorcé une longue agonie. À la faveur de l'indécence et sur fond de volontarisme politique de l'état indépendant d'autres types de villes ont émergé. Aujourd'hui, la très large majorité des populations sahariennes vit dans des agglomérations. C'est la conséquence des rythmes soutenus d'urbanisation qu'a connu le Sahara depuis quatre décennies.

D'autre part, la découverte des ressources hydrauliques souterraines a considérablement modifié les rapports entre l'homme et son milieu. L'affranchissement des contraintes topographiques liées aux affleurements de nappes, la diffusion des motopompes et des forages profonds ont engendré l'émergence de processus et de mutations essentiels. (Bisson, 1990)

« Si l'eau constituait jusqu'alors une contrainte environnementale majeure de l'urbanisation par sa rareté et la difficulté de son accès, la possibilité de valoriser les ressources du sous-sol

³² El Ayoubi K. « Maison traditionnelle dans les zones arides. In les lundis de Biskra », Co-Edit : INES d'architecture de Biskra, GEAA19 Paris 1991 PP 107-123. Cité dans Alkama et al, (2001).

a conduit à l'apparition de problématiques nouvelles (bouleversement) dans la relation étroite et séculaire entre ksar et palmeraie» (Kouzmine, 2010).

En effet, le processus d'urbanisation initié pendant la période coloniale a été mené par l'armée française en mettant en place des plans d'aménagement volontaristes, dans une volonté de marquer l'espace, fixer les populations et diffuser des normes de confort afin d'endiguer l'exode rural, jusque-là très important. L'urbanisation saharienne s'est, pour l'essentiel, effectuée par la densification de réseaux villageois en place, ou bien par la création de village ex-nihilo suivant un modèle d'habitat uniforme, planifié à distance puis généralisé à l'ensemble du territoire saharien dans une perspective de contraindre plutôt que d'opérer dans la concertation, surtout si l'on songe aux contraintes bien spécifiques que pose la vie dans des espaces soumis aux climats arides (Pliez, 2011).

Le constat que l'on peut faire sur cette urbanisation est qu'elle est souvent faite sans ou contre les sociétés. La manière dont les aménageurs pensent l'espace et les pouvoirs publics décident de créer sont loin d'être ce que réellement la population vit et veut se réappropriier l'espace.

« L'ensemble de l'habitat construit depuis un siècle et qui fait l'essentiel aujourd'hui de la ville au Sahara algérien, semble tourner le dos aux principes graduellement élaborés à travers les siècles des ksour... Partout la trame viaire ouvre la ville par des artères 2 à 5 fois plus larges que les rues anciennes. » (Mazouz, 2005-c, p.196).

« Si l'oasis est une réalité pour ceux qui y vivent, c'est-à-dire là où ils ont élu domicile, où il élèvent leurs enfants, où il rêvent de leur avenir et où ils triment au quotidien pour réaliser une infime partie de leurs rêves, que peut-elle bien être pour ceux qui décident.....qu'une oasis doit être développée d'une manière et pas d'une autre ?.....Ils sont toujours de passage là où ils s'arrêtent. Entre deux mutations, ils vivent leur affectation au Sahara comme un incident de parcours....lorsqu'on décide de construire des cités dortoirs que ne se pose-t-on pas la question de savoir de quoi vont vivre leurs nouveaux résidents ? » (Pliez, 2011)

Ce sont là les grandes mutations qui ont marqué les territoires sahariens au cours du 20^e siècle, à l'instar de celles du pays : déracinement, perte des repères, affaiblissement du communautarisme, volonté de modernisme, ouverture sur les réalités du reste du pays.

Ces mutations se traduisent au niveau de l'espace *ksourien* par certains besoins, ressentis partout comme exigences auxquelles on ne peut aujourd'hui déroger :

- espace bâti suffisamment spacieux pour loger correctement la grande famille et doté souvent d'un garage au rez-de-chaussée ;
- l'accès automobile à l'îlot, de façon à permettre à l'habitant l'accès rapide aux biens et services urbains.
- logement présentant des garanties de longévité, évitant l'astreinte de l'entretien tous les deux ou trois ans qu'imposait la terre ;
- matériaux de construction bon marché, seul le parpaing répond aujourd'hui à cette définition, la pierre et la brique étant considérées comme trop chères sur le marché actuel.

Ces éléments expliquent que l'adaptation aux éléments de l'environnement et du climat ait changé de caractère.

2.4.2. Etalement urbain ; un tissu d'habitat spontané

Les extensions se font en terrain nu, cette fois-ci hors palmeraies et sans *foggara*. Ce qui à la fois simplifie les problèmes fonciers et évite l'empiètement des terrains agricoles mais le problème est que ces extensions sont généralement réalisées en rupture avec les modes de construction traditionnels dans les plans comme dans les matériaux ; c'est un urbanisme importé, il s'agit de celui des villes du nord, ce qui ne va pas sans conséquence sur le bon fonctionnement de la ville traditionnelle (Pliez, 2011).

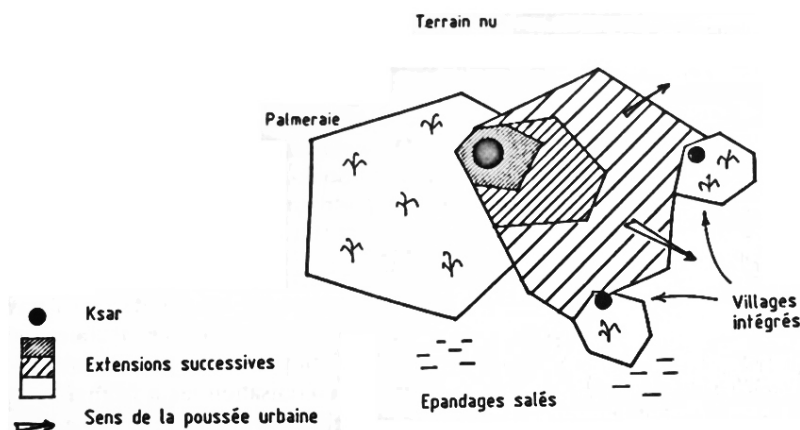


Figure 28: évolution de l'espace ksourien d'après Côte (1996. p.98).

Avec la forte croissance démographique qu'a connue la région ces dernières décennies la relation de l'homme à l'habitat s'est complexifiée. Sur un plan quantitatif, cette croissance

démographique a mis au jour progressivement les carences importantes en matière de logement et parfois les inégalités de traitement face à cette question. Sur un plan qualitatif, l'introduction de nouveaux principes urbanistiques et de matériaux de construction modernes a considérablement remodelé le paysage oasien. De plus, l'étalement urbain a eu une conséquence directe sur le mitage des palmeraies et sur les écosystèmes de manière globale, du fait de l'accroissement des pollutions urbaines et des volumes de déchets et d'eaux usées. En ce sens, nul ne doute que les écosystèmes ont une influence sur le climat, et réciproquement, les changements climatiques exercent des impacts considérables sur le climat local, accroissant l'ensablement, la dégradation des terres et la perte de la diversité biologique.

L'émergence de l'habitat spontané à son tour, fait partie d'un mouvement général qui est pour une large part la conséquence de la croissance démographique d'une population qui a plus que doublée en un quart de siècle et qui a basculée vers la citoyenneté. En raison de l'uniformisation de la culture et des phénomènes de mondialisation socio-économiques auxquelles l'espace oasien ne peut échapper, les structures *ksouriennes* sont devenues extrêmement vulnérables parce qu'elles sont confrontées à de graves problèmes d'obsolescence, d'équilibre interne et d'intégration (Kouzmine, 2007).

« Les inconvénients de la concentration dans un espace restreint sont désormais vivement ressentis au point que les habitants invoquent comme raisons de l'abandon du ksar l'entassement, la cohabitation avec le bétail, l'insalubrité, l'absence de commodités ...etc. Ainsi que le mauvais état du bâti (encore qu'il s'agisse plus d'une conséquence que d'une cause) » (Bisson et Jarir, 1986).

Le développement des lotissements d'habitat individuel et des grands ensembles urbains, souvent mal équipés, nuit à l'unité architecturale de la région, à son harmonie et à son fonctionnement. En plus de cette crise en matière de forme urbaine adaptée au contexte physique s'ajoutent les défauts de l'urbanisme normatif, qui négligent les spécificités de constructibilité des terrains et les contraintes climatiques (Kouzmine, 2012).

Par ailleurs, malgré le fait connu, que les techniques d'urbanisation et de constructions dites traditionnelles avec les matériaux locaux réalisent un confort thermique considérable, les habitants détruisent aveuglement ce précieux héritage du cadre de vie en le remplaçant par de nouvelles constructions avec de nouveaux matériaux comme le parpaing et le béton. Les habitants estiment que ces matériaux synonymes de modernité leur permettent de réaliser un

cadre de vie meilleur³³, alors que ces matériaux de faible inertie thermique ne réalisent aucun confort, même confortés avec les techniques d'isolation thermique. Bien au contraire ils génèrent souvent des malaises que ce soit en période estivale ou hivernal. De là, les techniques et les procédés de construction traditionnels en murs porteurs à base de matériaux locaux perpétués dans cette région pendant de longues périodes n'ont pas été épargnés par ce changement. Ils connaissent actuellement une disparition graduelle, alarmante certes, mais au profit de nouveaux systèmes constructifs en poteaux poutres, en voiles en béton armé avec du parpaing ou de la brique comme matériaux de remplissage, ou même encore en éléments préfabriqués.

2.5. Conclusion

L'organisation de l'espace résulte de l'aménagement qu'une société produit pour y vivre. L'évolution spatio-temporelle de cet espace est une synthèse de longues périodes historiques où différentes organisations spatiales se succèdent ou s'affrontent. Malheureusement, pour la ville saharienne cette évolution censée être poursuivie dans le souci d'un meilleur équilibre entre l'homme et les conditions présentes a été rompue suite à de multiples mutations qu'a connues la région. Résultat ; la ville saharienne correspondant à cette évolution et qui s'est faite en une période relativement courte n'est qu'un espace hétéroclite aujourd'hui.

Tout au long de cette partie de recherche, il nous a été donné de constater une dynamique sans précédent caractérisant l'espace et les pratiques dans les villes oasiennes de Gourara. Il s'avère bien évident qu'une pareille dynamique ne peut se faire sans incidences sur la morphologie et sur l'identité de ces entités. Le taux d'urbanisation semblable à celui des villes du Nord, impose un rythme de développement urbain qui n'est pas sans conséquence sur l'homogénéité urbaine et l'équilibre de l'écosystème oasien.

Hormis la question sociale et économique, la mutation de l'espace oasien suit l'avènement de la ville « exogène », n'a pas pris en considération les dimensions climatiques et environnementales du site, et cette situation l'a rendu plus vulnérable aux aléas climatiques de la région (inondation et ensablement). D'autant plus que la notion de confort est parfois quasi absente dans les nouveaux centres urbains que ce soit à l'intérieur de la ville ou à l'intérieur de l'habitation.

³³ D'après notre entretien réalisé en 2011 avec les habitants de l'ancien *ksar* de Timimoun dans le cadre du projet CMEP (ex-Tassili) n°09MDU788 (2009-2013), intitulé « futurs des villes face aux changements climatiques : Vulnérabilité et adaptation des sociétés et des milieux oasiens du Touat-Gourara, en Algérie ». Collaboration entre les deux laboratoires LAE-EPAU d'Alger et LRA-ENSA de Toulouse.

L'afflux brutal d'émigrés depuis les années soixante-dix, la croissance démographique et l'économie développée ont entraîné une transformation du tissu urbain, de l'émergence de quartiers nouveaux à l'extension continue du *ksar* vers l'oasis. Celle-ci se trouve alors menacée par l'abattage des palmiers, la prolifération de constructions illicites en son sein, la surexploitation des ressources hydriques, la remontée des eaux salées et la pollution des nappes par les eaux usées. La combinaison de tous ces facteurs signe l'arrêt de mort du système oasien.

Une conclusion s'impose à l'évidence ; l'aménagement moderne révèle des faiblesses indéniables dans la maîtrise du milieu oasien et il en sera ainsi tant que la réflexion en la matière restera sectorielle ... De ce fait, il nous semble que le moment est venu pour la ville saharienne d'entreprendre un saut qualitatif, après avoir vécu les années passées entre l'expectative et les bonds quantitatifs, légitimes mais empreint de précipitation et d'errements.

**3. CHAPITRE III : PHENOMENE D'ENSABLEMENT DANS LA
ZONE DE GOURARA ; ORIGINES, AGGRAVATION ET GESTION**

3.1. Le phénomène d'ensablement : origines et forces d'aggravation

3.1.1. Les origines

En milieu saharien, l'eau a constitué historiquement le facteur premier de développement des oasis, prémices des villes sahariennes actuelles. Cette ressource a joué un rôle structurant à deux échelles spatiales imbriquées; celle régionale des pôles de peuplement mais également l'échelle intra-urbaine dans la morphologie et structure du foncier des oasis. A sa rareté liée sa valeur qui en faisait bien avant la terre le premier élément dans la hiérarchie des facteurs de production (Bisson, 1994).

« Dans un milieu désertique marqué par des conditions d'aridité extrême, le facteur déterminant est avant tout la présence d'eau puisqu'elle représente un facteur vital incontournable dans la prise de décision ». (Bellatrach, 2008).

Cependant les ressources hydrauliques ne sont pas inépuisables; il suffit de rappeler que la *foggara* jouant le rôle de drain provoquant le rabattement de la nappe. De ce rabattement découle l'obligation, si l'on veut continuer à bénéficier de l'irrigation par gravité -principal avantage de la *foggara*- de rechercher des terroirs cultivables situés à une côte inférieure à celle du débouché original de la *foggara*. Cette nécessité explique le glissement lent des palmeraies qui a pu s'effectuer sur plusieurs siècles vers le plateau limitant la *sebkha* de Timimoun et par la suite vers l'Erg Occidental. Ceci explique donc l'origine des installations humaines dans l'Erg Occidental et le point de départ de palmeraies dont les populations (*Zénètes* du Taghouzi), nous rapporte la tradition orale, sont venues voici environ deux siècles des bordures de la *sebkha* de Timimoun et de la corniche *hamadienne* : le déplacement a été de l'ordre de la quarantaine à la soixantaine de kilomètres (Bisson, 1985).

Note : Nous reviendrons dans la section 7.3 du chapitre 7 sur les motifs de la translation d'oasis vers les dépressions dans de l'Erg Occidental et son incidence dans l'aggravation du phénomène d'ensablement à ces endroits précis de la zone de Gourara.

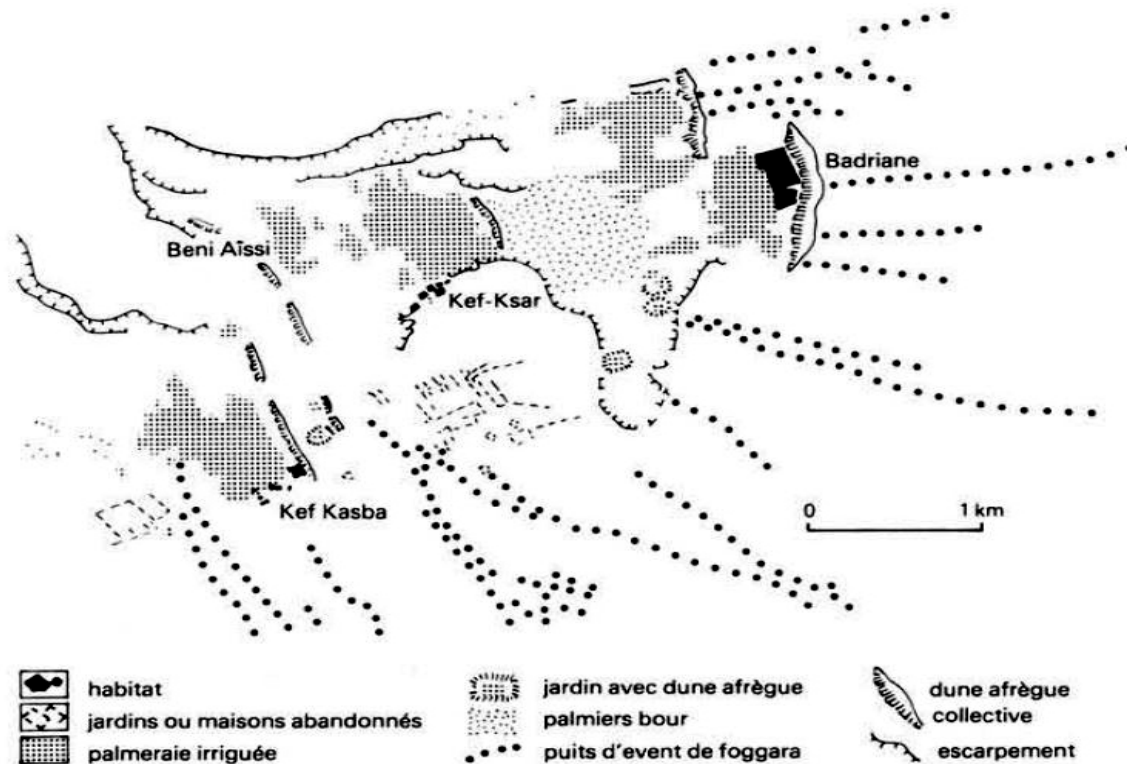


Figure 29: Terroirs des palmeraies irriguées par foggaras de la bordure de la sebkha.

- palmeraies de Badriane, à l'abri d'une dune-afrège haute de 22 mètres.
 - traces de jardins abandonnés par suite du rabattement de la nappe dite albienne, sur le plateau de grès du Continental Intercalaire : glissement des terroirs vers les points bas, particulièrement net à Kef-Ksar. (Calque d'une photographie aérienne. Bisson, 1957)

3.1.2. Les facteurs d'aggravation anthropiques

Sans doute les terroirs sont étroitement soumis à la dépendance hydraulique, mais l'évolution s'étale largement dans le temps. Il n'en est pas de même pour l'ensablement qui, si l'on n'y prend garde, peut progresser très vite, au point d'effacer toute intervention humaine. L'échelle ne se mesure plus en décennies, voire en siècles, mais en années, car tout obstacle au vent - l'aménagement d'un territoire avec ses palmerais denses, ses murettes de clôture, son habitat ... en est un- bloquera les grains de sable transportés par le vent et provoquera inévitablement un dépôt de sable qui rapidement prendra de la consistance au détriment de tout aménagement rencontré. Aussi tout jardinier sait très habilement contrecarrer la menace éolienne et protéger efficacement ses cultures et sa maison ; mais qu'un voisin fasse preuve de négligence, souvent involontaire (émigration vers un chantier lointain sans remplacement, absence d'enfant capable de prendre le relais d'un père âgé ...) et c'est toute une frange d'un territoire qui de voisin en voisin sera menacée.

a. L'abandon du système des « afregs »

Dans le but de protéger contre l'ensevelissement leurs villages et terroirs attenants, les habitants les ceinturent toujours de haies de palmes sèches (*djérid*) grossièrement entrecroisées, parfois tressées, jouant le rôle de brise-vent que l'on appelle localement « *afreg* » (étymologie : limite). L'accumulation de sable se produit au niveau de la haie, si bien que rapidement naît une dune qui épouse le tracé même de l'*afreg*. A mesure que le sable s'accumule, la dune artificielle ainsi créée s'élève protégeant du même coup très efficacement le jardin ou la maison située sous le vent de cette dune (Bellatrach, 2008).

Techniquement, l'*afreg* est un système de stabilisation mécanique de sable qui s'établit à l'aide de dunes artificielles surmontées par une palissade en feuilles de palmes. La dune formée est un obstacle linéaire placé perpendiculairement aux vents dominants pour bloquer la progression des dunes de sable vers le village. Elle est érigée selon la fermeté du terrain, soit directement à même le sol dans un fossé de 30 à 40 cm de profondeur, soit sur une levée de terre allant jusqu'à 80 cm de hauteur (FAO, 1988). Fig.30

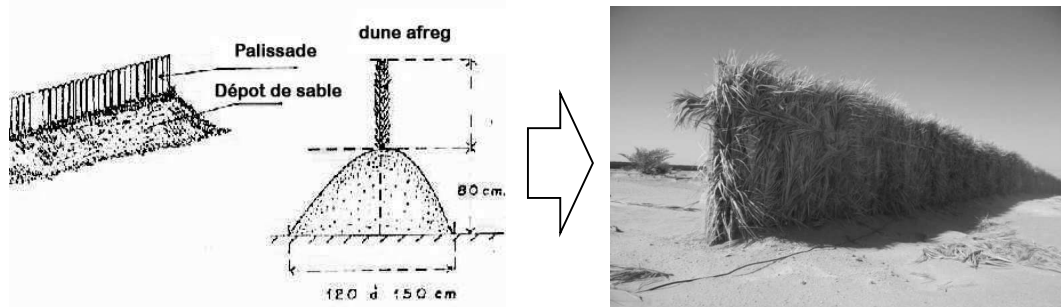


Figure 30: Schéma de mise en place des afregs. Photo auteur 2011. Lieu : Timimoun

L'observation montre que la perméabilité de la barrière améliore son rendement, ce qui signifie qu'elle n'arrivera pas à bloquer tous les grains de sable mais provoquera le dépôt de la plus grande partie du sable entraîné par saltation et reptation, tant au vent que sous le vent de l'obstacle artificiellement créé. Les *afregs* sont toujours fixés à une certaine distance de l'endroit à protéger, car il faut prévoir qu'en s'élevant l'*afreg* va s'élargir par la base et gagne ainsi du terrain. Lorsque la barrière de protection concerne l'ensemble d'un village ou toute une palmeraie la sagesse des *ksouriens* a prévu une large distance séparant l'*afreg* du village, afin de ne pas outrepasser la limite (connue empiriquement) au-delà de laquelle le rôle protecteur de la dune s'estomperait. Tout, repose sur une expérience raisonnée, et des règles simples à respecter (Bisson, 1985).

L'*afreg* représente donc la plus efficace des défenses, contrairement au mur anti-sable, fixé une fois pour toutes, et inutile dès l'instant où les trous ménagés à la base (ce qui est une façon de reconnaître l'intérêt d'une certaine perméabilité de l'obstacle) sont colmatés, et où le sable atteint le sommet. Ainsi, l'*afreg* a pour lui l'avantage d'être le point d'ancrage d'un système que l'on peut qualifier d'évolutif, dans la mesure où il suffit d'entretenir la haie à quelques centimètres en deçà de la crête sommitale. La dune présente alors un tracé rectiligne ou légèrement incurvé, et un profil dissymétrique et effilé, témoignages évidents de l'efficacité du système (Bisson, 1985).

Pour que l'*afreg* fonctionne correctement et d'une manière pérenne, il doit sans cesse être soigneusement renouvelé, sinon le vent, canalisé par une trouée, provoque des encoches dans l'arête, dégage un couloir de déflation et projette le sable sur les cultures et les maisons. Le processus une fois déclenché peut aller très vite. Aujourd'hui bien des *afregs* ne sont plus entretenus, dû à la perte du sens de la collectivité (sinon le respect de l'autorité) avec son corollaire, la *Touiza*³⁴ (ou corvée collective). Ce système conçu au départ pour contrer l'avancement de sable, devient, dans ce cas un véritable piège à sable et donne lieu à une formation d'immenses édifices dunaires qui petit à petit gagne du terrain autour et finit par ensevelir des oasis toutes entières.

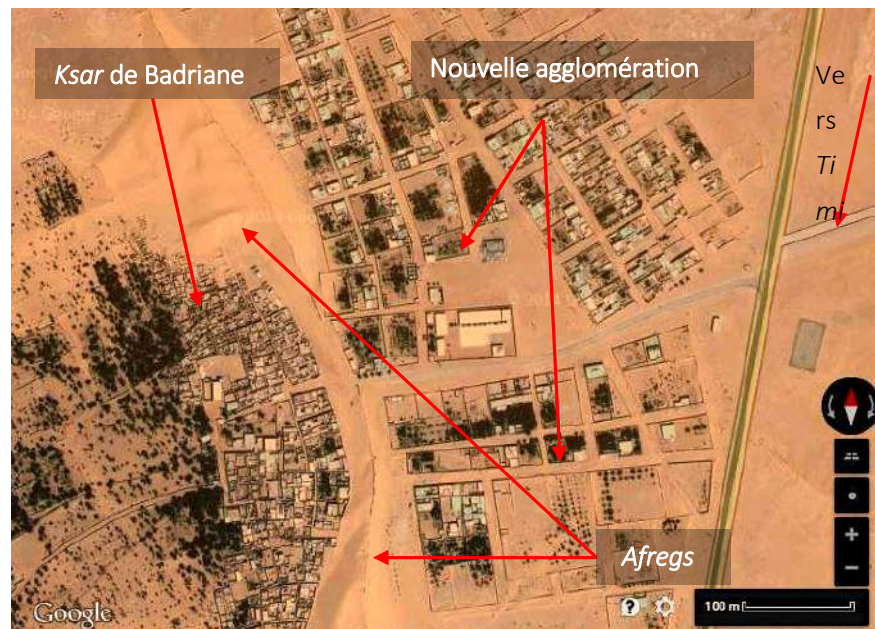


Figure 31: ksar de Badriane, le système «afregs» et la nouvelle extension à l'Est. Illustration établie par l'auteur depuis un support Google-maps (2011).

³⁴ La Touiza, est une forme de volontariat qui s'effectue avec la participation de tout le monde, notamment les habitants des *ksour*. Des dizaines de kilomètres d'*afregs* ont été réalisés par les habitants des oasis de Timimoun et ses environs grâce à cette tradition ancestrale.



Figure 32: A droite : ensablement du ksar de Badriane dans sa partie Sud-Est. A gauche : photo prise à l'intérieur de la partie ensablée du ksar de Badriane. Source : auteur 2011

b. L'implantation contre la direction du vent dominant : nouvelles extensions

Dans le cadre de sa politique de développement rural, ayant comme principal objectif le développement des espaces ruraux et la fixation des populations locales, l'Etat avait promulgué dès les années 80 une loi (82/02) de 1982 relative à la promotion de l'auto-construction (Sriti et al, 1999)³⁵. Cette loi offrait une totale liberté aux auto-constructeurs en les dispensant déjà du permis de construire et en mettant à leur disposition des plans types. Récemment encore et dans le cadre de la promotion des régions du sud, une aide financière a été attribuée au logement individuel (auto-construction) réalisé sous forme groupée (Décret exécutif n° 13-389 du 24 novembre 2013).

L'émergence de nouvelles extensions à côté du *ksar* sous formes d'auto-constructions comme c'est le cas à Badriane a été facilité en partie par la disponibilité du foncier qui, autrefois était légué au *Cheikh* de la *Zaouïa* et considéré comme une sorte de *Habous*. Ce foncier est rendu cessible au profit des habitants du *ksar* pour y construire leurs maisons afin de désengorger l'ancien *ksar* qui ne satisfaisait plus au nombre important de la population³⁶. Cette nouvelle typologie et façon d'occuper l'espace en rupture complète avec la tradition ancestrale n'est pas sans conséquences sur la reconfiguration de l'espace oasien. Ainsi nous passons d'un système d'habitat compact à densité élevée à une forme d'habitat éparse à faible densité qui se construit et se cherche en dehors de la logique oasienne millénaire. Par ailleurs, ces nouvelles auto-constructions et groupements d'habitats sont souvent situés dans des couloirs éoliens d'ensablement et dont aucune mesure de protection n'a été prévue dans ce sens. Beaucoup

³⁵ Cité dans Côte (2005, p.176)

³⁶ Information recueillie en 2011 lors de notre entretien avec le *Cheikh* de la *Zaouïa* de Badriane réalisé dans le cadre du projet CMEP (ex-Tassili) n°09MDU788 (2009-2013).

d'exemples en témoignent aujourd'hui et soulignent l'absence d'une politique d'aménagement en cohérence avec la nature hostile des mouvements éoliens d'ensablement dans la région.

➤ **Exemple de la nouvelle extension du ksar de Taguelzi**

Perché sur la corniche *hamadienne* pour des raisons défensives, le *ksar* de Taguelzi, a depuis les années cinquante perdu de son intérêt dans la mesure où avec la sécurité, les habitants ont préféré de s'installer près de la palmeraie située en contrebas (Bisson et Jarir, 1986). Les nouvelles extensions dressées en contre-bas sur des terrains plats sont souvent exposés à toute présence du vent dans la région. En effet, cette manière d'occuper l'espace sans tenir compte des couloirs éoliens d'ensablement, n'est pas passée sans conséquences. L'émergence de formes sédimentaires et dunaires constatée depuis les premières installations continue à prendre de l'ampleur au gré de certaines conditions favorables telles que ; la présence régulière du vent, une topographie plate, le manque de système de protection...etc.). La situation actuelle constatée lors de notre visite en 2011 est alarmante ; le sable a envahi une bonne partie de la palmeraie et des maisons situées dans le couloir éolien nord-est (fig.33).

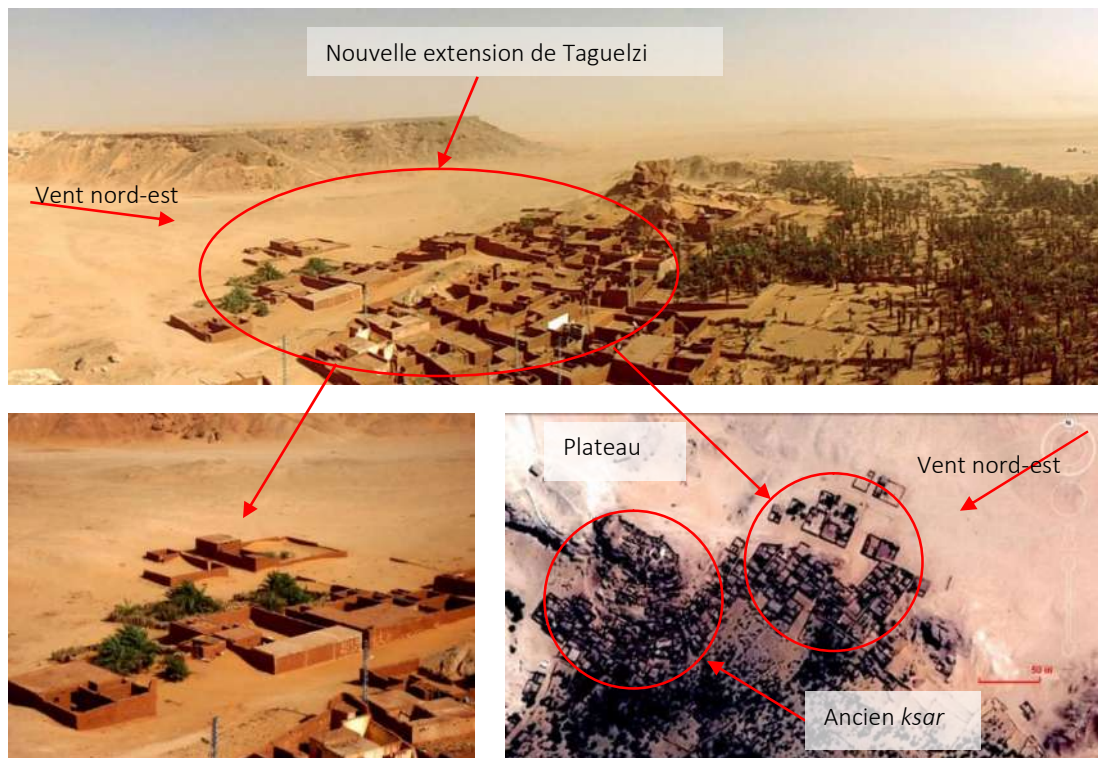


Figure 33: Ensablement localisé au niveau de la nouvelle extension du Ksar de Taguelzi. Source : auteur 2011

La palmeraie, située en contre-bas subit le même sort que la nouvelle extension et se retrouve de plus en plus confinée par les amas de sable qui viennent se tasser sur ses bordures (fig.34).



Figure 34: palmeraie de Taguelzi envahie par le sable. Auteur, 2011

➤ Exemple de l'oasis de Touat-Intebou

A l'image des implantations en plein milieu dunaire, la présence de l'oasis de Touat-Intebou à Sidi Moulay Mohammed en plein milieu d'une *theïrat* n'est pas sans conséquences sur la dynamique éolienne. Les impacts résultant des perturbations de la dynamique éolienne ne sont pas immédiats et visibles dès la mise en place des aménagements mais plutôt, ils sont de nature sournoise.

Les accumulations sableuses se manifestent au départ par de légers voiles sableux dont la présence n'est ressentie que par ceux qui appréhendent les mécanismes d'évolution et le danger lié à l'ensablement. En effet, lorsqu'on évolue dans un milieu où la composante première est la présence du sable, comme c'est le cas ici puisqu'il s'agit d'un erg, il est extrêmement difficile de prendre conscience que les prémices de l'ensablement se manifestent sur le terrain par des voiles qui petit à petit évoluent vers des boucliers sableux et finissent par des trains *barkhaniques*³⁷ (Bellatrach, 2008). L'extrait de l'image satellitaire ci-dessous montre une tendance à l'ensablement dans la partie nord-est qui a une prédisposition à évoluer selon un axe oblique nord-est sud-ouest en direction de l'oasis de Touat-Intebou (fig.35).

³⁷ C'est un ensemble coalisant de *barkhanes*. La *barkhane* est une dune en forme de croissant à convexité au vent. Il s'agit d'une forme d'accumulation sableuse la plus menaçante vu sa capacité de déplacement rapide.

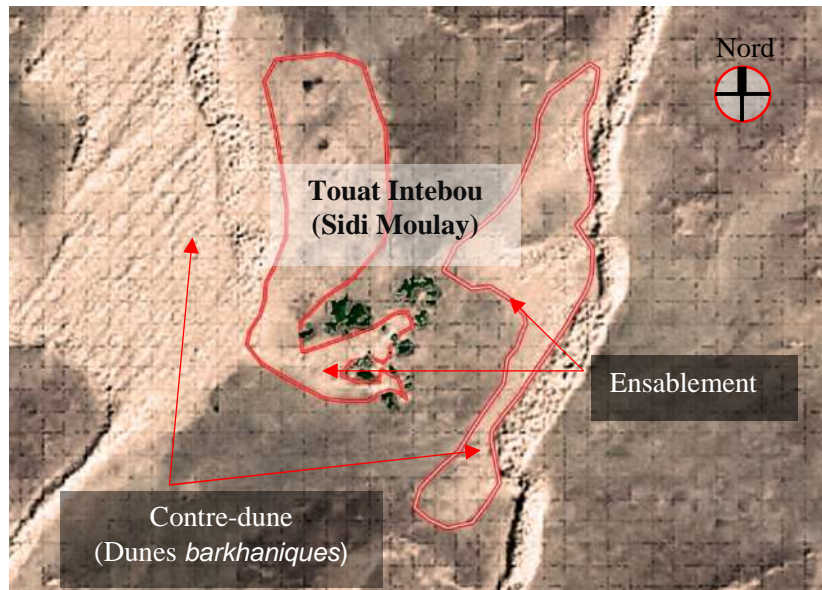


Figure 35: installations au milieu d'un couloir éolien ; cas de l'oasis de Touat Intebou à Gourara. Source : Bellatrach, (2008).

Si de prime abord, l'erg apparaît comme une étendue sableuse figée, elle est réellement loin de l'être puisque les courants éoliens ont tendance à modeler de manière continue la géométrie morphologique des édifices sableux en assurant un transfert des éléments fins d'une forme à l'autre à l'intérieur de l'erg. Donc, ce qui semble globalement immuable est concrètement en mouvement continu et dont la résultante morphologique est induite par les courants éoliens dominants. A ce stade, nous nous sommes posé un certain nombre de questions qui méritent l'attention et qui nécessitent que l'on se penche dessus dans la partie expérimentation de notre recherche :

Dans ce type d'occupation de l'espace peut-on vraiment parler de la possibilité d'une véritable mise en place d'une politique de lutte contre l'ensablement ? Lorsque l'on se retrouve au beau milieu d'un océan de sable peut-on lutter efficacement contre l'ensablement et à quel prix ?

La maîtrise du processus d'ensablement soulève une question très pertinente : comment peut-on bloquer le processus dans un espace où l'essence existentielle de celui-ci est le sable, puisque la totalité de cet environnement « erguin » si l'on peut dire ainsi, se résume au grain de sable ?

En effet, une étude morfo-dynamique détaillée devra être réalisée sur les systèmes dunaires en relation avec les caractéristiques physiques des vents pour bien comprendre la dynamique

éolienne spatio-temporelle dans la région de Gourara en vue de faire les aménagements les plus adéquats et les plus efficaces pour lutter contre le phénomène de l'ensablement qui devient de plus en plus important en raison de l'intensification de l'action anthropique et la tendance vers l'aridification que connaît le climat actuel.

3.2. Gestion des risques naturels en Algérie : l'ensablement

3.2.1. Risques naturels : quelques généralités

Quel que soit la complexité des phénomènes, la compréhension de leurs mécanismes est une condition sine qua non pour déceler une assise de manière à atténuer les contraintes. Il est bien clair que les dangers abondent en situations imprévues, c'est ce que la gestion des risques préconise dans l'intention de prendre les mesures nécessaires et indispensables pour en réduire l'effet.

a. Qu'est-ce qu'un risque majeur ?

Il est convenu (dictionnaire le Robert) que le risque est un danger éventuel plus au moins prévisible. Selon Pagney (1994) le risque (le danger) peut être concevable, inévitable, immédiat ou lointain. Il s'agit donc d'un événement dramatique plus ou moins attendu. Le risque n'est pas la catastrophe, il est l'attente de la catastrophe.

Le risque majeur est la possibilité d'un événement d'origine « naturelle » ou « anthropique », dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société.

L'existence d'un risque majeur est liée :

- d'une part à la présence d'un événement, qui est la manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique ; appelé aléa,
- d'autre part à l'existence d'enjeux, qui représentent l'ensemble des personnes et des biens (ayant une valeur monétaire ou non monétaire) pouvant être affectés par un phénomène. Les conséquences d'un risque majeur sur les enjeux se mesurent en termes de vulnérabilité.

Dans la réglementation algérienne, notamment l'article 2 de la loi n° 04-20 du 25/12/2004 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes qualifie le risque

majeur comme toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines.

b. Risques naturels

Les risques naturels sont liés à l'existence de phénomènes naturels dont l'ampleur, plus ou moins exceptionnelle, peut engendrer des conséquences catastrophiques : tempêtes, pluies et inondations, froids excessifs, sécheresse et ensablement, avalanche, séismes, ...etc. (Tronchon, 1991)

Le milieu naturel impose des contraintes à l'aménagement du fait qu'un site présente toujours de caractéristiques dépendant :

- de la topographie et du relief (pourcentage des pentes, falaise ou ravins, glissement, tassement...etc.) ;
- de l'évolution du paysage soit par des mouvements lents des terrains (érosion, ensablement) ou rapides (éboulement) soit par dissolution (cavités karstiques)³⁸ ;
- de l'eau sous ses différents aspects : eau de surface (zones inondables, érosion des berges), eaux marines (érosion ou engraissement des plages), nappes souterraines (ressource à protéger).

Dans certains pays ou contrées, la fréquence des phénomènes naturels, à l'ampleur plus ou moins importante, peut générer des conséquences incommensurables au point où les possibilités de développement urbain ou industriel s'en trouvent considérablement perturbées (zone de séismes, zone désertique). En Algérie, le risque d'ensablement est d'une occurrence importante au point de générer des conséquences de taille sur la vie des populations qui dans un passé proche étaient en quête permanente de nouveaux territoires à l'abri du phénomène d'ensablement qui menace sans cesse leurs maraichages et palmeraies. Cette « colonisation aléatoire » des territoires pose ainsi aux autorités locales d'énormes problèmes en matière d'aménagement et mise en place de service de base (écoles, équipements de sante...etc.) ou de viabilisation (alimentation en eau et électricité, réalisation de routes...etc.).

³⁸ Le relief karstique est une forme de paysage provoqué par l'action de l'eau qui s'infiltre dans le sous-sol de certaines régions. Cette eau va dans un premier temps dissoudre la roche puis dans un second temps, redéposer cette matière dissoute en créant des formations caractéristiques. Définition et plus d'informations disponibles sur le site http://www.geowiki.fr/index.php?title=Relief_karstique

c. Aléa climatique

Selon l'Université Virtuelle Environnement et Développement Durable (UVED)³⁹ la définition usuelle donnée pour le risque naturel est la suivante :

$$(\text{Risque}) = (\text{aléa}) \times (\text{enjeu})$$

On parle d'aléa naturel quand on ne s'intéresse qu'à la seule manifestation d'un phénomène naturel sans l'enjeu. Le risque est donc la confrontation d'un aléa (phénomène naturel dangereux) et d'une zone géographique où existent des enjeux qui peuvent être humains, économiques ou environnementaux.

Selon Moriniaux, et al, (2003) l'aléa peut se transformer en catastrophe si le produit du phénomène dommageable et de la vulnérabilité des éléments exposés dépasse un certain seuil de tolérance du système naturel et social, la catastrophe engendre des perturbations socio-économiques et écologiques durables.

Pour Dauphiné (2001) l'aléa, ou événement ou encore processus, doit être défini par une intensité (pourquoi et comment ?), une occurrence spatiale (où ?) et temporelle (quand ?, durée ?).

- L'intensité traduit l'importance d'un phénomène. Elle peut être mesurée (hauteur d'eau pour une inondation, magnitude d'un séisme) ou estimée (durée de submersion, vitesse de déplacement).
- La probabilité d'occurrence spatiale est conditionnée par des facteurs de prédisposition, qui s'expriment par une susceptibilité. L'extension spatiale de l'aléa est plus difficile à estimer (avalanche ou mouvement de terrain par exemple).
- La probabilité d'occurrence temporelle dépend de facteurs déclenchants naturels ou anthropiques. Elle peut être estimée qualitativement (négligeable, faible, forte) ou quantitativement (période de retour de 10 ans, 30 ans, 100 ans).
- La durée du phénomène doit être également prise en compte (% d'occurrence pour les vents dont la vitesse est supérieure à 4.5m/s pour la saltation, ou nombre de jours pour les vents de sable). Il est souvent nécessaire de dresser un tableau à double entrée pour caractériser l'aléa (intensité, durée).

³⁹ Créée en juin 2005, l'Université Virtuelle Environnement et Développement Durable (UVED) est l'une des sept Universités Numériques Thématiques (UNT) soutenues par le Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche en France. <http://www.uved.fr/>

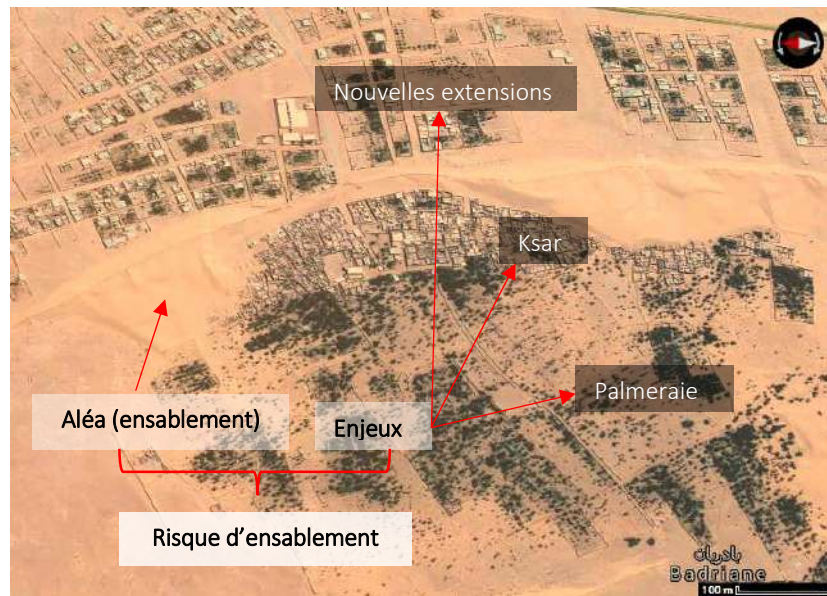


Figure 36: schématisation du risque d'ensablement dans le ksar de Badriane (Timimoun).
 Source : illustration établie par l'auteur.2012

En ce qui concerne notre région d'étude, l'aléa d'ensablement est un phénomène dont la probabilité d'occurrence temporelle dépend fortement du régime éolien ; dès que le seuil de vitesse atteint ou dépasse les 4.5m/s, un mouvement d'ensablement peut avoir lieu suivant un mode de saltation, dont la durée peut être estimée par les météorologues en nombre d'heures par an. La probabilité d'occurrence spatiale implique un travail de terrain car très liée à la nature du relief de la région qui définit les couloirs éoliens d'ensablement.

d. La vulnérabilité face au risque naturel

La notion de vulnérabilité désigne la susceptibilité d'un système naturel ou humain à être affecté par les effets négatifs du changement, de la variabilité et des extrêmes climatiques. Par conséquent, elle induit toute capacité à anticiper, résister ou s'adapter aux impacts négatifs du climat ou à se remettre de ces impacts (UNFCCC, 1992)⁴⁰.

La vulnérabilité d'un enjeu correspond à sa faculté à résister aux sollicitations engendrées par le phénomène. Cette vulnérabilité est donc dépendante de l'aléa considéré, et peut varier au cours du temps en fonction, en particulier, de l'activité humaine (vieillesse et mauvais entretien des infrastructures, nouveaux aménagements...etc.).

⁴⁰ Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. 1992. Source : <http://unfccc.int/>

La vulnérabilité peut être appréhendée à différentes échelles. Pour des systèmes complexes, tels que les systèmes urbains, l'analyse systémique est primordiale, puisque la défaillance, même partielle, d'un système secondaire peut être lourde de conséquences à l'échelle du système global.

Selon Gondard-Delcroix & Rousseau (2014), pour juger la vulnérabilité d'un individu ou d'un groupe, nous devons tenir compte de trois caractéristiques

- La prédisposition aux risques : l'individu est-il dans une zone à hauts risques ? A-t-il une plus grande probabilité de voir sa situation se dégrader lors d'un aléa climatique ?
- L'élasticité à résister aux aléas : quelle est la capacité de l'individu à résister aux effets d'un événement catastrophique ? Jusqu'à quel point son stock de capacités peut-il lui permettre de s'ajuster aux risques ? Ses capacités sont-elles suffisantes ?
- La robustesse des capacités : les capacités mises en œuvre pour résister à un choc ont-elles des effets durables ou transitoires ?

e. L'adaptation

La notion d'adaptation et sa perception varie d'une société à l'autre. Elle dépend des moyens d'existence des populations et du niveau de développement du pays. Elle se réfère à tout ajustement dans les systèmes naturels ou humains pour répondre aux impacts réels ou prévus du changement climatique (GIEC, 2001)⁴¹.

On distingue plusieurs types d'adaptation ; chaque type dépendant des stratégies et des moyens dont disposent les populations. L'adaptation, qu'elle soit anticipative (i.e. prise avant que les impacts initiaux aient lieu) ou réactive (i.e. conçue et mise en œuvre en réponse aux impacts initiaux) permet de réduire la vulnérabilité à la variabilité et au changement climatiques. Selon le rapport du GIEC (2007), à ces deux principaux types d'adaptation, s'ajoute l'adaptation planifiée, résultat d'une décision politique délibérée, basée sur une prise de conscience des changements en cours et à venir, et une bonne évaluation des possibilités d'adaptation selon des critères pertinents (disponibilité, bénéfiques, coûts, efficacité, efficience et faisabilité).

Dans les sciences sociales, selon Gondard-Delcroix et Rousseau (2014) la capacité d'adaptation est mise en rapport avec l'ampleur du risque et la vulnérabilité induite. Tel que

⁴¹ GIEC : Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. En anglais IPCC : the Intergovernmental Panel on Climate Change. Source : https://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml

[$V=R/C$], où V est la vulnérabilité, R l'aléa climatique (ou risque) et C la capacité, définie comme l'ensemble des capacités d'un individu à assurer ses fonctionnements individuels et au sein d'un groupe.

Réduire la vulnérabilité (V) équivaut à permettre un équilibre entre le risque (R) et la capacité ou capacité d'adaptation (C), soit, arriver à un ajustement dans l'objet de la gestion du risque. Cette capacité d'adaptation dépend non seulement du mode socio-économique du groupe humain en question mais aussi des caractéristiques des aléas climatiques.

f. La résilience

Les spécialistes de l'approche systémique comme Brunet et al. (1993)⁴² définissent la catastrophe en tant que : « *rupture dans une trajectoire, dans la reproduction d'un système [...] suivie par l'émergence ou la bifurcation d'une nouvelle trajectoire et la mise en place d'un nouveau système* ». On comprend alors que cette notion est liée à un ou des seuils d'endommagement et que leur franchissement éventuel est largement conditionné par la capacité de réponse des sociétés concernées, autrement dit de leur résilience.

Étymologiquement, le terme de résilience vient du latin *Resilio*, littéralement « sauter en arrière », qui signifie « rebondir, résister ». Bien que le terme de résilience soit employé couramment, ses significations s'appliquent à de nombreux domaines comme la physique, l'écologie, la psychologie ou encore l'informatique.

Selon Mathieu (1991), la résilience en physique mesure la capacité d'un objet à retrouver son état initial après un choc ou une pression continue. Walter et al, (2006) dans son ouvrage « Qu'est -ce que la résilience ? » définit ce concept comme étant « La capacité d'un système à absorber une perturbation, à se réorganiser, et à continuer de fonctionner de la même manière qu'avant la survenance de cette perturbation. »

Le concept de résilience a plus récemment été introduit en urbanisme où son application à la ville commence à nourrir de nouvelles recherches. Les territoires sont considérés comme des systèmes soumis à des risques, leur résilience dépend alors de leur capacité d'adaptation et de récupération face aux différents aléas. Le concept de la résilience urbaine est selon Scarwell (2007) indissociable du concept de vulnérabilité et trouve sa place dans les recherches et les politiques de prévention des risques. Il estime ainsi que par ce temps de la reconstruction et du

⁴² Cité dans Moriniaux et al, (2003, p.47)

retour à un fonctionnement normal, que peut s'observer le degré de résilience d'un territoire et plus généralement d'une société.

Scarwell (2007) estime que pour faire face aux nouveaux enjeux des changements climatiques, il convient de s'attaquer aux vulnérabilités comme moyen de renforcer la résilience. Il considère que la prise en considération de la vulnérabilité et de la résilience d'un territoire exposé au risque naturel permettra de le maintenir en équilibre afin d'assurer sa durabilité. S'il a été montré que les logiques de protection, d'ouvrage et de résistance ne sont pas une solution ou encore un but à atteindre pour faire diminuer la vulnérabilité d'un territoire, la poursuite de la résilience d'un territoire nécessite une action sur les facteurs qui le rendent vulnérable.

3.2.2. Gestion des aléas climatiques par la population : de l'adaptation « anticipative » à l'adaptation « réactive »

a- L'impact de la culture

Selon Moriniaux, et al., (2003) parmi les paramètres qui influencent la perception des risques, la notion de « proximité/distance » peut-être d'un grand intérêt. Il s'agit alors d'une déclinaison de la distance qui n'est pas seulement géométrique (distance à la source du danger), certes mais aussi distance affective au danger qui dépend de la familiarité que l'on a avec ce danger, autrement la culture du danger.

La culture peut se définir par l'ensemble des « formes acquises de comportement dans les sociétés humaines » (dictionnaire Le Petit Robert). Selon les anthropologues, la culture est l'ensemble des « connaissances, croyances, art, morale, loi, coutumes ainsi que toute autre capacité et manière d'être ou de faire acquise par un être humain en qualité de membre d'une société » (E. Tylor, 1871). De là, mentionner l'existence d'une culture des risques, c'est faire référence à un savoir, un bagage collectif commun à tous ceux qui appartiennent à une société. La manière de concevoir le risque repose sur des « perceptions », notamment de l'environnement vécu, mais correspond aussi à un savoir transmis, forgé plus au moins volontairement et s'inscrivant dans un contexte particulier (civilisation, société, nation...). Il est indéniable, de ce fait, que la conception des risques soit différente d'une société à l'autre et il semble légitime aussi de parler de cultures au pluriel ; ces cultures varient en particulier dans l'espace et le temps : il existe des différenciations spatiales et des variations historiques (émergence, changement, évolution voire révolution...etc.)

Il existe des essais de synthèse de l'étude des risques, prenant en compte l'aspect « objectif », en partie mesurable des dangers (surtout lorsque l'on s'intéresse à l'emprise spatiale des effets des catastrophe) mais aussi les différences d'appréhension et de résistance aux risques, voire en incluant les questions de « perception » des risques. Ces recherches utilisent l'approche territoriale et la notion de « vulnérabilité » d'où la vulnérabilité territoriale qui est schématisée par Bonnet (2001)⁴³. Fig.37

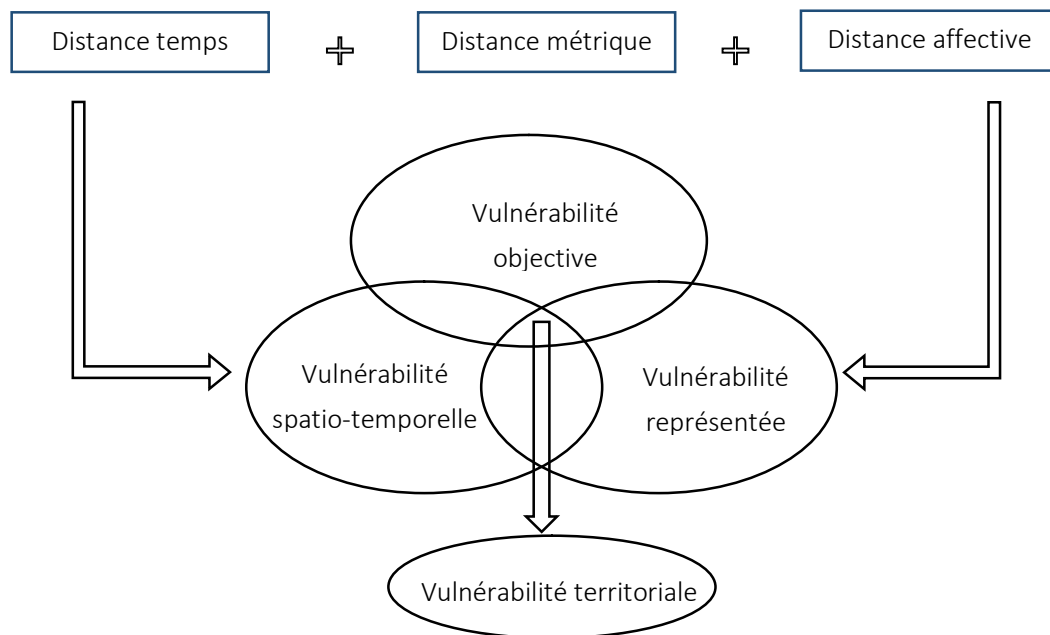


Figure 37: schéma de l'évaluation de la vulnérabilité territoriale d'après par Bonnet (2001). Moriniaux, et al. (2003, p.85)

Dans la région de Gourara, si le facteur d'eau avait constitué un élément nécessaire à la création de l'espace oasien et souvent avait dicté l'endroit de l'installation humaine dans la région de Gourara, l'ensablement avait toujours constituée une menace pour ces populations, dont la vie et le maintien de leurs installations en dépendaient étroitement. La lutte contre ce phénomène a souvent été favorisée par la mise en place de certaines techniques ancestrales tel que les *afregs*, les tas de remblais (freineur ou déblayeur), le choix de la zone d'implantation....etc. Aujourd'hui beaucoup de cas illustrent l'abandon de ce savoir-faire quant au choix du lieu d'implantation. Beaucoup de groupements d'habitations se sont dressées en plein erg sans tenir compte du régime éolien d'ensablement. Par ailleurs, dans d'autres *ksour* comme celui de Badriane, le développement rapide d'extensions spontanées n'a

⁴³ Cité dans Moriniaux et al, (2003, p.85).

pas laissé le temps aux habitants de réfléchir au respect des conditions requises pour la protection contre l'envahissement des sables, tel que la zone de servitude qui doit séparer le *ksar* des *afregs* et qui servait autrefois comme une zone de protection. Cette distance une fois qu'elle a été rompue comme nous pouvons le constater dans certains cas a considérablement favorisé l'envahissement des sables.

L'extension du *ksar* de Badriane au-delà de la zone de protection est un fait délibéré mais inconscient du risque à encourir, et ceci n'est qu'un exemple parmi tant d'autres dans la région de Gourara. La population vit une sorte de fatalisme et ne peut plus croire aux pratiques ancestrales de lutte contre l'ensablement. En effet, aujourd'hui les jeunes sont réfractaires à ces tâches pénibles, ce qui menace de facto l'équilibre séculaire établi.

Il se trouve que les variations historiques et les mutations induites qu'a connue la région de Gourara parviennent à diminuer l'efficacité des savoir-faire dans les consciences collectives vis-à-vis des risques climatiques en général et du risque d'ensablement en particulier. Nous passons ainsi d'une adaptation « *anticipative* » qui est une ressource patrimoniale et dont les résultats sont assurés, à une adaptation « *réactive* » sans garantie de résultats.

3.2.3. La gouvernance et la prise en compte du risque d'ensablement en Algérie

a. Dans la législation (textes de loi)

Les politiques publiques de gestion des risques environnementaux font partie du droit de l'environnement, car elles sont en filigrane des textes à caractère législatif et réglementaire qui visent principalement l'identification et l'évaluation des risques, leur gestion au sens de la protection civile, et des questions de responsabilités et d'indemnisation des dommages.

L'idée de prévention des risques majeurs a réellement émergée à la suite du séisme du 10 octobre 1980 d'*El Asnam*, renommé *Chlef*⁴⁴ aujourd'hui. Depuis, sur insistance des pouvoirs publics, le législateur algérien a élaboré et adopté un certain nombre de textes dans lesquels on retrouve les dispositions relatives à la prévention des risques majeurs. Il s'agit du code de santé publique, du code des eaux, du code forestier, du code maritime, loi n°90-29 du 1^{er} décembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme qui impose la prise en compte des risques majeurs dans les projets de construction à travers son article 4 ; « *seules sont constructibles les parcelles qui ne sont pas exposées aux risques naturels et technologiques.* »

⁴⁴ Chlef, anciennement *Castellum Tinginitum* à l'époque romaine, Orléansville à l'époque française, puis *El-Asnam* après l'indépendance, est une commune de la wilaya de *Chlef* dont elle est le chef-lieu, située à 200 km au sud-ouest d'Alger et à 210 km au nord-est d'Oran.

Les dispositions de la n°90-29 du 1^{er} décembre 1990, ont été susvisées et complétées par la loi n° 01-20 du 12 décembre 2001⁴⁵ relative à l'aménagement et au développement durable du territoire. Les dispositions de cette loi définissent les orientations et les instruments d'aménagement du territoire de nature à garantir un développement harmonieux et durable de l'ensemble du territoire national. Elle retient comme finalités la protection des territoires et des populations contre les risques liés aux aléas naturels.

L'administration précisera par voie réglementaire les terrains exposés aux risques résultant de catastrophes naturelles et identifiés au moment de l'élaboration des plans d'aménagement et d'urbanisme. Mais auparavant, la loi n°89-26 du 31 décembre 1990, portant loi de finance pour 1990 a mis en place le Fonds de calamités naturelles et des risques technologiques majeurs. Plus tard, viendra la loi 03-10 du 13 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable et ensuite, la loi 04-20 du 25 décembre 2004⁴⁶ relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Cette dernière loi est la plus importante en la matière car elle est entièrement consacrée aux risques majeurs ; son article 2 définit le risque majeur comme ceci : « *Est qualifié, au sens de la présente loi, de risque majeur toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels, exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines.* ». Tout en énonçant des prescriptions générales, elle prévoit aussi des prescriptions particulières à chaque risque majeur. L'article 3 de cette loi précise : « *Relèvent de la prévention des risques majeurs, la définition et la mise en œuvre de procédures et de règles visant à limiter la vulnérabilité des hommes et des biens aux aléas naturels....* ».

Dans la même loi n° 04-20 du 25/12/2004, l'article 6 stipule que les règles de prévention des risques majeurs et de la gestion des catastrophes visent à prévenir et prendre en charge les effets des risque majeurs sur les établissements humains, leurs activités et leur environnement dans un objectif de préservation, de sécurisation et de développement. Son article 7 développe les objectifs visés par le système de prévention des risques majeurs et de gestion de catastrophes, il s'agit de ;

⁴⁵ Loi n° 01-20 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire. Source : Journal officiel de la république algérienne n°84.

⁴⁶ Loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25/12/2004 relative la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

- l'amélioration de la connaissance des risques, le renforcement de leur surveillance et de leur prévision ainsi que le développement de l'information préventive sur ces risques ;
- la prise en compte des risques dans l'utilisation des sols, et dans la construction ainsi que la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens aux aléas ;
- la mise en place de dispositifs ayant pour objectif la prise en charge cohérente, intégré et adaptée de toute catastrophe d'origine naturelle ou technologique.

En matière de prévention des aléas climatique, il a été prévu l'établissement d'un plan général de prévention des aléas climatiques dont le rôle est défini par l'article 27 de la loi 04-20 (du 25/12/2004). Ce plan vise à déterminer les zones exposées, les modalités de veille pour l'observation de l'évolution des aléas climatiques, les seuils, conditions et procédures de déclenchement des pré-alertes et des alertes pour chacun de ces aléas, ainsi que les procédures de suspension des alertes, et enfin les mesures de prévention applicables lors d'une alerte ou pré-alerte.

Une autre initiative entreprise par le gouvernement concerne la création d'un fonds spécial de développement des régions du Sud par le décret exécutif n° 06-485⁴⁷ qui a été modifié et complété par le décret exécutif n° 11-291⁴⁸. Il consiste à doter les régions du sud algérien - dont la wilaya d'Adrar- d'un budget alloué annuellement dans le cadre du programme d'actions pour :

- le financement des opérations de développement, en accordant la priorité aux projets structurants ;
- le financement temporaire du programme spécial de développement des wilayas du Sud ;
- le financement de la réduction de la facture de l'électricité à concurrence de 50% au profit des ménages et des agriculteurs.

Ces financements sont effectués par les ministres et les walis concernés pour les projets inscrits à leur indicatif. Or, ce qui est déplorable est que ces financements ne peuvent pas profiter à des programmes de lutte contre l'ensablement car tout simplement ces derniers ne sont pas encore à l'ordre du jour. Une seule action mérite une reconnaissance, il s'agit du

⁴⁷ Décret exécutif n° 06-485 du 23 décembre 2006 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spéciale n° 302-089 intitulé : « fonds spécial de développement des régions du Sud ».

⁴⁸ Décret exécutif n° 11-291 du 18 août 2011 modifiant et complétant le décret exécutif n° 06-485.

projet intitulé « Appui au renforcement des capacités locales pour un développement durable » initié en juillet 2005 par la daïra de Charouine en collaboration avec les agences du système des Nations unies (PNUD⁴⁹, FNUAP⁵⁰, UNICEF⁵¹) dans le cadre du programme de développement de la ville de Charouine pour une durée de 03 années puis il a été prolongé jusqu'à décembre 2012.

Ce projet a été mis en place suite à l'expérience du projet pilote « *Développement Communautaire dans le Sud* » conduit à Ouled Saïd, dans la Daïra voisine de Timimoun. Le projet vise à appuyer les autorités et les populations locales dans le but de renforcer leurs capacités et améliorer leur gestion du développement, en créant des opportunités économiques durables et en ouvrant l'accès aux services de base. Un des enjeux majeurs de ce projet est d'impliquer les catégories particulières de population que sont les femmes et les jeunes afin de les faire participer activement au processus de développement de leur région.

Parmi les objectifs majeurs visés par le projet, le 1^{er} objectif a retenu toute notre attention, il porte sur « le désenclavement de la région et la lutte contre l'ensablement », et vise la protection de l'écosystème oasien avec l'élaboration d'une carte de l'ensablement de la daïra de Charouine. La carte d'ensablement, ce document auquel nous avons eu accès lors de notre visite à la daïra de Charouine a été élaboré par le bureau d'étude BERGAM⁵² dirigé par Mr Bellatrach géographe de formation qui nous a accordé une audience au sein de son cabinet afin de répondre à nos interrogations sur quelques aspects de ce projet.

En effet, les résultats de ce projet sont forts appréciables en matière de lutte contre l'ensablement dans la commune de Charouine et mérite d'être généralisés à d'autres régions. Un ensemble de techniques et de méthodes est proposé, la carte d'ensablement donne un aperçu sur la nature des dunes présentes dans la commune et leur dynamique. En revanche, le souci, est que l'étude n'a pas pris en considération les mouvements allochtones d'ensablement qui prennent leur naissance de sources lointaines de la région de Charouine. Ainsi l'ensemble de méthodes proposées sont de l'ordre technique et se résume à des techniques de quadrillage et de blocage des dunes pour protéger des constructions et aménagements qui sont déjà en place ; or une politique durable de lutte contre l'ensablement nécessite une vision plus globale

⁴⁹ Le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD), fait partie des programmes et fonds de l'ONU. Son rôle est d'aider les pays en développement en leur fournissant des conseils mais également en plaidant leurs causes pour l'octroi de dons.

⁵⁰ FNUAP : Fonds des Nations Unies pour la population. Site-web : <http://www.unfpa.org/>

⁵¹ UNICEF : Fonds des Nations unies pour l'enfance. Site-web: <http://www.unicef.org/>

⁵² BERGAM : Bureau d'Etude de Recherche en Géomorphologie et Aménagement, sis à Cheraga, Alger.

et plus anticipative qui découle de la planification et qui pourra prendre en charge des aménagements futurs dans la région.

b. Dans les documents d'urbanisme - SNAT (horizon 2030)

Sur les quatorze risques majeurs identifiés par l'ONU, l'Algérie en compte dix, à savoir ; les séismes et risques géologiques, les inondations, les risques climatiques, les risques radiologiques et nucléaires, les feux de forêts, les risques industriels et énergétiques, les risques portant sur la santé humaine, les risques portant sur la santé animale et végétale, les pollutions atmosphériques, telluriques, marines ou hydriques, les catastrophes dues à des regroupements humains importants. (SNAT 2030, p.12). Ces conditions géologiques et climatiques se conjuguent pour faire de l'Algérie, une « terre à risques ».

Dans le sud de l'Algérie, le milieu oasien est menacé sous l'effet de plusieurs facteurs liés à la pression anthropique et naturelle parmi lesquels se distinguent : l'ensablement, la salinisation, la remontée des eaux, l'utilisation excessive de l'eau, les grandes mises en valeur agricoles, la démographie croissante et l'urbanisation accélérée nécessite une attention particulière. Ces facteurs sont ceux qui conditionnent l'occupation du territoire dans ces contrées reculées du pays et les décideurs en sont conscients car en page 13 du SNAT on relève cette phrase :

« Les oasis doivent servir d'assise à la relance économique des espaces du Sud car, bien que menacées, elles présentent un grand potentiel de développement : mines, hydrocarbures, agriculture, tourisme, énergies naturelles, échanges transfrontaliers ».

Des recommandations ont été émises dans ce sens au niveau du SNAT (p.11), sur la prise en considération de la vulnérabilité aux risques majeurs, naturels et industriels, au niveau de toute urbanisation. Ainsi, toute urbanisation croissante ne prenant pas en compte ces risques, est considérée comme susceptible d'accroître les conséquences néfastes en cas de catastrophe.

Le SNAT définit quelques objectifs en termes de protection et de valorisation du système oasien que nous résumons dans les points suivants :

- ✓ développement et promotion des techniques traditionnelles d'économie d'eau, réutilisation des eaux usées épurées ainsi que les eaux de drainage pour l'irrigation,

- ✓ gestion des problèmes de remontée des eaux, protection des villes contre les inondations,
- ✓ lutte contre l'ensablement des zones menacées par la réalisation de ceintures vertes, introduction des espèces adaptées au stress hydrique en milieu aride,
- ✓ utilisation de l'énergie renouvelable pour les besoins domestiques et les activités de traitement des eaux usées, promotion et développement de l'utilisation des énergies renouvelables,
- ✓ valorisation des petits élevages en milieu oasien,
- ✓ réhabilitation des *ksour* et des habitats traditionnels.

Les décideurs et services d'aménagement envisagent de mettre en œuvre une politique d'aménagement du territoire permettant de prévenir les risques majeurs et d'en limiter les effets. La prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, constitue un système global qui doit être conduit par l'Etat, et mis en œuvre par les institutions publiques et les collectivités territoriales dans le cadre de leurs compétences respectives, en concertation avec les opérateurs économiques, sociaux et scientifiques, et en associant les citoyens dans les conditions définies par la loi et ses textes d'application (PAT4-SNAT p.48).

Afin d'atteindre ces objectifs quelques stratégies ont été adoptées à savoir :

- Identifier et prévenir les risques majeurs, naturels et industriels,
- Renforcer les capacités techniques et de mise en œuvre de la prévention des risques,
- Mettre en place une politique de formation et de sensibilisation à la prévention et à la gestion des risques.

Le programme d'action esquissé regroupe les pistes suivantes :

1. limitation et contrôle de l'urbanisation dans les zones à risque,
2. plan d'atténuation et d'adaptation au risque climatique.
3. assistance technique, sensibilisation et mobilisation des acteurs

Il s'agit d'appuyer les collectivités locales dans la réalisation de plans de prévention des risques et des documents d'urbanisme afin d'identifier l'ensemble des risques et de prendre les mesures afférentes pour réduire l'exposition aux risques et leurs impacts. Il s'agit plus largement de sensibiliser l'ensemble des acteurs susceptibles de participer à la prévention des risques et de leur fournir les outils nécessaires. Cet appui peut se traduire par :

- un programme de formation pour développer des compétences au niveau national permettant de prévenir et de gérer les risques majeurs. Ce programme s'adresse aussi bien aux collectivités locales qu'aux autres acteurs concernés : entrepreneurs, maîtres d'ouvrage privés etc.
- la mise en place de l'Agence de prévention des risques majeurs veillant à l'application de la stratégie nationale en matière de prévention et de réduction de la vulnérabilité du territoire, assurant la formation en la matière, constituant un centre de ressources techniques et assistant les collectivités locales dans sa mise en œuvre opérationnelle des mesures de prévention.

Enfin, un dernier point ;

4. Systématiser les plans de prévention des risques, les intégrer dans les documents d'urbanisme avec des normes parasismiques.

Les plans de prévention des risques naturels et industriels sont mis en place et leurs prescriptions spécifiées dans les documents d'orientation, de planification et d'urbanisme. Des cartes de micro-zonage sismique et les prescriptions afférentes sont par exemple réalisées dans les plans locaux d'urbanisme. La mise en œuvre effective des mesures de prévention est promue et vérifiée.

La loi portant sur la prévention des risques et la gestion des catastrophes est mise en œuvre et les plans relatifs à la prévention et à la réduction des risques majeurs à établir sont : Plans Généraux de Prévention (PGP), Plans d'Exposition aux Risques (PER), Plans Particuliers d'Intervention (PPI), Plans d'Organisation Interne de l'entreprise (POI)

Ces plans seront complétés par quelques prescriptions dans les documents d'urbanisme (PDAU et POS), tel que :

- des prescriptions d'urbanisme particulières pour les espaces bâtis ou à urbaniser (zones non aedificandi, zones soumises à prescriptions spéciales, application de normes particulières dans la construction etc.),
- des zones d'extension urbaine situées autant que possible hors des zones vulnérables,
- des études géotechniques et de micro-zonage complémentaires permettant de limiter l'exposition aux risques sismiques, géologiques, industriels, inondations, ...

Nous constatons qu'à l'encontre de l'ensemble des risques naturels que l'on peut recenser en Algérie, seulement le risque sismique a été pris en considération jusqu'à ce jour, et ce, à travers la définition et la mise en œuvre de normes parasismiques pour les constructions. Par

ailleurs, l'article 27 de la loi n° 04-20 du 25/12/2004, dénombre parmi les aléas climatiques pouvant engendrer un risque majeur ; la désertification et les vents de sable. Alors même si le terme proprement dit « ensablement » n'est pas cité, néanmoins les manifestations et conséquences d'un tel phénomène sont implicites dans les deux phénomènes. En revanche, ce détail montre quelque part à quel point le phénomène d'ensablement est méconnu ou confondu avec d'autres, chez le législateur et les décideurs.

Cette présente recherche porte en soi une sensibilisation aux décideurs et acteurs d'aménagements vis-à-vis du phénomène d'ensablement à travers la mise en exergue des risques et catastrophes encourues ces dernières décennies par le phénomène et qui pèsent sur la région de Gourara et ses environs. Nous souhaitons que l'initiative engagée et aboutie vis-à-vis du risque sismique soit reproduite pour celui d'ensablement, et tant d'autres risques naturels issus du dérèglement climatique tels que les inondations dont les bilans (humain, matériel, écologique...etc.) sont très lourds depuis quelques années (Bâb El Oued 2001 et 2013, Ghardaïa 2008, Biskra 2011).

3.3. Conclusion : Positionnement et Objectifs

Les éléments que nous avons mis en lumière jusqu'ici permettent d'appréhender en partie les structures et les processus qui forgent les spécificités du dynamisme des territoires sahariens en Algérie. Ces derniers sont caractérisés depuis deux décennies par l'émergence de tensions prégnantes qui remettent parfois sérieusement en cause les politiques d'aménagement menées depuis l'indépendance.

Sans tomber dans une lecture trop alarmiste des faits, il est possible de considérer que les politiques d'aménagement et de gestion territoriale ont parfois souffert d'inadaptations aux conditions et aux réalités locales de la région. La loi n° 04-20 du 25/12/2004 représente un bon départ en termes de lutte contre les risques naturels, mais qui malheureusement n'a connu aucune suite en ce qui concerne les textes d'application. Le rapport (M.A.T.E., 2010) établit un bilan relativement critique de la gouvernance en matière d'aménagement du territoire en Algérie face aux risques majeurs en général. Par ailleurs, la notion du risque d'ensablement demeure jusqu'à présent méconnue et totalement absente en matière de planification. Aucune mesure proprement dite de prévention ou de protection contre ce risque n'a été soulevée que ce soit dans les textes et lois relatif à l'aménagement et la planification ou dans les instruments d'urbanisme.

Devant la montée de l'urbanisation du Sahara et la recrudescence du phénomène d'ensablement, l'Etat algérien se doit d'engager seul ou en partenariat international⁵³ des actions de prévention, d'anticipation, de prospective et de gestion des risques majeurs en général et celui de l'ensablement en particulier, car méconnu jusqu'à présent. Les décideurs et acteurs d'aménagement se doit d'intégrer ces actions dans les différentes politiques qu'il élabore et qu'il met en œuvre dans le temps et dans l'espace.

L'originalité de certains territoires, nommés « espaces fragiles » -car exposés aux risques majeurs- dans la terminologie du S.N.A.T., mérite d'entreprendre des actions qui permettent de pallier aux difficultés spécifiques. L'intensité de leurs problèmes empêche les acteurs de s'en remettre au fonctionnement spontané du marché ou à des politiques très éloignées qui ne prennent pas en compte leurs spécificités.

En tant qu'architectes-urbanistes, le territoire, la forme urbaine et l'architecture des bâtiments, constituent pour nous les principaux outils d'action pour mettre en place une politique d'aménagement qui doit satisfaire aux règles de sécurité associant aussi bien la prévention des risques naturels que la protection de l'environnement. « *Les villes constituent une échelle d'action clé pour répondre aux défis des changements climatiques par des mesures d'adaptation et d'atténuation* » (Moser, et al., 2007).

Notre objectif serait ainsi d'accompagner une politique de planification qui intègre la réponse à long terme aux effets possibles de l'aléa d'ensablement dans l'aménagement des zones menacées. En ce sens, notre présente recherche se veut une contribution à l'élaboration d'un modèle d'adaptation de la ville saharienne au phénomène d'ensablement. Elle vise à établir un plan de prévention et de protection de l'aléa d'ensablement en fournissant sous forme d'orientations un ensemble de règles, de rapports architecturaux et urbanistiques d'aménagement et des prescriptions spécifiques pour leur application dans les régions arides de l'Algérie où le phénomène d'ensablement abonde.

⁵³ Un partenariat international peut être multiplié sous forme de conventions comme ça été le cas avec le projet « Appui au renforcement des capacités locales pour un développement durable » initié en 2005 entre la Daïra de Charouine et le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement).

PARTIE II : CADRE METHODOLOGIQUE

4. CHAPITRE IV : AERAULIQUE ET AERODYNAMIQUE

4.1. Les mouvements de l'air dans la couche atmosphérique : notions de base

L'air qui constitue l'atmosphère terrestre est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, constitué à 99% par de l'oxygène et de l'azote. On le trouve concentré dans les basses couches de l'atmosphère, principalement dans la troposphère qui est une couche d'une dizaine de kilomètres d'épaisseur dont la limite inférieure est le sol et la limite supérieure la tropopause. Dans cette région, le déplacement de l'air vis à vis de la surface terrestre, appelé vent, résulte de l'équilibre entre les forces de pression, la force de Coriolis⁵⁴ et les forces de frottement.

D'après Sacré (1995) ;

- Les forces de pression sont à l'origine du déplacement des masses d'air constituant le vent. Elles proviennent des inhomogénéités de pression dues à l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Elles sont perpendiculaires aux surfaces isobares⁵⁵ et dirigées des hautes pressions vers les basses pressions.
- La force déviatrice de Coriolis est perpendiculaire à la vitesse du vent, orientée vers sa droite dans l'hémisphère nord, et provient de la rotation de la terre autour de ses pôles. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.
- Les forces de frottement traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol. Leur action se fait ressentir très près du sol dans une zone appelée la couche limite atmosphérique (CLA).

On divise ainsi schématiquement les basses couches de l'atmosphère en deux parties distinctes :

- La CLA, près de la surface terrestre où la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et donne naissance à une forte agitation, appelée turbulence.
- L'atmosphère libre, sous l'action des forces de pression et de Coriolis, le vent (dit géostrophique) est uniforme, horizontal, très peu turbulent et sa vitesse (dite de gradient) est constante.

⁵⁴ En climatologie la force de Coriolis est une force inertielle agissant perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu lui-même en rotation uniforme. En générale cette force est due à la rotation de la terre.

⁵⁵ En climatologie les isobares sont des lignes fictives reliant les points ayant la même pression.

4.1.1. Echelles des mouvements atmosphériques

L'écoulement de l'air atmosphérique est constitué d'une large gamme d'écoulements interdépendants caractérisés par des tailles allant du millimètre au millier de kilomètres. Chaque phénomène atmosphérique est identifié par son extension horizontale et par sa durée de vie (ces deux paramètres sont fortement corrélés) (Ali-Toudert, 2000).

- Les mouvements à grandes échelles (échelles synoptiques ou planétaires) ont une taille supérieure à la centaine de kilomètres et ont une durée de vie de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines. Ils contribuent à la circulation à l'échelle planétaire et sont responsables des tendances météorologiques à long terme.
- Les mouvements à petites échelles ont une taille inférieure au kilomètre et ont une durée de vie de quelques minutes au maximum (micro-échelles). Ils sont liés à la turbulence et sont générés, dans la couche limite atmosphérique, par la présence d'obstacles ou par la rugosité des sols.
- Des mouvements de tailles intermédiaires (mésos-échelles) assurent la transition entre les précédents. Notons qu'entre les petites et les mésos-échelles, on distingue parfois des échelles dites Sub-mésos.

Le tableau 3 donne une correspondance approximative entre la taille moyenne des mouvements atmosphériques, les périodes qui leur sont associées et les échelles d'Orlanski (Orlanski, 1975).

Tableau 3: Echelles des mouvements atmosphériques d'après (Atkinson, 1995, p.3).

Taille (km)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4
Période	1s	10s	1mn	10mn	2h	15h	7j	70j
Echelles	micro-échelles			meso-échelles		grandes échelles		
Echelles d'Orlanski	micro γ	micro β	micro α	meso γ	meso β	meso α	macro α et β	

Les échelles d'Orlanski sont utilisées comme référence par trois principales disciplines qui étudient les mouvements de l'air atmosphérique. Ces disciplines sont :

- La climatologie, qui s'intéresse aux particularités des grands mouvements atmosphériques en fonction des régions du globe et des saisons (Sacré, 1995).
- La météorologie, qui s'occupe du suivi et de l'évolution des masses d'air sur des régions données (Holton, 1979).
- La micro-météorologie, qui traite de la structure détaillée des phénomènes atmosphériques au voisinage du sol (Poggi, 1977).

Pour ce qui est des effets aérodynamiques, objet de notre présente recherche, seule donc la micro-météorologie est capable de fournir des informations pertinentes concernant la structure des mouvements de petites échelles (micro-échelles) tel que les manifestations aérodynamiques résultantes de l'interaction du vent avec les obstacles.

4.1.2. La couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique est la partie de l'atmosphère, fortement turbulente, située juste au-dessus de la surface terrestre. Dans cette région, à l'échelle micro-météorologique, le vent est un écoulement d'air turbulent constitué de tourbillons de tailles différentes, emportés par le mouvement d'ensemble. La vitesse d'un vent dont l'écoulement est turbulent se constitue d'une partie moyenne, déterministe, et d'une partie turbulente, aléatoire. Seules des mesures sur site permettront de déterminer de façon précise toutes les caractéristiques des composantes de la vitesse du vent en un endroit donné. Pour exprimer ces caractéristiques, on dispose aussi d'une échelle Beaufort et d'expressions empiriques qui peuvent donner de bonnes estimations sur un grand nombre de sites peu complexes (Turbelin, 2000).

L'étude de couche de l'atmosphère a fait l'objet de nombreuses publications (Stull, 1988)⁵⁶ et (Garratt 1992)⁵⁷. En résumé, son épaisseur, notée (δ), varie de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols, de l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée. Enfin, elle est constituée de trois parties distinctes :

- La couche d'Ekman.
- La couche de surface.
- La sous couche rugueuse.

⁵⁶ Cité dans Turbelin (2000, p.10)

⁵⁷ Ibid.

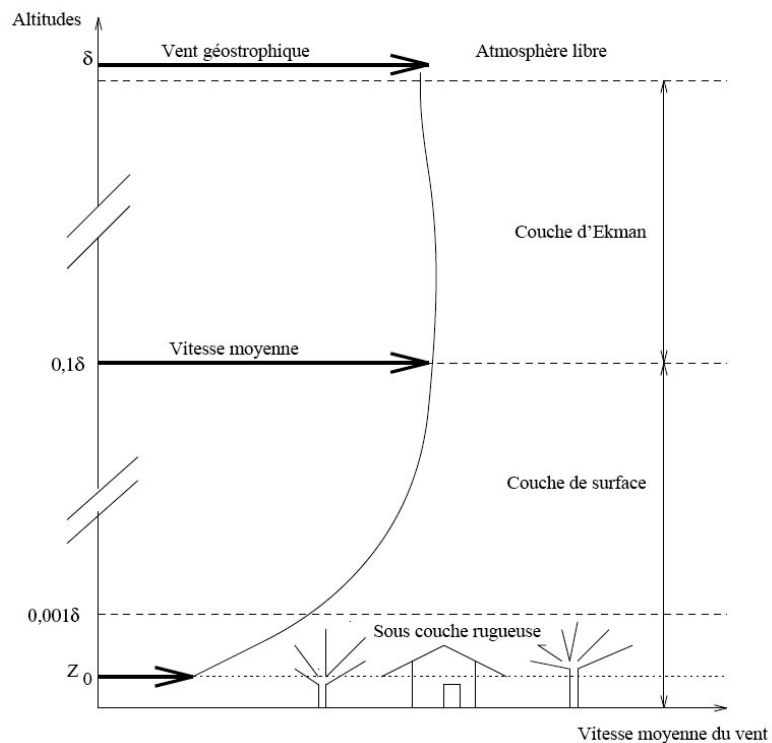


Figure 38: Représentation schématique des bases couches troposphériques et profil de vitesse selon les différentes couches. Turbelin (2000).

- h représente la hauteur de la couche limite atmosphérique et z_0 la longueur de rugosité.

Chacune de ces parties possède ses propres caractéristiques :

- La couche d'Ekman : La partie supérieure de la CLA est appelée la couche d'Ekman. Dans cette région, la structure du vent est influencée à la fois par le frottement de l'air sur la surface terrestre, par la stratification thermique de l'air et par la force de Coriolis. Avec l'altitude, les effets du frottement au sol deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, la direction du vent subit une rotation et atteint à son sommet celle du vent géostrophique.
- La couche de surface : Cette couche est la partie de la CLA directement en contact avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis sont négligeables, la direction du vent est constante, et la structure du vent est uniquement déterminée par les effets dynamiques engendrés par le sol et par la stratification thermique de l'air.
- La sous-couche rugueuse : La partie inférieure de la couche de surface, située juste au-

dessus de la surface terrestre, est la sous-couche rugueuse. L'épaisseur de cette zone varie de quelques dixièmes de millimètres (en mer) à quelques dizaines de mètres (dans les zones fortement urbanisées). Dans cette couche, qui contient les éléments de rugosité, l'écoulement de l'air est fortement turbulent, non homogène et instationnaire. Puisqu'il est impossible d'en proposer une modélisation universelle, on la caractérise par une rugosité globale, notée Z_0 , homogène à une longueur. Cette dernière est fonction de la taille, de la forme et de la densité des obstacles qui recouvrent le sol. Les sites homogènes de grande extension horizontale sont classés en cinq catégories de rugosité que l'on développera ci-après.

4.1.3. Structure du vent

Dans la couche limite atmosphérique, le vent est un écoulement d'air dont la vitesse, en un point donné de l'espace, présente de fortes variations plus ou moins irrégulières d'amplitudes et de fréquences différentes. Une analyse spectrale de (Van der Hoven, 1957)⁵⁸, présentée ci-dessous montre l'étendue des échelles de ces fluctuations. Fig.39

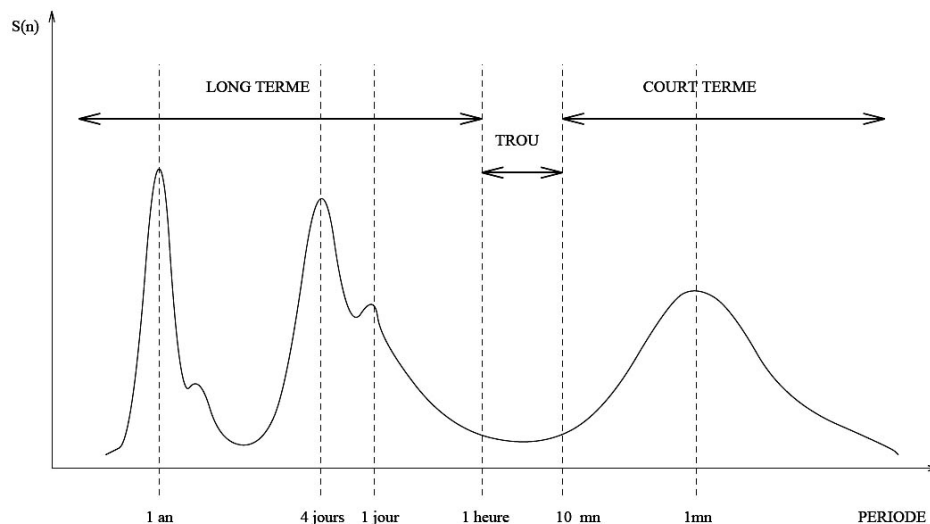


Figure 39: Spectre de Van der Hoven – 1957. Source : Turbelin, (2000).

- Pour les basses fréquences (variations à long terme), l'énergie est principalement concentrée près des périodes d'une année (variations saisonnières, cycle annuel du climat), quatre jours (variations climatiques associées aux perturbations qui traversent une région donnée) et 24

⁵⁸ Cité dans Turbelin (2000, p.12).

heures (variations journalières, phénomènes thermiques jour-nuit). Comme nous l'avons déjà précisé, ces périodes supérieures à une heure correspondent à des mouvements atmosphériques de larges amplitudes (grandes et méso-échelles).

- Pour les périodes comprises entre 10 minutes et 1 heure, on observe un « trou » d'énergie. C'est un laps de temps qui n'appartient ni aux variations de court terme ni à celles de long terme, voir Tab.3. Il ne peut relever aucune mesure explicite.
- Pour les fréquences plus élevées (variations à court terme), l'énergie est concentrée autour de périodes de l'ordre de la minute. Si on se rapporte au tableau 3, ces périodes sont celles de la micro-turbulence générée par la rugosité des sols. A cette échelle, le vent est un écoulement d'air turbulent, constitué d'une multitude de tourbillons appelés « eddies » en anglais, de tailles différentes, emportés par le mouvement d'ensemble. (Hunt, 1992)⁵⁹.

La vitesse instantanée du vent reflète sa nature turbulente. Elle se décompose en deux parties :

- Vitesse moyenne : La vitesse moyenne est une quantité déterministe qui traduit la force du vent en un point de l'espace. Elle varie avec la hauteur, la rugosité du sol, la topographie du site. Dans la pratique elle se mesure à l'aide d'un anémomètre, sur des périodes de temps qui varient entre 10 minutes et une heure (pour que le résultat ne soit sensible ni aux fluctuations lentes ni aux variations rapides du vent). A défaut d'anémomètre, il est possible d'estimer la vitesse du vent à l'aide de la méthode de recalage climatique qui consiste à transposer ou de « recalcr » la vitesse moyenne du vent $U_{météo}$ obtenue à la station météo à une valeur correspondante U_{site} aux abords du site d'étude suivant l'équation (3) (Gandemer et al., 1981).

$$U_{site} = k_c \cdot U_{météo} \quad Eq. (3)$$

Où ; k_c est le coefficient de recalage climatique, les vitesses $U_{météo}$ et U_{site} sont évaluées à une hauteur $Z=10$ m par rapport au sol.

- Vitesse fluctuante (ou turbulente) aléatoire : La partie fluctuante de la vitesse du vent, appelée vitesse de rafale, est une fonction aléatoire qui représente les fluctuations turbulentes de la vitesse autour de sa moyenne. Ces fluctuations sont décrites statistiquement (écarts types, densités spectrales).

4.2. Le vent comme phénomène physique

⁵⁹ Cité dans Turbelin (2000, p.13).

4.2.1. Le vent comme fluide

Par définition, les fluides sont des substances qui se déforment facilement lorsqu'elles sont soumises à des forces de cisaillement (Aynsley et al, 1977). La densité et la viscosité sont les deux propriétés les plus importantes des fluides. La densité représente simplement le rapport entre la masse volumique du fluide et celle de l'eau (exprimées en kg/m³). Quant à la viscosité, elle est proportionnelle à la résistance que le fluide oppose au cisaillement. Pour les fluides newtoniens (air, eau...etc.), le coefficient de viscosité (α) représente le rapport entre la contrainte de cisaillement ($\delta = F/A$) et le taux de cisaillement ($\dot{\gamma} = \Delta U/\Delta x$). Ce coefficient est exprimé en Ns/m². La viscosité joue un rôle important dans la stabilité des écoulements laminaires et de la couche limite. Fig.40

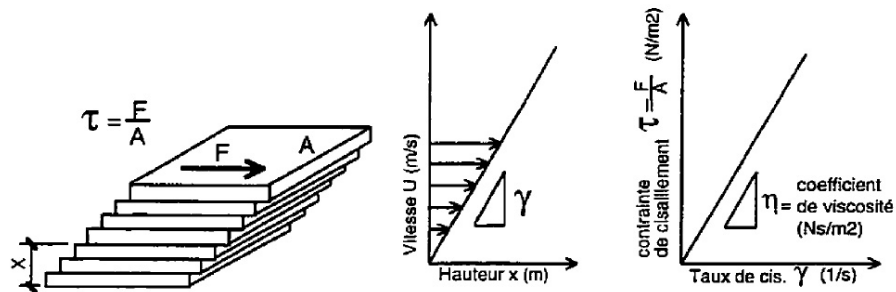


Figure 40: Détermination du coefficient de viscosité pour un fluide newtonien soumis à un écoulement laminaire. Source : Aynsley et al, (1977).

L'écoulement d'un fluide peut être décrit par une série de lignes de courant qui suivent la trajectoire des particules. Les écoulements peuvent être divisés en différentes catégories : turbulents ou laminaires, permanents ou non permanent, uniformes ou non uniformes, rotationnels ou non rotationnels, fluviaux ou torrentiels. Ces catégories sont importantes car le comportement d'un fluide est fortement déterminé par le type d'écoulement qui y prévaut. Nous avons tentés de définir en détail chacune de ces catégories ci-dessous :

4.2.2. Propriétés et types d'écoulement

a. Écoulement laminaire, turbulent et mixte

L'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Cette distinction est certainement la plus élémentaire. Dans un écoulement laminaire, le fluide est formé de minces couches qui glissent les unes sur les autres (fig.41). Dans de tels écoulements, la viscosité du fluide est suffisamment élevée pour prévenir tout échange de matière entre deux couches voisines (Graf et Altinakar, 2000).

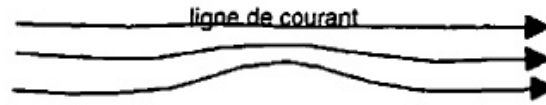


Figure 41: Illustration des lignes de courant pour un écoulement laminaire.

Dans les écoulements turbulents, il n'existe pas de couches bien définies ; la trajectoire des particules est tourmentée et erratique. Le fluide se déplace sous forme de tourbillons de taille, de fréquences et de vitesses variés. (fig.42). Le vent est un écoulement turbulent dont la vitesse moyenne et le niveau de turbulence varient avec la hauteur (Gandemer et Guyot, 1976).



Figure 42: Deux lignes de courant dans un écoulement turbulent.

Dans un milieu construit « urbain » par exemple, ce sont les écoulements turbulents que l'on rencontre le plus couramment et que l'on peut distinguer selon deux types de turbulence à savoir : la turbulence de paroi (ou de frottement) et la turbulence libre.

La turbulence de paroi est générée par les forces de frottement contre une paroi solide comme l'écoulement près du fond d'une chute, par exemple. Quant à la turbulence libre, elle résulte de couches de vitesses différentes comme dans l'écoulement d'un jet ou dans le sillage derrière un obstacle. Ces deux types de turbulence sont générés lorsque le vent contourne un obstacle.

a. Écoulements permanents et non permanents, uniformes et non uniformes, rotationnels (tourbillonnaires) et non rotationnels

Un écoulement est dit permanent lorsque les conditions en un point du fluide demeurent constantes dans le temps. Par opposition, l'écoulement est dit non permanent lorsque, en un point donné, les conditions varient avec le temps. De même, un écoulement est dit uniforme lorsque le vecteur de vitesse est identique en tout point du fluide, en grandeur et en direction. L'écoulement est donc non uniforme lorsque le vecteur de vitesse varie d'un endroit à l'autre à un instant donné. Un écoulement tourbillonnaire, ou vortex, se produit lorsque les particules de fluide dans une région donnée subissent un mouvement de rotation autour d'un axe. Dans

l'écoulement non rotationnel, aucune rotation ne se produit. Le vent est ainsi un écoulement non uniforme, non permanent et tourbillonnaire (Hassan, 1974)⁶⁰.

b. Relation entre la vitesse et la pression (loi de Bernoulli)

La loi de Bernoulli demeure une expression extrêmement importante pour l'écoulement des fluides. Elle est basée sur le principe de conservation de l'énergie⁶¹ et, en l'absence de frottement, elle s'exprime de la façon suivante :

$$\rho \cdot g \cdot z + \frac{\rho}{2} \cdot U^2 + P = \text{constante} \quad \text{Eq. (4)}$$

Où ;

P est la pression exercée en un point quelconque du fluide exprimée en (N/m²) ou (Pa) ;

ρ , sa masse volumique en (kg/m³) ;

U, sa vitesse de l'air en (m/s) ;

g, est la gravité terrestre (9.81 m/s²) ;

z est le dénivelé vertical du conduit en (m).

Le premier et le second terme de l'équation (4) représentent respectivement l'énergie potentielle (ou pression de pesanteur) et l'énergie cinétique (ou pression cinétique) d'un volume élémentaire de fluide. Pour les écoulements éoliens, la constante de l'équation (4) est égale à la pression atmosphérique (approximativement 100 000 N/m² ou 100 KPa).

La loi de Bernoulli montre que, lors d'un écoulement, l'augmentation de la vitesse s'accompagne d'une chute de pression et vice versa. Ce sont les lignes de courant qui se resserrent pour laisser augmenter la vitesse de l'écoulement et diminuer automatiquement la pression. L'équation (4) ne s'applique qu'aux écoulements laminaires. Pour les écoulements turbulents on doit y ajouter un autre variable qui tient compte de l'énergie dissipée par la turbulence.

⁶⁰ Cité dans Dubois Marie-Claude (1998, p.34)

⁶¹ Principe de conservation de l'énergie : la somme des pressions et des énergies mécaniques par unité de volume est constante tout le long du tube de courant. Source : <http://www.mecaflux.com/Bernoulli.htm>

4.3. Comportement du vent autour d'un obstacle

Lorsque l'écoulement contourne un obstacle, il y a toujours formation d'une zone de surpression à l'amont et de dépression à l'aval de l'obstacle. Cette différence de pression provoque des survitesses et des tourbillons autour de l'obstacle (Gandemer et Guyot, 1976) qui, parce qu'ils obéissent aux lois de l'aérodynamique sont relativement prévisibles.

4.3.1. La couche limite de rugosité

Elle correspond à la région où la vitesse de l'écoulement est influencée par la présence d'une paroi et de sa rugosité (Fernandez et Lavigne, 2009). L'écoulement à l'intérieur d'une couche limite est laminaire. Cependant il est souvent turbulent au-dessus de cette couche limite (fig.43). Même lorsque l'écoulement est turbulent à l'intérieur de la couche limite, il subsiste toujours une mince couche laminaire tout près de la paroi. Cette couche est appelée couche visqueuse (Graf et Altinakar, 2000). L'épaisseur de la couche limite et les caractéristiques de l'écoulement dans cette couche sont fortement influencées par la rugosité de la paroi.

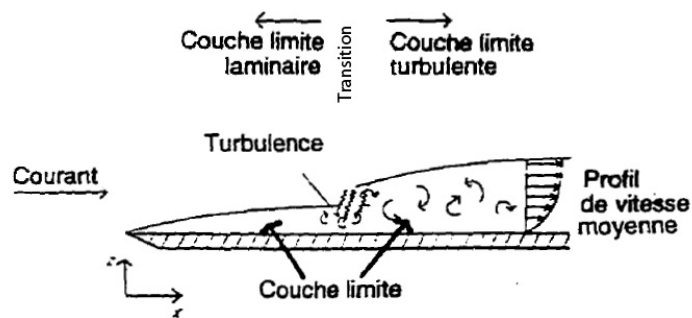


Figure 43 : Description schématique de la couche limite (Aynsley et al. 1977)

Près du sol le vent est un écoulement qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes. La nature et la taille des aspérités du terrain, qui constituent des rugosités variables (végétation, construction, etc.) induisent des forces de frottement qui réduisent la vitesse moyenne (U) du vent avec création d'une « agitation importante » ou turbulence. Localement, la vitesse du vent va varier en grandeur et direction. Cet écoulement turbulent du vent peut être décrit par la superposition d'une vitesse moyenne (U) sur une période (t) assez longue et d'une vitesse fluctuante en fonction du temps (Gandemer, 1979). Fig.44

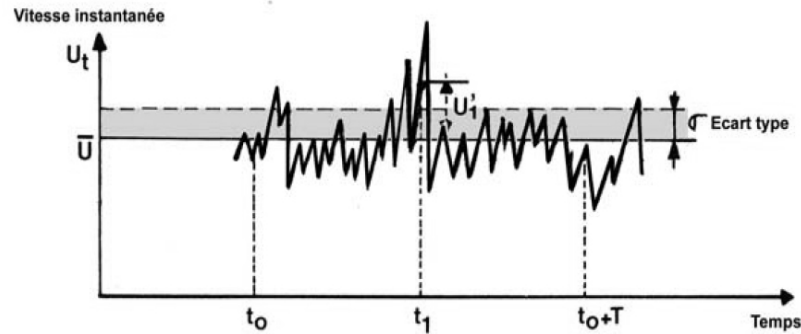


Figure 44: Ecoulement turbulent d'après Gandemer (1979).

La vitesse au temps t_1 vaut U_1 et s'écrit alors :

$$U_1 = \bar{U} + U'_1 \quad \text{Eq. (5)}$$

Avec ;

Δ est l'écart type de la turbulence, c'est-à-dire la dispersion de la vitesse autour de sa valeur moyenne (sur la période T) ;

U'_1 est la fluctuation de la vitesse de vent ;

La vitesse moyenne du vent U_z [m/s] varie avec la hauteur Z , la rugosité du sol et éventuellement la topographie des sites.

À l'intérieur de la couche limite de rugosité, la vitesse du vent contrairement à sa turbulence augmente avec la hauteur jusqu'à une certaine valeur appelée « hauteur du gradient de vitesse » qui varie entre 250 et 400m (Gandemer et al, 1976). L'épaisseur de la couche limite terrestre et les caractéristiques de l'écoulement dans cette couche sont fortement influencées par la rugosité du sol et de la stratification thermique des basses couches. C'est sur la base de la rugosité du sol que l'on distingue souvent trois grands types d'écoulement éolien : le type rase-campagne, forêt-banlieue et centre-ville (Beranek, 1984).

D'après (Fernandez & Lavigne 2009) le vent présente une vitesse instantanée très variable, avec des variations de vitesses que sont les turbulences, autour d'une vitesse moyenne qui évolue avec l'altitude. A partir d'une certaine hauteur Z_G au-dessus du sol, nommée couche limite, la vitesse moyenne du vent est constante U_0 et dans cette couche la vitesse moyenne U_z évolue approximativement selon la relation suivante :

- Pour $Z < Z_G$

$$\frac{U_Z}{U_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha \quad \text{Eq. (6)}$$

- Pour $Z > Z_G$

$$U_Z = U_G \quad \text{Eq. (7)}$$

Avec ;

U_Z : vitesse moyenne du vent à une hauteur Z

U_0 : vitesse moyenne de référence (obtenue dans la station de référence à une hauteur $Z=10\text{m}$)

Z_G : hauteur de la couche limite

U_G : gradient constant de la vitesse du vent

α : est une constante dépendant de la rugosité du site. Beranek (1984) définit α suivant les trois types de terrains comme illustré en tab.4 et fig.45.

Tableau 4: valeurs de α en fonction du type de terrain (Beranek, 1984).

Type de terrain	α	Z_G (m)
Grand centre urbain	0.40	500
Forêts, constructions basses	0.28	400
Zone plate (rase campagne)	0.14	250

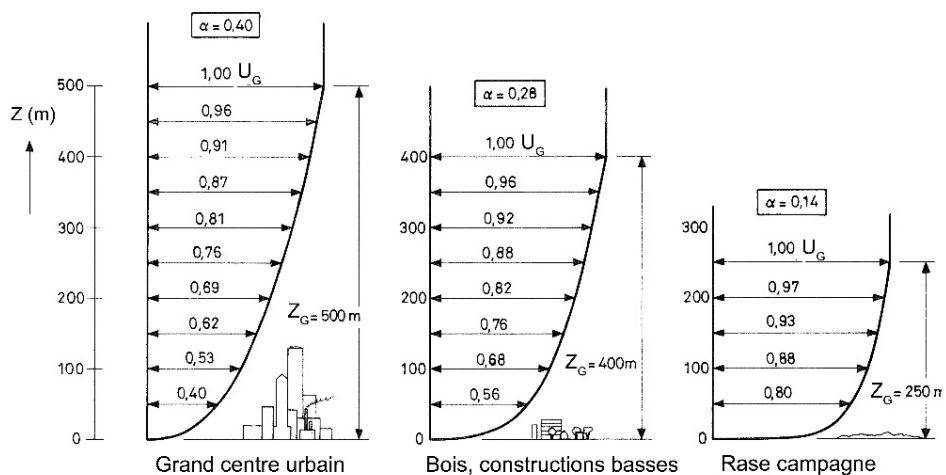


Figure 45: valeur de α et Z_G en fonction du type de terrain. (Beranek, 1984)

4.3.2. Mécanisme de l'écoulement autour d'un obstacle

L'écoulement d'un fluide autour d'un obstacle peut être divisé en trois régions distinctes : la zone d'écoulement libre, la zone de séparation (ou de cisaillement) et la zone de sillage (fig.46). L'écoulement libre se situe à l'extérieur de la zone d'influence de l'obstacle contrairement à la zone de sillage qui se situe tout près de l'obstacle et elle est caractérisée par un écoulement tourbillonnaire à basse vitesse. La zone de séparation (ou de cisaillement) quant à elle, correspond, à la couche limite qui se forme au contact de tout corps et elle marque la transition entre l'écoulement libre et la zone de sillage. Dans la zone de séparation, le taux de cisaillement est relativement élevé et le gradient de vitesse est important (Aynsley et al., 1977).

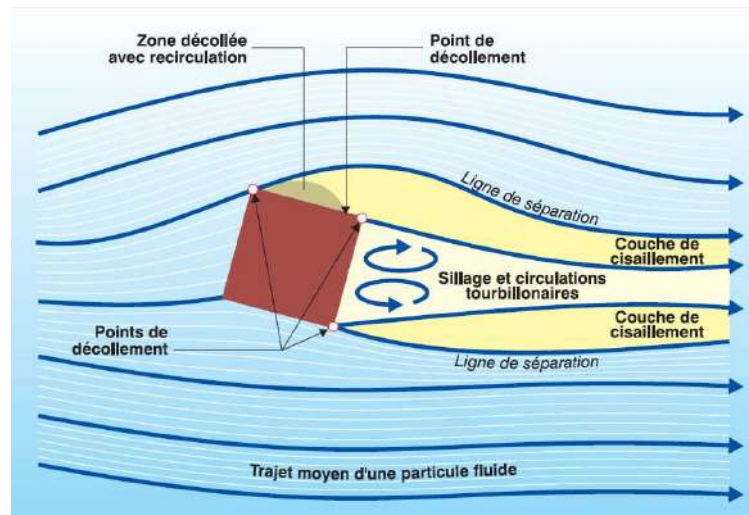


Figure 46: écoulement d'un fluide autour d'un obstacle. Source : Liebard & De-Herde, (2006).

Deux mécanismes se combinent pour créer des survitesses et des tourbillons autour d'un bâtiment. Le premier mécanisme est causé par la distribution inégale de la pression sur la façade exposée au vent. Puisque la pression dynamique du vent augmente avec la hauteur à l'intérieur de la couche limite (cette pression est proportionnelle au carré de la vitesse du vent), l'écoulement incident est aspiré vers le bas et forme un rouleau tourbillonnaire devant la façade exposée. Le fluide se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression (fig.47-a).

Le deuxième mécanisme est causé par l'adhérence de pression qui existe entre la façade exposée au vent, qui est une zone de haute pression, et la façade sous le vent, qui est une zone de basse pression. La trajectoire du vent est déviée, ce qui provoque des survitesses autour des

arêtes exposées et dans les ouvertures telles les arcades. Sous l'effet de la dépression, le vent est aussi aspiré derrière le bâtiment, ce qui engendre des tourbillons sur un plan horizontal (fig.47-b).

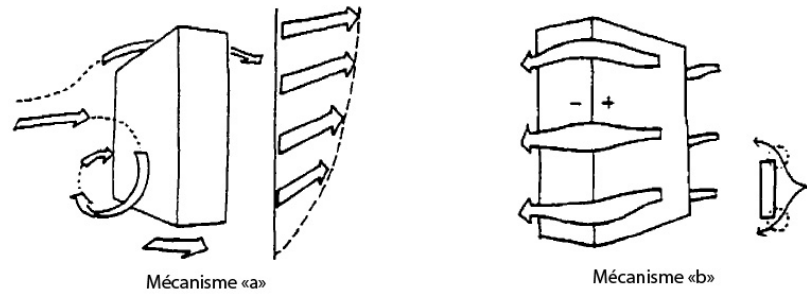


Figure 47: mécanismes (a) et (b) lors de l'écoulement du vent autour d'un bâtiment. (Gandemer et Guyot, 1976)

L'étendue des perturbations générées par la présence d'obstacle dépend de la géométrie du bâtiment en question. A chaque forme correspond une zone d'influence que Beranek (1984) définit comme étant déterminée par les dimensions relatives ou proportions du bâtiment. Certaines formes sont caractérisées par la dominance d'une dimension par rapport aux autres (respectivement longueur et hauteur). Fig.48

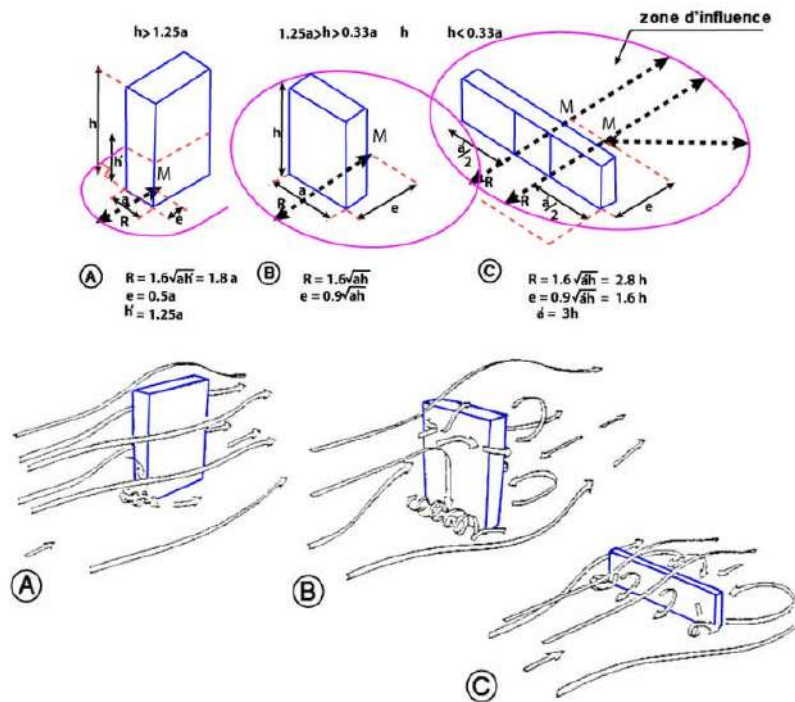


Figure 48: Impact de la forme du bâtiment sur l'écoulement d'air. (Beranek, 1984).

4.3.3. Géométrie de l'écoulement autour d'un obstacle : les effets aérodynamiques du bâtiment

Lorsqu'un vent incident rencontre dans son trajectoire un bâtiment (comme étant un corps isolé), il se forme un écoulement tridimensionnel. Globalement le flux incident est dévié dans les deux directions perpendiculaires au vent (Fig.49-a). L'écoulement sur la face frontale s'évacue non seulement sur les côtés et par-dessus du corps mais aussi vers le bas. A environ deux tiers de la hauteur du bâtiment, l'écoulement se stabilise (point R). Au-dessus de ce point, l'écoulement s'évacue par-dessus du bâtiment. En dessous, l'écoulement se dirige vers le bas jusqu'au sol. A ce niveau, soit au bas de la face, il possède plus d'énergie cinétique que celle de la vitesse du vent à cette même hauteur. De ce fait, cet écoulement peut alors souffler dans la direction opposée à celle du vent, il remonte jusqu'au point (T).

L'interaction entre ce flux descendant la face et le vent incident provoque un tourbillon au pied du bâtiment. Ce tourbillon se prolonge par entraînement sur les deux côtés du bâtiment. Vu en plan (Fig.49-b), l'air qui pénètre dans le tourbillon s'évacue sur les deux côtés du bâtiment prend la forme d'un fer à cheval. Ce tourbillon a une influence significative sur la répartition de pressions.

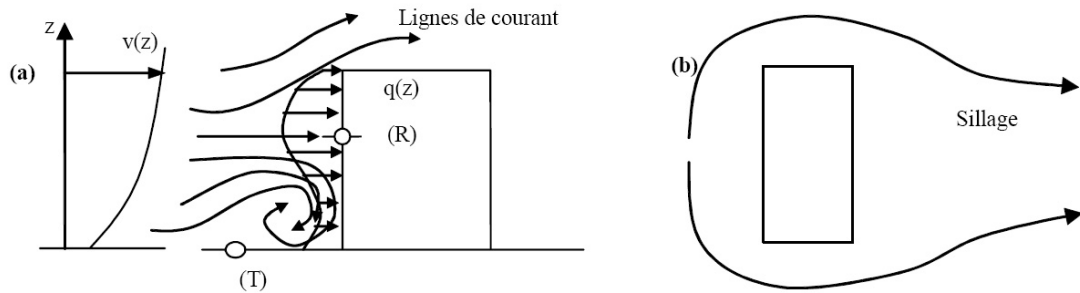


Figure 49: écoulement et couche limite autour d'un bâtiment isolé. (Fernandez & al, 2009)

- a- Les lignes d'écoulement et les répartitions de pression, vu de profil.
- b- La forme du tourbillon, vu du dessus

Dans le sillage turbulent derrière un bâtiment parallélépipédique (fig.50), il est possible d'y distinguer deux régions : la région intérieure (B) formée par une circulation fermée immédiatement derrière le mur et la région externe (A) se déplaçant avec l'écoulement général et se mélangeant progressivement avec la couche limite turbulente. L'écoulement (A)

correspond, vu en plan, au tourbillon en forme de fer à cheval et a tendance à renforcer le déplacement vers le haut des tourbillons (B). L'écoulement au point de stagnation peut alors soit s'éloigner avec le courant ou alors revenir vers le bâtiment. L'écoulement (C) marque la partie qui est entraînée dans le sillage (Smith & Lestuzzi, 2013-2014).

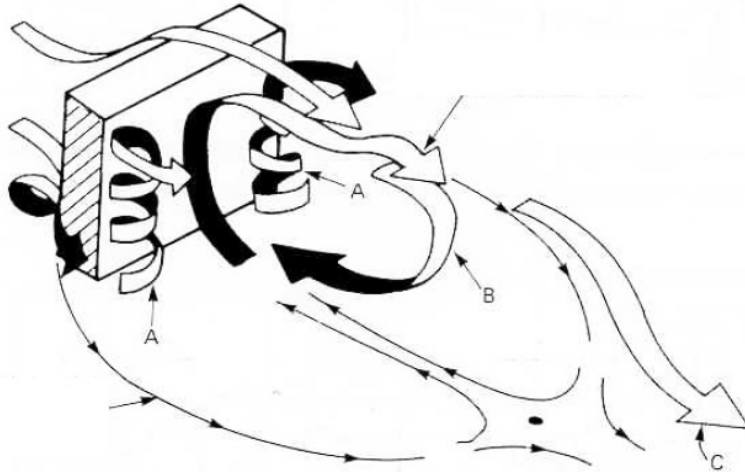


Figure 50: Écoulement au sillage d'un corps d'après Cook, (1985).

Enfin, pour conclure, il convient de rappeler les paramètres déterminants dans l'écoulement du vent autour d'un obstacle tirés d'une analyse des écoulements autour d'obstacles placés en soufflerie (Gandemer, 1979) :

- La géométrie et des dimensions de l'obstacle (longueur, largeur, hauteur).
- Son état de surface (plane, courbe...etc.)
- Les caractéristiques du vent incident (force, direction, fréquence...etc.).
- Les caractéristiques l'environnement proche (discontinuité, changement de rugosité).

- ***Les différents effets aérodynamiques de(s) bâtiment(s)***

La disposition des constructions et leurs formes peuvent engendrer, localement ou sur des étendues importantes, des phénomènes d'accélération du vent. A titre d'illustration, voici quelques cas couramment rencontrés en milieu urbain (Gandemer et al, 1976).

a- Effet de sillage

Définition : circulation fluide tourbillonnaire en aval des formes. Fig.51

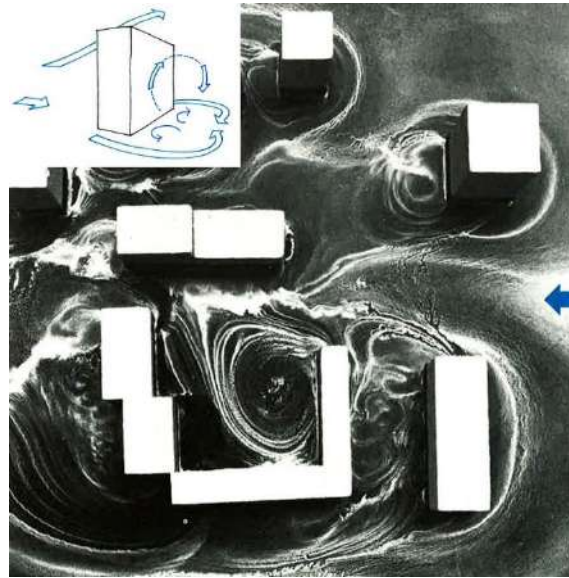


Figure 51: Méthode visualisation de l'effet de sillage par enduit (CSTB). (Gandemer et al, 1976, p.59)

a- Effet de trous sous immeubles

Définition : Phénomène d'écoulement dans les trous ou passage sous immeuble qui relie le côté amont du bâtiment en suppression de son côté aval en dépression. Fig.52

Condition d'existence : hauteur minimum supérieure à 15m ($H > 15m$) pour que les champs aérauliques soient déviés vers le bas et non par les trous sous l'immeuble. Un bâtiment dont la hauteur est inférieure à 15m ne fait pas suffisamment écran pour la production d'un tel phénomène.

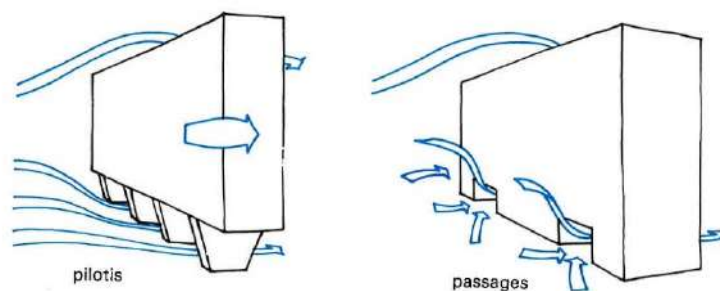


Figure 52: effet de trous sous immeuble. (Gaudemer et al, 1976, p.50)

b- Effet du coin

Définition : Phénomène d'écoulement aux angles des constructions qui mettent en relation la zone de surpression amont et la zone de pression latérale du bâtiment. Fig.53

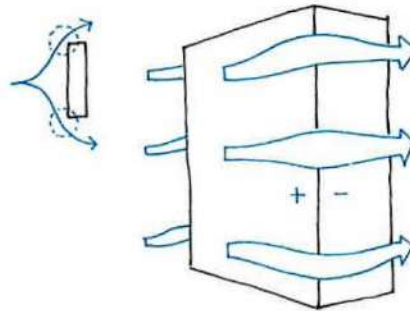


Figure 53: effet de coin. (Gaudemer et al, 1976, p.54)

c- Effet tourbillonnaire au pied des immeubles

Définition : il s'agit d'un rouleau tourbillonnaire au pied des immeubles dans la face au vent.

Condition d'existence : En plus de la hauteur du bâtiment qui doit être supérieure à 15 m, elle dépend du gradient vertical de vitesse moyenne du vent. Cette anomalie est particulièrement désagréable en raison des directions verticales que peut avoir l'écoulement dans le tourbillon.

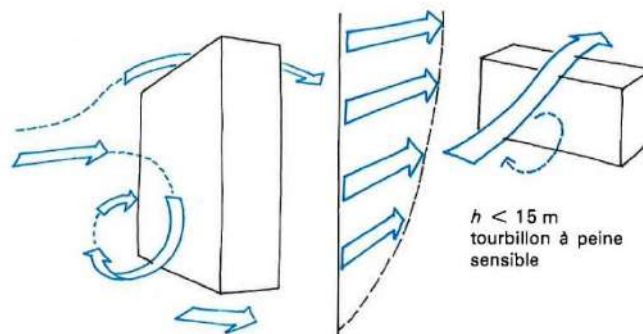


Figure 54: effet de tourbillon. (Gaudemer et al, 1976, p.62)

d- Effet Wise

Définition : L'association de bâtiments de tailles différentes et implantés parallèlement entretient un tourbillon à composante verticale issu de l'effet de tourbillon ou de sillage du bâtiment amont combiné avec le tourbillon amont du bâtiment situé en aval. Fig.55

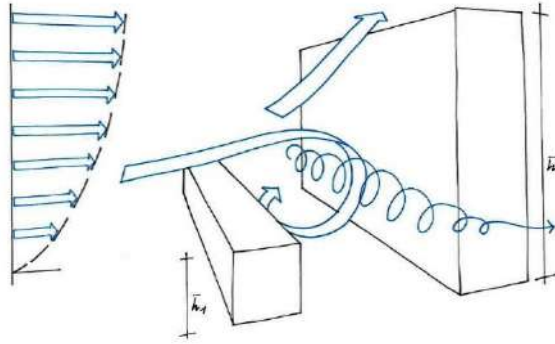


Figure 55: Effet Wise. (Gandemer, et al, 1976, p.62)

e- Effet de liaison de zones de pression différente entre immeubles

Définition : C'est une disposition en quinconce de deux constructions créant un couloir de liaison entre eux lié au champ de pression existant entre la façade sous le vent du bâtiment amont et la façade au vent du bâtiment en aval. Fig.56

Condition d'existence : une hauteur moyenne maximum $H=15m$ avec un couloir de liaison bien défini et pas trop large ($d \leq H$)

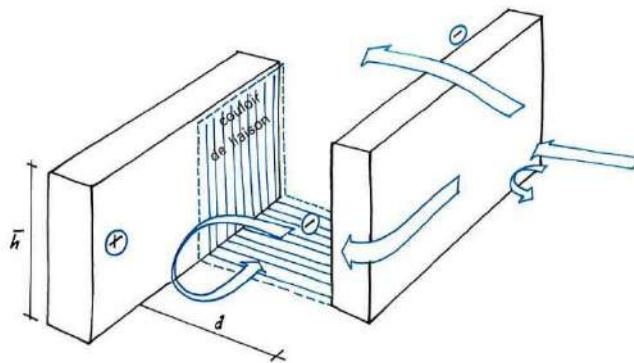


Figure 56: effet de liaison de différence de pression entre immeubles.

f- Effet Venturi

Définition : disposition relative de deux bâtiments formant un collecteur de flux ; le rétrécissement du passage a pour effet d'augmenter la vitesse pour un débit identique. Fig.57

Condition d'existence : une bonne accélération du flux d'air incident a été constatée pour une largeur effective de l'étranglement de l'ordre de 2 à 3 fois la hauteur H des constructions (avec une hauteur minimal de 15m) formant le Venturi.

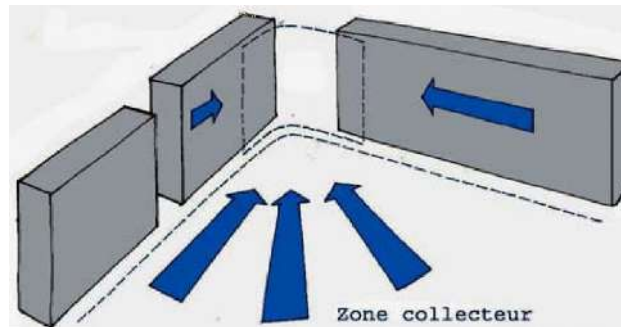


Figure 57: Effet Venturi. (Gandemer et al, 1976)

g- Effet de canalisation

Définition : ceci correspond à une configuration classique d'une rue délimitée par des constructions en continu de chaque côté. Cette disposition entretient et prolonge tout phénomène situé au début de la rue. Fig.58

Condition d'existence : une canalisation n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique qu'elle transmet sur toute sa longueur, exemple : association canalisation-Venturi. Le phénomène est entretenu pour un espacement de 2 fois la hauteur moyenne des parois délimitant la rue.

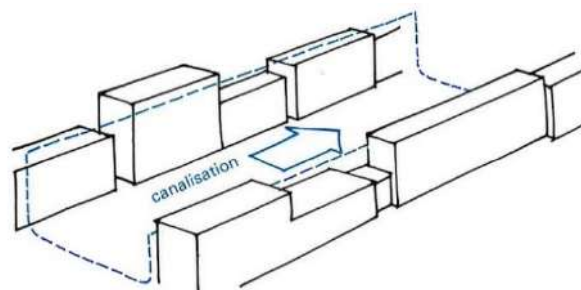


Figure 58: Effet de canalisation. (D'après Gandemer et al, 1976)

h- Effet combiné Venturi et canalisation

Définition : Il s'agit de l'association d'une place ouverte et d'une rue, la première fait office de collecteur et accélère les flux, la deuxième développe spatialement le phénomène. Fig.59

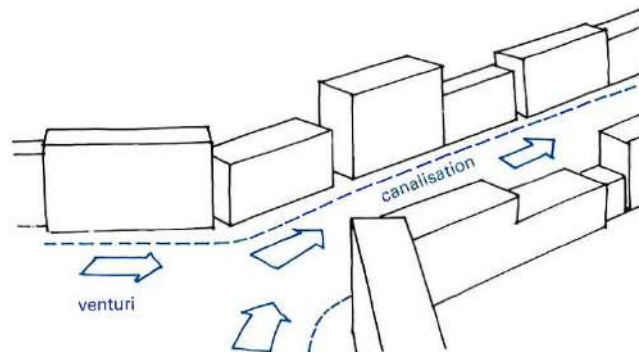


Figure 59: effet combiné venturi et canalisation. (Gandemer et al, 1976, p.78)

i- Effet de maille ou de cour

Définition : configuration composée de juxtaposition de bâtiments qui forment un alvéole.

Conditions d'existence :

- La hauteur moyenne doit être supérieure à l'épaisseur (largeur) des bâtiments.
- L'ouverture ne doit pas excéder en termes de surface le quart du périmètre de la maille.

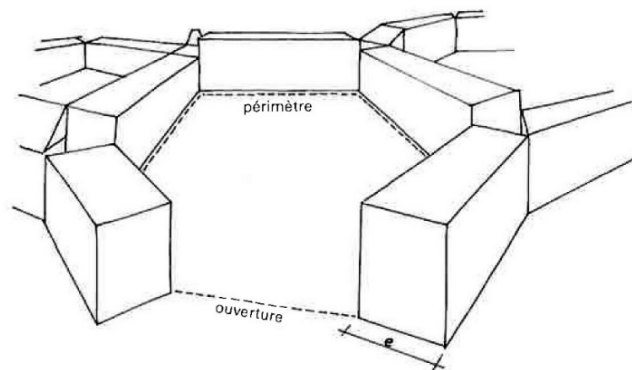


Figure 60: effet de maille. (D'après Gandemer et al, 1976, p.81)

j- Effet de pyramide

Définition : il s'agit d'un groupement de construction à décrochements et caractère pyramidale qui crée des survitesses et des turbulences autour des constructions. Les secteurs critiques sont les coins de la pyramide, les balcons ou loggias au vent et au voisinage des crêtes. Fig.61

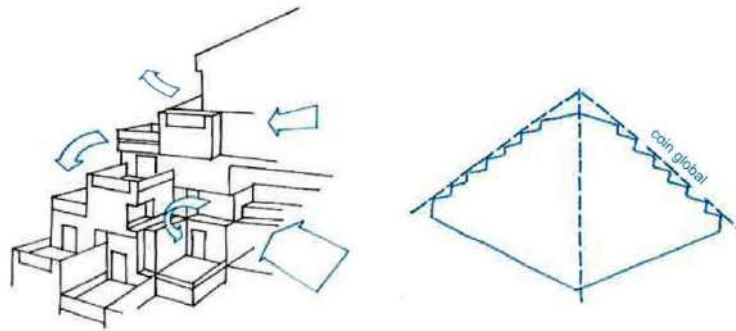


Figure 61: effet de pyramide. (D'après Gandemer et al, 1976, p.85)

4.4. Le vent dans un milieu construit et en site urbain

4.4.1. Nature du comportement du vent en milieu urbain

Le vent urbain est l'élément du climat le plus largement modifié par la ville, engendrant des flux complexes. Cette modification est due à la rugosité de la ville, à la canalisation dans les rues et aux différences thermiques donnant naissance à des brises locales (Escourrou, 1991).

En site urbain, du fait de la rugosité variable, il se forme une couche limite urbaine (Oke, 1987) ou Urban Boundary Layer (UBL). Le niveau moyen des constructions, qui font obstacle à l'écoulement, permet de définir une sous-couche atmosphérique d'écoulement fortement perturbée appelée « canopée urbaine » (fig.62). Loin du sol, à plus de 1000 m, les perturbations sont faibles et le vent est sensiblement parallèle aux isobares, ce qui correspond à l'équilibre géostrophique entre la force de Coriolis et la force du gradient de pression. Plus près du sol, les forces de frottement sur le sol rugueux réduisent la vitesse du vent et sont sources de turbulence sur un site homogène, comme en zone rurale.

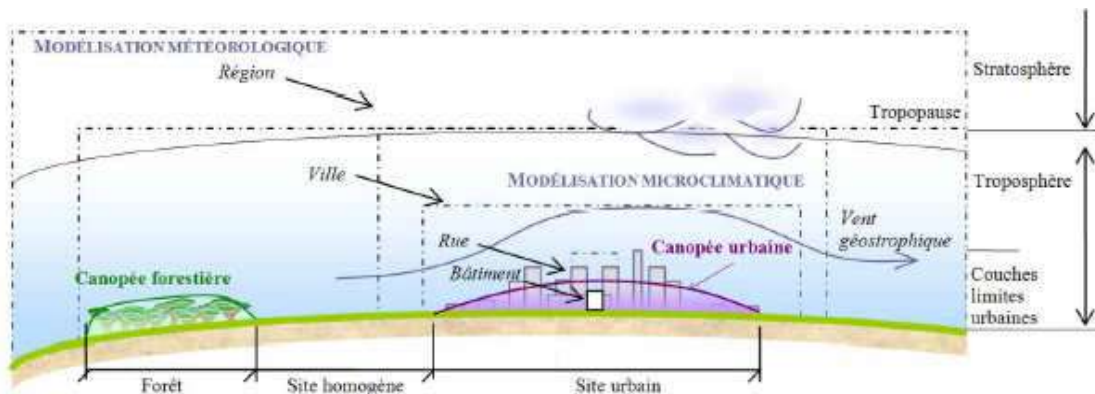


Figure 62: couche limite atmosphérique et canopée urbaine.

4.4.2. Les paramètres déterminants de la géométrie urbaine dans l'écoulement du vent

Étant donné le caractère fluide du vent, le facteur le plus déterminant dans le contrôle de l'écoulement de l'air à l'échelle urbaine, est la géométrie de l'espace libre, autrement dit, tous les espacements qui existent entre bâtiments, aussi bien les espacements horizontaux (distances latérales et frontales) que la relation du bâtiment avec sa hauteur. Ainsi que le profil urbain qui déterminent fortement le niveau d'abri ou d'exposition au vent dans l'entité urbaine à travers la répartition des pressions.

a. Effet de la disposition des bâtiments et de densité du plan masse

Les espacements entre les masses bâties sont des zones où siègent souvent des turbulences dans lesquelles le vent tend à changer brusquement de direction avant de reprendre sa direction principale. La grandeur de l'espacement de ces zones serait déterminante dans le mécanisme qui régit le comportement du vent. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude de la relation entre le vent et la géométrie du plan masse et sa densité, notamment ; Oke (1988), Hosker (1985), Koenigsberger et al., (1973), Soliman (1976), Hussain (1978) et De Herde et al., (2005) dont le but était de saisir le comportement d'un flux de ventilation urbaine. Dans notre cas nous nous intéressons à cette question en vue d'appréhender le mécanisme des mouvements éoliens d'ensablement. L'identification des zones de sillages et de turbulence va nous renseigner sur la manière dont le sable traverse la forme urbaine et sur la façon dont les grains de sable se déposent au sein de celle-ci.

Dans son étude Koenigsberger et al, (1973) avait examiné à travers un modèle-test les effets de l'agencement des bâtiments sur le mode d'écoulement du vent. Dans un premier temps, un réseau régulier de bâtiments représentatif d'une situation urbaine a été adopté, Koenigsberger montre que des zones de stagnation d'air se prolongent depuis la première rangée en amont du vent jusqu'au dernier suivant un effet de masque (Fig.63-a).

Dans un deuxième temps, il s'agit d'un modèle de plan organisé en quinconce qui d'après Koenigsberger génère un écoulement uniforme et diminue les zones de stagnation pour plonger l'ensemble du plan masse dans un champ aérodynamique. Bien que sommaire, cet exemple renseigne, d'un point de vue qualitatif, sur l'importance que peuvent avoir les espacements des bâtiments sur l'écoulement du vent. De manière générale, un schéma en quinconce est préférable pour l'atténuation des effets de masque des bâtiments en amont : le vent est susceptible d'accéder aux constructions en aval sans être trop perturbé (Fig.63-b).

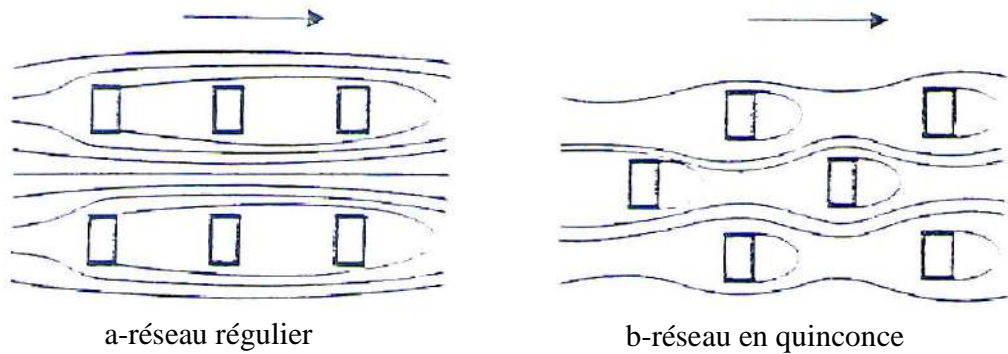


Figure 63: Le rôle de l'agencement des bâtiments sur le mode d'écoulement du vent. (Koenigsberger et al., 1973)

Selon De Herde et al. (2005), l'influence d'un obstacle sur l'écoulement du flux d'air peut se faire sentir jusqu'à une distance de 4 à 12 fois sa hauteur. Cette distance est fonction des caractéristiques géométriques des obstacles, de leur orientation par rapport au vent, de leur implantation et de leur porosité. Plus les bâtiments sont courts et profonds, moins la distance d'éloignement à respecter entre eux doit être grande. Le schéma en fig.64 livre quelques règles sur l'influence d'une forme parallélépipédique en fonction de ces proportions et des distances (d) et (I) à respecter entre bâtiments.

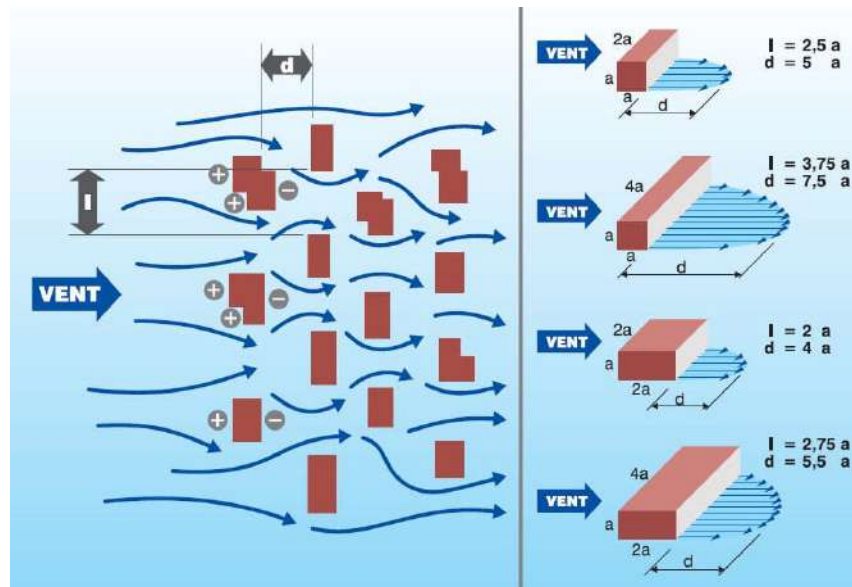


Figure 64: l'influence des aménagements en quinconce sur le comportement du vent. (De Herde et al. 2005, p. 144b)

b. Effet de la géométrie du canyon (H/D) et de la géométrie du bâtiment (I/H)

Les études élaborées par Soliman (1976)⁶², Hussain (1978)⁶³ et Oke (1988) comptent jusqu'à nos jours parmi les plus éminentes à propos de l'impact de la géométrie d'un groupement urbain extensif sur le flux d'air. Dans sa recherche Oke (1988), avait étudié les effets de la densité du plan, en variant le prospect (H/D) de la rue canyon et celui de la géométrie du bâtiment (I/H). Les résultats indiquent que les flux d'air dans un groupement peuvent être déterminés suivant trois régimes distincts de flux d'air. Ces régimes sont respectivement : le régime de flux isolé, le régime d'interférence du sillage et le régime de flux rasant. Fig.65

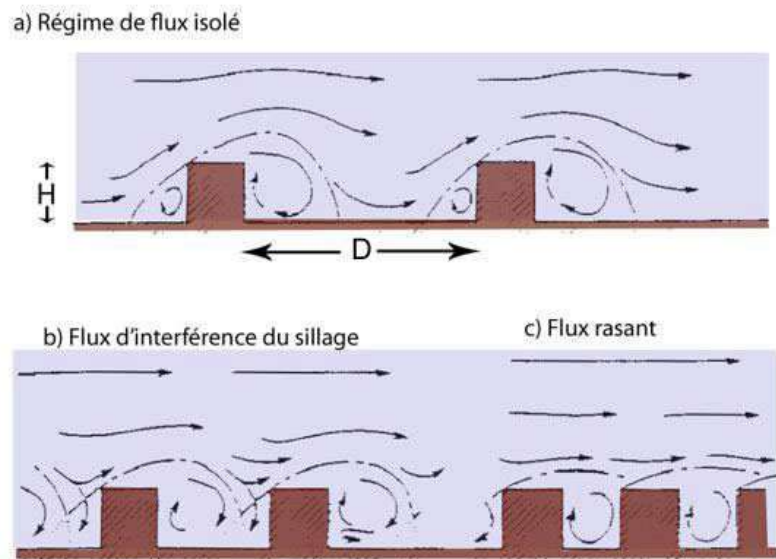


Figure 65: les trois régimes de flux dépendant de la géométrie du canyon (H/D) d'après Oke (1988)

1)- Régime de flux isolé : lorsque les bâtiments sont bien espacés (H/D très faible), les champs de flux ne sont pas en interaction, les mouvements d'air sont alors identiques à ceux observés autour de bâtiments isolés, ce qui signifie que le niveau d'exposition des bâtiments y est similaire au cas de bâtiments isolés.

2)- Flux d'interférence du sillage : pour des espacements plus étroits (H/D faible), un régime d'interférence du sillage s'établit, caractérisé par l'interaction des flux. Dans ce cas, des flux

⁶² Cité dans Bensalem (1991, p.60).

⁶³ Idem.

secondaires prennent place dans les espacements entre bâtiments dus à la déviation d'une partie du vent global au-dessus des toits vers la rue. Ce cas suggère une plus grande protection des vents que le premier cas mais maintient un niveau élevé de renouvellement d'air avec l'air au-dessus des toits, et présente une façade face au vent exposée et celle sous le vent protégée.

3)- Flux rasant : pour des densités élevées (bâtiments très serrés avec H/D élevé), une circulation tourbillonnaire stable s'installe dans les vides entre les bâtiments et définit le régime de flux rasant. Le passage à ce régime survient lorsque le flux principal n'entre pas dans les espacements et passe au-dessus des bâtiments et correspond au cas d'une grande protection des vents et un faible potentiel de renouvellement d'air dans les rues.

La largeur (D) de la rue canyon est un facteur qui peut modifier les flux depuis le régime isolé jusqu'au régime rasant en passant par le régime interférent. Cependant lorsque les éléments sont suffisamment longs, les espacements frontaux ont moins d'effets, leur influence dépend du pourcentage des vides par rapport aux surfaces pleines faisant faces au vent. Selon Oke (1988) la transition entre les flux dépend de la géométrie relative du canyon et des obstacles ; Rapports (H/D) et (I/H). Toutefois le rôle du prospect (H/D) est dominant, tandis que (I/H) est faible. Fig.66

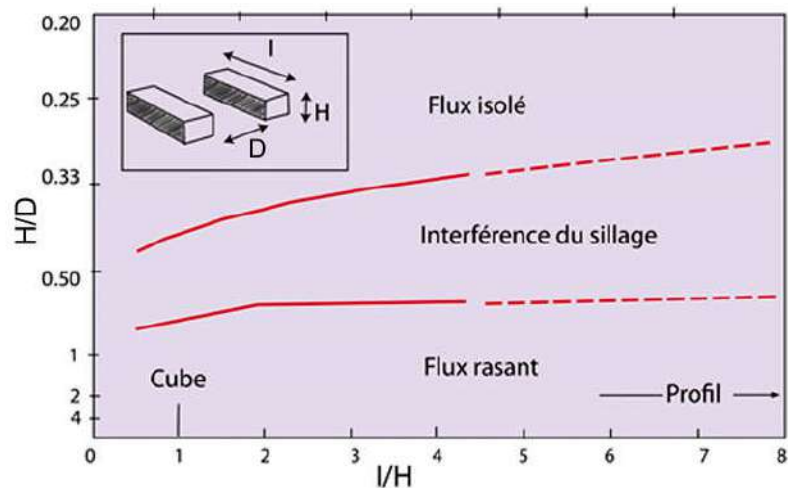


Figure 66: dépendance de la nature du flux d'air par rapport au prospect (H/D) et la géométrie du bâtiment (I/H). (Hussain, 1978, d'après Hosker 1985)

c. Effet du profil urbain sur la vitesse de vent

Bien qu'Oke (1988) affirme qu'on ne connaît pas parfaitement la relation entre réduction de la vitesse du vent et géométrie des obstacles, tous les travaux s'accordent à affirmer que les pressions positives et négatives sur les surfaces d'un élément sont considérablement plus

faibles lorsqu'ils se trouvent dans un réseau que par rapport aux conditions isolées, même avec une densité très faible. De même, la réduction des distances qui séparent les bâtiments dans un groupement important plonge toutes les faces des bâtiments dans le sillage des éléments en amont du vent et créent un champ de pression uniforme sur toutes les surfaces.

Givoni (1989) confirme que lorsque de longues rangées de bâtiments sont perpendiculaires au vent, seulement une fraction de la vitesse du vent au-dessus des toitures est enregistrée dans les rues, dû à l'effet d'abri créé par les bâtiments en amont du vent. La moyenne de la vitesse dans les espaces protégés est inférieure à 30 % du vent total mesuré à la même hauteur en milieu dégagé mais les distances entre bâtiments ont un faible effet sur cette réduction.

La distribution des vitesses du vent dans les rangées de bâtiments, montre une force de vent plus importante pour les constructions les plus en amont. Après, la seconde rangée la vitesse relative est graduellement stabilisée. Ce qui suppose qu'une attention particulière devrait être accordée aux bordures urbaines. Cette forme de distribution a été observée pour différentes combinaisons du canyon (H/D). Cette déclinaison graduelle vers une vitesse du vent uniforme semble dépendre fortement du rapport E/D ; tel que (E) : longueur de la canopée urbaine (longueur totale des bâtiments y compris les espacements) et (D) : espacement entre deux bâtiments.

L'étude de Givoni (1989) montre que la vitesse du vent chute vers une valeur asymptotique d'environ 10% de la vitesse totale du vent (fig.67). Ceci renseigne sur la relation entre densité de la configuration urbaine et profondeur d'intrusion du vent dans un tissu urbain extensif. De même qu'il révèle la forte exposition des bordures urbaines par rapport aux centres urbains mieux protégés.

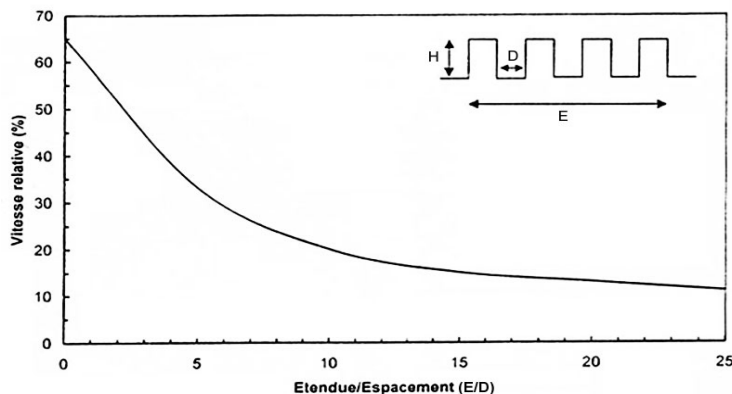


Figure 67: impact de l'étendue d'un tissu urbain sur la vitesse du vent ; cette dernière tend à se stabiliser à mesure que (E) augmente. (Givoni, 1989).

d. Impact de la variation des gabarits sur la vitesse du flux d'air

Jusqu'ici, tous les travaux que nous avons présentés considèrent des réseaux uniformes de même hauteur. A présent nous nous intéressons à l'impact de l'addition de bâtiments élevés au sein d'un tissu urbain pour nous permettre d'apprécier le rôle que peut jouer la variation des gabarits dans l'écoulement du vent d'une structure urbaine.

Une autre étude de Givoni (1989) consistait en la comparaison de trois réseaux de bâtiments de distributions différentes (fig.68) :

- a. réseau uniforme constitué de bâtiments de même hauteur
- b. réseau avec tours formant une brise vent placée en amont du réseau
- c. réseau avec tours réparties d'une manière aléatoire dans le tissu

Il a été constaté que la disposition (b) réduit davantage les vitesses du vent (15%) contre 26% dans le réseau uniforme (a). En revanche, dans le cas de bâtiments dispersés (réseau b), de plus grandes vitesses pouvant atteindre 60% sont mesurées face aux tours et plus faibles derrière ou entre deux tours. Conclusion, l'addition de bâtiments élevés et leur mode de distribution fait varier considérablement la vitesse des vents.

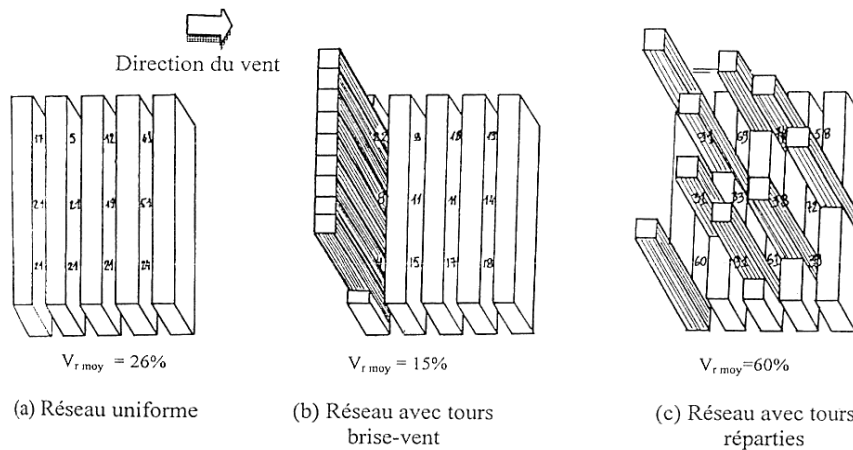


Figure 68: impact de la variation des gabarits sur la modification des flux d'air. (Givoni, 1989). Les chiffres représentent la vitesse relative du vent en %. $V_{r\text{ moy}}$ est la vitesse relative moyenne.

De point de vue variation du ratio (H/D) ; une autre étude complémentaire a été menée par Givoni (1989) ou plusieurs hauteurs de tours ont été testées en gardant toujours le même emplacement des tours par rapport aux rangés et on ne fait que varier la distance (D) entre eux, (fig.69).

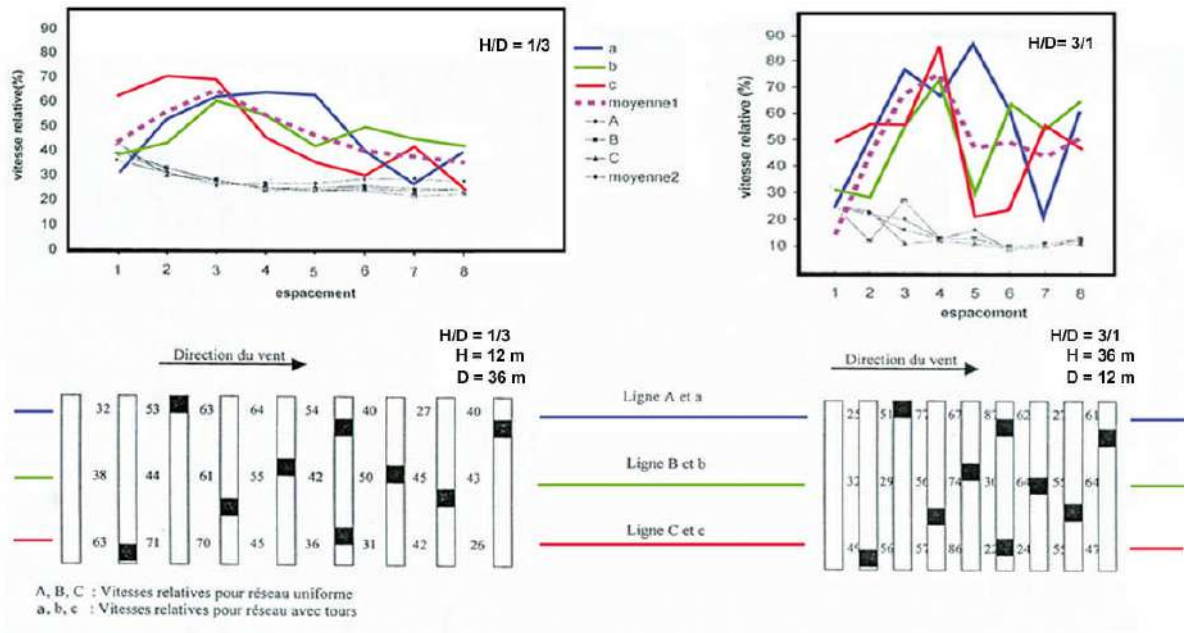


Figure 69: impact du gabarit et de l'espacement entre bâtiments dans l'augmentation de la vitesse du vent. Les chiffres qui sont entre les espacements des bâtiments indiquent la vitesse du flux d'air. Les carreaux noirs indiquent l'emplacement des tours. (Givoni, 1989)

Il s'avère que les tours dispersées dans le tissu accroissent toujours de manière significative la vitesse de l'air dans les rues. En moyenne, la hausse est de 48% contre 28% seulement dans le réseau sans tours pour $H/D = 1/3$ et de 52 % contre 15% pour un ratio de $3H/D$. Ainsi, Le ratio H/D ne semble pas avoir une très grande importance sur les variations enregistrées.

Enfin, ce qui est important de retenir de cette expérience c'est la nature rendue erratique du flux d'air du fait de l'introduction de tours. La distribution inégale des gabarits au sein d'un groupement de bâtiment semble avoir une influence notoire sur l'accélération de la vitesse de l'air dans la zone de sillage créée aux alentours de chaque tour.

e. Orientation du plan masse par rapport au vent dominant

Wiren (1985) avait démontré une corrélation majeure entre vent incident et angle d'orientation dans la dispersion des pressions atmosphériques à l'intérieur d'un tissu en damier (fig.70). Les résultats phares de cette étude sont les suivants :

- L'obstacle réduit sensiblement la circulation du flux d'air lorsque les angles d'incidence sont faibles. Autrement dit, l'effet d'obstacle devient négligeable pour une incidence oblique (autour de 60°) et le vent peut circuler librement au sein des masses bâties.

- Dans le cas des éléments posés côte à côte, l'impact des espacements est important ; la circulation du flux d'air peut être réduite avec la diminution de l'espacement entre bâtiments.
- Enfin, la présence d'éléments adjacents conduits à une canalisation du vent entre les bâtiments lorsque le vent est plus au moins perpendiculaire (0° à 30°) ;

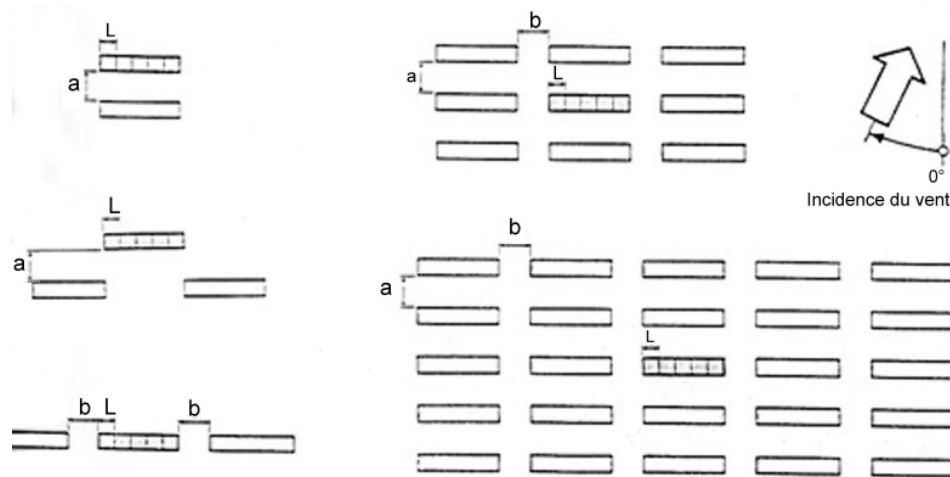


Figure 70: Géométrie utilisée dans la simulation menée par Wiren, 1985.

4.5. Conclusion

1. Dans la nature et à une échelle globale de l'atmosphère, l'air se déplace des zones de hautes pressions vers des zones de basses pressions. La vitesse du vent ainsi que sa direction, générées par les systèmes météorologiques à l'échelle synoptique sont par la suite modulées par la topographie régionale et locale. Il peut y avoir alors de grandes différences dans l'environnement aéraulique d'une partie de la ville comparativement à une autre, ou même à micro-échelle d'un lieu à un autre.

En effet, dans la couche limite atmosphérique (CLA), située juste au-dessus de la surface terrestre, le vent est un écoulement d'air turbulent, non uniforme, constitué, de tourbillons de tailles différentes emportés par le mouvement atmosphérique. Tandis que, dans la couche limite de rugosité appelée aussi « couche de surface », partie inférieure de la couche limite atmosphérique, la vitesse du vent est constituée d'une partie moyenne déterministe et d'une partie turbulente aléatoire issue de l'interaction du vent avec la rugosité du sol (aspérités,

obstacles ...etc.). La présence d'un obstacle oblige le vent à le contourner, ce qui modifie localement sa vitesse et sa trajectoire, réciproquement, le vent induit un champ de force sur les parois de l'obstacle suivant une forme de sillage relative à la géométrie de cet obstacle.

2. En milieu construit, la particularité de l'écoulement du vent réside dans l'interaction créée entre le vent et les masses bâties. Cette interaction génère des zones de pression et de dépression responsables du déplacement et de régénération du flux d'air à des vitesses instantanées plus intenses autour d'une vitesse moyenne. De ce fait, des zones de sillages (tourbillons) sont créées en amont et en aval de l'obstacle et sont propres à chaque forme d'obstacle.

Le but principal de cette partie est de répertorier les paramètres physiques de l'espace urbain qui sont à l'origine des effets aérodynamiques qui peuvent y avoir lieu, ainsi que d'appréhender le mécanisme d'influence de ces paramètres sur le mode d'écoulement du flux d'air incident.

Au sein d'une forme urbaine, les espacements entre les rangées de bâtiments affectent les conditions d'écoulement de l'air. Les interstices, les failles, les vides entre les bâtiments tendent à créer des mouvements tourbillonnaires responsables de la diminution ou l'augmentation du potentiel de la vitesse d'air. En ce qui concerne les mouvements éoliens d'ensablement nous considérons que la moindre affectation de ces mouvements modifiera le cours des grains de sable en mouvements et fera apparaître l'une de ces trois manifestations suivantes :

- Un dépôt de sable suite à une chute de la vitesse d'entrée initiale,
- Un déplacement continu des grains de sable suite à une vitesse plus au moins constante,
- Une remise en mouvement (arrachement) des grains déjà déposés au sol suite à une accélération brusque du flux d'air incident (effet Venturi, bourrasques,...etc.).

Afin d'éviter qu'il y est une sédimentation des grains de sable, il faudrait que le vent puisse traverser la forme urbaine sans être exagérément perturbé. Notre objectif serait de retrouver au vent ses caractéristiques dites « laminares », synonyme d'une circulation fluide afin d'empêcher toute forme de dépôt. Ceci revient à étudier via la simulation numérique CFD l'impact sur le vent de ces caractéristiques géométriques des bâtiments, de leur orientation par rapport à un vent incident, de leur disposition et enfin, de leur porosité (perméabilité) et densité.

En ce sens, certaines dispositions particulières de formes urbaines sont à privilégier :

- En termes de disposition de bâtiments, les espacements entre masses bâties doivent être définis de manière à réduire les zones de turbulence responsable de la production d'un comportement erratique du flux d'air. De manière générale, un schéma en quinconce est préférable car il permet d'éviter les effets de masque du bâtiment placé en amont et empêche la production de zones de sillage capable de plonger l'ensemble dans une zone de turbulence.
- En termes de profil urbain, un flux rasant obtenu grâce à des bâtiments serrés pourrait favoriser une circulation laminaire (stable) au sein des rangées de bâtiments et s'oppose à un éventuel dépôt des grains de sable en mouvement.
- Les bordures de la forme urbaine sont fortement exposées aux vents incidents à l'encontre des zones centrales mieux protégées. De ce fait, une attention particulière doit être accordée aux bordures dans un souci de protection et de diminution de la surface exposée au vent, un profilage de forme pourrait apporter des résultats satisfaisants dans ce cas.
- L'addition de bâtiments élevés et leur mode de distribution fait varier considérablement la vitesse du vent autour d'eux, ce qui accroît de manière significative la vitesse de l'air et le niveau de turbulence dans les rues. Dans ce sens et afin d'éviter la production d'un comportement erratique du flux d'air synonyme d'un niveau élevé de turbulence, il faut opter pour des gabarits uniformes pour l'ensemble des bâtiments constituant une forme urbaine ou un même plan masse.
- En termes d'orientation du plan de masse, le grand souci est de diminuer l'effet d'obstacle. Ceci impliquera à réduire les angles d'incidences et les ramener autour de 60° entre la direction du vent et l'axe des vues.
- Enfin, l'optimisation de la vitesse au sein d'un plan de masse consiste à développer des mécanismes de brassage de l'air (entonnoir) et de canalisation capables d'augmenter la vitesse de l'air et de maintenir un flux laminaire. Nous considérons que l'intégration des deux effets aérodynamiques « Venturi » et « canalisation » dans un plan de masse pourra favoriser davantage la circulation du flux d'air et le déplacement des grains de sables déjà en mouvement. Un travail de modélisation en CFD serait nécessaire dans ce cas afin de définir les rapports dimensionnels de la géométrie en question.

**5. CHAPITRE V : L'ENSABLEMENT COMME PHENOMENE
PHYSIQUE : LES POSSIBILITES D'UNE MODELISATION CFD**

5.1. Mode de déplacement

Suivant son origine, le sable accumulé se distingue en deux catégories :

- Le sable allochtone : quand la source de sable entraîné par le vent est lointaine. Ce transport à grande distance porte exclusivement sur des particules dont le diamètre est inférieur à 0,05mm.
- Le sable autochtone : quand la source de sable est locale. Le sable autochtone a une couleur brunâtre assez foncée tandis que celui d'origine allochtone provenant des ergs est plus clair, jaunâtre.

Le sable d'origine locale (autochtone) peut provenir :

- de la décomposition de grés qui constituent les roches de montagnes ;
- de la désagrégation de sols de plaines alluvionnaires mis à nu par la disparition du couvert végétal ;
- des limons charriés par les oueds et qui résultent d'une érosion hydrique dans les bassins versants de ces cours d'eau.

La vitesse du vent est nulle au contact même du sol et elle croît progressivement lorsqu'on s'en éloigne. La variation de vitesse la plus importante s'observe dans les premiers millimètres ou centimètres au-dessus de la surface. C'est la couche de turbulence. Ce sont les tourbillons créés dans cette zone qui entraînent le mouvement de particules. Etant un fluide doué d'énergie cinétique, le vent prend en charge les particules qu'il trouve à sa disposition : ce faisant il nettoie le sol, c'est la déflation. Puis il transporte, ensuite, lorsqu'il y a rupture de charge, il abandonne sa charge et il crée des accumulations.

On parle de vent efficace lorsque sa vitesse est supérieure à un seuil critique à partir duquel le soulèvement des particules du sol et leur transport deviennent possibles. Les vitesses de mise en marche dépendent naturellement de la rugosité du sol. Dans l'Ouest des États-Unis, il faudra un minimum de 14-16.5m/s pour entraîner le sable sur les surface d'épandage sablo-caillouteuse, alors que 4.5-6.5 m/s suffisent pour mobiliser les grains des dunes (Demangeot & bernus, 2001, p.158). Pour le mode de saltation objet de la présente recherche, on admet que cette vitesse est comprise entre 4 et 4.5 m/s (Pethick, 1984).

On peut appeler vent de sable tout vent qui transporte des grains compris entre 0.3 et 0.15mm de diamètre, au-dessus d'une surface de plusieurs kilomètres carrés. Tout vent qui transporte des particules de diamètre inférieur est un vent de poussière (Demangeot & bernus, 2001, p.157).

Selon leur granulométrie, les grains de sable se meuvent individuellement suivant l'un des trois modes de déplacement de grains désignés par : la saltation, la reptation et la suspension, (fig.71). En plus de la granulométrie, la densité et la vitesse du vent sont les facteurs qui interviennent dans le classement de ces modes de déplacements.

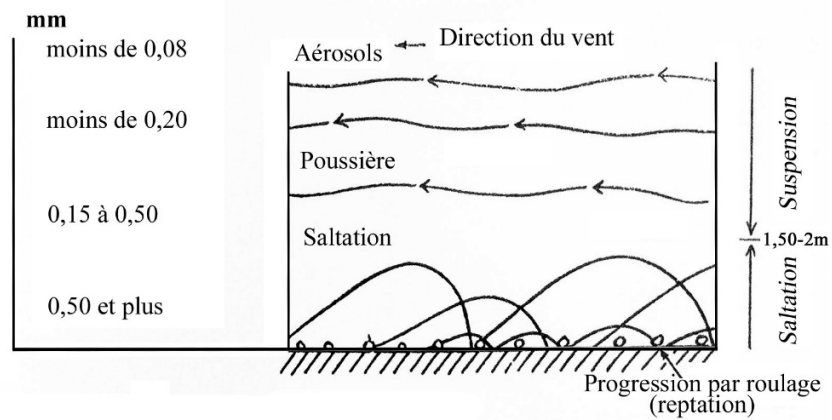


Figure 71: différents modes de transport éolien. Morel (2008, p. 105)

5.1.1. La reptation

C'est le mode de transport des grains grossiers dont les diamètres sont supérieurs à 500 μ m et que l'énergie du vent est incapable de soulever. Elle est fortement activée par l'impact des grains en saltation et sur le plan théorique, elle est relativement peu étudiée (Fryrear et al. 1991).

5.1.2. La saltation

Elle concerne les grains, de taille comprise entre environ 70 et 500 μ m éjectés de la surface du sol. La saltation est un mode de transport éolien amorcé par pression directe sur les grains ou par impact, lors de leur chute, des autres grains en saltation. Il s'agit d'une série de sauts successifs de trajectoires balistiques se produisant dans le sens de l'écoulement de l'air. La saltation soulève les grains obliquement et transporte, avant qu'ils ne retombent presque verticalement ; ils dessinent ainsi des bonds et éjectent d'autres grains ; la vitesse critique de

détachement doit être supérieure à la vitesse de friction entre les grains. La hauteur atteinte par les grains définit la couche de saltation, elle varie de quelques dizaines de centimètres à 1 m (Fryrear et al. 1991) ou même 2m sur une surface de galet (Mainguet, 1995) et dépend de l'équilibre entre énergie cinétique et énergie potentielle des grains en mouvement ascendant (Bagnold, 1941 ; Greeley et Iversen, 1985).

5.1.3. La suspension

Les particules de taille inférieure à une vingtaine de micromètres (20 μm), sont généralement mobilisées en suspension lorsque leur mouvement leur permet de dépasser la hauteur maximale de la couche de saltation (Greeley et Iversen, 1985). Ces particules fines constituent les aérosols minéraux qui sont transportés sur de longues distances depuis les zones source à des altitudes de 3 à 4.000 mètres.

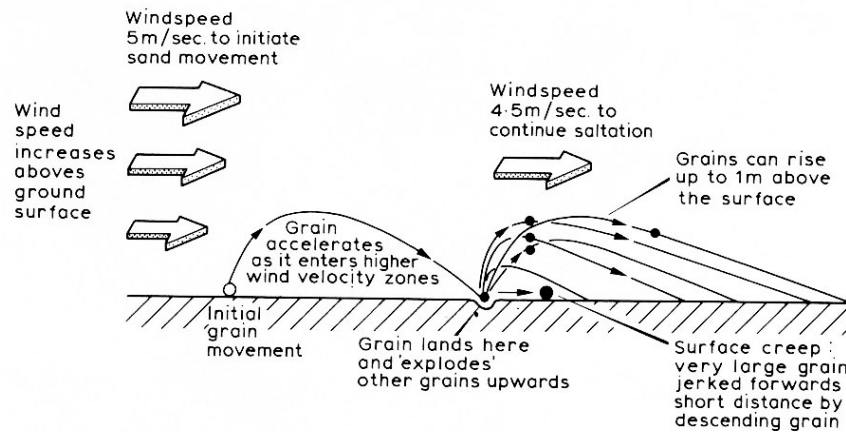


Figure 72 : déplacement des grains de sable suivant un mode de saltation. (Pethick, 1984)

5.2. Principales formes d'accumulation de sable

5.2.1. Dans la nature

Quand le vent perd sa vitesse d'entraînement, les particules de sable se déposent et donnent des formes d'accumulation très complexes qui sont fonction de la structure du courant éolien, de la nature de la surface du sol, de la topographie, de la végétation et la dimension des particules de sable. Ces formes d'accumulation que l'on appelle édifices éoliens correspondent à plusieurs types allant de la *barkhane* isolée au train de *barkhane* impressionnant, donnant au paysage l'aspect d'un océan de sable (Morel, 2008). Quelques formes caractéristiques de ces accumulations sont présentées ci-dessous :

- **Nebka** : c'est une forme naine induite par l'arrêt du sable par un obstacle (végétal, rocheux,...) se trouvant sur la trajectoire des particules en mouvement (fig.73). La taille de *nebka* est de quelques décimètres de hauteur et de 1 à 4m de long. En générale, l'édification de *nebka* se fait rapidement en quelques jours de vent fort de direction constante (Morel, 2008).



Figure 73: Nebkas à flèche, secteur de Bamba, nord-Mali.
Hauteur des buissons : 30 cm. Venard (2012, p.29)

- **Barkhane ou dune libre** : c'est une dune en forme de croissant à convexité au vent. Il s'agit d'une forme d'accumulation sableuse la plus menaçante vu sa capacité de déplacement rapide (Venard, 2012). La migration des *barkhanes* requiert trois conditions : un vent constant monodirectionnel, une source de sable importante, une granulométrie allant de 0.12 à 0.25 mm de diamètre, et une surface plane et dure comme la *hamada* (Morel, 2008). Fig.74

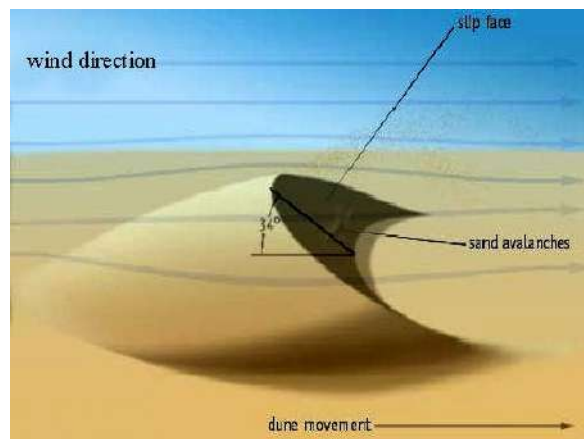


Figure 74 : Schéma d'une dune de type barkhane.

Les *barkhanes* étant des constructions instables, mobiles et sans cesse remodelées par le vent, leur vitesse de déplacement peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par an. Lorsque les édifices *barkhaniques* par mouvement atteignent des infrastructures humaines ils se déforment en devenant des édifices beaucoup moins précis appelés fronts de dunes. Ces fronts, par leurs

crêtes, constituent des pièges à sable qui vont grossir et éventuellement engloutir des habitations et même des arbres de plusieurs mètres de haut. Les fronts constituent aussi une réserve importante de matériel sableux qui peut être transporté par le vent et envahir d'autres sites (Mainguet, 1995).

- **Dunes linéaires ou « Sifs »** : sont des édifices allongé, de forme linéaire étirée sur toute sa longueur comme une épée d'où son nom « *sif* » en arabe. Les *sifs* naissent dans un régime éolien bidirectionnel, ou sous le vent d'un obstacle qui devise un régime éolien monodirectionnel en deux branches, à la convergence desquelles naît l'édifice. Les *sifs* possèdent deux côtés à pentes fortes qui se rejoignent en une crête active (Mainguet, 1995).

Fig.75

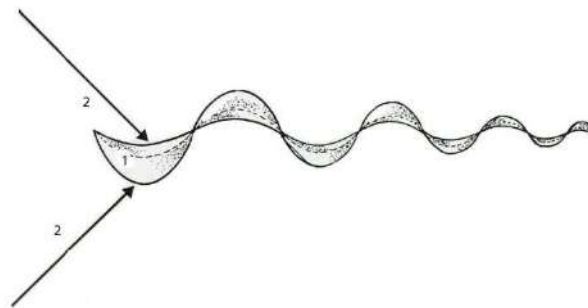


Figure 75 : Accumulation dunaire en forme linéaire (*sif*). (Mainguet, 1995, p. 141). 1 : Crête anguleuse de l'édifice. 2. vents dominants

En générale, les *Sifs* sont de 2 à 3 km de long et 30 à 150 m de large. La longueur est toujours de huit à dix fois plus importante que la largeur et résultent de l'action de deux vents de directions différentes. L'emplacement d'une dune linéaire est toujours oblique par rapport au vent résultant annuel. Son développement se fait par allongement, au fur et à mesure des nouveaux apports de sable par le vent (Morel, 2008).



Figure 76: dunes linéaires ou *sifs* localisé au niveau de l'Erg Occidental. Source : <http://www.panoramio.com/photo/92204849>

- **Dunes pyramides ou « ghourd »** : Ce sont des collines de sable souvent en forme de pyramide étoilée avec trois ou plusieurs bras s'étalant à partir du sommet qui peut atteindre jusqu'à 300m de hauteur (fig.77). Elles naissent à la convergence de plusieurs flux éoliens et sont pratiquement stables et immobiles. Elles deviennent donc des sources de sable qui peuvent donner naissance à des *barkhanes* ou à des dunes linéaires (*sifs*) (Mainguet, 1995).



Figure 77: dunes pyramidales repérées près de Kerzaz au Gourara. Photo Adolph L, 2011.

- **Dune parabolique** : c'est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent à l'encontre des dunes barkhaniques qui sont à convexité au vent. La dune parabolique est peu mobile plus ou moins fixée par la végétation et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée (fig.78). La juxtaposition de dunes paraboliques donne enfin des dunes en râteau, dont les dents, parallèles au vent, sont formées par les ailes des dunes. (Morel, 2008).

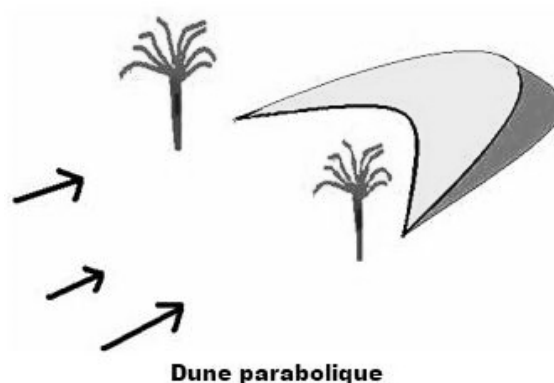


Figure 78: dune parabolique fixée par la végétation.

- **Dunes longitudinales ou « sandridges »** : sont de larges édifices sableux longitudinaux séparés par des couloirs de déflation. Ces cordons longitudinaux sont différents des dunes linéaires, ils s'alignent dans la direction des vents dominants contrairement aux *sifs* qui sont obliques par rapport à la direction résultante annuelle. Les dunes linéaires sont façonnées par un dépôt de sable qui arrive obliquement sur la dune tandis que des sandridges existent par suite d'un départ de sable. Les sandridges sont les plus longs édifices éoliens (FAO, 1988).
Fig.79

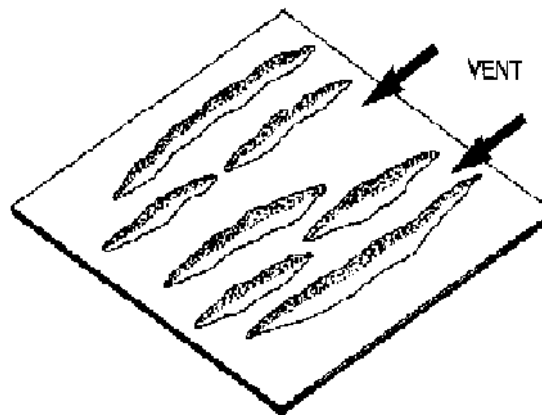


Figure 79: accumulations dunaires en forme longitudinale (sandridges). F.A.O, 1988

- **Dunes transversales** : Elles forment des arêtes de sable allongées perpendiculairement à l'action des vents dominants. Comme pour les *barkhanes*. Aux Émirats, ces dunes transversales sont localisables près de la frontière sud-est avec Oman. Elles présentent une succession de chaînes sableuses rectilignes parallèles entre elles et séparées par des *sebkhas* (Le Fol, 2008). Fig.80

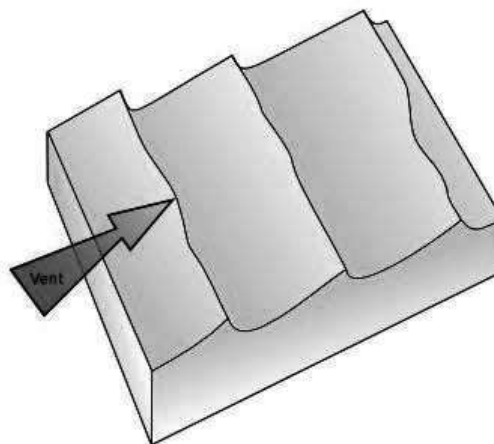


Figure 80: schéma de dunes transversales.

- **Aklé** : C'est un cas particulier des dunes transversales. Elles se forment par un assemblage dense de dunes qui se tassent et tendent à grimper l'une sur le dos de l'autre et s'organisent de façon quinconciale séparés par des *sebkhas* prenant l'aspect de cuvettes. Ces dunes dites *Aklé* sont visibles dans le désert de Liwa aux Emirats (Le Fol, 2008). Fig.81



Figure 81: Aklé (structure d'erg à plusieurs directions de dunes). Localisé au desert de Liwa (voir coordonnées GPS). Consulté le 10 20 2016 sur google-earth.com

a. Classification selon le degré de mobilité

Dans la nature les dunes sont différenciées par le degré de mobilité du sable ; dunes actives, dunes fixes, dunes à couverture végétale. (Mainguet, 1995)

La dune active ou la dune vive désigne un édifice éolien à matériel mobilisable, indépendamment de la taille de particules ou de la nature minéralogique (il existe des dunes d'argile, de limon, de sablon ou de sable ou un mélange des quatre). Les dunes actives perdent leur dynamique dès qu'intervient la pédogénèse (prise en masse ou agrégat), par exemple les particules qui sont agrégés par de l'oxyde de fer ou de la silice, ou encroutées par du gypse ou des carbonates donnent lieu à des dunes fixes. Une dune fixe peut résulter aussi d'un vannage⁶⁴qui laisse en surface un pavage de grains grossiers de taille supérieure à la compétence éolienne.

⁶⁴ En géologie, c'est le processus d'érosion éolienne ou hydrique qui consiste à séparer des éléments les plus fins d'un sédiment par l'action de l'eau ou du vent.

La troisième famille concerne des dunes stabilisées par une couverture végétale ; se sont, par exemple, les dunes du Sahel au sud du Sahara. Lorsque se produisent des changements de climat (période de sécheresse) ou des dégradations par suite de surexploitation (surpâturage), un processus de réactivation intervient dans ces dunes. Leur sable devenu mobilisable, ces dunes auparavant fixes se transforment en réservoirs de particules dispersables par le vent et danger potentiel pour les exploitations humaines situées en aval par rapport au vent.

b. Classification selon le régime éolien

Une autre classification des dunes selon le régime éolien a été proposée par Aufrère (1931)⁶⁵ qui a pu distinguer les quatre régimes éoliens suivants :

- Les vents en conjonction : cela correspond à un régime monodirectionnel ou à une direction dominante ; c'est-à-dire qu'il peut comporter des vents de diverses directions mais seule une direction possède des vents efficaces ayant la capacité de prendre en charge les particules.
- Les vents en opposition : ce régime correspond à deux directions dominantes opposées ; à titre d'exemple : le *chergui* et le *sahéli* du Maroc méridional, l'*alizé* et le *sirocco* des sud algérien et tunisien.
- Les vents incidents : ce sont les régimes bidirectionnels ou localement les régimes monodirectionnels subdivisés par les obstacles topographiques. A la différence des vents opposés, les vents incidents ont la même source de direction.
- Les vents multidirectionnels : ce sont des régimes complexes qui comportent au moins trois directions dominantes.

c. Classification selon le bilan sédimentaire

La notion de bilan sédimentaire sablo-éolien est un préalable utile pour comprendre les mouvements dunaires et adopter des stratégies adaptées vis à vis des risques liés à l'action éolienne (Mainguet, 1995).

- *Bilan sédimentaire positif* : il s'agit d'un dépôt quantitativement plus élevé que l'exportation dans un secteur soumis à des vents porteurs de particules sableuses.
- *Bilan en équilibre* : lorsque l'arrivage et le départ de particules s'égalisent.
- *Bilan sédimentaire négatif* : lorsque dans un secteur soumis à des vents porteurs de sableuses, la déflation et l'exportation sont supérieures à l'apport.

⁶⁵ Cité dans (Mainguet, 1995)

En combinant bilan sédimentaire et régime éolien, Mainguet (1984)⁶⁶ range les différents types de dunes qui puissent exister en trois familles (tableau 5).

Tableau 5: bilan sédimentaire et types de dépôt. Mainguet, (1995)

Bilan sédimentaire	1. Positif Apport > départ (accumulation dominante)	2. Négatif Apport < départ (déflation dominante)
Régime éolien	Types de dunes	Types de dunes
Un vent dominant	Barkhane Chaine barkhanique Chaine transverse	Dune longitudinale (à pavage de type reg) Nebka (genèse en milieu à couverture végétale)
Deux vents dominants	Dune linéaire (<i>sif</i>)	-
Plusieurs directions éoliennes	Dune pyramidale (<i>ghourd</i>)	-

5.2.2. Ensablement autour d'un obstacle isolé

Les obstacles, quelles que soient leur taille, leur forme et leurs natures (arbres, pentes, reliefs, massifs) introduisent une rugosité qui provoque ainsi une augmentation de la perte de charge et une réduction de la vitesse du vent, favorisant le dépôt de sable et la formation des dunes. A son contournement de l'obstacle, la vitesse du flux augmente sur les côtés de l'obstacle et diminue à l'arrière de ce dernier, de telle sorte que l'érosion prédomine sur les côtés et le dépôt se réalise à l'arrière. Ainsi, une dune embryonnaire se construit (Louis-Dubreuil, 1984). Fig.82

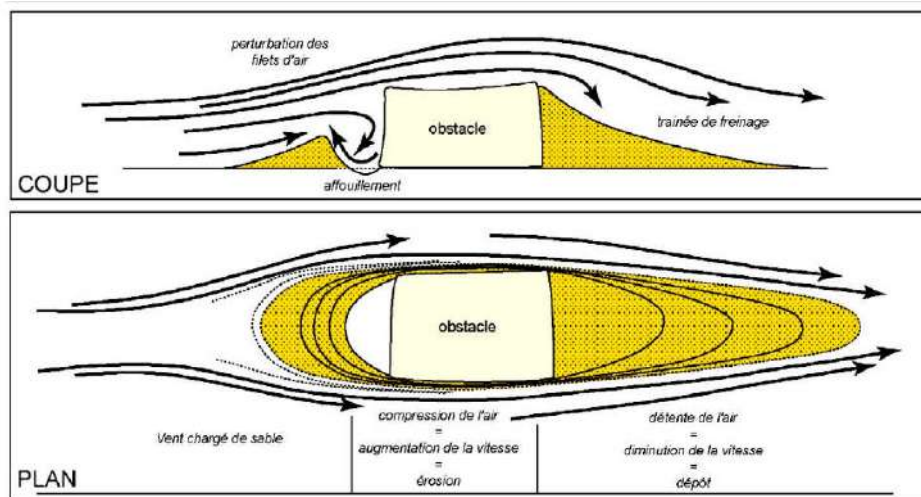


Figure 82: Ensablement autour d'un obstacle. (D'après Louis-Dubreuil, 1984, p.7)

⁶⁶ Cité dans Mainguet, 1995.

D'une manière plus détaillée, dans le comportement du vent de sable autour d'un obstacle, nous pouvons différencier cinq secteurs tel qu'illustré dans le schéma ci-dessous (Mainguet, 2004) ;

- point A appelé point d'arrêt : la pression est maximale et la vitesse est faible ou nulle. Cette zone est le siège d'un dépôt sableux ;
- de A en B, selon le théorème de Bernoulli, sur le filet fluide de ABC, la pression décroît, la vitesse augmente et les filets du fluide se resserrent, c'est l'aire du col. C'est une aire d'érosion et de transport, où la déflation⁶⁷ éolienne peut être active ;
- au-delà du point B, la pression augmente de nouveau et il en résulte une brusque diminution de la vitesse, les filets du fluide s'écartent de l'obstacle ; c'est la zone de décollement ;
- le point D appelé point de décollement au-delà duquel, la vitesse le long de la paroi est en sens contraire de l'écoulement.
- à partir du point D, la couche limite se détache de la paroi en formant un sillage tourbillonnaire (E). Cette zone ne comporte pas un dépôt qu'à la limite externe de l'aire de sillage ;
- à l'aval de l'aire du sillage, se situe le point de recollement R qui constitue l'amorce de l'aire de dépôt potentiellement maximum. L'aire de recollement est riche en dépôt sableux, les vents de sable après avoir été déviés par les obstacles y retrouvent leur direction initiale. La vitesse pourra reprendre aussi après avoir accusé une allure dégressive donnant lieu au dépôt sableux.

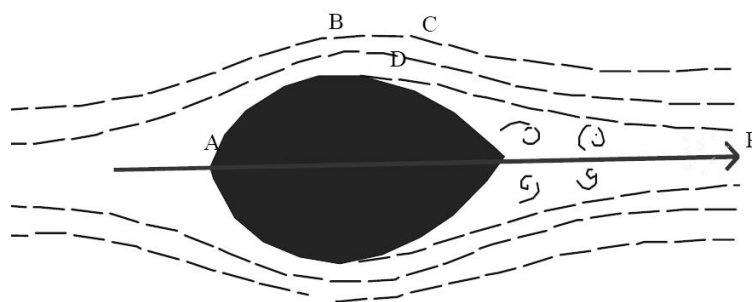


Figure 83 : comportement aérodynamique d'un obstacle. (Mainguet, 2004)

⁶⁷ La déflation est un processus éolien d'érosion qui affecte les sédiments meubles d'un désert. Les particules fines (limon, sable, voire des graviers) sont arrachées par le vent. On parle aussi de « vannage » éolien. Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Déflation_\(géomorphologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Déflation_(géomorphologie))

Duchemin (1958) de son côté avait étudié l'aérodynamique de l'habitat saharien de par le rôle de son enveloppe extérieur dans l'accélération ou le ralentissement du déplacement des grains de sable. Pour remédier au phénomène d'accumulation du sable, Duchemin propose de supprimer le support plan sur lequel se dépose le sable. La solution serait de construire sur des pitons ou des sommets de montagnes. Comme les emplacements favorables ne furent pas suffisants, l'auteur propose ainsi la construction sur pilotis assez élevés dont la section est profilée (fig.84).

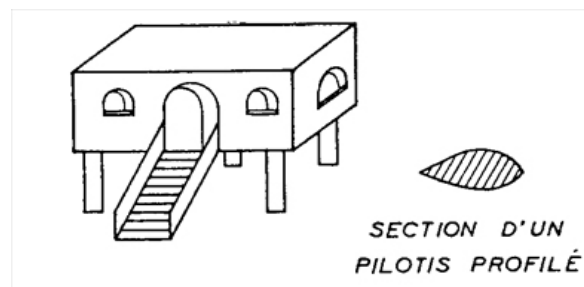


Figure 84 : schéma d'une maison sur pilotis. (Duchemin, 1958).

Partant de ce principe de forme fuselée pour les pilotis, Duchemin propose des habitations dont la forme en plan horizontal se présente de la même façon, il s'agit d'une forme qui s'inspire de la dune résultante du mouvement du sable autour d'un obstacle (fig.85).

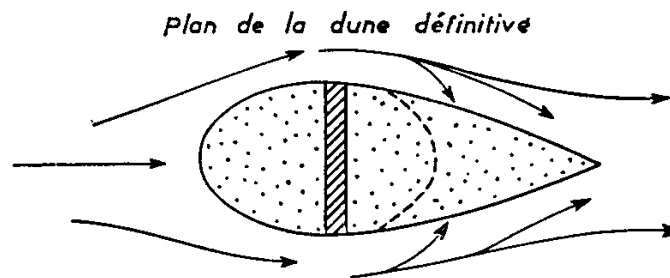


Figure 85 : Mouvement de sable autour de la forme profilée. (Duchemin, 1958).

Dans un autre modèle Duchemin s'inspire toujours du travail de la nature et propose une habitation dont le profil vertical (élévation) cette fois-ci a pour forme l'aspect du sable qui s'accumule en amont et en aval d'un obstacle jusqu'à ce qu'il atteigne un état d'équilibre (fig.86).

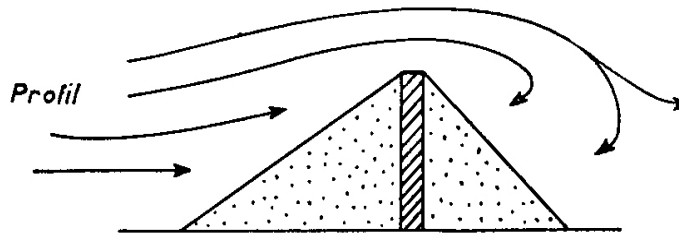


Figure 86: profil d'une dune équilibrée d'après Duchemin (1958).

En profil la dune créée se présente sous un angle approchant les 30° au vent et de 45° sous le vent. On aboutit donc à une forme prismatique comme illustrée en figure 87.

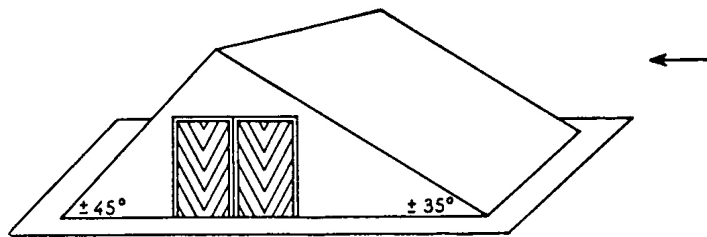


Figure 87: schémas de maison profilée en élévation d'après (Duchemin, 1958).

Dans les deux cas de figure, l'auteur tend à adopter une forme dont l'aérodynamisme tend à créer des perturbations légères dans le vent pour déranger le moins possible sa capacité du transport de sable. Il faut signaler que ces formes proposées ont été soumises à des essais de souffleries atmosphériques réalisées à partir de maquette à l'échelle 1/50. La difficulté était de trouver un rapport proportionnel à la vitesse du fluide (air) et aux matériaux transportés (sable). Il aurait fallu opter alors pour une vitesse d'air de 0,14 fois celle du vent réel, pour des grains d'un diamètre de 7 fois supérieur au volume de sable réellement transporté et une densité égale au 1/3000 environ de celle du sable.

- Par rapport une maison classique rectangulaire (maquette1) l'ensablement est minimum dans le cas d'une maison profilée en plan fuselé (maquette8) et un peu plus marqué pour un bâtiment profilé en plan rectiligne (maquette9). Fig.88

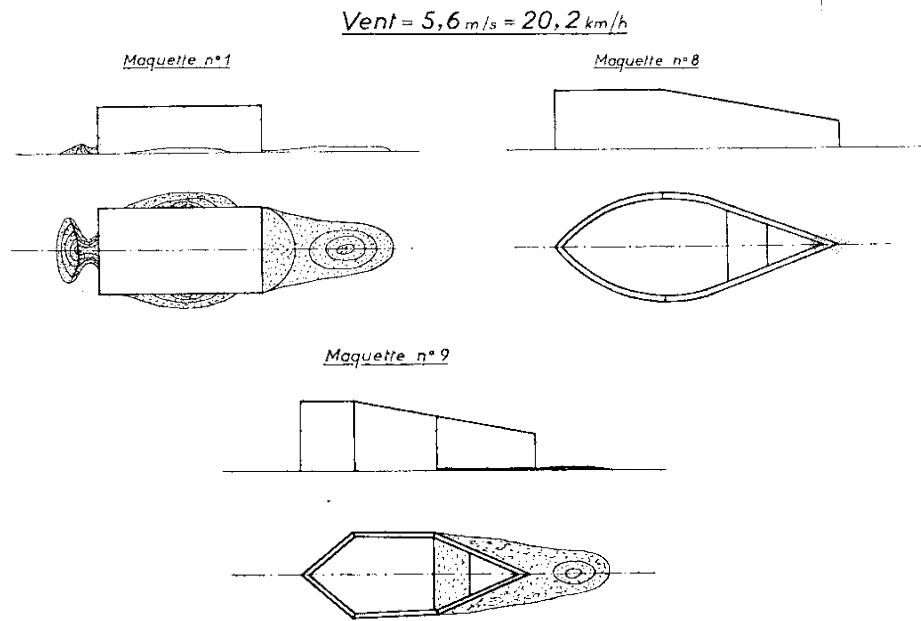


Figure 88 : essai en soufflerie- maquette de bâtiment en forme prismatique d'après (Duchemin, 1958).

- La maquette 6 pour une forme prismatique a donné des résultats discutables ; toutefois des essais devraient être faits sur place pour déterminer les valeurs exactes des angles de base amont et aval (fig.89).

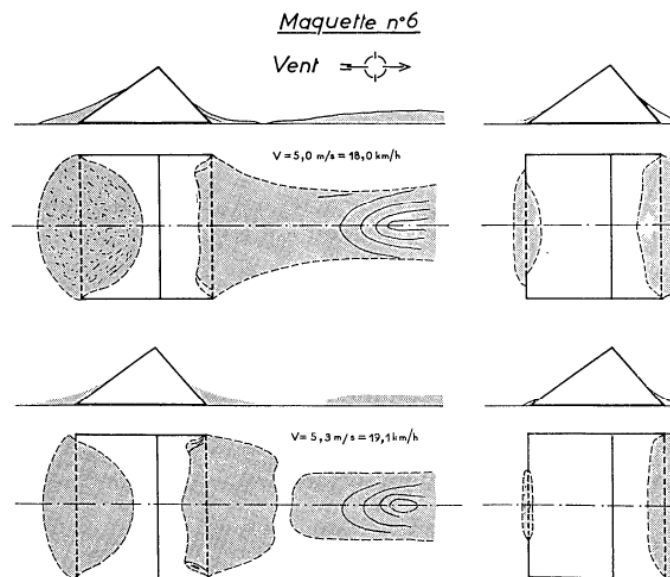


Figure 89 : essai en soufflerie - bâtiment en forme prismatique (Duchemin, 1958).

- Pour la forme trapézoïdale maquette 7, on peut extrapoler des bâtiments de dimensions très diverses y compris de grands entrepôts et en se limitant à cette seule forme une série d'essais en grandeurs croissantes permettrait de fixer la variation optimale des angles aval et amont en fonction de la hauteur et de la longueur du bâtiment (fig.90).

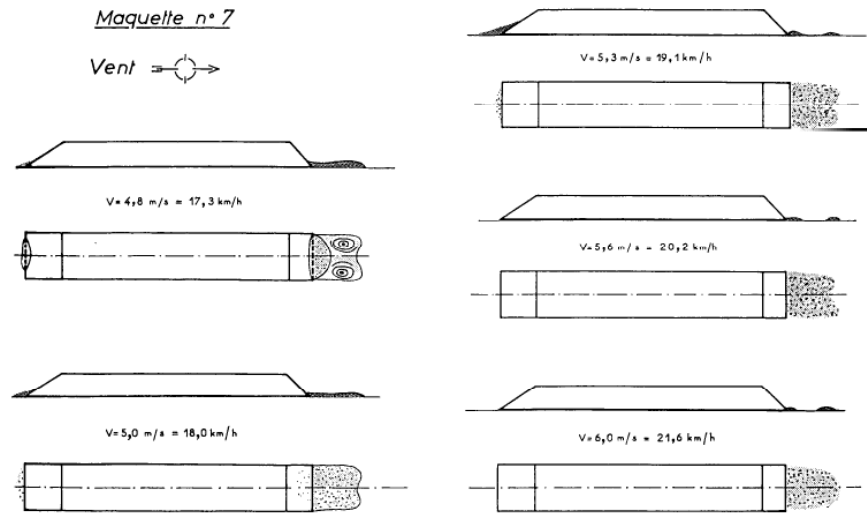


Figure 90: maquette de bâtiment en forme trapézoïdale d'après (Duchemin, 1958)

5.2.3. Autour d'un groupement d'obstacles

Pour le cas d'un groupement d'habitation, Duchemin (1958) avait mené une série d'essais de simulations atmosphériques à partir des maquettes d'un groupement de bâtiments dont il fait varier à chaque fois l'espacement en gardant toujours la même forme profilée identique pour l'ensemble des bâtiments (fig.91).

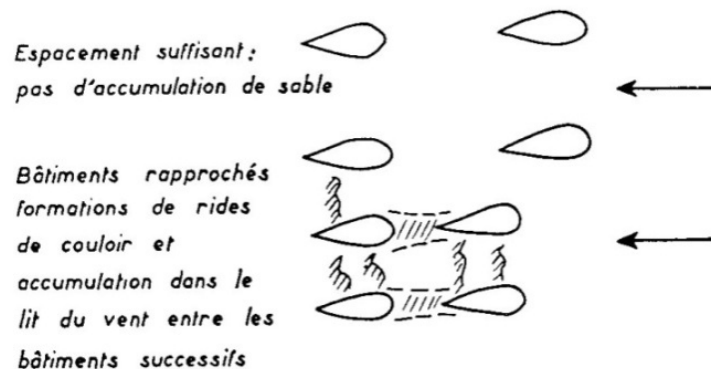


Figure 91: essai en soufflerie - cas de petites constructions groupées d'après (Duchemin, 1958)

Les différents essais ont conduit aux recommandations suivantes :

- La forme du bâtiment doit avoir une largeur maximale au niveau du tiers de la longueur à partir de l'extrémité au vent. Le toit doit être plat. La forme doit ainsi disposer d'une étrave angulaire et non pas seulement arrondie et d'un arrière très effilé (fig.92).

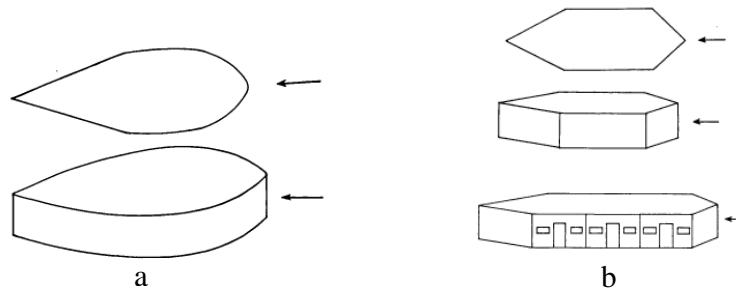


Figure 92: schémas de maisons profilées (Duchemin, 1958) ;
a- en arrondi. b- angulaire

- Entre les maisons groupées les perturbations réciproques provoquent des rides de couloir. Duchemin recommande que l'espacement soit de deux longueurs et de deux largeurs entre les petits bâtiments pour éviter ces rides (fig.93).

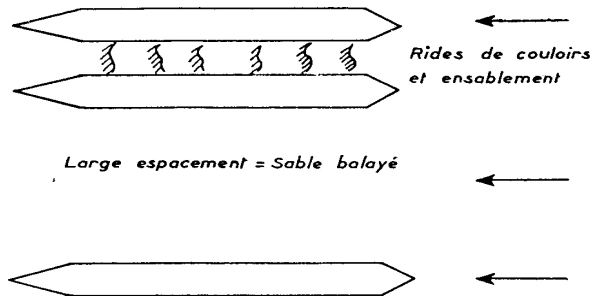


Figure 93: essai en soufflerie ; Cas de grands bâtiments groupés d'après (Duchemin, 1958).

- Pour des bâtiments plus grands et plus allongés, l'espacement en couloir devra être plus important. D'autre part tous ces bâtiments doivent être d'une surface très lisse et ne devront présenter aucune saillie. De même qu'il est préférable de les border d'un trottoir ou d'une chape de ciment et à niveler le sol avoisinant afin de favoriser le déplacement de sable et empêcher sa stagnation.
- Pour des bâtiments parallèles dans le sens de la longueur l'espacement n'a pas été déterminé cependant il doit être moins important proportionnellement à leur longueur et doit logiquement croître plus rapidement que la largeur des bâtiments.

Dans le même registre, un autre travail a retenu notre attention : il s'agit de celui réalisé par Naaim-Bouvet (2003) sur les écoulements bi-phasiques turbulents de neige. Même si le travail porte sur le déplacement de particules de neige, toutefois et dans ses simulations en soufflerie, Naaim-Bouvet avait opté pour des grains de sable pour simuler l'interaction avec des tas freineur (obstacles) composés de différentes séries de volumes. Cette étude nous a permis de tirer des rapports dimensionnels quant aux volumes qui génèrent le moins de dépôt en amont et en aval mais aussi dans les vides séparant les rangées que l'on peut assimiler à des rues intérieures dans le cas d'une forme urbaine.

Le dispositif expérimental utilisé est la soufflerie diphasique de l'Irstea⁶⁸ (ex-Cemagref). En circuit fermé et d'une longueur totale de 13 m. Elle dispose d'une veine d'étude de 4,5 m de long pour une section de 1 m sur 0,5 m. Sa vitesse maximale est de 17 m/s. Une grille de turbulence permet d'obtenir une couche limite d'environ 20 cm (fig.94).

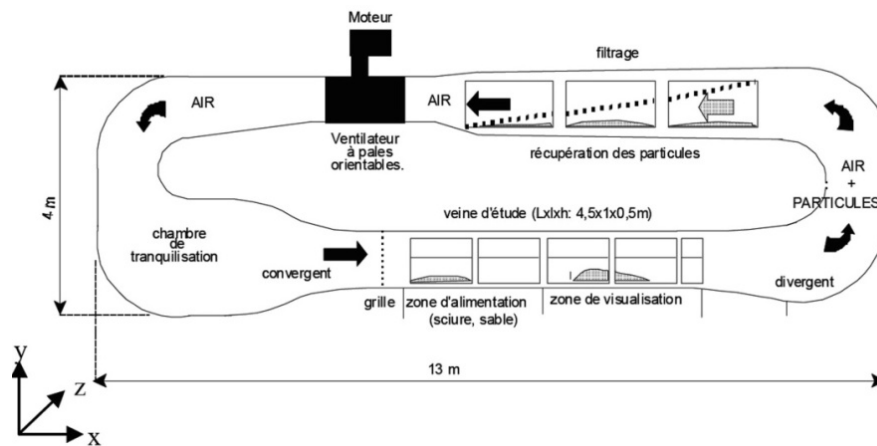


Figure 94: Schéma de la soufflerie diphasique de l'Irstea (ex-Cemagref). Naaim-Bouvet, 2003

Il est à noter que les différentes couches limites se développent sur le fond, le plafond et sur les côtés latéraux tout au long de la veine d'étude qui a une section constante. De ce fait la vitesse de frottement ne sera pas constante le long de l'axe x et la partie « utile » de la zone d'étude se limitera aux 60 cm centraux suivant l'axe z, les effets de bord en fin de veine étant importants. Les particules sèches sont soit déposées de façon uniforme dans la zone d'alimentation et reprises par le flux d'air, soit injectées par le haut en début de veine.

L'échelle des expériences était de l'ordre de 1/200. Le passage du modèle réduit à la réalité se fait par l'intermédiaire de critères de similitude. Ces derniers peuvent être déterminés en

⁶⁸ Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. <http://www.irstea.fr/le-cemagref-devient-irstea>

examinant les équations de bilan écrites sous forme adimensionnelle. Une méthode permettant d'obtenir les critères de similitude est de faire apparaître des nombres sans dimension dans les équations de bilan. Les caractéristiques des particules utilisées sont présentées en tab.6 suivant :

Tableau 6: caractéristiques des particules. (Naaim-Bouvet, 2003)

Particules	Densité σ kg/m ³	Densité apparente γ kg/m ³	Diamètre moyen D_p μm	u_{*t} (mesuré) m/s	u_*/u_{*t} (mesuré)	U_F (calculé pour un D_p moyen) m/s	U_F/U_*	Longueur de saltation L_s (m)
Sable	2650	1200	115	0,28	1,1	0,72	2,3	0,03

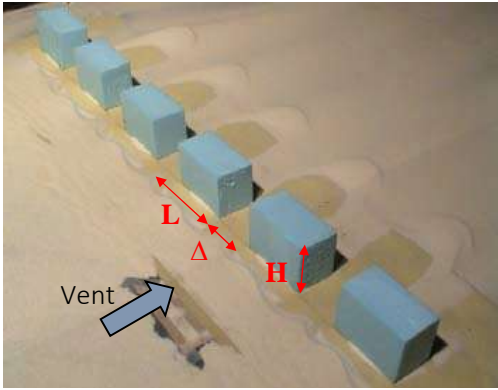
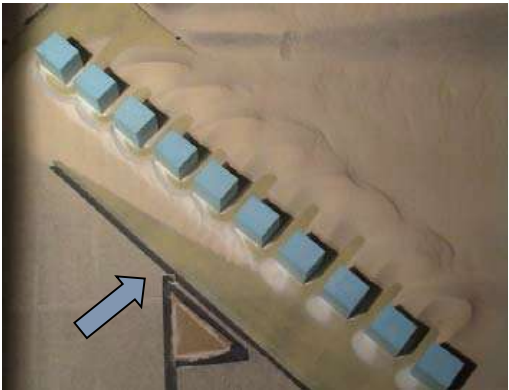
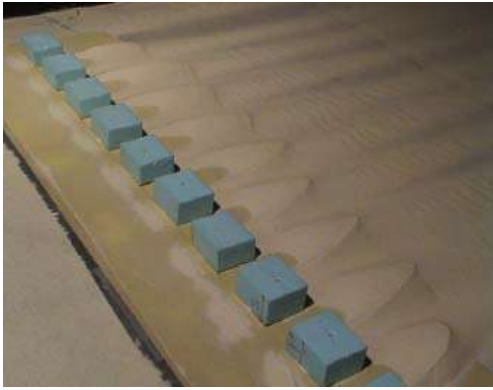
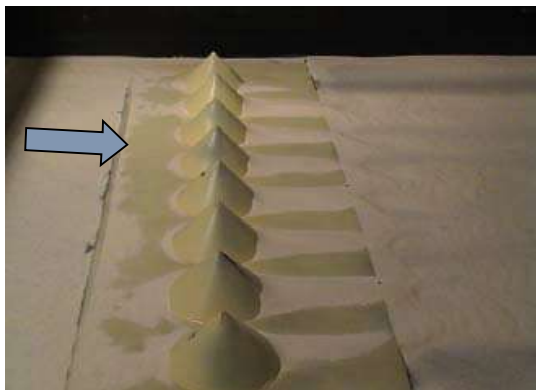
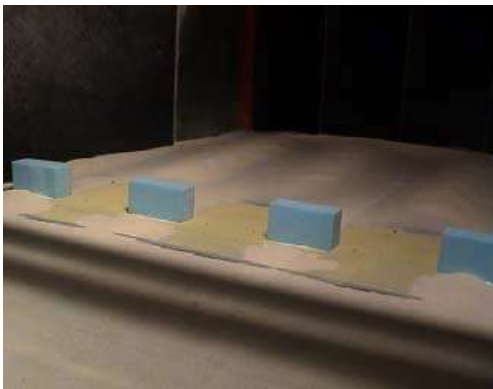

Les différents dispositifs de protection paravalanche testés ont les caractéristiques suivantes :

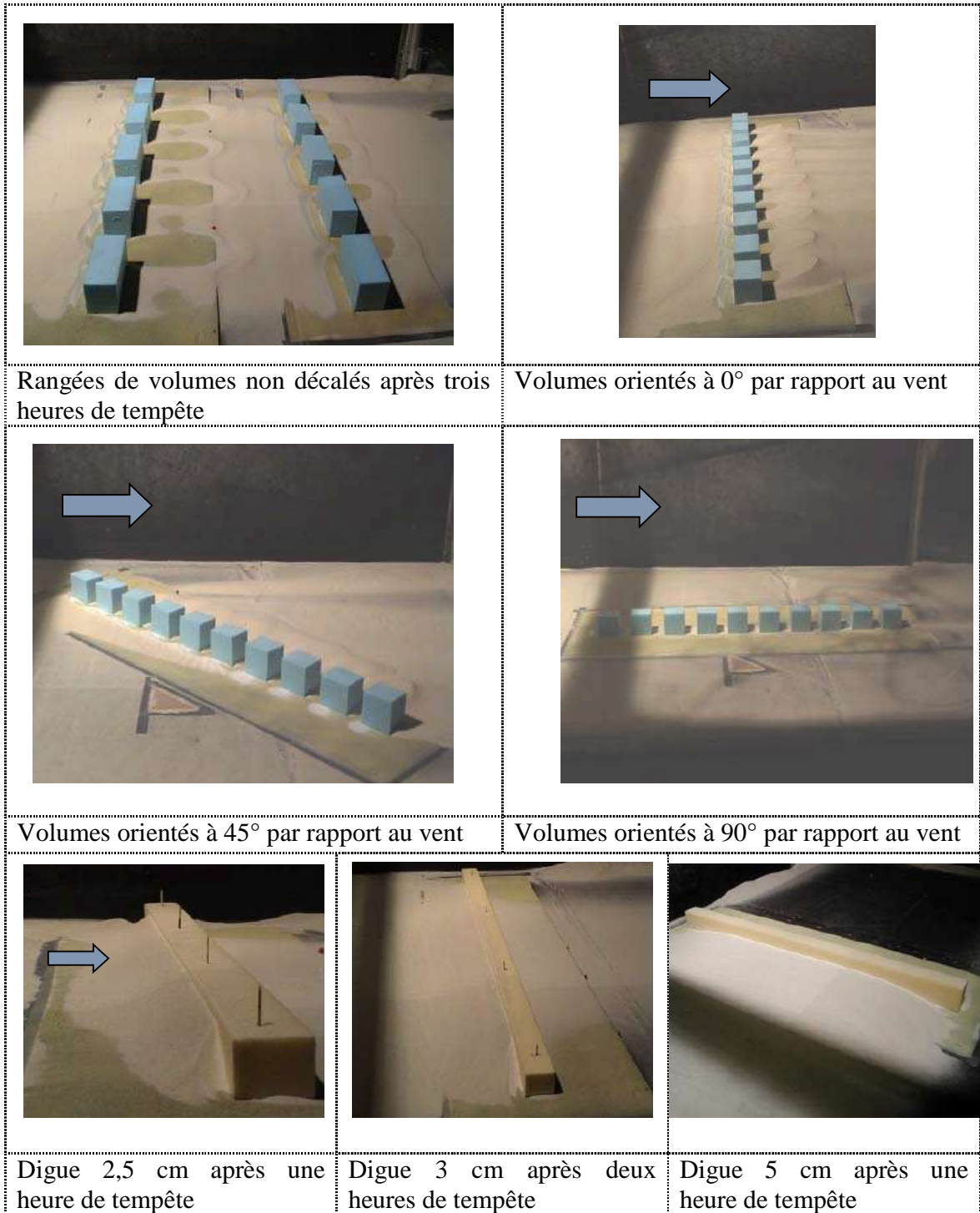
Tableau 7: caractéristiques des différents modèles testés. (Naaim-Bouvet, 2003)

N°	Modèle	Hauteur (H) [cm]	Largeur (L) [cm]	Distance entre volumes Δ [cm]	Ratio H/L	Ratio L/ Δ (porosité)	Caractéristiques particulières
1	Digue 2,5 cm	2,5	-	-	-	-	-
2	Digue 3 cm	3	-	-	-		
3	Digue 5 cm	5	-	-	-		
4	Digue Semi-arrondie	3	44	-	-		
6	Volumes type A	5	7,5	5	0,67	1	-
7	Volumes type B	5	5	3	1	1,66	
8	Volumes type C	2,5	5	3	0,5	1,66	
9	Volumes type D	5	10	15	0,5	0,66	
10	Volumes type coniques	5	10	0	0,5	-	
11	2 rangées de volumes non décalées	5	10	6	0,5	-	
12	2 rangées de volumes décalées	5	10	6	0,5	-	Distance entre deux rangées : 30 cm

Pour plus de clarté, ci-après en tableau 8 des photographies des différents dispositifs testés.

Tableau 8: photos des différentes dispositions testées par rapport à l'accumulation des grains de sable (Naaim-Bouvet, 2003).

	
Volumes type A après trois heures de tempête	Volumes type B après une heure de tempête
	
Volumes type C après trois heures de tempête	Volumes type conique après trois heures de tempête
	
Volumes type D après trois heures de tempête	Deux rangées de volumes décalés après trois heures de tempête.



Les hauteurs de dépôt ont été mesurées à l'aide d'une diode laser (avec une précision de l'ordre du mm) déplacée sur un chariot de mesures bidimensionnel suivant un maillage de 5 mm permettant d'obtenir une visualisation tridimensionnelle du dépôt engendré. Ci-dessous

les graphes synthétisant l'évolution temporelle du volume adimensionnel pour les différentes configurations testées (fig.95 et 96).

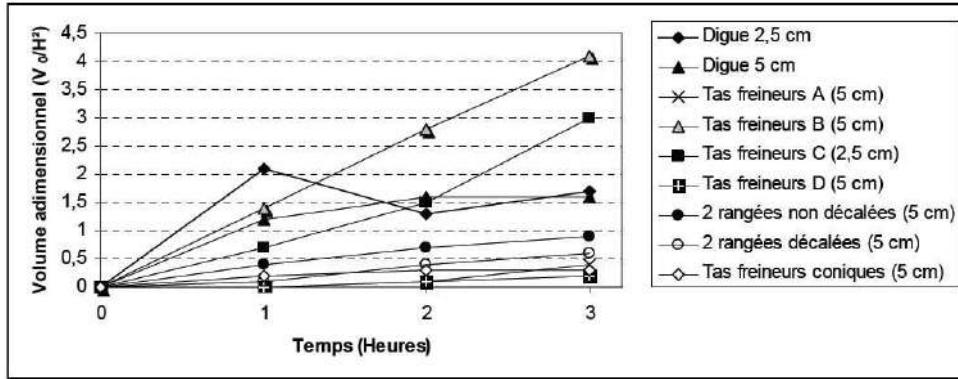


Figure 95: évolution temporelle du volume adimensionnel pour les différentes configurations avec un vent perpendiculaire (90°). (Naaim-Bouvet, 2003)

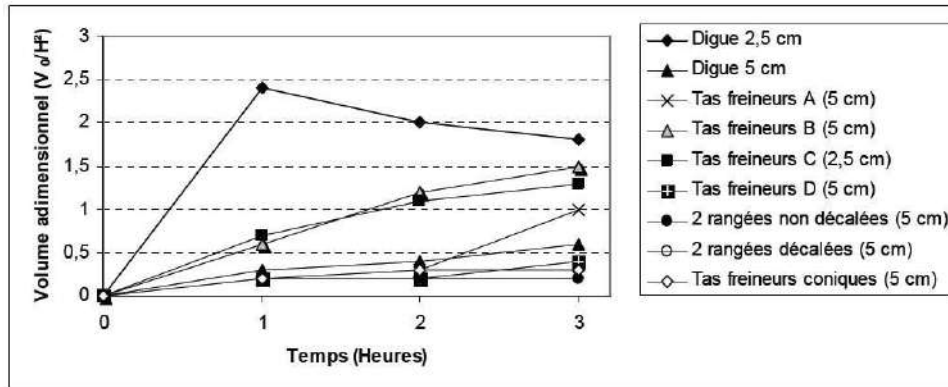


Figure 96: évolution temporelle du volume adimensionnel pour les différentes configurations pour un vent à 45°. (Naaim-Bouvet, 2003)

Contrairement aux digues, les volumes séparés ne génèrent pas beaucoup de dépôt du côté au vent, cela paraît évident du fait de la porosité présente entre les volumes et qui facilite la dissipation du fluide au travers ceux-ci. Cependant il est à noter que dans le cas des digues l'essentiel de l'accumulation se produit au vent de la structure tandis que dans le cas des tas volumes, cette accumulation se produit sous le vent.

La comparaison entre volumes en termes de masse de sable accumulé révèle que les volumes type B sont ceux qui génèrent le plus de dépôt, cela se confirme clairement au fil du temps. Les volumes type C semblent avoir un comportement aérodynamique analogue aux précédents, et génèrent aussi à leur tour un dépôt plus important que celui engendré par une digue d'une même hauteur.

Il semble que vis-à-vis de l'accumulation des grains de sable le rapport L/Δ (porosité de la façade au vent) joue un rôle prépondérant. En effet, plus ce rapport est petit, plus la quantité de sable accumulée est faible. Ainsi les volumes type D, pour lesquels ce rapport est égal à 0,66, génèrent le moins de dépôts ; l'accumulation est encore plus faible que celle produite par les volumes coniques qui individuellement ont une forme beaucoup plus aérodynamique sauf que pour ce dernier cas l'espacement Δ est nul (tab.7).

Une fois de plus l'intérêt du rapport L/Δ se confirme à travers le cas des volumes type A, où ce rapport est égal à 1, et les accumulations générées bien que supérieures à celle entraînées par les volumes type D restent largement inférieures à celles générées par les volumes type B, et ceci à une hauteur équivalente.

Selon Naaim-Bouvet (2003), il est préférable de décaler deux rangées de volumes, plutôt que de les positionner exactement l'une derrière l'autre, ceci dans le cas où les rangées seraient suffisamment proches (inférieure à 10h) pour que leurs sillages interagissent.

Quel que soit le dispositif, un vent perpendiculaire à l'axe de la digue ou aux rangées de volumes, correspond à la situation la plus critique. En moyenne, le volume de particules accumulé diminue de 55% à 65% pour une direction de vent de 45° et il devient négligeable pour une direction de vent de 90° .

5.3. Modèle mathématique de « saltation » et calcul du bilan sédimentaire

5.3.1. Equations de mise en mouvement des grains

Appelée aussi mode de transport par charriage, la saltation joue un rôle central dans les processus éoliens car elle initie habituellement les autres modes de transport, y compris l'émission d'aérosols de poussière qui se déplacent ensuite en suspension. C'est pour cette raison que la saltation est considérée comme étant le mode le plus à craindre en termes d'ensablement.

La saltation est le mode de transport qui a lieu quand le cisaillement dû au fluide en écoulement est capable d'entraîner des grains, mais n'est pas capable de les mettre en suspension. Il a donc lieu quand le cisaillement dû au fluide est limité à une gamme de valeurs : au-dessous il n'y a pas de mouvement, au-dessus les grains sont mis en suspension. La contrainte de cisaillement du vent appliquée sur le sol (τ) est d'une valeur de $\tau \sim 0,05 \text{ N/m}^2$ pour le sable meuble (Greeley et Iversen, 1985).

Cette plage de valeurs de la contrainte peut être quantifiée en considérant que le transport de grains par saltation dépend d'un bilan entre deux forces :

- Une force motrice liée aux contraintes exercées par le fluide sur les grains, d'ordre τd^2 , où (τ) est la contrainte au niveau des grains causée par l'écoulement et (d) le diamètre des grains. Dans le cas d'un écoulement turbulent, $\tau = \rho U^*$. Où (U^*) est la vitesse de frottement ;
- Une force de résistance liée à la pesanteur par la loi de Coulomb⁶⁹ : elle est égale au poids apparent multiplié par un coefficient de frottement (χ). Dans le cas d'un grain, elle fait donc échelle avec $(\rho_p - \rho) g d^3$, où ρ est la densité du fluide, ρ_p est la densité des grains et g l'accélération de la gravité ;

Le transport de grains peut avoir lieu si la force motrice est plus importante que la force de résistance, l'écoulement n'étant pas capable d'entraîner des grains dans le cas contraire. On peut regrouper tous ces paramètres dans un nombre sans dimension, appelé nombre de Shields θ (d'après Shields, 1936)⁷⁰ qui se définit comme suit :

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_p - \rho) g d} \quad \text{Eq. (8)}$$

Le charriage a lieu dans la gamme $0,01 < \theta < 1$. Au-dessous il n'y a pas de transport ; au-dessus il y a transport par suspension.

Après une mise en mouvement, les particules levées sont accélérées par le vent en trajectoires balistiques et les incidences sur le lit du sol peuvent éjecter de nouvelles particules dans le courant de fluide de saltation. Ce processus produit une augmentation exponentielle de la concentration de particules, ce qui conduit à augmenter la résistance sur le vent, retardant ainsi la vitesse du vent dans la couche de saltation (Bagnold, 1941). Ce ralentissement du vent agit comme une rétroaction négative, en réduisant la vitesse des particules, cela produit la chute de certains saltons et donc la projection de nouvelles particules dans la saltation, ce qui limite finalement le nombre de particules en saltation.

⁶⁹ Loi de Charles de Coulomb : en mécanique, la loi de Coulomb permet d'exprimer sous une forme simplifiée les forces de frottement qui s'exercent entre deux particules. Selon que ces particules glissent ou non l'une contre l'autre, on parle de glissement (frottement dynamique) ou d'adhérence (frottement statique).

⁷⁰ Cité dans De Moraes Franklin (2008, p.26)

La physique de la saltation éolienne peut donc être divisée en quatre principaux processus physiques (Kok et Renno, 2009) :

- (1) la mise en mouvement en saltation par la levée des particules de surface par un vent incident,
- (2) les trajectoires subséquentes des particules en saltation,
- (3) la projection de particules de surface par l'impact de saltons, et
- (4) la modification du profil de vent par la résistance entraînée par l'augmentation de la densité du fluide de saltation (concentration de particules).

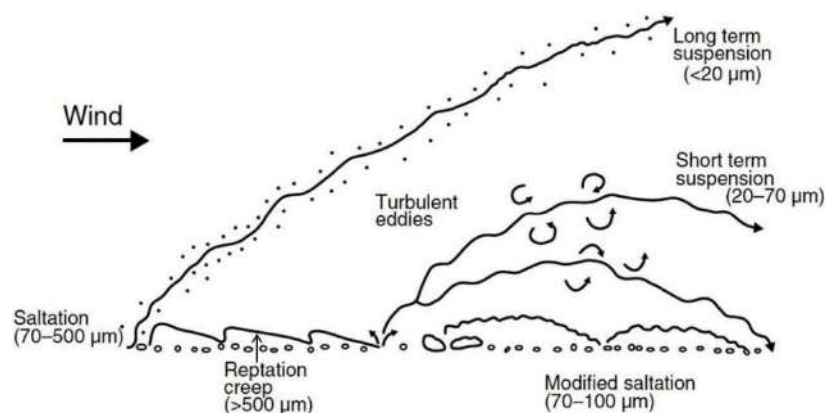


Figure 97: schéma des différents modes de transport éolien. Reproduit de Nickling et McKenna Neuman (2009). Cité dans Kok et al, (2012).

Pour que le mouvement par saltation ait lieu il faut qu'il ait une valeur critique du cisaillement du fluide sur le lit capable de déloger et déplacer un grain. La détermination de cette valeur critique, fondamentale pour bien comprendre le charriage (saltation), a été le sujet de nombreuses études, mais il n'y a pas encore un vrai consensus sur cette valeur ni sur les méthodes pour la déterminer.

Le seuil de mise en mouvement peut être obtenu par un bilan des moments subis par un grain posé sur un lit granulaire soumis à un écoulement, à la limite d'être entraîné. Les forces appliquées par l'écoulement sur le grain seront la trainée (d'origine inertielle ou visqueuse) et une force de portance. En plus de ces forces, la pesanteur et la poussée d'Archimède⁷¹ agissent aussi sur le grain.

⁷¹ La poussée d'Archimède est la force particulière (pression du fluide) que subit un corps plongé en tout ou en partie dans un fluide (liquide ou gaz) soumis à un champ de gravité. <http://www.futura-sciences.com/>

Bagnol (1941), propose un bilan des moments en un point en considérant juste la trainée d'origine inertielle, la pesanteur et la poussée d'Archimède. Dans ce cas, le moment dû au poids apparent (M_{weight}) est défini comme suit :

$$M_{weight} = \frac{\pi d^3}{6} g(\rho_p - \rho) \frac{d}{2} \sin \alpha \quad Eq. (9)$$

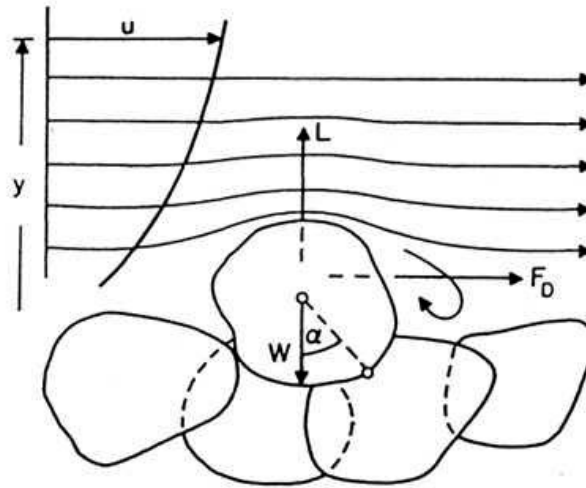


Figure 98: bilan de forces sur un grain. (Pons, 2007)

Et celui dû à la trainée (M_{drag}) est :

$$M_{drag} = \beta' \rho u_*^2 \frac{\pi d^2 d}{4} \frac{1}{2} \cos \alpha \quad Eq. (10)$$

Où β' est un paramètre prenant en compte la relation entre la valeur maximale de la contrainte et sa valeur moyenne (puisque'ici l'intérêt est dans des valeurs instantanées pouvant déloger le grain), mais aussi la proportion de la surface du grain exposée à l'écoulement (et donc subissant la trainée). Par le bilan des moments, on obtient formule de Bagnold (1941) et qui est la plus utilisée :

$$U^* = k_1 \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}\right) g d} \quad Eq. (11)$$

Avec ;

U^* : vitesse critique d'arrachement (cisaillement) en cm/s

k_1 : coefficient égal à 0,1 pour un grain quand le diamètre est supérieure à 200 μm (0,02mm)

ρ_s : densité des sables (2, 65 g/cm³ pour le quartz)

ρ_a : densité de l'air (1, 23 kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

d : le diamètre moyen des grains de sables (en cm)

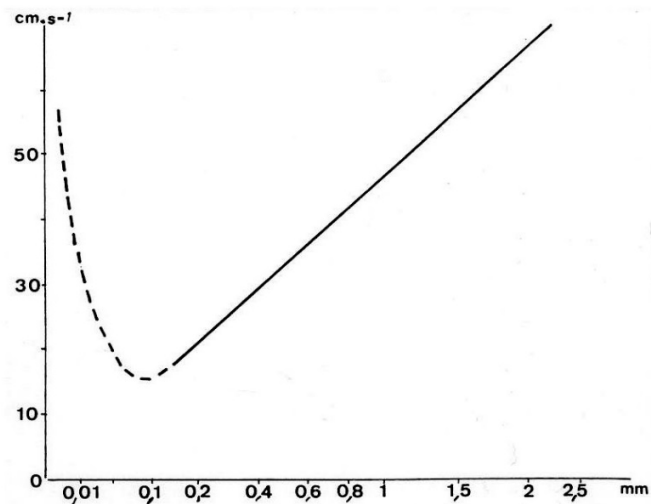


Figure 99: relation entre vitesse critique d'arrachement du vent U^* et la taille moyenne des grains de sables quartzeux (Bagnold, 1941).

5.3.2. Calcul du volume sédimentaire

Plusieurs chercheurs ont tenté de développer des expressions pour le taux du mouvement de sable en fonction de certaines variables. Une de ces expressions les plus abouties est celle de Bagnold (1941) qui rend possible le calcul de la quantité de sable transportée Q à partir de la connaissance de la vitesse d'arrachement U^* , et certains autres paramètres liés au diamètre des grains et leur coefficient de tri. Q est exprimé en kg par unité de largeur et unité de temps.

$$Q = CIt \frac{\rho}{g} U^{*3} \sqrt{\frac{d}{D}} \quad \text{Eq. (12)}$$

Avec ;

Q : quantité de sable transporté (g/cm.s ou kg/m.s)

U^* : vitesse critique d'arrachement en cm/s

C : coefficient sans dimension qui dépend du tri du sédiment = 1,5 très bon tri ; 1,8 bon tri ; 2,8 mauvais tri ; 3,5 éléments non mobilisables

P : densité de l'air (1,23 kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

d : le diamètre moyen des grains de sables (en mm)

D : valeur du grain standard (0,25 mm)

l : longueur du front exposé perpendiculairement à la direction du vent considérée (m).

t : durée de vent par an (s/période)

La contrainte de cisaillement (τ), exercée par le vent à la surface du sable par le vent est l'une des facteurs les plus importants pour déclencher les mouvements de sable sous l'action du vent.

Lorsque cette contrainte dépasse une certaine valeur critique, les particules de sable commencent à se déplacer. Tant qu'il n'y a pas de mouvement de sable, la vitesse du vent peut être décrite de la manière suivante ;

$$U = C \log \frac{Z}{Z_0} \quad \text{Eq. (13)}$$

Avec ;

U : vitesse à la hauteur Z

Z_0 : hauteur de la couche de rugosité

C : coefficient de Karman / $C=2.3 U^*/k$; ou, U^* : vitesse de cisaillement définie comme $(\tau/\rho)^{0.5}$

ρ est la densité de l'air et τ la contrainte de cisaillement.

Pour $k=0.4$ (constant de Karman) l'équation (13) devient ;

$$U = 5.75 U^* \log \frac{Z}{Z_0} \quad \text{Eq. (14)}$$

Avec ;

Z : hauteur à partir du quelle commence le mouvement des grains tel que $Z= 10d$ (mm) avec

d : diamètre de grain (mm).

Pour le calcul de Z_0 , Zingg (1953)⁷² propose l'équation :

$$Z_0 = 0.081 \log \frac{d}{0.18} \quad \text{Eq. (15)}$$

Une fois que la vitesse du vent est suffisamment grande pour déplacer des particules de sable, les profils de vitesse du vent pour différentes valeurs U semblent avoir à un certain point Z' nommé en anglais « Focus » la même valeur U' . La hauteur Z' , semble être associée à la hauteur des ondulations qui se forment sur la surface. Les études faites par Zingg (1953) permettent ainsi d'écrire la vitesse du vent au moyen de la formule :

$$U = C \log \frac{Z}{Z'} + U' \quad \text{Eq. (16)}$$

Avec ;

$Z' = 10d$ (mm), et $U' = 20d$ (miles/heure) où le diamètre de grain, d , est exprimé en millimètres.

Bagnold avait supposé un coefficient C de $5.75 U^*$ qui correspond à la valeur de 0,40 pour le constant k de Karman mais les expériences par Zingg ont donné l'équation (17) ci-dessous qui indique une valeur de 0,375 pour le constant k de Karman, d'où l'équation 16 devient :

$$U = 6.13U^* \log \frac{Z}{Z'} + U' \quad \text{Eq. (17)}$$

Depuis l'équation 17, et en connaissance de différents valeurs de U nous pourrions déduire les valeurs de U^* correspondants pour le calcul du bilan sédimentaire Q défini par l'équation 12.

5.4. Modélisation CFD

5.4.1. Introduction

En termes de simulation du flux d'air dans un environnement bâti, les trois méthodes principales qui existent de nos jours sont ; les mesures *in situ* (échelle réelle), l'expérimentation en soufflerie (échelle réduite) et la simulation avec les codes CFD (échelle

⁷² Cité dans Kadib (1964).

virtuelle). Les avantages et limites de chaque outil sont synthétisés dans le tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9: avantages et limites des différents outils de simulation atmosphérique. (Wang, 2015)

Outils d'évaluation	Avantages	Limites
Mesures sur le terrain	<ul style="list-style-type: none"> - Une grande fiabilité dans les résultats ; - Valable pour la validation des autres méthodes comme l'essai en soufflerie ou la simulation CFD. 	<ul style="list-style-type: none"> - En conception, les mesures sur le terrain sont généralement plus coûteuses que les simulations ; - Les paramètres mesurés sont limités, pour des études généralisées ; - Il est souvent difficile de maintenir des conditions stables tout au long des tests.
Essais en soufflerie	<ul style="list-style-type: none"> - Représentation géométrique fine du bâtiment étudié et de son environnement ; - Adaptée aux études paramétriques réalisables sur des maquettes dans une veine aéraulique de soufflerie ; - Adaptée aux mesures des pressions sur les façades ; - Adaptée aux mesures des vitesses d'air et/ou débits à l'intérieur du bâtiment. 	<ul style="list-style-type: none"> - Simplification et abstraction de réalité physique ; - Effets sur le nombre de Reynolds (effet de taille de la maquette réduite) ; - Pas de prise en compte des phénomènes thermiques ; - Intrusion des mesures sur la maquette ; - Souvent très cher ; - Incompatible potentielle entre la maquette de petite échelle et la réalité ; - Pas de représentation de l'écoulement du champ mais accès uniquement à des mesures ponctuelles ; - Réservée à des experts.
Simulations CFD	<ul style="list-style-type: none"> - Très adaptés aux études paramétriques, notamment tout ce qui concerne la modélisation des volumes construits ; - Représentation d'une image entière de l'écoulement ; - Simulation à grande échelle ; - Adaptés aux études d'écoulement du vent à très petite échelle ; - Possibilité de prise en compte des phénomènes d'origine thermique ; - Calcul des écoulements intérieurs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Représentation géométrique plus succincte pour un résultat proche de celui obtenue en soufflerie ; - Calculs longs si la géométrie est complexe ; - Grande puissance de calcul de l'ordinateur est nécessaire ; - Réservés à des experts ; - Difficulté de définir les conditions aux limites qui peuvent avoir des effets importants sur la résolution du modèle ; - Difficulté de valider les résultats de la simulation.

a. Qu'est-ce qu'une modélisation ?

La modélisation est un instrument incontournable pour explorer une réalité, les modèles peuvent, en effet, avoir des rôles très différents : ils peuvent décrire, expliquer, prévoir ou aider à une prise de décision. La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique. Le modèle sera alors *numérique* ou *analogique*.

Lorsqu'on parle de modélisation, nous avons le choix entre deux types à savoir ; la modélisation analogique via la soufflerie atmosphérique ou la modélisation numérique via les codes CFD tel que ; Phoenics, Ecotect, Airpak, CFX, Flow3D, ENVI-met, ANSYS Fluent...etc.

Même si la modélisation en soufflerie tient compte de plusieurs phénomènes sur le site réel, comme l'environnement avoisinant du cas à étudier, l'influence de la topographie du site et la rugosité du sol. Ce genre de simulation en laboratoire nécessite une construction des modèles à une échelle réduite et nécessite donc un investissement lourd en termes de temps et d'argent. Ce qui explique d'une part notre choix pour la modélisation numérique CFD qui est d'ailleurs très reconnue pour sa performance dans plusieurs domaines comme l'aérodynamique (construction automobile, aéronautique...etc.) et l'hydrodynamique (construction navale). Une recherche menée par Gadilhe (1992) au laboratoire CRENAU⁷³ (ex- CERMA) de l'Ecole d'Architecture de Nantes, sur un espace urbain à Nantes a révélé une bonne concordance des résultats entre modélisation analogique et numérique, ce qui est encourageant pour l'utilisation de la modélisation numérique pour notre étude vu les similitudes qu'elle présente.

b. Qu'est-ce qu'un modèle ?

Un modèle est une représentation idéalisée de la réalité afin de faire apparaître certaines de ses propriétés. On parle ainsi de modèle, d'un modèle-type ou d'un prototype. C'est donc un schéma idéalisé ou idéal qui représente le fonctionnement réel des faits. La finalité d'un modèle est de représenter schématiquement une entité ou un processus réel dans le but de comprendre et d'expliquer son fonctionnement mais également de prévoir son comportement.

Dans notre cas, la modélisation CFD consiste à construire un système physique (modèle) qui reproduit fidèlement un phénomène que l'on souhaite étudier (ensablement). Elle nous

⁷³ Centre de Recherche Nantais Architectures Urbanités (CRENAU). Site web : <http://cerma.archi.fr/>

permettra de prédire le comportement des modèles conçus de formes bâties soumis à un phénomène d'ensablement. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène et permet ensuite d'ajuster et de modifier le modèle en fonction des résultats escomptés ou voulus. La théorie dans ce cas est nécessaire pour guider et contrôler la réflexion sur les modèles et interpréter les résultats.

c. Qu'est-ce que la CFD ?

La mécanique des fluides numérique (MFN), plus souvent désignée par le terme anglais *computational fluid dynamics* (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le mouvement du fluide. En fonction des paramètres choisis, qui sont en général le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisations disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc.

La MFN a été développé pour devenir un outil essentiel dans pratiquement toutes les branches de la dynamique des fluides, de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques en passant par le dessin des coques de bateaux. Dans le domaine de la recherche, cette approche est d'un intérêt fondamental car elle permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration) pour chaque point du domaine de calcul, pour un coût global généralement modique par rapport aux expériences correspondantes.

Une étude numérique basée sur la dynamique des fluides informatique CFD est capable de fournir des informations très fiables pour une étude détaillée. Un avantage particulier du CFD est qu'il fournit des données entières de champ d'écoulement à l'encontre de l'essai en soufflerie qui donne accès uniquement à des mesures ponctuelles.

Dans notre présente recherche la modélisation CFD a été réalisée via le logiciel ANSYS Fluent en raison de plusieurs avantages ;

- le contrôle de paramètres détaillés sur les conditions initiales tel que la possibilité d'introduire des fonctions définies par l'utilisateur, UDF (user defined function) qui permet d'adapter certains paramètres propres au cas d'étude tel que la vitesse d'entrée.
- le choix d'un modèle de turbulence parmi une panoplie de modèles proposés que nous avons détaillé ci-après ;

- les représentations et des différentes sorties des résultats de calcul qu'il propose ;
Et enfin, le choix de ce logiciel a été ainsi conditionné par l'assistance technique proposée par l'équipe du laboratoire LRA de l'école d'architecture de Toulouse (ENSA) qui dispose d'une licence du logiciel au niveau de son centre de calcul.

d. Qu'est-ce que Fluent ?

ANSYS Fluent, est un logiciel qui permet d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Il porte le nom de la compagnie qui l'a développé, rachetée par ANSYS.Inc en février 2006. Fluent est un solveur : il ne comporte pas de mailleur, le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS. Le paramétrage du modèle que l'on développera en quelques étapes ci-après se fait par une interface graphique au niveau du logiciel.

Fluent dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles de calcul, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, KW, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence.

e. Qu'est que Gambit ?

Gambit permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau. Il permet de créer plusieurs types de maillage suivant la géométrie et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide).

5.4.2. Méthodes de résolution et modèles de turbulence

Il existe plusieurs méthodes pour la modélisation de la turbulence dans les codes CFD. Selon Laporte (2008), il est très important de choisir un modèle de turbulence qui correspond le plus

au problème auquel nous faisons face, car souvent, à partir de données d'entrée identiques, et pour des modèles de turbulence différents on peut tomber sur des résultats très nuancés.

Il existe trois approches pour la simulation numérique, à savoir ; la simulation numérique directe (DNS), la simulation des grandes échelles (LES), et la simulation RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Des modèles de turbulences sont intégrés sous chacune des deux dernières méthodes que nous illustrons ci-dessous en fig.100.

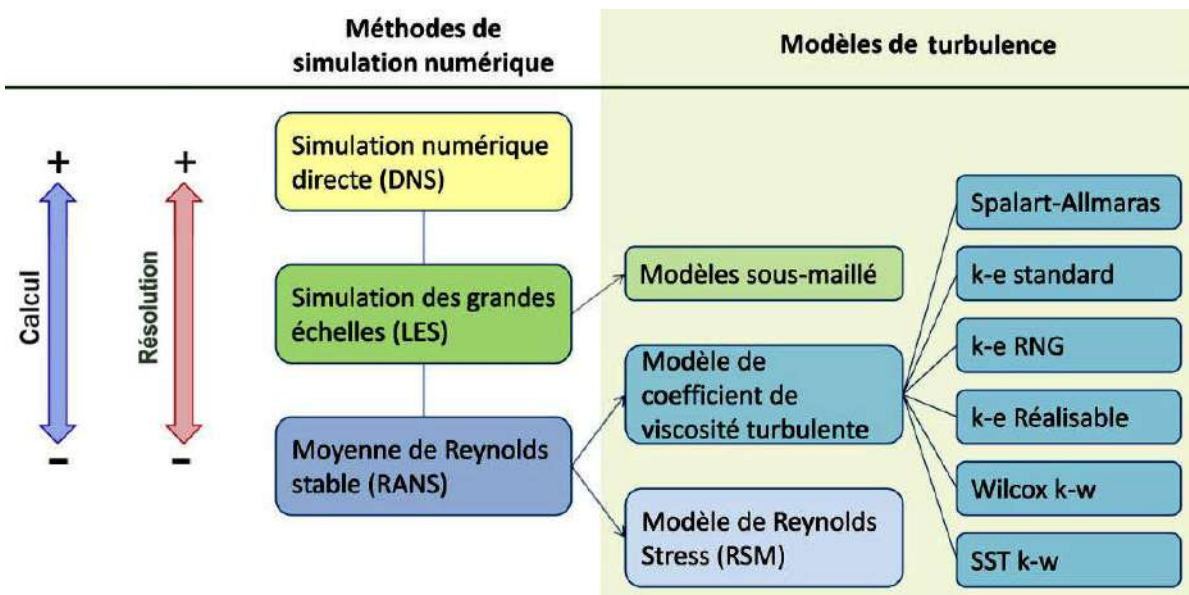


Figure 100: méthodes de calcul CFD et modèles de turbulences associés. (Wang, 2015, p.86)

- **Simulation numérique directes (DNS)**

Cette méthode permet de résoudre toutes les équations de Navier-stokes sans un modèle de turbulence. Le calcul doit résoudre toutes des échelles spatiales et temporelles de l'écoulement, en représentant toutes les structures tourbillonnaires. La résolution spatiale et temporelle doit être très élevée. Dans cette méthode, les équations de la continuité et du bilan de quantité de mouvement forment un système d'équation fermé de quatre équations à quatre inconnues (μ_i, μ_j, μ_k trois composantes de vitesse et ρ la pression).

Théoriquement, la résolution de ce système est possible et ne nécessite aucun modèle. En revanche, en pratique cela n'est pas toujours possible. En effet, pour un écoulement laminaire avec une géométrie assez simple la DNS est possible. Mais, pour un écoulement turbulent (à

nombre de Reynolds⁷⁴ élevé), on a des structures turbulentes à toutes les échelles spatiales et temporelles. Pour pouvoir capter ces microstructures de très faible dimension il faut diviser le domaine en volumes de contrôle de taille très petite : il faut donc un maillage très fin, donc des processeurs très puissants, beaucoup de mémoire et un temps considérable pour le calcul.

En résumé, cette méthode semble être limitée à des cas de nombre Reynolds modeste (car le nombre de nœuds de maillage N doit satisfaire $N^3 \geq Re^{2.25}$). Étant donné le nombre Reynolds très élevé pour les écoulements autour des constructions ($Re > 10^5$), cette méthode ne semble pas être convenable à notre cas d'étude. (Nouri, 2013)

- **Simulation des grandes échelles : Large-eddy simulation (LES)**

Généralement, ce modèle est très adapté à l'écoulement de sillage, et reste avantageux pour des flux transitoires, des flux séparés ou des flux autour ou derrière un obstacle, qui ne peuvent pas être simulés par les modèles RANS (Wang, 2015). Cependant, ce modèle requiert des mailles sensiblement plus fines que celles utilisées pour les modèles RANS. En outre, comme il est conçu pour résoudre les fluctuations instables dans le flux, il doit être exécuté pour des temps suffisamment longs afin d'obtenir des statistiques stables de l'écoulement modélisé. Le modèle LES est donc normalement adapté aux ordres de grandeur plus élevés que celui des modèles RANS en termes de mémoire vive (RAM) et de temps CPU (Fluent 6.0 Tutorial Guide, 2001).

- **Simulation à moyenne Reynolds (RANS)**

Pour un fluide newtonien stationnaire et incompressible et sur la base des équations de Navier-Stokes, Osborne Reynolds avait proposé une décomposition de la quantité instantanée à ses quantités moyennes et fluctuantes dans le temps. Ces équations peuvent être utilisées avec des approximations basées sur la connaissance des propriétés de la turbulence de l'écoulement, pour donner des solutions en moyenne temporelle des problèmes de la turbulence.

Même si les différents modèles RANS se développent et proposent des améliorations sur la base du modèle k-ε Standard, la limite principale de ces modèles demeure dans leur incapacité à modéliser les caractéristiques intrinsèquement transitoires du champ d'écoulement tel que la séparation et le recyclage produits en aval du bâtiment, ainsi que la formation de tourbillons

⁷⁴ Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent). http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Reynolds

dans le sillage. Par conséquent, la précision des méthodes LES est nettement supérieure, cependant, les simulations LES sont beaucoup plus complexes que celles des RANS. A noter aussi qu'il existe aujourd'hui des « benchmark »⁷⁵ pour de meilleures pratiques des RANS pour l'environnement extérieur autour des bâtiments, mais que cela est, au moins à l'heure actuelle, pas le cas pour les modèles LES. En outre, les méthodes LES requièrent évidemment beaucoup plus de temps que les RANS (Blocken et al., 2011).

Les caractéristiques des différentes méthodes CFD sont synthétisées dans le Tableau 10.

Tableau 10: comparaison des différents modèles de turbulence proposés sous Fluent. (Fedala, 2007)

Modèles		Avantages	Limites/Inconvénients
Simulation numérique directe (DNS)		Il résout toutes les échelles spatiales et temporelles de l'écoulement. Il est très précis mais demande beaucoup de puissance de CPU.	Faible nombre de Reynolds.
Simulation de grande échelle (LES)		Il résout les grands tourbillons et simule les petits. Il est précis mais demande un maillage assez fin et un CPU de grande puissance	Simule les flux de type : sillage, transitoire, séparé, autour ou derrière un obstacle.
Moyenne Reynolds (RANS)	Spalart Allmaras	Economique (01 Eq.). Bon pour les écoulements moyennement complexes, et les écoulements sur profil.	N'est pas largement testé.
	Standard k-ε	Robuste, économique et relativement précis.	Résultats médiocres pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
	RNG k-ε	Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, écoulements secondaires).	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
	Realizable k-ε	Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandé dans le cas des turbomachines. Respecte une contrainte physique que le modèle RNG k-ε peut violer.	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
	Reynolds Stress Model (RSM)	Le modèle le plus complet physiquement (transport et anisotropie de la turbulence sont pris en compte).	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et turbulence sont étroitement liées.
	SST et Standard k-ω	Modèle le plus recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines, meilleur que le Realizable k-ε.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières.

⁷⁵ Appelé aussi « guideline », c'est un ensemble de lignes directrices.

- **Choix du modèle de calcul CFD**

Après avoir pris connaissance des différents modèles de turbulences et leur caractéristiques proposées en CFD sous le code Fluent, notre choix s'est porté sur le modèle k-ε Standard. Ce choix n'est pas anodin, il est justifié par le fait que ce modèle de turbulence a la particularité d'être le plus couramment utilisé en CFD pour simuler les caractéristiques d'écoulements moyens turbulents ce qui convient à notre cas d'étude où le régime d'écoulement du flux d'air est perturbé par la présence de combinaisons complexes de l'espace urbain (grand nombre de Reynolds, petite et grande échelle à la fois). Un autre point d'une grande importance qui a susciter notre intérêt pour le choix de ce modèle est la disponibilité d'un « benchmark » relatif à la bonne pratique des calculs CFD avec les modèles RANS publié par Franke, et al., (2004) que nous aurons à détailler dans la partie dédiée à la validation CFD.

- **Modèle de turbulence (k- ε) Standard**

Le modèle k-ε standard est un modèle semi-empirique. Deux équations de transport sont utilisées : une pour l'énergie cinétique de turbulence k (*Turbulence Kinetic Energy TKE*) obtenue à partir d'une équation exacte (Eq.18) et l'autre pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique ε (*turbulence dissipation rate*) obtenue par résonance physique (Eq.19) (Brangeon, 2008).

- Equations de transport :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot k \cdot U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{Eq. (18)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot \varepsilon \cdot U_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \text{Eq. (19)}$$

Avec ;

G_k : génération de l'énergie cinétique due au gradient de vitesse

G_b : génération de l'énergie due au décollement et des forces de volume

Y_M : contribution de la dilatation fluctuante dans La turbulence compressible pour (ε)

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$: constantes,

S_k , S_ε : terme source,

σ_k , σ_ε : nombre de Prandtl turbulent pour k et ε

- Modélisation de la viscosité⁷⁶ turbulente :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad Eq. (20)$$

Les résultats de calcul dépendent fortement de la valeur des constantes empiriques, cela constitue une faiblesse de ce modèle, bien que les auteurs admettent le plus souvent les mêmes valeurs. Les constantes, déterminées empiriquement par les auteurs du modèle, sont :

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}= 1.92, C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} C_{1\varepsilon}=0.7, \bar{C}_k = 1, \bar{C}_\varepsilon = 1,3, \bar{C}_t = 1$$

- L'équation de continuité ou bilan de la masse : Dans le cas des écoulements incompressibles à masse volumique constante, l'équation de continuité s'écrit de la forme suivante (en utilisant la convention d'Einstein sur les indices répétés) :

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} = 0 \quad Eq. (21)$$

- Les équations du bilan de quantité de mouvement (dites équations de Navier-Stokes) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad Eq. (22)$$

Où ; u_i désigne la composante du vecteur de la vitesse instantanée du flux dans la direction de x_i ($i = 1, 2, 3$, qui représentent respectivement les coordonnées X, Y, Z), t représente le temps, p désigne la pression du fluide, μ désigne la viscosité dynamique du fluide, ρ désigne la masse volumique du fluide, et f_i désigne la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide.

Les équations de Navier-Stokes généralisent les équations d'Euler en introduisant un terme de viscosité tenant compte de phénomènes de frottements. La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue (Guyon et al., 2011).

⁷⁶ La viscosité est la propriété d'un fluide (liquide ou gaz), par lequel elle résiste à un changement de forme ou de mouvement des parties voisines par rapport à l'autre. Donc viscosité désigne l'opposition à l'écoulement.

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension a été défini par Padet, (1991) par l'équation suivante ;

$$R_E = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu_d} \quad \text{Eq. (23)}$$

Avec ;

ρ : masse volumique du fluide [kg/m³]

U : vitesse caractéristique du fluide [m/s]

L : dimension caractéristique [m]

μ_d : viscosité dynamique du fluide [Pa.s ou kg/(m.s)]

Quand le nombre de Reynolds caractéristique augmente, des perturbations s'amplifient, donnent naissance à des instabilités et l'écoulement devient turbulent.

En faisant varier successivement le diamètre D de la conduite, la vitesse débitante V de l'écoulement et la viscosité μ_d du fluide, Reynolds a montré qu'un écoulement en conduite cylindrique horizontale, initialement laminaire se transforme brutalement, après une courte période de transition en un écoulement turbulent dès que le nombre adimensionnel VD/μ_c baptisé nombre de Reynolds R_e dépasse une valeur critique, (avec μ_c , viscosité cinématique du fluide m²/s).

À partir d'un certain Reynolds se produit une transition qui fait apparaître des instabilités dues à l'amplification des perturbations. La valeur du Reynolds de transition et la nature des instabilités dépendent essentiellement du type d'écoulement considéré, ainsi on distingue quatre régimes principaux : régime de Stokes, régime laminaire, régime transitoire, régime turbulent.

- Si $Re < 1$, l'équation est linéaire car les phénomènes de diffusion dominant. L'équation de Navier-Stokes se simplifie et devient l'équation de Stokes ;
- Si $Re > 2000$, l'équation est non linéaire car les phénomènes convectifs dominant. Les non-linéarités produiront des effets non stationnaires pour un forçage stationnaire, des brisures de symétries par rapport aux conditions aux limites initiales, en d'autres termes, la turbulence. Ce changement brutal qui s'opère correspond au passage du mode de transport de diffusion dominant au mode de transport convectif dominant.

5.5. Conclusion

L'ensablement se produit quand les grains de sable commencent à se mouvoir suivant l'un des trois modes connus, à savoir : reptation, saltation et suspension. Le mode de saltation étant le plus récurrent car il permet aux grains de sable de diamètre 50 à 500 micromètre (μm) de se mouvoir pour des distances allant de 1 m à des centaines de mètres. Pour la production de ce mode, on parle de vent « efficace » et on admet que sa vitesse est comprise entre 4 et 4.5 m/s (Pethick, 1984). Cette vitesse supérieure au seuil critique d'arrachement permet aux grains de sable de se mouvoir à travers une série de petits bonds de trajectoire balistique et de se propulser par la suite dans le jet d'ensablement (Bagnold, 1941).

Dans un mode de saltation, les grains de sable arrivent souvent à parcourir quelques dizaines de mètres avant de regagner le sol suite à une diminution de la vitesse de l'air en dessous du seuil de portance, ou à cause d'un obstacle percuté qui vient s'opposer à leur déplacement. Les obstacles, avec leur taille, leur forme et leurs natures (arbres, pentes, reliefs, massifs) introduisent une rugosité qui provoque ainsi une augmentation de la perte de charge et une réduction de la vitesse du vent, favorisant le dépôt de sable et la formation des dunes. Une fois sur le sol, les grains s'accumulent et forment des tas que l'on appelle « sédiments » ou « dunes » en fonction de son volume. Le bilan sédimentaire positif ou négatif dépend fortement de la nature du sol (reg, erg...etc.) et de l'action du vent (érosion ou ensablement).

Les formes d'accumulation dans la nature sous forme de dunes varient d'une simple dune isolée au train barkhanique et dépendent des trois facteurs suivants : degré de mobilité, régime éolien et bilan sédimentaire (positif/négatif) (Mainguet, 2003). Mainguet et al., (2006) soutiennent que la formation de dunes est tributaire de ce que le vent dépose et de ce qu'il emporte en chaque point considéré. Lorsque, pour une raison ou une autre, la vitesse du vent diminue, ce processus est déséquilibrée au bénéfice du dépôt et l'accumulation commence. Cependant, la vitesse du vent peut augmenter du fait d'une topographie lisse, tel que la *hamada*. Le processus est déséquilibré au bénéfice de l'érosion, c'est le déplacement de sable qui l'emportera.

Quant aux formes d'accumulation au sein d'un espace bâtie et autour d'obstacles, ce sont les paramètres morphologiques de la forme bâtie qui sont déterminants dans la production ou non du dépôt de sable. Ceci a été démontré aux travers les différents exemples étudiés issus des expériences de Duchemin (1958) et Naaim-Bouvet (2003). En effet, le dépôt ou le maintien des grains de sable en mouvement dépend fortement de la forme de l'obstacle, de son

agencement et disposition avec les autres obstacles et du niveau de la turbulence générée au sein du plan de masse.

Nous avons ainsi répertorié à travers cette partie de recherche, les paramètres physiques liés à l'espace urbain qui sont à l'origine des effets aérodynamiques pour une meilleure maîtrise des mouvements d'air d'ensablement. A titre d'exemple, à une échelle de l'unité urbaine (ilot) et pour lutter contre les dépôts de sable, il serait intéressant de favoriser le déplacement de sable par la force du vent à travers l'optimisation de la fluidité de l'écoulement d'air au sein du plan de masse. Ceci requiert l'intégration au sein de cette unité urbaine d'effets aérodynamiques tels « Venturi » et/ou « canalisation » que l'on considère susceptibles d'accélérer le régime éolien et favoriser de ce fait la mise en mouvement des grains de sable et leur déplacement en dehors du périmètre bâti.

Etant soumis à la force de cisaillement, les particules de sable, par leur viscosité se glissent l'une sur l'autre pour donner une nature erratique au fluide générant un écoulement non uniforme, non permanent, turbulent et parfois tourbillonnaire très proche du comportement du vent (Bagnold, 1941). De là, nous pouvons aisément et sans risque transposer les mêmes effets aérodynamiques issues de l'interaction vent-obstacle au cas de notre fluide composé d'air et de sable.

La modélisation CFD sous Fluent, sera l'outil méthodologique privilégié dans notre expérimentation relative à l'étude de la nature d'écoulement éolien et son mécanisme d'ensablement au sein de nos modèles de formes bâties. En CFD trois méthodes de simulation de calcul sont proposées qui répondent à des problèmes de situations diverses allant d'une petite à une grande échelle. La méthode RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) est recommandée pour des écoulements moyennement complexes ce qui s'avère très compatible avec notre cas d'étude.

Concernant le modèle de turbulence, nous avons opté pour (k-ε) Standard de la méthode RANS. Ce choix est justifié par le fait que ce modèle est le plus couramment utilisé en CFD pour simuler les caractéristiques d'écoulements moyens turbulents ce qui convient parfaitement à notre cas d'étude. Un autre point a suscité notre intérêt pour le choix de ce modèle, c'est la disponibilité d'un benchmark publié par Franke et al., (2004) relatif à la bonne pratique des calculs CFD avec les modèles RANS que nous aurons à détailler dans la partie dédiée à la validation CFD.

Les différentes équations qui régissent ce modèle ont été présentées en chapitre 5 et la paramétrisation du modèle adopté (k- ϵ) Standard sera abordée dans le chapitre 8 dédié à l'expérimentation en tenant compte des caractéristiques de notre cas d'étude. Les recommandations et orientations tirées du benchmark de Frank et al., (2004) seront prises en considération lors de la validation du modèle afin de minimiser au maximum les erreurs que pourra générer le calcul.

**6. CHAPITRE VI : ETATS DES SAVOIRS SUR LES METHODES ET
TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE L'ENSABLEMENT**

6.1. Introduction

L'inventaire des techniques de lutte contre l'ensablement, actuellement en usage dans les différents pays de climat aride fait ressortir une importante diversité de ces techniques. Cette diversité est liée à l'expérience propre à chaque pays, des particularités des sites traités et de la disponibilité des matériaux utilisés. Ainsi, les types de techniques peuvent être identifiées se rapportent globalement à deux procédés de lutte mécanique et biologique. Nous reprenons ci-après dans le détail l'ensemble de ces techniques en insistant particulièrement sur celles qui connaissent une large utilisation (FAO, 1988).

6.2. Les procédés de lutte mécanique

La stabilisation mécanique constitue le préalable indispensable à une fixation durable des sables mobiles et des édifices dunaires à court et moyen terme. La lutte mécanique recourt à une panoplie de techniques visant à stabiliser, par des moyens mécaniques, les masses sableuses en mouvement ou à empêcher la formation de dépôts de sable pendant un temps assez long. Ces techniques, malgré leur variabilité apparente, se subdivisent en quatre groupes :

- La technique des palissades.
- La technique de quadrillage.
- La technique du paillage ou mulching.
- La technique aérodynamique de désensablement.

6.2.1. La technique des palissades

Le principe de la technique des palissades repose sur l'utilisation d'obstacles qui s'opposent au vent et l'obligent à déposer sa charge. Les nombreuses techniques de palissades utilisées pour stabiliser les dunes varient en efficacité. Parfois, il faut la positionner perpendiculairement au vent dominant, d'autres fois il suffit de modifier la direction d'une dune par déviation...etc. Dans certains cas, des barrières sont constituées d'arbres et d'arbustes peuvent se révéler prometteuses pour contrer l'avancée des dunes mais n'empêche que cette technique peut se révéler très coûteuse et peu rentable en raison de l'aridité extrême de certaines régions comme c'est le cas pour le Gourara.

Selon l'orientation de la palissade par rapport à la direction du vent, elle peut être soit palissade « d'arrêt » quand celle-ci est perpendiculaire au vent, soit palissade de « défilement ou diversion » dans le cas où elle est placée en biais par rapport au vent.

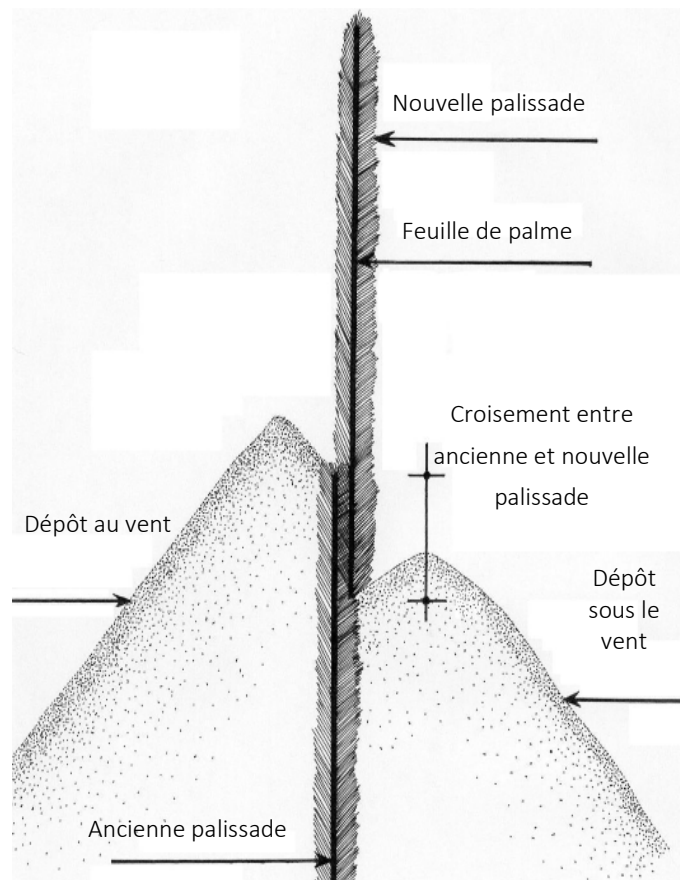


Figure 101: exemple d'une palissade végétale (dune afreg) et son principe de fonctionnement et son entretien. (Bellatrach, 2008)

b. Des palissades d'arrêt

Positionnée perpendiculairement au vent dominant, une palissade d'arrêt oppose à la force du vent dominant une résistance qui diminue la vitesse du vent et induit une diminution de la capacité de transport du sable vers les zones que nous souhaitons protéger.

Le volume de sable accumulé est proportionnel à la hauteur de la palissade utilisée. Pour plus d'efficacité les palissades doivent être installées à une certaine distance très variable de l'objet à protéger qui oscille de 30 à 300m en fonction de l'érodabilité du milieu, de la hauteur de la palissade et de l'objectif de protection recherché (arrêt ou défilement). En règle générale la distance doit être choisie de sorte que les dépôts piégés ne constitueront pas une menace à l'objet protégé (F.A.O, 1988).

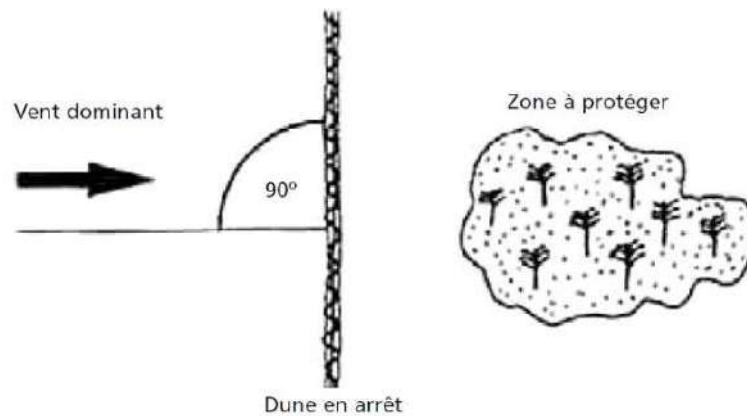


Figure 102: palissade d'arrêt. Source F.A.O. (1988)

Kerr et Nigra (1952)⁷⁷ ont envisagé de rendre ce système encore plus efficace pour lutter contre un déplacement massif de sable. Ils ont proposé alors de placer une série de palissades à différentes distances de l'objet à protéger et espacées entre elles d'environ 1500m. De cette manière, les palissades les plus éloignées freinent une grande masse du sable transporté et augmentent de ce fait la durée de vie des brise-vent intermédiaires qui sera multiplié en quatre fois et de neuf fois celle des brise-vent qui sont plus proches de l'objet. Fig.103

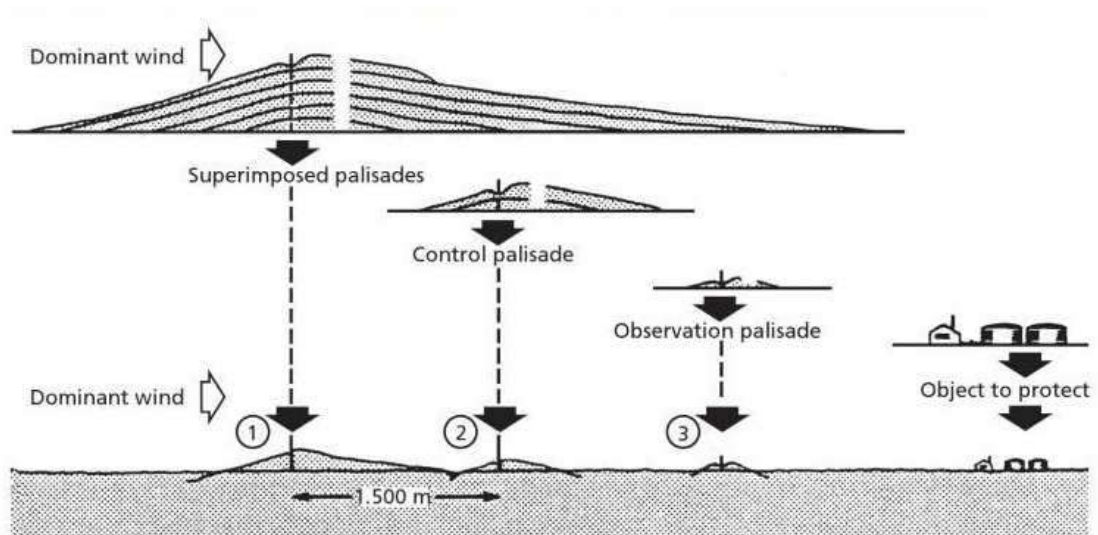


Figure 103: système à plusieurs palissades d'arrêt. Kerr et Nigra (1952) d'après Gutierrez (2012).

⁷⁷ Cité dans Gutierrez (2012).

c. Des palissades de déviation

Positionnées selon un angle de 120 à 140° par rapport au vent dominant, une grande partie des particules transportées est déviée dans le sens de l'orientation de la palissade afin d'éviter l'ensablement des infrastructures se trouvant à l'aval, c'est ce qui est désigné par le terme «blocage en défilement» (F.A.O, 1988). Fig.104

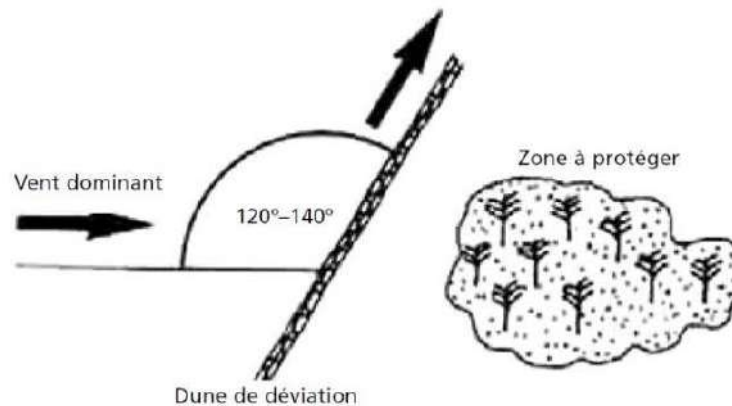


Figure 104: palissade de défilement (ou diversion). Source : F.A.O. (1988)

Les palissades de blocage en défilement sont préconisées dans les couloirs inter-dunaires en des points assez éloignés des agglomérations afin de dévier et délester les courants éoliens des particules qui viendront engraisser les édifices dunaires localisés latéralement. En revanche, lorsque les installations quelle que soit leur nature sont menacées, il est conseillé de choisir les palissades de blocage frontal (perpendiculaire à l'axe du vent dominant) afin de créer une contre-dune artificielle capable d'annihiler le processus d'ensablement.

La nature de la palissade diffère selon les matériaux utilisés. Elle peut être d'origine végétale ou synthétique. Pour les palissades synthétiques, on peut utiliser des plaques perforées en fibrociment ou de grillages synthétiques. La maille du quadrillage varie essentiellement en fonction de la hauteur de ce dernier et des particularités du site. La forme de la maille la plus usitée est losangique mais peut être aussi carrée ou rectangulaire.

Quant aux palissades végétales, les matériaux d'origine végétale, le plus souvent inertes, sont généralement constituées de la palme, l'alfa, le diss, le leptodenia, l'aristida, le roseau, les branchages (tamarix, rétama, genévrier, pin d'Alep...), les résidus de produits agricoles (millet, sorgho, maïs, riz, tournesol...) ou bien d'autres herbacées naturelles comme le panicum turgidum.

Pour remplir efficacement son rôle, la mise en place d'un système de palissades doit tenir compte de certaines conditions à savoir (FAO, 1988) :

- La palissade doit avoir une perméabilité de 30 à 40%, afin de freiner la vitesse du vent sans provoquer dans la zone sous le vent de phénomène tourbillonnaire (à noter que la stabilité de la palissade face à l'agressivité des vents impose une certaine perméabilité).
- La hauteur efficace de la palissade varie d'un pays à un autre selon la nature du matériau utilisé. Elle varie généralement de 0.3 à 1m et ne doit pas dépasser 1,2 m de hauteur, car 95% du volume de sable en mouvement se trouve dans les 30 premiers centimètres au-dessus de la surface du sol.
- Dans un dispositif de protection à plusieurs rangées, l'espacement observé entre les palissades est très variable, de 50 à 150m au Maroc, voire jusqu'à 500m en Tunisie.
- La distance séparant l'objectif à protéger de la palissade varie également dans une large mesure, de 20 à 300 m dans le cas de la Tunisie par exemple.

6.2.2. La technique de quadrillage

Quand le vent est multidirectionnel, la technique qui peut être utilisée pour lutter contre l'ensablement consiste en l'installation d'un réseau de palissades disposées en échiquier et portant le nom de « quadrillage » ou « clayonnage ». Le quadrillage est un réseau de lignes d'arrêt délimitant entre elles des carrés ou des losanges. La nature et la technique de mise en place sont similaires à celles des palissades. En effet, chaque élément de clayonnage fonctionne comme une palissade au-delà de laquelle se dépose le sable. Les surfaces délimitées à l'intérieur du clayonnage se remplissent progressivement au fur et à mesure qu'elles piègent le sable. Cette technique est employée dans le cas où les directions des vents sont variables.

Ci-dessous une image (fig.105) montrant une opération de fixation des dunes par un quadrillage captée par le satellite Alsat-2A⁷⁸ de l'agence spatiale algérienne (ASAL)⁷⁹.

⁷⁸ Alsat-2A est le deuxième satellite algérien d'observation de la terre du programme spatial national (PSN) mis en orbite après Alsat-1 le 28 novembre 2002. C'est un satellite à haute résolution avec une répétitivité de 03 jours et un champ d'observation de 20 Km. Source : <http://www.asal.dz/Alsat/>

⁷⁹ Site web : <http://www.asal.dz/>

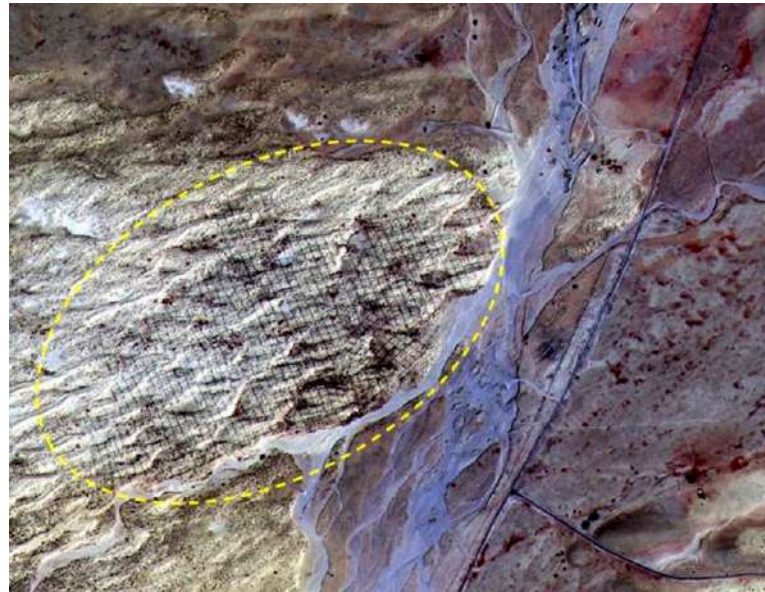


Figure 105: évaluation et suivi des actions de lutte contre la désertification.
Source : ASAL 2014. <http://www.asal.dz/Alsatsat%202020A.php>

Pour une bonne efficacité de ce système Gutierrez (2012) requiert certaines conditions :

- Le quadrillage doit couvrir systématiquement l'ensemble du front dunaire comme il peut être installé par bande.
- Le dimensionnement des quadrillages doit prendre en compte l'intensité du vent à neutraliser, la pente des versants, la forme des dunes et la hauteur du maillage, variable avec la nature des végétaux employés : de 0.30 m (alfa, rétama,...) à 0.70 m (palme, branchages...). A titre d'exemple ; au Maroc les dimensions moyennes des mailles utilisées sur les dunes présahariennes sont de 10x15m à leur sommet, de 3x3m sur les versants et de 4x4m dans les dépressions.
- Les palissades et les quadrillages doivent être régulièrement entretenus, et rehaussés dès que le sable arrive à 10-15cm du bord supérieur des palissades, de sorte qu'elles puissent continuer à jouer un rôle efficace et durable. Toute brèche dans ces infrastructures peut entraîner rapidement la remise en mouvement de grandes quantités de sable et annihiler leur efficacité. Le rehaussement des palissades continuera jusqu'à ce que la dune artificielle atteigne son profil d'équilibre et devienne stable et fixe pour former une contre dune.



Figure 106: système de quadrillage en losanges. Watson (1990) d'après Gutierrez (2012).

6.2.3. La technique du paillage (le mulching)

Ce procédé regroupe toutes les techniques de lutte basées sur l'installation d'une couverture, qui peut être naturelle ou artificielle, d'une façon intégrale ou partielle de la dune. Les objectifs recherchés sont la conservation de l'humidité du sol et l'immobilisation des particules de sable qui risquent de causer un ensablement de zones voisines. Ce procédé est surtout utilisé sur des surfaces planes ou peu accidentées. Pour la confection du mulch, des matériaux divers peuvent être utilisés, comme la couverture végétale à base de paille, des branches d'arbres ou les huiles minérales ou même on peut recourir à l'utilisation des films plastiques, des fibres et des grillages acryliques (Mainguet, 2003).

Pour la fixation des sables mobiles, certains pays font recours à des huiles minérales à base d'asphalte, huiles lourdes et huiles brutes. A titre d'exemple, la Libye, qui a été parmi les premiers pays arabes à initier dès le début des années soixante l'utilisation des huiles lourdes par un simple épandage sous forme d'une mince pellicule de 5mm. Au fil des années cette méthode a fait l'objet d'améliorations nécessaires touchant à la fois aux moyens de traitement et à la période d'application. L'application de cette méthode peut être réalisée par bande d'une largeur de 20 m et nécessite entre 2.5 à 4 tonnes d'huile lourde par hectare (FAO, 1980).

D'autres dérivés de pétrole et en particulier le bitume ont été testés à petite échelle en Algérie, en Tunisie, au Maroc et en Egypte. Il est à signaler que ce procédé, bien que coûteux et peu efficace à long terme, est surtout adopté par les pays producteurs de pétrole comme par

exemple la République Islamique d'Iran. Cette dernière a réalisé d'importants travaux de fixation des dunes en utilisant ce procédé, associé principalement à des plantations de tamarix (FAO, 1980).



Figure 107: technique de fixation par l'épandage de doum (palmier nain) ou mulching. (Barre, 2008)

6.2.4. La technique aérodynamique

La méthode aérodynamique utilise la capacité de transport du vent lorsqu'il atteint une vitesse suffisante. Cette technique tire son origine de pratiques anciennes et d'une observation assidue et continue sur le terrain. En effet, elle a évolué au fil des années d'une simple pose de pierres au sommet des dunes à évacuer à un procédé aérodynamique plus élaboré.

C'est une méthode dont le principe de base est d'utiliser la force du vent pour faciliter l'évacuation du sable au niveau des sites à protéger. Cette technique vise à utiliser la vitesse du vent et sa capacité de transport pour faire évacuer les dépôts de sable indésirables. A titre d'exemple ; en profilant les obstacles pour augmenter la vitesse du vent, ces obstacles auront un effet aérodynamique à jouer sur l'écoulement du courant éolien. Il se produit une compression qui permet d'accélérer la vitesse du vent, sans provoquer d'effet tourbillonnaire qui conduit à des accumulations sableuses. Ce principe d'accélération de la vitesse du vent augmente la capacité de charge de ce dernier, et donc sa force d'entraînement. Le vent balaie alors littéralement le sable qu'on veut dégager. C'est le contraire du principe de ralentissement du vent par les palissades.

Dans le sud du Maroc et de l'Algérie, plusieurs techniques de lutte contre l'ensablement basées sur la technique aérodynamique sont utilisées. Nous avons recensé trois techniques qui sont particulièrement intéressantes et que nous avons développé ci-après : l'une utilisée dans le cas de petites dunes de 1 à 2 mètres de hauteur, l'autre pour de grosses dunes de 2 à 6 mètres et une dernière appelée technique des « tas de remblais freineurs » est utilisée pour la protection des routes et des jardins.

a. Le cas des petites dunes

Des pierres de 20 à 30 cm de diamètre sont déposées le long de la crête des dunes à faire disparaître, et séparées les unes des autres par une distance pouvant varier de 0,50 à 1 mètre. Lorsque le vent érosif souffle, des turbulences se créent au niveau de chaque pierre. Ces turbulences augmentent ponctuellement la vitesse du vent et son énergie cinétique, lui permettant de transporter plus loin le sable remis en mouvement. Un affouillement éolien se produit à la base de chaque pierre qui tend ainsi à descendre. D'autre part, entre deux pierres, il se crée un effet de « sifflet » se traduisant encore par une accélération de la vitesse du vent et de son énergie cinétique. Sous l'effet de ces deux actions, les petites dunes, qui s'érodent dans leur partie supérieure, diminuent progressivement jusqu'à leur disparition (fig.108).

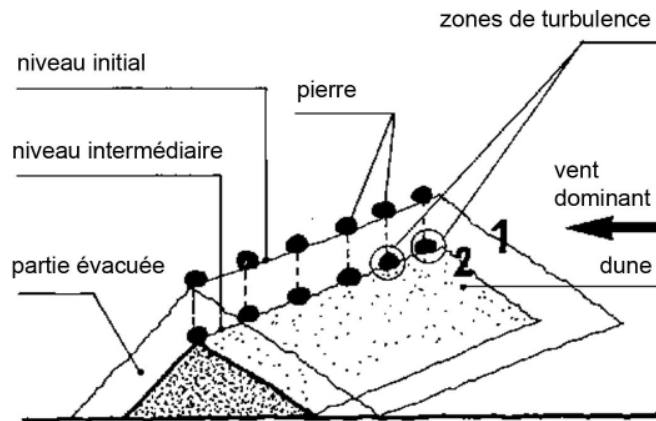


Figure 108 : Technique de pierres à turbulence. Source : FAO, (1988).
1. Profil initial de la dune à évacuer. 2. Profil intermédiaire.

b. Le cas des grosses dunes

Pour les grosses dunes les paysans utilisent la même technique que pour les petites, mais l'accélération provoquée du vent est encore accrue par l'adjonction de stipes de palmiers-dattiers posés horizontalement sur les alignements de pierres. Le vent, passant dans les espaces

compris entre celles-ci, le sommet de la dune et les stipes, augmente de vitesse en les traversant et se charge de sable. Pierres et stipes descendent simultanément au fur et à mesure que la crête de la dune s'érode (fig.109 et 110).

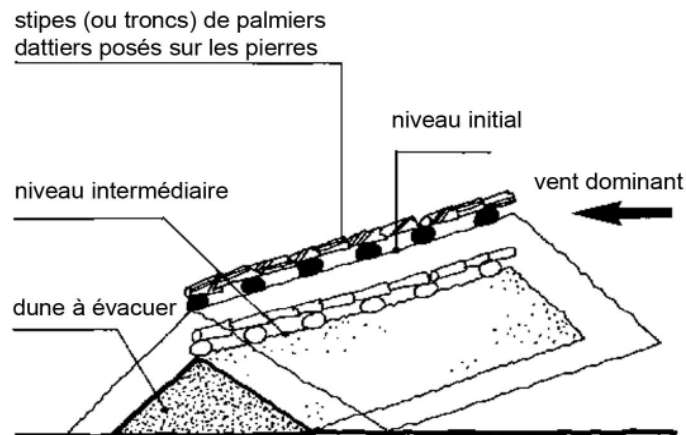


Figure 109: Technique de pierres à turbulence : cas de grosses dunes.
Source : FAO, (1988)



Figure 110: technique aérodynamique pour l'évacuation de sable.
Source : F.A.O. (1988)

c. La technique des tas de remblais freineurs

Dans le sud algérien de gros efforts ont été fournis et d'importants travaux sont mis en œuvre par les services des travaux publics (palissades, mulching, désensablement...etc.) et par les paysans en vue de lutter, d'une manière efficace, contre ce phénomène tant sur le plan curatif que préventif. La technique du tas freineurs expérimentée traditionnellement par les paysans et les services des travaux publics de la région de *Taïbet* et *Oued Souf* est basée sur l'effet aérodynamique pour la modification de la vitesse du vent et de sa direction. Le tas freineur est

un remblai composé d'une dune isolée et peu volumineuse dont le principe est d'utiliser la force du vent pour faciliter le dégagement de sable au niveau des sites à protéger. (Sebaa et al, 2009).

Le tas de remblais peut être mis en place suivant deux dispositifs à savoir ;

- **Dispositif des tas de remblai (*Gatoas*) déposés perpendiculairement à la direction du vent dominant (cas de dunes isolées)**

Souvent les tronçons de route perpendiculaires aux trajectoires éoliennes constituent des lieux favorables de dépôt du matériel sableux. Le dispositif appliqué est basé essentiellement sur le vide ou l'espace laissé entre les tas de remblai. Une discontinuité entre les tas de remblai qui sont opposés au vent dominant (dispositif en quinconce). Dans le sud-est algérien, les oasiens utilisent dans le cas des petites dunes (dunes isolées et peu volumineuses), des tas de remblais de 3m de hauteur, de 14 à 16m de longueur et 3 à 6 m de largeur, avec une forme trapézoïdale.

Ces obstacles sont déposés le long de la crête des dunes à faire disparaître. Ils sont séparés les uns des autres par une distance $V1$ variant de 3 à 4 m et $V2$ variant de 14 à 16 m (fig.111). Lorsque le vent érosif souffle, les turbulences se créent au niveau de chaque tas de remblai. Ces turbulences augmentent ponctuellement la vitesse du vent et son énergie cinétique, lui permettant ainsi de transporter plus loin le sable remis en mouvement. Sous l'effet de ces deux actions, la dune soumise à ce mécanisme diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement.

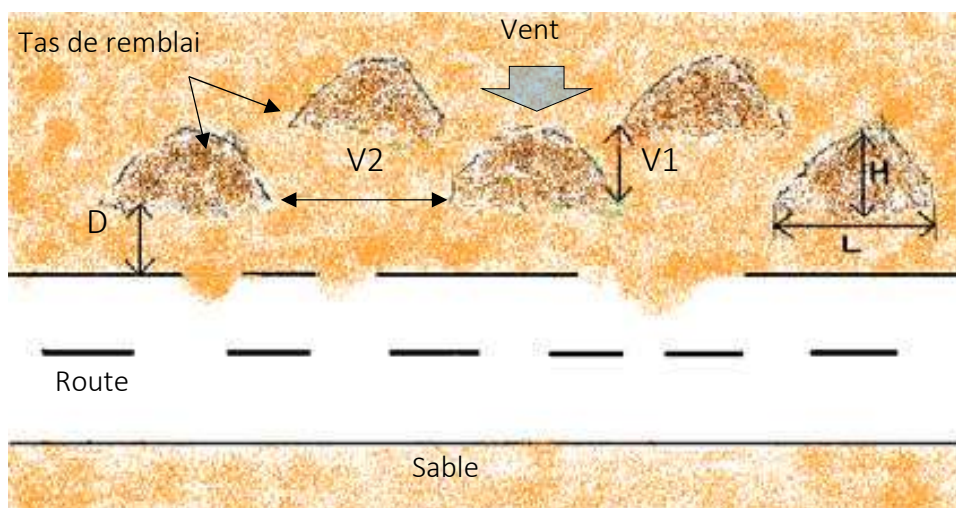


Figure 111: dispositif de (*Gatoas*) déposés perpendiculaire à la direction du vent dominant. Source : (Sebaa, 2009)

- **Dispositif du tas de remblai (*Gatoas*) déposé obliquement à la direction du vent dominant**

C'est un autre système efficace appliqué par les paysans de *Taïbet* qui consiste à mettre en place des tas de remblais orientés obliquement cette fois-ci par rapport à direction du vent dominant. Ainsi, des tas de remblais sous forme circulaire (ou conique) appelés traditionnellement « *El Methana* » sont déposés derrière les tas de remblais obliques et sur la masse dunaire. Ces derniers créent avec le vent une zone de turbulence qui provoque le départ plus ou moins rapide du sable et par là une réduction progressive de l'édifice sableux (Sebaa et al., 2009). Fig.112 et fig.113.

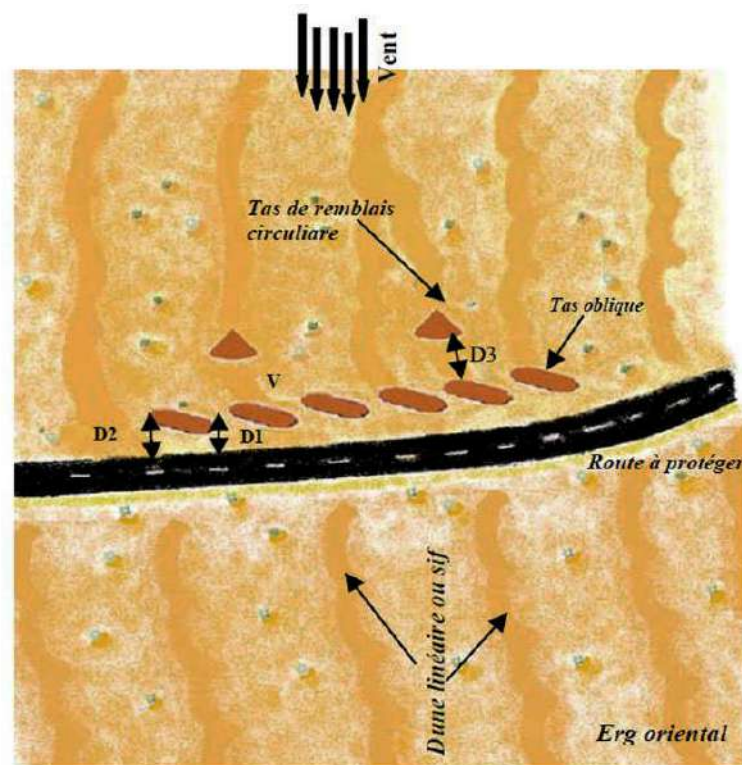


Figure 112: tas de remblais orientés obliquement à la direction du vent dominant. (Sebaa et al, 2009)

D1, D2 : distances à respecter entre la route et le tas de remblai de manière à ce que le tas soit oblique à la direction du vent dominant.

D3 : distance à respecter entre le tas oblique et le tas circulaire (ou conique)

V : vide entre les tas de remblais.



Figure 113: tas de remblais localisés au niveau de la route reliant Timimoun à Talmine (70 km à l'ouest de Timimoun). Photo Auteur, 2012

6.3. Les procédés de lutte biologique

Comme son nom l'indique, la lutte biologique fait recours à un matériel végétal adapté aux conditions écologiques du site. Elle peut se réaliser sur front dunaire en vue d'assurer sa fixation définitive, comme elle peut être utilisée en zone de déflation pour arrêter la progression du sable.

6.3.1. *Choix des espèces ligneuses et herbacées*

Le milieu dunaire est connu pour être défavorable, voire hostile à l'installation et la croissance des espèces végétales. Selon Alali et Benmohammadia (2013), toute plantation devra nécessairement tenir compte du choix des espèces pouvant s'adapter à ce milieu aride et de la profondeur de l'humidité résiduelle des couches sous-jacentes. En effet, la particularité des sables dunaires dénudés est leur capacité à conserver une partie de leurs eaux d'infiltration pendant un laps de temps assez long et cela grâce à leur propriété d'avoir une faible remontée capillaire. En effet, la partie supérieure de la dune joue un rôle d'écran protecteur sur 20 à 30 cm, réduisant ainsi la perte d'humidité des couches plus profondes, ce qui est indispensable à la reprise et à la croissance des espèces végétaux.

Le choix des espèces végétales varie donc en fonction de la nature du sol ainsi que des conditions climatiques et écologiques du site. En ce qui concerne les milieux arides, les espèces à choisir devront impérativement remplir les critères suivants (FAO, 1988) :

- la capacité de pousser dans un milieu pauvre en éléments nutritifs et soumis à des variations de température diurne et nocturne importantes ;
- disposer d'un système racinaire puissant, pouvant atteindre l'humidité résiduelle du sol pour combattre les effets de la sécheresse ;
- résister aux vents violents, secs et chauds et à leur action abrasive sur les feuilles et les tiges ;
- croissance rapide et faculté de se régénérer facilement en cas de dégradation ;
- capacité d'améliorer et d'enrichir le sol dunaire en matière organique tel que des espèces fixatrices d'azote (légumineuses).

6.3.2. Techniques de plantation

Dans certains pays, on a recours à l'ensemencement par avion. Cependant, il est à signaler que c'est une méthode qui est assez coûteuse et nécessite de grandes quantités de semences, ainsi qu'une bonne connaissance des conditions météorologiques, notamment la direction des vents et leur vitesse.




- **L'époque de plantation :** Les plantations débutent généralement avec le lancement de la campagne annuelle de reboisement, qui correspond en général à celle de la saison des pluies. Lorsque la pluviométrie est déficitaire, ce qui est souvent le cas dans les régions arides, un apport d'eau avant et après la plantation est indispensable pour permettre au pivot d'atteindre plus rapidement la couche d'humidité résiduelle du sol et au plant de s'établir.

- **La densité à la plantation :** Dans les zones arides et semi-arides, la densité va dépendre de la richesse du sol, de la profondeur de l'humidité résiduelle et surtout des précipitations. Plus ces dernières sont faibles, plus l'écartement entre les lignes de plantation sera grand, afin d'éviter la concurrence entre les plants et l'épuisement des réserves hydriques du sol. La densité retenue doit cependant permettre la réduction et la suppression de l'érosion éolienne.

Enfin, la réussite d'une plantation dépend de la rapidité d'exécution, de la bonne organisation et de la répartition des équipes sur le terrain, ainsi que de la quantité de précipitations reçues. Pour un meilleur rendement, la combinaison des procédés de lutte mécanique et biologique est très recommandée.

Une liste non exhaustive des principales espèces est dressée ci-après en tableau 11. Certaines essences s'adaptent aux différentes parties de la dune, d'autres aux zones inter-dunaires.

Tableau 11: principales espèces (ligneuses et herbacées) utilisées dans la lutte biologique contre l'ensablement.

Nom	Photos	Caractéristiques
<p>Calligonum azel Maire</p>		<p>Arbre pouvant atteindre 5 à 6 m de haut. Présente un grand intérêt écologique en zone saharienne : elle est fixatrice de sable mobile et peut améliorer la teneur du sol en matière organique nécessaire à l'accroissement de la productivité biologique du milieu.</p>
<p>Retama raetam</p>		<p>Espèce saharo-arabique commune au Sahara septentrional, également en Palestine et en Syrie. C'est un arbuste qui peut avoir une taille de 1 à 2m. C'est la plante par excellence pour la fixation des dunes.</p>
<p>Stipa tenacissima (Alfa)</p>		<p>Plante herbacée avec des tiges pouvant atteindre plus de 1.5 m. formant de vastes « nappes » dans les régions d'aridité moyenne, cette espèce est une fixatrice de dunes.</p>

<p>Lycium intricatum</p>		<p>C'est un arbuste à feuilles charnues ayant de 1.5 à 2 m de hauteur. Ses racines peuvent avoir jusqu'à 20 m de longueur, et de ce fait elle est d'un grand intérêt dans la fixation du sol.</p>
<p>Nitraria retusa</p>		<p>C'est un arbuste épineux à feuilles épaisses qui atteint de 1 à 1.5 m de hauteur. Son enracinement est puissant et pivotant.</p>
<p>Casuarina cunninghamiana (pin australien)</p>		<p>Appelé communément en français «Pin australien». C'est un spécimen classique de pin qui ne perd pas ses aiguilles. Un arbre à croissance rapide qui peut atteindre 20m de hauteur. Aime un éclairage direct, est très tolérant aux mauvaises conditions : temps sec, humide, fortes chaleurs, vent...etc.</p>

6.4. Approche participative

Dans toute initiative ou tout programme de lutte contre la désertification et l'ensablement, l'utilisation d'une approche participative est une condition clé pour assurer des résultats durables et des impacts positifs sur le moyen et le long terme.

D'abord, le recours à une approche participative permis de garantir les points suivants :

- familiarisation et prise de conscience du problème de la part des habitants locaux afin de susciter leur engagement et participation en tant que parties prenantes dans la lutte contre l'ensablement ce qui renforce les capacités des communautés locales. C'est ainsi que l'on puisse bannir aussi l'attitude fataliste des populations et l'esprit réfractaire à la notion d'entretien.
- la compréhension et la prise en considération des avis des communautés villageoises en matière de gestion durable de leur territoire ;
- Les programmes réalisées peuvent soulager le quotidien des habitants et contribuer à leur bien-être immédiat, en protégeant leurs infrastructures socio-économiques, en améliorant leur niveau de vie et en ralentissant l'exode vers les centres urbains ;
- l'atténuation de l'ensablement et de la pression environnementale due à l'exploitation, grâce à des techniques pouvant être facilement adaptées et dupliquées par les populations locales.

La méthodologie de l'approche participative prévoit plusieurs étapes, notamment ;

- la mise en place de comités villageois dans les zones ciblées, afin d'assurer l'organisation sociale des travaux et de veiller à la gestion et au suivi du calendrier établi ;
- la signature de conventions ou d'accords en ce qui concerne la nature des opérations à entreprendre, les délais prescrits, la participation nécessaire, les rôles du comité constitué par les bénéficiaires et l'encadrement technique à apporter ;
- la formation de villageois par les cadres de terrain (experts et techniciens nationaux, responsables de projets et d'ONG) en matière de production de plants, mise en place du clayonnage, plantation, suivi et gardiennage....etc.;
- le choix des sites à traiter, en prenant en considération la gravité des problèmes d'ensablement, la disponibilité et la volonté des populations pour réaliser les travaux selon les techniques appropriées, ainsi que l'approbation par les autorités locales du choix des sites à traiter et des priorités;

- l'inventaire des activités et opérations à mettre en œuvre en étroite collaboration avec les communautés locales, afin de garantir la participation et la responsabilisation des populations au respect du calendrier des activités.
- l'exécution des activités doit s'établir sous la supervision de l'État avec une aide sous forme d'une main-d'œuvre rétribuée, plutôt que de compter entièrement sur la participation collective désintéressée des communautés. De cette manière, la commune pourra absorber une partie du chômage à tendance très élevée dans zones isolées.

6.5. Conclusion

Après avoir passé en revue les différentes techniques de lutte mécanique et biologique contre l'ensablement, nous soulignons que les méthodes utilisées et les normes établies varient selon l'expérience propre à chaque pays et restent tributaires de certains points tels que les particularités du périmètre à traiter, la nature et la disponibilité des matériaux locaux, mais aussi, de la stratégie économique établie en fonction des objectifs recherchés. De ce fait, l'efficacité des techniques reste locale et n'est pas généralisable. Les résultats enregistrés sur le terrain, le coût, et le niveau de protection atteint sont les principaux critères d'appréciation de l'efficacité de toute méthode. Ainsi nous avons passé au crible chacune des méthodes étudiées afin de dégager ses avantages et ses inconvénients en vue de trouver la bonne combinaison.

1. La lutte mécanique, si elle s'avère dans bien des cas efficace, ne peut indéfiniment avoir la même efficacité en raison de la dynamique éolienne qui finit par avoir le dessus sur les ouvrages mis en place. Notons que dans le contexte algérien, les matériaux végétaux inertes (palme sèche) ont fait l'objet d'expérimentations diverses et les résultats obtenus n'ont pas été très probants vu l'ampleur des superficies à traiter et l'indisponibilité du matériau en quantités suffisantes. Cette méthode s'avère alors insuffisante et il va falloir combiner avec d'autres méthodes pour pallier à ses carences.

Quant aux matériaux synthétiques, ils sont pour la plupart polluants, non biodégradables, c'est le cas des plaques en fibrociment et le bitume. En revanche d'autres matériaux ont donné de bons résultats comme c'est le cas de la maille plastique, qui n'a pourtant pas permis son utilisation à grand échelle, compte tenu de son coût excessif.

Le modèle « tas de remblai » de stabilisation mécanique des dunes mis en place dans la région du sud-est algérien a fait preuve d'efficacité en termes de protection des routes et de terres agricoles. Son efficacité est mise en évidence suite à son adoption par les services des travaux publics pour la protection des routes notamment celles d'*Oued Souf* et *Taïbet*. En revanche ce système, est plutôt efficace pour les petites dunes isolées. Dans le cas contraire, notamment au milieu de l'erg, cette méthode se montre très limitée, voir inefficace même et ne peut donc être envisagé.

2. La lutte biologique, quant à elle ne peut non plus représenter un moyen à 100% efficace dès le départ (excepté dans certaines situations particulières) en raison du temps nécessaire pour que les espèces poussent et atteignent un degré de maturité leur permettant de combattre l'érosion éolienne. Ainsi et face à la grande aridité du climat le choix des espèces est très restreint dans certaines régions. D'autre part, en plein erg cette méthode ne peut être envisagée en raison de l'épaisseur de la couche de sable mouvant qui empêchera toute possibilité de plantation et de croissance des espèces.

Dans l'objectif de pallier aux carences relevées dans chacune des méthodes exposées, Il est donc fortement recommandé de combiner les moyens mécaniques et biologiques afin d'assurer une protection équilibrée contre le phénomène d'ensablement. Par ailleurs, quelle que soit l'approche adoptée dans la lutte contre l'ensablement, la réussite des programmes suppose l'utilisation et la valorisation des spécificités écologiques et humaines locales afin de minimiser les coûts et rendre les solutions plus viables. Si le facteur humain n'est pas intégré dans l'approche, le programme est voué à l'échec de manière certaine. Il important de savoir que aménageur et réalisateur sont appelés à quitter les lieux alors que les populations locales seront les seules à y demeurer. Par conséquent, l'entretien, le suivi des ouvrages incombera dans l'étape finale à la population, et si cette dernière saisit l'intérêt de l'aménagement et les retombées positives sur son quotidien, elle s'impliquera davantage afin d'assurer la pérennité des réalisations.

**PARTIE III : EXPERIMENTATION ET
RECOMMANDATIONS**

**7. CHAPITRE VII : L'ENSABLEMENT A L'EHELLE MACRO :
DYNAMIQUE D'ENSABLEMENT ET IMPACT SUR LA
CONFIGURATION DU TERRITOIRE DANS LE GOURARA**

7.1. Choix des sites d'investigation

Quatorze *ksour* ont été choisis pour faire l'objet d'investigation et d'observation *in situ*. Leurs coordonnées et leur répartition sur la région d'étude sont illustrées en fig.114. Cette liste a été établie dans le but de toucher l'ensemble du territoire Gourari d'est en ouest et du nord au sud afin de relever les différents types d'installations humaines qui puissent exister dans la région, d'en étudier les spécificités, de comprendre leur fonctionnement, mais surtout de saisir leur interaction avec le phénomène d'ensablement.

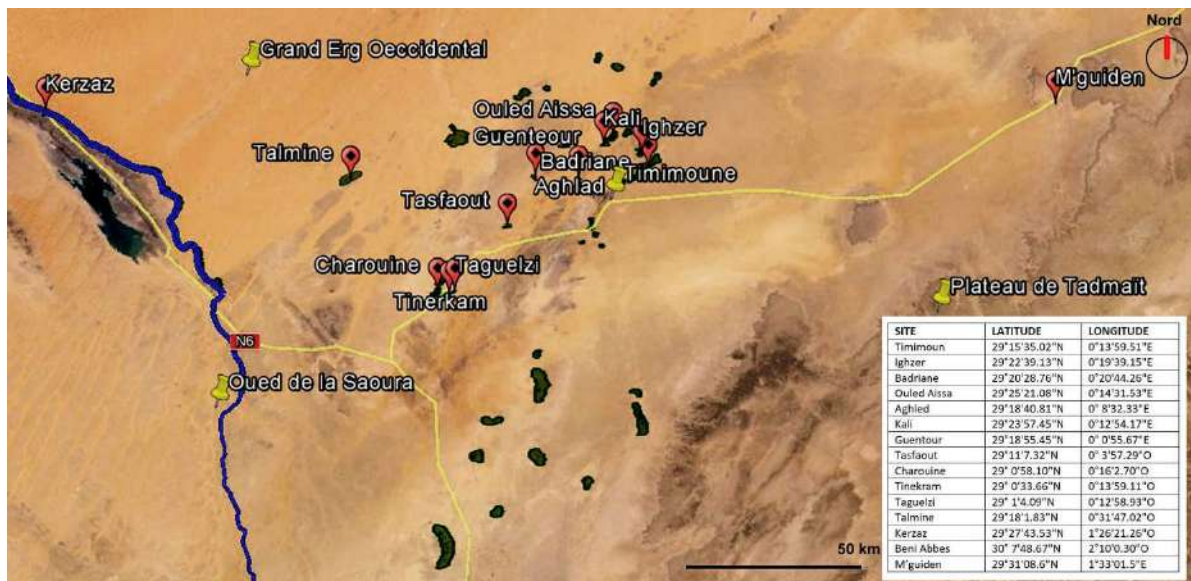


Figure 114: localisation des ksour ayant fait cas d'études dans la région de Gourara.

Il n'est pas dans notre propos de reprendre dans le détail l'ensemble des critères de classification des formes éoliennes, l'état de l'art en fournit plusieurs détails. L'objet de cette partie est de préciser quelques éléments de différenciation propres à la région de Gourara et de montrer à travers l'étude des types de dunes dans cette région comment peut-on caractériser les formes dunaires et en quoi elles peuvent renseigner sur la dynamique du milieu auquel elles appartiennent et sur le mécanisme de leur formation.

7.1.1. Direction des dunes

Selon Demangeot et al. (2001), les théories modernes sur les rapports entre la direction du vent et la direction des dunes sont passées par trois stades suivants, symbolisés par trois noms : Aufrère, Bagnold, Clos-Arceduc.

Pour Aufrère (1936)⁸⁰, il existe un véritable « cycle des dunes ». En période de jeunesse, toutes les dunes sont obliques par rapport au vent : *barkhanes* s'il n'y a aucune végétation, dunes paraboliques si le sol est quelque peu couvert. En période de maturité, les dunes longitudinales l'emportent sur les dunes transversales ; elle sont constituées, remarque Aufrère, par le sable chassé latéralement des « *Gassis* ». Enfin, l'erg est diminué lorsque l'élargissement des *gassis* réduit les cordons dunaires à peu de chose. Cette théorie, fondée sur l'observation des dunes du sud algérien, déclenchera beaucoup de discussions. Mais Aufrère avait renoncé par la suite à la notion d'évolution cyclique, et il écrivait : « *il semble que l'on passe de la dune en chaîne à la dune en vague quand la puissance du vent diminue.* » ce qui remettait tout en question. Du moins la dynamique des *gassis* avait-elle été éclaircie.

Pour Bagnold (1941), la dune élémentaire est bien la *barkhane* et la chaîne dunaire qu'il appelle *sif* dérive de la *barkhane*. Mais si la *barkhane* provient de l'activité du vent dominant, même modéré, la déformation de la *barkhane*, qui aboutit à la chaîne, résulte de l'intervention d'un vent latéral violent et de courte durée. Les grands cordons dunaires, par exemple, sont exactement alignés dans l'axe des alizés. Surtout, Bagnold démontre que le transport du sable est proportionnel au cube de la vitesse du vent. Dubief (1952) confirme l'intérêt de la formule de Bagnold, mais démontre par l'étude des vents de sable, que le vent efficace n'est pas le vent dominant en direction, mais le vent de tempête, plus rare. Il conclut prudemment qu'il faut tenir compte des héritages pour comprendre les ergs. D'où une subdivision en : erg jeunes, ergs adultes stables, ergs anciens faisant place à une plaine sableuse, ergs interrompus dans leur développement.

Plus récemment, Clos-Arceuduc (1969)⁸¹ a repris la question des dunes et a remplacé l'interprétation des données météorologiques, nettement insuffisantes, par l'interprétation de leurs conséquences morphologiques concrètes, grâce à la photographie aérienne. Il confirme ce que les recherches antérieures ont déjà montré, à savoir que les dunes longitudinales, minces « *Silk* » ou plus épaisses « *Alab* », dérivent directement de la *barkhane* ; il précise la notion de dune d'écho. Mais il découvre ce fait nouveau et très important qui a été confirmé encore par Mainguet (1995) : le *Silk* ou l'*Elb* (pl. *Alab*) ne sont pas dans l'axe du vent puisqu'ils prolongent l'une des cornes de la *barkhane* ; ils font avec la direction du vent dominant un angle qui varie de 15 à 35 degrés (fig.115).

⁸⁰ Cité dans Demangeot et al. (2001, p.213)

⁸¹ Cité dans Demangeot et Bernus (2001)

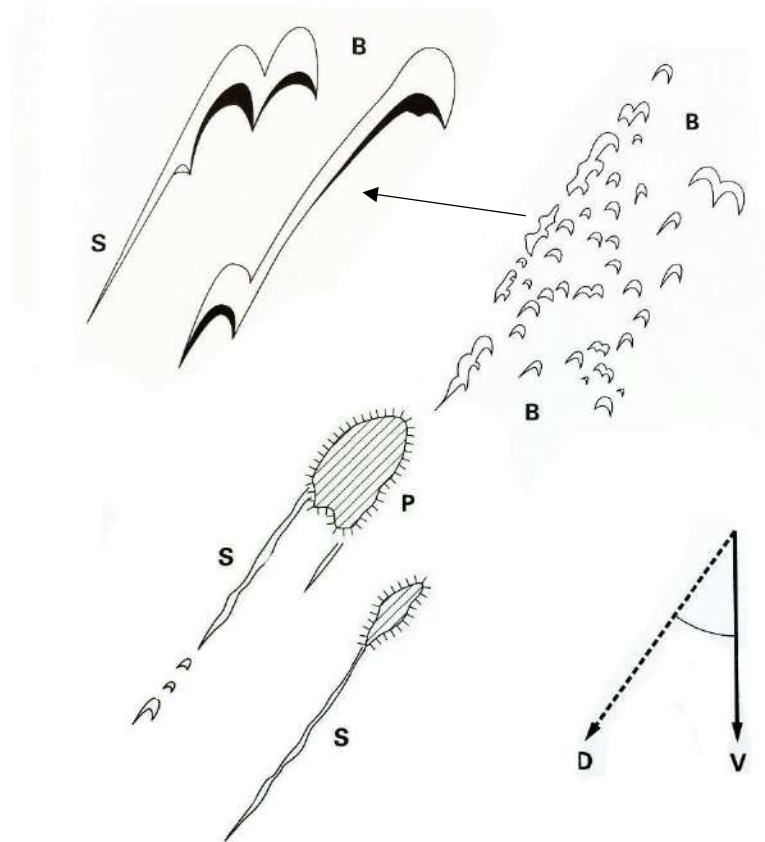


Figure 115: évolution des barchanes en Slouk. (Clos-Arceduc). Source : (Demangeot & Bernus, 2001, p.197).

- V : l'axe du vent dominant
- B : barchanes
- S : Slouk
- D : axe des dunes
- P : Plateau

7.1.2. Mécanisme de formation

A une échelle synoptique dans les régions sèches le vent est le principal agent transporteur de sable. La présence d'obstacles majeurs (pentes, reliefs, massifs), forment et façonnent les ergs par leur morphologie. En effet, les obstacles créent une rugosité qui provoque une augmentation de la perte de charge et une réduction de la vitesse du vent, favorisant le dépôt de sable et la formation des dunes. La répartition des massifs et la diversité du relief crée des couloirs, des méga-convergents et des méga-Venturi, obéissant au théorème de Bernoulli engendrent une dynamique éolienne qui fait apparaître des aires d'érosion (erg exportateur) et des aires de dépôt (erg accumulateur) (Mainguet et al. 2004).

Les ergs qui se forment à l'amont de l'obstacle sont des aires à budget sédimentaire positif, tout comme ceux qui se forment à l'aval de l'obstacle, mais toujours derrière l'aire d'abri (aire de recollement) ; En revanche, les ergs formés de part et d'autre de l'obstacle (col) sont à budget sédimentaire négatif.

a- Les zones d'ablation (bilan sédimentaire négatif)

La formation de dunes est tributaire de ce que le vent dépose et de ce qu'il emporte en chaque point considéré (Venard, 2012). Selon Mainguet (1995), lorsque, pour une raison ou une autre, la vitesse du vent diminue, ce processus est déséquilibré au bénéfice du dépôt et l'accumulation commence. Cependant, la vitesse du vent peut augmenter du fait d'une topographie lisse, tel que la *hamada*. Le processus est déséquilibré au bénéfice de l'ablation, c'est le déplacement de sable qui l'emportera.

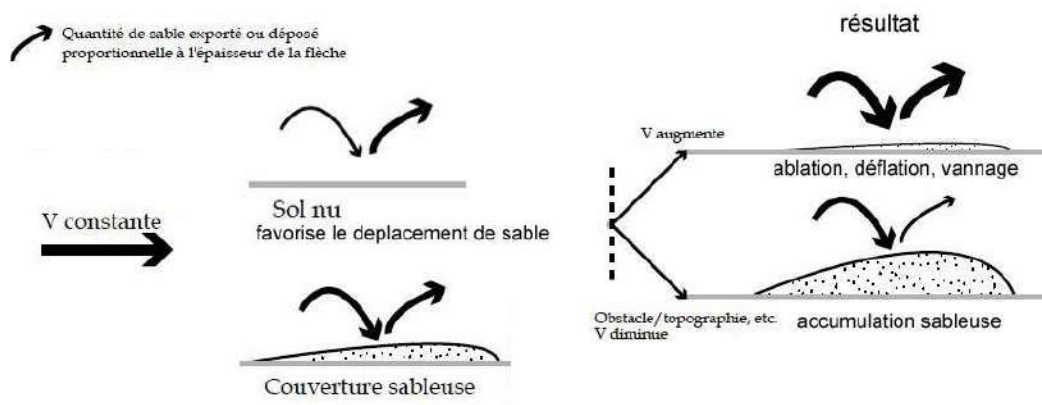


Figure 116: schématisation de la formation de dunes suite à action morphologique. Venard (2012, p.27)

Dans les vastes étendues des milieux désertiques le vent peut atteindre des vitesses considérables lui permettant d'exercer des actions érosives sur le sol et ce, suite au dessèchement des parties superficielles du sol, à l'émiettement du sol et l'arrachage des particules sableuses, à la corrosion des roches et de la végétation et à la destruction par déchaussement de la végétation.

Dans la région de Gourara, se sont les plateaux constitués de reg (*hamada*) qui jouent le rôle de zones de déflation. Sur site, il nous a été donné de constater que le sable ne s'attarde pas sur la surface d'une *hamada*, contrairement à la zone erguienne où il est souvent piégé par la topographie (fig.117).



Figure 117: dichotomie topographique hamada-erg dans la région de Timimoun. 2011

b- Les zones d'accumulation (bilan sédimentaire positif)

L'accumulation de sable résulte du dépôt des particules soulevées par le vent. Les dunes sont sans aucun doute les formes d'accumulation les plus remarquables des zones désertiques. Au cours des deux dernières décennies, l'utilisation des images satellitaires a significativement fait avancer la recherche dans l'étude des mouvements éoliens d'ensablement. Une lecture globale du mouvement général du transport de sable par les vents dans le Gourara révèle d'après Livingstone (1996) que celui-ci s'oriente globalement d'ouest en est, ce qui nous laisse supposer que l'alimentation provient forcément de l'Erg Occidental (fig.118).

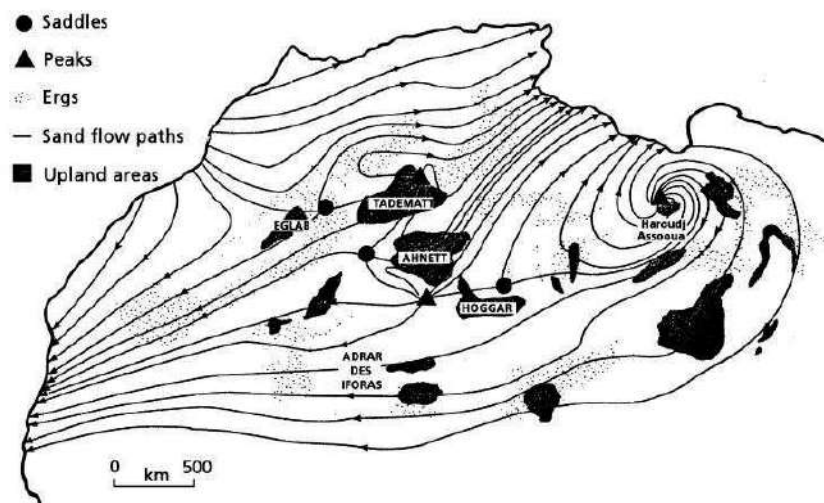


Figure 118: lignes d'écoulement de sable dans le Sahara (d'après Wilson 1971 et Mainguet, 1978). Cité dans (Livingstone, 1996, p.106)

Cependant, nos visites récurrentes sur le site d'étude nous ont permis de constater que le transport du sable se déroule réellement par l'addition de deux directions qui ne sont pas tout à fait opposées à savoir, les vents du nord-est et du Sud (Sirocco), communément indexés de vents de poussière et autres tempêtes de sable. En effet, les vents du sud grâce à leurs forces sont responsables de la migration massive des stocks de grains au niveau de l'Erg Occidental vers les autres régions se trouvant dans cette direction. Tandis que les vents nord-est avec des vitesses moins importantes (4-6m/s) mais plus fréquentes sont les plus à craindre, car dans la majeure partie du temps ces vents provoquent le déplacement du sable déposé sur les plateaux vers les installations humaines suivant à un rythme que l'on ne peut même pas remarquer et c'est ce qui explique d'ailleurs l'aspect latent et sournois du phénomène d'ensablement.

7.1.3. Types de dunes dans la zone de Gourara

L'observation des formes d'ensablement dans la région de Gourara montre que les édifices éoliens dunaires prennent plusieurs formes et plusieurs orientations, certaines dominantes, d'autres secondaires, qui, par endroits, peuvent se croiser, ceci est dû à la double direction du régime éolien responsable du déplacement de sable (Mainguet, 1995). A l'aide des vues satellitaires disponibles sur Google-maps nous avons réussi à répertorié et localisé les formes dunaires que l'on a pu constater dans la région de Gourara, notamment des dunes *barkhaniques*, linéaires, longitudinales (*sandrîdges*) dans la limite sud-ouest de l'Erg Occidental, ainsi que des dunes pyramidales (*ghourd*) au niveau de la limite ouest de l'Erg Occidental (pas loin de Kerzaz). Ensuite, nous avons tenté d'appréhender les mécanismes de développement et le risque potentiel qu'elles représentent pour la région de Gourara, et ce, en se basant sur nos références théoriques en la matière (Mainguet 1995, Livingstone 1996, Demangeot et al. 2001, Mainguet et al. 2004, Bellatrach 2008).

D'après Mainguet (1995) deux types de dunes méritent une attention particulière dans la lutte contre l'ensablement du fait des dangers qu'elles représentent pour les infrastructures humaines. Il s'agit des *barkhanes*, croissants de sable qui se meuvent dans leur totalité, et les *sifs* ou dunes linéaires, édifices le long desquels le sable migre comme le long d'un rail de transport. Suite à nos investigations sur les lieux que nous allons exposer ci-après, ces deux types omniprésents dans la région de Gourara au niveau de l'Erg Occidental et ses bordures Est et Ouest. D'après Callot (2008), ces dunes peuvent être considérées comme les plus influentes dans le modelage du paysage de la région et dans la configuration topographique continue de la zone de l'erg.

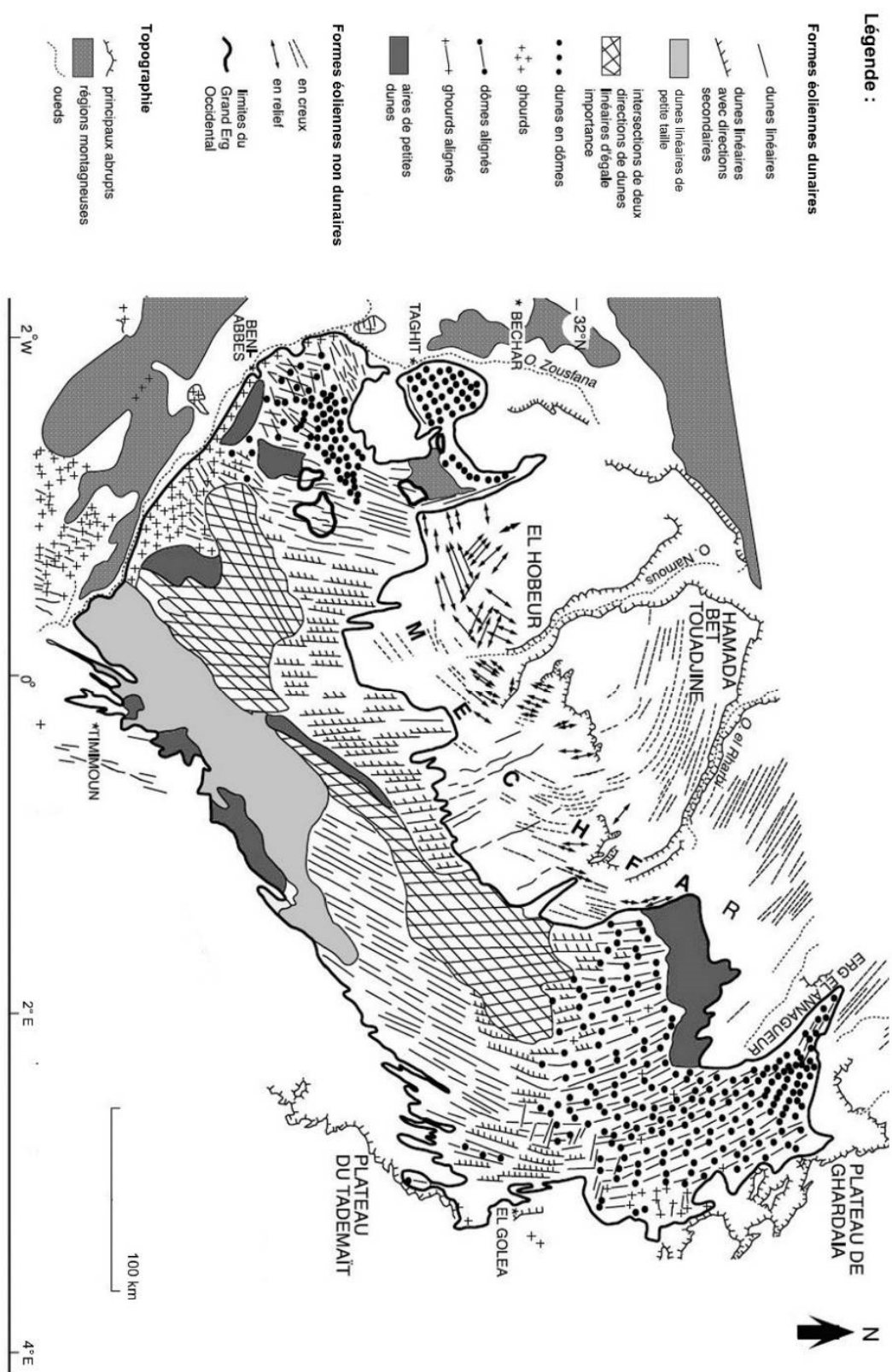


Figure 119: schéma de la structure dunaire du Grand Erg Occidental. Collot (2008) d'après Venard (2012, p.22)

En effet, et nous pouvons le constater sur la carte en fig.119 que la zone située dans la partie méridionale de l'Erg Occidental est occupée actuellement par un champ *ghourdique* (dunes pyramidales coalescentes). D'après Bellatrach (2008), la présence de ce type d'édifice en cet endroit précis peut être probablement le résultat d'une extension complexe d'autres formes dunaires tels que les *barkhanes* que l'on retrouve dans les couloirs inter-dunaires de l'erg. Fig.120 et 121



Figure 120: dunes pyramidales (ghourd) au niveau de la limite ouest de l'Erg Occidental (Coordonnées : 29°28'20.86"N 1°26'41.28"O).Auteur



Figure 121: dunes pyramidales. Photo prise à l'entrée du village de Kerzaz (29°27'43.53"N, 1°26'21.26"O). Source : Auteur 2011

Par ailleurs, les dunes linéaires (*sifs*) ont été repérées sur la rive sud-est de l'Erg Occidental près des oasis de *Taghouzi* et *Ouled Aissa*. Ces dunes s'allongent obliquement par rapport aux deux vents dominants comme le sillage d'un bateau et, lors de leur allongement, peuvent recouper ou envahir des infrastructures humaines (Mainguet, 2006). Fig.122 et 123.

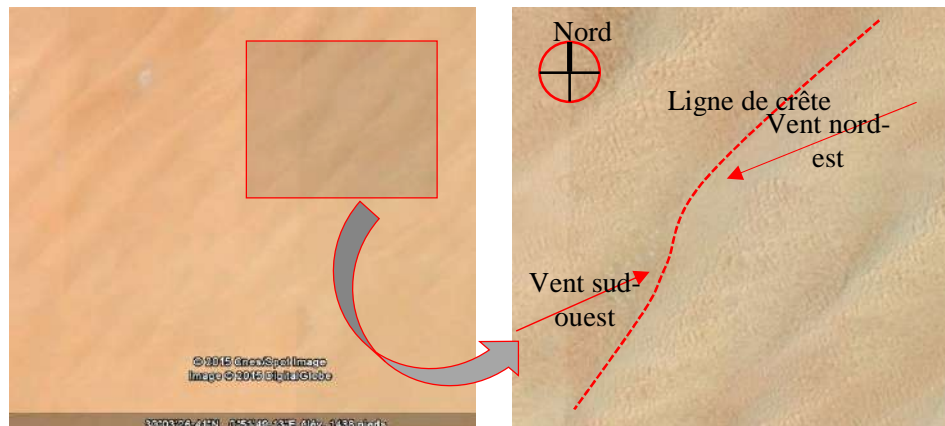


Figure 122: dunes linéaires (sifs) au niveau de l'Erg Occidental (30°03'26.41"N 0°51'49.13"O). Auteur



Figure 123: exemple de dunes linéaires (sifs) au niveau de l'Erg Occidental. Source : Auteur 2011

Dunes linéaires (*sifs*) et dunes longitudinales (*sandridges*) sont souvent confondues. Afin de lever cette confusion il est important de faire appel à la définition de Clos-Arceuduc (1969)⁸² qui a démontré scientifiquement la différence entre ces deux types de dunes. En effet, les premières sont des édifices de dépôt, obliques au vent ; elles expriment un bilan sédimentaire positif, alors que les dunes longitudinales, parallèles au vent, sont des édifices d'érosion dont le bilan sédimentaire est négatif. Les premières sont dangereuses car elles s'allongent lors des phases d'accrétion tandis que les secondes ne le sont pas, sauf lors des tempêtes provoquant la perturbation de leur surface et entraînant l'exportation du sable. Fig.124

⁸² Cité dans Mainguet (1995).

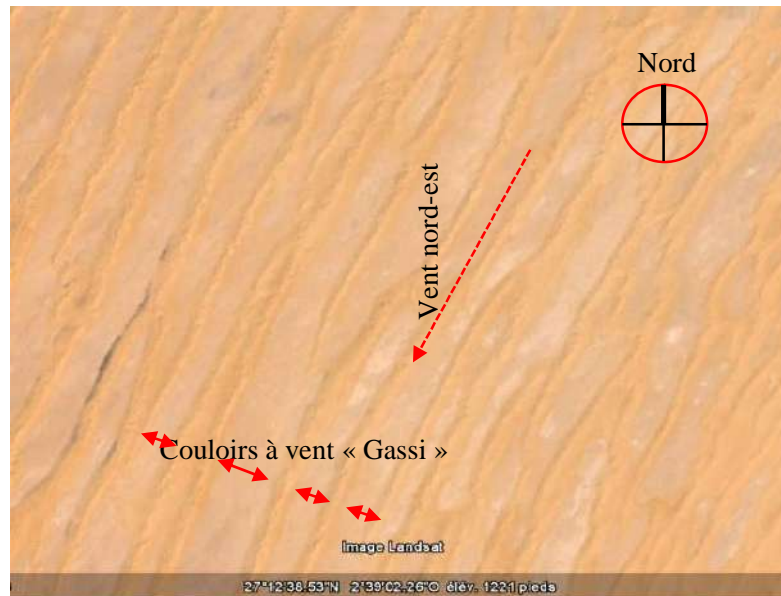


Figure 124: exemple de dunes longitudinale (sandridges) au niveau de la limite sud-ouest de l'Erg Occidental (27°12'38.53"N 2°39'02.26"O). Google-maps.2015. Les dunes longitudinales peuvent être distinguées par la présence de couloirs que l'on appelle "Gassi". Source : Auteur

Ainsi, lors nos investigations de la zone d'étude, nous nous sommes rendu compte de la présence des dunes de type *barkhane* dans l'Erg Occidental, souvent localisées sur la bordure d'un espace nu comme les *Theïrat*. Quelques exemples illustrent ce cas de figure tel que les espaces dégagés au sein de l'erg où se situe le *ksar* de Talmine, Aghlad, Guentour...etc. Bellatrach (2008) explique que la naissance de ce type de dunes dans l'Erg Occidental est due aux vents dominants qui provoquent un mécanisme d'ablation sur les zones en dépression (*Theïrat*). En effet, Mainguet (1995) conditionne le développement d'une *barkhane* par un certain nombre de facteurs dont ; un régime éolien monodirectionnel, une source de sable entre 0.125 et 0.350 mm, une topographie plane, un couvert végétal inexistant ou peu dense.

Les édifices *barkhaniques*, au stade de dôme ou de bouclier, ne sont pas mobiles mais sont un danger potentiel, car ils constituent un réservoir de sable dont, en outre, la forme peut évoluer vers des édifices à crête anguleuse, dièdres *barkhaniques* qui eux sont mobiles constituent une menace aux infrastructures et installations humaines (Bellatrach, 2008). Dans notre zone d'étude et suite à nos investigations précisément dans l'Erg Occidental nous nous sommes rendu compte que les dunes *barkhaniques* se développent avec le temps en dunes linéaires (*sifs*). L'exploitation d'images satellitaires illustrée en fig.125 révèle que la dune *barkhanique* est la composante de base pour les dunes linéaires.

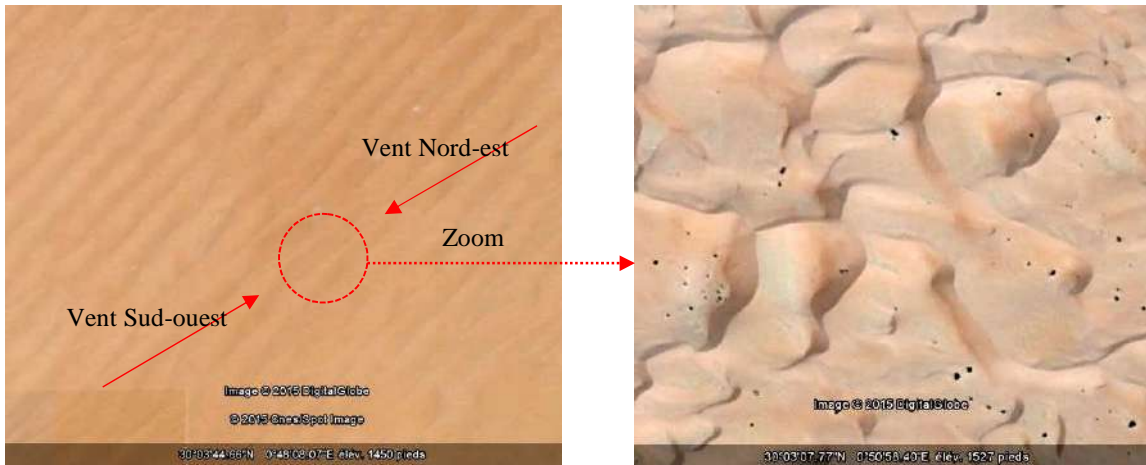


Figure 125: dunes linéaires composées de barkhanes localisées au niveau de l'Erg Occidental. Source : Auteur

Par ailleurs, Bagnold (1941) explique clairement que les dunes linéaires (*sifs*) sont dérivées de *barkhanes* par l'allongement de l'une des cornes dans une zone des vents bidirectionnels avec des intensités différentes. A travers son schéma (fig.126) Bagnold explicite cette évolution suivant cinq étapes à travers lesquelles on passe d'une forme *barkhanique* à une forme allongée que l'on appelle dune linéaire (*sif*). A ce stade, nous ne pouvons que souligner mettre en garde contre le danger que peut représenter les dunes de type *barkhanique*, tout comme les *sifs* et les *ghourds*.

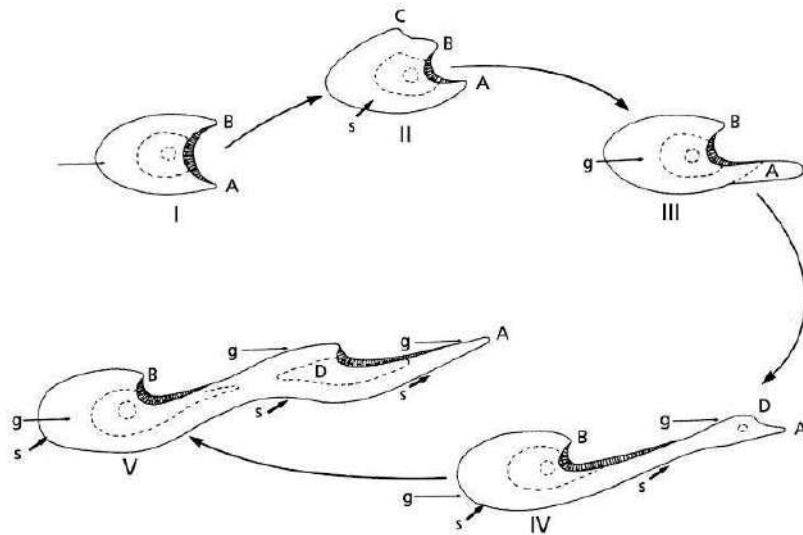


Figure 126: modèle de la genèse de dune linéaire à partir d'une barkhane en fonction de l'intensité des vents dominants. (Bagnold, 1941).

- A, B, C, D représentent les cornes de la barkhane.
- s : vents à forte intensité.
- g : vents à faible intensité.

7.2. Modes d'implantation des ksour dans la zone de Gourara

Force est de reconnaître un certain savoir-faire des populations autochtones qui a été mis à profit dans le choix du lieu d'implantation de leurs groupements dans un milieu assez répulsif. En effet, les investigations menées sur terrain, l'examen et l'analyse des photos satellitaires ainsi que le recoupement des données et écrits⁸³ sur la région, nous ont permis de distinguer trois positions d'implantation des groupements humains (*ksour*), à savoir :

- implantations localisées en position d'abri au bas de la corniche *hamadienne*,
- implantations dans les *theïrat* ayant comme assise la *hamada*.
- implantations inter-dunaire (au milieu de l'erg) dans les dépressions.

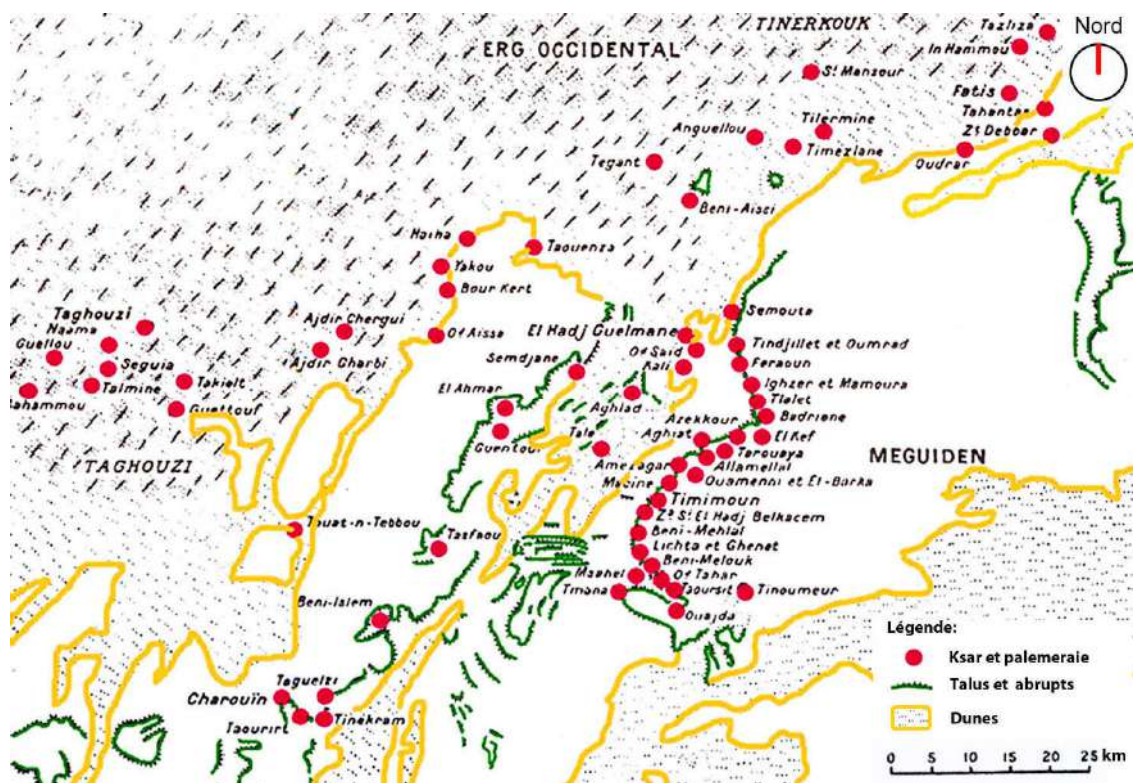


Figure 127: localisation des ksour dans le Gourara. Bisson (1957, p.66)

7.2.1. Implantations en position d'abri au pied de la corniche de la plaine de Tademaït

L'ensemble des palmeraies localisées au pied de la corniche sud et ouest de la plaine de Tademaït se trouvent dans ce cas de figure telle que les *ksour* situés sur la route reliant

⁸³ Bisson 1957, Bellatrach 2008, PDAU d'Adrar et de Timimoun 2004

Charouine à Timimoun à l'image de Tinekram et Taguelzi. Ainsi que l'ensemble des *ksour* situés en bas du relief sur la route menant vers *ksar* Kaddour tel que le *ksar* d'Ighzer, Timimoun...etc. Ce mode d'implantation étant le plus répandu et le plus peuplé dans le Gourara est favorisé par le relief escarpé de la région qui confère une position d'abri par rapport à la dynamique éolienne d'ensablement.

En effet, Bisson (1957) nous rapporte que le choix de ce type de site a été édicté par deux facteurs essentiels à savoir ;

- La facilité d'accès à l'eau qui est un facteur déterminant dans ce type de milieu très hostile. En effet, l'absence des calcaires barrémo-aptiens, qui représente un obstacle difficilement franchissable en raison de son épaisseur, met en affleurement des terrains plus tendres et donc facilement excavables. Ainsi, la position des palmeraies en bas de la corniche permet de drainer l'eau depuis la *foggara* creusée sur le plateau par la force gravitationnelle. Cette eau rare et précieuse passe d'abord par le *ksar* qui vient en première position pour être alimenté en eau potable, puis la palmeraie en deuxième position pour l'irrigation (fig.128).

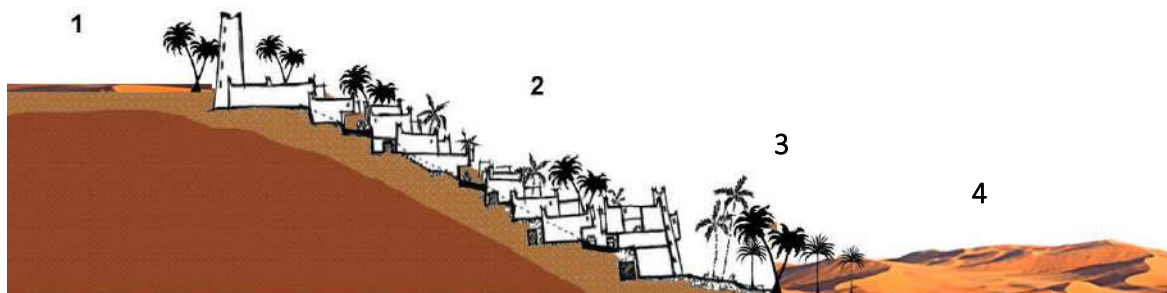


Figure 128 : schématisation de l'implantation d'un ksar sur un site en position d'abri. 1 : Hamada (zone où est creusée la foggara) ; 2 : Ksar ayant comme assise la corniche ; 3 : la palmeraie, 4 : erg ou dunes isolées.

- Le second facteur, c'est l'ensablement qui représente une contrainte majeure pour le milieu humain et son développement dans la région. Ce phénomène se manifeste à travers la dynamique éolienne et se traduit par la construction d'édifices sableux de formes et de tailles variables à la moindre aspérité ou obstacle rencontré. Dans ce cas précis, le choix de l'implantation des palmeraies au pied de la corniche n'est guère fortuit mais répond plutôt à un sens aigu de l'observation de la réalité du terrain. En effet l'aspect indenté de cette bordure du plateau induit une zone de protection pour les différentes palmeraies situées à son pied et qui épousent une direction nord-est/sud-ouest qui en est de même pour la direction principale des vents dominants de la région (fig.129, 130 et 131).

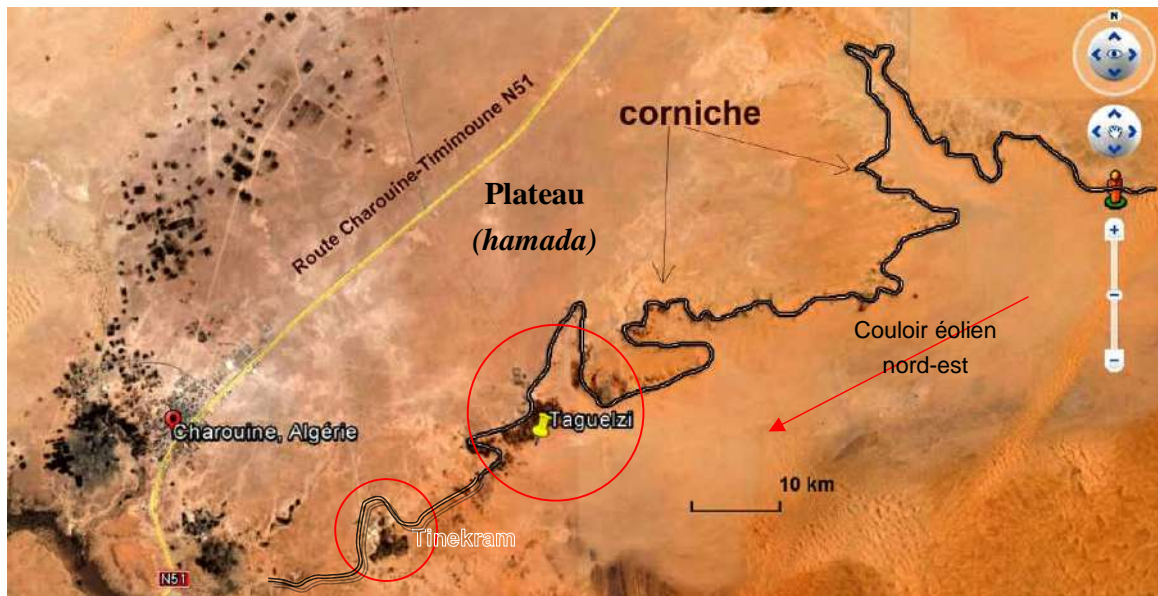


Figure 129: Vue satellitaire du ksar de Taguelzi et Tinekram situés au pied de la corniche hamadienne. Source : Auteur

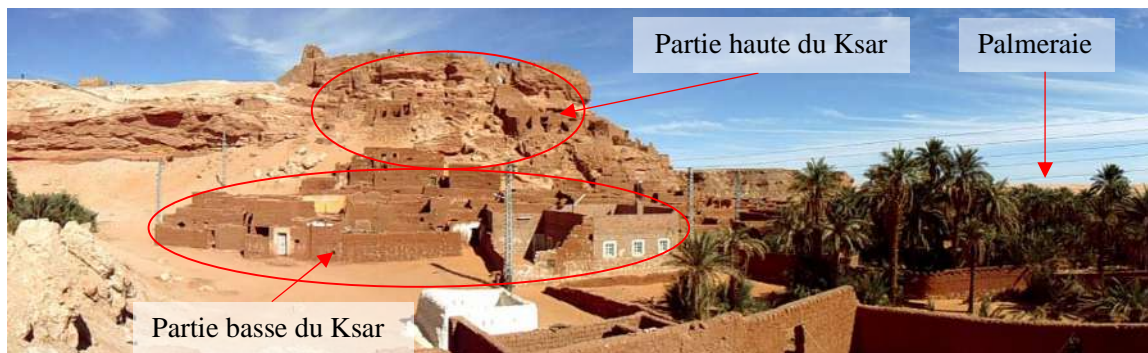


Figure 130: l'ancien Ksar de Taguelzi. Photos prise depuis la palmeraie. Source : Auteur 2011



Figure 131: ksar de Taguelzi ; vue sur la palmeraie prise d'en haut. Source : Auteur 2011

En Egypte, plus précisément à Djebels Archenu et Oweinat un cas de figure illustre aussi la position d'abri formé par le relief du terrain mais cette fois-ci par des petites montagnes situées à l'opposé de la direction des vents dominants (fig.132). Mainguet et al., (2004). Il est constitué de :

- une aire de dépôt formée en amont vent du djebel (montagne) par effet de blocage ;
- une subdivision de courants éoliens de part et d'autre de l'obstacle avec le phénomène de col et la formation de bouquets de *sifs* ;
- une aire d'abri en forme de fer de lance.

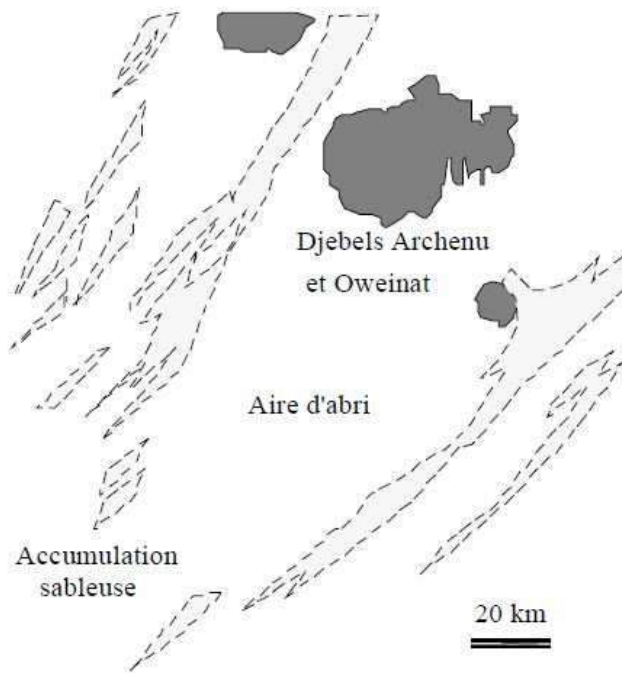


Figure 132: Effet d'abri des Djebels Archenu et Oweinat en Egypte. Mainguet et al. (2004)

7.2.2. Implantations sur les *theïrat* ayant comme assise la *hamada*

Dans la région de Timimoun on retrouve ce cas de figure au pied des cordons dunaires bordant ces vastes plaines que l'on appelle « *theïrat* » comme le cas du *ksar* d'Aghled.



Figure 133: schéma d'une installation inter-dunaire au sein d'une *theïrat*. 1 : contre dune. 2 : *ksar*

Selon Bellatrach (2008), l'implantation de groupements humains sur les *Theïrats* est dictée à la fois par la présence d'eau qui ne nécessite que le percement de la dalle barrémo-aptienne, d'où l'appellation *Hassi* (puit) qui compose le nom de la plupart des oasis présentes sur l'erg. Autre élément incontournable qui a conforté l'installation humaine sur les *theïrat* est la présence de la contre-dune qui est d'une importance considérable dans la protection contre le phénomène d'ensablement. La contre-dune constitue sur le terrain le frein naturel à la progression de sable dans la direction perpendiculaire à celle-ci. Fig.134

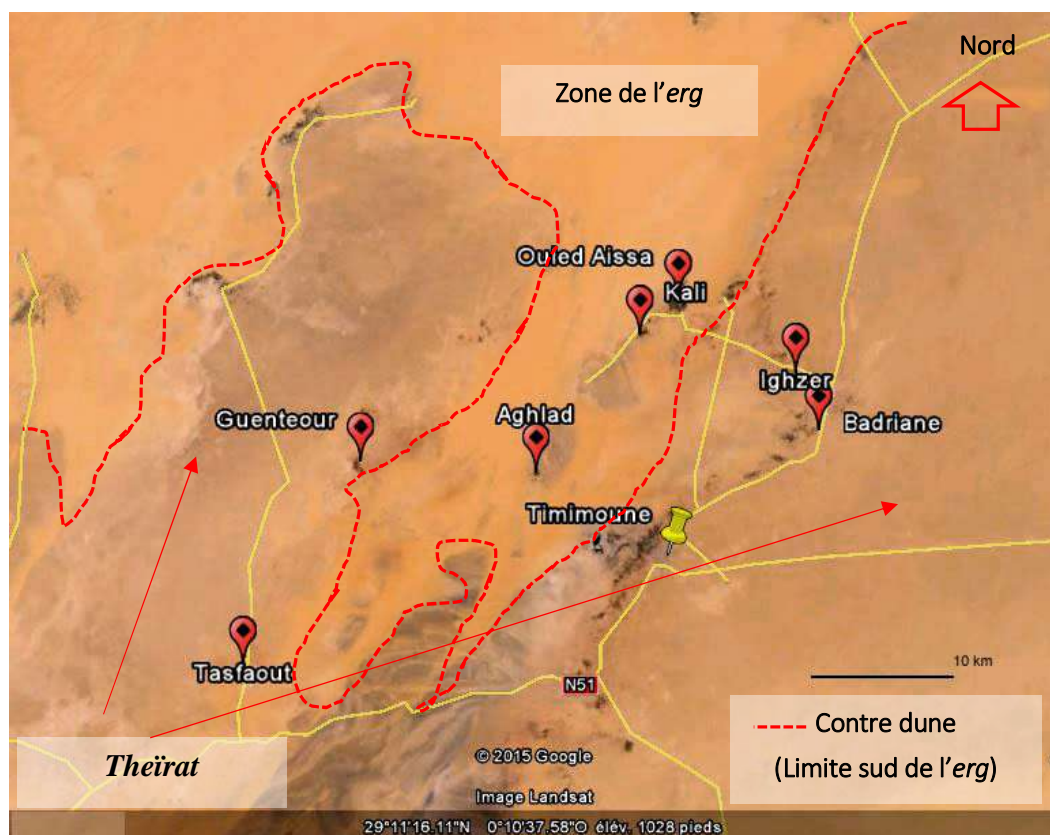


Figure 134: situation des ksour par rapport à l'Erg Occidental, la theïrat et la contre-dune. Source : Auteur

La contre-dune est un édifice éolien constitué par un ensemble de dunes *barkhaniques* coalescentes et enchevêtrées les unes dans les autres. La formation des édifices *barkhaniques* longiformes s'effectue généralement à partir de dunes linéaires suite à un vent bidirectionnel dominant nord-est/sud-ouest avec un angle légèrement oblique par rapport à chacune des deux directions principales des vents dominants. Les contre-dunes sont connues localement sous l'appellation de « *Drâa* » qui signifie « bras » (Bellatrach, 2008). Fig.135 et 136



Figure 135: Exemple d'une contre-dune dans l'Erg Occidental. 2014. Coordonnées (29°08'42.03" N, 0°36'51.78" O.). Auteur



Figure 136: Vue sur la contre dune bordant la limite Est de l'Erg Occidental. Photo prise depuis l'hôtel « Rose des sables » à Timimoun. Auteur 2011

Toutefois, si la contre-dune représente un élément protecteur vis à vis de l'ensablement, il n'en demeure pas moins que les vastes plaines (*theïrat*) sont sous l'influence de la dynamique éolienne. En effet, dès qu'un obstacle se dresse dans le parcours des vents dominants, on voit apparaître les prémices même embryonnaires d'édifices morphologiques.

Par ailleurs les vents dominants arrachent les molécules sableuses des grands espaces dénudés qui avoisinent les oasis et les emportent vers celles-ci, les déposent dans les bas-fonds, et généralement en amont et en aval de tous les obstacles rencontrés sur leur parcours. Quand les vents atteignent une oasis, des remous se produisent et les sables se déposent à l'orée des palmeraies. Le premier dépôt se grossit des apports qui se succèdent et forment une dune longitudinale de 20 et 40 mètres de haut. Les apports continuent et le vent entraîne dans le sens de sa direction le sable superficiel qui gravite la dune, dépasse sa crête et va se déposer sur son avancée. La dune progresse ainsi et pénètre dans la palmeraie, suivie d'une seconde qui se forme derrière elle après qu'elle a un peu dépassé la lisière. L'oasis se trouve d'ores et déjà traversée de part en part, elles laissent derrière elles quelques palmiers clairsemés, des bourgs, insuffisants pour former barrage de retenue ; alors elles repartent, obéissant aux vents qui les éliminent et emportent de nouveau leurs éléments vers l'ouest. Fig.137



Figure 137: Prémices d'ensablement au niveau d'une theïrat localisée au niveau de l'Erg Occidental. Source : prise d'écran-documentaire « L'Algérie vue du ciel » de Yann Artus-Bertrand, diffusé sur France-2 le 16/06/2015.

«Les dunes avancent, reculent, selon que tel ou tel vent domine ; elles oscillent sur place lorsque les vents se neutralisent ; en un mot, elles suivent de loin, dans leur marche lente et irrégulière, l'allure capricieuse du vent » (Schirmer 1893, p.160)

7.2.3. Implantations dans les dépressions à l'intérieur de l'Erg

Parmi les trois cas de figures d'implantations humaines rencontrées dans la région de Gourara, celle localisée au sein même de l'erg soulèvent la problématique la plus ardue en matière d'aménagement de l'espace (fig.138).



Figure 138: schématisation de l'implantation au cœur de l'erg. 1 : Erg. 2 : ksar situé sur une dépression inter-dunaire ; 3 : limites d'appropriation (afreg)

En effet, le développement et le maintien soutenu d'une technique de lutte au sein même de l'erg exigent des efforts humains énormes et des investissements qui sont loin d'être amortissables financièrement. Afin d'apprivoiser ces portions d'espace gagnées par l'erg, l'homme procède par trois étapes (Bellatrach, 2008) :

- Installation au niveau des dépressions (cuvettes) inter-dunaires après percement de la dalle barrémo-aptienne et accès à la nappe d'eau.
- Mise en place d'une limite physique grâce au système des *afregs* qui jouera aussi le rôle de protection contre l'avancé des dunes de l'erg.
- Mise en place de plantations de palmiers dattiers.

Au premier abord, lorsqu'on examine une oasis d'erg, on a l'impression que les hommes ont recherché les creux des dunes pour y établir leur jardin. En réalité quand on retrace l'évolution d'une oasis à jardin en cuvettes comme celle du Tinerkouk ou du Taghouzi, on s'aperçoit qu'au début les jardins étaient situés sur un *reg* ou sur le fond rocheux d'une *theïrat* et que peu à peu ce sont les clôtures des jardins (*afreg*) qui, en provoquant une accumulation de sable, ont donné naissance à une alvéole (cuvette) ou un entonnoir de sable.

Si de prime abord, l'erg apparaît comme une étendue sableuse figée est réellement loin de l'être puisque les courants éoliens ont tendance à modeler de manière continue la géométrie morphologique des édifices sableux en assurant un transfert des éléments fins d'une forme à l'autre à l'intérieur de l'erg. Donc, ce qui semble globalement immuable est concrètement en

mouvement continu. Par conséquent, et afin d'assurer une lutte positive contre l'ensablement, les propriétaires de ces régions sont tenus d'assurer la surélévation continue des palissades, petit à petit l'oasis prend forme d'une cuvette à cause des *afregs* qui sont montés et qui ont arrondi l'aspect quadrilatère qu'avait le jardin à l'origine.



Figure 139: Ksar de Talmine ; installation humaine au milieu de l'erg avec mise en place d'un système *afregs*. Source : Auteur 2011

La comparaison des zones d'installation révèle des zones situées à l'abri de l'ensablement, des zones plus au moins à l'abri grâce aux contre-dunes et enfin, des zones complètement à découvert, situées en plein erg où le phénomène d'ensablement abonde. Un questionnement se pose lorsqu'on observe que les populations avaient ce choix de s'installer à l'abri du vent de sable et d'épargner leurs efforts de combattre l'ensablement en plein erg : Quels sont les facteurs qui ont été à la base d'une telle position spatiale ? Pourquoi avoir choisi l'implantation de groupements humains au sein même des masses dunaires ?

Bien que ces zones soient connues pour leur vulnérabilité extrême au phénomène d'ensablement du fait qu'elles se situent en plein erg, la présence des palmeraies et des systèmes d'irrigation (*foggara*) nous a poussés à supposer que c'est la disponibilité de l'eau souterraine qui a attiré les populations à occuper ces régions. La réponse à ces questions n'a été possible qu'à travers une étude de l'évolution hydraulique des oasis à *foggaras* appuyée par des écrits, notamment ; (Bisson 1975 et 1985, Marc Côte 2005, Kouzmine 2007, Marouf 2010...etc.) et combinant à la fois observation *in situ* et analyse d'études hydrogéologiques effectuées déjà sur la région par l'ANRH⁸⁴.

⁸⁴ ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Site web : <http://www.anrh.dz/>

7.3. Nature hydrogéologique du Gourara, phénomène d'ensablement et impact sur la translation des oasis

7.3.1. Introduction

Dans un pays qui reçoit 15mm de pluie annuellement, c'est aux nappes phréatiques que l'homme doit s'adresser pour irriguer ses palmiers et ses jardins. Une procédure à l'accoutumé dans le Gourara -et c'est là une de ses originalités- qui possède un important réseau de *foggaras* qui drainent l'eau du sous-sol et l'amènent vers le *ksar* pour l'alimenter en eau potable puis vers la palmeraie pour des raisons d'irrigation.

Si l'on examine une carte des procédés d'irrigation utilisés au Gourara, on constate d'une part que les oasis à *foggaras* sont pour la plupart localisées le long des escarpements du M'guiden (le plateau), mais que d'autre part, bien de ces oasis autrefois à *foggaras* ne possèdent aujourd'hui que des puits à balancier. Ce que nous cherchons à travers cette partie de la recherche dédiée à l'étude des conditions hydrogéologiques, de comprendre les raisons de de cette localisation, le pourquoi de cet abandon du système à *foggaras* dans certaines oasis et de cette mutation des *foggaras* vers des puits à balancier.

7.3.2. Les nappes phréatiques et système d'exploitation ancestral ; les *foggaras*

En géologie, les eaux souterraines sont contenues dans des formations plus ou moins argileuses et sablo-argileuses datant de la fin de l'ère Tertiaire et début du Quaternaire. Ces nappes sont des aquifères c'est à dire des corps (couche, massif) de roches perméables à l'eau, à substrat et parfois à couverture de roches moins perméables, comportant une zone saturée et conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. Ces couches sont connues sous l'appellation du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT). (Observatoire du Sahara et du Sahel, 2015)⁸⁵

- Le Continental Intercalaire (CI)

D'après les constats dressés par l'Observatoire du Sahara et du Sahel (2008), le Continental Intercalaire (CI) est la couche qui contient les nappes du système aquifère du Sahara septentrional (SASS) - partagé par l'Algérie, la Tunisie et la Lybie - comme les appellent les spécialistes plus communément les nappes de l'Albien à cause de l'âge géologique des formations qui les contiennent. Ces nappes sont en effet alimentées par des infiltrations d'eau

⁸⁵ Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Site web : <http://www.oss-online.org/>

de pluie aux piémonts de l'Atlas saharien de l'ordre de 1,4 milliard de mètres cubes par an. La démonstration récente de l'IRD⁸⁶ en mai 2013 (OSS, 2008), qui s'appuie sur des données obtenues par satellite, a permis d'estimer les variations du volume d'eau emmagasiné sous le Sahara septentrional. L'Algérie, la Tunisie et la Libye se partagent successivement 70%, 22% et 8% des 1 019 000 km² de la superficie du SASS qui contient, avec deux aquifères superposés, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. L'or bleu du Sahara ou encore la «mer souterraine du Sahara» contiendrait, selon l'Observatoire du Sahara et du Sahel (2008), entre 30 000 et 100 000 milliards de mètres cubes.

- La nappe du Complexe Terminal (CT)

Connue aussi sous le nom de nappe « pontienne » cette nappe est en effet entretenue par plusieurs formations perméables d'âge Crétacé Supérieur à Tertiaire. Elle a une superficie d'environ 350 000 km² et située à une faible profondeur (100 à 400 m), ce explique d'ailleurs sa formation par l'accumulation d'eau au cours de périodes pluvieuses du Quaternaire, mais aussi par les infiltrations à partir des oueds à sa périphérie (Atlas saharien, Mzab, Dahra) et par l'infiltration de pluies exceptionnelles sur le Grand Erg Oriental. (Côte, 2005).



Figure 140: localisation du système aquifère du Sahara septentrional SASS dans le Bas-Sahara algérien. Source : (OSS, 2015)

Selon l'OSS (2008), le bassin SASS se subdivise en trois sous bassins : le bassin du grand Erg Occidental à l'ouest, le bassin du grand Erg Oriental au centre et le plateau de la *hamada El Hamra* à l'est. Notre région d'étude fait partie du bassin du Grand Erg Occidental qui englobe

⁸⁶ IRD : Institut de recherche pour le développement. <http://www.ird.fr/>

dans sa majeure partie la nappe du Continental Intercalaire (CI). D'autres études géologiques ont été effectuées sur la zone d'étude par l'ANRH montre que le Continental Intercalaire est la seule et unique nappe d'eau dans la région d'étude, elle affleure tout le long de l'axe reliant Timimoun à In Salah.

Grace à l'analyse des cartes et profils géologiques récupérés auprès l'ANRH nous avons pu mettre en exergue l'importance de l'épaisseur de la nappe du Continental Intercalaire qui est de l'ordre 200 à 300 m dans la région de Gourara qui représente la limite sud-ouest de cette nappe. Via, ses coordonnées GPS et sous une interface Google-Earth nous avons calé la carte géologique sur le périmètre de la zone d'étude (Fig.141) et voici ce qui en ressort ;

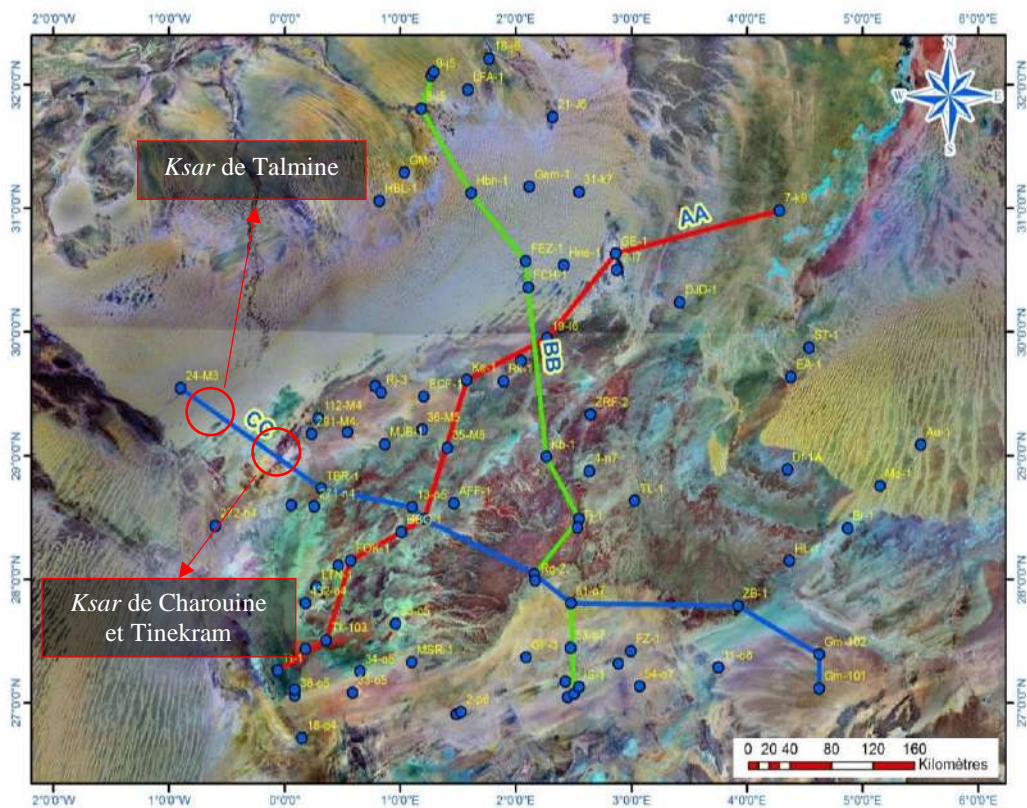


Figure 141: Carte hydrogéologique de la zone de Gourara. Source ANRH

Sur le profil hydrogéologique CC (Fig.142) nous pouvons constater que la situation du ksar de Talmine, de Charouine et de Tinekram est très favorable à l'exploitation de la nappe phréatique disponible en peu de profondeur à ces endroits. Cela corrobore notre hypothèse qui suppose que l'installation humaine dans ces zones répulsives a été dictée en premier lieu par la disponibilité abondante de l'eau souterraine.

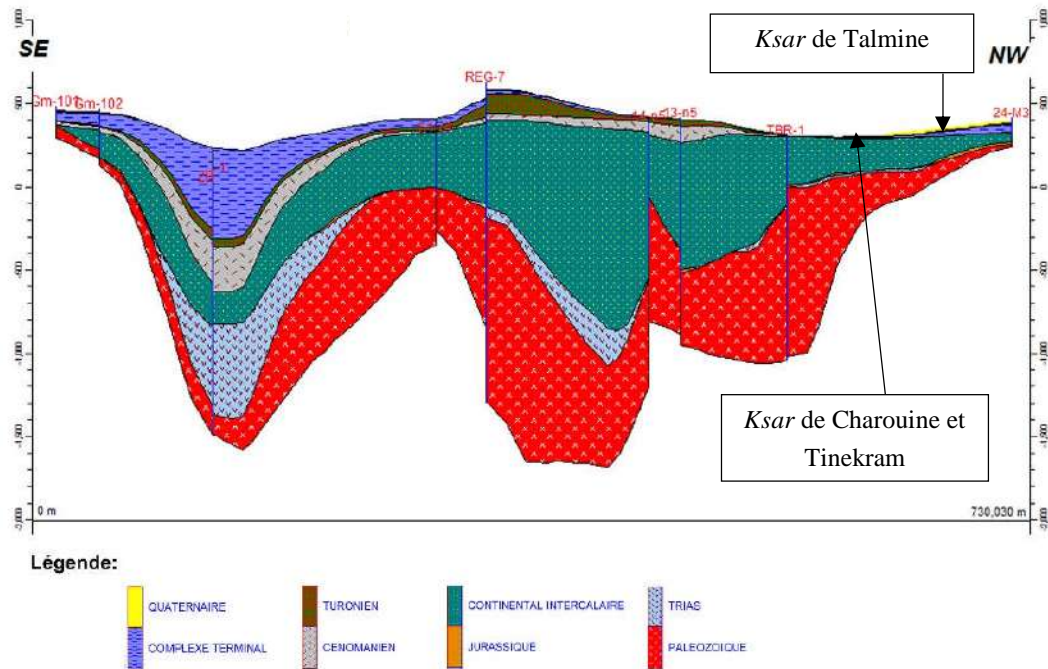


Figure 142: Profil hydrogéologique CC (Sud-Est, Nord-Ouest). Source : ANRH

La carte en fig.143 nous montre que c'est précisément la région des grès du Continental Intercalaire qui a le plus attiré les oasis à *foggaras* puisque, au total, une cinquantaine de palmeraies du Gourara sont alimentées par la nappe albienne : ce sont toutes celles de la rive ouest du M'guiden, toutes celle de Deldoul et de l'Aouguerout, Charouine et El Hadj Guelmane au centre. En revanche, les oasis à *foggaras* dans le Tinerkouk sont peu nombreuses, car on dénombre plusieurs d'entre elles qui sont déjà mortes.

Sur le premier gradin du M'guiden, qui porte le ksar de Timimoun et la plupart des *ksour*, se trouvent de nombreuses ruines, des traces de jardins et de séguias. En raison du rabattement de la nappe les nouveaux jardins ont gagné peu à peu sur la *sebkha* en se glissant par les talwegs qui cisèlent le glacis taillé dans les argiles de base du Continental Intercalaire. Le cas est particulièrement net à Timimoun ou la palmeraie se compose de deux parties distinctes :

La partie haute, plaquée contre le ksar ainsi qu'immédiatement en contre-bas de l'escarpement gréseux qui limite le plateau, est la plus ancienne. Elle est aisément reconnaissable à la densité de ses palmiers. En revanche, le bas de la palmeraie est beaucoup moins touffu, et surtout ses palmiers sont plantés à intervalles réguliers. Il s'agit de la partie nouvelle dont il faut reconnaître que la création est due au rabattement de la nappe phréatique.

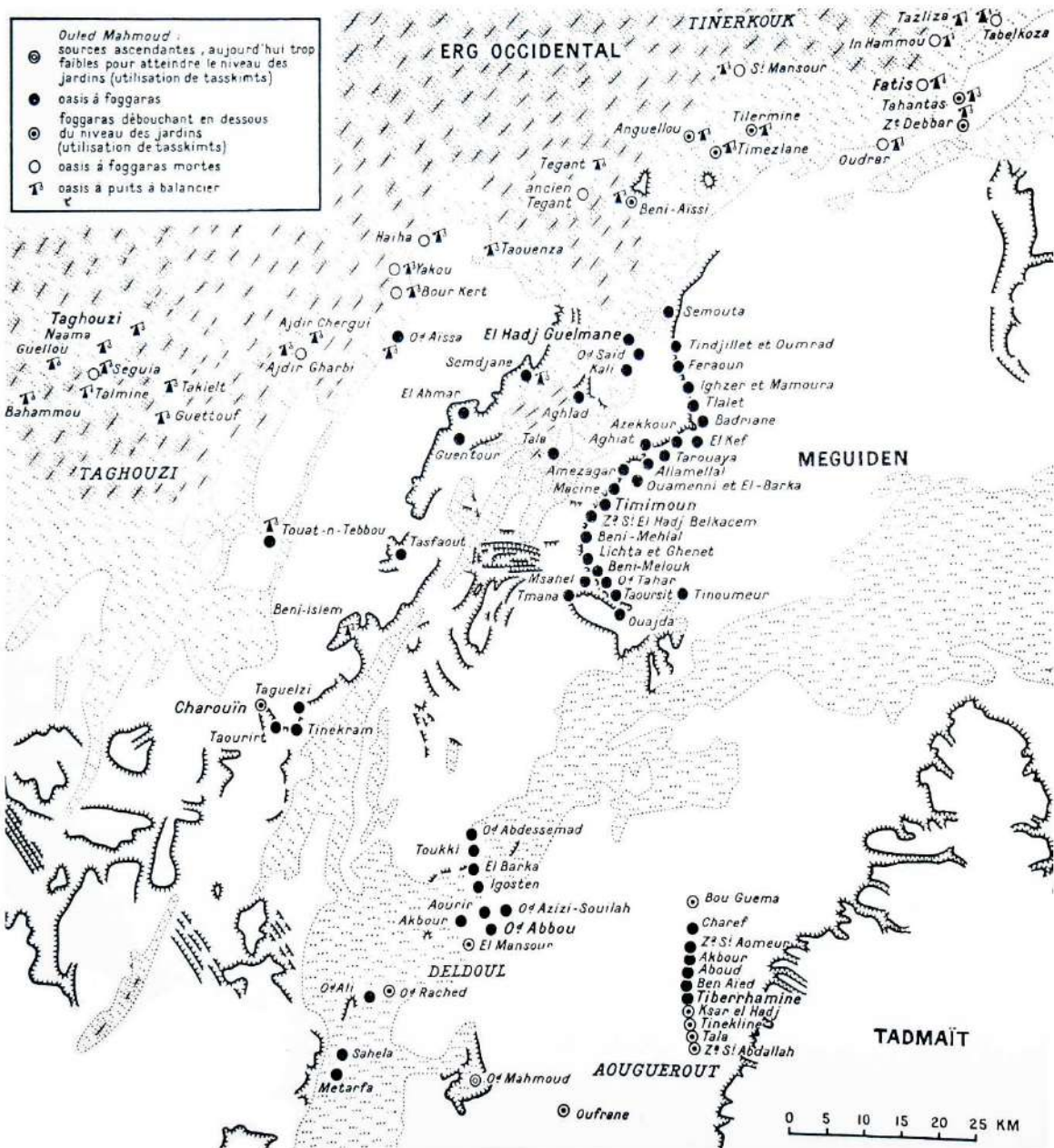


Figure 143: localisation des oasis à Foggaras dans le Gourara. (Bisson, 1957, p.66)

Bisson (1957) explique que ce glissement vers la *sebkha* est particulièrement net à Deldoul où là encore ensablement et rabattement jouent dans le même sens : tandis que les jardins Est sont abandonnés parce qu'à la fois plus élevés et plus exposés à l'ensablement, les palmeraies par contre s'étendent sur la *sebkha* en profitant de la protection de l'escarpement contre l'ensablement et de la force gravitationnelle qui draine l'eau depuis les *foggaras*. Dans tous les cas considérés, ce glissement vers la *sebkha* ne va pas sans inconvénients :

- Du fait du prolongement des jardins sur des terres salées, les besoins en eau sont devenus plus importants (il faut arroser le plus possible afin de faire disparaître les sels).
- Avec l'allongement des séguias qui en résulte, les pertes augmentent le long des séguias.

Ainsi, même dans le cas de *foggaras* bien entretenues, les ressources en eau deviennent insuffisantes. Ainsi, même des oasis favorisées du point de vue du rabattement des *foggaras* par la topographie se voient de plus en plus limitées dans leurs possibilités : à l'aval, c'est le danger du salant, ou pire de l'inondation qui les menace ; vers le haut, c'est le forage de puits, de plus en plus profonds qui rend l'entreprise des *foggaras* de plus en plus coûteuse.

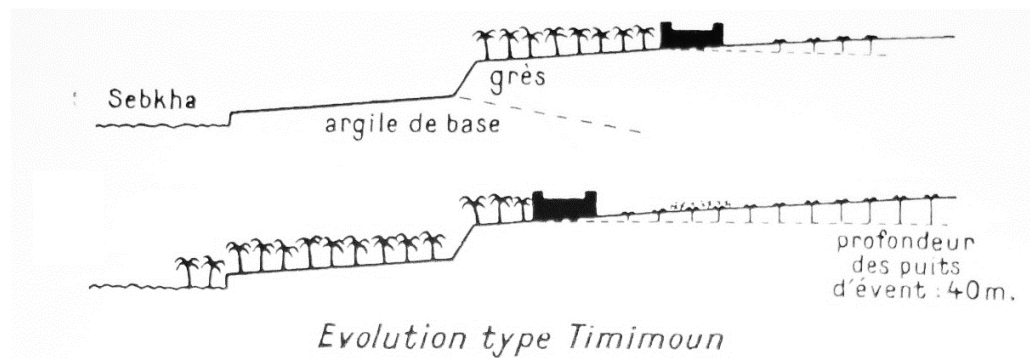


Figure 144: Evolution de l'oasis de Timimoun suite au rabattement de la nappe phréatique. (Bisson 1957, p. 77)

L'étude des niveaux piézométriques de la région de Gourara montrent qu'il y a un abaissement du niveau piézométrique de la nappe dans la région sur une période de 40 ans d'observation, estimé à plus de 40 mètres (OSS, 2008). La baisse du niveau piézométrique des *foggaras* a engendré le passage d'un système d'irrigation par *foggaras* vers le système d'irrigation par puit. « ...lorsque les *foggaras* sont devenues d'un rendement trop faible, elles sont finalement abandonnées au profit des puits à balanciers. Ce passage d'une oasis à *foggaras*, puis *foggaras* et *tasskimt*, et enfin puits, est progressif, c'est-à-dire qu'une partie de l'oasis peut encore être irriguée directement par la *foggara*, tandis qu'une autre partie a dû se résigner aux *tasskimt*, et que la dernière utilise des balanciers ; dans ce dernier cas, les conditions sociales en sont responsables ». (Bisson 1957, p.78)

Cependant, même la stabilité des oasis à balanciers est comme celle des oasis à *foggaras*, limitée dans le temps du fait de l'épuisement des réserves hydrauliques.

« au Tinerkouk, après un laps de temps, chacun de ces puits diminue de débit au point d'imposer son remplacement par un nouveau à creuser assez loin, 15 ou 20m pour atteindre la couche hors de la zone que les puits anciens ont déjà épuisée ». A.G.P. Martin (1908)

Au final, ces circonstances naturelles, aggravées de causes sociales expliquent la décadence de beaucoup d'oasis à *foggaras* dans le Gourara. « lorsque les possibilités techniques sont épuisées, et c'est le cas pour les *foggaras* établies sur des regs de très faible pente (*hamada*) les populations sont alors obligées d'aller chercher des sites d'implantation ailleurs. Le plus bel exemple est donné au Gourara par la petite palmeraie de Tegant. Le terroir était «bled tleg» (pays où l'on lâche l'eau) avant de devenir «bled jbid» (pays où l'on puise l'eau)... » (Bisson, 1985)

Ainsi, cela explique d'ailleurs la translation des palmeraies suite à la translation des nappes phréatiques progressivement vers l'erg et l'abandon total des terroirs cultivés initialement dans la bordure longeant la *hamada*. Telle a été l'origine de l'implantation en plein erg et le point de départ de palmeraies dont les populations (*Zénètes*), sont venues voici environ deux siècles des bordures de la *sebkha* de Timimoun et de la corniche *hamadienne*. D'après Bisson (1954), le déplacement, a été de l'ordre de la quarantaine à la soixantaine de kilomètres. Les nouvelles conditions d'implantation (très favorisé sur le plan hydraulique) impliquant le creusement de fosses jusqu'à atteindre la nappe de l'erg est à l'origine de ce type de terroir fait d'une juxtaposition de jardins dispersés dans les couloirs inter-dunaires. Fig.145

Au final, translation lente des oasis à *foggaras* et ensevelissement des palmeraies de l'erg par l'ensablement ont induit une mobilité des terroirs qui est la condition de toute survie de l'activité agricole, mais dont l'ampleur est variable : tantôt elle est compatible avec une permanence du site d'habitat (un dédoublement *ksar*-palmeraie) tantôt elle obligerait à des déplacements quotidiens tels que les hommes préfèrent se fixer auprès du nouveau terroir. De toute façon migration ne signifie nullement désertion car ces mouvements restent circonscrits dans l'espace, tant sont puissants les liens sociologiques qui unissent les habitants d'un même groupe d'oasis. (Bisson, 1985)



Figure 145: organisation nébuleuse de jardins et terroirs dans l'Erg Occidental. (Bisson, 1985)

- vieux jardins, de plan circulaire : l'ensablement explique la rétraction de l'espace cultivé.
- jardins plus récents reconnaissables au tracé très géométrique de la *dune-afreg*.

7.4. Conclusion

La formation des dunes est tributaire de la présence du vent et du sable. La région de Gourara est connue pour son Erg Occidental qui constitue une source inépuisable de sable. D'autre part, la présence quasi permanente du vent dans la région à des vitesses supérieures à 5m/s durant toute l'année et suivant deux directions principales ; nord-est et sud-ouest font de Gourara un terrain très favorable à la production du phénomène d'ensablement.

La topographie et les éléments du relief interviennent dans le façonnement des dunes. La répartition et la disposition des massifs rocheux et des dépressions topographiques, induisent en plus d'une circulation éolienne au voisinage d'un relief, des couloirs de circulation privilégiée de courants transporteurs de sable et une dynamique exceptionnelle des dunes.

Lors de nos investigations sur le terrain, nous avons pu relever plusieurs types de dunes en fonction des différentes formes constatées ; d'une simple dune isolée sur la *hamada* au train *barkhanique* très complexe dans l'Erg Occidental. Parmi les typologies de dunes identifiées, certaines d'entre elles tel que les dunes *barkhaniques* et étoilées méritent plus d'attention de par le danger qu'elles représentent pour les établissements et infrastructures ainsi que pour tout développement future des villes de la région. Ces deux types de dunes ont été localisés dans l'erg pas loin des villages de Talmine, Guentour, Charouine...etc., ainsi que sur la limite ouest de l'erg près du village de Kerzaz.

L'étude comparative des zones d'installation dans la région de Gourara révèle des différences d'une zone à l'autre : zone d'habitat située à l'abri des vents de sables à l'opposé d'une autre située en plein erg ou le phénomène d'ensablement abonde. Une question se pose lorsqu'on observe que les populations avaient le choix de s'installer à l'abri du vent de sable et d'épargner leurs efforts de combattre l'ensablement en plein erg : le pourquoi de cette translation des groupements humains vers le milieu de l'erg au sein même des masses dunaires ? Quels sont les facteurs qui ont été à la base d'une telle translation ?

En effet, il nous a été difficile au départ de comprendre ce qui stimule les habitants de cette région à vouloir s'installer parfois au sein même de l'erg alors qu'il aurait été plus aisé d'occuper les espaces latéraux bordant la *hamada* qui offrent une protection contre l'ensablement par la présence des dunes frontales (contre-dune). Bien que ces zones soient connues pour être très vulnérables au phénomène d'ensablement du fait qu'elles se trouvent en plein erg, la présence des palmeraies et des systèmes à *foggaras* sur les lieux nous a poussés à

supposer que l'implantation des *ksour* au sein de ces zones est liée à la disponibilité de l'eau souterraine.

A la fin de cette partie d'étude nous avons pu mettre en relief les facteurs pertinents qui ont dicté le choix des populations locales dans l'implantation de leurs *ksour* à ces endroits erguiens aussi répulsifs que contraignants. En effet, de l'origine d'implantation au sein de l'erg à l'abandon total des jardins et palmeraies pour la conquête de zones situées au nord-ouest de la *hamada*, eau et ensablement ont joué un rôle prépondérant. Tantôt, c'est le rabattement de la nappe qui oblige à abandonner des jardins qu'il n'est plus possible d'irriguer, tantôt, c'est le sable qui les submerge. Dans la plupart des cas rabattement et ensablement agissent de concert, parfois à un degré tel qu'il est devenu préférable d'abandonner les lieux et de s'installer plus loin. Ce sont en définitive ces conditions naturelles qui expliquent que toute occupation du sol au Gourara ne peut être que provisoire jusqu'à présent. Les migrations internes de population, la décadence de certaines oasis en pleine période de sécurité et l'émergence d'autres en plein milieu dunaire illustrent la capacité du phénomène d'ensablement couplé à la disponibilité de l'eau dans le remodelage du paysage oasien dans la région de Gourara.

Aujourd'hui, si l'on veut que l'aménagement soit pérenne, on doit tenir compte des deux éléments ayant toujours façonné et ordonnée l'occupation du sol dans le Gourara à savoir, l'eau par sa rareté ou sa disponibilité et l'ensablement par ses manifestations récurrentes dans la région.

**8. CHAPITRE VIII : L'ENSABLEMENT A L'ECHELLE MICRO :
MODELISATION CFD ET CALCUL DU BILAN SEDIMENTAIRE**

8.1. Simulation du comportement du vent dans le village de M'guiden à Timimoun

8.1.1. Présentation du village de M'guiden

Le village socialiste de M'guiden se trouve à 130 kilomètres à vol d'oiseau au nord-est de Timimoun chef-lieu. Son édification remonte à l'époque de la révolution agraire en 1973 pendant le mandat du président Boumediene pour fixer les nomades. Dans le Sud-Ouest, et sous la responsabilité d'un certain Marc Gossé⁸⁷, la programmation de la révolution agraire se matérialisa par le village socialiste de M'Guiden : « *M'Guiden est un lieu-dit entre Timimoun et El Goléa accessible par la route asphaltée. Il sert de zone tampon entre Tademaït et le Grand Erg. Le village fut implanté dans une zone protégée par le banc basaltique de la colline de M'Guiden* ». (Marouf, 1981).

La croissance du village depuis sa création est presque nulle, on ne constate aucune construction récente ; les anciens hangars militaires qui servaient au stockage du matériel sont désormais utilisés comme des dépendances agricoles ou des abris pour les chèvres et les moutons. Ce village vit uniquement des activités agricoles et des subsides extérieurs (donations de l'Etat et argent de l'émigration) et n'a tiré aucun parti de sa situation.

Selon une étude des services de l'hydraulique (Chaouche-Bencherif, 2007), la situation de ce village dans la Saoura ne répond ni à l'exigence de proximité d'un établissement humain (ksar) ni à la nature du terrain (ce n'était pas une terre non exploitée). Ces terrains devaient profiter aux *ksouriens* et aux populations éparses souffrant de l'ensablement de leurs palmeraies, visant ainsi, des buts similaires et réutilisant les mêmes éléments de programmation coloniale. Quant à la programmation urbanistique, elle était identique dans les principes aussi. Comme le précise Marouf (2010), ce village, conçu pour 150 logements environ, ressemble à tous ceux des plaines du Nord. Cependant, son originalité, tient à sa configuration spirale, afin de juguler les vents de sable, qui au lieu de former les dunes contre ses enceintes, évolueraient de façon circulaire autour du village sans l'atteindre, tentative d'adapter l'habitat aux conditions climatiques locales, mais aussi, cette géométrie spatiale devrait permettre d'obtenir un meilleur regroupement autour des équipements collectifs de base et donner au village une certaine homogénéité (fig.146).

⁸⁷ Marc Gossé, architecte urbaniste belge né en 1944. Il a travaillé en Algérie (1970-1977), où il a dirigé l'équipe d'urbanisme de l'ETAU à Alger, pour diverses études régionales et l'établissement de plans directeurs d'une dizaine de villes, puis, à la Direction départementale des Travaux Publics de la Saoura, il a participé à la réalisation de villages agricoles au Sahara (M'Guiden et Abadla), dans le cadre de la Réforme agraire. Dans le cadre de la présente recherche, nous avons contacté Mr Marc Gossé pour lui demander d'amples informations concernant le village de M'guiden. Malheureusement nous n'avons reçu à ce jour aucune réponse de sa part.

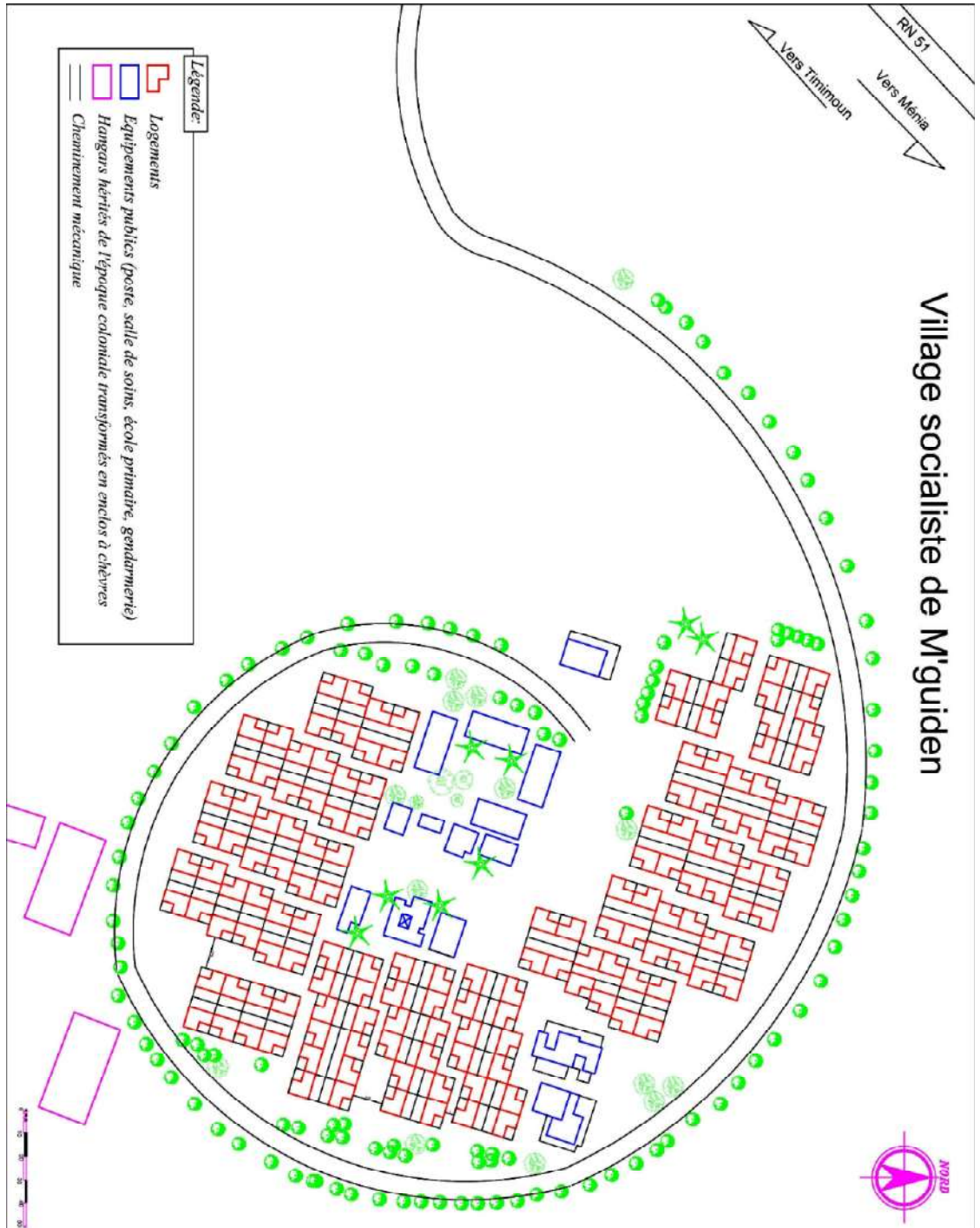


Figure 146: Plan du village socialiste de M'guiden. Relevé et restitution établis par l'auteur. Ech : 1/2500

Au-delà, de ces tentatives d'adaptation, le programme était lié à des standards de logements, d'organisation d'espace et de matériaux. Chaque logement est composé d'une cellule F3 avec une cour arrière, une courette, à l'entrée pour une extension future et terrasse accessible (fig.147). Les logements sont disposés en groupement de quatre pour que les habitants soient, à équidistance du centre où sont rassemblés les équipements collectifs. Le concepteur voulait dissocier la circulation piétonne de celle des véhicules poussée à la périphérie et adopter une disposition des logements telle qu'elle créât l'ombre indispensable aux habitants « en dedans » et limita les effets du vent. Pour la construction, des matériaux locaux furent utilisés à l'image de la brique de terre pour les murs, alors que le crépissage a été réalisé en mortier de ciment sous forme d'écailles afin de générer de l'ombre sur les murs extérieurs.

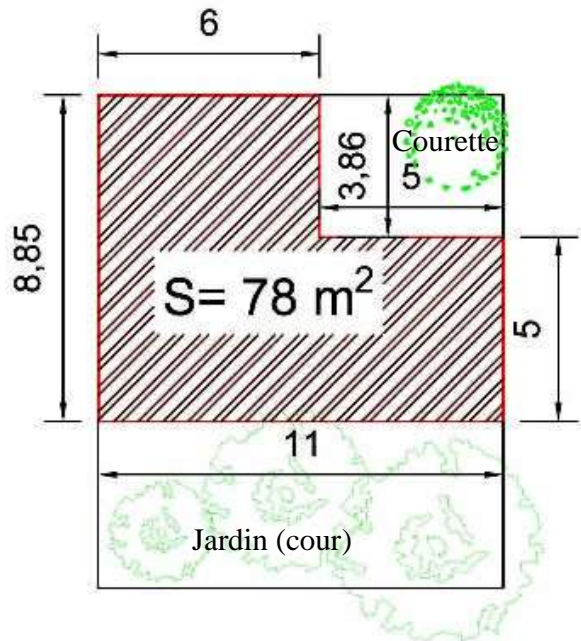


Figure 147: plan (relevé) d'un module de base (logement F3).
Ech. : 1/200. Source : Auteur 2012

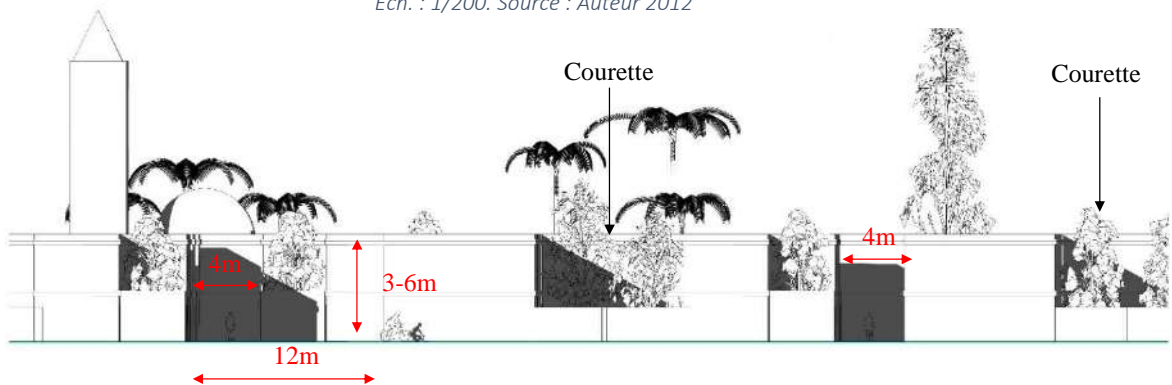


Figure 148: Façade Est du village de M'guiden (Reconstitution avec Archicad v.19 pro). Source : Auteur 2012

8.1.2. Le choix du village de M'guiden

Le choix du M'guiden est justifié par quelques points que nous développons ci-dessous :

- Le village de M'guiden subi l'ensablement de plein fouet à cause de sa situation géographique entre deux méga-obstacles qui d'après Mainguet (2003) sont pour la plupart du temps des canalisateurs de mouvements éoliens d'ensablement. Les vents est et nord-est de 5-6m/s très présents dans la région à des fréquences régulières tout au long de l'année font de ce village un endroit très exposé au phénomène d'ensablement. D'autant plus que le relief de M'guiden totalement plat (plateaux de Tademaït), constitue un terrain favorable à la déflation et au transport des particules de sable dans l'absence d'une rugosité qui peut diminuer ces phénomènes.
- D'autres part, le village de M'guiden incarne la politique d'aménagement postindépendance dans le désert. Il ne prend pas en compte les paramètres climatiques et environnementaux du site, pour ne citer que ceux-ci, et demeure dépourvue de stratégies de lutte contre tout aléa climatique, à l'image de l'ensablement. Nous avons voulu mettre en exergue à travers l'exemple du village de M'guiden, les conséquences qui peuvent s'avérer parfois désastreuses, d'une politique d'aménagement qui n'intègre pas la notion du risque naturel dans ses cahiers d'urbanisme.

8.1.3. Protocole et objectifs

Lors de cette première étape de modélisation nous sommes partis d'un cas de figure d'une forme urbaine existante, il s'agit du village de M'guiden afin de simuler le comportement du vent au sein de son plan masse. Plusieurs points de dépôt ont été relevés au sein de ce village qui pourtant était conçu suivant un plan en spirale supposé combattre la stagnation de sable. L'objectif étant d'identifier les zones de dépôt sur plan masse grâce à un travail d'observation *in situ*, puis de les comparer aux résultats de simulation CFD. Cela nous permettra d'appréhender le mécanisme d'ensablement et de comprendre davantage la manière dont se produisent ces stagnations de sable au sein d'un plan masse, puis d'identifier les paramètres physiques de la forme urbaine susceptibles d'enclencher ce processus.

La simulation CFD a été réalisée avec le code Fluent-Ansys, dont le paramétrage constitue une première étape indispensable pour le lancement du calcul. En effet, le paramétrage du modèle de simulation repose sur la définition des données « input » que l'on doit implémenter dans le code Fluent avant de lancer le calcul. Ces données concernent à la fois la morphologie du cas

d'étude (forme 3D, grandeurs réelles), l'environnement climatique de la région d'étude (vitesse et direction du vent, température, pression...etc.) et des paramètres relatifs au modèle de turbulence à engager. Ces paramètres doivent être déterminés avec le plus grand soin, car les résultats de calcul en dépendent fortement. Mieux ces paramètres sont définis, plus précis seront les résultats.

8.1.4. Validation du modèle de modélisation

a. Introduction

La modélisation CFD utilise des systèmes d'équations différentielles non-linéaires⁸⁸ et partielles dont aucune preuve mathématique ne permet de garantir leur stabilité, l'exactitude et la convergence des résultats. Dans une modalisation CFD le grand souci est de garantir l'exactitude des calculs CFD à travers un travail de validation. L'absence de lignes directrices claires sur les paramètres physiques et numériques qui doivent être fournis à l'utilisateur dans les programmes informatiques ce travail s'avère difficile ou parfois impossible.

La validation et la vérification constituent donc une étape indispensable pour la modélisation CFD. Souvent l'expérimentation en soufflerie est considérée comme la méthode la plus pratique pour la validation des résultats de la modélisation CFD. En revanche, même la méthode de soufflerie présente aussi des difficultés et des risques, qui d'ailleurs comme nous l'avons déjà signalé en tab.10 demeure réservée aux experts et à des rares universités et entreprises en aérodynamique du fait des données d'expérimentations qui sont précieuses et rarement publiés sous forme de benchmark.

Plusieurs études de cas sur l'environnement aéraulique au niveau piéton autour de bâtiments réels ont été réalisées en utilisant la technique CFD (Stathopoulos et Baskaran 1996, Timofeyev 1998, Westbury et al. 2002, Richards et al. 2002). Cependant, l'influence des conditions de calcul, à savoir : taille de la grille de discrétisation de domaine, conditions aux limites, etc., sur la précision de la prédiction n'a pas été étudiée de façon systématique. La technique CFD a été donc souvent appliquée avec une insuffisance d'informations sur l'influence de nombreux facteurs liés aux conditions et modèles de calcul.

En ce qui concerne notre présente recherche, nous avons réussi à récupérer un ensemble d'orientations (benchmark) publiées par Franke et al. (2004) et Franke et al. (2007). Ce

⁸⁸ La propriété de non-linéarité dans une équation, signifie que la somme de deux solutions possibles de l'équation ne constitue pas, en général, une autre solution possible.

benchmark a été d'une grande valeur pour l'avancement de notre recherche car il nous a permis de valider notre modèle de simulation suivant la technique CFD. En effet, en 2004, Franke et al., avaient compilé à partir d'un examen détaillé de la littérature une série de recommandations spécifiques pour l'utilisation de la CFD dans l'ingénierie du vent. Il a été publié en tant que contribution principal dans la procédure finale de la COST⁸⁹ Action C14 intitulée : « impact du vent et de la tempête sur la vie en ville et l'environnement bâti ». Par la suite, Franke et al. (2007) ont considérablement étendu ce papier dans le cadre de l'action COST 732⁹⁰ pour inclure les principes d'une meilleure pratique de la simulation CFD dans les environnements urbains. Ces lignes directrices ont été principalement axées sur les modèles RANS (adoptés déjà pour nos modélisations CFD), mais aussi des informations ont été fournies sur URANS, LES et les modèles hybrides URANS/LES. L'établissement de ces lignes directrices a été élaboré sur la base d'une comparaison croisée entre les simulations CFD, les résultats de tests en soufflerie et de mesures sur le terrain afin d'étudier l'influence de nombreux types de conditions de calcul pour différents champs d'écoulement.

Ces lignes directrices résument les points essentiels de la technique CFD qu'il faut vérifier pour la validation d'un modèle de simulation que nous développons ci-dessous :

b. Domaine de calcul

Certaines conditions sont à prendre en considération pour la définition du domaine de calcul. D'après Franke et al, (2007) le domaine de calcul doit être suffisamment grand pour éviter l'accélération artificielle de l'écoulement. Dans ce sens, certaines grandeurs sont données à savoir ; la distance en amont du bâtiment $D_{\text{amont}} > 4 \sim 5H$ où H est la hauteur du bâtiment. La distance en aval (entre le bâtiment et le fond du domaine à la direction du vent) $D_{\text{aval}} > 10 \sim 15H$. La distance latérale $D_l > 4 \sim 6H$. La hauteur du domaine $H_d > 3 \sim 6H$. Pour l'écoulement autour de bâtiments bas, H_d doit être égal à $6H$, alors que pour l'écoulement autour d'une tour, la hauteur du domaine peut être égale à $3H$. D'ailleurs, le taux de blocage de l'écoulement par la zone de construction (rapport entre la surface frontale des bâtiments au premier rang et la surface de la coupe verticale du domaine) doit être inférieur à 3-5 % (Franke et al., 2007)

Le domaine de calcul a été défini comme illustré en fig.149 ci-dessous. En suivant les recommandations de Franke et al., (2007), les dimensions du domaine ont été définies à partir

⁸⁹ COST : Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique. Site web : <http://www.cost.eu/>

⁹⁰ COST Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models

de la hauteur moyenne ($H \sim 6\text{m}$) des bâtiments du cas d'étude. La distance en amont des bâtiments D_a a été définie de l'ordre de $5H$ où, H est la hauteur du bâtiment. La distance en aval des bâtiments D_{av} est de l'ordre de $15H$. La distance latérale sur les deux cotés D_c est de $6H$, et enfin la hauteur du domaine H_d est de $6H$.

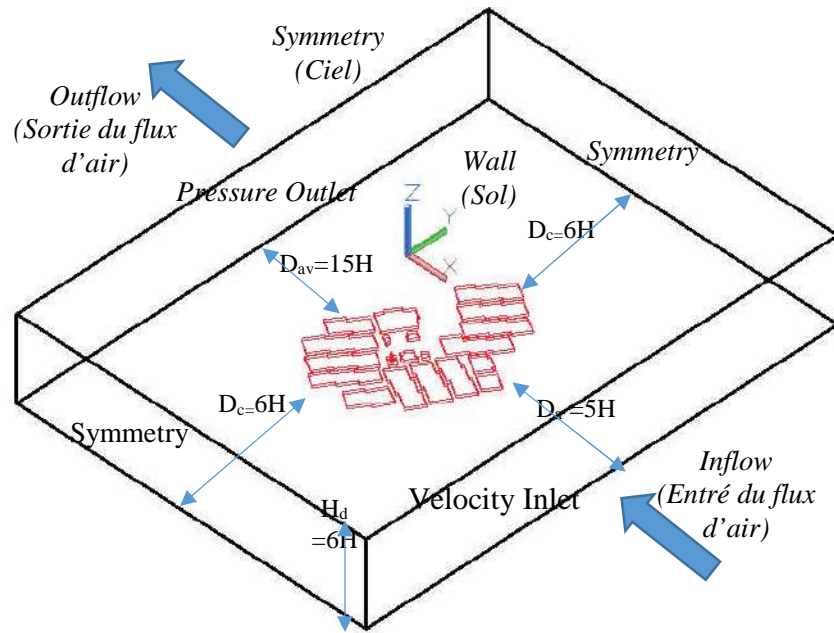


Figure 149: définition du domaine de calcul pour le village de M'guiden. Source : Auteur

Le sol ainsi que les surfaces des bâtiments constituent la zone de circulation de l'air (la veine fluide) et doivent être lisses, ceci correspondant à une valeur nulle de rugosité afin de pouvoir affiner le maillage le long de ces parois.

Pour la limite supérieure et latérales une « symétrie » est généralement prescrite, qui impose un flux parallèle et une vitesse nulle à la surface des parois, et ce, afin éviter une trop forte accélération artificielle de l'écoulement (Frank et al. 2007). Les deux faces restant, représentent respectivement l'entrée du flux d'air (Inflow) et sortie du flux d'air (Outflow). Pour la première une vitesse d'entrée sera affectée, tandis que pour la seconde c'est plutôt une pression qui sera définie.

c. Maillage

La phase de génération du maillage est celle qui mobilise le plus de temps dans la mise en œuvre d'une simulation en CFD. Plusieurs raisons à cela. D'une part, le dessin par ordinateur

d'espaces architecturaux ou urbains n'est pas aussi intuitif que nous pourrions l'imaginer. Il nécessite une expérience dans le domaine de la modélisation et de la représentation de formes dans l'espace. D'autres parts, il doit se réaliser suivant des contraintes spécifiques aux maillages volumiques appropriés à la CFD. Le code Fluent utilise la méthode des volumes finis⁹¹. Le volume de la géométrie est discrétisé en volumes élémentaires (hexaèdres, tétraèdres, prismes ou un mélange des trois) qu'on appelle aussi mailles (Franke et al. 2004, 2007, Tominaga et al. 2008).

Le maillage est une discrétisation de l'espace à étudier. Il est constitué d'un ensemble de mailles (ou cellules) dans lesquelles les équations du problème seront résolues. Le pas d'espace est ici défini comme la taille caractéristique d'une maille. Aussi, faut-il veiller à ce que deux mailles adjacentes n'aient pas de dimensions trop différentes sans qu'il y ait recouvrement d'une maille sur l'autre. Il est souhaitable pour cela que la variation de tailles entre deux cellules adjacentes n'excède pas à 20% (Tominaga et al. 2008). Lors d'une modélisation CFD, l'étape de création du maillage est cruciale pour assurer la cohérence des résultats et prendre en compte les considérations physiques du cas à étudier. Comme le signale Bonneaud (2004), le maillage doit être réalisé de sorte à minimiser la diffusion de l'erreur numérique. En plus la notion de raffinement de maillage est liée à la taille du pas d'espace aux endroits à fort gradients : il faut mailler petit dans une zone à fort gradient.

Le maillage consiste à découper l'espace en cellules appelées « volumes de contrôle ». Il faut mailler tout l'espace « vide » (la veine fluide), et les détails de surface qui ont de l'importance puisqu'ils génèrent des turbulences. Les résultats de calculs dépendent de façon cruciale de la grille qui est utilisée pour discrétiser le domaine de calcul. Le réseau doit être conçu de telle sorte qu'il ne présente pas d'erreurs qui seront trop grandes. Cela signifie que la résolution de la grille doit être suffisante pour capturer les phénomènes physiques importants comme les couches de cisaillement et les tourbillons. (Frank et al. 2007)

Pour notre cas d'étude, les volumes du village de M'guiden ont été dessinés en 3D avec Autocad, puis importés dans Gambit pour la régénération d'un maillage après avoir défini le domaine du calcul. Nous avons utilisé un maillage non structuré, constitué d'une discrétisation spatiale en éléments finis (tétraèdres) qui sont en mesure d'épouser les diverses formes aussi bien simples que compliqués (décrochements) sans générer trop d'erreurs (fig.150).

⁹¹ La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur des volumes entourant chaque point du maillage. Cette méthode, même si elle ne fournit qu'une précision du premier ordre, possède des qualités qui en font l'une des plus adaptées à l'étude des écoulements turbulents.

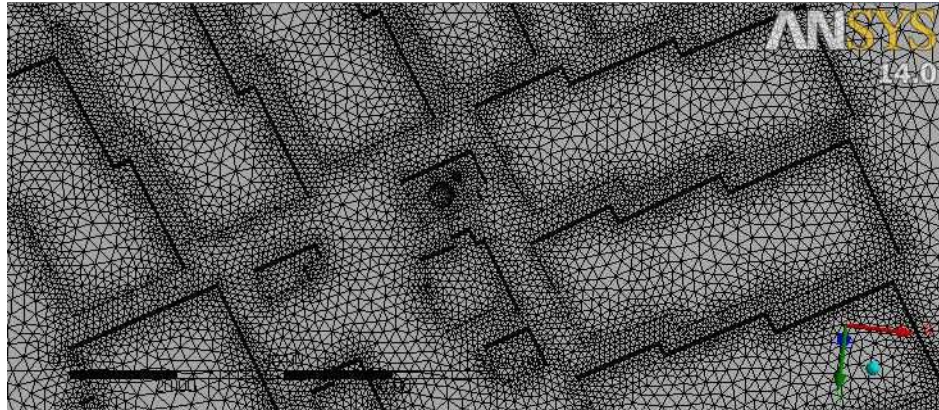


Figure 150: maillage en tétraèdres de la volumétrie du village de M'guiden. Source : Auteur

d. Conditions aux limites

Pour résoudre les équations aux dérivées partielles, il faut indiquer les conditions aux limites à l'instant initial. Il s'agit en général de définir :

1. sur les parois (le vecteur de vitesse est nécessairement parallèle à la paroi) :
 - s'il s'agit d'une paroi parfaitement glissante où s'il faut prendre en compte la viscosité,
 - la température de paroi et éventuellement le coefficient d'échange thermique si l'on résout l'équation de la chaleur ;

2. sur les surfaces ouvertes :
 - s'il s'agit d'une entrée ou d'une sortie (le flux est à sens unique), ou éventuellement s'il s'agit d'une ouverture dans laquelle le flux peut être dans les deux sens (introduit des instabilités numériques),
 - imposer un champ de vitesse ou un débit, ou bien imposer une pression statique moyenne,
 - imposer une température uniforme ou un flux d'enthalpie⁹² si l'on résout l'équation de la chaleur.

Lors de la définition des conditions aux limites, il faut prendre en compte la stabilité du calcul : la résolution des équations se fait de manière approchée, en plusieurs étapes, et il importe que l'on se rapproche à chaque étape de la solution (convergence, calcul stable).

⁹² L'enthalpie est couramment utilisée lors de l'étude des changements mettant en jeu l'énergie d'un système dans de nombreux processus chimiques, biologiques et physiques. Pour les processus effectués à pression constante, la variation d'enthalpie correspond à la chaleur absorbée (ou dégagée). Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Enthalpie>

Les conditions aux limites donnant le calcul le plus stable sont :

- une entrée sur laquelle on impose une vitesse ou un débit ;
- une sortie sur laquelle on impose une pression.

En revanche, si on définit une pression en entrée et en sortie, ou bien un flux (vitesse ou débit) en entrée et en sortie, cela débouche en général sur un calcul instable ; le logiciel peine à s'approcher de la solution.

Les conditions aux limites pour un calcul stable ont été déterminées par :

- une entrée du flux d'air avec une vitesse de 6 m/s ;
- une sortie sur laquelle on impose une pression.

- **Vitesse d'entrée**

Il s'agit de la vitesse et la direction du vent incident. Dans notre cas, la région d'étude est caractérisée par un vent dominant de direction ENE et de vitesse moyenne de 6 m/s (fig.151).

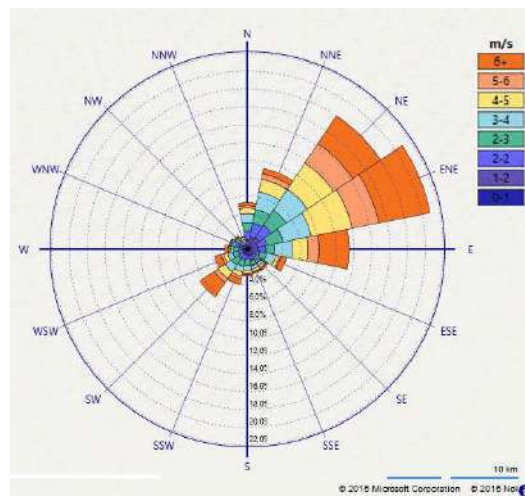


Figure 151: rose des vents à Timimoun. Source : Vasari-Autodesk. <http://autodeskvasari.com>

Plutôt que de donner une vitesse d'air constante, nous avons implémenté dans Fluent la formule logarithmique⁹³ (Eq.6) ci-dessous de Davenport (1960), qui permet de reprendre fidèlement le changement de la vitesse de l'air en fonction de la hauteur de la couche de rugosité :

⁹³ Les modèles «logarithmique» prédisent une vitesse de vent nul à la hauteur de la rugosité dans n'importe quelle condition de vent, alors que dans la réalité différentes vitesses de vent, parfois très fortes, qui peut être expérimenté à ce niveau. Le modèle de puissance de Davenport (1960) n'a pas cette limitation théorique, car il prévoit une certaine vitesse de vent même très près du niveau du sol. (Givoni, 1998, pp. 265-266)

$$\frac{U_z}{U_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha$$

Avec ;

$U_0 = 6$ m/s ; vitesse moyenne du vent à la hauteur $Z_0 \sim 10$ m

$Z \leq 1$; la hauteur pour laquelle la vitesse du vent V_z sera calculée (couche de saltation)

$\alpha = 0,28$; étant donné que la zone sur laquelle est situé le village de M'guiden est marquée par des constructions basses⁹⁴.

e. Lancement du calcul et nombre d'itérations

Une fois le paramétrage mis en place, le calcul peut être lancé suivant un nombre d'itération à définir qui de préférence doit être grand (> 500 itération). Nous signalons qu'à mesure que le nombre d'itérations augmente le calcul sera plus long mais plus précis.

La méthode pour définir le nombre d'itération consiste en une résolution approchée, on définit le Résidus $[R]$ comme étant :

$$[R] = [A][\varphi] \quad \text{Eq. (24)}$$

Tel que ;

$[A]$ est une matrice de coefficients ;

$[\Phi]$ est le vecteur contenant les variables des équations ;

Dans une résolution itérative, le but à chaque itération étant de diminuer les valeurs de $[R]$. On s'intéresse en général à une valeur particulière, soit la valeur maximale des coefficients de $[R]$, soit la moyenne quadratique. On arrête le processus itératif lorsque l'estimateur du Résidus $[R]$ atteint une valeur « admissible », ou bien après un nombre donné d'itérations, lorsque le calcul a du mal à converger. Cela ne garantit toutefois pas que la solution trouvée corresponde à la réalité. On s'attache en général à suivre une ou plusieurs grandeurs, par exemple un débit ou une pression moyenne sur une surface, et l'on vérifie que la valeur des grandeurs est stable d'une itération à l'autre.

⁹⁴ Réf. voir Tab.4, Beranek, 1984 pour les valeurs de α .

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente. Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans Fluent (residual) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voire 10^{-6} . Dans le cas des écoulements diphasiques⁹⁵, il faut impérativement pousser la convergence à 10^{-4} . (Fedala, 2007)

La convergence de la résolution itérative est contrôlée par l'évolution des Résidus [R] au cours des itérations ainsi que par l'évolution des valeurs individuelles de chaque variable. Dans notre cas et bien après un nombre d'itérations d'environ 500, nous avons constaté que le calcul avait du mal à converger pour chaque variable ce qui signifie que la réduction du Résidus [R] a atteint son maximum et cela est suffisant pour espérer des résultats précis en termes de calcul. En outre, les Résidus ont été pris à cinq décimales (10^{-5}) après la virgule tout en précisant les coefficients de relaxation adaptée au type de problème pour accélérer la convergence de la solution (fig.152).

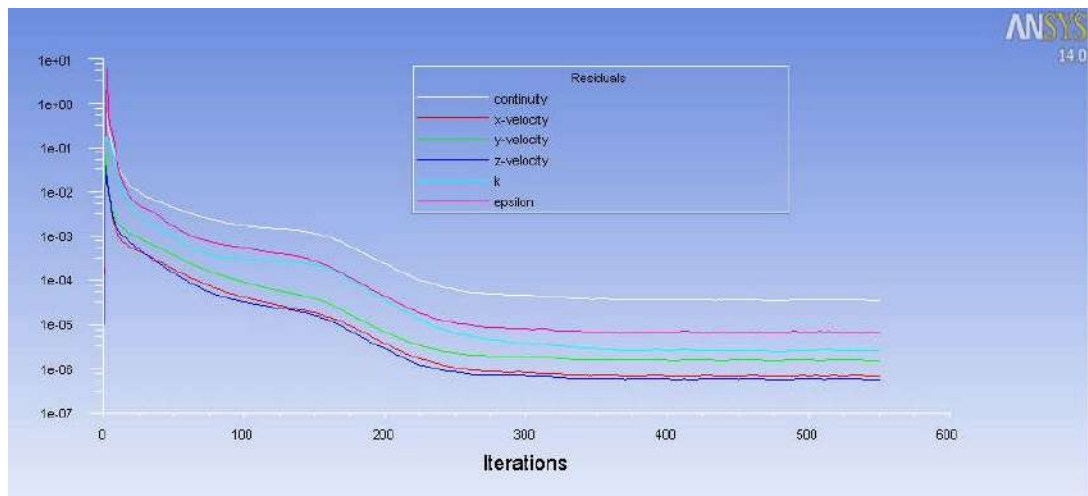


Figure 152: évolution du calcul en fonction du nombre d'itérations. Source : Auteur

⁹⁵ A la différence des écoulements monophasiques, constitués, comme leur nom l'indique d'une seule phase (gaz, liquide ou vapeur), les écoulements diphasiques combinent deux phases, qu'elles soient ou non relatives à la même matière. Exemple : écoulement liquides à bulles, écoulement gaz-particules...etc. l'un des problèmes rencontrés lors des écoulements diphasiques c'est diversité des configurations possibles d'écoulement liée à la présence de deux phases à la fois ; écoulements très dilués versus écoulement très denses. (Chabard, (s.d.))

8.1.5. Résultats de la simulation

Les résultats qui vont suivre concernent la pression statique (Pa) et la vitesse d'air (m/s) obtenus dans la couche de saltation, c'est-à-dire à une hauteur du sol ($Z < 2\text{m}$). Ceci dans un objectif nous le rappelons d'étudier le comportement du vent dans cette couche appelée « couche de saltation » afin d'appréhender le mécanisme responsable du déplacement/stagnation des grains de sable.

a. Vitesse du vent

De faibles vitesses ont été enregistrées aussi bien sur le contour extérieur qui ceinture le plan masse du village de M'guiden qu'au niveau des ruelles intérieures dotées de décrochements. Certains autres bâtiments faisant obstacles perpendiculaires au vent incident génèrent un effet de masque et créant ainsi des zones d'abri où on enregistre une vitesse d'air nulle ou presque (0 à 0.3m/s). Fig.153

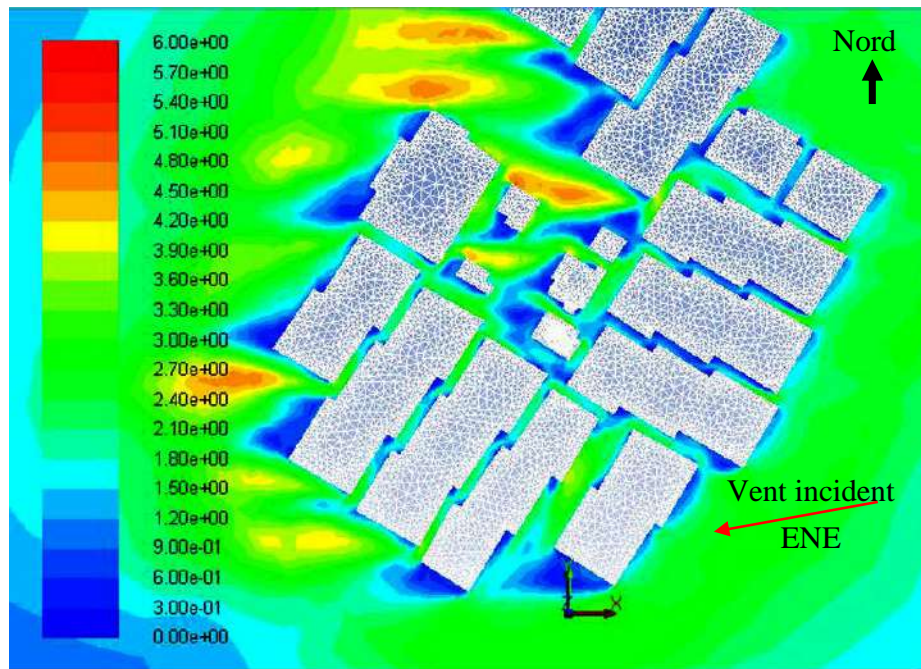


Figure 153: Gradient de vitesse à <2m du sol au niveau du village de M'guiden. Source : Auteur

Cependant, dans certains autres endroits du plan masse nous avons enregistré une vitesse d'air de l'ordre de 3m/s qui a été localisée au niveau des angles vifs des bâtiments exposés au vent. Ceci est dû à un effet de décollement qui produit une accélération du flux d'air à l'endroit des angles vifs, tandis qu'une partie du flux d'air se comprime derrière l'angle sous un effet d'enroulement créant ainsi une zone de vitesse nulle. Fig.154

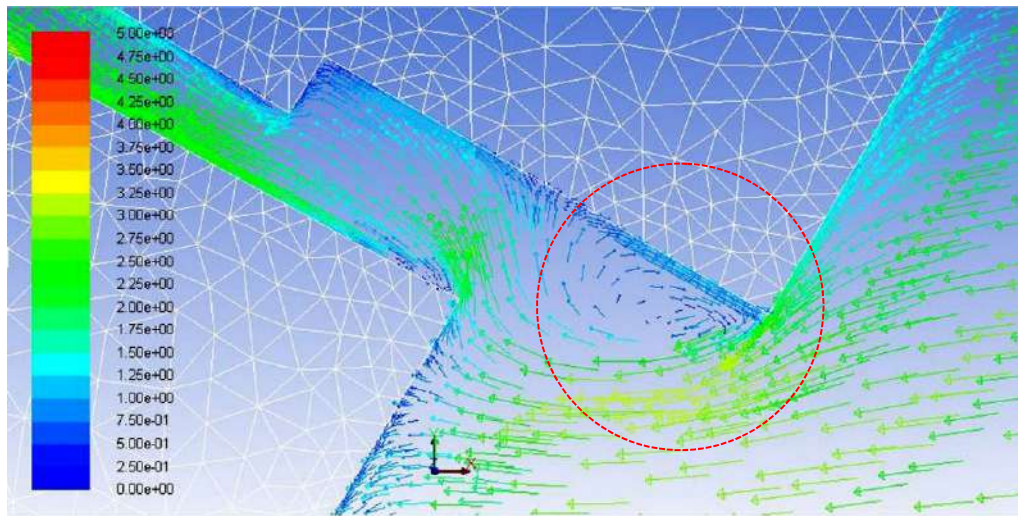


Figure 154: effet de décollement (enrôlement) produit au niveau des angles vifs des bâtiments. Source : Auteur

b. Pression statique

La pression statique, dans un fluide (eau, air...) en mouvement, est la pression que mesure un capteur qui se déplace à la même vitesse que le fluide. Elle s'oppose à la pression dynamique exercée par un fluide sur un objet et qui est due au déplacement de ce fluide autour de cet objet. (Villeneuve, 1980, p.355)

Le résultat de la pression statique enregistrée semble constituer un indice pertinent pour comprendre et expliquer les mouvements aérodynamiques manifestés au sein du plan masse. La pression la plus élevée a été enregistrée sur les façades au vent avec une valeur de 10 Pa, tandis qu'une pression nulle ou « neutre »⁹⁶ a été constatée autour du village et au niveau de certains endroits à l'abri du vent grâce à l'effet de masque. Cependant nous avons enregistré des zones de pression négative et cela au niveau des angles qui jouxtent les façades au vent, le long des ruelles intérieures, ainsi qu'au niveau des parois et zones sous le vent. Fig.155

⁹⁶ Ce terme est utilisé ici pour indiquer qu'il peut exister une pression positive liée à l'énergie du fluide se localisant sur les surfaces au vent, et autre négative liée à l'effet de surfaces est généralement localisée sur les parois latérales ou sous le vent.

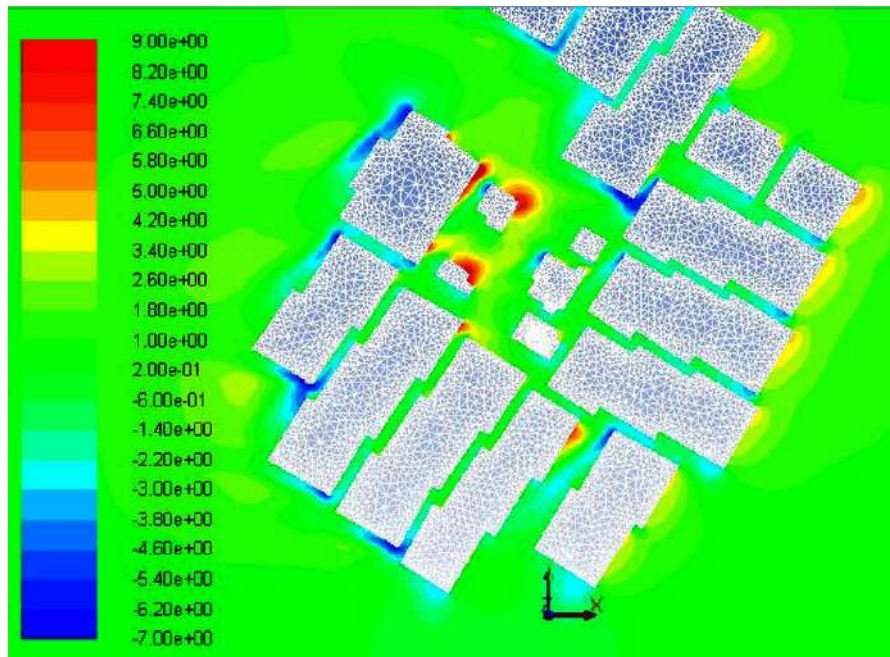


Figure 155: pression statique (Pa) enregistrée au sein du village de M'guiden. Source : Auteur

c. Comparaison entre observation *in situ* et résultats de simulation CFD

Notre travail d'observation *in situ* consistait à repérer sur plan masse les zones de dépôts (fig.156), puis de les répertorier en tableau 12 afin de les caractériser en fonction des résultats de simulation (présentée plus haut) en termes de vitesse et de pression statique. Les principaux résultats de cette comparaison sont résumés en quelques points ci-dessous. Nous avons pu établir une relation entre les zones de dépôt relevées sur site et les zones de pression enregistrées en simulation CFD.





- Une première forme de dépôt a été constatée sur la façade au vent au point 1 (zone à forte pression $>10\text{Pa}$), et ce, suite à la collision des grains de sable contre cette façade qui forme un écran imperméable contre l'avancé du sable.
- Une deuxième zone de dépôt a été localisée au point 2 du plan masse et a été identifiée suite aux résultats CFD comme zone de sillage de par la pression négative enregistrée (-7 Pa). En effet, la vitesse d'air est faible dans cette zone après avoir subi un décollement au niveau des angles vifs des bâtiments et oblige le vent à lâcher les grains de sable emportés par effet de gravité.




- Une troisième partie des grains de sable transitent via les ruelles qui morcellent le plan de masse. Ces grains ayant perdu de leur vitesse initiale dans le sillage se percutent contre les murs intérieurs et donnent suite à des dépôts en cet endroit précis du plan masse (points 3, 4 et 5).
- Certains endroits du plan masse se trouvent complètement à l'abri, en l'occurrence le point 6 et 7. Seulement, une partie du flux d'air supérieur (up flow) arrive à passer au-dessus des masses bâties avant de rejoindre ces zones. Ce flux d'air est chargé généralement de poussière mais jamais de grains de sable qui eux, se déplacent en saltation à une hauteur ne dépassant pas 2m du sol.



Figure 156: identification des zones de dépôt sur le plan masse du village de M'guiden. Source : Auteur

Tableau 12: photos relatives aux zones de dépôt relevées sur le plan masse de M'guiden

Point	Position	photos
1	façades au vent	
2	façade (+/-) à l'abri	
3	rue intérieure	
4	rue intérieure	

5	rue intérieure	
6	espace dégagé	
7	espace dégagé	

Pour récapituler, le vent chargé de grains de sable se met en contact avec les façades au vent qui constituent un obstacle imperméable excepté les rues et ruelles qui puissent exister. Du fait de cette imperméabilité, une forte pression se concentre en amont des bâtiments obligeant le vent à se décharger d'une partie du sable transporté suite à la collision des grains de sable le front de la façade. C'est là où se produit le premier dépôt, ensuite, à travers les rues et ruelles, une partie du flux d'air se canalise à l'intérieur de la forme urbaine ayant un comportement

plus au moins erratiques suite aux champs de sillage. Les zones de sillage se prolongent jusqu'en aval des bâtiments au vent et obligent ce dernier à suivre une trajectoire très agitée résultant de l'effet de décollement des arêtes vives. Les grains de sable toujours en mouvement rentrent en collision contre elles et contre les murs et décrochements rencontrés et finissent par tomber au sol.

A la suite des résultats obtenus nous avons pu identifier quelques paramètres physiques -liés à la morphologie du cas d'étude- que l'on juge susceptibles d'enclencher un « processus d'ensablement ». Un schéma sous forme d'organigramme a été dressé ci-dessous (fig.157) afin de mettre en exergue les différentes étapes qui puissent constituer un processus d'ensablement dans notre cas d'étude (village de M'guiden).

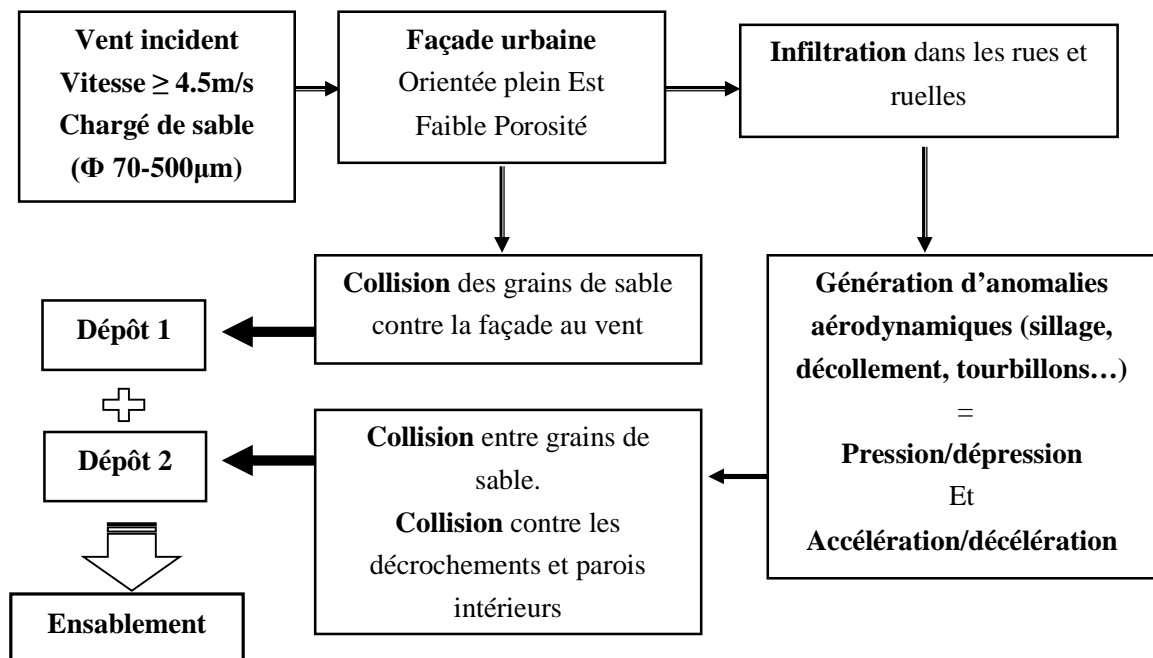


Figure 157: Schématisation du processus d'ensablement dans le village de M'guiden. Illustration de l'auteur.

8.1.6. Synthèse

Contrairement à ce qu'il a été supposé dans certains écrits (Marouf, 2010)⁹⁷, la forme en spirale est loin de pouvoir épargner le village de M'guiden du phénomène d'ensablement. De

⁹⁷ « Ce village, conçu pour 150 logements environ, ressemble à tous ceux des plaines du Nord. Son originalité, cependant, tient à sa configuration spirale, afin de juguler les vents de sable, qui au lieu de former les dunes contre ses enceintes, évolueraient de façon circulaire autour du village sans l'atteindre ». (Marouf, 2010, p.238)

par les effets de turbulence que sa forme génère au niveau des décrochements de son plan masse, et qui deviennent systématiquement de vrais pièges à sable, ce village est loin d'être épargnée du risque d'ensablement.

L'ampleur du phénomène d'ensablement se fait sentir à une échelle globale certes (région, agglomération, ville...etc.) mais sa production se manifeste à des échelles plus réduites à savoir *micro* (bâtiment) et *méso* (ilots, rue, fragment de ville...etc.). De là, on retient que toute modélisation de la forme urbaine en vue de la lutte contre l'ensablement devra passer impérativement par l'échelle ces deux échelles.

Enfin, dans une forme urbaine, la réduction des zones de pression, de sillage et de masque pourra forcément réduire les zones de turbulence et ce qui en suit comme collision entre grains de sable provoquant leur dépôt. La maîtrise du comportement de vent au sein d'un espace urbain requiert la maîtrise de certains rapports dimensionnels relatifs à la forme du bâtiment et la disposition des masses bâties dans un plan masse, autrement sa géométrie. « *Compte tenu de la nature fluide et dynamique du vent, le facteur le plus crucial dans le contrôle du flux d'air à l'échelle urbaine est la géométrie de l'espace bâti. Les espacements entre les bâtiments, modulent grandement le comportement du vent au sein de ces derniers.* » (Escourrou, 1991)

Dans la prochaine étape, et dans l'objectif de modéliser une forme bâtie capable de lutter contre le dépôt de sable, certains paramètres essentiels doivent être pris en considération liés à la fois à la géométrie du bâtiment, la perméabilité au niveau de la façade au vent et la géométrie du plan masse :

- Un bâtiment dépourvu de décrochements facilitera davantage le transit éolien, ainsi certaines formes de bâtiment imaginées par Duchemin (1958) ont éprouvé lors des simulations en soufflerie un comportement favorable au transit des grains de sable.
- Une perméabilité adéquate au niveau de la façade au vent pourra assurer un bon acheminement du vent incident à travers une largeur suffisante et appropriée des rues. Ainsi, une telle perméabilité permettra de dissiper la pression en amont et fera éviter la production de l'effet de sillage et ce qui en résulte en termes de stagnation de sable.
- La géométrie de la forme urbaine : un bon acheminement du flux d'air au sein d'un plan masse suppose la suppression des changements brusques de direction qui peuvent s'opposer à la direction du vent et perturber sa trajectoire. Ainsi, certaines dispositions de bâtiments sont connues pour être très favorables au transit éolien sous l'effet aérodynamique généré à l'image de l'effet « canalisation » et « Venturi ».

8.2. Modélisation de l'effet « Venturi » et « canalisation » dans un groupement de bâtiments.

8.2.1. Introduction

L'ensablement est un phénomène qui caractérise un ensemble de territoire et qui touche à la forme urbaine dans toutes ses composantes (rues, bâtiments, espaces extérieurs...etc.). La production d'un ensablement est tributaire de la présence du sable, mais surtout de la vitesse du vent qui joue le rôle d'une force locomotrice de déplacement des grains de sable. A son tour, la vitesse du vent est souvent beaucoup plus faible dans un tissu urbain que dans un espace rural notamment littoral : souvent plus un espace est fermé et plus les bâtiments l'entourant sont hauts, plus la vitesse du vent au sol est faible comparée à la vitesse au-dessus des structures bâties, ou dans un site moins perturbé (rase campagne) tel que les pistes d'atterrissage des aéroports. Les relations entre flux d'air en espace libre et espace construit dépendent de la taille, de la hauteur et de l'espacement entre obstacles.

Les rues et les espaces ouverts facilitent la canalisation de l'air à l'intérieur du tissu urbain, ce qui va de même théoriquement pour le déplacement des grains de sable emportés par le vent. Ainsi, certaines géométries de l'espace urbain sont connues pour être favorables à au développement d'effets aérodynamiques à l'image de celui de canalisation et de Venturi, laissant ainsi apparaître des accélérations du flux d'air incident au niveau des zones de convergence...etc., (Mestoul, 2010). Ces effets sont supposés être très favorables au déplacement des grains de sable au sein de l'entité urbaine. En effet, le rôle d'un effet Venturi intégré au sein d'une entité urbaine pourrait être comparable à celui d'une « chasse sable », à travers l'arrachement et la remise en mouvement des grains de sable déposés au sol. Quant à l'effet canalisation, il maintiendra le régime de vitesse généré par le Venturi afin de propulser les grains de sable en dehors du périmètre bâti.

Le vent et ses variations locales au sein d'un tissu urbain soumis à l'ensablement vont donc avoir une influence directe à la fois ; sur le régime éolien (sillage, fluctuation, turbulence...etc.) et sur le déplacement et la stagnation des grains de sable. En perturbant ou en favorisant l'écoulement du vent, cela influe d'une manière directe et significative le bilan sédimentaire au sein des masses bâties.

« L'ensablement ne signifie pas une augmentation du volume de sable mais sa redistribution et son accumulation contre toutes les infrastructures urbaines » (Mainguet 2008).

Lors de nos visites récurrentes sur le site d'étude, il nous a été donné de constater que dans les zones situées sur la *hamada* - plus exactement celles qui se trouvent dans le couloir éolien nord-est- le risque d'ensablement est d'autant plus accru qu'il y a une présence humaine. Car en mettant en places des installations, cela modifie fortement la rugosité du sol qui par la suite tend à piéger les grains de sable en mouvement de saltation et contribue donc d'une manière significative dans le déclenchement du processus d'ensablement. C'est dans ce sens que nous avons eu l'idée de concevoir un modèle de forme urbaine adaptée à la dynamique éolienne d'ensablement dans la région. Cette forme urbaine suppose la prise en compte du régime éolien afin de laisser libre le déplacement des masses de sable en toute fluidité afin d'éviter autant que possible de provoquer leur dépôt.

Conscients du contexte spécifique de la région d'étude (paramètres météorologiques, relief, architecture...), nous avons cherché à définir des rapports dimensionnels de forme urbaine intégrant un comportement aérodynamique capable d'assurer un écoulement « laminaire » et un bilan sédimentaire qui soit le moins important.

Le mécanisme aérodynamique (Venturi et/ou canalisation) que l'on veut concevoir sera modélisé sous Fluent à partir de certaines règles de dimensionnement de formes bâties tirées de la littérature, notamment les expériences de Bagnold (1941), Duchemin (1958), Gandemer (1976, 1979 et 1981), Lawson (1980), Naaim-Bouvet (2003), Oke (1988) et Koenigsberger et al (1973).

8.2.2. Modélisation de l'effet « canalisation »

L'effet de canalisation se rapporte à la circulation d'air au sein d'un ensemble construit formant un couloir à ciel ouvert. D'après nos références théoriques (Gandemer, 1976 et Naaim-Bouvet, 2003) certaines conditions sont requises pour qu'un effet canalisation puisse se produire :

- Le couloir doit être constitué de parois (bâtiments) peu poreuses pour éviter les filtrages d'écoulement. En effet, avec une porosité supérieure à 5%, la canalisation ne fonctionne pas.
- La largeur du couloir canalisant doit être inférieure ou égale à l'épaisseur des bâtiments.
- La hauteur minimale des bâtiments doit être supérieure ou égale à 6m.

Dans ce premier cas de figure, nous sommes partis d'un cas d'étude tiré de l'expérience de Naaim-Bouvet (2003). Compte tenu des différents modèles testés, Naaim-Bouvet conclut que pour le modèle présentant un rapport $L/\Delta = 0.66$, la quantité de sable accumulée au vent est la plus faible. En effet, l'accumulation ou non du sable en amont d'une série d'obstacles est en rapport avec la largeur qui sépare les obstacles (Δ). Le rapport L/Δ , avec (L), largeur d'un volume, exprime donc la porosité (ou perméabilité) de la barrière constituée de volumes et rythmée par des largeurs séparatives fixe (Δ). Fig.158

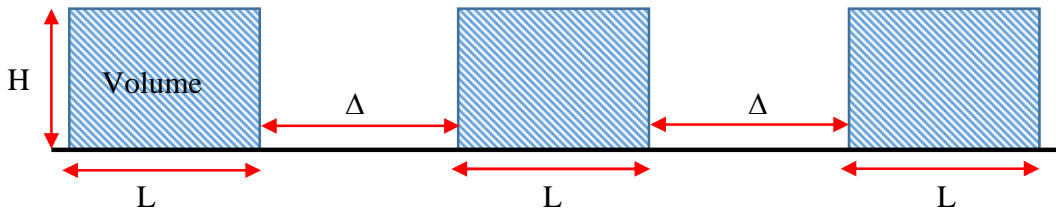


Figure 158 : schéma illustrant le rapport L/Δ utilisé dans l'expérience de Naaim-Bouvet (2003).

a. Cas d'une rangée de volumes isolés

Partant du rapport ($L/\Delta=0.66$), soit un volume (A) qui dispose d'une largeur $L=12m^{98}$. La distance (Δ) sera donc de l'ordre de 18m. Une rangée composée de volumes de type (A) dont les caractéristiques dimensionnelles sont présentées en tableau 13 a fait l'objet d'une première simulation.

Tableau 13: caractéristiques dimensionnelles d'un modèle composé de volumes (type A) intégrant le rapport $L/\Delta=0.66$ tiré de l'expérience de Naaim-Bouvet (2003).

Type de modèle	Hauteur (H) [m]	Largeur (L) [m]	Longueur (l) [m]	Distance entre volumes Δ [m]	Ratio H/L	Ratio L/Δ
(A)	6	12	24	18	0,5	0,66

Les résultats obtenus représentent le comportement d'un vent incident de 6m/s au sein des volumes en question à une hauteur $Z < 2m$ (couche de saltation). En amont des volumes, l'air compressé tend de les contourner et crée ainsi trois régions distinctes : zone d'écoulement libre (couleur orange), zone de séparation (couleur verte) et zone de sillage (couleur bleue). Fig.159

⁹⁸ À titre indicatif, cette valeur a été choisie en rapport avec la largeur conventionnel d'un habitat collectif.

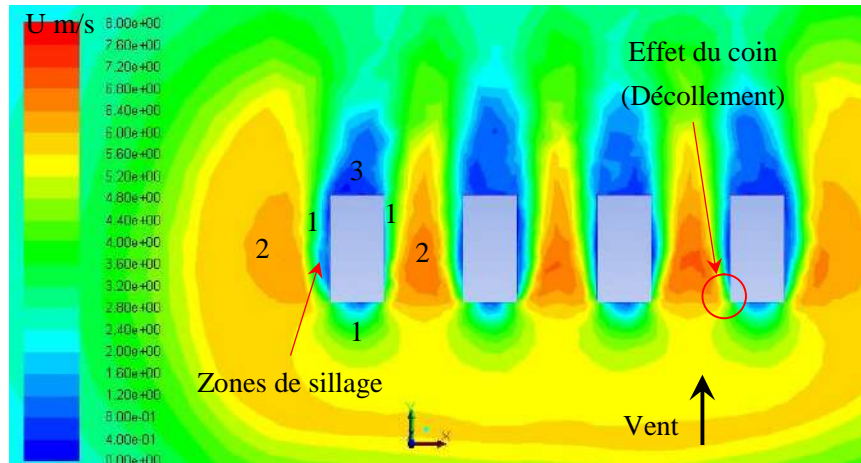


Figure 159: simulation de la vitesse d'air autour des volumes type (A), $Z < 2m$. Source : Auteur

1. Zone d'écoulement libre
2. Zone de séparation (cisaillement)
3. Zone de sillage

L'écoulement libre se situe à l'extérieur de la zone d'influence de l'obstacle contrairement à la zone de sillage qui se situe tout près de l'obstacle et elle est caractérisée par un écoulement tourbillonnaire à basse vitesse ($< 2m/s$). La zone de séparation (ou de cisaillement) quant à elle, correspond, à la couche limite qui se forme au contact de tout corps et elle marque la transition entre l'écoulement libre et la zone de sillage. Selon Aynsley et al. (1977), dans la zone de séparation, le taux de cisaillement est relativement élevé et le gradient de vitesse est important. Autre phénomène constaté, une petite accélération de l'air due à un « effet de coin » généré par les angles vifs des volumes qui provoquent le décollement des flux d'air et permet à ceux-ci de gagner en vitesse en zone libre (orange). En profil, le comportement de l'air est illustré en fig.160 à l'aide des flèches afin de saisir la trajectoire des champs aérauliques.

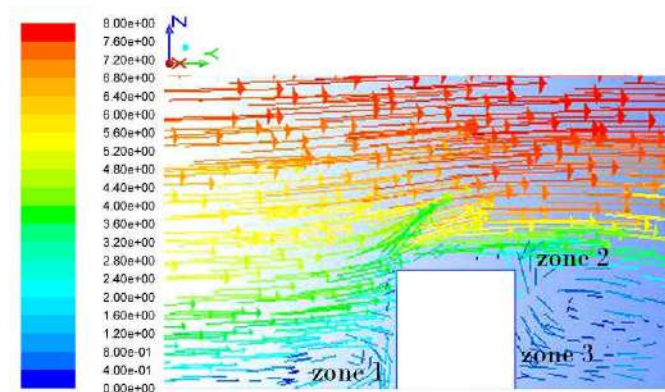


Figure 160: illustration en flèche du comportement du flux d'air autour d'un volume. Source : Auteur

Au départ, une partie des champs aérauliques se heurtant contre la face de l'obstacle (volume A) se trouve piégée en zone (1). Une autre partie, décolle suite à un effet d'angle pour rejoindre la zone d'écoulement libre zone (2), tandis qu'une partie du flux d'air pris dans la zone de sillage génèrent des tourbillons à faibles vitesses qui finissent par perdre leur vitesse en rebroussant leur chemin avant de se heurter contre la face avale de l'obstacle en zone (3). Par conséquent, dans le cas d'un flux d'air chargé de particules de sable, nous pouvons considérer que les deux zones (1) et (3) sont des zones de dépôt potentiel du sable.

Notre avons tenté d'apporter une modification à la trajectoire du flux d'air autour des obstacles afin de faire disparaître les zones de pression et de sillage et lutter donc contre des éventuelles zones de dépôt. Ceci correspond à intervenir sur la forme de l'obstacle afin de modifier son comportement aérodynamique. S'inspirant de l'expérience de Duchemin (1958) nous avons profilé la forme de l'obstacle en V. Les résultats obtenus sont concluants (fig.161).

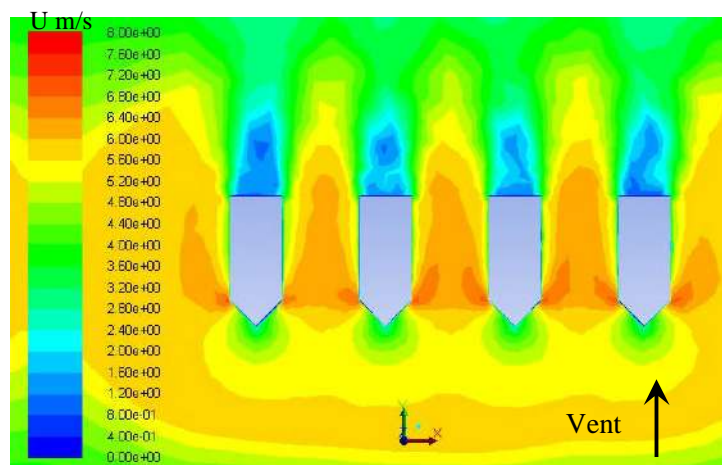


Figure 161: résultat du nouveau comportement du flux d'air incident après profilage des volumes. Source : Auteur

La nouvelle forme angulaire arrive à mieux évacuer les champs aérauliques en amont et participe de ce fait à la disparition des zones de sillage en amont et sur les bords latéraux de l'obstacle (disparition de la zone bleue et verte).

Ainsi, la forte pression enregistrée auparavant en amont des volumes diminue considérablement après profilage (fig.162). En effet, La forme profilée éprouve moins de résistance contre le vent incident et permet de ce fait, l'atténuation de l'effet de masque ; le vent arrive à traverser et accéder à l'aval des obstacles sans être exagérément détourné suivant un régime complètement laminaire (fig.163).

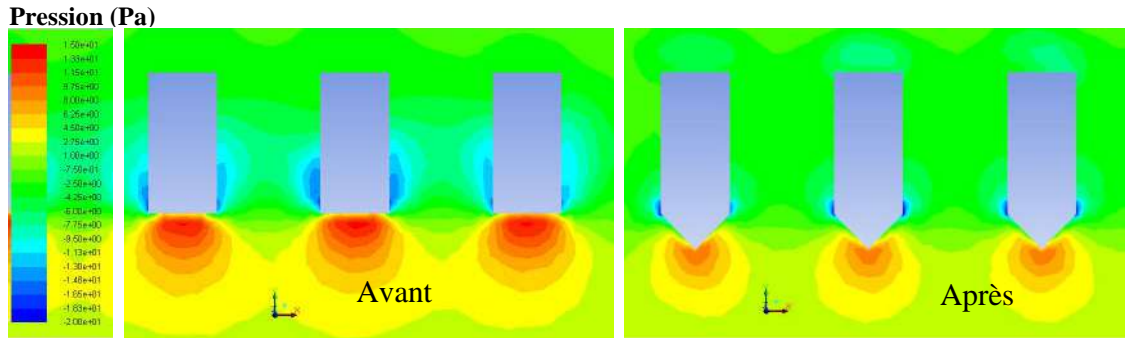


Figure 162: Niveau de pression statique enregistrée en amont des volumes avant et après profilage. $Z < 2m$

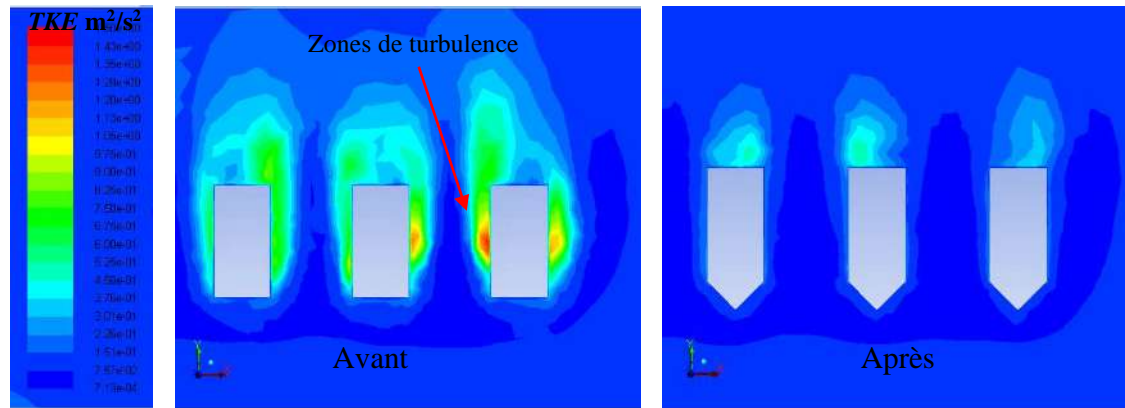


Figure 163: visualisation du niveau de turbulence (TKE) enregistrée avant et après profilage des volumes. $Z < 2m$

b. Cas de plusieurs rangées de volumes

Partant des expériences d'Oke (1988) et Koenigsberger et al (1973) (voir section 4.4.3) sur l'effet de la disposition des bâtiments et de la densité du plan masse, plusieurs types de combinaisons ont été testés afin de qualifier à chaque fois l'influence de chaque type sur le comportement de l'air notamment en termes de création ou disparition de zones de sillage et de turbulence.

1^{er} cas : organisation en plan régulier

Plusieurs modèles ont été conçus, composés de volumes de type (A) intégrant différents valeurs géométrique du prospect H/D , tel que H , est la hauteur des volumes et D , la distance entre les rangés (dans le sens parallèle au vent incident). L'objectif étant de déterminer un prospect H/D qui présente des meilleurs résultats en termes de lutte contre les zones de

turbulence et qui puisse assurer donc un écoulement du fluide dit « laminaire » au sein du modèle. Les caractéristiques dimensionnelles des modèles testés sont synthétisées en tableau 14 ci-dessous ; H, L et l étant de valeurs stables, tandis que D est variable et prend des valeurs entre 2 et 24 m.

Tableau 14: caractéristiques dimensionnelles des modèles testés en vue de la définition d'un rapport H/D adéquat.

modèle				
Stables			variables	
Hauteur (H) [m]	Largeur (L) [m]	Longueur (l) [m]	Distance entre rangés D [m]	Prospect H/D
6	12	24	2-24	3-0.25

Les résultats obtenus nous ont permis de constater que le modèle présentant un prospect H/D=3 (avec D=2m et H=6m) est celui qui présente les meilleurs performances en termes d'écoulement laminaire. Pour une meilleure illustration de ce résultat, une comparaison a été faite entre un modèle avec H/D=3 et un autre présentant un prospect H/D=0,25. Les résultats présentés ci-dessous concernent la vitesse d'air (en plan et en profil) ainsi que le niveau de turbulence TKE (*Turbulence Kinetic Energy*) générée par chaque modèle (fig.164, 165 et 166).

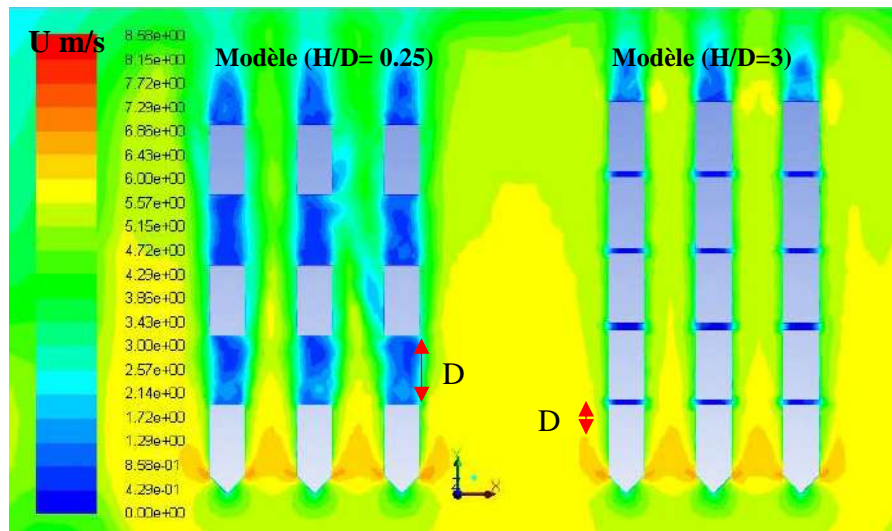


Figure 164: vitesse d'air dans les deux modèles à Z<2m. Source : Auteur

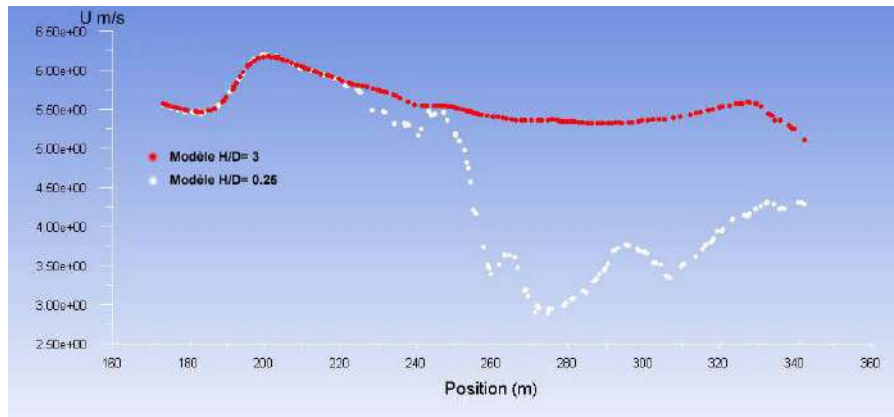


Figure 165: profile de la vitesse de l'air en fonction de $x(m)$ dans les deux modèles à $Z < 2m$.

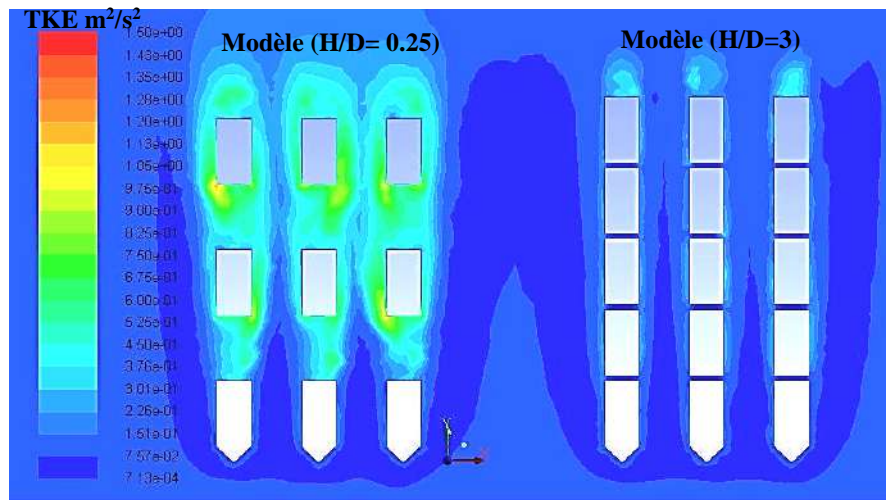


Figure 166: Niveau de turbulence dans les deux modèles à $Z < 2m$. Source : Auteur

En effet, dans le modèle ($H/D=0,25$) les volumes sont distanciés, la vitesse d'air est moins importante que celle du modèle ($H/D=3$), et ce, à cause des interférences générées par les distances entre volumes et qui ont une incidence directe sur le comportement global de vent, qui devient très proche du comportement d'un flux isolé. Dans le modèle ($H/D=3$), bien au contraire, les zones de sillage et d'interférence sont réduites au maximum ou presque inexistantes (flux rasant), le vent aura tendance à circuler librement d'une manière laminaire entre les rangées de volumes sans pour autant perdre trop de sa vitesse initiale.

2^{ème} cas : organisation en quinconce

Selon Koenigsberger et al (1973) la disposition en quinconce favorise un écoulement uniforme de flux d'air et diminue de ce fait les zones de stagnation en plongeant l'ensemble du plan masse dans un champ aérodynamique. Faute de rapports dimensionnels pour ce cas de figure

de la part de Koenigsberger et al, notre objectif dans cette partie sera de définir un rapport H/D pour un modèle de plan organisé en quinconce qui puisse vérifier l'expérience de Koenigsberger et al (1973). A partir des modèles précédents et en faisant varier le rapport H/D nous avons développé d'autres modèles qui s'organisent cette fois-ci en quinconce. Nous parlerons plus de prospect mais de rapport H/D pour ce qui en suit. Ces modèles ont été composés de volumes du même type (A)⁹⁹ utilisé déjà dans les modélisations précédentes.

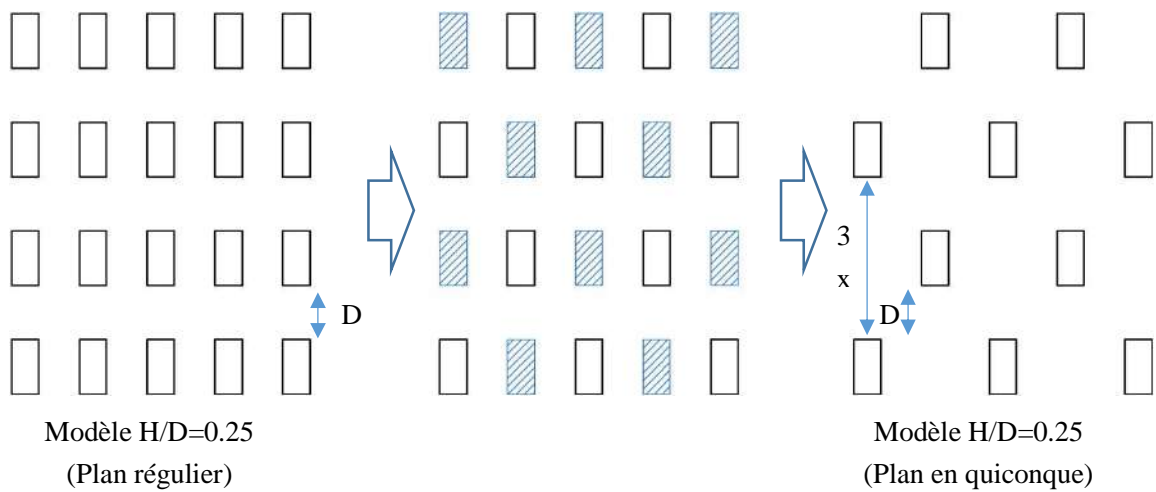


Figure 167 : étapes de développement du modèle H/D=0.25 suivant un plan en quinconce. Illustration : Auteur

Après plusieurs tests, nous avons réussi à définir un rapport H/D=0,25 capable de produire un écoulement laminaire à partir d'un flux d'air entrant. La distance entre les volumes dans ce modèle permet à chaque volume de modifier le flux d'air à son niveau sans qu'il y une interférence avec les autres volumes ce qui confère au flux d'air un comportement plutôt laminaire, d'autant plus que la forme profilée pour chaque volume réduit visiblement les zones de sillage autour des volumes. Résultat ; déplacement plus fluide du flux d'air incident et niveau de turbulence remarquablement réduit (fig.168).

Les résultats de la simulation du flux d'air sont exprimés en termes de vitesse d'air et de turbulence générées par chaque modèle (fig. 168,169 et 170).

⁹⁹ Les dimensions d'un volume type (A) sont les suivantes : Hauteur H=6, largeur L=12 et longueur l= 24.

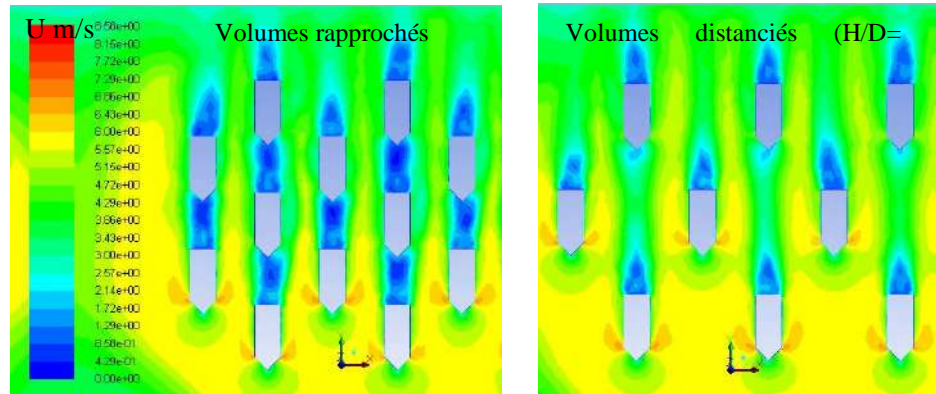


Figure 168: vitesse de l'air à $Z < 2m$. Source : Auteur

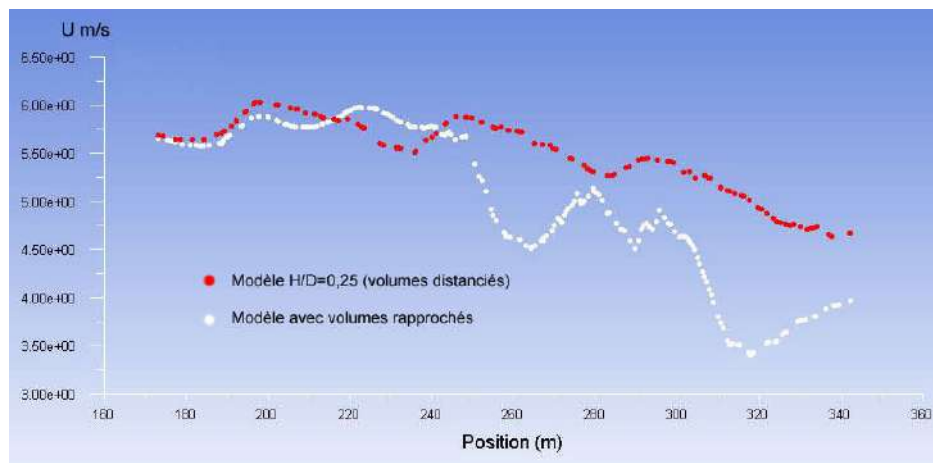


Figure 169: vitesse d'air enregistrée à $Z < 2m$. Le modèle ($H/D=0,25$) affiche une vitesse plus au moins stable comparée à celle enregistrée dans le modèle avec volumes serrés, dans ce dernier la vitesse est d'une allure plus perturbée, ceci s'explique par le degré de turbulence généré qui rend le flux d'air plus agité d'où la vitesse d'air instable (comportement erratique). Source : Auteur

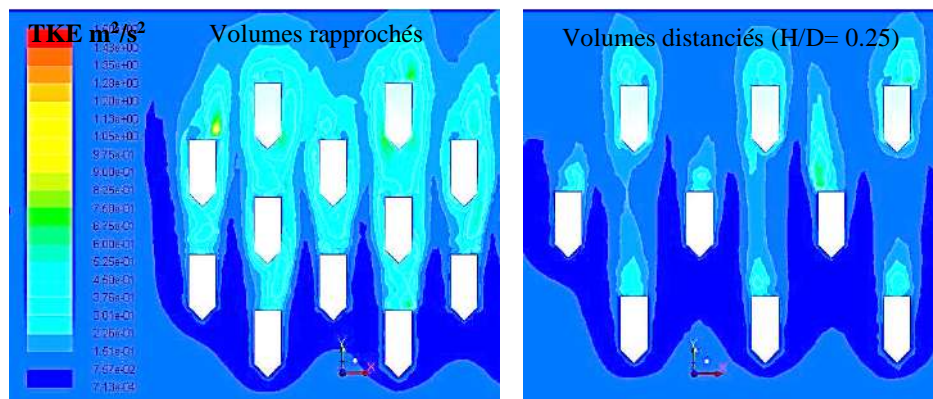


Figure 170: niveau de turbulence (TKE) à $Z < 2m$. Source : auteur

8.2.3. Modélisation de l'effet Venturi

Pour la production de l'effet Venturi en passage convergent Gandemer (1976) préconise les conditions suivantes :

- (1) la taille minimum H des bâtiments ne doit pas être inférieure à 15 m ;
- (2) la longueur des bâtiments « bras de Venturi » ne devrait pas être moins de 100 m ; et
- (3) l'environnement environnant devrait être exempt de tout obstacle pouvant empêcher ou perturber les champs aérauliques.

En termes d'effet Venturi, près des passages convergents souvent est constatée une zone d'augmentation de la vitesse du vent près du niveau du sol (down flow) du fait de la rétrécissement de la section et une zone de diminution de la vitesse du vent horizontale de la partie supérieure des passages convergents (up flow) dû à l'augmentation de la section qui fait perdre aux champs aérauliques déviés au-dessus de l'obstacle de leur vitesse (fig.171).

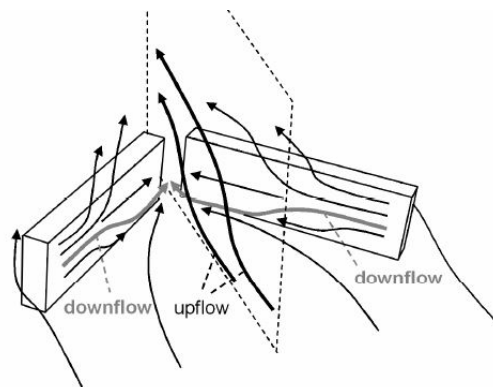


Figure 171: Représentation schématique de l'écoulement dans le passage convergent. Source : Blocken (2004)

Selon, Blocken (2008) le facteur d'amplification K est défini comme étant le rapport U/U_0 , où U est la vitesse du vent local et U_0 la vitesse du vent de référence (au même endroit mais sans bâtiments, c'est-à-dire de libre-champ). L'espacement critique W de 2 à 3 fois la hauteur des constructions formant le Venturi entraîne une valeur de K d'environ 1,6. Quant à Lawson (1980), il déclare que peu d'accélération se produit dans le passage quand la largeur de passage W est en dehors de l'intervalle $[0.5H, 4H]$. Malheureusement, Gandemer (1976) et Lawson (1980) n'ont pas communiqué les conditions d'essai et les détails de dimensionnement, notamment le la largeur du « col convergent »¹⁰⁰ (W) et son rapport à la hauteur des bâtiments

¹⁰⁰ L'effet Venturi est typiquement associé à un passage convergent, également appelé « col-Venturi » ou « col-convergent ». En anglais « Venturi-throat » (Gandemer, 1975).

(H) de leurs résultats d'essai. Nous nous sommes trouvés alors dans l'obligation de les déterminer au travers de la modélisation.

Pour les modèles testés, nous avons repris les quelques recommandations de Gandemer (1976) pour la production de l'effet Venturi notamment en ce qui concerne le bras Venturi ($L_V=100m$) au moins, puis une hauteur (H) qui puisse contenir et dévier les flux d'air se trouvant à plus de 10m du sol (fig.172). L'objectif étant de définir une valeur du col-Venturi (W) appropriée, tel que W doit se situer entre $[0.5H-4H]$, tout en prenant en compte l'impact de l'angle d'incidence du vent sur son comportement.

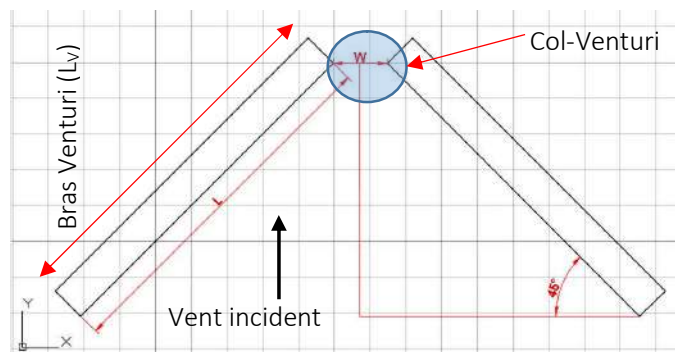


Figure 172: modèle de forme Venturi défini par L, H et W. Auteur

a- Impact de l'angle d'incidence

Dans un premier temps, nous avons étudié l'impact de différents angles d'incidence θ , soient (0° , 30° , 45° et 60°) sur le comportement du vent au sein d'une forme Venturi définie par ($L_V=100$, $H=W=12m$).

Une vitesse d'entrée d'air $U_0=6m/s$ a été adoptée dans les calculs. Cette vitesse est représentative de la vitesse moyenne annuelle des vents dominants (ENE) de la région de Gourara. Elle a été introduite sous Fluent via l'équation (6)¹⁰¹. Cette formule permet de prédire les vitesses d'air (U_z) à différentes hauteurs (Z) mais surtout près du sol dans la couche de saltation ($<2m$) à partir de la vitesse de référence U_0 ($\geq 10m$ du sol) :

$$\frac{U_z}{U_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha$$

¹⁰¹ L'équation (6) a été développée sous forme de fichier Txt puis implémentée dans Fluent via l'onglet « udf.h » (User Defined Function)

Avec ;

$U_o = 6\text{m/s}$ (vitesse d'entrée) ;

$\alpha=0.28$ (rugosité d'une zone de basses constructions) ;

$Z_o=10\text{m}$ (hauteur de référence).

Les résultats obtenus sont illustrés en fig.173 et commentés ci-dessous ;

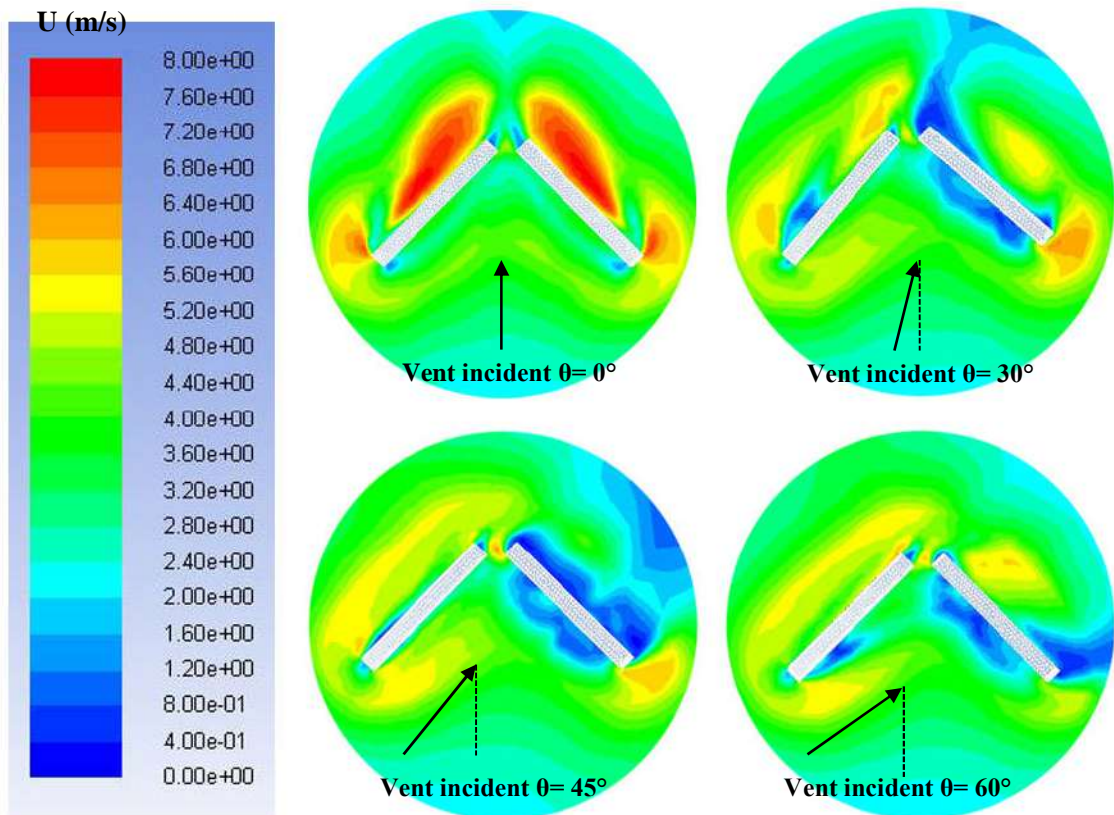


Figure 173: vitesse d'air au sein d'une forme Venturi pour plusieurs angles d'incidence (θ). Source : Auteur

Une coupe passant par la médiatrice de l'angle Venturi a été tracée afin de saisir l'allure de la vitesse depuis son entrée et jusqu'à sa sortie de la forme Venturi (fig.174). Les résultats des minima et maxima sont rapportés en tableau 15 ci-après.

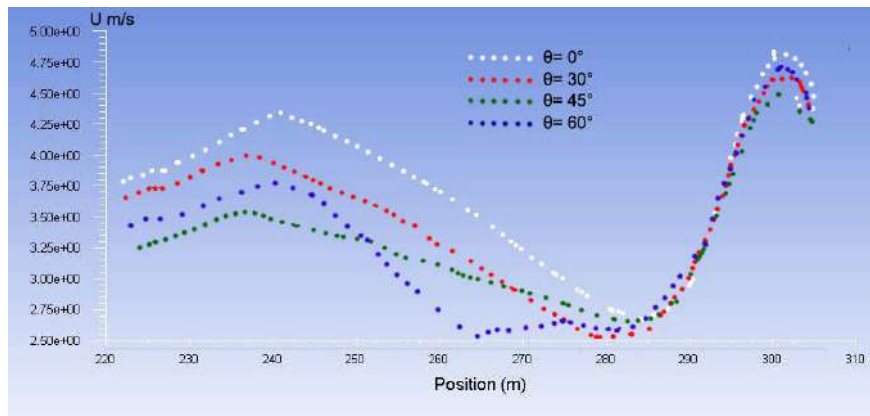


Figure 174: vitesse d'air /angle d'incidence pour une forme venturi (L=100m, H=W=12m).

Tableau 15: vitesse min et max obtenus en fonction de l'angle d'incidence (θ).

Angle d'incidence θ	U_{10} m/s	U_{min} m/s	U_{max} m/s
0°	6	2.92	6.12
30°		2.53	5.23
45°		2.67	4.83
60°		2.62	5.62

La vitesse maximale a été obtenue avec à un angle d'orientation ($\theta=0^\circ$). Ainsi, la vitesse minimale avec cet angle demeure nettement supérieure aux autres cas. A la lumière de ces résultats nous pouvons affirmer que la vitesse d'air a de meilleures performances avec un angle d'incidence perpendiculaire, soit $\theta=0^\circ$.

b- Impact du rapport W/H ; avec H hauteur des volumes et W largeur du col-Venturi

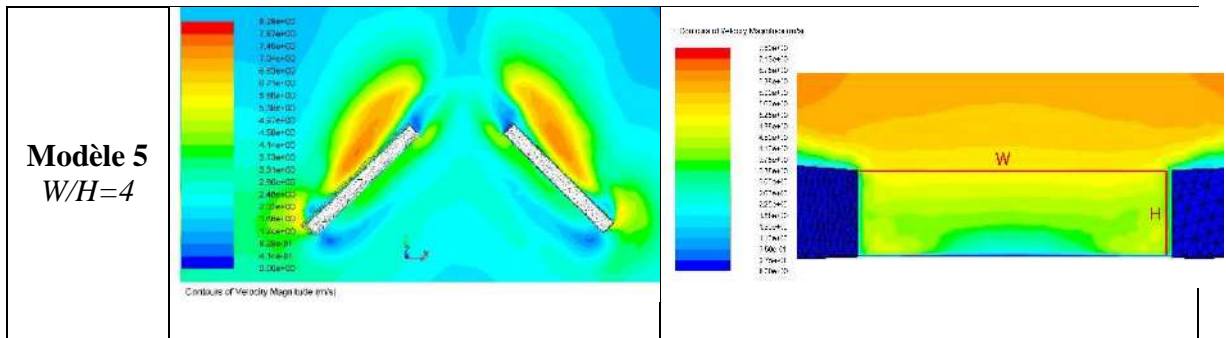
Dans une deuxième étape de modélisation, nous avons cherché à définir un rapport W/H qui présente une meilleure performance en termes d'accélération du flux d'air incident. H étant fixe et égale à 12 m, il s'agit alors de définir W qui à devra se situer dans un intervalle [0.5H-4H] d'après Lawson (1980). Cinq modèles ont été développés (tableau 16) dont les résultats obtenus ont été organisés sous forme d'une comparaison en tableau 17.

Tableau 16: caractéristiques dimensionnelles des modèles objets de modélisation.

Modèle	L_v	H	W	W/H
1	100	12	6	0.5
2	100	12	12	1
3	100	12	24	2
4	100	12	36	3
5	100	12	48	4

Tableau 17: résultats de la vitesse d'air obtenue à Z < 2m dans les cinq modèles testés.

Modèle	Résultat CFD	
	Vue en plan	Vue de face
Modèle 1 <i>W/H=0.5</i>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>
Modèle 2 <i>W/H=1</i>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>
Modèle 3 <i>W/H=2</i>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>
Modèle 4 <i>W/H=3</i>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>	<p>Contours of Velocity Magnitude (m/s)</p>



D'après ces résultats, nous constatons que dans les cinq modèles testés la vitesse d'air dans la couche de saltation enregistrée à l'intérieur de la forme Venturi tend à s'accélérer près des parois internes des bras Venturi. Ceci s'explique par le fait qu'une partie des champs aérauliques supérieurs (up-flow) à leur contact avec les parois Venturi se retrouvent déviés vers la couche de saltation avec une vitesse supérieure à l'initiale suite à un effet de décollement. Afin de mieux appréhender le comportement du flux d'air dans la zone comprise entre les bras Venturi, nous avons tracé une coupe AB qui passe par la ligne médiane de la forme Venturi tel qu'illustré dans le schéma ci-dessous (fig.175).

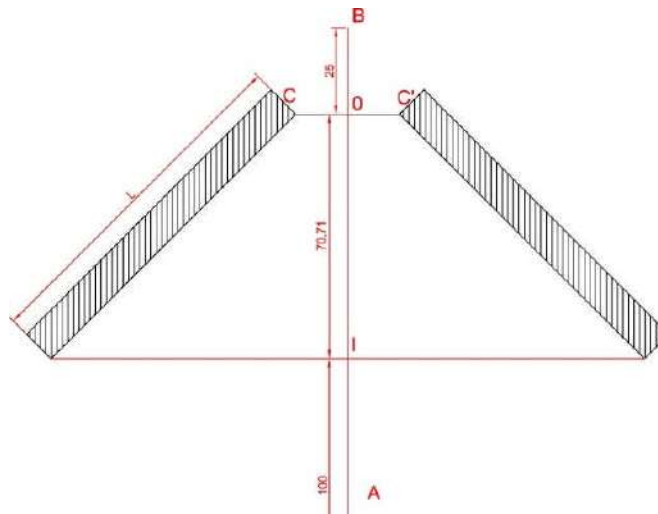


Figure 175: schémas des coupes AB et CC' passant par le col-Venturi.

Cette coupe traduit l'évolution de la vitesse d'entrée U_0 (à <2m du sol) depuis le point A au point B en passant par les points I et O dont ; I représente l'entrée dans la forme Venturi et O le col-Venturi. La position du point A étant à l'extérieur du bras de Venturi (à environ 100m du point I) nous permet d'observer l'évolution de la vitesse d'air d'entrée U_0 à son approche de la forme Venturi et son interaction avec cette dernière. Les résultats sont présentés en fig.176.

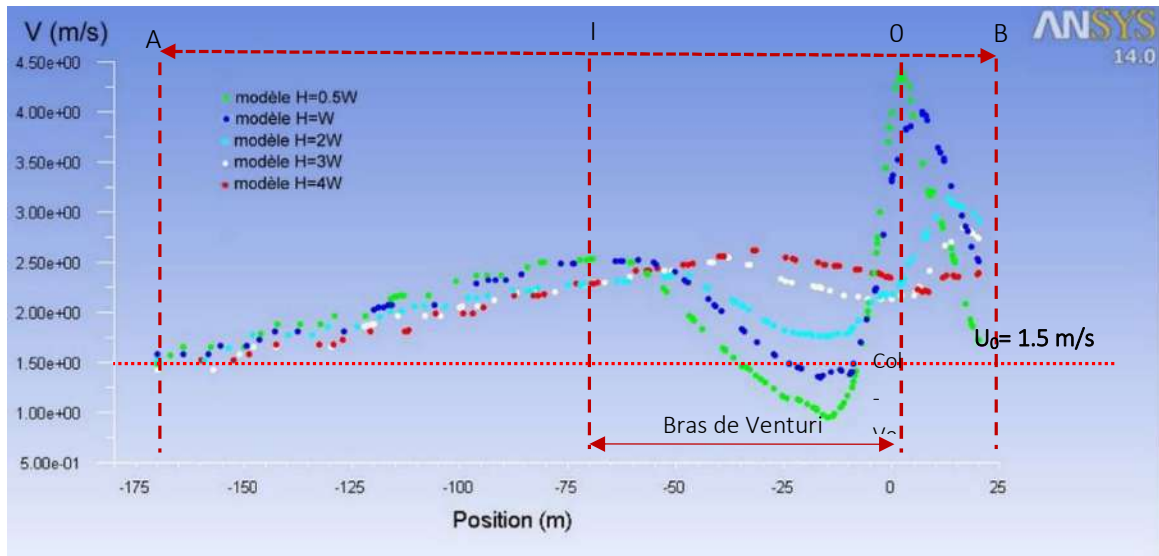


Figure 176: Comparaison de l'évolution de la vitesse d'air suivant le parcours AB. Illustration de l'auteur
 Dans la zone centrale l'air a tendance de stagner légèrement (couleur turquoise) dans les modèles 3, 4 et 5, et d'une manière plus accentuée (Couleur bleu) dans les deux premiers modèles 1 et 2.

Cette coupe nous permet de constater que bien avant la production de l'effet Venturi au niveau du col-Venturi une décélération se produit en amont de cette zone (parcours I-0) qui ne peut être que le résultat de la collision de deux champs aérauliques opposés suite à leur déviation par les parois Venturi. Nous constatons que cette chute de vitesse ne se produit pas avec la même intensité dans les différents modèles testés, elle est plus accentuée dans les deux modèles (1) et (2) ou la vitesse enregistrée est nettement inférieure à celle d'entrée $U_0=1.5\text{m/s}$. Cependant dans les modèles (3, 4 et 5) la vitesse d'air est nettement supérieure et cela s'explique par le fait que la largeur W plus importante dans ces trois modèles a permis de réduire le nombre de collisions entre champs aérauliques et de préserver plus au moins la vitesse jusqu'à son passage par le col-Venturi.

Même si au niveau du col-Venturi les deux modèles 1 et 2 présentent une accélération nettement plus importante, le fait qu'ils provoquent une décélération de la vitesse d'air en deçà de la vitesse d'entrée U_0 pourrait renseigner sur un éventuel dépôt de sable dans cette zone du plan masse. Les modèles 1 et 2 ne présentent pas une largeur suffisante pour permettre au flux d'air de gagner en vitesse sans pour autant se mettre en collision. C'est pour cette raison qu'ils ne seront pas considérés dans la suite de notre modélisation. Le modèle (3) en revanche, avec ($W=2H$) demeure dans ce cas celui qui présente une meilleure accélération sans pour autant qu'il y une accélération au-dessous de la vitesse d'entrée ($U_0=1.5\text{m/s}$). De ce fait il sera adopté pour la suite de notre modélisation.

8.2.4. Association effet « Venturi-canalisation » dans un groupement de volumes

Cette étape consiste à modéliser une forme qui associe à la fois effet Venturi et canalisation. L'objectif étant de provoquer une accélération de la vitesse du flux d'air incident puis de la prolonger grâce à un effet de canalisation tout au long de son parcours au sein du modèle. Dans ce sens, et à partir du modèle (3) dont $(W=2H=24m)^{102}$ nous avons développé deux nouveaux modèles avec deux différentes combinaisons V1 et V2 ;

- **Modèle V1** : comme illustré en fig.177, ce modèle est composé de deux rangées de forme Venturi associées en quinconce. La particularité de la forme obtenue est qu'elle dispose de cette manière de deux cols-venturi reliés par un canal, ce qui pourrait être considéré comme un inconvénient car cela peut perturber à un certain degré le comportement du flux d'air.

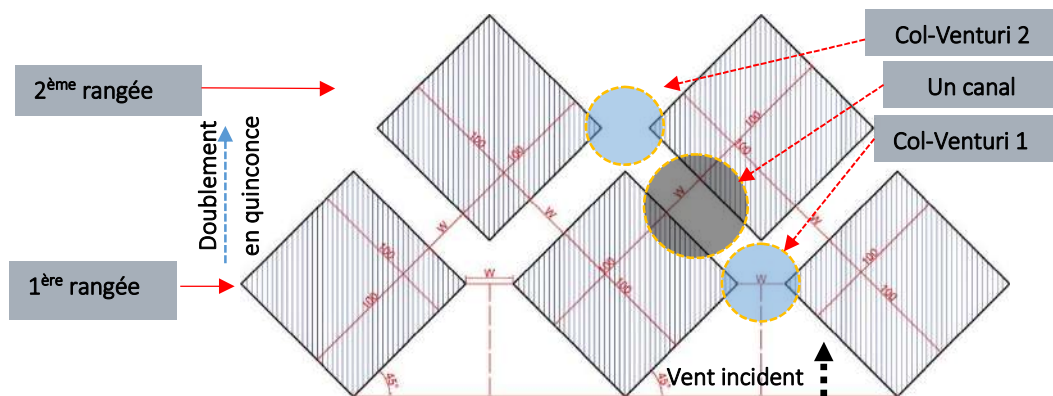


Figure 177: modèle V1 composé de deux rangées de forme Venturi organisées en quinconce. Auteur

Suite aux résultats obtenus, nous avons pu relever plusieurs zones de décélération de la vitesse d'air (couleur turquoise fig.178) en amont et en aval des col-Venturi. La décélération en amont se justifie par le rétrécissement de la section qui oblige une partie des champs aérauliques de se rabattre vers l'autre côté et entrer en collision entre eux ce qui crée une chute de vitesse d'air qui est à son niveau le plus bas en cet endroit du plan masse. Tandis que la décélération en aval des col-Venturi se justifie par l'élargissement de la section qui provoque nécessairement une diminution de la vitesse du fait de la conservation de l'énergie (théorème de Bernoulli)¹⁰³.

¹⁰² Pour rappel, pour qu'un effet Venturi puisse se produire, la hauteur des constructions doit être d'une valeur $H > 10m$ afin qu'elle puisse contenir et dévier les flux d'air à forte vitesse se trouvant à $10m$. (Gandemer, 1975).

¹⁰³ Théorème De Bernoulli : si le débit de fluide est constant et que le diamètre diminue, la vitesse augmente nécessairement ; du fait de la conservation de l'énergie, l'augmentation d'énergie cinétique se traduit par une diminution d'énergie élastique, c'est-à-dire une dépression. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Venturi

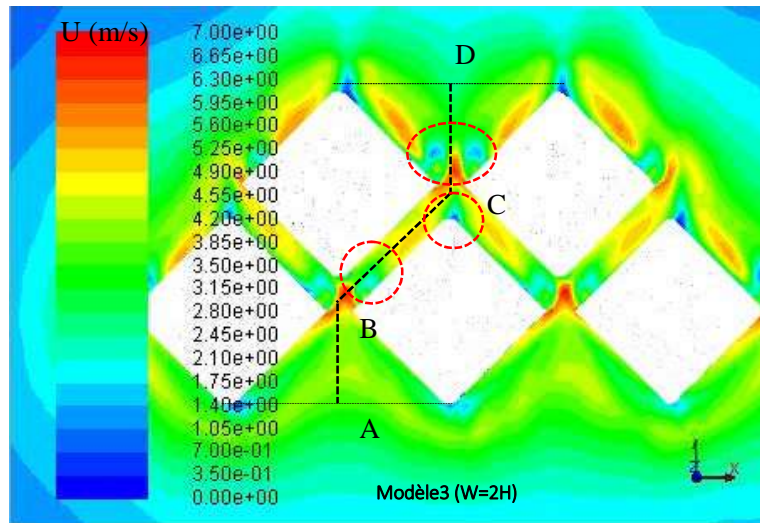


Figure 178: la vitesse du flux d'air au sein du modèle V1 et tracé de la coupe brisée AD. Les cercles rouges indiquent les zones d'un dépôt potentiel.

Afin de mieux appréhender le comportement du flux d'air et l'évolution de sa vitesse dans le modèle V1 nous avons tracé une coupe brisée suivant les points A, B, C et D tel qu'illustré dans le schéma ci-dessus (fig.179). Cette coupe reprend le parcours du vent incident en passant par des point bien précis du plan masse, notamment l'entrée (point A), la sortie (point D) et les deux col-Venturi en point B et C à une hauteur $Z \leq 2m$ (couche de saltation). Le but étant d'étudier en détail les interactions qui s'opèrent entre flux d'air incident et forme du modèle et qui auront des impacts significatifs sur la vitesse de ce dernier.

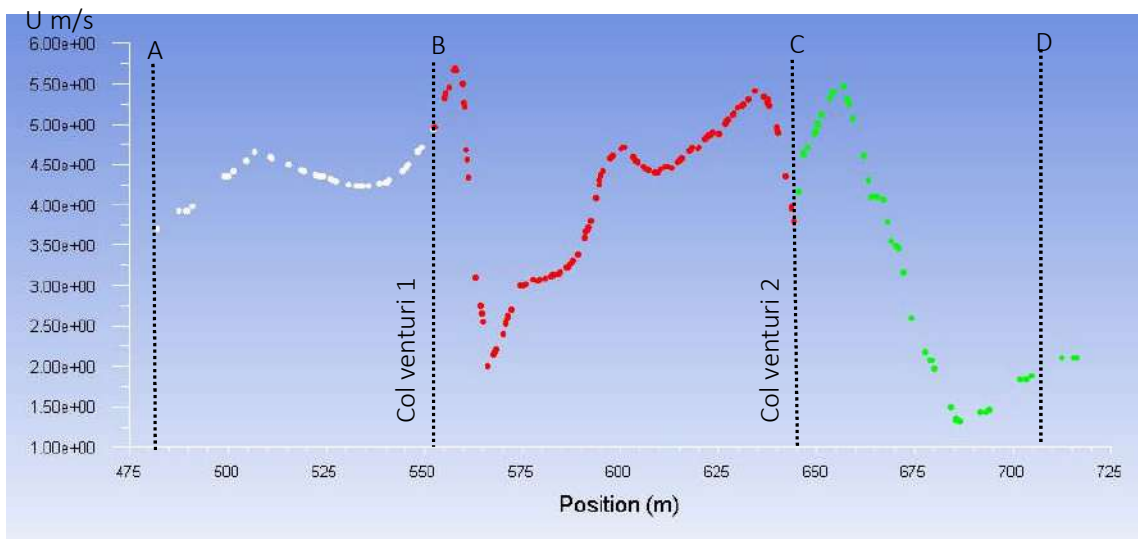


Figure 179: tracé de la vitesse d'air suivant le parcours ABCD à une hauteur $Z < 2m$ avec $U_0 = 6m/s$.

- Parcours AB : Accélération progressive du flux d'air incident jusqu'à atteindre une vitesse de 3.5m/s à son entrée dans la forme Venturi. Quelques perturbations suivies d'une légère régression de vitesse suite aux collisions qui peuvent se produire entre champs aérauliques suite à leur déviation par les deux parois opposées à l'approche du col Venturi1 en point B.
- Parcours BC : Après avoir atteint une valeur maximale de 5.75m/s suite à un effet Venturi1 (point B), la vitesse d'air subit une chute importante suite la divergence de la section et l'éventuelle collision contre l'angle vif du volume en face (fig.180).

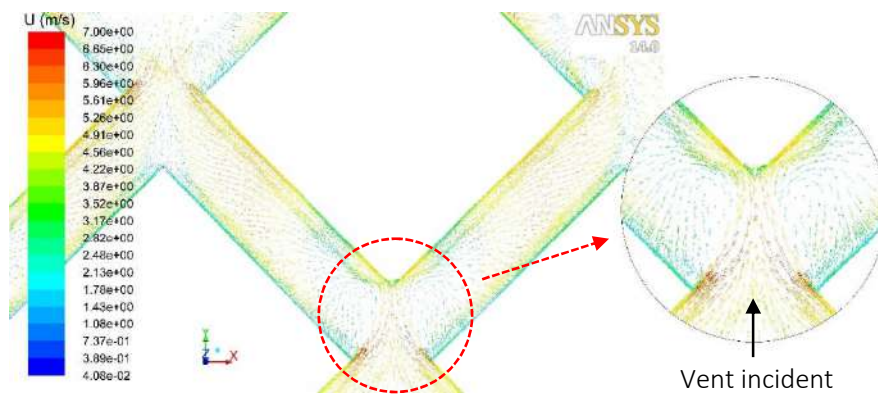


Figure 180: collision du flux d'air incident contre l'arrêt vif d'un volume dans le modèle V1.

- Parcours CD : Comme dans le premier cas, l'accélération du flux d'air « rebondit » suite à un effet Venturi 2 (point C) et atteint cette fois-ci sa valeur maximale de 6.5m/s. Comme à chaque élargissement de la section, la vitesse du flux d'air subit une chute importante avant d'atteindre le point D.

A la lumière de ces résultats nous constatons que lors de son passage au sein du modèle V1 suivant le parcours ABCD la vitesse d'air subit des perturbations importantes (accélération, décélération, collision...etc.) caractéristiques de son interaction avec la morphologie du modèle en question. Le modèle V1 a la particularité de disposer d'un rapport $W=2H$ qui semble être très performant en termes de l'accélération du flux d'air suite à la production de l'effet Venturi, cependant cette accélération est souvent suivie par une décélération qui une fois en-dessous de la vitesse d'entrée U_0 (3.5m/s) risque de faire apparaître des zones de dépôt. Cette décélération due en majeure partie à deux facteurs essentiels à savoir ; l'élargissement brusque de la section et la collision produite entre champs aérauliques et contre les parois intérieures des obstacles rencontrés.

- **Modèle V2** : c'est une forme Venturi pour laquelle on additionne un canal d'environ 100m de longueur et d'une largeur W celle du col-Venturi (voir schéma ci-dessous fig.181).

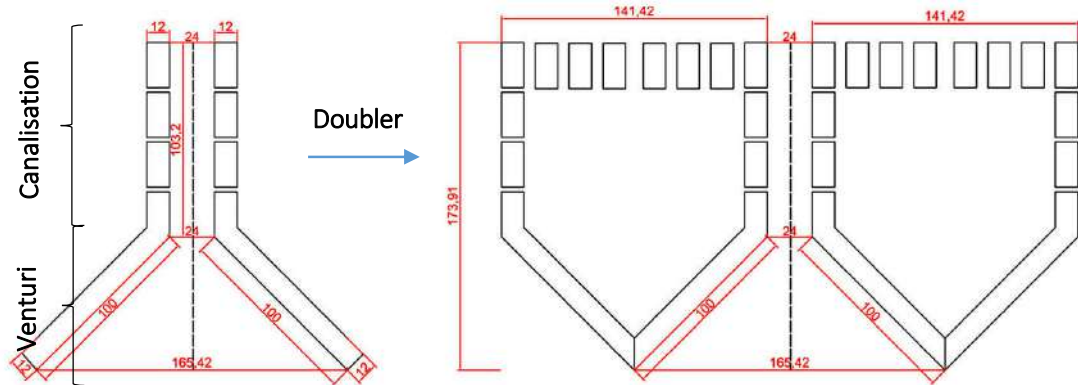


Figure 181: variante (2) ; forme Venturi associée à un canal. Illustration de l'auteur.

Selon Gandemer (1976), pour qu'un effet de canalisation puisse se produire à l'échelle d'une rue, il faut que la largeur de la rue, soit de deux fois la hauteur H des parois de la rue qui à leur tour doivent avoir une hauteur minimale de 6m et une porosité n'excédant pas 5%.

La porosité de 5 % au niveau des parois de la rue est traduite par des espacements de 2 m de large. Une multiplication de cette forme a été faite de façon à avoir une sorte d'îlots fermés et profilés avec les mêmes caractéristiques aérodynamiques du modèle (3) obtenu lors de la première modélisation de forme Venturi. Le modèle V2 au final est composé d'unités d'îlot que l'on pourra fragmenter en petites parcelles. Seulement le contour périphérique de l'îlot a été dessiné pour intégrer une porosité de 5%, car nous nous intéressons en effet au comportement du vent à la périphérie de l'îlot et pas à son intérieur. De ce fait, nos lectures et analyses concernera le comportement du vent en extra-muros de l'îlot.

Les résultats de simulation sont présentés ci-dessous en figure.182. Ainsi et comme pour le modèle V1, afin de mieux appréhender le comportement du vent au sein de ce modèle, nous avons tracé une coupe longitudinale AC qui reprend le parcours traversé par le vent suivant les points A, B et C qui représentent respectivement, l'entrée, le col-Venturi et la sortie du modèle.

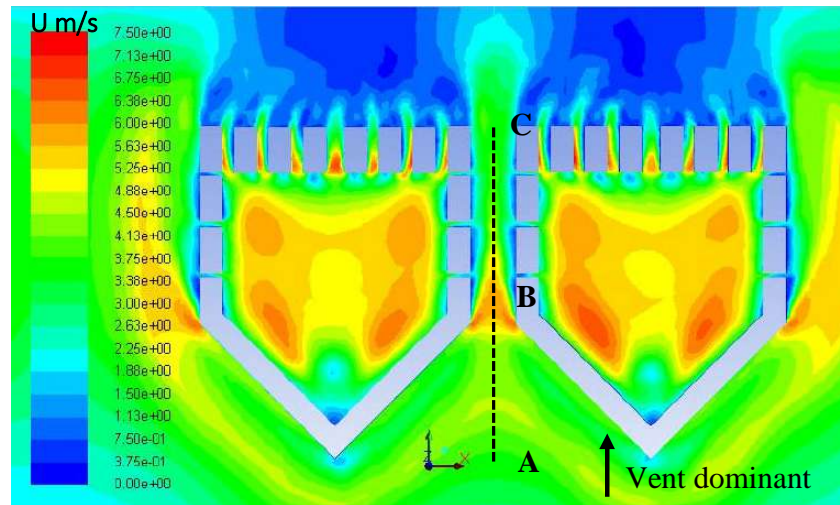


Figure 182: vitesse du flux d'air enregistrée au sein du modèle V2 à $Z < 2m$ du sol.

Les résultats de l'allure de la vitesse suivant la coupe AC sont présentés et commentés ci-dessous (fig.183).

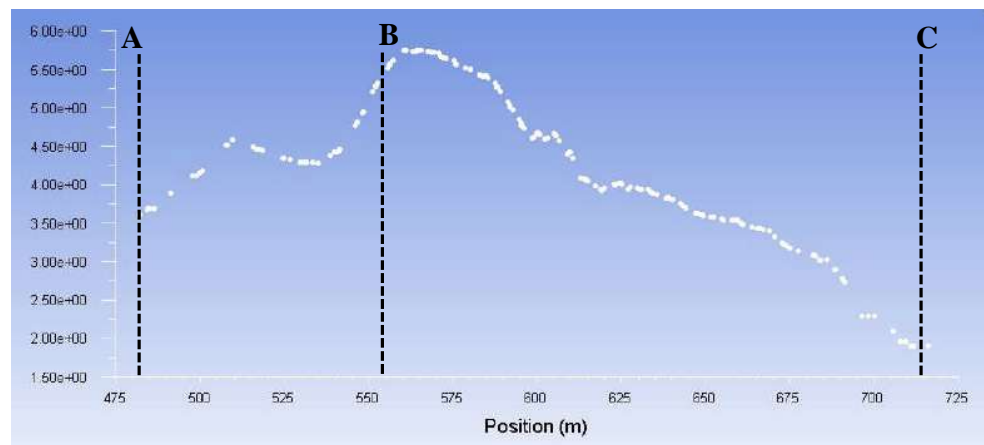


Figure 183: vitesse du flux d'air au sein du modèle V2 suivant le parcours ABC à $Z < 2m$.

De A à B : la vitesse d'air augmente progressivement jusqu'à atteindre son apogée (5.7m/s environ) juste avoir son passage du col-Venturi en point B, puis elle entame une décélération avant de rejoindre le point C où elle enregistre sa valeur la plus basse du parcours soit de 1.8m/s.

En général, nous avons constaté que le flux d'air traverse le modèle V2 sans pour autant subir trop de perturbations (accélération/décélération) ce qui lui confère un régime plus ou moins laminaire à l'encontre de ce que nous avons pu constater au niveau du modèle V1. Ainsi, ce

modèle V2 présente un effet de canalisation qui lui permet de maintenir une vitesse d'air à dégression plus stable tout au long de son parcours BC d'environ 100m.

Du point de vue des minima de la vitesse d'air enregistrée, le modèle V2 assure tout au long de son profil une vitesse d'air qui reste nettement supérieure à la vitesse d'entrée (3.5 m/s) pour une certaine longueur de son parcours. Ce résultat est très significatif car une fois que la vitesse d'air passe en dessous de sa valeur initiale U_0 , il est très probable que le vent emportant les grains de sable se trouve obligé de les lâcher sous l'effet de la gravité, l'apparition de zones de dépôt est alors immédiate au sein d'un plan de masse. Comparativement avec le modèle V1, le modèle V2 est de loin plus performant car plus favorable à l'évacuation des quantités de sable qui peuvent transiter par son plan de masse.

8.3. Calcul du volume sédimentaire dans les modèles développés

Face à cette difficulté d'accéder à l'expérimentation en soufflerie, notre seule méthode pour le calcul du bilan sédimentaire des modèles développés serait la simulation mathématique. La méthode que nous avons adoptée fait essentiellement référence aux équations développées par Bagnold (1941), Karman et Zingg (1953) dans ce domaine et que nous avons déjà détaillées dans le chapitre méthodologique.

Dans cette partie, le but est de calculer le bilan sédimentaire dans chaque plan masse des quatre modèles développés à savoir ; modèle V1, modèle V2, modèle en plan régulier avec $H/D=3$ et modèle avec plan en quinconce dont $H/D=0,25$. Un bilan sédimentaire positif serait révélateur d'un dépôt de sable tandis qu'un bilan sédimentaire négatif renseigne plutôt sur une érosion (ou déflation) de sable. Le bilan sédimentaire sera calculé dans différents points (a, b, c, d...etc.) qui retracent les amplitudes enregistrées dans les différents graphes représentatifs des gradients de vitesse. Ces points (amplitudes) enregistrés par rapport au seuil de saltation (4,5m/s) peuvent renseigner donc sur tout éventuel dépôt ou déplacement des grains de sable transportés (Fig.184, 185, 186 et 187). Ces points vont être repérés sur plan masse pour indiquer le bilan sédimentaire à différents endroits du plan masse de chaque modèle.

Dans des conditions idéales, l'influence de l'humidité a été négligée, nous avons considéré ainsi que la rugosité de la surface comme uniforme, en négligeant les effets complexes de sols hétérogènes, nous avons choisi $\alpha =0.28$ (basses constructions), et une valeur $Z_0=0.03$ avec un coefficient correspondant $k=0.234$. Le diamètre choisi est de 200 μm , soit 0.2mm correspond à des grains de sable de la bordure orientale du Grand Erg Occidental (Morel, 2008, p.88).

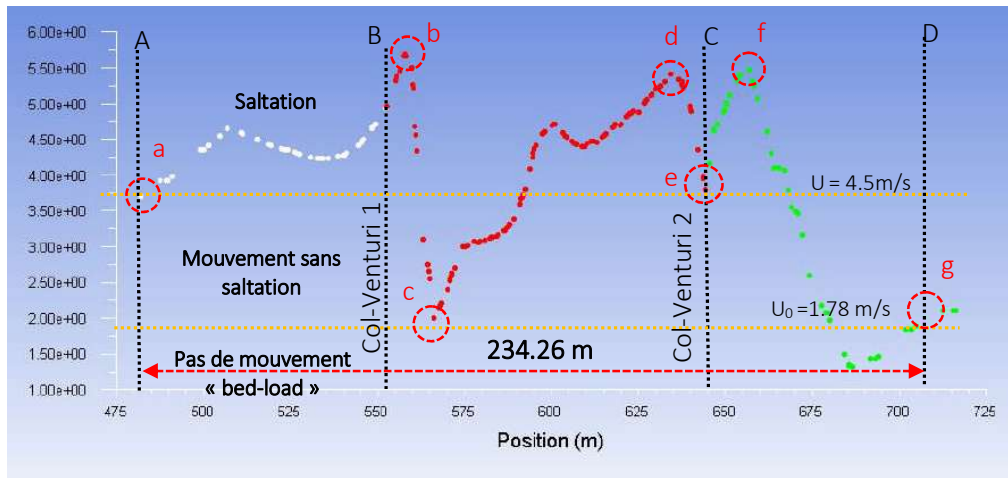


Figure 184: modèle V1. Gradient de la vitesse d'air dans la couche de saltation. Illustration de l'auteur.

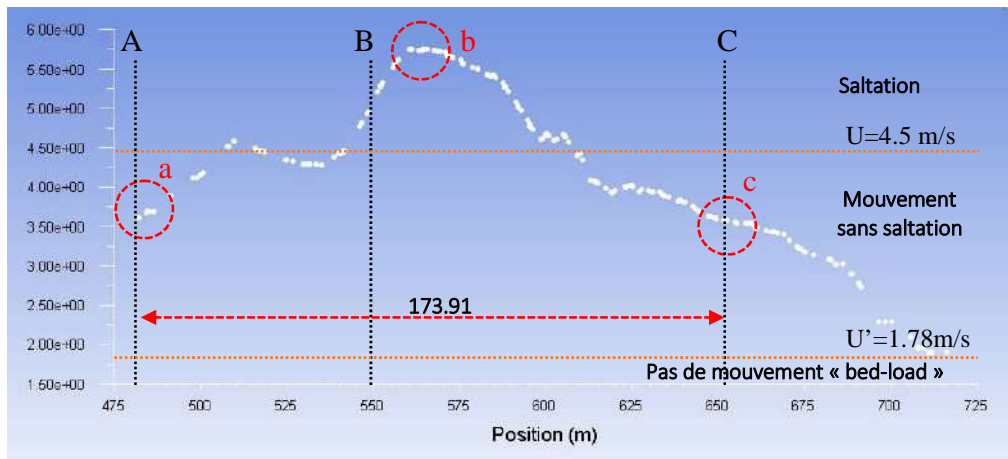


Figure 185: modèle V2. Gradient de la vitesse d'air dans la couche de saltation ($Z < 2m$).

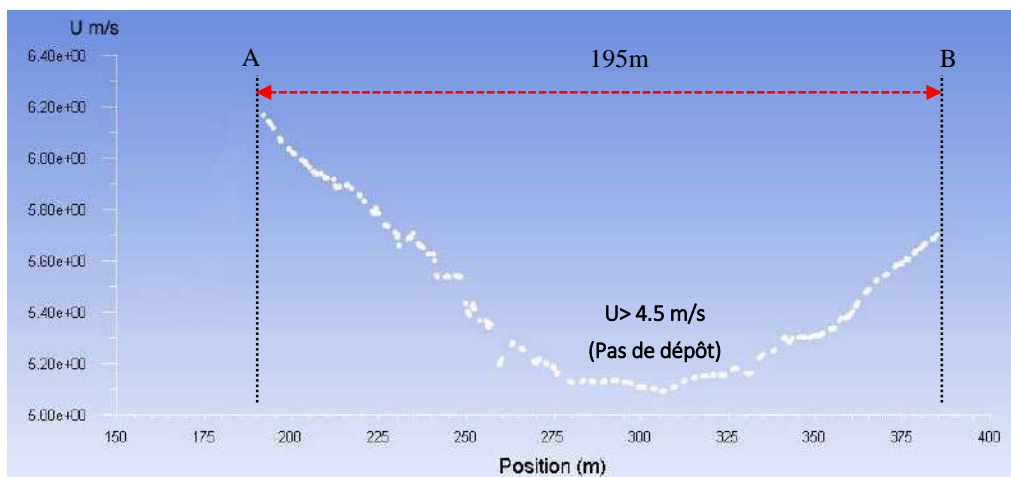


Figure 186: modèle en plan régulier avec $H/D=3$. Gradient de la vitesse d'air à $Z < 2m$ (couche de saltation)

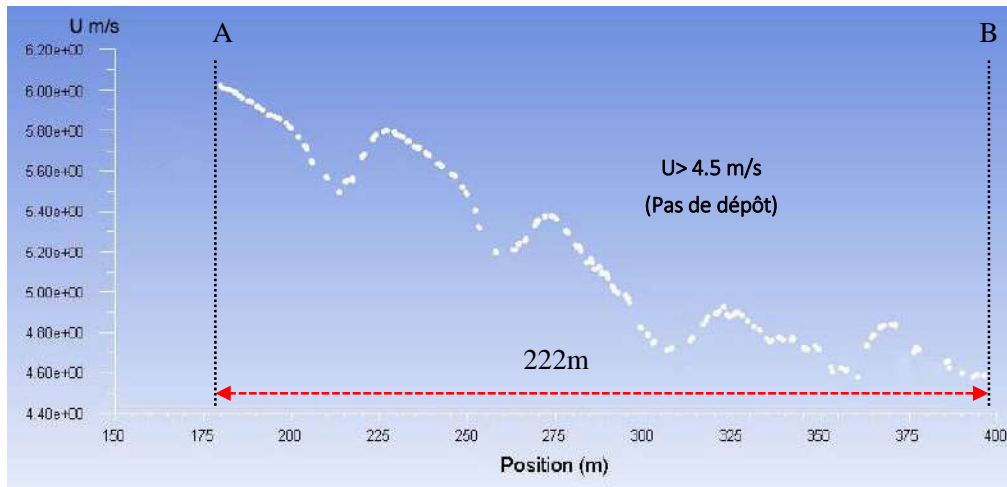


Figure 187: modèle en quinconce ($H/D=0,25$). Gradient de la vitesse d'air dans la couche de saltation ($Z < 2m$).

Nous constatons que dans les graphes des deux modèles (plan régulier et plan en quinconce) représentés respectivement en fig.186 et 187, la vitesse d'air ne descend pas en dessous du seuil de saltation (4.5m/s), cela veut dire qu'il ne peut pas y avoir de dépôt dans ces deux modèles. Ceci s'explique par le faible niveau de turbulence (TKE) générée par ces modèles que l'on présente ci-dessous en fig.188.

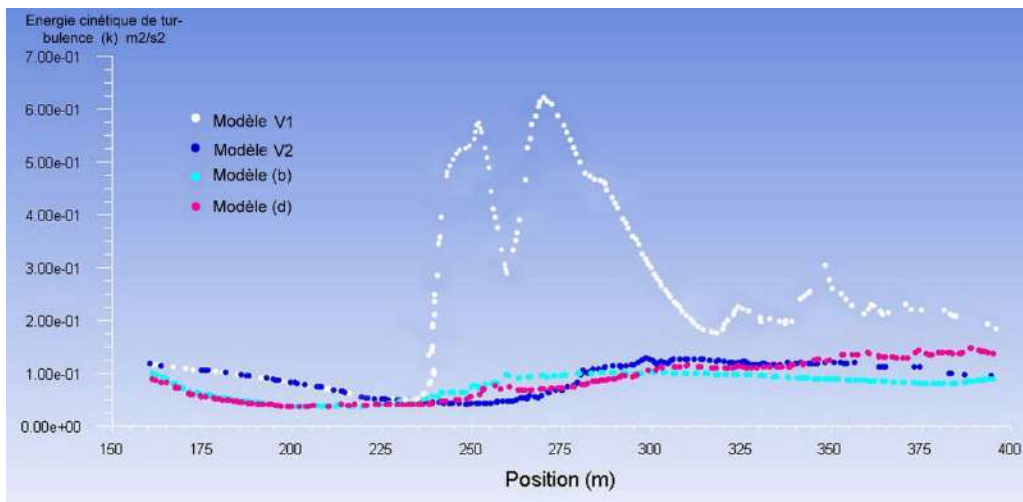


Figure 188: niveau de turbulence (TKE) dans les quatre modèles testés. Illustration de l'auteur.

Le flux d'air est légèrement perturbé et cela lui permet de conserver plus au moins sa vitesse tout au long de son parcours dans ces deux modèles à l'encontre du modèle V1 qui présente un niveau de turbulence élevé suite aux différents changements de direction subis par le flux

d'air. De ce fait, nous pouvons sans trop tarder affirmer qu'il ne peut y avoir de dépôt dans ces deux modèles et de ce fait le bilan sédimentaire est considéré comme étant négatif. Seuls alors les deux modèles V1 et V2 vont être considérés dans le calcul mathématique du bilan sédimentaire.

- **Calcul mathématique du bilan sédimentaire dans les modèles V1 et V2**

Afin d'identifier et classer les zones de dépôt suivant leur bilan sédimentaire (positif ou négatif) nous allons suivre plusieurs étapes tirées de la littérature et qui sont comme suit :

- Calculons Q en fonction de (l) et (t) à partir de l'équation (12) de Bagnold (1941). Avec : (t), durée annuelle du vent (s/an) et (l), longueur du front perpendiculaire à la direction du vent (m).

$$Q = Clt \frac{\rho}{g} U^{*3} \sqrt{\frac{d}{D}}$$

$$Q = 1.8lt \frac{1.23}{9.81} U^{*3} \sqrt{\frac{2}{0.25}}$$

Q= 0.64.l.t.U*³ kg/période

- Considérons que (t) est le même pour l'ensemble des points, nous pourrions calculer (Q) en fonction de (U*) et (l), puis de déduire ΔQ. L'équation (12) devient :

Q= 0.64.l.U*³ kg/période

À partir de l'équation (17) nous calculons U* (vitesse de cisaillement) pour déduire ensuite Q depuis l'équation (12)

$$U = 6.13U^* \log \frac{Z}{Z'} + U'$$

$$U^* = \frac{U - U'}{6.13 \log \frac{Z}{Z'}}$$

Tel que ; U' = 20d (miles/h) / d (mm)

Nous choisissons $C = 1.8$ (bon tri) avec une valeur $d=0.2\text{mm}$ ($200 \mu\text{m}$) représentative des grains de sable concernés par le mode de saltation.

$Z' = 10d$ (mm)= 2mm (Couche de cisaillement)¹⁰⁴ et $Z \leq 2\text{m}$ (couche de saltation)

D'où:

$U' = 40$ (miles/h) = 1.78m/s

A partir de l'équation (17) de Zingg (1953) nous calculons U^*

$$U^* = \frac{U-1.78}{6.13 \log \frac{1}{0.002}}$$

$$U^* = \frac{U-1.78}{16.54}$$

$U^* = 0.06 (U-1.78)$ (m/s)

La vitesse des grains de sable (U) sera déduite des graphes de vitesse et rapportée en tableau 18 dans les différents points identifiés précédemment (a, b, c, d,).

$U'=1.78$ représente la vitesse minimale pour mettre en mouvement les grains de sable de 0.2 mm de diamètre. Lorsque $U \leq U'$ ceci veut dire qu'il n'y pas de mouvement de sable bien au contraire il s'agit d'un dépôt, ou stagnation.

Les mesures de la longueur (l)¹⁰⁵ des différents points (a, b, c, d, e, f, et g) sont rapportées dans le tableau 18 pour chaque modèle. Ils ont été mesurés à l'aide des schémas établis en annexe 2 pour les deux modèles V1 et V2.

¹⁰⁴ C'est la couche dans laquelle les grains de sable commencent à se mouvoir.

¹⁰⁵ (l) : longueur du front exposé perpendiculairement à la direction du vent considérée (m).

Tableau 18: vitesse de vent (et grains de sable) U (m/s) à $Z=1m$, vitesse d'arrachement U^* (m/s), longueur l (m) et volume de sable transporté $Q.10^{-3}$ (kg/s/an).

		Vitesse du vent U (m/s) à $Z=1m$, vitesse d'arrachement U^* (m/s) et volume de sable transporté $Q.t$ (kg/s/an)						
		a	b	c	d	e	f	g
Modèle (V1)	U	3,75	6,75	2	5,4	4,5	5,5	2,20
	U*	0,12	0,24	0,01	0,21	0,16	0,22	0,03
	U* ³	1,73.10 ⁻³	13,8.10 ⁻³	10 ⁻³ .10 ⁻³	9,26.10 ⁻³	4,1.10 ⁻³	10,6.10 ⁻³	0,027.10 ⁻³
	l	165,42	34	48	48	48	100	165,42
	Q	183,62.10 ⁻³	300,22.10 ⁻³	0,031.10 ⁻³	284,16.10 ⁻³	125,76.10 ⁻³	678.10 ⁻³	2,81.10 ⁻³
	ΔQ		-116,6.10 ⁻³	+300,19.10 ⁻³	-284,13.10 ⁻³	+158,4.10 ⁻³	-555,24.10 ⁻³	+675,19.10 ⁻³
	ΔQ _{totale}	Bilan total + 180,81.10⁻³						
Modèle (V2)	U	3.60	5.75	3.75	-	-	-	-
	U*	0.10	0.24	0.10	-	-	-	-
	U* ³	10 ⁻³	13,8.10 ⁻³	10 ⁻³				
	l	165,42	24	24	-	-	-	-
	Q	105,86.10 ⁻³	211,92.10 ⁻³	15,36.10 ⁻³	-	-	-	-
	ΔQ		-106,06.10 ⁻³	+196,56.10 ⁻³				
	ΔQ _{totale}	Bilan total + 90,50.10⁻³						

Avec ;

Q : représente le volume annuel de sable qui peut transiter par chaque point

ΔQ : représente le bilan sédimentaire et sa répartition sur le plan masse

ΔQ_{totale} : représente le volume de sable peut stagner au sein du plan de masse

Modèle V1

$$\Delta Q_{\text{totale}} = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}} = \mathbf{180,81.10^{-3}.t}$$
 (kg/s/an)

Modèle V2

$$\Delta Q_{\text{totale}} = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}} = \mathbf{90,50.10^{-3}.t}$$
 (kg/s/an)

A la lumière de ces résultats obtenus, il s'avère que le modèle V1 à l'encontre du modèle V2 accuse beaucoup de dépôt au sein de son plan masse, ceci est dû d'une part aux différentes fluctuations (accélération/décélération) que subit le flux d'air dans son parcours aux travers les volumes. D'autres parts, le changement de direction crée forcément des surfaces de collision pour les grains de sable en mouvement et fait apparaître inévitablement des zones de dépôt (fig.189).

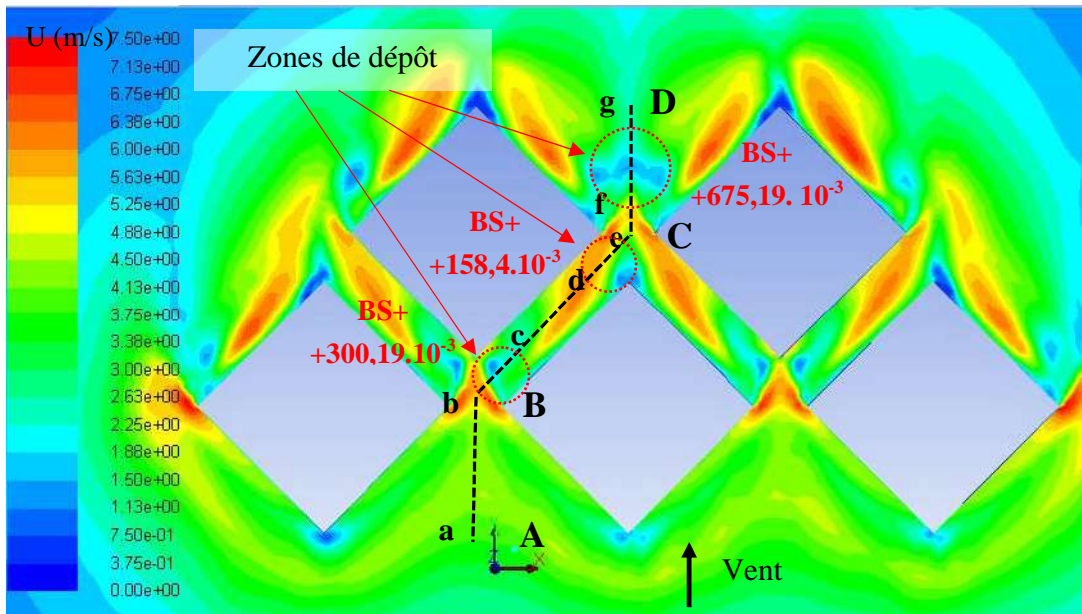


Figure 189: modèle V1 ; vitesse d'air et répartition des résultats du bilan sédimentaire calculé sur le plan masse.

Le comportement aérodynamique du modèle V2 favorise davantage le déplacement de sable au sein de son plan masse ; seulement une zone accuse un léger dépôt de sable à l'encontre de tout le parcours qui affiche un bilan sédimentaire négatif (fig.190). Le modèle V2 semble constituer la combinaison parfaite entre effet Venturi et canalisation, d'autant plus que sa forme profilée en V permet d'entraver le moins possible la circulation du flux d'air incident, sa vitesse et donc sa capacité à faire mouvoir le sable à travers ses artères principales.

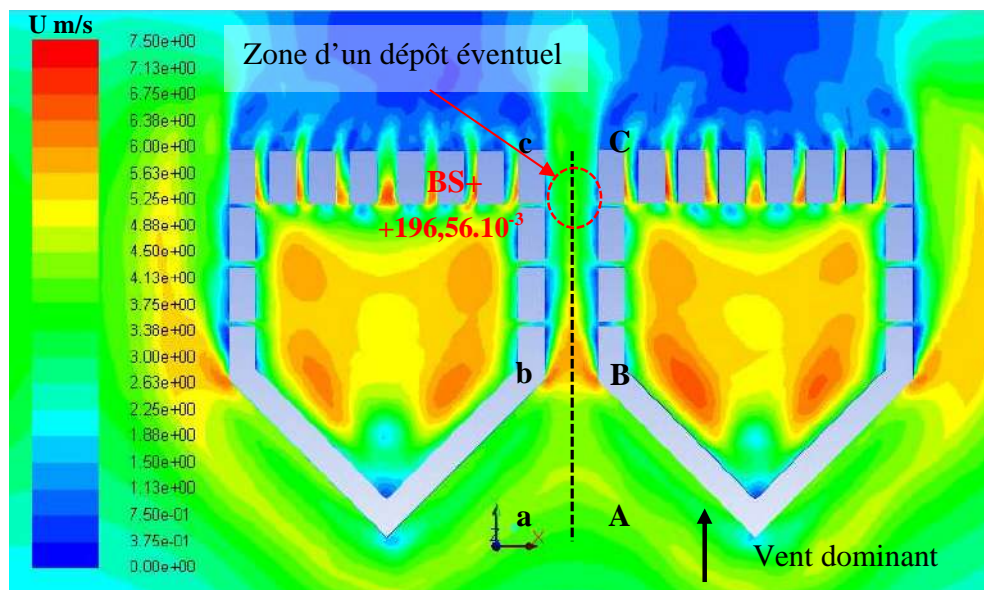


Figure 190: modèle V2 ; vitesse d'air et répartition des résultats du bilan sédimentaire sur le plan masse.

8.4. Conclusion

Dans cette partie dédiée à la modélisation, nous avons tenté de développer des modèles de formes (ou fragments) urbaines à partir de l'intégration de certaines conditions et rapports dimensionnels relatifs à la production d'effets « Venturi » et « canalisation ». Nous avons supposé au préalable que l'intégration de ces effets aérodynamiques dans la forme urbaine est capable de remédier à la question du dépôt de sable à travers la suppression des effets de sillage et de turbulence qui peuvent apparaître généralement au sein d'une forme urbaine. En outre, un écoulement laminaire que l'on pourra avoir suite à la prise en considération de certaines dispositions particulières de forme urbaine est en mesure de fournir un bilan sédimentaire négatif synonyme de la disparition des zones de dépôt.

Cette partie de la modélisation s'est soldée par le développement de quatre prototypes de formes urbaines que nous développons ci-dessous. Les rapports dimensionnels et toutes les dispositions particulières à prendre en charge pour une intégration réussie des effets aérodynamiques tel que ; Venturi et canalisation sont synthétisés ci-dessous.

1. En termes d'effet canalisation

Les résultats obtenus des modèles développés affirment leur efficacité en termes de fluidité de l'écoulement d'air incident (écoulement laminaire) à travers le faible niveau de turbulence (TKE) enregistré. Ainsi, la forme profilée intégrée dans les deux modèles réduit visiblement les zones de sillage autour des volumes et dissipe le flux d'air et la pression à travers les rues qui jouent le rôle de canalisateurs (effet canalisation).

La largeur des rues représente la porosité (ou perméabilité) de la façade au vent, et de ce fait, a un rôle primordial à jouer dans l'efficacité du modèle dans l'évacuation du sable en amont des bâtiments au vent. Un rapport $L/\Delta=0.66$ (avec ; L : largeur de bâtiment et Δ : largeur de rue) tiré de la littérature (Naaïm-Bouvet, 2003) semble être le meilleur en termes d'évacuation du sable a été adopté pour le reste de notre modélisation.

Le modèle d'un groupement de bâtiments organisés en plan régulier avec un prospect ($H/D=3$) assure un flux rasant grâce à ses masses serrés et permet de faire disparaître l'effet de masque. Ainsi, le vent aura tendance à circuler librement d'une manière laminaire entre les rangées de volumes sans pour autant perdre de sa vitesse initiale.

En revanche, le modèle organisé en quinconce avec des volumes suffisamment distancés dont ($H/D=0.25$), permet à chaque volume de modifier le flux d'air à son niveau sans qu'il y ait une interférence avec les autres volumes ce qui confère au flux d'air un comportement plutôt laminaire proche du flux isolé. La forme profilée dans ce cas de figure aura un effet considérable dans l'évacuation du flux d'air incident de telle manière à faire disparaître les zones de sillage et l'effet de masque.

2. En termes d'effet Venturi

L'impact du rapport W/H est très important (avec ; H , hauteur des volumes et W , largeur du col Venturi). En effet, le modèle intégrant un rapport ($W=2H$) pour sa forme Venturi est celui qui présente une meilleure accélération du flux d'air incident. Ainsi, la vitesse maximale a été obtenue pour un angle d'orientation ($\theta=0^\circ$).

3. En termes d'effet combiné Venturi-canalisation

En général, nous avons constaté que l'association d'une canalisation à une forme Venturi permet au flux d'air incident de traverser le modèle sans pour autant manifester trop de perturbations (accélération/décélération), ce qui confère à ce dernier un régime plus ou moins laminaire. Ainsi, l'effet canalisation permet de prolonger la vitesse obtenue et de la maintenir tout au long de son parcours.

4. Choix des modèles performants parmi ceux développés en modélisation (modèle V1, modèle V2, modèle en plan régulier avec $H/D=3$ et modèle avec plan en quinconce avec $H/D=0.25$)

Afin de définir la performance des modèles développés dans la lutte contre le dépôt de sable, il a fallu vérifier le bilan sédimentaire dans de chaque modèle. Dans l'impossibilité d'avoir recours à des simulations en soufflerie nous étions obligés de faire appel à la simulation mathématique en faisant référence aux expériences de Bagnold (1941), Karman et Zingg (1953) dans ce domaine.

Après simulation mathématique du bilan sédimentaire, les résultats montrent que :

- Les deux modèles avec plan régulier et plan en quinconce sont nettement plus performants en termes d'évacuation des grains de sable qui peuvent transiter par leurs plans masse. Théoriquement, aucune forme de dépôt ne peut être constatée, et ce, grâce

à la vitesse d'air enregistrée au sein des deux modèles et qui demeure nettement supérieure au seuil de saltation (4,5m/s), mais cela à condition que la vitesse initiale soit à la base supérieure à ce seuil.

- Les deux autres modèles à savoir ; V1 et V2, accusent à leur tour des formes de dépôt à différents points de leurs plans masses, et ce, suite aux effets de turbulence générés par la disposition particulière de leur masses bâties (convergens, divergens, angles vifs, changement brusque de direction...etc.). En revanche, le volume de dépôt enregistré au niveau du modèle V2 demeure nettement inférieur à celui enregistré en modèle V1. En effet, le modèle V2 dispose d'un mécanisme d'accélération « Venturi » combiné à celui de « canalisation » lui permettant théoriquement d'évacuer davantage le volume de sable qui peut transiter par son plan masse. De ce fait, le modèle V2 est plutôt recommandé, tandis que le modèle V1 est déconseillé.

5. Quelques réserves relatives au calcul du bilan sédimentaire

- Ce sont uniquement les grains de sable avec un diamètre $d = 0.2 \text{ mm}$ ($200 \mu\text{m}$) qui ont été pris en considération dans le calcul du bilan sédimentaire. Même si cette valeur reste très représentative des grains de la région d'étude (0.20 à 0.22mm selon Morel, 2008), ceci n'empêche qu'un calcul plus précis demeure celui qui prend en considération l'ensemble des grains qui peuvent être concernés par la saltation, dont le diamètre peut commencer dès 0.07mm et reste inférieure à 0.5mm.
- Faute de données, nous avons pris en charge une seule direction (ENE) dans le calcul du bilan sédimentaire. Ceci représente une bonne partie mais pas la totalité du bilan sédimentaire que l'on peut enregistrer au niveau du modèle proposé. La prise en charge de l'ensemble des vents dominants, leurs vitesses et leurs fréquences d'occurrence nous permettra de mieux quantifier le bilan sédimentaire au sein des modèles développés.
- Seulement la vitesse moyenne annuelle ($U = 6 \text{ m/s}$) a été prise en compte dans les calculs, or, le mieux serait d'intégrer toutes les classes de vitesses que peut inclure un vent dominant.

**9. CHAPITRE IX : VERS UN MODELE D'ADAPTATION DE LA VILLE
SAHARIENNE AU PHENOMENE D'ENSABLEMENT DANS LA
REGION DE GOURARA ; ORIENTATIONS D'AMENAGEMENT ET
PROTOTYPES DE FORMES URBAINES ADAPTEES**

9.1. Introduction

Ce qui importe d'abord dans la conception d'un schéma de lutte contre l'ensablement c'est de placer celui-ci dans le système global d'action éolienne en tenant compte des variables topographiques, de la nature des édifices à mettre en place et de l'appréciation du rôle déstabilisateur de l'homme par son action sur le terrain avant d'entamer la réflexion sur les moyens réducteurs du risque d'ensablement.

En effet, il est primordial de renseigner sur la dynamique éolienne d'ensablement du site en question pour cerner d'abord son degré de vulnérabilité. Les édifices dunaires tels que nous les avons identifiés dans la région de Gourara diffèrent en typologie (*ghourd*, *barkhane*, *sifs...*etc.) et sont révélateurs du régime éolien présent dans la région : monodirectionnel, bidirectionnel ou multidirectionnel qui lui-même subit une influence directe et significative des éléments du relief et de la topographie. A titre d'exemple ; le vent multidirectionnel est parfois le résultat de la présence de méga-obstacles (piémonts) qui influent sur le mouvement éolien en générant plusieurs directions secondaires à partir d'un vent monodirectionnel ou bidirectionnel (Mainguet, 1995). Dans le même sens, la formation de dunes étoilées (*ghourd*) et *barkhaniques* sur le site indique la présence d'un vent multidirectionnel.

Ces étapes d'exploration sont incontournables pour tout aménagement car elles permettront de définir la nature de l'opération à mettre en place. Mais quelle que soit sa nature, la réussite de la mesure choisie suppose l'utilisation et la valorisation des spécificités écologiques et humaines locales qu'il ne faut pas perdre de vue afin de minimiser les coûts et rendre les solutions viables au profit de la communauté.

Le schéma de lutte contre l'ensablement que nous avons développé tout au long de cette recherche consiste en la mise en place de deux stratégies complémentaires scindées en deux échelles d'intervention, à savoir ; « prévention » à l'échelle Macro (territoire) et « protection » à l'échelle Méso/Micro (ville/bâtiment). Nous développons ci-dessous chacune de ces deux stratégies en fonction des échelles d'intervention :

9.2. Echelle macro : Mesures de prévention

A une échelle macro (territoire) des mesures dites de « prévention » sont plutôt recommandées. La prévention est l'option qui conduit à combattre l'aléa d'ensablement dans le fœtus. Elle permet de réduire le degré de vulnérabilité des enjeux pour faire en sorte que le

coût humain et matériel des dommages liés à la survenue de ce phénomène soit supportable par la société.

Concrètement, il s'agit d'orienter les programmes d'aménagement vers des zones qui par leur position géographique et éléments du relief se trouvent à l'abri des mouvements éoliens d'ensablement. En revanche, même si ces zones disposent d'une faible vulnérabilité vis-à-vis du phénomène d'ensablement, cela n'empêche de dresser -en guise de précautions- quelques orientations que nous développons ci-dessous afin de renforcer leur protection contre toute surprise pouvant mettre à mal l'aménagement et le développement futur de ces zones.

9.2.1. Délimitation de zones d'abri au pied du plateau de Tademaït

Au pied du plateau de Tademaït et dans sa limite ouest se présente une vaste plaine totalement à l'abri des vents dominants nord-est grâce à l'aspect indenté du plateau tel qu'illustré en fig.191. Dans la région d'Aougrout située sur cette plaine, certains *ksour* et palmeraies existent et sont fonctionnels de nos jours. Le manque de digues et des *afregs* autour de ces *ksour* et de leurs palmeraies attenantes témoignent d'une situation sans danger vis-à-vis du phénomène d'ensablement. En effet, aucune trace d'ensablement n'est enregistrée sur les lieux. Ces *ksour* jouissent d'une position stratégique leur permettant de bénéficier largement de la protection du plateau de Tademaït. Ce dernier constitue une véritable barrière naturelle contre tout aléa d'ensablement provoqué par les vents nord-est. « A l'échelle synoptique, la présence de méga-obstacles dans un désert aboutit à l'apparition des aires d'abri. » (Mainguet et al., 2004).

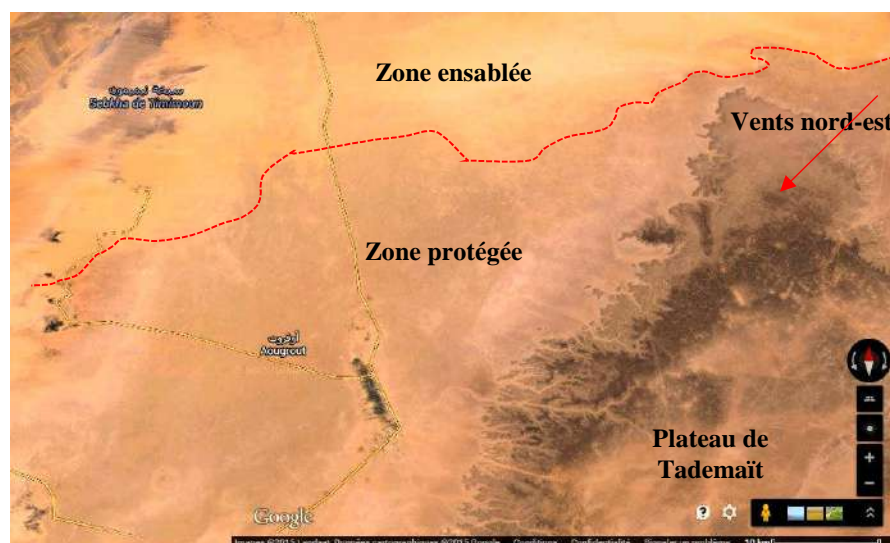


Figure 191: situation de la zone protégée de l'ensablement dans le Gourara.

Tenant compte de la limite indentée du plateau de Tademaït et de la direction nord-est des vents dominants nous avons tracé une ligne tangente aux limites saillantes de ce plateau. Ce tracé nous a permis de définir une zone aménageable et totalement protégée d'une surface de 50 000km² environ, divisibles en trois sous-zones comme illustré en fig.192 ci-dessous.

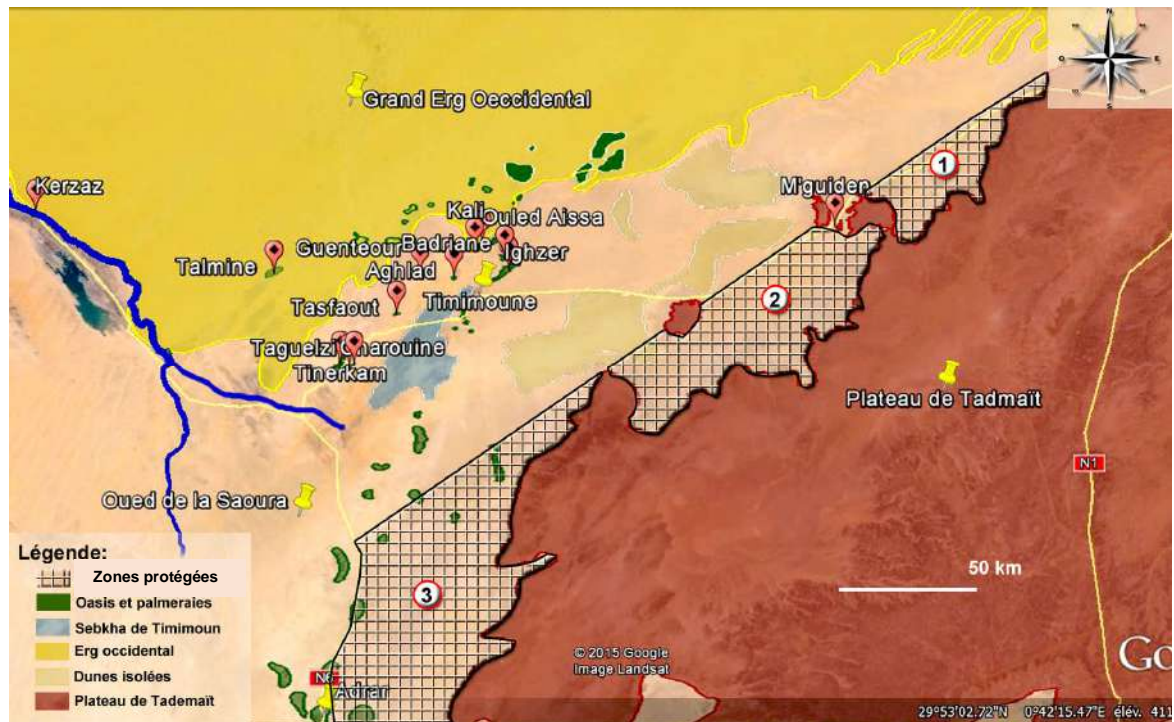


Figure 192: zones désignées protégées au pied du plateau de Tademaït. Illustration établie depuis un support Google-maps.

D'après les données géologiques¹⁰⁶ de la région, cette zone située au pied du plateau de Tademaït abonde en eau souterraine, ce qui ne poserait nullement le problème d'alimentation en eau potable dans le cas de son urbanisation. Alors même si l'eau est à une profondeur importante due aux rabattements des nappes, l'Etat dispose aujourd'hui de moyens nécessaires pour pouvoir l'exploiter et assurer convenablement sa distribution.

«les palmeraies ne sont plus «condamnées» à glisser vers les points bas afin de continuer à bénéficier de l'irrigation par gravité, puisque en greffant une motopompe sur un conduit de foggara - en un point quelconque de son parcours souterrain, et pas nécessairement à son

¹⁰⁶ Le bassin du SASS (système aquifère du Sahara septentrional) qui comprend la zone de Gourara est évalué entre 30 000 et 100 000 milliards de mètres cubes partagés entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye avec des pourcentages respectifs de 70%, 22% et 8% des 1 019 000 km² de la superficie du SASS.

débouché - on peut désormais irriguer des terroirs topographiquement élevés, d'où une reconquête des terres « hautes », est désormais possible ». (Bisson, 1990, p.239).

9.2.2. Délimitation de zones d'abri sur la bordure sud de la hamada

Au pied de la corniche sud de la *hamada*, certains *ksour* sont toujours habités à l'image de Taguelzi et Tinekram ne subissant aucun danger vis à vis de l'ensablement. En revanche, des prémices d'ensablement sont constatées au niveau des nouvelles extensions, notamment le cas de la nouvelle extension de Taguelzi qui s'est faite dans le talweg qui épouse la direction des vents dominants nord-est responsable de l'ensablement dans cet endroit.

Selon Mainguet et Rimini (2004), la répartition et la disposition des massifs rocheux et des dépressions topographiques, induisent en plus d'une circulation éolienne au voisinage d'un relief, des couloirs « Venturi » de circulation privilégiée de courants transporteurs de sable et une dynamique qui a comme conséquence l'ensablement des infrastructures, des routes et des oasis. Dans ce sens, toute nouvelle implantation dans cette zone doit tenir compte de la direction des vents dominants nord-est générateurs de courants éoliens d'ensablement. Aucune construction ne doit être envisagée dans le talweg étant donné que ce dernier constitue un couloir privilégié des mouvements d'ensablement. Quelques exceptions pourront être faites pour les vides aménagées par la corniche de la *hamada* considérées comme épargnées du danger grâce à l'aspect indenté du relief.

9.3. Echelle méso/micro : Mesures de protection

9.3.1. Délimitation des zones d'action

Cette mesure concerne les zones exposées aux mouvements éoliens d'ensablement et qui attestent d'une forte vulnérabilité au phénomène d'ensablement. Suivant la topographie et le relief de la région, ces zones sont scindées en deux catégories à savoir : dépression et plateau. Nous développons pour chacune de ces catégories et en fonction de leurs spécificités (relief, topographie et mouvements éoliens d'ensablement) les méthodes et outils les plus appropriées pour lutter efficacement contre le phénomène d'ensablement.

a. Zones situées dans les dépressions de l'Erg Occidental

Cela concerne essentiellement, les agglomérations et oasis implantées dans les dépressions en position latérale et qui ont comme protection naturelle des contre-dunes se présentant sous

forme de *barkhanes* coalescentes. En effet, les investigations du terrain ainsi que l'examen des cartes satellitaires mettent en évidence la présence de ceintures latérales (contre-dunes) bordant les différentes dépressions de la zone d'étude. Ce type d'édifices joue un rôle de barrière de protection au pied desquelles des oasis et des groupements humains se sont implantés.

Au premier abord, il est difficile d'imaginer que ces édifices jouent un rôle de protection, alors que l'on sait que les *barkhanes* sont des édifices dunaires très mobiles et peuvent constituer un danger pour les établissements humains et voies de communication. Toutefois, ce qui est important à signaler c'est la manière de positionner ces implantations par rapport à l'orientation et la direction du vent dominant dans la région. En effet, la direction du courant éolien dominant est nord-est/sud-ouest. Le vent modèle la morphologie des édifices *barkhaniques* et les fait progresser en dunes linéaires conformément à cette direction. La position des anciennes implantations humaines démontre une connaissance parfaite du mouvement éolien d'ensablement dans la région car les implantations se positionnent de manière parallèle aux contre-dunes et ne constituent à ce stade aucun obstacle à l'écoulement du flux éolien d'ensablement.

En revanche, dans certains cas le facteur éolien est négligé par méconnaissance ou perte de savoir-faire. Les nouvelles extensions sont dressées contre la direction des vents dominants constituant des obstacles à la dynamique éolienne des dunes. A titre d'exemple, nous avons le cas des oasis de Sidi Moulay Mohamed et Touat-Intebou qui ont été implantées en plein couloir éolien provoquant ainsi un dépôt progressif à tel point que l'assiette d'implantation se trouve aujourd'hui coupée en deux par le développement des bras sableux (*Drâas*) qui tendent à joindre les deux contre-dunes opposées.

Par rapport à ce cas de figure, nous proposons deux mesures à prendre en considération :

1- Veiller à ce que le développement des agglomérations et/ou des oasis se fasse toujours parallèlement à la direction des vents dominants nord-est/sud-ouest afin de ne constituer aucun obstacle sur le trajet des flux éoliens d'ensablement.

2- Stabiliser certains périmètres constitués de dunes pyramidales et *barkhanes* par la mise en place de système de quadrillage. Son dimensionnement prend en compte l'intensité du vent à neutraliser, la pente des versants, la forme des dunes et la hauteur du maillage, variable avec la

nature des végétaux employés : stipes de palmiers ou palme, Alfa (*Stipa Tenacissima*), ...etc. A titre d'exemple, au Maroc, les dimensions moyennes des mailles utilisées sur les dunes présahariennes sont de 10 x 15m à leur sommet, de 3 x 3m sur les versants et de 4x4m dans les dépressions (F.A.O, 1988).

b. Zones situées sur la *hamada*

Ces zones ont comme assise la *hamada* (plaine de M'guiden) et sont comprises entre la zone située au pied du plateau de Tademaït (fig.192) et la limite sud-est de l'Erg Occidental. Elles sont épargnées par l'ensablement massif grâce à leur surface plane dépourvue d'obstacles naturels qui pourraient perturber l'écoulement des flux éoliens et provoquer l'ensablement. Jusqu'à présent, ces zones sont considérées comme zones « d'ablation », car permettent au sable de se déplacer sans pour autant se déposer. Cependant, ce n'est pas toujours le cas, l'installation humaine récente dans la région par des établissements érigés en place a rompu ce processus naturel d'ablation. Les constructions constituent souvent une rugosité qui provoque une augmentation de la perte de charge et une réduction de la vitesse du vent, favorisant ainsi le dépôt de sable et la formation des dunes. Le résultat est parfois alarmant notamment dans certains *ksour* à l'image de Badriane ou la mise en place d'*afregs* génère une importante dune de sable qui depuis ne cesse de prendre du volume et gagner du terrain jusqu'à envahir les habitations limitrophes. Lorsqu'une telle étape d'ensablement est franchie, il est bien difficile voire impossible de revenir au stade initial, c'est un processus irréversible.

Les orientations à prendre en considération pour un aménagement durable dans ces zones concernera à la fois des mesures de lutte mécanique (quadrillage, défilement, plantation végétale....etc.) dans le but de stabiliser le sable à sa source ou de le dévier par rapport aux installations humaines en danger.

Certaines mesures relevant de la méthode aérodynamique pourraient concerner les nouveaux programmes d'aménagement envisagés à ces endroits hostiles. Elles consistent en l'intégration et la mise en place à l'échelle du plan masse de certains rapports géométriques et morphologiques relatifs à la production d'effets aérodynamiques tel que « Venturi » et « canalisation ». Ces mesures se sont révélées –suites à nos expérimentations- très pertinentes en termes d'évacuation par la force du vent des grains de sable accumulées au niveau du plan masse.

Nous synthétisons ci-dessous chacune des deux mesures dites « mécanique » / « aérodynamique » ainsi que les mécanismes et les conditions de leur mise en œuvre pour de meilleurs résultats :

9.3.2. Mesures de lutte mécanique

La lutte mécanique implique de réduire le phénomène d'ensablement suivant différentes méthodes et dispositifs qui diffèrent suivant le but recherché (réduction, blocage ou déviation) :

- Quadriges, plantation, mulching...etc., afin de maintenir sur place les particules. Ceci convient pour les zones de départ du sable (bilan sédimentaire négatif) et les aires de dépôt (bilan sédimentaire positif) qui par changement saisonnier du régime éolien peuvent devenir à leur tour des zones de départ.
- Palissades d'arrêt (ou de limitation) : cela convient pour les aires d'ablation afin de réduire le volume de sable en déplacement, ou pour forcer l'accumulation en amont des aires aménagées à protéger.
- Palissades déviateuses (défilement) : elles sont préconisées dans les couloirs interdunaires en des points assez éloignés des agglomérations afin de dévier les courants éoliens chargés de sable en les délestant de leurs particules qui viendront alimenter les édifices dunaires localisés latéralement (*sifs*).

La mise en place du système de protection via la technique de lutte mécanique requiert certaines conditions qui diffèrent d'un endroit à l'autre suivant le régime éolien.

- Dans les endroits où le vent est monodirectionnel, le système de palissade d'arrêt ou « *afregs* » comme on l'appelle localement est recommandé. Cette structure agit comme une barrière perpendiculaire à l'axe du vent dominant afin de créer une contre-dune artificielle pour annihiler le processus d'ensablement.
- Dans les endroits où le vent est multidirectionnel comme dans les zones couvertes de dunes étoilées (*ghourd*) et *barkhaniques*, les palissades doivent être mises en place en zigzag ou en quadrillage pour contrer les vents provenant de plusieurs directions.

- Dans les endroits où le vent est multidirectionnel avec possibilité de vents violents et formation de tourbillons, le meilleur dispositif serait une combinaison de digues en palissades et un quadrillage. En effet, on peut prévoir de couvrir des parties de l'espace compris entre deux palissades successives grâce à un réseau de carrés ou des losanges. On peut même proposer des haies vives en plantation d'arbrisseaux, ce qui n'est pas évident dans le cas nous concernant puisque le Gourara est un milieu désertique où les conditions climatiques sont extrêmes et par conséquent la réussite de telle tâche exige énormément d'investissements tant humains que financiers. C'est plutôt la présence d'oasis en nombre suffisant dans la région qui offre un matériau adapté dans la lutte contre l'ensablement à savoir ; la palme. La disponibilité d'un matériau de ce type est une aubaine pour envisager des aménagements peu coûteux à base de palme sèche pour la confection de palissades.

La technique de lutte mécanique diffère d'un site à l'autre suivant la nature des dunes. Dans certains endroits nous aurons besoin d'une « limitation » du volume sédimentaire, d'autre fois, une simple « déviation » de ce dernier suffira largement pour épargner un site de l'ensablement et enfin la « stabilisation » est employée pour maintenir en place des dépôts sédimentaires de grands volumes (*barkhanes, ghourd.....etc.*) et empêcher leur déplacement sous l'influence des vents. Ainsi, et dans certains cas la combinaison de plusieurs techniques est recommandée.

Au final, le choix d'une technique par rapport à l'autre est tributaire de certains facteurs à savoir : la taille du périmètre à traiter, le type de dunes, les données relatives aux mouvements éoliens d'ensablement et la nature et disponibilité des matériaux, d'où l'intervention du facteur coût qui peut parfois être discriminant dans le choix de la technique. De ce point de vue nous considérons que l'efficacité d'une technique n'est pas généralisable mais reste plutôt locale. En ce sens, le recours à l'avis des collectivités locales et des habitants en la matière -à travers un retour d'expérience sur les différentes techniques employées et l'évaluation des résultats obtenus- pourra contribuer à déterminer les priorités en termes du choix de la technique et méthode appropriées.

9.3.3. Méthode aérodynamique : rapports géométriques et morphologiques

Dans les zones situées sur la *hamada*, surtout celles qui se trouvent dans le couloir éolien (nord-est), le risque d'ensablement est d'autant plus accru que l'activité humaine crée des obstacles ou augmente la rugosité (constructions, agriculture, axes de communication) ; tout

aménagement nouveau doit permettre la circulation du sable, en évitant le blocage des particules et la concentration des dépôts. Dans ce sens, et suite à nos expérimentations en matière de modélisation CFD, certaines mesures relatives à la conception de la forme urbaine pour la prise en compte de la dynamique éolienne ont été développées.

La modélisation CFD a consisté à définir des rapports géométriques et morphologiques à privilégier dans les zones où il y a un risque potentiel d'ensablement. Ces rapports dimensionnels tiennent leur intérêt dans l'effet aérodynamique généré (Venturi/canalisation) qui permettra de lutter contre les dépôts de sable au sein du plan masse.

L'intégration de l'effet Venturi et/ou celui de canalisation a révélé des résultats fort appréciables en termes d'amélioration de la circulation des champs aérauliques, notamment l'accélération du flux d'air incident et le maintien de sa vitesse tout au long de son parcours.

Nous tenons à signaler que le procédé aérodynamique que nous avons conçu reste valable uniquement pour les zones à faible rugosité, car dans les zones où la rugosité est importante (relief contrasté), la présence d'obstacles modifiera les champs aérauliques d'une manière aléatoire et compliquera davantage toute prévision des mouvements éoliens d'ensablement.

- Principaux rapports géométriques et morphologiques à privilégier pour produire l'effet « canalisation » au sein d'une forme bâtie :

a. Organisation en quinconce des masses bâties

Les modèles organisés en quinconce présentent de bons résultats en termes de circulation du flux d'air avec une fluidité analogue à celle générée par des volumes isolés. En effet, le modèle développé avec un rapport ($H/D=0.25$) et un rapport de porosité ($L/W=0.66$) réduit significativement les zones de turbulence et permet au flux d'air incident de maintenir une vitesse supérieure au seuil de saltation, ce qui peut visiblement réduire toute éventualité de dépôt de sable au sein du plan masse. Ainsi, dans ce cas de figure, la forme profilée pour l'ensemble des volumes de l'unité urbaine joue un rôle considérable dans l'évacuation de la pression de l'air autour des volumes. De cette manière, les zones de sillage et l'effet de masque qui peuvent provoquer la stagnation des grains de sable disparaissent pour laisser place à un régime laminaire.

Cependant, cette organisation en quinconce et le respect stricte des zones de sillage implique de ne positionner aucun bâtiment dans la zone critique de sillage d'un autre bâtiment, ce qui induit de très faibles densités. La conception dans ce cas est limitée et incite à la conception de formes urbaines assez « lâches ». Il peut s'agir de zones résidentielles avec des groupements collectifs entourés de grands jardins ou espaces publics sans masse végétale dense. Nous aboutissons dans ce cas à des zones discontinues au niveau du bâti ce qui est un peu contradictoire à l'aspect architectural et urbanistique de la région d'étude et qui pourra ainsi amener à des difficultés économiques, environnementales ou sociales tel que ;

- Une forte consommation de terrains, avec des zones éparses alors que la majorité des constructions dans les régions arides doivent se présenter sous formes d'unités compactes à l'image des *ksour* pour une bonne protection thermique.
- Une réduction des possibilités de rencontre, d'échange, de mixité sociale entre les habitants ce qui n'arrange pas la situation de la région de Gourara ou la cohésion sociale est une règle vitale pour la vie et le maintien du système oasien.
- La lourde mise en œuvre de voiries et réseaux nécessaires à l'implantation des habitations : route, chemins d'accès, alimentation en eau potable et assainissement, réseaux électriques, réseaux téléphoniques ...etc.
- Moyens de transports en commun peu rentables à cause du manque de densité ce qui incitera à l'usage de la voiture et induira une gestion des flux et d'aires de stationnement.

De ce point de vue, et au vu des difficultés que peut rencontrer un aménagement de faible densité dans la région d'étude, des plans masses plus denses pourraient constituer une alternative et sont recommandés dans ce cas. Dans ce sens, nous avons développés des modèles en plan régulier ou en forme Venturi qui peuvent présenter une densité beaucoup plus importante pour pallier cette problématique.

b. Organisation en plan régulier

Le modèle développé en plan régulier avec un rapport ($H/D=3$) avec un rapport de porosité ($L/W=0.66$) présente une densité plus élevée que celle du modèle en quinconce. Grace à un

rapport ($H/D=3$) synonyme de volumes serrés ce modèle peut assurer un flux rasant et permet d'avoir un écoulement laminaire avec une disparition de l'effet de masque. Ainsi, le vent aura tendance à circuler librement d'une manière laminaire entre les rangées de volumes sans pour autant perdre sa vitesse initiale. En revanche, quelques règles sont à respecter pour optimiser l'efficacité du modèle et assurer de résultats satisfaisants :

- Eviter les décrochements : toute construction fait partie du parcours traversé par le vent doit être dépourvue de tout décrochement pouvant perturber les champs aérauliques afin d'éviter la création de tourbillons et la stagnation du sable.
- Définir une porosité (ou perméabilité) appropriée pour la façade urbaine au vent : les volumes de la façade au vent doivent disposer d'une certaine perméabilité de l'ordre $L/\Delta=0.66$ (avec L , largeur du bâtiment, et Δ , distance entre bâtiments dans le sens perpendiculaire à la direction du vent). D'après nos expérimentations et références théoriques (Naaim-Bouvet, 2003), ce rapport permet de réduire le volume de dépôt en amont de la façade au vent à travers une dissipation du vent au travers les distances entre bâtiments.
- Profiler la forme des volumes au vent : une forme angulaire en V permet l'évacuation de la pression positive piégée en amont des volumes et participe à la disparition des zones de sillage qui induisent généralement le dépôt des grains de sable.

- Principaux rapports géométriques et morphologiques à privilégier pour produire l'effet « Venturi » au sein d'une forme bâtie :

a- Effet Venturi

Pour la production d'un effet Venturi à l'échelle d'une rue, Gandemer (1976) recommande que la largeur de la rue (W), soit de deux fois la hauteur (H) des parois de la rue qui à leur tour doivent avoir une hauteur minimale de 6m et une porosité n'excédant pas 5%. Suite à notre expérimentation en CFD, il s'est avéré que le modèle de plan masse qui dispose d'un rapport $W=2H$ (avec H , hauteur des volumes et W , largeur du col venturi) demeure celui qui présente une meilleure accélération du flux d'air incident. Ainsi, pour ce cas de figure, la vitesse maximale peut être obtenue à partir d'un angle d'incidence (θ) = 0° .

Enfin, une forme profilée (angulaire) des volumes qui constituent la façade au vent permet de réduire considérablement la pression exercée par le vent, ce qui réduira systématiquement les zones de sillage autour des volumes et empêchera de cette manière la stagnation des grains de sable et la formation de dépôts.

b- Effet combiné Venturi-Canalisation

En général, nous avons constaté que les formes qui ont été dotés d'une forme venturi associée à une canalisation présentent de meilleures performances dans l'empêchement de la formation des dépôts de sable. En effet, ce modèle à double effet aérodynamique permet aux grains de sable entrant de gagner en vitesse suite à un effet Venturi au départ, puis de préserver cette vitesse tout au long de leur parcours grâce à l'effet de canalisation. Toutefois, et pour optimiser l'efficacité du modèle, les parois de la rue ne doivent en aucun cas disposer d'un pourcentage de porosité supérieure à 5% de leur surface globale. De cette façon, le flux d'air entrant pourra traverser le modèle sans pour autant subir trop de perturbations (décélération) qui peuvent entraver le déplacement des grains de sable déjà en mouvement.

Sur un plan aérodynamique ; la combinaison de l'effet Venturi et canalisation permet de :

- Procurer une survitesse au flux d'air incident qui peut améliorer davantage sa vitesse d'arrachement grâce au quelle, les grains de sable déjà déposés sur le sol pourront se remettre en mouvement et s'évacuent par la force du vent en dehors du périmètre urbain.
- "Booster" le régime du vent transporteur et maintenir de ce fait les grains de sable déjà en mouvement afin de parcourir une distance encore plus importante que celle prévue. La vitesse minimale ne doit pas être inférieure au seuil de saltation (4.5m/s).

10. CONCLUSION GENERALE

10.1. Introduction

L'ensablement est un mécanisme complexe d'accumulation sableuse due à un arrivage de particules, grain par grain, mobilisées par la « saltation », et à un arrivage massive sous forme de dunes de la famille des *barkhanes* ou des *sifs*. Il peut aussi s'agir d'une réactivation éolienne *in situ* (autochtone) suite à un mouvement de saltation ou ex-situ (allochtone) par les vents de sable pour des dunes auparavant fixées par une paléo-pédogénèse (*erg*) ou une couverture végétale. L'ensablement n'est pas seulement un processus physique parmi les nombreux autres processus naturels de dégradation, mais un phénomène provoqué ou aggravé par les activités humaines.

Tout au long de cette recherche nous nous sommes rendu compte de la gravité de l'incidence du problème d'ensablement sur le développement économique et sociale de la région de Gourara. Dans un tel espace « *erguien* »¹⁰⁷ le sable abonde en surface et au-delà du défi qu'il représente pour tout acte d'aménagement il constitue une menace pour les infrastructures et les établissements déjà existants. Si aucune mesure de protection n'est entreprise dans un proche avenir, une bonne partie de ces installations humaines déjà en péril menace de disparaître à jamais. Nous comprenons vite l'importance de la prise en compte du phénomène d'ensablement dans le développement urbain de la région et l'urgence qui impose de trouver des solutions durables aux dangers qu'il représente.

La lutte contre l'ensablement a été reléguée parmi les combats sectoriels. Or elle s'avère être un combat global dans la lutte contre la désertification car elle est un composant essentiel du maintien : 1) de la sécurité alimentaire par la protection des palmeraies contre la désertification, 2) de la sécurité de l'habitat lorsque celui-ci se trouve sur les trajets de transport éolien du sable et, 3) de la sécurité des voies de communication. Elle se révèle donc une partie intégrante des actions de développement à entreprendre dans toute région soumise au risque d'ensablement et prend dans les cas extrêmes comme celui de Gourara, une place prioritaire.

Autant l'aménagement des temps lointains avait mis en place des systèmes de protection plus ou moins efficaces -conçus empiriquement par des modestes paysans pour la protection des terroirs et maisons de l'ensablement- l'aménagement moderne révèle des faiblesses indéniables dans la maîtrise du milieu. A titre d'exemple, l'ensablement des écoles construites en des lieux non ensablés au départ, mais sans qu'ait été prévue une quelconque protection, ou

¹⁰⁷ Qui appartient à l'Erg Occidental.

encore l'exemple du village socialiste de M'guiden dont le plan avait pourtant été cité en modèle : une disposition en spirale des maisons était censée provoquer des tourbillons, donc un effet de chasse-sable ! Ces exemples démontrent à l'évidence que tant que l'aménagement ne sera pas conçu dans sa globalité, le danger persistera.

La lutte contre l'ensablement est d'autant plus justifiée, son intérêt d'autant plus grand, qu'elle est possible dans l'immédiat à la condition de bien comprendre la dynamique en fonction des situations locales et régionales, du système d'action éolienne en cause et de bien définir les échelles optimales d'intervention (micro, méso et macro) et les disponibilités naturelles (présence de l'eau et du couvert végétal) et humaines nécessaires pour décider de la nature de l'action à entreprendre (lutte biologique, mécanique ou entretien...etc.).

Aujourd'hui de par le monde, l'intégration de la dimension du risque naturel dans les projets d'urbanisme prend de l'ampleur. La multiplication de phénomènes climatiques extrêmes qui découle du réchauffement climatique global pousse les experts à repenser l'aménagement du territoire en fonction des aléas naturels. Par exemple, la tempête Xynthia¹⁰⁸ (2010) a frappé plusieurs pays européens, elle a entraîné en France des inondations très importantes du littoral, et a occasionné de nombreuses victimes humaines ainsi que des dégâts matériels importants, ce qui a amené à poser la question de savoir s'il est concevable d'urbaniser dans des zones inondables ! Les scientifiques ont montré que les fonctions de protection et de prévention sont parfois à privilégier dans les décisions d'aménagement du territoire. C'est par exemple le cas du bassin de la Durance¹⁰⁹ en France où la morphologie des plantes est utilisée pour lutter contre les inondations.

C'est parce que nous sommes convaincus que tout développement économique dans les régions arides doit d'abord passer impérativement par la mise en place d'une politique pérenne de protection contre les risques naturels que nous nous rendons compte de la nécessité de l'intégration du risque d'ensablement dans l'aménagement et la planification à travers l'élaboration d'un PPR_N¹¹⁰ pour tenir compte du phénomène d'ensablement.

¹⁰⁸ La tempête Xynthia est une dépression météorologique majeure ayant frappé plusieurs pays européens entre le 26 février et le 1^{er} mars 2010, causant un épisode de vents violents qui a fait un bilan de 53 morts et un dégât matériel d'environ 1,5 milliard d'euros.

¹⁰⁹ La Durance est la plus importante rivière de France, située en région de Provence et se jetant dans le Rhône.

¹¹⁰ Le plan de prévention des risques naturels (PPR_N) est un document réalisé par l'Etat qui réglemente l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis. Voir annexe 3 pour plus de détails sur les étapes d'élaboration d'un PPR_N

Fruit d'un long travail de recherche et d'expériences capitalisées lors du projet de recherche CMEP (Ex-Tassili)¹¹¹ ayant eu comme cas d'étude la zone de Gourara, ce travail synthétise clairement les différentes possibilités techniques d'aménagement et de conception architecturale pour juguler le phénomène d'ensablement tant à l'échelle du territoire qu'à l'échelle de l'unité urbaine.

10.2. Retour sur les résultats

La présente recherche propose un modèle d'adaptation de la ville saharienne au phénomène d'ensablement ainsi qu'un ensemble de règles en matière d'aménagement, de construction et de gestion des zones à risque face au phénomène d'ensablement. Ces règles visent une planification globale et concernent de ce fait les trois échelles fortement imbriquées Macro, Méso et Micro :

1. Sur le plan Macro, et à la lumière de l'analyse du relief du territoire Gourari nous signalons l'urgence et la nécessité d'établir une carte d'aléa d'ensablement. Elle consiste en une délimitation des zones en fonction de leur degré d'exposition au phénomène d'ensablement et permet d'évaluer leur degré de vulnérabilité. Celui-ci qui diffère d'une zone à l'autre est en rapport avec certains paramètres tel que le type de relief, le bilan sédimentaire (positif ou négatif) et la typologie de l'édifice dunaire présent à l'endroit (*ghourd, barkhane, sifs...etc.*). En outre, cette carte constituera un outil informatif sur l'état du relief de la région de Gourara, et reflètera la réalité du terrain et permettra de ce fait, de prescrire des règles d'aménagement en fonction de la nature topographique de la zone en question. Elle devra être actualisée en permanence afin de tenir compte des éventuelles changements du relief dans la région (avènement massif de dunes de sable...etc.). Dans ce sens, le recours au SIG (système d'information géographique) constitue un outil incontournable pour l'alimentation et l'exploitation de la carte d'aléa d'ensablement.

2. Sur une échelle Méso/Micro, notre recherche montre l'intérêt que peut porter la modélisation numérique CFD pour la lutte contre l'ensablement à l'échelle du quartier et celui du bâtiment. Les résultats obtenus en termes de modélisation démontrent que la morphologie urbaine ainsi que la forme du bâtiment ont un rôle essentiel à jouer dans le renforcement de la résilience face à l'ensablement. Les résultats obtenus dans la présente recherche peuvent être

¹¹¹ Projet CMEP (ex-Tassili) n°09MDU788 (2009-2013). « Futurs des villes face aux changements climatiques : vulnérabilité et adaptation des sociétés et des milieux oasiens du Touat-Gourara, en Algérie ». Collaboration entre les deux laboratoires LAE-EPAU d'Alger et LRA-ENSA de Toulouse.

généralisés à d'autres régions du pays où les phénomènes d'ensablement abondent sous les mêmes conditions climatiques.

Enfin, la lutte contre le phénomène d'ensablement ne peut être seulement technique, elle doit aussi être socio-économique : il serait erroné de croire que les causes et les mécanismes de la mobilisation des sables puissent être combattus par des moyens uniquement matériels. Certes, les stratégies de lutte contre les effets du vent comportent des méthodes physiques et des méthodes biologiques de fixation mais ne peuvent réussir que complétés par une action culturelle et sociale soutenue, ainsi que d'une stratégie d'aménagement en vue d'une prévention en amont de tout acte d'urbanisation ou d'aménagement.

Dans ce sens, les solutions proposées par cette recherche, carte d'aléa d'ensablement et rapports dimensionnels de modèles de formes urbaines développés grâce à la modélisation CFD peuvent servir de base à l'établissement d'un plan de protection contre le risque naturel d'ensablement (PPR_N) qui pourra réglementer les nouvelles constructions et aménagements dans les zones à haut risque. En outre, il est important de veiller à ce que les nouvelles constructions n'aggravent pas le phénomène (facteurs de risques). Ainsi, les règles d'un PPR_N s'imposent aux constructions futures, comme aux constructions existantes, mais aussi selon les cas aux différents usages possibles du sol : activités touristiques, de loisirs, exploitations agricoles ou autres. Tout au plus, il peut constituer un outil d'aide à la décision en termes d'aménagement du territoire.

L'aide à la décision s'adresse généralement aux intervenants du processus de décision. *«Elle est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision. Elle comporte des éléments concourant à éclaircir la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un choix de façon à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part.»* (Roy, 1985)

Dans ce contexte, et à travers cette recherche nous nous proposons d'accompagner les architectes, urbanistes et designers urbains au rang d'acteurs potentiels de l'atténuation et de l'adaptation au phénomène d'ensablement. Le principe d'un modèle d'adaptation que nous proposons consiste à orienter, non à diriger, les acteurs d'aménagement des villes arides soumises aux problèmes d'ensablement à travers la proposition d'un ensemble d'orientations

en termes d'aménagement et de conception de formes urbaines pouvant juguler le phénomène d'ensablement.

10.3. Limites et difficultés de la recherche

La plupart des travaux ayant fait référence au sujet d'ensablement s'intéressent principalement à la question d'ensablement comme phénomène physique naturel, son impact sur les écosystèmes et sur la recrudescence de la désertification. Or, le sujet de notre présente recherche se voulait résolument original à travers cette question de la ville saharienne confrontée au phénomène d'ensablement. Dans l'état des savoirs, une seule étude intégrant la dimension de l'espace bâti a été trouvée, il s'agit de celle de Duchemin (1958). Malheureusement celle-ci est restée très sommaire sur la question des règles de conception des formes bâties adaptées à l'ensablement. L'originalité de notre recherche trouve son sens aussi dans l'interdisciplinarité¹¹² adoptée, et c'est là où réside toute la difficulté. Le recours à la démarche interdisciplinaire s'est imposé pour notre recherche afin d'expliquer par la confrontation interdisciplinaire ce qui reste inexplicé dans notre propre discipline.

L'intégration de ces champs disciplinaires chronophages auxquels nous ne sommes pas prédisposés à maîtriser à l'image de la modélisation CFD nous a coûté beaucoup de temps et d'investissement. L'accueil offert par le laboratoire LRA¹¹³ de Toulouse entre 2014 et 2016 dans le cadre de la bourse de finalisation de doctorat a été une réelle occasion pour acquérir auprès des spécialistes les bases de la modélisation CFD nécessaires pour résoudre les équations complexes de déplacement des grains de sable dans la nature et au sein d'un espace bâti.

En ce sens, l'articulation entre les différentes disciplines abordées (architecture, urbanisme, mécanique des fluides, météorologie....etc.) était un exercice difficile et de longue haleine. Cependant nous avons réussi à atteindre, malgré quelques maladresses assumées, les objectifs que nous nous sommes assignés au départ et nous sommes parvenus à valider les hypothèses énoncées. Le chapitre conclusif et les conclusions émises au niveau des différents chapitres développés, résument les résultats obtenus et valident cette recherche doctorale que l'on peut qualifier d'interdisciplinaire.

¹¹² L'interdisciplinarité a pour but d'élaborer un formalisme suffisamment général et précis pour permettre d'exprimer dans ce langage unique les concepts, les préoccupations, les contributions d'un nombre plus ou moins grand de disciplines. Glykos (1999)

¹¹³ LRA- Laboratoire de Recherche en Architecture. Site web : <http://lra.toulouse.archi.fr/lra>

Par ailleurs, il serait faux de croire que l'on peut transporter le sable sur des centaines de mètres voire des kilomètres au sein d'un espace bâti. L'expérimentation nous a montré que les modèles développés se limitent à quelques mètres et peuvent avoisiner les cent mètres maximum. Au-delà de cette distance, il serait difficile, voire impossible de maintenir une pression aéraulique et une vitesse d'air constantes (le vent est d'une nature instantanée et intermittente). Ceci nous donne une idée sur la grandeur des modèles développés et qui peuvent présenter des résultats performants en intégrant la force du vent (effets aérodynamiques performants). Cet aspect a été développé pour des modèles seulement en plan régulier (Mestoul et al., 2016). D'autres modélisations doivent être établies pour des modèles avec différentes organisations spatiales et différents rapports géométriques.

Ainsi, la porosité des modèles développés nous laisse croire que ces modèles sont de faibles densités et ne répondent pas au caractère dense du tissu local de la région. En effet, l'intégration d'un tissu dense est possible à l'échelle de l'ilot pour certaines formes issues de notre travail de modélisation à l'image de celles intégrant l'effet Venturi, car, selon Merlin, et al., (2000), un ilot sera dit à tissu dense ou serré, si les bâtiments, compris dans ses différentes parcelles, sont jointifs et constituent des agglomérats continus. Donc l'ilot sera l'unité urbaine qui nous permettra de basculer vers un tissu dense à partir des modèles développés.

10.4. Perspectives envisagées

Cette recherche ne prétend pas avoir suffisamment répondu à certaines questions comme l'intégration d'une architecture locale au niveau des modèles proposés qui demeure à solutionner. Nous nous sommes contentés de modéliser et dimensionner des volumes "austères", exempts de tout ornement stylistique de la région d'étude. Dans cette présente recherche la priorité était accordée à la question de l'écoulement des mouvements aérauliques d'ensablement au détriment de ces aspects d'ordre stylistique. Nous considérons que dans une région où le phénomène d'ensablement est aussi prégnant comme le Gourara, la priorité doit être accordée à une problématique qui puisse traiter de l'atténuation de l'ampleur de la catastrophe dans un premier temps pour songer par la suite à des problématiques d'ordre secondaire.

De même, dans cette étude, les effets de l'adaptation climatique ne sont pas considérés. Sur le plan thermique, l'influence du régime des écoulements d'air sur le confort thermique n'a pu être mise en évidence. Son analyse représentera une information supplémentaire précieuse pour la compréhension des échanges thermiques résultants et la prise en charge du confort

thermique dans de tels climats arides. Des expérimentations en simulation numérique portant sur l'influence de la dimension aéraulique sur le confort thermique des usagers seront nécessaires. Elles permettront de dégager des considérations à prendre en charge pour un confort propre au climat chaud et sec du Gourara.

Enfin, les résultats de cette recherche portent les prémices d'une future contribution qui portera sur l'étude des autres sous-problématiques sous-jacentes liées au modèle de ville saharienne résiliente vis-à-vis de l'ensablement que l'on propose. Ces sous-problématiques peuvent concerner l'amélioration des conditions de confort extérieur et intérieur, l'îlot de chaleur urbain, la réduction des consommations énergétiques, la réduction des émissions de gaz ...etc. les expérimentations seront effectuées en modélisation numérique CFD sous Fluent qui est un outil numérique très performant. Toutefois, la validation de certains de ces paramètres nécessitera impérativement de confronter les résultats de modélisation CFD avec ceux d'une simulation en soufflerie atmosphérique ou de mesures in-situ.

Conscients de la difficulté matérielle et financière que peut induire le choix de l'un de ces deux procédés, nous espérons que cette modeste recherche puisse avoir un écho positif auprès de nos décideurs et acteurs économiques afin de donner une suite opérationnelle à cette recherche.

BibliographieNote :

- *Toutes les références incluses dans cette bibliographie n'ont pas systématiquement fait l'objet d'appel dans le texte, mais ont néanmoins contribué à la réalisation de ce travail.*
- *Les références dans le texte sont notées suivant le système Harvard.*
- *Les références sont regroupées par thème afin de faciliter leur exploitation par le lecteur.*
- *Les références sont classées et présentées selon le style APA disponible sur Microsoft Word (V.2014) (Voir annexe n°04 - style APA). Le style APA intègre strictement la norme ISO 690 (Z 44-005).*

❖ Ensablement : aspect géomorphologique et physique, méthodes de lutte...etc.

1. ALALI , A., & BENMOHAMMADIA, A. (2013, Décembre). L'ensablement dans la plaine de Tafilalet (sud-est du Maroc). *Larhyss Journal*(n°16), pp.53-75.
2. BAGNOLD, R. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. London: Chapman et Hall.
3. BARRE, A. (August 2008). Sols en mouvement : la lutte contre l'ensablement à Yabari, Niger. *AGRIDAPE, Volume 24*(n° 2). Consulté le 02 10, 2016, sur <http://www.agriculturesnetwork.org/magazines/west-africa/des-sols-vivants-pour-une-agriculture-plus>
4. BELLATRACH. (2008). *Daira de Charouine; processus et méthode de lutte contre l'ensablement*. Daira de Charouine, PNUD. Consulté le 02 03 2014 sur <https://www.yumpu.com/fr/document/view/6362550>
5. CLOS-ARCEDEC, A. (1969). *Etudes de photo-interpretation, n° 4, essai d'explication des formes dunaires sahariennes*. l'Institut géographique national-IGN.
6. COOKE, R. U., WARREN, A., & GOUDIE, A. S. (1993). *Desert Geomorphology*. (C. Press, Éd.)
7. COTE, M. (2005). *La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien*. Paris, Aix-en-Provence: Karthala; IREMAM.

8. DE MARTONNE, E. (1926). Aréisme et indice d'aridité. *Académie des Sciences*, 181, pp. 1395-1398.
9. DE MORAES FRANKLIN, E. (2008). Dynamique de dunes isolées dans un écoulement cisailé. *Doctorat en Mécanique des Fluides-MEGep, Université de Toulouse*. Toulouse, France.
10. DEMANGEOT, J., & BERNUS, E. (2001). *Les milieux désertiques*. Paris: Armand Colin/HER.
11. DJEBBARI, A. (1993). DEA (Diplome d'Etudes Approfondies). *Typologie et étude aérodynamique des places des Bastides: influence de l'orientation de la place vis à vis des vents dominants*. Nantes, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, France.
12. DORSOUMA , A.-H., & REQUIER-DESJARDINS , M. (2008, 04). Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique : s'adapter, une approche intégrée. *Vertigo-la revue en sciences de l'environnement*, 8(2). Consulté le 08 21, 2014, sur <http://vertigo.revues.org/5356#tocfrom1n1>
13. DUBIEF, J. (1952). Le vent et le déplacement du sable au Sahara. *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes, Vol.8, 123-164*.
14. DUBIEF, J. (1963). *Le climat du Sahara (Vol. 2)*. (I. d. sahariennes, Éd.) Alger, Algérie.
15. DUCHEMIN, G. J. (1958). *Essai sur la protection des constructions contre l'ensablement à Port-Etienne (Mauritanie)* (Vol. T.X.X, sér A n°2). (B. d. (IFAN), Éd.) Mauritanie.
16. DURAND, J. H. (1988). *Arreter le desert*. Paris: PUF.
17. ECHALLIER, J. C. (1972). *Villages désertés et structures agraires anciennes du Touat-Gourara: Sahara algérien*. (A. e. graphiques, Éd.) Paris.
18. FAO. (1988). *Manuel de fixation des dunes. Cahiers Conservation*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
19. FAO. (2010). *Lutte contre l'ensablement. L'exemple de la Mauritanie*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.

20. FRYREAR, D. W., STOUT, J. E., HAGEN, L. J., & VORIES, E. D. (1991). Wind erosion: Field measurement and analysis. *Trans. ASAE*, 31(1), 155-160.
21. GOUDIE, A. S. (2013). *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. Cambridge University Press.
22. GUTIERREZ, M. (2012). *Geomorphology*. CRC Press.
23. KADIB, A.-L. (April 1964). *Calculation procedure for sand transport by wind on natural beaches* (Vol. MISCELLANEOUS PAPER No. 2-64). California, University of California: U.S. Army-Coastal Engineering Research Center (CERC).
24. KOK, J. F., PARTELI, E. J., MICHAELS, T. I., & BOU KARAM, D. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics*, 75(10), 72pp.
25. LAKHDARI, F., SEBAA, A., BERROUSSI, S., BOUHANNA, M., BOULGHOBRA, N., HADRI, T., . . . BENZAOU, T. (2015). *Guide des techniques de lutte contre l'ensablement au Sahara Algérien*. Touggourt, Algérie: CRSTRA. Consulté le 12 2015, 23, sur <http://www.crstra.dz/telechargement/ouvrages/guide-des-techniques-de-lutte-contre-l-ensablement-au-sahara-algerien.pdf>
26. LE FOL, E. (2008, 10 06). *Comment se forment les dunes ?* Consulté le 03 17, 2013, sur Sciences de la vie et de la terre: <http://www.svt-monde.org>
27. LIVINGSTONE, I., & WARREN, A. (1996). *Aeolian Geomorphology*. Harlow, England: Longman.
28. LOUIS DUBREUIL, J. P. (1984). *Les Dunes de Bretagne : aménagement et gestion*. (D. à. Ministère de l'environnement, Éd.) Paris.
29. MAINGUET, M. (1995). *L'homme et la sécheresse*. (A. Colin, Éd.) Paris: Masson.
30. MAINGUET, M. (2003). *Les pays secs; environnement et développement*. Paris: Ellipses.
31. MAINGUET, M., & DUMAY, F. (Avril 2006). *Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification* (Vol. Les dossiers thématique n°3). Montpellier, France: CSFD- Comité Scientifique Français de la Désertification/Agropolis.

32. MAINGUET, M., & REMINI, B. (juin 2004). Le role des mega-obstacles dans la formation et le façonnement des ergs: Quelques exemples du Sahara. *Larhyss Journal*(n° 03), 13-23.
33. MAINGUET, M., DUMAY, F., OULD ELHACEN, M. L., & GEORGES, C. (2008). Changement de l'état de surface des ergs au nord de Nouakchott (1954 – 2000). Conséquences sur la désertification et l'ensablement de la capitale. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*(3/2008), 144-152. Consulté le 21 10 2014 sur <http://geomorphologie.revues.org/6643>
34. OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL (OSS). (2008). *Système aquifère du Sahara septentrionale (Algérie, Tunisie, Lybie): gestion commune d'un bassin transfrontalier*. (Vol. N° 1). Tunis: Collection Synthèse. Consulté le 13 03 2015 sur www.oss-online.org
35. OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL (OSS). (Avril 2015). *Système aquifère du sahara septentrional. Pour une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation dans le bassin du SASS-diagnostic et recommandations*. Consulté le 01 02 2016, sur www.oss-online.org
36. PARSONS, A. J., & ABRAHAMS, A. D. (1994). *Geomorphology of Desert Environments*. Chapman and Hall.
37. PETHICK, J. (1984). *An introduction to coastal geomorphology*. London: Edward Arnold.
38. PYE, K., & TSOAR, H. (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Berlin: Springer.
39. REMINI, B. (2002). Méga-obstacles et dépressions, leurs influences sur la dynamique éolienne, les ergs et l'ensablement des espaces oasiens. *Thèse de Doctorat, Laboratoire de Géographie Zonale pour le Développement, Université de Reims Champagne-Ardenne*, 208. France.
40. SEBAA, A., BERROUSSI, S., BOUHANNA, M., & BENAZZOUZ, M. T. (2009). Utilisation des méthodes traditionnelles de lutte contre l'ensablement dans le Bas - Sahara algérien : le tas de remblai. *Algerian Journal of Arid Areas; revue scientifique annuelle n°08*.

41. UNESCO. (1986, novembre 24-29). La lutte contre la désertification en Algérie. L'expérience du barrage vert en Algérie. *Séminaire organisé dans le cadre du Projet-pilote de lutte contre la désertification dans le Sud tunisien*. Tunisie.
42. VENARD, C. (2012). La morphodynamique éolienne en régions sèches. Des échelles spatiales et temporelles aux outils. *Thèse de doctorat, Spécialité : Géographie, Aménagement et Urbanisme, Université Lumière Lyon 2*. Lyon, France.
- ❖ **Mécaniques des fluides (modélisation CFD, Fluent, vent urbain, aérodynamisme....etc.)**
43. ARCHAMBEAU, F. (2004-2005). Introduction à la turbulence. *Cours-École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, ENSTA-Paris Tech*, 54p. Paris, France. Consulté sur <http://www.dfr.ensta.fr/Cours/docs/A3-1/A3-Theorique-CoursTurbulence-040913.pdf>
44. ATKINSON, B. W. (1995). *Introduction to the fluid mechanics of meso-scale flow fields: Diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields* (Vol. ERCOFTAC Series). (a. R. Gyr A.G., Éd.) Kluwer Academic Publishers.
45. AYNLEY, R. M., MELBOURNE, W., & VICKER, B. J. (1977). *Architectural aerodynamics. Coll. Architectural science series*. (A. S. Publishers, Éd.) London.
46. BENSALÉM, R. (1991). Wind-driven natural ventilation in courtyard and atrium-type buildings. *Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the Building Science Unit School of Architectural Studies University of Sheffield*. Sheffield, UK.
47. BERANEK, W. J. (1984). Wind environment around single buildings of rectangular. *Heron*, vol.29(N°1), pp 2-70.
48. BLOCKEN, B., & CARMELIET, J. (October 2004). Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 28, pp. 107-159.
49. BLOCKEN, B., STATHOPOULOS, T., CARMELIET, J., & HENSEN, J. (Juin 2011). Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 4 (No. 2), pp.157–184.

50. BONNEAUD, F. (1998). Ventilation naturelle des batiments collectifs dans les département d'outre-mer : influence de la forme et de la composition de l'habitat. *Diplome d'Etudes Approfondies- DEA-Ecole d'Architecture de Nantes*.
51. BONNEAUD, F. (2004). Ventilation naturelle de l'habitat dans les villes tropicales; Contribution à l'élaboration d'outils d'aide à la conception. (N° ED 0367-121). Ecole polytechnique de l'université de Nantes: CERMA-UMR CNRS 1563.
52. BOTTEMA, M. (1993). Wind climate and urban geometry. *Phd Thesis*. Netherlands: Technology University of Eindhoven- Netherlands.
53. BRANGEON, B. (2008). Simulation des grandes échelles (SGE) d'écoulements de fluides incompressibles Large-eddy simulation (LES) of incompressible fluid flows. *hal-00682561*. Consulté le 01 29, 2016, sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00682561>
54. CFD Online; *online center for Computational Fluid Dynamics*. (1994). Consulté le 29 05 2015, sur <http://www.cfd-online.com/>
55. CHABARD , J. (s.d.). Transferts thermiques dans les processus énergétiques. Partie 5: écoulements diphasiques. *Cours en ligne*. ENSTA ParisTech (École Nationale Supérieure de Techniques Avancées), France. Consulté le 23 01 2016, sur <http://www.dfr.ensta.fr/Cours/docs/A3-1/A3-Theorique-2-CoursChabard-113-137-080113-2.pdf>.
56. COMMISSARIAT GENERAL AU DEVELOPPEMENT DURABLE (CGDD). (2012). Actes du colloque « Modélisation urbaine : de la représentation au projet ». *Collection RéférenceS*.
57. COOK, N. J. (1985). *The designer's guide to wind loading of building structures*. Cambridge, UK: The University Press.
58. DUBOIS, M.-C. (1998). Influence de collecteurs et de déflecteurs sur la formation des congères autour de maisons de banlieue. *Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître en architecture (M. Arch.)*. École d'architecture, Université LAVAL. Québec, Canada.
59. FEDALA, D. (Octobre 2007). Initiation à la CFD: Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent applications. Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique des Fluides Interne. ENSAM, CER de Paris, France.

60. FERZIGER, J., & PERIC, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Germany: Springer. 3rd edition.
61. FLUENT 6.0 Tutorial Guide. (Fév.2003). *Volume 1 et 2. Consulté le 12 02 2012 sur : <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/pdf/tg/fl61tg.pdf>*
62. FRANKE, J., HELLSTEN, A., Schlünzen, H., & CARISSIMO, B. (2010). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment: an outcome of COST 732. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010, ISBN 3-00-018312-4*.
63. FRANKE, J., HIRSCH, C., JENSEN, A., KRUS, H., SCHATZMANN, M., WESTBURY, P., WRIGHT, N. (2004). Recommendations on the Use of CFD in Predicting Pedestrian Wind Environment. *2nd European ERCOFTAC SIG.5 Workshop "Urban Scale CFD" University of Nottingham*.
64. GADILHE, A. (n° 98-1992). *Ecoulement du vent sur la place du Sanitat à Nantes: comparaison des simulations numériques et analogique*. CRENAU Ex-CERMA, Nantes.
65. GANDEMER, J. (1979). « Les effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis. *Techniques et Architecture (TA) n° 325*.
66. GANDEMER, J. (1984). Aide aux concepteurs dans la prise en compte du phénomène vent. *Recherche et Architecture (RA) n° 57*, pp. 34-39.
67. GANDEMER, J., & GUYOT, A. (1976). *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti : guide méthodologique et conseils pratiques*. (M. d. l'équipement, Éd.) Paris, France.
68. GANDEMER, J., & GUYOT, A. (juin 1981). *La protection contre le vent: Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques*. Paris: Centre Scientifique et Technique du Batiment-CSTB.
69. GANDEMER, J., BARNAUD, G., SACRE, C., & MILLETS, J. R. (1992). *Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide, Tome 1, Méthodologie de prise en compte des paramètres climatiques dans l'habitat et conseils pratiques*. (CSTB, & C. s. (France), Éd.) Paris, France.

70. GRAF, W. H., & ALTINAKAR, M. S. (2000). *Hydraulique fluviale. Ecoulement et phénomènes des transport dans les canaux à géométrie simple. Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (Vol. 16). Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
71. GREELEY, R., & IVERSEN, D. (1985). *Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus, and Titan*. New York: Cambridge University Press.
72. GRIMMOND, C. S., & OKE, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(N°09).
73. GUYON, E., HULIN, J.-P., & PETIT, L. (2011). *Ce que disent les fluides : la science des écoulements en images* (Vol. 2e édition revue et augmentée). (P. 1. science, Éd.) Belin.
74. GUYOT, A. (2007). Le vent - l'architecture et l'aménagement urbain. *Cours Et Tutoriels, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Marseille*. Marseille, France.
75. HERTIG, J. A., & ZIMMERLI, B. (2010). Protection des toits et des façades contre les dommages dus au vent. *Rapport de synthèse à l'intention des architectes, maîtres d'ouvrages et propriétaires de bâtiments*. Berne, Suisse.
76. HOLTON, J. R. (1979). *An Introduction to Dynamic Meteorology, Second Edition*. New York: Academic Press.
77. HOSKER, R. (1985). Flow around isolated structures and building clusters: a review. *ASHRAE Transactions*, Vol.91(N° 2B), 1671-1692.
78. HUSSAIN, M. (1978, Nov.). A study of the wind forces on low rise building arrays and their application to natural ventilation design methods. *Ph.D. thesis*. University of Sheffield, Department of Building Science. UK.
79. KASBADJI-MERZOUK, N. (2006). Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ». Thèse de Doctorat. Tlemcen, Algérie: Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen. Faculté des sciences. Département de physique. Unité de recherche matériaux et énergies renouvelables.

80. KOK, J. F., & RENNO, N. O. (2009). A comprehensive numerical model of steady-state saltation (COMSALT). *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, Vol 114(D17204).
81. LAPORTE, L. (2008). Application d'un code de CFD atmosphérique à l'estimation du productible éolien en terrain complexe. *Thèse de Doctorat.École doctorale Ville et Environnement (Champs-sur-Marne, Seine-et-Marne), Paris Est.*
82. LAWSON, T. V. (1980). Wind effects on buildings. *Design applications, Vol.1.* Consulté le Novembre 22, 2014, sur <http://trove.nla.gov.au/version/11879640>
83. LEROYER, S. (2006). Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle SUBMESO : application à la campagne CLU-Escompte sur l'agglomération de Marseille. *Thèse de Doctorat; Université de Nantes.* Nantes, France.
84. LOUISNARD, O. (2012). Cours de mécanique des fluides. *Ecole des Mines d'Albi . Albi, France.* Consulté sur <http://perso.mines-albi.fr/~louisnar/MECADEF/PolyMecaDef.pdf>
85. MATHIEU, J. P., KASTLER, A., & FLEURY, P. (1991). *Dictionnaire de physique.* Paris: Masson.
86. MESTOUL, D., BENSALAM, R., & ADOLPHE, L. (Décembre 2015). Modélisation de la forme urbaine par rapport au déplacement du sable en mode de saltation dans la région de Timimoun en Algérie. *Courrier du Savoir, N°20*, pp.16-22. <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/1456>
87. MOISY, F. (2013-2014). Turbulence : Physique et modélisations. *Cours-Master 2 de Dynamique des Fluides et Énergétique, Laboratoire FAST, Université Paris-Sud.* Consulté sur http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/teaching/turb_M2_slides.pdf
88. NAAIM-BOUVET, F. (2003). Approche macro-structurelle des écoulements bi-phasiques turbulents de neige et de leur interaction avec des obstacles. *Habilitation à diriger les recherches-Université de Joseph Fourier-CEMAGREF.* Grenoble.
89. NOURI, H., & RAVELET, F. (2013). *Introduction à la simulation numérique des écoulements. Application au transfert thermique sur plaque plane avec StarCCM+.* (D. - A. ParisTech, Éd.) Paris, France. Consulté le 01 29, 2016, sur : <http://florent.ravelet.free.fr/TutorielStarCCM2012.pdf>

90. PADET, J. (1991). *Fluides en écoulement : méthodes et modèles*. Paris , France: Masson.
91. PONS, A. (2007, Février). Le sable et le vent. *Projet bibliographique encadré par Stéphane DOUADY*. (L. d. ENS-CNRS, Éd.) France. Consulté le 03 2015, 15, sur http://www.geologie.ens.fr/~adeline_pons/public/doc/projet-sable.pdf
92. POPE, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Royaume-Uni: Cambridge University Press. Consulté sur <http://www.amazon.fr/Turbulent-Flows-Stephen-B-Pope/dp/0521598869>
93. SACRE, C. (1995). aerodynamique et effet du vent sur les constructions. *Notes de cours de climatologie*.
94. SMITH, I., & LESTUZZI, P. (2013-2014). Dynamique des structures. *Cours Destiné aux étudiants (Master) en génie civil-École Polytechnique Fédérale de Lausanne-EPFL*. Lausanne, Suisse.
95. SOLIMAN , B. F. (1976). A study of the wind pressure forces acting on groups of buildings. *Ph.D. thesis*. University of Sheffield, Department of Building. UK.
96. TOMINAGA, Y., MOCHIDA, A., YOSHIE, R., KATAOKA, H., NOZU, T., YOSHIKAWA, M., & SHIRASAWA, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(N° 96), 1749–1761. Consulté le 21 12 2015 sur : <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-wind-engineering-and-industrial-aerodynamics>
97. TURBELIN, G. (2000). Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent. *Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne*. EVRY, France.
98. WANG, B. (2015). Les Impacts de la Morphologie Urbaine sur le Vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier. *Thèse de Doctorat. Ecole doctorale MEGEP - Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés. Laboratoire Recherche en Architecture de l'Ecole Nationale d'Architecture de Toulouse*. France.
99. WILCOX, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD (Third Edition)*. (D. C. Industries, Éd.) California, USA.

100. WIREN, B. G. (1985). Effects of surrounding buildings on wind pressure distribution and ventilation losses for single-family houses. *The National Swedish Institute for Building Research, Report No. M85:19.*
- ❖ **Climat urbain (Climat, météorologie, ville, changements climatiques, développement urbain durable...etc.)**
101. ADOLPHE, L., CHATELET, A., BOUSSOUALIM, A., AIT-AMEUR, K., BARLET, A., & CASAL, A. (2002). *SAGACités, vers un système d'aide à la gestion des ambiances urbaine. Rapport final.* GRECO-EAT & EAPB, MENRT-Direction de la technologie N°99 V0532, Toulouse.
102. ALI-TOUDERT, F. (2000). Intégration de la dimension climatique en urbanisme. *Mémoire de Magistère.*
103. AYNSLEY, R. M. (1974). Effects of airflow on human comfort. *Building Science, 9*, 91-94.
104. BOUCHERF, D. (2006, Déc). «Variabilité et Changement climatique au Sahara». *Séminaire "Habiter les Déserts".*
105. BOUCHERF, D. (2010). Etude spatio-temporelle et prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie. *Magister en Sciences de la Terre. Option : Climatologie, Environnement et Développement Durable. U.S.T.H.B . Alger.*
106. CHATELET, A., FERNANDEZ, P., & LAVIGNE, P. (1998). *Architecture climatique - une contribution au développement durable* (Vol. Tome 2: Concepts et dispositifs). (Edisud, Éd.) Aix-en-Provence.
107. COLOMBERT, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. *Thèse de Doctorat, École Doctorale Ville et Environnement, Spécialité : Génie urbain, Université Paris-Est . Paris, France.*
108. DE HERDE, A., & LIEBARD, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable.* (Observ'ER, Éd.) Paris: Le Moniteur.

109. ESCOURROU, G. (1991). *Le climat et la ville*. (Nathan, Éd.) Paris.
110. FERNANDEZ, P., & LAVIGNE, P. (2009). *Concevoir des batiments bioclimatiques; Fondements et methodes*. Paris: LE MONITEUR.
111. FOUCHIER, V. (2000). Intervenir sur les densités urbaines pour limiter l'usage de l'automobile. *La forme des villes. Caractériser l'étalement urbain et réfléchir à de nouvelles modalités d'action. Séminaire de prospective urbaibe organisé par le Certu*, pp. 40-60.
112. GIEC-(IPCC). (2001). *Climate change 2001, Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report*. UK: Cambridge Press.
113. GIEC-(IPCC). (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.], 103p. Genève, Suisse.
114. GIVONI, B. (1978). *L'Homme, l'architecture et le climat*. Paris, France: Moniteur.
115. GIVONI, B. (1989). *Urban Design in Different Climates*. (W. M. Organization, Éd.) Los Angeles, USA.
116. KOENIGSBERGER, O. H., MAYHEW, A., INGERSOLL, T. G., & SZOKOLAY, S. V. (1973). *Manual of Tropical Housing and Building: part 1, climatic design*. Londres: Longman.
117. LIEBARD, A., & DE HERDE, A. (2006). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. (O. d. Renouvelables-Observ'ER, Éd.) Paris, France: Moniteur.
118. MANSOURI, Y. (2003). Conception des enveloppes de bâtiments pour le renouvellement d'air par ventilation naturelle en climats tempérés- Proposition d'une méthodologie de conception. *Thèse de Doctorat. Ecole d'Architecture de Nantes*. Nantes, France.

119. MESTOUL, D. (2010). Evaluation du degré de gêne dans les espaces publics extérieurs soumis aux effets aérodynamiques des bâtiments. Cas d'étude : Cité CNEP 800 logements de Bouzereah à Alger. *Mémoire de Magistère. Option: Architecture et Environnement. EPAU*. Alger.
120. MOSER, S. C., & DILLING, L. (2007). *Creating a Climate for Change: Communicating Climate Change and Facilitating Social Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
121. OKE, T. R. (1987). *Boundary layer climates, 2nd edn*. London: Routledge.
122. OKE, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*(11-1988), 103-113.
123. ORLANSKI, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56 n°5, 527-530.
124. POGGI, A. (1977). *Introduction à la micrométéorologie ; Transferts d'énergie atmosphère-sol*. Paris, New York, Barcelone: Masson.
125. UNFCCC. (1992). *Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*. Consulté le 11 02, 2015, sur <http://unfccc.int/>
126. VILLENEUVE, G. O. (1980). *Glossaire de la météorologie*. (L. p. Laval, Éd.) Québec, Canada.
127. WALTER, B., WALKER, B., & SALT, D. (2006). *Resilience thinking. Sustaining ecosystems and people in a changing world*. USA: Island Press. Consulté le 08 04 2014 sur <https://islandpress.org/book/resilience-thinking>
- ❖ **Gourara / villes du sud algérien (urbanisation / habitat / société / cultures...etc.)**
128. ALKAMA, D., & TACHERIFT, A. (2001). Essai d'analyse typo-morphologique des noyaux urbains traditionnels dans la région des Ziban. (U. d. Biskra, Éd.) *Courrier du savoir, vol.1*, 81-88. Consulté le 13 03 2015 sur <http://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/195>

129. BACHMINSKI , J., & GRANDET, D. (1985). *Cinq études urbaines et architecturales sur le sud-ouest algérien* (Vol. 1). (U. d. d'Oran-USTO, Éd.) Oran, Algérie.
130. BELLIL, R. (2002). Les Zénètes du Gourara d'hier à aujourd'hui. *Revue Passerelles*(24). Consulté le 09 05, 2015, sur <http://www.mondeberbere.com/civilisation/gourara/gourara.htm>
131. BELLIL, R. (2003). *Ksour et saints du Gourara, dans la tradition orale, l'hagiographie et les chroniques orales*. . Alger: Mémoires du Centre national de recherches préhistoriques, anthropologiques et historiques.
132. BENABOU, M. (1972). Une oasis du Sahara occidental (Timimoune),. *Thèse de 3ème cycle, EPHE IVe section*. Paris, France.
133. BENSAAD , A. (2011). *L'eau et ses enjeux au Sahara. Collection: Hommes et sociétés* . Paris: Karthala.
134. BISSON, J. (1957). *Le Gourara. étude de géographie humaine. Mémoire n°3. Institut de recherches sahariennes. Université d'Alger*.
135. BISSON, J. (1984). *Tinerkouk et Tarhouzi (Sahara Algérien): déménagement ou désenclavement de l'Erg Occidental*. (CRESM-CNRS, Éd.) Paris.
136. BISSON, J. (1985). *De la mobilité des terroirs à la stabilisation de l'espace utile l'exemple du Gourara (Sahara Algérien).*(Extrait de *Annuaire de l'Afrique du nord, XXII, 1983.*). Paris, France: Centre national de la recherche scientifique.
137. BISSON, J. (1990). Permanence d'une paysannerie au Sahara algérien : l'exemple des confins du Grand Erg Occidental. In : Dollé V. (ed.), Toutain G. (ed.). *Les systèmes agricoles oasiens, Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n.11*, pp. 289- 298.
138. BISSON, J. (1994). *Développement et mutations au Sahara maghrébin*. (C. Orléans, Éd.) Tours.
139. BISSON, J., & JARIR, M. (1986). *ksour du Gourara et du Tafilelt de l'ouverture de la société oasienne à la fermeture de la maison* (Vol. *Annuaire de l'Afrique du Nord Tome XXV*). (CNRS, Éd.)

140. BISSON, M. F. (2007, Aout). Vernaculaire moderne? Vers une compréhension de la notion d'architecture vernaculaire et de ses liens avec la modernité architecturale. (U. d. Québec, Éd.) Montréal, Canada.
141. CAPOT-REY, R. (1953). *Le Sahara français* (Vol. 1 vol. (VII-564 p.-12 p. de pl.)). Paris: Presses universitaires de France.
142. CERTU (Centre d'études sur les réseaux, l. t. (2003). *Algérie, traces d'histoire : architecture urbanisme et art de la préhistoire à l'Algérie contemporaine*. (E. N. Grenoble, Éd.) Lyon: Publi.Association Les 2 rives.
143. CERTU (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques). (2000). La forme des villes : caractériser l'étalement urbain et réfléchir à de nouvelles modalités d'actions : séminaire de prospective urbaine organisé par le Certu. Lyon.
144. CHAOUICHE-BENCHERIF , M. (2007). La Micro-urbanisation et la ville-oasis; une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable. Cas du Bas-Sahara. *Thèse de Doctorat en sciences. Université Mentouri. Constantine. Département d'architecture et d'urbanisme*. Constantine, Algérie.
145. CIAV-ICOMOS. (1999). Charte du patrimoine bâti vernaculaire . *Ratifiée par la 12^e Assemblée Générale de ICOMOS, au Mexique, octobre 1999*.
146. COTE, M. (1988). *L'Algérie ou l'Espace retourné*. Paris, France: Flammarion.
147. COTE, M. (1996). *Espace et société*. Paris: Masson, A. Colin.
148. DJERADI, M. (2012). L'architecture ksourienne (Algérie) entre signes et signifiants. *L'architecture vernaculaire, Tome 36-37*. Consulté le 11 05 2015 sur : http://www.pierreseche.com/AV_2012_ameur_djeradi.htm
149. DUBOST, D. (1991). Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. *Doctorat en Géographie. Université François Rabelais. Tours, France*.
150. GLYKOS, A. (1999). Approche communicationnelle du Dialogue Artiste/Scientifique. *Note de synthèse pour l'Habilitation à diriger des recherches. Université Diderot Paris 7. Paris*.
151. GOTMAN, A. (1999). *Cultures et habitats. Douze contributions à une ethnologie de la maison*. (P. Erny, Éd.) Paris: L'Harmattan.

152. KOUZMINE, Y. (2007). Dynamiques et mutations territoriales du sahara algerien vers de nouvelles. Approches fondees sur l'observation. Université de Franche-Comté. Besançon, France.
153. KOUZMINE, Y. (2012). *Le Sahara algérien. Intégration nationale et développement régional*. Paris: L'Harmattan.
154. MAHROUR, K. (1994). Tamentit, cité du désert. *HTM(2)*, 23-37.
155. MARCAIS, G., MARCAIS, G., & YVER, G. (1937). *L'Afrique du Nord Française dans l'histoire*. Lyon-Paris: Editions Archat.
156. MAROUF, N. (2010). *L'eau, la terre, les hommes. Passé et présent des Oasis Occidentales (Algérie)*. (c. CEFRESS, Éd.) L'Harmattan.
157. MAROUF, N. (2011). *Les fondements anthropologiques de la norme maghrebine*. Alger: Casbah-Editions.
158. MARTIN, A. G.-P. (1908). *Les Oasis Sahariennes (Gourara-Touat-Tidekelt)* (Vol. Tome 1). Alger, Algérie: Imprimerie Algerienne.
159. MAZOUZ, S. (2005-a). Mémoire et traces: le patrimoine Ksourien. Dans M. COTE, & IREMAM (Éd.), *La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien*. Paris, Aix-en-Provence (pp. 123-156). Paris: Karthala.
160. MAZOUZ, S. (2005-b). L'habitat des 19e et 20e siècles, rupture et éclatement. Dans M. COTE, & IREMAM (Éd.), *La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien* (pp. 157-186). Paris: Karthala.
161. MAZOUZ, S. (2005-c). L'adaptation bioclimatique dans le Bas-Sahara. Dans M. COTE, & IREMAM (Éd.), *La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien* (pp. 187-199). Paris: Karthala.
162. MERLIN, P., & CHOAY, F. (2000). *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, 3ème Edition*. Paris, France: Presses Universitaire de France (PUF).
163. MOUSSAOUI, A. (2002). Espace et sacré au Sahara: Ksour et oasis du sud-ouest algérien. (C. Éditions, Éd.) *1*, 291.
164. MOREL, A. (2008). *Milieux et Paysages du Sahara* (éd. Collection Sahara et Sahel). (I. Press, Éd.) Paris.

165. Nomadéis. (2012). *Bâti vernaculaire et développement urbain durable*. ARENE Ile-de-France, Paris. Consulté le 19 03 2015, sur http://www.nomadeis.com/Rapport_Etude_Bati_Vernaculaire
166. PINOL, J.-L. (2000). Les transformations de la forme des villes au XIXe siècle. *La forme des villes. Caractériser l'étalement urbain et réfléchir à de nouvelles modalités d'actions- Séminaire de prospective urbaine organisé par le Certu*, pp. 26-39.
167. PLIEZ, O. (2011). *Les cités du désert: des villes sahariennes aux saharatowns*. Marseille, Toulouse, France: IRD- Institut de recherche pour le développement et presses universitaires du Mirail .
168. RAPOPORT, A. (1972). *Pour une Anthropologie de la maison*. Paris: Dunod.
169. REMINI, B., & HALLOUCHE, W. (2006, Déc). La foggara: le système hydraulique des Oasis du grand Erg occidental en déclin. *Séminaire Habiter les Désert- EPAU*.
170. ROY, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Collection: Production techniques quant*. Paris: ECONOMICA.
171. SCHIRMER, H. (1893). *Le Sahara*. (Hachette, Éd.) Paris. Consulté le 09 12, 2015, sur <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k166057n/f6.item>
172. UNESCO, C. d. (1995, Déc). Médinas: sauvegarde sélective de l'habitat traditionnel? *La Lettre du patrimoine mondial*(n°9).
- ❖ **Risques majeurs / catastrophes climatiques**
173. AFCA-Association Française des Concepteurs et Constructeurs d'Abris, s. d. (1989). *Les risques majeurs et la protection des populations : prévenir, planifier, protéger, secourir* (Vol. Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment). Paris: Editions du Moniteur.
174. BESSON, L. (2005). *Les risques naturels. De la connaissance pratique à la gestion administrative*. (G. Institut des risques majeurs, Éd.) Voiron, Rhône-Alpes, France: Techni.Cités.
175. BRUGNOT, G. (2001). *Gestion spatiale des risques*. Paris: Hermès science / Lavoisier.

176. DAUPHINE, A. (2001). *Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer.* (A. Colin, Éd.) Paris.
177. GONDARD-DELCROIX , C., & ROUSSEAU, S. (2014). Vulnérabilité et stratégies durables de gestion des risques, une étude appliquée aux ménages ruraux de Madagascar, Développement durable et territoire. Consulté sur <http://developpementdurable.revues.org/1143>
178. MORINIAUX, V., BESSAT, F., DAUPHINE, A., & DESHAIES, M. (2003). *Les Risques. Collection : Questions de géographie.* Nantes: Editions du temps.
179. PAGNEY, P. (1994). *Les catastrophes climatiques.* Paris: Presses Universitaires de France-PUF.
180. SCARWELL, H.-J. (2007). Déconstruire les logiques de gestion du risque d'inondation. De la résistance à la résilience : quelle adaptation de la prévention des risques naturels au réchauffement climatique ? *AirPur* (n°72), pp.24-31.
181. TRONCHON, P. (1991). *Risques majeurs, environnement et collectivités locales.* (Berger-Levrault, Éd.) Paris, France: Administration locale.
182. VANOUDEUSDEN, E. (2012, sept.). La modélisation des risques naturels géologiques-influence du contexte urbain. (C. «. (DRI), Éd.) *La modélisation de la ville : de la représentation au projet.*

❖ **Guides et références pour la rédaction d'une thèse**

183. American Psychological Association. (2011). *APA Style.* Consulté le 03 16, 2016, sur <http://www.apastyle.org>
184. BEAUD, M., GRAVIER, M., & DE TOLEDO, A. (2006). *L'art de la thèse. Comment préparer et rédiger un mémoire de master, une thèse de doctorat ou tout autre travail universitaire à l'ère du Net.* (L. Découverte, Éd.) Paris.
185. Bureaux de l'égalité des Hautes écoles universitaires de la Suisse Latine (BuLa). (s.d.). Bien démarrer sa thèse. Guide pour les doctorant(e)s. (U. d. Genève, Éd.) Consulté le 03 20, 2016, sur <http://www.releve-academique.ch/>

186. BUTTLER, A. (Nov. 2006). *Comment rédiger un rapport ou une publication scientifique ? Version 2.2*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne – Laboratoire des Systèmes écologiques ECOS. Consulté le 03 20, 2016, sur <http://ecos.epfl.ch/files/content/sites/ecos/files/Teaching%20material/Comment%20rediger%20v2.2.pdf>.
187. CARON, R. (1995). *Comment citer un document électronique?* Consulté le 03 20, 2016, sur Université Laval. Bibliothèque: <http://www.bibl.ulaval.ca/doelec/citedoce.html>
188. DESAULNIERS, D. (2016, 01 11). *Citer selon les normes de l'APA*. (U. d. Montréal, Éditeur) Consulté le 03 19, 2016, sur <http://guides.bib.umontreal.ca/disciplines/20-Citer-selon-les-normes-de-l-APA?tab=106>
189. LICHTFOUSE, E. (2012). *Rédiger pour être publié ! Conseils pratiques pour les scientifiques. 2e édition*. (Springer, Éd.) France.
190. MERLEAU-PONTY, N. (2014, 03 07). Publier dans une revue à comité de lecture : stratégies éditoriales dans un monde concurrentiel. *Blog "Les aspects concrets de la thèse"*. Consulté le 03 20, 2016, sur <http://act.hypotheses.org/4028>
191. PIERRE, V. (2007, mai 23). Références et citations bibliographiques dans un article scientifique. La norme ISO 690 (Z 44-005). Consulté le 03 20, 2016, sur <http://revues.refer.org/telechargement/fiche-bibliographie.pdf>.
192. ROMELAER, P., & KALIKA, M. (2007). *Comment réussir sa thèse. 2ème édition-La conduite du projet de doctorat*. (Dunod, Éd.)
193. SANTIAGO-DELEFOSSE, M. (s.d.). Introduction à la rédaction d'un article scientifique. Consulté le 03 19, 2016, sur [http://www.unil.ch/files/live//sites/cerpsa/files/shared/support de cours/redaction art s c i e n t i f i q u e . p d f](http://www.unil.ch/files/live//sites/cerpsa/files/shared/support%20de%20cours/redaction%20art%20scientifique.pdf).
194. Université LAVAL. (s.d.). *Documents d'aide à la rédaction. Citer vos sources*. (B. U. LAVAL, Éditeur) Consulté le 03 20, 2016, sur <http://www.bibl.ulaval.ca/aide-a-la-recherche/documents-d-aide-a-la-redaction/citer-vos-sources>
195. Vertigo. La revue électronique en sciences de l'environnement. (s.d.). *Écrire pour un journal scientifique. Guide pour la rédaction scientifique*. Consulté le 05 12, 2014, sur <http://vertigo.revues.org/5402?file=1>

196. VILLENEUVE, N. (s.d.). Style de citation APA. (UQAM). Québec, Canada. Consulté le 03 19, 2016, sur http://bibliotheque.uqac.ca/aide/guides/style_apa.pdf

a. DOCUMENTS AUDIOVISUELS

1. **ARTUS-BERTRAND Yann (2015)** : « L'Algérie vue du ciel ». Documentaire diffusé sur France 2, le 16/06/2015.
2. **CRSTRA (Centre de recherche scientifique et technique des régions arides)**, Station de Touggourt, Service de lutte contre la désertification. Film scientifique présenté et commenté en arabe sous le titre « زحف الرمال في الصحراء الجزائرية » (« L'ensablement dans le Sahara algérien »). (s.d.)
3. **KASBADJI-MERZOUK, Nachida (2006)** : « érosion éolienne dans une semi-aride ». Film scientifique réalisé dans le cadre d'un PNR (Programme National de Recherche). Film Domicilié au CRSTRA (centre de recherche scientifique et technique des régions arides) et rattaché au CDER/INRF/CNRB.

b. RAPPORTS INSTITUTIONNELS

1. **CIAV (ICOMOS) - Comité international sur l'architecture vernaculaire** : Charte du patrimoine bâti vernaculaire (1999). Ratifiée par la 12^e Assemblée Générale de ICOMOS, au Mexique, octobre 1999. Site web : <http://ciav.icomos.org/>
2. **Daïra de Charouine**, projet intitulé : « Appui au renforcement des capacités locales pour un développement durable ». Juillet 2005-décembre 2012, initié en collaboration avec le PNUD. Consulté le 15 juin 2014 sur le site-web : http://www.dz.undp.org/content/algeria/fr/home/operations/projects/poverty_reduction/daira-de-charouine--appui-au-renforcement-des-capacites-locales-.html
3. **Direction du patrimoine culturel-Ministère de la Communication et de la Culture, 2002** : « Les oasis à foggaras et les *ksour* du Grand Erg Occidental. Thèmes Paysages culturels. Unesco-Centre du patrimoine mondial. Réf.1772. Source : <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/1772/>

4. **MATE-Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 2010 :** Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT 2030). 107 pages. Téléchargeable sur : <http://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2010/F2010061.pdf>
5. **MATE-Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Déc. 2014 :** 5ème Rapport National sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique au niveau national. Consulté sur : <https://www.cbd.int/doc/world/dz/dz-nr-05-fr.pdf>
6. **Ministère du Tourisme (1970) :** Etude d'aménagement touristique de la région de la Saoura. Phase II : avant-projet d'aménagement. Document consulté au niveau de l'Agence Nationale du Développement du Tourisme (ANDT). <http://www.andt-dz.org/>
7. **UNESCO- L'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture :** Médinas : sauvegarde sélective de l'habitat traditionnel ? *La Lettre du patrimoine mondial* (Centre du patrimoine mondial de l'Unesco), n°9, décembre 1995.
8. **UNFCCC, 1992. La Convention Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques,** adoptée en 1992 à l'occasion du sommet de Rio.
9. **UNCCD, 1994. La Convention des Nations-Unies pour la Lutte contre la Désertification,** adoptée en 1994.
10. **UNCBD, 1992. La Convention des Nations-Unies sur la Diversité Biologique** adoptée en 1992.

c. DOCUMENTS D'URBANISME

1. **PDAU d'Adrar et de Timimoun**, juillet 2004, Diagnostic général, phase 01.

d. TEXTES OFFICIELS

1. Loi n°04-05 du 27 Joumada Ethania 1425 correspondant au 14 août 2004 modifiant et complétant la loi n° 90-29 du 1er décembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme. Consulté sur : www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2004/F2004051.pdf
2. Loi n°01-20 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement durable du territoire. Source : Journal officiel de la république algérienne n°77. Consultée sur : <http://faolex.fao.org/docs/texts/alg43214.doc>
3. Loi n° 04-20 du 13 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable Source : Journal officiel de la république algérienne n°84. <http://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2004/F2004084.pdf>
4. Loi n° 10-02 du 16 Rajab 1431 correspondant au 29 juin 2010 portant approbation du Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT 2030). Source : Journal officiel de la république algérienne n°61. <http://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2010/F2010061.pdf>
5. Décret exécutif n° 06-485 du 3 Dhou El Hidja 1427 correspondant au 23 décembre 2006 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spéciale n° 302-089 intitulé : « Fonds spécial de développement des régions du Sud ». Source : Journal officiel de la république algérienne n°84. <http://www.andi.dz/PDF/legislation/fond/06-485.pdf>
6. Décret exécutif n° 11-291 du 18 Ramadhan 1432 correspondant au 18 aout 2011 modifiant et complétant le décret exécutif n° 06-485 du 3 Dhou El Hidja 1427 correspondant au 23 décembre 2006 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spéciale n° 302-089 intitulé : « Fonds spécial de développement des régions du Sud ». Source : Journal officiel de la république algérienne n°47. <http://www.joradp.dz/jo2000/2011/047/fp31.pdf>
7. Décret exécutif n° 13-389 du 20 Moharram 1435 correspondant au 24 novembre 2013 fixant les niveaux et les modalités d'octroi de la bonification du taux d'intérêt des prêts accordés par les banques et les établissements financiers, pour l'acquisition d'un logement collectif, la construction d'un logement rural, ainsi que d'un logement individuel réalisé sous la forme groupée dans des zones définies des wilayas du Sud et des Hauts-Plateaux. Consulté sur : www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2013/F2013061.pdf

ANNEXES

Annexe 1 : Echelle de Beaufort

En 1949, l'échelle de Beaufort a été prolongée de cinq niveaux par décision de l'Organisation Météorologique Internationale passant à 12 niveaux (de 0 à 12) comme illustré en Tab.19 ci-dessous.

Tableau 19: échelle de Beaufort prolongée montrant les effets indésirables du vent sur les personnes.

Degré Beaufort	Terme descriptif	Vitesse moyenne en nœuds	Vitesse moyenne en Km/h	Observations en mer	Observations sur terre
0	Calme	<1	<1	La mer est comme un miroir.	On ne sent pas de vent, la fumée d'élève verticalement.
1	Très légère brise	de 1 à 3	de 1 à 5	Quelques rides en écailles de poisson, mais sans aucune écume.	On sent très peu le vent, sa direction est relevée par la fumée qu'il entraîne, mais non par les girouettes.
2	Légère brise	de 4 à 6	de 6 à 11	Vaguelettes courtes aux crêtes d'apparence vitreuse, ne déferlant pas.	Le vent est perçu au visage, les feuilles frémissent, les girouettes tournent.
3	Petite brise	de 7 à 10	de 12 à 19	Très petites vagues (environ 60 cm de haut), les crêtes commencent à déferler, les moutons apparaissent.	Les drapeaux légers se déploient, les feuilles et les rameaux sont sans cesse agités.
4	Jolie brise	de 11 à 16	de 20 à 28	Petites vagues s'allongeant, moutons nombreux.	Le vent soulève la poussière, les feuilles et les morceaux de papier, il agite les petites branches ; les cheveux sont dérangés, les vêtements claquent.
5	Bonne brise	de 17 à 21	de 29 à 38	Vagues modérées (2 m de haut), nettement allongées ; beaucoup de moutons ; embruns.	Les yeux sont gênés par les matières dans l'air ; les arbustes en feuilles commencent à se balancer ; des vaguelettes se forment sur les plans d'eau.
6	Vent frais	de 22 à 27	de 39 à 49	Des lames se forment, les crêtes d'écume blanche s'étendent ; davantage d'embruns.	Les manches sont gonflées par les côtés, l'utilisation des parapluies devient difficile, les grandes branches sont agitées,

					les fils des lignes électriques sifflent.
7	Grand frais	de 28 à 33	de 50 à 61	La mer grossit en lames déferlantes ; l'écume commence à être soufflée en traînées dans le lit du vent.	La marche contre le vent devient pénible ; les arbres sont agités en entier.
8	Coup de vent	de 34 à 40	de 62 à 74	Les lames atteignent une hauteur de l'ordre de 5 m ; tourbillons d'écume à la crête de lames, traînées d'écume.	La marche contre le vent est très difficile ; le vent casse des rameaux.
9	Fort coup de vent	de 41 à 47	de 75 à 88	Grosses lames déferlant en rouleaux, tourbillons d'embruns arrachés aux lames, nettes traînées d'écume ; visibilité réduite par les embruns.	Les enfants sont renversés ; le vent arrache les tuyaux de cheminées et endommage les toitures.
10	Tempête	de 48 à 55	de 89 à 102	Très grosses lames déferlantes (9 m de haut) ; écume en larges bancs formant des traînées blanches ; visibilité réduite par les embruns.	(Rarement observé à terre.) Les adultes sont renversés ; les arbres sont déracinés, les habitations subissent d'importants dommages.
11	Violente tempête	de 56 à 63	de 103 à 117	Lames déferlantes d'une hauteur exceptionnelle ; mer couverte d'écume blanche, visibilité réduite.	(Très rarement observé à terre.) Ravages étendus.
12	Ouragan	64 et plus	118 et plus	Lames déferlantes énormes (les creux atteignent 14 m), mer entièrement blanche ; air plein d'écume et d'embruns ; visibilité très réduite.	(En principe degré non utilisé.) Ravages désastreux : violence et destruction.

Annexe 2 : Mesures de la longueur (l) à différents points du plan masse dans les deux modèles V1 et V2.

Mesurer la longueur (l)¹¹⁴ pour chaque modèle suivant les points : a, b, c, d, e, f, et g revient à repérer ces points sur le plan masse grâce à leur coordonnées et leur emplacement sur les axes AB, BC, CD. (Fig. 193)

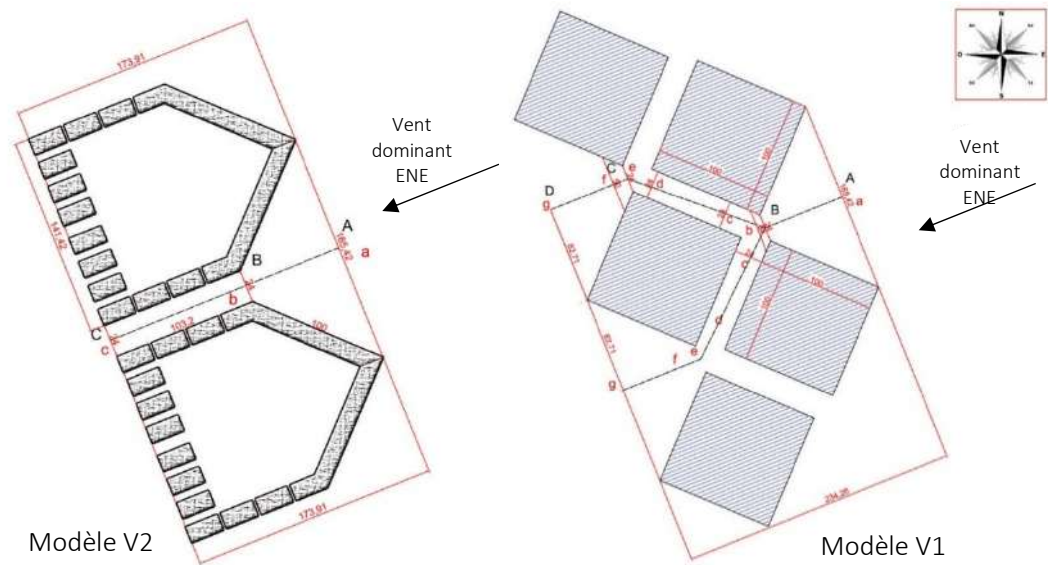


Figure 193: repérage des point a, b, c, d, e, f et g sur le plan masse et calcul de (l) dans les deux modèles (V1 et V2).

Les différentes valeurs de (l) sont synthétisées dans le tableau 20 ci-dessous :

Tableau 2020: valeurs de mesure de (l) dans les deux modèles V1, V2.

Points	Longueur (l) en m						
	a	b	c	d	e	f	g
Modèle (V1)	165,42	34	48	48	48	100	165,42
Modèle (V2)	165,42	24	24	-	-	-	-

¹¹⁴ (l) : longueur perpendiculaire à la direction du vent considérée (m).

Annexe 3 : le PPR_N ; étapes d'élaboration et de mise en œuvre

1. Définitions et étapes d'élaboration

Le PPR (Plan de Prévention des Risques) comporte une note de présentation ainsi qu'un ou plusieurs documents graphiques (carte informative des phénomènes naturels historiques et actifs, carte des aléas, carte des enjeux, zonage réglementaire). Les risques naturels sont décrits et régis par un PPR_N (Plan de Prévention des Risques Naturels). (Besson, 2005).

Le plan de prévention des risques naturels (PPR_N) est un document réalisé par l'Etat qui réglemente l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions. Le PPR_N vise à limiter les conséquences humaines et économiques des catastrophes naturelles, dans une perspective de développement durable (Besson, 2005). Il a pour objectif, d'une part, d'améliorer la sécurité des personnes, d'autre part d'arrêter la croissance de la vulnérabilité des biens et des activités dans les zones exposées et, si possible, de la réduire pour limiter les indemnisations en cas de sinistre, dont le montant est largement supporté par la collectivité.

Pour l'élaboration et la gestion d'un PPR, la cartographie constitue un outil incontournable, Ainsi, pour la gestion des risques naturels, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont très souvent utilisés. Un SIG permet de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser et de présenter des informations localisées géographiquement (géo-référencées).

1.1. Le rapport de présentation

Il présente, tout d'abord, le périmètre d'étude et les raisons de la prescription du PPR, puis le territoire objet du PPR, dans ses aspects géographiques, climatiques, météorologiques, géologiques et économiques. Il rappelle les phénomènes connus, explique les hypothèses retenues pour la qualification des aléas, présente et définit le zonage et les mesures réglementaires.

1.2. Les documents graphiques non réglementaires du PPR

Ce sont les documents graphiques intermédiaires qui servent à conduire l'expert à formaliser cartographiquement l'étape ultime de zonage réglementaire qui sera arrêté par décret. Ces

documents graphiques non réglementaires sont au nombre de deux : la carte informative des phénomènes naturels et la carte des aléas.

a- La carte informative des phénomènes naturels

Présentée sur fond topographique à petite échelle (1/25 000), elle est la traduction cartographique des phénomènes connus, tirés des archives, observés sur le terrain ; on l'appelle aussi carte d'historicité. La connaissance des événements historiques constitue une étape essentielle et inévitable de la démarche. Sur le plan technique, elle présente l'avantage de donner une idée de la sensibilité du site concerné face à tel ou tel phénomène et, le cas échéant, celui d'identifier les conditions de son apparition. Elle constitue la meilleure démonstration de la pertinence du zonage des aléas et permet en outre de justifier l'élaboration d'un PPR.

b- La carte des aléas

Présentée aussi sur fond topographique à une échelle plus grande (1/10 000), parfois sur fond cadastral, à plus grande échelle (1/5 000) où figurent les zones d'aléas de différents niveaux. Elle constitue un document de synthèse des facteurs analysés. Elle est interprétative et prospective. Elle résulte de la combinaison des facteurs de prédisposition à l'apparition de phénomène ou à son aggravation.

En France, le guide méthodologique édité par le ministère de l'environnement fait appel à la sémiologie pour dicter les règles de représentation des aléas. Par exemple tous les aléas doivent être représentés par une même couleur (rose), seuls les niveaux d'intensité sont différenciés par les nuances de rose (du plus foncé pour l'aléa fort au plus clair pour l'aléa faible). Cependant, dans le cas de cartes multi-aléas, où les phénomènes sont nombreux, variés et entrecroisés, cette méthode nuit gravement à la lisibilité du document. La solution dans ce cas serait de différencier les couleurs pour les aléas.

1.3. L'appréciation des enjeux et leur exposition

Avant de définir le zonage réglementaire, il est nécessaire d'analyser les différents types d'occupation et d'utilisation du sol (POS), existant et futurs, du territoire de la ou des communes étudiées. Comparée à la carte des aléas, cette analyse permet d'identifier et de recenser les enjeux menacés telles les zones d'habitat, les établissements recevant du public

(hôpitaux, écoles, collèges, camping...etc.), mais aussi les structures stratégiques comme les stations d'adduction d'eau potable, les services publics, les bâtiments industriels susceptibles d'aggraver les risques en cas de crise, ainsi que les voies de communication susceptibles d'être coupées ou pouvant servir de dessertes pour acheminer les secours et, le cas échéant, évacuer les population en danger.

Sans pour autant procéder à un recensement exhaustif de tous les enjeux concernés, il est nécessaire d'attirer l'attention sur ceux d'entre eux qui se trouvent particulièrement exposés du fait de leur situation en zone d'aléa fort ou moyen. Enfin, ce recensement peut être présenté soit sous forme cartographique, soit sous forme de tableau.

1.4. Le plan de zone réglementaire

La carte des aléas établit les enjeux menacés recensés. Sa traduction en plan réglementaire n'est pas mécanique. La liste ci-dessous qui peut être établie sous forme d'un tableau présente une base de réflexion et de concertation à engager avec les partenaires locaux en fonction des particularités du terrain et de la nature des enjeux (Besson, 2005).

- Type d'aléa
- Niveau d'intensité
- Mesures de prévention techniques
- Espaces non urbanisés
- Espaces urbanisés : non protégés / protégés

Les limites des zones réglementaires suivent en principe les limites des zones d'aléa. Elle peut comporter trois couleurs (rouge, bleu et blanc par exemple) pour indiquer les zones dans lesquelles sont définies les interdictions, les prescriptions réglementaires homogènes, les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

1.5. La concertation

La concertation est le moyen d'établir des relations humaines de coopération permettant d'atteindre un objectif commun. C'est vraisemblablement une condition indispensable de réussite de la politique de prévention des risques. La fixation du niveau de risque, qui reste du ressort de l'état, sera mieux comprise, plus facilement légitimée et donc mieux acceptée.

Le PPR doit être établi à partir d'une vision globale et partagée de la prévention, affaire commune ou chacun à un rôle à jouer. Mais c'est à l'Etat d'engager la démarche de concertation en instaurant une situation d'écoute, pour éviter l'image négative d'imposer (ou de donner l'impression d'imposer) a priori une vision technico-règlementaire pure et dure. Ecouter ne signifie pas adopter systématiquement le point de vue de l'interlocuteur, mais examiner, en concertation avec lui, le bien-fondé de son argumentation pour ouvrir le dialogue sur des bases saines et objectives, se rapprocher et aboutir, si possible, à une vision commune.

Pour réussir, la prévention des risque suppose certes d'être adaptée au contexte géographique, c'est un préalable minimal, mais aussi aux conditions sociales, c'est-à-dire en tenant compte de l'histoire, de la culture et des solutions traditionnelles, fruits de l'expérience des groupes humains et dont on doit tirer parti ; ce qui n'exclut pas la recherche de perspectives innovantes pour transformer les contraintes en opportunité dans une nouvelle logique territoriale.

Annexe 4 : Manuel de présentation des références bibliographiques selon les normes de l'APA (American Psychological Association), 6^{ème} éd. Tableau récapitulatif.

Article	Auteur. (année). Titre de l'article. <i>Titre de la revue</i> , Volume (numéro), pages.
Article électronique	Auteur. (année). Titre de l'article. <i>Titre de la revue</i> , Volume (numéro), pages. Repéré à URL
Livre	Auteur. (année). <i>Titre du livre</i> (édition). Lieu d'édition : Maison d'édition.
Livre électronique	Auteur. (Année). <i>Titre du livre</i> (édition). Repéré à URL ou doi: 10.1037/a0013790 ou http://dx.doi.org/10.1037/a0013790
Chapitre	Auteur du chapitre. (année). Titre du chapitre. Dans Directeur, <i>Titre du livre</i> (édition, volume, pages). Lieu d'édition : Maison d'édition.
Chapitre électronique	Auteur du chapitre. (année). Titre du chapitre. Dans Directeur, <i>Titre du livre</i> (édition, volume, pages). Repéré à URL
Article de journal	Auteur. (année, date de publication). Titre de l'article. <i>Journal</i> , pages.
Article de journal en ligne	Auteur. (année, date de publication). Titre de l'article. <i>Journal</i> . Repéré à URL
Dictionnaire ou encyclopédie (papier, entrée anonyme)	Entrée consultée. (année). Dans Directeur (dir.), <i>Titre de l'ouvrage</i> . Lieu d'édition: Maison d'édition.
Dictionnaire ou encyclopédie (en ligne, entrée anonyme)	Entrée consultée. (année). <i>Titre de l'ouvrage</i> . Repéré à URL
Dictionnaire ou encyclopédie (en ligne, entrée par auteur identifié)	Rédacteur de l'entrée. (année). Entrée consultée. Dans Directeur (dir.), <i>Titre de l'ouvrage</i> . Repéré à URL
Mémoire ou thèse (papier)	Auteur. (année). <i>Titre du document</i> (Mémoire de maîtrise ou Thèse de doctorat). Université, Lieu.
Mémoire ou thèse (électronique)	Auteur. (année). <i>Titre du document</i> (Mémoire de maîtrise ou Thèse de doctorat, Université). Repéré à URL
Mémoire ou thèse (Repéré dans une base de données)	Auteur. (année). <i>Titre du document</i> (Mémoire de maîtrise ou Thèse de doctorat). Accessible par Proquest Dissertations & Theses. (Numéro d'identification unique)
Communication à une conférence ou un	Auteur. (année, mois). <i>Titre de la communication</i> . Communication présentée au [à la] Nom du congrès ou de la conférence, Lieu.

congrès	
Film cinématographique ou documentaire	Producteur (producteur) et Réalisateur (réalisateur). (année). <i>Titre du film</i> [Film cinématographique ou Film documentaire]. Lieu: Studio ou compagnie cinématographique.
Reportage ou épisode tiré d'une émission	Reporteur. (année). Titre du reportage ou de l'épisode [Reportage ou Épisode télévisé]. Dans A. Réalisateur (réalisateur), <i>Titre de l'émission</i> . Lieu: Diffuseur.
Vidéo en ligne	Auteur [Pseudonyme, si disponible]. (année, date). <i>Titre du vidéo</i> [Vidéo en ligne]. Repéré à URL
Photographie ou image (en ligne)	Auteur. (année). <i>Titre de l'image</i> [Image en ligne]. Repéré à URL
Photographie ou œuvre d'art (originale)	Auteur. (année). <i>Titre de l'image</i> [Photographie ou Oeuvre d'art]. Lieu: Musée, lieu ou organisme qui détient l'oeuvre.
Note de cours (recueil papier)	Professeur. (année). Sigle et titre du cours. Recueil inédit, Université de Montréal.
Note de cours (en ligne)	Professeur. (année). Sigle et titre du cours [Présentation PowerPoint]. Repéré à URL
Page Web individuelle	Auteur. (année, date). Titre du document [Format]. Repéré à URL
Document ou rapport en PDF sur le Web	Auteur. (année). <i>Titre du document</i> [Format]. Repéré à URL
Billet dans un blogue	Auteur du billet. (année, date). Titre du billet [Billet de blogue]. Repéré à URL
Wikipédia et autres wikis	Entrée consultée. (année, date). Dans <i>Wikipédia l'encyclopédie libre</i> . Repéré le date à URL