

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Mécanique

Présentée et soutenue publiquement

Le: 23/02/2020

REZIG Ahmida

THEME

**Effets de l'érosion du sable sur les performances
d'une éolienne.**

JURY:

Mr. ALLAOUI Omar	Président du jury,	Pr., Université Amar Telidji (UATL) Laghouat.
Mr. ARIS Abdelkader	Examineur,	Pr., Ecole Nationale Polytechnique (ENP- M. A.) Oran.
Mr. KAHALERRAS Henda	Examinatrice,	Pr., Université Houari Boumediene (USTHB) Alger.
Mr. RAHMANI Mohamed	Examineur,	Pr., Université Amar Telidji (UATL) Laghouat.
Mr. GUERIBIZ Djalloul	Examineur,	Pr., Université Amar Telidji (UATL) Laghouat.
Mr. YOUSFI Ahmed	Rapporteur,	Pr., Université Amar Telidji (UATL) Laghouat.

Dédicaces

A

Ma mère,

Ma femme,

Ma fille, Sawsan,

Mes fils, Salah Eddine et Mohamed Al Hadi

Mes frères et sœurs

Remerciements

Ma gratitude et ma reconnaissance s'adressent tout d'abord à Monsieur le Professeur Ahmed YOUSFI qui a accepté de diriger cette thèse pour son enthousiasme, sa rigueur et son goût passionné pour la recherche scientifique.

Je voudrais ensuite remercier Mr. Sylvain FREOUR, Mr Frédérique JACQUEMIN et Mr Samuel BRANCHU, Professeurs à l'Université de Nantes-École Centrale de Nantes pour leurs aides et conseils précieux et qui m'ont permis de mener à bien cette thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent à Mr Omar ALLAOUI, Professeur à l'université Amar Theliji - Laghouat, qui me fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Mme Henda KAHALERRAS, Professeur à l'Université Houari Boumediene (USTHB) Alger, et à Mr Abdelkader ARIS, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP- M. A.) Oran, pour avoir accepté de prendre sur leur temps afin d'examiner ce travail, j'en suis particulièrement honoré.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr Mohamed RAHMANI, et Mr Djalloul GUERIBIZ tous les deux Professeurs à l'université Amar Theliji- Laghouat, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je rends ici hommage à mes collègues au sein du département mécanique, qui n'ont jamais cessé de me témoigner leur amitié et leur affection tout au long de ce travail, et qui ont contribué de près ou de loin à son accomplissement.

Je remercie infiniment tous les gens en d'hors de département mécanique et qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse.

Table des matières

Remerciements	
Table des matières.....	
Résumé.....	
Abstract.....	
Nomenclature.....	
Introduction générale.....	1

Chapitre 1

1.1 Introduction.....	6
1.2 Evolution de la technologie des éoliennes commerciales.....	8
1.3 Historique de l'évolution des éoliennes.....	9
1.3.1 1ère période de l'énergie éolienne.....	10
1.3.1.1 Les moulins méditerranéens.....	11
1.3.1.2 Les moulins Andalous.....	12
1.3.1.3 Les moulins européens.....	14
1.3.2 2ième période : Amélioration de l'utilisation des moulins.....	15
1.3.2.1 Evolution des systèmes d'orientation.....	17
1.3.2.2 Evolution des pales.....	18
1.3.2.3 Moulins à axe vertical.....	18
1.3.3 3ième période: Une nouvelle conception des moulins.....	19
1.3.3.1 Découvertes scientifiques.....	20
1.3.4 4ième étape: Développement depuis 1973.....	22
1.4 Etat actuel des parcs éoliens.....	24
1.5 L'énergie éolienne en Algérie.....	27
1.5.1 Détermination du potentiel éolien d'une région.....	30
1.6 La région de Laghouat.....	30
1.6.1 Potentiel éolien	30
1.6.2 Le profil des vents	31
1.6.2.1 Extrapolation vertical de la vitesse du vent.....	31
1.6.2.2 Vitesse seuil du vent.....	32
1.6.2.3 Représentation statistique du vent.....	33
1.6.2.4 Distribution de Weibull.....	33
1.6.3 Traitement des données de la région de Hassi R'mel	37
1.6.4 Traitement des données de la station métrologique de Laghouat	39
1.7 Les transformations énergétiques.....	41
1.7.1 Structure d'une éolienne.....	41
1.7.2 Aérodynamique des pales d'éoliennes.....	42
1.7.3 Le vent.....	42
1.7.4 Nombre de pales.....	43
1.7.4.1 Comment les pales capturent l'énergie éolienne.....	44
1.7.4.2 Torsion.....	45
1.7.4.3 Section de la pale.....	46
Bibliographie.....	47

Chapitre 2

2.1 Notions aérodynamiques des éoliennes.....	48
2.1.1 Forces sur un profil.....	48
2.1.2 Forces de trainée et portance en profils fixes.....	51
2.1.2.1 Polaire de profil.....	51
2.1.2.2 Action du vent sur le profil.....	52
2.1.3 Forces de trainée et de portance dans des profils mobiles.....	55
2.1.3.1 Couples et forces axiales.....	56
2.1.3.2 Couple moteur.....	57
2.1.3.3 Rendement aérodynamique des hélices.....	57
2.1.3.4 Puissance maximale.....	58
2.1.3.5 Couple maximal.....	59
2.1.3.6 Vitesse angulaire maximale.....	60
2.1.4 Modèle théorique de BETZ.....	60
2.2 Performances aérodynamiques d'une éolienne.....	63
2.3. Théorie de quantité de mouvement appliquée à un élément de pale.....	64
2.3.1 Théorie de quantité de mouvement.....	64
2.3.1.1 Force axiale.....	64
2.3.1.2 Tube de flux annulaire rotatif.....	65
2.4 Théorie des éléments de pale.....	67
2.4.1 Débit relatif.....	68
2.4.2 Éléments de la pale.....	69
2.4.3 Correction de perte de pointe.....	71
2.4.4 Equations d'élément de pale.....	72
2.4.5 Puissance de sortie.....	72
2.4.6 Procédure de conception d'une pale.....	73
2.4.7 Calcul de la performance de notre éolienne.....	75
2.4.7.1 Distribution de la corde et du gauchissement géométrique.....	76
2.4.7.2 Procédure de calcul.....	77
2.4.7.3 Le cas de notre pale (notre futur échantillon NACA4412 –AR : 0.175).....	79
2.4.7.4 Influence de la qualité aérodynamique des profils.....	82
2.4.8 Profils aérodynamiques.....	84
2.4.8.1 Désignation des profils NACA.....	84
2.4.8.2 Section NACA à 4 chiffres.....	84
Bibliographie.....	85
	86

Chapitre 3

3.1 Introduction.....	
3.2 Phénomènes et paramètres météorologiques liés au déclenchement de sable.....	88
3.2.1 Lithométéores.....	89
3.2.2 La brume sèche.....	89
3.2.3 La brume de sable.....	89
3.2.4 Le chasse-sable ou chasse-poussière.....	90
3.2.5 La tempête de poussière ou tempête de sable.....	91
3.3 Les mécanismes de génération des aérosols minéraux.....	91
3.4. Modélisation des processus d'émission.....	92
3.4.1 Le flux horizontal de saltation.....	95
3.4.2 Le flux vertical de particules fines (émission).....	95
3.5 Transport par le vent.....	97

3.5.1 Distributions d'aérosols minéraux et des sols du Sahara.....	102
3.6 L'analyse granulométrique.....	103
3.6.1 Module de finesse (Mf)	104
3.6.2 Caractéristiques chimiques.....	105
3.6.3 Composition chimique de sable de dunes.....	106
3.7 Nombre de jours par an avec tempêtes de poussière.....	106
3.8 Formule de R.A. BAGNOLD (1936).....	107
3.8.1 Quantification du transport annuel.....	108
3.9 Détermination du profil de densité de flux de masse horizontal, Q.....	109
3.9.1 Hauteur des capteurs BSNE.....	111
3.9.2 La densité de flux de masse horizontal.....	111
Bibliographie.....	112
	113

Chapitre 4

4.1 Introduction.....	115
4.2 Modèle d'érosion.....	115
4.3 Processus d'érosion des matériaux ductiles par les abrasifs durs.....	116
4.4 Suivi des particules de sable dans un environnement à écoulement visqueux.....	119
4.4.1 L'approche Eulérienne- Eulérienne.....	119
4.4.2 L'approche eulérienne et lagrangienne.....	120
4.5 Modèle de rebond de particules lors de l'impact sur une surface solide.....	124
4.6 Simulation de l'impact d'une particule de sable avec le substrat.....	127
4.6.1 Schéma de prévision du suivi actuel des particules et des dommages causés par l'érosion.....	127
4.6.2 Condition d'injection au point de libération des particules.....	128
4.6.3 Type d'injection de particules solides.....	130
4.6.4 Les propriétés des particules solides libérées.....	131
4.6.5 Taux d'érosion.....	132
4.7 Simulation numérique du profil lisse et du profil rugueux.....	135
4.7.1 Loi de la paroi rugueuse.....	135
4.7.2 Stratégie de solution.....	135
4.7.3 Détails sur la discrétisation.....	136
4.7.3.1 Génération de la maille.....	136
4.7.3.2 Modèle mathématique.....	138
4.7.3.3 Simulation dans les petits angles d'attaque.....	138
4.7.3.4 Conditions initiales.....	139
4.7.3.5 Conditions de contour.....	140
4.7.3.6 Discrétisation.....	141
4.8 Résultats.....	142
4.8.1 La courbe du coefficient de pression Cp.....	144
4.9 Conclusion.....	150
Bibliographie.....	150

Chapitre 5

5.1 Introduction.....	152
5.2 Expérimentation.....	153
5.2.1 Objectifs expérimentaux.....	153
5.3 Théorie de l'érosion.....	153
5.3.1 Paramètres impliqués dans le processus d'érosion.....	157
5.3.1.1 Erosion en fonction de la vitesse de particules.....	158

5.3.1.2 Erosion en fonction de la concentration.....	159
5.3.1.3 Erosion en fonction de la matière de particule.....	160
5.3.2 Approche de Beckmann & Gotzmann.....	160
5.3.3 Modèle d'érosion général.....	161
5.4 Comportement des matériaux composites utilisé.....	161
5.4.1 Types de sablage pour les essais d'érosion.....	162
5.5 Montage expérimental.....	163
5.5.1 Description de la mise en place.....	163
5.5.2 Caractéristiques de l'appareil de sablage.....	164
5.5.3 Anémomètre.....	165
5.5.4 Réglage de la puissance.....	165
5.5.5 Paramètres intervenant dans le processus d'érosion.....	166
5.5.6 Evolution de l'érosion en fonction du temps de sablage.....	166
5.7 L'échantillon.....	167
5.7.1 Matière de l'échantillon.....	168
5.8 Résultats après sablage.....	169
5.8.1 Observation des surfaces sablées.....	171
5.9 Machine d'essai de fatigue par érosion.....	172
5.10 Résultats obtenus en soufflerie.....	174
5.10.1 Détermination indirect des coefficients aérodynamiques.....	175
5.11 Conclusion.....	181
Bibliographie.....	182
Conclusion et perspective.....	183
Annexe A	
Annexe B	
Annexe C	
Annexe D	

Liste des figures

Figure	Intitulé	Page
1.1	Sources et couloirs principaux de transport de la poussière Saharienne	7
1.2	Evolution de la technologie des éoliennes commerciales	8
1.3	Moulin à vent Perse	10
1.4	Moulin à axe horizontal	11
1.5	Moulin à grain	12
1.6	Moulin d'Andalousie	13
1.7	Le moulin de Majorque (a), et moulin de Manche (b)	14
1.8	Moulin à pivot (à tour) (a), et moulin à trépied (b)	15
1.9	Moulin au-dessus d'une maison	16
1.10	La complexité des systèmes d'orientation des moulins à vent	17
1.11	Evolution des pales	18
1.12	Moulins à axe vertical	19
1.13	Moulin avec pompe à piston et à tour métallique	20
1.14	Rotor Savonius (a) et Rotor Darrieus	21
1.15	Éolienne Smith-Putnam	22
1.16	Aérogénérateur de 100 kW	23
1.17	Evolution des installations éoliennes dans le monde entier en MW	24
1.18	Capacité totale installée 2013-2017	25
1.19	Nouvelle capacité installée	26
1.20	Taux de croissance	26
1.21	Parts des Continents du monde des nouvelles capacités 2016	26
1.22	La première ferme éolienne du pays inaugurée à Adrar	28
1.23	Nouvel atlas éolien de l'Algérie à 10m de hauteur	29
1.24	Profil vertical de la vitesse du vent dans la région de Laghouat	33
1.25	Histogramme des vitesses de vent et courbe de Weibull ajustée aux données obtenus à Hassi R'mel.	38
1.26	Histogramme des vitesses de vent et courbe de Weibull ajustée aux données obtenus à Laghouat	40
1.27	Transformation de l'énergie cinétique du vent	41
1.28	Structure d'une éolienne	41
1.29	Vecteurs de portance et de traînée	44
1.30	Différentes positions d'une pale « AOA »	44
1.31	Angles apparents du vent	45
1.32	La torsion de la pale	46
1.33	Formes typiques de profils offrant un bon rapport portance/trainée.	46
2.1	Profil avec un angle d'incidence $\alpha=0^\circ$ dans un flux de fluide.	49
2.2	Profil en position quelconque dans un flux de fluide	49
2.3	Plaque plate inclinée par rapport à l'horizontal	49
2.4	Coefficient C_r pour certains profils hémisphériques	50
2.5	Forces de portance et traînée d'un profil fixe	51
2.6	Polaire d'un profil	51
2.7	Profil NACA 4412	52
2.8	Forces agissant sur un élément de pale en rotation	53
2.9	Angles dans une pale d'éolienne	54
2.10	Vitesses et forces apparentes sur une pale d'éolienne.	55
2.11	Modèle de Betz	61
2.12	Tube de flux autour d'une éolienne	65
2.13	Tube de flux annulaire en rotation	66
2.14	Tube de flux annulaire en rotation.	67
2.15	Modèle d'élément de pale	67
2.16	Ecoulement sur la pale d'une éolienne	68
2.17	Forces sur la pale de l'éolienne	69
2.18	Coefficients de portance et de traînée pour un profil NACA 4412	70
2.19	Géométrie d'une pale pour l'analyse d'éolienne HAWT	77
2.20	Algorithme de calcul des paramètres locaux d'une pale.	78
2.21	Coefficients de portance d'après les résultats expérimentaux	80
2.22	Design 3D d'un rotor de 16m de diamètre	82

2.23	Influence de la qualité aérodynamique (éolienne 3 pales).	83
2.24	Méthode de combinaison de la ligne médiane et de la distribution d'épaisseur.	84
2.25	profil NACA 4412 généré sous Excel.	86
2.26	CAD modèle du futur échantillon.	86
2.27	Dimensions de l'échantillon	86
3.1	Eoliennes implantées dans le lac Turkana.....	88
3.2	Symboles des phénomènes réduisant la visibilité près du sol	90
3.3	Photo d'un mur de vent de sable –Laghouat (28 Août 2013)	92
3.4	Mode de production des particules en suspension dans l'atmosphère	94
3.5	Comparaison d'une nouvelle expression de la vitesse de friction seuil à ceux de Greeley et de Flectcher	99
3.6	Spectres de concentration en nombre de l'aérosol saharien pour différentes situations	99
3.7	Distributions granulométriques d'aérosol saharien comparées	101
3.8	Diagramme de Hjulström : Transport des éléments solides	102
3.9	Distributions granulométriques d'aérosol saharien (région de Laghouat)	104
3.10	L'analyse granulométrique du sable	105
3.11	Analyse chimique du sable de dune	106
3.12	Micrographie montrant un échantillon du sable utilisé (Gx100).	107
3.13	Zone d'étude près de la ville de Laghouat	109
4.1	Eoliennes implantées dans le désert	118
4.2	Géométrie de rebond pour l'impact d'une seule particule solide	125
4.3	Simplification d'un impact d'une particule de sable irrégulière	126
4.4	Impact d'une particule de sable sur une surface en composite	127
4.5	Forme érodée dû à un jet d'air chargé de grains de sable	127
4.6	Profil NACA4412 soumis à l'injection par particules	128
4.7	Configuration bidimensionnel d'injection	129
4.8	Types d'injections de particules solides sous Flow Simulation	130
4.9	Alignement des particules de sable dans le domaine d'injection	131
4.10	Impact et rebond sur le bord d'attaque	133
4.11	Menu pour injecter ou modifier les paramètres de la rugosité.	136
4.12	Dimensions du domaine et distribution des faces. Longueur de corde $l_c = 0,175$ (m)	137
4.13	Raffinage au voisinage du bord d'attaque du profil	137
4.14	Domaine du problème (Longueur de corde $l_c = 0,175$ m).	140
4.15	Contours de la pression statique d'un profil NACA4412 lisse à $\alpha = 0^\circ$.	143
4.16	Contours de la vitesse d'un profil NACA4412 lisse à $\alpha = 0^\circ$.	143
4.17	Contours de la pression statique d'un profil NACA4412 rugueux à $\alpha = 0^\circ$.	144
4.18	Contours de la vitesse d'un profil NACA4412 rugueux à $\alpha = 0^\circ$.	144
4.19	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA=0^\circ$.	145
4.20	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA=2^\circ$.	145
4.21	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA=4^\circ$.	146
4.22	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 6^\circ$.	146
4.23	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 8^\circ$.	147
4.24	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 10^\circ$.	147
4.25	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 13^\circ$.	148
4.26	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 16^\circ$.	148
4.27	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 20^\circ$.	149
4.28	Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rigoureux à $AOA= 25^\circ$.	149
5.1	Comportement typique à l'érosion des matériaux ductiles et fragiles en fonction de l'angle d'impact des particules.	154
5.2	Mécanismes possibles d'érosion par une particule de sable.	154
5.3	Les quatre sous mécanismes qui enlèvent de la matière de la cible par érosion.	155
5.4	Influence de sur le mode type d'écoulement d'érosion.	156
5.5	Forces qui agissent sur une particule de sable.	156
5.6	Fissures générées par l'impact d'une particule.	157
5.7	Répartition du taux de restitution en fonction de la vitesse d'impact.	159
5.8	Influence de la matière de la particule sur le taux d'érosion.	160
5.9	Comparaison des caractéristiques du comportement ductile et fragile par érosion.	162

5.10	Machine de sablage à air comprimé.	163
5.11	Porte échantillon orientable.	165
5.12	Anémomètre pour mesurer la vitesse du jet.	165
5.13	Photos des échantillons.	167
5.14	Relevé de la rugosité de l'échantillon.	168
5.15	fibre de verre tissée selon un motif (Plain weave).	168
5.16	Points principaux du bord d'attaque.	169
5.17	Perte de masse en fonction du temps de sablage.	170
5.18	Photos des échantillons dégradés par sablage (durée de sablage: 160 s).	171
5.19	L'image MEB montre l'apparition de fibres après un temps d'exposition : (a) T = 160 s (angle d'incidence $\alpha = 60^\circ$), (b) T = 160 s (angle d'incidence $\alpha = 60^\circ$).	172
5.20	CAD modèle de la machine de fatigue par érosion.	172
5.21	Machine d'essai de fatigue par érosion.	173
5.22	CAD modèle des échantillons en composite montés sur un porte échantillon dans l'appareil de fatigue par érosion.	174
5.23	Soufflerie subsonique HM 170 Gunt.	175
4.24	CAD modèle du banc d'essai pour mesurer m_p et m_T .	175
5.25	Coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence.	178
5.26	Coefficient de traînée en fonction de l'angle d'incidence.	178
5.27	Coefficient d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence.	179
5.28	Les zones lisses et rugueuses des profils d'ailes.	180

Liste des tableaux

Tableau	Intitulé	Page
1.1	Classe de vent à 10 et 50 m.	30
1.2	Potentiel éolien à travers la steppe.	31
1.3	Vitesse de vent en fonction de la hauteur.	32
1.4	Vitesse moyenne annuelle des vents à Laghouat.	35
1.5	Données des vitesses du vent de la station de Hassi R'mel.	37
1.6	Données des vitesses du vent de la station de Laghouat.	39
2.1	Nombre de pales en fonction de λ .	73
2.2	Résultats obtenus par la méthode itérative.	81
2.3	Longueur de la corde le long de la pale.	82
3.1	L'analyse granulométrique de sable.	104
3.2	résultats des essais physiques effectués sur le Sable de dune utilisé.	106
3.3	Caractéristiques des périodes de l'érosion éolienne. (mesures effectués avec enregistrements de la saltation).	107
3.4	Nombre de jours par an avec tempêtes de poussière (visibilité <1 km).	108
3.5	Hauteur des capteurs.	111
3.6	Masse récoltée de chaque BSNE.	111
3.7	Densité de flux de masse horizontal.	112
4.1	Résultats obtenus par simulation.	134
4.2	Discretisation sous Fluent.	140
4.3	Facteurs de relaxation.	140
4.4	Critères de convergence.	141
5.1	Concentration des particules– MIL STD-810G.	154
5.2	Les distances prévues des éprouvettes par rapport à la buse.	162
5.3	Caractéristiques Fibre de verre.	166
5.4	Résistance à la traction de fibre de verre.	166
5.5	Propriétés de traction de la résine polyester.	167
5.6	Propriétés de flexion de la résine de polyester.	167
5.7	Propriétés de rupture de la résine de polyester.	167
5.8	Pertes de masse en fonction du temps et de l'angle d'impact.	168
5.9	Résultats expérimentaux de la rugosité.	169
5.10	Résultats pour un profil NACA 4412 lisse ($Ra= 0.94$).4	174
5.11	Résultats pour un profil NACA 4412 rugueux ($t = 40$ s).	175

Abstract. This paper presents the results of experimental research to investigate blade material surface deterioration of wind turbines located in arid areas caused by sand particles impacts and the resulting influence on their energetic performance. Tests are conducted in the erosion sandblaster then in the wind tunnel for uncoated Glass Fiber/Polyester blade at various angles and durations impact. The magnitudes of aerodynamics forces on a Naca 4412 profile are determined experimentally. All profiles (AR=0.571) are tested in a wind tunnel at air speed of 10 m/s at Reynolds number 6.5×10^5 . The results show the behavioral differences detected for the specimens with $T = 160$ s, $T = 240$ s and $T = 340$ s (when Ra increases) by comparing them with the smooth specimen ($T = 0$ s, $Ra = 0.94$). Force coefficients (CL and CD) show significant changes which leads to a decrease of the lift-to-drag ratio and therefore there will be a notable performance loss. This will be an acceptable threshold for the case where $t = 160$ s.

Résumé: Ce travail présente les résultats expérimentaux d'une étude de dégradation de la surface des pales d'éoliennes situées dans des zones arides causée par les impacts de particules de sable et les conséquences qui en résultent sur leurs performances énergétiques. Les essais sont effectués sur une sableuse à érosion puis sur une soufflerie pour la pale en fibre de verre / polyester non revêtue sous différents angles et différentes durées d'impact. Les forces aérodynamiques sur le profile utilisé NACA 4412 sont déterminées expérimentalement. Tous les profiles (AR = 0,571) sont testés dans une soufflerie à une vitesse d'air de 10 m/s et au nombre de Reynolds 6.5×10^5 . Les résultats montrent les différences de comportement détectées pour les échantillons à différentes durées d'impact $T = 160$ s, $T = 240$ s et $T = 340$ s (quand Ra augmente) en les comparant avec l'échantillon sain (ou non érodé) ($T = 0$ s, $Ra = 0,94$). Les coefficients de force (CL et CD) montrent des changements significatifs qui conduisent à une diminution du rapport portance-trainée et donc une perte de performances notable.

Nomenclature

A	Section du rotor	m^2
AOA	Angle Of Attack	
a	Facteur d'induction axiale	
a'	Facteur d'induction radiale	
AR	Rapport d'aspect	
$BSNE$	Capteur de sable « Big Spring Number Eight)»	
C_w	Concentration en particules de sable	%
c	Paramètre d'échelle	m/s
C_r	Coefficient de résistance (de pénétration)	
C_x, C_T	Coefficient de traînée	
C_y, C_P	Coefficient de portance	
$C_{tot.}$	Coefficient aérodynamique total	
\vec{c}, \vec{W}	Vitesse du vent relatif	m/s
C_{max}	Couple maximal	$N.m$
$C_{puis.}$	Coefficient de puissance	
$C_{perf.}$	Coefficient de permanence	
D_p	Diamètre de la particule	m
E	Energie totale	J
$E_{cin.}$	Energie cinétique	J
F_P	Force de portance	N
F_T	Force de traînée	N
f	Finesse	
F_θ, F_c	Force de couple	N
F_x, F_{axi}	Force axiale (de poussée)	N
F_h	Flux horizontal de particules	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
g	Accélération de pesanteur	m/s^2
h_1	Hauteur de mât de mesure	m
h_2	Hauteur souhaitée de l'éolienne	m
I	Moment d'inertie	$Kg.m^2$
J	Facteur de correction	
k	Facteur de distribution de forme	
L	Longueur du profil	m
l_c	Corde du profil	m
N_{vent}	Energie éolienne du vent	J
N	Nombre d'éléments de pale	
n	Fréquence de rotation nominale de la pale	tr/min
OMM	Organisation mondiale de la météo	
$P_{uti.}$	Puissance utile	W
P_{vent}	Puissance du vent	W
P_1	Pression dans la station 1	N/m^2
P_2	Pression dans la station 2	N/m^2

P_3	Pression dans la station 3	N/m ²
Q	Taux de transport de sable	%
Re	Nombre de Reynolds	
R	Rayon de la pale	m
r	Rayon d'un élément de pale	m
r_m	Rayon du moyeu	m
S	Section frontale du profil	m ²
SR	Rapport de vitesse	
TSR	Rapport de vitesse de la pointe de la pale	
\vec{u}	Vitesse du vent créée par la pale	m/s
u_*	Vitesse de friction du vent	m/s
u_*^*	Vitesse de friction seuil	m/s
V_v	Vitesse du vent créée par la pale	m/s
\vec{v}	Vitesse du vent réelle (nominale)	m/s
x_U, y_U	Coordonnées de l'extrados	m
x_L, y_L	Coordonnées de l'intrados	m
z_0	Longueur de rugosité	
Z	Nombre de pale	
α	Angle d'attaque (d'incidence)	°
β	Angle de calage local (pitch)	°
β_p	Angle de calage de la pale	°
β_0	Gauchissement de la pale	°
β_T	Angle twist local	°
ρ_a	Masse volumique de la particule	Kg/m ³
ρ	Densité de l'air	Kg/m ³
ν	Viscosité cinématique de l'air	m ² /s
θ	Angle du vent apparent (d'assiette)	°
η_{aero}	Rendement aérodynamique	
λ	Rapport de vitesse de la pointe de la pale	
λ_r	Rapport de vitesse	
λ_m	Rapport de vitesse du moyeu	
ω_{max}	Vitesse angulaire maximale	rad/s
Ω	Vitesse angulaire de la pale	rad/s
γ_s	Masse volumique absolue	Kg/m ³
δ'	Solidité locale	

Introduction générale

Problématique

La demande d'énergie suit un rythme croissant semblable à celui de la croissance de la population mondiale. Parmi Les ressources énergétiques principales c'est les combustibles d'origine fossiles car ils sont plus largement disponibles, mais ils ne peuvent pas répondre à tous les besoins en énergie des habitants de la planète. En conséquence, et à cause de l'instabilité de leurs prix et d'après les données des réserves en combustibles fossiles actuelles, les prévisions montrent qu'ils peuvent être épuisés dans les prochaines décennies, alors les pays ne disposant pas de leur propre approvisionnement en pétrole ont recherché des sources d'énergie alternatives réalisables et durables. Un autre défi environnemental vient s'ajouter à tout cela, c'est la menace d'une augmentation des quantités émis de gaz à effet de serre nocifs dans l'atmosphère résultant d'une exploitation excessive de gaz et de produits pétroliers, ce qui met la pression afin d'utiliser des ressources en énergies renouvelables. Parmi ces ressources, on trouve l'énergie éolienne, c'est l'une des sources d'énergie renouvelables envisagées en raison de sa disponibilité globale et de son faible coût.

Les autorités politiques nationales connaissent ces soucis, et ont donc décidé, depuis plusieurs années, de se pencher sur la question. Le développement des énergies renouvelables en Algérie est un projet inscrit dans la loi nationale depuis 2004. La loi n° 04-09 du 14 août 2004 stipule en effet, au terme de son article 6, que "la promotion des énergies renouvelables est réalisée à travers : un programme national de promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable et les instruments de promotion des énergies renouvelables".

Un certain nombre de pays, comme l'Algérie, connaissent des périodes sèches et poussiéreuses dans les régions arides et semi arides, et les éoliennes récemment installées à Adrar ou les parcs éoliens qui sont inscrit dans le programme national seront exposés à l'érosion par des particules de sable, ces dernières ont plusieurs effets néfastes sur la performance et la durée de vie de l'éolienne. Par conséquent, la prévision des pertes d'énergie dues à l'érosion est une question vitale à prendre en compte par les responsables de projets d'implantation de parcs éoliens. Le projet d'installation d'un parc éolien dans la zone venteuse de Laghouat dans le sud de l'Algérie, s'avérera utile dans les années à venir, alors il faut

prendre en compte qu'il est bien connu que le vent de sable est un phénomène météorologique commun à cette région.

Les parcs éoliens souffrent de sous-performances par rapport aux prévisions du fabricant. Les facteurs de capacité ont été surestimés de 10% à 30% [1]. Cependant, la sur-prédiction est difficile à caractériser. Les coupables vont de la localisation non optimale, des ressources éoliennes mal comprises, et même une atmosphère politique, mais si on se contente que des facteurs aérodynamiques alors la rugosité de la pale causée par l'érosion (sable, sel et grêle), dépôts (insectes, glace) ou spallation de revêtement, sont les vrais coupables de la perte de performance d'une éolienne (voir Figure 1.1).

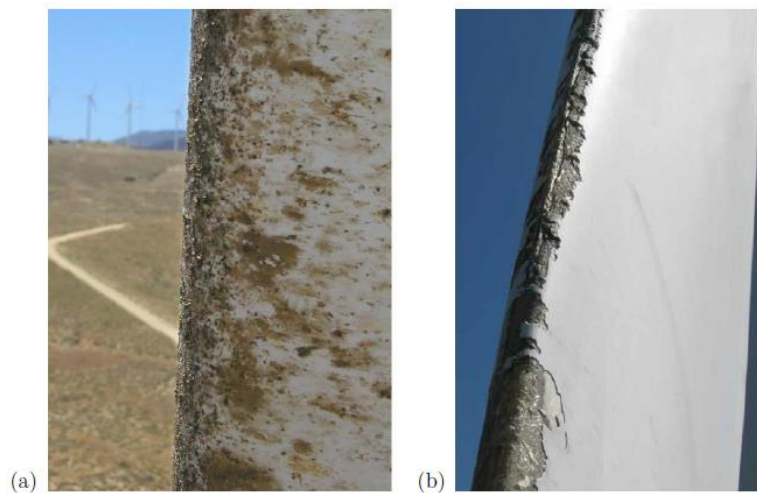


Figure 1.1. Rugosité des pales d'éoliennes : rugosité causée par le dépôt d'insectes (a) et la rugosité due à l'érosion (b) [4].

La rugosité causée par le dépôt d'insectes a entraîné une diminution de 25% de la production d'énergie [2]. De même, il a été observé que l'érosion entraînait une perte de 20% ou plus de l'énergie capturer et peut affecter les pales qu'après seulement deux à trois années de leurs fonctionnement [3]. L'érosion des pales représente maintenant 6% de toutes les réparations liées aux éoliennes [4].

Les dommages dus à l'érosion d'une pale d'une éolienne résultant de l'impact de particules solides entraînent un enlèvement important de matière à la surface. L'enlèvement de matière entraîne une réduction importante de sa durée de vie et une augmentation des coûts de réparation et de remplacement. Une bonne compréhension et une bonne prévision de l'érosion sur les pales d'une éolienne sont donc très importantes pour évaluer les dommages, estimer les performances aérodynamiques et développer un système de protection contre l'érosion.

Cependant, la prédiction de l'érosion sur les pales reste un défi en raison de la complexité des processus physiques impliqués et des limites de la littérature ouverte existante.

Par conséquent, dans ce travail, une méthodologie précise et rapide a été appliquée pour effectuer le suivi des particules de sable et prévoir les dommages causés par l'érosion du sable sur les pales d'éolienne dans les conditions réelles de son fonctionnement ensuite les données finales serviront à valider les prédictions des performances de la simulation. Cette méthodologie a été réalisée sur la base d'une revue de littérature approfondie dans le domaine de l'érosion par particules solides dans les systèmes de turbomachines en raison de la similitude des phénomènes de physique des écoulements et d'érosion dans les composants de turbomachines et autour des pales d'éolienne.

Bien que l'effet néfaste de la rugosité soit incontestable, de nombreux progrès restent à faire pour quantifier l'ampleur de l'effet. Les concepteurs de pales continuent de lutter pour minimiser la sensibilité de la pale à la rugosité. Enfin, les opérateurs n'ont aucune idée quantitative de la perte de production due à la rugosité.

Il existe peu d'études quantitatives sur la rugosité des pales d'éoliennes dans la littérature. Les fabricants modernes et les exploitants de parcs éoliens hésitent à publier en raison de la perception de la marque. Une grande partie des données de puissance disponibles proviennent d'anciennes turbines à régulation de décrochage, où la rugosité était un problème considérable. Les turbines à vitesse variable régulées en tangage étant devenues familières, la sensibilité à la rugosité a diminué. Cependant, à mesure que les pales épaississent, des preuves anecdotiques indiquent que la rugosité redevient un problème. La rugosité fait également l'objet d'un nouvel examen, car les entreprises demandent des estimations de performance précises. Malgré cela, peu de références modernes définissent et quantifient clairement la rugosité de la pale.

La rugosité s'est révélée être un problème considérable pour les performances des éoliennes et les profils aérodynamiques et ces derniers ont été systématiquement conçus pour lutter contre cela. Les profils aérodynamiques ont souvent été validés expérimentalement avec des bandes abrasives pour simuler des conditions difficiles. La rugosité avec des bandes abrasives est plus appropriée, mais elle est définie et appliquée de manière incohérente entre les références.

De nombreux articles récents ont examiné qualitativement le problème de rugosité des pales d'éoliennes. Dalili et al. discuter du givrage, de la rugosité causée par les insectes et de

l'érosion du sable comme principales préoccupations environnementales [5]. Des sources de rugosité de pale supplémentaires sont identifiées, notamment une accumulation de sable, du sel, des gouttelettes d'eau et des imperfections de fabrication. L'accumulation de sable est difficile à caractériser car il n'existe aucune littérature concernant l'effet des particules de sable en altitude entre 20 et 150 m.

Objectifs de la recherche

Les éoliennes actuelles sont à mégawatts et régulées en tangage, avec de grandes différences entre les anciennes turbines en kilowatts et régulées en décrochage. Bien que les deux systèmes soient sensibles à la rugosité et qu'il y a un travail énorme fait pour quantifier les pertes de performances sur les éoliennes modernes dû aux dépôts d'insectes et de glace, en revanche, il est presque rare de trouver un travail quantifiant ces pertes du à l'érosion par des particules de sable.

Afin de contribuer à la résolution de ce problème, nous présentons ici les travaux effectués dans ce sens. Tout d'abord, il faut faire la caractérisation de la rugosité des pales d'une éolienne en service d'une taille de mégawatt. Ces défauts micro et macro géométriques de l'état de surface seront obtenu par l'exposition des profils aérodynamiques à un sablage avant de les tester. Les tests aérodynamiques sur ces profils dégradés seront exécutés dans une soufflerie subsonique afin de les comparer avec ceux du profil témoin lisse.

Des mesures de portance, de traînée, de moment et de transition seront effectuées pour chaque niveau de dégradation. Le développement de la couche limite derrière les configurations de rugosité sera examiné. La perte de performance due à la rugosité sera quantifiée expérimentalement. Ensuite, une comparaison de l'AEP (Annual Energy Loss) entre des profils dégradés et le profil témoin. Une simulation numérique est faite pour étudier les effets de la rugosité du bord d'attaque sur les performances aérodynamiques. En espérant que nos résultats serviront l'industrie et les futurs efforts de recherche. Economiquement, avec les résultats obtenus les opérateurs peuvent planifier une stratégie de maintenance préventive dont les inspections et les réparations des pales seront réduites avec des estimations de perte de performance minimisés. Les résultats collectés expérimentalement serviront aussi à proposer dans le futur une nouvelle méthode de maintenance CBM afin d'améliorer la durée de vie d'une pale éolienne. Cette maintenance CBM va permettre de façon plus efficace à détecter toute dégradation provoquée par l'usure érosive à la surface d'une pale pendant son service.

L'organisation de cette thèse est la suivante:

Le chapitre 1 : contient un état d'art sur les éoliennes, leur évolution technologique, l'importance de l'énergie éolienne pour l'économie d'un pays, les statistiques mondiales de la production d'énergie à partir de l'éolien, le potentiel éolien national et celui de la région de Laghouat et en fin quelques notions terminologiques sur l'aérodynamique.

Le chapitre 2 : ce chapitre est consacré à expliquer les méthodes de calcul de la performance d'une éolienne à savoir la théorie de quantité de mouvement et la théorie des éléments de pale et en fin les procédures de la conception d'une pale.

Le chapitre 3 : Met en évidence les liens entre les endommagements des pales et le phénomène d'érosion éolienne et le type de granulométrie de sable qui participe à l'érosion des bords d'attaques des pales. Une étude du flux vertical des particules fines permet de déterminer les hauteurs les vitesses et la concentration des particules de sable dans le vent.

Le chapitre 4 : est consacré à la description de la méthodologie numérique utilisée dans les simulations, la présentation des étapes de la simulation à l'aide du logiciel Ansys-Fluent en 2D et la simulation de l'érosion d'un profil 3D.

Le chapitre 5 : est consacré à la campagne expérimentale, décrit le programme des essais sur des échantillons en composite (résine Polyester renforcé par des fibres de verre), et la description des moyens utilisés.

Cette thèse se termine par une conclusion générale résumant l'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail.

Références :

- [1] Boccard, N., "Capacity factor of wind power realized values vs. estimates," Journal of Energy Policy, Vol. 37, 2009, pp. 2679.
- [2] White, E. B., Kutz, D., Freels, J., Hidore, J. P., Grife, R., Sun, Y., and Chao, D., "Leading-Edge Roughness Effects on 633-418 Airfoil Performance," 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Vol. none, 2011, p. none.
- [3] Berg, D. E., A Review of the Workshop on WECS Blade-Surface Roughness, Sandia National Laboratories, asme wind energy symposium ed., January 1994.
- [4] Rempel, L., "Rotor Blade Leading Edge Erosion - Real Life Experiences," Wind Systems Magazine, Oct. 2012.
- [5] Dalilia, N., Edrisya, A., Carriveau, R., «A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance», Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 2, Feb. 2009, pp. 428-438.

Chapitre 1

Evolution de la technologie des éoliennes

1.1 Introduction

Depuis ces dernières décennies le secteur éolien s'est développé à une vitesse étonnante, et il est désormais classé parmi les priorités de l'agenda politique presque de tous les pays. Avec la menace de crise énergétique qui plane, on entend des appels de plus en plus pressants pour qu'une solution immédiate et concrète soit apportée aux nombreux défis énergétiques et climatiques que le monde est actuellement amené à relever : et c'est précisément cette solution qu'offre l'énergie éolienne.

Ce chapitre traite de l'historique des éoliennes, de leurs évolutions, de leur statut actuel et des défis à venir. Le défi technique de l'industrie éolienne principal pour l'homme consiste à concevoir une éolienne efficace et fiable pour exploiter l'énergie d'origine éolienne et la transformer en électricité. Avant d'aborder la recherche historique de l'évolution de ces machines, il faut préciser qu'on va s'intéresser essentiellement dans ce travail sur un autre défi qui est d'origine environnemental et qui touche directement les capacités aérodynamiques des pales d'une éolienne.

Le bord d'attaque est la première surface géométrique avancée de la pale qui entre en contact avec l'air. Cependant, le vent transportant de grandes quantités de sable fin peut éroder le bord d'attaque de l'éolienne. En conséquence, la rugosité de surface augmente, ce qui entraîne une dégradation des performances aérodynamiques. L'abrasion due aux particules dures dégrade gravement le revêtement de la pale et contribue au changement de sa forme aérodynamique engendrant des vibrations et réduisant inévitablement sa durée de vie. Les pales étant souvent en polymère renforcé de fibre de verre, alors les éoliennes implantées dans un environnement sec et poussiéreux sont exposées aux vents chargés de poussière (taille des particules de sable $\leq 80 \mu\text{m}$) et peuvent être fortement altérées dans ces conditions météorologiques. Le phénomène environnemental connu sous le nom de vent de sable est courant au printemps (avril et mai - voir figure 1.1) à Laghouat et ses régions voisines. Il est causé par l'érosion éolienne et selon les statistiques des services météorologiques locaux, la durée moyenne de ce phénomène en un an est de 18 jours et 19 heures.

Le taux d'émission de poussière est un flux de masse vertical de poussière qui monte à des altitudes plus élevées. Les particules de poussière, une fois en suspension dans l'air, peuvent être diffusées par turbulence dans les couches supérieures de l'atmosphère, puis transportées sur de grandes distances par les vents [1].

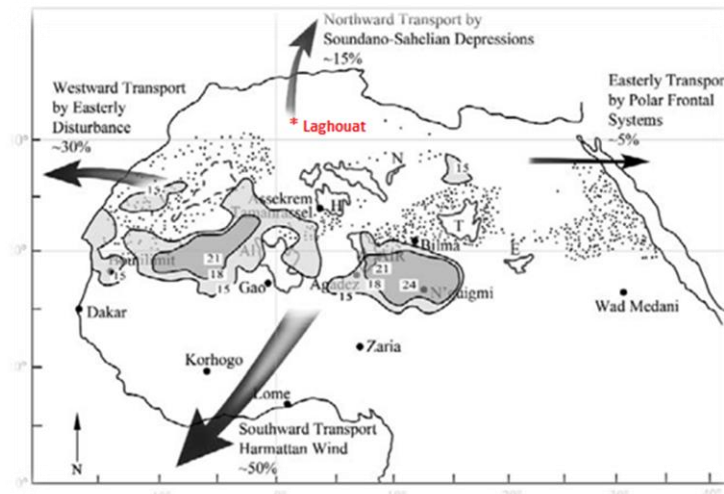


Fig. 1.1: Sources et couloirs principaux de transport de la poussière Saharienne [1].

Cependant, il est généralement admis que les bords d'attaque est un défi majeur pour les fabricants et les opérateurs. Wood [2] indique que certains opérateurs ont constaté que l'érosion du bord d'attaque pouvait devenir un problème après seulement deux ans de fonctionnement de l'éolienne; beaucoup plus tôt que prévu. Rempel [3] a déclaré que, dans les premières années de l'industrie éolienne nord-américaine, il était prévu qu'une fois les pales sont en service, les inspections et la maintenance de routine ne seraient plus nécessaires, mais au fur et à mesure du développement de l'industrie, il est devenu évident que le problème de l'érosion du bord d'attaque était important et que la maintenance serait essentielle si les pales devaient atteindre leur durée de vie prévue.

Actuellement, l'industrie éolienne a une forte tendance à se concentrer sur l'impact éventuellement grave de l'environnement sur les bords d'attaque des éoliennes, ainsi que sur leur taux de production énergétique. La perte de production d'énergie annuelle peut atteindre 20% en raison de l'érosion selon les recherches les plus récentes [4]. LM Wind Power a mené une étude sur plus de 400 éoliennes afin de déterminer le degré de fiabilité du bord d'attaque de leurs pales sur plusieurs sites. Les pales ont été minutieusement inspectées et les défauts sur les bords d'attaque ont été enregistrés. Tous les défauts sont classés en plusieurs modes de défaillance. Les modes de défaillance observés ont montré que les approches et les normes de test sont insuffisantes pour assurer une bonne protection du bord d'attaque.

Une meilleure corrélation des conditions environnementales, telles que l'intensité UV, la température et les précipitations, ainsi que les conditions de fonctionnement, telles que la vitesse nominale de la pointe de la pale et la durée de fonctionnement de l'éolienne, peut donner de nouveaux protocoles de test efficaces [5].

1.2 Evolution de la technologie des éoliennes commerciales

L'évolution des éoliennes modernes est une histoire d'ingénierie et de compétences scientifiques, associée à un fort esprit d'entreprise. Au cours des 20 dernières années, la taille des turbines a été multipliée par 100 (de 25 kW à 2500 kW et au-delà), le coût de l'énergie a été réduit de plus de cinq fois et l'industrie est passée d'une frange idéaliste activité à une composante reconnue du secteur de la production d'électricité. Dans le même temps, la base d'ingénierie et les outils informatiques ont été développés pour s'adapter à la taille et au volume de la machine. C'est une histoire remarquable, mais elle est loin d'être terminée: de nombreux défis techniques subsistent et des réalisations encore plus spectaculaires suivront.

Les rapides progrès techniques sont particulièrement visibles pour la technologie éolienne. Les chiffres montre avec quelle rapidité les dimensions, la puissance et la complexité des éoliennes se sont développées, la figure 1.2 montre mieux l'accroissement de taille des éoliennes commerciales (Figure 1.2).

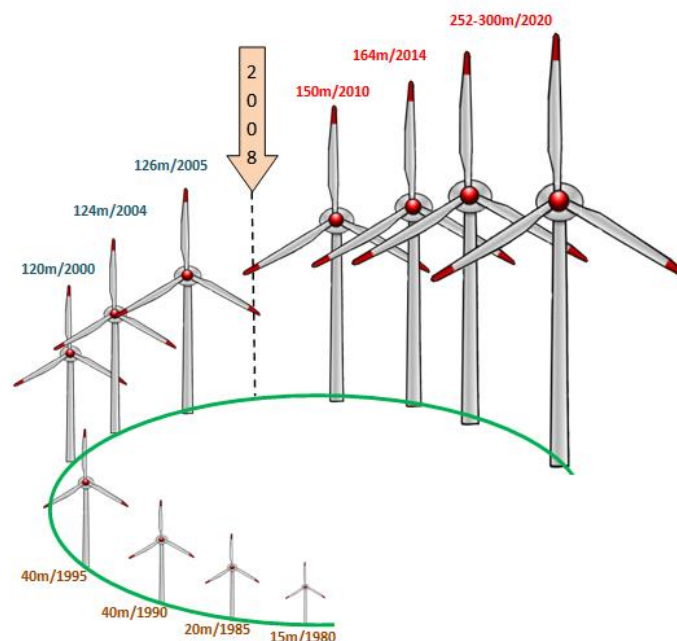


Fig. 1.2 : Evolution de la technologie des éoliennes commerciales.

En dépit de leur apparente simplicité, les éoliennes sont soumises à certaines exigences fondamentales qui rendent unique en son genre cette branche de l'ingénierie.

- La machine doit fonctionner comme une centrale électrique, sans personnel et la production qu'elle doit fournir au réseau électrique ne se limite pas à un seul type de secteur de consommation.
- Du fait que le vent varie sur une échelle de temps qui va des secondes aux années, tout est soumis à l'incertitude, depuis les charges mécaniques jusqu'à la production d'énergie.
- En matière de coûts énergétiques, la technologie doit faire face à la concurrence d'autres sources d'énergie renouvelable et celle de la production conventionnelle.

1.3 Historique de l'évolution des éoliennes

L'histoire nous apprend que l'utilisation de la technologie éolienne a été initiée en Perse en l'an 1000 avant J.C pour moulinier le grain et pour le pompage d'eau. Dans l'évolution historique des éoliennes, on distingue quatre périodes définies par des événements historiques ou techniques, décrites ci-dessous:

- La première période comprend les premières machines connues jusqu'aux XIVe et XVe siècles et se caractérise par une lente évolution technique.
- La deuxième période commence à la Renaissance et se termine au milieu de la révolution industrielle. A ce stade, les machines suscitent un grand intérêt. Il y a une évolution technique rapide qui permet à l'homme d'introduire d'importantes améliorations dans les usines. Les systèmes d'orientation sont développés, la conception des pales est simplifiée.
- La troisième période va du milieu du XIXe siècle au milieu du siècle passé. Pendant ce temps, la théorie aérodynamique est développée et d'autres découvertes de nature technique sont faites. Les moulins à vent subissent une transformation complète dans leur conception.
- La quatrième et dernière période commence avec la crise de l'énergie de 1973 et se poursuit jusqu'à aujourd'hui. Aucune modification majeure n'est constatée dans la conception, mais il existe une évolution technologique, des méthodes de calcul plus rigoureuses sont développées, de nouveaux matériaux plus légers et plus résistants sont utilisés, des systèmes de régulation et de contrôle électroniques apparaissent.

1.3.1 1^{ière} période de l'énergie éolienne.

Le plus ancien document historique connu sur l'exploitation de l'énergie éolienne est constitué de gravures égyptiennes traitant de la navigation à la voile de l'IV^e et VI^e millénaire avant Jésus-Christ.

La première référence historique à une éventuelle utilisation de l'énergie éolienne autre que la navigation date de 1700 avant J.C, les Babyloniens étant les pionniers dans l'utilisation des moulins à vent pour pomper de l'eau afin d'irriguer leurs champs.

Le premier moulin à vent orienté, connu de manière assez détaillée, est le moulin à arbre vertical persan, utilisé plusieurs siècles avant notre ère. Ce moulin était utilisé pour moudre le grain et était couramment utilisé dans Khorasan, une zone située dans l'ancienne Perse dans l'actuel Iran et l'Afghanistan, où il est dit qu'un vent très constant soufflait, appelé les 120 jours. On pense que l'apparence de ce moulin a un certain rapport avec la roue hydraulique apparue précédemment.

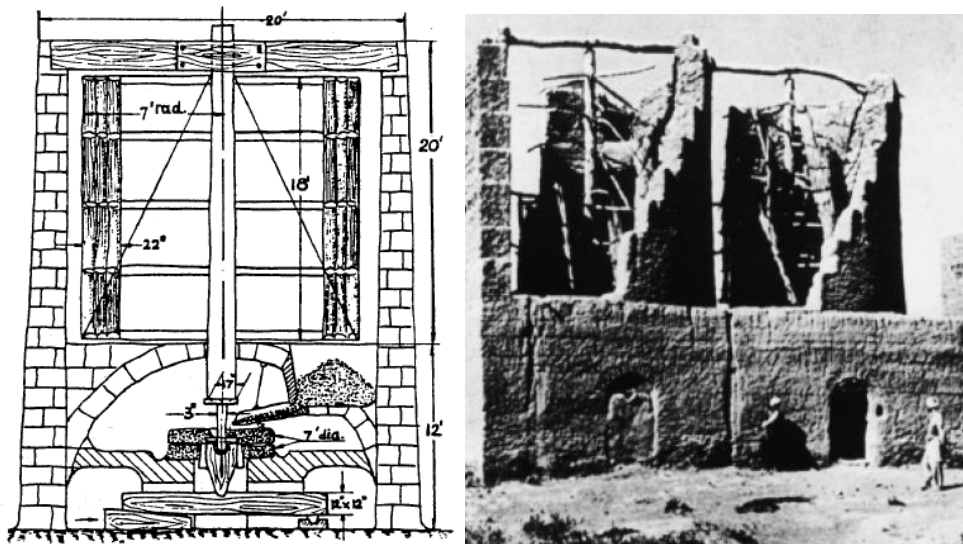


Fig. 1.3 : Moulin à vent Perse [6].

Le moulin persan (Figure 1.3) était formé d'une tour de maçonnerie avec un mur frontal qui permettait de diriger le vent sur les pales. Le rotor était formé de huit pales en bois qui se rejoignaient dans l'axe central, communiquant le mouvement aux roues situées dans la base.

Les moulins à axe horizontal pouvaient être apparus pour la première fois dans l'ancienne Perse, probablement avant l'ère islamique. Son invention devrait répondre à la nécessité d'adapter les éoliennes à axe vertical au pompage de l'eau.

La disposition du rotor, dans les systèmes à axe horizontal, est plus adaptée pour déplacer une noria (collecteur d'eau dans un aqueduc) sans avoir à modifier la direction de la force motrice au moyen d'un engrenage, ce qui supposerait sans aucun doute une complication technique pour l'époque.

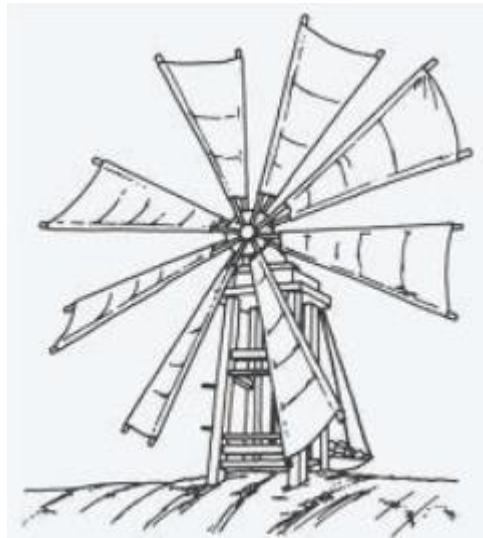


Fig. 1.4 : Moulin à axe horizontal [7].

Dans les premiers moulins à axe horizontal (figure 1.4), le rotor était formé de voiles similaires à celles utilisées en navigation. L'axe sur lequel les six ou huit pales étaient jointes déplaçait une roue à laquelle la roue était attachée. L'ensemble était soutenu par un trépied en bois placé au-dessus de la bouche du puits.

À partir des XI^e et XII^e siècles, l'évolution des moulins à vent se développe selon deux voies apparemment sans aucun rapport l'une avec l'autre. D'une part, on peut parler d'un type de moulin qui se développe au sein de la civilisation islamique, qui occupe tout le sud de la Méditerranée (moulin méditerranéen), atteignant la moitié sud de la péninsule ibérique (moulin ibérique), et d'autre part l'apparition des moulins éoliens de construction différente (moulin européen) en France, en l'Angleterre et en Pays-Bas auraient pu parvenir par les croisades rentrées de Palestine.

1.3.1.1 Les moulins méditerranéens.

Le moulin méditerranéen servait à pomper de l'eau et à moudre le grain sur toute la longueur de l'empire musulman. Le modèle le plus simple était celui utilisé pour puiser l'eau des puits. Les pales de ces moulins ont été fabriquées en attachant des toiles sur les pôles du rotor, semblables aux moulins persans à axe horizontal.

Le rotor reposait sur un trépied en bois, sur la quel une roue était placée et sur la périphérique de cette dernière on a accroché des seaux (conteneurs pour le transport de l'eau) permettant de puiser l'eau. La vitesse de rotation pourrait être réglée par la procédure de libération ou de récupération des voiles.

Les premiers moulins à grains étaient des machines à rotor fixe, sans possibilité d'orientation dans la direction du vent (Figure 1.5).



Fig. 1.5 : Moulin à grain [8].

Au fil du temps, ces moulins ont été perfectionnés pour devenir des moulins à tour. La tour, construite en maçonnerie, était couronnée par une copule ajustable où étaient logés l'arbre, les engrenages et d'autres mécanismes qui transmettaient le mouvement aux roues situées en dessous. Les opérations d'orientation ont été effectuées à l'aide d'un levier.

1.3.1.2 Les moulins Andalous

Dans tous les moulins du sud de la péninsule ibérique, les caractéristiques essentielles du moulin méditerranéen sont conservées, en ce qui concerne son système à pales et la tour, en ce qui concerne le nombre et la disposition des voiles ainsi que les détails. Il existe de grandes différences entre les structures architecturales de la tour, non seulement avec les modèles méditerranéens, mais aussi avec les modèles ibériques situés dans les régions voisines.

En Basse-Andalousie, un type de moulin était utilisé avec un rotor monté sur un arbre à deux étages.

Dans les régions de Murcie et de Carthagène, des moulins ont été utilisés (Figure 1.6), très similaires à ceux de l'Andalousie, mais adaptés au pompage de l'eau. Le mouvement de l'arbre est transmis le long de la tour par des engrenages pour entraîner une roue dont la périphérie on a attaché des seaux en rotation, afin de faire monter de l'eau à un réservoir.

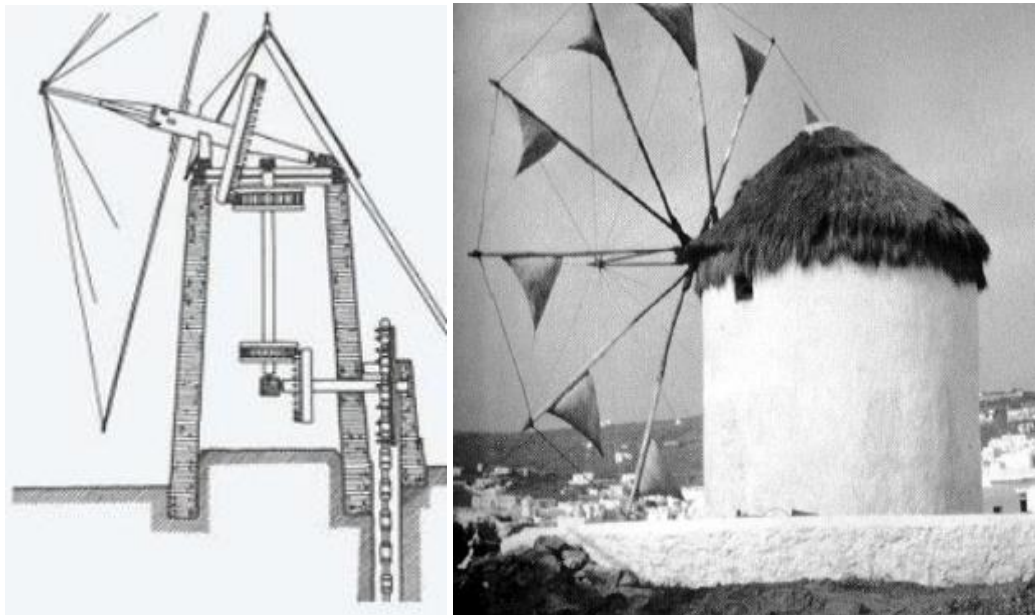


Fig. 1.6 : Moulin d'Andalousie [7].

Dans les royaumes de la péninsule ibérique, des moulins à vent sont apparus après les royaumes musulmans, peut-être aux XIII^e et XIV^e siècles. Le moulin de la Manche et Majorque constituaient un lien entre les deux cultures.

Le moulin de Majorque (figure 1.7 (a)) était généralement situé au-dessus de la maison du meunier. Le rotor portait six pales qui ressemblaient à celles des usines européennes, c'est-à-dire que les pales étaient constituées d'un cadre en bois et étaient recouvertes de tissu. Les pales avaient des sangles qui donnaient une plus grande rigidité à l'ensemble.

Le moulin de Manche (figure 1.7 (b)) était formé, à l'instar des Andalous, d'une tour de maçonnerie construite en pierre et en briques d'argile. La tour du moulin de la Manche était moins mince que celle du moulin de Majorque. Un toit conique était placé sur la tour, à l'intérieur duquel étaient logés les arbres de transmission et les engrenages. Le rotor était composé de quatre pales constituées d'un cadre en bois et était recouvert de tissu.

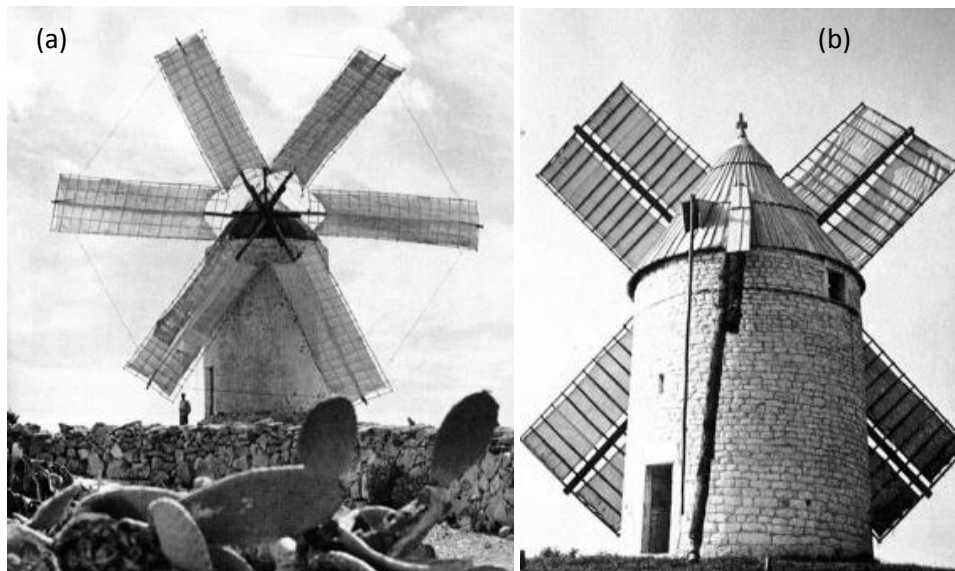


Fig. 1.7 : Le moulin de Majorque (a), et moulin de Manche (b) [8].

1.3.1.3 Les moulins européens.

En Europe, le moulin apparaît au milieu du 12^{ème} siècle. Le premier moulin européen pour laquelle des preuves documentaires sont disponibles a été construit en France en 1180 et, à partir de cette date, elle s'est rapidement étendue.

On pense que l'apparition de ces moulins pourrait être lié aux croisades car la coïncidence chronologique est le principal argument sur lequel cette hypothèse est basée. La première croisade eut lieu en l'an 1095, la seconde en 1147 et la troisième à la fin du même siècle.

À l'origine, les moulins du nord de l'Europe avaient un rotor à quatre pales constitué d'un châssis en bois recouvert de tissu ou de planches. Les pales étaient attachées à l'arbre principal et transmettaient la poussée du vent aux roues par l'intermédiaire d'un engrenage. L'arbre principal et les engrenages ont été placés dans une enceinte reposant sur un pivot (Figure 1.8 (a)). L'orientation de ladite enceinte dans la direction du vent est réalisée à l'aide d'un levier tournant sur le pivot généralement encastré dans le sol ou enfoncé dans une pile de pierres.

En peu de temps, le système de pivot a évolué pour devenir un trépied (Figure 1.8 (b)), ce qui offre au moulin une plus grande facilité lors de son orientation.

Ce type de moulin à pivot ou à trépied répond à la plupart des moulins du nord de l'Europe entre les XIII^e et XVI^e siècles.

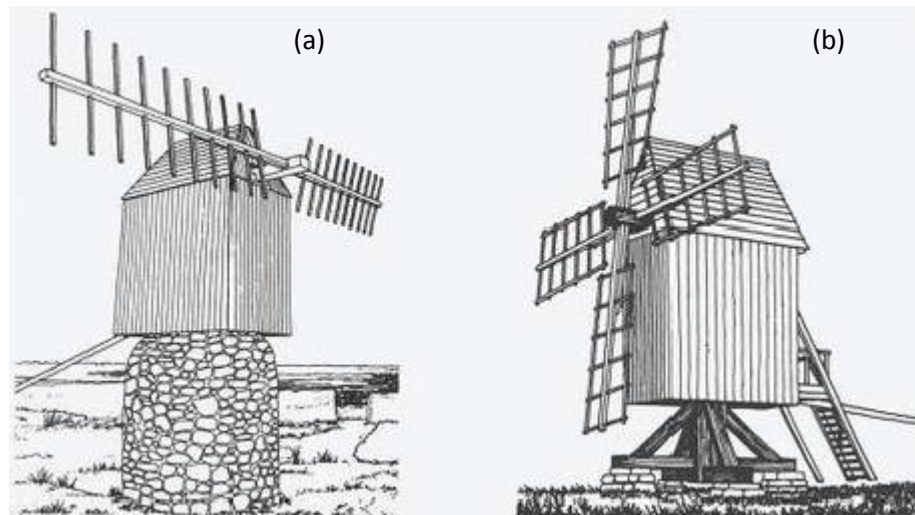


Fig. 1.8 : Moulin à pivot (a), et moulin à trépied (b) [7].

Bien que l'utilisation des moulins à vent se soit généralisée dans toute l'Europe, l'évolution technologique a été très lente au cours de cette période. Ce n'est qu'au 15^{ème} siècle que les moulins à trépied ou à pivot (à tour) sont réellement améliorés et peuvent devenir l'une des sources d'énergie les plus importantes.

1.3.2 2^{ème} période : Amélioration de l'utilisation des moulins.

À partir du XV^e siècle, deux types de moulins structurellement bien différenciés se sont répandus en Europe et se sont développés jusqu'au milieu du XIX^e siècle. Ce sont les moulins à trépied et les moulins à pivot (à tour). Les moulins à trépied avaient remplacé les moulins à pivots, ce qui avait permis d'améliorer considérablement le système de support, et permettait la construction de machines plus grandes.

La création du poteau creux a permis aux moulins à trépieds de poursuivre leur développement parallèlement au type de tour, en s'adaptant aux besoins croissants de l'époque. Avec le temps, le trépied se couvrirait pour servir d'entrepôt ou de logement de meunier (figure 1.9).

Les premiers moulins à tour européens apparaissent dans la région de Bretagne (France) au début du XV^e siècle, leur utilisation étant rapidement étendue à l'Angleterre et aux Pays-Bas, les tours sont en brique ou en pierre et s'adaptent à une section circulaire ou octogonale. À partir du XVII^e siècle, le moulin à vent est utilisé à grande échelle pour le pompage de l'eau.

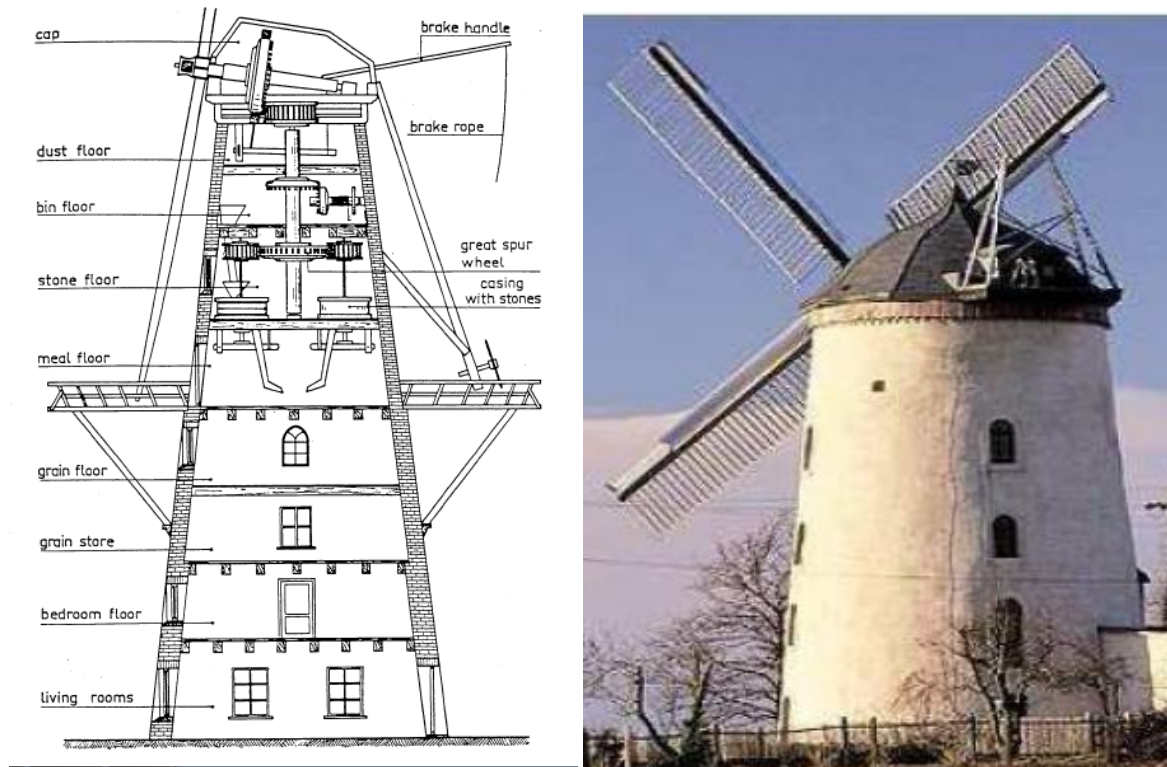


Fig. 1.9 : Moulin au-dessus d'une maison [8].

Le XVIII^e siècle est un siècle d'innovations technologiques, les éoliennes européennes atteignent un haut niveau de perfection. Les systèmes d'orientation mécanique et de régulation apparaissent pour la première fois et des pièces de bois commencent à être remplacées par des éléments métalliques qui ont permis d'obtenir des performances de plus en plus efficaces des éoliennes. Au cours du même siècle a commencé la publication des premiers traités théoriques sur les éoliennes, il s'agissait d'études approfondies sur le comportement aérodynamique des rotors, sur les systèmes de régulation automatique ou d'orientation. Parmi les premières œuvres devenues des classiques de la littérature éolienne, citons "Theatrum Machinarum Hydraulicorum" (théâtre de machines hydrauliques) de Léopold Jacobs, publié en 1724, "Architectura Mechanica of Moole-Boek" (architecture mécanique), de P. Linperch publiée en 1729 et Architecture Hydraulique de Belidor publiée en 1759.

L'ouvrage le plus important du dix-huitième siècle, est celui de l'œuvre de l'anglais Smeaton, avec ses travaux "Sur la construction et les effets des voiles d'éoliennes et une enquête expérimentale sur les pouvoirs naturels du vent et de l'eau" (une recherche expérimentale concernant les énergies naturelles du vent et de l'eau). Avec son travail, Smeaton a été le premier à démontrer que les rotors avec un nombre élevé de pales ne fournissaient pas plus de puissance que ceux avec seulement trois ou quatre pales présentant les mêmes caractéristiques. Il fut également le premier à utiliser des pièces de fonte pour la construction d'éoliennes.

1.3.2.1 Evolution des systèmes d'orientation.

Depuis l'apparition des éoliennes, l'orientation du rotor était le problème le plus important qui empêchait son développement. À partir des systèmes d'orientation à levier des premiers moulins, de nombreuses machines ont été inventées, mais la solution réelle au problème a été fournie par des améliorations de la conception visant à réduire le volume et le poids du rotor en remplaçant le système d'orientation et en introduisant des roulements et de pièces coulissantes.

L'Anglais Edmund Lee a inventé le premier système d'auto-orientation en 1745. Le mécanisme consistait en un rotor auxiliaire, disposé perpendiculairement au rotor principal, qui était monté sur l'échelle d'accès au moulin et couplé à des roues reposant sur celui-ci (Figure 1.10).

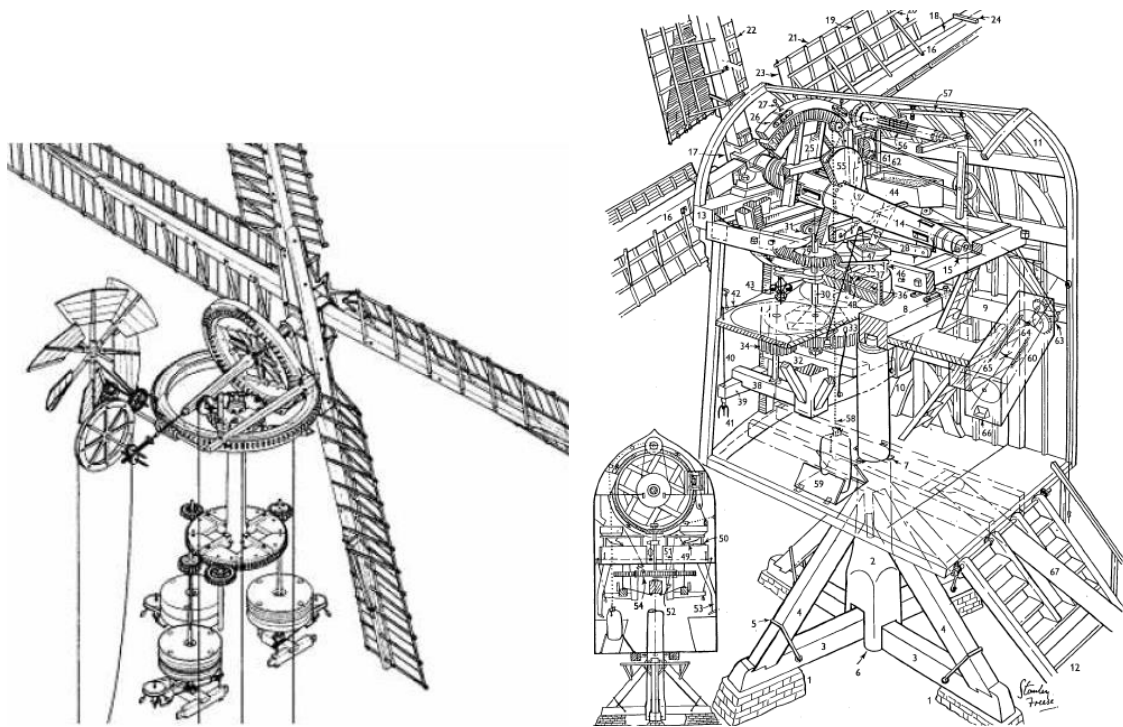


Fig. 1.10 : La complexité des systèmes d'orientation des moulins à vent [8].

Lorsque le moulin n'est pas correctement orienté, le vent frappe le rotor auxiliaire, ce qui agit sur les roues et déplace la machine. Ce système de guidage automatique a été utilisé, en principe, en Angleterre au XVIII^e siècle et au siècle suivant, il a été aussi utilisé par la Hollande.

1.3.2.2 Evolution des pales.

Les pales des moulins antérieurs au XVI^e siècle étaient construites avec une tringle sur les deux côtés d'un mât principal, recouvert ensuite d'un tissu (Figure 1.11 (a)).

Plus tard, le mât a été placé sur le bord d'attaque de la pale, de manière à mieux résister à l'admission d'air et à donner à la pale une certaine torsion sur toute sa longueur, afin d'améliorer ses performances aérodynamiques (Figure 1.11(b)). Les pales à torsion ont été développées au XVII^e siècle et l'incorporation de systèmes de régulation aérodynamique au XVIII^e.

La pale à frein aérodynamique intégré a été inventée par Andrew Meikle en 1772. Ces pales portaient à leur extrémité un rabat agissant comme un ressort lorsque le vent était trop fort (figure 1.11(c)).

En 1807, Sir Eilliam Cubitt a incorporé des masses d'action centrifuge à la fin du système, un système de régulation automatique pour la première fois (figure 1.11 (d)).

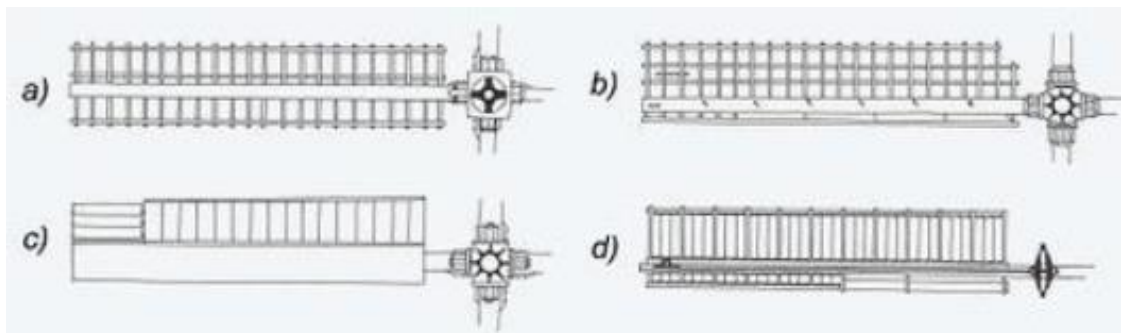


Fig. 1.11 : Evolution des pales [7].

1.3.2.3 Moulins à axe vertical.

Malgré les progrès techniques réalisés pour les moulins à trépied et à tour, l'orientation de ces machines, de plus en plus grandes, posait beaucoup de problèmes. C'est peut-être pour cette raison que les systèmes à axe vertical n'ont jamais disparu, bien qu'ils soient, de par leur aérodynamisme, moins efficaces. Les contributions les plus importantes concernant les moulins à axe vertical sont dues au Français Jacques Bressons et à l'évêque Polones Verancio.

Bressons, dans son ouvrage « Des instruments mathématiques et mécaniques » publiée en 1578, développa un système de rotor à axe vertical (Figure 1.12 (a)) qui fut probablement le prédécesseur de l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924.

L'évêque Verancio publie en 1616 un ouvrage intitulé « *Machinae Novae (machines neuves)* »; il y décrit une grande partie des connaissances de son époque sur les machines éoliennes et décrit quelques turbines développées par lui (figure 1.12 (b)).

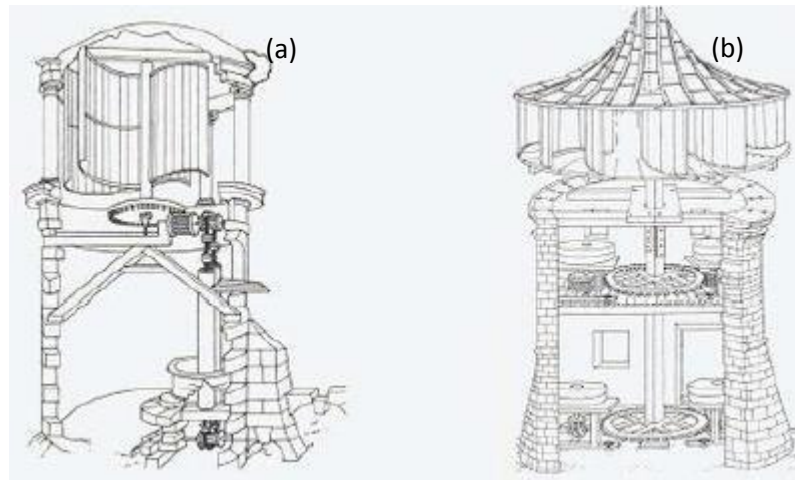


Fig. 1.12 : Moulins à axe vertical [7].

1.3.3 3^{ème} période: Une nouvelle conception des moulins.

Dans la seconde moitié du 19^e siècle, une nouvelle génération d'éoliennes a commencé à apparaître, avec une conception différente du design. Ce sont des machines simples et leur domaine d'application est réduit aux zones rurales plus ou moins isolées, où les avantages de l'industrialisation n'ont pas été exploités et sont généralement utilisés pour pomper l'eau des puits. Les premières éoliennes sont apparues aux États-Unis en 1854 et ont été développées par Daniel Halladay. Il s'agissait de rotors à plusieurs pales (multi-pales) couplés à une pompe à piston (Figure 1.13 (a)).

En 1884, Steward Perry fabriqua un autre modèle avec des pales en métal. Ce moulin, connu sous le nom de l'Américaine des multi-pales, était un moulin beaucoup plus léger que ses prédécesseurs et devenait le moulin à vent le plus répandu de tout ce qui existait. Il avait un rotor de 3 mètres de diamètre, un nombre de pales oscillant entre 18 et 24, et était monté sur un axe horizontal dans la partie supérieure d'une tour en métal (Figure 1.13).



Fig. 1.13 : Moulin avec pompe à piston et à tour métallique.

C'est en 1892 que le professeur Lacour, dans le cadre d'un programme de développement éolien du gouvernement danois, conçut le premier prototype d'éolienne électrique. La machine avait quatre pales de 25 mètres de diamètre et pouvait développer entre 5 et 25 kW. Le travail de Lacour a constitué les premières étapes dans le domaine des éoliennes modernes.

Parallèlement, E. L. Burne en Angleterre et K. Bilau en Allemagne ont mis au point le système de régulation à pas variable permettant ainsi un meilleur contrôle de la puissance de la turbine.

1.3.3.1 Découvertes scientifiques.

Jusque dans les premières décennies du XX^e siècle, il n'existait pas suffisamment de connaissances pour appliquer les profils aérodynamiques développés pour la fabrication des ailes et des hélices de l'aéronef aux éoliennes.

En 1924, le Finlandais Sigurd Savonius inventa un rotor à axe vertical capable de fonctionner avec des vitesses de vent très faibles. Le rotor de Savonius est formé de deux demi-cylindres disposés autour d'un axe vertical (Figure 1.14 (a)). La simplicité de sa conception signifie que cette turbine nécessite peu d'entretien et la convertit en un système adéquat pour le pompage de l'eau d'irrigation dans les régions moins industrialisées.

En 1927, les Allemands Prandtl et Betz ont montré analytiquement que les performances des rotors augmentaient avec la vitesse de rotation et que, dans tous les cas, aucun système éolien ne pouvait dépasser 60% de l'énergie contenue dans le vent. La même année, le Néerlandais AJ Dekker construisit le premier rotor équipé de pales à section aérodynamique. Jusque-là, les vitesses de pointe des pales obtenues avec les moulins à plusieurs pales étaient deux fois supérieures à celles du vent incident. Dekker a obtenu avec ses profils des vitesses en bout de pale quatre ou cinq fois supérieures à la vitesse du vent incident.

Dans le même temps, Darrieus développa en France une turbine à axe vertical. Cette turbine est équipée d'un rotor à pales incurvées, fabriqué par juxtaposition de deux ailes (Figure 1.14 (b)). Ce type de turbine est devenu l'une des options intéressantes au sein du domaine des éoliennes modernes.

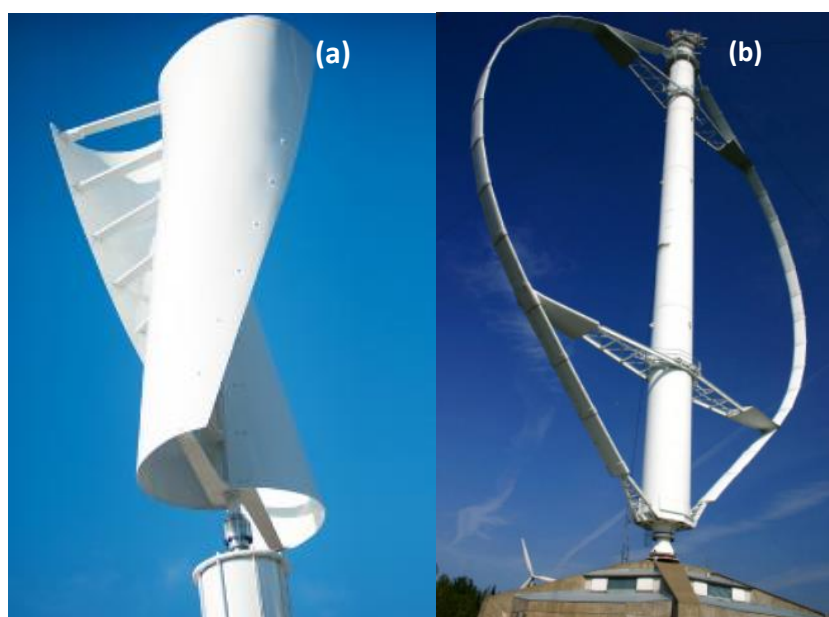


Fig. 1.14: Rotor Savonius (a) et Rotor Darrieus (b).

Il convient également de mentionner la première éolienne d'une puissance supérieure à un mégawatt, la Smith Putnam construite aux États-Unis en 1941 (figure 1.15). Cette éolienne avait un rotor à deux pales en acier inoxydable, disposé en arrière et avec une certaine inclinaison. Les longerons de la pale sont articulés au niveau de leur fixation de la racine au moyeu, ce qui leur permet de prendre une légère forme de cône pour réguler l'entrée d'air. Les vibrations ont provoqué la rupture d'une pale à cause de la fatigue après un fonctionnement d'environ 1000 heures.

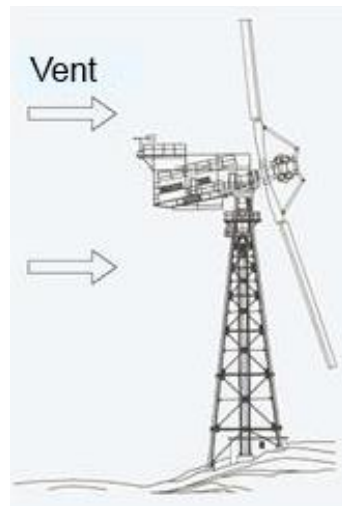


Fig. 1.15 : Éolienne Smith-Putnam [7].

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, une longue période commence au cours de laquelle le prix du pétrole est bas, atteignant cette tendance jusqu'en 1973, de sorte que l'intérêt des pays pour le développement de la technologie éolienne disparaît complètement. Il faut mentionner une exception qui supposait les fondements de la technologie actuelle. En 1952, au Danemark, et dans le cadre d'un programme de développement éolien, la carte éolienne danoise a commencé à être élaborée. En 1957, une éolienne de 200 kW a été installée à Gedser, avec un rotor à trois pales de 24 m de diamètre. Grâce à ce programme, le Danemark est actuellement le leader mondial de la technologie éolienne et ses développements ont servi de modèles pour les conceptions actuelles en construction dans différents pays.

1.3.3 4^{ème} étape: Développement depuis 1973.

Après la crise énergétique de 1973, marquée par une forte augmentation du prix du pétrole, certains pays ont mis en œuvre des plans de recherche et de développement tels que les États-Unis, dont le premier résultat important a été l'installation en 1975 de l'éolienne MOD-0. Une éolienne à deux pales de 38 mètres de diamètre avec des pales en métal et 100 kW de puissance. Ensuite, une série de nouvelles éoliennes ont été fabriquées dans le cadre du même programme, qui a abouti à l'installation de l'éolienne de 3,2 MW et du MOD-5B de 100 m de diamètre, construits par la société Boeing et installés à Hawaii en 1987.

En Espagne, le ministère de l'Industrie et de l'Énergie, par l'intermédiaire du Centre d'études sur l'énergie, a lancé en 1979 un programme de recherche-développement sur l'utilisation de l'énergie éolienne et sa transformation en électricité.

La première étape a été la conception et la fabrication d'une machine expérimentale de 100 kW (Figure 1.16), pour ensuite projeter de grandes éoliennes avec des puissances de l'ordre du MW. La machine était constituée d'une éolienne à axe horizontal avec trois pales en fibre de verre et polyester de 20 m de diamètre. Une puissance de 100 kW a été obtenue, avec une vitesse de vent de 12 m/s.



Fig. 1.16 : Aérogénérateur de 100 kW.

Dans les éoliennes, l'énergie du vent entraîne le disque (ensemble pales et moyeu) en mouvement de rotation et, au moyen d'un système mécanique, fait tourner le rotor d'un générateur, généralement un alternateur, qui produit de l'énergie électrique. Pour que leur installation soit rentable, ils sont généralement regroupés dans des concentrations appelées parcs éoliens. L'éolienne est un dispositif qui permet de capter l'énergie cinétique du vent et de la transformer en une autre forme d'énergie. Une éolienne est constituée d'un ensemble de pales (généralement trois) reliées à un rotor lui-même relié à un générateur électrique. Toutes ces machines sont placées au sommet d'une tour ou d'un mât où l'influence du vent est plus forte. La longueur des pales définira le diamètre de la zone de balayage des pales et plus cette zone est grande, plus la puissance qu'une éolienne peut générer est grande.

1.4 Etat actuel des parcs éoliens

Les éoliennes ont été étudiées de manière intensive par l'homme. On y trouve actuellement différents types de machines, allant des petites "puissances" aux grosses machines américaines et allemandes de plusieurs MW. Il existe de nombreux dispositifs permettant l'utilisation de l'énergie éolienne, pouvant en faire une classification en fonction de la position de son axe de rotation par rapport à la direction du vent.

Dans les éoliennes à axe horizontal, pour obtenir une vitesse angulaire régulière et uniforme w dans les pales, pour une certaine vitesse du vent v , il est nécessaire que la direction du vent et sa vitesse soient constantes par rapport à la vitesse du vent. Par contre, dans les éoliennes à axe vertical qui conservent les mêmes conditions de vitesse du vent et de vitesse angulaire des pales, il s'avère que celles-ci peuvent être soumises, par exemple, à un vent apparent de direction et de vitesse variables.

La capacité mondiale installée des éoliennes a atteint 196 630 MW jusqu'à fin 2010, ce qui peuvent produire l'électricité jusqu'à 430 TWh/an. Ceci représente 2,5% de l'énergie électrique consommée mondialement avec un chiffre d'affaire de 40 milliards d'euros [9]. La représentation graphique en Figure 1.17 montre la puissance installée en MW cumulée dans le monde entier et qui a connu une croissance très importante : 22,5% en 2010 ; ainsi une prévision d'installation pour 2011 est montrée. De cette capacité d'installation mondiale, 84 278 MW sont installés en Europe, ces éoliennes peuvent produire jusqu'à 181 TWh/an; ce qui représente 5,3% de la consommation de l'énergie électrique en Europe. L'Allemagne occupe la première place pour la puissance installée. Elle est suivie par l'Espagne, l'Italie, et la France. La capacité d'installation en France a atteint 5660 MW [9]; ce qui ont contribué à hauteur de 1,9% à la consommation électrique nationale et ont permis d'éviter l'émission de 4 millions de tonnes du CO₂. Ces chiffres montrent l'intérêt croissant pour l'utilisation des énergies renouvelables en réponse à l'inquiétude portée au changement climatique. À l'horizon de 2020, l'Europe prévoit la production de 20% de son énergie électrique à partir des énergies renouvelables comme l'éolienne.

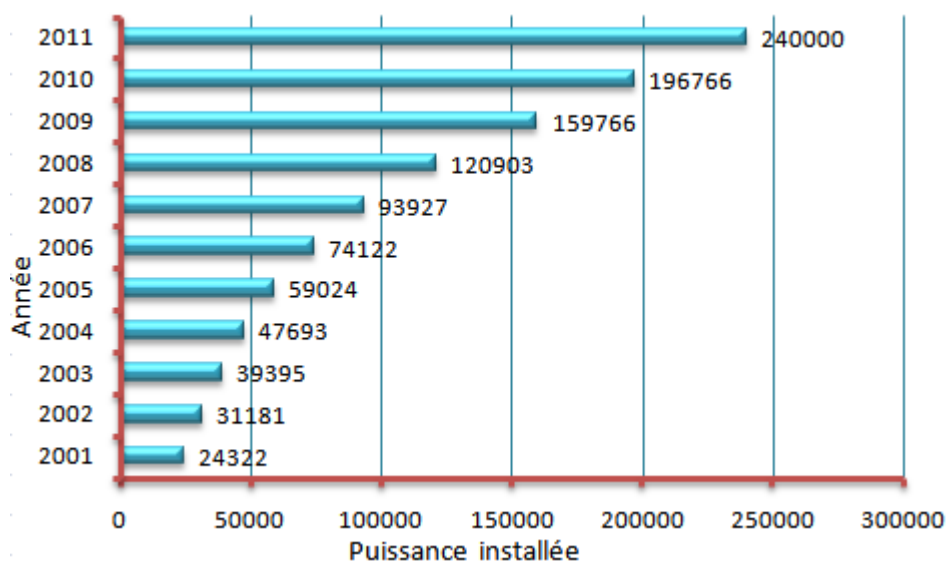


Fig.1.17 : Evolution des installations éoliennes dans le monde entier en MW [9]

D'après le rapport de l'WWEA (World Wind Energy Association) du 12 février 2018, et selon leurs statistiques, la capacité totale de toutes les éoliennes installées dans le monde entier à la fin de 2017 a atteint 539291 Mégawatt. 52552 mégawatt ont été ajoutés en 2017, soit un peu plus qu'en 2016 lorsque 51402 mégawatt ont été mis en ligne (figures 1.18 et 1.19). Il s'agit du troisième plus grand nombre jamais installé en un an, après les années record 2015 et 2014. Toutefois, le taux de croissance annuel de seulement 10,8% représente la croissance la plus faible jamais enregistrée depuis le début du déploiement industriel d'éoliennes à la fin du XX^e siècle. Toutes les éoliennes installées jusqu'à la fin de 2017 peuvent couvrir plus de 5% de la demande mondiale en électricité (Fig.1.21). Pour de nombreux pays, l'énergie éolienne est devenue un pilier de leurs stratégies d'élimination progressive des énergies fossiles et nucléaires. En 2017, le Danemark a établi un nouveau record mondial avec 43% de sa puissance produite par le vent. Un nombre croissant de pays ont atteint une part d'énergie éolienne à deux chiffres, notamment l'Allemagne, l'Irlande, le Portugal, l'Espagne, la Suède et l'Uruguay. Le marché éolien de loin le plus important, la Chine, a installé une capacité supplémentaire de 19 gigawatts, soit un peu moins qu'en 2016, et maintient sa position incontestée de leader mondial de l'énergie éolienne, avec une capacité éolienne cumulée de 188 gigawatts. Avec un déploiement incroyable dans l'énergie solaire, le pays est maintenant en train de faire de l'énergie renouvelable sa principale source d'énergie. Parmi les principaux marchés, les États-Unis (6,8 gigawatt ajoutés pour atteindre 89 gigawatt au total), l'Allemagne (6,1 gigawatt nouveaux, au total 56 gigawatt), l'Inde (4,6 gigawatt ajoutés, 32,9 gigawatt de capacité totale) Le Royaume-Uni (3,3 Gigawatt nouveaux, 17,9 Gigawatt total), le Brésil (2 Gigawatt nouveaux, 12,8 Gigawatt total) et la France (1,7 Gigawatt nouveaux, 13,8 Gigawatt total) ont tous connu une très forte croissance.

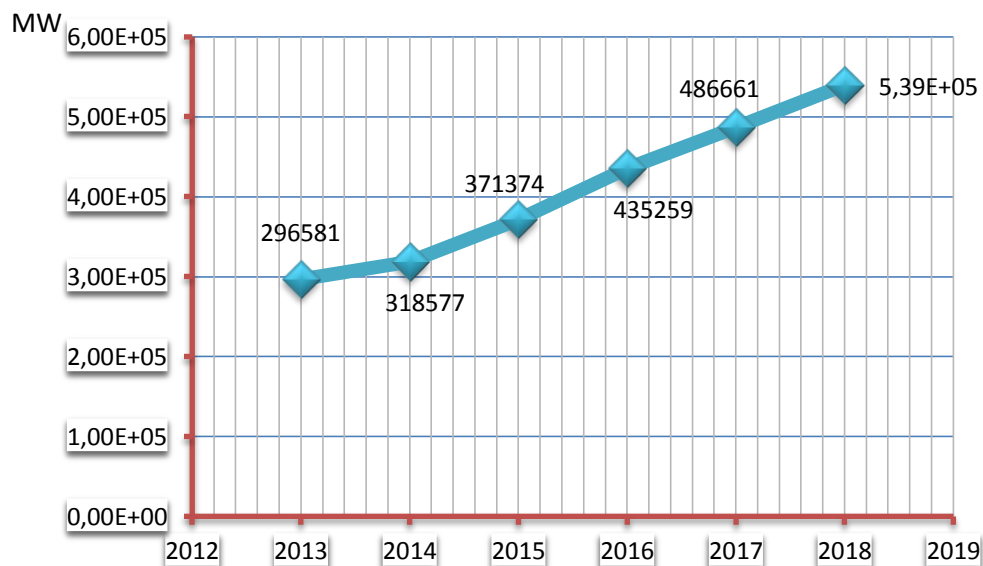


Fig.1.18 : Capacité mondiale totale installée, 2013-2017.

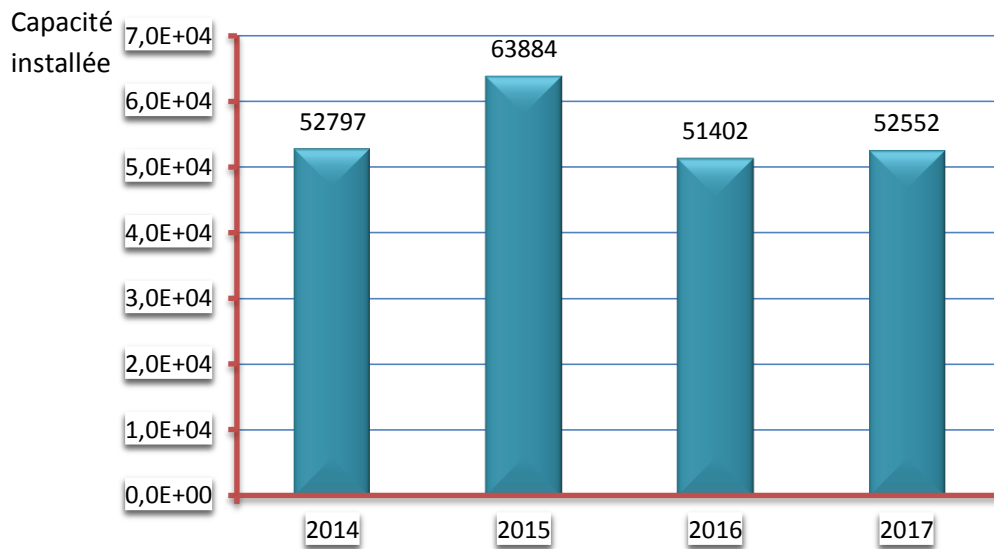


Fig.1.19 : Nouvelle capacité mondiale installée.

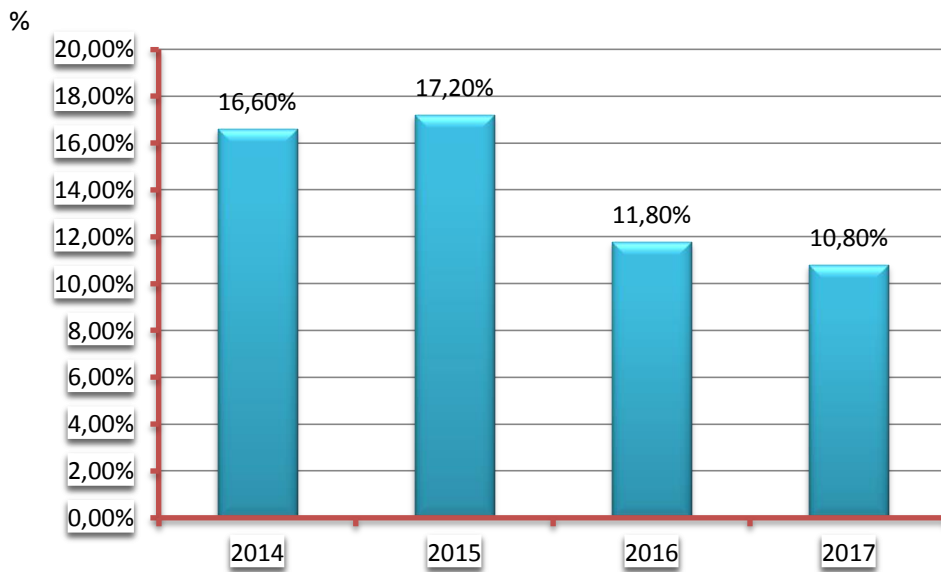


Fig.1.20 : Taux de croissance.

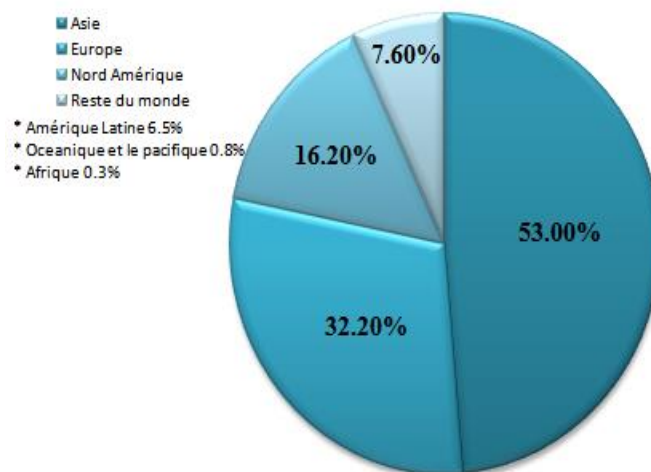


Fig.1.21 : Parts des Continents du monde des nouvelles capacités 2016 [9].

Les spécialistes du domaine éolien prévoient que le marché annuel restera approximativement au niveau de 2017 pour 2018 en raison des baisses prévues en Allemagne, au Royaume-Uni et en Inde. Cela sera compensé par des augmentations en Amérique du Nord, au Moyen-Orient, en Afrique et en Amérique latine. Le marché annuel reviendra à la croissance en 2019 et 2020, franchissant à nouveau la barrière des 60 GW et continuera à croître, à un rythme moins rapide toutefois, au début de la nouvelle décennie. Ils prévoient que le total des installations atteindra 840 GW d'ici à la fin de 2022.

1.5 L'énergie éolienne en Algérie

Quand on parle d'énergie en Algérie nous avons souvent tendance à ne penser qu'à l'électricité. Or, il faut rappeler que 30% de l'énergie est utilisée pour le transport, 42% pour la production de chaleur et seulement 28% pour nos besoins en électricité.

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar (figure 1.22). Cette ferme est fonctionnelle depuis 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [10], pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales.

Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes mesurées à 10 mètres d'altitude, doivent être supérieures à 6 m/s. Cependant, avoir de grandes vitesses ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être régulière. En d'autres termes, le nombre d'heures pendant lesquelles la vitesse du vent est élevée doit être important, sur l'année.

L'Algérie, immense territoire à la géographie et aux climats contrastés, est un pays riche de ressources naturelles pour développer les énergies renouvelables. Le potentiel algérien est particulièrement important si l'on s'intéresse au solaire et à l'éolien.

Les autorités politiques nationales connaissent ce potentiel, et ont donc décidé, depuis plusieurs années, de se pencher sur la question. Mais elles ont toujours tendance à se reposer sur les énergies fossiles, dont le pétrole, qui occupe une place essentielle dans l'économie du pays.



Fig. 1.22 : Eolienne - GEV HP de puissance 1 MW installée à Adrar [10].

Le développement des énergies renouvelables en Algérie est un projet inscrit dans la loi nationale depuis 2004. La loi n° 04-09 du 14 août 2004 stipule en effet, au terme de son article 6, que "la promotion des énergies renouvelables est réalisée à travers : un programme national de promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable et des instruments de promotion des énergies renouvelables".

Le projet de développement des énergies renouvelables a été laissé de côté jusqu'en mars 2011. À cette date, l'Algérie s'est dotée d'un "Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique". Ce programme prévoit une transition énergétique en 3 étapes :

- études et projets pilotes entre 2011 et 2013
- premières installations de production en 2014 et 2015
- lancement de l'industrie à grande échelle d'ici 2020.

En termes chiffrés, les prévisions du programme national sont les suivants :

- installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW d'ici 2013
- installation d'une puissance totale de l'ordre de 2 800 MW d'ici 2020 (2 600 MW pour le marché national, 2 000 MW pour l'exportation)
- installation d'une puissance totale de 32 000 MW d'ici 2030 (12 000 MW pour le marché national, 10 000 MW pour l'exportation)

Le gouvernement a estimé que le potentiel solaire était le plus représentatif, et le programme national est donc axé essentiellement sur l'énergie solaire. L'éolien, la biomasse et la géothermie représentent une partie plus marginale du projet de développement des énergies renouvelables.

Dans l'ensemble, le programme table sur la production de 40% des besoins d'électricité du pays à partir des énergies renouvelables d'ici 2030 (37% pour le solaire, 3% pour l'éolien).

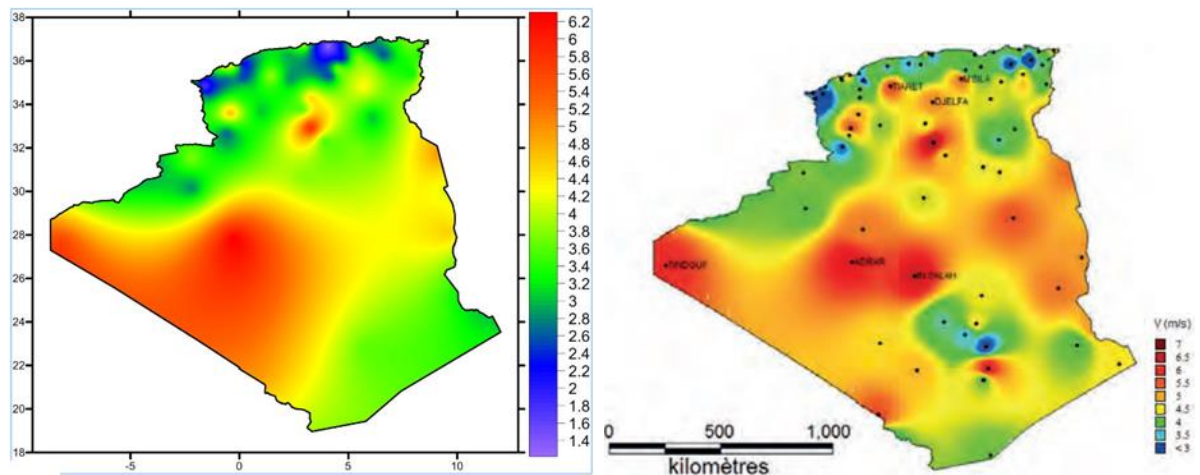


Fig. 1. 23: Nouvel atlas éolien de l'Algérie à 10m de hauteur [14]

Aujourd'hui, l'énergie d'origine éolienne est souvent considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. L'objectif d'une estimation de potentiel éolien est de donner avec la plus grande précision possible l'énergie éolienne récupérable sur le site d'installation à la hauteur du mat de l'éolienne. Le choix des turbines et de leur emplacement précis nécessite une détermination plus précise des conditions de vent et de turbulence, en prenant en compte les facteurs locaux (figure 1.23). Le productible théorique est alors estimé, assorti d'un calcul d'incertitude. Le vent est l'un des phénomènes météorologiques, les plus difficiles à prédire. Il nécessite l'utilisation des méthodes de prévision permettant de faire une prédiction fiable de la vitesse de vent afin de confirmer l'efficacité de la ferme éolienne utilisée. Or, le retour d'expérience des parcs en exploitation montre fréquemment une production réalisée inférieure à la production estimée, avec des écarts pouvant atteindre 20 %. La principale contribution à ces écarts provient probablement de l'incertitude sur la détermination des grandeurs météorologiques. C'est notamment le cas pour les sites en terrain complexe, pour lesquels les méthodes et outils actuellement utilisés sont souvent mis en défaut.

1.5.1 Détermination du potentiel éolien d'une région

Dans le cadre du processus de sélection de sites pour l'installation d'un parc d'éoliennes, la variable d'intérêt n'est pas la distribution des vents en soi, mais plutôt l'énergie disponible pour être transformée en électricité. À partir de la modélisation de la distribution des vents, il est possible d'estimer le potentiel énergétique d'une région. Pour ce faire, la densité de puissance est un outil fort utile puisqu'il permet de classer la qualité des vents sans être tributaire d'une turbine en particulier. Cette mesure est d'ailleurs abondamment employée dans la littérature [11] et [12]. Le calcul de densité de puissance moyenne peut être dérivé de la puissance instantanée disponible et les paramètres de la loi Weibull de densité de probabilité des vitesses des vents. L'association américaine de l'énergie éolienne propose une classification en 7 classes selon la hauteur de l'estimation et la densité de puissance (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Classe de vent à 10 et 50 m. [13].

Classe de vent	10m		50m	
	Densité de puissance (W/m ²)	Vitesse moyenne (m/s)	Densité de puissance (W/m ²)	Vitesse moyenne (m/s)
1	< 100	< 4.4	< 200	< 5.6
2	100-150	4.4 – 5.1	200-300	5.6 – 6.4
3	150-200	5.1 – 5.6	300-400	6.4 – 7.0
4	200-250	5.6 – 6.0	400-500	7.0 – 7.5
5	250-300	6.0 – 6.4	500-600	7.5 – 8.0
6	300-400	6.4 – 7.0	600-800	8.0 – 8.8
7	> 400	>7.0-	> 800	< 8.8

1.6 La région de Laghouat

1.6.1 Potentiel éolien :

Le potentiel éolien dans une région donnée se calcul à partir des distributions de la vitesse moyenne. Lorsqu'on dispose de mesures de vent, l'information peut être représentée sous forme d'histogramme. Ce dernier illustre la variation de la fréquence relative des vitesses du vent. La modélisation de la distribution de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs modèles [15], présents dans la littérature qui sont utilisés pour ajuster les distributions de la vitesse du vent sur une période de temps. Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull [16]. Les avantages de l'utilisation de la fonction de Weibull à deux paramètres ont été mis en évidence par Justus et al. [17 et 18].

Les travaux effectués par de nombreux chercheurs nationaux ([19], [20]) prouvent à l'évidence que le pompage éolien peut être pratiqué partout à travers la steppe. Les vitesses moyennes mensuelles et annuelles calculées à partir des données météorologiques (Voir tableau 1.2) sont supérieures ou égales à 3m/s et leur durée dépasse les 4.000h par an. Cela démontre que l'énergie éolienne pour l'exhaure de l'eau peut être pratiquée à grande échelle.

Tableau 1.2 : Potentiel éolien à travers la steppe [19, 20]

Station	Vitesse moyenne mensuelle m/s												Vitesse moyenne annuelle (m/s)	Nbre d'années d'observation	Hauteur de l'anémomètre	Altitude par rapport à la mer
	J	F	M	Av	M	J	J	Au	S	O	N	D				
TEBESSA	3.0	2.9	2.8	3.1	2.6	2.7	2.6	2.6	2.1	1.9	2.3	2.5	2.6	12	10	820
MSILA	4.2	3.9	4.4	4.7	5.0	4.1	4.1	3.9	3.3	3.1	3.7	3.5	4.0	12	11	441
OUARGLA	2.6	2.9	3.7	4.6	4.1	4.5	3.7	3.6	3.3	2.7	2.6	2.8	3.4	9	7	139
DJELFA	3.3	3.5	3.4	3.6	3.4	2.9	2.7	2.5	2.0	2.4	2.8	3.1	3.0	13	10	1144
SAIDA	2.9	3.2	2.8	3.1	3.0	2.9	2.9	2.7	2.4	2.4	2.7	2.9	2.8	12	12	750
TIARET	6.7	6.8	5.8	5.6	5.1	5.1	4.3	4.2	4.2	4.6	6.1	6.0	5.4	5	10	977
LAGHOUAT	3.2	3.6	4.1	4.4	3.9	3.8	3.5	3.4	3.0	2.8	2.8	3.7	3.5	10	12	765.44
EL BAYADH	4.1	4.2	3.9	4.7	4.8	4.5	4.4	4.2	3.5	4.0	3.7	3.8	4.2	13	10	1341
MILIANA	2.8	2.8	2.4	2.9	3.0	3.3	2.9	2.7	2.8	2.4	2.3	2.5	2.7	5	10	715
BATNA	4.7	4.9	4.6	4.5	4.2	4.1	4.5	4.1	3.6	4.1	3.5	4.7	4.3	10	7.5	1052.05
SETIF (Ain Armat)	3.3	3.5	3.4	3.4	3.3	3.1	3.3	3.0	2.7	2.6	2.9	3.1	3.1	8	10	1033
MASCARA	2.5	2.7	2.4	2.8	3.0	2.9	2.6	2.5	2.2	2.0	1.9	2.3	2.5	12	12	511
BISKRA	4.1	4.4	4.6	4.9	5.1	4.5	3.9	3.8	3.1	3.5	3.4	3.5	4.1	12	10	86
EL GOLEA	3.0	3.3	3.7	4.1	4.1	3.6	3.3	2.8	3.0	2.9	2.7	2.5	3.2	12	10	398
BECHAR	2.7	3.3	3.7	4.8	5.3	4.8	4.3	4.0	3.3	2.7	2.6	2.4	3.6	13	10	811
HASSI MESSAOUD	2.8	3.7	3.9	4.2	4.8	4.9	4.4	3.2	2.5	2.9	2.8	3.0	3.7	10	10	142

Vitesse maximale
Vitesse minimale

1.6.2 Le profil des vents :

1.6.2.1 Extrapolation vertical de la vitesse du vent

Il existe plusieurs lois pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent qui est utilisée pour déterminer la vitesse du vent à un niveau différent du point de mesure. Pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent, il existe deux lois, largement utilisées, la loi logarithmique et la loi de puissance [14]:

a- La loi logarithmique

Au-dessus d'un terrain plat et avec une stratification atmosphérique neutre, le profil logarithmique du vent permet une bonne approximation du cisaillement vertical:

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

h_1 : hauteur du mat de mesure

h_2 : hauteur de l'éolienne

v_1 : vitesse mesuré au niveau du mat de mesure

v_2 : vitesse qu'on veut déterminer

$z_0 = 0.03m$, pour les terrains agricoles découverts, sans clôtures ni haies, avec des constructions éparpillées et des collines peu profilées

Au sol, le vent est fortement freiné par des obstacles et par des accidents de terrain. A une certaine hauteur, dans les couches géostrophiques (à env. 5 km de hauteur), le vent ne subit plus l'influence de la surface du sol. Entre les deux, la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur. Ce phénomène est connu sous la désignation de cisaillement vertical du vent.

1.6.2.2 Vitesse seuil du vent

Dans la région de Laghouat la vitesse du vent (à 3.6m de hauteur) varie entre 6 et 7 m/s [21]. La loi logarithmique dépend de la longueur de rugosité Z_0 et est valable pour un profil près du sol. Sachant qu'une éolienne de puissance 1 MW possède un mât placé à une hauteur de 50m alors les résultats du profil du vent dans la zone d'étude est représenté par la figure 1.24.

Tableau 1.3 : Vitesse de vent en fonction de la hauteur.

Vitesse du vent [m/s]	Hauteur [m]
6,5	3,6
7,89	10
8,83	20
9,38	30
9,77	40
10,07	50
10,32	60

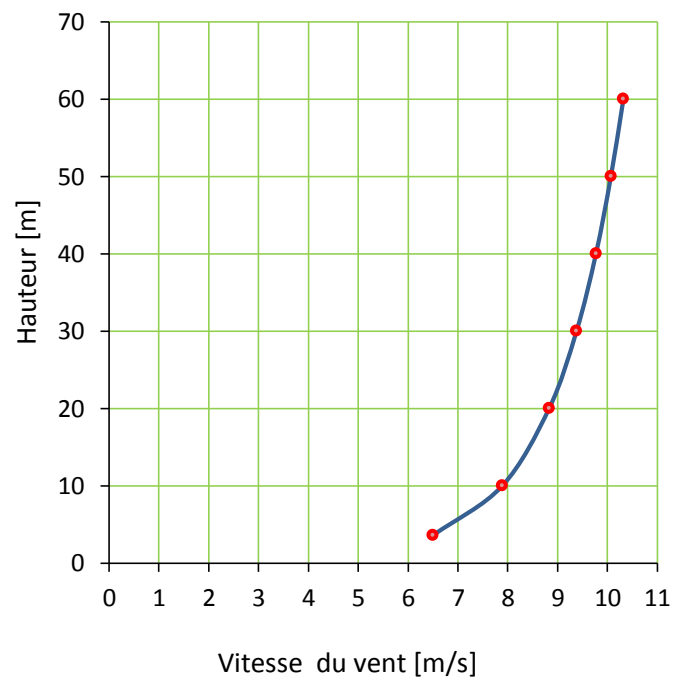


Fig. 1.24 : Profil vertical de la vitesse du vent de la zone d'étude la région de Laghouat.

1.6.2.3 Représentation statistique du vent

Compte tenu des caractéristiques dispersées et aléatoires de l'énergie éolienne, il est évident que la seule façon d'étudier si un site est adéquat ou non est d'utiliser des statistiques. Pour ce faire, on utilise la représentation de la vitesse du vent en tant que variable aléatoire avec une certaine fonction de distribution.

Habituellement, la distribution de Weibull est utilisée; c'est une distribution de deux paramètres: un paramètre d'échelle c et un facteur de distribution de forme k .

1.6.2.4 Distribution de Weibull

La vitesse du vent varie en permanence. Pour prévoir la production d'énergie d'une éolienne, il faut connaître la force et la fréquence exactes du vent. On mesure pour cela la vitesse moyenne du vent toutes les 10 minutes. Les valeurs obtenues peuvent être réparties en différentes classes. On peut alors exprimer le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse.

La fonction de densité de probabilité de la distribution de la vitesse du vent $f(v)$ est de la forme:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \dots \dots \dots (2)$$

Il s'agit d'une distribution de deux paramètres, c étant le paramètre d'échelle et k le facteur de forme indiquant les caractéristiques moyennes du vent sur le site; une valeur très utilisée est $k=2$ (distribution de Rayleigh).

La fonction de distribution est:

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \dots \dots \dots (3)$$

Le n ème moment de la distribution de Weibull est:

$$v_{(n)} = \int_0^{\infty} v^n f(v) dv = \dots = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \dots \dots \dots (4)$$

La courbe d'erreur normale ou intégrale de Gauss est:

$$\int_0^{\infty} e^{-t^2} dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \dots \dots \dots (5)$$

qui est obtenu de:

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = 2 \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt = \sqrt{\pi} \dots \dots \dots (6)$$

La vitesse moyenne du vent est le premier moment de la fonction de densité ($n = 1$), donc:

$$v_{(1)} = \hat{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \dots \dots \dots (7)$$

En multipliant la distribution de la vitesse du vent $f(v)$ par l'énergie éolienne de N_{vent} , on obtient la distribution de l'énergie éolienne; L'énergie totale E du vent est:

$$E = \int_0^{\infty} N_{vent} f(v) dv = \int_0^{\infty} \frac{\rho A v^3}{2} f(v) dv = \frac{\rho A}{2} c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \dots \dots \dots (8)$$

Dans certaines situations, comme dans les régions intérieures, l'énergie calculée par la distribution de Weibull est 10% plus élevée que celle calculée expérimentalement.

Pour déterminer les paramètres d'échelle et de forme c et k de la distribution, une approximation par la méthode des moindres carrés peut être utilisée; à partir de la fonction de distribution de Weibull sous la forme:

$$1 - f(v) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \dots \dots \dots (9)$$

Et en prenant deux fois les logarithmes peuvent être mis sous la forme:

$$-\ln\{1 - f(v)\} = \left(\frac{v}{c}\right)^k \Rightarrow \ln[-\ln\{1 - f(v)\}] = \ln\left(\frac{v}{c}\right)^k = k \ln v - k \ln c \dots \dots \dots (10)$$

$$y = kx + b, \quad \text{avec: } \begin{cases} y = \ln[-\ln\{1 - f(v)\}] \\ x = \ln v; b = -k \ln c; c = e^{-\frac{b}{k}} \dots \dots \dots \end{cases} (11)$$

Pour n paires de valeurs (x, y) au moyen de moindres carrés, on obtient les valeurs de k et b :

$$k = \frac{\sum_{n=1}^n xy - \frac{\sum_{n=1}^n x \sum_{n=1}^n y}{n}}{\sum_{n=1}^n x^2 - \frac{(\sum_{n=1}^n x)^2}{n}} \dots \dots \dots (12)$$

$$b = y - kx = \frac{\sum_{n=1}^n y}{n} - \frac{k \sum_{n=1}^n x}{n} \dots \dots \dots (13)$$

$$c = e^{-\frac{b}{k}} = \exp \left\{ - \left(\frac{\sum_{n=1}^n y}{n} - \frac{k \sum_{n=1}^n x}{n} \right) \frac{\sum_{n=1}^n x^2 - \frac{(\sum_{n=1}^n x)^2}{n}}{\sum_{n=1}^n xy - \frac{\sum_{n=1}^n x \sum_{n=1}^n y}{n}} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

Le tableau 1.4 indique la vitesse moyenne annuelle des vents (correspondant à un parc éolien situé à 750 mètres d'altitude, avec une perte de 8% due à l'ombrage, à la disponibilité et à la transformation), qui, selon la distribution statistique de Weibull, permettent de réaliser la production d'électricité dans les heures de fonctionnement indiquées.

Tableau1.4 : Vitesse moyenne annuelle des vents à Laghouat*.

V _v [m/s]	h/an
0	52
0.3	1379
1.4	3803
3.4	1947
5.3	1083
7.8	416
10.5	77
13.9	4
17	0

* Résultats obtenus dans notre zone d'étude.

Dans la région de Laghouat-Algérie, les données officielles sur le vent proviennent de deux sources différentes, à savoir:

- a) **station météorologique de Hassi R'mel**
- b) **station météorologique de Laghouat**

La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre du globe, en fonction des conditions climatiques locales, du paysage et de sa surface. La distribution de Weibull utilisée peut varier à la fois en forme et en valeur moyenne.

*** Facteur de forme k :**

- L'énergie N que transporterait le vent si elle se déplaçait à une vitesse égale à la moyenne pendant les 8760 heures de l'année serait:

$$\hat{N} = \int_0^{8760} k * \hat{v}^3 dt = 8760 k * \hat{v}^3 = 4380 \rho A \hat{v}^3 \dots \dots \dots (15)$$

Alors que l'énergie réellement disponible dans l'année est:

$$N_{annuel} = \int_0^{8760} k * v^3 dt \dots\dots\dots(16)$$

Le facteur de distribution de la forme de l'énergie éolienne k est défini comme le rapport entre l'énergie obtenue au cours d'une année N_{annuel} et l'énergie N qui serait obtenue au cours de cette année si la vitesse du vent était constante et égale à la vitesse moyenne v , c'est-à-dire:

$$k = \frac{N_{annuel}}{\hat{N}} = \frac{v^3}{\hat{v}^3} \dots\dots\dots(17)$$

À deux endroits où la vitesse moyenne du vent v est la même, davantage d'énergie sera disponible dans celui où le facteur de distribution k est supérieur. Le paramètre de forme k indique à quel point la distribution des vitesses du vent est pointue; si elles ont toujours tendance à être proches d'une certaine valeur, la distribution aura une valeur élevée de k et sera très pointue. Si les facteurs de distribution sont k_1 et k_2 et les énergies disponibles N_1 et N_2 , il faut que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{k_1}{k_2} \left(\frac{\hat{v}_1}{\hat{v}_2} \right)^3 \dots\dots\dots(18)$$

Dans la plupart des cas, les valeurs de k sont comprises entre 1,3 et 4,3; Pour cette raison, lorsqu'il n'y a pas beaucoup de données disponibles, la simplification de la méthode $k = 2$, connue sous le nom de distribution de Rayleigh, est généralement acceptée.

1.6.3 Traitement des données de la région de Hassi R'mel :

Traitement mensuelle : les données des vitesses du vent fournis par la station météorologique de Hassi R'mel sont mises sous forme de tableau 1.5 ci-dessous.

Tableau 1.5 : Données des vitesses du vent de la station de Hassi R'mel

mois	Vitesse moyen (m/s)	Vitesse max (m/s)	Facteur d'échelle c	Facteur de forme k	Le calme
Janvier	4,79032258	14.4	0.398358	0.158102	11.828
Fevrier	6,24690265	24.3	0.403508	0.130565	4.425
Mars	7,89032258	24.3	0.883724	0.229593	0.80
Avril	8,0725	17.1	0.67428	0.348235	0
Mai	7,53225806	15.3	0.516797	0.350495	0
Juin	6,5725	16.7	0.477744	0.357212	0
Juillet	4,99032258	14	0.282706	0.138872	2.41
Aout	5,49220779	13.1	0.212878	0.155492	1.29
Septembre	5,26416667	14	0.254774	0.156097	0.83
Octobre	5,06774194	14	0.279773	0.135292	0
Novembre	4,60583333	12.2	0.282192	0.131192	1.66
decembre	5,41048387	14.9	0.309658	0.13526	2.41
annuelle	6,00650685	24.3	0.0972589	0.0401294	2.027

La figure 1.25 présente à la fois l'histogramme des données et la loi de Weibull ajustée aux données de vitesse de vent (en rouge). On observe que la distribution théorique est assez bien ajustée bien que certaines classes soient légèrement sous-représentées par cette distribution théorique, principalement pour les vitesses de vent autour de 5 m/s. Il n'y a pas de 'trous' de données dans l'histogramme des données, ce qui nous amène à penser que la distribution de Weibull est bien ajustée.

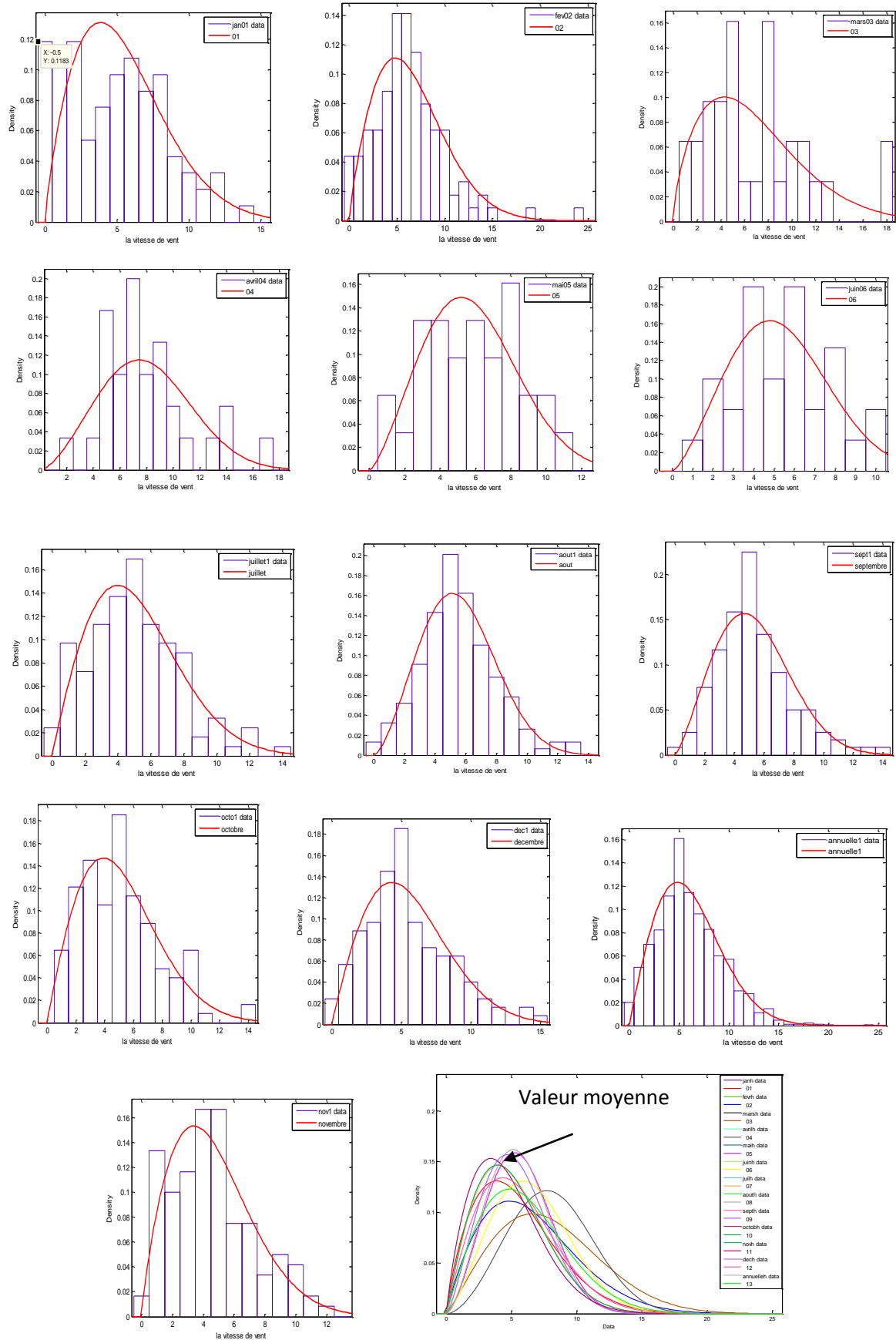


Fig. 1.25 : Histogramme des vitesses de vent et courbe de Weibull ajustée aux données obtenus à Hassi R'mel.

1.6.4 Traitement des données de la station métrologique de Laghouat :

Traitement mensuelle : les données des vitesses du vent fournis par la station météorologique de Laghouat sont mises sous forme de tableau 1.6 ci-dessous.

Tableau 1.6 : Données des vitesses du vent de la station de Laghouat.

Mois	Vitesse moyenne	Vitesse max	Facteur d'échelle c	Facteur de forme k	calme
Janvier	3,81606765	22	0.259357	0.0798924	40
Février	3,44800885	18	0.146647	0.059375	35.5
Mars	4,31048387	27	0.16279	0.0551633	34
Avril	4,92258065	19	0.132513	0.0651634	25
mai	4,55656566	21	0.114211	0.0645884	25
Juin	3,55846774	18	0.0965685	0.0789714	25
Juillet	3,70325203	19	0.100676	0.0685787	34
Aout	3,29516807	13	0.109865	0.0629847	31
Septembre	3,60080645	14	0.104599	0.0757003	37
octobre	3,284	14	0.119706	0.0895411	/
Novembre	2,571875	15	0.148983	0.101214	51
Décembre	3,02016129	16	0.188018	0.102967	46
Annuelle	3,84121	27	0.0404231	0.019977	33.46

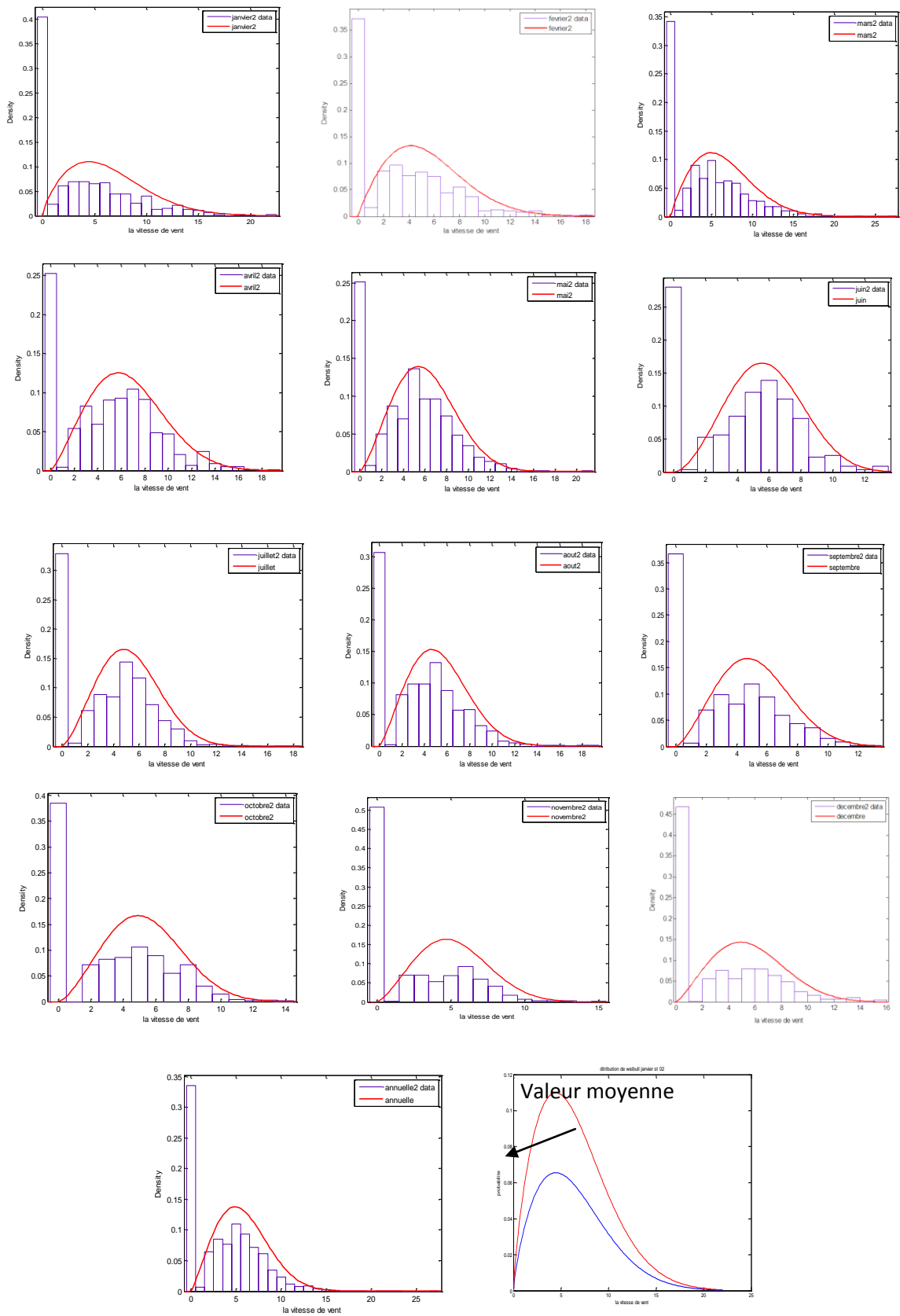


Fig. 1.26 : Histogramme des vitesses de vent et courbe de Weibull ajustée aux données obtenus à Laghouat.

1.7 Les transformations énergétiques

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

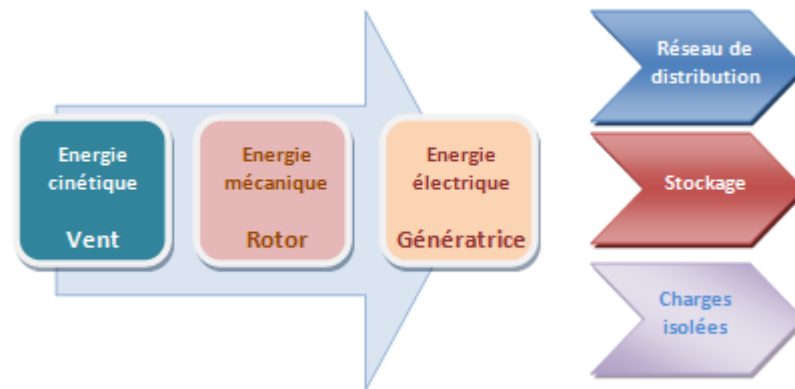


Fig. 1.27 : Transformation de l'énergie cinétique du vent.

1.7.1 Structure d'une éolienne

La figure suivante montre les principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal.

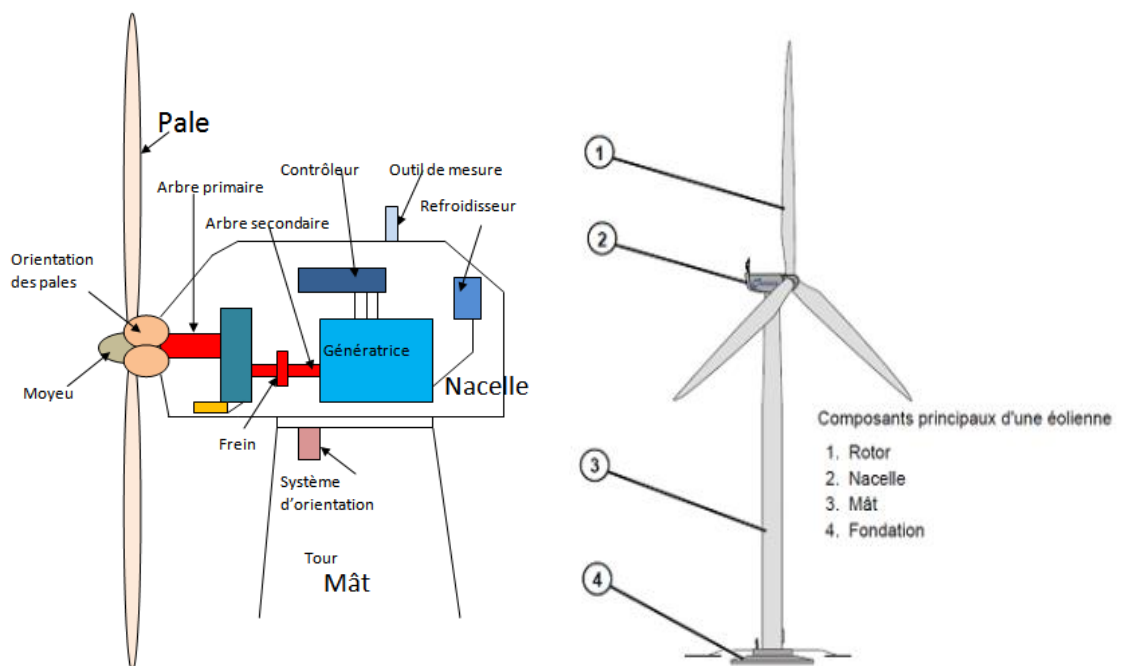


Fig. 1.28 : Structure d'une éolienne.

1.7.2 Aérodynamique des pales d'éoliennes

Les pales des éoliennes sont conçues pour générer le maximum de puissance du vent au moindre coût. La conception est principalement dictée par les exigences aérodynamiques, mais des considérations économiques impliquent que la forme de la pale constitue un compromis pour maintenir le coût de construction à un prix raisonnable. En particulier, la pale a tendance à être plus épaisse que l'optimum aérodynamique près de sa racine, où les contraintes dues à la flexion sont les plus grandes.

Le processus de conception de la pale commence par un compromis optimal entre efficacité aérodynamique et efficacité structurelle. Le choix des matériaux et du procédé de fabrication aura également une influence sur la finesse de la pale (donc sur le plan aérodynamique idéal). Par exemple, la fibre de carbone préimprégnée est plus rigide et plus résistante que la fibre de verre infusée. La forme aérodynamique choisie génère des charges qui sont intégrées dans la conception de la structure. Les problèmes identifiés à ce stade peuvent ensuite être utilisés pour modifier la forme si nécessaire et recalculer les performances aérodynamiques.

1.7.3 Le vent

Cela peut sembler évident, mais la compréhension du vent est fondamentale pour la conception des éoliennes. La puissance disponible du vent varie en fonction du cube de la vitesse du vent, donc deux fois la vitesse du vent signifie huit fois la puissance.

C'est la raison pour laquelle les sites doivent être choisis avec soin: au-dessous d'une vitesse du vent d'environ 5 m/s, la puissance dans le vent n'est pas suffisante pour être utile. Inversement, de fortes rafales fournissent des niveaux de puissance extrêmement élevés, mais il n'est pas économiquement viable de construire des machines permettant de tirer le meilleur parti des pointes de puissance car leur capacité serait gaspillée la plupart du temps. Donc, l'idéal est un site avec des vents stables et une machine capable de tirer le meilleur parti des vents légers tout en survivant aux rafales les plus fortes.

En plus des variations au jour le jour, le vent varie chaque seconde en raison des turbulences causées par les caractéristiques du terrain, les températures et les conditions météorologiques. Il souffle aussi plus fort au-dessus du sol que plus près du sol, en raison du frottement de la surface. Tous ces effets entraînent des charges variables sur les pales d'une éolienne lorsqu'elles tournent,

ce qui signifie que la conception aérodynamique et structurelle doit faire face à des conditions rarement optimales.

En extrayant de la puissance, l'éolienne elle-même a un effet sur le vent: le vent sous le rotor de l'éolienne se déplace plus lentement qu'au dessus de celui-ci. Le vent commence à ralentir avant même d'atteindre les pales, ce qui réduit la vitesse du vent à travers le «disque» (le cercle imaginaire formé par les extrémités des pales, également appelé zone balayée) et réduit donc la puissance disponible. Une partie du vent qui se dirigeait vers le disque dévie et manque totalement les pales. Il existe donc une quantité optimale de puissance à extraire d'un diamètre de disque donné: essayez d'en prendre trop et le vent ralentira trop, réduisant ainsi la puissance disponible. En fait, l'idéal est de réduire la vitesse du vent d'environ deux tiers sous le rotor de l'éolienne, même si le vent juste avant l'éolienne aura perdu environ un tiers de sa vitesse. Cela permet de capturer un maximum théorique de 59% de l'énergie éolienne, on parle de limite de Betz. En pratique, seuls 40 à 50% sont atteints par les conceptions actuelles.

1.7.4 Nombre de pales

La limitation de la puissance disponible dans le vent signifie que plus il y a de pales, moins leur puissance peut être extraite. La conséquence en est que chaque pale doit également être plus étroite pour maintenir l'efficacité aérodynamique. La surface totale de la pale, exprimée en fraction de la surface totale du disque balayé, est appelée solidité, et il existe une solidité optimale sur le plan aérodynamique pour une vitesse de la pointe de la pale donnée. Plus le nombre de pales est élevé, et plus la section de chaque pale doit être étroite. En pratique, la solidité optimale est faible (seulement quelques pour cent), ce qui signifie que même avec seulement trois pales, il faut que chacune doit être très étroite. Pour glisser facilement dans l'air, les pales doivent être minces par rapport à leur largeur, de sorte que la solidité limite également l'épaisseur des pales. En outre, il devient difficile de construire les pales suffisamment fortes si elles sont trop minces, ou le coût par pale augmente considérablement à mesure que des matériaux plus coûteux sont nécessaires.

Pour cette raison, la plupart des grandes machines ne disposent pas de plus de trois pales. L'autre facteur qui influe sur le nombre de pales est l'esthétique: il est généralement admis que les éoliennes à trois pales sont moins gênantes visuellement que les conceptions à une ou deux pales.

1.7.4.1 Comment les pales capturent l'énergie éolienne

Tout comme une aile d'avion, les pales d'éoliennes génèrent une portance due à leur forme. Le côté plus incurvé génère de basses pressions d'air tandis que de l'air à haute pression pousse de l'autre côté de la surface de l'aile. Le résultat net est une force de portance perpendiculaire à la direction du flux d'air.

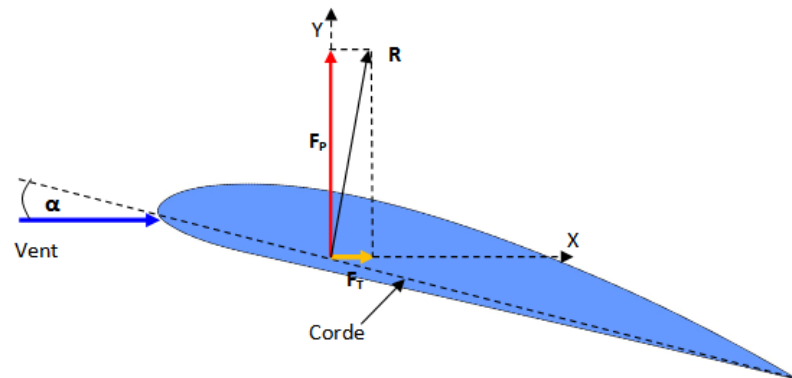


Fig. 1. 29 : Vecteurs de portance et de traînée.

La force de portance augmente lorsque la pale est tournée pour se présenter sous un angle plus grand avec le vent. C'est ce qu'on appelle l'angle d'attaque. Aux très grands angles d'attaque, la pale «cale» et la portance diminue à nouveau. Il existe donc un angle d'attaque optimal pour générer la portance maximale.

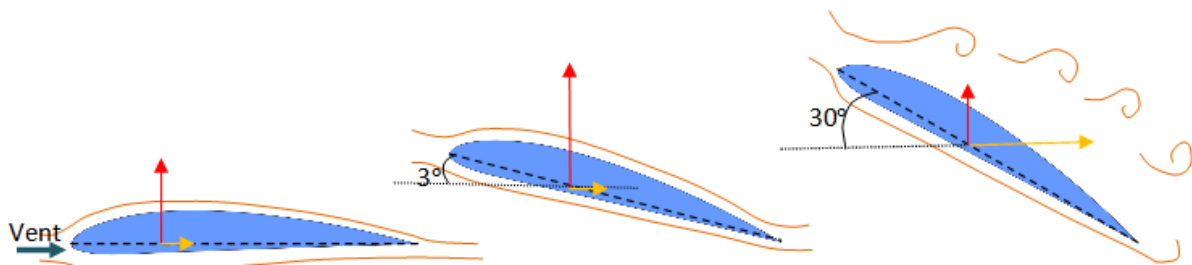


Fig. 1.30 : Différentes positions d'une pale.

Malheureusement, il existe également une force de freinage sur la pale: la traînée. C'est la force parallèle au vent qui augmente également avec l'angle d'attaque. Si la forme de la surface portante est bonne, la force de portance est beaucoup plus grande que la traînée, mais à des angles d'attaque

très élevés, en particulier lorsque la pale cale, la traînée augmente considérablement. Ainsi, à un angle légèrement inférieur à l'angle de levage maximal, la pale atteint son rapport de portance / traînée maximal. Le meilleur point de fonctionnement sera entre ces deux angles.

Étant donné que la traînée se trouve dans le sens du vent, il peut sembler que pour l'éolienne elle n'aurait pas d'importance, car elle serait parallèle à son axe et ne ralentirait donc pas le rotor. Cela créerait simplement une "poussée", la force agissant parallèlement à l'axe de l'éolienne n'a donc aucune tendance à accélérer ou à ralentir le rotor. Lorsque le rotor est à l'arrêt (par exemple juste avant le démarrage), c'est bien le cas. Cependant, le mouvement de la pale dans les airs signifie que, dans le cas de la pale, le vent souffle sous un angle différent. C'est ce qu'on appelle le vent apparent. Le vent apparent est plus fort que le vent réel mais son angle est moins favorable: il fait pivoter les angles de la portance et de la traînée pour réduire l'effet de la force de portance faisant tourner la pale et augmenter l'effet de la traînée. Cela signifie également que la force de levage contribue à la poussée sur le rotor.

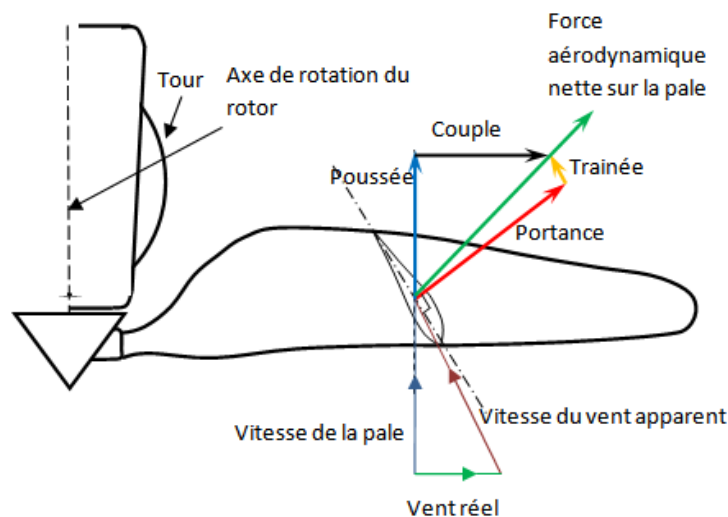


Fig. 1.31 : Angles apparents du vent.

Il en résulte que, pour conserver un bon angle d'attaque, la pale doit être éloignée de l'angle réel du vent.

1.7.4.2 Torsion

Plus vous approchez de la pointe de la pale, plus la pale se déplace rapidement dans les airs et plus l'angle de vent apparent est important. Ainsi, la pale doit être tournée plus loin aux extrémités qu'à la racine, autrement dit, elle doit être construite avec une torsion sur sa longueur. Typiquement, la torsion est d'environ 10-20° de la racine aux pointes. La nécessité de tordre la pale a des implications sur la facilité de fabrication.

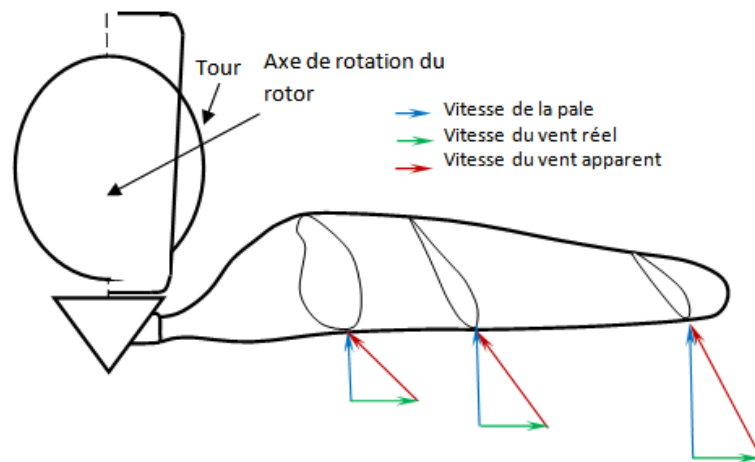


Fig. 1.32 : La torsion de la pale

1.7.4.3 Section de la pale

Outre la torsion, les pales d'éoliennes ont des exigences similaires à celles des ailes d'avion, de sorte que leurs sections transversales sont généralement basées sur une famille similaire de formes. En général, les meilleures caractéristiques de portance / traînée sont obtenues avec un profil aérodynamique assez mince: son épaisseur peut ne représenter que 10-15% de sa longueur de corde (la longueur à travers la pale, dans la direction du vent).

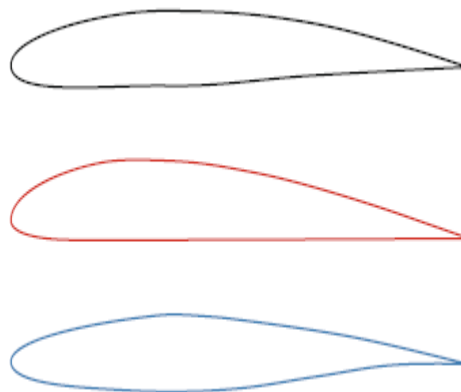


Fig. 1.33 : Formes typiques de profils offrant un bon rapport portance/trainée.

Bibliographie

- [1] Yaping Shao, Physics and modelling of wind erosion. Springer, Atmospheric and oceanographic sciences library, volume 37.
- [2] K. Wood Blade repair: Closing the maintenance gap Composites Technology April 2011.
- [3] L. Remple, Rotor Blade Leading Edge Erosion – Real Life Experiences, Wind Systems, 22 October 2012.
- [4] 3M 2012. [online]. Available: www.3M.com/wind.
- [5] M. D. Haag, Advances in leading Edge protection of wind turbine blades, conference proceeding, 4 FEBRUARY 2013 LM Wind Power, Denmark
- [6] E. H. Wulff, « The traditional crafts of Persia: their development, technology and influence on Eastern and Western civilizations », MIT Press, Cambridge, USA, 1966.
- [7] P. Gipe, « Wind Energy Comes of Age », John Wiley et Sons, Inc., New York, 1995.
- [8] D. G. Shepherd, « Historical Development of the Windmill », NASA Report, 1990.
- [9] World Wind Energy Association WWEA: <https://wwindea.org/blog/category/statistics>.
- [10] F. Sebaa-Ben Miloud et R. Aïssaoui, « Etude du potentiel éolien d'Adrar : Sélection de sites pour la ferme éolienne de 10 MW », Revue des Energies Renouvelables, 2010, pp. 295-300.
- [11] M.Jamil, S.Parsa, M. Majidi, « Wind power statistics and an evaluation of wind energy density », Renewable Energy, Volume 6, Issues 5–6, July–September 1995, pp. 623-628
- [12] A. N. Celik, « A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey », Renewable Energy, Volume 29, Issue 4, April 2004, pp. 593-604
- [13] American Wind Energy Association-AWEA : <https://www.awea.org/>.
- [14] S. M. BOUDIA, « Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat, 2013, Université de Tlemcen.
- [15] Kostas Philippopoulos, Despina Deligiorgi, and George Karvounis, Wind Speed Distribution Modeling In The Greater Area Of Chania, Greece, International Journal of Green Energy, 9: 174–193, 2012
- [16] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability," Journal of Applied Mechanics, n°18, pp. 293-297, 1951
- [17] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Yalcin, "Nationwide assessment of potential output from wind powered generators," Journal of Applied Meteorology, n°15, 1976, pp. 673-678.
- [18] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, D. Graber, "Methods for estimating wind speed frequency distribution," Journal of Applied Meteorology, n°17, 1978, pp. 350- 353.
- [19] H.Bensaad. Perspectives d'utilisation de l'énergie éolienne en Algérie. Révolution Africaine, N° 1089, 1985, pp 32- 34.
- [20] N.Kasbadji Merzouk. Wind energy potential of Algeria. Renewable Energy 21, 2000 , pp.533-562.
- [21] Z. Houyou, « Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat) », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach-Alger, 2015.

Chapitre 2

Théories aérodynamiques des éoliennes

2.1 Notions aérodynamiques des éoliennes

Le vent est composé de particules d'air en mouvement; lorsque la masse d'air est formée de filets juxtaposés, parfaitement individualisés, on dit que le mouvement de celui-ci est laminaire, alors que si les filets d'air se croisent et ne conservent pas leur individualité, on dit que le mouvement est turbulent; C'est le cas le plus général qui se passe dans le vent. Si les vitesses instantanées sont mesurées à chaque point d'une masse d'air en mouvement turbulent, on observe qu'elles varient en ampleur et en direction sans aucune régularité, mais elles ne s'écartent généralement pas beaucoup d'une valeur moyenne. Les mouvements désordonnés de l'air au niveau macroscopique s'appellent des turbulences, qui peuvent influencer des masses d'air importantes. Lorsque le vent rencontre un obstacle, son mouvement commence à être perturbé et à devenir irrégulier à une certaine distance de celui-ci.

2.1.1 Forces sur un profil

Un objet situé dans un courant d'air résiste à l'avancée, déformant les filets de fluide; cela dépend de la forme de l'objet et de sa position par rapport à la direction du vent, figure 2.1. Lors de l'étude des effets de la résistance de l'air sur une plaque plane, on constate que la résultante R des efforts appliqués à la plaque est un vecteur dont le point d'application est son centre aérodynamique ou son centre de poussée, sa direction étant perpendiculaire à la plaque, son sens celui du vent, et son intensité proportionnelle à la surface S exposée et au carré de la vitesse du vent v, sous la forme:

$$R_e = C_r \rho \frac{S v^2}{2} = k_i S v^2 \dots\dots\dots (1)$$

Où k_i est un coefficient qui dépend de l'angle α d'incidence, des unités choisies et de la turbulence du mouvement; C_r est le coefficient de résistance (pénétration), ρ est la densité de l'air et S est la section frontale du profil.

Si l'angle α qui forme le plan de la plaque avec la direction du vent est grand, il existe une surpression à l'avant de la plaque et une dépression à l'arrière de caractère tourbillonnaire, figure 2.3; Si l'angle d'incidence α est faible, la surpression apparaît au bas de la plaque et la dépression au-dessus, de sorte qu'une force apparaissant tend à la soulever, appelée force de portance.

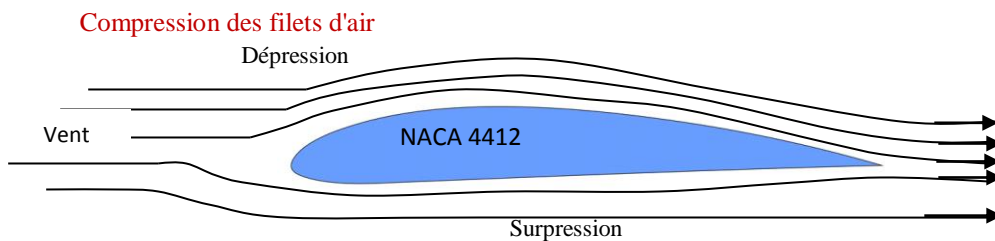


Fig. 2.1 : Profil avec un angle d'incidence $\alpha = 0^\circ$ dans un flux de fluide.

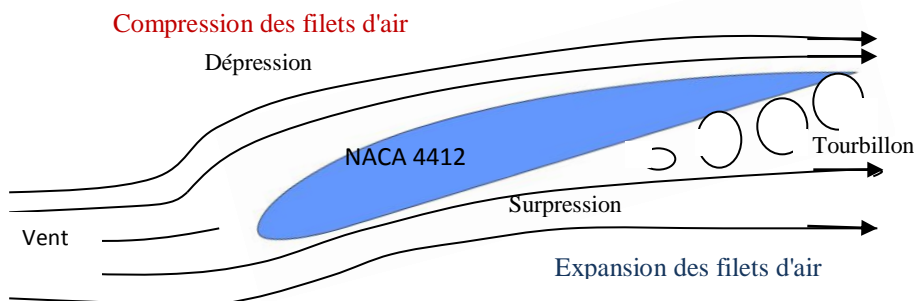


Fig. 2.2 : Profil en position quelconque dans un flux de fluide.

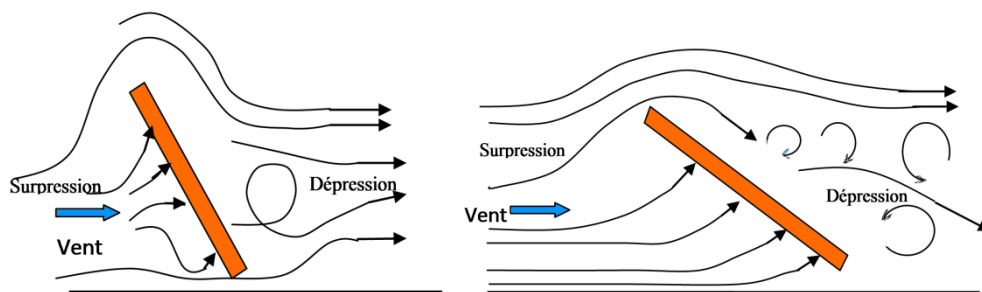


Fig.2.3 : Plaque plate inclinée par rapport à l'horizontal [1].

Sur la figure 2.3, un profil de plaque plat avec deux types d'inclinaison est représenté; en notant que plus l'angle d'inclinaison α est petit, plus la résultante R résultant est grand.

Pour les profils plats (fixes) de longueur L parallèlement à la vitesse du vent v , la valeur du nombre de Reynolds est:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \dots \dots \dots (2)$$

$$C_r = \begin{cases} \text{Régime laminaire : } C_r = \frac{1.328}{\sqrt{Re}} ; Re < 10^5 \\ \text{Régime turbulent : } \begin{cases} C_r = \frac{0.074}{Re^{1/5}} ; 10^5 < Re < 10^7 \dots \dots \dots (3) \\ C_r = \frac{0.455}{(\log Re)^{-2.58}} ; Re > 10^7 \end{cases} \end{cases}$$

Pour les autres profils non plats dont l'axe de symétrie est parallèle à la direction du vent, la valeur du coefficient C_r est indiquée sur la figure 2.4.

Pour un profil conçu sous forme aérodynamique, deux zones sont définies:

- a) L'extrados, qui est la partie du profil où les filets d'air sont en dépression
- b) L'intrados, qui est la partie du profil où les filets d'air sont en surpression.

Si la plaque n'est pas profilée convenablement, les turbulences provenant de l'extrados diminuent l'énergie cinétique de l'air. Si on laisse la plaque se déplacer sous l'effet de la force exercée par le vent, elle produira un travail récupérable sous forme d'énergie mécanique; plus la turbulence est basse, plus ce travail sera important.

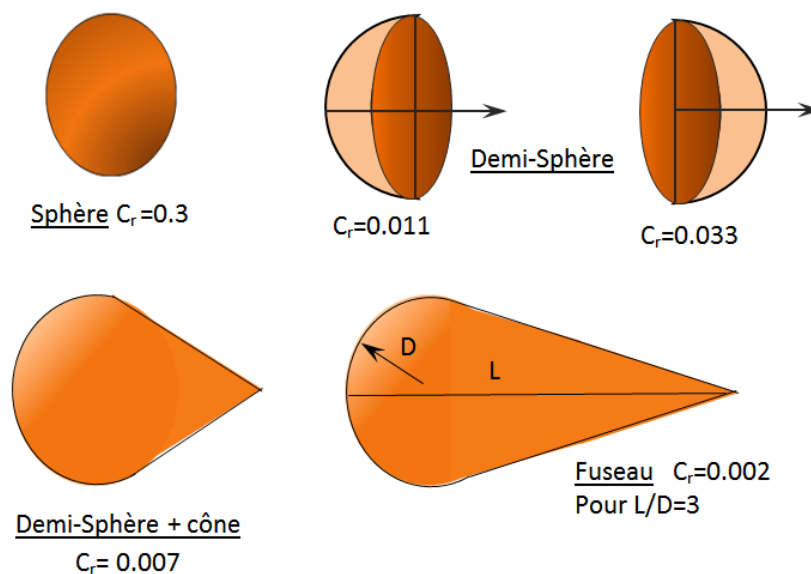


Fig. 2.4 : Coefficient C_r pour certains profils hémisphériques.

2.1.2 Forces de trainée et portance en profils fixes

La composante de R dans la direction du vent est la force de traînée F_T tandis que la composante de R perpendiculaire à la force de traînée est la force de portance F_P de la forme:

$$F_P = R \sin \alpha = k_{ix} S v^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$F_T = R \cos \alpha = k_{iy} S v^2 \dots\dots\dots (5)$$

La force R est considérée comme normale au profilé, qui est en même temps sa longueur caractéristique; la portance augmente lorsque α diminue. La corde est considérée à partir du bord d'attaque du profilé jusqu'au bord de fuite.

Si la forme du profil n'est pas plate, nous pouvons décomposer R en fonction de deux types de coefficients, k_{ix} de traînée et k_{iy} de portance, l'axe des x étant parallèles à la direction du vent, figure 2.5.

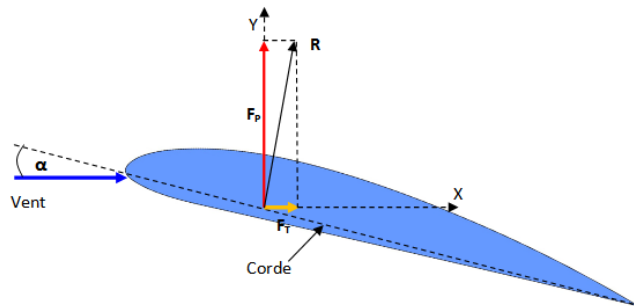


Fig. 2.5 : Forces de portance et traînée d'un profil fixe.

2.1.2.1 Polaire de profil

La finesse d'un profil est défini, pour une valeur donnée de α , par la relation entre les coefficients k_{iy} et k_{ix} sous la forme:

$$f = \frac{k_{iy}}{k_{ix}} = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{tg\alpha} \dots\dots\dots (6)$$

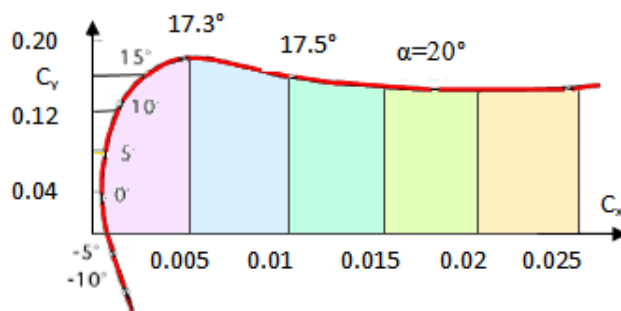


Fig. 2.6 : Polaire d'un profil.

La courbe $C_y = f(C_x)$, figure 2.6, est appelée polaire du profil et est déterminée en effectuant des mesures des valeurs de F_T et de F_P au moyen d'une balance de torsion en soufflerie, pour différentes valeurs de l'angle d'attaque α .

2.1.2.2 Action du vent sur le profil

a) Profils des pales

L'élément de base d'une éolienne est le rotor, formé d'une ou plusieurs hélices ou pales (sa théorie du calcul élémentaire est analogue à celle des hélices d'avions). Dans le rotor se trouvent les pales dont le nombre est variable selon les cas; chaque pale a un profil qui a une forme aérodynamique; ces profils ont une extrémité émoussée, qui est le bord d'attaque, tandis que l'autre extrémité, de forme prononcée, est le bord de fuite.

Les profils ont des noms différents selon leur géométrie. Ils sont appelés biconvexes si l'intrados et l'extrados sont convexes et plan-convexes s'ils ont l'extrados convexe et l'intrados plat et à double courbure si l'intrados est concave et l'extrados convexe.

En général, les types de profils utilisés dans les éoliennes rapides appartiennent à la série NACA (Comité Consultatif National de l'Aéronautique) et sont déterminés par un ensemble de chiffres définissant leur géométrie.

b) Nomenclature de profils NACA-4.

- Le premier chiffre a une signification géométrique et indique la flèche maximale de la ligne médiane en %, fournissant la courbure maximale.
- La deuxième chiffre a une signification géométrique et indique sa position, c'est-à-dire la distance du bord d'attaque à la position de la flèche maximale de la ligne médiane ou de la courbure maximale - Les deux derniers chiffres indiquent l'épaisseur relative maximale du profil en % par rapport à la corde.

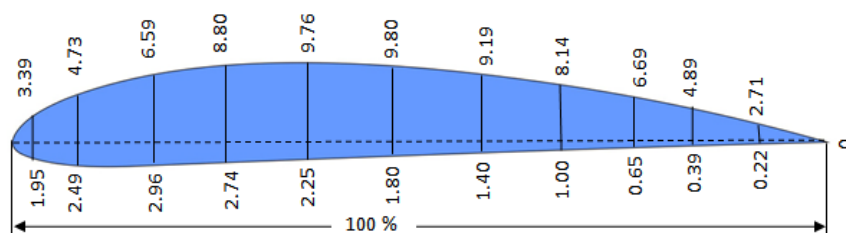


Fig. 2.7 : Profile NACA 4412.

Le profil est obtenu au moyen de deux paraboles tangentes au point de la ligne moyenne maximale. Exemple: Le profil NACA4412 (figure 2.7) a une hauteur maximale de 4% de la ligne médiane, située à 40% du bord d'attaque, avec une épaisseur relative de 12%.

Les profils NACA44XX ont l'intrados avec une partie convexe, ils sont donc de construction plus complexe et, le chiffre XX, indique l'épaisseur maximale du profil.

c) Angles de la corde

La pale d'éolienne est profilée et transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation. Les forces qui agissent sur un élément de longueur de la pale dx en rotation sont obtenues en étudiant l'action du vent sur la pale il en résulte une vitesse relative c du vent sur la pale (causée par le vent apparent ou sillage), ce qui peut être considéré comme la somme de la vitesse réelle du vent v , et d'un vent causé par le mouvement de rotation de la pale, ayant une vitesse u , figure 2.8. S'il s'agit d'une hélice d'avion (propulsive), le vent incident étant un vent relatif dû au déplacement de l'aéronef, la position de la pale par rapport à l'éolienne est différente, comme indiqué à la figure 2.9, dans lequel:

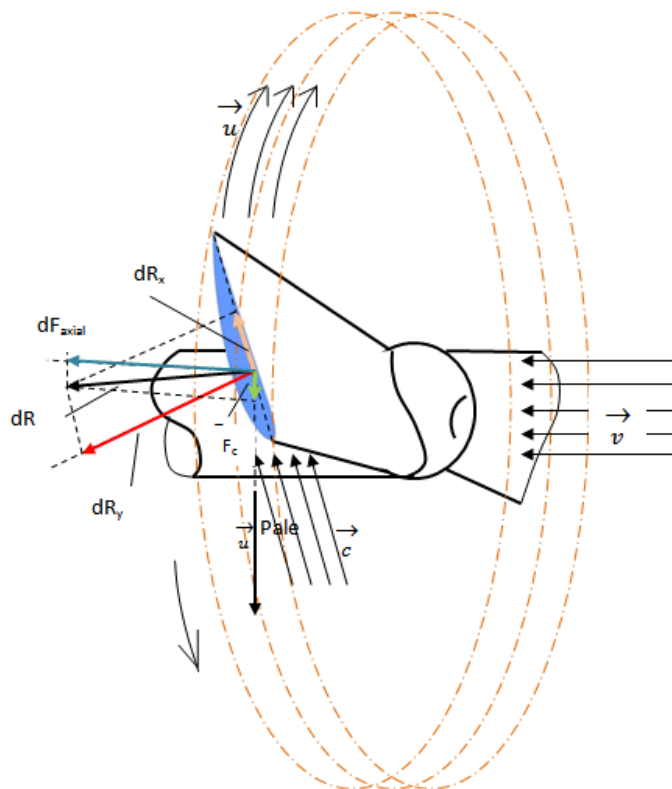


Fig. 2.8 : Forces agissant sur un élément de pale en rotation.

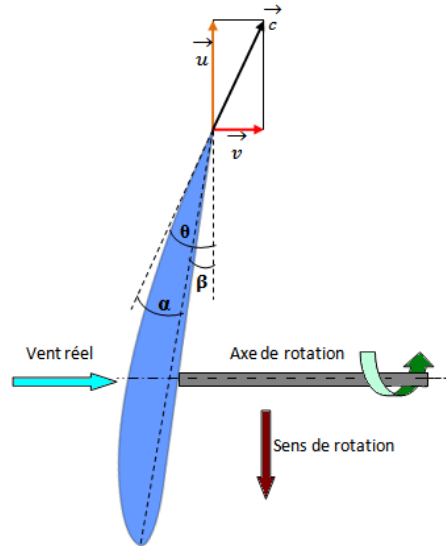


Fig. 2.9: Angles dans une pale d'éolienne

β est l'angle entre la corde du profil et le sens de rotation dans le plan de rotation, c'est l'angle de calage ou d'inclinaison (corde/ u) ;

α est l'angle entre la corde du profil et la vitesse apparente du vent c , (angle d'incidence ou d'attaque) ;

θ est l'angle entre le plan de rotation et la direction apparente du vent traversant le bord d'attaque; c'est ce qu'on appelle l'angle apparent du vent.

Si:

$\beta = \theta - \alpha$, c'est le cas d'une pale d'éolienne

$\beta = \theta + \alpha$, c'est le cas d'une hélice d'avion

u : est la vitesse du vent créée par le déplacement de la pale ;

v : est la vitesse réelle du vent (vitesse nominale).

Le tangage est une mesure de la tendance d'un profil d'aile à abaisser son bord d'attaque dans un courant frontal du vent, ses données sont importantes pour la conception de la structure des pales et des mécanismes d'hélices etc... Certains profils sont neutres car ils n'ont pas de moment de tangage.

La pale d'une éolienne est plus simple et plus facile à construire que celle d'un avion, car elle est plus lisse et présente une surface presque plane, si l'hélice d'un avion tourne dans les mêmes conditions d'une éolienne, il n'aurait pratiquement aucune transformation de l'énergie éolienne.

2.1.3 Forces de traînée et de portance dans des profils mobiles

La force agissant dans le centre aérodynamique d'un élément de pale en rotation, de surface frontale élémentaire dS (projection du profil sur la direction du vent apparent), est donnée par dR , figure 2.10.

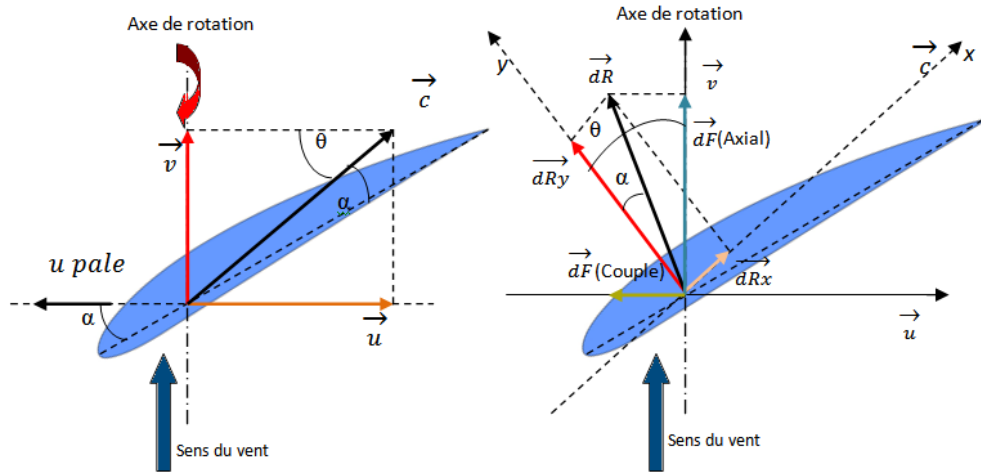


Fig. 2.10 : Vitesses et forces apparentes sur une pale d'éolienne.

Cette force peut être décomposée à son tour en deux autres, à la fois à l'entrée du vent dans le profil mobile et à la sortie.

- À l'entrée du profil mobile, il existe un vent de vitesse v qui engendre la force axiale F_{ax} et la force du couple F_c ;
- A la sortie du profil mobile, il y a une vitesse de vent apparente c qui donne lieu à la force de traînée F_T et à la force de portance F_P ;

$dR_x = F_T$ dans la direction c du vent apparent correspond à une dégradation de l'énergie

$dR_y = F_P$ est la force de levage ou de poussée sur l'élément du pale, ce qui le fait "voler / tourner".

Pour un élément de la pale différentiel en rotation dS , et conformément à la figure 2.10, on peut mettre:

La force de traînée :

$$dR_x = dF_T = \frac{1}{2} C_x \rho c^2 dS \dots \dots \dots (7)$$

La force de portance :

$$dR_y = dF_P = \frac{1}{2} C_y \rho c^2 dS \dots \dots \dots (8)$$

C_x est le coefficient de traînée et C_y est le coefficient de portance, qui dépend du type de profil, de l'angle d'incidence et du nombre de Reynolds.

dS , est la surface de l'élément différentiel de la pale face au vent, de valeur $(L.dr)$ où L est la longueur caractéristique du profil, égale à la longueur de sa corde.

Les coefficients C_x et C_y sont liés par le coefficient aérodynamique total $C_{Tot.}$ de la forme:

$$C_{Tot.}^2 = C_x^2 + C_y^2 \dots \dots \dots (9)$$

2.1.3.1 Couples et forces axiales

Si les forces de traînée ou de résistance dR_x et portance ou de levage dR_y sont projetées sur le plan de rotation, une force utile est obtenue, dF_c (couple), (parallèle à \vec{u}), qui fait tourner l'hélice, et une autre force perpendiculaire, $dF_{axial.}$, (Force de poussée du vent sur le rotor), qui est compensée par la réaction du support de l'arbre du rotor de l'hélice, et les deux forces sont sous les formes suivantes:

$$\begin{aligned} dF_{(couple)} &= dR_y \sin \theta - dR_x \cos \theta = \frac{1}{2} \rho c^2 dS (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) = \\ &= \frac{1}{2} \rho \frac{v^2}{\sin^2 \theta} dS (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) = \frac{\rho v^2}{2} (1 + \cot^2 \theta) dS (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) \dots \dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dF_{(axial.)} &= dR_y \cos \theta + dR_x \sin \theta = \frac{1}{2} \rho c^2 dS (C_y \cos \theta + C_x \sin \theta) = \\ &= \frac{1}{2} \rho \frac{v^2}{\sin^2 \theta} dS (C_y \cos \theta + C_x \sin \theta) = \frac{\rho v^2}{2} (1 + \cot^2 \theta) dS (C_y \cos \theta + C_x \sin \theta) \dots \dots (11) \end{aligned}$$

Étant θ l'angle formé par la direction du vent apparent, entre les vecteurs de vitesse u et c , les valeurs impliquées dans le calcul de ces éléments différentiels sont fonction des vitesses dans chaque zone et donc de l'angle d'attaque α , comme il est connu et sachant que $\frac{C_x}{C_y} = tg \alpha$, alors il est possible d'obtenir $dF_{(couple)}$ et $dF_{(axial.)}$ en fonction de α , comme suit:

$$C_y \sin \theta - C_x \cos \theta = C_y \left(\sin \theta - \frac{C_x}{C_y} \cos \theta \right) = C_y (\sin \theta - tg \alpha \cos \theta) = C_y \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \dots \dots (12)$$

Et,

$$C_y \cos \theta + C_x \sin \theta = C_y \left(\cos \theta + \frac{C_x}{C_y} \sin \theta \right) = C_y (\cos \theta + tg \alpha \sin \theta) = C_y \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \dots \dots (13)$$

Et donc,

$$dF_{couple} = \frac{1}{2} \rho v^2 dS C_y \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin^2 \theta \cos \alpha} \dots \dots \dots (14)$$

$$dF_{axial.} = \frac{1}{2} \rho v^2 dS C_y \frac{\cos(\theta - \alpha)}{\sin^2 \theta \cos \alpha} \dots \dots \dots (15)$$

La force de portance augmente avec l'angle d'attaque α jusqu'à un maximum, puis diminue.

Puisque u varie avec le rayon r , c variera également, ainsi l'angle β doit varier le long de la pale, et par conséquent les pales sont construites avec une géométrie déformée.

2.1.3.2 Couple moteur

Les éoliennes dont le couple est obtenu à partir de la force de traînée de F_T sont les éoliennes Savonius et les moulins à plusieurs pales (de 12 à 24 pales).

$$dC = r dF_T = \frac{r}{2} C_x \rho c^2 dS = \frac{r}{2} C_x \rho v^2 (1 + \cot^2 \theta) dS = \frac{r}{2} C_x \rho v^2 \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin^2 \theta \cos \alpha} dS \dots \dots \dots (16)$$

Les éoliennes dont le couple est obtenu à partir de la force de couple dF_C sont les éoliennes Darrieux et à pale.

$$dC = r dF_p = \frac{r}{2} \rho v^2 dS (1 + \cot^2 \theta) (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) \dots \dots \dots (17)$$

2.1.3.3 Rendement aérodynamique des pales

La puissance utile générée par un élément différentiel de pale est:

$$dP_{util.} = dF_C \cdot u \dots \dots \dots (18)$$

et la puissance consommée par le vent:

$$dP_{vent} = dF_{axial.} \cdot v \dots \dots \dots (19)$$

Pour que le rendement aérodynamique $\eta_{aérody.}$ puisse être définie comme le rapport entre la puissance utile générée par la pale et celle consommée par le vent, sous la forme:

$$\begin{aligned} \eta_{aérody.} &= \frac{dF_C \cdot u}{dF_{axial.} \cdot v} = \frac{dR_y \sin \theta - dR_x \cos \theta}{dR_y \cos \theta + dR_x \sin \theta} \frac{u}{v} = \operatorname{tg}(\theta - \alpha) \frac{u}{v} = \frac{\left(\frac{dR_y}{dR_x}\right) - \cot \theta}{\left(\frac{dR_y}{dR_x}\right) \cot \theta + 1} \frac{u}{v} \\ &= \frac{1 - \mu \cot \theta}{1 + \mu \operatorname{tg} \theta} = \frac{f - \cot \theta}{f + \operatorname{tg} \theta} \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

Puisque on a :

$$f = \frac{1}{\mu} = \frac{dR_y}{dR_x} = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \dots \dots \dots (21)$$

Et,

$$TSR = \frac{u_{max}}{v} = \cot \theta_{max} = \frac{R \omega}{v} \dots \dots \dots (22)$$

Cela dépend de la finesse f (figure 2.10), et du TSR (Tip-Speed-Ratio) défini comme la relation entre la vitesse périphérique de la pale u et celle du vent v , sans intervention de vitesses induites, c'est un concept qui dans ces machines a remplacé le nombre spécifique de révolutions [2].

La relation entre la vitesse angulaire ω pour tout rayon r et l'angle θ est la suivante:

$$SR = \frac{u}{v} = \cot g \theta = \frac{r \omega}{v} = \frac{\pi r n}{30 v} \dots \dots \dots (23)$$

Avec SR (rapport de vitesse), où r est la distance de l'élément de pale considéré par rapport à l'axe de rotation de l'éolienne; si r diminue, l'angle θ augmente; si β est constant, l'angle d'incidence α augmente.

D'après l'expression du rendement d'une pale d'éolienne basée sur sa finesse f et l'angle apparent du vent θ , il s'ensuit que plus la valeur de μ est faible (ou plus la valeur de finesse f est grande), plus grande sera la valeur du rendement $\eta_{aérody.}$; On obtient pour ($\mu = 0$) ou ($f = \infty$), un rendement maximal égal à l'unité, question impossible selon le théorème de Betz [3].

Lors d'implantation d'une éolienne, il est nécessaire de choisir la vitesse de vent v la plus appropriée et d'essayer d'obtenir les rendements (performances) maximales; il s'agit de la vitesse nominale, en fonction du lieu où on veut installer l'appareil; Une fois défini, le type de profil de la pale et la vitesse de rotation souhaitée sont choisis. Connaissant la vitesse nominale v du vent et la vitesse périphérique de rotation u , on détermine l'angle apparent du vent θ qui varie le long de la pale en fonction de la distance à l'axe de rotation de la pale. Il faut également prendre en compte que pour obtenir le $\eta_{aérody.max}$, l'angle d'incidence du vent sur la pale doit avoir une valeur fixe α_0 sur toute sa longueur; pour que cela soit le cas, il est nécessaire que l'angle ($\beta = \theta - \alpha$) varie en même temps que θ .

2.1.3.4 Puissance maximale

Pour trouver la puissance maximale, on commence par l'expression de la puissance utile de la forme:

$$\begin{aligned} dP_{util.} &= u dF_{couple} = u(dR_y \sin \theta - dR_x \cos \theta) = \frac{u}{2} \rho c^2 dS (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) = \\ &= \frac{u}{2} \rho v^2 dS (\cot g^2 \theta + 1) (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) = \frac{\rho v^3 dS}{2} \cot g \theta (\cot g^2 \theta + 1) (C_y \sin \theta - C_x \cos \theta) \dots (24) \end{aligned}$$

Dans la pratique cette expression est simplifiée, donc:

$$tg \theta = \sin \theta; \cos \theta \approx 1; \cot g \theta \approx \frac{1}{\sin \theta} \dots \dots \dots (25)$$

Donc, on peut écrire l'expression de dP_{util} sous la forme:

$$dP_{util} = \frac{\rho v^3 dS}{2} \frac{1}{\sin\theta} (\cot g^2\theta + 1)(C_y \sin\theta - C_x) =$$

$$= \frac{\rho v^3 dS}{2} \left[C_y (\cot g^2\theta + 1) - C_x \frac{\cot g^2\theta + 1}{\sin\theta} \right] = \frac{\rho v^3 dS}{2} \left(\frac{C_y}{\sin^2\theta} - \frac{C_x}{\sin^3\theta} \right) = \frac{\rho v^3 dS}{2} (C_y \cot g^2\theta - C_x \cot g^3\theta) \dots \dots \dots (26)$$

La condition de puissance maximale développée par le vent correspondant à l'élément de surface de la pale dS est calculée en dérivant l'expression du dP_{util} par rapport à θ , on obtient:

$$2C_y \cot g\theta - 3C_x \cot g^2\theta = 0 \dots \dots \dots (27)$$

Dont les solutions sont:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cot g\theta = 0 \\ 2C_y = 3C_x \cot g\theta \rightarrow \cot g\theta = \frac{2C_y}{3C_x} = \frac{2f}{3} = \frac{2}{3\mu} \end{array} \right.$$

$$dP_{util,max} = \frac{\rho v^3 dS}{2} \left(C_y \frac{4C_y^2}{9C_x^2} - C_x \frac{8C_y^3}{27C_x^3} \right) = \frac{2\rho v^3 dS}{27} \frac{C_y^3}{C_x^2} \dots \dots \dots (28)$$

2.1.3.5 Couple maximal

Le couple dC correspondant à l'élément de surface de la pale dS a été précédemment calculé comme suit:

$$dC = r dF_p = \frac{r}{2} \rho v^2 dS (1 + \cot g^2\theta)(C_y \sin\theta - C_x \cos\theta) \dots \dots \dots (29)$$

On peut également obtenir le couple en fonction du dP_{util} et sera da la forme suivante:

$$dC = \frac{dP_{util}}{\omega} = \frac{dN_{Putil}}{u} r = \frac{dP_{util}}{v \cot g\theta} r = \frac{r \rho v^2}{2} (C_y \cot g\theta - C_x \cot g^2\theta) \dots \dots \dots (30)$$

Qui est nul pour:

$$\cot g\theta = \frac{C_y}{C_x} \dots \dots \dots (31)$$

La condition de couple maximum en posant la dérivée de (30) égal à zéro:

$$C_y = 2C_x \cot g\theta \rightarrow \cot g\theta = \frac{C_y}{2C_x}$$

$$dC_{max} = \frac{r \rho v^2 dS}{2} \left(\frac{C_y^2}{2C_x} - \frac{C_x C_y^2}{4C_x^2} \right) = \frac{r \rho v^2 dS}{8} \frac{C_y^2}{C_x} \dots \dots \dots (32)$$

2.1.3.6 Vitesse angulaire maximale

La vitesse angulaire maximale ω_{max} est:

$$\omega_{max} = \left(\frac{dP}{dC}\right)_{max} = \frac{\frac{2\rho v^3 dS C_y^3}{27 C_x^2}}{\frac{r \rho v^2 dS C_y^2}{8 C_x}} = \frac{16}{27} \frac{v C_y}{r C_x} = \frac{\pi n_{max}}{30} \dots \dots \dots (33)$$

Dans les éoliennes à axe horizontal, pour obtenir une vitesse angulaire uniforme ω , il est nécessaire que la vitesse v du vent et sa direction restent constantes par rapport à la pale. Le rapport ($TSR = \cotg \theta$) est compris entre 0,2 et 13, ce qui nous permet de faire la classification suivante des éoliennes à axe horizontal:

Pour les grandes éoliennes..... $u/v < 1$

Pour les éoliennes à plusieurs pales $u/v \approx 3$

Pour les éoliennes à pale rapide $u/v \approx 10$

2.1.4 Modèle théorique de BETZ

L'énergie éolienne peut être récupérée et transformée par une éolienne mais lors de l'immersion du rotor dans un flux d'air de vitesse v_1 en amont de ce dernier devient v_2 non nulle en aval alors on peut dire que la transformation et la récupération de toute l'énergie éolienne en une autre forme d'énergie ne sont pas possibles [3].

Dans le plan contenant le rotor (figure 2.11), la section transversale battue par ce dernier serait un disque imaginaire de section A , où v est la vitesse de vent utile qu'il contient.

Supposant aussi qu'en amont du rotor, l'air circulant dans le tube de flux a une vitesse v_1 dans la section transversale fictive A_1 , qui correspond à la vitesse du vent non perturbée, tandis que v_2 correspond à une autre section fictive A_2 en aval de la zone où se trouve le rotor.

Le rotor est supposé être un disque de diamètre d qui capte l'énergie de l'air en mouvement qui l'atteint. Si le disque était capable de capter toute l'énergie cinétique du vent, l'air serait au repos en aval et, par conséquent, la vitesse v_2 serait nulle.

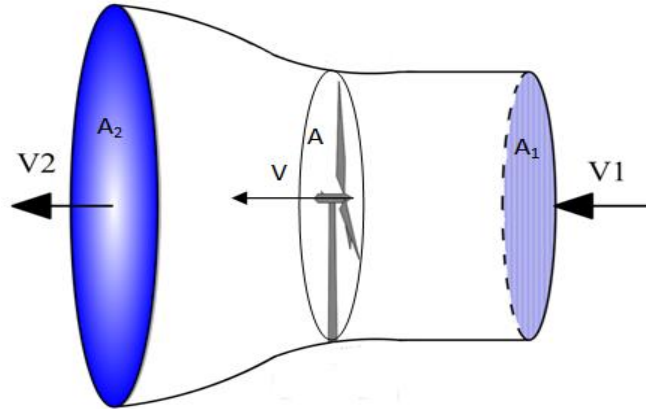


Fig. 2.11 : Modèle de Betz

En supposant que la masse G d'air circulant dans le tube soit constante, on peut dire:

$$G = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A v \dots \dots \dots (34)$$

La variation de l'énergie cinétique du vent dans l'unité de temps est de la forme:

$$\Delta E_{cinétique} = E_{c1} - E_{c2} = \frac{G}{2} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho A v}{2} (v_1^2 - v_2^2) \dots \dots \dots (35)$$

La force F exercée par le vent dans l'unité de temps ($\Delta t = 1$) sur la zone fictive A balayée par le rotor, est égale à la variation de la quantité de mouvement de l'air qui le traverse; le travail généré par cette force F dans l'unité de temps, est la puissance P_{util} a la forme suivante:

$$P_{util} = F.V = \rho A v^2 (v_1 - v_2) \dots \dots \dots (36)$$

Avec, $F = \frac{G \Delta v}{\Delta t}$

Ce qui est égal à la variation d'énergie cinétique de l'air, dans le même temps, et on peut mettre:

$$P_{util} = \rho A v^2 (v_1 - v_2) = \frac{\rho A v}{2} (v_1^2 - v_2^2) \dots \dots \dots (37)$$

Avec : $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$

Si on remplace la vitesse v_2 par $b v_1$ avec ($0 < b < 1$), il en résulte:

$$P_{util} = \frac{\rho A (v_1 + v_2)}{4} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho A v_1^3}{4} (1 + b)(1 - b^2) \dots \dots \dots (38)$$

La valeur maximale de P_{util} est obtenue par la dérivée de $\frac{dP_{util}}{db} = 0$, il en résulte :

$$(1 + b)(1 - 3b) = 0 \dots \dots \dots (39)$$

Dont les solutions sont:

- $b = -1$, cela ne répond pas à la condition ($0 < b < 1$)
- $b = \frac{1}{3} = \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow v_1 = 3v_2$

Ce qui permet de trouver la puissance maximale fournie par le rotor, et qui vaut:

$$P_{util.max} = \frac{\rho A v_1^3}{4} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right) = \frac{8 \rho A v_1^3}{27} = 0.37 A v_1^3 \dots \dots \dots (40)$$

C'est ce qu'on appelle l'équation de Betz, et dans laquelle il a été pris comme densité d'air moyenne ($\rho = 1,25$) kg/m^3 , puisqu'en hiver, elle est de l'ordre de 1,33 et en été de 1,15.

Il s'ensuit que la puissance maximale théorique est proportionnelle au diamètre D du cercle balayé par la pale et au cube de la vitesse nominale du vent v_1 .

La puissance du vent en amont du rotor est donnée par l'expression:

$$P_{vent disponible} = \frac{\rho A v_1^3}{2} = 0.625 A v_1^3 \dots \dots \dots (41)$$

Le rendement aérodynamique maximal (ou facteur de puissance maximale) est:

$$\eta_{max} = \frac{P_{util.max}}{P_{vent}} = \frac{16}{27} = 0.5925 = 59.25\% \dots \dots \dots (42)$$

Qui est la limite théorique ou le coefficient de Betz, il en résulte qu'aucune éolienne, aussi sophistiquée soit-elle, ne peut le dépasser.

Considérations pratiques :

L'équation de Betz fournit la limite supérieure des possibilités d'une éolienne, mais elle n'est pas très fine en soi, car elle ne prend pas en compte une série de facteurs tels que:

- La résistance aérodynamique des pales ;
- La perte d'énergie par le sillage généré dans la rotation ;
- La compressibilité du fluide ;
- L'interférence des pales.

La performance pratique dépend du type de rotor, multipliant ainsi l'expression précédente de la puissance maximale théorique par un coefficient du rendement théorique maximum, qui résume les facteurs ci-dessus, et qui est inclus dans l'intervalle ($0,30 \div 0,80$), on obtient:

$$P_{max.réel} = (0.11 \div 0.30) A v_1^3 \dots \dots \dots (43)$$

En réalité, nous devons également tenir compte de la performance des différents mécanismes qui composent l'éolienne. Par conséquent, il faut tenir en compte les taux de différents composants:

Performance de Betz	59,3%
Performance du rotor	85%
Performance du multiplicateur	98%
Performances de l'alternateur	95%
Efficacité du transformateur	98%

On obtient une performance globale de l'installation de l'ordre de 46%.

En pratique, les performances de l'éolienne seront encore plus faibles, de sorte qu'elle peut être acceptée comme une valeur assez raisonnable pour sa puissance, selon l'expression suivante:

$$P_{util.} = (0.11 \div 0.17) A v_1^3 \dots \dots \dots (44)$$

2.2 Performances aérodynamiques d'une éolienne

Les profils utilisés pour une éolienne peut être considérée comme une hélice qui extrait l'énergie de l'air d'entraînement et la convertit en une énergie mécanique comme une hélice qui expulse de l'énergie dans l'air à partir d'une autre source d'énergie. La similitude de l'hélice et de l'éolienne permet de suivre le même développement théorique pour l'analyse des performances. La théorie des hélices a été développée selon deux méthodes d'approche indépendantes, l'une appelée théorie de la quantité de mouvement et l'autre, théorie d'éléments de pale.

La théorie de la quantité de mouvement a été développée pour la première fois par W.J.M. Rankine [4] en 1865, puis améliorée par R.E. Froude [5]. La théorie repose sur la détermination des forces agissant sur le rotor pour produire le mouvement du fluide. La théorie est utile pour prédire l'efficacité et la vitesse d'écoulement idéales, mais elle ne donne aucune information sur la forme de la pale nécessaire pour générer le mouvement du fluide. Les effets de rotation du sillage ont été inclus dans la théorie par A. Betz [3].

La théorie d'éléments de pale a été créée par R.E. Froude [5] en 1878 et développée par S. Drzewiecki. L'approche de la théorie d'éléments de pale est opposée à celle de la quantité de mouvement en ce que concernent les forces produites par les pales résultant du mouvement du

fluide. Son développement initial a été entravé par le manque de connaissances sur l'aérodynamique des sections et l'interférence mutuelle des pales.

La théorie moderne des rotors s'est développée à partir du concept des tourbillons libres dissipés par les pales en rotation. C'est la théorie la plus fréquemment utilisée pour l'analyse de la performance des éoliennes et des rotors d'hélicoptère, bien que des méthodes d'analyse plus convenables soient disponibles. La technique, qui suppose un écoulement bidimensionnel local à chaque station rotorique radiale, est une approche de conception-analyse dans laquelle la surface portante, la corde et l'angle de tangage sont nécessaires pour déterminer les forces et le couple. On suppose que les approches de la théorie d'éléments de pale seraient adéquates pour l'analyse des performances des éoliennes; Cependant, la vérification expérimentale devrait être nécessaire et les essais doivent être effectués dans une plage de nombres de Reynolds assez large.

2.3. Théorie de quantité de mouvement appliquée à un élément de pale

La théorie de l'élément de pale associe deux méthodes pour examiner le fonctionnement d'une éolienne. La première méthode consiste à utiliser la théorie de quantité de mouvement pour un tube à flux annulaire en rotation traversant un rotor d'une éolienne. La seconde consiste à examiner les forces générées par les coefficients de portance et de traînée de la surface portante à différentes sections de la pale. Ces deux méthodes donnent ensuite une série d'équations qui peuvent être résolues de manière itérative.

2.3.1 Théorie de quantité de mouvement

2.3.1.1 Force axiale

Considérons le tube de flux autour d'une éolienne (figure 2.12); Cette figure montre quatre stations, la première est située quelque part en amont de l'éolienne, la 2^{ème} juste avant les pales, la 3^{ème} juste après les pales et la 4^{ème} en aval des pales. Entre 2 et 3 de l'énergie est extraite du vent et il en résulte un changement de pression. En supposant que $p_1 = p_4$ et que $V_2 = V_3$. Nous pouvons également supposer qu'entre 1 et 2 et entre 3 et 4 le flux est sans frottement, et donc appliquer l'équation de Bernoulli.

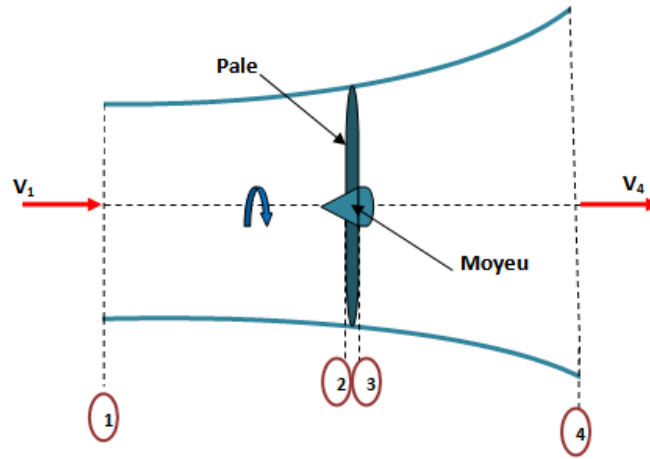


Fig. 2.12 : Tube de flux autour d'une éolienne

Alors :

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_4^2) \dots \dots \dots (45)$$

Sachant que la pression c'est la force sur la surface, alors:

$$dF_x = (p_2 - p_3) dA \dots \dots \dots (46)$$

$$\Rightarrow dF_x = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_4^2) dA \dots \dots \dots (47)$$

En définissant le facteur d'induction axiale comme suit:

$$a = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \dots \dots \dots (48)$$

On peut aussi montrer que:

$$v_2 = v_1 (1 - a) \dots \dots \dots (49)$$

$$v_4 = v_1 (1 - 2a) \dots \dots \dots (50)$$

Avec la substitution de (49) et (50) dans (47) on trouve :

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho v_1^2 [4a(1 - a)] 2\pi r dr \dots \dots \dots (51)$$

2.3.1.2 Tube de flux annulaire rotatif

Considérons le tube de flux annulaire en rotation illustré dans la figure 2.13. Quatre stations sont représentées sur le schéma, 1 quelque part en amont de la turbine, 2 juste avant les pales, 3 juste après les pales et 4 en aval des pales. Entre 2 et 3, la rotation de la turbine confère une rotation au sillage de la pale.

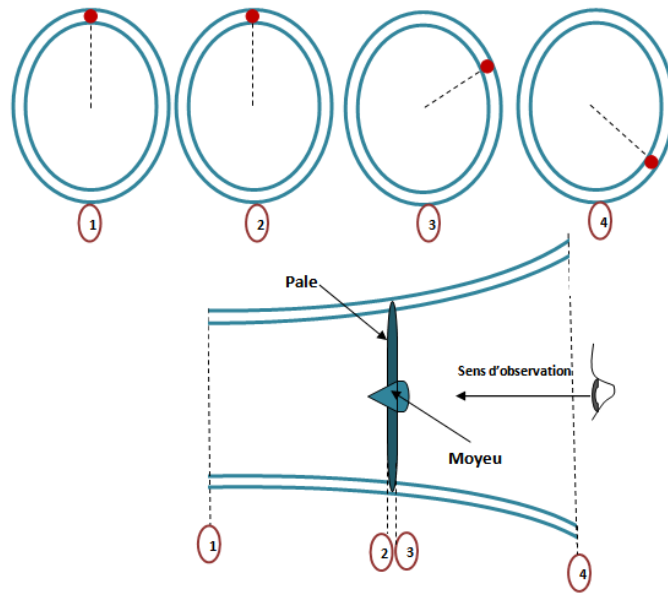


Fig. 2.13: Tube de flux annulaire en rotation.

Si on considère la conservation du moment angulaire dans ce tube à flux annulaire. Sur la figure 2.13, à la station 3, on peut dire que le sillage des pales tourne à une vitesse angulaire ω et les pales tournent à une vitesse angulaire de Ω . D'après la physique de base on a:

Le moment d'inertie d'un anneau, $I = mr^2$ (52)

Le moment angulaire : $L = I \omega$ (53)

Le couple : $C = dL/dt$ (54)

$$\Rightarrow C = \frac{dI\omega}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt} r^2 \omega \dots\dots\dots (55)$$

Donc, pour un petit élément, le couple correspondant sera:

$$dC = d\dot{m}\omega r^2 \dots\dots\dots (56)$$

Pour l'élément annulaire en rotation :

$$d\dot{m} = \rho A v_2 \dots\dots\dots (57)$$

$$d\dot{m} = \rho 2 \pi dr v_2 \dots\dots\dots (58)$$

$$\Rightarrow dC = \rho 2 \pi r dr v_2 \omega r^2 = 2 \pi \rho v_2 r^3 dr \dots\dots\dots (59)$$

Le facteur d'induction angulaire a':

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \dots \dots \dots (60)$$

Rappelons que $v_2 = v(1 - a)$ donc:

$$dC = 4a'(1 - a)\rho v\Omega r^3\pi dr \dots \dots \dots (61)$$

La théorie de la quantité de mouvement a donc donné deux équations, la première c'est la force axiale (éq. 51) et la deuxième c'est la force tangentielle (éq. 61) sur un élément annulaire de fluide.

2.4 Théorie des éléments de pale

La théorie des éléments de pale repose sur deux hypothèses clés suivants:

- Il n'y a pas d'interactions aérodynamiques entre les différents éléments de pale ;
- Les forces sur les éléments de la pale sont uniquement déterminées par les coefficients de portance et de traînée.

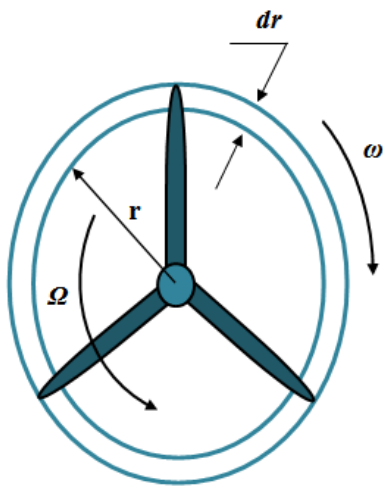


Fig. 2.14 : Tube de flux annulaire en rotation.

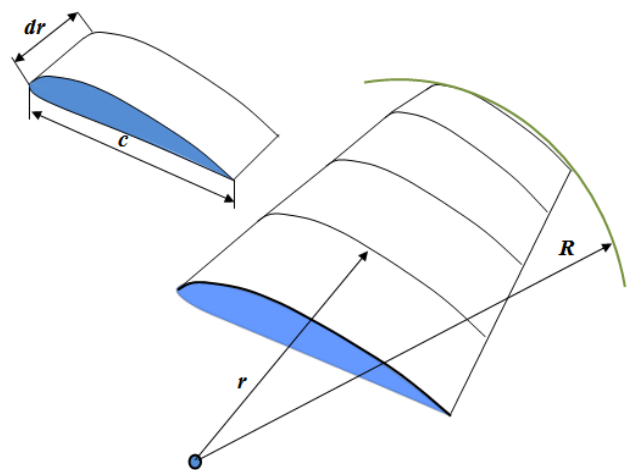


Fig. 2.15: Modèle d'élément de pale.

Considérons une pale divisée en N éléments, comme indiqué dans la figure 2.15. Chacun des éléments de la pale subit un écoulement légèrement différent car ils ont une vitesse de rotation différente (Ωr), une longueur de corde différente (l_c) et un angle de twist « torsion » différent (β_T). La théorie des éléments de pale consiste à diviser la pale en un nombre suffisant (généralement entre dix et vingt) d'éléments et à calculer le flux à chacun d'eux. Les caractéristiques de performance globales sont déterminées par l'intégration numérique le long de la pale.

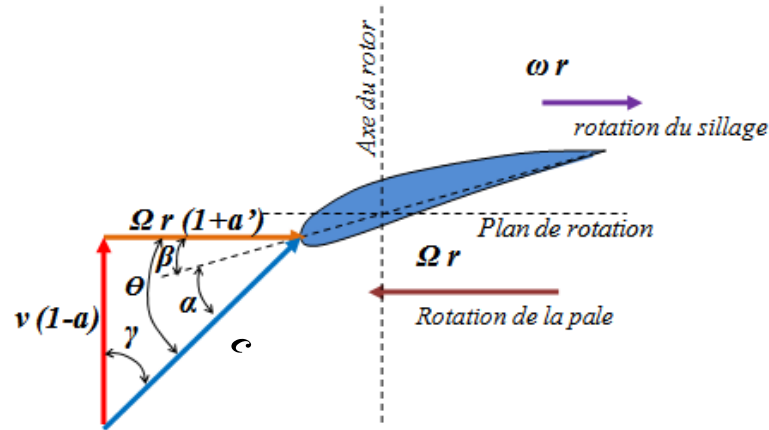


Fig. 2.16: Ecoulement sur la pale d'une éolienne.

2.4.1 Débit relatif

Les données de coefficient de portance et de traînée sont disponibles pour une variété de profils aérodynamiques à partir de données de soufflerie. Étant donné que la plupart des essais en soufflerie sont effectués avec de profils à l'arrêt, nous devons établir un lien entre le débit sur la pale en mouvement et celui de l'essai à l'arrêt. Pour ce faire, nous utilisons la vitesse relative sur la surface portante. Hansen et Butterfield [6] donnent plus de détails sur l'aérodynamique des éoliennes et sur la sélection de surfaces aérodynamiques.

En pratique, le flux est légèrement inversé lorsqu'il passe sur la surface de la pale. Par conséquent, et afin d'obtenir une estimation plus précise des performances de la surface, une moyenne des conditions d'écoulement en entrée et en sortie est nécessaire.

L'écoulement autour des pales commence à la station 2 (figures 2.12 et 2.13) et se termine à la station 3. À l'entrée de la pale, le flux ne tourne pas, mais à la sortie des pales, le flux tourne avec une vitesse angulaire ω . La vitesse de rotation moyenne du flux sur la pale dû au sillage est donc égale à $\omega/2$. Puisque la pale tourne à la vitesse Ω alors, la vitesse tangentielle moyenne de la pale est donc $\Omega r + \omega r/2$ (voir la figure 2.16). En examinant la figure, nous pouvons immédiatement noter que:

$$\Omega r + \frac{\omega r}{2} = \Omega r(1 + a') \dots \dots \dots (62)$$

D'après (éq. 49): $v_2 = v_1 (1 - a)$ et ainsi:

$$\tan \theta = \frac{v(1 - a)}{\Omega r(1 + a')} \dots \dots \dots (63)$$

Où v est utilisé pour représenter la vitesse d'écoulement entrante v_1 . La valeur de β variera d'un élément de pale à l'autre. Le rapport de vitesse de pointe local λ_r est défini comme suit:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{v} \dots \dots \dots (64)$$

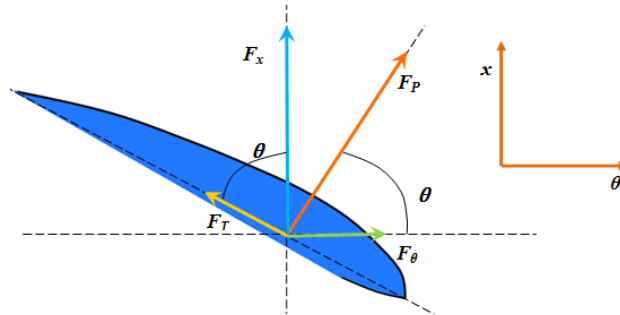


Fig. 2.17: Forces sur la pale de l'éolienne.

Donc, l'expression $\tan\beta$ peut être encore simplifiée:

$$\cotan \theta = \frac{\lambda_r(1 + a')}{(1 - a)} \dots \dots \dots (65)$$

En plus de l'équation (65), la figure 2.16 montre que la vitesse du vent apparent s'écrit comme suit:

$$c = \frac{v(1 - a)}{\cos\gamma} \dots \dots \dots (66)$$

2.4.2 Éléments de la pale

Les forces sur l'élément de la pale sont illustrées dans la figure 2.17. Notant, par définition, les forces de portance et de traînée sont perpendiculaires et parallèles au flux entrant. Pour chaque élément de pale, on peut avoir:

$$dF_\theta = dP \cos\theta - dT \sin\theta \dots \dots \dots (67)$$

$$dF_x = dP \sin\theta + dT \cos\theta \dots \dots \dots (68)$$

Où dP et dT représentent respectivement les forces de portance et de traînée exercées sur l'élément de la pale. dP et dT peuvent être trouvés en fonction des coefficients de portance et de traînée comme suit:

$$dP = C_P \frac{1}{2} \rho c^2 l_c dr \dots \dots \dots (69)$$

$$dT = C_T \frac{1}{2} \rho c^2 l_c dr \dots \dots \dots (70)$$

Les coefficients de portance et de traînée pour un profil aérodynamique NACA 4412 sont illustrés dans la figure 2.18. Ce graphique montre que, pour des valeurs d'incidence faibles, le profil aérodynamique produit avec succès une grande portance avec une faible traînée. Aux alentours de $\alpha = 14^\circ$, il se produit un phénomène connu sous le nom de décrochage, caractérisé par une augmentation massive de la traînée et une nette réduction de la portance.

S'il existe Z pales, en combinant l'équation 67 et l'équation 69, on peut montrer que:

$$dF_x = \frac{1}{2} Z \rho c^2 (C_p \sin\theta + C_T \cos\theta) l_c dr \dots \dots \dots (71)$$

$$dF_\theta = \frac{1}{2} Z \rho c^2 (C_p \cos\theta - C_T \sin\theta) l_c dr \dots \dots \dots (72)$$

Le couple sur un élément, dC est simplement la force tangentielle multipliée par le rayon.

$$dC = \frac{1}{2} Z \rho c^2 (C_p \cos\theta - C_T \sin\theta) l_c r dr \dots \dots \dots (73)$$

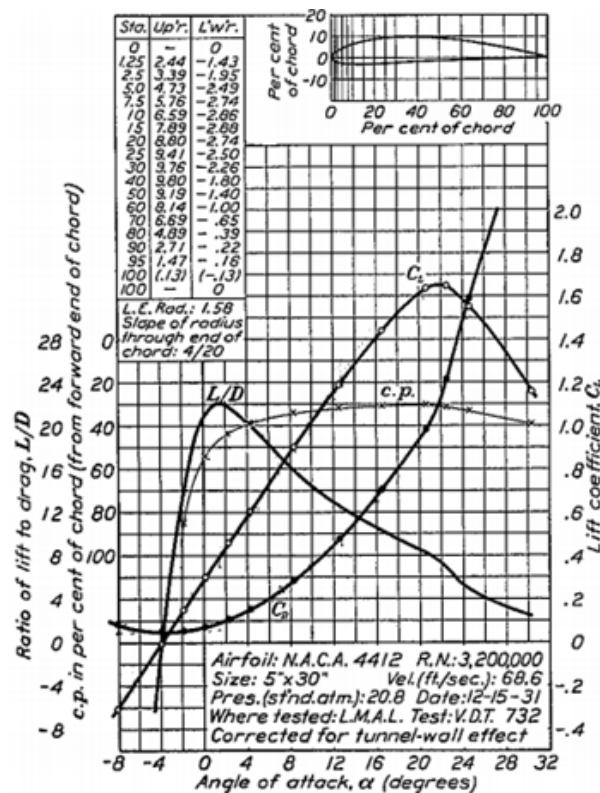


Fig. 2.18: Coefficients de portance et de traînée pour un profil NACA 4412.

L'effet de la force de traînée est clairement visible dans les équations, une augmentation de la force de poussée sur l'éolienne et une diminution du couple (et de la puissance).

Ces équations peuvent être rendues plus utiles en notant que θ et γ peuvent être exprimés en termes de facteurs d'induction, (équations 65 et 66). En substituant et en effectuant quelques opérations algébriques, on obtient:

$$dF_x = \delta' \pi \rho \frac{v^2(1-a)^2}{\cos^2\theta} (C_p \sin\theta + C_T \cos\theta) r dr \dots \dots \dots (74)$$

$$dC = \delta' \pi \rho \frac{v^2(1-a)^2}{\cos^2\theta} (C_p \cos\theta - C_T \sin\theta) r^2 dr \dots \dots \dots (75)$$

Où δ' est appelée la solidité locale et est définie comme suit:

$$\delta' = \frac{Z l_c}{2\pi r} \dots \dots \dots (76)$$

2.4.3 Correction de perte de pointe

À la pointe de la pale de l'éolienne il y a des pertes. Celles-ci peuvent être expliquées dans la théorie BEM au moyen d'un facteur de correction. Ce facteur de correction J varie de 0 à 1 et caractérise la réduction des efforts le long de la pale.

$$J = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{\frac{Z}{2} [1 - \frac{r}{R}]}{(\frac{r}{R}) \cos\theta} \right) \right\} \right] \dots \dots \dots (77)$$

Les résultats de \cos^{-1} doivent être exprimés en radians. La correction de perte de la pointe est appliquée à l'équation 51 et à l'équation 61, qui deviennent:

$$dF_x = J \rho v_1^2 [4 a (1 - a)] \pi r dr \dots \dots \dots (78)$$

$$dC = 4 J a' (1 - a) \rho v \Omega r^3 \pi dr \dots \dots \dots (79)$$

2.4.4 Equations d'élément de pale

Nous avons maintenant quatre équations, deux dérivées de la théorie de la quantité de mouvement qui expriment la poussée axiale et le couple en termes de paramètres d'écoulement (équations 78 et 79) et nous avons également deux équations dérivées en tenant compte des forces de pale qui expriment la force axiale et le couple en termes de coefficients de portance et de traînée de la pale (équations 74 et 75):

Pour calculer les performances du rotor, les équations 78 et 79 à partir de l'équilibre en termes de quantité de mouvement sont assimilées aux équations 74 et 75. Une fois que cela est fait, on obtient les relations utiles suivantes:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\delta' [C_p \sin\theta + C_T \cos\theta]}{4J \cos^2\theta} \dots \dots \dots (80)$$

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{\delta' [C_p \cos\theta - C_T \sin\theta]}{4J \lambda_r \cos^2\theta} \dots \dots \dots (81)$$

Les équations 80 et 81 sont utilisées dans la conception de la pale.

2.4.5 Puissance de sortie

La contribution à la puissance totale de chaque anneau est de:

$$dP = \Omega dC \dots \dots \dots (82)$$

La puissance totale du rotor est de:

$$P = \int_{r_m}^R dP dr = \int_{r_m}^R \Omega dC dr \dots \dots \dots (83)$$

Où r_m est le rayon du moyeu. Le coefficient de puissance $C_{Puis.}$ est donné par:

$$C_{Puis.} = \frac{P}{P_{vent}} = \frac{\int_{r_m}^R \Omega dC}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3} \dots \dots \dots (84)$$

En utilisant l'équation 75, il est possible de trouver directement par intégration le coefficient de puissance:

$$C_{Puis.} = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_m}^{\lambda} J \lambda_r^3 a'(1-a) \left[1 - \frac{C_P}{C_T} \tan\theta \right] d\lambda_r \dots \dots \dots (85)$$

2.4.6 Procédure de conception d'une pale

Pour exécuter une conception d'une pale d'une éolienne donnée, il faut suivre la procédure suivante :

1. Détermination du diamètre du rotor requis à partir des conditions du site et résolvant l'équation suivante:

$$P = \frac{1}{2} C_{Per} \eta \rho \pi R^2 v^3 \dots \dots \dots (86)$$

Où: • P est la puissance de sortie

- C_{Per} est le coefficient de performance attendu (0,4 pour une éolienne moderne à trois pales)
- η est le rendement électrique et mécanique attendu (0,9 serait une valeur appropriée)
- R est le rayon de la pointe
- v est la vitesse du vent attendue

2. Choix d'un rapport de vitesse de la pointe (TSR) pour la machine.

- Pour le pompage de l'eau, on prend $1 < \lambda < 3$ (ce qui donne un couple élevé)
- pour la génération d'énergie électrique, on prend $4 < \lambda < 10$.

3. Choix du nombre de pale Z à l'aide du tableau 1.

Tableau 2.1 : Nombre de pales en fonction de λ .

λ	Z
1	8-24
2	6-12
3	3-6
4	3-4
Plus de 4	1-3

4. Sélection d'un profil aérodynamique. Pour $\lambda < 3$, des plaques incurvées peuvent être utilisées plutôt qu'une forme aérodynamique.

5. Obtention et examen des courbes de coefficient de portance et de traînée de la pale en question.

6. Choix les conditions aérodynamiques de conception pour chaque profil aérodynamique. La sélection est de 80% de la valeur de portance maximale. Ce choix permet de corriger efficacement le vrillage de la pale.

Sur de longues pales, un très grand degré de vrillage (twist) est nécessaire pour obtenir 80% de la portance maximale près du moyeu.

7. Choix d'une répartition des cordes de la pale. Il n'existe pas de moyen physiquement facilement accessible de le faire, mais une simplification d'une pale idéale est donnée par:

$$l_c = \frac{8 \pi r \cos \theta}{3 Z \lambda_r} \dots \dots \dots (87)$$

Cela donne une forme moyennement complexe et une distribution linéaire de la corde peut être considérablement plus facile à réaliser.

8. Division de la pale en N éléments, typiquement de 10 à 20 éléments.

9. Comme première hypothèse, pour la solution de flux, en utilisant les équations ci-dessous. Ces équations sont basées sur une forme de pale idéale obtenue avec une rotation de sillage, une traînée nulle et une perte nulle:

$$\beta = 90^\circ - \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \dots \dots \dots (88)$$

$$a = \left(1 + \frac{4 \cos^2 \theta}{\delta' C_p \sin \theta} \right)^{-1} \dots \dots \dots (89)$$

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \dots \dots \dots (90)$$

10. Le calcul des performances du rotor, et la modification de la conception si nécessaire (c'est un processus itératif).

Le nombre de pales, la forme de la surface portante, la répartition des cordes et la répartition des torsions sont les caractéristiques essentielles d'une éolienne. Bien que la procédure de conception ci-dessus donne quelques recommandations simples, il est fort probable que le concepteur devra passer beaucoup de temps à affiner la répartition des torsions et des cordes pour parvenir à une solution acceptable.

2.4.7 Calcul de la performance de notre éolienne

En vue de l'implantation dans le futur d'un parc éolien dans la région de Laghouat, alors il faut prendre en compte les atouts du site choisi sans oublier les conditions météorologiques et le choix du type d'éoliennes. Afin d'être plus pratique, on va prendre un exemple d'éolienne de moyenne puissance qui va être l'objet de notre étude. D'après la classification des éoliennes : une éolienne de puissance moyenne qui possède un rotor de 16 m de diamètre ayant un TSR égal à 7 et implantée dans une zone suffisamment ventée sera étudiée dans ce travail.

L'éolienne utilise un profil aérodynamique NACA 4412 et à partir de l'expression de la quantité de mouvement (eq.61), on obtient la puissance capturée par un anneau de diamètre r du disque de la pale :

$$dP = \Omega dC = (4\rho v \Omega^2 r^3 \pi dr) a' (1 - a) J \dots \dots \dots (91)$$

Pour une valeur donnée de, r et dr , la valeur dans la première parenthèse est une constante. Ensuite, pour obtenir le maximum de puissance dans chaque anneau du disque, nous devons optimiser la fonction.

$$G = a' (1 - a) J \dots \dots \dots (92)$$

Pour cela, on prend une valeur de a et on calcule $\tan\beta$. Avec l'équation (88), on calcule ensuite J puis G . La valeur correspondante est ensuite utilisée pour calculer la corde l_c à partir de l'équation suivante :

$$l_c = \frac{a}{1 - a} \frac{8 \pi J r \sin^2 \theta}{Z C_p \cos \theta} \dots \dots \dots (93)$$

Ensuite, la valeur de C_p peut être une valeur supposée, V_r et le nombre de Reynolds sont ensuite calculés :

$$V_r = \sqrt{v_1^2 (1 - a)^2 + \Omega^2 r^2 (a' - 1)^2} \dots \dots \dots (94)$$

$$R_e = \frac{V_r l_c}{\nu} \dots \dots \dots (95)$$

où ν est la viscosité cinématique de l'air.

Après avoir sélectionné le profil aérodynamique et avec le R_e obtenu, on suppose un angle d'attaque α et on détermine C_p et C_T .

Nous pouvons maintenant calculer le coefficient C_x :

$$C_x = C_p \sin \theta - C_T \cos \theta \dots \dots \dots (96)$$

Ce coefficient C_x est dans le plan de rotation et est celui qui entraîne la pale dans son mouvement de rotation. En faisant varier α , on obtient le maximum C_x puis avec la valeur de α correspondant à C_{xmax} , on détermine C_p et on recalcule la corde l_c et le nombre de Reynolds. L'angle β est formé par la corde du profil calculé avec le plan de rotation et avec sa répartition le long de la pale, il convient d'obtenir les angles d'incidence comme suit :

$$\beta = \theta - \alpha \dots \dots \dots (97)$$

Cette valeur de β nous donne l'inclinaison du profil qui est variable avec le rayon puisqu'elle doit accompagner la variation de la vitesse tangentielle de la pale. A partir de cette valeur de β , on obtient le gauchissement de la pale β_0 qui est l'angle qui forme le fil d'un profil donné avec le fil du profil de pointe de la pale.

2.4.7.1 Distribution de la corde et du gauchissement géométrique

Le choix de la distribution de la corde et du gauchissement géométrique est d'une importance primordiale dans la conception de la pale. À l'aide de la théorie de la quantité de mouvement couplée à la théorie de l'élément de pale, il est possible d'évaluer la forme idéale que devrait avoir une pale. Plusieurs auteurs ([7], [8]) proposent des méthodes pour concevoir une pale basées sur cette théorie en posant quelques hypothèses supplémentaires. Par exemple, une des méthodes celle de Manwell et al., néglige la traînée et les pertes en bout de pale ($C_T = 0$ et $J = 1$) [8]. La répartition optimale de l'angle d'incidence du vent sur la pale est alors :

$$\theta = \frac{2}{3} \arctan \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \dots \dots \dots (98)$$

où λ_r est la vitesse spécifique locale de l'élément de pale et est égale à $\frac{r\lambda}{R}$.

α est l'angle d'attaque de conception, c'est-à-dire l'angle d'attaque pour lequel le rapport C_p/C_T est maximal.

L'angle d'attaque de conception peut varier le long de la pale si, par exemple, plusieurs profils différents sont utilisés.

L'angle de gauchissement géométrique d'un élément de pale est défini comme étant l'angle entre la direction de la corde de cet élément et la direction de la corde de l'élément au bout de la pale. Ainsi,

le gauchissement est défini par rapport à la pale elle-même et non par rapport au plan du rotor. La distribution de l'angle de gauchissement est donc :

$$\beta_0 = \beta - \beta_p \dots \dots \dots (99)$$

Où β_p est l'angle de calage nominal (angle de calage de l'élément au bout de la pale) qui permet de définir l'orientation de la pale par rapport au plan de rotation du rotor.

La répartition de la corde peut, quant à elle, être exprimée ainsi :

$$l_c = \frac{8\pi r}{Z C_{p,lc}} (1 - \cos\theta) \dots \dots \dots (100)$$

où $C_{p,lc}$ est le coefficient de portance de conception ($C_{p,lc}(\alpha_{lc})$) et peut varier le long de la pale.

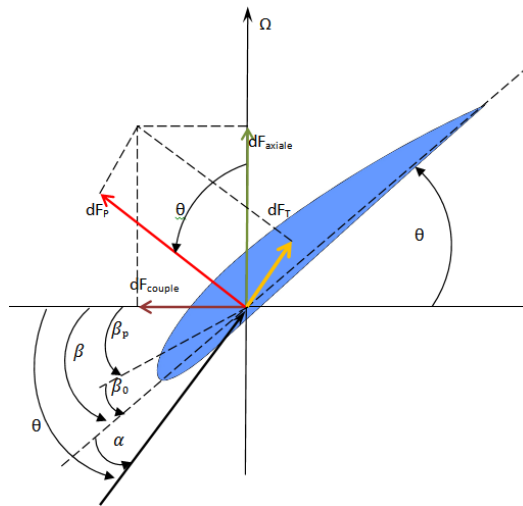


Fig. 2.19 : Géométrie d'une pale pour l'analyse d'éolienne HAWT.

2.4.7.2 Procédure de calcul

Le processus de calcul d'une pale optimale est décrit ci-dessous:

Données initiales sont : r et dr , vitesse du vent v_l , n : fréquence de rotation nominale de la pale, R : rayon maximal de la pale, Z : nombre de pales et valeurs de C_p et C_T du profil sélectionné (voir figure 2.20).

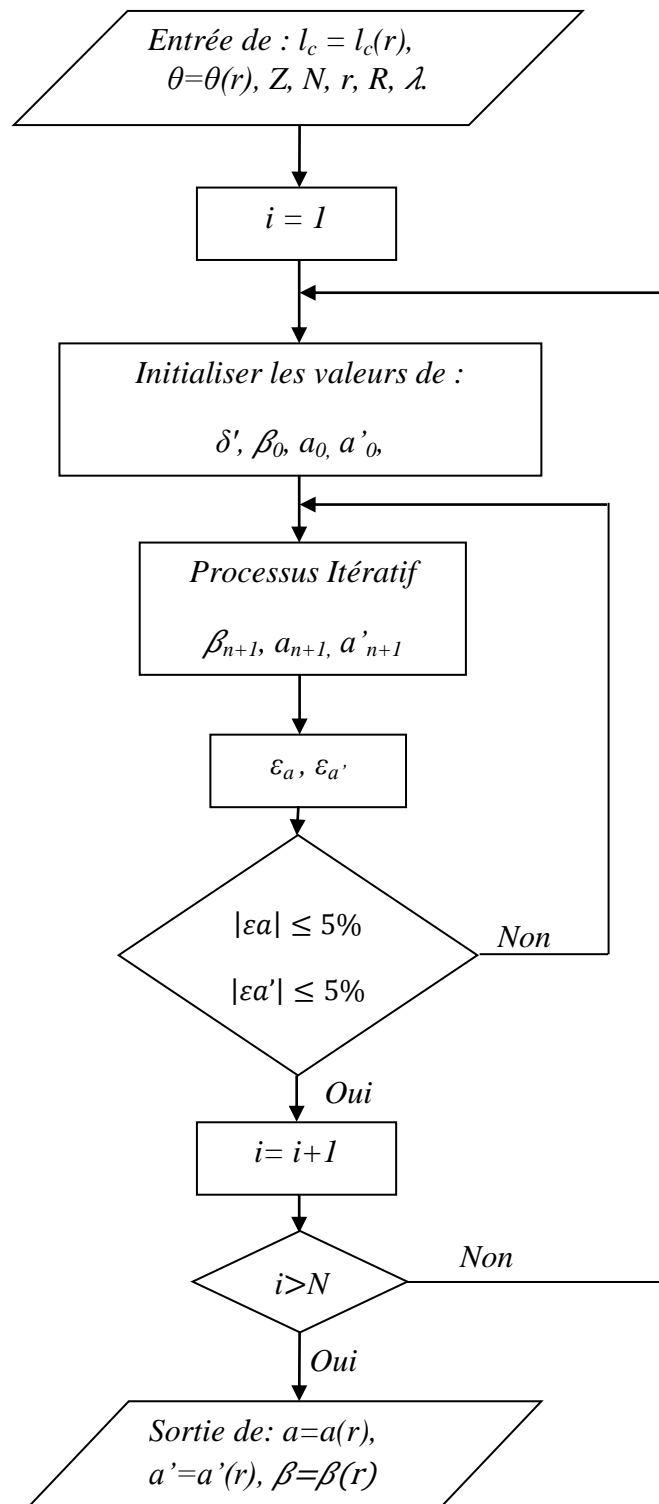


Fig. 2.20 : Algorithme de calcul des paramètres locaux d'une pale.

2.4.7.3 Le cas de notre pale (notre futur échantillon NACA4412 –AR : 0.175)

La solution pour une pale donnée ne peut pas être trouvée directement à partir des équations, mais une solution itérative est nécessaire. Il existe une solution basée sur des suppositions pour a et a' et les itérations suivantes :

Le C_T de traînée est égal à zéro et la correction de perte d'extrémité J est à 1.

Les équations à résoudre se réduisent donc aux équations (88), (89) et (90).

L'algorithme pour une solution itérative est le suivant:

1. Posons a et a'
2. Calculons λr et θ
3. Recherchons C_P et C_T pour les angles d'incidence appropriés.
4. Calculons à nouveau a et a' .

Pour démontrer le fonctionnement de la procédure, les conditions à la pointe ($r = 8\text{m}$) seront d'abord calculées. Parmi ces conditions il y a la solidité du rotor d'une éolienne à une position radiale donnée :

$$\delta' = Z l_c / 2\pi r \dots\dots\dots (101)$$

$$\delta' = (3 \times 0.175) / 2\pi(8)$$

$$\delta' = 0.01045$$

L'équation 98 sera utilisée pour estimer l'angle relatif d'écoulement θ . Les premières suppositions pour a et a' seront également calculées.

$$\text{Si } \lambda = 7 \text{ donc } \beta = 90^\circ - (2/3) \tan^{-1}(1/7) \dots\dots\dots (102)$$

$$\beta = 84.58^\circ \dots\dots\dots (103)$$

Alors, θ est 91.58° et l'incidence α est de 7° , en examinant le graphique du coefficient de portance et de traînée NACA 4412 (voir la figure 2.21, ceci donne un coefficient de portance d'environ 1.2).

Nous pouvons ensuite utiliser nos deux équations pour la première estimation pour a et a' afin de calculer les «premières suppositions» pour ces deux paramètres.

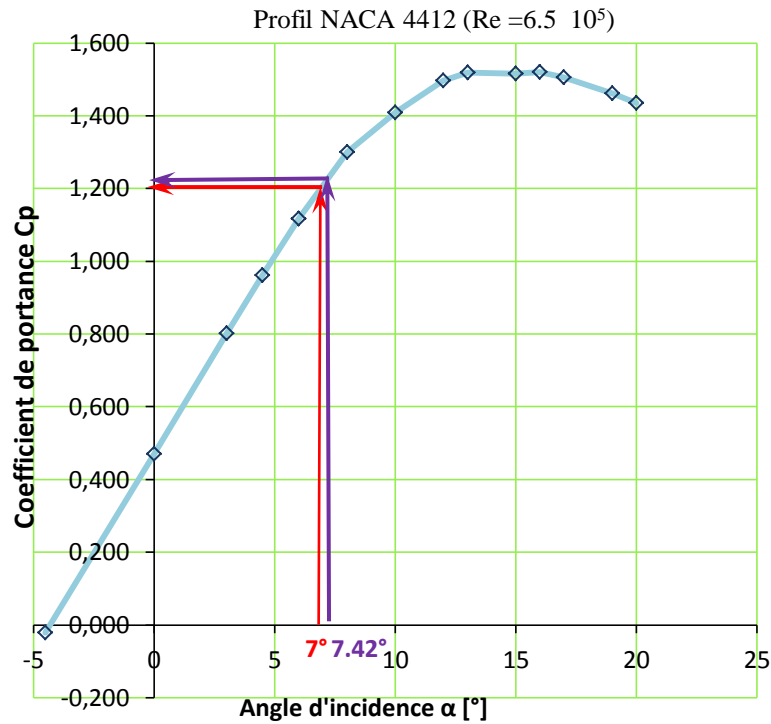


Fig. 2.21: Coefficients de portance obtenus à l'aide du logiciel XFOil.

Alors, la **1^{ère} Itération:**

$$a = \left(1 + \frac{4 \cos^2 \beta}{\delta' C_p \sin \beta}\right)^{-1} \dots \dots \dots (104)$$

⇒ a = 0.25916

Avec, $a' = \frac{1-3a}{4a-1}$

a' = 0.03449

Ces valeurs suffisent comme point de départ dans notre procédure itérative. Après avoir déterminé un point de départ approprié, nous commençons maintenant l'itération proprement dite.

- En utilisant a et a' on peut calculer β comme suit:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_r (1 + a')}{1 - a} \right) \dots \dots \dots (105)$$

⇒ β = 84,16°

- calcul de l'incidence α puis Cp :

α = (θ - β) = 91.58° - 84.16° = 07.42°

Cp = 1.24

- Calcul les nouvelles valeurs de a et a'.

2^{ème} Itération :

En arrivant à la 2^{ème} itération, les résultats de a et a' sont respectivement 0.23141 et 0.03319

On va se contenter des valeurs de la 2^{ème} itération car il y a convergence, et que ça va nous permettre d'étudier la performance de notre profile le NACA 4412 qui est le 17^{ème} élément de la pale dont le $AR=0.571$ ($l_c=0.175m$ et l'envergure est de 0.1 mm), il faut noter que la géométrie de la pointe de la pale est celle de notre échantillon (voir le chapitres 4 et 5). En ce qui concerne le reste de la pale, on peut voir tous les résultats ci-dessous (voir tableau 2.2).

Tableau 2.2 : Résultats obtenus par la méthode itérative.

N° élé.	r	λr	β	θ	a (1ere Ité.)	a' (1ere Ité.)	β corrigée
1	0,20	0,18	36,62	43,62	0,00289	0,00659	10,02
2	0,50	0,44	45,75	52,75	0,00459	0,00631	23,86
3	0,80	0,70	53,33	60,33	0,00700	0,00659	35,36
4	1,42	1,24	64,11	71,11	0,01458	0,00805	51,81
5	2,03	1,78	70,41	77,41	0,02559	0,01002	61,48
6	2,64	2,31	74,38	81,38	0,04000	0,01224	67,66
7	3,25	2,84	77,08	84,08	0,05757	0,01459	71,90
8	3,86	3,38	79,00	86,00	0,07793	0,01702	74,97
9	4,00	3,50	79,37	86,37	0,08303	0,01760	75,56
10	4,47	3,91	80,43	87,43	0,10064	0,01950	77,28
11	5,08	4,44	81,54	88,54	0,12538	0,02202	79,10
12	5,69	4,98	82,42	89,42	0,15165	0,02458	80,55
13	6,30	5,51	83,14	90,14	0,17914	0,02716	81,75
14	6,91	6,04	83,74	90,74	0,20744	0,02976	82,74
15	7,00	6,13	83,82	90,82	0,21185	0,03017	82,88
16	7,50	6,56	84,22	91,22	0,23544	0,03232	83,56
17	8,00	7,00	84,58	91,58	0,25915	0,03449	84,16

N° élé.	r	α	C_p corrigée	a (2iemit.)	a' (2iemit.)	Coeff. de puissance
1	0,20	33,60	-0,3676	0,00056	-0,00558	-0,0008
2	0,50	28,89	0,5376	0,00151	0,00381	0,0026
3	0,80	24,97	1,3847	0,00272	0,00772	0,0123
4	1,42	19,31	1,6190	0,00640	0,00878	0,0333
5	2,03	15,93	1,6520	0,01194	0,01039	0,0619
6	2,64	13,72	1,6232	0,01968	0,01221	0,0971
7	3,25	12,18	1,5774	0,02995	0,01415	0,1382
8	3,86	11,03	1,5292	0,04306	0,01621	0,1841
9	4,00	10,81	1,4834	0,04656	0,01631	0,1922
10	4,47	10,15	1,4414	0,05935	0,01785	0,2295
11	5,08	9,45	1,4035	0,07922	0,02014	0,2825
12	5,69	8,87	1,3694	0,10294	0,02259	0,3378
13	6,30	8,40	1,3388	0,13084	0,02524	0,3947
14	6,91	7,99	1,3114	0,16305	0,02810	0,4512
15	7,00	7,94	1,2868	0,16839	0,02810	0,4553
16	7,50	7,66	1,2648	0,19853	0,03056	0,4985
17	8,00	7,42	1,2451	0,23141	0,03319	0,5377

Tableau 2. 3: Longueur de la corde le long de la pale.

N° élé.	r (m)	r/R	l _c /R	Corde l _c
1	0,20	0,025	0,0566	0,453
2	0,50	0,063	0,0566	0,453
3	0,80	0,100	0,0935	0,748
4	1,42	0,178	0,1398	1,118
5	2,03	0,254	0,1375	1,1
6	2,64	0,330	0,1368	1,094
7	3,25	0,406	0,1315	1,052
8	3,86	0,482	0,1238	0,99
9	4,00	0,500	0,1200	0,96
10	4,47	0,558	0,1165	0,932
11	5,08	0,635	0,0963	0,77
12	5,69	0,711	0,0861	0,689
13	6,30	0,787	0,0775	0,62
14	6,91	0,863	0,0743	0,594
15	7,00	0,875	0,0563	0,45
16	7,50	0,938	0,0375	0,3
17	8,00	1,000	0,0219	0,175

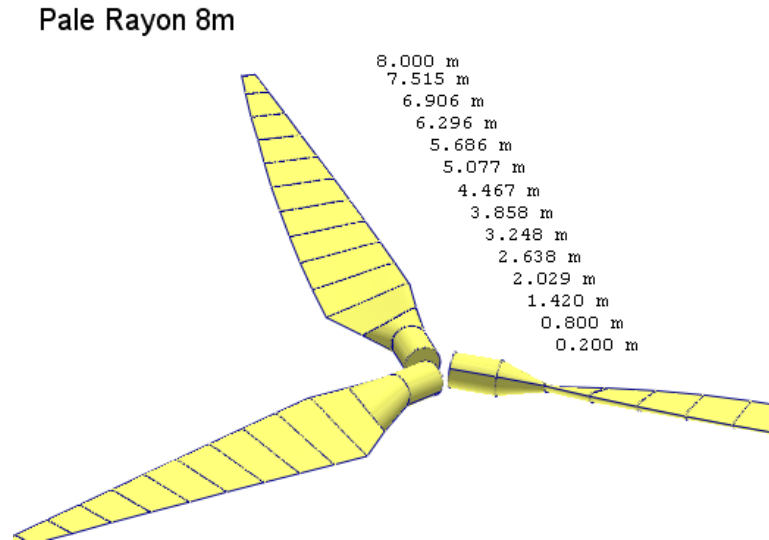


Fig.2.22 : Design 3D d'un rotor de 16m de diamètre.

La figure 2.22, montre un rotor d'un rayon de 8 m conçu sous XFOil. Ce logiciel nous a permis de déterminer quelques caractéristiques de notre éolienne qui seront utilisés dans les chapitres suivants.

2.4.7.4 Influence de la qualité aérodynamique des profils

Comme nous l'avons vu précédemment, le choix des profils aérodynamiques pour les pales d'éoliennes nécessite une analyse minutieuse. Le R_e varie considérablement entre la racine et la pointe de la pale, principalement en raison de la variation de la vitesse tangentielle. Près de la racine où le nombre de Reynolds est faible, on développe généralement une bulle laminaire dont le comportement est très variable. La forme géométrique des profils détermine la portance et la résistance aérodynamique qu'ils produisent. Les coefficients de portance et de trainée C_P et C_T , ainsi que leur rapport C_P / C_T , varient en fonction de l'angle d'attaque. La valeur maximale atteinte, $(C_P / C_T)_{max}$, est l'un des paramètres fondamentaux permettant d'analyser le comportement des pales et détermine le profil le mieux adapté à chaque application.

De nombreuses variables interviennent dans la conception d'une pale d'éolienne et il est souvent nécessaire d'estimer le coefficient de puissance maximal pouvant être atteint pour une configuration donnée. Pour rendre cette estimation possible et basée sur de nombreuses données expérimentales en 1976, Wilson [9 et 10] a proposé l'expression suivante pour calculer la valeur de $C_{per.max}$.

$$C_{per.max} = 0.593 \left[\frac{\lambda Z^{0.67}}{1.48 + (Z^{0.75} - 0.04)\lambda + 0.0025\lambda^2} - \frac{1.92\lambda^2 Z C_T}{1 + 2\lambda Z C_P} \right] \dots \dots \dots (106)$$

Où Z est le nombre de pale de l'éolienne.

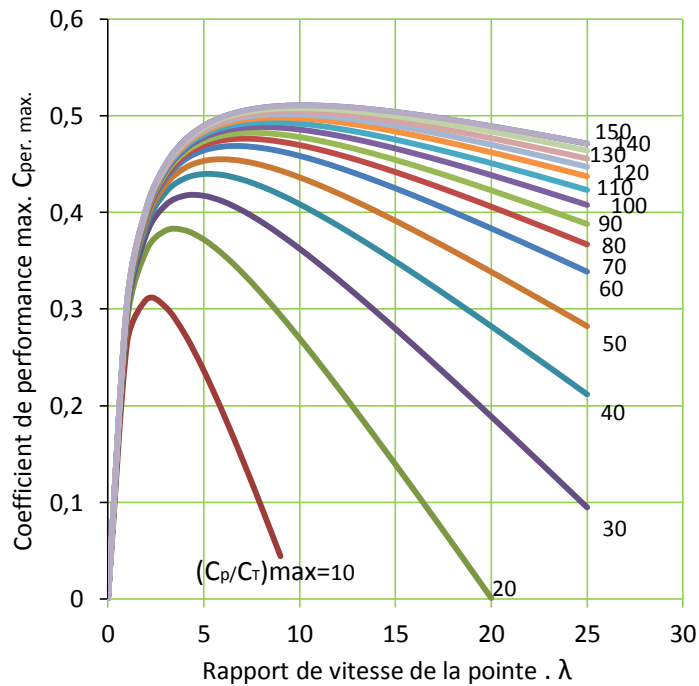


Fig. 2.23 : Influence de la qualité aérodynamique (éolienne 3 pales).

Dans la Figure 2.23, la valeur de $C_{per.max}$ pour une éolienne tripale de puissance moyenne 66.63 KW, c'est-à-dire $Z = 3$ en fonction de λ , a été représentée. Les courbes montrent une chute sévère des performances pour les faibles valeurs de $(C_P/C_T)_{max}$. Choisir une valeur élevée de λ , c'est-à-dire une vitesse de rotation élevée, n'a pas beaucoup de sens s'il n'y a pas une valeur élevée de $(C_P / C_T)_{max}$.

En pratique, la valeur de $(C_P/C_T)_{max}$ est limitée par la qualité de fabrication des pales, car plus la qualité aérodynamique est élevée, plus la qualité de la finition, l'état de la surface, la courbure du profil, le gauchissement, etc. sont élevés.

Par exemple, si pour un profil donné et une valeur de R_e et également pour une certaine qualité de construction, $(C_P/C_T)_{max} = 80$, il serait raisonnable de concevoir une éolienne à trois pales avec une valeur $\lambda = 7$. Alors que pour $(C_P/C_T)_{max} = 40$, λ devrait être approximativement égal à 4.

La valeur de $(C_P/C_T)_{max}$ est un facteur important pour le choisir aussi haut que possible, mais il convient de prendre en compte le fait que les profils avec une $(C_P/C_T)_{max}$ ont beaucoup de courbure et, par conséquent, le moment aérodynamique M sera très importante.

2.4.8 Profils aérodynamiques

Les profils d'aile, développés pour tirer le meilleur parti de l'énergie du flux, ont été conçus selon des méthodes théoriques et expérimentales. Ils sont largement utilisés dans les secteurs les plus divers de l'ingénierie et en particulier dans le domaine de l'aérospatiale, des éoliennes pour la transformation de l'énergie.

Les sections aérodynamiques les plus utilisées, connues sous le nom de profils NACA, sont le résultat de recherches menées par le Comité consultatif national de l'aéronautique (NASA).

2.4.8.1 Désignation des profils NACA.

a. Méthode de combinaison de la ligne médiane et de la distribution d'épaisseur :

La recherche sur les profils NACA a été systématisée en séparant les effets de courbure de la ligne médiane et de la distribution des épaisseurs. En général, une section d'une pale peut être obtenue en combinant la ligne médiane à la distribution d'épaisseur, comme illustré à la figure 2.24.

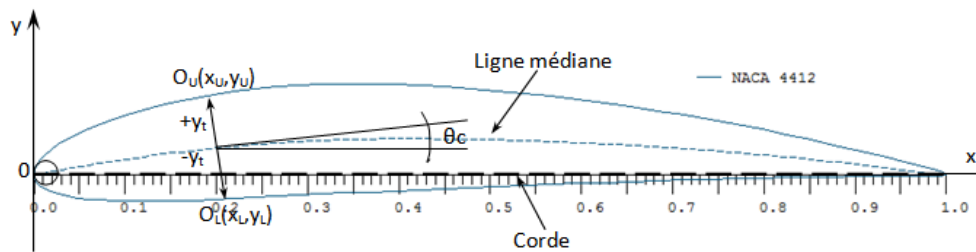


Figure 2.24 : Méthode de combinaison de la ligne médiane et de la distribution d'épaisseur.

Les bords avant et arrière sont définis comme les extrémités avant et arrière de la ligne médiane, respectivement. La corde est définie comme la ligne droite qui relie ces extrémités. L'ordonnée d'une section avec gauchissement est obtenue en projetant la distribution d'épaisseur perpendiculairement à la ligne médiane. Les abscisses, les ordonnées et les pentes de la ligne médiane sont désignées respectivement par x_c , y_c et $\tan \theta_c$.

Si x_U et y_U représentent les coordonnées de tout point de la surface supérieure d'une section d'aile et que y_t est l'ordonnée de la distribution symétrique de l'épaisseur en un point x de la longueur de la corde, conformément à la figure 2.22, les coordonnées de la surface supérieure sont donnés par les relations suivantes:

$$x_U = x - y_t \sin \theta_c \dots \dots \dots (107)$$

$$y_U = y_c + y_t \cos \theta_c \dots \dots \dots (108)$$

De même, les expressions correspondantes pour les coordonnées de la surface inférieure sont:

$$x_L = x + y_t \sin \theta_c \dots \dots \dots (109)$$

$$y_L = y_c - y_t \cos \theta_c \dots \dots \dots (110)$$

2.4.8.2 Section NACA à 4 chiffres.

a. Distribution d'épaisseur.

La distribution d'épaisseur pour une section NACA à 4 chiffres est donnée par l'équation suivante:

$$\pm y_t = \frac{t}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \dots \dots (111)$$

Où : t : épaisseur maximale exprimée en fraction de la corde.

Le rayon du bord d'attaque est :

$$r_t = 1.1019 t^2 \dots \dots \dots (112)$$

b. Ligne médiane

Selon les études sur l'effet de la variation de la cambrure et de la forme de la ligne médiane, celle-ci est exprimée analytiquement par deux arcs paraboliques tangents dans la position maximum de l'ordonné et exprimée par :

$$y_c = \begin{cases} \frac{m}{p^2} (2px - x^2) & , 0 \leq x < m \\ \frac{m}{(1-p)^2} [(1 - 2p) + 2px - x^2] & , m \leq x \leq 1 \end{cases} \dots \dots \dots (113)$$

où

m : hauteur maximale de la ligne médiane exprimée en fraction de la corde.

p : position de la hauteur maximale.

Le calcul du profil NACA 4412 dont la corde est de 175mm a été effectué sous Excel et les résultats sont dans l'Annexe A.

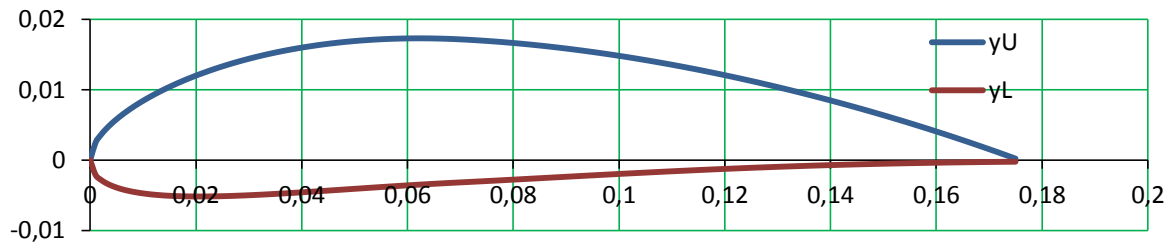


Fig. 2.25 : profil NACA 4412 généré sous Excel.

Afin de réaliser une meilleure confection des échantillons, il fallait dessiner son profil en 3D, alors c'est sous le logiciel Solidworks qu'on a exécuté cette tâche après avoir importé les données du profil à partir d'un fichier Excel figure 2.25. Les figures ci-dessous (figures 2.26 et 2.27) représentent le profil NACA 4412 en 3D avec une corde $l_c=175mm$ et le dessin de définition du profile avec les dimensions à respecter lors de sa réalisation.

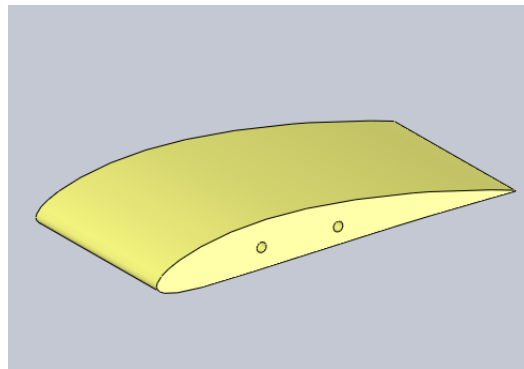


Fig.2.26 : CAD modèle du futur échantillon.

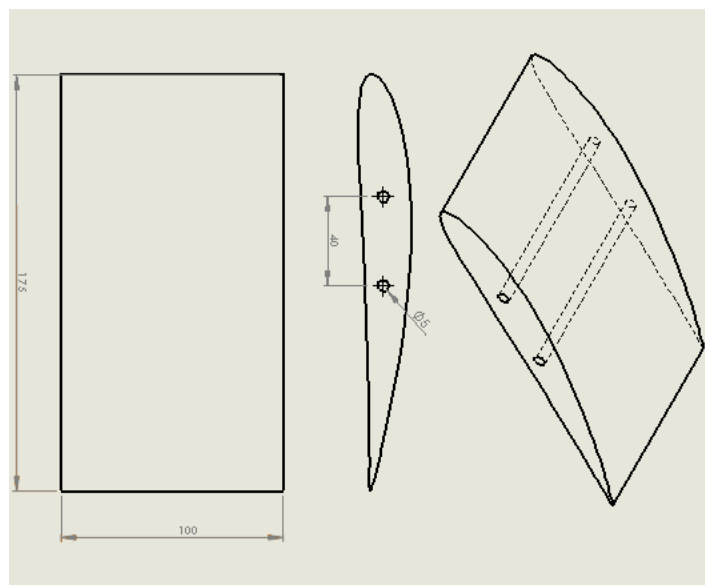


Fig.2.27: Dimensions de l'échantillon.

Bibliographie

- [1] J. D. Anderson, "Fundamentals of Aerodynamics", Third Edition, Ed. Mc Graw Hill, 2001.
- [2] M. Ragheb1, A. M. Ragheb, « Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio », Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, June, 2011, pp. 20-38.
- [3] Betz A., "Die Windmühlen im Lichte Neuerer Forschung", Naturwissenschaften, XV , 1927, pp. 905.
- [4] W.J.M. Rankine, « On the Mechanical Principles of the Action of Propellers », Transactions of the Institution of Naval Architects, 1865,
- [5] R.E. Froude, "On the Part Played in Propulsion by Differences of Fluid Pressure", Trans. Inst. Naval Architects 30, 390, 1889.
- [6] A. C. Hansen and C. P. Butterfield, "Aerodynamics of Horizontal-Axis Wind Turbines", Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 25, Jan. 1993, pp.115-149.
- [7] T. Burton et al. : Wind Energy Handbook. John Wiley and Sons, 2001
- [8] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers "Wind energy explained: Theory, Design and Application", John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [9] R. E. Wilson, P. B. S. Lissaman, S.N. Walker, "Aerodynamic Performance of Wind Turbines", Oregon State Univ., Corvallis, Oregon, 1976.
- [10] R. E. Wilson, P. B. S. Lissaman,, "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines", PB 238595, Rep. N° NSF-RA-N-74-113, NTIS, Springfield, Virginia, 1974.
- [11] I.H. Abbott, A.E. Von Doenhoff, "Theory of Wing Sections (Summary of Airfoil Data)" Dover, New York, 1959.
- [12] D.M. Somers, M.D. Maughmer, "Theoretical Aerodynamic Analyses of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines". NREL/SR-500-33295. June 2003.
- [13] R. M. Pinkerton "Calculated and Measured Distributions over the Midspan Section of the N.A.C.A. 4412 Airfoil", NACA Report No. 563. 1937.
- [14] H. Glauert, "The elements of Aerofoil and Airscrew Theory", Cambridge University Press,1937.
- [15] U. Hütter, "The Aerodynamic Layout of Wing Blades of Wind Turbines with High Tip-speed Ratio", Proc. U. N. Conf. New Sources of Energy, Roma 7, p. 217, 1961.
- [16] Z.L. Mahri "Etude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.0

Chapitre 3

Etude des phénomènes météorologiques de la région

3.1 Introduction

Le vent joue un rôle très important dans le développement de nouvelles énergies, la production d'électricité et son apport climatique à l'environnement. Mais si la vitesse du vent atteint une valeur seuil appelée vitesse de friction seuil et si on est dans une région aride (figure 3.1) alors forcément le vent se charge de particules fines de sable par suspension. Au cours du voyage de ces particules de sable dans l'air il est probable qu'elles rencontrent des structures ayant des hauteurs plus ou moins importantes. Parmi ces structures il y a les tours, les nacelles et les pales d'éoliennes. Afin d'étudier de façon profonde les effets de particules de sables sur le niveau de dégradation des bords d'attaque des pales, il fallait chercher en amont le transport, la source, la distribution granulométrique, la vitesse lors de suspension et la concentration de cet agent environnemental agressif dans l'air pour les pales d'éolienne. Pour se faire, il faut tout d'abord étudier l'érosion éolienne dans la région et connaître tous les phénomènes et paramètres météorologique liés au déclenchement de sable.



Fig.3.1 : Eoliennes implantées dans le lac Turkana [1].

3.2 Phénomènes et paramètres météorologiques liés au déclenchement de sable

3.2.1 Lithométéores

Le terme populaire « vent de sable » englobe en réalité toute une série de phénomènes climatiques plus connus dans la littérature météorologique sous le nom « lithométéores ».

Le lithométéore est un terme composé de Litho : du grec *lithos* : « pierre » et Météore : du grec *meteôros*, « élevé dans les airs ».

Un lithométéore, en anglais “*lithometeor*”, est défini par l’OMM [2] comme un « *météore consistant en un ensemble de particules dont la plupart sont solides et non aqueuses. Ces particules sont plus ou moins en suspension dans l’atmosphère, ou soulevées du sol par le vent* ».

Deux catégories de lithométéores sont prises en compte suivant qu’ils sont en suspension dans l’atmosphère ou directement mobilisés par le vent :

- Les lithométéores qui ont plus ou moins le caractère de suspension dans l’atmosphère sont : la brume sèche, la brume de poussière, la brume de sable et la fumée. Ces lithométéores sont constitués par de très petites particules de poussières ou encore par des particules provenant de combustions diverses.
- Les lithométéores directement mobilisés par le vent sont : chasse-poussière, chasse sable, tempête de poussière, tempête de sable, tourbillon de poussière et tourbillon de sable.

3.2.2 La brume sèche

Une brume sèche, en anglais “*haze*”, est définie comme suit : « *Suspension dans l’atmosphère de particules sèches, extrêmement petites, invisibles à l’œil nu et suffisamment nombreuses pour donner à l’air un aspect d’opalescence* » [3].

L’OMM, dans le code du temps présent [3], préconise également l’utilisation du terme brume sèche seulement lorsque ce lithométéore réduit la visibilité à moins de trois kilomètres, soit $VV < 300$ dam, et qu’il n’y a pas de dépôt visible de poussières en sa présence.

Les brumes sèches correspondent au nombre « 05 » dans le code du temps présent [3] que l’on retrouve dans les carnets d’observations. Sur les cartes météorologiques ainsi que dans les Tableaux Climatiques Mensuels (TCM), on attribue le symbole (∞) aux brumes sèches (figure 3.2).

3.2.3 La brume de sable

La brume de sable, en anglais “*sand haze*”, est définie comme suit : « *Suspension dans l’atmosphère de poussières ou de petites particules de sable qui ont été soulevées du sol antérieurement au moment de l’observation par une tempête de poussière ou une tempête de sable* » [2]. Le code du temps présent [3] complète cette caractérisation en soulignant que la brume de sable peut être distinguée de la brume sèche en ce qu’elle est susceptible de produire, sur une surface exposée, un dépôt visible. On en déduit dès lors que l’utilisation du terme brume de sable est requise seulement lorsque ce lithomètre réduit la visibilité à moins de trois kilomètres, soit $V_v < 300$ dam.

Les brumes de sable correspondent au nombre « 06 » dans le code du temps présent [3] que l’on retrouve dans les carnets d’observations. Sur les cartes météorologiques ainsi que dans les Tableaux Climatologiques Mensuels (TCM), on attribue le symbole (S) aux brumes de sable.




lithomètres	consistant en une suspension de particules dans l’atmosphère	brume sèche	∞
		brume de sable	S
		fumée	
	consistant en ensembles de particules soulevées par le vent	chasse-poussière ou chasse-sable	\$
		chasse-poussière basse ou chasse-sable basse	\$↓
		chasse-poussière élevée ou chasse-sable élevée	\$↑
		tempête de poussière ou tempête de sable	
		mur de poussière ou mur de sable	

Fig. 3.2 : Symboles des phénomènes réduisant la visibilité près du sol [2].

3.2.4 Le chasse-sable ou chasse-poussière

La chasse-sable ou chasse-poussière, en anglais “*drifting or blowing dust or sand*”, est définie comme suit : « *Ensemble de particules de sable ou de poussière soulevées du sol, au lieu de l’observation ou dans son voisinage, à des hauteurs faibles ou modérées, par un vent suffisamment fort et turbulent* » [2].

La chasse-poussière et la chasse-sable est divisée en deux classes :

- Chasse-poussière ou chasse-sable basse : « *Poussière ou sable, soulevés par le vent à faible hauteur au-dessus du sol. La visibilité n’est pas sensiblement réduite au niveau de l’œil de l’observateur (1m80)* » [2].
- Chasse-poussière ou chasse-sable élevée : « *Poussière ou sable, soulevés par le vent jusqu’à des hauteurs assez importantes au-dessus du sol. La visibilité horizontale au niveau de l’œil de l’observateur est réduite de façon sensible* » [2].

La chasse-sable et chasse-poussière correspond au nombre « 07 » dans le code du temps présent [3] que l’on retrouve dans les carnets d’observations. Sur les cartes météorologiques ainsi que dans les Tableaux Climatiques Mensuels (TCM), on attribue le symbole (\$) aux chasse-sable et chasse-poussière.

3.2.5 La tempête de poussière ou tempête de sable

Les tempêtes de poussières ou tempêtes de sable, en anglais “*dust storm ou sand storm*”, sont définies comme étant un « *ensemble de particules de poussière ou de sable puissamment soulevées du sol par un vent fort et turbulent, jusqu’à de grandes hauteurs* » [2]. A noter que la majorité des auteurs français utilisent, encore maintenant, plutôt le terme “Vent de sable” pour parler de tempête de poussière ou tempête de sable [4].

Le mur de poussière ou de sable est également parfois mentionné et caractérise la « *partie antérieure d’une tempête de poussière ou d’une tempête de sable, qui présente l’aspect d’une gigantesque muraille qui progresse plus ou moins rapidement* » [5].



Fig. 3.3 : Photo d'un mur de vent de sable –Laghouat (28 Août 2013).

Les tempêtes de poussières ou tempêtes de sable correspondent aux nombres « 09 et 30 à 36 » suivant leur violence et leur état de maturité dans le code du temps présent [3] que l'on retrouve dans les carnets d'observations. Sur les cartes météorologiques ainsi que dans les Tableaux Climatiques Mensuels (TCM), on attribue le symbole aux tempêtes.

3.3 Les mécanismes de génération des aérosols minéraux

A la surface du sol il existe des « particules » non liées susceptibles de se mouvoir sous l'action du vent. Ces particules ont des diamètres compris entre une vingtaine de micromètres et un millier de micromètres [11]. Pour les particules de diamètre $> 500 \mu\text{m}$, les forces de gravité qui les maintiennent en surface sont très supérieures aux forces d'extraction du vent. De ce fait elles peuvent au mieux rouler (creeping) lorsque les vents sont très forts. Ce sont les particules ou plutôt des agrégats de particules, qui ont une taille entre $20 \mu\text{m}$ et $500 \mu\text{m}$ qui peuvent être soulevées au-dessus du sol sous l'effet de la contrainte exercée par l'écoulement aérodynamique. Les mesures granulométriques effectuées après dispersion complète des échantillons de sols en phase liquide montrent qu'il existe aussi dans le sol une fraction plus fine constituée de particules de diamètre inférieur à $20 \mu\text{m}$ (PM 20). Celle-ci, ne se trouve pas à l'état libre dans le sol. En effet, ces particules établissent des liaisons électriques et s'agglomèrent entre elles et/ou sur des grains de sable pour former des agrégats relativement grossiers. D'une manière générale, le sol est un puits de quantité de mouvement pour l'écoulement de l'air puisqu'il exerce une force de freinage qui ralentit les basses couches de l'atmosphère. La contrainte de cisaillement τ exercée par l'air sur le sol (et réciproquement) s'exprime par :

$$\tau = \rho \sqrt{(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2} \dots \dots \dots (1)$$

Où u' , v' et w' sont respectivement les composantes turbulentes horizontales (u' et v') et verticale (w') du vecteur vitesse du vent et ρ , la densité volumique de l'air.

Si la direction du vent est choisie parallèle à l'axe X, le terme $(v'w')^2$ devient nul, on se retrouve alors avec une expression simplifiée de la contrainte τ de la forme :

$$\tau = \rho \overline{|u'w'|} \dots \dots \dots (2)$$

De manière tout à fait équivalente, on peut exprimer la contrainte τ au moyen du carré de la vitesse dite de 'friction', u^* :

$$\tau = \rho \cdot u^{*2} \dots \dots \dots (3)$$

En pratique la valeur de cette vitesse de friction peut être obtenue par application de la théorie de Monin-Obikhov qui exprime la variation avec l'altitude (z) de la composante horizontale du vent moyen dans la couche limite de surface selon :

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right) \right] \dots \dots \dots (4)$$

Dans cette expression, k est la constante de von Karman (= 0.4), Z_0 la hauteur de rugosité aérodynamique correspondant à la hauteur théorique au-dessus de la surface où le vent s'annule et L la longueur de Monin-Obikov caractéristique de la stabilité thermique de l'atmosphère.

La fonction $\psi_m(z/L)$ est un terme corrigeant l'équation de von Karman applicable à la neutralité thermique. Elle prend en compte les modifications de la turbulence résultant de la stratification thermique de la couche limite de surface (gradient de température potentiel non nul). Cet indice de stabilité peut être positif (conditions stables), négatif (conditions instables) ou nul (à la neutralité).

Au-dessus d'une certaine valeur seuil de la contrainte, et donc d'une valeur seuil de la vitesse de friction (u^*), les particules libres au niveau du sol se mettent en mouvement sous l'action du vent. Le mouvement, appelé mouvement de 'saltation', qui en résulte est essentiellement horizontal. Il mobilise des particules relativement grossières (jusqu'à environ 500 μm de diamètre) pouvant être soulevées jusqu'à plusieurs mètres au-dessus du sol, bien que l'essentiel de la masse soit transportée dans les premiers décimètres. Du fait de leur masse importante, ces particules de taille sableuse retombent très vite à la fin de leur trajectoire balistique. En impactant la surface du sol, les grains de

sable ou les agrégats libèrent les particules plus fines qui s'étaient agrégées à eux ; c'est ce qu'on appelle le 'sandblasting'. Les particules fines ainsi libérées sont suffisamment légères pour être entraînées dans un mouvement ascendant par la turbulence, ce qui génère un flux vertical de particules fines. Ces particules peuvent parcourir des milliers de kilomètres avant de se redéposer. A côté des particules fines, des particules de tailles intermédiaires avec des diamètres variant entre 20 μm et 100 μm peuvent également être incorporées de manière plus fugace dans le flux vertical de particules. Cet entrainement correspond au phénomène dit de la 'saltation modifiée'. Toutefois, selon les estimations des modèles basés sur la théorie du dépôt, les particules de cette catégorie parcourent au plus quelques dizaines de kilomètres avant de se redéposer (Figure 3.4). L'étude de leur redistribution ne présente donc d'intérêt qu'à une échelle locale, ce qui nous conduit à s'intéresser sur ce dernier phénomène appelé saltation modifiée.

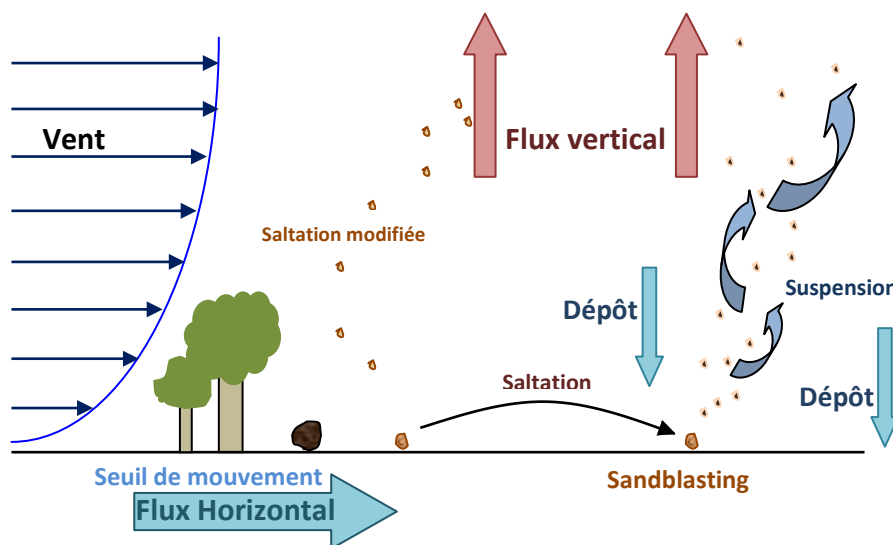


Fig.3.4: Mode de production des particules en suspension dans l'atmosphère.

Les particules produites par le sandblasting ($D_p < 80 \mu\text{m}$) sont directement entraînées en suspensions et constituent ainsi l'essentiel du flux vertical d'aérosols désertiques.

Finalement, en analysant le mode de production et de dépôt des particules désertiques on peut distinguer trois catégories de particules :

- Les particules fines ($D_p \leq 20 \mu\text{m}$)
- Les particules de tailles intermédiaires ($20 \mu\text{m} < D_p \leq 100 \mu\text{m}$)
- Les particules grossières ($D_p > 100 \mu\text{m}$).

3.4. Modélisation des processus d'émission

3.4.1 Le flux horizontal de saltation

Les grains de sable sont maintenus en surface par leur poids et, selon Chepil et Woodruff [7], seule la fraction inférieure à 840 μm serait mobilisable par la contrainte exercée par le vent à la surface. En fait, cette valeur est seulement indicative et des grains de taille plus importante peuvent être mis en mouvement lors d'événements érosifs violents. Quoi qu'il en soit, cette mobilisation est un phénomène à seuil qui ne peut avoir lieu que lorsque la vitesse de friction dépasse une certaine intensité. Une expression théorique de la vitesse de friction seuil établie (u_t^*) par Bagnold [8] montre qu'elle dépend de la taille des grains mobilisables selon :

$$u_t^* = A \left(\frac{\rho_p g D_p}{\rho_a} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (5)$$

Dans cette expression, A est un coefficient dépendant des caractéristiques aérodynamiques de la particule, D_p est le diamètre de la particule, ρ_p est la masse volumique de la particule et ρ_a celle de l'air, g accélérations de pesanteur.

Toutefois, cette expression ne prend en compte que le poids des grains libres présents en surface. Or les résultats expérimentaux de Bagnold lui-même [8] et Chepil [9], confirmaient bien cette dépendance à la taille mais montraient dans le même temps une augmentation de u_t^* lorsque la taille des particules devient très petite. La conséquence de ces observations est qu'il existe donc une gamme de tailles de particules optimale mobilisables par le vent, celle pour laquelle u_t^* est minimale (autour de 60-80 μm). Plus tard, Iversen et al. [10] ont montré que ce sont les forces de cohésion inter-particulaires qui, devenant plus importantes au fur et à mesure que décroît la taille des particules, expliquaient ce relèvement des seuils de mobilisation pour la fraction fine du sol. A partir de mesures en soufflerie effectuées pour des particules de tailles et de densités différentes, Iversen et White [11] ont proposé une expression semi-empirique qui prédit la vitesse de friction seuil en saltation en prenant en compte ces forces de cohésion inter-particulaires.

Par ailleurs, la présence sur le sol d'éléments trop gros pour être érodés (éléments non érodables) affecte le seuil d'érosion en protégeant une partie de la surface qui devient inaccessible au vent. Dans le même temps, ces éléments non érodables consomment une partie de la contrainte exercée par le vent au niveau du sol qui ne sera donc plus disponible pour mettre les grains en mouvement. On parle dans ce cas d'une partition de la contrainte entre les grains mobilisables à la surface et les éléments de rugosité. Plusieurs modèles ont permis de prendre en compte cet effet de partition dans le calcul de la vitesse de friction seuil ([12], [13] et [14]). L'humidité de la surface du sol peut aussi

augmenter les seuils d'érosion en favorisant le développement de forces capillaires entre les particules [15].

De la même manière, la formation de croûtes physiques et biologiques dans certains cas [17], peut réduire considérablement la saltation en agrégeant des grains qui étaient initialement à l'état libre à la surface du sol.

Il résulte des considérations précédentes que deux paramètres clés caractérisent une surface érodable :

- Le premier est la distribution granulométrique des particules libres en surface. Cette distribution joue un rôle primordial pour :

- a) la définition du seuil d'érosion ;
- b) la quantification de l'intensité des émissions.

- la rugosité de surface qui conditionne la valeur de la vitesse friction agissant sur les particules mobilisables à la surface.

A partir de ses études sur les dunes de sable, Bagnold est le premier à avoir proposé de quantifier le mouvement des grains de sable au moyen du flux horizontal de saltation (F_h) [8]. Celui-ci est défini comme la masse de particules traversant chaque seconde une surface verticale, rectangulaire, de largeur unité, de hauteur infinie et positionnée perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Ce flux s'exprime donc en $g\ cm^{-1}\ s^{-1}$. L'expression proposée par Bagnold montre que le flux horizontal est proportionnel à la vitesse de friction en suivant une fonction puissance d'ordre 3, à partir du seuil d'érosion. De nombreux auteurs ont par la suite proposé des expressions de F_h qui dans tous les cas tendent, aux fortes valeurs de la vitesse de friction, vers une fonction puissance d'ordre 3 de u^* [18] et [19]. La limite de ces modèles réside dans le fait que les paramètres de l'état de surface tels que la rugosité n'y sont pris en compte qu'implicitement (au travers de la valeur de u^*), rendant difficile leur transposition à des conditions expérimentales différentes. Pour pallier cet inconvénient, Marticorena et Bergametti ont modélisé le flux horizontal de saltation en prenant en compte à la fois la distribution en taille des grains mobilisables et la partition de l'énergie entre ces grains et les éléments de rugosité en utilisant la hauteur de rugosité aérodynamique z_0 [13]. Ainsi l'expression modélisée du flux horizontal de particules en saltation, au-dessus d'une surface hétérogène composée de particules de tailles différentes s'écrit :

$$F_h(D_p) = \frac{\rho_a}{g u^{*3}} (1 - R(D_p))(1 + R(D_p))^2 \dots \dots \dots (6)$$

$$R(D_p) = u_t^* \frac{D_p}{u^*} \dots \dots \dots (7)$$

Shao et al. (1996) et Shao (2001) ont également modélisé le flux de saltation en utilisant une paramétrisation du seuil d'érosion dérivée de considérations théoriques sur la partition de la contrainte entre les particules libres et les éléments de rugosité [11]. Cette partition est basée sur la densité de rugosité ou couverture latérale et sur le ratio entre le coefficient de partition pour des éléments de rugosité isolés et une surface nue [12]. La densité de rugosité correspond à la surface occupée par les éléments de rugosité par unité de surface horizontale.

3.4.2 Le flux vertical de particules fines (émission)

Le processus de sandblasting est une conséquence directe de la saltation. Lorsque les particules en saltation retombent sur le sol à la fin de leur trajectoire, une partie de leur énergie cinétique est utilisée pour libérer les fines particules au sol ainsi que celles agrégées sur les grains eux-mêmes [20], [21] et [19]. L'étude du processus de sandblasting est très difficile à effectuer indépendamment de celle de la saltation car les paramètres contrôlant la saltation jouent également un rôle dans le sandblasting. Pour contourner cette difficulté des études en soufflerie ont été menées. Elles ont consisté à séparer artificiellement la saltation du sandblasting en utilisant des grains de sable pour bombarder une cible d'agrégats d'argiles [19] et [22]. Alfaro et al. ont pu étudier en soufflerie la distribution granulométrique de l'aérosol produit dans différentes conditions de vent. Ces expériences répétées avec des sols naturels ont confirmé que la distribution du flux de particules fines émises était une combinaison de trois populations de particules fines et que la proportion des plus fines augmentait avec la vitesse du vent. Ces observations ont été interprétées de la manière suivante : l'énergie nécessaire pour libérer les particules très fines initialement incorporées dans les agrégats de dimension plus importante était d'autant plus forte que les particules étaient petites. A partir de cette théorie, un modèle de sandblasting a été proposé. Il repose sur un schéma de partition de l'énergie cinétique des grains en saltation entre les 3 modes de particules fines libérables et sur une estimation expérimentale des énergies de cohésion des particules selon leur taille [22].

Plus précisément, la version du modèle de production de poussière (Dust Production Model, ou DPM) proposé par Alfaro et Gomes en 2001 considère que les particules libérables appartiennent à trois populations de particules à distribution de taille log normale [14].

Par ailleurs, le flux d'énergie cinétique $dF_{cin}(D_p)$ des agrégats en saltation est proportionnel au flux horizontal correspondant $dF_h(D_p)$ selon l'expression ([24] ; [22]) :

$$dF_{cin}(D_p) = \xi dF_h(D_p) \dots \dots \dots (8)$$

Avec $\xi = 16300 \text{ cm s}^{-2}$

Si on appelle $p_i(D_p)$ la proportion d'énergie cinétique apportée par les grains en saltation de taille D_p , la fraction $dF_{\text{cin}}(D_p)$ qui est capable de libérer des particules du $i^{\text{ème}}$ mode est $p_i(D_p)\xi dF_h(D_p)$. Par conséquent le flux en nombre, $dN_i(D_p)$ pour des particules supposées sphériques ou le flux en masse dF_i du $i^{\text{ème}}$ mode libéré par impact des agrégats sur le sol est donné par :

$$dN_i(D_p) = \frac{\xi dF_h(D_p) p_i(D_p)}{e_i} \dots \dots \dots (9)$$

$$dF_i(D_p) = \frac{\left(\frac{\pi}{6}\right) \rho_p \xi dF_h(D_p) p_i(D_p) d_i^3}{e_i} \dots \dots \dots (10)$$

L'efficacité de sandblasting est donc par définition

$$\alpha_i(D_p) = \left(\frac{\pi}{6}\right) \rho_p \xi \left[\frac{p_i(D_p) d_i^3}{e_i} \right] \dots \dots \dots (11)$$

Le flux vertical résultant de la saltation se note alors :

$$dF_{v,i}(D_p) = \alpha_i(D_p) dF_h(D_p) \dots \dots \dots (12)$$

La confrontation du modèle de production de poussière (le DPM) à des mesures de terrain a déjà fait l'objet de travaux expérimentaux. En effet, le DPM qui a été développé essentiellement à partir de mesures en soufflerie (pour le sanblasting) voire à partir de considérations théoriques (pour la saltation) devait être confronté à des mesures en conditions naturelles. Deux campagnes de mesures dédiées entre autres à la validation du DPM ont été effectuées au nord-est de l'Espagne et dans le Sahel Nigérien. Il s'agit des campagnes WELSONS « Wind Erosion and Loss of Soil Nutrients in semi-aride Spain » [43] et PROSE « Programme Soil and Erosion », respectivement. Ces deux campagnes de mesures réalisées en conditions naturelles ont permis, en divisant les énergies de cohésion du DPM par 3 [43], de valider ce dernier pour la masse totale.

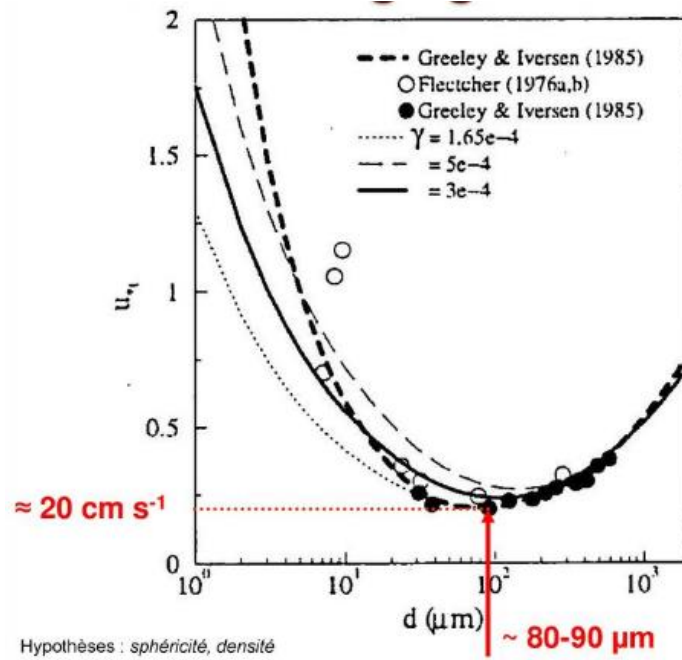


Fig.3.5 : Comparaison d'une nouvelle expression de la vitesse de friction seuil à ceux de Greeley et de Fletcher [25].

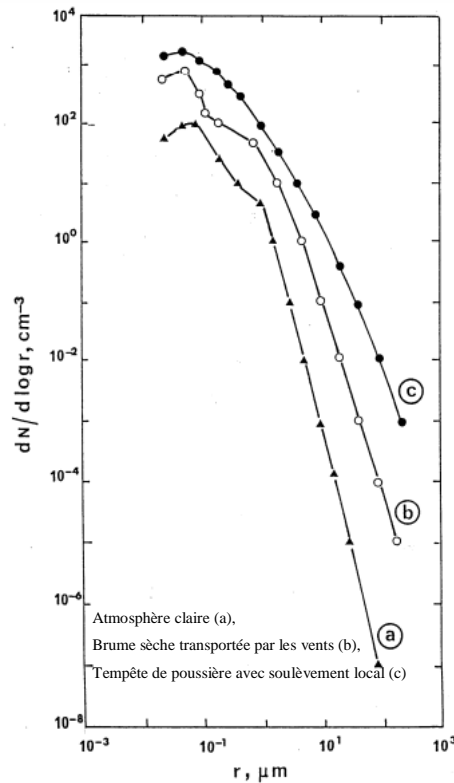


Fig.3.6: Spectres de concentration en nombre de l'aérosol saharien pour différentes situations [26].

La figure 3.6 d'après D'Almeida [26], compare les concentrations en nombre d'une tempête de poussière - avec génération locale, d'une brume sèche transportée par les vents - sans génération

locale, et du fond d'aérosol résiduel. Ces trois cas correspondent dans cet ordre à des aérosols de plus en plus anciens pour lesquels on observe effectivement une diminution relative beaucoup plus importante de la concentration en grosses particules que de celle en particules submicroniques.

La distribution en nombre $dN/d\log r$, ou $N(r)$ représente le nombre de particules par unité de volume d'atmosphère, cumulé entre 0 et r (concentration volumique en nombre),

- la distribution en surface ou représentation de Whitby, $dS/d\log r$, où $S(r)$ représente la section géométrique des particules par unité de volume d'atmosphère, cumulée entre 0 et r ,

- les distributions en volume $dV/d\log r$ et en masse $dM/d\log r$, où $V(r)$ et $M(r)$ sont respectivement le volume et la masse d'aérosol par unité de volume d'atmosphère, cumulés entre 0 et r . Si la distribution en nombre est la plus commune et la mieux appropriée du point de vue de la microphysique des particules, la représentation de Whitby [28] apparaît plus pertinente pour apprécier l'impact radiatif de l'aérosol. Les distributions en volume et en masse sont évidemment intéressantes pour la détermination des quantités de matière en suspension et des flux en masse. Ces diverses représentations sont reliées entre elles par les relations simples suivantes :

$$\frac{dS}{d\log r} = \pi r^2 n \dots \dots \dots (13)$$

$$\frac{dV}{d\log r} = \frac{4}{3} \pi r^3 n \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{dM}{d\log r} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 n \dots \dots \dots (15)$$

où $n = dN/d\log r$, et où ρ est la masse volumique du matériau constitutif de l'aérosol supposé homogène.

La représentation synthétique d'une granulométrie donnée est le plus souvent réalisée par ajustement à l'aide d'une superposition de distributions log normales (ou modes), comme préconisé par Davies [28]:

$$\frac{dN}{d\log r} = A \frac{N_{0i}}{\log \sigma_i} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\log \left(\frac{r}{r_m} \right)}{\log \sigma_i} \right]^2 \right\} \dots \dots \dots (16)$$

avec : $A = 0,434 (2\pi)^{-1/2}$,

p : nombre de modes,

N_{0i} : concentration volumique en nombre pour le mode i ,

r_m, σ_i : respectivement rayon médian et écart-type géométrique du mode i .

Ces distributions log normales ont été largement utilisées pour la définition des divers types ou modèles d'aérosol (rapport WCP-55, 1983; MIM - Aerosol Model de D'Almeida).

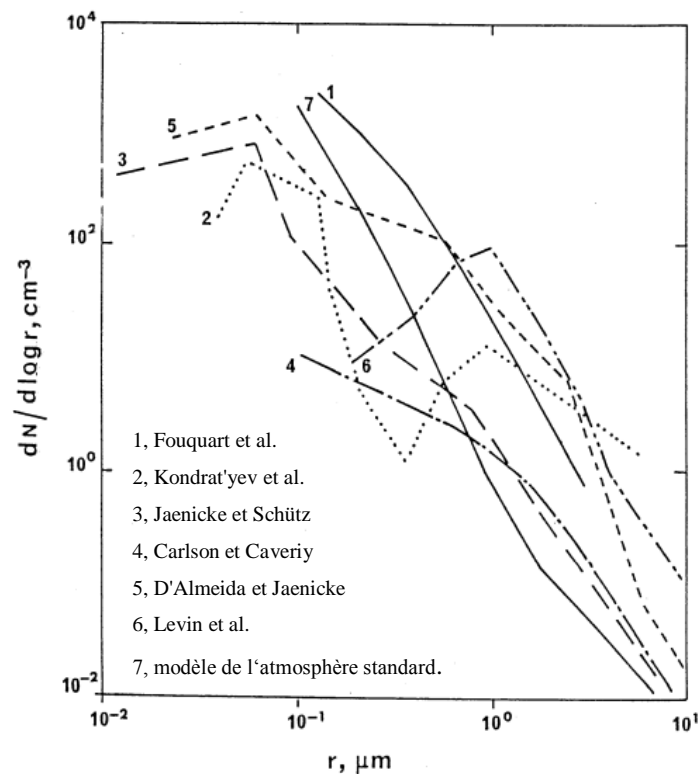


Fig.3.7 : Distributions granulométriques d'aérosol saharien comparées d'après [29].

La figure 7 extraite de [30] permet la comparaison de distributions d'aérosol saharien déterminées par divers auteurs. Les différences de granulométrie sont mises en évidence par les écarts entre les pentes des courbes. On peut interpréter les distributions à faible pente moyenne comme riches en grosses particules, c'est le cas de la courbe 4 de Carlson et Caverly [30]. Les distributions à forte pente moyenne sont au contraire riches en petites particules : un exemple est la courbe 1 issue de la campagne ECLATS (décrite dans Druilhet et Durand, [31]). Les écarts observés doivent s'expliquer à partir des deux considérations suivantes : (i) des écarts sont induits artificiellement par les divers procédés de mesure utilisés; (ii) l'existence de différences objectives résulte de la variabilité des caractéristiques des échantillons étudiés, en rapport avec la diversité des situations géographiques et météorologiques rencontrées.

3.5 Transport par le vent

L'air est un fluide transporteur de faible viscosité; sa charge et sa compétence seront faible: les particules transportées ont des tailles de quelques $1/10^{\text{ème}}$ de mm à quelques cm par vent violent. Le choc des grains entre eux est plus violent que dans un transport aquatique (l'eau amortit les chocs). Les grains présentent des traces de choc en "V" et prennent une surface dépolie. L'érosion et le transport éolien prennent une grande importance dans le cas de sédiment meuble, non protégé par la végétation, ni rendu plus cohérent par une imprégnation d'eau. Ces conditions sont rencontrées dans les régions désertiques où la désagrégation mécanique produit des matériaux de toute taille; les particules fines sont balayées (déflation), les éléments plus grossiers restent sur place et forment les surfaces caillouteuses, des regs. Les particules de l'ordre de 0,1 à 1 mm transportées par le vent érodent les roches qu'elles rencontrent: cette action de "sablage" est visible aussi bien sur des panneaux entiers de roches (falaises, monument comme le Sphinx du Caire) que sur les cailloux au sol qui prennent un aspect dépoli et présentent des surfaces planes (galets à facettes ou "dreikanter"). Elles peuvent être accumulées plus loin en dunes. Quand les poussières sont entraînées à haute altitude, elles sont disséminées très loin: les poussières sahariennes, de quelques dizaines de microns, tombent parfois sur la France et colorent la pluie en rouge. Le diagramme de Hjulström (figure 3.8) illustre le comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant.

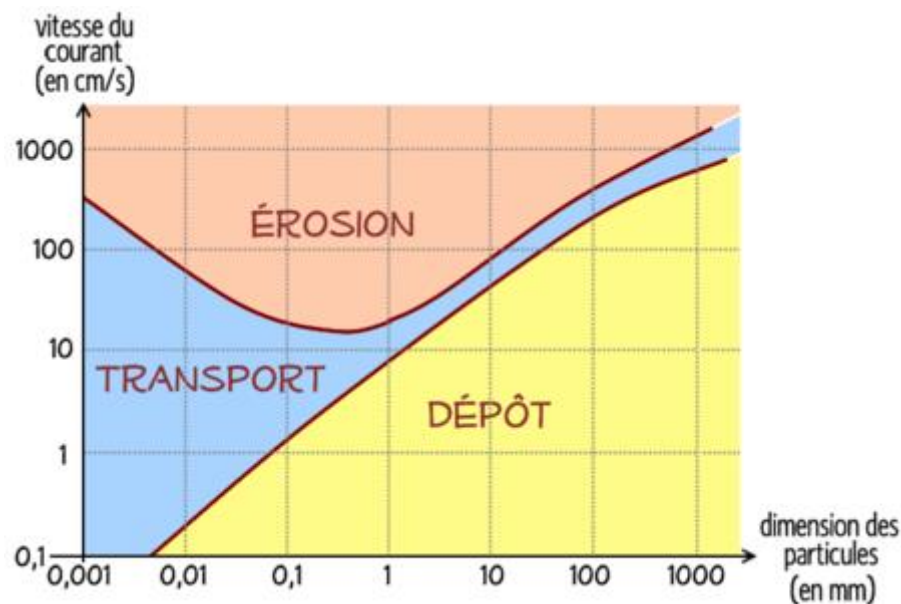


Fig.3.8: Diagramme de Hjulström : Transport des éléments solides.

3.5.1 Distributions d'aérosols minéraux et des sols du Sahara

Des échantillons d'aérosol et de sol du Sahara ont été étudiés. Une méthode directe est utilisée pour déterminer la distribution complète de la taille des minéraux dans les aérosols (composant insoluble dans le xylène) et dans les sols (composant insoluble dans l'eau) couvrant une plage de tailles allant de 10 à 1000 μm , en utilisant un diffractomètre et le tamisage.

Des échantillons ont été prélevés sur les 5 premiers cm du sol de la zone d'étude en utilisant une cuillère ordinaire. Chaque échantillon représentait environ 0.5 kg. Sur chaque échantillon, des portions d'environ 100 g ont été utilisées pour l'analyse de la distribution de taille.

Pour le traitement et l'analyse des échantillons, un schéma d'évaluation tel que a été décrit et a été conçu par d'Almeida [32]. Certaines parties de cette procédure sont basées sur des expériences de Schutz et Jaenicke concernant des particules de $r > 1 \mu\text{m}$ [33]. Le nouveau schéma permet d'étudier la distribution granulométrique totale des particules minérales dans une plage allant d'environ 10 $\mu\text{m} < r < 1000 \mu\text{m}$ pour les échantillons de sol et jusqu'à plusieurs centaines de micromètres pour les aérosols. Le schéma permet également de couvrir une diminution de la concentration allant jusqu'à 12 ordres en ampleur dans les deux types d'échantillons en divisant la plage de tailles complète de l'enquête en sous-échelle.

Des échantillons de sol de l'ordre de 50 à 100 g ont été séparés en neuf gammes de tailles différentes par tamisage humide avec de l'eau distillée. Cette procédure couvre l'intervalle de rayon de particule de $16 \mu\text{m} < r < 1000 \mu\text{m}$. Après 1 heure d'agitation, chaque fraction de taille a été séchée à 70 ° C dans une étuve et la masse de particules sèches ΔM_i dans la plage de taille r_i, r_{i+1} a été déterminée à l'aide d'une balance de précision. La distribution du nombre de taille sous la forme $\Delta N_i / \Delta \log r_i$ peut être facilement obtenue en convertissant ΔM_i en ΔN_i en supposant un rayon moyen des particules de $r_m = (r_i + r_{i+1})/2$ et une densité apparente moyenne de $\rho_p = 2,5 \text{ gcm}^{-3}$. Les particules $< 16 \mu\text{m}$ ne sont pas retenues par tamisage et sont donc apparues dans la suspension aqueuse. Les particules retenues après la dissolution sont les particules de sable entre 16 μm et 80 μm figure 3.9.

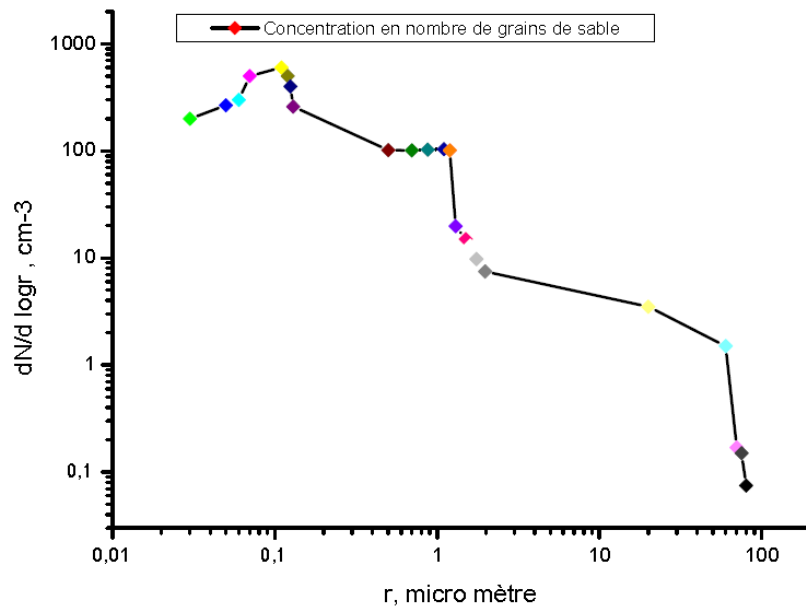


Fig.3.9: Distributions granulométriques d'aérosol saharien (région de Laghouat).

3.6 L'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus essentiels effectués dans l'étude l'érosion par sablage des profils des pales d'éolienne puisque la notion même de sable est basée sur un critère de taille des éléments. Le tableau 3.1 représente les résultats obtenus par tamisage lors de l'analyse granulométrique où les particules de sable dont la taille est 80 μm représentent presque 4% de la masse totale de sable capturé par les capteurs BSNE dans la zone d'étude.

Tableau 3.1 : L'analyse granulométrique de sable.

Tamis (mm)	5.0	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	0.125	0.08
module	38	35	32	29	26	23	22	20
SD (%)	100	100	100	99.11	60.71	21.62	8.13	3.99

La figure 3.10 montre les proportions du sable dunaire, le sable alluvionnaire et le sable alluvionnaire-dunaire après l'analyse granulométrique. La présence du sable alluvionnaire et la sable alluvionnaire-dunaire peut être expliqué par la situation de notre site d'étude qui se trouve au sud de Oued M'Zi.

Où M_s est la masse des grains solides

V_s est le volume des grains solides

Le tableau 3.2: regroupe l'ensemble des résultats des essais physiques effectués sur le
Sable de dune utilisé:

Tableau 3.2 : résultats des essais physiques effectués sur le Sable de dune utilisé [34]:

Caractéristiques	γ (kg/m ³)	γ_s (kg/m ³)	M_f	C_p	ES_v	ES_p
Sable de dune	1531.9	2758.4	1.20	56	89.9	79.31

3.6.2 Caractéristiques chimiques :

L'analyse du sable des dunes a été menée avec le microscope électronique à balayage à l'I.U.T. d'Amiens en France [34]. Elle révèle la présence d'atome de Si et O, ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO₂ (Silice).

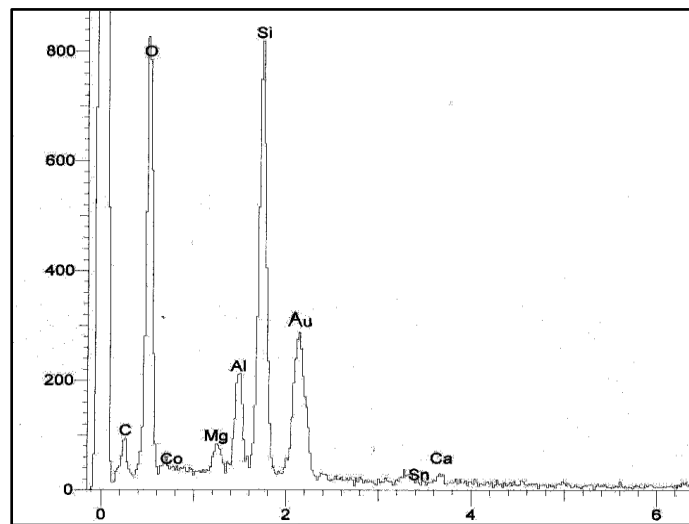


Fig.3.11: Analyse chimique du sable de dune [36].

L'analyse chimique du sable de dune menée par rayon X révèle la présence d'atomes de Si et O, ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO₂ (silice). De plus le pourcentage atomique important de Si nous indique que SiO₂ est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques, nous permettent d'établir que ce sable contient aussi quelques traces, en comparaison avec SiO₂, d'espèces calciques et magnésiennes.

3.6.3 Composition chimique de sable de dunes :

Du fait que les sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Alors, le sable à une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface (figure 3.12).



Fig.3.12: Micrographie montrant un échantillon du sable utilisé (Gx100).

3.7 Nombre de jours par an avec tempêtes de poussière

A partir des enregistrements météorologiques, Z. Houyou a pu relever dans une campagne scientifique dans la même zone d'étude que la nôtre avec un pas de 1 mn, 206 événements d'érosion qui se sont produits entre le 04 Mars 2009 et le 08 Février 2010 (Tableau 3.3) [35]. Sur un total de 341 jours, sont observés un cumul de 18 jours et 19 heures de saltation, répartis sur 206 événements c'est-à-dire 451 heures de vent de poussière que les futures éoliennes qui seront implantées près de ce site venté seront exposées à un vent chargé de poussière. Donc il faut prendre en considération cette durée dans nos calculs et nos expériences en plus de la vitesse seuil de friction qui vaut 6.72 m/s.

Tableau 3.3 : Caractéristiques des périodes de l'érosion éolienne.
(mesures effectués avec enregistrements de la saltation) [36].

Période (Début à fin)	Nbe	Dts (min)	Ds/Dtot	Vs (m/s)	Vmoy (m/s)	Vmax (m/s)	P (mm)	Sp/Stot
Du 04/03/2009 au 09/04/2009	19	3478	53	6.5	7.3	17.7	4.0	20.78
Du 10/04/2009 au 16/04/2009	09	1774	70	6.2	6.9	13.3	2.4	1.20
Du 16/04/2009 au 28/04/2009	20	2844	64	6.6	6.5	13.0	5.8	0.18
Du 29/04/2009 au 17/05/2009	12	1913	71	6.4	6.4	11.4	2.6	0.14
Du 18/05/2009 au 28/06/2009	/	/	/	5.6	5.8	13.5	/	/
Du 29/06/2009 au 18/07/2009	20	1082	31	6.2	6.7	13.8	1.2	10.52
Du 19/07/2009 au 10/08/2009	15	828	35	5.8	6.2	14.1	0.4	14.93
Du 11/08/2009 au 19/08/2009	13	2600	66	5.7	7.0	14.8	2.2	13.47
Du 19/08/2009 au 18/11/2009	54	4110	60	6.0	7.0	11.9	19.8	1.2
Du 19/11/2009 au 23/12/2009	23	2703	68	6.5	6.8	13.2	4.0	0.28
Du 23/12/2009 au 30/12/2009	03	1248	80	6.5	7.8	13.5	0.4	0.95
Du 31/12/2009 au 08/02/2010	18	4468	71	6.4	7.1	16	33.0	48.57

Nbe= Nombre d'événements ; Dts=Durée totale de la saltation ; Dtot= Durée totale des événements érosifs ; Vs= Vitesse du vent seuil de saltation ; Vmoy= Vitesse moyenne du vent durant les événements érosifs ; Vmax= Vitesse maximale du vent durant les événements érosifs ; P= Pluie cumulée durant les événements érosifs ; Spluie= Saltation mesurée durant la pluie ; Stot= Saltation mesurée durant les événements érosifs. (**) = Panne de la station météo).

A titre de comparaison, le tableau 3.4 regroupe les statistiques faite dans de nombreux pays et qui donne le nombre de jours par ans avec tempêtes de poussière pour une visibilité inférieur à 1 km [47].

Tableau 3.4 : Nombre de jours par an avec tempêtes de poussière (visibilité <1 km) [47].

Location	Days Per Year
Abadan, Iran	13
New Delhi, India	8
Ganganagar, India	17
Paoting, China	19
Kantse, China	35
Hami, China	33
Tarim Basin, China	100 to 174
Baghdad, Iraq	21
Basra, Iraq	15
Shaibah, Iraq	38
Diwaniyah, Iraq	36
Aqaba, Jordan	11
Nguru, Nigeria	26
Mexico City, Mexico	68
Kazakhstan, (former) USSR	60
Repetek, (former) USSR	60
Kuwait Airport, Kuwait	27
Abu Kamal, Syria	10
Mersa Matruh, Egypt	10
Riyadh, Saudi Arabia	13
Dharan, Saudi Arabia	11
Khartoum, Sudan	24

A 250 km au Nord Est de la région de Laghouat Guettouche et Guendouz indiquent que la durée moyenne des vents de sable est de 50 heures par an [36]. Sur un total de 341 jours, Houyou a observée à Mokrane, 18 jours et 19 heures de Saltation [35]. Taibi a montré que Laghouat se situait dans une zone à fort transit éolien [37]. La durée moyenne annuelle de vent de sable calculée par Dubief pour Laghouat est de 6.7 jours entre 1925 et 1939 [38]. La durée observée par Houyou à Mokrane, est égale à plus de deux fois et demie celle signalée par Dubief en 1952. Des enregistrements de saltation en continu et sur plusieurs années seront toutefois nécessaires pour évaluer si cette augmentation résulte d'une variabilité à court terme ou reflète un réel changement climatique.

3.8 Formule de R.A. BAGNOLD (1936)

Bagnold dans son étude a proposé l'expression du taux du transport du sable ci-dessous [50] :

$$Q = K \left(\frac{D_{50}}{D} \right)^{0.5} \cdot \left(\rho \cdot \frac{\alpha}{g} \right) \cdot u^{*3} \dots \dots \dots (19)$$

où Q est le taux du transport en g/s/cm, K un coefficient d'ajustement (1,5 pour les sables homogènes ; 1,8 pour les sables bien classés ; 2,5 pour les sables mal classés), D_{50} la taille moyenne des sables étudiés en mm, D la taille théorique d'un grain moyen standard (0,250 mm), $\rho\alpha$ la densité de l'air ($1,226 \times 10^{-3}$ g/cm³), g l'accélération par la gravité (980 cm/s²) et u^* la vitesse de frottement en cm/s.

3.8.1 Quantification du transport annuel

Les différentes étapes pour simuler le transport éolien sont les suivantes :

1/ Obtenir des données statistiques du vent, pour cela nous avons utilisé les relevés métrologiques des stations de Laghouat et de Hassi R'mel situées respectivement à 5.3 km au nord et 113 km au sud du site d'étude (figure 3.13).



Fig.3.13: Zone d'étude près de la ville de Laghouat.

2/ Déterminer la vitesse de friction seuil u_t^* :

La vitesse seuil d'érosion est un paramètre difficile à mesurer sur le terrain. Elle correspond théoriquement à la vitesse du vent pour laquelle les premiers grains de sable se mettent en mouvement à la surface du sol. La mise en mouvement des particules a lieu quand les forces aérodynamiques (force d'entraînement et force de soulèvement) sont suffisamment fortes pour vaincre les forces de résistance et donc pour déloger les particules solides érodables du sol et initier leur mouvement. La force de soulèvement résulte de l'important gradient de la vitesse du vent au voisinage de la surface du sol, les forces de résistance dépendent de la nature du matériau mis en mouvement [39]. A partir des études de ces forces, l'expression de la vitesse seuil du mouvement des particules (Equation 20) fut établie pour des grains de sables (en saltation) de tailles supérieures à 100 µm par Bagnold et Chepil [8] et [9].

$$u_t^* = A' \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{\rho_p - \rho_{air}}{\rho_{air}} \right) \cdot g \cdot D_p \right]} \dots \dots \dots (20)$$

u_t^* : vitesse de friction seuil (m.s⁻¹) ;

A' : coefficient empirique sans dimension ;

ρ_p : masse volumique de la particule du sol (kg.m⁻³) ;

ρ_{air} : masse volumique de l'air (kg.m^{-3}) ;

D_p : diamètre de la particule (m).

Cette étape permet de déterminer une vitesse limite en-dessous de laquelle il n'y a, théoriquement, pas de transport de particule. Dans notre cas la vitesse seuil $u_t^* = 6.72 \frac{m}{s}$, [35].

3/ Déterminer la vitesse de cisaillement (u^*) à partir de la formule :

$$U_z = (u^* / k) \times \ln(z/z_0) \dots \dots \dots (21)$$

où U_z est la vitesse moyenne (en m/s) à l'altitude z , k la constante de Van Karman (0,41), z l'altitude de la station météorologique (en m), et z_0 la longueur de rugosité, soit 1 mm, pour reprendre la valeur utilisée par S.M. Arens [40].

4/ Calculer le transport théorique par classe de vitesse et par direction de vent en utilisant une formule de transport.

Les taux de sédimentation des sables naturels sont très différents de ceux des sphères, principalement en raison de leurs formes non sphériques qui les poussent à se déformer et à tourner lors de leur sédimentation. On peut s'attendre à ce que les grains se déposent dans l'air avec un écart similaire à la sédimentation des sphères. L'objectif de la présente étude est d'entreprendre les expériences nécessaires pour examiner de manière approfondie la sédimentation des grains de sable naturels dans l'air, cette enquête est presque similaire à celle de Baba et Komar pour la décantation des grains dans l'eau [41].

Malgré l'intérêt considérable et à long terme que suscite le transport de sable éolien, peu de considérations ou de mesures ont été prises quant à la vitesse de sédimentation des grains naturels à densité de quartz dans l'air. La plupart des chercheurs se sont contentés de traiter les grains comme des sphères parfaites et de calculer leurs taux de sédimentation en conséquence. En revanche, de nombreuses études ont été menées sur les vitesses de sédimentation des grains de sédiment dans l'eau, par exemple dans l'article de Baba et Komar [41].

La rareté des données sur les taux de sédimentation des grains dans l'air peut certainement être attribuée à la difficulté d'effectuer de telles mesures. Les grains de sable se déposent généralement à des vitesses de 1 à 6 m / s (Figure 3.4) et parcourent ainsi une distance verticale considérable en quelques secondes seulement. Les grains de sable qui se déposent dans l'eau peuvent être minutieusement chronométrés dans un tube de sédimentation d'un mètre ou deux de long, mais il est

évident que des mesures comparables dans l'air nécessiteraient un chronométrage sur une distance verticale d'environ 10 m ou plus pour obtenir le même résultat demande plus précision.

3.9 Détermination du profil de densité de flux de masse horizontal, Q,

Au moyen du modèle puissance modifié et avec une vitesse seuil de 6,72 m/s, les sédiments collectés à chaque vidange correspondent à un cumul de sédiments captés lors d'événements qui se sont succédé entre deux vidanges [35]. Pendant toute la période de mesures, les capteurs BSNE (Big Spring Number Eight [43]) ont été vidés 22 fois.

3.9.1 Hauteur des capteurs BSNE :

Les capteurs montés à différentes hauteurs à savoir 0,1 m, 0,175 m, 0,3 m, 0,5 m et 1 m par rapport au niveau du sol.

Tableau 3.5 : Hauteur des capteurs.

Hauteur des capteurs [m]				
H1	H2	H3	H4	H5
0,1	0,175	0,3	0,5	1

Les quantités collectées pendant la période de mesures sont présentées au tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Masse récoltée de chaque BSNE [35].

Masse récoltée en gramme					
N° BSNE	H1	H2	H3	H4	H5
01	0	0	0	0	0
02	113	78	21	16	7
03	129	85	29	20	0
04	497	258	44	21	8
05	194	190	40	76	11
06	121	100	24	14	12
07	564	539	300	20	11
08	0	0	0	0	0
09	454	753	205	59	13
10	26	20	21	12	9
11	489	592	129	33	11
12	15	14	13	9	5
13	172	173	14	6	11
14	41	42	11	8	4
15	69	91	21	22	7
16	202	323	43	14	11
17	162	209	58	36	7
18	262	141	57	23	9
19	18	14	9	6	6
20	100	68	50	18	8
21	21	25	10	10	6
22	248	309	50	14	6
23	0	0	0	0	0
24	89	75	16	5	2

3.9.2 La densité de flux de masse horizontal

Pour l'étude de l'érosion éolienne sur le terrain et la conception et l'évaluation de techniques de contrôle de l'érosion éolienne, des observations détaillées des processus d'érosion éolienne sont nécessaires. Le transport des particules par le vent dans le site est généralement échantillonné avec des capteurs de sédiments (par exemple, Bagnold, 1973; Wilson et Cooke, 1980; Fryrear et al., 1991). Bien que les capteurs décrits dans la littérature soient différents par leur taille et leur forme, ils consistent généralement en un réseau vertical de pièges à sédiments. Lors d'une érosion éolienne, chaque piège collecte des matériaux en mouvement à une certaine hauteur. A partir du poids des matériaux piégés et de la durée de la tempête, des flux de masse horizontaux sont calculés. Un taux de transport de masse au point d'observation est obtenu en intégrant le profil de flux de masse sur toute la hauteur (tableau 3.7). Plusieurs modèles de distribution verticale du flux de masse horizontal ont été décrits dans la littérature.

Selon Voriès et Fryrear (1991), la relation entre le flux de masse horizontal et la hauteur peut être décrit par:

$$F_h(z) = az^{-b} + c \exp(-dz) \dots \dots \dots (22)$$

Où $F_h(z)$ [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] est la masse de flux à une hauteur z [m] et a , b , c et d des coefficients de régression. Le tableau 3.7 récapitule tous les mesures effectués pendant deux années dans la zone d'étude de la région de Laghouat.

Tableau 3.7 : Densité de flux de masse horizontal [35].

Q : densité de flux de masse horizontal [$\text{kg/m}^2/\text{épisode}$]					
N° BSNE	H=0,1	H=0,175	H=0,3	H=0,5	H=1
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1004,44	239,72	52,24	33,07	26,00
3	1516,40	343,60	72,83	45,90	
4	5220,59	811,58	114,55	71,62	19,37
5	2348,67	551,49	121,69		27,95
6	1333,77	245,17	79,74	34,46	26,99
7	6596,49	1257,47	/	43,54	32,69
8	/	/	/	/	/
9	5591,13	1850,12	551,08	147,65	36,40
10	281,84	/	46,64	33,27	22,23
11	5556,82	1289,73	219,57	64,23	24,59
12	284,90	/	32,29	/	12,39
13	1378,87	427,48	35,38	/	26,13
14	522,96	114,53	31,47	17,70	10,57
15	1078,80	239,83	50,99	/	/
16	2896,06	830,76	113,51	31,25	/
17	2660,10	464,70	174,21	79,32	15,93
18	3055,04	407,42	132,53	48,14	24,21
19	230,77	39,20	20,81	15,45	14,10
20	915,58	/	126,90	45,71	15,44
21	428,92	53,65	24,28	/	13,72
22	4817,40	751,09	152,79	31,90	15,83
23	/	/	/	/	/
24	1205,96	268,82	48,57	9,13	5,55

Bibliographie

- [1]. Various rope access maintenance works, Lake Turkana Windfarm, Offshore Painting Services LTD, 7 Leckwith Road Bootle, LIVERPOOL, JULY 2019.
- [2] Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M), 1966. Vocabulaire Météorologique International. 182, TP.91, 276 p.
- [3] OMM, 1973. – Guide des instruments et des observations météorologiques, n° 8.
- [4] Dubief, J., 1953. Les vents de sable dans le Sahara Français, Colloques Internationaux du CNRS 35, 45-70.
- [5] Organisation Météorologique Mondiale (O.M.M), 1956. Atlas International des Nuages. Volume 1. 165 p.
- [6] B. Chatenet, B. Marticorena, L. Gomes, « Assessing the microped size distributions of desert soils erodible by wind », IAS,Wiley, Volume43, Issue5, October 1996, Pages 901-911.
- [7] W.S.Chepil, N.P.Woodruff, « The Physics of Wind Erosion and its Control » ; Advances in Agronomy, Elsevier, Volume 15, 1963, Pages 211-302.
- [8] Bagnold, R.A. “The physics of blown sand and desert dunes”, London: Methuen 1941.
- [9] W.S.Chepil, “Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil”, Soil Science: Volume 60 - Issue 4 ,October 1945, pp 305-320.
- [10] J.D. Iversen, J.B. Pollack, R. Greeley, “Windblown Dust on Earth, Mars and Venus”, Journal of the Atmospheric Sciences, volume 33, Dec. 1976, pp: 2425-2429.
- [11] J. D. Iversen, B. R. White, “Saltation threshold on Earth, Mars and Venus”, IAS, Wiley, Volume29, Issue1, Feb. 1982, pp: 111-119
- [12] M. R. Raupach, “Drag and drag partition on rough surfaces”, Boundary-Layer Meteorology, Springer, Sep. 1992, Volume 60, Issue 4, pp 375–395.
- [13] B. Marticorena, G. Bergametti, « Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme », JGR: Atmospheres, Volume100, IssueD8, 20 August 1995, pp. 16415-16430.
- [14] Alfaro, S.C. and Gomes, L, “Improving the large-scale modeling of the saltation flux of soil particles in presence of nonerodible elements”, Journal of Geophysical Research, Volume100, IssueD8, 20 August 1995, pp. 16357-16366.
- [15] F. Fécan, B. Marticorena, and G. Bergametti, “Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas”, Ann. Geophys., Volume 17, issue 1, Jan.1999, pp. 149-157.
- [16] L. Gomes, J.L. Rajot, S.C. Alfaro, A. Gaudichet, « Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger », CATENA; Volume 52, Issues 3–4, 1 July 2003, pp. 257-271.
- [17] J. Belnap, « The world at your feet: desert biological soil crusts », Frontiers in Ecology and the Environment, Volume1, Issue4, May 2003, pp. 181-189.
- [18] R. Greeley & J. D. Iversen, “Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus and Titan”, Geological Magazine, vol. 122, issue 5, Sep. 1985, pp. 578-579.
- [19] Y. Shao, Raupach, M.R. and Findlater, P.A, “Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind”, Journal of Geophysical Research, vol. 98, no. D7, Jul. 1993, pp. 719-726.
- [20] D. Gillette, P. A. Goodwin, « Microscale transport of sand-sized soil aggregates eroded by wind” JGR-Oceans and Atmospheres, Volume79, Issue27, 20 September 1974, pp. 4080-4084.
- [21] D.A. Gillette, T.R. Walker, “Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of west Texas”, Soil Science, - Volume 123 - Issue 2, February 1977.
- [22] S. C. Alfaro, A. Gaudichet, L. Gomes, M. Maillé, « Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies”, Geophysical research Letters, Volume25, Issue7, April 1998, pp. 991-994.
- [23] S. C. Alfaro, L. Gomes, « Modeling mineral aerosol production by wind erosion: Emission intensities and aerosol size distributions in source areas”, JGR Atmospheres, Volume Issue Quantifying the Radiative Impacts of Mineral Dust (DUST), Feb. 2018, pp. 18075-18084.
- [24] D. A. Gillette, G. Herbert, P. H. Stockton, « Causes of the fetch effect in wind erosion”, Earth Surface Processes and Landforms, Volume21, Issue7, July 1996, pp. 641-659.
- [25] Y. Shao, H. Lu, “A simple expression for wind erosion threshold friction velocity”, IGR-Atmospheres, Volume105, IssueD17, Sep. 2000, pp.22437-22443.
- [26] G. A. D’Almeida, “On the variability of desert aerosol radiative characteristics”, IGR-Atmospheres, Volume92, IssueD3, March 1987, pp. 3017-3026

- [27] G.M.Sverdrup, K.T.Whitby, W.E.Clark, « Characterization of California aerosols—II. Aerosol size distribution measurements in the Mojave Desert », *Atmospheric Environment*, Volume 9, Issue 5, May 1975, pp. 483-494.
- [28] C. N. Davies, “Size distribution of atmospheric particles”, *J. Aerosol Sci.* 5, 293-300.
- [29] Y. Fouquart, B. Bonnel, G. Brogniez, “Observations of Saharan Aerosols: Results of ECLATS Field Experiment. Part II: Broadband Radiative Characteristics of the Aerosols and Vertical Radiative Flux Divergence”, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 26 No. 1, January 1987.
- [30] T. N. Carlson, R. S. Caverly, « Radiative characteristics of Saharan dust at solar wavelengths”, *JGR- Oceans and Atmospheres*, Volume 82, Issue 21, July 1977, pp.3141-3152.
- [31] A. Druilhet, P. Durand, « Etude de la couche limite convective sahélienne en présence de brumes sèches (Expérience ECLATS) », *Boundary-Layer Meteorology*, Volume 28, Issue 1–2, January 1984, pp 51–77.
- [32] G. d'Almeida, “Die vollständige mineralische Größen-Verteilung and Diskussion möglicher Quellgebiete von Sandstürmen der zentralen, westlichen and südwestlichen Sahara”. Master’s thesis, Institute for Meteorology, University of Mainz, FRG, 1979,
- [33] L. Schutz, R. Jaenicke, “Particle number and mass distributions above 10-4 cm radius in sand and aerosol of the Sahara Desert”. *J. Appl. Meteor.*, 13, 1974, pp.863-870.
- [34] T. Bouziani, M. Bederina, “Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC)”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Volume 6, Issue 1, March 2012, pp 59–64.
- [35] Z. Houyou, Impact de la mise en culture en pluvial sur la dégradation du sol par érosion éolienne dans la steppe centrale (cas de la région de Laghouat), Thèse de Doctorat, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH-ALGER, 2015.
- [36] M. S. Guettouche, M. Guendouz, « Modélisation et évaluation de l'érosion éolienne potentielle des sols cultivables dans le Hodna (Nord-Est algérien) », *Science et changements planétaires*, Volume 18, numéro 4, 2007.
- [37] Taibi, A.N., « Le piémont sud du djebel Amour (Atlas saharien, Algérie), apport de la télédétection satellitaire à l'étude d'un milieu en dégradation ». Université Denis Diderot, Paris VII, Thèse de Doctorat, 1997, p.310.
- [38] -Dubief J., « Le vent et le déplacement du sable au Sahara, Travaux de l'institut de Recherches Sahariennes ». t. VIII, 1952, p 123-162.
- [39] A. W. ZINGG, « Wind-Tunnel Studies of the Movement of Sedimentary Material”, *Proceedings of the 5th Hydraulic Conference Bulletin*, 1953.
- [40] S.M Arens, « Transport rates and volume changes in a coastal foredune on a Dutch Wadden island”, *Journal of Coastal Conservation*, Volume 3, Issue 1, Dec.1997, pp 49–56.
- [41] J. Baba, P. D. Komar, « Measurements and analysis of setting velocities of natural quartz sand grains” *Journal of Sedimentary Research*, Jun.1981 51 (2), pp. 631-640.
- [42] D. W. Fryrear, « A field dust sampler”, *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 41 no. 2, March/April 1986, pp. 117-120.
- [43] L. Gomes, J. LRajot, S.C. Alfaro, A. Gaudichet, « Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger”, *CATENA*, Volume 52, Issues 3–4, 1 July 2003, pp. 257-271.
- [44] M. Legrand : Etude des aérosols sahariens au-dessus de l'Afrique à l'aide du canal A10 Microns de Météosat : Visualisation, Interprétation, et Modélisation, Thèse de doctorat, Juillet 1990.
- [45] Dubief, J., 1953. Les vents de sable dans le Sahara Français, *Colloques Internationaux du CNRS* 35, 45-70.
- [46] Y. Shao, MR Raupach and JF Leys, “A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region”, *Australian Journal of Soil Research*, Volume 34, Issue (3), 1996, pp. 309 – 342.
- [47] Y. Shao, « A model for mineral dust emission”, *IGR-Atmospheres*, Volume 106, Issue D17, 16 September 2001, pp. 20239-20254
- [48] Y Shao, GH McTainsh, JF Leys and MR Raupach, “Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement” *Australian Journal of Soil Research*, 1993, Volume 31, Issue 4, pp. 519 –532.
- [49] M. R. Raupach, D. A. Gillette, J. F. Leys, « The effect of roughness elements on wind erosion threshold”, *IGR-Atmospheres*, Volume 98, Issue D2, 20 February 1993, pp. 3023-3029.
- [50] R. A. Bagnold, « The movement of desert sand”, *Royal Society*, Volume 157, Issue 892, Dec. 1936
- [51] M. Sow : Mesure, caractérisation et paramétrisation des flux d'aérosols terrigènes produits par érosion éolienne en zone sahélienne. Thèse de doctorat, sept.2009.

Chapitre 4

Simulation numérique

4.1 Introduction

Durant ces dernières décennies la simulation numérique a contribué énormément au développement de la majorité des secteurs industriels. Cependant, le déploiement de la simulation numérique reste encore lent. Seuls certains leaders de l'industrie parviennent à capter son plein potentiel. Un modèle est une représentation testable d'un système et la simulation est l'action d'utiliser ce modèle. Les calculs émanant de ces simulations étant souvent complexes, les outils numériques sont utilisés pour les exécuter ; on parle alors de simulation numérique. Cette technique offre un potentiel immense, utile au secteur de l'éolien.

4.2 Modèle d'érosion

Le comportement des matériaux composites à un flux d'air transportant des particules érosives suscite un grand intérêt pour les chercheurs qui veulent améliorer la performance du système éolien. La connaissance des taux d'érosion est très importante dans la conception des pales, le hub, la nacelle et la tour.

Un modèle d'érosion se compose de trois paramètres indépendants, tels que l'angle d'impact, la vitesse d'impact de la particule de sable et le diamètre de la particule de sable. Ce modèle varie en fonction de la surface cible des matériaux et du type de particule de sable. De plus, ce modèle est issu des équations empiriques obtenues à partir de données expérimentales en soufflerie. Par conséquent, un modèle d'érosion pour les particules de sable impactant du composite est nécessaire pour prévoir les dommages causés par l'érosion sur les pales d'une éolienne.

Le problème général de l'érosion implique deux phénomènes distincts: la mécanique des fluides du flux diphasique (ou l'échange de quantité de mouvement entre les deux phases) et l'usure des matériaux par collision avec l'érodant à la surface du matériau.

Ainsi, il faut combiner les théories de la mécanique des fluides des particules solides en suspension dans un flux de fluide de transport et de l'usure des métaux par des abrasifs. Le mouvement des particules érosives est différent de celui du mouvement d'écoulement du fluide, principalement en raison de leur inertie supérieure. Pour effectuer des calculs d'érosion, il faut déterminer les composantes de la vitesse des particules lorsqu'elles touchent la pale. Cela peut être fait en écrivant

les équations du mouvement des particules solides dans le flux de fluide et en suivant chaque érodant individuel dans son mouvement vers l'échantillon où l'érosion se produira.

L'une des principales questions que l'on pourrait se poser est la suivante: comment l'érosion se produit-elle lors de l'impact des particules de sable sur la plaque échantillon? Cette question concerne les différents aspects de l'érosion, et principalement les conditions d'usure à l'interface entre l'abrasif et la plaque échantillon.

Avant d'établir un modèle théorique de l'érosion dans le cas des pales d'éolienne, il convient de recueillir des informations sur la variation des caractéristiques des dégradations lors de la perte de masse de la plaque échantillon et, si possible, d'éliminer les paramètres qui ont un faible effet sur le taux d'érosion.

4.3 Processus d'érosion des matériaux ductiles par les abrasifs durs

Une des conditions de l'érosion des matériaux ductiles est que la dureté Vickers de l'érodant soit au moins 1,5 fois supérieure à celle de la surface à éroder. Si la dureté du matériau est proche de la dureté de l'érodant, il se produira une certaine érosion par un processus de fatigue (par exemple, un mécanisme de fatigue à cycle réduit avec un angle d'impact élevé). Certaines analyses de l'érosion ont été fondées sur l'hypothèse selon laquelle le mécanisme de l'érosion pourrait être considéré comme une combinaison de deux processus distincts, l'un consistant à former une déformation plastique provoquée par la composante normale de la force de l'érodant utilisé; et le second la coupe érosive provoquée par la composante parallèle de la force exercée sur la surface de la cible. Par exemple, Finnie [1] a suggéré que des particules angulaires coupent la surface du métal, éliminant ainsi le matériau par micro-usinage, comme lors d'un test de rectification, tandis que Hutchings et Winter [2] ont signalé que le métal s'écoulait vers le haut autour du bord de l'empreinte laissée par l'érodant et a supposé qu'il était finalement retiré par cisaillement ductile. Tilly et Sage [3] ont observé des lèvres similaires surélevées, mais ont suggéré que celles-ci soient enlevées par des fragments des particules, qui se brisent lors de l'impact.

Dans une autre étude intéressante, Bitter [4] a montré que tant que la composante normale de la vitesse d'abrasion ne dépasse pas la limite d'élasticité en vitesse (un certain type seuil de vitesse limite pour l'impact normal), aucun dommage ne surviendra du fait de la composante parallèle de la vitesse des particules seulement; la limite d'élasticité en vitesse est définie comme la vitesse d'abrasion en dessous de laquelle aucun dommage par érosion ne se produit. Cependant, si la composante normale de la vitesse de la particule dépasse la limite élastique de la vitesse, il se produit une déformation plastique et, en conséquence de la composante parallèle de la vitesse de la particule, la surface est soumise à une charge de cisaillement sur une surface égale à la section

transversale verticale de la partie de l'abrasif qui a pénétré dans le corps, provoquant une égratignure.

Les dommages dus à l'érosion d'une pale d'une éolienne résultant de l'impact de particules solides entraînent un enlèvement important de matière à la surface. L'enlèvement de matière entraîne une réduction importante de sa durée de vie et une augmentation des coûts de réparation et de remplacement. Une bonne compréhension et une bonne prévision de l'érosion sur les pales d'une éolienne sont donc très importantes pour évaluer les dommages, estimer les pertes de performances aérodynamiques et développer un système de protection contre l'érosion. Cependant, la prédiction de l'érosion sur les pales reste un défi en raison de la complexité des processus physiques impliqués et des limites de la littérature ouverte existante.

Par conséquent, il fallait chercher les méthodes et les moyens déjà appliquée pour effectuer le suivi des particules de sable et prévoir les dommages causés par l'érosion du sable sur les pales d'éolienne dans des conditions de son fonctionnement. Les méthodes employées jusqu'à là d'après une revue de littérature approfondie dans le domaine de l'érosion par particules solides sont ceux destinées aux systèmes de turbomachines et ceux des pales d'hélicoptères opérant dans le désert en raison de la similitude des phénomènes physiques des écoulements et d'érosion avec des pales d'éolienne.

Un système éolien rencontre inévitablement des particules solides en suspension dans l'air au cours de leur fonctionnement. Par conséquent, l'enlèvement de matière des surfaces de ce système est dû à l'impact de particules solides, causant une «usure de coupe abrasive-érosive» ou à une «érosion».

De nombreuses recherches analytiques et expérimentales ont été effectuées au cours des dernières décennies [1], [5], [6]. Ces résultats ont conclu que les dommages causés par l'érosion sur une surface d'un matériau sont principalement affectés non seulement par les propriétés de la surface du matériau proprement dit mais aussi par les propriétés des particules d'impact. Les propriétés d'un matériau de surface sont : la dureté, la rugosité, l'élasticité et la métallurgie (fragile ou ductile) et les propriétés de particules sont : la taille, la forme, la vitesse, la densité et l'angle d'impact des particules. Tous ces paramètres sont importants pour la prévision de l'érosion. Cependant, comprendre et modéliser le mécanisme d'érosion du sable sur les pales d'éoliennes est difficile. Dans le domaine de l'éolien, le phénomène d'érosion pose un grave problème car il entraîne une détérioration importante de la géométrie des composants, réduit les performances, raccourcit la durée de vie des composants et augmente les coûts d'exploitation / réparation. Les dégâts dus à l'érosion sont plus graves lorsque l'éolienne opère dans un environnement chargé de sable, comme illustré dans la Figure 4.1.

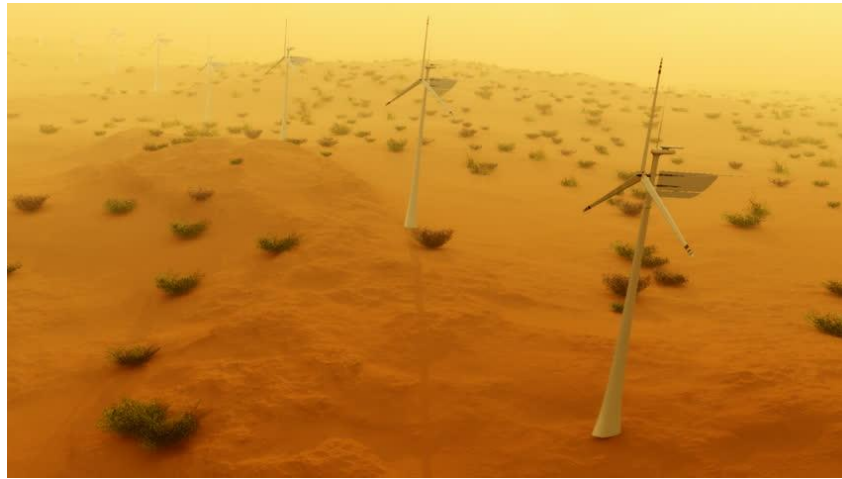


Fig.4.1 : Eoliennes implantées dans le désert [7].

Dans la prévision des phénomènes d'érosion, des trajectoires précises des particules solides, des caractéristiques de rebond et des taux d'érosion sont nécessaires. Une prévision efficace des caractéristiques de rebond et des taux d'érosion provient généralement d'études sur l'érosion en soufflerie. Les études de prévision de l'érosion sur les pales d'éolienne sont très limitées et c'est pour cela qu'il fallait chercher des études antérieures dans le domaine de l'érosion dans les systèmes de turbomachines et l'érosion des pales d'hélicoptère. La plupart des méthodes analytiques permettant de suivre les particules de sable dans l'air, les modèles de rebond et les modèles de taux d'érosion développés auparavant pour les systèmes de turbomachines et pour les pales d'hélicoptère sont directement applicables aux études de prévision de l'érosion sur les pales d'éolienne, en raison des similitudes physiques entre leurs problèmes d'écoulement.

Pour prévoir les trajectoires des particules et l'érosion qui en résulte, il est nécessaire de bien comprendre et modéliser deux mécanismes interactifs. Le premier est le mécanisme interactif entre un flux de particules solides et un fluide, qui est nécessaire pour déterminer la trajectoire des particules solides dans le champ d'écoulement et leurs conditions d'impact sur une surface. Vient ensuite le mécanisme interactif entre une particule solide et une surface, utilisé pour quantifier les dommages causés par l'érosion sur cette surface. Ce mécanisme est généralement représenté par un modèle de rebond et un modèle d'érosion qui proviennent généralement d'études sur l'érosion en soufflerie sous forme de corrélations empiriques. De nombreuses études expérimentales et numériques ont été réalisées afin de comprendre ces mécanismes interactifs et de développer un algorithme de suivi des particules, un modèle de rebond approprié et un modèle d'érosion. Ces études de prévision de l'érosion portaient principalement sur les turbomachines et les systèmes à écoulement interne, et la littérature ouverte sur la prévision des dommages causés par l'érosion sur une pale d'éolienne reste très limitée.

4.4 Suivi des particules de sable dans un environnement à écoulement visqueux

En général, il existe deux approches différentes pour le suivi des particules solides dans un environnement à écoulement visqueux. La première approche est l'approche eulérienne-eulérienne. Dans cette approche, les phases fluide et particulaire sont considérées comme un continuum mixte. Par conséquent, l'équation de continuité et les équations de quantité de mouvement pour les deux continua doivent être résolues afin de déterminer le mouvement de l'écoulement du fluide et le mouvement des particules solides. L'autre approche est l'approche eulérienne-lagrangienne. Dans cette approche, un mélange peut être considéré comme la combinaison d'un continuum homogène (uniquement en phase fluide) et la phase solide est traitée comme un écoulement dispersé. Cette approche est raisonnable lorsque la concentration en masse de la phase solide est très inférieure à l'unité ou que le diamètre de la particule solide est très petit car, dans cette situation, l'effet de la quantité de mouvement des particules solides sur le mouvement de l'écoulement de fluide est négligeable. L'approche eulérienne-lagrangienne détermine les trajectoires des particules en résolvant le mouvement de l'équation à l'aide d'une solution d'écoulement fluide.

4.4.1 L'approche Eulérienne- Eulérienne

L'approche Eulérienne-Eulérienne considère le flux en deux phases (flux de fluide contenant des particules solides en suspension) comme un continuum de mélange. Dans cette approche, les trajectoires de particules solides sont calculées en même temps que le calcul d'écoulement fluide en résolvant les équations suivantes [8].

- Conservation de masse en phase solide:

$$\frac{\partial}{\partial t}(B\rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_j}(B\rho_p u_{p,j}) = 0, \quad \text{pour } j = 1; 2; 3 \dots \dots \dots (1)$$

- Conservation de masse en phase gazeuse:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha\rho u_j) = 0, \quad \text{pour } j = 1; 2; 3 \dots \dots \dots (2)$$

Où $B = \frac{V_p}{(V_p+V_f)}$

est un rapport volumique (concentration) de la phase solide à toutes les phases et: $\alpha = 1 - B$ est un rapport volumique de la phase fluide à toutes les phases. L'indice p et g représentent la phase des particules solides et la phase d'écoulement.

- Equation de quantité de mouvement pour la phase solide dans la direction i :

$$\frac{\partial}{\partial t}(B\rho_p u_{p,i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(B\rho_p u_{p,j} u_{p,i}) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(B\tau_{p,ij}) + B\rho_p g_i - B\frac{\partial P}{\partial x_i} + B_A(u_i - u_{p,i}) \dots (3)$$

- Equation de quantité de mouvement pour la phase fluide dans la direction i ;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha u_i u_j) = -\alpha\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}(B_f\tau_{ij}) + \alpha\rho g_i - B_A(u_i - u_{p,i}) \dots \dots \dots (4)$$

τ_{ij} et $\tau_{p,ij}$ sont des contraintes de cisaillement pour les phases fluide et solide. Le dernier terme de l'équation 3 et de l'équation 4 est une force de traînée générée par la différence de vitesse entre deux phases. B_A est un coefficient de transfert de moment d'interphase. Ces termes sont également développés dans des études expérimentales [9].

Comme le montrent ces équations, les équations qui régissent l'approche eulérienne-eulérienne sont compliquées. Cette approche est coûteuse en calcul en raison d'équations et de termes supplémentaires.

4.4.2 L'approche eulérienne et lagrangienne

La complexité de l'écoulement diphasique dans l'approche eulérienne-eulérienne peut être simplifiée lorsque la phase dispersée de la particule solide est suffisamment diluée dans la phase fluide. Dans cette condition, l'équation qui gouverne est régie par le principe des limites de concentration faibles [10]. Le principe indique lorsque la concentration massique en particules solides est très inférieure à l'unité, pour les particules de sable en suspension dans l'air lors de la rotation des pales, le flux de mélange en deux phases peut être considéré comme un flux monophasé (phase fluide), car les particules solides n'affectent pas le mouvement du fluide pour le flux à faible concentration ou pour le flux de faible densité relative.

Par conséquent, dans le calcul des trajectoires de particules solides en utilisant l'approche eulérienne-lagrangienne, une procédure en deux étapes est nécessaire. La première étape consiste à déterminer le champ de flux pour la phase fluide unique qui est très légèrement modifié en raison de l'action des particules en résolvant les équations de Navier-Stokes. La deuxième étape consiste à calculer la trajectoire des particules en résolvant l'équation du mouvement d'une particule solide individuelle libérée d'une position initiale connue.

Dans la deuxième étape, il est nécessaire de comprendre les forces agissant sur les particules solides afin de déterminer leurs trajectoires dans le champ de fluide, en particulier lorsqu'il y a un mouvement transitoire et instable des particules. Boussinesq [11] a conclu que le mouvement des particules solides était déterminé par la combinaison d'une force de traînée en régime permanent, d'une force de masse ajoutée et d'une force d'histoire intégrale due à la transition. Par conséquent, l'expression de Boussinesq pour la force hydrodynamique est composée de trois termes de force indépendants: la force de traînée en régime permanent, la force de masse ajoutée et la force intégrale de l'histoire. Basset [12] a développé le terme de force d'histoire intégrale indépendante d'une particule solide sphérique dans des conditions d'écoulement rampant. Ce terme est appelé «force de Basset» ou «intégrale de Basset». Michaelides [13] montre la forme précoce de la force hydrodynamique transitoire basée sur l'expression mathématique de Boussinesq / Basset, comme indiqué dans l'équation 5.

$$F = 6\pi\alpha_p\mu V_p + \frac{m}{2} \frac{dV_p}{dt} + 6\alpha_p^2\sqrt{\pi\rho\mu} \int_0^t \frac{dV_p}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \dots \dots \dots (5)$$

Où α_p est le rayon d'une particule solide.

Ces trois forces indépendantes ont été suggérées en termes de force de base et de facteur empirique. Différents résultats expérimentaux ont été réalisés afin de déterminer ces facteurs empiriques et de développer une forme exacte pour ces forces.

Tout d'abord, la traînée à l'état d'équilibre développée par les premières expériences a été suggérée dans les littératures de Wallis [14], Clift et al. [15], et d'autres chercheurs. Ces études ont conclu que la traînée à l'état d'équilibre peut être définie comme étant égale à :

$0.5C_D\pi\rho\alpha_p^2V_p^2$ à des vitesses finies. La traînée statique est également réduite à $6\pi\alpha_p\mu V_p$ car le coefficient de traînée aux nombres de Reynolds finis peut être supposé être $C_D = \frac{24}{Re}$. Par conséquent, en termes de forme alternative, la force de traînée en régime permanent peut être exprimée par $(6\pi\alpha_p\mu V_p)f$. Où, f est un facteur empirique sans dimension pour la force stationnaire.

Odar et Hamilton [16] ont suggéré une expression de force hydrodynamique étendue, comme le montre l'équation 6. Ils ont introduit deux coefficients supplémentaires pour tenir compte de la force de masse ajoutée et de la force d'histoire intégrale.

$$F = c_1(6\pi\alpha_p\mu V_p) + \Delta_A \left(m \frac{dV_p}{dt} \right) + \Delta_H (\alpha_p^2\sqrt{\pi\rho\mu} \int_0^t \frac{dV}{\sqrt{t-\tau}} d\tau) \dots \dots \dots (6)$$

Où c_l , Δ_A et Δ_H sont le coefficient de la force de traînée en régime permanent, de la force de la masse ajoutée et de la force histoire intégrale, comme indiqué dans l'équation 7.

$$\Delta_A = 1.05 - \frac{0.066}{0.12 + A_c^2} \quad \text{et} \quad \Delta_H = 2.88 + \frac{3.12}{(1 + A_c)^2} \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{Où,} \quad A_c = \frac{|V - V_p|^2}{\left(2\alpha_p \left|\frac{dV_p}{dt}\right|\right)}$$

Cependant, ces coefficients sont utiles dans le cas d'une sphère rigide partant d'une condition stationnaire (vitesse nulle) dans un fluide au repos.

Michaelides et al. [17] ont suggéré une expression développée pour l'équation du mouvement d'une particule solide dans un cadre de référence stationnaire, comme indiqué dans l'équation 8.

$$m_p \frac{dV_{pi}(t)}{dt} = (m_p - m)g_i + m \frac{DV_i(x_i, t)}{Dt} \Big|_{Y(t)} + F_i \dots \dots \dots (8)$$

où $V_{pi}(t)$ est la vitesse arbitraire du centre de la sphère visqueuse située à $Y(t)$, $V_i(x_i, t)$ est la vitesse du fluide et F_i est la force hydrodynamique exercée par le champ d'écoulement.

La force hydrodynamique totale sur une sphère visqueuse peut être simplifiée dans le domaine de Laplace (ou Fourier), comme indiqué dans l'équation 9.

$$F_i = -6\pi\alpha_p\mu[V_{pi}(s) - V(Y(t), s)] \cdot \left[\frac{\lambda^2}{9} + \lambda + 1 - \theta(\lambda, \kappa)\right] \dots \dots \dots (9)$$

Où :

$$\theta(\lambda, \kappa) = \frac{(\lambda + 1)^2[\lambda_p^3 - \lambda_p^2 \tanh \lambda_p - 2f(\lambda_p)]\kappa\sigma + f(\lambda_p)}{[1 + \sigma(\lambda + 3)][\lambda_p^3 - \lambda_p^2 \tanh \lambda_p - 2f(\lambda_p)]\kappa + (\lambda + 3)f(\lambda_p)} \dots \dots \dots (10)$$

$\kappa = \frac{\mu_p}{\mu}$ est le rapport entre les viscosités dynamiques et $\sigma = \mu/(\beta_s \alpha_p)$ est un paramètre sans dimension lié au coefficient de glissement, β_s .

Les paramètres λ et λ_p sont les deux échelles de longueur sans dimension du fluide et de la sphère visqueuse dans le domaine de Laplace.

$$\zeta = \sqrt{\frac{s\alpha_p^2}{v}} \quad \text{et} \quad \zeta_p = \sqrt{\frac{s\alpha_p^2}{v_p}} \dots \dots \dots (11)$$

Où s est la variable de transformation de Laplace.

Cependant, ces équations sont complexes et une solution analytique générale pour l'équation dans le domaine temporel est irréalisable. De plus, les équations précédentes ont été développées dans des conditions de fluage (très faible nombre de Reynolds). Par conséquent, Galindo et al. [18], Lovalenti et al. [19], d'autres chercheurs se sont efforcés d'obtenir une solution analytique pour l'équation du mouvement d'une particule solide sur une large plage de nombres de Reynolds.

L'équation 12 est une équation récemment développée et simplifiée pour le mouvement d'une particule solide en suspension dans le flux de fluide présentée dans le manuel Fluent [20].

$$\frac{dV_p}{dt} = F_{DT}(V - V_p) + \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} g + F_{add} \dots \dots \dots (12)$$

Comme le montre cette équation, le mouvement d'une particule solide individuelle est déterminé par trois termes de force indépendants. Le premier terme de force est une force de traînée induite. La force de traînée induite est la force aérodynamique due au mouvement d'une particule solide par rapport au mouvement d'un fluide. La force dépend de la taille et de la forme d'une particule solide ainsi que de la vitesse relative entre une particule solide et un écoulement de fluide. La force de traînée, $F_T(V - V_p)$, est la suivante:

$$F_T(V - V_p) = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} (V - V_p) = \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p d_p} |V - V_p| (V - V_p) C_T \dots \dots \dots (13)$$

où C_T est le coefficient de force de traînée

Le deuxième terme dans l'équation 12 est la force de flottabilité. La force est générée en raison de la différence entre la densité du fluide et celle du solide. La force finale agissant sur une particule solide est l'addition de toutes les forces par unité de masse d'une particule solide. Des recherches antérieures ont montré que les forces additionnelles dominantes agissant sur une particule solide peuvent être une force de masse, une force thermo phorétique, une force brownienne et des forces de portance pouvant être dominantes dans certaines conditions. Heureusement, que dans le cas des particules de sable en suspension dans l'air, ces forces supplémentaires peuvent être négligées.

La force qui affecte de manière dominante le mouvement des particules de sable est la force de traînée induite qui est provoquée par la différence de vitesse entre une particule solide et le flux de fluide environnant.

4.5 Modèle de rebond de particules lors de l'impact sur une surface solide

Une évaluation des caractéristiques de rebond des particules solides dans diverses conditions d'impact est importante car la condition de rebond détermine le mouvement d'une particule solide (amplitude et direction de la vitesse) après l'impact, ce qui a une incidence sur les conditions de ré-impact. Dans l'éolienne, les particules solides rebondies en surface d'une pale en rotation peuvent également avoir une incidence sur les autres pales en retrait, ce qui affecte les caractéristiques générales de l'érosion sur les pales d'éoliennes, ainsi que sur la concentration de phase solide dans les calculs.

De plus, la condition de rebond est utile pour évaluer l'échange d'énergie cinétique entre une particule solide et une surface lors d'une collision. L'échange d'énergie cinétique entre une particule solide et un métal est directement proportionnel à la quantité de matière retirée de la surface. Les caractéristiques de rebond sont utiles pour développer un modèle empirique des dommages causés par l'érosion. Les caractéristiques de rebond sont généralement représentées sous forme de taux de restitution, comme indiqué dans les équations de 14 à 17.

- Rapport de restitution de la vitesse:

$$e_V = \frac{V_{2M}}{V_1} \dots \dots \dots (14)$$

- Rapport de restitution de la vitesse tangentielle:

$$e_T = \frac{V_{T2M}}{V_{T1}} \dots \dots \dots (15)$$

- Rapport de restitution de la vitesse normale:

$$e_N = \frac{V_{N2M}}{V_{N1}} \dots \dots \dots (16)$$

- Rapport de restitution d'angle:

$$e_\beta = \frac{\beta_{2M}}{\beta_1} \dots \dots \dots (17)$$

Les rapports de restitution sont déterminés par la mesure des angles et des vitesses de particules solides avant et après la collision. La Figure 4.2, montre la géométrie statistique de l'impact et du rebond pour une seule particule impactant une surface cible.

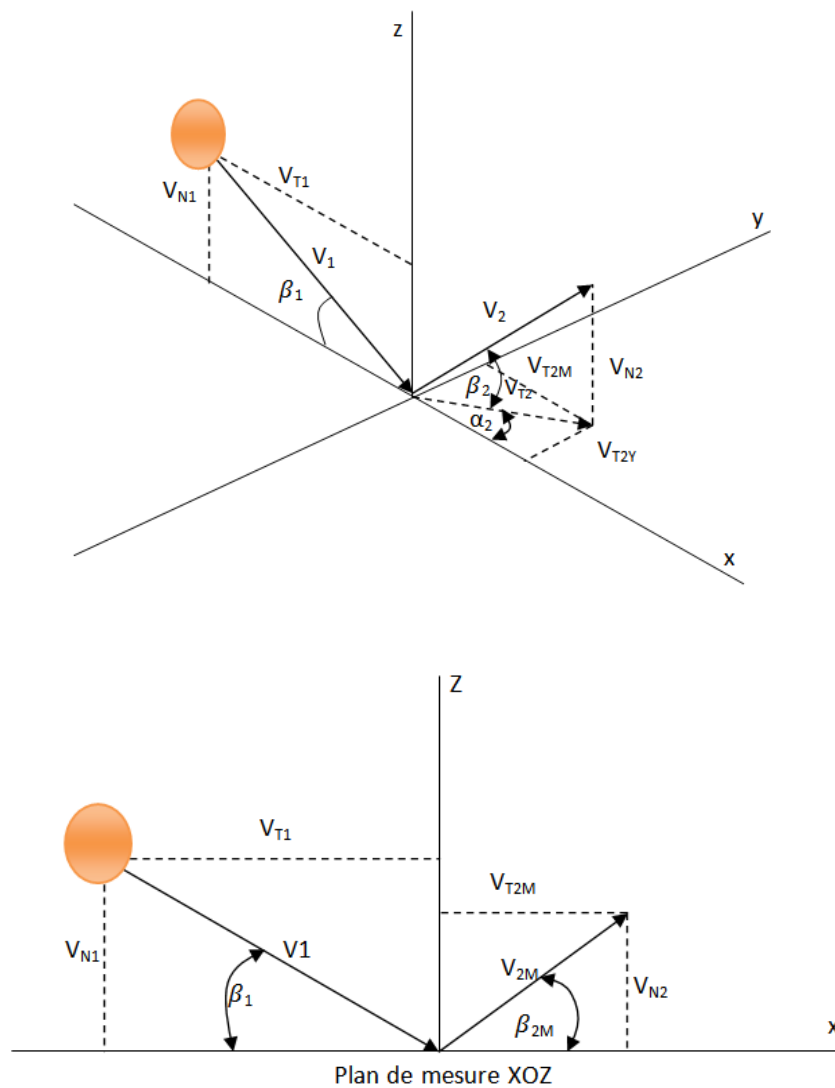


Figure 4.2 : Géométrie de rebond pour l'impact d'une seule particule solide [22].

La particule frappe la surface à la vitesse V_1 et à l'angle β_1 dans le plan xoz , et la particule rebondit à la vitesse V_2 et à l'angle β_2 . Dans les expériences courantes, on mesure la vitesse et l'angle des particules solides en contact avec la surface et ceux des particules solides rebondissant à partir de la surface sur le plan de mesure bidimensionnel parallèle au sens de circulation d'une particule solide se rapprochant de la surface et contenant la position d'impact.

En condition réelle, il existe une différence entre la condition mesurée (V_{2M} et β_{2M}) et la condition réelle (V_2 et β_2) des particules rebondies, car les particules rebondies ont une composante de vitesse hors-plan due à la rugosité aléatoire de surface et de forme irrégulière de particules solides. Ces différences peuvent être négligées selon les résultats numériques obtenus par Eroglu et al. [21].

Cependant, ces résultats n'incluaient pas l'effet de la taille des particules solides et du matériau d'une particule solide ni du type de la surface cible. Wakeman et al. [22] ont mené une étude analytique pour corriger un modèle de rebond avec des données mesurées. Ils ont analysé les conditions d'impact d'une particule rigide irrégulière impactant une surface cible rugueuse. Pour simplifier la théorie, la particule irrégulière est idéalisée en tant que particule sphérique dont le rayon est identique au rayon de la partie sphérique locale de la particule irrégulière comme le montre la figure 4.3.

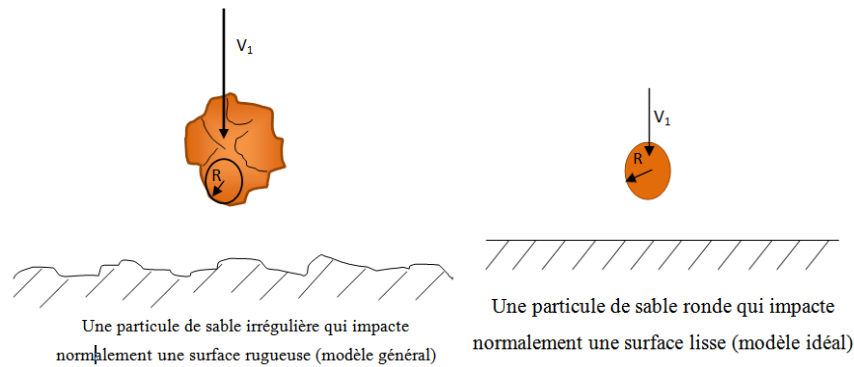


Fig.4.3 : Simplification d'un impact d'une particule de sable irrégulière [22].

Enfin, ils ont suggéré des équations empiriques généralisées du rapport de restitution à divers matériaux et à différentes températures.

$$e_N = 1 - 2.11E^{-2}\beta_1 + 1.28E^{-3}\beta_1^2 - 8.76\beta_1^3 \dots \dots \dots (18)$$

$$e_N = 0.95 - 4.46E^{-3}\beta_1 + 6.48E^{-6}\beta_1^3 \dots \dots \dots (19)$$

La modification de la qualité de surface, après son exposition à un sablage dépend de la nature du substrat (fragile, ductile, amortissement en matière visqueux-élastique, présence ou non de renfort, nature du renfort). Ainsi les paramètres les plus significatifs dans ce type de tests sont:

- La nature, la taille et la forme des particules de sable;
- Le temps d'exposition;
- La vitesse du flux des particules de sable;
- L'angle d'impact des particules de sable;
- La distance entre la buse et l'échantillon;
- Le diamètre de la buse.

4.6 Simulation de l'impact d'une particule de sable avec le substrat

Une simulation sous le logiciel ANSYS Fluent 15.0 a été effectuée (voir figures 4.4) pour faire un constat du comportement à l'usure érosive du composite avec renfort et d'évaluer l'influence de la taille de la particule de sable et la vitesse du jet sur le taux d'érosion.

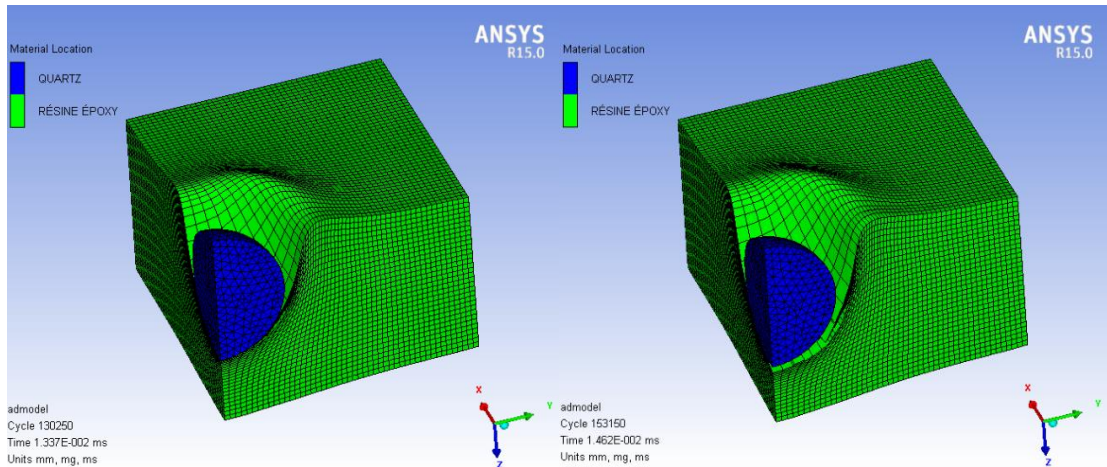


Fig. 4.4: Impact d'une particule de sable sur une surface en composite.

Mansouri et al. [27] ont établi une méthodologie qui combine entre la simulation et l'expérimentale pour prédire l'érosion (figure 4.5).

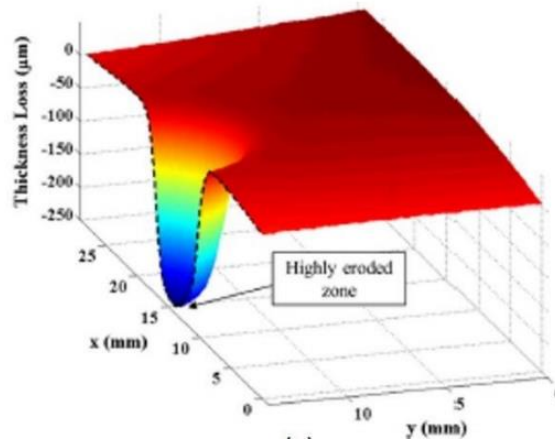


Fig. 4.5 : Forme érodée dû à un jet d'air chargé de grains de sable [27].

4.6.1 Schéma de prévision du suivi actuel des particules et des dommages causés par l'érosion

Un algorithme approprié de suivi des particules, ainsi que des modèles de rebond et d'érosion, sont nécessaires pour calculer les dommages causés par l'érosion sur les surfaces des matériaux. Cependant, les méthodologies antérieures de prévision de l'érosion dans les systèmes de turbomachines et les pales d'hélicoptère présentaient certaines limites lorsqu'elles étaient appliquées à la prévision de l'érosion sur les pales d'une éolienne.

Peu probable dans le cas d'écoulement interne tel qu'une turbomachine, des systèmes d'écoulement interne et des entrées d'air, dans le cas d'écoulement externe, il n'y a pas de condition limite d'admission définie pour la résolution du fluide écoulement et pour l'injection de particules solides dans le problème d'érosion des pales d'éolienne. De plus, les caractéristiques d'écoulement autour d'une pale d'éolienne 3D varient énormément dans la section d'envergure de la pale du rotor et selon les conditions de fonctionnement. Par conséquent, dans ce chapitre, on se contente de méthodologies pour le suivi des particules de sable et la prévision de l'érosion du sable sur les pales d'éolienne qu'offre le module Flow Simulation sous SolidWorks (figure 4.6).

Tout d'abord, un algorithme de suivi des particules solides lagrangien est adapté pour des conditions d'injection imposées. Ensuite, un modèle de rebond et d'érosion pour une particule de sable sphérique impactant le bord d'attaque, l'extrados, et l'intrados du profil NACA 4412 est proposé. Vu la difficulté de simuler un tel phénomène le défi consiste aussi à mettre en place un scénario réaliste pour prédire la forme de la surface du bord d'attaque après un laps de temps donné. Cependant, l'incertitude qui existe actuellement dans la caractérisation de la quantité de particules de sable pour un emplacement géographique donné rend difficile la prédiction de la forme du bord d'attaque soumise à l'érosion des particules.

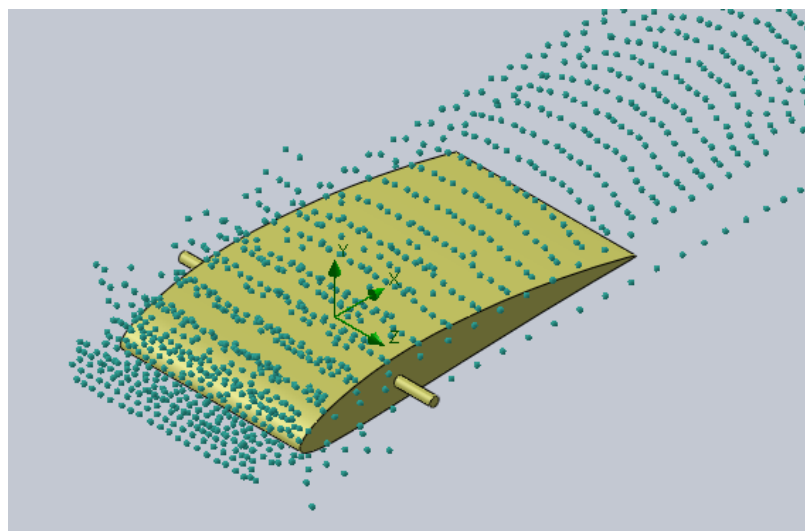


Fig. 4.6 : Profil NACA4412 soumis à l'injection par particules.

4.6.2 Condition d'injection au point de libération des particules

Lors de la détermination de la trajectoire des particules de sable, il faut définir une position de départ (position de libération) de chaque particule de sable ainsi que ses propriétés : vitesse initiale,

diamètre, densité et débit massique. Cet ensemble de données est défini comme «condition d'injection de particules».

Dans les études sur l'érosion des turbomachines, des systèmes à écoulement interne et des entrées d'air, la position d'injection des particules solides est définie à la limite d'entrée du fluide car toutes les particules libérées des positions d'injection affectent les caractéristiques d'érosion de ces systèmes. On peut supposer que les propriétés des particules solides libérées par les points d'injection sont fixes car ces systèmes fonctionnent généralement au point de conception. Il est également supposé que ces propriétés sont uniformes sur la section d'injection. Dans le cas de particules de sable en suspension dans l'air autour d'une pale d'éolienne en rotation, de nombreuses particules de sable se répercutent sur la pale du rotor, ce qui provoque certainement des dommages par érosion sur la pale du rotor et affecte les caractéristiques de l'érosion. Mais, il y a aussi d'autres particules de sable qui disparaissent sans collision avec la surface du rotor. Afin de prévoir des dommages précis dus à l'érosion sur la pale, toutes les particules de sable en suspension dans un domaine de calcul complet doivent être prises en compte.

Malgré qu'il est très difficile de déterminer le mouvement des particules de sable dans le domaine de calcul en raison du coût de calcul élevé, un nombre approprié de particules de sable prises en compte dans la détermination de leur trajectoire et de leurs conditions d'impact doit être choisi afin d'améliorer la précision du suivi et de la prévision de l'érosion des particules de sable dans un système éolien et de réduire les coûts de calcul.

Pour un calcul bidimensionnel de l'érosion du sable, le plan d'injection est généralement spécifié dans la condition aux limites d'entrée pour le calcul de l'écoulement de fluide, comme illustré à la figure 4.7. Dans les calculs tridimensionnels pour la prévision de l'érosion du sable sur des pales d'éolienne en rotation 3D, il n'existe pas de condition limite précise à l'entrée pour la résolution du flux de fluide; un plan spécifique à partir duquel les particules solides sont libérées est donc requis.

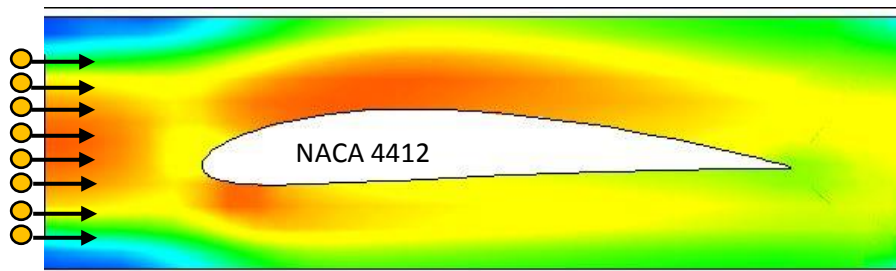


Fig.4.7 : Configuration bidimensionnel d'injection.

Les pales d'éolienne fonctionnent à des conditions d'écoulement non uniformes et non linéaires sur toute la longueur d'une pale. Les conditions d'écoulement autour de la pale varient également en fonction de l'angle d'azimut de la pale en rotation. Les propriétés des particules de sable libérées des

points d'injection ne sont donc pas uniformes dans le sens de l'étendue et par rapport à l'angle d'azimut. Par conséquent, les propriétés appropriées des particules de sable libérées doivent être sélectionnées et mises en œuvre afin de prévoir avec précision les trajectoires des particules et les dommages causés par l'érosion.

4.6.3 Type d'injection de particules solides

Le module Flow simulation dans Solidworks, est un résolveur utilisé dans cette étude pour le calcul de flux visqueux, un type d'injection de surface est mis en œuvre. Dans ce type d'injection, la position libérée des particules solides est définie en utilisant la grille de calcul déjà existante utilisée pour le calcul en flux uniquement (figure 4.8). Tous les points de la grille dans le domaine d'entrée sont utilisés pour l'injection de particules, comme illustré à la figure 4.8. L'injection de surface dépend fortement du système de grille de calcul. Le regroupement des points de la grille peut entraîner une distorsion des caractéristiques d'érosion prévues.

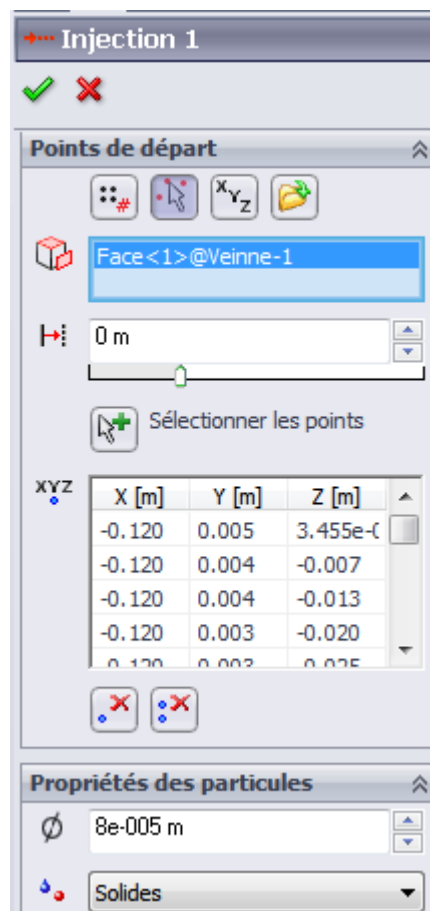


Fig. 4.8 : Types d'injections de particules solides sous Flow Simulation.

4.6.4 Les propriétés des particules solides libérées

Dans ce chapitre, certaines hypothèses sont appliquées afin de définir les conditions d'injection des particules de sable libérées, telles que la vitesse initiale, le diamètre, la densité et le débit massique. La première hypothèse est que toutes les particules solides sont libérées des points spécifiés (point d'injection). Deuxièmement, les propriétés des particules solides libérées du même point d'injection sont les mêmes. L'hypothèse finale est que les particules solides libérées du même point d'injection suivent la même trajectoire et les points d'injection sont répartis uniformément sur un plan spécifié, qui est placé aux conditions limites d'entrée pour la simulation de l'écoulement du fluide. Pour une prévision des dommages 2D dus à l'érosion du sable sur la pale, tous les points d'injection sont positionnés sur la ligne spécifiée qui est placée aux conditions aux limites d'entrée, comme indiqué dans la Figure 4.9.

Comme le montre cette figure, l'intervalle entre deux points d'injection adjacents est uniforme.

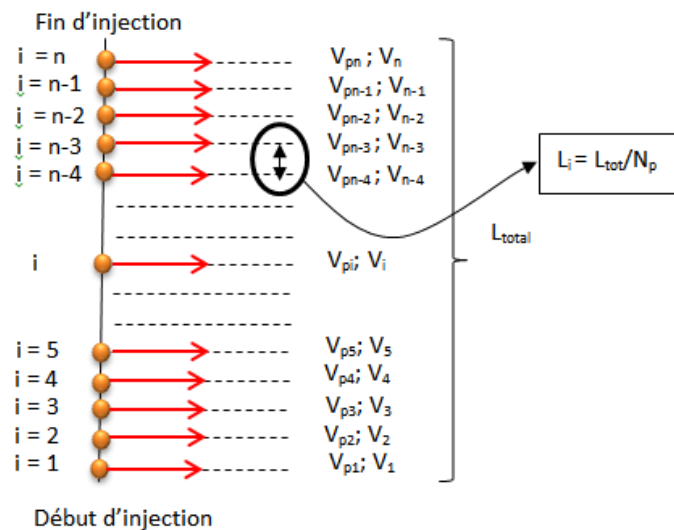


Fig. 4.9 : Alignement des particules de sable dans le domaine d'injection.

La vitesse libérée des particules de sable est définie comme identique à la vitesse du fluide au point d'injection ($V_{pi} = V_i$). Ensuite, la densité et le diamètre sont les propriétés d'une particule de sable et sont aussi des valeurs d'entrée. Enfin, le «débit massique» est défini comme la masse de particules solides par unité de temps libérée de la section d'injection, qui peut être calculée à l'aide des équations 20 à 23.

La masse du fluide qui passe par le $i^{ièm}$ section à la durée Δt :

$$M_i = \rho V_i L_i \Delta t \dots\dots\dots (20)$$

Où, M_{pi} et M_i sont la masse totale de particules solides et de fluide injectés à partir de la $i^{\text{ème}}$ section pendant le temps de fonctionnement (Δt) et Φ est la fraction massique de particules solides qui sont définies sur la base de données expérimentales comme indiqué dans l'équation 21.

$$\phi = \frac{M_{pi}}{M_{pi} + M_i} \dots \dots \dots (21)$$

- Masse de la particule solide passant dans la $i^{\text{ème}}$ section pendant le pas de temps (Δt)

$$M_{pi} = \frac{\phi}{1 - \phi} M_i = \frac{\phi}{1 - \phi} (\rho V_i L_i \Delta t) \dots \dots \dots (22)$$

- Débit massique d'une particule solide passant dans la $i^{\text{ème}}$ section du domaine d'injection

$$\tilde{m}_{pi} = \frac{M_{pi}}{\Delta t} = \frac{\phi}{1 - \phi} \frac{1}{\Delta t} (\rho V_i L_i \Delta t) = \frac{\phi}{1 - \phi} \tilde{m} \dots \dots \dots (23)$$

$$\tilde{m}_{pi} = \tilde{N}_{pi} \left(\frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \right) \dots \dots \dots (24)$$

Où \tilde{N}_{pi} est le nombre de particules de sable libéré de l' $i^{\text{ème}}$ point d'injection, ρ_p et D_p sont la densité et le diamètre de la particule de sable.

4.6.5 Taux d'érosion

Dans une expérience d'érosion générale, une masse connue de particules érosives est libérée de l'entrée dans une période de temps très longue (ou dans une période de temps relativement plus courte). La quantité exacte de masse enlevée (ou volume enlevé) de la surface cible est ensuite mesurée. Par conséquent, un modèle de prévision du taux d'érosion est développé à partir des dommages moyens mesurés pour une certaine condition d'impact, car il est très difficile de mesurer les dommages causés par l'érosion en raison d'un simple impact de particules solides sur la surface cible. De plus, il est également difficile de contrôler les conditions d'impact de chaque particule solide. La condition d'impact comprend la vitesse d'impact, l'angle d'impact, le débit massique, le diamètre et la densité d'une particule solide. Alors, la définition précédente du «taux d'érosion» détermine «la quantité de masse ou de volume retirée de la surface ciblée lorsque la masse unitaire de particules solides frappe la surface ciblée».

Taux d'érosion = (Taux de la masse du flux pour chaque impact de particule) x (masse ou volume de matière enlevée quand une unité de masse de particule de sable impact la cible).

$$ER = \sum_{i=1}^n \frac{M_{pi}}{\Delta t} f(\alpha_s, V_p, D_p)_i = \sum_{i=1}^n \tilde{m}_{pi} f(\alpha_s, V_p, D_p)_i \dots \dots \dots (25)$$

Où

$$\tilde{m}_{pi} = \frac{M_{pi}}{\Delta t} = \frac{\phi}{1 - \phi} \frac{M_i}{\Delta t} (\rho V L_i) = \frac{\phi}{1 - \phi} \tilde{m}_i \dots \dots \dots (26)$$

La fonction $f(\alpha_s, V_p, D_p)$ provient d'études expérimentales réalisées dans des souffleries où un type de particules de sable sélectionné est impacté sur une surface cible dans un environnement contrôlé. La fonction $f(\alpha_s, V_p, D_p)$ dépend fortement de l'angle d'impact AOA, de la vitesse d'impact V_{p1} et le diamètre des particules D_p . La Figure 4.10 montre la définition de l'angle d'impact AOA, impact la vitesse V_{p1} et la vitesse de rebond V_{p2} dans une interaction typique de particules de sable et de surface cible, y compris les rapports de restitution e_N et e_T .

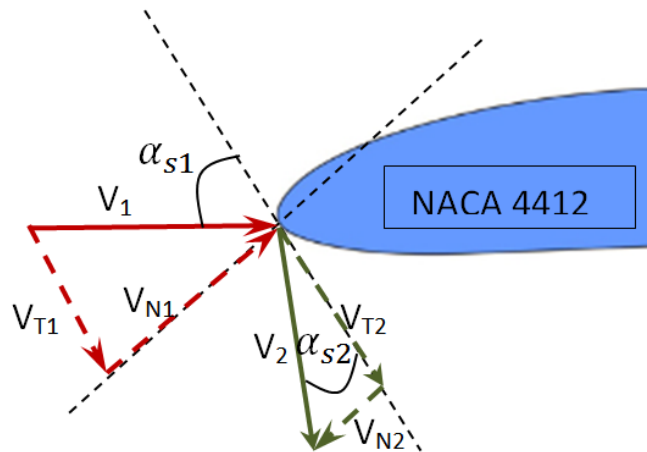


Figure 4.10. Impact et rebond sur le bord d'attaque.

Par conséquent, une définition plus complète de cette fonction $f(\alpha_s, V_p, D_p)$ peut être exprimée comme indiqué dans l'équation 27. Une valeur précise de $f(\alpha_s, V_p, D_p)$ peut être évaluée à partir de les trois fonctions appelées g_1 , g_2 et g_3 . Chacune de ces fonctions g est également exprimée en fonction de l'angle d'impact (α_s), de la vitesse d'impact V_{p1} et du diamètre de particule D_p , respectivement. Il existe généralement un coefficient c_e appelé coefficient de taux d'érosion.

$$f(\alpha_s, V_p, D_p) = c_e \cdot g_1(\alpha_s) \cdot g_2(V_{p1}) \cdot g_3(D_p) \dots \dots \dots (27)$$

Une équation empirique de l'érosion a été développée en utilisant les résultats expérimentaux de Bahadur et al. [23]. Dans cette campagne expérimentale, le taux d'érosion est défini comme «la perte de masse moyenne lorsqu'une unité de masse de particules solides est libérée à l'entrée». Basé sur les mêmes résultats expérimentaux, une fonction spécifique g_1 est développée en utilisant des courbes polynomiales à plusieurs sections en fonction de l'angle d'impact comme indiqué dans de l'équation 28 à l'équation 30.

$$g_1(\alpha_s) = 4.4E^{-2}\alpha_s + 1.5E^{-5}\alpha_s^2 - 1.2e^{-5}\alpha_s^3 \quad \text{pour } \alpha_s \leq 25^\circ \dots (28)$$

$$g_1(\alpha_s) = -6.5 + 8.2E^{-1}\alpha_s - 2.3E^{-2}\alpha_s^2 + 4.5E^{-4}\alpha_s^3 - 1.9E^{-6}\alpha_s^4$$

pour $25^\circ \leq \alpha_s \leq 53^\circ \dots (29)$

$$g_1(\alpha_s) = 1.1 - 5.4E^{-2}\alpha_s + 6.1E^{-4}\alpha_s^2 - 1.8E^{-6}\alpha_s^3 \quad \text{pour } 53^\circ \leq \alpha_s \leq 90^\circ \dots (30)$$

Les résultats expérimentaux en fonction du diamètre d'une particule solide [26], montrent que la fonction du taux d'érosion pour le diamètre d'une particule solide présente une seule section. Cette section pour un diamètre de particule compris entre 40µm et 80µm montre que le taux d'érosion est proportionnel au diamètre des particules, mais que le taux de changement diminue avec le diamètre des particules.

L'équation 31 est une fonction spécifique pour le diamètre des particules solides :

$$g_3 = 3.35E^{-2} + 1.769E^{-3}D_p - 0.605E^{-5}D_p^2 \quad \text{pour } 40\mu m < D_p \leq 80\mu m \dots (31)$$

Enfin, l'équation 32 est la dernière forme permettant de prédire le taux d'érosion du bord d'attaque.

• La forme finale de l'équation d'érosion est:

$$ER = 0.1(V_p)^2 \cdot g_1(\alpha_s) \cdot g_3(D_p) \quad \text{en } \left[\frac{mg}{g} \right] \dots (32)$$

Les résultats obtenus par la simulation pendant 2 secondes sous Solidworks sont représentés dans le tableau 4.1 ci-dessous :

Tableau 4.1 : Résultats obtenus par simulation.

Paramètre (local)	Minimum	Maximum	Moyenne	Superficie [m^2]
Taux d'Erosion de Masse [kg/(s*m^2)]	1,30549E-23	0,000675231	8,74151E-06	0,03821368

Il faut signaler que les valeurs des taux d'érosion sont celui de la surface total du profile NACA4412 qui vaut 38213,68 mm² et pas seulement le bord d'attaque.

4.7 Simulation numérique du profil lisse et du profil rugueux

Il est souhaitable de reproduire le test aérodynamique en soufflerie d'un profil aérodynamique effectué par Swalwell et Sheridan à différents angles d'attaque [24], à l'aide de calculs informatisés de la dynamique des fluides. Le problème est supposé être une situation à deux dimensions et résolu par des méthodes numériques à l'aide du logiciel ANSYS Fluent 15.0.

Si on veut modéliser un écoulement autour d'un profil dans lequel les effets de rugosité de paroi sont considérés comme étant significatifs, alors on peut inclure les effets de rugosité de paroi via la modification de la loi du mur pour la rugosité.

4.7.1 Loi de la paroi rugueuse

Des expériences sur des conduites, des pipes et la tuyauterie rugueuse indiquent que la distribution moyenne de la vitesse près des murs rugueux, lorsqu'elle est tracée à l'échelle semi-logarithmique habituelle, a la même pente ($1/\kappa$) mais une interception différente (constante d'addition B dans la loi de log). Ainsi, la loi de la paroi pour la vitesse moyenne modifiée pour la rugosité a la forme :

$$\frac{u_p u^+}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho u^+ y_p}{\mu} \right) - \Delta B \dots \dots \dots (33)$$

Où $u^+ = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$ et $\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln f_r$.

f_r est une fonction de rugosité qui quantifie le décalage de l'interception dû aux effets de rugosité. B dépend en général du type (sable, rivets, filets, nervures, treillis, etc.) et de la taille de la rugosité. Il n'y a pas de fonction de rugosité universelle valable pour tous les types de rugosité. Pour une rugosité de grain de sable et des types similaires d'éléments de rugosité uniforme, il a été trouvé que B était bien corrélé à la hauteur de rugosité non dimensionnelle, $K_s^+ = \rho K_s u^+ / \mu$, K_s est la hauteur de rugosité physique et $u^+ = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$.

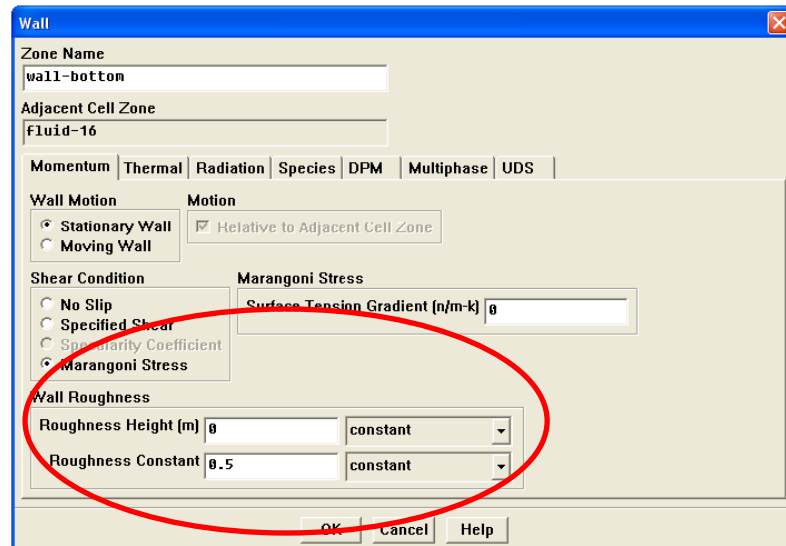


Fig. 4.11: Menu pour injecter ou modifier les paramètres de la rugosité.

4.7.2 Stratégie de solution

Trouver une solution analytique des équations aux dérivées partielles qui régissent l'écoulement des fluides autour de géométries complexes est une tâche impossible à réaliser. En général, ces problèmes sont résolus au moyen de méthodes d'analyse numérique. Dans les solutions de type numérique, le domaine continu est remplacé par un domaine discret utilisant un maillage. Il ne s'agit donc que d'une approximation de la solution exacte. Cependant, en traitant de la solution pour un nombre fini de points discrets, la méthode est simplifiée en résolvant un système d'équations algébriques.

La méthode pour discrétiser les équations différentielles dans ANSYS Fluent 15.0 est la méthode bien connue des volumes finis. Ceci considère un compromis des propriétés comme masse, quantité de mouvement, énergie, etc., dans un petit volume fini compris dans le domaine de calcul.

4.7.3 Détails sur la discrétisation

4.7.3.1 Génération de la maille.

La construction de la géométrie du problème en 2D et 3D ont été réalisées sous Solidworks 2013 après avoir généré les coordonnées du profil NACA 4412 sous Excel (voir Annexe A). Ensuite l'esquisse construite du profil avec son extrusion en 3D ont été exportées vers l'ANSYS Fluent sous forme d'un fichier IGS. Concernant l'étude en 2D la géométrie a été introduite par le biais du module DM du logiciel afin de simuler la forme réelle de la section aérodynamique. Même chose pour

l'introduction des dimensions du domaine du problème et les conditions aux limites à l'aide des modules disponibles en Fluent. La condition d'entrée du flux est à une distance égale à 4 fois la longueur de la corde mesurée à partir du centre du profil, de sorte que le courant atteigne la condition de flux pleinement développée avant de s'approcher de la section de l'aile.

Une des conditions de sortie disponibles dans Fluent et utilisée dans la plupart des situations d'écoulement de fluide incompressible, Outflow, impose la restriction d'écoulement pleinement développée dans la sortie, c'est-à-dire un flux tel que la diffusion de toutes les variables du flux dans le sens de la sortie soit nulle. Pour que cela se produise dans une situation où un long sillage est prévu, une distance égale à 8 fois la longueur de la corde. Les murs supérieur et inférieur sont à une distance égale à 3 fois la longueur de la corde (l_c) afin de ne pas affecter le comportement de l'écoulement près du profil. Le domaine a été divisé en 12 faces selon la configuration illustrée à la figure 4.12.

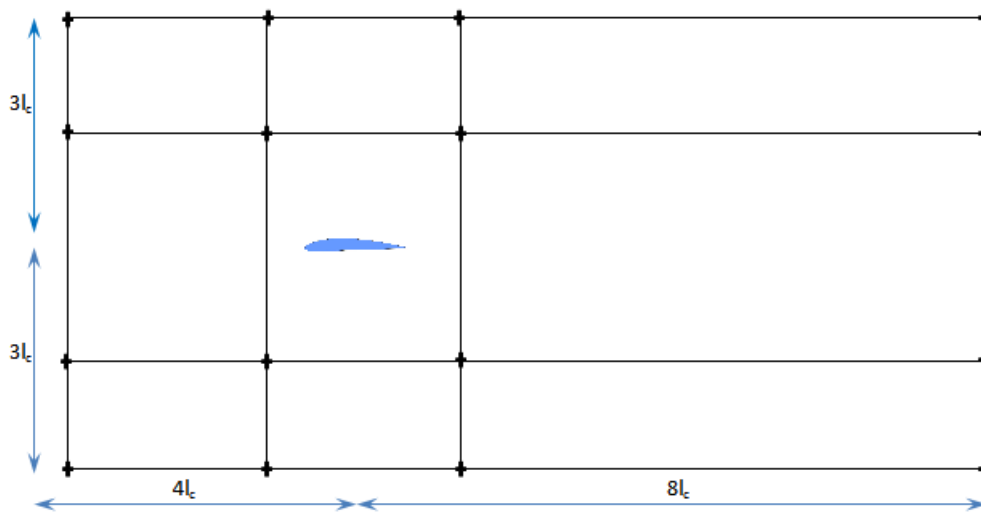


Fig. 4.12. Dimensions du domaine et distribution des faces pour une corde $l_c = 0,175$ (m).

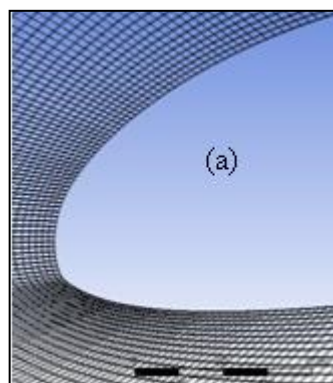


Fig.4.13 : Raffinage au voisinage du bord d'attaque du profil.

Un type de maillage quadrilatéral a été sélectionné et environ 30600 nœuds ont été générés. Les détails concernant le raffinement au voisinage du profil sont présentés dans les figures 4.13.

C'est la configuration typique utilisée, bien que, pour certains angles d'attaque, de légères modifications aient été apportées pour éviter toute déformation du maillage au bord de la pale.

La forte densité de mailles concentrée dans les contours de la voilure est due à certaines conditions imposées par Fluent pour décrire correctement le comportement de la couche limite.

4.7.3.2 Modèle mathématique

Lors d'une première tentative, la dynamique des fluides a été simulée à l'aide du modèle potentiel, mais étant donné les conditions irrationnelles du modèle, cela a donné des résultats acceptables jusqu'à un angle d'attaque égal à 17.5° . Après cela, il était impossible d'initialiser le problème car il devenait très divergent.

Le modèle laminaire montre un comportement instable à de faibles angles d'attaque ainsi qu'une séparation prématurée de la couche limite près du bord d'attaque. Fluent ne prend pas en charge les paramètres de rugosité dans le mur lorsque le modèle laminaire est utilisé, ce qui peut être à l'origine de la séparation aux faibles angles d'attaque. Les expériences montrent que, pour certaines valeurs de rugosité de paroi, la couche limite change de régime d'écoulement de laminaire à turbulent avec un déplacement en aval du point de séparation en raison de la quantité de mouvement plus importante qu'une couche limite turbulente transportée. Théoriquement, les équations de Navier Stokes peuvent simuler directement la turbulence, mais cela impliquerait une capacité de traitement étendue. Kaneda et al. dans leur publication ont réalisé une simulation numérique directe de la turbulence et pour cela, ils ont utilisé 40963 points de maillage, ce qui correspond à 0.5 téra octets de mémoire [25]. La prise en compte de la rugosité dans le mur en écoulement laminaire conduirait à cette condition et, de ce fait, le modèle est limité pour cette situation. Ce qui précède n'est que l'une des explications possibles pour clarifier la raison de la non-adaptation du modèle dans cette situation de flux.

Aux petits angles d'attaque, le modèle turbulent et ses variations ne s'adaptent pas avec une grande précision aux données expérimentales. Bien que la séparation ne soit pas visualisée, les valeurs de portance moyennes sont inférieures à celles réelles. Au contraire, la force de traînée dépasse de manière excessive les valeurs moyennes enregistrées. Pour les angles d'attaque élevés, le modèle turbulent se comporte de manière acceptable.

Comme indiqué dans les sections précédentes, il existe une incertitude dans la zone de transition. De plus, les informations sur les caractéristiques de l'essai expérimental ne sont pas assez détaillées pour modéliser avec précision cette région.

En ce qui concerne la simulation aux petits angles d'attaque, seules les informations relatives aux amplitudes moyennes de la portance et de la traînée sont disponibles, ce qui ne garantit pas que l'évolution temporelle du phénomène soit fidèlement modélisée par le modèle potentiel.

4.7.3.3 Simulation dans les petits angles d'attaque

Le modèle potentiel sera utilisé pour simuler la dynamique de fluides à de faibles angles d'attaque. Etant donné que dans les situations d'écoulements externes, les effets visqueux sont appréciables principalement dans la couche limite, en supposant qu'un modèle potentiel soit une pratique acceptable, toutefois, étant donné que la force de traînée aux petits angles est principalement due aux effets visqueux, toutes les informations obtenues à cet égard, ne seront pas considérées comme valides.

Pour résoudre le problème, une formulation séparée est définie dans un schéma implicite. L'évolution dans le temps est calculée par une approximation du second ordre.

Si, $u = u(x, y, t)$ et $v = v(x, y, t)$ sont les composantes de la vitesse dans les directions x et y , respectivement, et que $p = p(x, y, t)$ est la pression, alors les équations qui régissent l'écoulement bidimensionnel d'un fluide non visqueux et incompressible sont:

Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (34)$$

Équations d'Euler :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \dots \dots \dots (35)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \dots \dots \dots (36)$$

4.7.3.4 Conditions initiales

L'objectif principal étant d'analyser le comportement du flux lorsqu'il atteint un régime périodique stable, les conditions initiales n'influenceront pas la solution finale après un long laps de temps.

En général, pour toutes les situations analysées, à $t = 0$, toutes les variables auront une valeur égale à ceux imposées à l'entrée.

4.7.3.5 Conditions de contour

Le flux est caractérisé par une vitesse de 10 m/s et une viscosité de l'air dans les conditions normales et que le centre du profil soit l'origine du repère dans le plan XOY (voir figure 4.14).

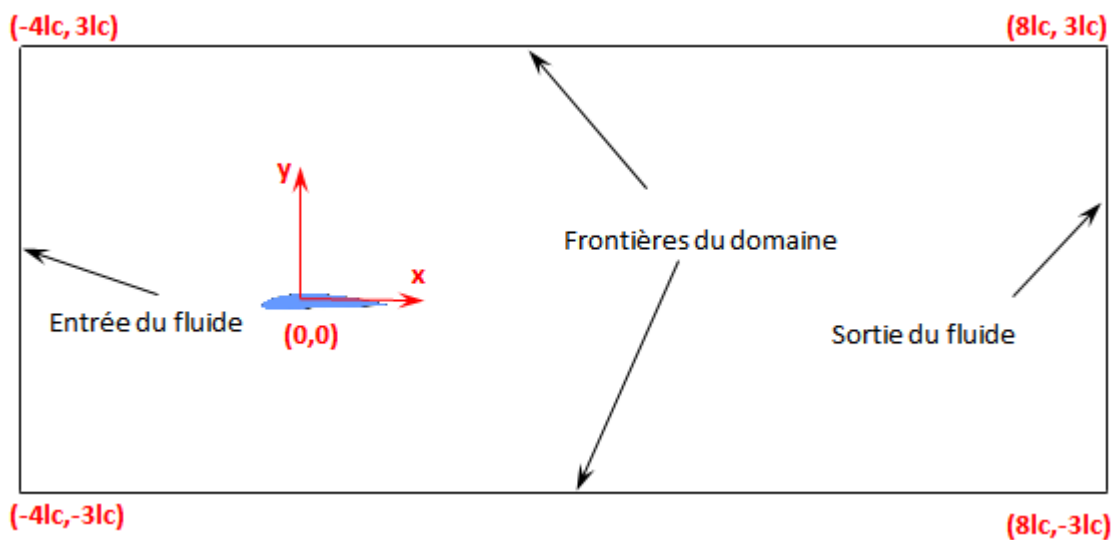


Fig. 4.14 : Domaine du problème (Longueur de corde $l_c = 0,175\text{m}$).

a- Entrée de flux :

$$\begin{aligned} u(-4l_c, y, t) &= U_\infty & , -3l_c < y < 3l_c, & 0 < t < \infty \\ v(-4l_c, y, t) &= 0 & , -3l_c < y < 3l_c, & 0 < t < \infty \end{aligned}$$

b- Frontières inférieure et supérieure :

$$\begin{aligned} v(x, \pm 3l_c, t) &= 0 & , -4l_c < x < 8l_c, & 0 < t < \infty \\ \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{(x, \pm 3l_c, t)} &= 0 & , -4l_c < x < 8l_c, & 0 < t < \infty \end{aligned}$$

Sortie du flux :

$$v(8l_c, y, t) = 0 \quad , -3l_c < y < 3l_c , \quad 0 < t < \infty$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{(8l_c, y, t)} = 0 \quad , -3l_c < x < 3l_c , \quad 0 < t < \infty$$

4.7.3.6 Discrétisation

Les méthodes de discrétisation disponible dans Fluent ne concernent que les situations de flux simples. Compte tenu de la complexité de la configuration de l'écoulement au bord de sortie du profil, des formulations de second ordre seront utilisées.

Fluent suggère d'utiliser l'algorithme PISO (pression implicite avec fractionnement des opérateurs) pour le couplage pression-vitesse dans des situations transitoires.

La méthode de discrétisation utilisée est résumée dans le tableau 3.1.

Tableau 4.2 : Discrétisation sous Fluent.

Equation	Forme
Pression	Seconde ordre
Couplage pression-vitesse	Piso
Quantité de mouvement	Seconde ordre

a- Facteurs de relaxation

Dans la plupart des situations analysées, les valeurs suggérées par Fluent pour les facteurs de relaxation ont été utilisées. Toutefois, pour des angles d'attaque supérieurs à 10°, des facteurs mineurs facilitent la convergence lors des premières itérations.

Les facteurs utilisés sont résumés dans le tableau 4.3 suivant :

Tableau 4.3: Facteurs de relaxation.

Variable	Facteurs de relaxation
Pression	0.3
Densité	1
Force	1
Quantité de mouvement	0.7

b- Critères de convergence

Il a été mentionné précédemment que la méthode de discrétisation implique qu'un système d'équations différentielles soit remplacé par un autre équivalent, mais algébriquement. En raison du nombre d'équations des systèmes résultants, du fait qu'elles sont de type non linéaire ($\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}$), une stratégie itérative (algorithme de Gauss Seidel) est requise pour l'inversion de la matrice de coefficients du système d'équations.

La méthode itérative est basée sur un critère de convergence lié à la précision requise de la solution. Par conséquent, une sélection adéquate de ces valeurs est importante. Le tableau 4.4 montre les valeurs utilisées dans les simulations.

Tableau 4.4 : Critères de convergence.

Equation	Critère de convergence
Continuité	10^{-3}
Quantité de mouvement en x	10^{-4}
Quantité de mouvement en y	10^{-4}

c- Paramètres d'itération

Dans les 10^3 premières itérations, pour les simulations aux angles d'attaque dans une plage de 0° à $7,5^\circ$, un pas de temps égal à 10^{-7} s est suffisant. Ensuite, il est possible d'augmenter progressivement jusqu'à un maximum autorisé de 10^{-5} . Compte tenu de la grande instabilité numérique, un Δt égal à 10^{-4} s assure la divergence de la solution en environ 10^3 itérations.

Pour des angles d'attaque compris entre $7,5$ et $17,5^\circ$, le pas de temps dans les premières itérations peut être même de l'ordre de 10^{-13} sous les angles les plus grands. La valeur maximale autorisée pour Δt est de 10^{-6} s.

4.8 Résultats

Les distributions de pression et de vitesse peuvent être affichées une fois les simulations terminées. En général, les figures montrent que la pression sur la surface inférieure du NACA4412 qui est supérieure à la surface supérieure pour presque tous les angles d'attaques. Il montre également que la pression statique est maximale au bout du bord d'attaque et qui vaut 58.1 Pa lorsque l'AOA est à 0° (figure 4.15), puis on constate qu'elle diminue et se déplace au-dessous de la zone de bord d'attaque en fonction de l'augmentation de l'AOA. La pression statique minimale est répartie sur la surface supérieure. Comme le montre la figure 4.16, le flux d'air est fixé à la pale et il est évident

que l'air passe par la surface supérieure, qui est plus rapide que la surface inférieure et la vitesse maximale de l'air est de 13.34 m / s.

Section NACA 4412 (lisse), α à 0°

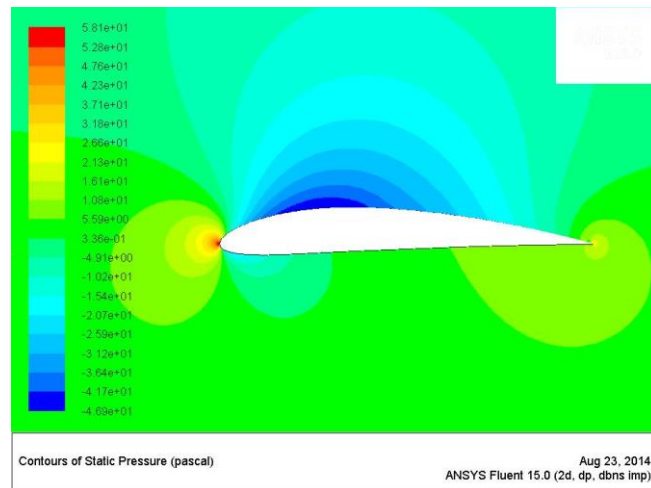


Fig.4.15 : Contours de la pression statique d'un profil NACA4412 lisse à $\alpha = 0^\circ$.

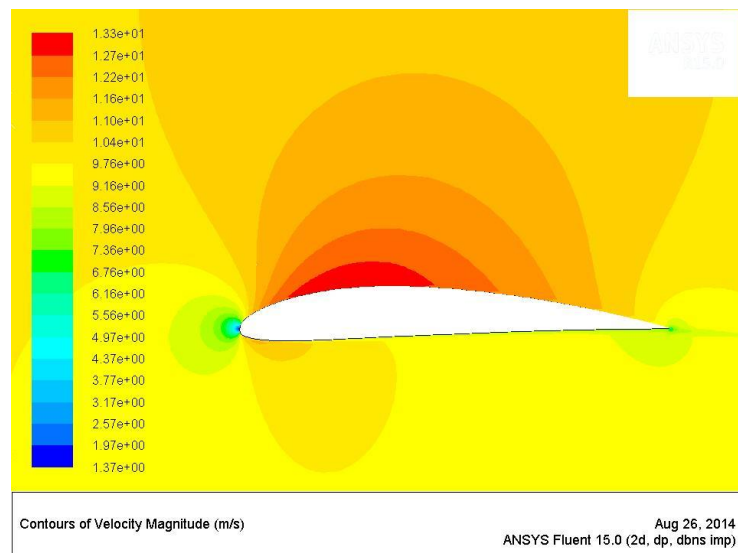


Fig.4.16 : Contours de la vitesse d'un profil NACA4412 lisse à $\alpha = 0^\circ$.

Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 0^\circ$

En comparant les figures 4.15 et 4.17, on constate une légère baisse dans la pression statique et cela est dû à la dégradation du bord d'attaque à cause du sablage du profile pendant 40s. Avec un profile lisse ($Ra=0.94$) la pression statique maximale vaut 58.1 Pa il devient après sablage ($Ra = 1.19$) 57.6 Pa. Même chose avec la vitesse maximale qui devient 13.7 m/s après avoir été 13.3 m/s.

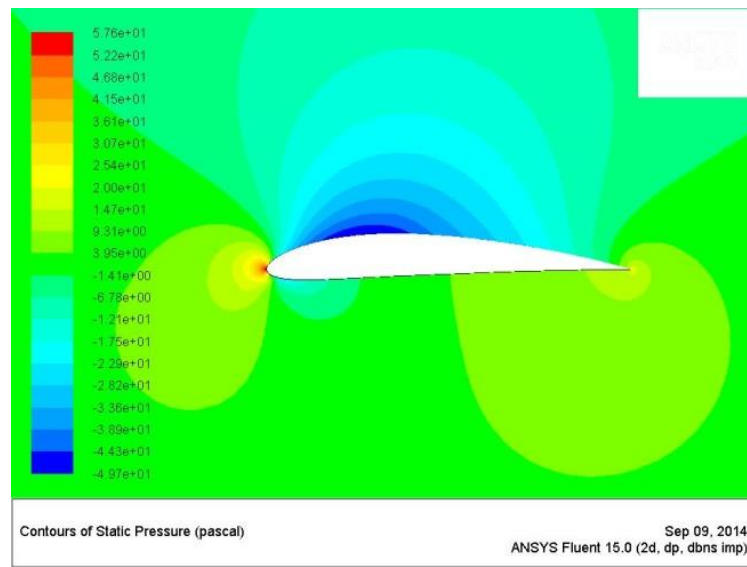


Fig.4.17: Contours de pression statique d'un profil NACA4412 rugueux à $\alpha = 0^\circ$.

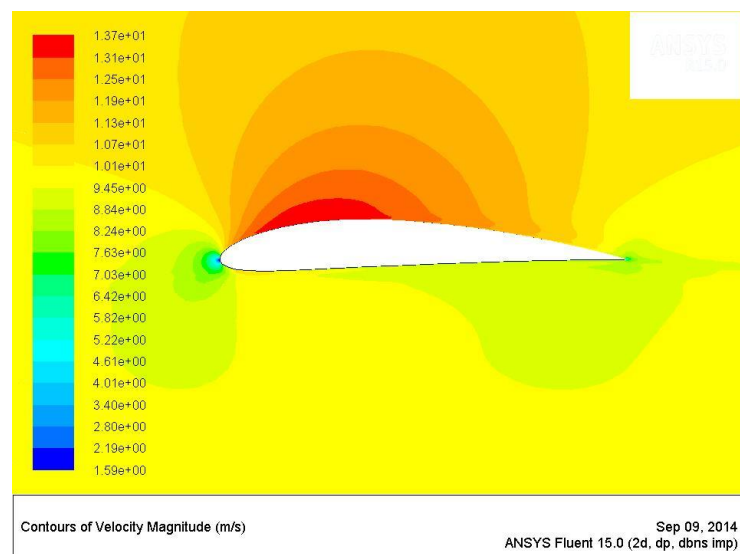


Fig.4.18: Contours de la vitesse d'un profil NACA4412 rugueux à $\alpha = 0^\circ$.

4.8.1 La courbe du coefficient de pression C_p

Les performances aérodynamiques des sections des profils peuvent être étudiées plus facilement en se référant à la distribution de la pression sur ses surfaces. Cette distribution est généralement exprimée en termes de coefficient de pression.

Le coefficient C_p est un nombre adimensionnel qui décrit la pression relative à travers un champ d'écoulement. Il est défini par la formule suivante :

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$$

Où P : Pression statique locale

P_∞ : Pression statique de l'écoulement non perturbé.

Les graphiques suivants (de Figure 4.19 à Figure 4.28) indiquent comment le coefficient de pression varie en fonction de la position de la corde sur les surfaces supérieure et inférieure du profil.

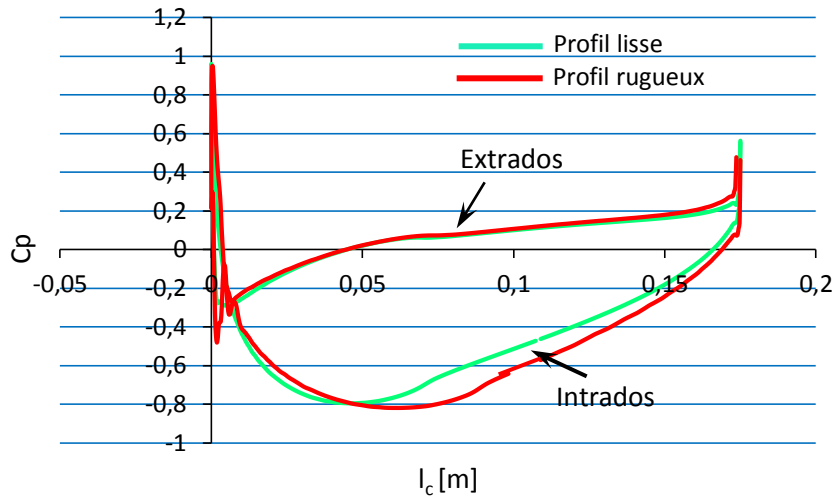


Fig. 4.19 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $AOA=0^\circ$.

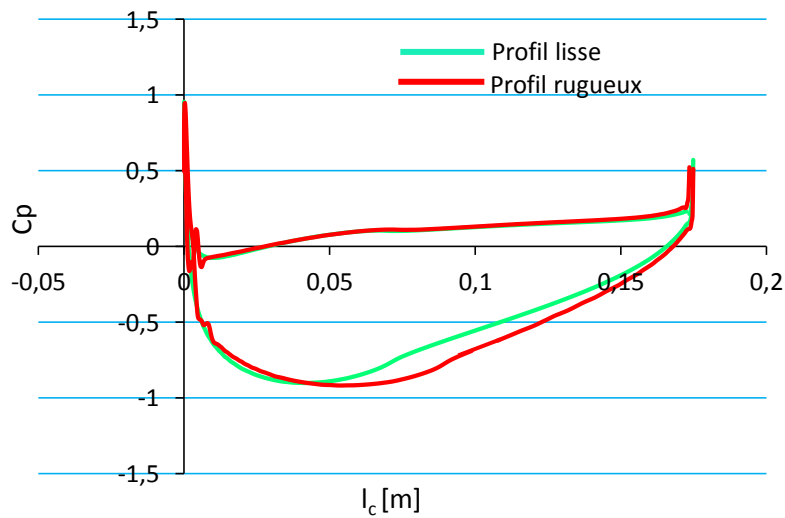


Fig. 4.20 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $AOA=2^\circ$.

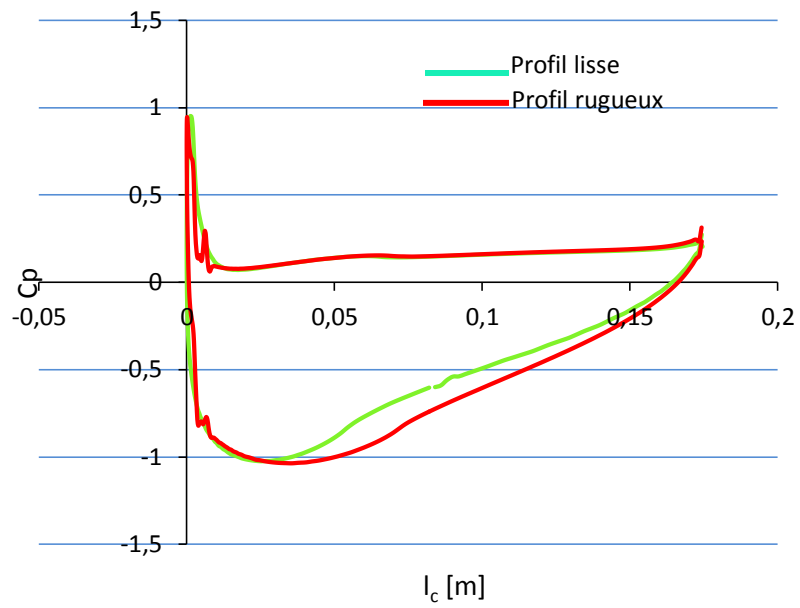


Fig. 4.21 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profile rugueux à $AOA=4^\circ$.

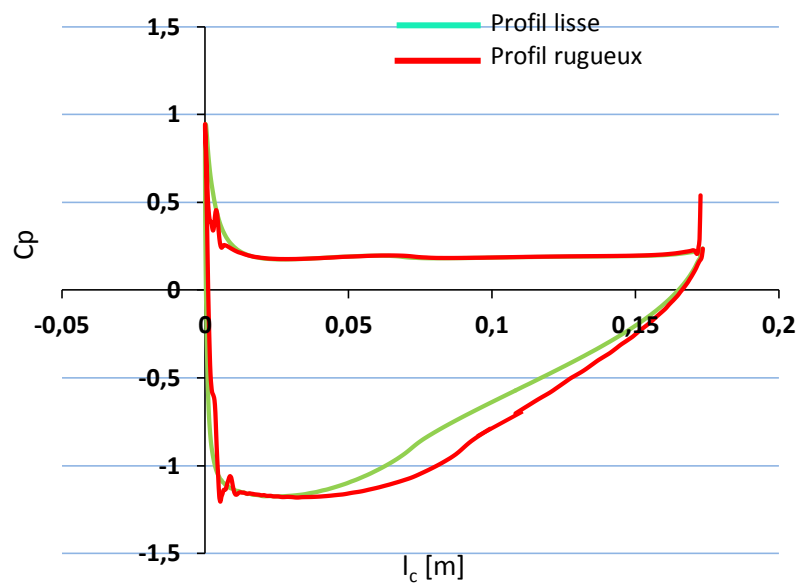


Fig. 4.22 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profile rugueux à $AOA=6^\circ$.

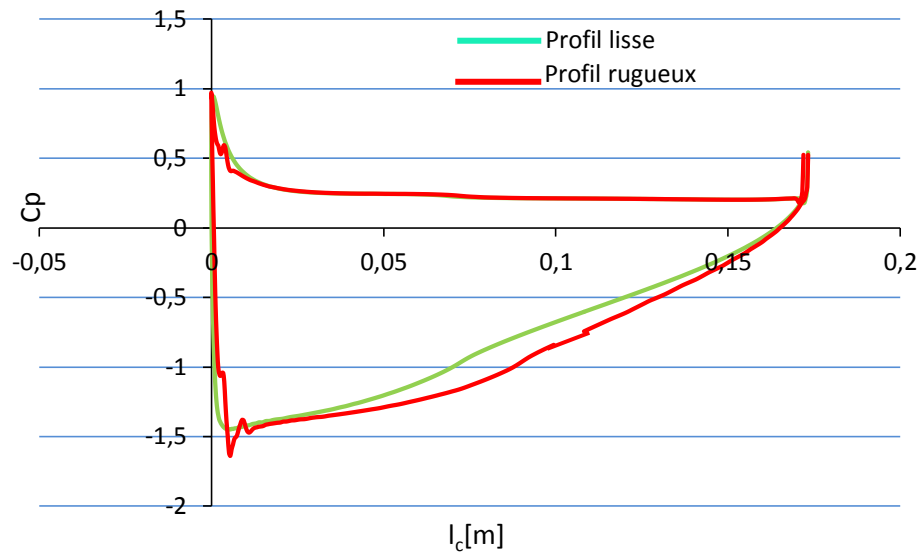


Fig. 4.23 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $AOA= 8^\circ$.

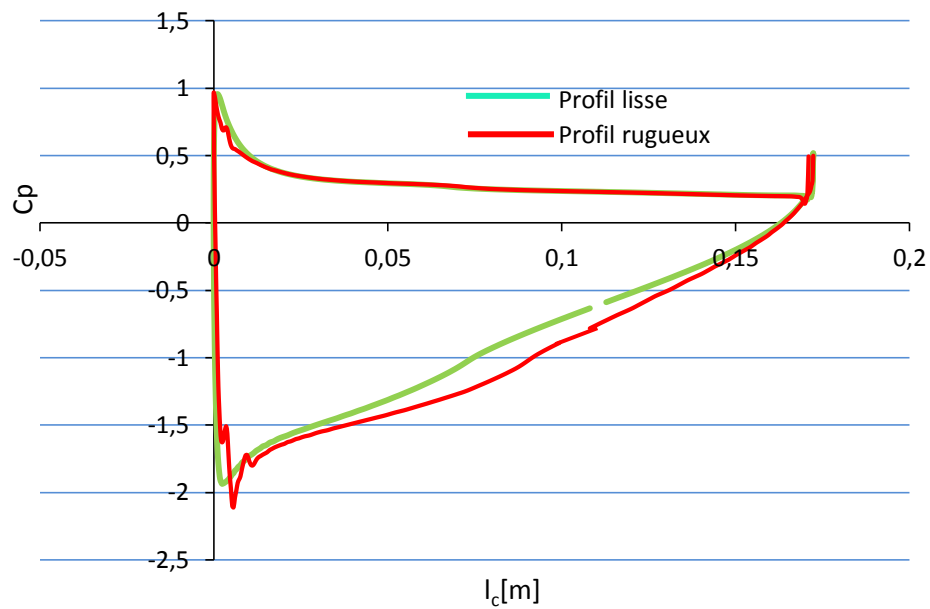


Fig. 4.24 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $AOA= 10^\circ$.

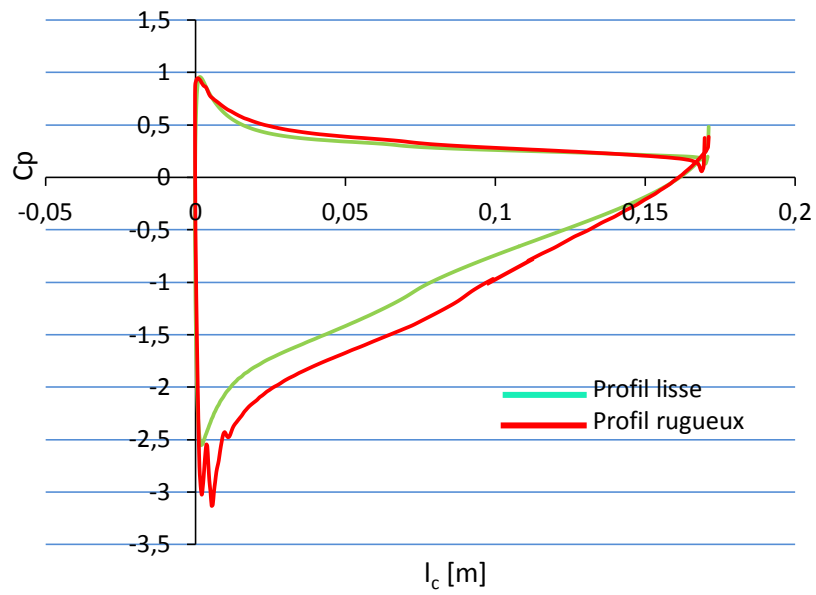


Fig. 4.25 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $\text{AOA} = 13^\circ$.

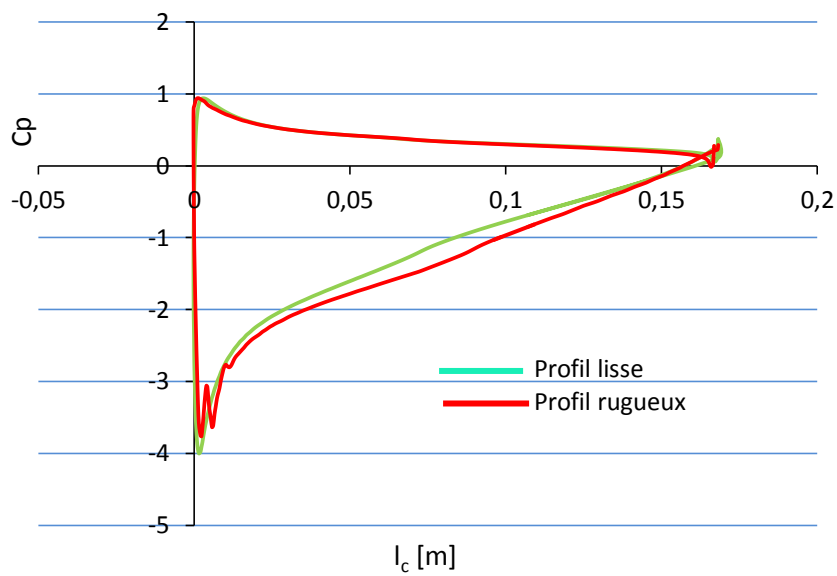


Fig. 4.26 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $\text{AOA} = 16^\circ$.

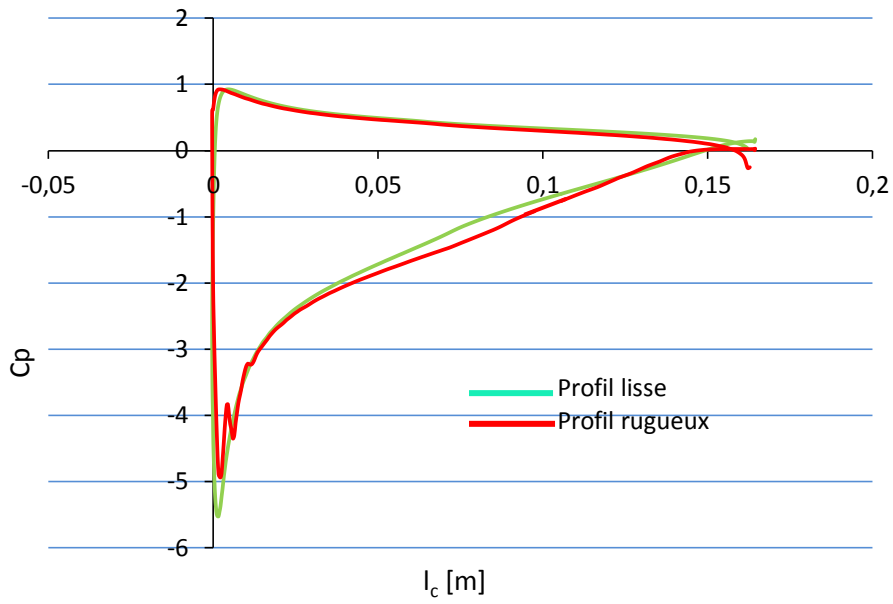


Fig. 4.27 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $\text{AOA} = 20^\circ$.

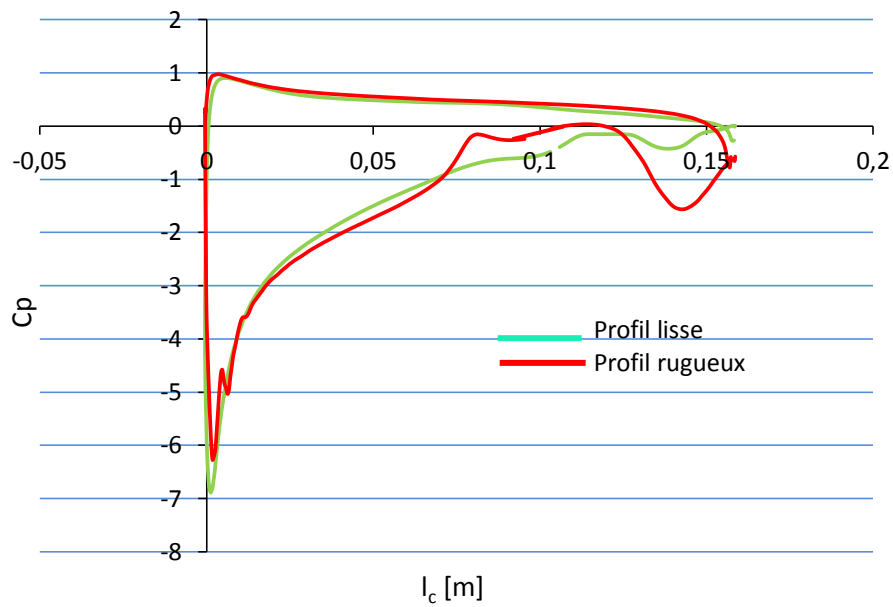


Fig. 4.28 : Distribution du coefficient de pression pour le profil lisse et le profil rugueux à $\text{AOA} = 25^\circ$.

4.9 Conclusion

Le comportement d'un écoulement de fluide autour d'un profil aérodynamique exposé un flux d'air libre pour différents angles d'attaque a été représenté. Les résultats de la modélisation montrent en général une bonne approche qualitative dans certains paramètres de l'étude (courbes des coefficients de pression, des vitesses et des pressions statiques).

Les petites perturbations que subit l'écoulement à cause de la rugosité de surface du profil sont amplifiées. L'écoulement devient instable et aléatoire. Sur la totalité de la plage d'angle d'incidence (de 0° à 25°), on voit que la partie supérieure de la courbe de la distribution du coefficient (l'extrados du profil) est presque la même le long de la corde sauf pour la pointe du bord d'attaque qui enregistre une faible baisse de la pression. Par contre, il y a de nette différence entre la courbe de coefficients de pression pour un profil lisse et un profil rugueux sur l'intrados et cela s'explique par l'influence de l'état de surface sur l'écoulement de l'air.

Bibliographie

- [1]. I. Finnie, "Some observations on the Erosion of Ductile Metals 1972, Wear, Vol. 19, pp. 81-90.
- [2] I. M. Hutchings, R. E. Winter, J. E. Field, « Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles », The Proceedings of the Royal Society, Volume 348 Issue 1654, March 1976.
- [3] G.P. Tilly, W. Sage, « The interaction of particle and material behaviour in erosion processes », Wear, Volume 16, Issue 6, Dec. 1970, pp.: 447-465
- [4]. J. G. Bitter, "A Study of Erosion Phenomena", Wear, Vol. 6, 1963, pp. 5-2.
- [5] J. D. Gibbings, "Dimensional Analysis of Wear by Particle Impact in Fluid Flow", Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 13, 4, 1972.
- [6] M. T. Benchaïta, "Erosion of Metal Pipe By Solid Particles Entrained In a Liquid", Oct. 1979, Ph.D. thesis.
- [7] www.motionelements.com/electric-power-wind-turbines-in-desert-sand-storm-aerial.html.
- [8] T. Anderson, R. Jackson, «A Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds.». Industrial Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 6, 1967, pp. 527-539.
- [9] F. Durst, D. Milojevic, B. Schonung, "Eulerian and Lagrangian prediction of particulate two-phase flows: a numerical study.", Appl. Math. Modelling, Vol. 8, 1984, pp. 101-115.
- [10]. D. A. Drew, "Two-Phase Flows : Constitutive Equations for Lift and Brownian Motion and Some Basic Flows.", Archive for Rational Mechanics, Vol. 62, Feb. 1976, pp. 149-163.
- [11]. Boussinesq. "Sur la Résistance qu' Oppose un Liquide Indéfini en Repos.". Comptes Rendu, Acad. Sci., Vol. 100, Paris : s.n., 1885 pp. 935-937.
- [12]. A. B. Basset, "On the Motion of a sphere in a Viscous Liquid". Transactions of the Royal Society of London, Vol. 179, 1888, pp. 43-63.
- [13]. E. E. Michaelides, "Review - The Transient Equation of Motion for Particles, Bubbles, and Droplets.", Journal of Fluids Engineering, Vol. 62, Feb. 1997, pp. 233-243.
- [14] G. B. Wallis, "One-Dimensional Two Phase Flow", New York : McGraw-Hill, 1969.
- [15] R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber, "Bubbles, Drops and Particles". New York : Academic Press, 1978.
- [16] F. Odar, W.S. Hamilton, "Forces on a Sphere Accelerating in a Viscous Fluid.". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 18, 1964, pp. 302-303.

- [17] E.E. Michaelides, Z. G. Feng, "The Equation of Motion of a Small Viscous Sphere in an Unsteady Flow with Interface Slip". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, 1995, pp. 315-321.
- [18] V. Galindo, G. Gerbeth, «A Note on the Force on an Accelerating Spherical Drop at Low Reynolds Numbers". *Physics of Fluids*, Vol. 5, 12, 1993, pp. 3290-3292.
- [19] P.M. Lovalenti, J. F. Brady, "The Force on a Bubble, Drop or Particle in Arbitrary Time-Dependent Motion at Small Reynolds Numbers". *Physics of Fluids*, Vol. 5, 1993, pp. 2104-2116.
- [20] Inc., FLUENT. "FLUENT 6.3 User's Guide". 2006, ANSYS-FLUENT.
- [21] H. Eroglu, W. Tabakoff, "3-D LDV Measurements of Particle Rebound Characteristics". AIAA Technical Report. 1991, AIAA-91-0011.
- [22] T. Wakeman, W. Tabakoff, "Effect of Particle Rebound Characteristics on Erosion of Turbomachinery Components". ASME Technical Paper, Vol. 20, March 1983, pp. 275-280.
- [23] S. Bahadur, R. Badruddin, « Erodent particle characterization and the effect of particle size and shape on erosion”, *Wear*, Volume 138, Issues 1–2, June 1990, pp. 189-208.
- [24] K. Swalwell, J. Sheridan, W. Melbourne, « The Effect of Turbulence Intensity on Performance of a NACA4421 Airfoil Section”, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan.2004, Reno, Nevada.
- [25] Y. Kaneda, T. Ishihara, « Energy dissipation rate and energy spectrum in high resolution direct numerical simulations of turbulence in a periodic box”, *AIP, Physics of Fluids*, V 15, Issue 2, Feb. 2003, pp.
- [26] M. Naim, S. Bahadur, “Experimental study on erosion characteristics on Ti-6Al-4V”, *Wear*, Vol. 142, 1991, pp. 253-263.
- [27] A. Mansouri, H. Arabnejad, S.A. Shirazi, B.S. McLaury, “A combined CFD/experimental methodology for erosion prediction”, *Wear* 332-333, 2015, pp. 1090-1097.

Chapitre 5

Expérimentation, résultats et discussion

5.1 Introduction

L'érosion est un type d'usure qui se produit lorsqu'un flux de particules solides frappe une surface d'un matériau. En générale, lorsqu'on parle de l'usure ce mot implique directement une élimination de la matière des surfaces par des processus mécaniques ou chimiques. Généralement, Il est admis que le mot "usure" comprend quatre phénomènes principaux:

a. L'usure de coupe abrasive ou érosive est le type d'usure qui se produit lorsqu'un courant de particules (telles que des particules de sable) frappe une paroi et entraîne une perte de poids d'une surface;

b. L'usure adhésive est le cas d'usure qui entraîne l'enlèvement de matière lorsque deux surfaces sont mises en contact et qu'un mouvement relatif est imposé entre les surfaces de glissement ;

c. L'usure chimique se produit lorsqu'une surface réagit en présence d'un lubrifiant par une action chimique.

d. L'usure par fatigue est le résultat de chocs répétés entre les surfaces, caractérisée par l'enlèvement de très petits fragments "à long terme" d'une surface, ou les deux, par des effets de frottement (vraisemblablement par un cycle de faible fatigue).

Bien que ces types d'usure ont été traités séparément dans la plupart des études, ils peuvent se produire simultanément et devenir interdépendants et dépendants les uns des autres, dans ce cas les taux d'usure peuvent devenir beaucoup plus importants. Cependant, le plus important est l'usure abrasive (purement mécanique), plus particulièrement l'usure «érosive-abrasive» produite par des particules solides (telles que des grains de sable) entraînées dans un flux de fluide, aussi appelé "érosion".

Selon l'ASTM G40-05 [1] l'érosion par particule solide est définie comme la perte progressive de matière due à une exposition continue à l'impact. Le terme particule solide couvre les particules de diamètre compris entre 5 et 850 μm . Les dommages causés par la grêle ou les roches (supérieur à 2mm) ne sont pas pris en compte.

5.2 Expérimentation

5.2.1 Objectifs expérimentaux

L'expérimentation a pour objectif principal de tester les effets et l'influence de différents paramètres, notamment les propriétés d'un échantillon en composite (Fibre de verre/Résine Polyester), des particules de sable de silice et de la phase fluide (air) sur le taux d'érosion.

La vitesse du flux diphasique (sable plus air) doit être contrôlée dans la plage 0-15 m/s à la sortie de la buse. En outre, la taille des particules a été choisie avec une grosseur $\leq 80\mu\text{m}$ (Particule de sable aptes à la suspension dans l'air [2]). La concentration en particules de sable a été choisie d'après les données météorologiques de la zone d'étude. Le montage expérimental à décrire remplit toutes ces conditions. Le sable de silice est choisi comme érodant et le composite GF/PP comme échantillon à tester à température ambiante. Il convient de noter que le composite GF/PP présente un comportement semi ductile [3] lorsqu'ils sont érodés par des sables de petite taille. La raison pour laquelle nous avons choisi le composite GF/PP comme spécimen d'essai est que la majorité des pales d'éoliennes sont fabriquées à partir de cette matière en raison de son faible prix dans le marché. De l'air comprimé a été utilisée comme phase fluide (transport d'érodant).

5.3 Théorie de l'érosion

Un modèle mathématique de l'érosion capable de prédire la perte de masse de tout système donné, et dans toutes les circonstances, devrait être basé sur les propriétés de la cible (ou de la surface du matériau), les propriétés abrasives (particules solides) et les propriétés du fluide de transport.

Les propriétés des composants du phénomène d'érosion peuvent être listées comme suit:

- a. Propriétés du matériau de surface: dureté ou contrainte d'écoulement, métallurgie (fragilité ou ductilité), rugosité, couche de film d'oxyde, taille de la structure, élasticité, écrouissage de la surface.
- b. Propriétés des abrasifs: taille, forme, distribution dans le courant de fluide, dureté, vitesse, densité et angle d'impact.
- c. Propriétés de la phase fluide: vitesse, densité (densité de phase), viscosité, régime d'écoulement (turbulence).

L'érosion des composites par des particules de sable est un phénomène dont le processus est assez complexe. Les impacts des particules de sable sur la surface d'un matériau composite entraînent l'enlèvement de matière caractérisé par la rupture fragile-ductile (figure 5.1).

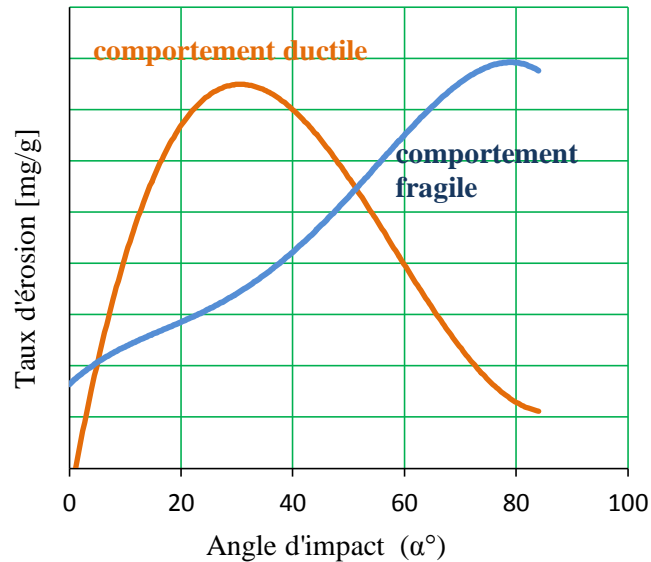


Fig. 5.1: Comportement typique à l'érosion des matériaux ductiles et fragiles en fonction de l'angle d'impact des particules.

Le volume (masse) de la matière enlevée durant l'impact, sont largement étudiés et dépendent de plusieurs facteurs : forme, masse, vitesse des particules, dureté et ténacité du matériau, Figure 5.2.

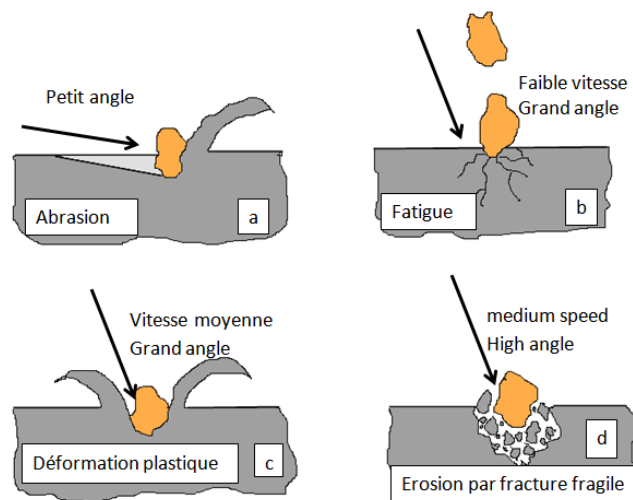


Fig. 5-2 : Mécanismes possibles d'érosion par une particule de sable [4].

Les mécanismes possibles de l'érosion par impact des particules solides suggéré par Stachowiak et Batchelor [4] sont : L'érosion abrasive, la fatigue de surface, la rupture fragile, la déformation ductile, la fusion de surface, l'érosion macroscopique et l'érosion atomique.

Mais en général, il y a quatre mécanismes d'érosion par impact des particules de sable :

- Erosion par coupe,
- Erosion par fatigue,

- Erosion par rupture fragile,
- Erosion par fusion.

Les deux sous mécanismes à savoir : la pénétration par arête de coupe et la déformation plastique à la rupture font partie des actions de coupe qui sont les principales agents du phénomène d'érosion par particules de sable (figure 5.3).

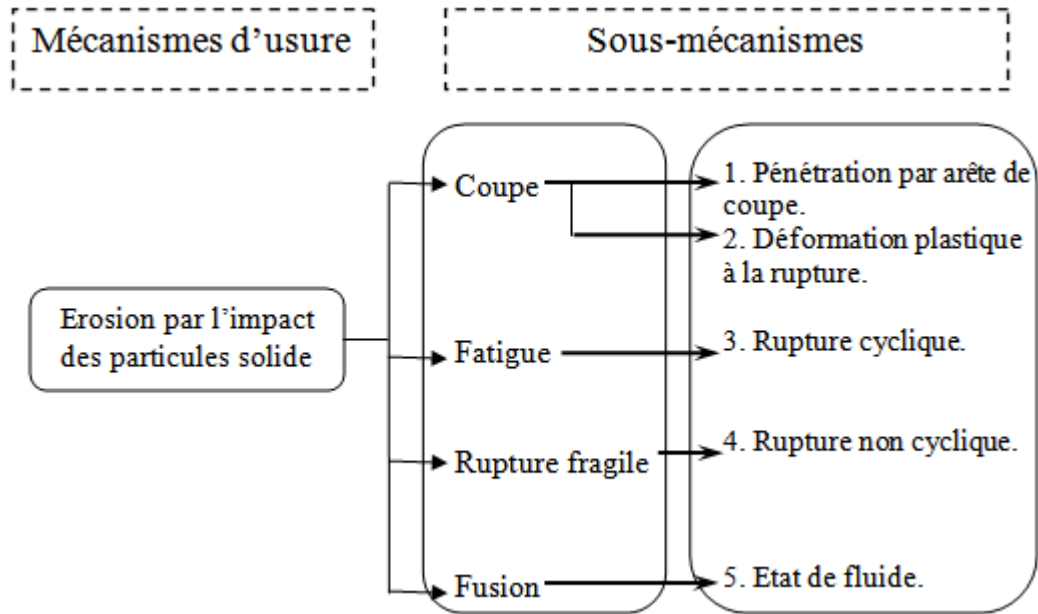


Fig. 5.3: Les quatre sous mécanismes enlevant de la matière de la cible par érosion [5].

Lors du fonctionnement des pales l'air chargé de particules de sable entre en contact avec le bord d'attaque et suivant le type d'écoulement de l'air ainsi que de ses caractéristiques contribuent aux changements de l'action des particules de sable. Les caractéristiques de l'air ont des effets importants sur l'érosion.

Plusieurs facteurs affectent la configuration finale de l'érosion.

- Propriétés du fluide : densité, viscosité
- Nature de l'écoulement : laminaire ou perturbé
- propriétés microscopiques et macroscopiques: rugosité de la surface.

L'érosion de la matière augmente lorsque l'écoulement est perturbé même si celle-ci est parallèle à la surface. Au contraire, si l'écoulement est laminaire alors l'érosion est moins importante.

Dans l'écoulement perturbé, la plupart des particules ont la probabilité d'entrer en contact avec la surface et de frapper plusieurs fois cette surface. En écoulement laminaire, les particules essayeront de suivre le courant et peuvent éviter la surface, et donc réduire l'érosion. L'érosion sera plus élevée lorsque l'AOA est différent de zéro dans un écoulement laminaire, figure 5.4.

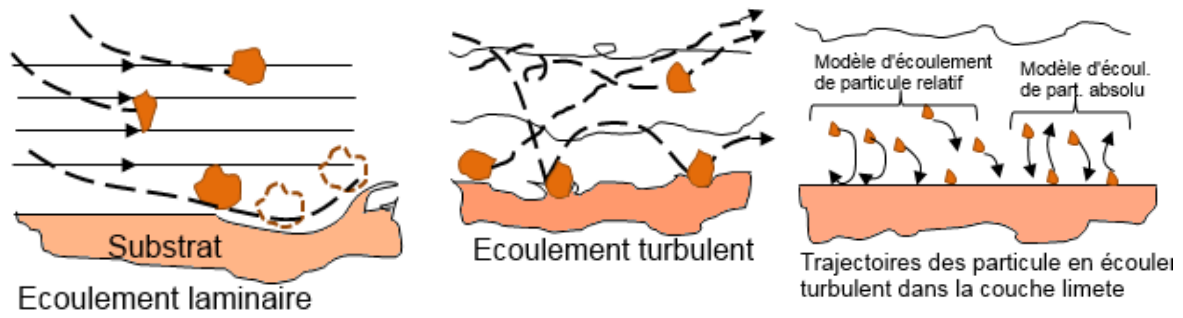


Fig. 5.4: Influence de sur le mode type d'écoulement d'érosion.

En réalité, le modèle d'érosion est aussi influencé par le mode de transport des particules de sable dans l'air. La manière avec laquelle les particules de sable se déplacent est influencé par ces propres caractéristiques tels que la densité, la forme et la taille ajoutant à cela les caractéristiques de l'air proprement dit (vitesse, turbulence et viscosité). Dans leurs mouvements et lors du contact avec la cible, les particules de sable sont sollicitées par plusieurs forces, Figure 5.5.

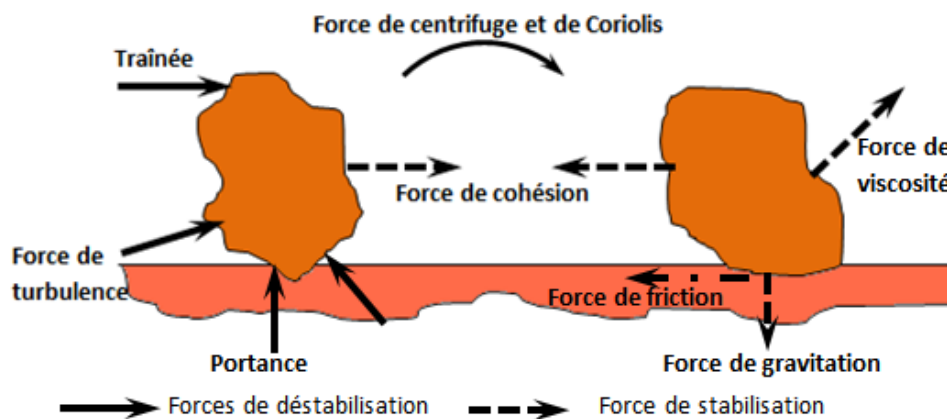


Fig. 5.5: Forces qui agissent sur une particule de sable [6].

Le comportement à l'usure érosive du composite avec renfort a été étudié dans le passé par N. Miyazaki, et al [7]. Les types et les dimensions des fissures qui se forment à la surface lors de l'impact sont largement étudiés et dépendent de plusieurs facteurs: forme, masse, vitesse des particules, ductilité ou fragilité du matériau. Les fissures latérales dans le mécanisme d'enlèvement de matière sont importantes Buijs et al [8], Marshall et al [9]. Le taux d'érosion dépend du rapport entre la dureté de la particule et la dureté du matériau cible. En effet, les particules de faible dureté, par rapport à la surface à éroder, provoquent une usure beaucoup moins importante que les particules dures. Selon Keegan [10], la force de traînée augmentera de 6% pour atteindre les 500% en fonction du taux de dégradation provoqué par l'érosion du bord d'attaque. Les surfaces endommagées par l'érosion comportent un risque structurel énorme (figure 5.6).

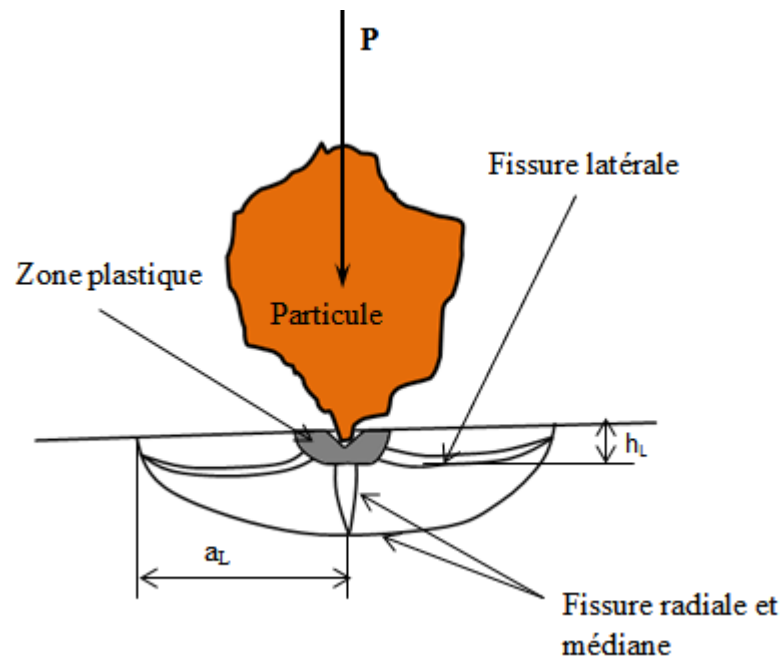


Fig. 5.6: Fissures générées par l'impact d'une particule [11].

Le volume ΔV de la matière enlevé de la surface cible par indentation sous le seuil de la rupture peut être considéré comme étant le même volume ΔV enlevé lors de l'érosion et il est calculé en fonction de la longueur de la fissure a_L et de la profondeur latérale de la fissure h_L . On exprime le volume d'érosion comme suit :

$$\Delta V = \pi a_L^2 h_L \dots \dots \dots (1)$$

5.3.1 Paramètres impliqués dans le processus d'érosion :

Avec un certain nombre de variables potentielles, la recherche d'un modèle analytique de l'érosion permettant de prédire l'influence des divers paramètres représente une tâche considérable. Cependant, il est possible de réduire le nombre de paramètres impliqués dans un processus d'érosion (dans certaines circonstances particulières) en fonction de leurs influences et de leurs importances relatives sur le taux d'érosion. Par exemple, il a été démontré que la dépendance de l'érosion avec la taille des particules, la vitesse et l'angle d'impact est assez similaire pour les particules sphériques et celles avec des arêtes vives [12]. De même, de nombreux expérimentateurs [13] ont découvert que le taux d'érosion était indépendant de la taille des particules, à condition que la charge du système soit la même et que les abrasifs soient suffisamment grands (c'est-à-dire le diamètre moyen des particules supérieur à 100 μm) ; dans la plage de vitesses de particules jusqu'à 100 m/s.

5.3.1.1 Erosion en fonction de la vitesse de particules

Les dégradations et les dommages causés par l'impact d'une particule de sable sur surface d'un matériau composite est souvent dû à la force normale responsable de la déformation plastique et aussi dû à la force tangentielle responsable aux micros coupages. Ces dégradations dépendent de plusieurs paramètres tels que la vitesse entre autres.

L'amplification de l'érosion par l'action de ces deux forces commence lorsque la vitesse de la particule de sable augmente et dépasse une vitesse critique [14].

A des vitesses inférieures à la vitesse seuil (vitesse critique) les particules de sable n'ont pas assez d'énergie pour éroder le matériau par l'action de coupe, mais les effets de la déformation élastique ou de la fatigue peuvent être observés. Parmi les expressions qui mettent en relation l'érosion et la vitesse des particules, est :

$$E_w \sim v^n \dots\dots\dots(2)$$

Où l'exposant n dépend de la matière cible et d'autres conditions.

La dynamique des particules individuelles est utilisée pour développer des modèles d'érosion.

Des relations empiriques et statistiques sont souvent élaborées à partir des essais et des observations expérimentales. Truscott [15] constate que l'érosion du matériau dépend de la vitesse des particules. E. Rabinowicz donne l'usure de l'érosion proportionnelle au carré de la vitesse des particules (pour des raisons d'énergie cinétique) [16]. Comme le nombre de particules en contact est proportionnel à la vitesse de la particule, l'érosion totale (pour un flux de particules) est proportionnelle à la puissance cubique de la vitesse de la particule, conformément à une analyse dimensionnelle de Gibbings [17]. Une autre étude intéressante sur l'érosion de la plaque métallique par des particules en mouvement libre a été réalisée par Finnie [18]. Il suppose que les particules à arêtes vives érodent la surface du matériau par un processus de coupe (en raison de la déformation plastique) et donne une relation fonctionnelle de l'érosion avec les paramètres du système qui prédit que l'érosion est proportionnelle à la deuxième puissance de la vitesse de la particule et inversement proportionnelle à la dureté du matériau, et une variation relativement adéquate de l'érosion avec l'angle d'impact (à l'exception de très grands angles d'impact, c'est-à-dire un angle $\geq 40^\circ$). La théorie de Finnie n'a pas réussi à expliquer l'érosion importante qui se produit à un angle d'impact de 90° et n'a pas suffisamment pris en compte la dépendance à la vitesse.

Plusieurs essais sur différents matériaux montrent que l'érosion dépend fortement de l'énergie cinétique des particules de sable, figure 5.7.

Généralement, l'énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} M_p V_p^2 \dots \dots \dots (3)$$

M_p et V_p sont respectivement masse de la particule et vitesse de la particule.

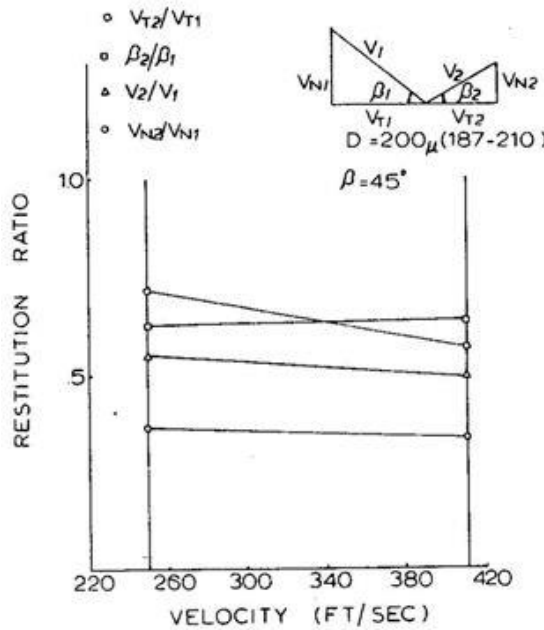


Fig. 5.7 : Répartition du taux de restitution en fonction de la vitesse d'impact [19].

5.3.1.2 Erosion en fonction de la concentration

La concentration des particules est aussi utilisée dans la plupart des applications pratiques pour représenter ce facteur. Il s'agit d'une masse (ou d'un volume) des particules présentes dans l'unité de masse (ou de volume) d'un fluide. Elle peut aussi être représentée en terme de pourcentage des particules dans la masse (ou le volume) d'un fluide. L'érosion est considérée linéairement proportionnelle à la concentration. Bjordal et al. [20] ont constaté que :

$$E_w \sim C_w^{0.25 \div 1.27} \dots \dots \dots (4)$$

Pour la plupart des matériaux, lorsque le test dure longtemps, cette valeur est proche de 1. La proportionnalité directe de l'érosion à la concentration, tout en respectant la vitesse, est une bonne approximation.

Tableau 5.1 : Concentration des particules– MIL STD-810G [21]

Conditions	Concentration des particules
Conditions naturelles	0.177g/m ³
Mouvements de camions dans la zone	1.1g/m ³
Autour d'un hélicoptère en mouvement	2.2g/m ³

On pourrait accepter une concentration de 2.2 g/m^3 puisqu' il y a similitude entre l'hélicoptère et l'éolienne du point de vue milieu de fonctionnement et matière des pales (Tableau 5.1), mais à cause d'autres considération liées à la zone d'implantation de l'éolienne (zone aride) la concentration de l'air en particules de sable est plus importante.

5.3.1.3 Erosion en fonction de la matière de particule

La matière de la particule est un facteur important comme illustré sur la figure 5.8. Celle-ci montre le taux d'érosion en fonction de la vitesse d'impact et de la matière pour un même diamètre compris entre $125\mu\text{m}$ et $150\mu\text{m}$ pour un impact normal. Dans l'atmosphère, nous trouvons essentiellement du sable ou poussière dont le constituant principal est le quartz (SiO_2) qui a une dureté Vickers $\text{HV}=131$. D'après la littérature, le quartz à une dureté supérieur à l'Aluminium et du Fer qui ont des duretés respectivement 24 et 120 (dureté Vickers).

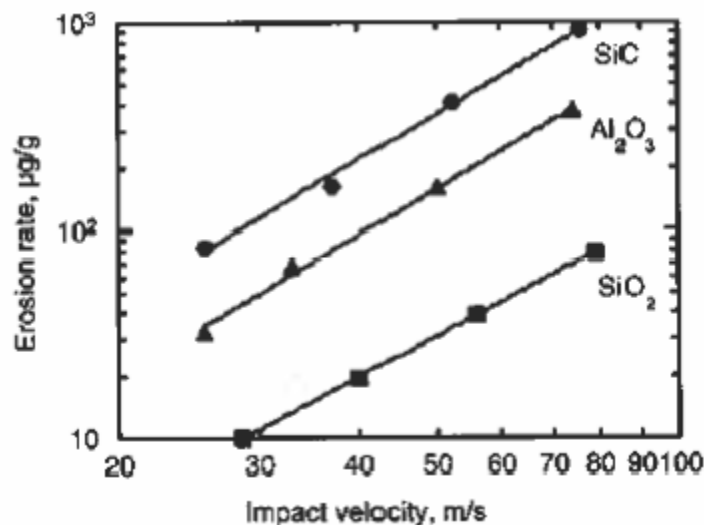


Fig. 5.8: Influence de la matière de la particule sur le taux d'érosion [22].

5.3.2 Approche de Beckmann & Gotzmann

D'après Beckmann et Gotzmann dans le phénomène d'érosion le volume de matière enlevé est proportionnel au travail des forces de cisaillement en surface.

Dans leur théorie, ils supposent que :

Les particules sont parfaitement sphérique, homogènes, déformable élastiquement et sont irrotationnelle,

La vitesse V_0 des particules immédiatement avant impact est constante quelque soit l'angle d'impact α ,

La dureté de la particule est supérieure à la dureté du substrat ($H_p > H_s$).

5.3.3 Modèle d'érosion général

Le modèle général d'érosion est présenté simplement par l'équation suivante :

Erosion = f (conditions du fonctionnement, propriétés des particules, propriétés du matériau cible)
Généralement, cette expression est donnée en fonction de la vitesse, de la dureté du matériau cible, de la taille des particules et de la concentration des particules. Bardal [23] décrit la formule la plus générale de l'érosion pure par :

$$E_w = k_1 k_2 C_w V_p^n f(\alpha) \dots \dots \dots (5)$$

Avec :

E_w : Perte de matériau en mm/an,

k_1 : Constante du matériau,

k_2 : Constante en fonction de milieu,

C_w : Concentration des particules,

$f(\alpha)$: Fonction de l'angle d'impact α ,

V_p : Vitesse des particules,

n : Exposant de la vitesse.

Il faut signaler qu'il y a d'autres critères qui influent sur le taux d'érosion qui sont liés à l'éolienne elle-même à savoir :

- Si l'éolienne est à l'arrêt (freinage) :

La vitesse du vent (exemple $v=10\text{m/s}$), les petites particules (poussières) se déplacent plus vite que les grosses.

- Si l'éolienne en service (les pales tournent) :

La vitesse des particules est égale à la vitesse du vent plus la vitesse de la pale ($> 10\text{m/s}$, dépend du rayon le long de la pale). Dans ce cas-là toutes les particules ont la même vitesse.

5.4 Comportement des matériaux composites utilisé

En général, le comportement à l'abrasion (érosion) des matériaux est classé comme ductile ou fragile en fonction de l'évolution de la vitesse d'érosion et en fonction de l'angle d'attaque des particules. Etant donné que le comportement à l'usure par érosion dépend fortement des conditions expérimentales et de la composition du matériau cible, le comportement ductile est caractérisé par un taux d'érosion maximal à un angle de projection d'environ 15° à 30° alors que si le taux d'érosion est maximal pour une incidence normale des particules, le comportement du matériau soumis à ce

type d'érosion est dit fragile. Cependant, lorsque le taux d'érosion maximum est obtenu avec une valeur intermédiaire de l'angle de projection (entre 45 ° et 60 °), le comportement est qualifié de semi-ductile. La figure 5.9, montre un comportement semi-ductile pour le matériau composite de nos échantillons.

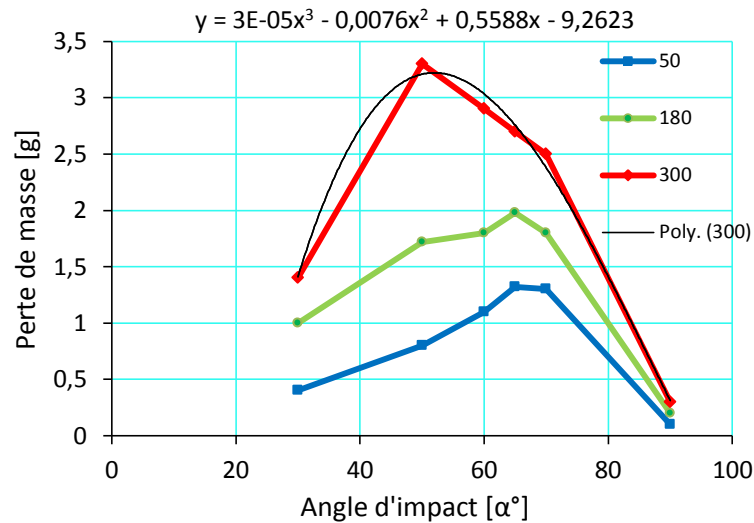


Fig. 5.9: Comparaison des caractéristiques du comportement ductile et fragile par érosion.

Les résultats obtenus après une série d'expériences sur un appareil de sablage (figure 5.9) ont permis d'établir une relation entre le taux d'érosion et l'angle d'impact sous la forme suivante (Equation 6) :

$$ER(\alpha_s) = 3E-05(\alpha_s)^3 - 0,0076(\alpha_s)^2 + 0,5588(\alpha_s) - 9,2623 \dots \dots \dots (6)$$

5.4.1 Types de sablage pour les essais d'érosion

Afin d'effectuer une campagne d'essais sur le comportement aérodynamique des pales d'éolienne lorsqu'elles sont endommagées par érosion par des particules de sable et afin de reproduire le même effet sur des échantillons en composite, il est nécessaire d'utiliser une machine de sablage (sandblasting machine) ou communément connue sous le nom de machine à grenail. Il existe de nombreux types de machines à grenail mais en général on peut les classer en deux catégories principales :

- Machine de sablage par air comprimé;
- Machine à grenail utilisant une turbine centrifuge.

La machine de sablage utilisée pour effectuer nos essais est de type à air comprimé. La conception et la réalisation de cette machine ont été faites au niveau de l'atelier de fabrication mécanique dans le cadre d'un projet de fin d'étude (Master) (figure 5.10).

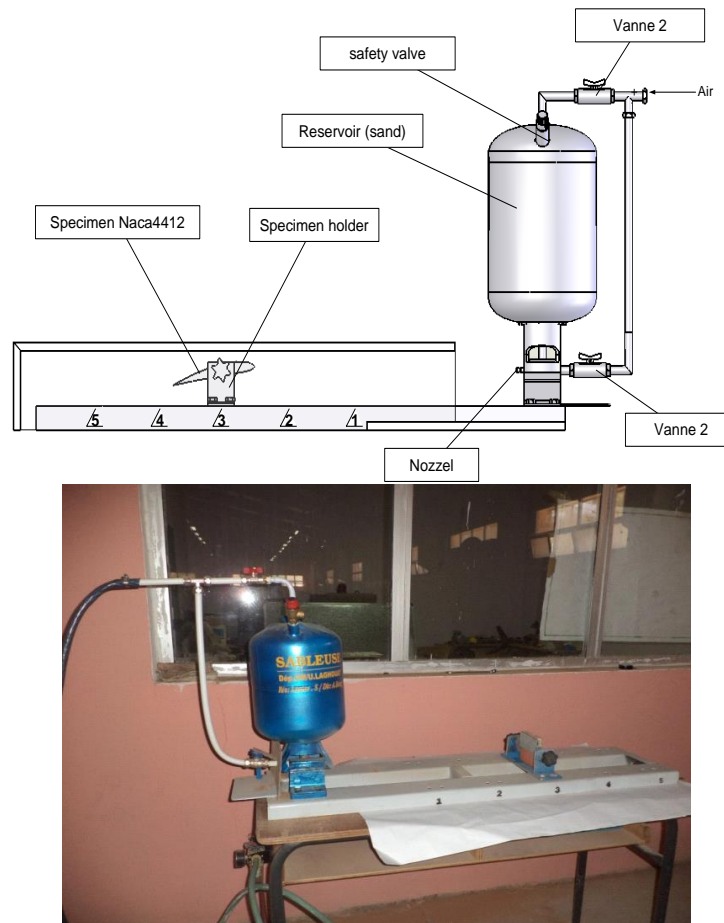


Fig. 5.10: Machine de sablage à air comprimé.

5.5 Montage expérimental

5.5.1 Description de la mise en place

L'appareil de sablage comprend cinq éléments principaux: un compresseur, un filtre détenteur-régulateur, un réservoir de sable, un mélangeur avec une buse à sa sortie, un porte échantillon orientable.

Le sable érodant est introduit dans un réservoir et grâce à la gravité et à la pression communiquée au réservoir par le haut, le sable décent et entre dans une chambre de mélange avec des quantités contrôlées où il va être mélangé avec de l'air comprimé venant d'un système pneumatique composé d'un groupe de compression et d'un régulateur de pression entre outre.

Le réservoir est placé à une hauteur de 211 mm et il alimente le jet d'air par du sable fin (grosseur de grains de sable entre 40 et 80 μm). Le diamètre du réservoir est de 245 mm et son volume est 0.012m^3 . Le jet d'air chargé par des particules de sable vers l'échantillon à travers une buse et la vitesse du mélange est fonction de la pression de l'air comprimé et au diamètre de la buse. Les particules solides sont éjectées à grande vitesse dans une buse de projection où est créé un effet venturi (aspiration) ; les particules sont conduites dans la buse par surpression d'en haut et par aspiration au niveau de la buse. Le réglage de la pression de l'air comprimé contrôle la vitesse d'éjection.

Ce type de machines a l'avantage de produire un jet de sable parfaitement localisable, dont la direction peut être déterminée avec précision. Il est donc possible d'obtenir une érosion dans une zone très précise.

5.5.2 Caractéristiques de l'appareil de sablage

- La vitesse de l'air à la sortie de la buse : varié de 0 à 40 m/s
- Débit du sable de dune à la sortie : varié de 0,08 à 25 g/s
- Les distances prévues des éprouvettes par rapport à la buse sont représentées dans le tableau 5.2 ci-dessous:

Tableau 5.2 : Les distances prévues des éprouvettes par rapport à la buse.

Position	1	2	3	4	5
Distance (mm)	300	470	640	710	880

- Les angles possibles pour l'orientation de l'éprouvette (voir figure 5.11) : varié de 0° à 90° .
- Capacité du réservoir du sable : 12L.
- Pression et débit de l'air à l'entrée après le système de régulation : 6 bars.
- La pression minimum de réservoir : 10 bars.
- Dimensions maximum possibles des éprouvettes : 100 x 200 x 30 mm.

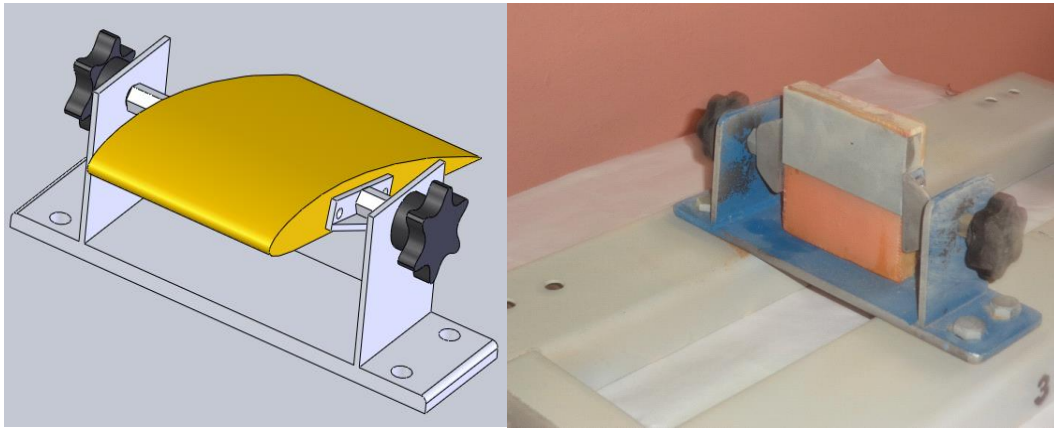


Fig.5.11 : Porte échantillon orientable.

5.5.3 Anémomètre

Afin de vérifier les capacités de la machine de sablage tel que la vitesse du mélange (sable + air) et le débit massique du mélange qui sort de la buse à différentes positions (300, 470, 640, 710 et 880 mm) un anémomètre (figure 5.12) a été utilisé. Puisque la considération faite au chapitre 4 et que les particules de sable n'influe pas sur l'écoulement du fluide, alors les vitesses mesurées de l'air seul sortant de la buse en plusieurs positions de l'appareil pour ne pas abimer l'anémomètre.



Fig. 5.12 : Anémomètre pour mesurer la vitesse du jet.

5.5.4 Réglage de la puissance:

1- Par la pression :

- Le réglage de la pression se fait en tournant le bouton du manodétendeur : ce qui agit sur la vitesse de projection du sable, donc sur la puissance d'impact des grains.

2- Par le débit :

- Il est possible d'utiliser des buses de diamètre différent qui doivent être montée avec la rondelle doseuse correspondante. Plus la buse est grosse, plus la puissance est forte est plus la consommation d'air est importante.

3- Réglage du mélange :

- Quand la buse s'use, son diamètre s'agrandit, ce qui augmente la consommation d'air et modifie la proportion du mélange air-sable. La vanne de réglage permet de modifier le rapport du mélange air/sable.
- Plus on ferme la vanne de réglage, plus on augmente le débit de sable, et plus on diminue le débit d'air.

5.5.5 Paramètres intervenant dans le processus d'érosion

Il y a plusieurs facteurs qui interviennent pour différencier les types de mécanisme d'érosion. Afin de contrôler l'érosion il y a des moyens d'érosion qui peuvent être regroupés en trois catégories suivantes :

1. Milieu : Le temps d'exposition, la vitesse, l'accélération, l'angle d'impact, le moyen du débit ou la concentration, le flux et la température.
2. Erodant : La taille, la forme, la dureté et la matière.
3. Matériaux cibles : Composition chimique, propriétés mécaniques, dureté et surface morphologique.

5.5.6 Evolution de l'érosion en fonction du temps de sablage

De nombreuses équations ont été obtenues en utilisant des méthodes de la mécanique des solides. La plupart contiennent des propriétés du matériau, des propriétés thermodynamiques ou d'autres variables génériques dont certaines peuvent être fondamentales. A partir de 1947 et jusqu'à maintenant, trois formes générales de la modélisation d'érosion peut être perçues. Des équations empiriques sont construites directement avec les données expérimentales, dans lesquels quelques conditions ont été changées.

Parmi plusieurs équations qui tentent de donner un modèle d'érosion en fonction du temps de sablage $\Delta V = f(t)$, comme celles suggérées par Barwell [24]. Ce sont des équations empiriques construites directement à partir des données expérimentales et qui peuvent être données en tant que moyenne d'usure. L'usure peut être caractérisée par la courbe de l'une de ces trois équations.

$$\Delta V = \frac{\beta_S}{\alpha_C} \{1 - \exp(-\alpha_C t)\} \quad (7)$$

$$\Delta V = \alpha_C t \quad (8)$$

$$\Delta V = \beta_S \exp(\alpha_C t) \quad (9)$$

Où ΔV : volume érodé, t : durée d'exposition, α_C : constante et β_S : paramètre identifié par certaines caractéristiques de la surface initiale. Ces équations sont suffisantes pour décrire la forme des courbes de $\Delta V = f(t)$ ou $\Delta V = f(\beta_S)$.

Rhee [25] a constaté que l'usure totale par frottement (matrice polymère) est fonction de la charge appliquée F , de la vitesse V et du temps t :

$$\Delta V = k F^a V^b t^c \quad (10)$$

Où ΔV : masse du matériau érodé, k , a , b et c : constantes empiriques.

5.7 L'échantillon:

Le spécimen d'essai est une plaque en composite GF/PP sur laquelle un jet d'écoulement à deux phases (particule de sable et air) frappe. Les dimensions de la plaque de l'échantillon sont (100mm x 100 mm x 3 mm) figure 5.11. L'utilisation de ce type d'échantillon a pour but d'estimer le taux d'érosion en fonction des trois paramètres qui sont l'AOA, la durée d'exposition au sablage et la vitesse du flux. Un autre type d'échantillon a été confectionné pour obtenir un profil d'aile de type NACA 4412 (figure 5.13) en composite et qui a été exposé aussi à un jet de sable de la même manière que l'échantillon carré. Le jet provient de la buse dont la section transversale est circulaire (diamètre $D = 6\text{mm}$) alors que la distance entre celle-ci et la plaque peut être réglée par le choix de l'emplacement du porte échantillon. Dans la première série d'expériences, la perte de masse de la plaque est déterminée en fonction de l'angle d'impact (AOA), vitesse des particules, etc.,

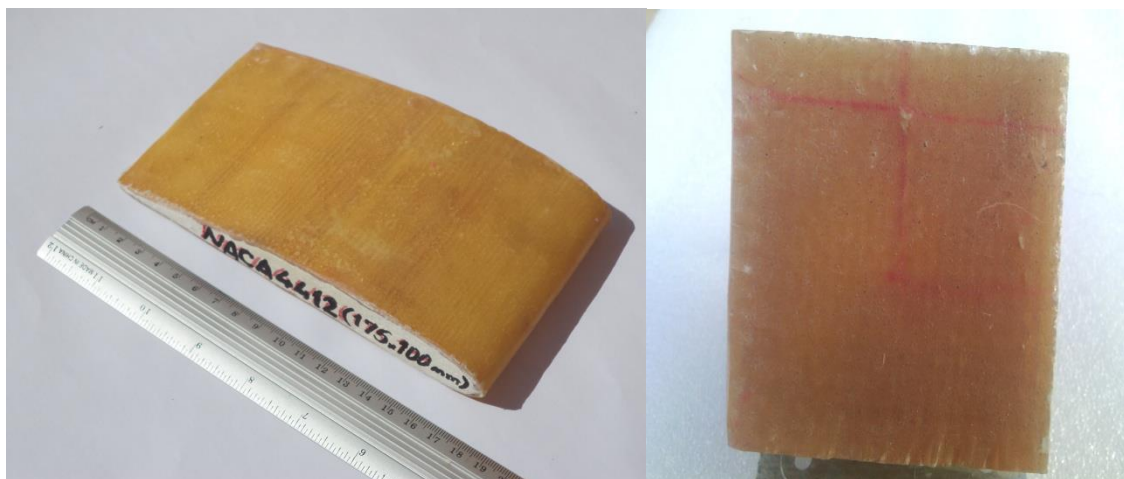


Fig. 5.13 : Photos des échantillons.

Après chaque opération de sablage, un relevé de rugosité est effectué à l'aide du Surfrest 201 Mitutoyo (figure 5.14) afin de connaître l'état de surface pour l'échantillon avant de le passer à la soufflerie pour l'étude aérodynamique.



Fig. 5.14: Relevé de la rugosité de l'échantillon.

5.7.1 Matière de l'échantillon

a- Caractéristiques de la fibre de verre

Le composite utilisé est un produit Chamaelon 503 composé de résine en PR et de fibre de verre. .

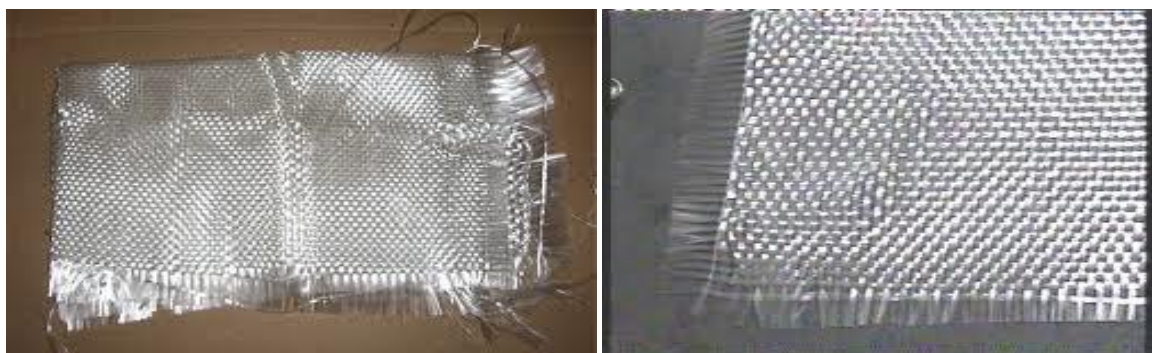
La fibre de verre utilisé comme renfort a les caractéristiques suivantes :

Tableau 5.3 : Caractéristiques Fibre de verre.

Résistance à la flexion	Résistance à la compression	Module d'élasticité	Déformation de rupture	Température de transition vitreuse
145 MPa	130Mpa	2.9GPa	3.5%	95°C

Tableau 5.4 : Résistance à la traction de fibre de verre.

Résistance à la traction [MPa]	Module en traction [GPa]	Diamètre (μm)
4500	73	15

Fig. 5.15 : fibre de verre tissée selon un motif (*Plain weave*).

b- Caractéristiques de la résine

Le Polyester utilisé comme résine a les caractéristiques suivantes :

Tableau 5.5: Propriétés de traction de la résine polyester.

Contrainte à la rupture σ_r (MPa)	Module de Young E (GPa)	Allongement ε_r (%)
63 ± 2.0	1.0 ± 0.40	4.7 ± 0.20

Tableau 5.6 : Propriétés de flexion de la résine de polyester.

Contrainte à la rupture σ_r (MPa)	Module de Young E (GPa)	Allongement ε_r (%)
78 ± 1.4	4.0 ± 0.5	1.8 ± 0.30

Tableau 5.7 : Propriétés de rupture de la résine de polyester.

La tenue au délaminage	Energie de fracture
K_{Ic} (MPa m ^{0.5})	G_{Ic} (J m ⁻²)
0.30	90

5.8 Résultats après sablage

Avant d'exposer les échantillons NACA 4412 à un jet de sable, six angles d'impact ont été choisis (30°, 50°, 60°, 65°, 70°, 90°). Le sable choisi est un sable de dune pris dans la même région où il y a possibilité d'implantation d'un parc éolien et dont la taille de particule est $\leq 80 \mu\text{m}$. Différents temps d'exposition au sablage ont été pris en compte pour le spécimen: 50 s, 180 s, 300 s. Après sablage, il fallait nettoyer les spécimens, puis les peser pour déterminer la perte de masse de chaque spécimen. Avant chaque test de nos échantillons dans la soufflerie, il faut mesurer Ra (rugosité moyenne arithmétique) sur chaque plan tangent aux angles choisis (voir Fig. 5.16).

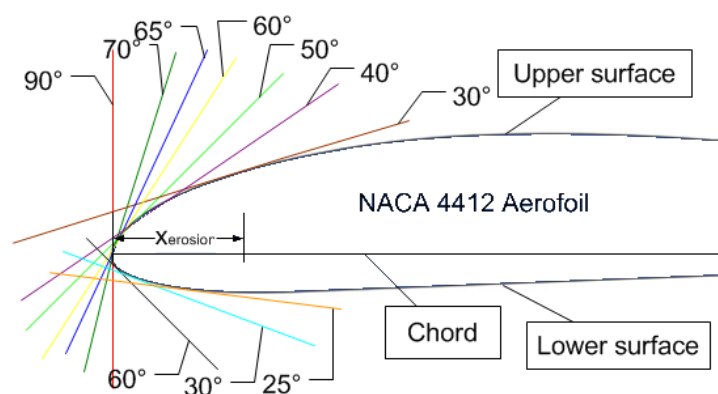


Fig.5.16: Points principaux du bord d'attaque.

Tableau 5.8 : Pertes de masse en fonction du temps et de l'angle d'impact.

N° Echantillon	Masse avant Expe. [g]	Angle d'impact [°]	Temps d'exposition au sablage [s]			
			0	50	180	300
E1	103.2	30	0	0.4	1	1.4
E2	106.5	50	0	0.35	0.42	3.3
E3	102.9	60	0	0.165	0.6	0.7
E4	104.3	65	0	0.02	0.03	0.46
E5	101.8	70	0	1.3	2.2	3
E6	106.4	90	0	0.1	0.2	0.3

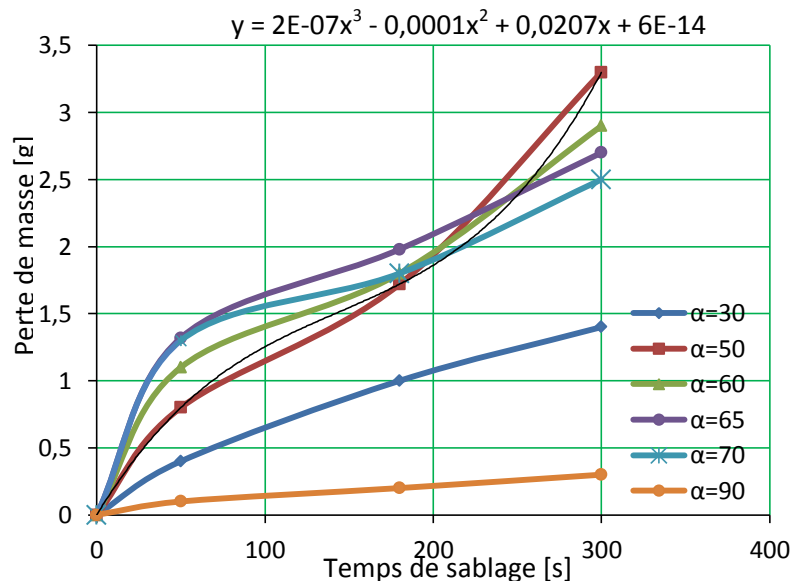


Fig. 5.17 : Perte de masse en fonction du temps de sablage.

Les mêmes résultats de sablage (Tableau 5.8) nous permettent aussi de tracer les courbes de la perte de masse en fonction du temps de sablage (figure 5.17) et dont l'équation à la forme suivante :

$$ER(t) = 2E-07(t)^3 - 0,0001(t)^2 + 0,0207(t) + 6E-14.....(11)$$

5.8.1 Observation des surfaces sablées :

Après l'opération de sablage, nous avons pris des photos sur les défauts générés dans trois endroits (figure 5.18) coté bords des échantillons, ensuite près du centre et enfin au centre.

On constate que lorsqu'on avance progressivement du bord des échantillons vers le centre, il se forme d'abord des défauts isolés, de tailles variables. On observe également que les écailles sont bien formées. Ensuite dans la zone intermédiaire, il se forme des interconnexions entre les défauts voisins, ce qui forme de petites zones endommagées. Enfin dans la partie centrale c'est-à-dire la plus sablée, il se forme un effritement au niveau de la surface qui se traduit par la formation des grandes zones endommagées

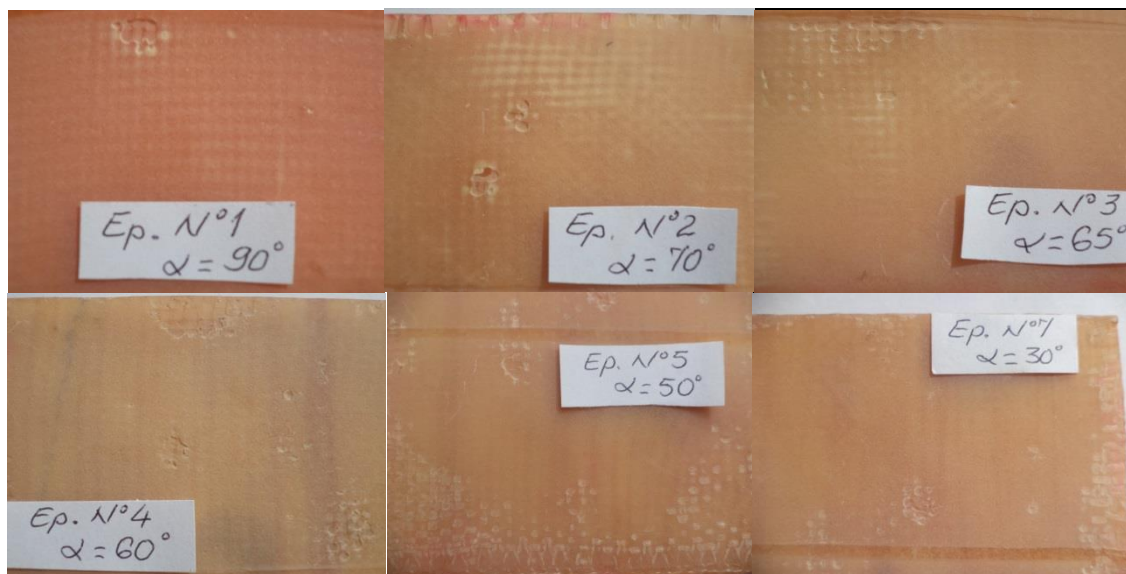


Fig. 5.18 : Photos des échantillons dégradés par sablage (durée de sablage: 160 s).

Tableau 5.9: Résultats expérimentaux de la rugosité.

Angle d'impact	Durée d'impact [sec.]									
	0	40	80	120	160	200	240	300	340	390
30°	0,94	7,02	4,01	7,02	8,53	8,1	4,25	8,3	8,85	9,4
40°	0,94	4,92	8,02	7,08	7,64	6,85	5,75	6,93	6,45	8,2
50°	0,94	12,5	8,63	12,3	6,6	8,55	8,49	5,99	8,28	8,35
60°	0,94	4,53	6,17	9,79	5,16	5,6	8,52	9,42	13,5	14,6
65°	0,94	9,17	5,48	12,4	6,16	10,6	6,36	7,64	6,34	11,5
70°	0,94	4,43	4,63	3,65	4,41	5,17	6,93	6,2	7,83	9,05
90°	0,94	1,19	3,23	3,35	4,65	4,19	3,96	8,42	7,89	8,73

Les résultats dans le tableau 5.9, montre que plus la durée de sablage augmente plus l'indice de la rugosité augmente ce qui est normale et cela est dû à l'enlèvement excessive de la matière et création des zones creuses sur la surface de l'échantillon.

On remarque aussi que les valeurs les plus grandes de la rugosité sont enregistrées à un angle de contact $\alpha = 60^\circ$ vu le degré de la gradation de la cible.

Les observations MEB éclairent les résultats présentés précédemment. La figure 5.19 illustre l'effet de l'usure érosive sur la matrice et les fibres du composite. Les photos montrent que le mécanisme de micro-découpage dû à la composante tangentielle (F_t) est la cause principale de cette dégradation. Ils montrent qu'après élimination de la couche supérieure de l'échantillon, les particules de sable fracture les fibres puis arrachent les morceaux de leurs places.

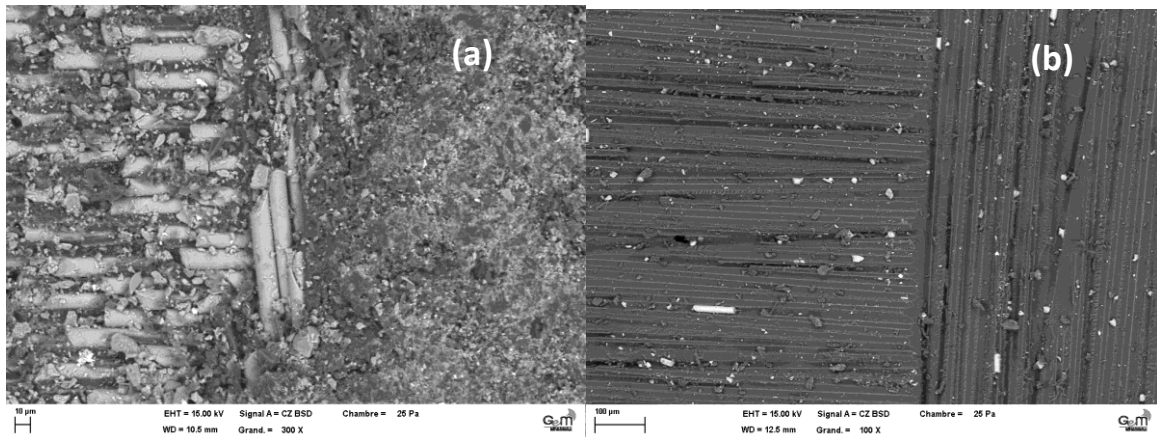


Fig.5.19: L'image MEB montre l'apparition de fibres après un temps d'exposition :
(a) $T = 80$ s (angle d'incidence $\alpha = 60^\circ$), (b) $T = 160$ s (angle d'incidence $\alpha = 60^\circ$)

5.9 Machine d'essai de fatigue par érosion

Afin de déterminer l'effet de sablage (sandblasting) pendant des durées de temps prolongées d'exposition aux particules de sable et de vérifier la durabilité des pales à l'érosion dans des conditions similaire à ceux des pales d'une éolienne qui opère dans une zone aride poussiéreuse, une deuxième conception d'une machine d'essai de fatigue par érosion a été faite. La machine a été réalisée dans l'atelier de fabrication mécanique (Département mécanique – Université de Laghouat) (figure 5.20).

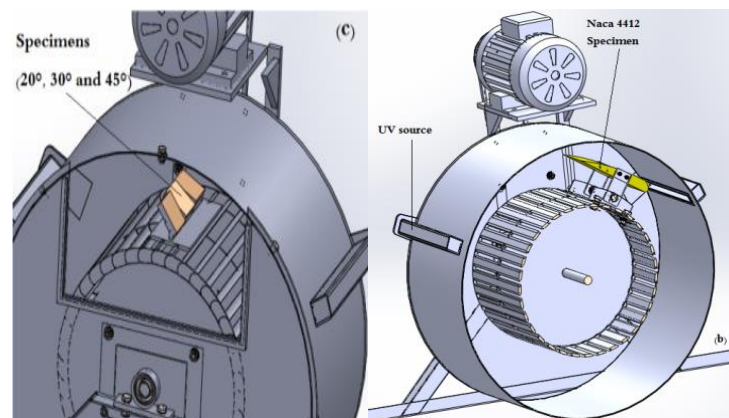


Fig. 5.20: CAD modèle de la machine de fatigue par érosion.



Fig. 5.21: Machine d'essai de fatigue par érosion.

Les figures 5.20 et 5.21 représentent le modèle 3D de l'appareil d'érosion par fatigue et les photos après sa fabrication. L'appareil se compose d'une chambre dans laquelle un ventilateur à aubes inclinés vers l'avant qui tourne autour d'un axe horizontal et dans son mouvement de rotation il provoque des perturbations au niveau de la surface du sable déposé en bas de la chambre. La quantité de sable fin est bien calculée pour que sa suspension dans l'air soit homogène dans toute la chambre et que l'air a la concentration en particule de sable voulu. Sachant que le sable utilisé dans les essais est collecté dans la zone d'étude mentionnée dans le chapitre 3 et ayant une granulométrie $\leq 80 \mu\text{m}$. Des échantillons de $50 \times 50 \times 1.5 \text{ mm}$ ont été confectionnés pour les tests de l'érosion et montés sur le porte-échantillon (figure 5.22). Le ventilateur est entraîné par un système poulie-courroie et la source du mouvement de rotation est un moteur contrôlé par un variateur de fréquences permettant ainsi de choisir la vitesse de rotation du porte-échantillon dans la chambre.

L'échantillon monté sur le support d'échantillon lors de l'arrêt de la machine et ce dernier assure une distance ($d=60\text{mm}$) qui sépare l'extrémité inférieure de l'échantillon à la surface supérieure du sable déposé dans la chambre. Les échantillons en composites sont fixés dans un support d'échantillon qui comporte plusieurs positions formant plusieurs angles. Le montage des échantillons s'exécute en respectant les angles de contact désirés. Un deuxième support d'échantillon destiné au profil d'aile de type NACA 4412 et ayant une largeur (span ou envergure) de 100 mm et une corde $c = 175\text{mm}$.

Comme on le voit sur la Figures 5.20 et 5. 21, les échantillons en composite suivent le chemin dans la chambre qui a un rayon moyen de $r_{\text{moy}}=300\text{mm}$. Les angles de contact choisis pour les échantillons " α " sont : 20° , 30° , 45° , 60° et 90° , ces angles de contact seront suffisant pour montrer le comportement à l'usure érosive des échantillons. Les positions que peut prendre l'échantillon sont illustrées à la Figure 5.22.

Une procédure d'essai standard a été utilisée pour chaque test d'usure. Les échantillons ont été nettoyés dans de l'acétone, séchés et pesés à une précision de $0,001\text{g}$ en utilisant une balance électronique avant le test d'usure érosif. Après le test d'usure érosif, l'échantillon est à nouveau nettoyé par l'enlèvement des particules de silice de la surface de l'échantillon puis ce dernier est pesé une deuxième fois pour déterminer la perte de poids. Il faut signaler que tous les tests d'érosion ont été effectués à température ambiante.

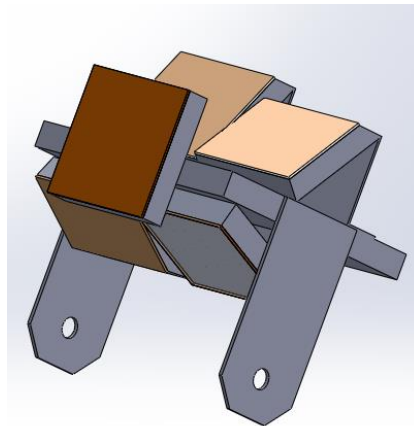


Fig. 5.22: CAD modèle des échantillons en composite montés sur un porte échantillon dans l'appareil de fatigue par érosion.

5.10 Résultats obtenus en soufflerie

C'est à l'aide des expérimentations que sont étudiés les comportements du profil NACA 4412 témoin (lisse) pour tirer les paramètres aérodynamiques de références. Les interactions fluide-structure sont généralement étudiées en soufflerie. La détermination de ces paramètres aérodynamiques d'un profil d'aile est en fonction de la vitesse de l'écoulement pour les différents angles d'incidences.

5.10.1 Détermination indirect des coefficients aérodynamiques

Pour obtenir les coefficients aérodynamiques indirectement de nos profils (lisses et rugueux), on a réalisé un banc d'essai adaptable à la veine de la soufflerie subsonique HM 170 Gunt disponible au niveau de notre laboratoire de turbomachine (figure 5.23).



Fig. 5.23: Soufflerie subsonique HM 170 Gunt

Le banc d'essai (figure 5.24) conçu et réalisé afin de déterminer les performances aérodynamiques des deux types d'échantillons à savoir le profil NACA 4412 lisse et le profil NACA 4412 rugueux ce dernier a été exposé dans la chambre de la machine de fatigue érosive à un milieu poussiéreux pendant des durées assez longues (jusqu'à 458 heures). En montant le profil à l'envers, l'air qui circule dans la veine provoque une surpression à l'intrados ce qui fait pousser le profil vers le bas à cause de la force de portance. La valeur de la pesée (m_p) apparaît sur l'afficheur de la première balance. La deuxième balance affichera la pesée de la force de traînée (m_T) à cause d'une légère rotation des barres articulées causée par la poussée horizontale du flux d'air sur le profil.

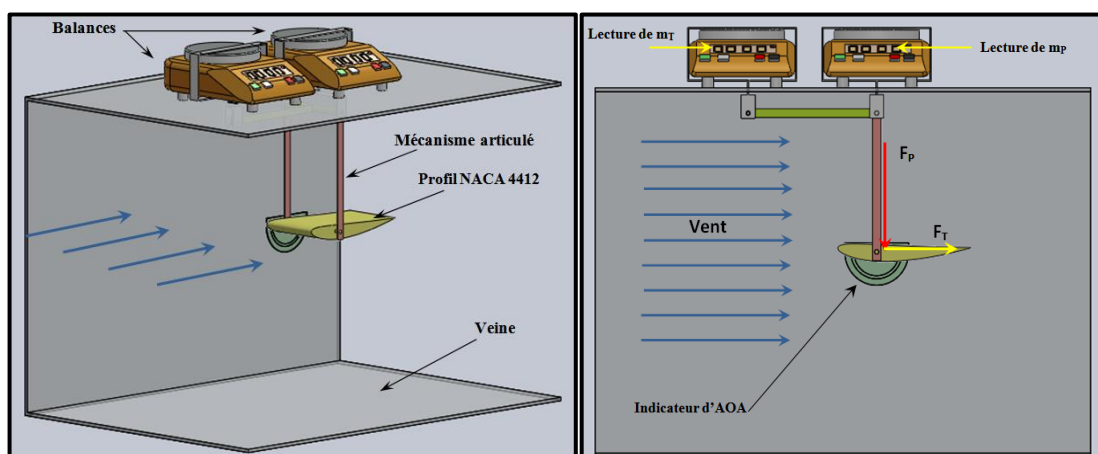


Fig. 5. 24: CAD modèle du banc d'essai pour mesurer m_p et m_T .

Les données mesurées en soufflerie subsonique (HM 170 Gunt) sont substituées dans les équations ci-dessous (Eq.12, Eq.14 et Eq.15) pour que les valeurs de la force de portance et de la traînée soient calculées.

$$C_P = \frac{F_P}{q.S} \dots\dots\dots (12)$$

Où, C_P est le coefficient de portance, F_P est la force de portance, q est la pression dynamique et S est la surface plane du profil NACA 4412 ($S = 0,175 \times 0,1 \text{ m}^2$).

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \dots\dots\dots (13)$$

v représente la vitesse du vent [m/s], ρ est la densité,

$$C_T = \frac{F_T}{q.S} \dots\dots\dots (14)$$

C_T est le coefficient de traînée et F_T est la force de traînée,

$$C_E = \frac{C_P}{C_T} \dots\dots\dots (15)$$

C_E est le coefficient d'efficacité (ou de performance),

Tableau 5.10: Résultats pour un profil NACA 4412 lisse ($Ra= 0.94$).

α	m_P [g]	m_T [g]	F_P [N]	F_T [N]	C_P	C_T	$C_E = C_P/C_T$
-4,5	-2,255	1,074	-0,02	0,01	-0,021	0,01	-2,10
0	50,479	0,752	0,50	0,01	0,470	0,007	67,14
3	86,137	0,859	0,86	0,01	0,802	0,008	100,25
4,5	103,321	0,859	1,03	0,01	0,962	0,008	120,25
6	119,968	1,181	1,20	0,01	1,117	0,011	101,55
8	139,623	1,289	1,39	0,01	1,300	0,012	108,33
10	151,330	1,933	1,51	0,02	1,409	0,018	78,28
12	160,674	2,792	1,60	0,03	1,496	0,026	57,54
13	163,144	3,544	1,63	0,04	1,519	0,033	46,03
15	162,822	5,800	1,62	0,06	1,516	0,054	28,07
16	163,252	7,303	1,63	0,07	1,520	0,068	22,35
17	161,748	8,592	1,61	0,09	1,506	0,08	18,83
19	157,022	12,136	1,57	0,12	1,462	0,113	12,94
20	154,122	14,177	1,54	0,14	1,435	0,132	10,87

Tableau 5.11: Résultats pour un profil NACA 4412 rugueux ($t = 40$ s).

α	m_P [g]	m_T [g]	F_P [N]	F_T [N]	C_P	C_T	$C_E = C_P/C_T$
-4,5	-2,041	1,074	-0,020	0,01	-0,019	0,01	-1,90
0	51,553	0,752	0,515	0,01	0,480	0,007	68,57
3	85,814	0,859	0,856	0,01	0,799	0,008	99,88
4,5	101,066	1,074	1,009	0,01	0,941	0,01	94,10
6	117,713	1,289	1,175	0,01	1,096	0,012	91,33
8	132,105	1,396	1,318	0,01	1,230	0,013	94,62
10	143,275	2,255	1,430	0,02	1,334	0,021	63,52
12	153,693	3,115	1,534	0,03	1,431	0,029	49,34
13	154,552	3,974	1,542	0,04	1,439	0,037	38,89
15	155,733	6,015	1,554	0,06	1,450	0,056	25,89
16	157,559	7,411	1,572	0,07	1,467	0,069	21,26
17	156,593	8,914	1,563	0,09	1,458	0,083	17,57
19	157,022	11,814	1,567	0,12	1,462	0,11	13,29
20	150,578	14,607	1,503	0,15	1,402	0,136	10,31

Les résultats récoltés par les essais expérimentaux sont traités et regroupés dans les tableaux ci-dessus, mais ici on représente seulement les résultats de l'échantillon témoin qui est lisse et ceux de l'échantillon dégradé par sablage pendant 40 sec.

Avec les résultats des tableaux 5.10 et 5.11, on peut tracer les courbes du coefficient de portance, du coefficient de traînée et le coefficient d'efficacité comme le montre les figures ci-dessous.

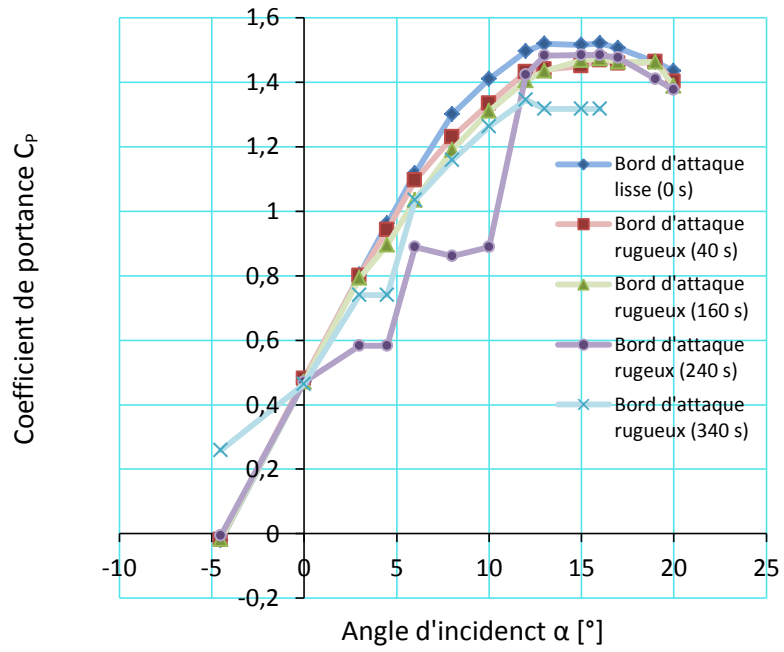


Fig. 5.25: Coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence.

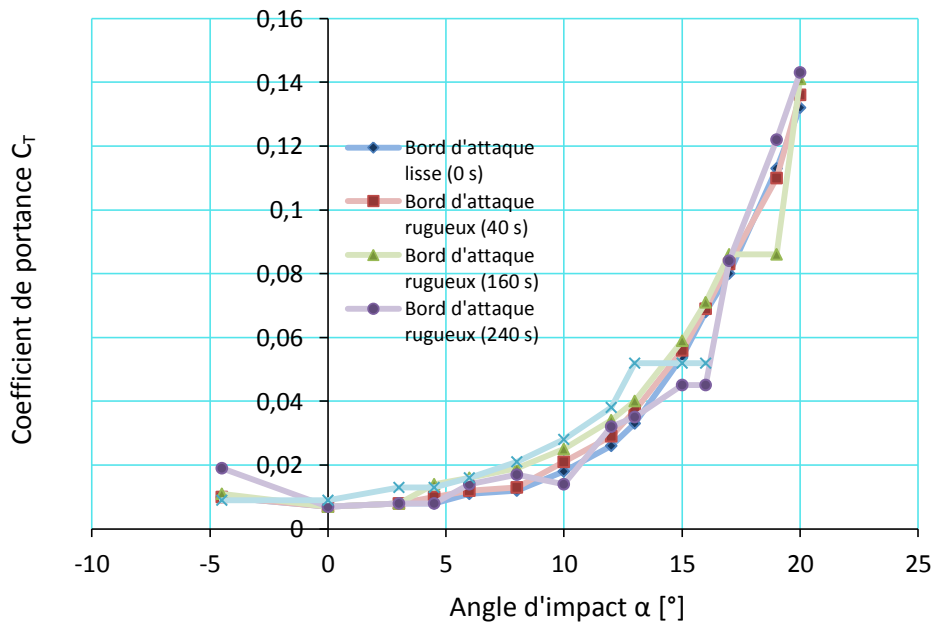


Fig. 5.26: Coefficient de traînée en fonction de l'angle d'incidence.

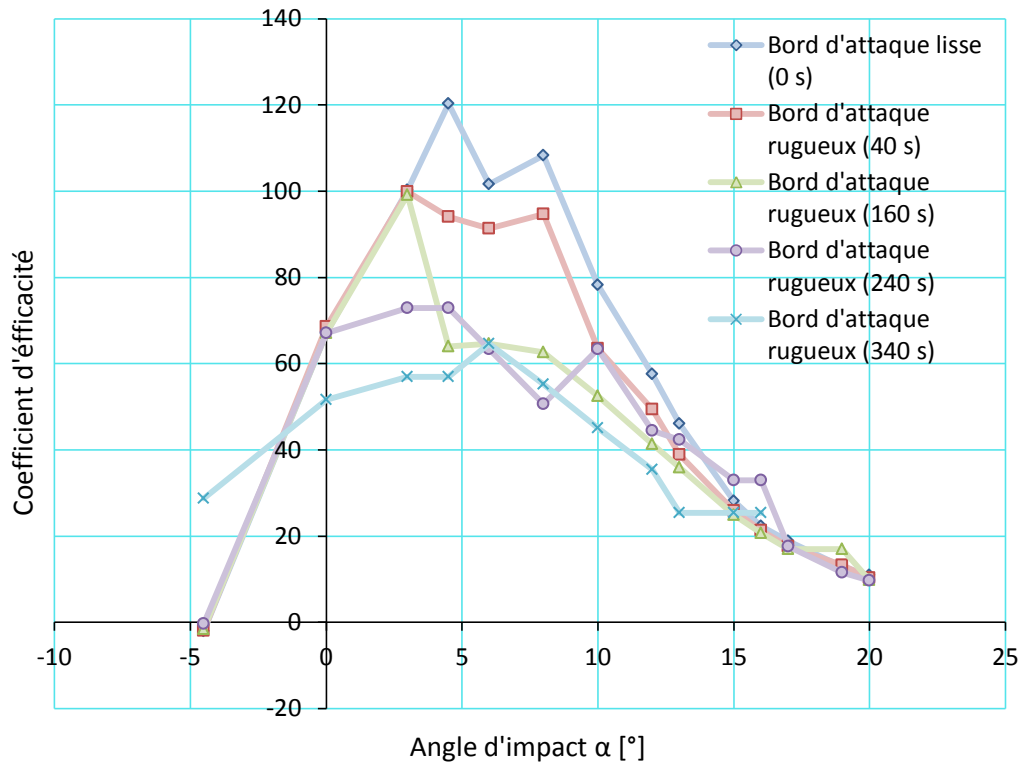


Fig. 5.27: Coefficient d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence.

La figure 5.25, montre les effets de la durée de l'impact sur les variations du coefficient de portance pour les profils lisse ($t = 0$ s) et rugueux ($t = 40$, $t = 160$, $t = 240$ et $t = 340$ s). La rugosité a un effet significatif sur les données du coefficient de portance. Les coefficients de portance pour les profils ($t = 240$ s et $t = 340$ s) ont des valeurs inférieures à celles du profil net ($t = 0$ s) et les profils rugueux ($t = 40$ s, $t = 160$ s), qui restent quasiment identiques. Cependant, l'exception concerne les coefficients de portance pour ($t = 340$ s), qui ont les valeurs les plus faibles jusqu'à l'angle $\alpha = 10^\circ$, puis il y a une forte augmentation lorsque α atteint 13° . Cela s'explique par le fait que lorsque $\alpha = 10^\circ$, les dommages sur le bord d'attaque ont formé un obstacle qui empêche le flux d'air et contribue par conséquent à la diminution de la force de portance et à l'augmentation de la force de traînée. La rugosité influe sur la force de traînée lors de la séparation et elle devient donc apparente à un AOA élevé (Fig.5.26). Or si $\alpha = 13^\circ$, l'air sera moins sensible aux défauts micro et macro géométriques de la surface dégradée avec sa nouvelle orientation et la surface de l'échantillon n'empêche pas le flux d'air. Nous sommes à la frontière qui délimite la zone lisse et la zone rugueuse (voir Fig.5.28).

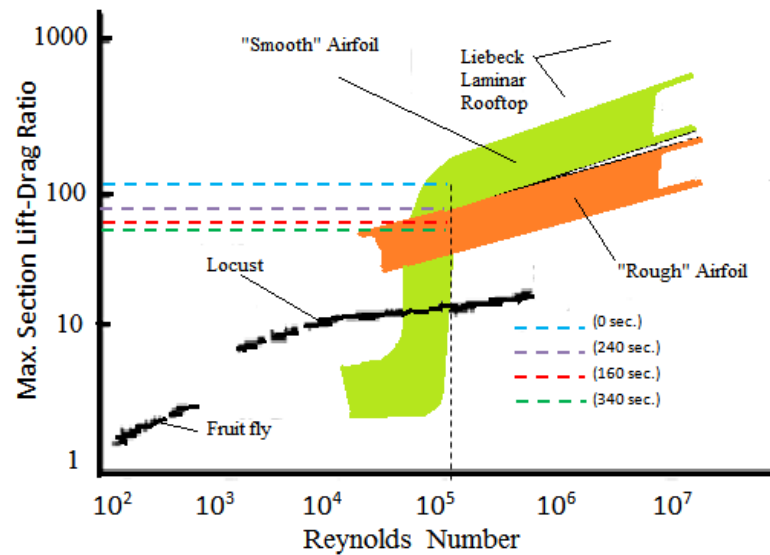


Fig. 5.28: Les zones lisses et rugueuses des profils d'ailes [26].

Une inspection de la Figure 5.27, montre qu'à $\alpha = 0^\circ$, les échantillons ($t = 40$, $t = 0$, $t = 160$ et $t = 240$) ont presque la même performance et que seul l'échantillon ($t = 340$) a une performance qui a chuté de 22,20% par rapport aux autres. Il y a une chute de performance à $\alpha = 3^\circ$ de 66,97% pour le spécimen ($t = 340$ s) et de 51,43% pour le spécimen ($t = 240$ s), tandis que les trois spécimens ($t = 0$ s, $t = 40$ s et $t = 160$ s) ont la même performance.

Lorsque l'échantillon lisse ($t = 0$ s) atteint son maximum à $\alpha = 4,5^\circ$ avec un coefficient d'efficacité de $C_E = 120,25$, les trois autres échantillons ($t = 160$ s, $t = 240$ s et $t = 340$ s) auront respectivement des performances pertes de: 46,77%, 39,39% et 50,17%.

À $\alpha = 6^\circ$, les trois profils ($t = 160$ s, $t = 240$ s et $t = 340$ s) perdront jusqu'à 36,78% de leurs performances en les comparant avec le profil lisse.

Dans l'intervalle $6 < \alpha < 10^\circ$, on remarque que les pertes de performance des profils ($t = 160$ s et $t = 340$ s) diminuent de la même manière alors que celle de ($t = 240$ s) varie et que sa courbe prend une allure inattendue.

À l'angle d'incidence, $\alpha = 13^\circ$ qui correspond à l'angle de décrochage, où la valeur du coefficient de portance est maximale, $C_L = 1,519$ (point de décrochage).

5.11 Conclusions

Le travail du chapitre 5 est consacré à l'étude des profils d'ailes du type NACA 4412 similaire à la géométrie d'une pointe de pale d'éolienne (rayon de rotor : 8m) et fabriqués en polyester renforcé de fibres de verre. Ces profils ont été soumis à l'érosion par des particules de sable. Les investigations expérimentales effectuées à différents angles d'impact montrent que les taux d'usure par érosion sont fonction du temps de sablage. La surface du profil rugueux ($t= 240$ s) a des coefficients de portance inférieurs que celui avec une surface lisse. Les coefficients de portance du profil rugueux ($t=240s$) sont souvent inférieurs à ceux des autres surfaces des profils érodées ($t = 160$ s et $t = 340$ s) dans la plage de $0^\circ < \alpha < 12^\circ$. La seule explication de ces résultats est que la géométrie de la dégradation est différente pour tous les profils même si les temps d'exposition est le même. En comparant les profils dégradés par l'érosion du sable avec ceux qui sont lisses à $\alpha = 4,5^\circ$, ces derniers présentent des performances les plus élevées. On peut dire que les profils érodés perdent leurs performances avec un taux moyen de 45,44%. Cela signifie que la production d'énergie des pales d'éoliennes diminue dans un environnement poussiéreux, ainsi que sa durée de vie. Cependant, ces travaux ouvrent des recherches futures afin de trouver un revêtement approprié qui permettrait d'augmenter la durabilité des pales d'éoliennes exposées à l'érosion par les particules de sable au cours de leur fonctionnement. Ces tests expérimentaux sur le profil NACA 4412 vont être utilisés pour déterminer la valeur seuil de surveillance des éoliennes afin d'appliquer une stratégie de CBM dans un futur travail. Grâce à la détermination de la valeur seuil optimale, le CBM sera capable de maintenir le niveau de production annuel d'une éolienne constant malgré l'environnement agressif de la région.

Bibliographie

- [1] ASTM-G40-05, "Standard Terminology Relating to wear and Erosion"
- [2] Yaping Shao, Physics and modeling of wind erosion. Springer, Atmospheric and oceanographic sciences library, volume 37.
- [3]. Harsha A.P, Tewari U.S and Venkatraman B, (2003). Solid particle erosion behaviour of various polyaryletherketone composites, *Wear*, 254:693-712.
- [4] G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [5] H.C. Meng, K.C. Ludema. "Wear models and predictive equations: their form and content". *Wear* 181-183 (1995) p. 443-457, 1995.
- [6] D.K. Lysne, B. Glover, H. Støle and E. Tesaker, *Hydropower development book series number 8 - Hydraulic design*, NTNU, 2003.
- [7] N. Miyazaki, T. Hamao, "Solid particle erosion of thermoplastic resins reinforced by short fibers", *J. Compos. Mater.* 28 (9) (1994) 871–883.
- [8] M. Buijs, J.M.M. Pasmans, "Erosion of glass by alumina particles": transitions and exponents, *Wear* (184), p. 61-65, 1995.
- [9] D.B. Marshall, B.R. Lawn, A.G. Evans, "Elastic-plastic indentation damage in ceramic: the lateral crack system", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 65, p. 561-566, 1982.
- [10] Keegan MH, Nash DH, Stack MM. "On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades". *J Phys D Appl Phys* 2013;46:383001.
- [11] S. Bouzid, Z. Azari, S. Dominiack, J. Gilgert, A. Dhieb, *Endommage du verre par impact de sable : évaluation du volume érodé*, *Verre*, Vol. 9, n°3, 2003.
- [12] G.L. Sheldon, G. Kanhere, "An investigation of the impingement erosion using single particles", *Wear*, vol. 21, 1972, pp. 195-209.
- [13] D. Mills, J.S. Mason, "Learning to live with erosion of bends", *First International Conference on the Internal and External Protection of Pipes*, Sept. 9-11, 1975, University of Durham, Paper G1.
- [14] R.C.D. Richardson, "The wear of metals by hard Abrasives", *Wear* 10, 1967, pp. 291-309.
- [15] G.F.Truscott, « A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery", *Wear*, Volume 20, Issue 1, May 1972, Pages 29-50.
- [16] E. Rabinowicz, R. I. Tanner, "Friction and Wear of Materials", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 33, issue 2, p. 479
- [17] J.D. Gibbings, "Dimensional analysis of wear by particle impact in fluid flow", *Journal of mechanical engineering science*, vol. 13, 4.
- [18] I. Finnie, "Some observations on the erosion of ductile metals", *Wear*, vol. 19, 1972, pp. 81-90.
- [19] G. Grant, Tabakoff, "Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from Environmental Solid Particles", *Journal of Aircraft*, W. 5, Vol. 12, May 1975, pp.471-478.
- [20] M. Bjordal, E. Bardal, T. Rogne, T.G. Eggen, "Erosion and corrosion properties of WC coatings and duplex stainless steel in sand-containing synthetic sea water", *Wear*, Volumes 186–187, Part 2, Aug. 1995, pp. 508-514
- [21]. MIL-STD-810G, "Method 510.5: Sand and dust", 2008
- [22] I.M. Hutchings, R.E. Winter, J.E. Field, "Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles", *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A* 348, 1976, pp.379-392.
- [23] E. Bardal, "Korrosjon og korrosjonsvern", Tapir, Trondheim (In Norwegian), 1985.
- [24] F.T. Barwell, *Wear of metals*, *Wear* (1) , 1957-1958, pp. 317-332.
- [25] S. K. Rhee, 'Wear on for polymers sliding against metal surfaces', *Wear*, 16, 1970, pp. 431–445.
- [26] J. H. McMasters, M. L. Henderson, "Low-speed single-element airfoil synthesis", *Technical Soaring* 4, 2, 1979, 1–21.

Conclusion et perspective

Sur la base des travaux de recherche, les buts et les objectifs de ce travail ont été atteints. Des constatations importantes sont résumées ci-dessous.

Au cours de ce travail la simulation et l'expérimentation aérodynamique de pales d'éoliennes étaient au centre de nos intérêts afin de comprendre et de cerner le problème que les bords d'attaque de ces derniers sont confrontés au cours de leurs fonctionnement dans les zones arides et semi arides. Avec l'outil de simulation, la méthode du Disque Actif a été employée pour modéliser le rotor et ses interactions avec l'air.

Après avoir présenté le problème de l'érosion à partir de la littérature disponible, les procédures expérimentales et la méthodologie de calcul itératif ont été employés et les endroits les plus touchés de la pale par l'érosion ont été déterminés.

Les principales dépendances fonctionnelles du comportement du matériau composites sous érosion par impact des particules de sable (air + sable) ont été étudiées avec une nouvelle approche dans cette thèse malgré la rareté des contributions scientifiques dans la littérature.

Des tests expérimentaux ont été effectués pour différentes conditions de fonctionnement (vitesses de jet, angles d'inclinaison de l'échantillon, particules de sable, temps de test) pour les échantillons sous forme de plaques et les échantillons sous forme de profil NACA 4412 du matériau cibles.

La dépendance du taux d'érosion (ER) à l'angle d'inclinaison de l'échantillon et au temps d'exposition à un jet d'air chargé de particules de sable fines a été confirmé dans ce travail.

La génération de la géométrie en 2D et en 3D des pales à l'aide du Solidworks a été ainsi directement exploitée par les logiciels Xfoil et Ansys-Fluent afin de visualiser les profils aérodynamiques et leurs comportements dans des conditions similaires à ceux de leurs fonctionnements.

En comparant les profils dégradés par l'érosion du sable avec ceux qui sont lisses (témoins), ces derniers présentent des performances les plus élevées. On peut dire que les profils érodés perdent leurs performances avec un taux moyen de 45,44%. Cela signifie que la production d'énergie des pales d'éoliennes diminue dans un environnement sec et poussiéreux, ainsi que sa durée de vie.

En plus de permettre une caractérisation préliminaire de l'érosion des bords d'attaque des pales d'éolienne, les résultats de cette thèse peuvent également être utilisés pour le développement et la validation de modèles numériques prédictifs. À cette fin, il conviendrait de mener une enquête plus approfondie sur l'effet de la durée prolongée des essais, ainsi qu'une analyse quantitative de la surface érodée. De plus, et afin de maîtriser le bon fonctionnement et d'augmenter la durée de vie de l'éolienne les résultats obtenus serviront à établir une stratégie de maintenance basé sur le seuil d'érosion admissible avant réparation des pales qui seront mises sous surveillance continue. Le CBM ainsi établi contribuera à diminuer les visites d'inspection et de réparation des équipes de maintenance et de garder la production d'énergie à des niveaux acceptables.

ANNEXE : A

*Les coordonnées : x_U, y_U de l'extrados
 x_L, y_L de l'intrados*

x_U	x_L	y_U	y_L
0	0	0	0
0,00099955	0,00100063	0,00247834	-0,0020812
0,00199875	0,00200152	0,003571	-0,00278243
0,00299774	0,00300258	0,00443134	-0,00325706
0,00399659	0,00400378	0,00516895	-0,00361466
0,00499531	0,00500509	0,00582629	-0,00389772
0,00599394	0,00600649	0,00642515	-0,00412801
0,00699249	0,00700796	0,00697851	-0,00431851
0,00799097	0,0080095	0,00749481	-0,00447766
0,0089894	0,00901108	0,00797993	-0,00461136
0,00998778	0,01001271	0,00843817	-0,00472388
0,01098612	0,01101438	0,00887277	-0,00481849
0,01198444	0,01201607	0,00928627	-0,0048977
0,01298273	0,01301778	0,00968067	-0,00496353
0,01398101	0,0140195	0,01005763	-0,00501763
0,01497927	0,01502124	0,01041849	-0,00506135
0,01597752	0,01602298	0,0107644	-0,00509583
0,01697578	0,01702473	0,01109633	-0,00512204
0,01797403	0,01802647	0,0114151	-0,00514081
0,01897229	0,0190282	0,01172144	-0,00515287
0,01997056	0,02002993	0,01201597	-0,00515883
0,02096884	0,02103164	0,01229926	-0,00515926
0,02196713	0,02203334	0,0125718	-0,00515466
0,02296544	0,02303502	0,01283402	-0,00514545
0,02396377	0,02403668	0,01308633	-0,00513205
0,02496212	0,02503831	0,01332908	-0,0051148
0,0259605	0,02603992	0,0135626	-0,00509403
0,0269589	0,02704151	0,01378718	-0,00507004
0,02795734	0,02804306	0,01400309	-0,00504309
0,0289558	0,02904459	0,01421059	-0,00501344
0,02995429	0,03004608	0,01440989	-0,00498132
0,03095282	0,03104754	0,01460123	-0,00494694
0,03195138	0,03204896	0,01478478	-0,0049105
0,03294998	0,03305035	0,01496075	-0,00487217
0,03394861	0,03405169	0,01512928	-0,00483214
0,03494729	0,035053	0,01529056	-0,00479056
0,035946	0,03605428	0,01544473	-0,00474758
0,03694475	0,03705551	0,01559192	-0,00470335
0,03794355	0,03805669	0,01573228	-0,004658
0,03894238	0,03905784	0,01586593	-0,00461165
0,03994126	0,04005894	0,01599299	-0,00456442

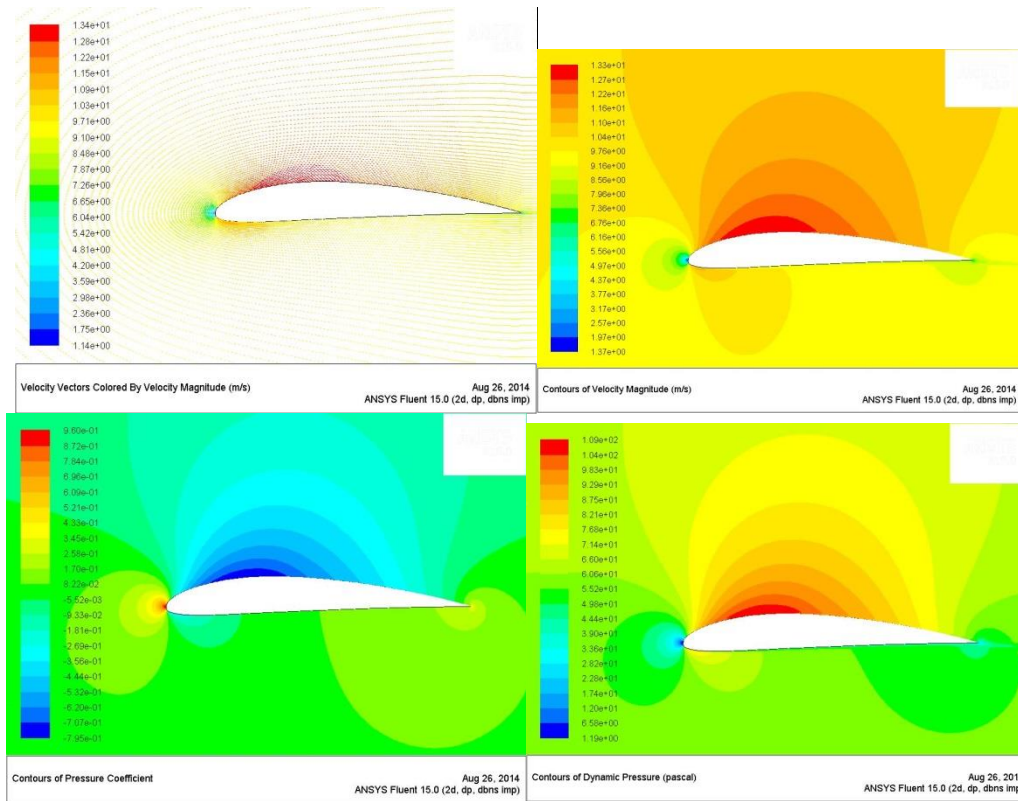
0,04094019	0,04106	0,01611357	-0,00451643
0,04193916	0,04206102	0,01622778	-0,00446778
0,04293817	0,04306199	0,01633571	-0,00441857
0,04393722	0,04406291	0,01643748	-0,00436891
0,04493633	0,04506379	0,01653316	-0,00431888
0,04593548	0,04606463	0,01662285	-0,00426857
0,04693467	0,04706542	0,01670664	-0,00421807
0,04793391	0,04806616	0,0167846	-0,00416745
0,0489332	0,04906685	0,0168568	-0,0041168
0,04993253	0,0500675	0,01692334	-0,00406619
0,05093192	0,0510681	0,01698426	-0,00401569
0,05193134	0,05206866	0,01703966	-0,00396537
0,05293082	0,05306916	0,01708958	-0,00391529
0,05393034	0,05406962	0,01713409	-0,00386552
0,05492991	0,05507004	0,01717326	-0,00381612
0,05592953	0,05607041	0,01720714	-0,00376714
0,05692919	0,05707073	0,01723579	-0,00371865
0,0579289	0,058071	0,01725927	-0,0036707
0,05892865	0,05907123	0,01727763	-0,00362334
0,05992845	0,06007142	0,01729091	-0,00357662
0,0609283	0,06107155	0,01729917	-0,0035306
0,06192819	0,06207165	0,01730246	-0,00348532
0,06292813	0,0630717	0,01730082	-0,00344082
0,06392811	0,0640717	0,01729431	-0,00339716
0,06492814	0,06507166	0,01728295	-0,00335438
0,06592821	0,06607158	0,01726679	-0,00331251
0,06692832	0,06707145	0,01724588	-0,0032716
0,06792848	0,06807128	0,01722026	-0,00323169
0,06892867	0,06907107	0,01718996	-0,00319282
0,06992891	0,07007082	0,01715502	-0,00315502
0,07092919	0,07107053	0,01711627	-0,00311754
0,07192949	0,07207022	0,01707454	-0,00307962
0,07292981	0,07306989	0,01702987	-0,0030413
0,07393015	0,07406953	0,01698228	-0,0030026
0,07493052	0,07506915	0,01693181	-0,00296356
0,07593092	0,07606875	0,0168785	-0,00292421
0,07693133	0,07706832	0,01682237	-0,00288459
0,07793177	0,07806788	0,01676344	-0,00284471
0,07893223	0,07906741	0,01670177	-0,00280462
0,07993271	0,08006692	0,01663735	-0,00276434
0,08093321	0,08106641	0,01657024	-0,00272389
0,08193373	0,08206588	0,01650045	-0,00268331
0,08293428	0,08306532	0,01642801	-0,00264261
0,08393484	0,08406475	0,01635294	-0,00260183
0,08493542	0,08506417	0,01627528	-0,00256099

0,08593602	0,08606356	0,01619503	-0,00252011
0,08693664	0,08706293	0,01611223	-0,00247922
0,08793727	0,08806229	0,01602691	-0,00243833
0,08893792	0,08906163	0,01593907	-0,00239748
0,08993859	0,09006096	0,01584874	-0,00235668
0,09093928	0,09106026	0,01575594	-0,00231594
0,09193998	0,09205956	0,01566607	-0,00227531
0,0929407	0,09305884	0,01556303	-0,00223478
0,09394143	0,0940581	0,01546295	-0,00219438
0,09494217	0,09505735	0,01536048	-0,00215413
0,09594293	0,09605658	0,01525564	-0,00211405
0,09694371	0,09705581	0,01514844	-0,00207416
0,09794449	0,09805502	0,01503891	-0,00203446
0,09894529	0,09905421	0,01492705	-0,00199498
0,0999461	0,1000534	0,01481288	-0,00195574
0,10094692	0,10105257	0,01469642	-0,00191674
0,10194775	0,10205174	0,01457769	-0,00187801
0,1029486	0,10305089	0,01445669	-0,00183955
0,10394945	0,10405004	0,01433345	-0,00180138
0,10495031	0,10504917	0,01420796	-0,00176352
0,10595118	0,1060483	0,01408026	-0,00172597
0,10695206	0,10704742	0,01395034	-0,00168876
0,10795295	0,10804653	0,01381823	-0,00165188
0,10895384	0,10904564	0,01368393	-0,00161536
0,10995474	0,11004474	0,01354746	-0,0015792
0,11095565	0,11104383	0,01340882	-0,00154342
0,11195656	0,11204292	0,01326802	-0,00150802
0,11295748	0,113042	0,01312508	-0,00147301
0,1139584	0,11404108	0,01298	-0,00143841
0,11495932	0,11504015	0,0128328	-0,00140422
0,11596025	0,11603923	0,01268347	-0,00137046
0,11696118	0,11703829	0,01253204	-0,00133712
0,11796212	0,11803736	0,0123785	-0,00130422
0,11896305	0,11903643	0,01222287	-0,00127176
0,11996399	0,12003549	0,01206515	-0,00123975
0,12096493	0,12103455	0,01190534	-0,0012082
0,12196587	0,12203362	0,01174346	-0,00117712
0,12296681	0,12303268	0,01157951	-0,0011465
0,12396774	0,12403175	0,0114135	-0,00111636
0,12496868	0,12503081	0,01124542	-0,00108669
0,12596961	0,12602988	0,01107529	-0,00105752
0,12697055	0,12702896	0,01090311	-0,00102883
0,12797147	0,12802803	0,01072888	-0,00100063
0,1289724	0,12902711	0,01055261	-0,00097292
0,12997332	0,13002619	0,01037429	-0,00094572

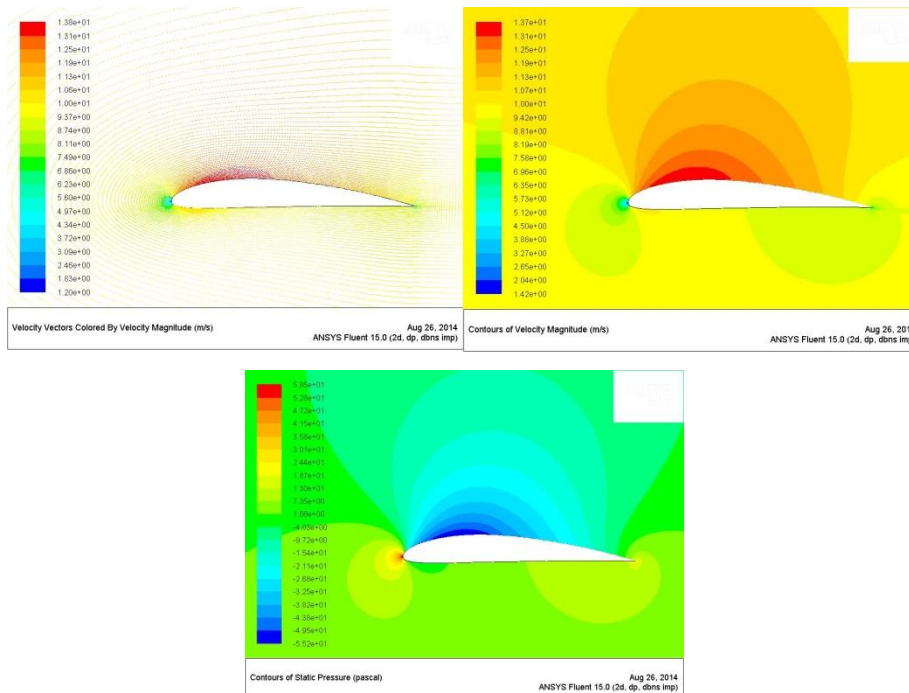
0,13097423	0,13102528	0,01019394	-0,00091902
0,13197514	0,13202438	0,01001155	-0,00089282
0,13297604	0,13302348	0,00982713	-0,00086713
0,13397694	0,13402259	0,00964067	-0,00084194
0,13497783	0,13502171	0,00945219	-0,00081726
0,13597871	0,13602083	0,00926167	-0,0007931
0,13697959	0,13701996	0,00906912	-0,00076944
0,13798045	0,1380191	0,00887455	-0,00074629
0,1389813	0,13901826	0,00867794	-0,00072366
0,13998215	0,14001742	0,00847931	-0,00070153
0,14098298	0,14101659	0,00827865	-0,00067992
0,1419838	0,14201578	0,00807595	-0,00065881
0,14298461	0,14301498	0,00787122	-0,00063821
0,14398541	0,14401419	0,00766446	-0,00061811
0,14498619	0,14501341	0,00745566	-0,00059851
0,14598696	0,14601265	0,00724482	-0,00057942
0,14698772	0,14701191	0,00703194	-0,00056082
0,14798846	0,14801118	0,00681701	-0,00054272
0,14898918	0,14901046	0,00660003	-0,00052511
0,14998989	0,15000977	0,006381	-0,00050799
0,15099057	0,15100909	0,00615992	-0,00049135
0,15199125	0,15200843	0,00593677	-0,00047518
0,1529919	0,15300778	0,00571156	-0,00045949
0,15399253	0,15400716	0,00548427	-0,00044427
0,15499314	0,15500656	0,00525491	-0,00042952
0,15599373	0,15600598	0,00502347	-0,00041522
0,1569943	0,15700542	0,00478994	-0,00040137
0,15799485	0,15800489	0,00455431	-0,00038796
0,15899538	0,15900437	0,00431659	-0,000375
0,15999588	0,16000389	0,00407675	-0,00036247
0,16099635	0,16100342	0,0038348	-0,00035036
0,16199681	0,16200299	0,00359073	-0,00033866
0,16299723	0,16300257	0,00334452	-0,00032738
0,16399763	0,16400219	0,00309618	-0,00031649
0,164998	0,16500183	0,00284568	-0,000306
0,16599834	0,16600151	0,00259303	-0,00029589
0,16699865	0,16700121	0,00233822	-0,00028615
0,16799894	0,16800094	0,00208123	-0,00027678
0,16899919	0,16900071	0,00182205	-0,00026776
0,16999941	0,1700005	0,00156068	-0,00025909
0,1709996	0,17100033	0,0012971	-0,00025075
0,17199975	0,1720002	0,0010313	-0,00024273
0,17299987	0,1730001	0,00076328	-0,00023502
0,17399995	0,17400003	0,00049301	-0,00022762
0,175	0,175	0,0002205	-0,0002205

ANNEXE B

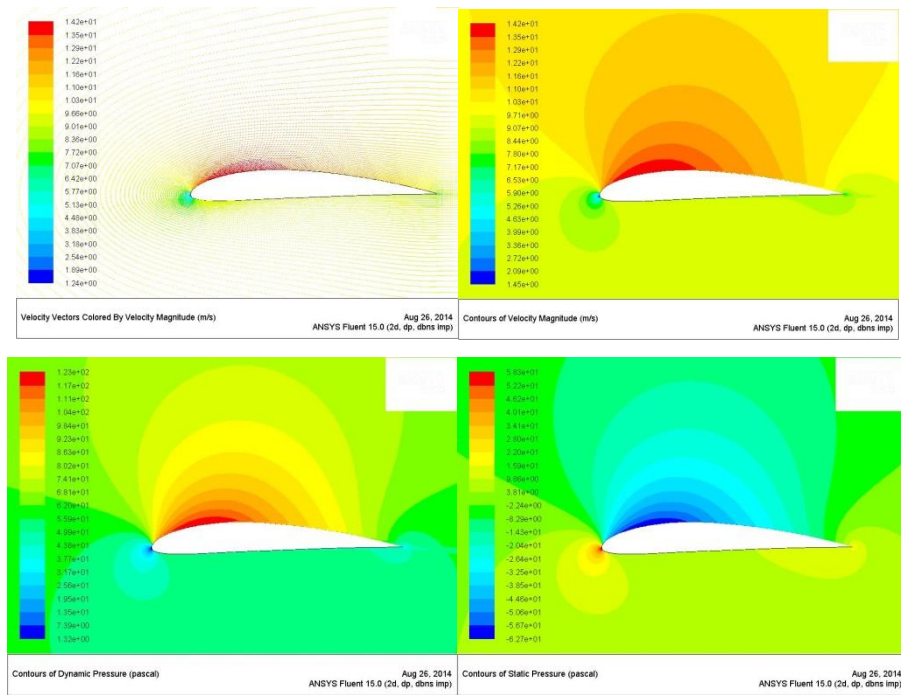
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 0^\circ$



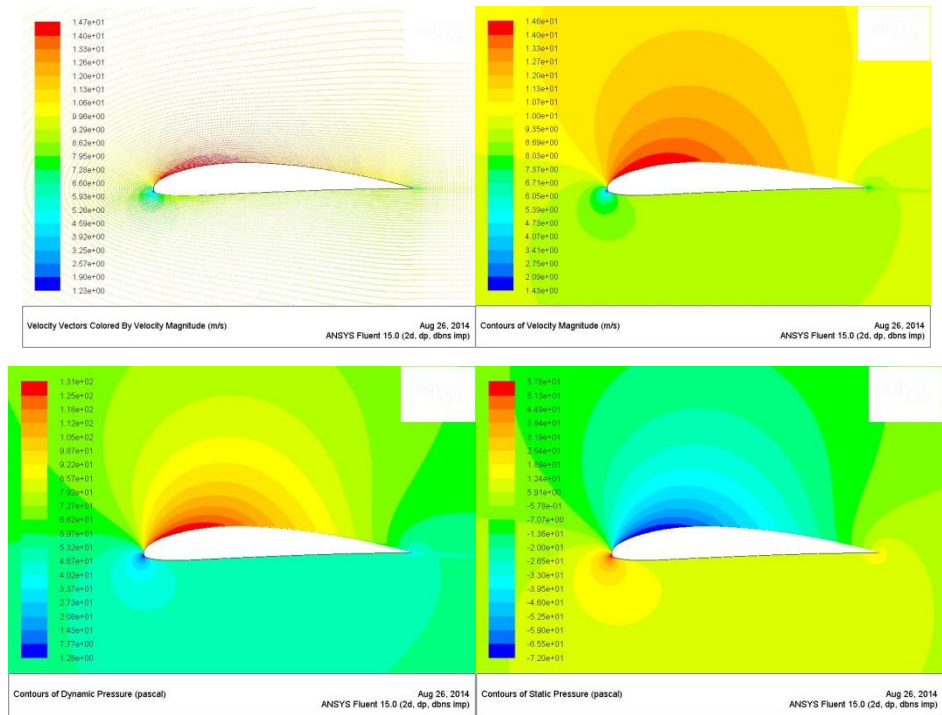
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 2^\circ$



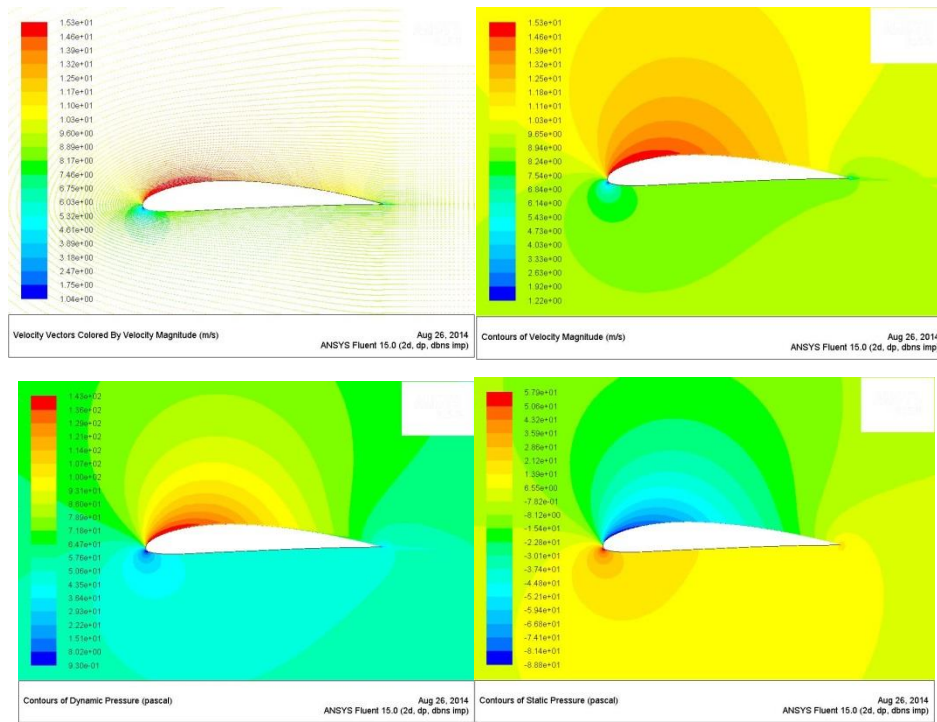
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 4^\circ$



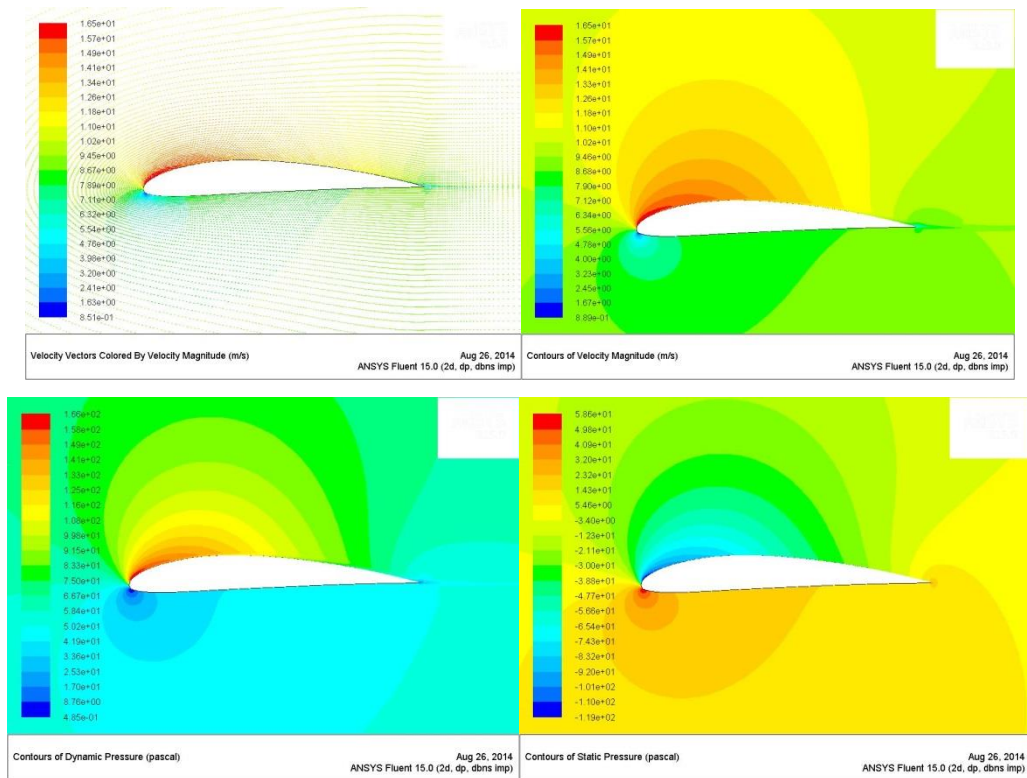
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 6^\circ$



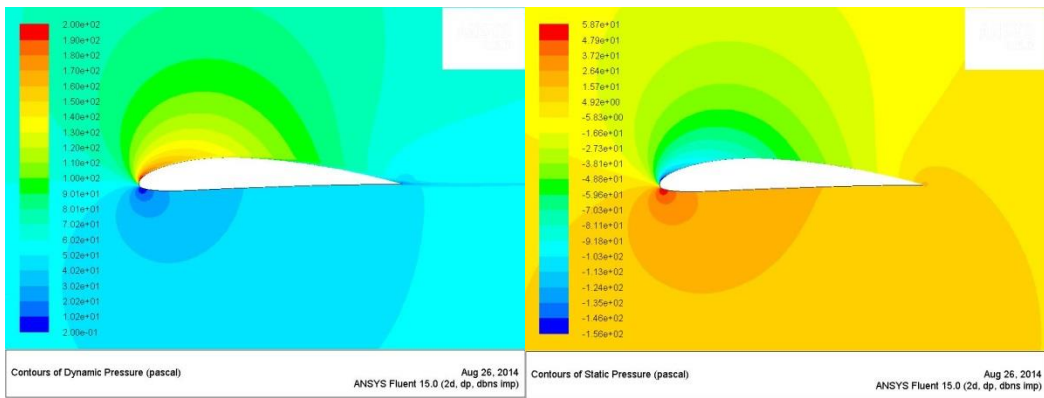
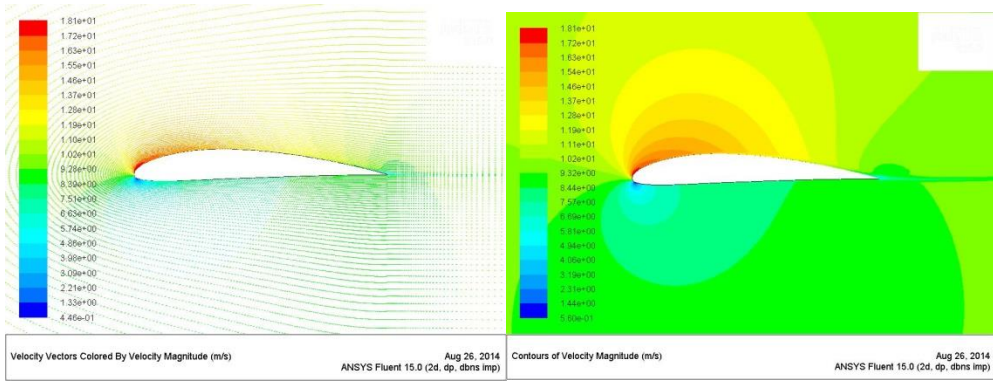
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 8^\circ$



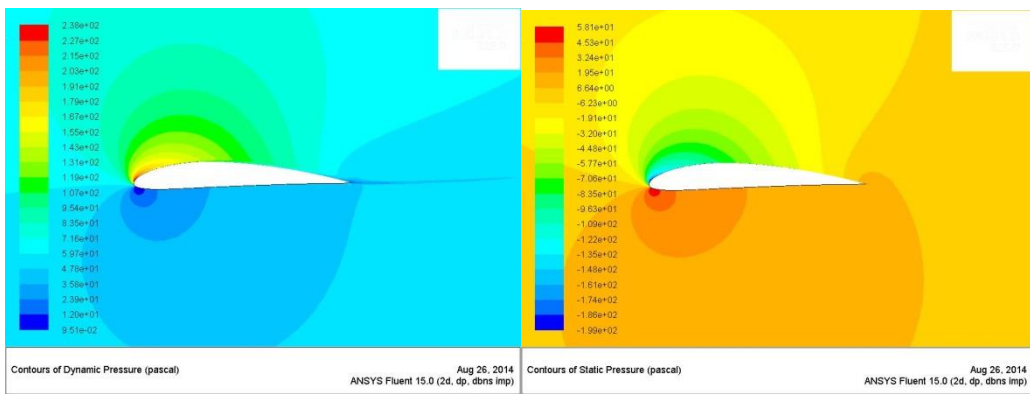
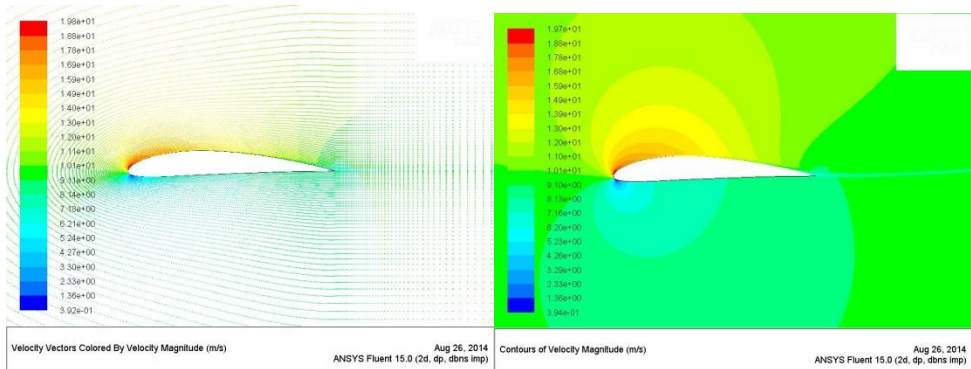
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 10^\circ$



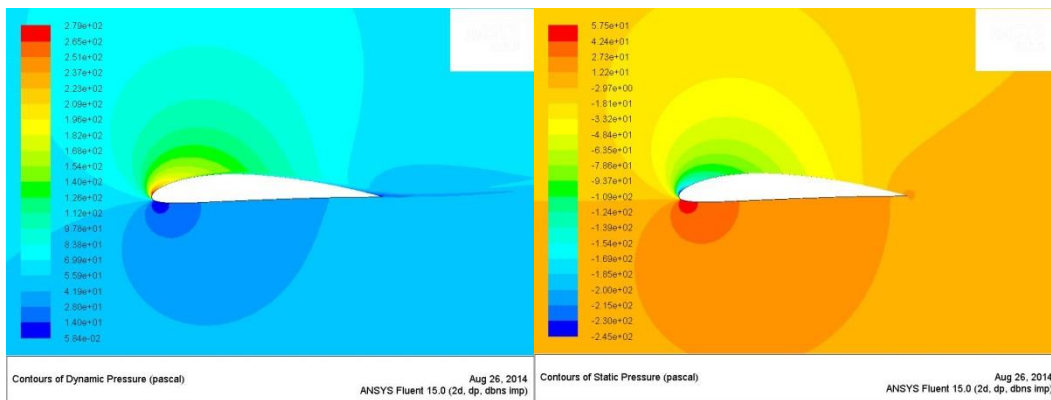
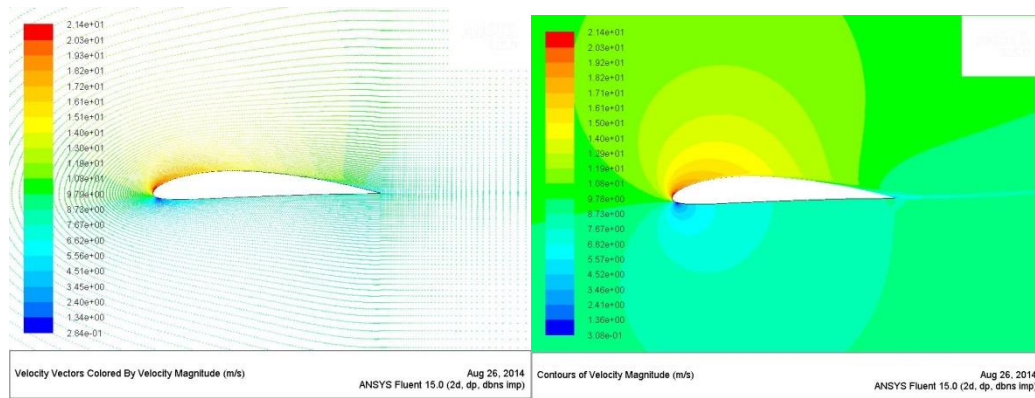
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 12^\circ$



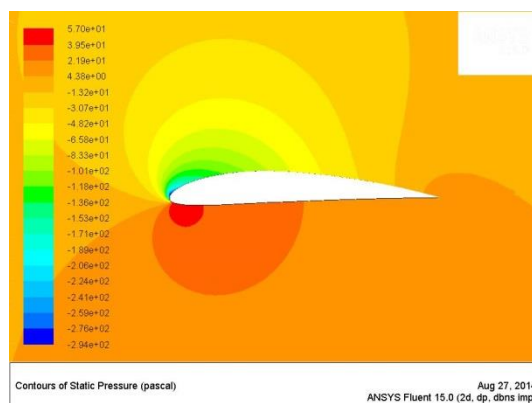
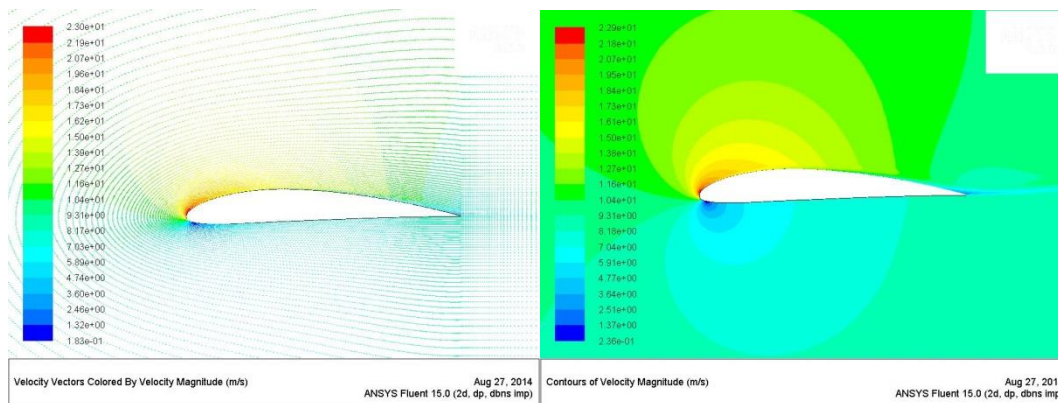
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 14^\circ$



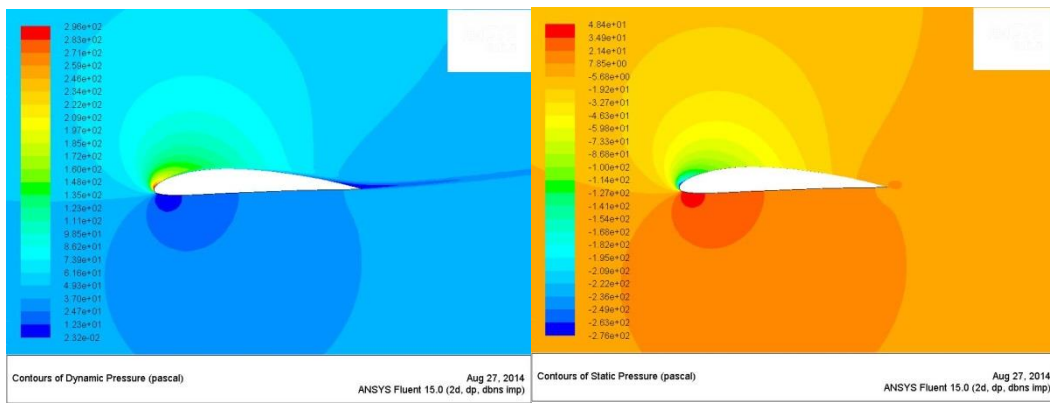
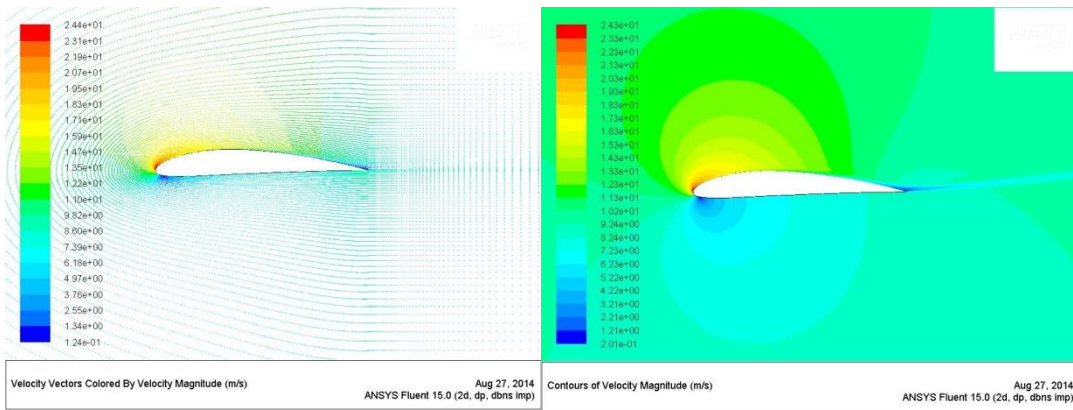
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 16^\circ$



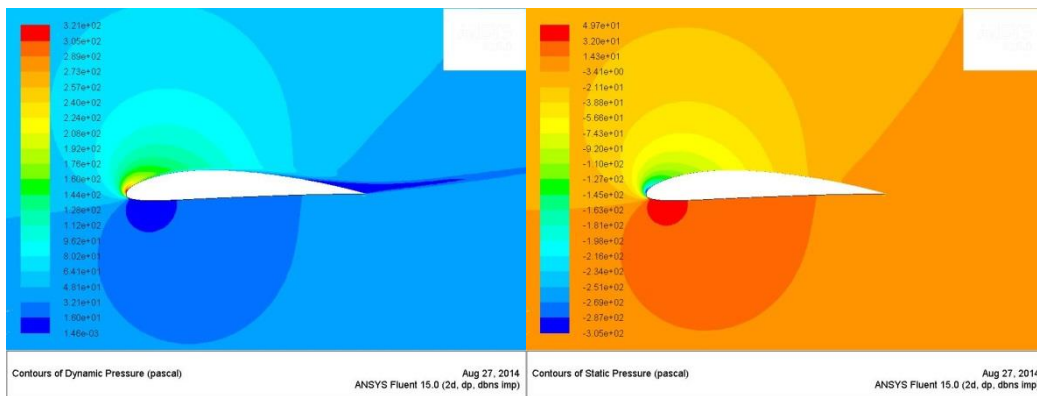
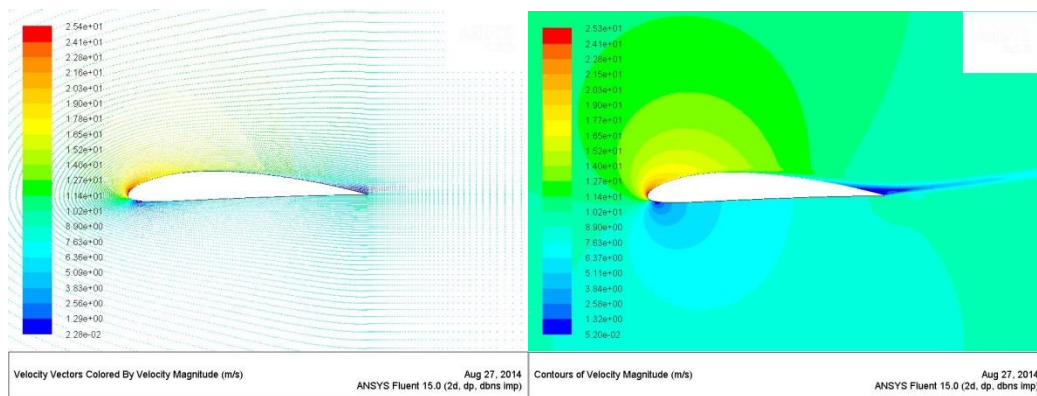
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 18^\circ$



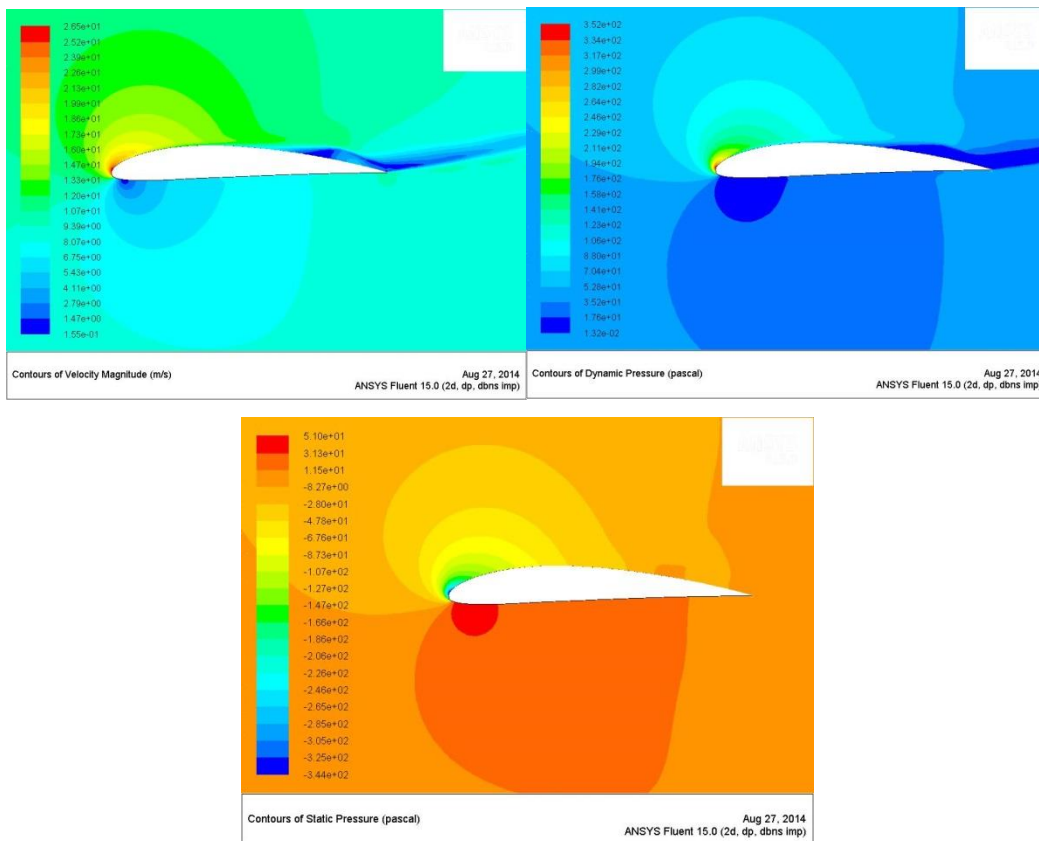
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 20^\circ$



Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 22^\circ$



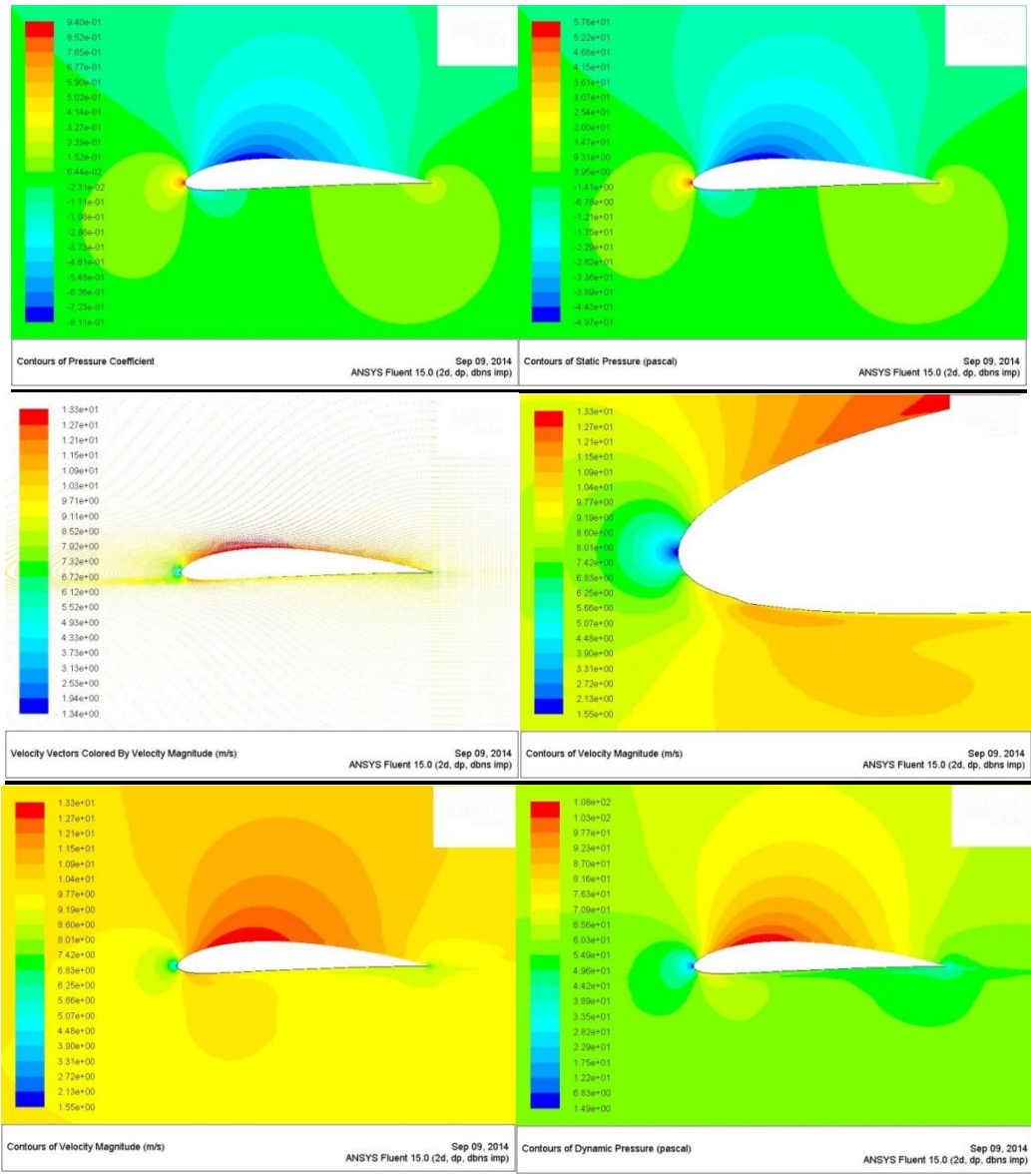
Section NACA 4412 (lisse), $\alpha = 25^\circ$



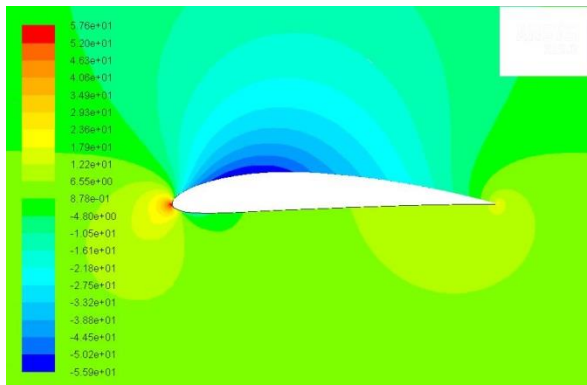
On peut consulter le reste des résultats de la simulation du profil NACA 4412 rugueux dans l'Annexe C.

ANNEXE C

Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 0^\circ$

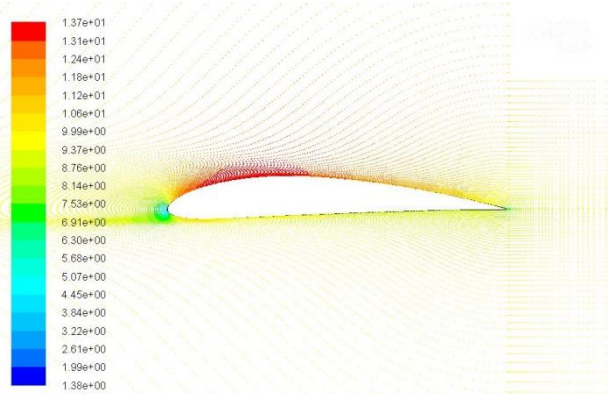


Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 2^\circ$



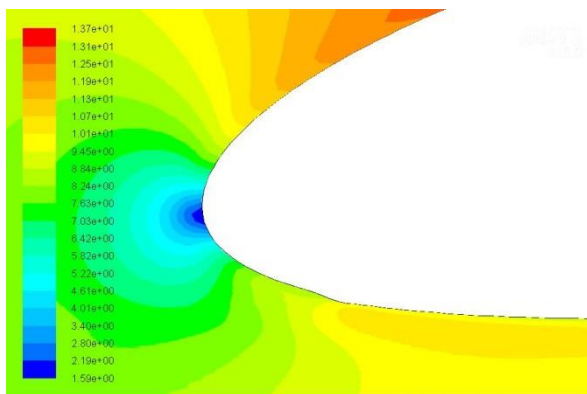
Contours of Static Pressure (pascal)

Sep 09, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, dbns imp)



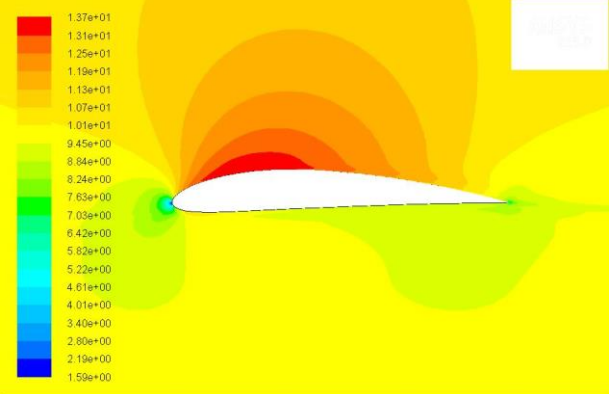
Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Sep 09, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, dbns imp)



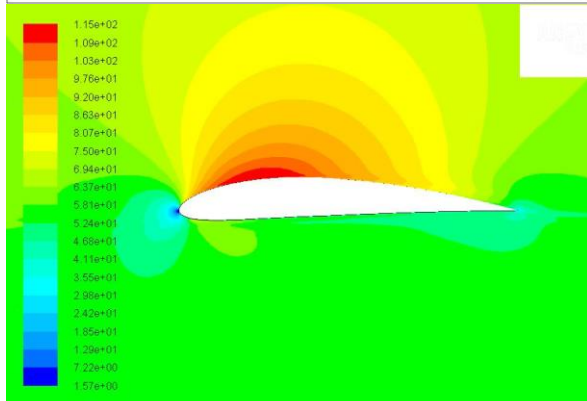
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 09, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, dbns imp)



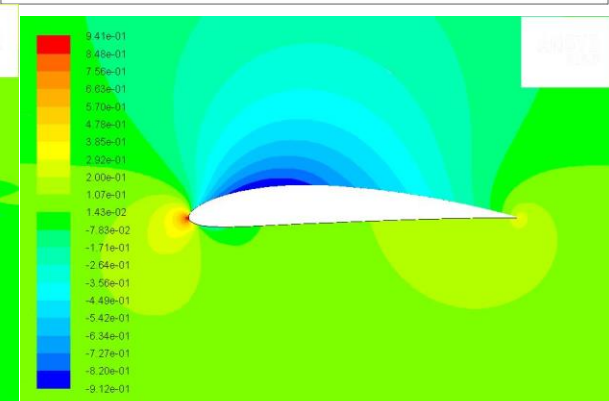
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Sep 09, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, dbns imp)



Contours of Dynamic Pressure (pascal)

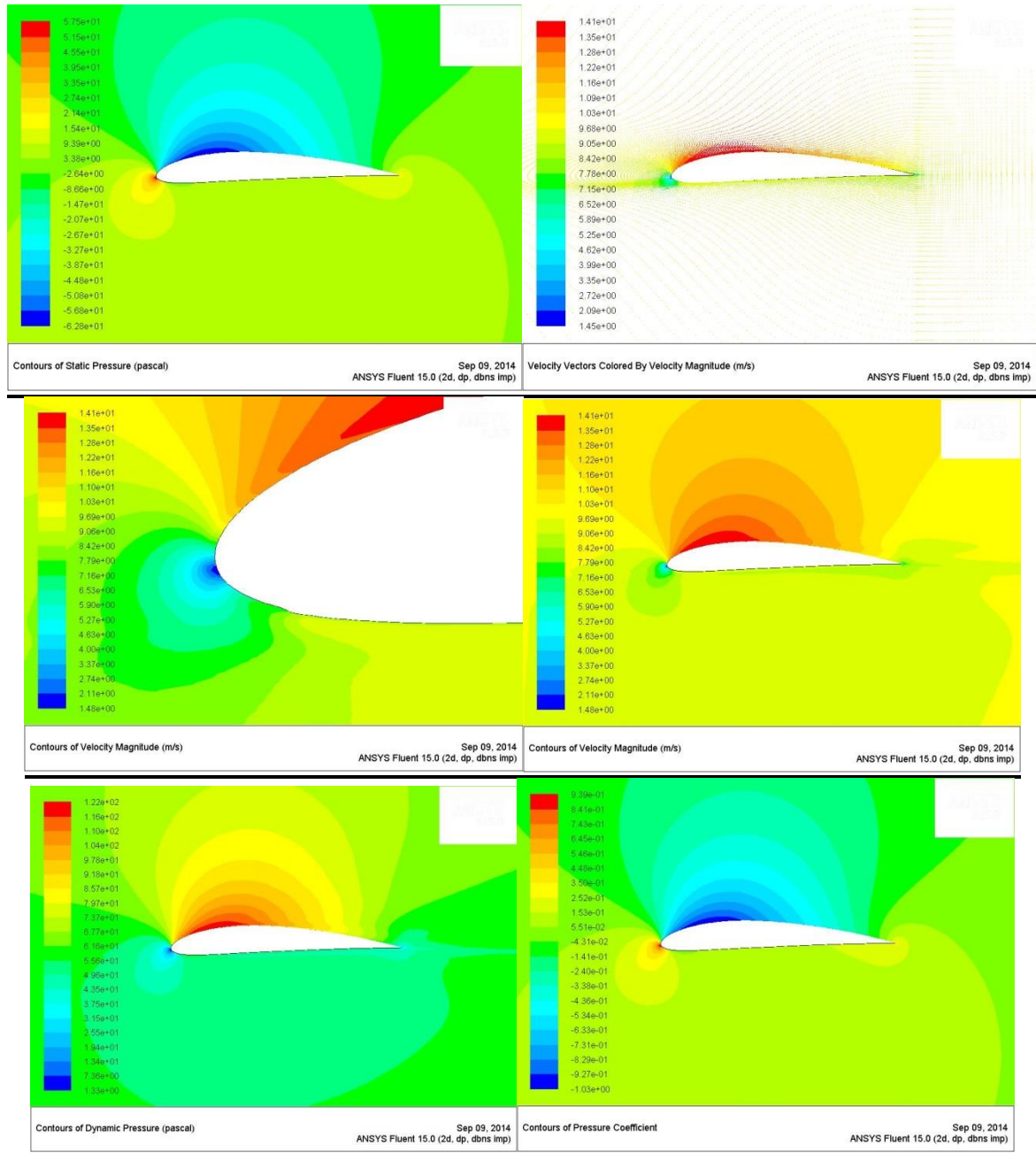
Sep 09, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, dbns imp)



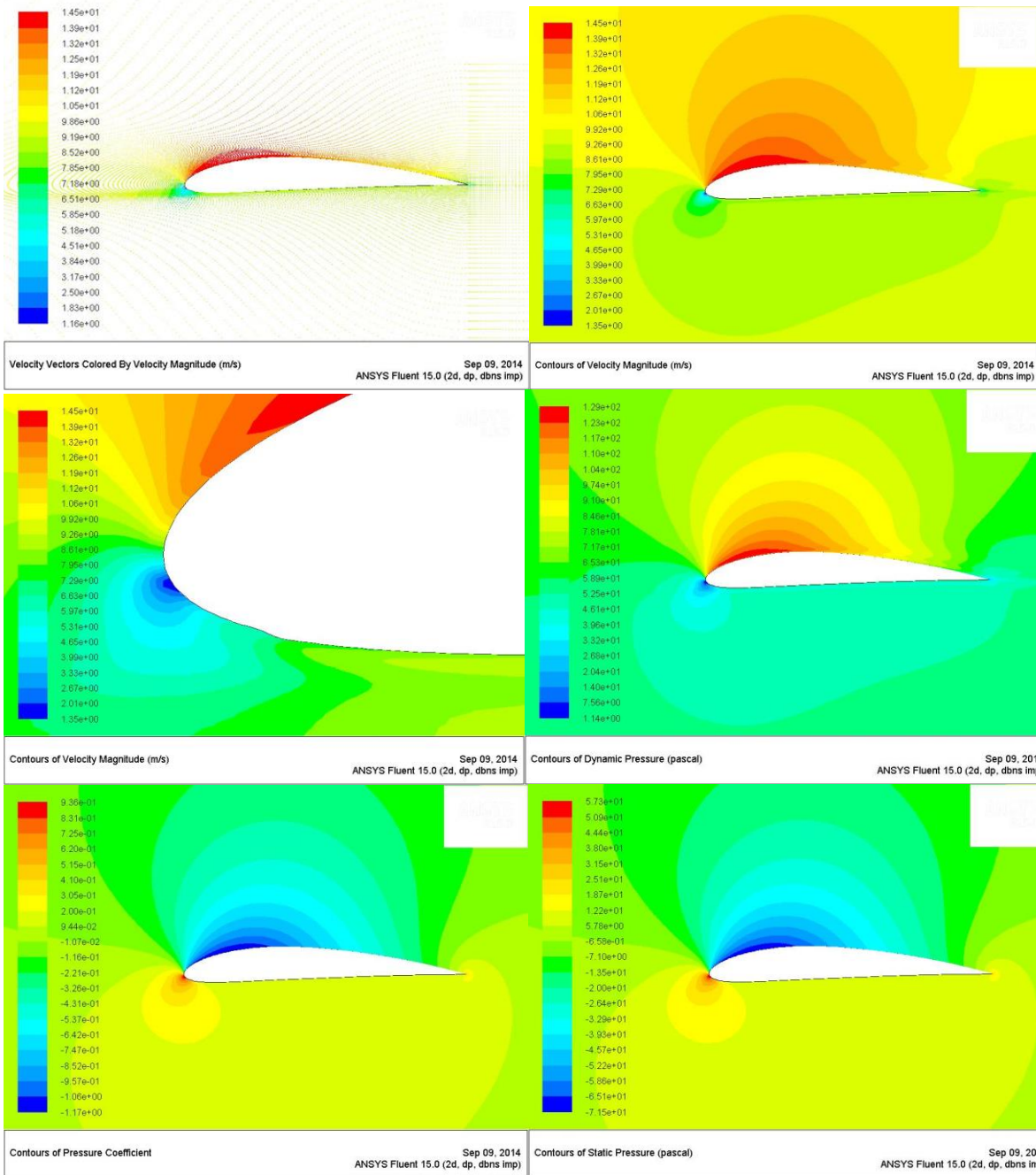
Contours of Pressure Coefficient

Sep 09, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, dbns imp)

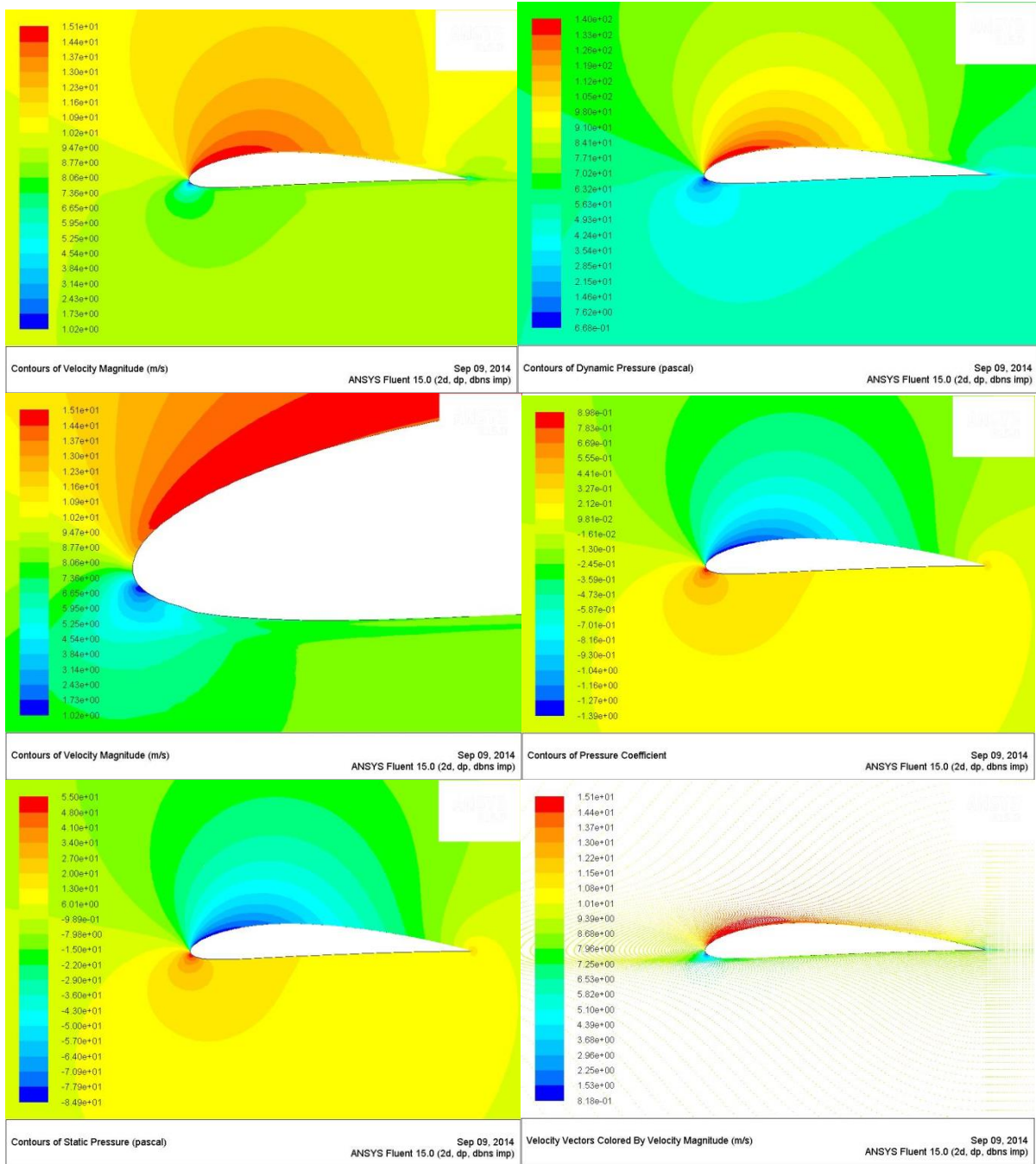
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 4^\circ$



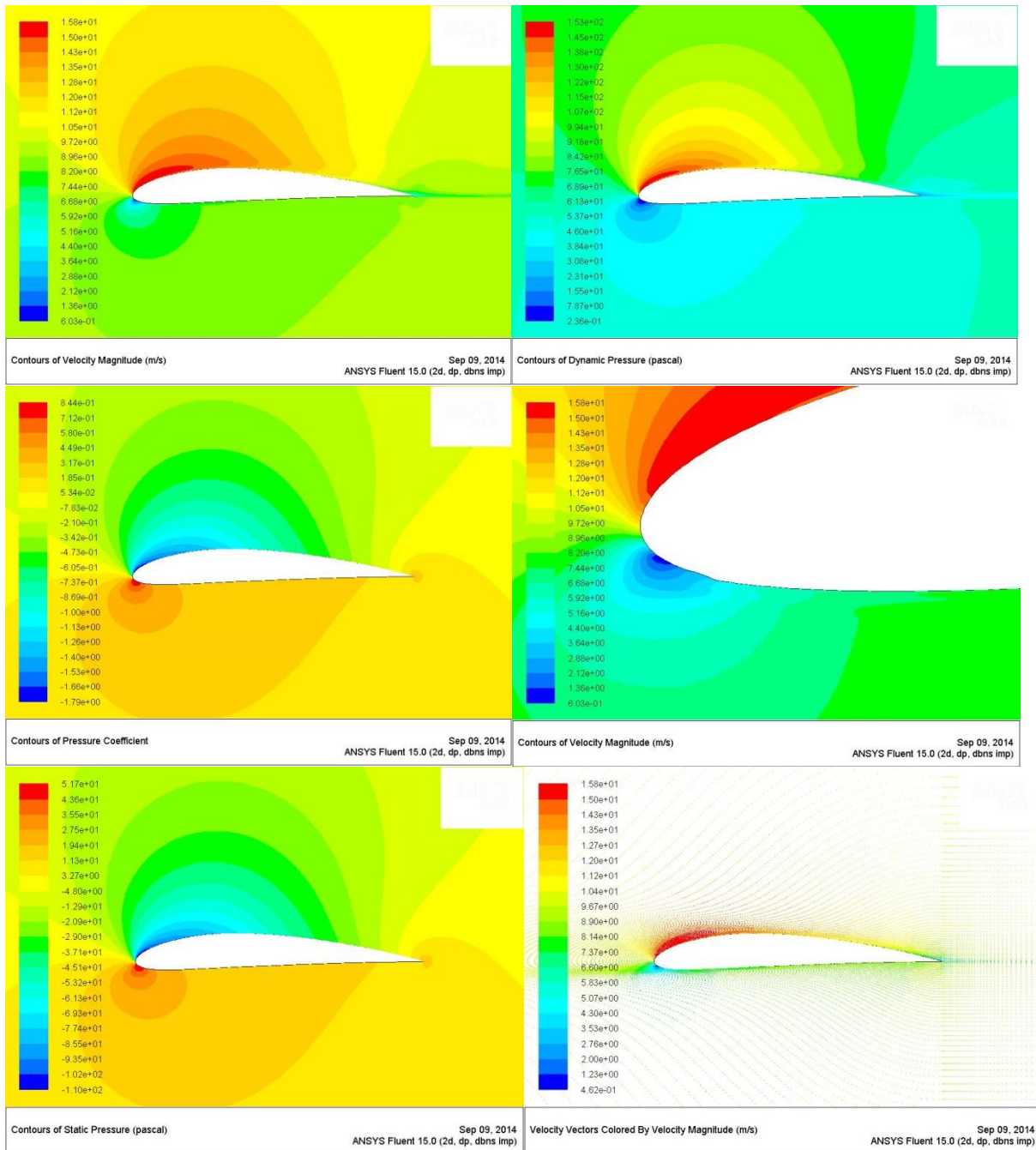
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 6^\circ$



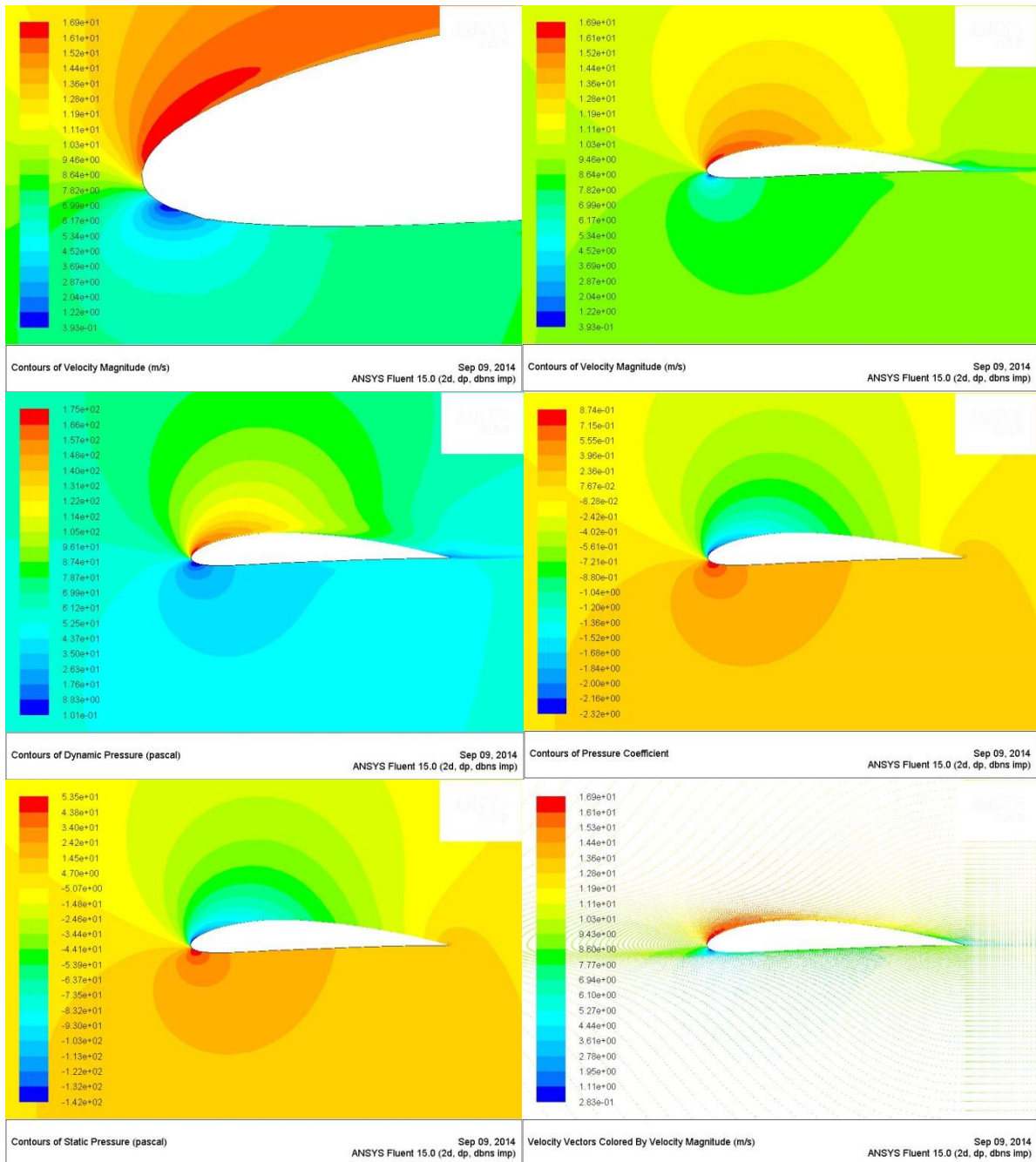
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 8^\circ$



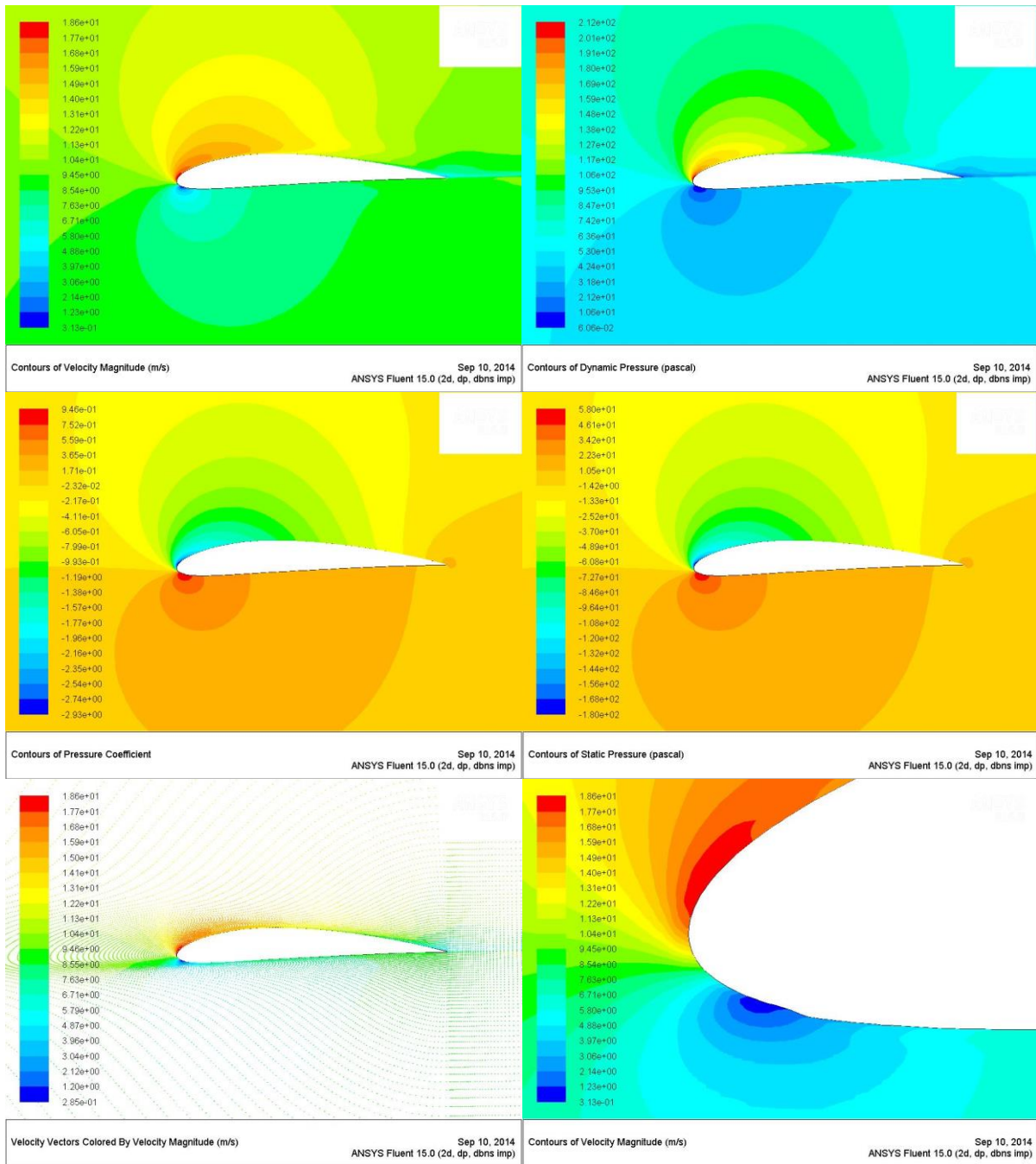
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 10^\circ$



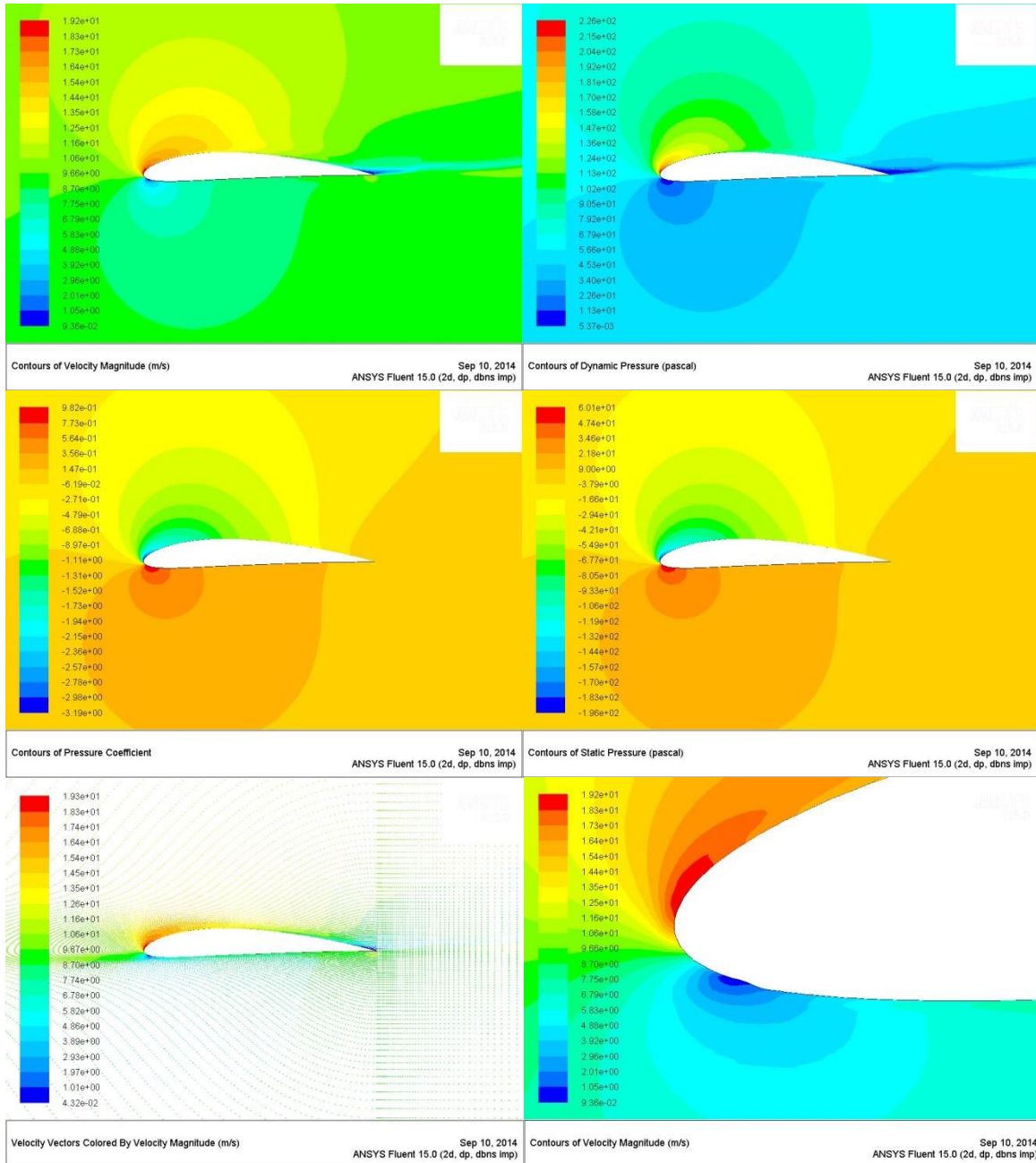
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 12^\circ$



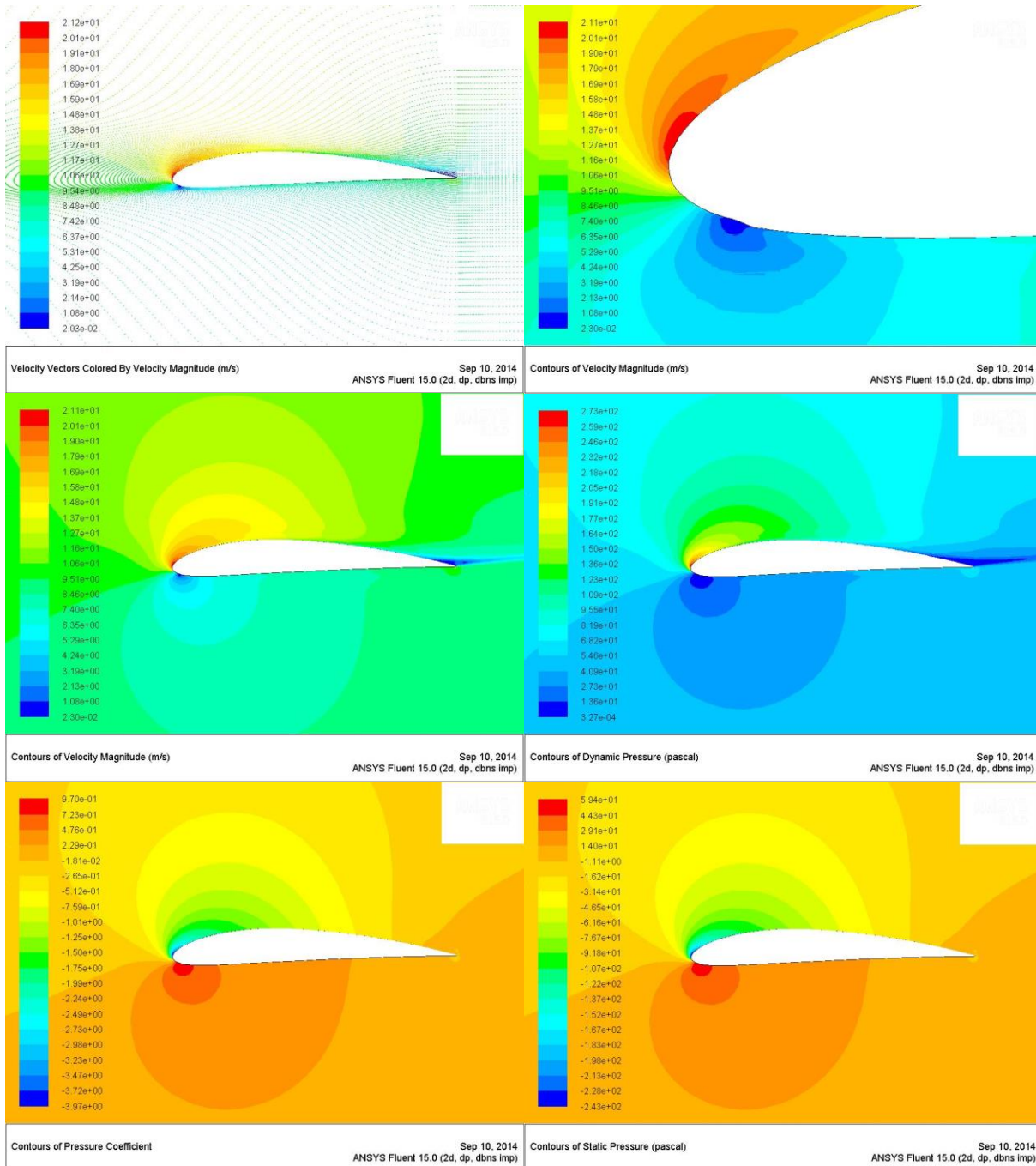
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 14^\circ$



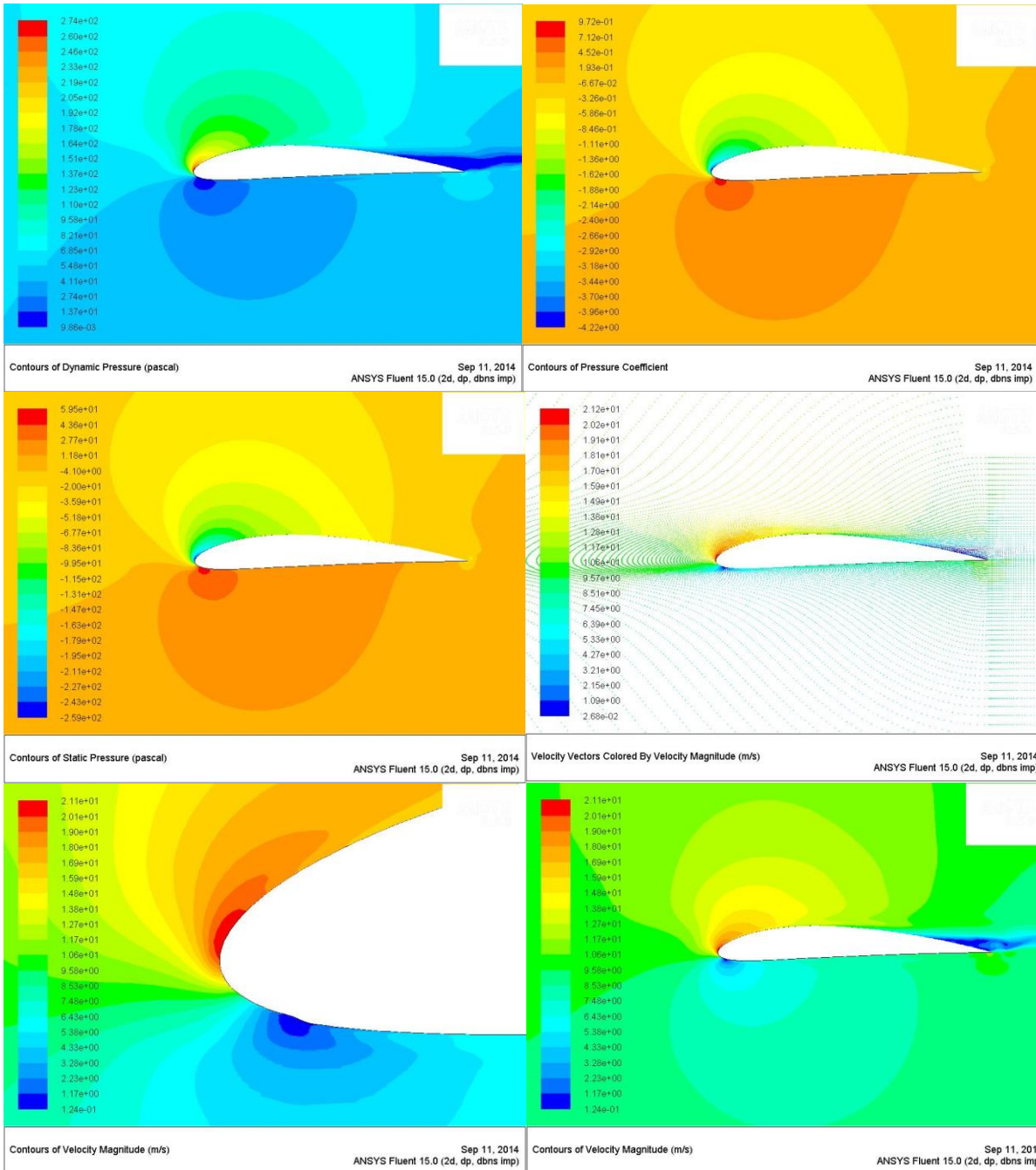
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 16^\circ$



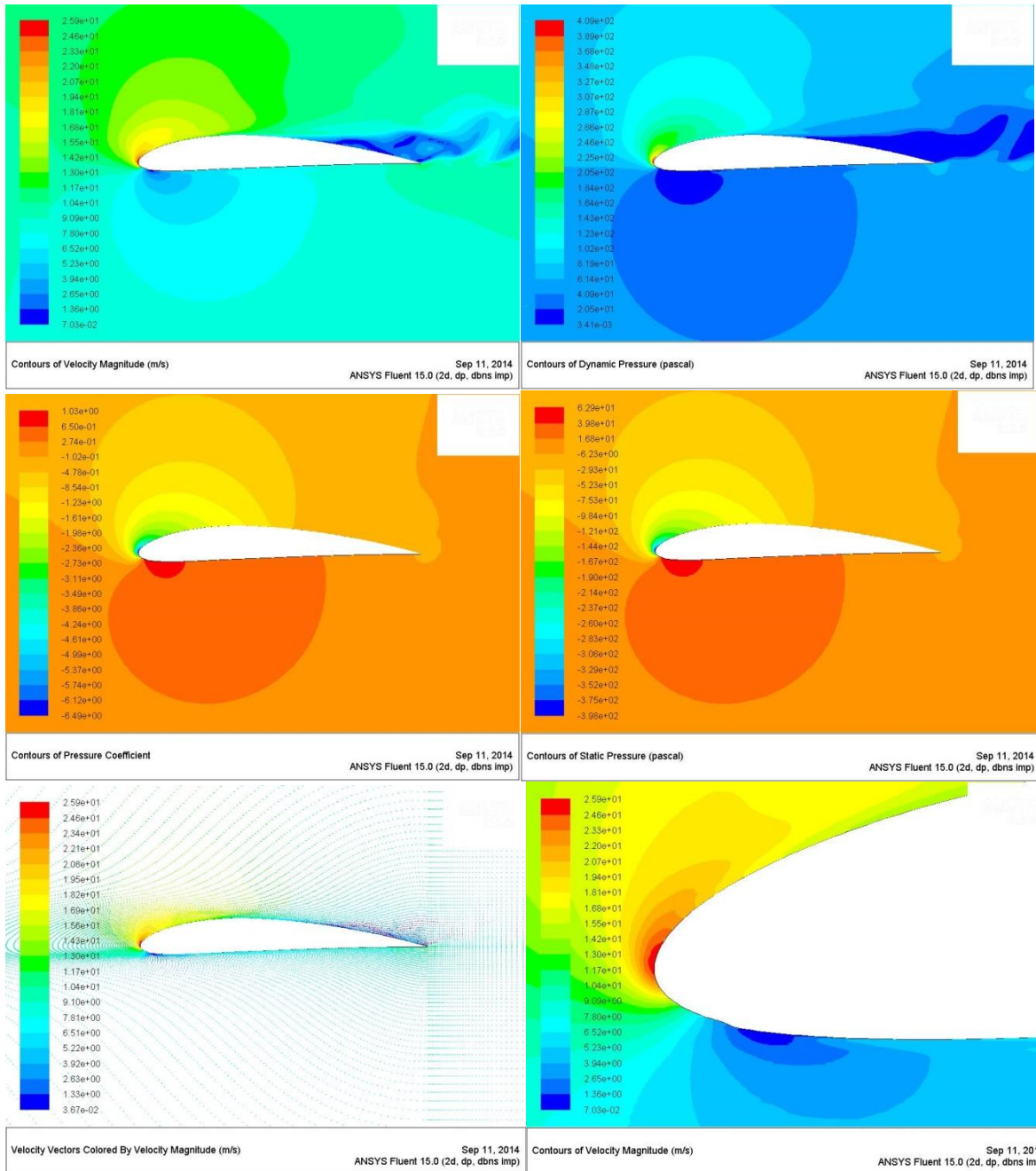
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 18^\circ$



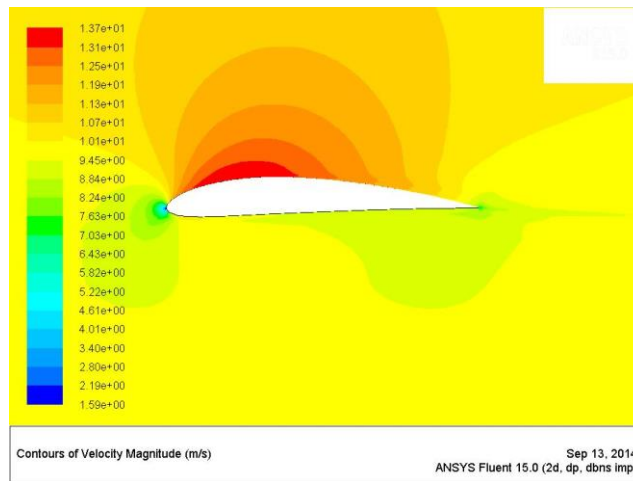
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 20^\circ$



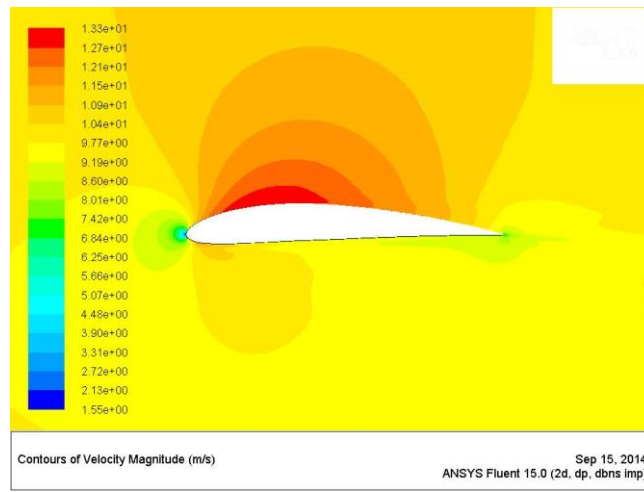
Section NACA 4412 (rugueux / 40s), $\alpha = 25^\circ$



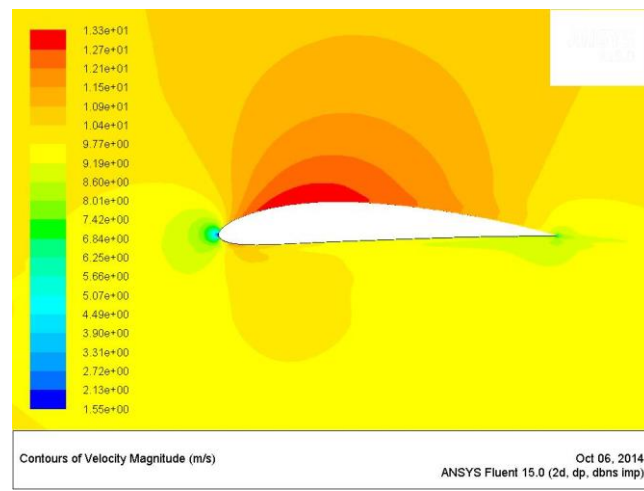
Section NACA 4412 (rugueux / 80s), $\alpha = 2^\circ$



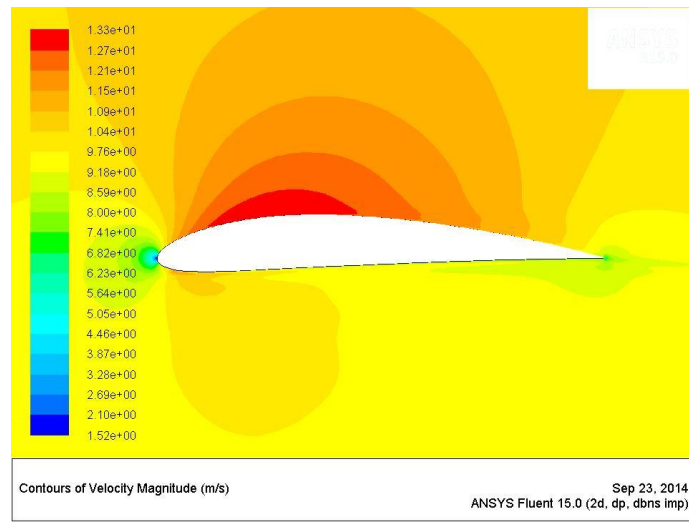
Section NACA 4412 (rugueux / 120s), $\alpha = 2^\circ$



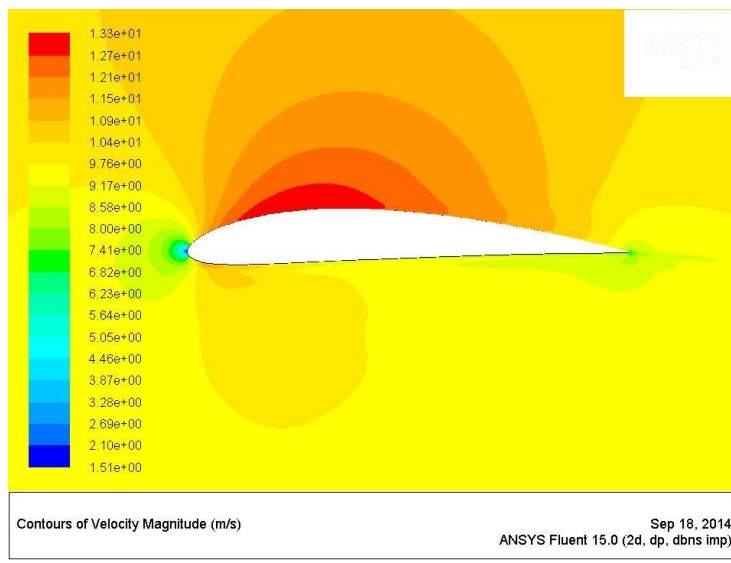
Section NACA 4412 (rugueux / 160s), $\alpha = 2^\circ$



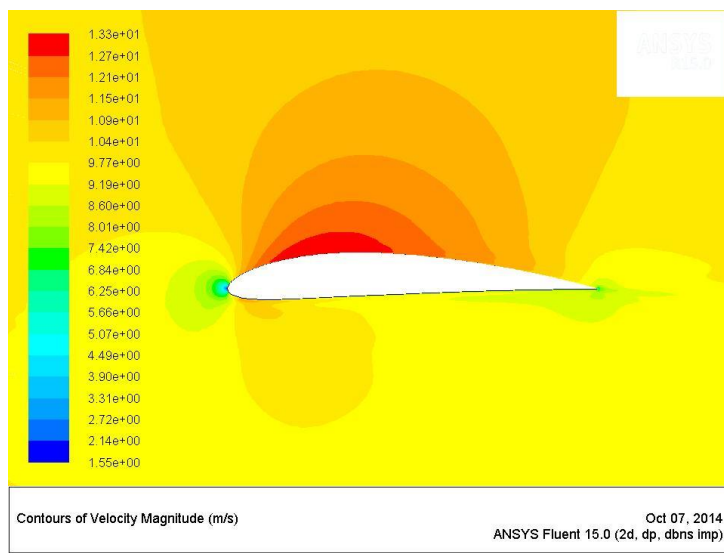
Section NACA 4412 (rugueux / 200s), $\alpha = 2^\circ$



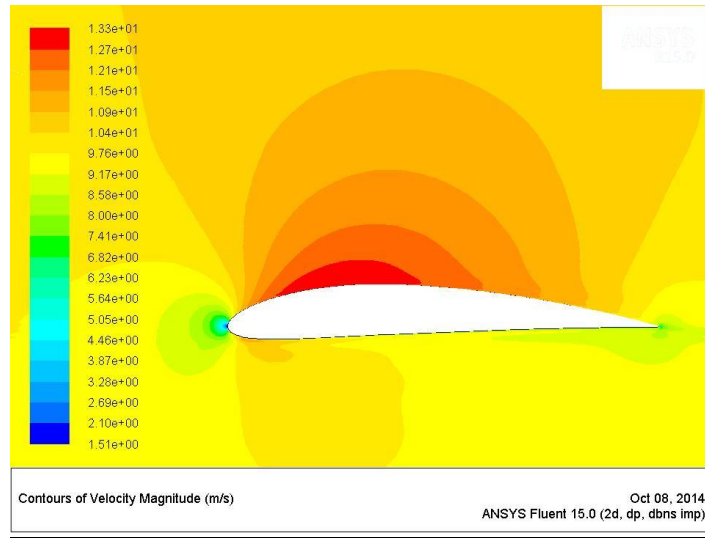
Section NACA 4412 (rugueux / 240s), $\alpha = 2^\circ$



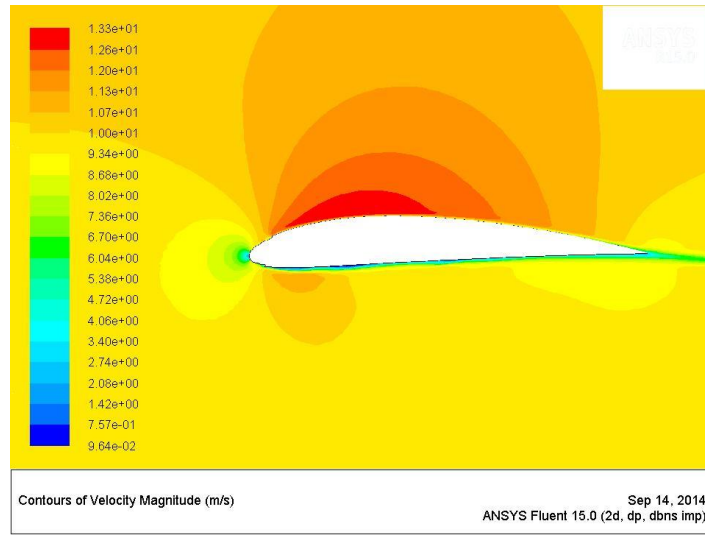
Section NACA 4412 (rugueux / 300s), $\alpha = 2^\circ$



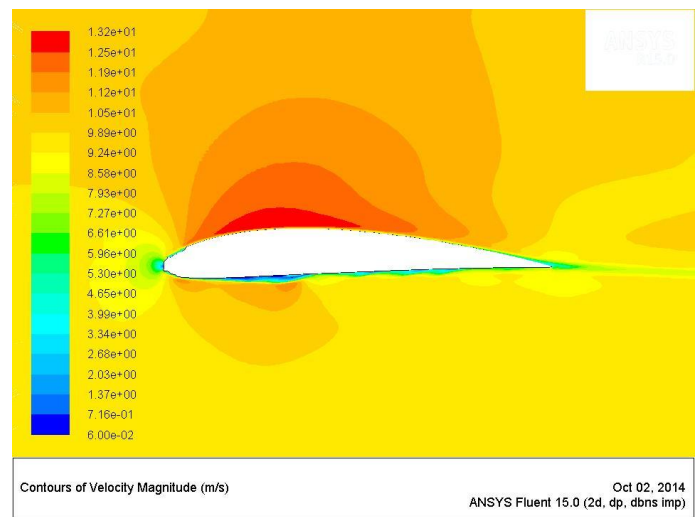
Section NACA 4412 (rugueux / 340s), $\alpha = 2^\circ$



Section NACA 4412 (rugueux / 390s), $\alpha = 2^\circ$

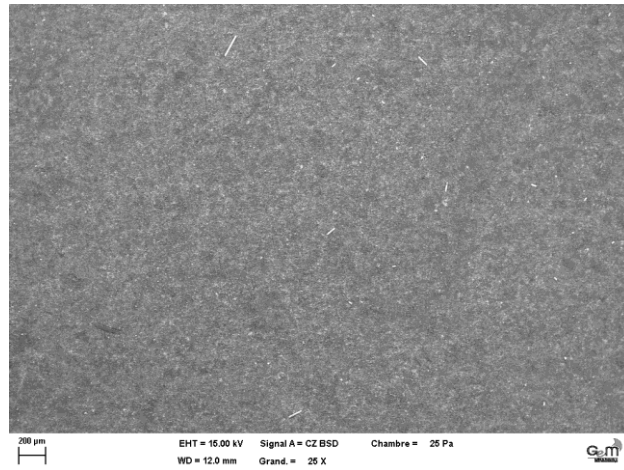


Section NACA 4412 (rugueux / 400s), $\alpha = 2^\circ$

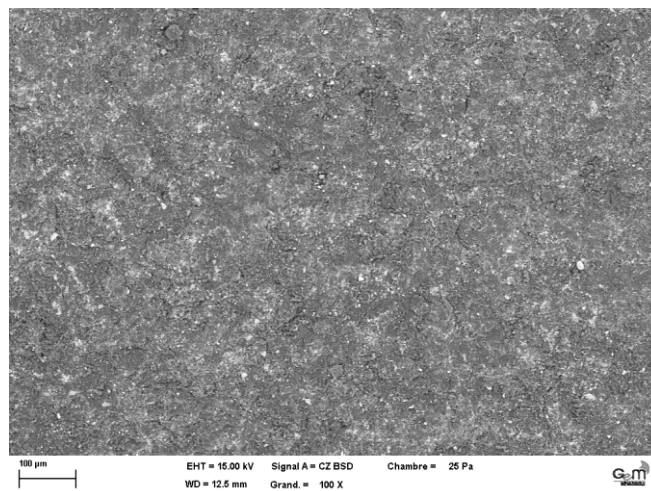


ANNEXE D

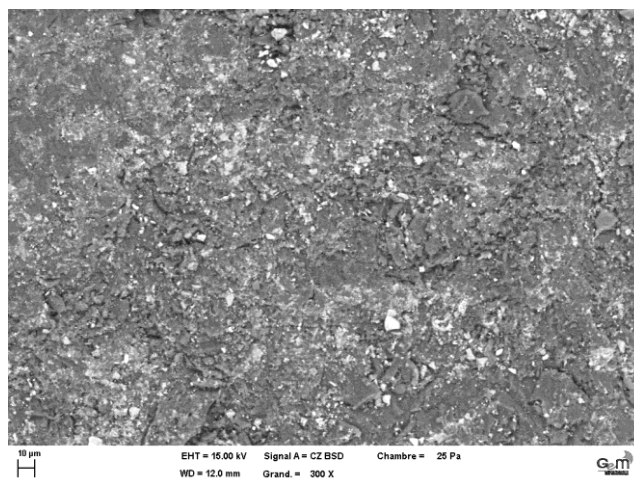
Echantillon 30°-50s



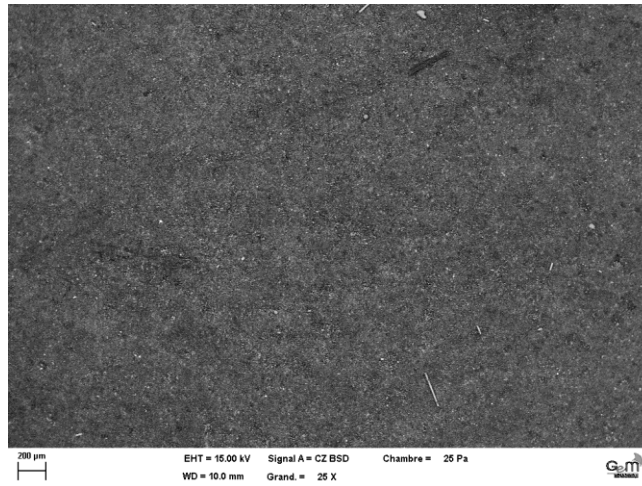
Echantillon 30°-180s



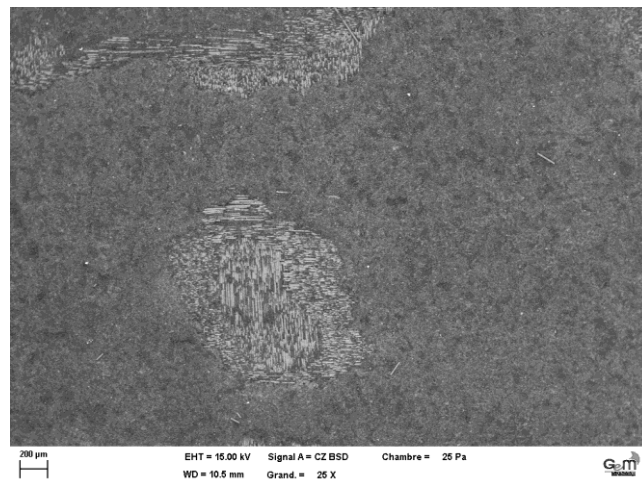
Echantillon 30°-300s



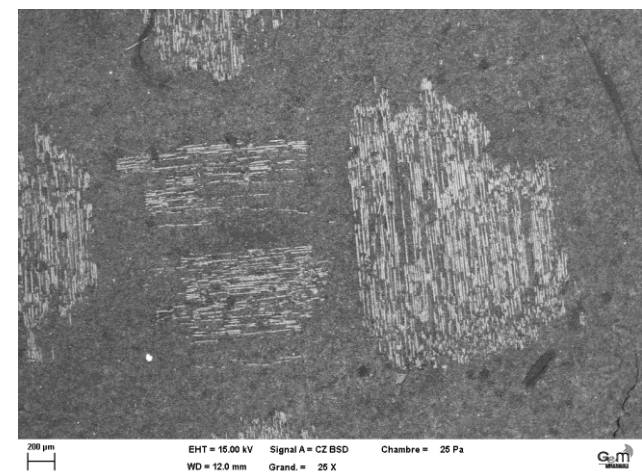
Echantillon 50°-50s



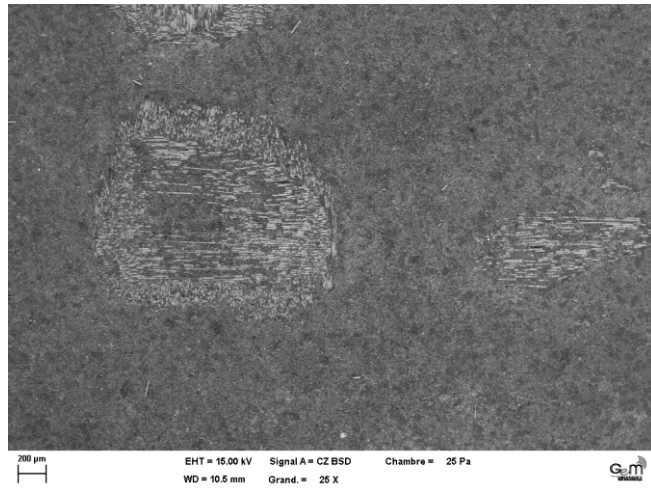
Echantillon 50°-180s



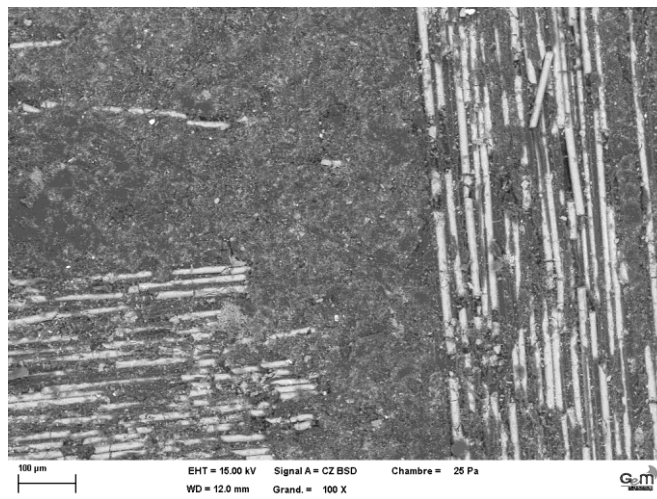
Echantillon 50°-300s



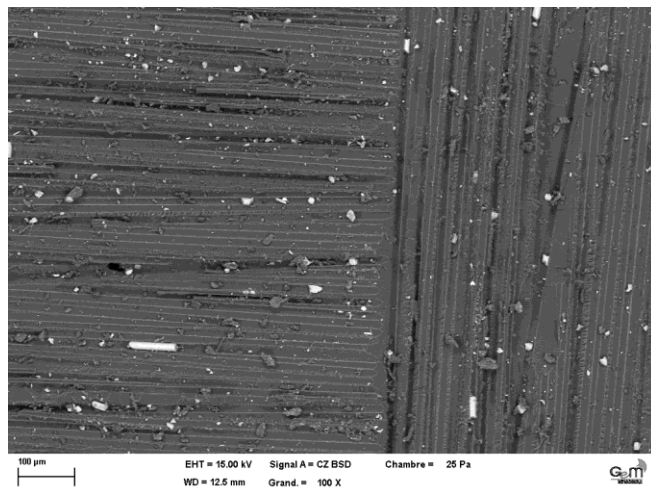
Echantillon 60°-50s



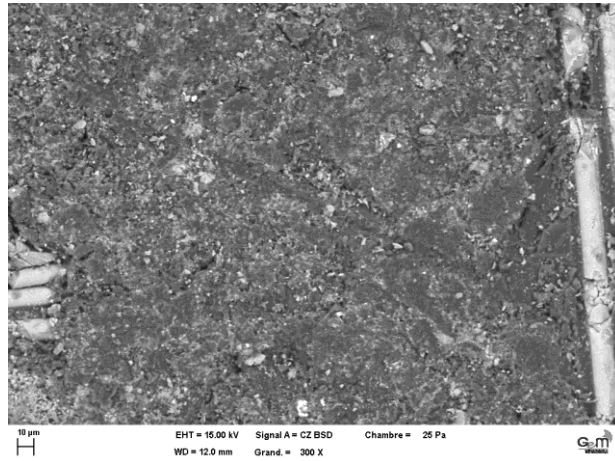
Echantillon 60°-180s



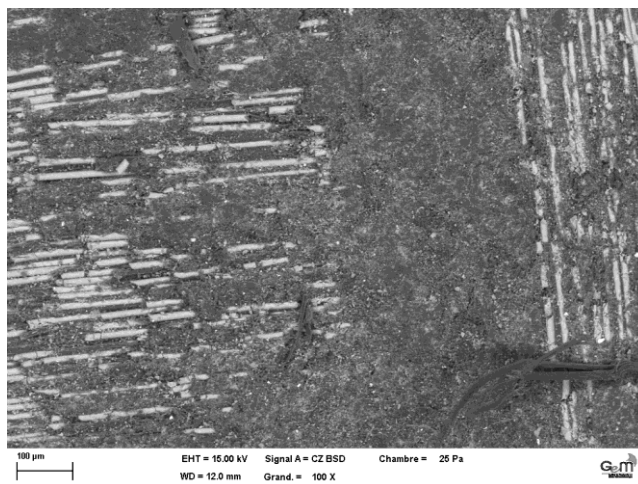
Echantillon 60°-300s



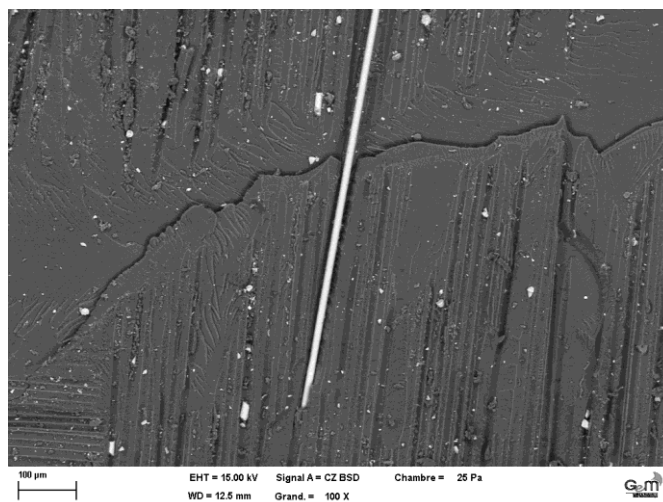
Echantillon 65°-50s



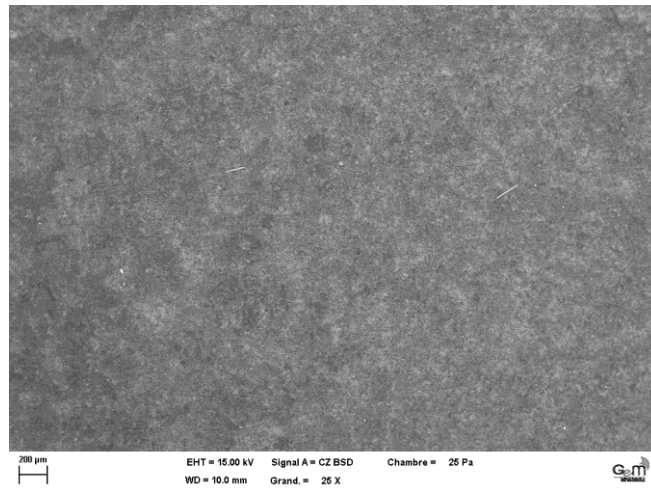
Echantillon 65°-180s



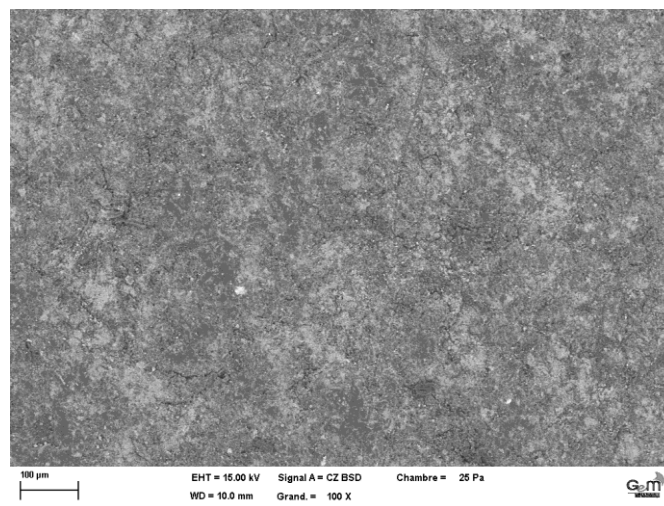
Echantillon 65°-300s



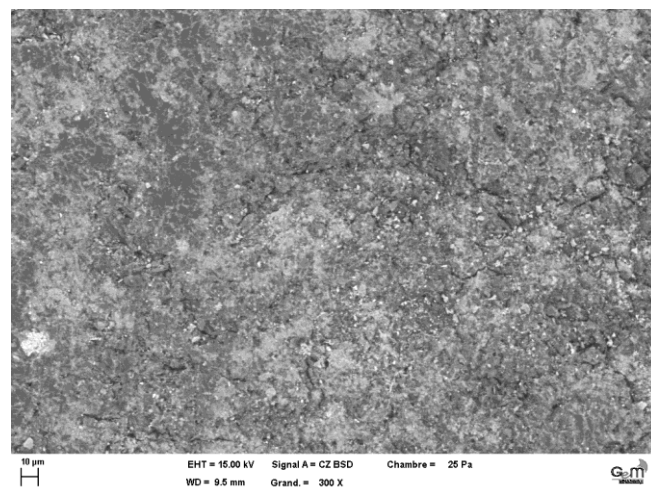
Echantillon 70°-50s



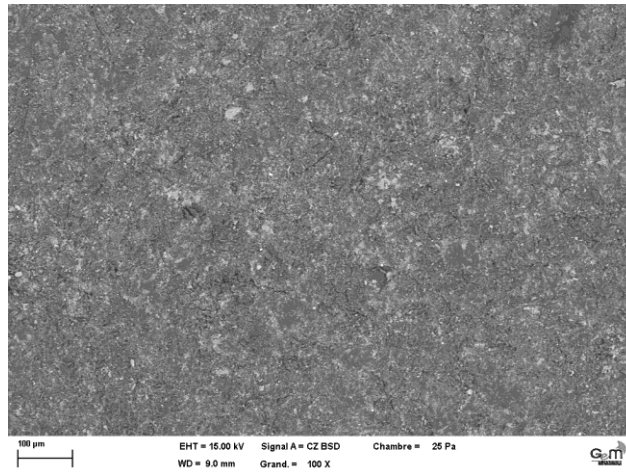
Echantillon 70°-180s



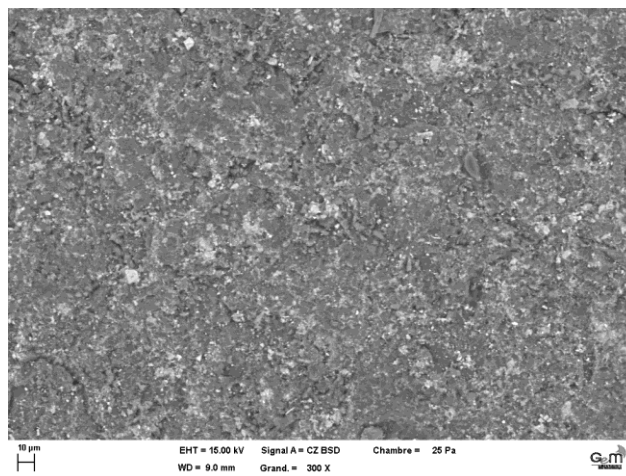
Echantillon 70°-300s



Echantillon 90°-50s



Echantillon 90°-180s



Echantillon 90°-300s

