

Tex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE D UN GROUPE
DE POMPAGE
ALIMENTE PAR TURBINE
EOLIENNE A AXE VERTICAL

Proposé par :
TODICESCU

Etudié par :
HAYANE K.

Dirigé par :
TALBI B.



PROMOTION : Janvier 86

Département: Génie mécanique

Professeur: M. Talbi B.

Étudiant ingénieur: Melle Hayane Karima

مراجعة:

مراجعة: طالبي

المصنعة هيثم مة: ميان كريمة

مقدمة

الموضوع: التحكم في منظومة ضخ مهددة بعنفة موائية ذات محور رأسي

ملخص: إن الهدف من هذه الدراسة هو تحويل الطاقة الحركية للهواء (طاقة بدون مقابل) إلى طاقة ميكانيكية بواسطة عنفة موائية ذات محور رأسي من شأنها أن تسمح بفتح المياه ضمن المناطق التي تفتقر إلى المياه.

SUJET: Etude d'une commande d'un groupe de pompage alimenté par une turbine éolienne à axe vertical.

SUMME: L'objectif de cette étude consiste en la transformation de l'énergie cinétique du vent (énergie gratuite) en énergie mécanique à l'aide d'une éolienne à axe vertical de type Darrieus permettant ainsi, le pompage de l'eau dans les zones arides.

SUBJECT: Control of a pumping system by a vertical axis wind turbine

SUMMARY: This project and realisation has for objective the transformation of kinetic wind energy (free energy) into a mechanical one thanks to the vertical axis wind turbine for water-pumping in rural areas.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde gratitude à

- Monsieur Belabbès ex-vice recteur à l'USTHB.
- Monsieur Talbi B. pour sa perspicacité, son aide judicieuse et son suivi tout au long de cette étude.
- Monsieur Boutobza pour tous les conseils, renseignements et aide sur les données météorologiques et techniques.
- Monsieur Bensaad pour son aide et ses renseignements sur le gisement éolien en Algérie.
- Monsieur Berkoune pour ces précieux conseils
- Monsieur Yahyaoui du C.E.N. , ainsi qu'à Monsieur Darradji enseignant de l'E.N.P.A.
- A tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.
- Monsieur Bargier, Madame Perdoux, Monsieur Calliès, et Monsieur BenAissa.

DEDICACES

HAY-LA revient à :

Toi Papa

Toi Maman

Toi Tata

Ma soeur Malika

Mon frère Mustapha

Mon frère Hocine

Ainsi qu'à tous mes amis qui ont participés de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE

PAGE

	HISTORIQUE	
	INTRODUCTION	
I	GENERALITES	
I-1	- Principe de la turbine éolienne	
	différents types d'aéromoteurs	
	aeromoteurs a axe horizontal	
	aeromoteurs à axe vertical	
	avantages et inconvenients des eoliennes lentes et rapides	
	classification et caractéristiques des aeromoteurs	
	choix d'un aeromoteur:Darrieus	
	organigramme	
II	ETUDE METEOROLOGIQUE	
	Origine du vent	
	mesure de la vitesse du vent	
	mesure de la direction du vent	
	évaluation des vitesse de vent	
	causes et consequences des variation de la vitesse	
	phénomènes saisonniers	
	variation de la vitesse du vent avec l'altitude	
	influence des obstacles et du relief sur l'écoulement	
	représentations de l'écoulement au dessus des collines	
	influence des batiment et de la végétation	
	influence des haie sur la vitesse du vent	
	choix et evaluation du site	
	perspectives d'utilisation d'énergie eolienne en Algerie	
III	ETUDE ENERGETIQUE	
	ENERGIE FOURNIE PAR LE VENT	
	Période defavorable:	
	choix de la vitesse nominale	
IV	Etude aerodynamique	
V	Etude du système de pompage.	
VI	CONCLUSION	

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU	PAGE
TAB 1 Evaluation des vitesses de vent	17
TAB 2 Caracteristiques d'un terrain plat	28
TAB 3 Sillages provoqués par des constructions et par la Vegetation	32
TAB 4 Critères de Frankels pour le choix des sites de collines	35
TAB 5 Classification des stations par volume horaire annuel	39
TAB 6 Limite de Betz dans le cas du rotor Darrieus	46
TAB 7 Períodes defavorables	47
TAB 8 Tableau donnant la vitesse moyenne journaliere du vent dans la region de Dar-El-Beida	
TAB 9 Frequences mensuelles de vent	
TAB 10 Vents dominants	
TAB 11 Repartition Frequentielle des vents	
TAB 12 Vitesses moyennes journalieres du vent des années 1971 - 1972 - 1974 à Dar-El Beida	
TAB 13 Nombre de jours où V observée Nombre de jours où V supérieure ou égale à V	

TABLE DES ABBAQUES

		PAGE
ABB 1	Abbaque à 40% de la puissance de Betz	
ABB 2	Abbaque à 50% de la puissance de Betz	
ABB 3	Abbaque à 60% de la puissance de Betz	
ABB 4	Abbaque à 70% de la puissance de Betz	

TABLE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
FIG 1 Organigramme d'une station de fourniture d'énergie mécanique par éolienne	11
FIG 2 Éolienne de Darrieus	12
FIG 3 Éolienne Savonius	13
FIG 4 Anémomètre à coupelles de Papillon	14
FIG 5 Anémomètre à plaque	15
FIG 6 Anémomètre à tube en "U"	15
FIG 7 Ventimètre	15
FIG 8 Girouette	16
FIG 9 Manche à air	16
FIG 10 a) Brise de mer - b) Brise de terre	22
FIG 11 a) Brise de vallée montante - b) Brise de vallée descendante	
FIG 12 a) Écoulement lisse b) Écoulement visqueux	29
FIG 13 Site ^{très} favorable à l'installation d'une éolienne	30
FIG 14 Site à éviter	30
FIG 15 (Site favorable) Profil de l'écoulement derrière un immeuble à angles vifs	31
FIG 16	31
FIG 17 Influence des haies sur la vitesse du vent	33
FIG 18 Intensité de la turbulence derrière un objet poreux	34
FIG 19 Intensité de la turbulence derrière un objet solide	34
FIG 20 Couche limite sur un obstacle elliptique	36
FIG 21 Courbe des vitesses classées	41
FIG 22 Théorème de Betz	44
FIG 23 Circulation des vitesses	50
FIG 24 Corps dans un fluide parfait	51
FIG 25 Forces de résistance	52
FIG 26 Force de traînée de pression R_{xp}	53
FIG 27 Corps dans un fluide réel	54
FIG 28 force appliquée à un élément de surface dans un fluide réel	54
FIG 29 Spectre aérodynamique d'une surface inclinée	55
FIG 30 Décomposition de la résultante de l'action du vent	56

FIG 31	Profil de Joukowski	57
FIG 32	Ecoulement autour d'un profil d'aile-naissance de la portance	57
FIG 33	a) Ecoulement // b) Ecoulement giratoire c) Ecoulement composé	58
FIG 34	a) Polaire d'aile b) $C_z = f(i)$	58
FIG 35	Repartition de la pression autour de l'aile	59
FIG 37	Rotor Darrieus cylindrique	60
FIG 38	Rotor Darrieus parabolique	61
FIG 39	Rotor tronconique	61
FIG 40	Hauteur manometrique totale	64
FIG 41	Variation de la puissance developpee en fonction de $N(\text{tr/mn})$	67
FIG 42	Variation de la quantite Y	67
FIG 43	Caracteristique $H(Q)$	67
FIG 44	Courbe de variation de debit	67
FIG 45	Variation de la puissance absorbee par la pompe	67
FIG 46	Puissance - Vitesse de l'epolienne	68
FIG 47	Caracteristique puissance - Vitesse	68
FIG 48	Determination de la quantite d'eau pompée	69
FIG 49	Periode de vent improductif	70

BIBLIOGRAPHIE

- Eolienne et générateur par Cuntz
- Energie éolienne par Legourrières
- Aerodynamique expérimentale par REBUFFET
- Mécanique des fluides par Comolet
- Les éoliennes de pompages par Gret
- The NRC double multiple stream tube theorie for vertical axis by R.J.Templin
- Vent et performances des éoliennes par justus.
- L'énergie éolienne perspective d'utilisation en Algérie par H;Bensaad

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE	PAGE
	HISTORIQUE
	INTRODUCTION
I	GENERALITES
I-1	- Principe de la turbine éolienne
	différents types d'aéromoteurs
	aeromoteurs a axe horizontal
	aeromoteurs à axe vertical
	avantages et inconvenients des eoliennes lentes et rapides
	classification et caractéristiques des aeromoteurs
	choix d'un aeromoteur:Darrieus
	organigramme
II	ETUDE METEOROLOGIQUE
	Origine du vent
	mesure de la vitesse du vent
	mesure de la direction du vent
	évaluation des vitesse de vent
	causes et consequences des variation de la vitesse
	phénomènes saisonniers
	variation de la vitesse du vent avec l'altitude
	influence des obstacles et du relief sur l'écoulement
	représentations de l'écoulement au dessus des collines
	influence des batiment et de la végétation
	influence des haie sur la vitesse du vent
	choix et evaluation du site
	perspectives d'utilisation d'énergie eolienne en Algerie
III	ETUDE ENERGETIQUE
	ENERGIE FOURNIE PAR LE VENT
	Période defavorable:
	choix de la vitesse nominale
IV	Etude aerodynamique
V	Etude du système de pompage.
VI	CONCLUSION

HISTORIQUE

D'énergie "nouvelle", l'énergie éolienne n'a de nouveau que le nom. Il s'agit d'une des plus anciennes puissances naturelles domestiquées sous forme mécanique.

Songez seulement à la navigation!

A l'origine, les usages de l'éolienne, dont le nom nous vient d'Eole (dieu du vent dans l'antiquité), étaient agricoles :

- moulage du grain
- pompage de l'eau
- sciage du bois

C'est aux environs de 2800 avant J.C., que l'utilisation des premières panémons (du grec "pan": dans toutes les directions et "anémos": vent) à axe vertical s'est développée chez chinois et égyptiens.

Hammourabi, roi de Babylone, avait conçu, 17 siècles avant J.C., le projet d'irriguer la riche plaine de Mésopotamie à l'aide d'éoliennes à axe vertical dont les ruines subsistent encore sur le plateau iranien. Ainsi la partie orientale du bassin méditerranéen constitue avec la Chine, où seules les machines à axe vertical étaient connues, le berceau des aéromoteurs.

En Europe, les éoliennes à axe horizontal ne s'introduisent qu'au Moyen-Âge grâce aux Croisés revenus du Moyen-Orient. L'éolienne lente du type multipales n'apparaît qu'au XIX^{ème} siècle pour conquérir ensuite les Etats-Unis.

À l'aube du XX^{ème} siècle les premières éoliennes rapides à axe vertical prennent naissance: l'oeuvre est due à l'académicien français Darrieus. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion, du moteur Diesel, l'utilisation du vent a été délaissée. De 1961 à 1973 le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne. Cependant, avec la diminution du stock mondial des hydrocarbures, la demande énergétique croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, l'énergie éolienne dès 1973 revient au premier plan de l'actualité.

INTRODUCTION

Notre étude consiste à concevoir une turbine éolienne à axe vertical capable de résister aux très forts vents, quelque soit le site. Pour cela, elle ne doit pas vibrer, doit posséder des pales de forme économique dans des positions optimales par rapport à la vitesse de l'air autour d'elles. Ce qui nous amène à regarder de plus près l'étude de la forme aérodynamique de la pale.

Adapter la machine au site désiré, nécessite une connaissance du vent : sa vitesse, sa fréquence, et ses irrégularités. Une étude météorologique s'impose donc. On est amené par la suite à faire un choix du matériau à utiliser et, à calculer sa résistance pour éviter tout danger de dispersion de pièces dans toutes les directions en cas de rupture. Pour cela une étude de résistance s'impose.

Une fois notre turbine éolienne à axe vertical placée dans des conditions réelles de fonctionnement, nous mesurons la puissance disponible et la puissance récupérable par l'éolienne pendant une période déterminée. Il a été constaté à partir d'une étude énergétique que seulement 60% de la puissance disponible du vent est récupérée par l'éolienne ceci en négligeant les frottements et l'inertie à vaincre pour le démarrage.

Enfin nous devons conclure que la puissance fournie par notre générateur peut en réalité satisfaire aux besoins hydrauliques d'une région déshéritée tels que :

- alimentation en eau potable extraite du sous-sol
- abreuvement des animaux
- irrigations de terres
- pompage dans une mare, un ruisseau, une rivière.

Un système de pompage est donc à prévoir.

Dans de nombreux cas, l'utilisateur est aussi intéressé par l'aspect économique (coût, investissement, amortissement), aussi l'évaluation des performances des éoliennes constitue le premier pas pour la réalisation d'une étude économique.

L'exploitation des éoliennes à axe vertical peut s'avérer très rentable en Algérie, dans la mesure où celle-ci possède un gisement éolien appréciable.

Ne serait-ce pas le bon moyen pour prévenir "l'après-pétrole"?

CHAPITRE I

GENERALITES

I-1-PRINCIPE DE LA TURBINE EOLIENNE

L'éolienne ou aéromoteur est une machine utilisant l'énergie cinétique du vent pour produire une énergie mécanique destinée au pompage de l'eau ou à la production de l'électricité. Sous l'impulsion du souffle du vent, elle se met à tourner et engendre une puissance. L'axe supportant la roue munie de pâles, devient alors "moteur". La puissance augmente d'autant plus que le diamètre de la roue est important. La puissance récupérable est proportionnelle au "cube" de cette vitesse.

I-2-DIFFERENTS TYPES D'AEROMOTEURS

Les aéromoteurs sont en général définis par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue:

- les aéromoteurs à axe horizontal
 - .axe horizontal parallèle à la direction du vent
 - .axe horizontal perpendiculaire à la direction du vent
- les aéromoteurs à axe vertical
 - .aéromoteurs dérivés du rotor Savonius
 - .aéromoteurs dérivés du rotor Darrieus
 - .aéromoteurs dérivés des machines à clapets, ou ailes

battantes

- les aéromoteurs utilisant le déplacement d'un mobile
- les dispositifs statiques de récupération de l'énergie

éolienne .

Ces aéromoteurs font partie de deux grandes familles d'éoliennes

- les éoliennes lentes
- les éoliennes rapides

I-2-1-Les aéromoteurs à axe horizontal

I-2-1-1-Axe horizontal parallèle à la direction du vent

Ceux sont les machines les plus répandues en Algérie, car elles possèdent un rendement supérieur à celui de toutes les

autres machines et leur installation est rapide .Mais parmi ces éoliennes à axe horizontal parallèle à la direction du vent il existe les aéromoteurs dont :

-l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent , pour des diamètres inférieur à 10m : "hélice au vent "

-l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent , pour des diamètres supérieur à 10m : "hélice sous le vent "

Le nombre de pales varie de 12 à 24 pour les éoliennes lentes et de 1 à 4 pour les éoliennes rapides. Ces aéromoteurs sont couplés à des pompes centrifuges à plusieurs étages dont le couple de démarrage est plus faible que celui des pompes à piston .

I-2-1-2-Axe horizontal perpendiculaire à la direction du vent

Ces systèmes nécessitent un dispositif d'orientation .La récupération d'énergie produite se traduit par une perte sensible du rendement global.

Lors de changements brusques de la direction et de la vitesse du vent, ces aéromoteurs subissent d'importantes contraintes. Ceux-ci sont à l'origine de vibrations néfastes au bon fonctionnement de la machine.

I-2-2-Les aéromoteurs à axe vertical

L'avantage de ces aéromoteurs est qu'ils ne nécessitent pas de dispositif d'orientation par rapport à la direction du vent. Ainsi lors du fonctionnement elles ne sont pas soumises aux contraintes importantes sur les pales, les roulements et les axes dues aux changements d'orientation. Donc facilités de construction. L'inconvénient est qu'ils ont un rendement médiocre, seulement 20 % de la limite de Betz (voir théorie). Ce qui explique le fait qu'ils sont peu utilisés.

On distingue 3 grandes familles d'aéromoteurs à axe vertical :

-les aéromoteurs dérivés du rotor de Savonius, utilisant la trainée différentielle créée par les aubes de forme, de nombre et d'épaisseur différentes.

-les aéromoteurs dérivés du rotor de Darrieus, utilisant la portance des pales, de formes diverses :

- .parabolique
- .cylindrique
- .tronconique
- .sphérique

Ils sont caractérisés par un faible couple de démarrage, mais pour l'améliorer on l'associe à un autre type de rotor (Savonius par exemple).

-les aéromoteurs dérivés des machines à clapets ou ailes battantes, facile à réaliser mais s'usent très vite.

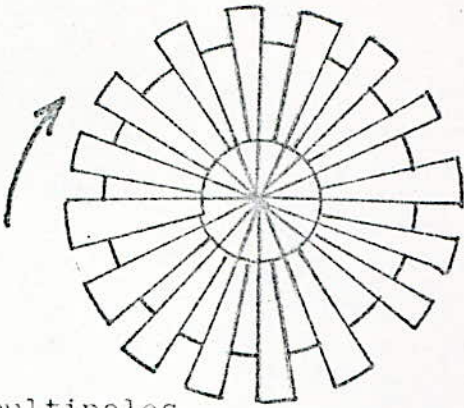
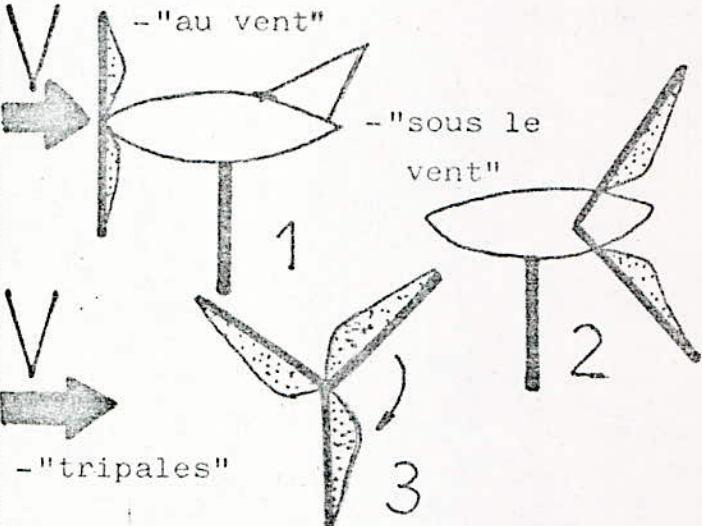
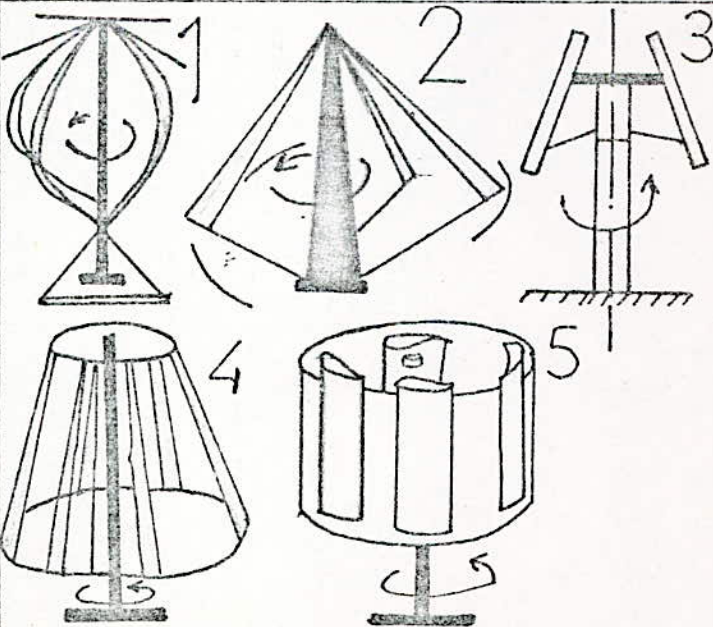
I-2-3-Avantages et inconvénients des éoliennes lentes et des éoliennes rapides

EOLIENNE LENTE	EOLIENNE RAPIDE
<ul style="list-style-type: none"> .Effort de poussée du vent élevé. .Poids de structure élevé .Nombre de pale de 12 à 24 .Couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre. .Démarrage à vide pour des vitesses de vent de l'ordre de 2 à 3 m/s . .Rendement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> .Contraintes mécaniques élevées .Structure fine utilisant donc des matériaux de pointe. .Rendement élevé. .Nombre de pales de 2 à 4 .Démarrage à vide pour des vitesses de vent de l'ordre de 5 m / s.

La vitesse de rotation d'une éolienne est fonction de la vitesse du vent. Pour un vent donné, les éoliennes tourneront à une vitesse différente suivant la finesse de leur pales, donc en fait suivant la résistance qu'elles opposent à la rotation.

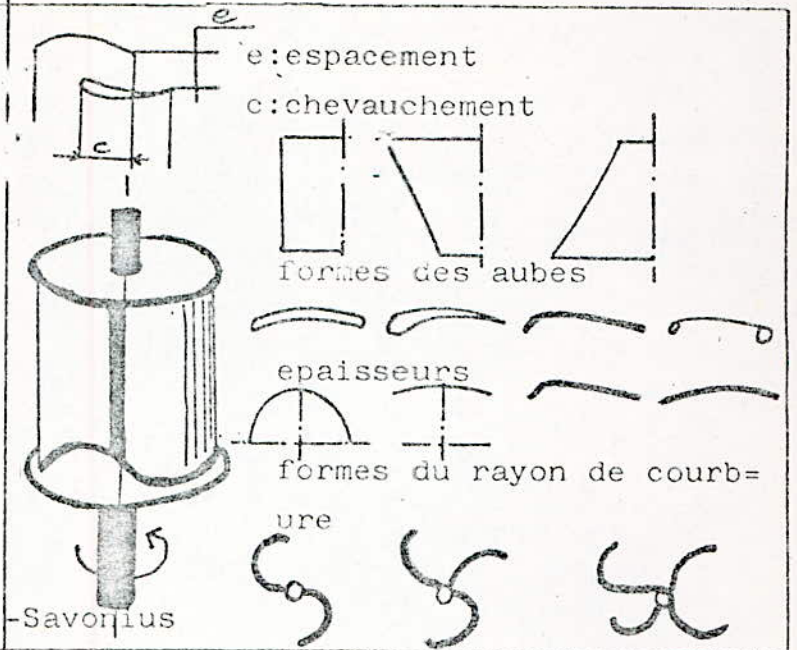
I-2-4-Classification et caractéristiques des aéromoteurs.

Orientation de l'axe de rotation	Déplacement des pales	Désignation courante	Dispositif d'orientation	U/V	Puissance réalisée ou projet en KW
Horizontal	<u>I</u> au vent	Moulin "Américain" multipales	oui	1 à 2	0,5 à 50
Horizontal	<u>I</u> au vent	Moulin à hélice .bipales"au vent" .bipales "sous le vent" .moulin à hélice tri-pales	oui	2 à 12 2 à 12	0,05 à 1200 0,05 à 1200
Vertical	//au vent	Rotor de Darrieus .parabolique (bi ou tri pales) .triangulaire tronconique .cylindrique .à géométrie variable .à pales mobiles	non	5 à 8	5 à 5000
Vertical	//au vent	Rotor de Savonius	non	0,5 à 1,7	0,02 à 1,7

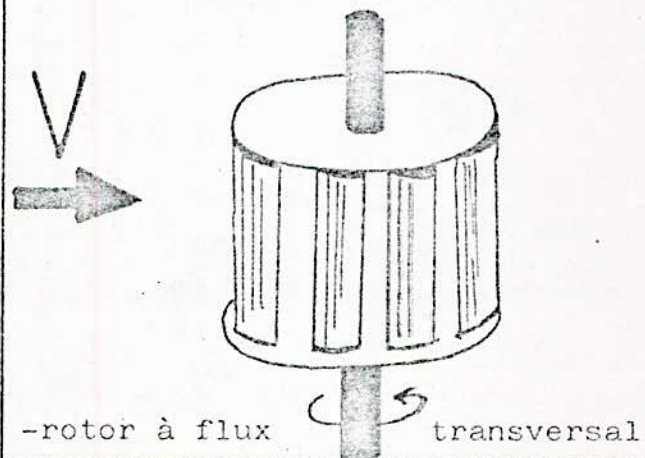
OBSERVATION	REPRESENTATION GRAPHIQUE
<ul style="list-style-type: none"> -simple -couple de démarrage élevé -rotation lente -rendement moyen -coût faible -vent mini:2à3m/s -pompage -éolienne lente 	 <p data-bbox="688 818 902 852">-multipales</p>
<ul style="list-style-type: none"> -relativement simple -couple faible -rotation rapide -bien connu -rendement bon -coût élevé -vent mini:4à5m/s -production d'électricité ou pompage -éolienne rapide 	 <p data-bbox="664 1351 881 1385">-tripales</p>
<ul style="list-style-type: none"> -relativement simple -couple élevé -rotation rapide -doit se développer -rendement bon -coût variable -vent mini:ne démarre pas seul -production d'électricité ou de pompage ou de chaleur -éolienne rapide 	

Vertical	//au vent	Moulinet	non	0,3à 0,6	0,02 à 1,7
Vertical	//au vent	Rotor à flux transversal Turbine mul= tipales	non	0,3à 0,4	0,01 à 0,05
Vertical	//au vent	Aclapets battants .à tambour central .à butées	non	0,2à 0,6	0,05 à 3
Vertical	//au vent	A orienta= tion cycl= ique des pales	oui	0,3à 0,5	0,5 à 8
Vertical	//au vent	A écran	oui	0,2à 0,6	0,5 à 5
Vertical ou Horizontal	// au vent	Machine à translat= ion ou ta= pis roul= ant Machine à oscillation	oui	0,5à 1 2	2à 3 0,5
Vertical	//au vent	A ailes battantes Mixte Sav= onius-Dar= rieus	non non	- -	- -

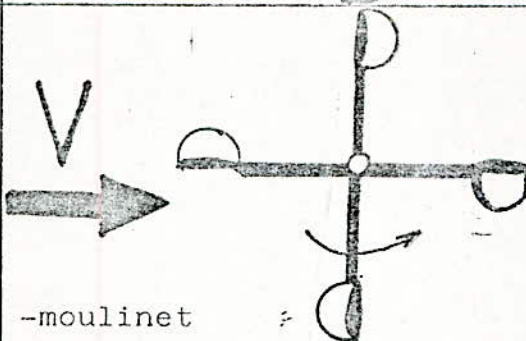
- très simple
- couple élevé
- rotation lente
- rendement modeste
- coût faible
- vent mini: 2 à 3 m/s
- pompage ou électricité
- éolienne lente
- variantes sur le nombre, la forme, et la configuration des aubes du rotor Savonius



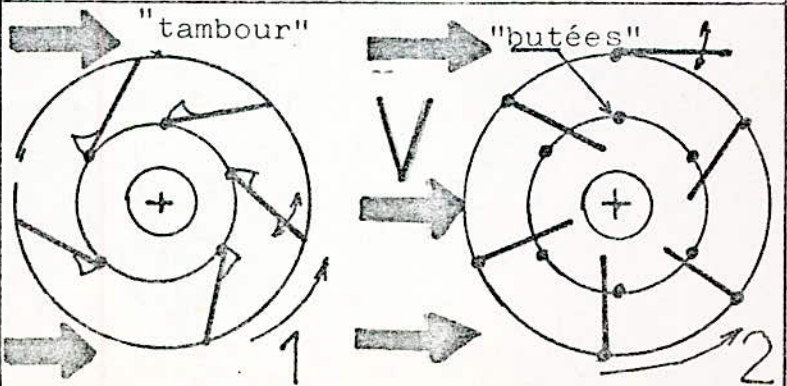
- très simple
- couple élevé
- rotation moyenne
- rendement moyen
- coût faible
- vent mini: 3 à 4 m/s
- pompage ou électricité
- peu développé
- éolienne lente



- très simple
- pas réalisable en grandes dimensions
- ne fournit aucune puissance
- éolienne lente



- assez simple
- nombreux chocs : bruits et usure
- rendement maxi entre 0,2 et 0,6
- fragilité
- pompage



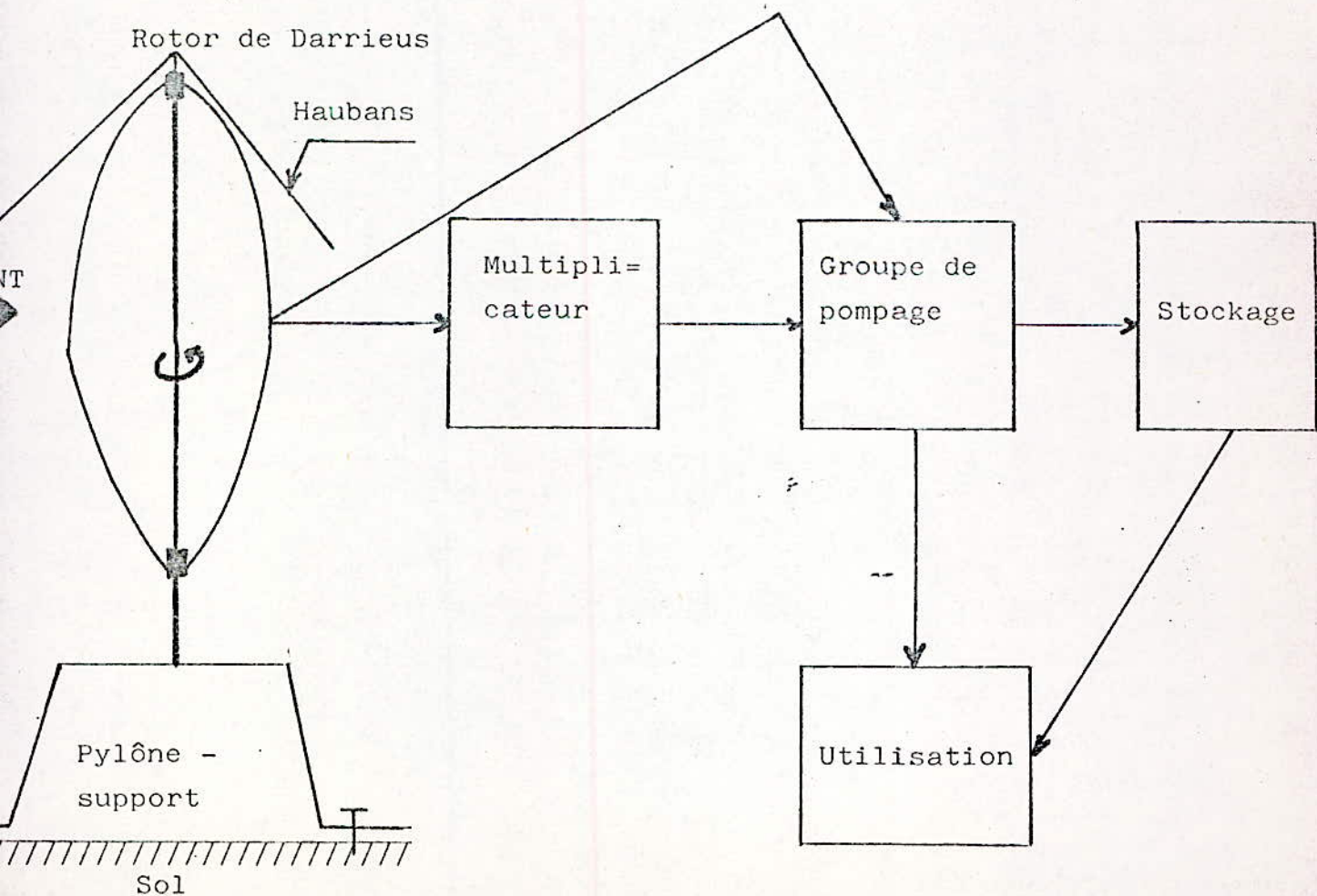
ou	//au vent	Double rotor de sens de rotation op= posées(NOAH)	non	-	-
Horizontal		Multi-rotor	non	-	-
		Pompe à ailes batt= antes	oui	-	-

U/V : rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent.

I-2-5-Choix d'un aéromoteur à axe vertical

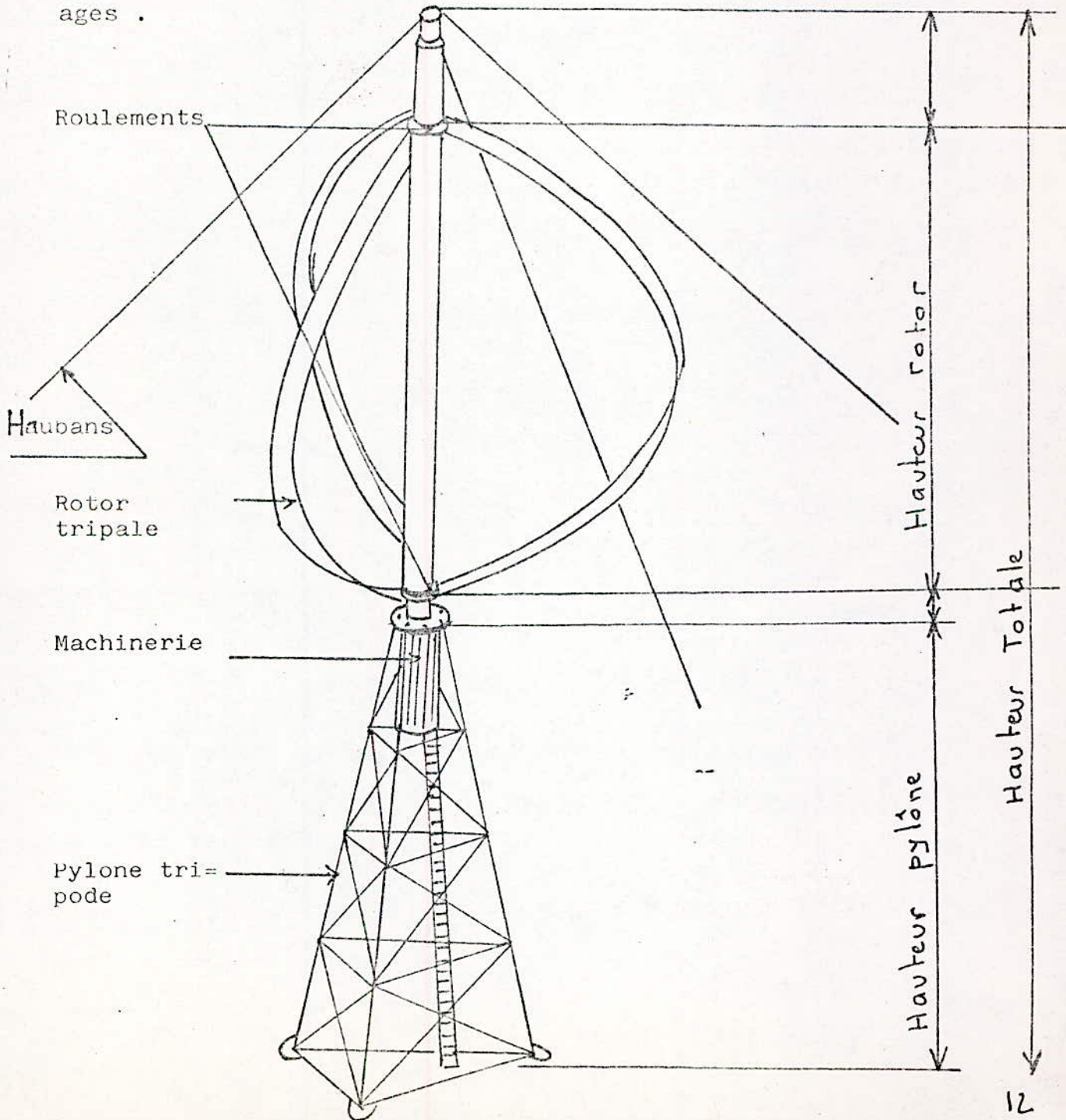
Lors de cette étude, notre choix portera sur l'éolienne à axe vertical dérivé du rotor de Darrieus de forme parabolique. Pourquoi ce choix? Car à travers tout le territoire algérien, aucune éolienne de ce type n'a été installée. Seules les éoliennes à axe horizontal ont été considérées et une éolienne de Savonius en construction au C.E.N. (commissariat des énergies nouvelles) de Bouzaréah.

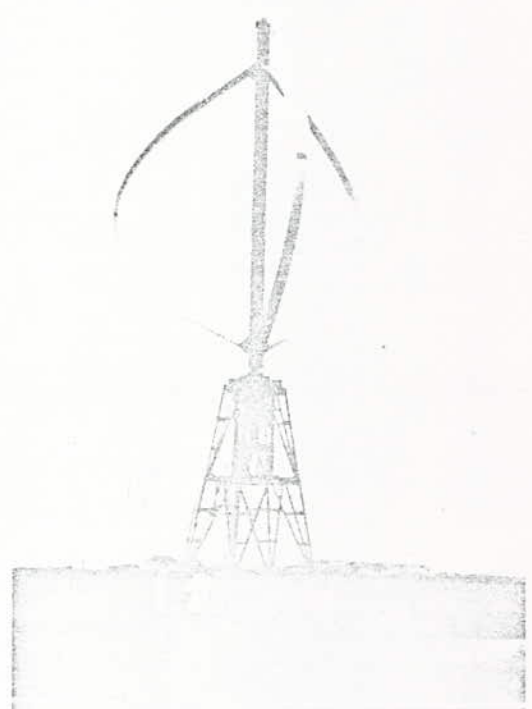
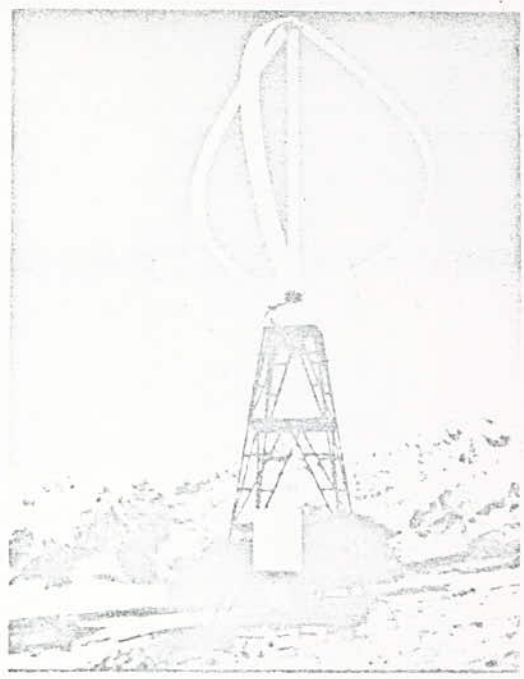
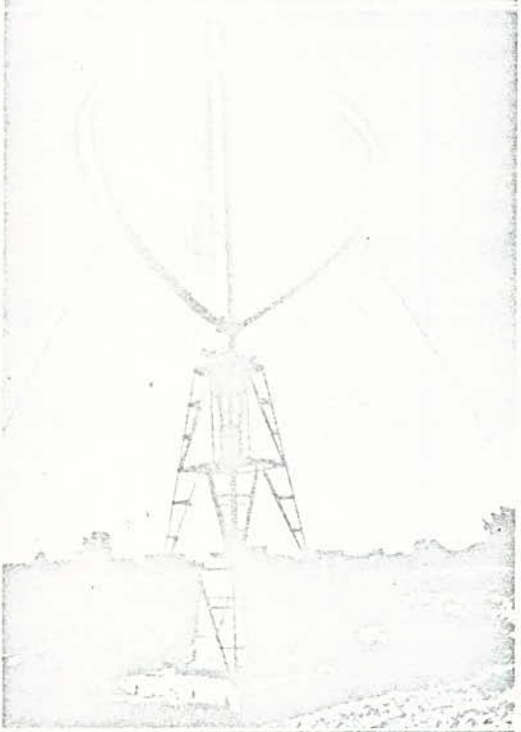
I-2-6-Organigramme d'une station de fourniture d'énergie mécanique par éolienne à axe vertical de Darrieus.



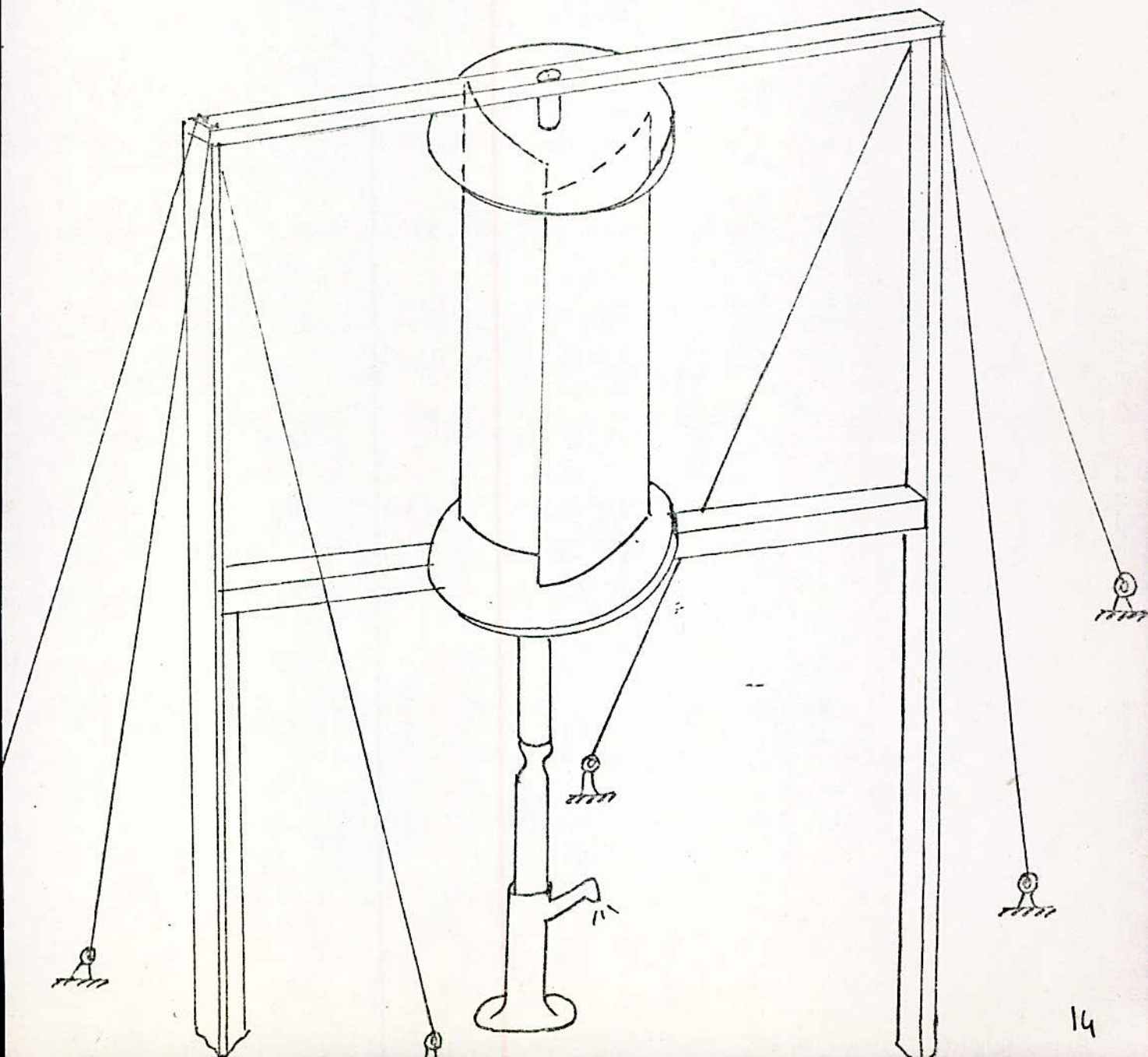
ou trois

L'éolienne de Darrius est constituée par deux pales profilées et cintrées de type N.A.C.A 0012 ou 0015, fixées rigidement à leurs extrémités sur un mât vertical tournant entre deux roulements. La puissance est directement disponible au sol. L'arbre vertical est idéal pour entraîner une pompe centrifuge. La vitesse de démarrage (5m/s) réserve ce rotor pour des sites bien ventés. Lorsque le vent dépasse 15m/s il s'établit une autorégulation de la vitesse de l'éolienne. On peut équiper celle-ci d'un frein centrifuge automatique de sécurité et d'un multiplicateur de vitesse à engrenage. Son adaptation à toute direction du vent ne nécessite pas de dispositif d'orientation. La machinerie est au niveau du sol donc plus accessible. Son socle est un pylône en acier haubaner par trois câbles en acier galvanisé et des ridoirs sur ancrages.





L'éolienne Savonius a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924, breveté en 1929. Elle comporte essentiellement deux demi cylindre dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Il s'agit d'une éolienne à trainée différentielle où l'air agit en comprimant certaines zones et en déprimant d'autres pour créer un couple moteur. Le rotor est monté sur roulements à sa base et à son sommet. La transmission du mouvement se fait par courroie puis par système de bielle pour commander une pompe à piston. Il faut placer un démultiplicateur entre le rotor et la pompe pour éviter qu'il ne tourne vite par vents forts. Un système d'effacement des pales peut être prévu pour que le rotor résiste aux vents violents. Le cadre support est en bois ,haubanné.



ETUDE METEOROLOGIQUE
LE VENT

II-1-ORIGINE DU VENT

Le vent est une masse d'air en mouvement. Il trouve son origine dans les différences de températures, et de pression de l'atmosphère aux divers points du globe. Le vent est caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps:

- la vitesse
- la direction

II-2-MESURE DE LA VITESSE DU VENT

Elle s'exprime en m / s, en Km / h, en Kt. Elle agit le plus directement sur le rendement de la station éolienne. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres classés en deux catégories:

- anémomètres à rotation
- anémomètres à pression

II-2-1-Anémomètres à rotation

Le plus utilisé est l'anémomètre à coupelles où la différence de poussée sur les faces concave et convexe des coupelles entraîne un mouvement de rotation. La mesure de la vitesse du vent peut se faire quelque soit sa direction.

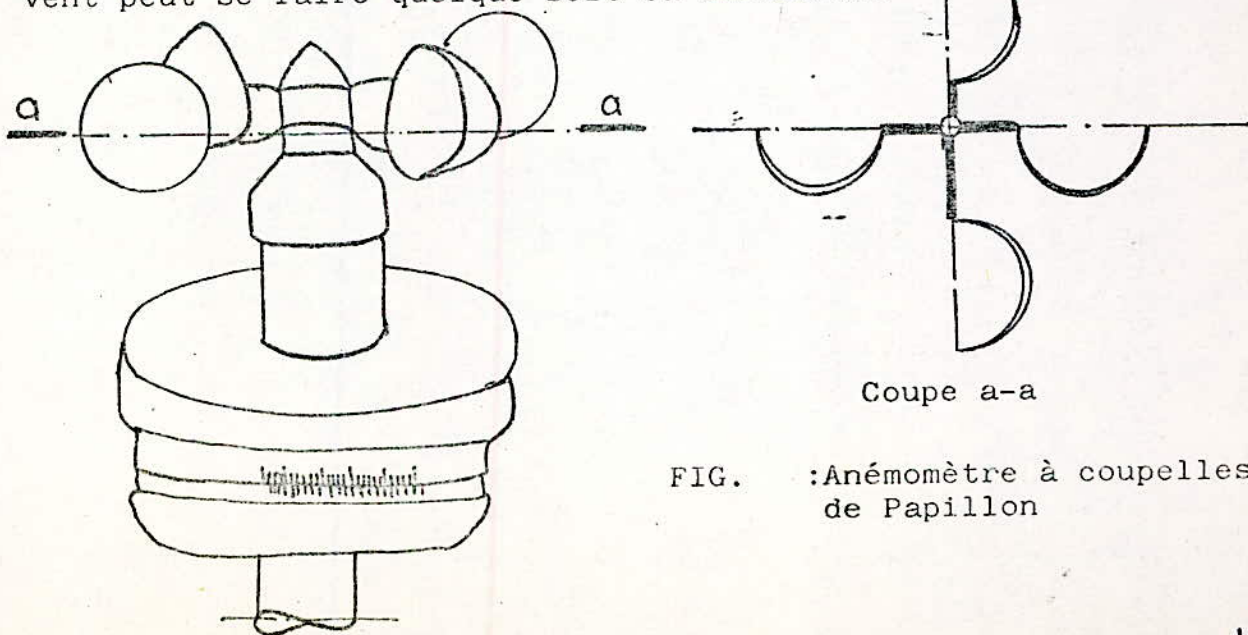


FIG. : Anémomètre à coupelles de Papillon

II-2-2-Anémomètres à pression

- L'anémomètre à plaque : par poussée du vent cette plaque se déplace devant une échelle graduée en m/s.

- L'anémomètre à tube en U : la pression du vent sur l'eau crée une différence de hauteur entre les deux colonnes. A chaque hauteur correspond une vitesse graduée en m/s.

- Le ventimètre : le vent exerce sa pression sur une plaque circulaire guidée par un axe en s'engouffrant par une ouverture située à l'extrémité inférieure d'un tube tronconique. A chaque hauteur atteinte par la plaque correspond une vitesse du vent.

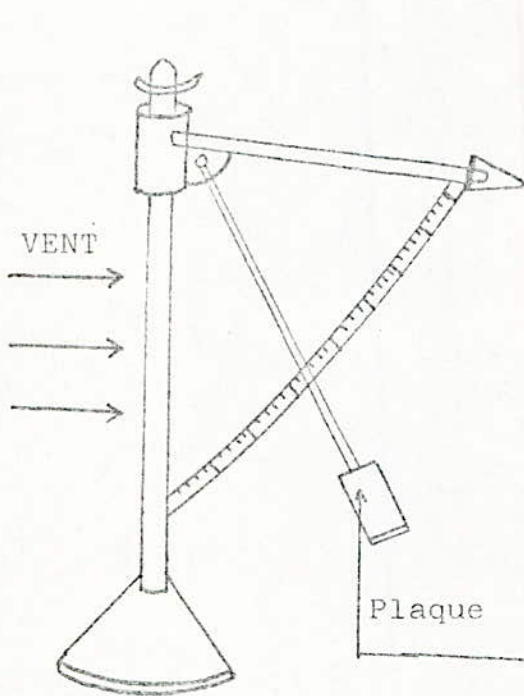


FIG.:Aplaque

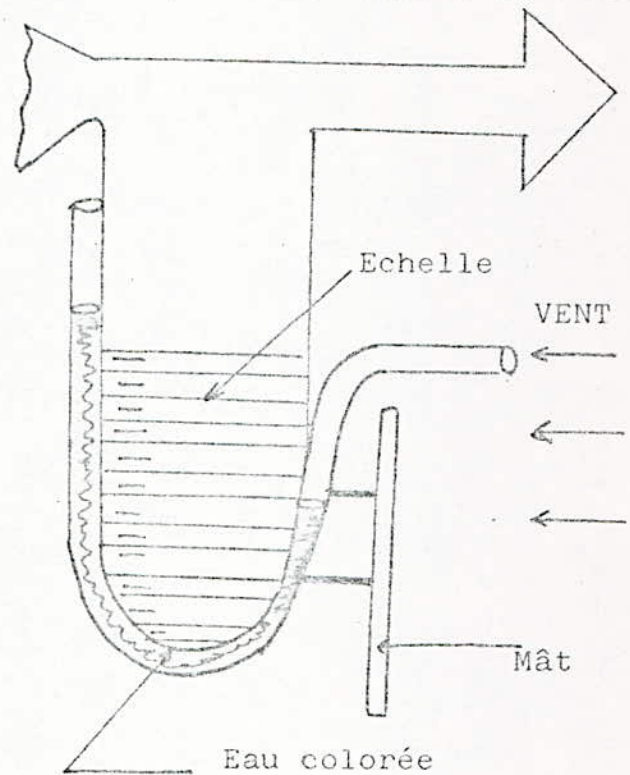


FIG.:Tube en "U"

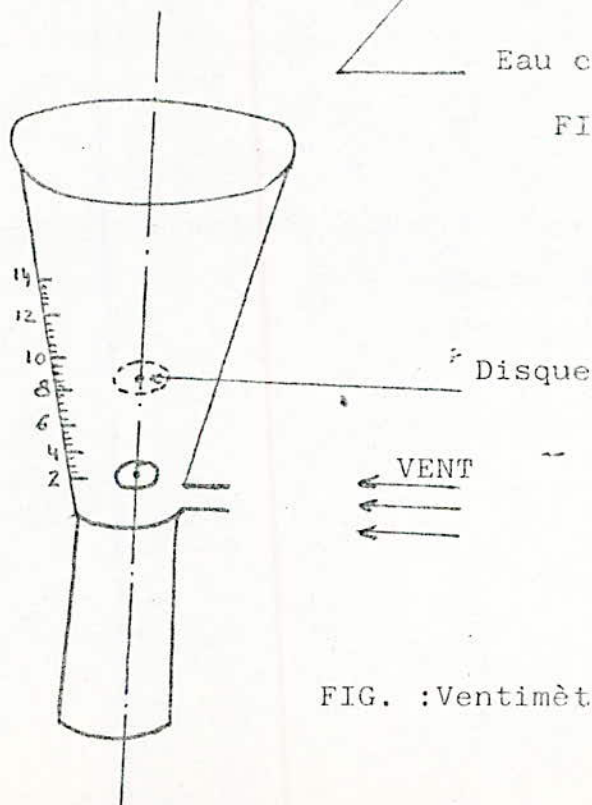


FIG. :Ventimètre

II-2-3-Les qualités que doivent présenter les anémomètres

Elles sont:

- 1- La linéarité entre la vitesse du vent et le signal de sortie dans une gamme de vitesse étendue.
- 2- Les indications de vitesses des vents ne doivent pas être affectées par les variations de la masse volumique de l'air, de la température, de l'humidité et de la pression.
- 3- La fidélité à long terme: Permanence de la validité de l'étalonnage.
- 4- Souplesse d'adaptation.
- 5- Maintenance simple et facile.

II-3-MESURE DE LA DIRECTION DU VENT

On repère la direction du vent par le côté d'où il souffle. Elle est généralement exprimée en degrés et indiquée par la dizaine de degré le plus proche à l'aide de l'échelle 01-36.

- . 09 =E (Est)
- . 18 =S (Sud)
- . 27 =W (Ouest)
- . 36 =N (Nord)

Le chiffre 0 indique un vent calme.

La direction est visualisée soit par une girouette, soit par une manche à air d'aérodrome.

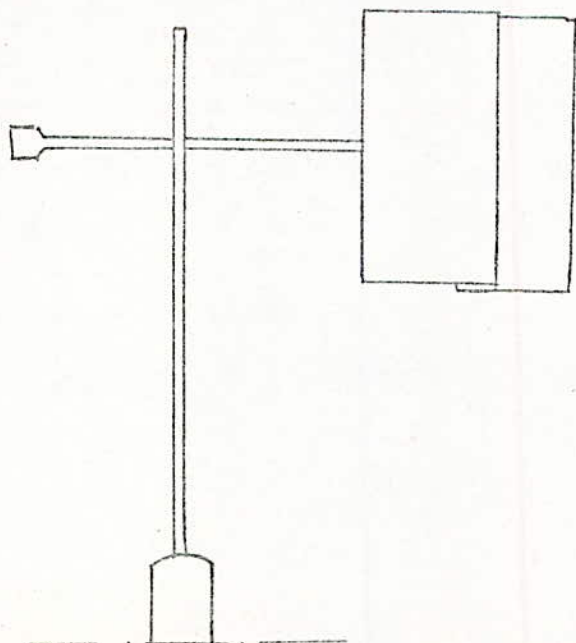


FIG. a) Girouette

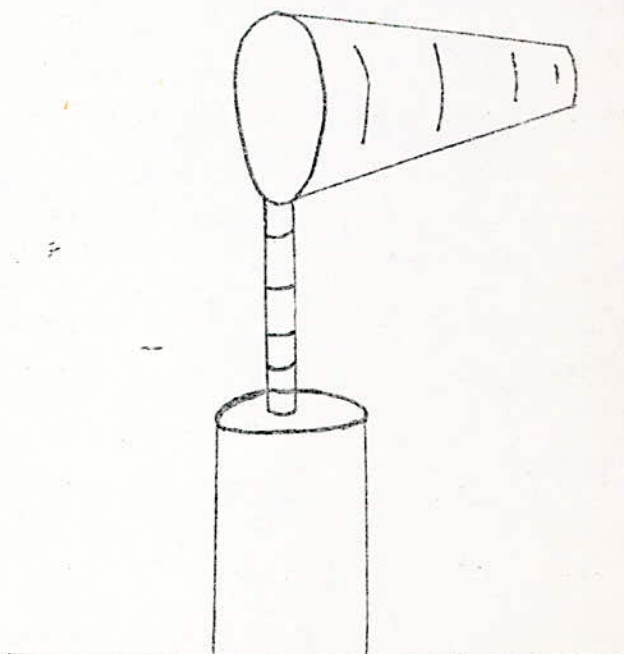


FIG. b) Manche à air

II-4-EVALUATION DES VITESSES DE VENT(MESUREES A 10 m)

Une graduation a été établie, l'échelle de Beaufort, qui divise les vents en fonction de leur vitesse en 17 catégories.

Degré Beaufort	Termes descriptifs	Vitesse moyenne(m/s)	Effet sur terre
0	Calme	0-0,2	Calme:la fumée s'élève verticalement
1	Très légère brise	0,3-1,5	La direction du vent révélée par la direction de la fumée
2	Légère brise	1,6-3,3	Vent perçu au visage Les feuilles frémissent
3	Petite brise	3,4-5,4	Feuilles et petites branches agitées.Le vent déploie les drapeaux.
4	Jolie brise	5,5-7,9	Vent soulève la poussière et les feuilles de papier.Les branchettes agitées.
5	Bonne brise	8,0-10,7	Les arbustes se balancent.Petites vagues avec crêtes sur les eaux intérieures
6	Vent frais	10,8-13,8	Les grandes branches agitées. Usage du parapluie difficile. Fils électriques sifflent.
7	Grand frais	13,9-17,1	Les arbres agités en entier.Marche contre le vent difficile .
8	Coup de vent	17,2-20,7	Le vent casse des branches.La marche contre le vent impossible.

9	Fort coup de vent	20,8-24,4	Légers dommages aux habitations
10	Tempête	24,5-28,4	Arbres déracinés. Graves dommages aux habitations.
11	Violente tempête	28,5-32,6	Très rarement observés. Des ravages étendus;
12	Ouragan	32,7-36,8	Ravages.
13	-	36,9-40,4	-
14	-	40,5-45,4	-
15	-	45,5-50,0	-
16	-	50,1-54,0	-
17	Cyclone	54,1-60,0	Ravages de toitures. Cheminées arrachées.

Le maximum observé DANS LA STATION de DAR-EL-BEIDA est de force 4 (environ 6m/s).

Vitesse moyenne (Km/h)	Effet au large	Hauteur maxi des vagues (m)	Pression sur surface plane (daN/m ²)
1	La mer est comme un miroir.	-	0,13
1 - 5	Se forme des rides, sans aucune écumes Mer dite:calme	0,1	0,8
6 - 11	Très petites vagues. Les crêtes déferlent. Mer dite:peu agitée.	0,3	3,2
12 - 19	Vaguelettes Mer dite:belle	0,6	6,4
20 - 28	Petite vagues Nombreux moutons.	1,5	13
29 - 38	Vagues modérées Embruns. Mer dite: forte.	2,5	22
39 - 49	Des lames se forment. Des crêtes d'écumes blanches.	4	33
50 - 61	La mer grossit. Les lames déferlent. Mer dite:forte.	5,5	52
62- 74	Lames de hauteur moyenne et allongées. Mer dite : grosse.	7,5	69

75 - 88	Grosses lames. Les embruns é=duisent la vis=ibilité.	10	95
89 -102	Très grosses lames.Visibi=lité réduite. Mer dite:très grosse.	12,5	117
103-117	Lames très hautes.Mer re=couverte de banc d'écumes.	16	160
118-138	L'air plein d'écumes et d'embruns.Mer dite énorme	14 et plus	208
139-149	-	-	265
150-166	-	-	325
167-183	-	-	365
184-201	-	-	470
202-220	-	-	Plus

II-5--CAUSES ET CONSEQUENCES DES VARIATIONS DE LA VITESSE, DE LA VITESSE.

Pour pouvoir juger de la rentabilité de l'éolienne, il est nécessaire d'évaluer de façon correcte le gisement éolien du site envisagé pour l'implantation de la machine.

Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un minimum de paramètres sur les caractéristiques du vent sur le site.

II-5-1-Phénomènes instantanés : les rafales, les vents extrêmes, les cisaillements.

Ces phénomènes entraînent des variations brutales de la vitesse du vent. Ils sont difficilement caractérisés. Prévoir des renseignements météorologiques sur 20 ans si ces régimes de vent sont répétitifs sur une année. Les vents forts, la turbulence, les cisaillements de vent rencontrés durant des conditions météorologiques sévères telles que les fronts orageux constituent un risque pour l'intégrité mécanique ou la durée de vie d'un aéromoteur. Ces phénomènes doivent être pris en considération lors de la construction du support de l'éolienne. Prévoir pour l'éolienne un système de régulation, ainsi qu'une installation de stockage.

II-5-2-Phénomènes journaliers.

Il en existe deux:

-près des côtes

-en montagne

Les vents subissent des fluctuations journalières dues à des effets convectifs.

II-2-5-1-Prés des côtes

La chaleur spécifique du sol étant inférieure à celle de l'eau, la terre s'échauffe plus vite que la mer sous l'effet du rayonnement solaire. Il se crée sur les continents et autour des grands lacs des mouvements convectifs:

.Au cours de la journée l'air au dessus de la terre s'élève et est remplacé par l'air marin plus froid: c'est la brise de mer (10h-18h)

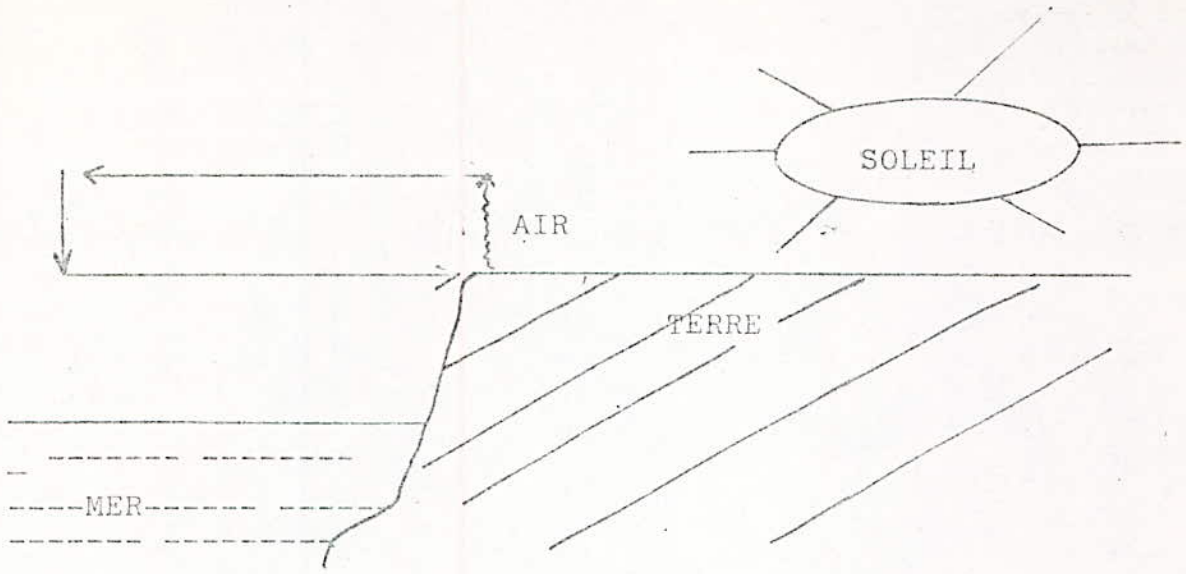


FIG: a) Brise de mer (soufflant de la mer vers la terre)

.Au cours de la nuit, la terre se refroidissant plus vite que l'eau, le phénomène s'inverse: c'est la brise de terre (21h-07h).

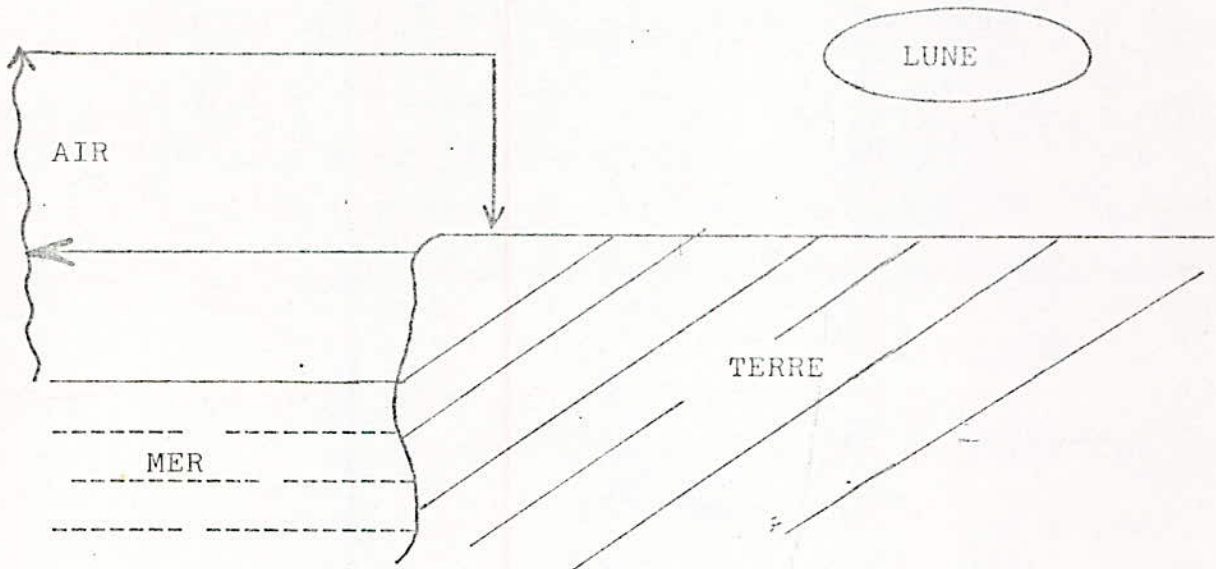


FIG: b) Brise de terre (soufflant de la terre vers la mer).

II-5-2-2-En montagne

La montagne est un endroit privilégié pour le déclenchement des ascendances thermiques. On observe :

-des brises du jour (à partir de 10 heures): le vent va d'aval en amont car les sommets plus près du soleil sont réchauffés avant les vallées.

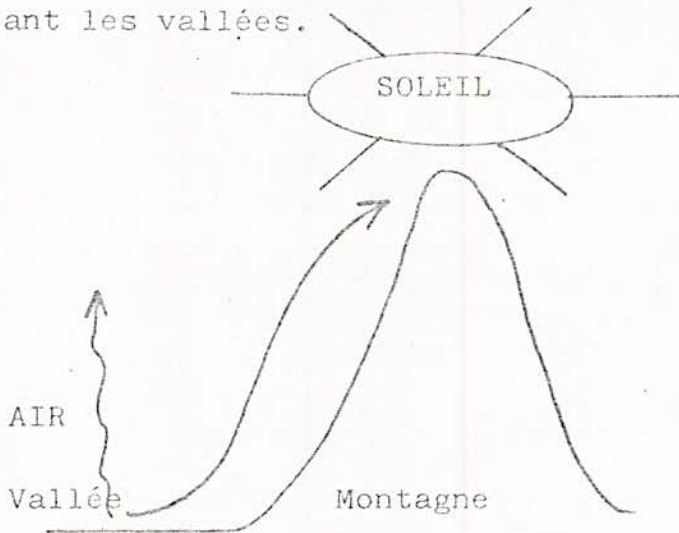


FIG. a) : Brise de vallée montante

-des brises de nuit (à partir de 18 heures): le courant s'inverse ; la brise va de l'amont en aval.

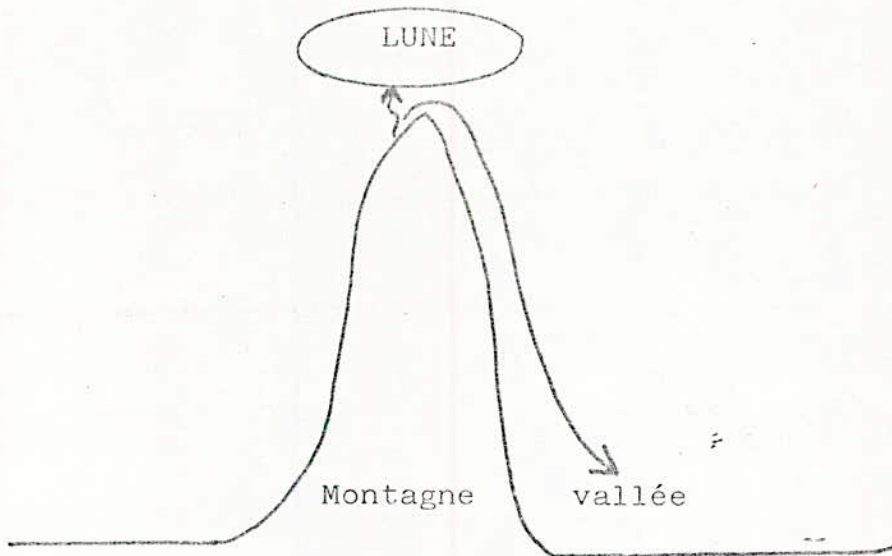


FIG. b) : Brise de vallée descendante.

II-5-3-Phénomènes saisonniers

La vitesse moyenne du vent varie en fonction des saisons.

II-5-3-1-Phénomènes mensuels

Les variations mensuelles dépendent essentiellement du lieu géographique et seuls les relevés météo. peuvent nous indiquer sur ces variations.

II-5-3-2-Phénomènes annuels

Les variations annuelles sont répétitives avec bonne précision, si bien que les renseignements sur une année permettent une bonne évaluation de l'énergie récupérable sur un site.

II-6-Variation de la vitesse moyenne du vent avec l'altitude

-Sur de courtes périodes(1 à 10 mn).

Le problème est de savoir comment à partir de la vitesse moyenne(sur une ou dix minutes mesurées au niveau de l'anémomètre) il est possible d'obtenir la vitesse à un autre niveau digne d'intérêt tel qu' au niveau de l'aéromoteur.

La variation de la vitesse moyenne du vent u se calcule à l'aide de la théorie de la couche limite turbulente(Monin et Obukov, 1954).

$$\frac{kZ}{u_*} \cdot \frac{du}{dZ} = \varphi\left(\frac{Z}{L}\right) \quad \text{d'où}$$

$$u(Z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi\left(\frac{Z}{L}\right) \right]$$

où φ et ψ =fonction universelles de Z
 Z =hauteur relative
 L =longueur de Monin-Obukov
 k =constante de Von Karman =0,4
 u_* =vitesse de frottement

$$L = \frac{-u_*^3 \rho C_p}{k g H} \quad \text{d'après Monin et Obukov}$$

où $H = \text{flux de chaleur} = \rho C_p (W'T)$

Mais u_* et H sont difficilement calculable car nécessite des laboratoires perfectionnés.

- Sur de longues périodes (1 mois ou 1an) .

Pour cela nous utiliserons un modèle de loi exponentielle pour l'obtention du profil vertical de vent sur une longue période.

$$\bar{u}(Z) = \bar{u}_a \left(\frac{Z}{Z_a} \right)^\alpha \quad \text{où}$$

\bar{u}_a = vitesse moyenne au niveau de l'anémomètre

Z_a = hauteur de l'anémomètre connue = 10m

$\bar{u}(Z)$ = vitesse moyenne au niveau Z désiré

Z = hauteur relative

L'exposant α ne peut pas prendre une valeur universelle pour tous les sites. Il caractérise la nature du terrain.

Justus et Mikhail (1966) ont proposé pour la valeur de

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln \bar{u}_a}{1 - 0,088 \ln \frac{Z_a}{10}}$$

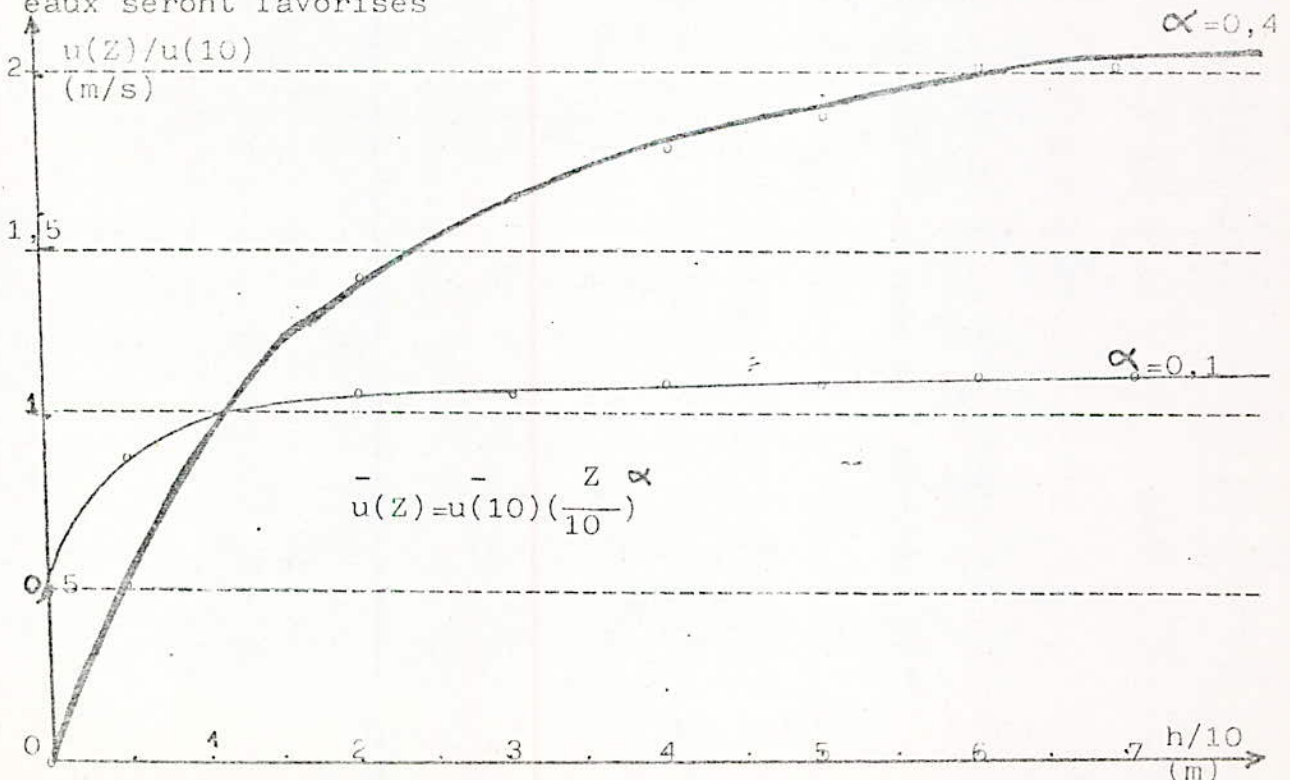
Généralement $Z_a = 10\text{m}$

ainsi $\alpha = 0,37 - 0,088 \ln \bar{u}_a$

Valeur de α pour 4 types de terrain.

Nature du terrain	Inégalité du sol Z_a (cm)	Exposant α
1-Plat:glace,neige, mer,marécages,herbes	0 - 20	0,08 à 0,12
2-Peu accidenté:in= égalités de faible amplitude,champs,...	20-200	0,13 à 0,16
3-Accidenté:bois zones peu habitées.	1000-1500	0,20 à 0,23
4-Très peu acciden= té:villes	1000-4000	0,25 à 0,4

Ainsi moins le terrain est accidenté plus on récupère de puissance au niveau du moteur éolien. La zone saharienne et les Hauts-Plateaux seront favorisés



Graphes des variations de vitesse de en fonction de l'altitude pour $\alpha = 0,1$ à $0,4$.

Ainsi plus le pylône est haut plus on récupère de l'énergie. L'énergie susceptible d'être captée étant proportionnelle au cube de la vitesse, il en résulte que :

$$\frac{E}{E_a} = \left(\frac{Z}{Z_a} \right)^3 \quad \text{où} \quad \begin{matrix} 0,24 & 3 & 1,20 \\ Z_a = 10m \end{matrix}$$

II-7-INFLUENCE DES OBSTACLES ET DU RELIEF SUR L'ECOULEMENT.

L'intensité des vents est influencée par le relief. En général la vitesse du vent est plus élevée sur les collines que dans les fonds de vallées, mais pas toujours vérifiée. Pour une direction donnée du vent, les fonds de vallées peuvent agir de telle sorte que l'air est accéléré. Ceci est couramment appelé les couloirs d'air.

Les collines situées près des côtes, constituent des sites favorables à l'implantation d'installations éoliennes. Les collines et les falaises de très forte pente sont beaucoup moins favorables du fait des turbulences qu'elles engendrent.

II-7-1-Caractéristique d'un terrain plat.

Frost et Novack(1977) ont défini le terrain plat comme une surface ayant les caractéristiques suivantes.

a)-Les différences de niveau entre les divers points, situés sur une surface de 12 Kms de rayon autour de l'emplacement de l'éolienne ne doivent pas dépasser 60m .

b)-Toutes buttes ayant un rapport hauteur sur largeur h/l inférieur à 0,016 dans un rayon d'action de 4 Kms doit être telle que la différence de niveau entre son point le plus haut et son point le plus bas soit inférieure ou égale au 1/3 de la différence de niveau entre la surface de balayage de l'éolienne et le point le plus bas du terrain.

C -Considérons un certain type de configuration de terrain, les reliefs ont une hauteur moyenne h_c et répartis de façon aléatoire. Si Z_r est la hauteur entre l'éolienne et le sol, Frost et Novack(1977), traitent les surfaces comme une surface rugueuse à condition que : $h_c / Z_r \ll 0,75$

Le paramètre de rugosité :

$$Z_o = 0,056h_c^{1,37}$$

Z_o (m) varie en fonction du type de surface ,Frost en a établi un tableau donnant quelques valeurs représentatives du paramètre de rugosité pour divers type de surface et de végétation.

Type de surface	Z_o (m)
-Marais, glace	10^{-5} à $3 \cdot 10^{-5}$
Mer calme	$2 \cdot 10^{-4}$ à $3 \cdot 10^{-4}$
Sable	10^{-4} à 10^{-3}
Plaine enneigée	$4,9 \cdot 10^{-3}$
Surface herbeuse	0,017
Herbe coupée	10^{-3} à 0,017
Steppe rase	0,032
Herbe haute	0,039
Blé	0,045
Palmiers	0,1 à 0,3
Arbres	0,2 à 0,9
Banlieues - Villes	1 à 2 - 1 à 4

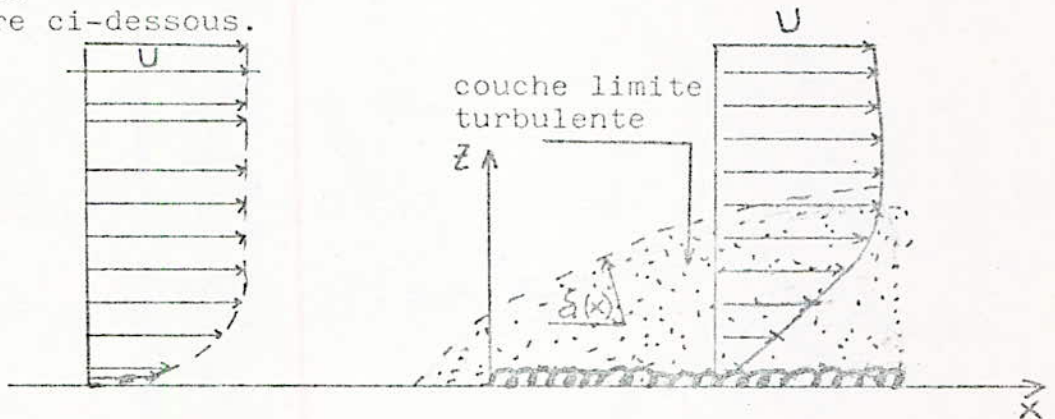
d-Si un obstacle isolé de hauteur h_c est situé à moins de 20 fois sa hauteur en amont de l'éolienne et si $h_c/Z_r \leq 0,33$, Frost suggère de le négliger. Il peut aussi ne pas être pris en compte s'il est plus loin de 20 fois h_c en amont quelque soit la valeur de h_c/Z_r .

e-Variation de la rugosité de surface d'un terrain plat . Si la hauteur des éléments qui composent une surface rugueuse varie de plus de 10% :

$$\begin{aligned} \cdot h_{ci} &\geq 1,1 h_{ci-1} && \text{ou} \\ \cdot h_{ci} &\leq 0,9 h_{ci-1} \end{aligned}$$

Frost et Novack considèrent que la rugosité de la surface a changé.

Si un tel changement de rugosité intervient et que Z_{oi-1} devient Z_{oi} , il se développe une couche limite turbulente. Voir figure ci-dessous.



. Ecoulement lisse

. Ecoulement visqueux (dû au frottements)

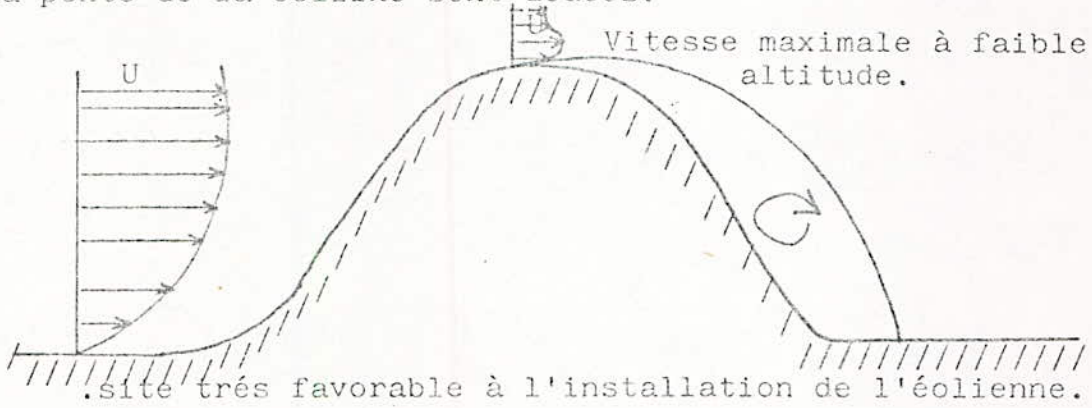
La hauteur de cette couche turbulente $\delta(x)$ varie avec X qui est la distance située en aval du changement de rugosité.

$$\delta(x) = \left(0,75 - 0,03 \ln \frac{Z_{oi}}{Z_{oi-1}} \right) \cdot x^{0,8} \cdot Z_{oi}^{0,2}$$

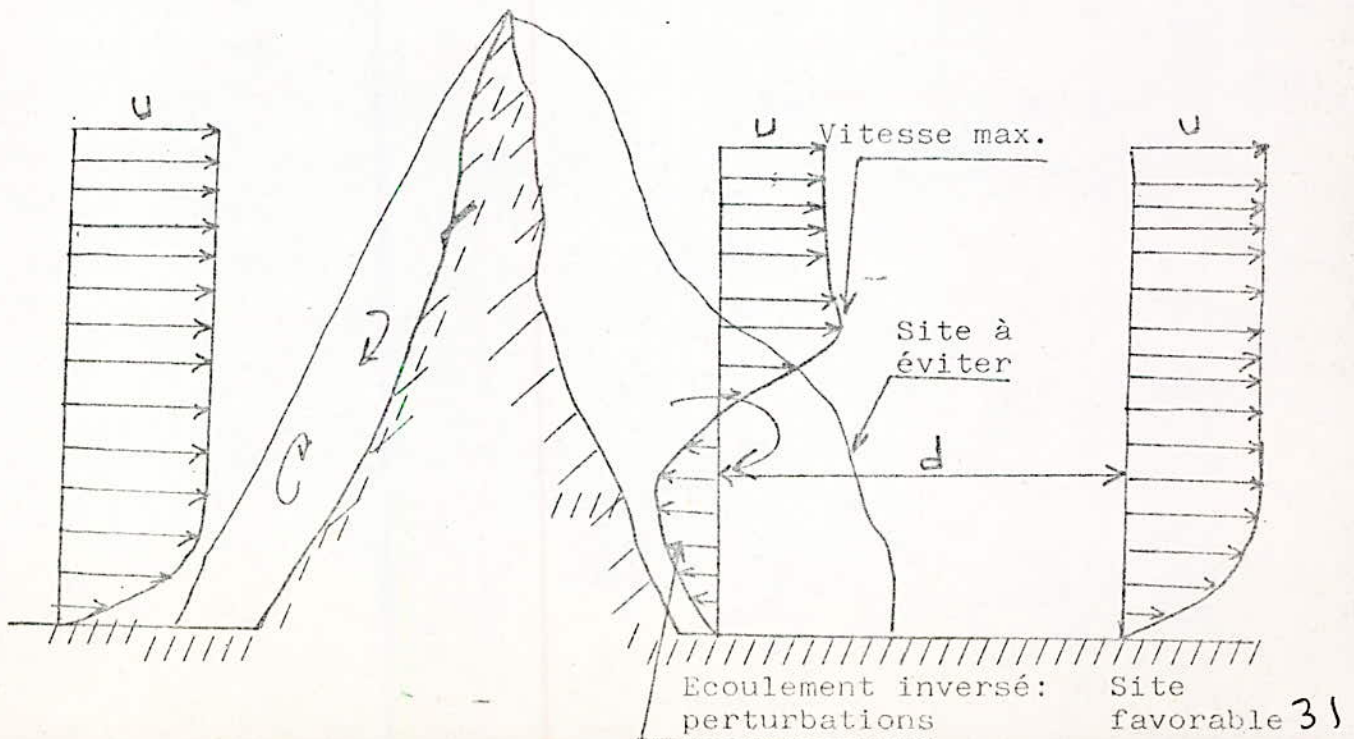
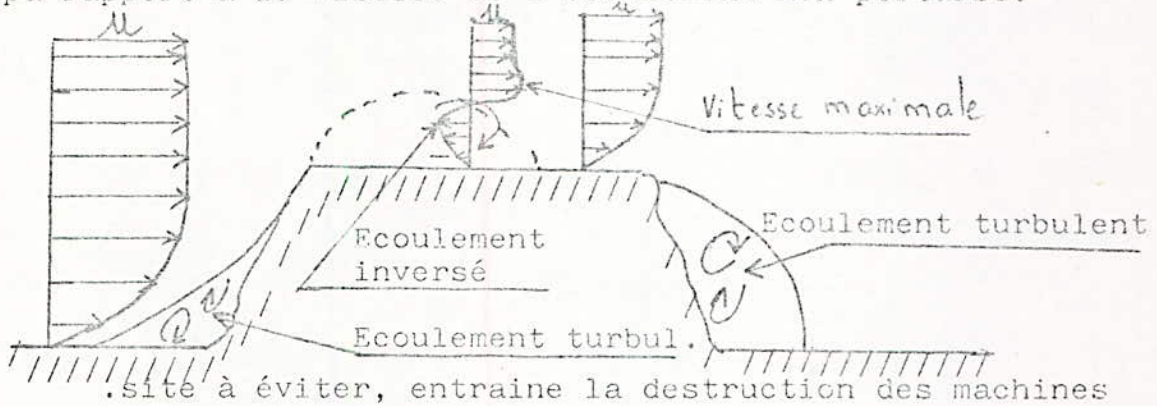
X, Z_{oi} et δ sont exprimés en mètres.

II-7-2- Représentations de l'écoulement au dessus des collines.

a- L'influence des collines sur l'écoulement de l'air peut se traduire par une accélération mais seulement si la forme et la pente de la colline sont douces.



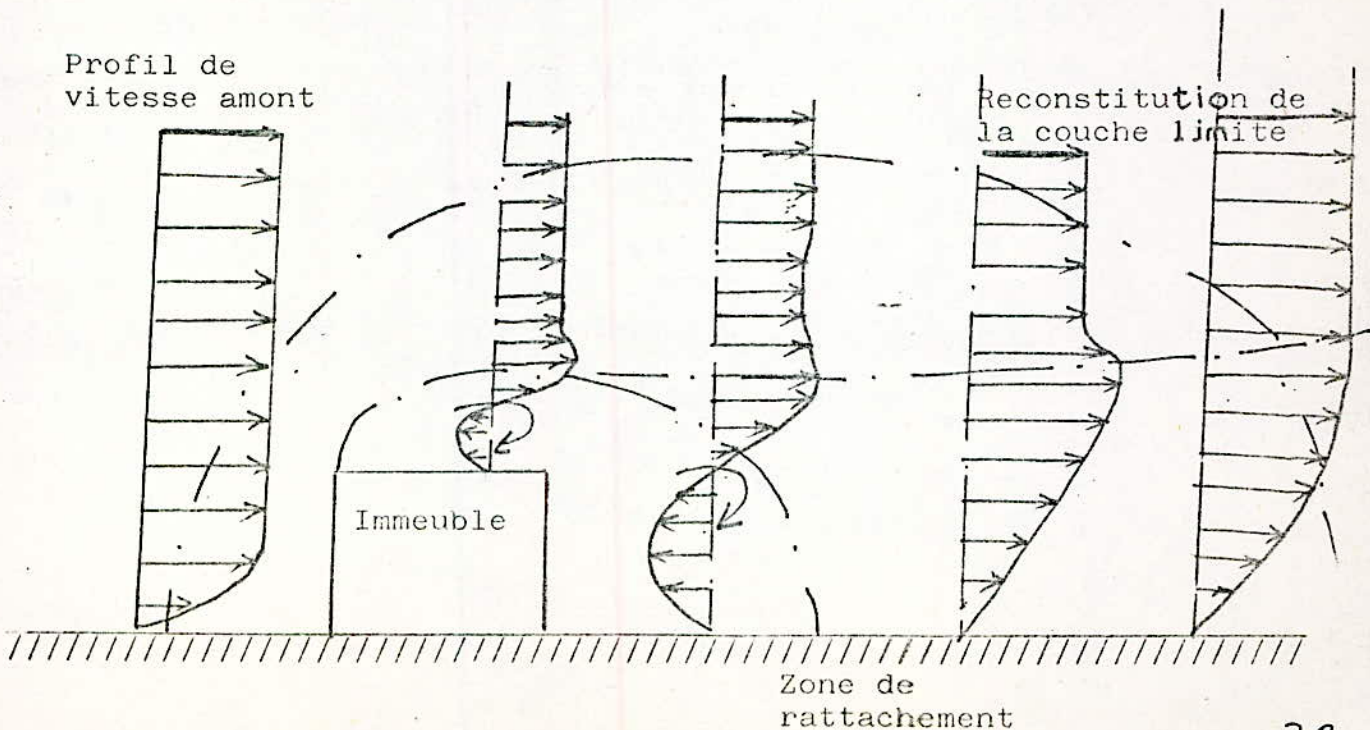
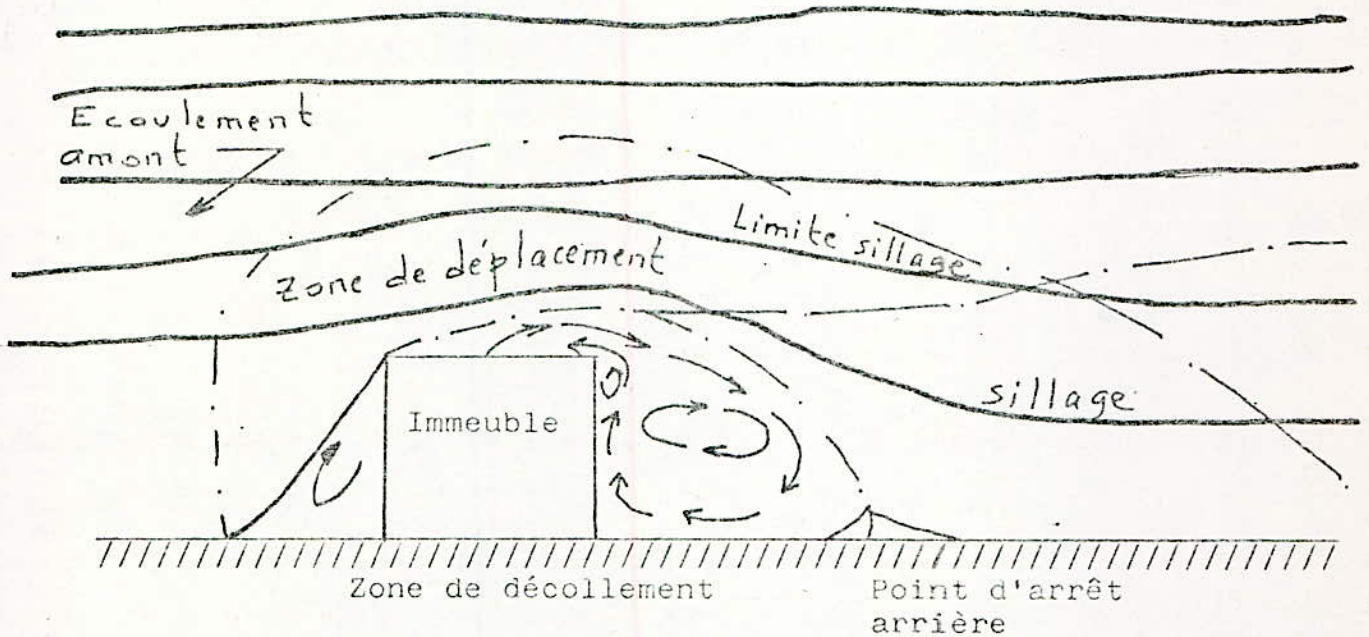
b- Les flancs abruptes, les falaises ou les crêtes peuvent réellement provoquer une diminution de vitesse de l'écoulement par rapport à la vitesse de l'écoulement non perturbé.



L'installation d'une éolienne juste après la crête est à éviter.
 La situer à environ $d = 10$ fois le diamètre de l'éolienne.

II-7-3-Influence des bâtiments et de la végétation.

Les sillages provoqués par les bâtiments, les arbres isolés ou les haies sont caractérisés par une diminution de la vitesse moyenne du vent et accroissement du niveau de turbulence. Le profil général de l'écoulement derrière un immeuble à angles vifs est illustré par la figure suivante :



. Tableau des sillages provoqués par des constructions et par la végétation.

Distance en aval H(m)	5	5	5	10	10	10	20	20	20
Flux variable	- ΔV%	- ΔP%	- ΔT%	ΔV%	ΔP%	ΔT%	-ΔV%	ΔP%	ΔT%
Constructions $\frac{W}{H}=4$ vent perpen- diculaire , mesuré à la hauteur H de l'immeuble . W est la longueur de l'immeuble	36	74	25	14	36	7	5	14	1
$\frac{W}{H}=3$	24	56	15	11	29	5	4	12	0,5
$\frac{W}{H}=1$	11	29	4	6	14	1	2	6	-
$\frac{W}{H}=0,3$	2,5	7,3	2,5	1,3	4	0,7	-	-	-
Arbre isolé :									
feuillage dense	20	49	-	9	17	-	4	13	-
feuillage clair	16	41	-	7	18	-	3	8	-
Haies(vent mesuré à la hauteur H):									
Porosité 0%	40	78	18	15	39	18	3	9	15
Feuillage clair 20%	80	99	9	40	78	-	12	32	-
Feuillage dense 40%	70	97	34	55	90	-	20	49	-
Hauteur type du sillagedans l'écoulement,H	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	3,0		

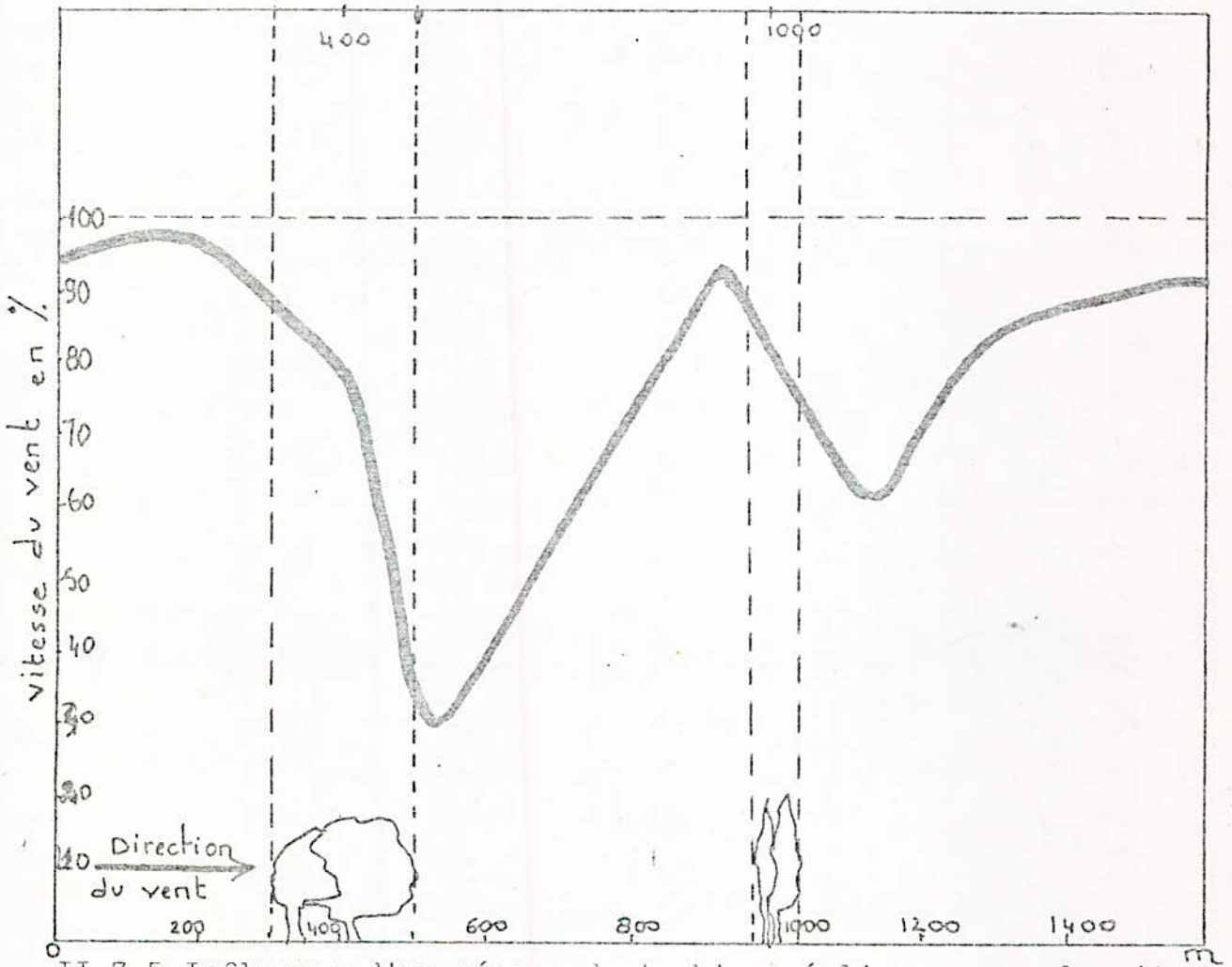
$$\cdot \Delta V\% = \left[\frac{U - U_0}{U_0} \right] \times 100$$

$$\cdot \Delta T\% = \left[\frac{\bar{U}'}{U} - \frac{\bar{U}'}{U_0} \right] \times 100$$

$$\cdot \Delta P\% = \left[\frac{U^3 - U_0^3}{U_0^3} \right] \times 100$$

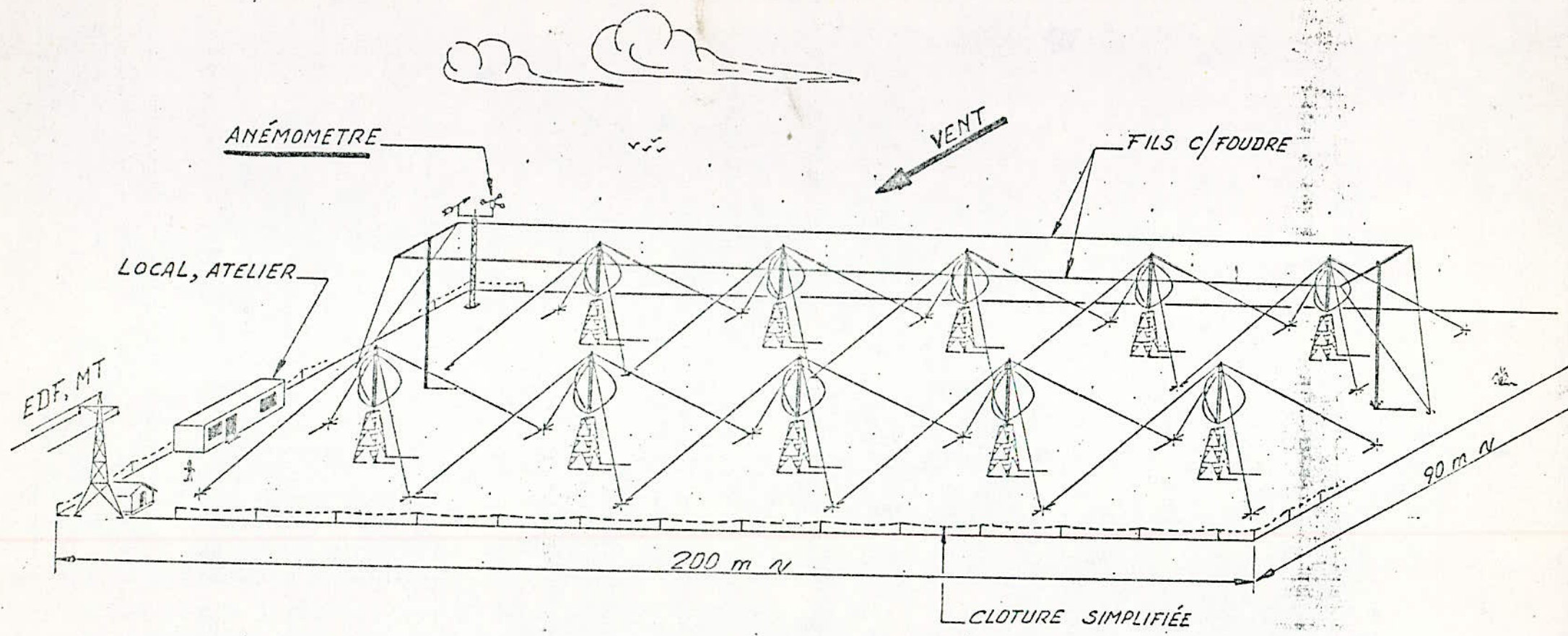
II-7-4-Influence des haies sur la vitesse du vent.

Au dessus des bosquets ou de groupes d'arbres une variation de vitesse est créée dont la représentation graphique se trouve ci-dessous.



II-7-5-Influence d'un réseau de turbines éoliennes sur la vitesse du vent.

L'espacement minimal des éoliennes pour éviter l'influence du sillage, d'une unité sur une autre située en aval, est de deux à trois fois le diamètre du rotor. Après cette distance le sillage s'amortit (voir étude de la couche limite turbulente).

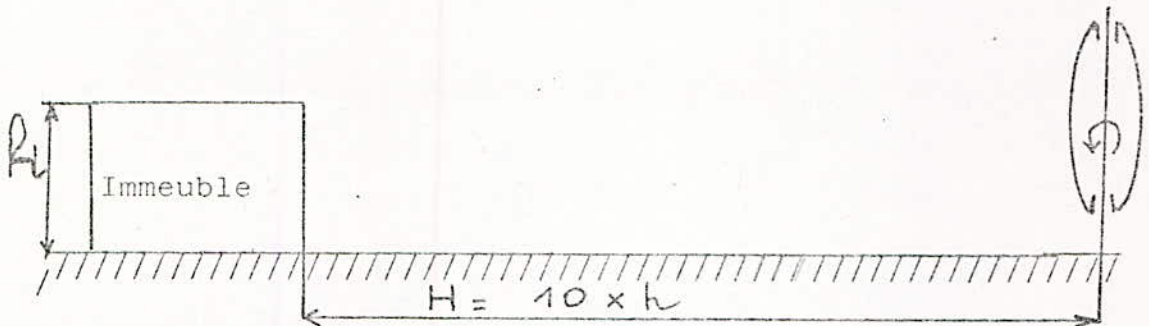
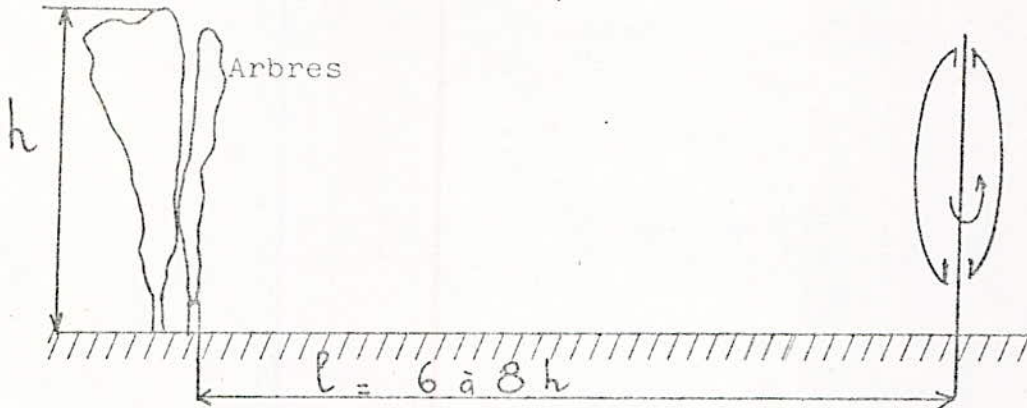


FERME D'ÉOLIENNES - 10 AÉROGÉNÉRATEURS D5
AIRE OCCUPÉE 90 x 200 m = 1,8 ha
PUISSANCE INSTALLÉE : 100 KVA
CEA - CENG (SEER/ASP)

En conclusion:

-La diminution de la vitesse à l'arrière d'objets poreux persiste deux fois plus loin que sur un obstacle plein.

-L'intensité de la turbulence derrière des objets poreux est inférieure au niveau de celle rencontrée dans le sillage d'objets solides



II-8-Choix et évaluation des sites.

II-B-1-Critère pour le choix d'un site.

-Une vitesse moyenne du vent élevée dans le site du lieu d'implantation de l'éolienne. Prévoir un terrain dont l'environnement accroîtra la vitesse moyenne sans interférences.

-Des variations annuelles, saisonnières et journalières acceptables.

-Des valeurs extrêmes et des niveaux de turbulences limités.

II-8-2-Critères généraux pour le choix des sites de vent fort.

-Crêtes perpendiculaires à la direction principale du vent en évitant les contreforts en amont, fréquents dans la zone des Hauts-Plateaux.

-Les collines à pente douce (entre 1/3 ET 1/4) dont les sommets ne sont pas trop plats. On les rencontre dans la zone saharienne.

-Collines dont la surface présente une faible rugosité (pas d'arbres).

-Sites éloignés des obstacles (immeubles, grands arbres)

• Critères de Frankels pour le choix des sites de collines.

Qualité du site	$R = U_{40m} / U_{10m}$	Exposant α	Pente
OPTIMAL	$R < 1,05$	0,0	1/3,5
TRES BON	$1,05 < R < 1,1$	0,07	1/6
BON	$1,1 < R < 1,15$	0,1	1/10
PASSABLE	$1,15 < R < 1,21$	0,14	1/20 (douce) 1/6 (irrégul.)
A EVITER	$R > 1,21$	$> 0,14$	1/20 1/2

L'installation d'une éolienne juste après la crête est à éviter. Car risque de rupture de l'éolienne due à l'écoulement turbulent. Il faut la situer à environ :

$d = 10$ fois le diamètre de l'éolienne.

-Représentation de la couche limite sur un obstacle elliptique d'après Frost(1975).

La figure ci-dessous montre l'écoulement de l'air au-dessus d'une colline de forme elliptique dont le rapport hauteur sur largeur h/l est de $1/8$.

Une accélération significative de la vitesse de l'écoulement d'air apparaît près de la hauteur $Z/h = 0,4$.

Sur des collines de forme triangulaire et sinusoïdale, l'accroissement relatif de la vitesse $S = (U_0 - U)/U_1$ près du sommet de la colline et décroît rapidement avec la hauteur $h/2$, c'est à dire la moitié de la largeur de la colline.

L'effet de la stabilité atmosphérique sur l'écoulement de l'air au-dessus des collines est significatif.

Afin de conserver son énergie, le vent a tendance à contourner la colline plutôt qu'à passer par-dessus.

Si les cas d'inversion sont fréquents, un site placé au pied d'une colline peut avoir une vitesse moyenne de vent plus élevée que celle rencontrée au sommet, à cause de l'influence de la stabilité. Mais une décroissance de celle-ci tend à accroître le facteur de survitesse en augmentant le flux de vent sur la colline.

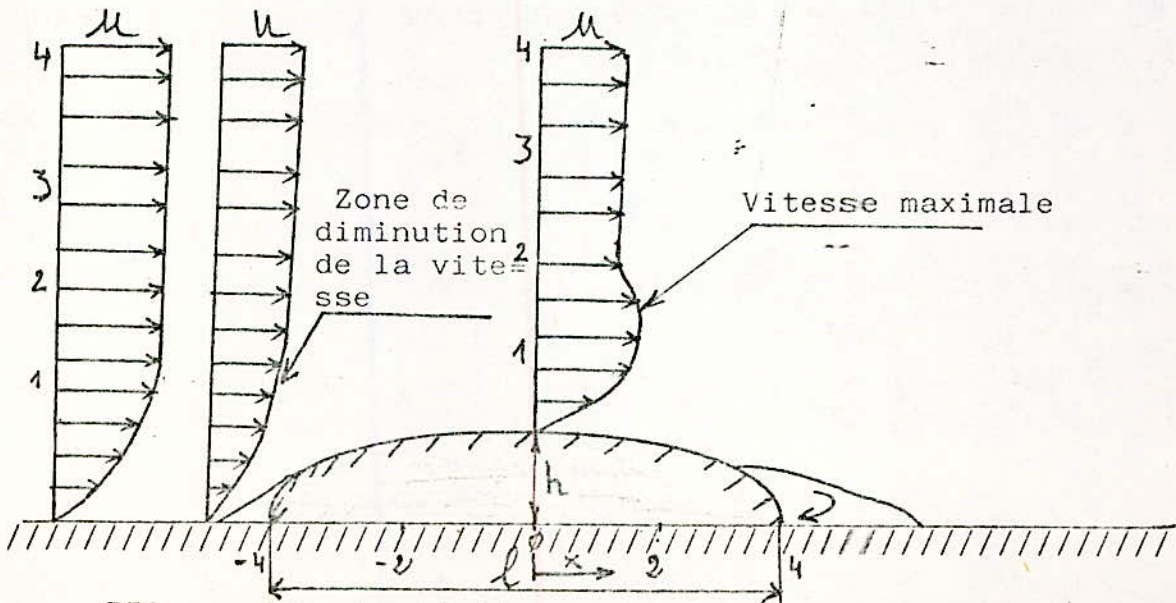


FIG. : Couche limite sur un obstacle elliptique.

II-9- PERSPECTIVES D'UTILISATION D'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE.

Les données météorologiques de l'office National de Météorologie de Dar-El-Beida(Alger) nous permettront de répondre aux questions suivantes:

-Dans quelles régions du pays y-a-t-il suffisamment de vent pour que l'implantation du groupe générateur soit économiquement rentable?

-Quelle est la distribution des périodes ventées durant le jour ,le mois et l'année?

-Quelle est la distribution des vents calmes et de vents forts durant le mois et l'année?

II-9-1-Données météorologiques

a-Observations en surface.

Elles sont faites dans 42 stations principales .La plupart d'entre elles(70%) sont situées dans la partie Nord du pays entre le 30ième et le 37ième parallèle.

Trente stations principales procèdent à des observations toutes les heures ou les trois heures.

Douze autres stations fonctionnent entre six heures et dix huit heures.

b-Observation en altitude

Cinq stations réalisent des sondages P.T.U.(T.U.:Temps Universel),en altitude.

Cinq stations réalisent des sondages RADAR(radar wind sounding).

Vingt deux stations à des lâchers de ballons.L'équipement utilisé est de marque vaissal mesural et météorite.


II-9-2-Etudes statistiques


Avant d'installer l'éolienne nous allons étudier statistiquement les disponibilités énergétiques à travers le territoire algérien.


Nous avons recours à des relevés météo de l'année 1971 à 1980; relevés donnant la répartition fréquentielle des vents en vitesse et direction sur l'année, le mois, le jour.

Pour l'installation de notre éolienne Darrieus de forme parabolique à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, l'on se contentera de prendre la vitesse moyenne annuelle dans la station de Dar-El-Beida.

Les graphiques donnent la répartition fréquentielle des vents, selon une rose des vent de 8 directions et trois intervalles de force. Cette représentation est classique en climatologie.

-Le trait  correspond à des forces comprises entre: 1 et 5m/s.

-Le trait  correspond à des forces comprises entre 6 et 15 m/s.

-Le trait  correspond à des forces supérieures à : 15 m/s.

Les fréquences inférieures à 1% n'ont pas été représentées. L'échelle adoptée est de 10mm pour 10%.

Les cercles ont été tracés de 10 en 10 mm(ou%) afin de faciliter la lecture des schémas.

Sur les tableaux N°2-1 sont présentés les valeurs des vitesses moyennes journalières du vent des années 1971 à 1980.

Un chronogramme, graphe donnant le pourcentage de jours (le nombre de jours de l'année) sur une année où le vent aura dépassé une vitesse V et la puissance par jour et par m^2 , qu'apporterait ce vent, a été établi.

Les tableaux présentent :

-le nombre de jours où la vitesse V a été observée.

-le nombre de jours où la vitesse V a été dépassé

-la puissance correspondante à la vitesse V en Kw/m^2 par jours.

Les graphes sont les chronogrammes correspondant aux tableaux.

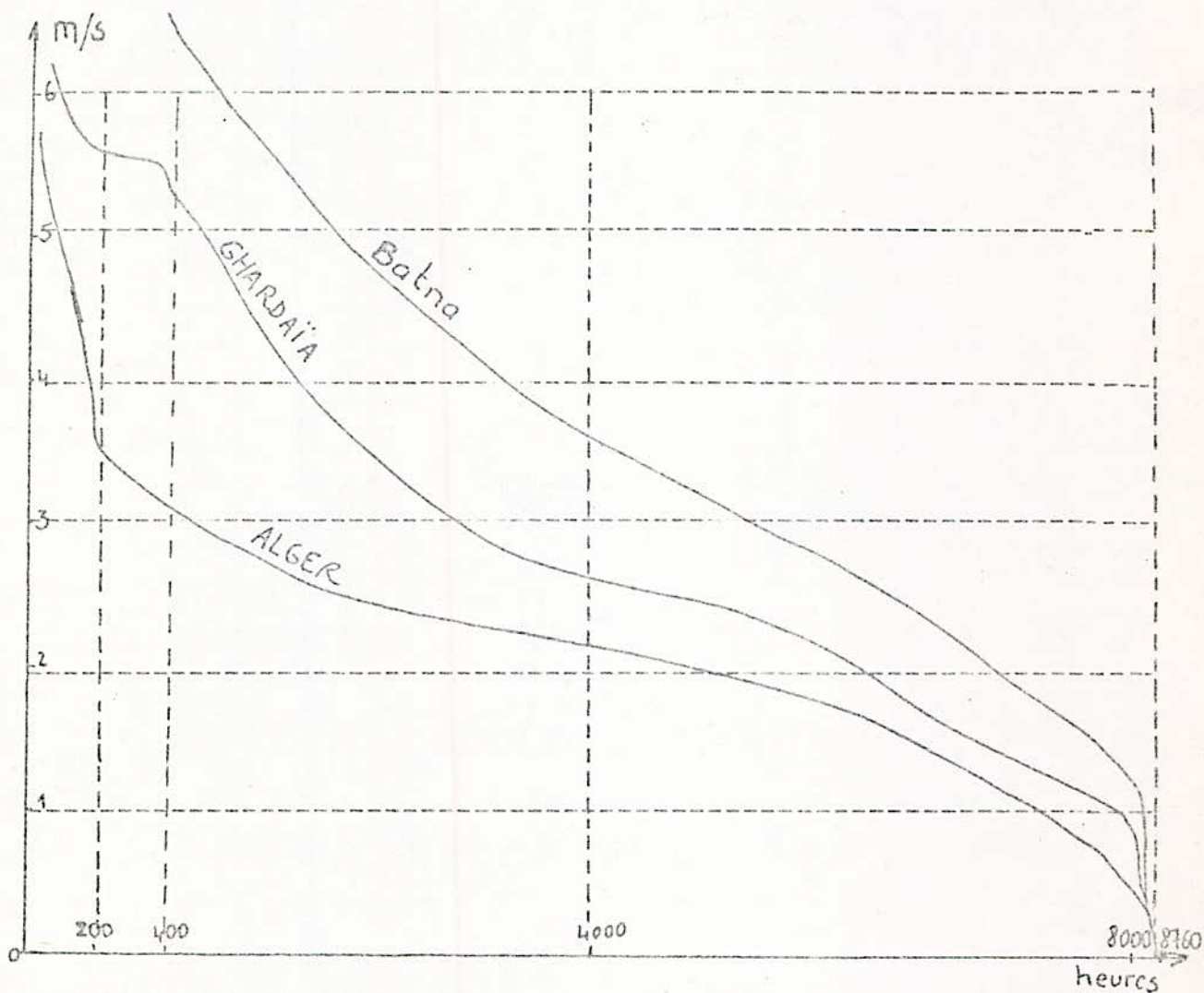
Nous devons indiquer , à partir de ces relevés météorologique ,où les investigations doivent être faites pour le choix de sites à fort potentiel éolien nécessaire pour l'installation de la turbine éolienne.

A cet effet nous allons procéder à la classification des stations par volume horaire annuel, pour une vitesse ≥ 3 m / s, vu qu'une turbine éolienne à axe vertical ne démarre qu'à partir de 3 m/s.

N°	STATIONS	VOLUME HORAIRE ANNUEL	%
1	EL-GOLEA	7302	83,3
2	HASSI-MESSAOUD	6675	76,2
3	BATNA	6654	76,0
4	EL-OUED	6381	72,8
5	BISKRA	6186	70,7
6	EL-BAYADH	6024	68,7
7	LAGHOUAT	5937	67,7
8	BEJAIA	5904	67,4
9	OUARGLA	5757	65,7
10	GHARDAIA	5016	57,2
11	ANNABA	4749	54,2
12	BECHAR	4560	52,0
13	ALGER	4539	51,8
14	ORAN	3819	43,6

A partir des données de variations de la vitesse moyenne mensuelles trihoraires du vent nous avons pu obtenir la courbe des vitesses classées pour trois stations principales:

- Batna
- Ghardaia
- Alger



Courbes des vitesses classées

La répartition du gisement éolien à travers le territoire correspond bien au découpage géographique du territoire suivant la coupe Nord -Sud:

-La zone du littoral:(Alger-Oran-Annaba...),zone moyennement favorable à l'installation d'éoliennes de type Darrieus car la vitesse du vent est en moyenne équivalente à 3m/s.

-La zone des Hauts-Plateaux (Sétif,Tiaret, Mascara,Tebessa, Constantine,Tlemcen),zone favorable à l'implantation d'éoliennes de type Darrieus.

-La zone saharienne(El Goléa,Hassi-Messaoud,Ouargla,Ghardaia, El Oued,Béchar...),zone sans obstacles, donc pas d'aérofreins créés par les montagnes, très favorable à l'implantation

Nous devons tenir compte de certaines spécificités géographiques. La station de Batna, quoique localisée sur les Hauts-Plateaux, a un très fort régime des vents proche de celui de la zone saharienne. Ceci est dû au fait, que cette station est située dans une vallée encaissée entre deux régions montagneuses.

ETUDE ENERGETIQUE-THEORIE DE BETZ

III-1-GENERALITES

Pour caractériser les ressources en énergie éolienne, il est nécessaire de distinguer:

- l'énergie éolienne disponible qui est l'énergie que pour = rait transformer une éolienne idéale de rendement unité.

- l'énergie éolienne récupérable qui dépend des caractéris = tiques du système de conversion utilisé.

III-2-L'ENERGIE FOURNIE PAR LE VENT

En considérant la masse volumique de l'air constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse.

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent qui tra = verse le rotor. Elle a pour expression:

$$E = 1/2.M.V^2 \quad \text{où}$$

E = énergie cinétique du vent en Joules

M = masse du volume d'air

V = vitesse instantannée du vent en m/s

En faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est constante en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse la surface en une seconde est égal à VS.

Si l'on prend m=la masse d'air traversant le rotor en 1 s, la puissance disponible à travers une surface S est:

$$P = 1/2.m.V^2$$

$$m = \rho.V.S$$

S = surface balayée par le rotor en m^2

ρ = masse volumique de l'air = 1,225 Kg/ m^3

Donc :

$$P = 1/2.\rho.S.V^3$$

$$P = 0,625.S.V^3$$

Toute cette énergie ne peut être captée car la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle. Ainsi nous sommes limités par le théorème de Betz.

III-2-1-Théorème de Betz

Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un écoulement d'air ayant à l'amont une vitesse V_1 à l'infini et une vitesse V_2 à l'aval.

Puisque la vitesse de l'air est faible, celui-ci est considéré comme étant incompressible.

L'équation de continuité nous permet d'écrire :

$$\rho \cdot S_1 \cdot V_1 = \rho \cdot S_2 \cdot V_2 = \rho \cdot S \cdot V = \dot{m} V \quad \text{où :}$$

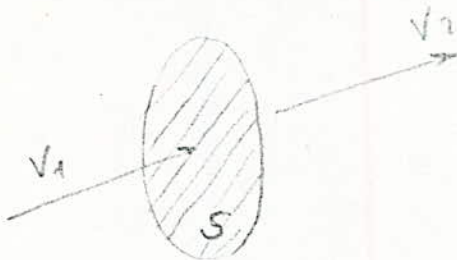
S_1, V_1 : la section et la vitesse à l'amont.

S_2, V_2 : la section et la vitesse à l'aval

S, V : la section et la vitesse au niveau du rotor.

$$P_1 = \frac{\dot{m} V_1^2}{2} = \text{Puissance à l'entrée}$$

$$P_2 = \frac{\dot{m} V_2^2}{2} = \text{Puissance à la sortie}$$



La puissance perdue par le fluide est :

$$P_c = P_1 - P_2 = 1/2 \cdot \rho \cdot V \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

Par ailleurs nous savons que la force exercée sur une section S est égale à la variation de la quantité de mouvement.

$$F = \rho V S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{théorème d'Euler})$$

Cette force est dirigée vers l'avant.

La puissance absorbée par la force F (c'est à dire par le moteur éolien) dont le point d'application se déplace à la vitesse V par rapport aux molécules d'air en mouvement est :

$$P_f = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2)$$

L'équation de conservation d'énergie nous donne :

$$P_f = P_c = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{\rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2}$$

On en tire :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

On pose : $V_2 = kV_1$ avec k compris entre 0 et 1 car V_1 est toujours supérieur à V_2 .

Nous avons l'équation :

$$P = P_f = P_c = \frac{\rho \cdot S \cdot V}{2} (V_1^2 - V_2^2)$$

En remplaçant V dans l'équation précédente on obtient :

$$P = 1/4 \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot (1+k)(1-k^2)$$

La vitesse, la section, et la masse volumique étant imposées, la puissance est fonction du paramètre k. Notre but est de récupérer le maximum pour $k = 1/3$, calculé à partir de la dérivée

$$\frac{dP}{dV_1} = 0 \quad \text{admettant deux racines: } V_1 = -V_2 \text{ (aucun sens physique)}$$

$$V_1 = \frac{V_2}{3} \text{ (maximum de puissance)}$$

donc la puissance maximale récupérable est :

$$P_{max} = 0,37.S.V_1^3$$

Cette relation constitue la limite de Betz, où

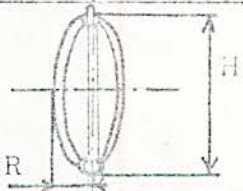
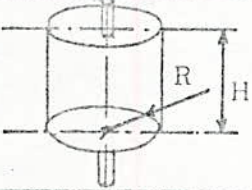
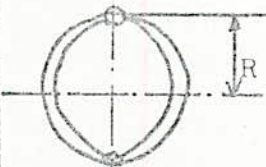
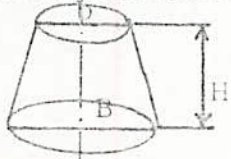
- . P est exprimé en Watt
- . S est exprimé en m^2
- . V est exprimé en m/ s

En écrivant P_{max} sous la forme :

$$P_{max} = 8/9 (1/3 \rho.S.V_1^3)$$

la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aéromoteur ne peut dépasser en aucun cas les 8/9 de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. Vu les réalisations pratiques et expérimentations, les aéromoteurs les plus perfectionnés ne dépassent pas 60% à 70% de la puissance maximale calculée par la formule de Betz.

III-2-2-Limite de Betz dans le cas du rotor Darrieus

FORME	CONFIGURATION	SURFACE BALAYÉE	PUISSANCE MAX.
PARABOLIQUE		$S = \frac{8}{3} RH$ R = rayon à l'équateur	$P = 0,98 RHV_1^3$
CYLINDRIQUE		$S = 2\pi RH$ $S = 2\pi R (R+H)$	$P = 2,32 RHV_1^3$ $P = 2,32R(R+H)V_1^3$
SPHERIQUE		$S = 4\pi R^2$	$P = 4,64 R^2V_1^3$
TRONCONIQUE		$S = \left(\frac{B+b}{2}\right) \times H$	$P = 0,187(B+b)HV_1^3$

III-2-4-Période défavorable

L'aérogénérateur doit assurer une consommation moyenne, chaque jour. Etant donné le caractère aléatoire des vitesses des vents, il faut se prémunir contre les périodes défavorables. D'après le diagramme baton (graphe), ces périodes changent chaque année.

ANNEE	+Dates limitant la période		+Durée de la Période(J)	Durée de la période maxi (jours)
	Début	Fin		
1971	7-1	14-1	7	15
	2-2	12-2	11	
	20-2	6-3	15	
	14-12	28-12	14	
1972	26-03	9-04	15	58
	5-05	2-07	58	
	1-11	17-11	17	
1974	11-01	2-02	22	53
	6-05	29-05	24	
	9-11	31-12	53	

L'on constate que la durée maximum de ces périodes est de deux mois environ. Pour les années 1976 à 1980 il n' a pu être obtenu de diagramme baton.

III-2-5-Choix de la vitesse nominale

Le choix de la vitesse nominale se fait sur le chronogramme en se fixant au préalable, un pourcentage sur le nombre de jours de l'année.

Nous constatons qu'autour du pourcentage 60% la vitesse ne varie que très peu autour de la valeur 3 m/s qui correspond à 51,8 % des jours de l'année.

Pour nos calculs nous prendrons comme vitesse nominale, la vitesse de 5 m/s, nécessaire pour permettre le démarrage de notre turbine éolienne de type Darrieus. Alors que l'éolienne de type Savonius peut démarrer avec une vitesse de 3 m/s.

CHAPITRE IV

ETUDE AERODYNAMIQUE

IV-1-GENERALITES

L'aérodynamique a pour objectif d'étudier les phénomènes qui se produisent lorsque un corps solide est en mouvement dans un fluide qui l'entoure.

L'élément principal du moteur éolien est la pale. Celle-ci n'est autre chose qu'une aile en rotation. En utilisant seulement la théorie de Betz, il sera difficile de construire le profil de la pale. D'où la nécessité de faire appel aux notions d'aérodynamique.

IV-2-COMPRESSIBILITE DE L'AIR

L'air est compressible pour des grandes vitesses, c'est à dire pour un nombre de Mach élevé ($M > 0,3$). Mais dans notre étude on a de faibles vitesses, donc des nombres de Mach faibles. Ainsi la vitesse du son joue un rôle important en aérodynamique, elle classe les phénomènes en deux catégories:

- subsonique ($V < a$)
- supersonique ($V > a$)

$M = V/c$ où V = vitesse de l'écoulement en m/s
 c = vitesse du son en m/s
 M = nombre de Mach

$c = \sqrt{dp / d\rho}$ (théorème d'Hugoniot)

$c = \sqrt{\gamma RT}$ où $R = 287 \text{ J/Kg}^\circ\text{K}$ = constante des gaz parfaits

$\gamma = C_p / C_v = 1,4$ et T = température de l'air en $^\circ\text{K}$

Pour une vitesse du vent maximale en Algérie de 15 m/s et pour $T = 318^\circ\text{K} = 45^\circ\text{C}$ on a : $c = 357,45 \text{ m/s}$ d'où $M = 0,042 < 0,3$

On considère donc que l'effet de compressibilité est négligeable.
= Cste par conséquent l'écoulement est incompressible.

III-3-EQUATION DU GAZ PARFAIT

L'air peut être assimilé à un gaz parfait aux températures usuelles et sous des pressions pas trop élevées, c'est à dire obéissant aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac qui s'écrit:

$PV = nRT$ = équation du gaz parfait valable en tout point d'un gaz en équilibre ou en mouvement.

III-4-ÉCOULEMENT A POTENTIEL DE VITESSES

Soit une particule fluide dont le centre est situé au temps t en un point $M(x,y,z)$ et dont les composantes de la vitesse V sont (u,v,w) .

Le mouvement de la particule se décompose en:

- une translation d'ensemble dont la vitesse a pour composantes (u,v,w) .

- une rotation d'ensemble dont la vitesse angulaire a pour composantes (ξ, η, ζ) où:

$$\xi = 1/2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\eta = 1/2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\zeta = 1/2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

sont les composantes au point M du vecteur tourbillon au temps t .

LORSQUE les composantes du tourbillon sont nulles en tout les points du fluide, ces mouvements sont appelés irrotationnels.

$$\xi = \eta = \zeta = 0$$

Pour vérifier, il faut que les composantes de la vitesse soient des dérivées partielles d'une fonction (x,y,z,t) appelée potentiel des vitesses.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

Les écoulements irrotationnels sont dit à potentiel des vitesses

III-5-EQUATION DE CONTINUITÉ

Dans la considération où le fluide en mouvement reste un milieu continu, l'équation s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

Puisque le fluide est incompressible $\rho = \text{constante}$.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Dans le cas d'écoulement à potentiel de vitesses, elle prend une forme particulière.

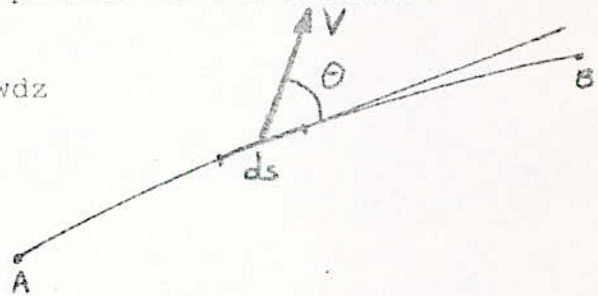
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Que l'on note $\Delta^2 \phi = 0$ (Laplacien nul). On dit que le potentiel est harmonique.

III-6-CIRCULATION DES VITESSES

La circulation entre deux points A et B s'écrit:

$$\Gamma = \int_{AB} V \cos \theta \, ds = \int_{AB} u \, dx + v \, dy + w \, dz$$



Si potentiel de vitesses $\Gamma = \int_{AB} d\phi = \phi_B - \phi_A$

Sur une courbe fermée la circulation est nulle sauf si le potentiel n'est pas uniforme.

III-7-FONCTION DE COURANT

Dans tout écoulement plan irrotationnel d'un fluide incompressible il existe une fonction de telle que :

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial \psi}{\partial x} = v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

$$\text{d'où, } \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \text{ et } \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0$$

La fonction de courant ψ est une fonction harmonique .
 φ, ψ sont deux fonctions harmoniques conjuguées .

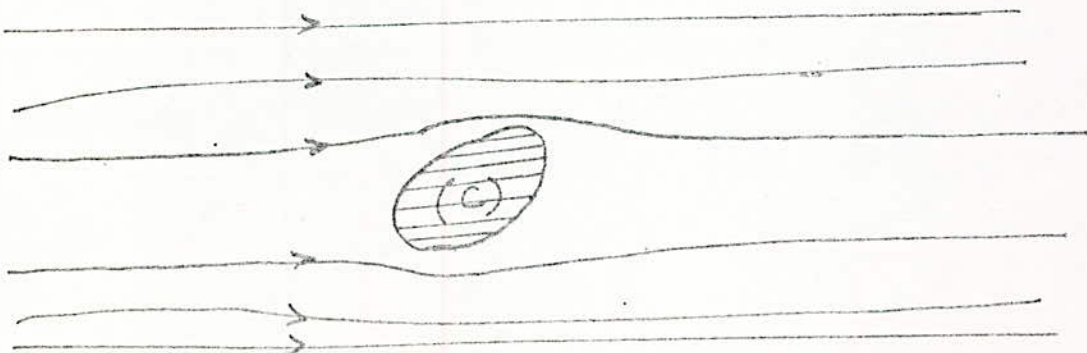
III-7-POTENTIEL COMPLEXE DE L'ÉCOULEMENT

La fonction $f = \varphi + i\psi$ est une fonction analytique de la variable complexe $z = x + iy$ dont la partie réelle $\varphi(x, y)$ représente le potentiel et le coefficient de la partie imaginaire représente la fonction caractéristique d'un écoulement irrotationnel plan du fluide.

f est appelé potentiel complexe de l'écoulement.

III-8-CORPS DANS UN FLUIDE PARFAIT

Un corps de forme quelconque , en mouvement uniforme dans un fluide parfait incompressible s'étendant à l'infini ne subit de la part de celui-ci aucune résistance quelque soit le sens du mouvement ou de la direction. Un fluide parfait est un fluide où les forces de viscosités restent nulles.



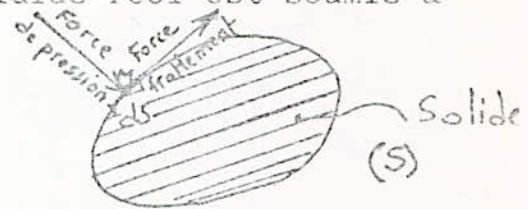
IV-9-CORPS DANS UN FLUIDE VISQUEUX

L'expérience fait qu'un corps en mouvement dans un fluide réel subit de la part du fluide une résistance qui s'oppose au mouvement. Pour l'écoulement visqueux, il y a adhérence du fluide à toute paroi solide fixe. La viscosité crée des tourbillons en détruisant l'écoulement à potentiel de vitesse. Il faut donc des circonstances particulières pour que l'écoulement visqueux soit à potentiel de vitesse.

IV-9-1-Origine des forces de résistance

Un corps placé dans un écoulement fluide réel est soumis à une résultante de deux forces:

- la force de trainée de frottement
- la force de trainée de pression



appelé résistance aérodynamique et un moment résultant par rapport au centre de gravité.

La trainée R_x est la composante de la résistance aérodynamique \vec{R} parallèlement à la vitesse V_∞ .

IV-9-1-1-Force de trainée de pression R_{xP}

Elle s'obtient, en faisant la somme des projections sur la direction de la vitesse V de V_∞ de toutes les forces élémentaires, à partir de la mesure des forces normales élémentaires $P \cdot dA$ sur la paroi d'un solide.

Considérons un élément de surface dS d'un corps baignant dans un écoulement fluide. Si on suppose que $gdZ = 0$ et si l'on appelle V_M et P_M la vitesse et la pression du fluide au voisinage d'un point M de dS , l'équation de BERNOUILLI s'écrira :

$$P_M + \rho (V_M^2 / 2) = P_\infty + \rho (V_\infty^2 / 2)$$

où P_M et V sont la pression et la vitesse du fluide au loin du point M et la masse volumique du fluide considéré incompressible.

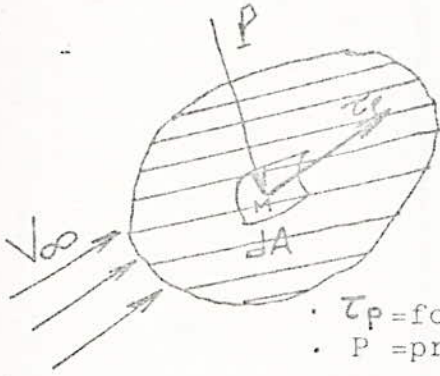
En posant : $K_P = 1 - (V_M / V_\infty)^2$

Nous avons : $P_M - P_\infty = \rho V_\infty^2 (K_P / 2)$

Donc au voisinage de chaque point du corps il existe une surpression ou une dépression qui provoque une force normale à dS :

$$\vec{dR}_{xp} = -K_p / 2 \rho V_\infty^2 dS \cdot \vec{dn}$$

Remarquons que K_p peut être positif ou négatif suivant que V_M est inférieure ou supérieure à V .



- τ_p = force de frottement par unité
- P = pression sur la paroi
- dA = élément de surface

IV-9-1-2-Force de trainée de frottement \vec{R}_{xf}

Soient u et v respectivement les projections des vitesses sur \vec{dn} et \vec{ds} , si l'écoulement suit le contour (pas de décollement), la composante v varie très peu et la composante u donne le profil parabolique donné par la figure. Donc le solide ralentit les particules en contact avec la paroi dont la cause est due à la viscosité du fluide. Ce qui se traduit par une force tangentielle exercée par le fluide sur l'élément de surface dS . Elle s'écrit :

$$\vec{dR}_{xf} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} dS \cdot \vec{ds} = \rho \nu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} dS \cdot \vec{ds}$$

A l'infini on a : $R_m = V_\infty D / \nu$

où : R_m = Nombre de REYNOLDS

D = Diamètre hydraulique

ν = Viscosité cinématique du fluide

d'où l'on tire :

$$\nu = \frac{V_\infty D}{R_m}$$

En posant $\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} = K V_\infty$ et $K_f = \frac{2KD}{R_m}$ nous obtenons :

$$\vec{dR}_f = K_f \left(\rho / 2 \right) V_\infty^2 dS \cdot \vec{ds}$$

.L'intégrale de dR_{xp} donne : $\vec{R}_{xp} = (\rho/2) V_{\infty}^2 C_p \vec{S} dn$

avec $C_p = (1/S) \int_S K_p \cdot ds$

.L'intégrale de dR_{xf} donne : $\vec{R}_{xf} = (\rho/2) V_{\infty}^2 C_f \vec{S} ds$

avec $C_f = (1/S) \int_S K_f \cdot ds$

Les deux forces R_{xp} et R_{xf} donnent naissance à une résultante telle que :

$$\vec{R} = (\rho/2) V_{\infty}^2 C (\vec{dn} + \vec{ds}) \quad \text{où } C = C_p + C_f$$

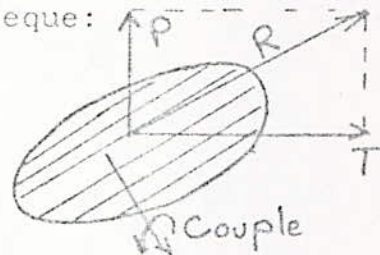
Si l'on considère un repère orthonormé (OX, OZ), la résultante R se décomposera en deux forces P et T telle que :

Trainée : $T = 1/2 C_x \rho S V_{\infty}^2$

Portance : $P = 1/2 C_z \rho S V_{\infty}^2$

où $C_x = C_{fx} + C_{px}$ est appelé coefficient de trainée .

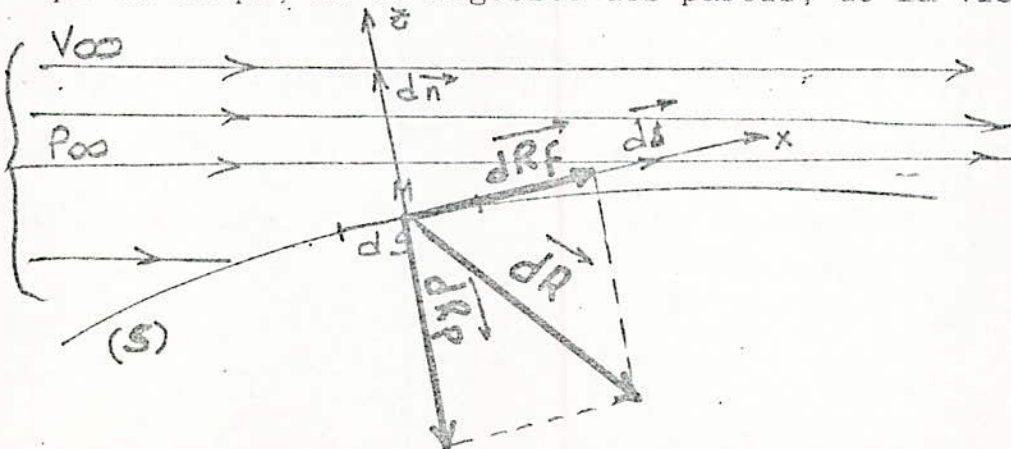
$C_z = C_{fz} + C_{pz}$ est appelé coefficient de portance.



Le moment résultant M du système des forces appliquées à l'obstacle, pris par rapport à un point ou un axe s'écrit :

$$M = 1/2 C_m \rho S V_{\infty}^2 l$$

Les coefficients C_x, C_z, C_m sont fonctions de la forme géométrique du corps, de la rugosité des parois, de la viscosité du fluide.



IV-10-ÉCOULEMENT AUTOUR DE CORPS GEOMETRIQUEMENT SIMPLES.

Ces corps sont classés en trois catégories suivant leur forme géométrique.

-les obstacles à courbure progressive: la sphère ou le cylindre où le point de décollement est susceptible de se déplacer.

-les obstacles à arêtes vives: la plaque plane inclinée sur V où le point de décollement de la couche limite est fixe.

-les obstacles profilés: plaque plane parallèle à V , où il n'y a pas de décollement de la couche limite.

IV-10-Action du vent sur une plaque plane.

soit une plaque plane de faible épaisseur, fixée sur un bras pivotant et exposée au vent de vitesse V_{∞} , on observe que les différents phénomènes pour une vitesse d'écoulement constante, sont essentiellement liés à l'angle d'incidence i que fait la surface avec la direction de l'écoulement de l'air.

Le vent crée sur la plaque une force \vec{R} qui se décompose en deux forces P et T où :

- P : perpendiculaire à la direction du vent appelée poussée qui donnera à la plaque un mouvement de rotation autour de l'axe.

- T : dans la même direction que le vent, appelée traînée.

La résultante de ces forces, \vec{R} est perpendiculaire à la plaque et appliquée au centre aérodynamique.

Si nous voulons avoir une rotation importante, il est nécessaire d'avoir une poussée importante et une traînée très faible. Pour cela nous aurons recours à des profils ne créant pas de turbulence.

Ce type de profil est appelé PROFIL AÉRODYNAMIQUE.

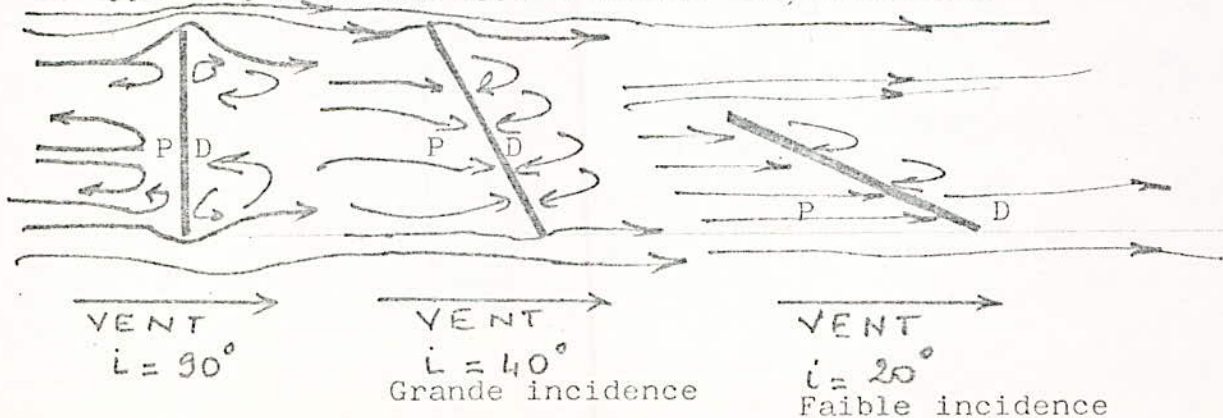


FIG : Spectre aérodynamique d'une surface inclinée /à la direction du vent (P:Surpression-D:Dépression)

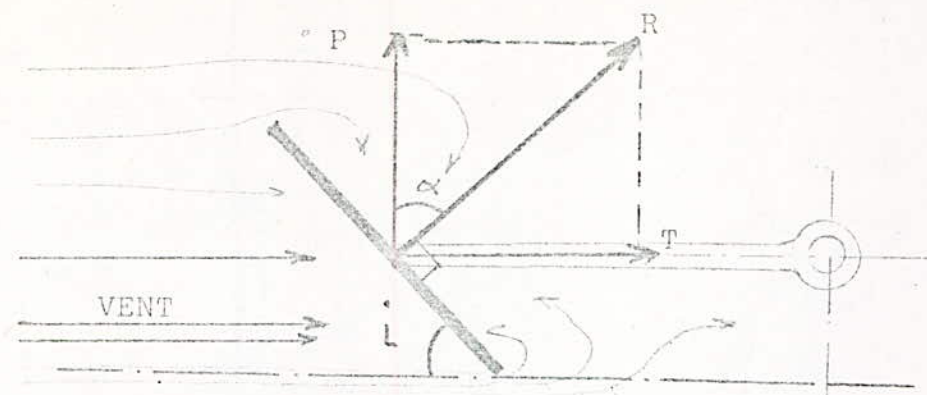


FIG Décomposition de la résultante de l'action du vent

IV-10-2-Profil aérodynamique.

Ce profil est obtenu par la transformation conforme d'un cercle en un contour fermé avec un arrondi à l'avant et une pointe à l'arrière.

Ainsi en aérodynamique l'équation :

$f(Z) = \frac{D}{2\pi} \text{Log}(Z-Z_0)$ représente le potentiel complexe de l'écoulement issu d'une source de débit D , placée en Z_0 .
En faisant décrire à Z un cercle, la fonction :

$f(Z) = Z + \frac{k}{Z}$ génère un profil aérodynamique, dit "profil de Joukowski", pour $k > 0$.

Sous certaines hypothèses simplificatrices de telles fonctions peuvent effectivement permettre d'établir des profils simplifiés d'ailes en se passant des souffleries, par le simple calcul.

IV-10-3-Profil de Joukowski

Un profil de Joukowski s'obtient en faisant varier Z sur un cercle C , et en calculant $f(Z) = k/Z$ avec $k > 0$. A ce moment $f(z)$ décrit également un cercle C' , tangent à c en B . Il suffit alors d'effectuer la somme $Z+f(Z)$ pour obtenir un point du profil de "Joukowski", dont la forme dépend du cercle C , et de k .

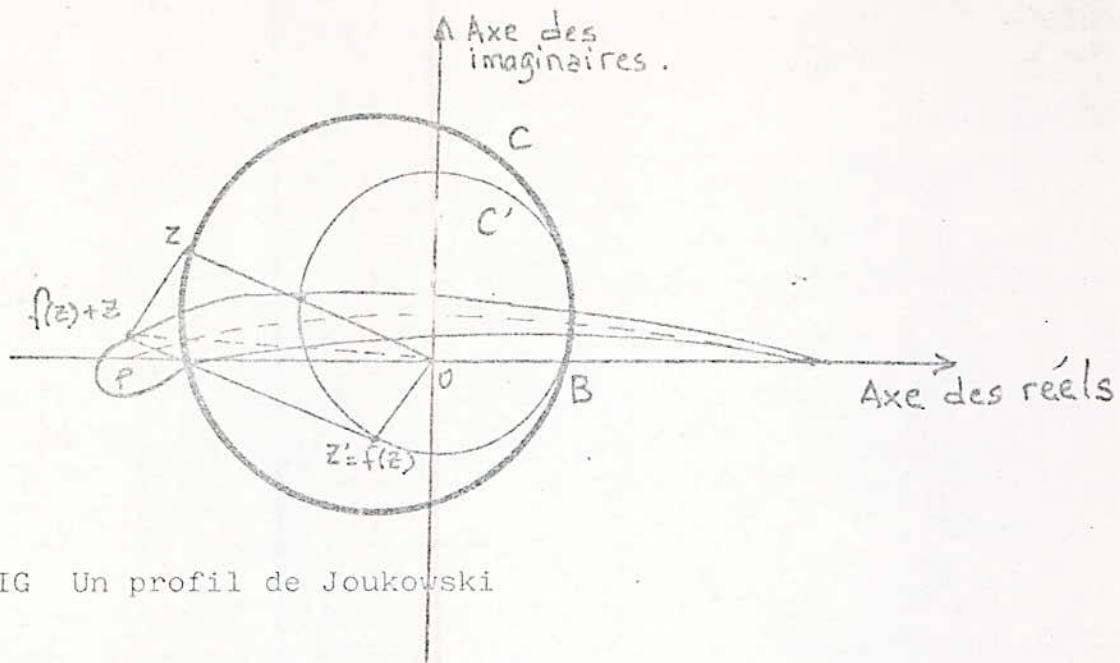
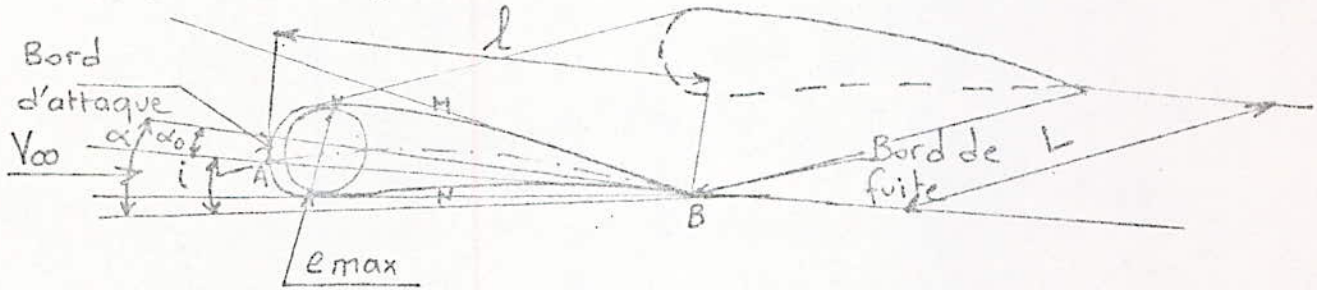


FIG Un profil de Joukowski

IV-10-4-Ecoulement autour d'un profil d'aile-Naissance de la portance .

Considérons un profil d'aile dans un vent de vitesse V .



AB = corde de référence du profil

l = profondeur du profil

AMB =extrados du profil

ANB =intrados du profil

MN =squelette du profil

i = angle d'incidence

α_0 = angle de portance nulle

α =angle de portance = $i - \alpha_0$

L =envergure

e_{max} =épaisseur du profil

$\Lambda = L/l$ =allongement de l'aile

e_{max}/l =épaisseur relative du profil

f = finesse de l'aile = $\frac{C_x}{C_z}$

ε = angle de glissement = $\text{Arctg} \frac{C_x}{P}$

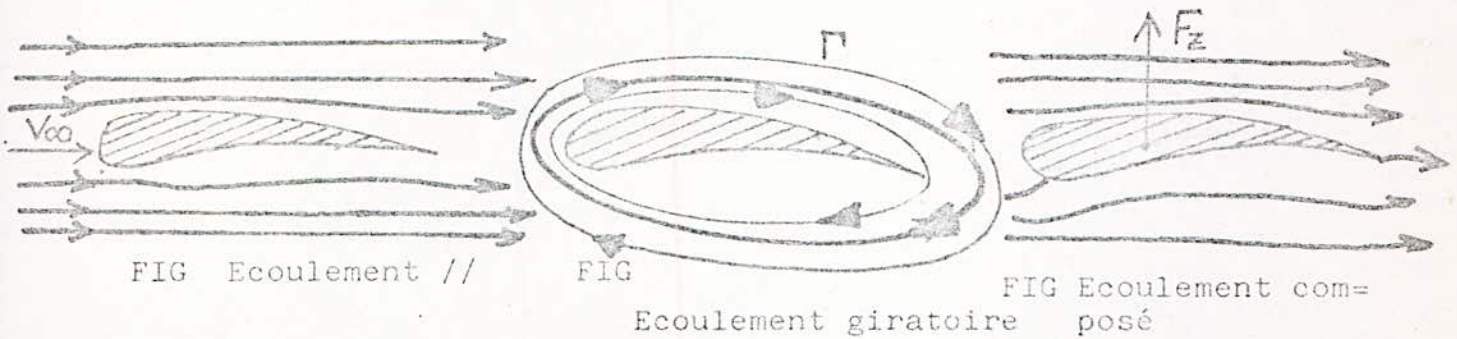
Considérons un écoulement autour de l'aile qui se décompose en :

- un écoulement parallèle
- un écoulement giratoire

Ainsi la somme de ces deux écoulements donne un surplus de vitesse.

Apartir du théorème de Kutta-Joukowski, la portance aérodynamique s'écrit :

$$F_z = \rho \cdot V_\infty \cdot \Gamma \cdot L \quad \text{où } \Gamma = 2\pi r v_t \quad \text{où } v_t = \text{vitesse tangentielle.}$$



Les propriétés aérodynamiques d'un profil d'aile portante sont représentées par :

- la courbe du coefficient de la portance aérodynamique

$$C_z = f(i)$$

- la polaire du profil appelée polaire d'Eiffel

$$C_z = f(C_x)$$

L'inclinaison de la polaire du profil par rapport à l'axe C_z est $\tan \alpha = C_x / C_z = F_x / F_z = 1/f$

Pour la détermination des épaisseurs à donner au profil en vue de sa résistance aux efforts aérodynamiques, on utilise la polaire de Lilienthal, courbe représentant la variation du coefficient C_n en fonction de C_t .

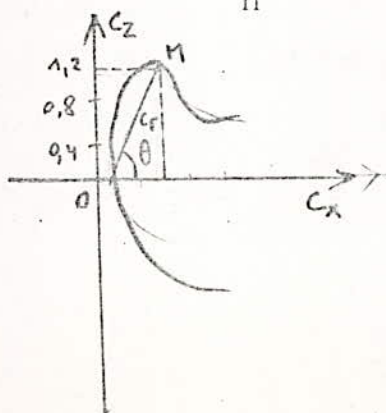


FIG Polaire d'aile

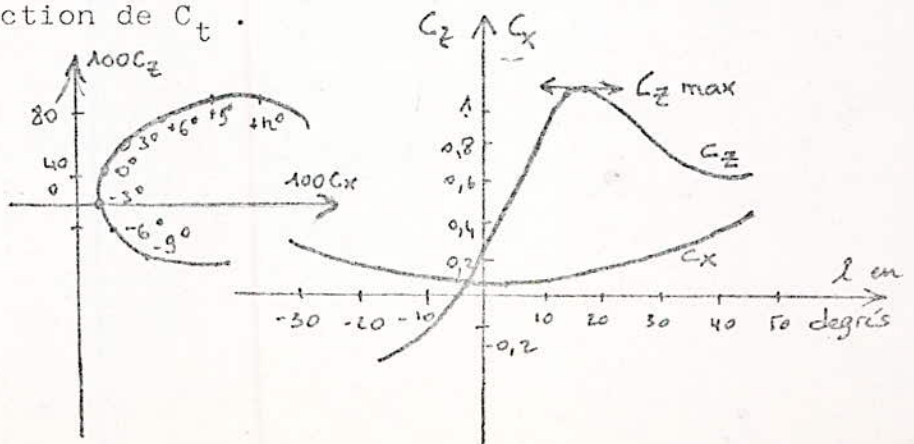
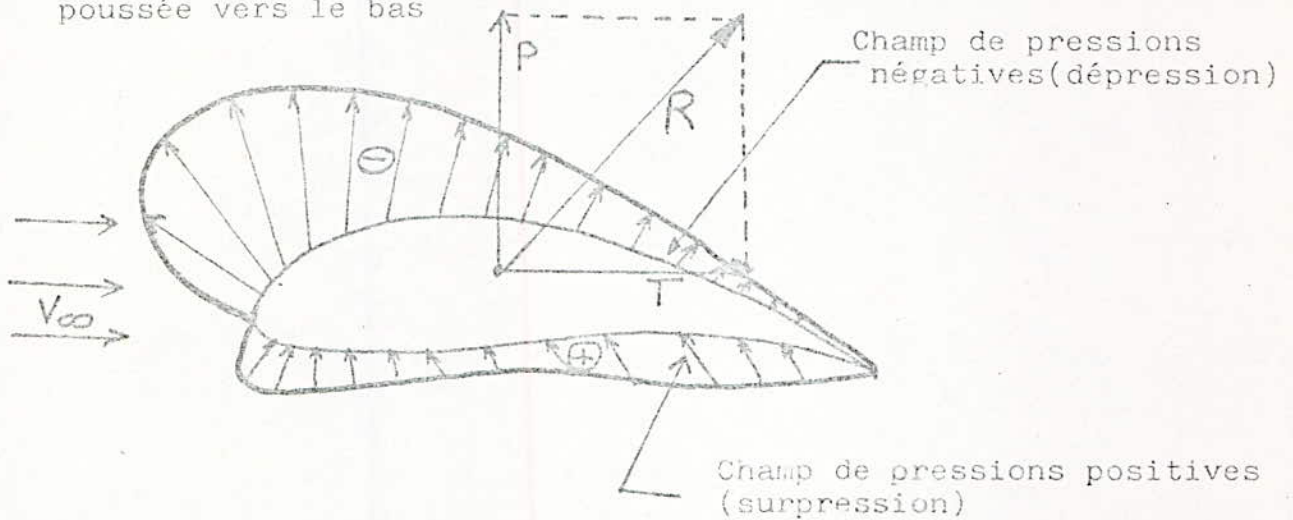


FIG $C_z = f(i)$

- La répartition de la pression autour de l'aile nous donne :
- une surpression sur l'intrados
 - une dépression sur l'extrados

On peut dire que l'aile est davantage aspirée vers le haut que poussée vers le bas



IV-11-Etude aérodynamique du rotor de Darrieus.

Le profil généralement utilisé est un profil symétrique N.A.C.A. 0012 ou 0015. Ce profil est choisi de façon à récupérer le maximum de puissance.

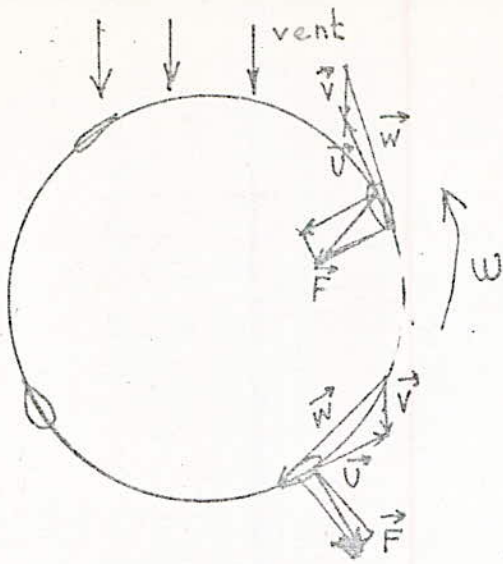
Considérons le rotor en mouvement sous l'action du vent. Suivant les diverses positions qu'occupent les pales, celles-ci sont soumises à des actions aérodynamiques. Pour connaître ces forces nous devons connaître la vitesse relative de l'air par rapport aux aubages, \vec{W} .

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad \text{où } \vec{V} = \text{vitesse du vent et } \vec{U} = \text{vitesse périphérique}$$

L'étude des triangles des vitesses pour différentes positions des montres que les forces qui agissent ont un moment moteur dans toutes les situations sauf lorsque le plan de symétrie du profil de l'élément de pale est parallèle à la direction du vent ou proche de cette position.

Les profils sont attaqués sous des angles d'incidence variable dont la valeur maxi est $i_{\max} = \arcsin \frac{V}{U}$.

Si l'éolienne est arrêtée $\vec{W} = \vec{V}$. Les incidences sur les pales sont élevées, il y a décrochement aérodynamique pour certaines positions des aubes. Un couple de démarrage par conséquent faible. D'où la nécessité de lancer les éoliennes Darrieus.



$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad \text{Rotor Darrieus cylindriques.}$$

.Etude du rotor de Darrieus.

Imaginons un système d'axes fixes Oxyz et dans cet espace un rotor Darrieus en rotation autour de son axe vertical confondu avec Oz, la vitesse absolue du vent à la traversée du rotor étant dirigée suivant Ox.

Considérons l'élément de pale de centre M, de corde l et de longueur ds.

Désignons par:

- r = la distance de cet élément à l'axe de rotation.
- θ = l'angle que fait le plan Oxyz, avec le plan vertical contenant l'axe de rotation
- δ = l'angle que fait la normale à l'élément de pale avec le plan horizontal.

.Pour un rotor parabolique de hauteur 2H centré sur le point 0.

$$(r/R) = 1 - (z/H)^2$$

$$\delta = \text{Arctg}(2zR/H^2)$$

.Pour un rotor cylindrique à pales rectilignes verticales.

$$r=R \quad \text{et} \quad \delta = 0$$

.Pour un rotor tronconique

$$r = R_0 - \frac{R_0 - R_1}{H} z \quad \text{et} \quad \delta = \text{Arctg} \frac{R_0 - R_1}{H}$$

.Pour un rotor sphérique

$$r^2 = R^2 - z^2 \quad \text{et} \quad \delta = \text{Arctg} \frac{z}{r}$$

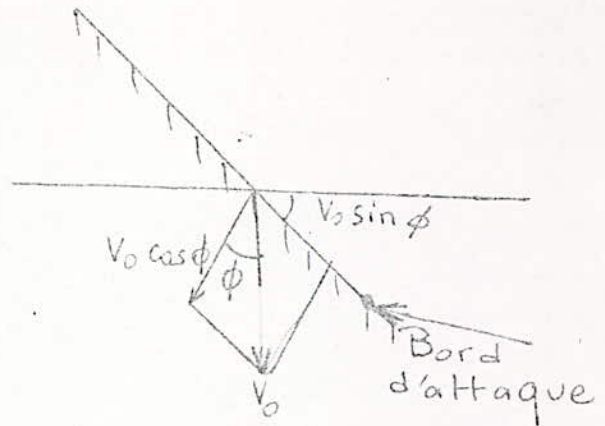
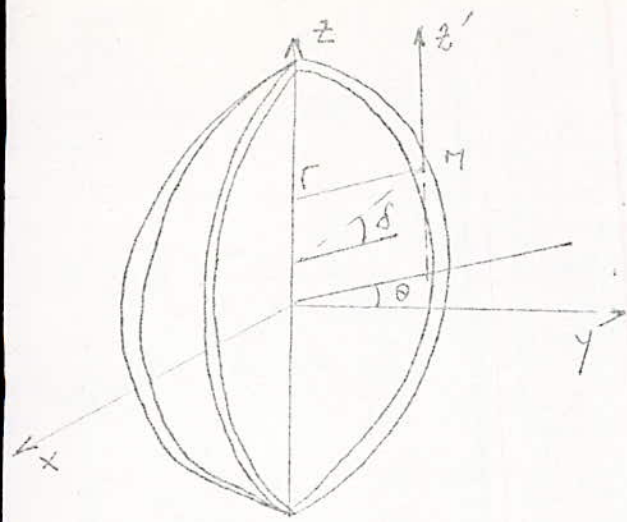


fig : Rotor Darrieus parabolique.

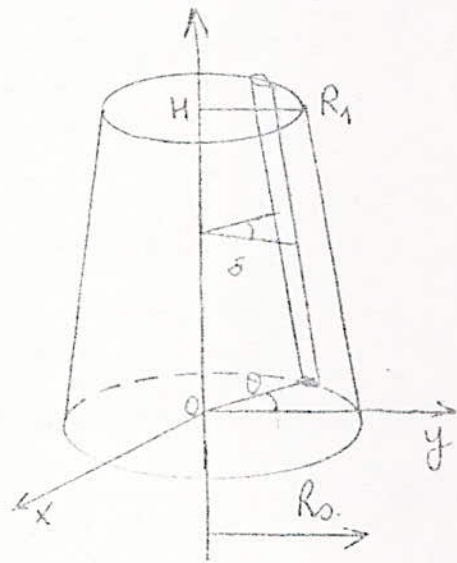
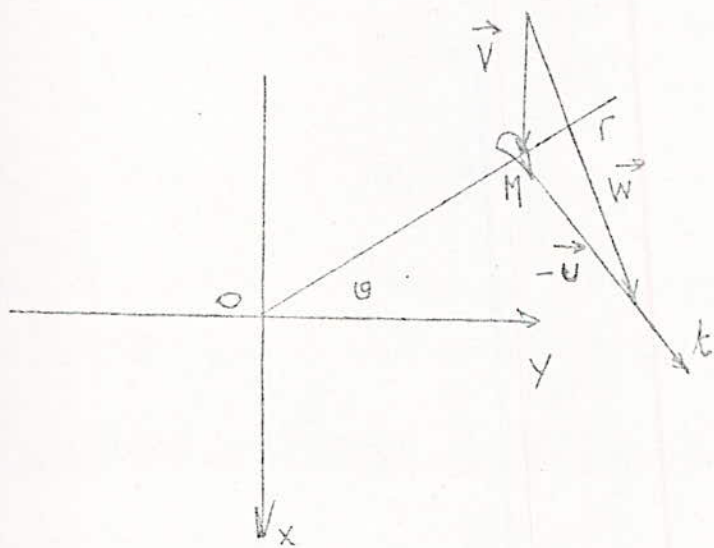


fig : Rotor tronconique

Evaluons les composantes de la vitesse relative W .

$$* W_r = V \sin \theta$$

$$* W_t = U + V \cos \theta \quad \text{où } U = \omega r$$

$$* W_z = 0$$

L'angle d'incidence est défini par la relation

$$\tan i = \frac{V \sin \theta \cos \delta}{\omega r + V \cos \theta}$$

Les composantes de la force aérodynamique sont :

• $dN = C_n q l dz / \cos \delta$

• $dT = C_t q l dz / \cos \delta$

où q est la pression dynamique

• $dz = ds \cos \delta$

La force exercée sur l'ensemble du rotor suivant la direction est donnée par :

$$F = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^{+H} \int_0^{2\pi} q \left(C_n \sin \theta - C_t \frac{\cos \theta}{\cos \delta} \right) d\theta dz$$

La détermination du moment pour l'ensemble du rotor s'obtient à partir de $dM = \frac{C_t q l}{\cos \delta} r dz$

D'où :

$$M = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^{+H} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \frac{C_t q r}{\cos \delta} d\theta dz$$

La puissance s'écrit :

$$P = M \omega = \frac{\rho l}{2\pi} \int_{-H}^{+H} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \frac{C_t q r \omega}{\cos \delta} d\theta dz$$

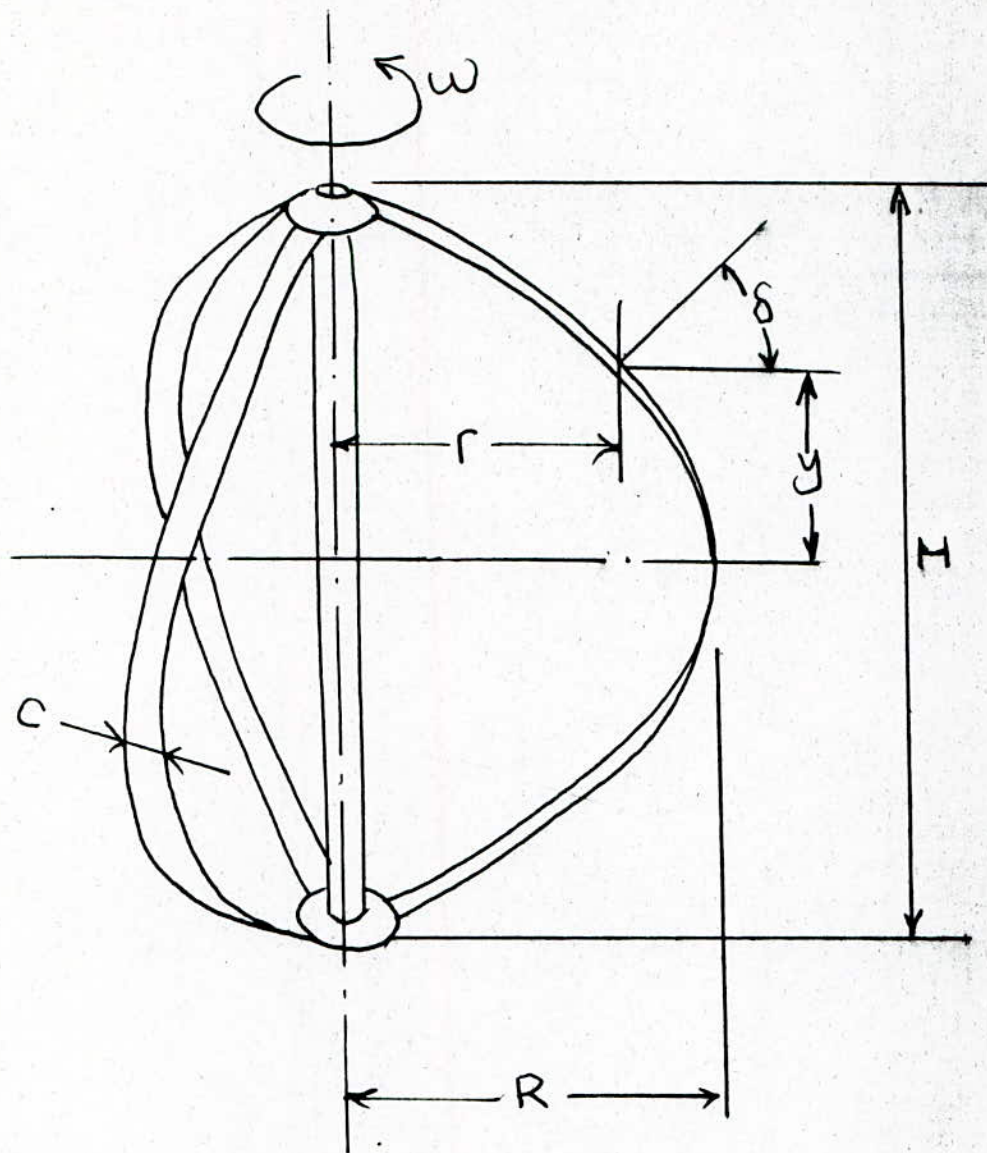
Nous définissons le coefficient de puissance par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P}{\rho S V_1^3} = \frac{\rho l}{2\pi S} \int_{-H}^{+H} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} C_t \frac{\omega^2}{V_1^3} \frac{r}{\cos \delta} d\theta dz$$

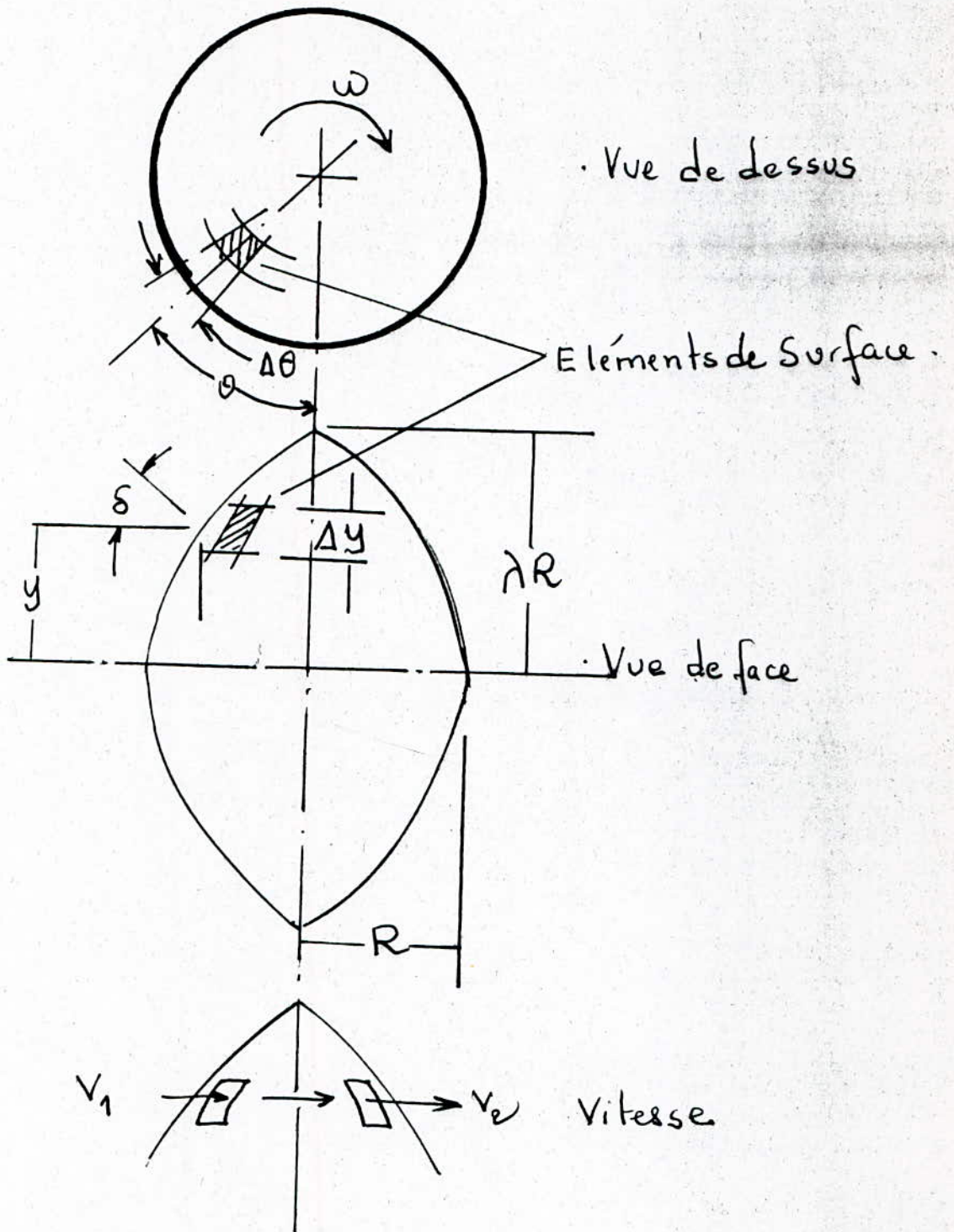
où la vitesse spécifique $\lambda_0 = \frac{\omega R}{V_1}$

Ainsi le coefficient de moment : $C_m = \frac{2M}{\rho S R V_1^2}$

Pour terminer cette étude aérodynamique, on constate que des considérations de symétrie permettent souvent de réduire le volume des calculs.



Rotor de Darrieus à 3 pales
paraboliques.



ETUDE DU SYSTEME DE POMPAGE

V-1-GENERALITES

L'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau est très répandue en Algérie.

Les problèmes qui se posent dans ce domaine sont multiples. Ils'agit de déterminer le type d'éolienne et de pompe à installer leur dimensions et leur caractéristiques et le volume du réservoir de régularisation pour que les besoins en eau potable ou en eau d'irrigation soient satisfaites dans les meilleures conditions. Le choix à effectuer et les caractéristiques des installations dépendent évidemment du régime des vents, mais aussi des disponibilités du point d'eau à équiper.

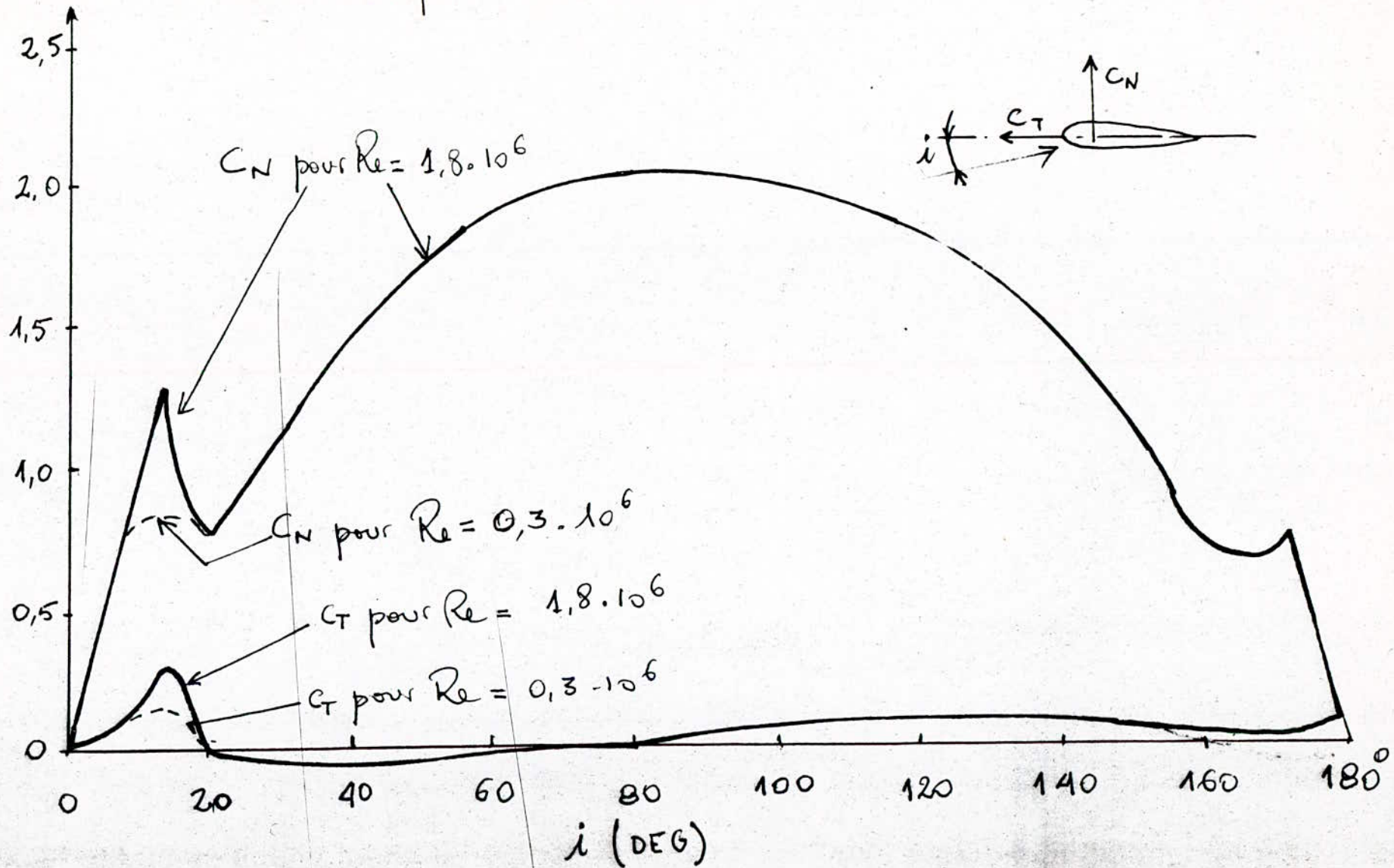
En pratique on a intérêt à procéder à un essai de pompage sur le point d'eau. On évaluera ensuite l'énergie nécessaire à l'exhaure de l'eau avant de déterminer le diamètre de l'éolienne et arrêter un choix quant au type de machine à installer.

V-2-Essai de pompage

Le pompage consiste à faire remonter une certaine quantité d'eau en un certain temps (débit) sur une certaine hauteur. D'une manière générale, l'eau aspirée à travers un filtre (ou crépine) arrive à l'entrée de la pompe par le conduit d'aspiration. La pompe fournit de l'énergie au fluide et le refoule vers l'utilisateur.

Un essai de pompage est indispensable pour un puits ou pour un forage. Les résultats obtenus seront reportés sur un graphique Fig(). En abscisse, on portera le débit Q , et en ordonnée, le rabattement y , celui-ci étant la différence entre le niveau statique de la nappe et le niveau de l'eau.

Fig: Profil NACA 0012



V-2-1-Niveau d'eau

. Le niveau d'eau s'exprime par un signe + ou - suivi d'un nombre qui désigne en mètres, la profondeur ou la hauteur par rapport à la surface du sol.

. Le niveau dynamique = le niveau maximum en période de pluie

. le niveau statique = le niveau moyen

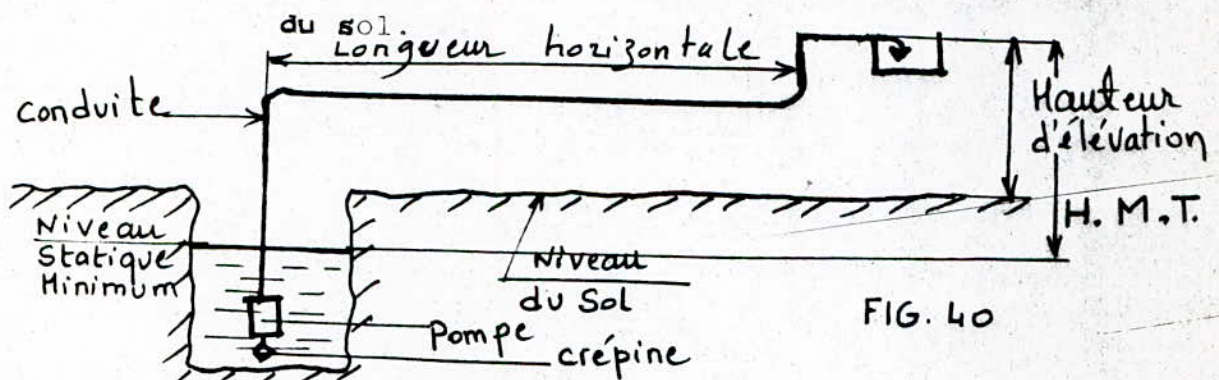
. le niveau statique minimum = le niveau minimum en période de sécheresse.

Pour cela des relevés des précipitations de pluie ont été faits pour quelques principales villes d'Algérie permettant ainsi de déterminer les endroits où notre installation de pompage peut être rentable. Voir tableaux

V-2-2-Hauteur manométrique totale (HMT)

. Toute installation de pompage se détermine par une HMT qu'il faut connaître pour déterminer les caractéristiques de l'éolienne qui conviendrait.

H.M.T. = Niveau statique minimum + Longueur horizontale divisée par 10 + Hauteur d'élévation au dessus



V-2-2-Différents types d'installation de pompage.

- . Pompage "vertical" : profondeur de pompage possible 170m
- . pompage "déporté" : hauteur maximum ,6m
- . pompage sans pompe de refoulement : l'eau peut être élevé au 4/5ième de la hauteur du pylône.
- . pompage avec pompe de refoulement : l'eau peut être élevée à une hauteur supérieure à celle du pylône.

V-2-4-Evaluation de l'énergie nécessaire au pompage.

L'énergie utile pour élever une masse d'eau (M) d'une hauteur (H) s'exprime:

$$E_u = M.H.g \text{ où } H = \text{hauteur manométrique totale (m)}$$
$$E_u = \text{énergie utile en Joules}$$
$$M = \text{masse d'eau en Kg}$$
$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

La puissance P_u développée par la pompe pour extraire le débit Q est :

$$P_u = \omega Q Y \text{ avec } Y = h + y + RQ^2$$

La connaissance de Q et de y à tout instant permet de calculer la valeur de Y et de P_u .

V-3-POMPAGE DE L'EAU PAR EOLIENNES RAPIDES

Le faible couple de démarrage des éoliennes rapides les rend inapte à l'entraînement des pompes à piston. On préfère les associer à une pompe centrifuge, (ou à hélice), vu que le couple au démarrage de celle-ci est très faible et que leur vitesse de rotation est par contre très élevée

V-3-1-Pertes de charge dans la pompe

Dans chaque machine il existe un point de fonctionnement optimal correspondant à un débit Q déterminé où les pertes sont minimales et le rendement maximum.

Les pertes sont :

- hydrauliques = pertes par frottement + pertes par choc

$$h = \xi_f + \xi_c$$

-volumétriques

-mécaniques

V-3-2 -Rendement global de la pompe

Il varie de 0,7 à 0,85.

$$\eta_g = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

V-3-3-Courbes caractéristiques de la pompe et du point d'eau.

Le pompage d'essai permet de déterminer la variation du rabattement y en fonction du débit. La hauteur géométrique de refoulement h étant connue, il est possible de calculer, pour divers débits, lorsque le diamètre de la conduite de refoulement a été choisi, la quantité :

$$Y = h + y + RQ^2$$

Représentons sur un graphique, la courbe de la variation de la quantité Y en fonction du débit Q . Plaçons sur la même figure la caractéristique manométrique de la pompe $H(Q)$ correspondant à une vitesse de rotation donnée.

Si vitesse de la pompe = vitesse indiquée, alors le point d'intersection fourni le débit pompé et la hauteur manométrique totale sous laquelle fonctionne l'installation.

V-3+4-Puissance hydraulique

La puissance hydraulique fournie par la pompe pour l'élévation de l'eau s'écrit.

$$P_H = \rho Q_i \cdot H_i$$

et à partir de ces valeurs on détermine les puissances absorbées par la pompe

$$P_i = \frac{\rho \cdot Q_i \cdot H_i}{\eta_i}$$

η_i étant le rendement de la pompe relatif à chacun des points M_i

En appliquant les formules des turbomachines hydrauliques

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1} \quad \text{et} \quad \frac{H}{H_1} = \left(\frac{N}{N_1}\right)^2$$

La connaissance de la caractéristique de pompe $H(Q)$ pour une vitesse donnée suffit par conséquent pour tracer les caractéristiques manométriques relatives à des rotations différentes.

On représente ces caract. pour des vitesses de rotation de pompe N'_0, N'_1, N'_3, \dots

La caractéristique résistante $Y(Q)$ de l'installation, que l'on porte sur la même figure, coupe les caractéristiques $H(Q)$ en différents points $M_1, M_2, M_3, M_4, \dots$

Les coordonnées de ces points indiquent les débits qui seraient pompés avec les hauteurs manométriques correspondantes pour les diverses vitesses de rotation $N'_0, N'_1, N'_2, N'_3, \dots$ où N'_0 est la vitesse de rotation pour laquelle la pompe commence à débiter. Autrement dit la vitesse d'amorçage où le point M_0 correspond à un débit nul.

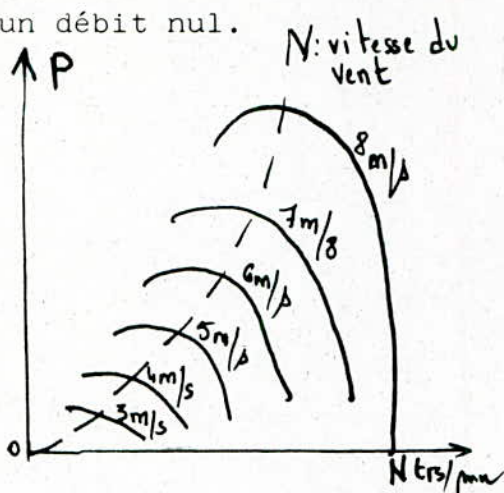


FIG 41 Variation de la puissance développée en fonction de N (tr/mn)

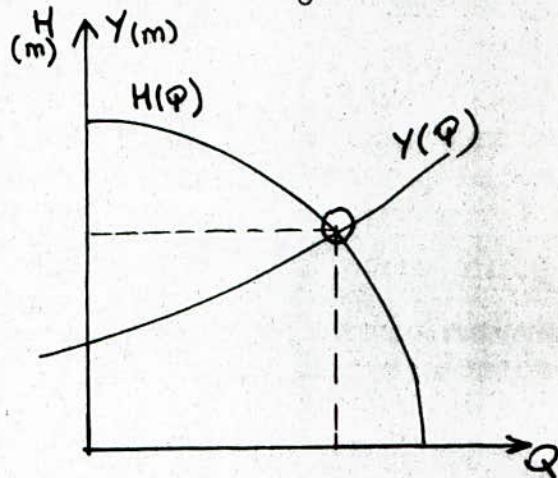


FIG 42 variation de la quantité Y de la hauteur manométrique H(Q)

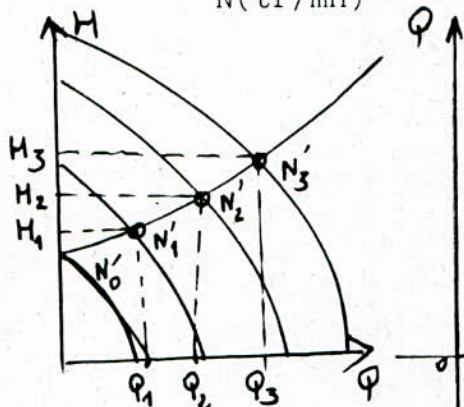


FIG 43 Caractéristique H(Q)

Fig 44 Courbe de variation de débit

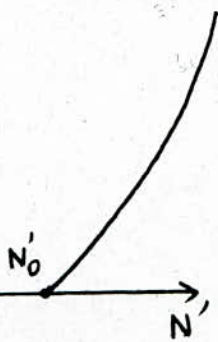
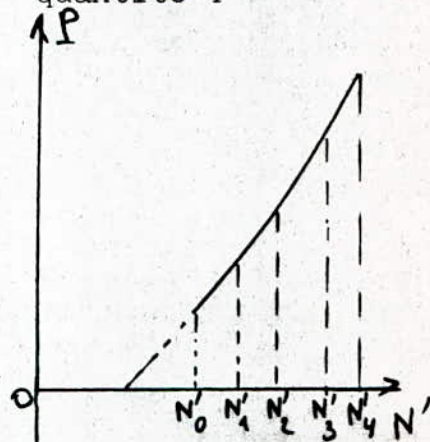


FIG 45 Variation de la puissance absorbée par la pompe



V-3-5-Détermination du rapport de multiplication et des conditions de fonctionnement.

L'axe de la pompe est relié à celui de l'éolienne par un train d'engrenages. Il en résulte que la vitesse de rotation de la pompe est proportionnelle à celle de l'éolienne.

Notre but est de déterminer le rapport de multiplication à adopter pour assurer une association éolienne-pompe rentable.

Reproduisons sur le même graphique les caractéristiques Fig: puissances-vitesse de l'éolienne et la caractéristique puissance-vitesse de la pompe, telle qu'elle a été définie à la fig.

Si l'on accouplait directement la pompe à l'éolienne, aucune quantité d'eau ne serait extraite, la pompe ne commençant à débiter que pour une vitesse N'_0 .

Il est donc nécessaire de placer entre la pompe et l'éolienne un multiplicateur de vitesse.

Supposons le rapport de multiplication k connu.

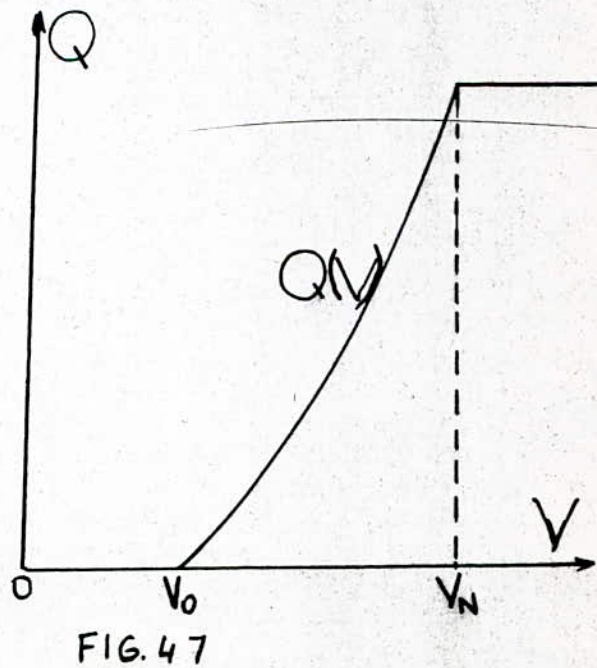
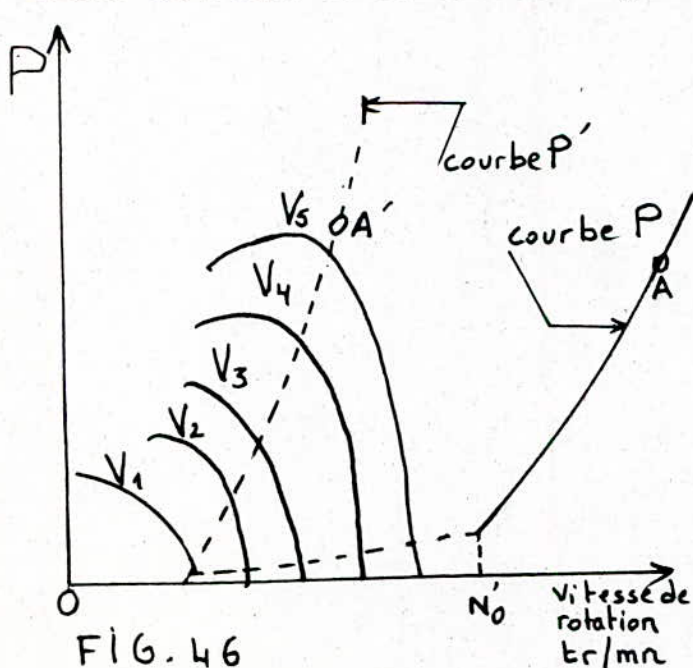
Pour déterminer les points de fonctionnement correspondants aux diverses valeurs de la vitesse du vent V_1, V_2, V_3, \dots il suffit de multiplier par k les abscisses des courbes caractéristiques de l'éolienne et de multiplier leur ordonnée par le rendement énergétique du train d'engrenage pour obtenir par intersection avec la caractéristique $P(N')$ de la pompe, la puissance absorbée par la pompe et la vitesse de celle-ci.

En réalité il est plus simple de réduire les abscisses de la caractéristique puissance-vitesse de la pompe en les multipliant par $1/k$ et de multiplier ses ordonnées par le rapport $1/\eta_e$.

Les coordonnées des points d'intersection de la nouvelle caractéristique P' ainsi déterminée avec les caractéristiques puissance-vitesse de l'éolienne indiquent la puissance fournie par l'éolienne et sa vitesse pour les différentes vitesses de vent V_1, V_2, V_3, \dots .

Il est important que les points d'intersection obtenus soient situés dans les zones où le rendement de l'éolienne est le plus élevé, c'est à dire au voisinage de la parabole cubique lieu des sommets des courbes caractéristiques de l'éolienne.

Pour la détermination du rapport k , il suffit donc de se fixer un point de la courbe P' placé sur la parabole cubique.



Les coordonnées des points d'intersection de la courbe P' avec les caractéristiques puissance-vitesse de l'éolienne pour les diverses vitesses de vent, nous donnent:

- la puissance fournie par l'éolienne
- la vitesse de rotation de l'éolienne
- la vitesse de rotation de la pompe.

A chaque valeur de la vitesse du vent correspond une valeur précise du débit et une seule.

L'intersection de la courbe Q(V) avec l'axe des abscisses OV indique la vitesse du vent pour laquelle la pompe commence à débiter (vitesse d'amorçage).

V-3-6-Détermination de la quantité d'eau pompée

La connaissance des vitesses de vent à travers tout le territoire algérien permet de déterminer la quantité d'eau pompée journalièrement, mensuellement, et annuellement, grâce aux courbes mensuelles et annuelles de vents classés.

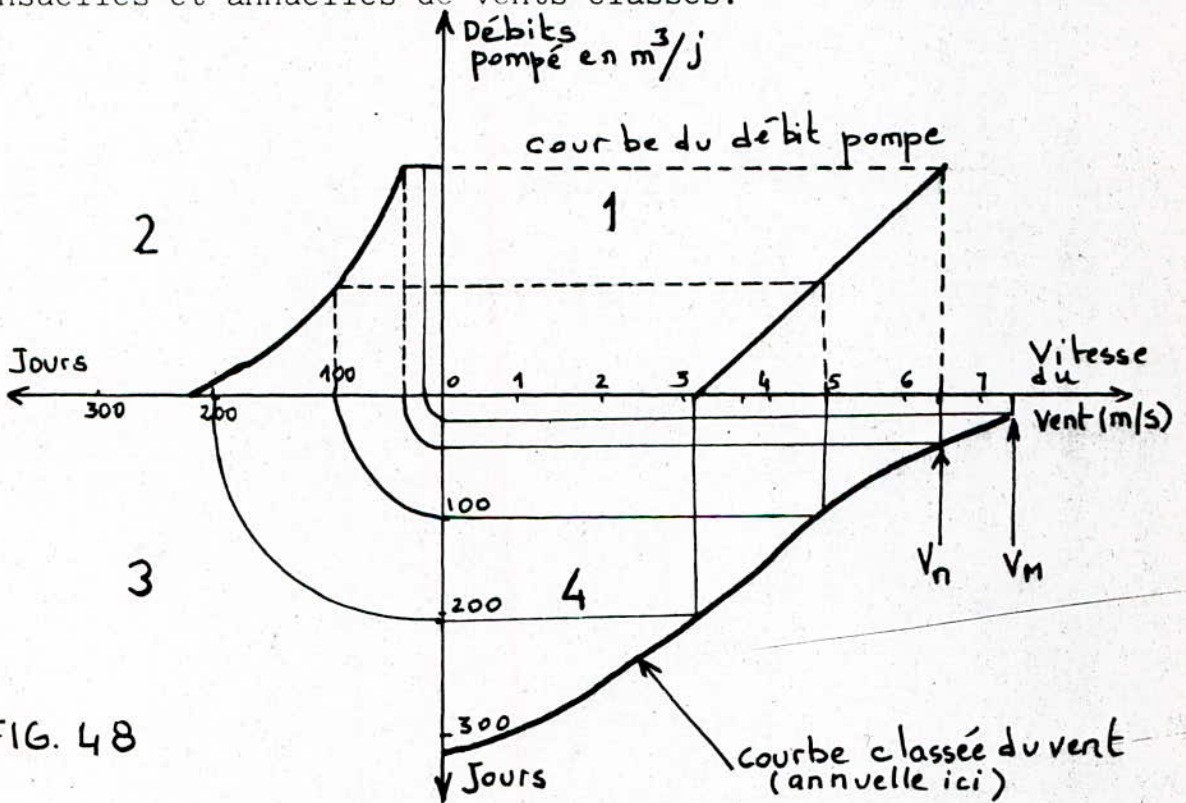


FIG. 48

.quadrant n°1: la courbe de variation du débit pompé en fonction de la vitesse du vent.

.quadrant n°4: la courbe des vitesses de vent classées pendant la période à étudier (mois ou année) avec les vitesses de vent nominal V_N et maximal V_M .

On peut alors construire dans le quadrant n°2, point par point, la courbe débit en m^3/j en fonction du nombre de jours

V-3-7-Détermination du volume des réservoirs

On peut opérer selon deux méthodes:

-soit en considérant la durée pendant laquelle le vent n'est pas productif

-soit en traçant les courbes de débit cumulé de l'eau demandée et de l'eau extraite.

V-3-7-1-Périodes de vent improductif

Au dessus d'une certaine vitesse, le vent est insuffisant pour extraire l'eau du puits ou du forage.

A partir de la courbe d'improductivité du vent, on peut calculer le volume du réservoir.

a)-On désire que le réservoir permette d'alimenter le village sans interruption. La courbe (fig;) montre que son volume doit correspondre à la consommation d'eau de 8 jours.

Le volume sera donné par l'expression:

$$V = 8nq \quad \text{où } n = \text{nombre d'habitants}$$

$q =$ consommation journalière moyenne de chaque individu en m^3 .

b)-Si ce volume paraît trop important, on pourra calculer le réservoir pour un nombre de jours inférieur à 4 jours. Mais on saura d'après la courbe (fig), qu'on manquera d'eau:

1 fois par an pendant 4 jours

2 fois par an pendant 2 jours

3 fois par an pendant 1 jour.

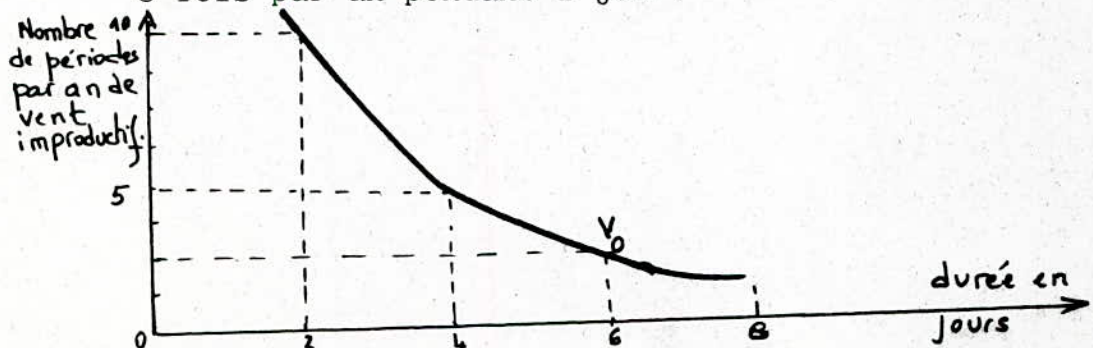


FIG. 49.

On peut alors construire dans le quadrant n°2, point par point, la courbe débit en m^3/j en fonction du nombre de jours

V-3-7-Détermination du volume des réservoirs

On peut opérer selon deux méthodes:

- soit en considérant la durée pendant laquelle le vent n'est pas productif
- soit en traçant les courbes de débit cumulé de l'eau demandée et de l'eau extraite.

V-3-7-1-Périodes de vent improductif

Au dessus d'une certaine vitesse, le vent est insuffisant pour extraire l'eau du puits ou du forage.

A partir de la courbe d'improductivité du vent, on peut calculer le volume du réservoir.

a)-On désire que le réservoir permette d'alimenter le village sans interruption. La courbe (fig.) montre que son volume doit correspondre à la consommation d'eau de 8 jours.

Le volume sera donné par l'expression:

$$V = 8nq \quad \text{où } n = \text{nombre d'habitants}$$

$q = \text{consommation journalière moyenne de chaque individu en } m^3.$

b)-Si ce volume paraît trop important, on pourra calculer le réservoir pour un nombre de jours inférieur à 4 jours. Mais on saura d'après la courbe (fig.), qu'on manquera d'eau:

- 1 fois par an pendant 4 jours
- 2 fois par an pendant 2 jours
- 3 fois par an pendant 1 jour.

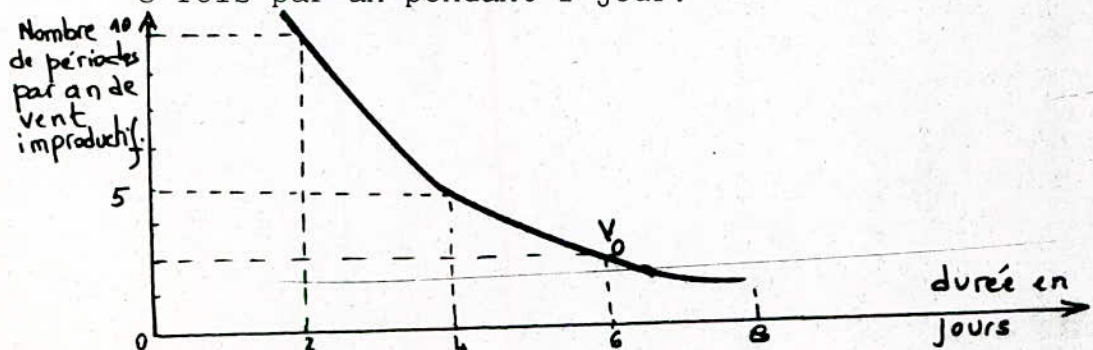


FIG. 49.

V-3-7-2-Utilisation des courbes de débit cumulé de l'eau extraite et de l'eau demandée.

On appelle courbe de débit cumulé, la courbe de variation en fonction du temps, de la quantité:

$$V = \int_{t_0}^t Q dt$$

$V=V_d$ et $Q=Q_d$ s'il s'agit de l'eau demandée

$V=V_e$ et $Q=Q_e$ s'il s'agit de l'eau extraite.

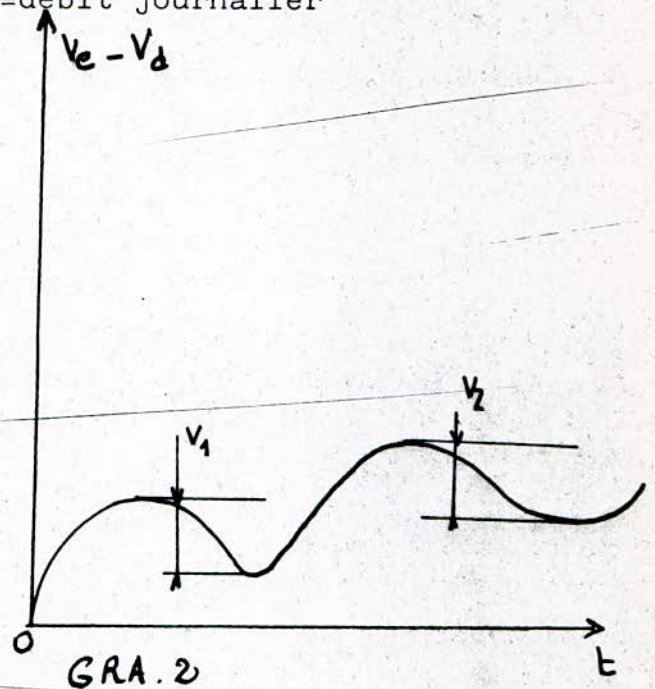
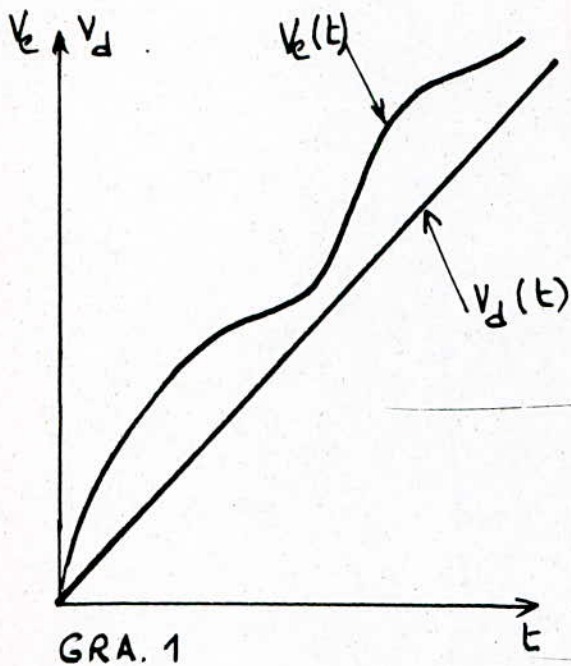
La courbe $V_e(t)$ représente la somme des volumes d'eau journaliers Elle est construite à partir des relevés anémométriques

La courbe $V_d(t)$ représente la somme des quantités d'eau demandées

La quantité $V_d(t)$ dépend de la population et de la destination de l'eau.

$$V_d(t) = nq(t-t_0) \quad \text{où } n = \text{nombre d'habitants}$$

$q = \text{débit journalier}$



Pour la sécurité de l'installation, prévoir que le volume d'eau au-dessus de la crépine reste toujours suffisant pour alimenter la pompe lorsque la vitesse du vent est supérieure ou égale à la vitesse nominale.

V-3-8-Valeur pratique approximative du débit susceptible d'être extrait.

La puissance maximale développée par l'éolienne rapide s'écrit : $P_R = 0,20 D^2 V^3$

Le rendement de la pompe centrifuge et de son accouplement est de 50%.

Le débit Q_R se déduit de :

$$Q_R H = 0,50 P_R \quad \text{d'où :}$$

$$Q_R = \frac{D^2 V^3}{10^5 H} \quad \text{en m}^3/\text{s}$$

$$Q_R = \frac{1}{100} \cdot \frac{D^2 V^3}{H} \quad \text{en l/s et } D \text{ en m}$$

H en m

V en m/s

Cette relation suppose que les machines fonctionnent dans des conditions pratiquement optimales et que la vitesse du vent est supérieure à leur seuil de démarrage.

V-3-8-Choix d'une pompe

Suivant les valeurs du nombre de tours spécifique la pompe centrifuge est classée comme suit :

-Hautes pressions : $N_S = 10$ à 30 tr/mn

-Moyennes pressions : $N_S = 30$ à 50 tr/mn

-Basses pressions : $N_S = 50$ à 80 tr/mn

N_S = nombre de tours spécifique = nombre de tours / mn
d'une machine homothétique à celle considérée et
donnant $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à 1 m de hauteur.

N_S correspond aux conditions optimales de fonctionnement.

Si $N_S > 80$ tr/mn il faut prévoir plusieurs pompes placées en parallèles

Si $N_S < 10$ tr/mn il faut prévoir une pompe multicellulaire.

CHAPITRE VI

DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION

VI-1-PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

VI-1-1-ROTOR

- Hauteur : $H = 10 \text{ m}$
- Diamètre à l'équateur : $2R = 10\text{m}$
- Surface balayée : $S = 67 \text{ m}^2$
- Pales : Aluminium extrudé
PROFIL symétrique NACA 0012
Corde 300
masse unitaire 100Kg
- Arbre tournant : Tube acier Ø 508mm, en deux éléments
- Masse totale du rotor : 1900Kg
- Hauteur du centre du rotor /15m

VI-1-2-SOCLE

- Pylône tripode, tubulaire en acier, hauteur 9m

VI-1-3- Haubannage

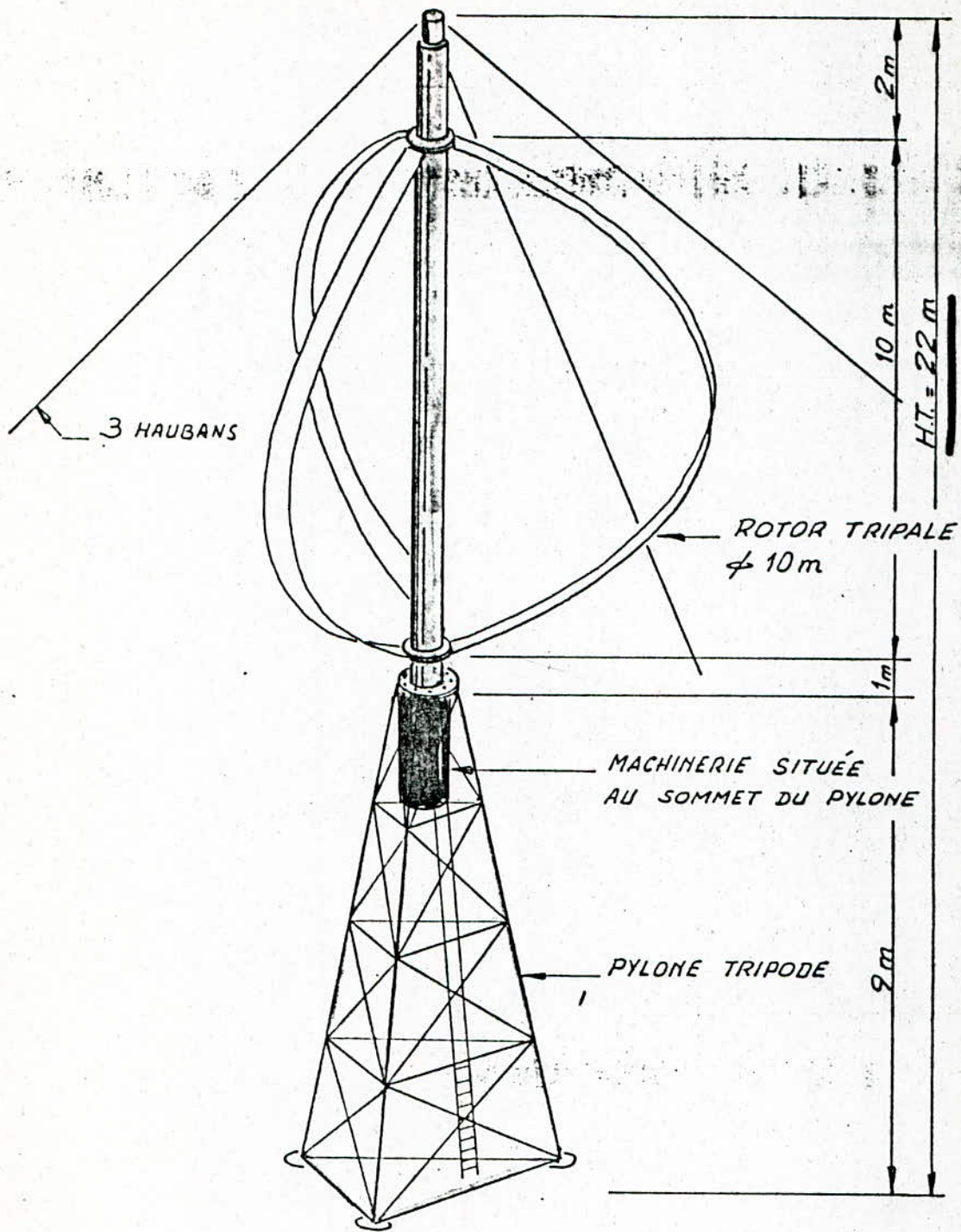
- 3câbles acier galvanisé , Ø 20 mm, longueur 33m

VI-1-4- MACHINERIE

- Frein automatique de sécurité sur l'arbre
- Multiplicateur à engrenages
- Vitesse d'accrochage 25 tr/mn par vent de 4m/s
- Vitesse maximale dans le cas d'un fonctionnement à vitesse variable : 110tr/mn
- Solidité: $\sigma = 0,3$ pour les trois pales

VI-2-APPLICATIONS

Elle est utilisée pour le pompage de l'eau (voir courbes de débit)



Installation d'un rotor de
Darrieus - Surface balayée 67 m²

CHAPITRE VII

CONCLUSION

La connaissance des régimes des vents et la profondeur des puits de pompage **est** primordiale avant une quelconque installation dans le site désiré.

L'installation de notre éolienne à axe vertical ne pourra se faire que dans des sites bien ventés, vu qu'elle ne commence à démarrer qu'à partir d'une vitesse du vent de 5 m/s. Mais que faire pour que notre éolienne de type Darrieus puisse être utilisée d'une manière rentable dans des sites où la vitesse moyenne du vent est inférieure à 3 m/s ?

Pour cela, il faut l'associer à une éolienne de type Savonius qui, elle, démarre sous des vitesses de vent de l'ordre de 3m/s. Ainsi l'énergie éolienne peut donc être utilisée à grande échelle pour le pompage de l'eau dans les zones rurales

Le choix du monde rural est dicté par de multiples raisons:

-économiques. L'hexaure de l'eau se fait soit à l'aide de motopompes ou de pompes électriques alimentées par des groupes électrogènes, soit par traction animale ou humaine. La totalité de ces moto-pompes, des groupes électrogènes est importée. Leur maintenance, entretien, et réparation exigent des pièces de rechange et des techniciens compétents et disponibles. Ce qui est difficile à obtenir, surtout dans les zones reculées et isolées.

-techniques. Son utilisation ne nécessite pas d'une technologie poussée.

-sociales enfin. Il s'agit d'apporter aux populations rurales un minimum de bien être et de confort, qui réduira petit à petit l'exode rurales vers les centres urbains.

Dans de nombreux cas, l'utilisateur potentiel est intéressé par l'aspect économique (coût, amortissement...). L'évaluation des performances des éoliennes constitue le premier pas pour la réalisation d'une étude économique sur ce sujet.

Nous pouvons conclure, que pour certaines utilisations telles que le pompage de l'eau, la conversion de l'énergie éolienne risque d'être une source d'énergie d'avenir.



5/86

Lex

Géomé - Mécanique.

ANNEXE



Etudié par:

HAYANE. K

1986

Figure 3.2

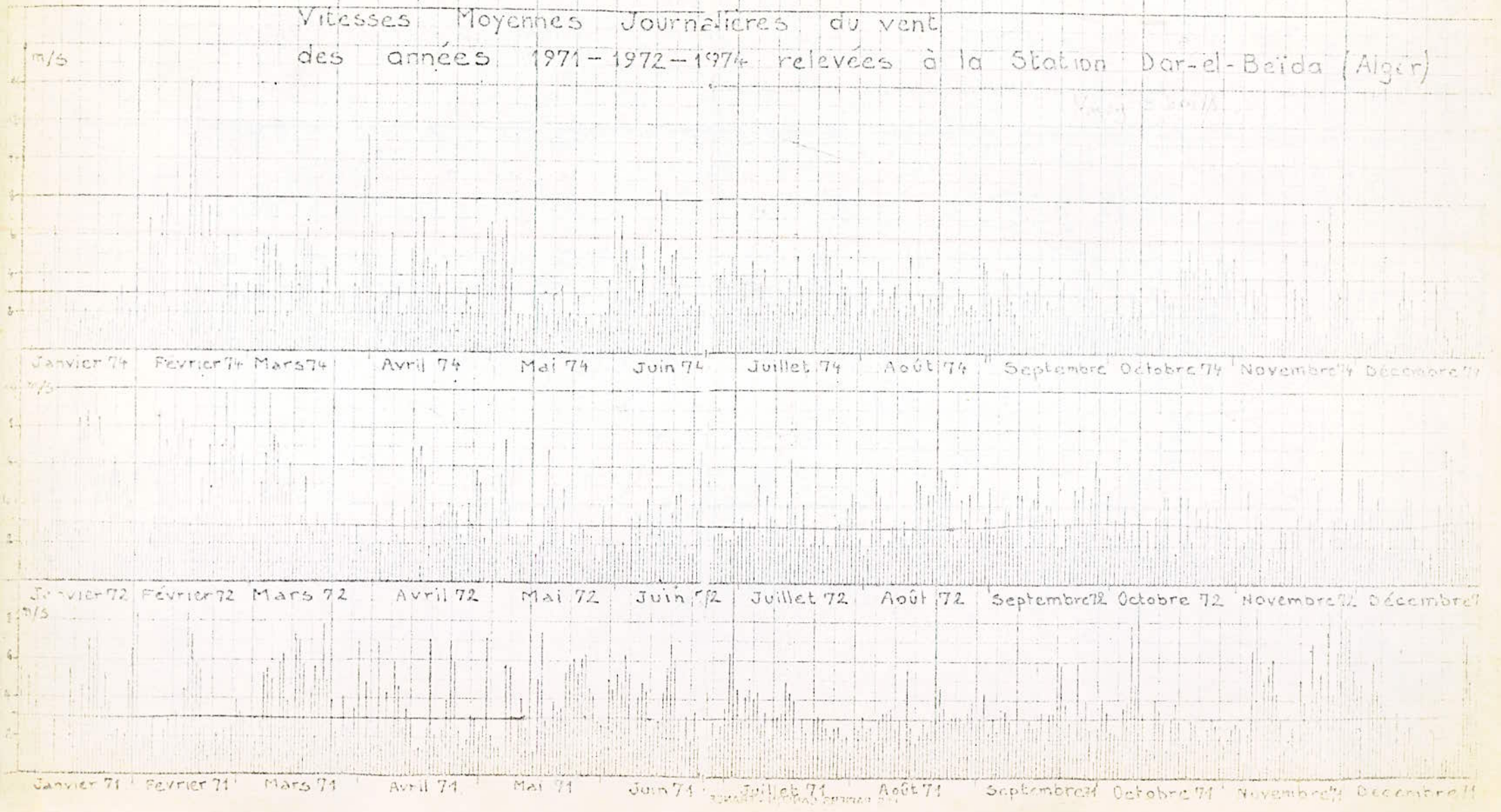
Vitesses Moyennes Journalières du vent
des années 1971-1972-1974 relevées à la Station Dar-el-Baïda (Alger)

m/s

Janvier 74 Février 74 Mars 74 Avril 74 Mai 74 Juin 74 Juillet 74 Août 74 Septembre 74 Octobre 74 Novembre 74 Décembre 74

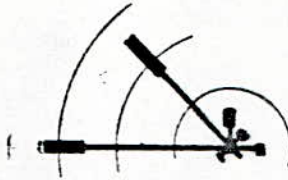
Janvier 72 Février 72 Mars 72 Avril 72 Mai 72 Juin 72 Juillet 72 Août 72 Septembre 72 Octobre 72 Novembre 72 Décembre 72

Janvier 71 Février 71 Mars 71 Avril 71 Mai 71 Juin 71 Juillet 71 Août 71 Septembre 71 Octobre 71 Novembre 71 Décembre 71



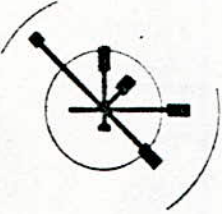
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS
STATION DAR EL BEIDA

Janvier



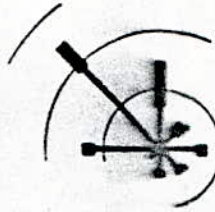
Calme: 26%

Avril



Calme: 25%

Fevrier



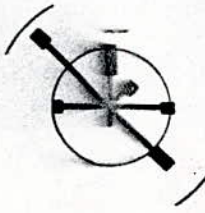
Calme: 22%

Mai



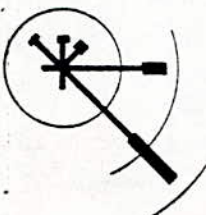
Calme: 27%

Mars



Calme: 25%

Juin

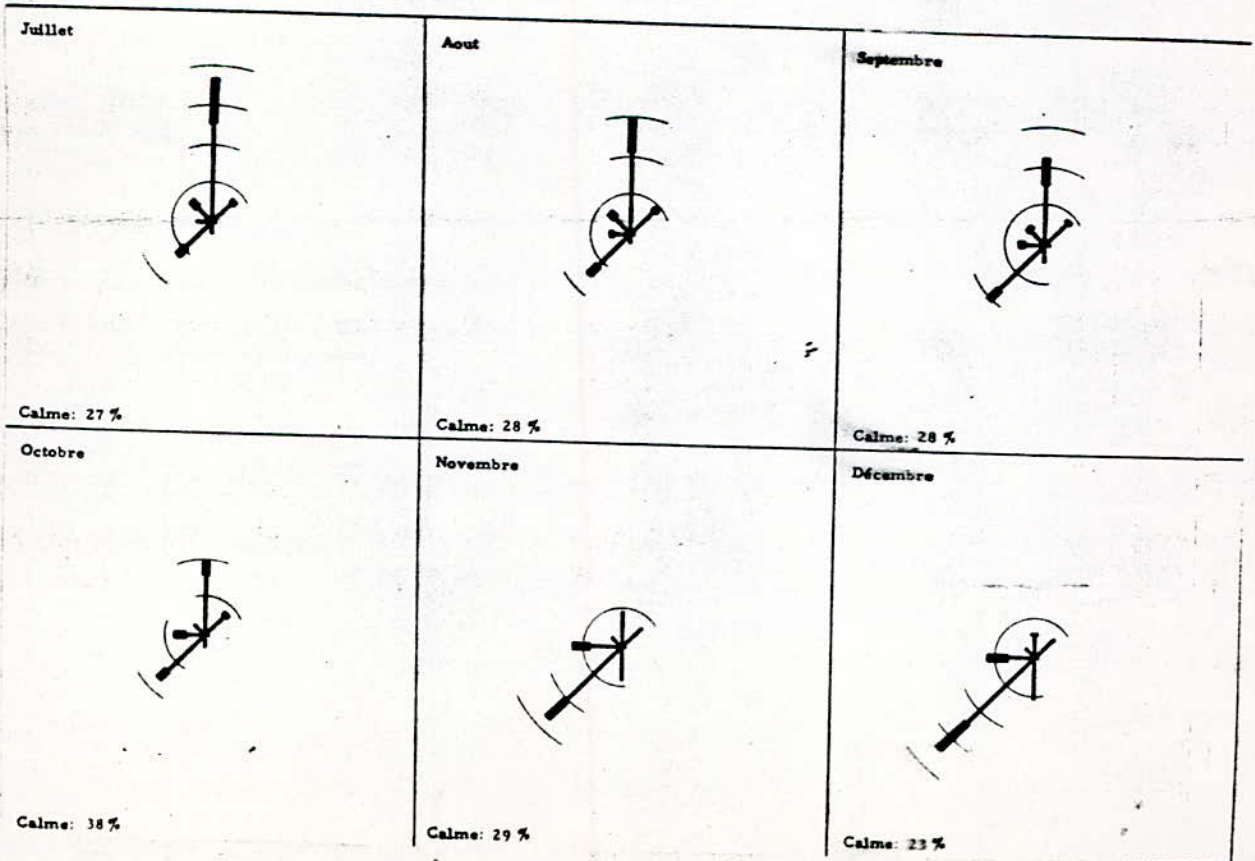
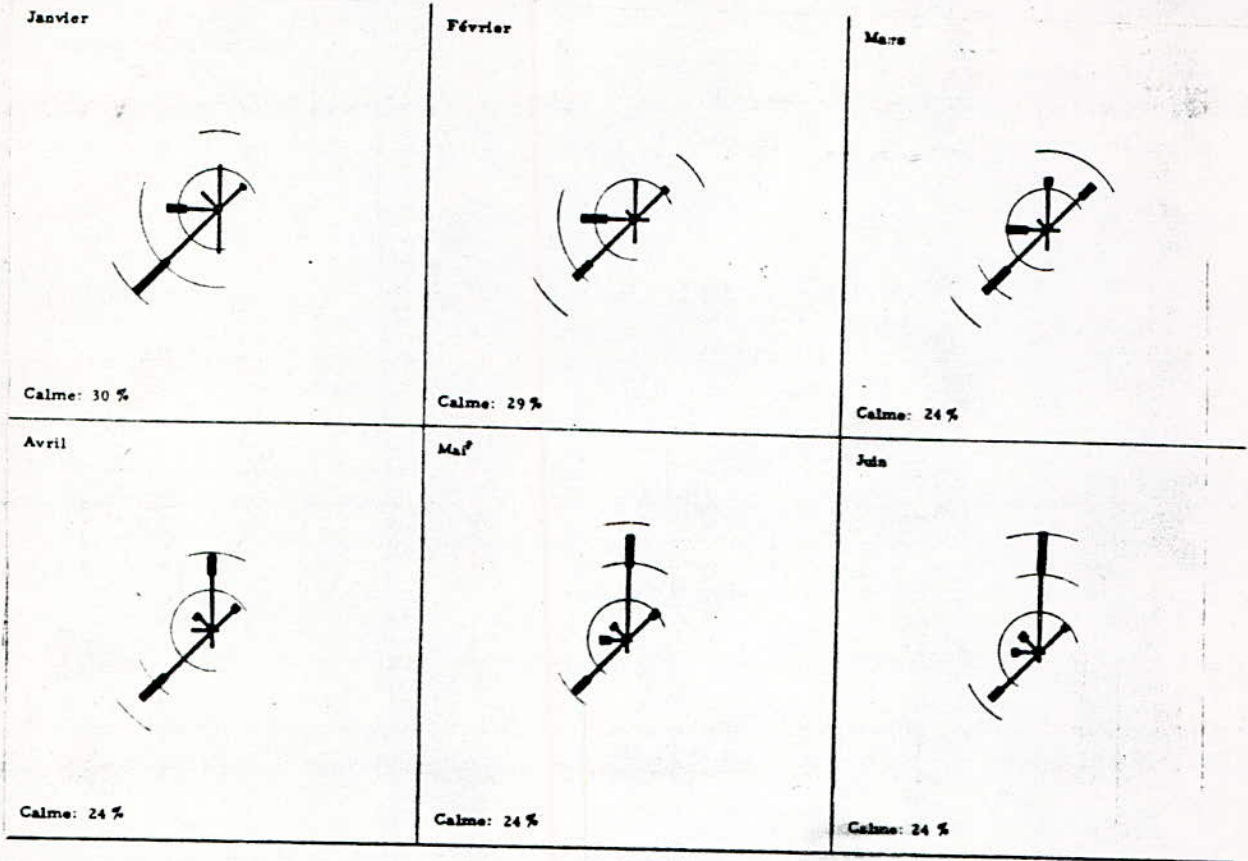


Calme: 28%

Repartition frequentielle des vents

REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

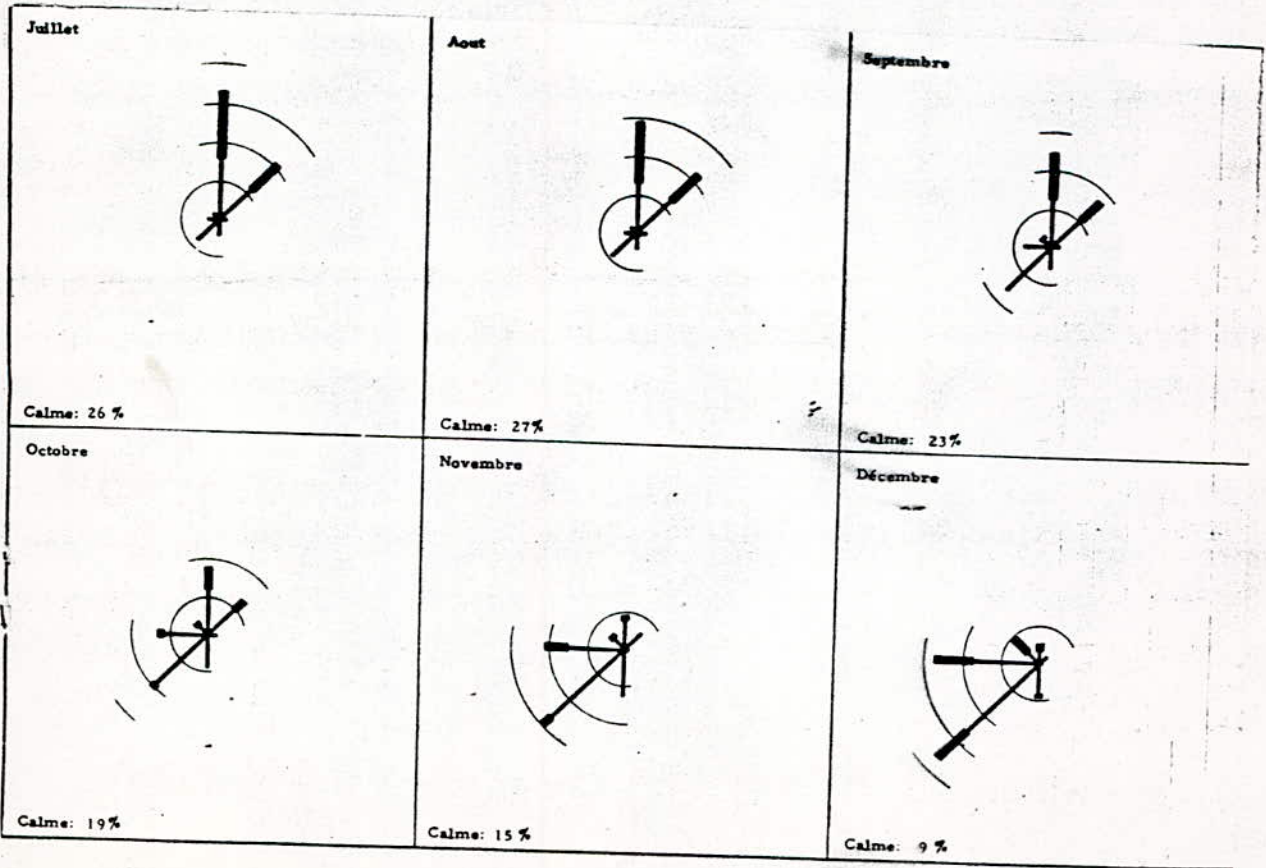
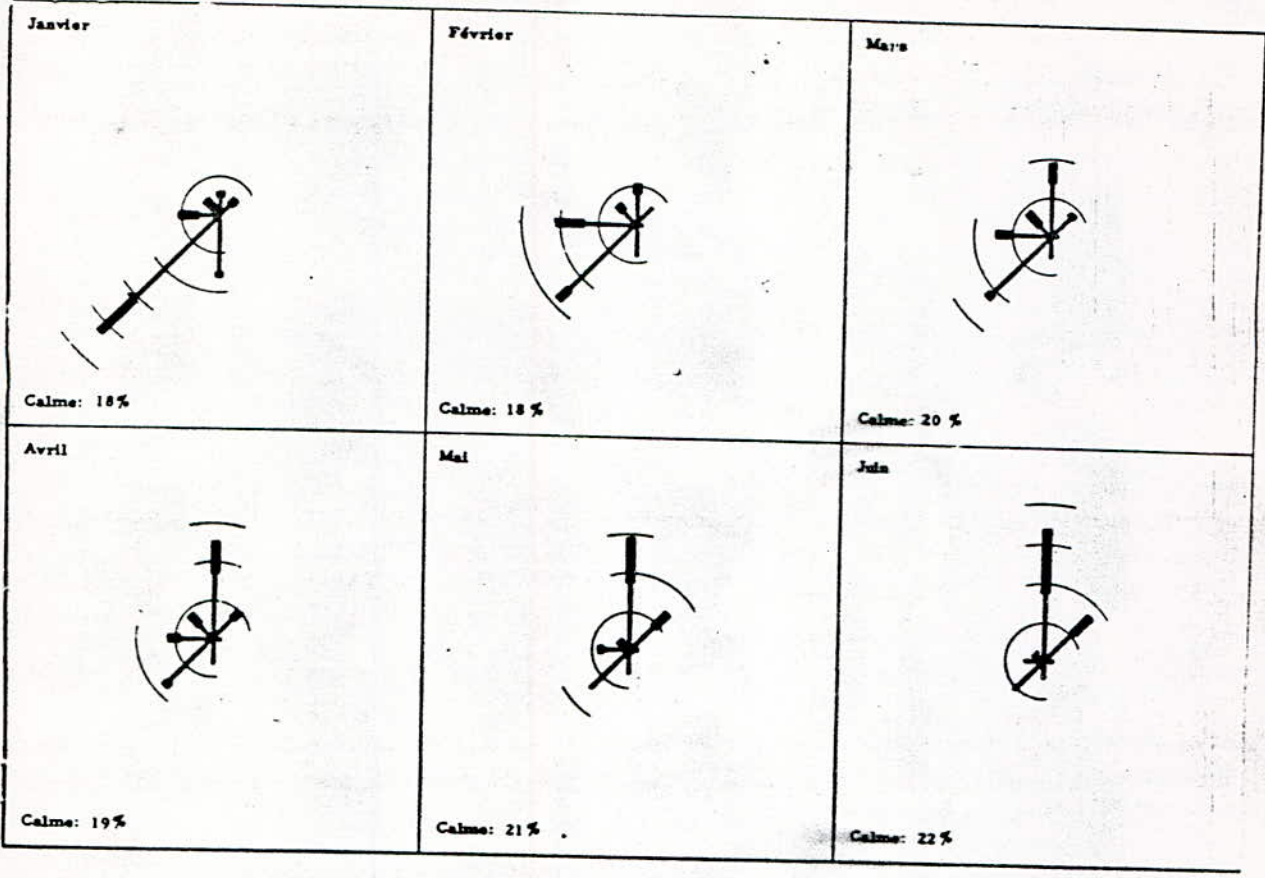
STATION : ORAN



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

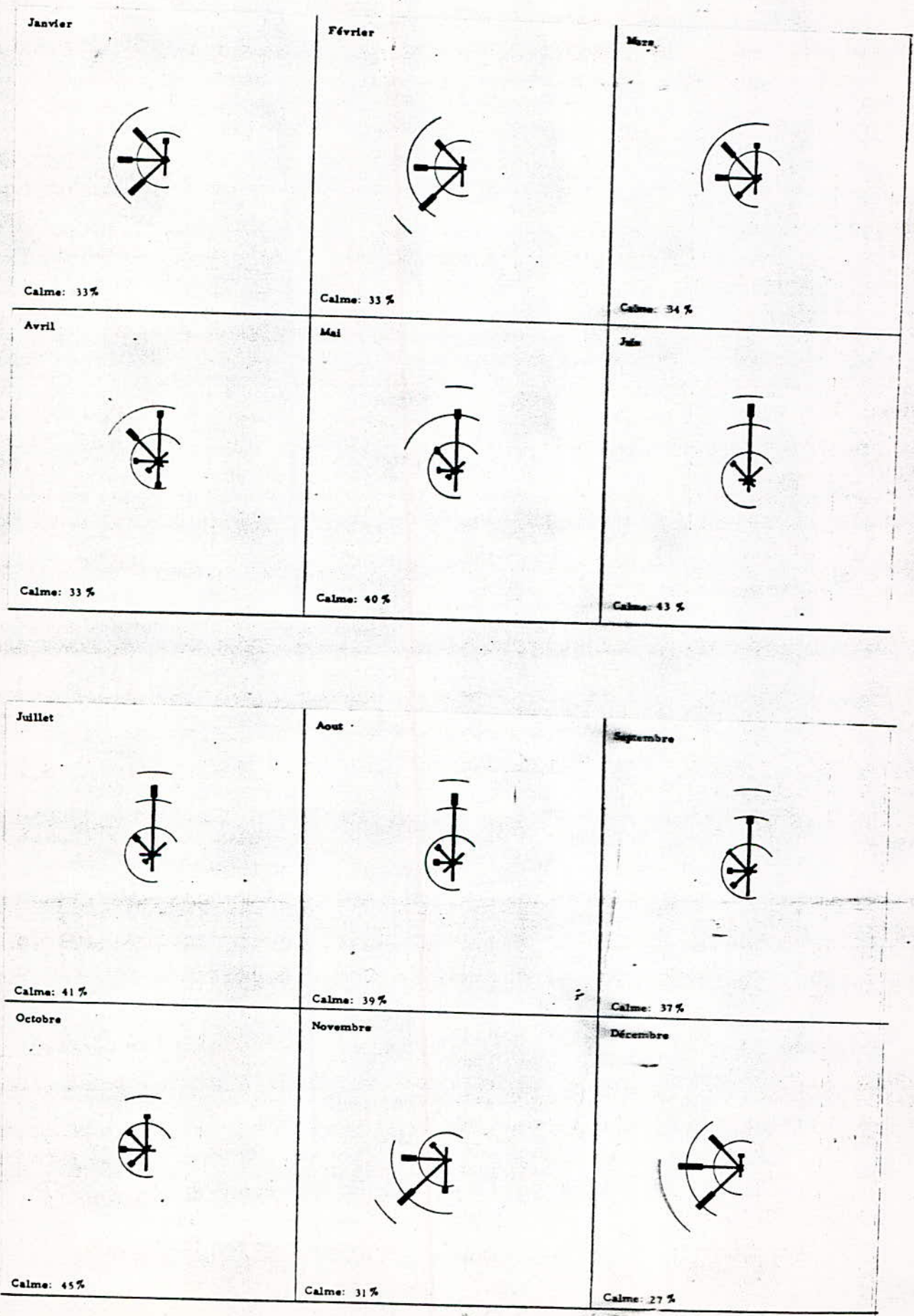
Repartition hebdomadaire des vents

Station: ANNABA



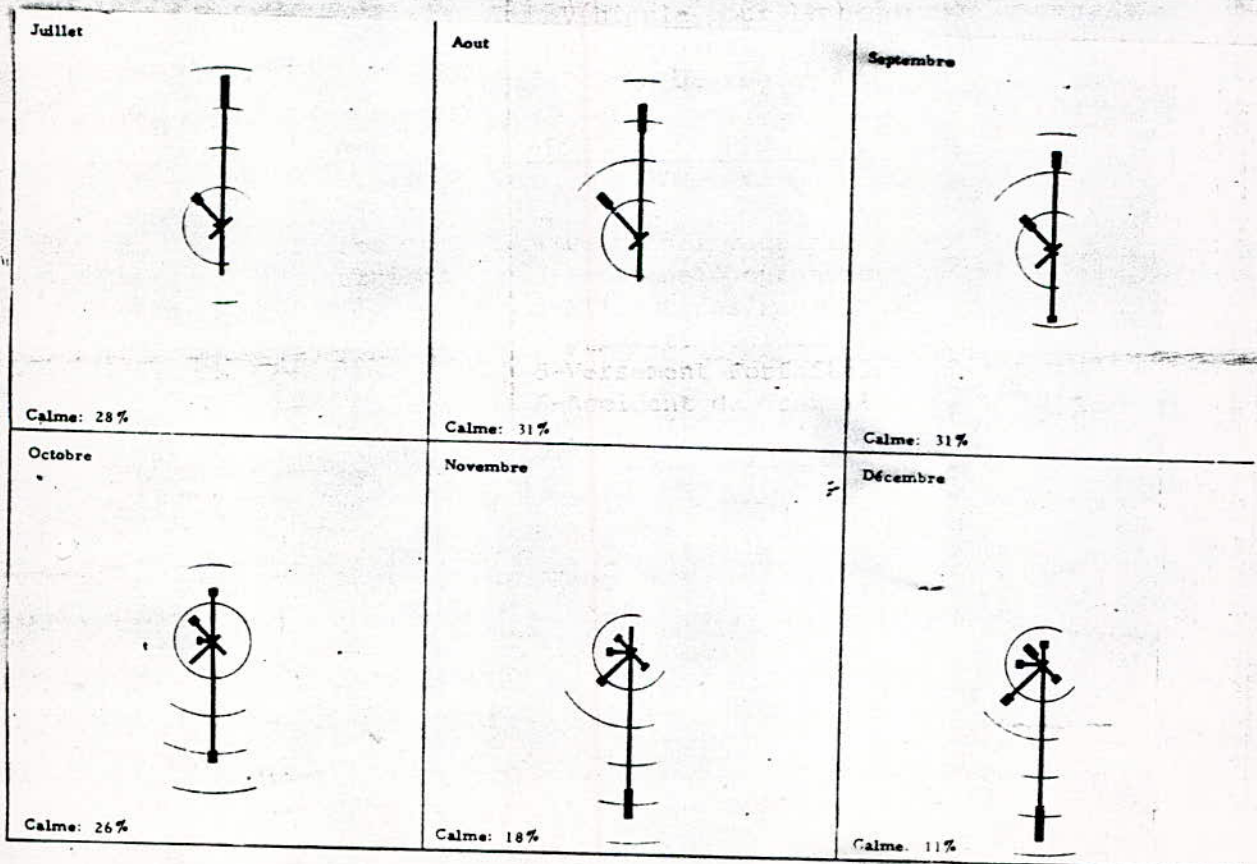
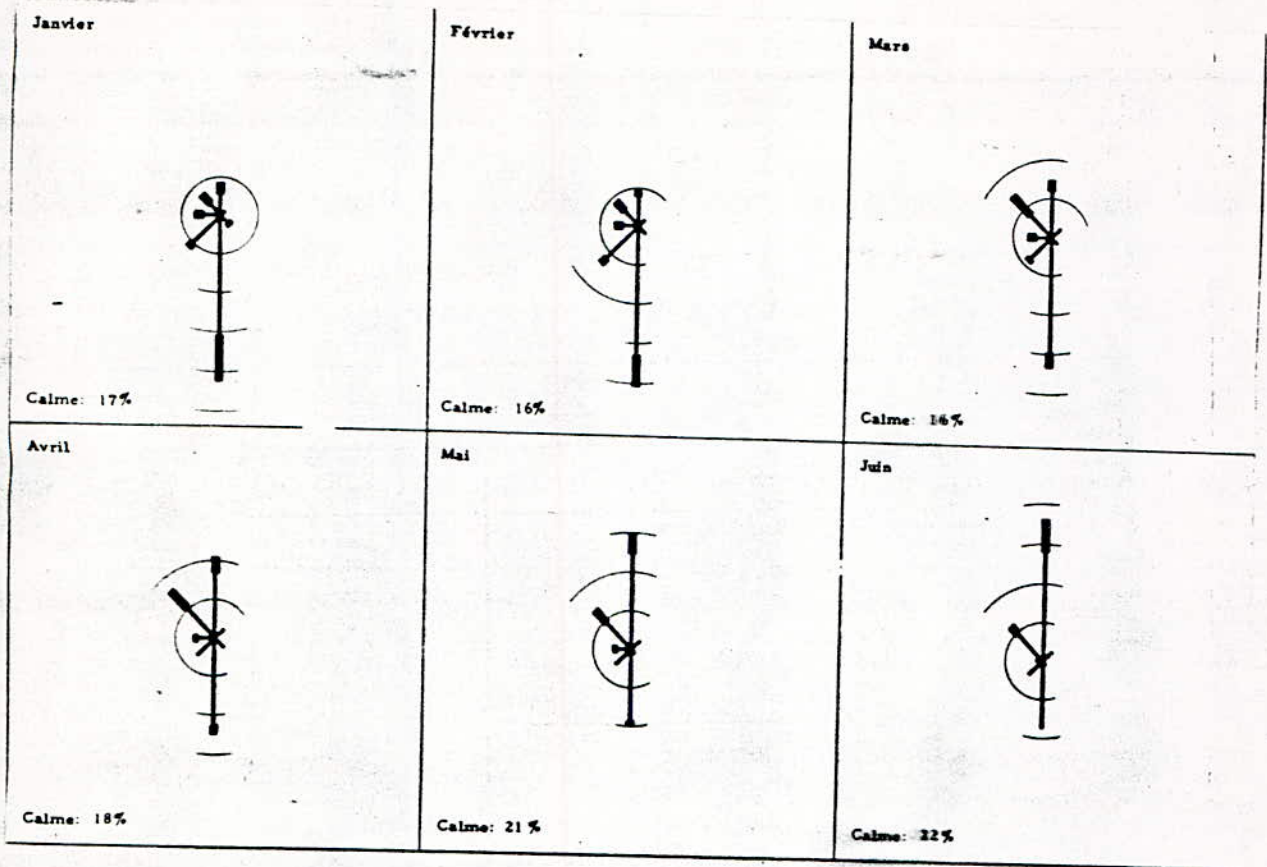
Repartition frequentielle de vents
 REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

STATION: CONSTANTINE



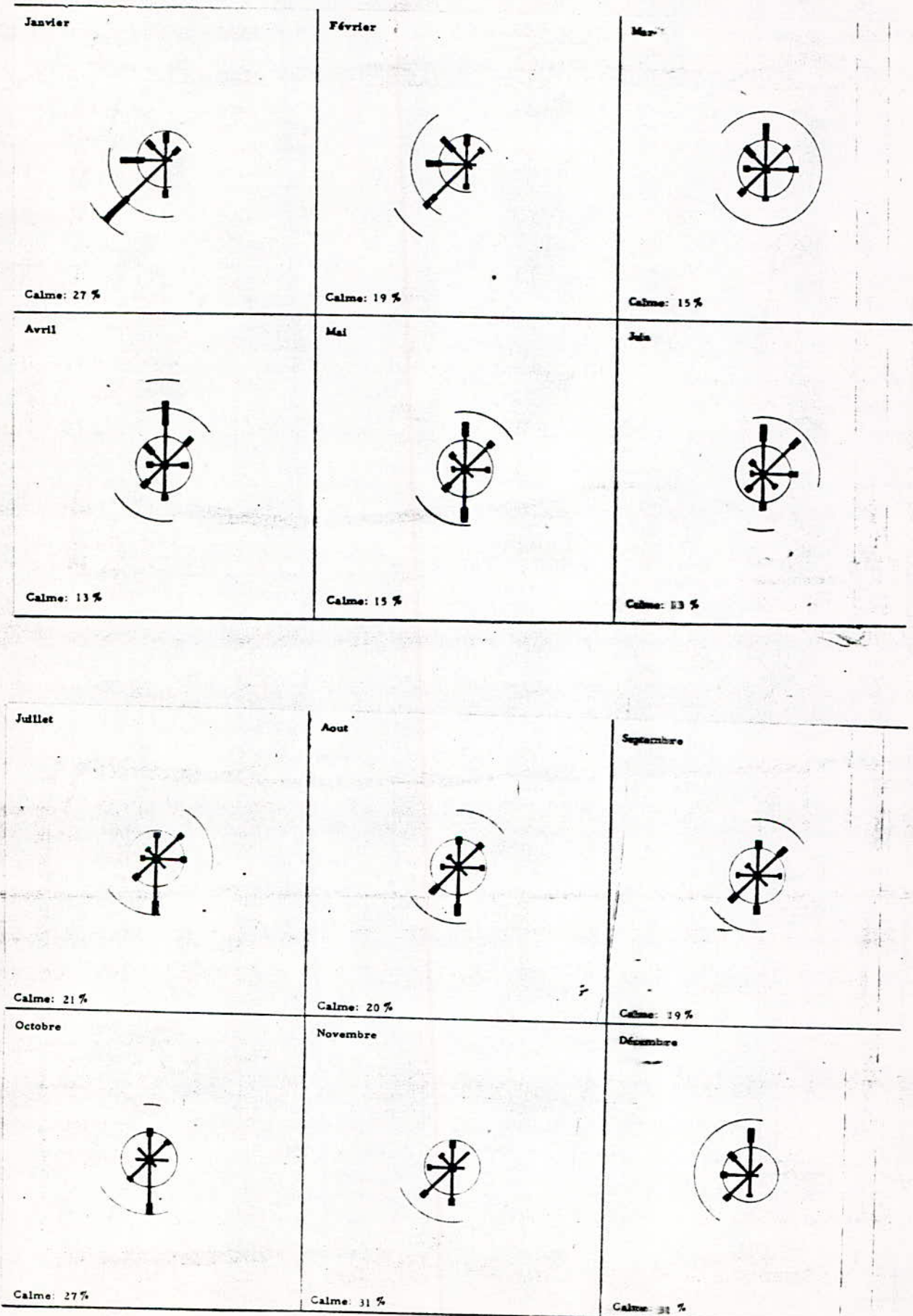
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station SKIKDA



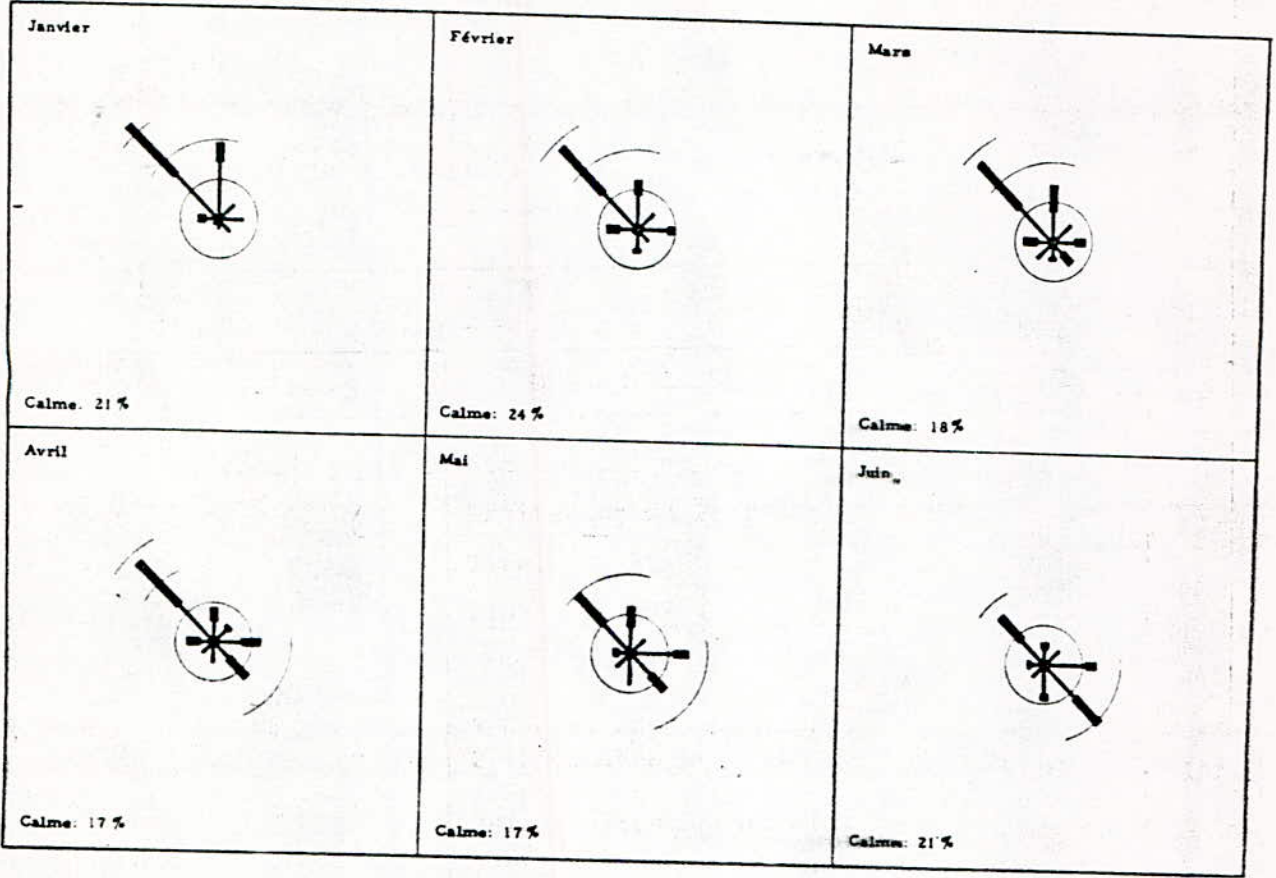
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station, LAGHOUAT



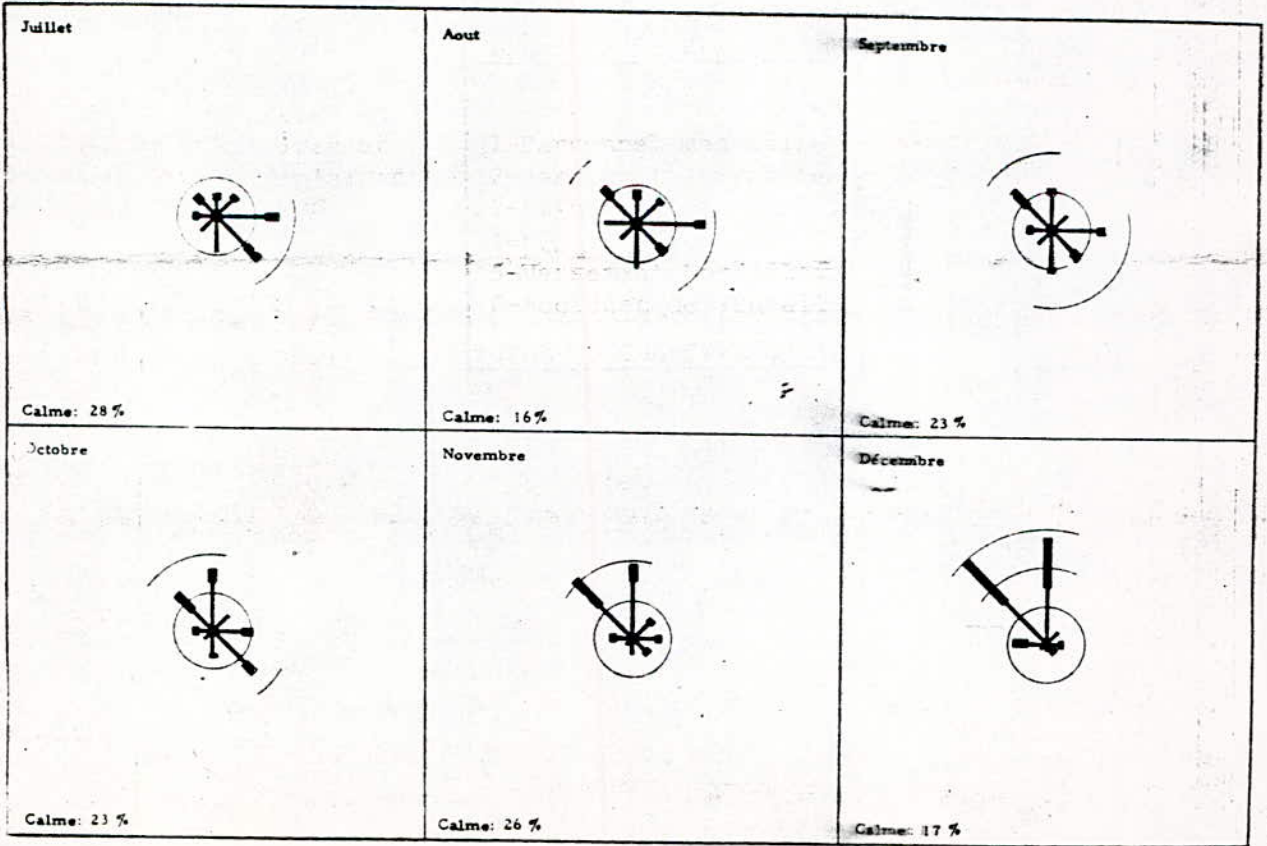
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : BISKRA



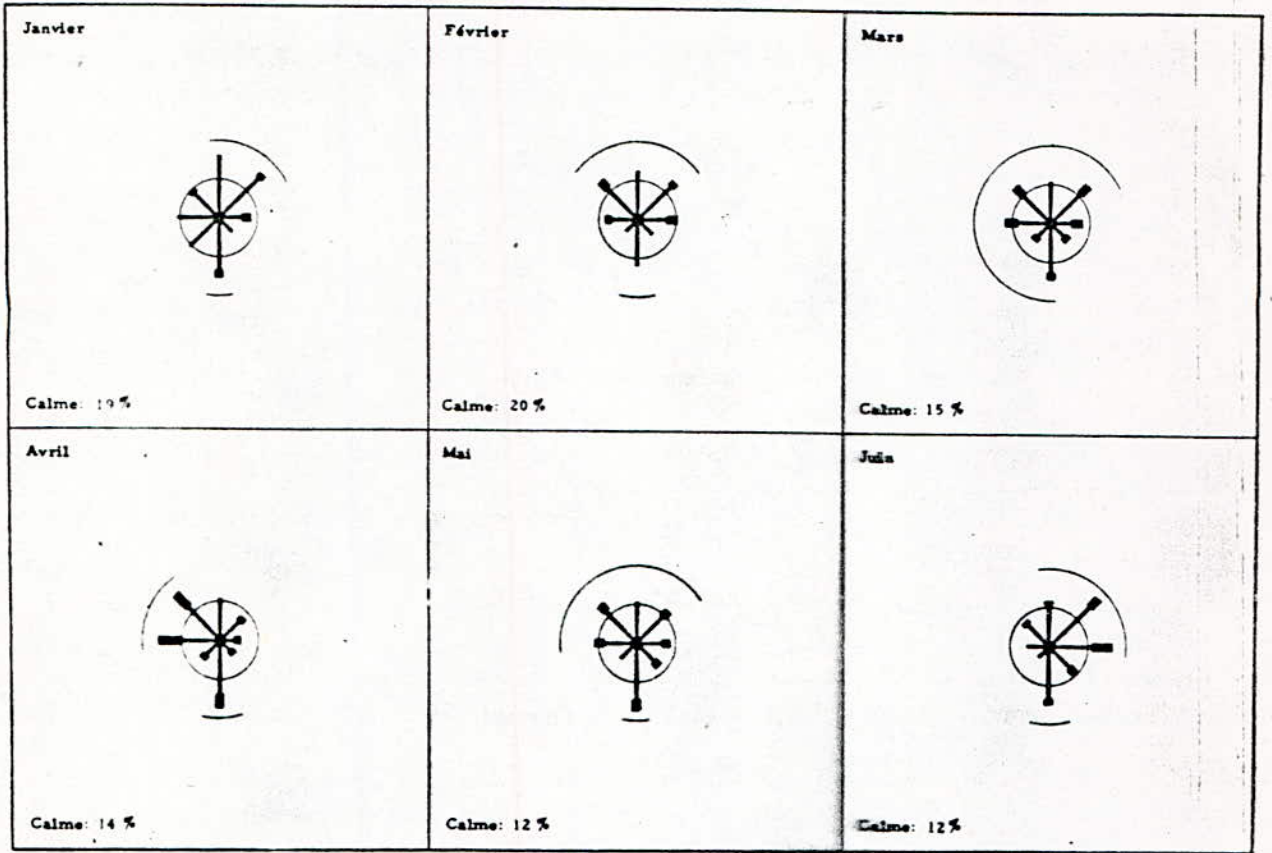
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : BISKRA



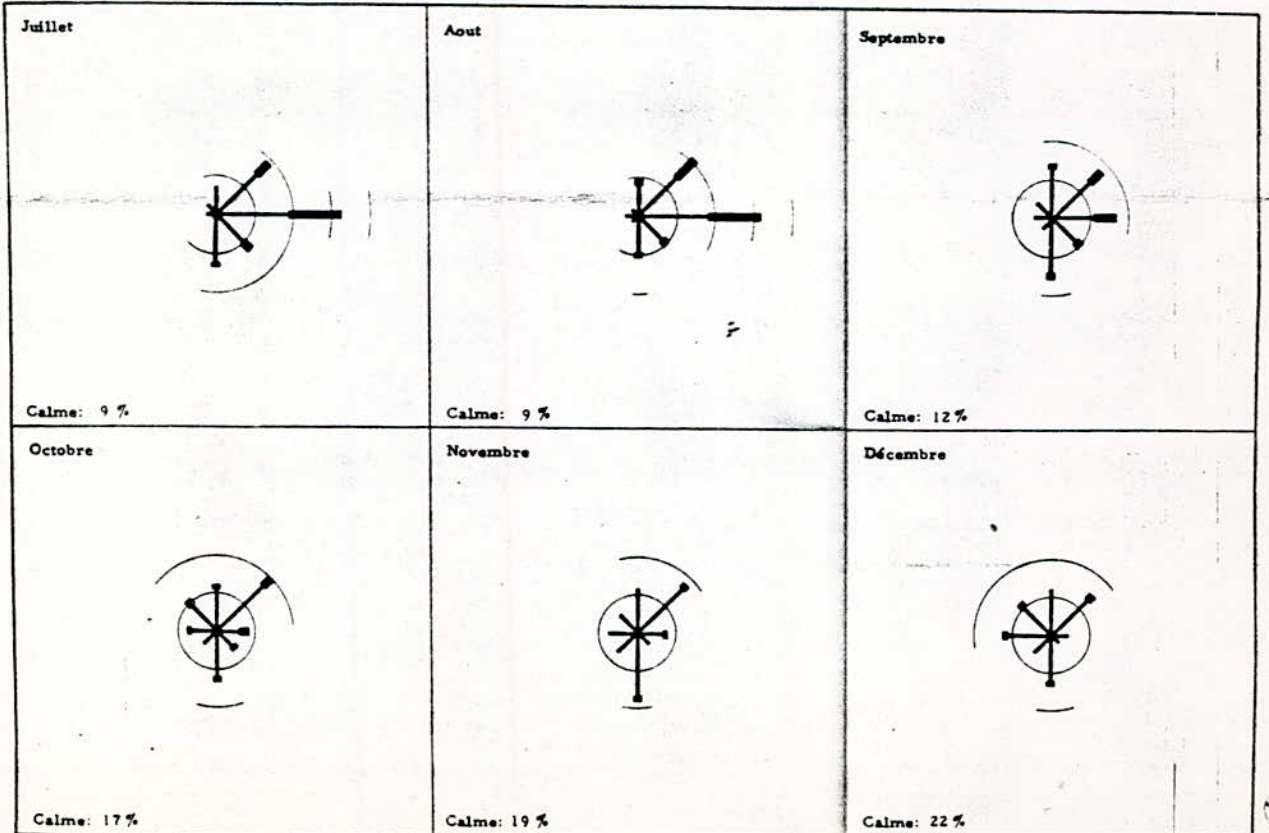
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : TAMANRASSET



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

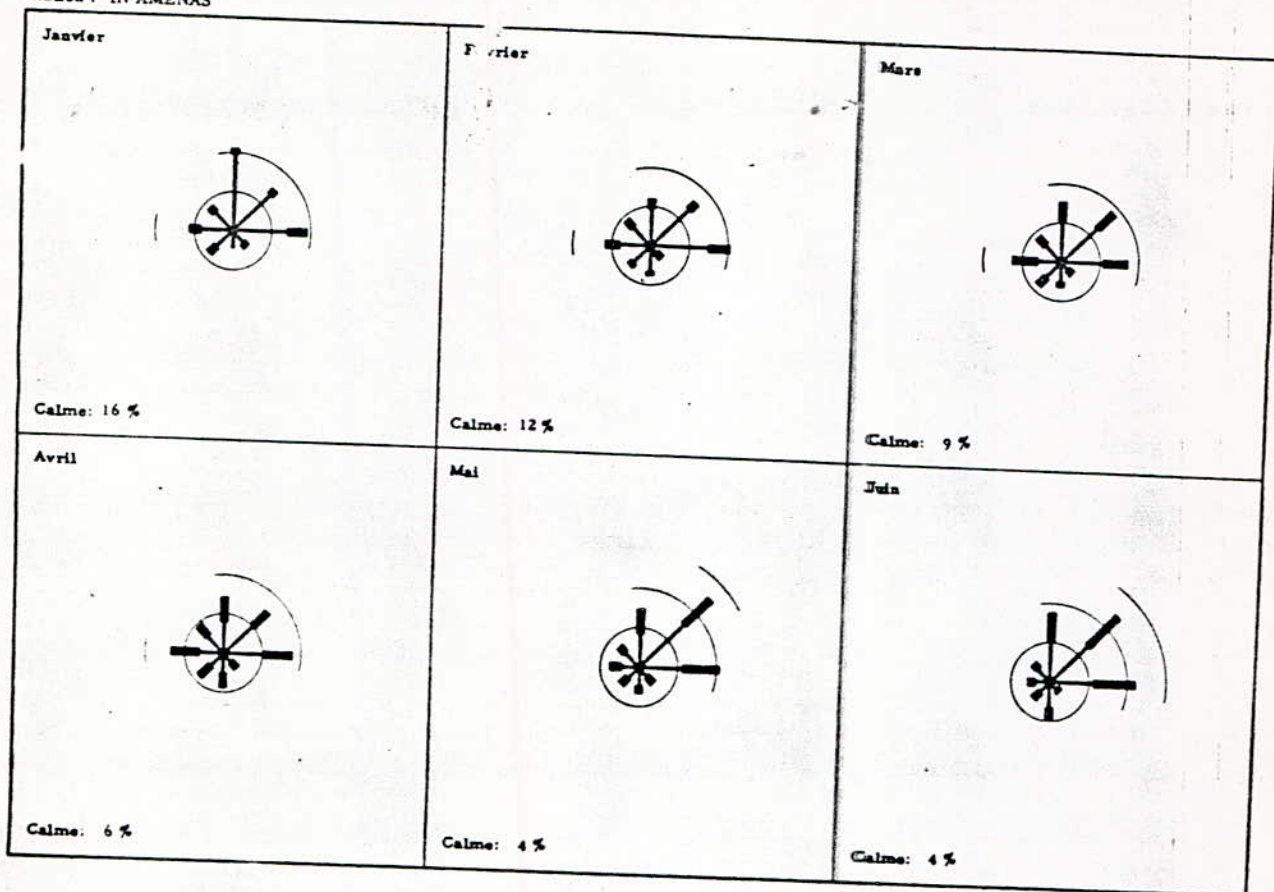
Station : TAMANRASSET



111

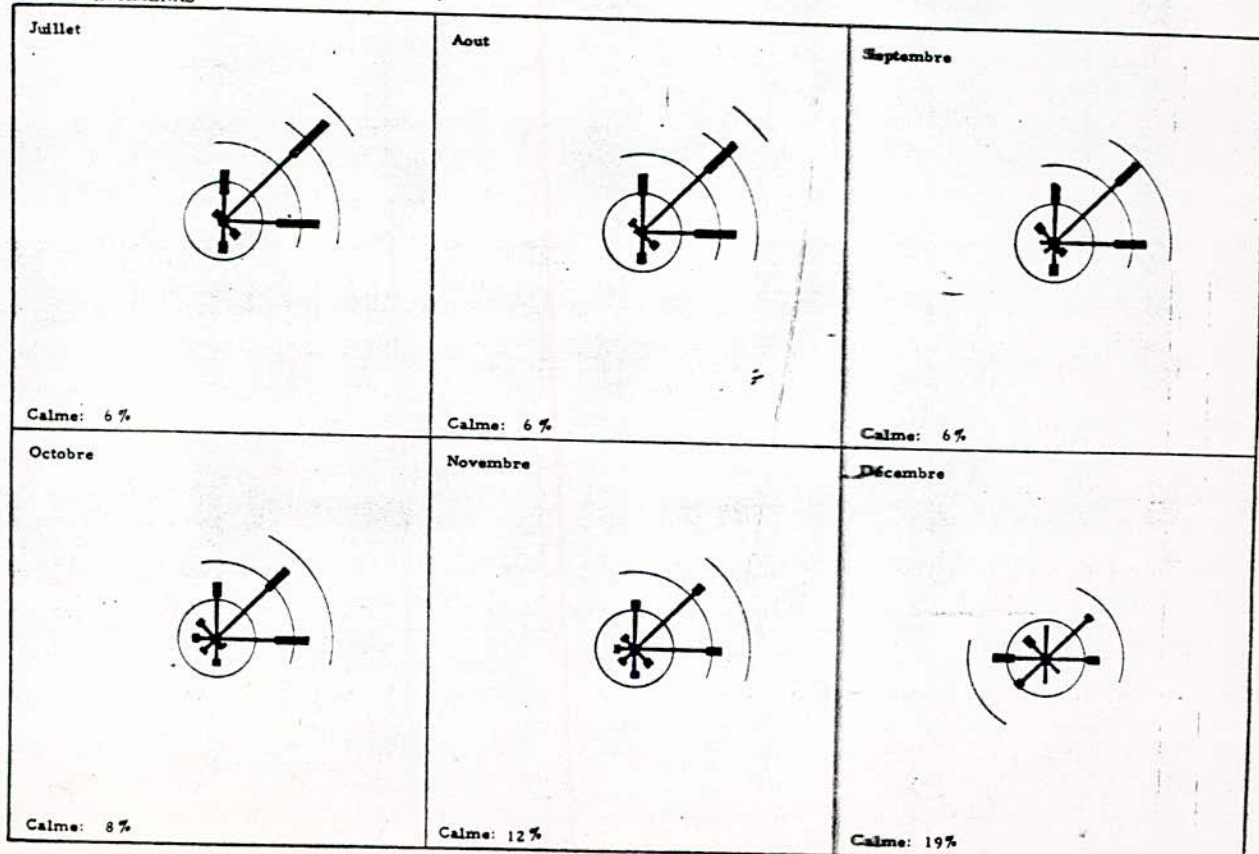
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : IN AMENAS



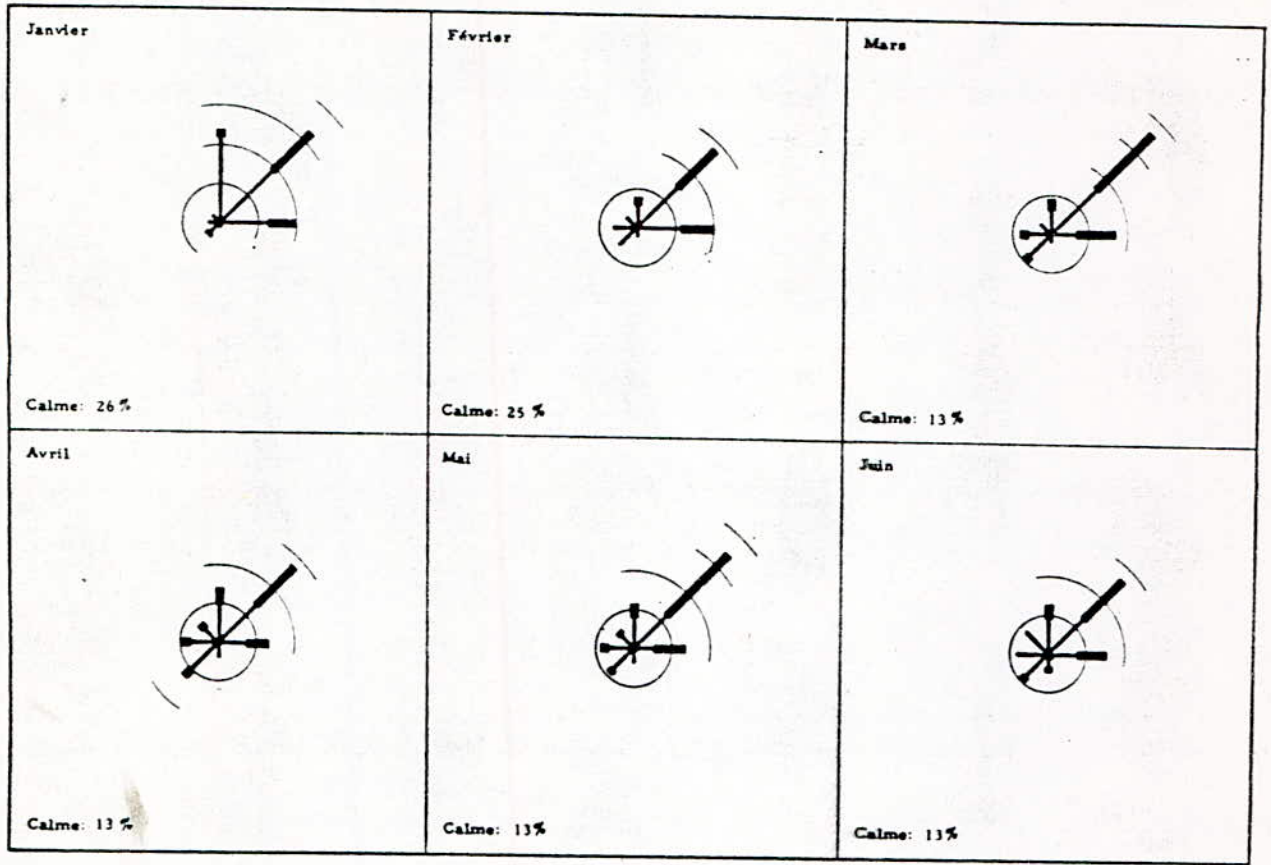
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : IN AMENAS



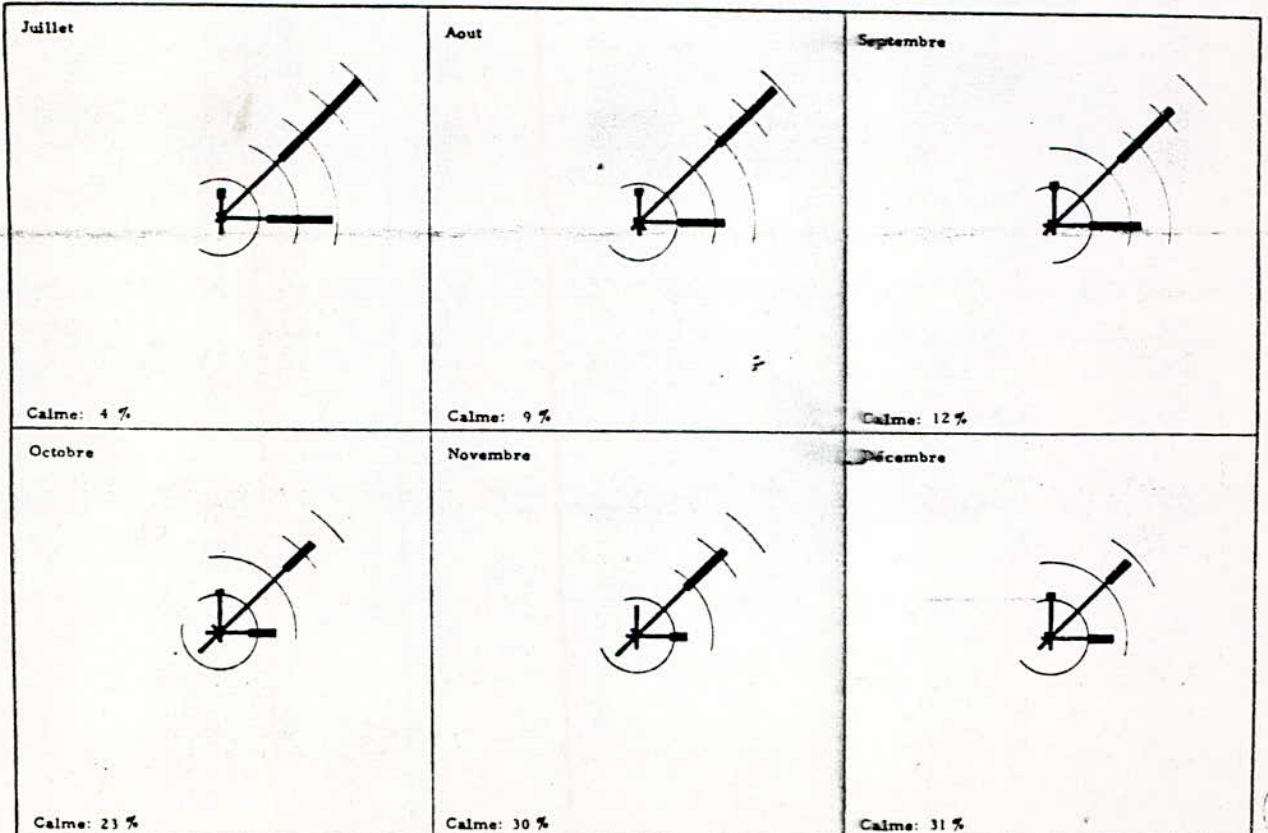
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : IN SALAH



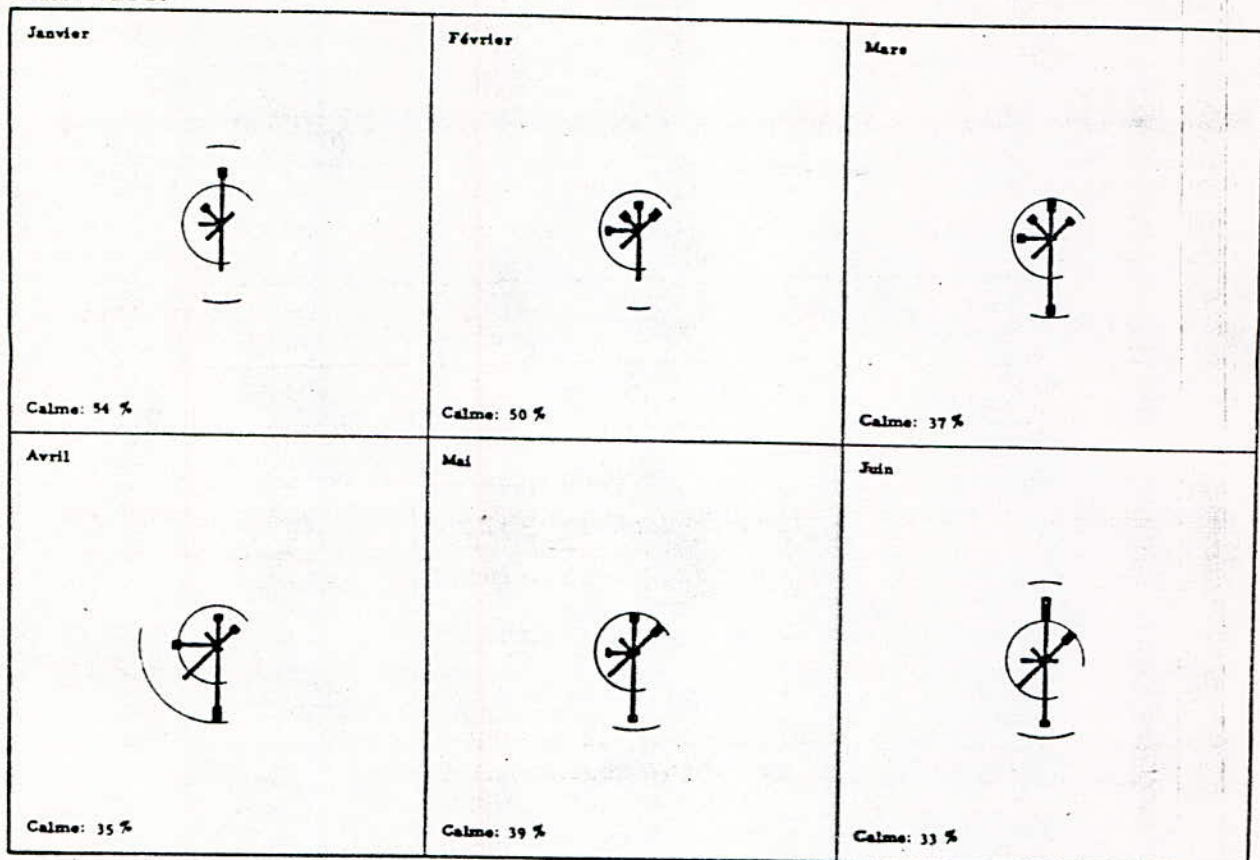
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : IN SALAH



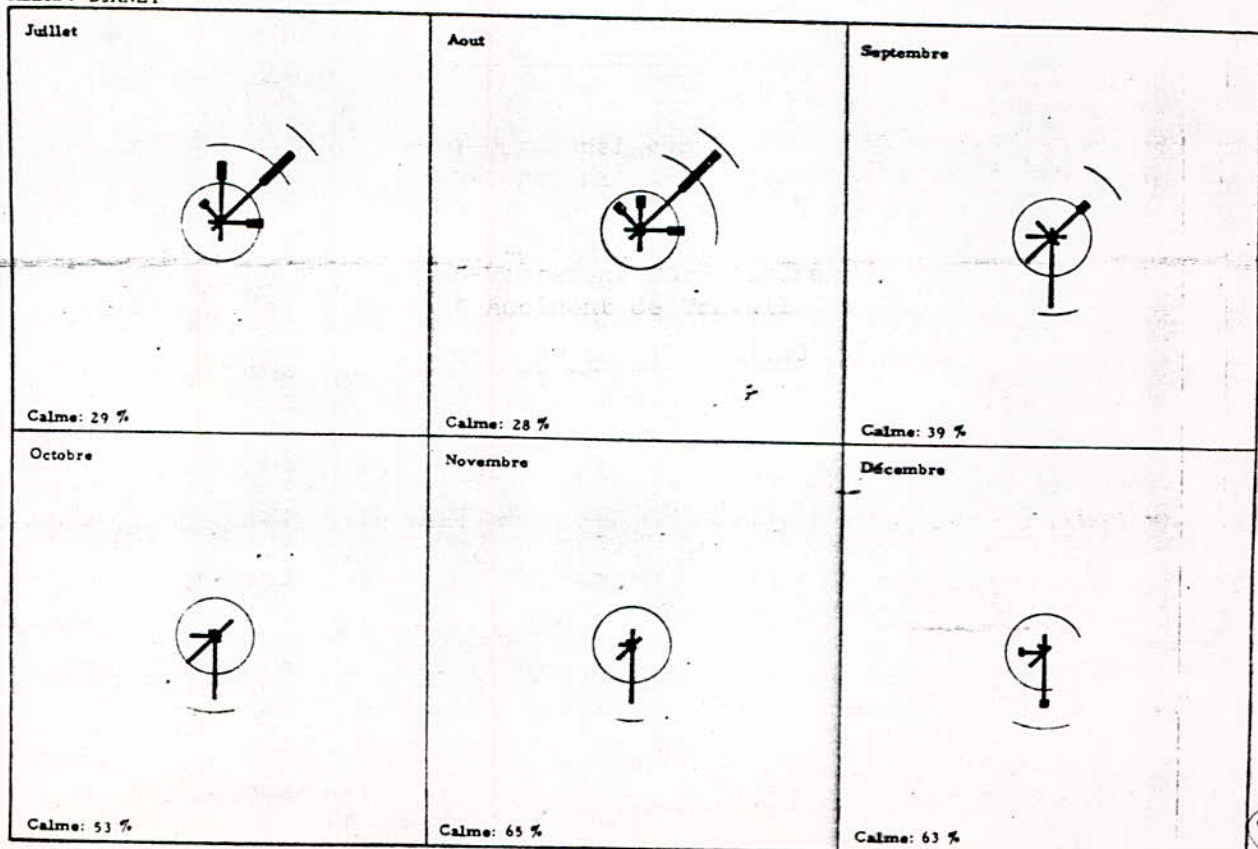
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : DJANET



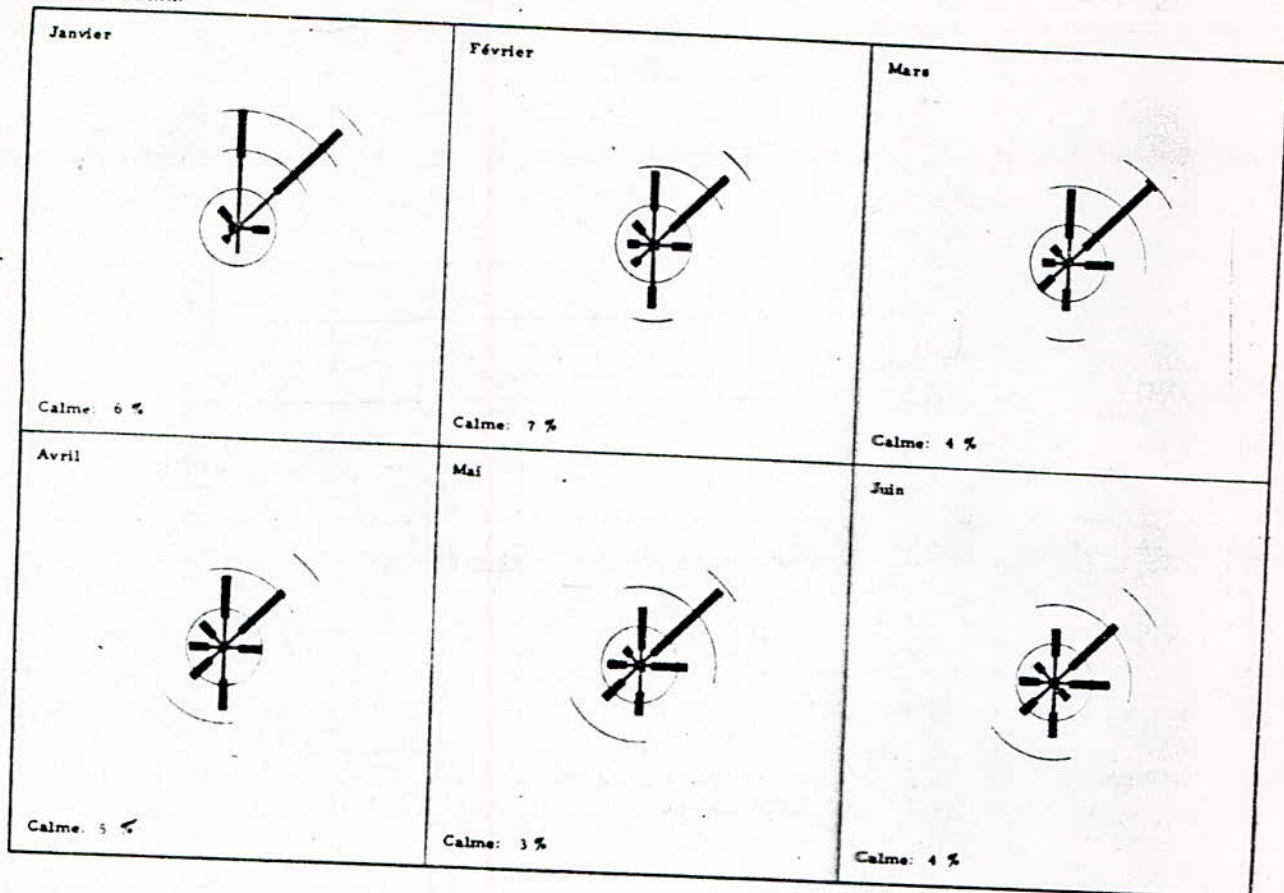
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : DJANET



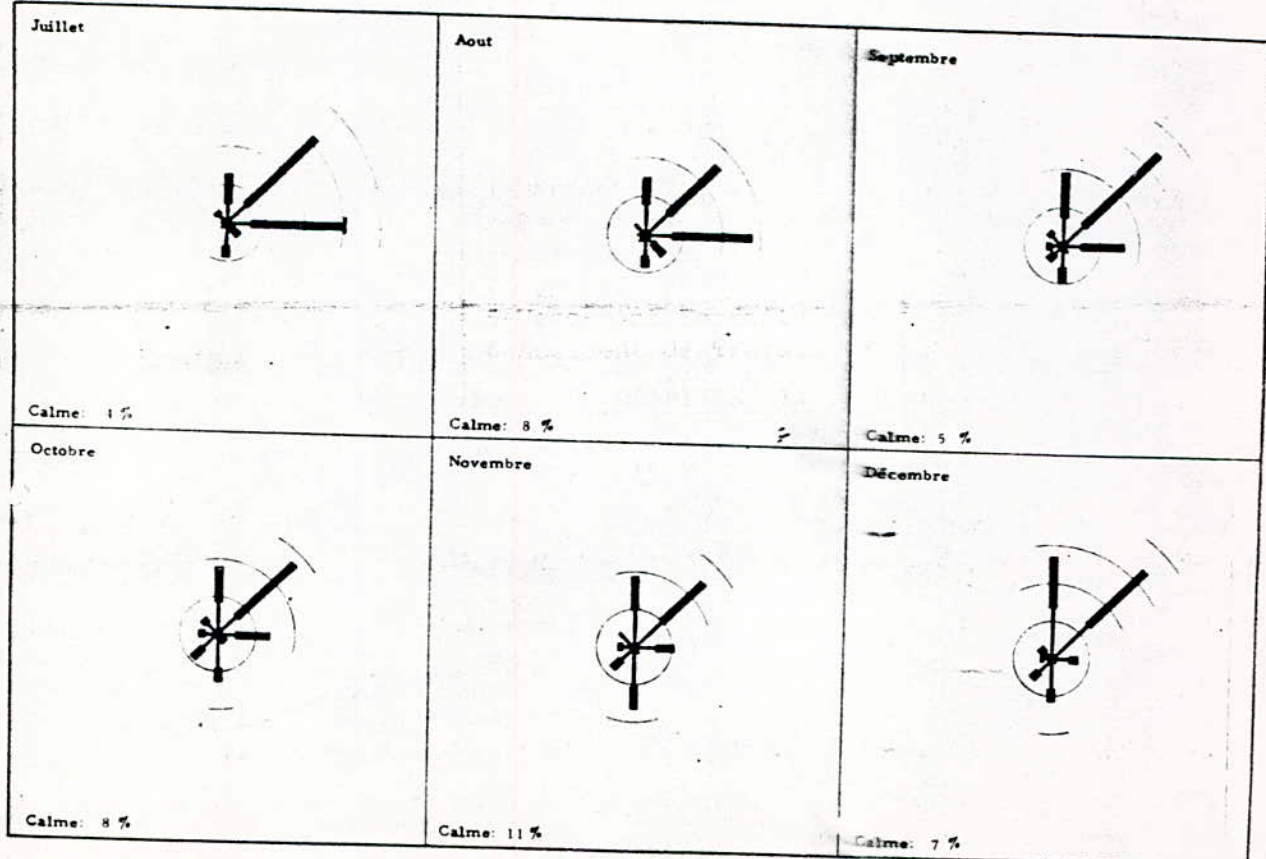
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : ADRAR



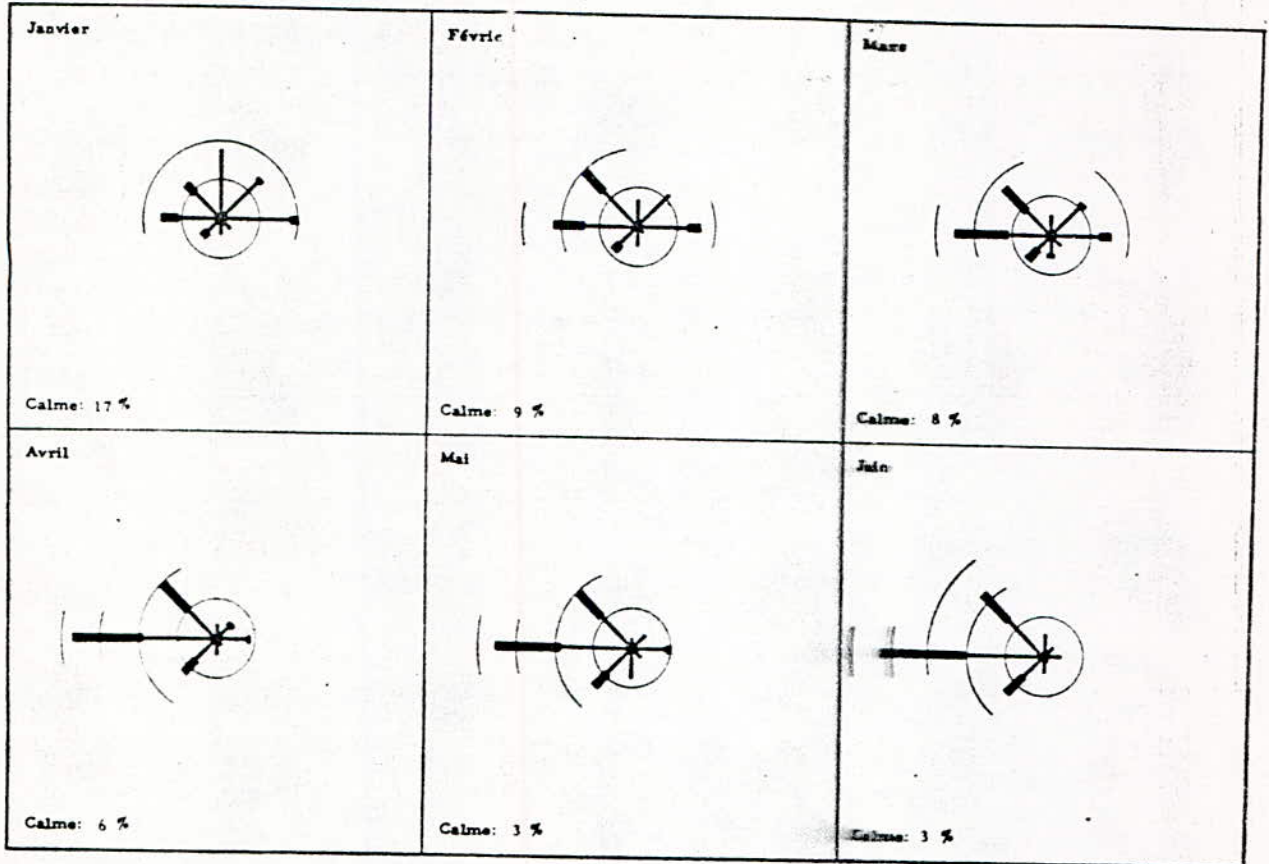
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : ADRAR



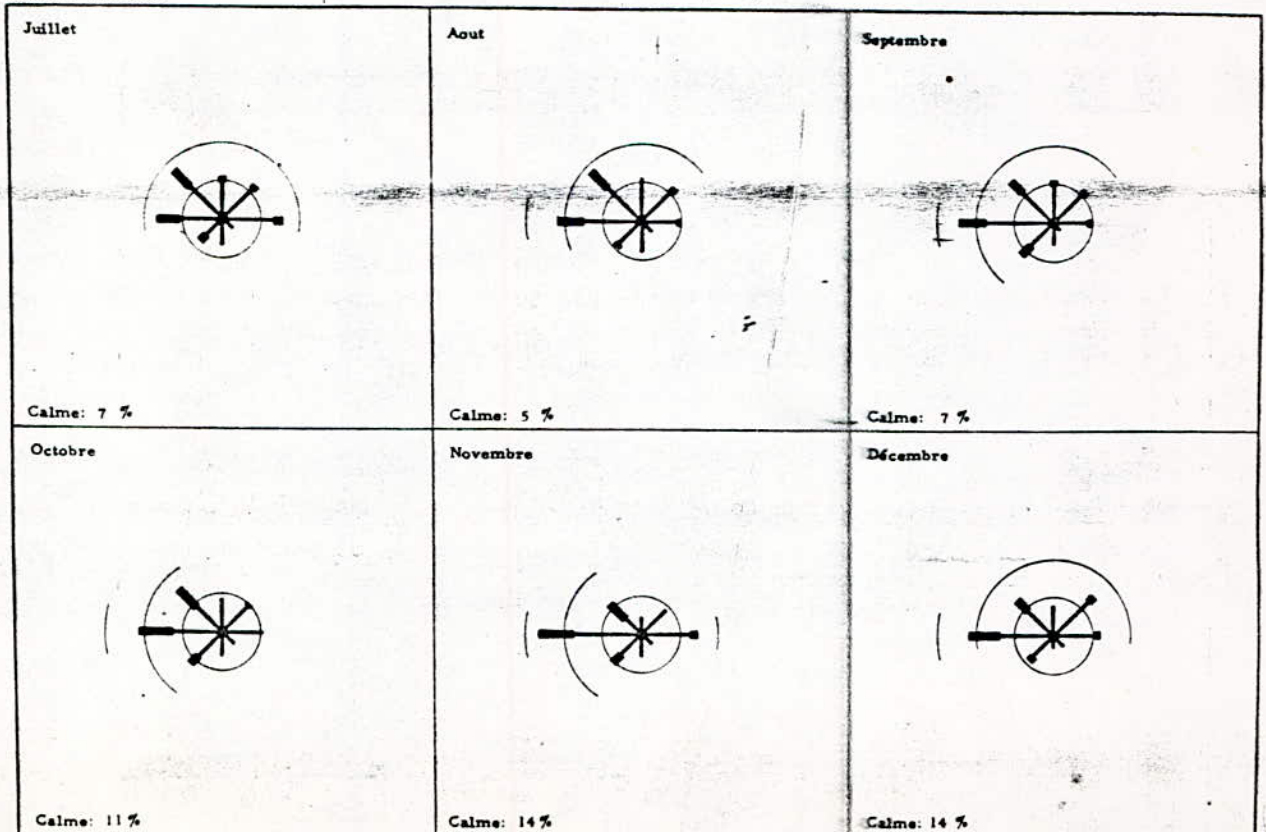
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : TINDOUF



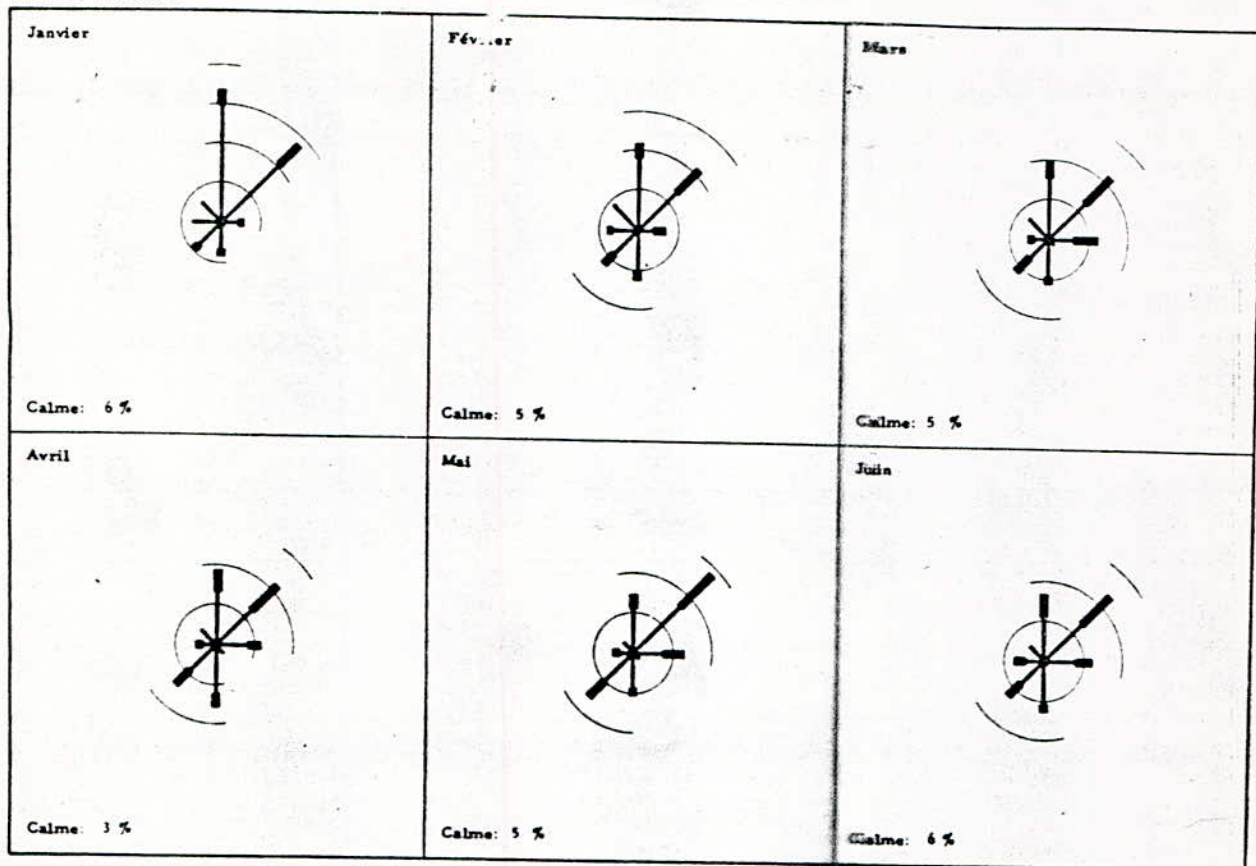
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : TINDOUF



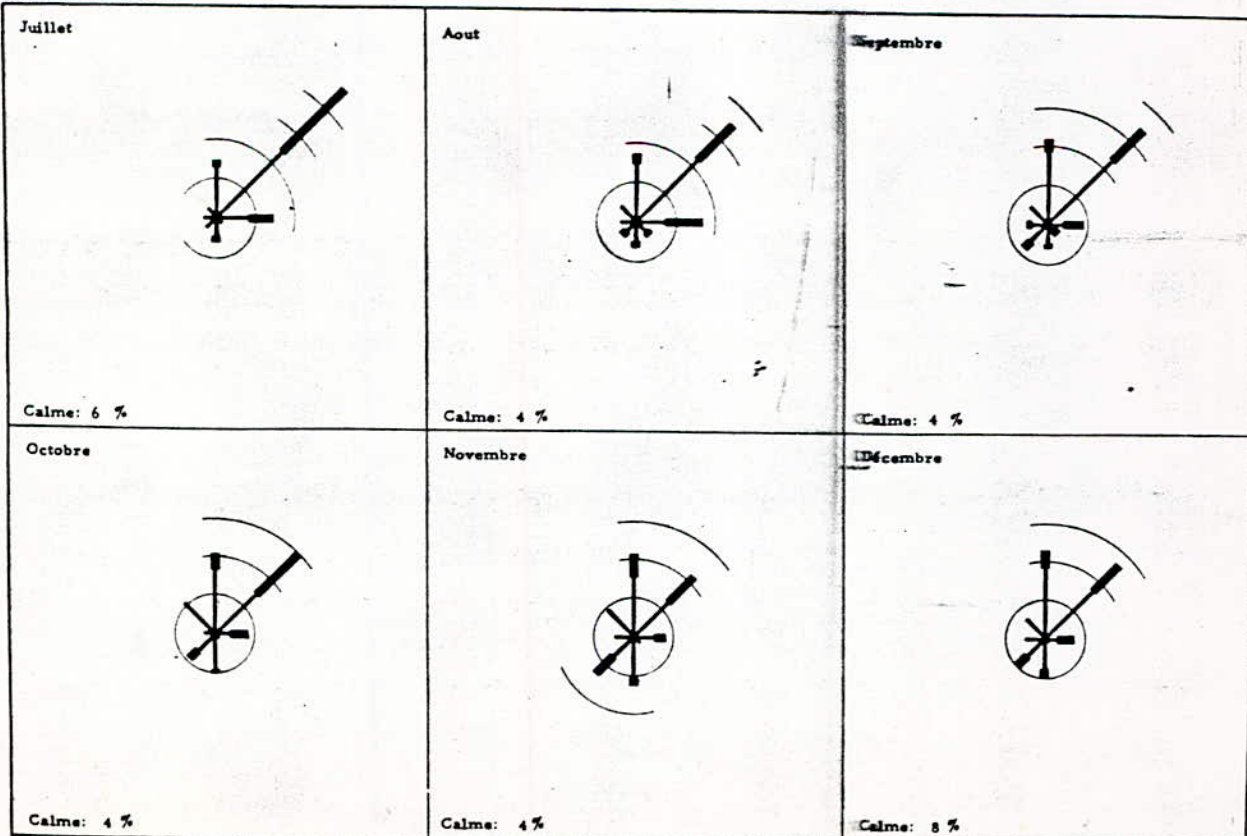
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : TIMIMOUN



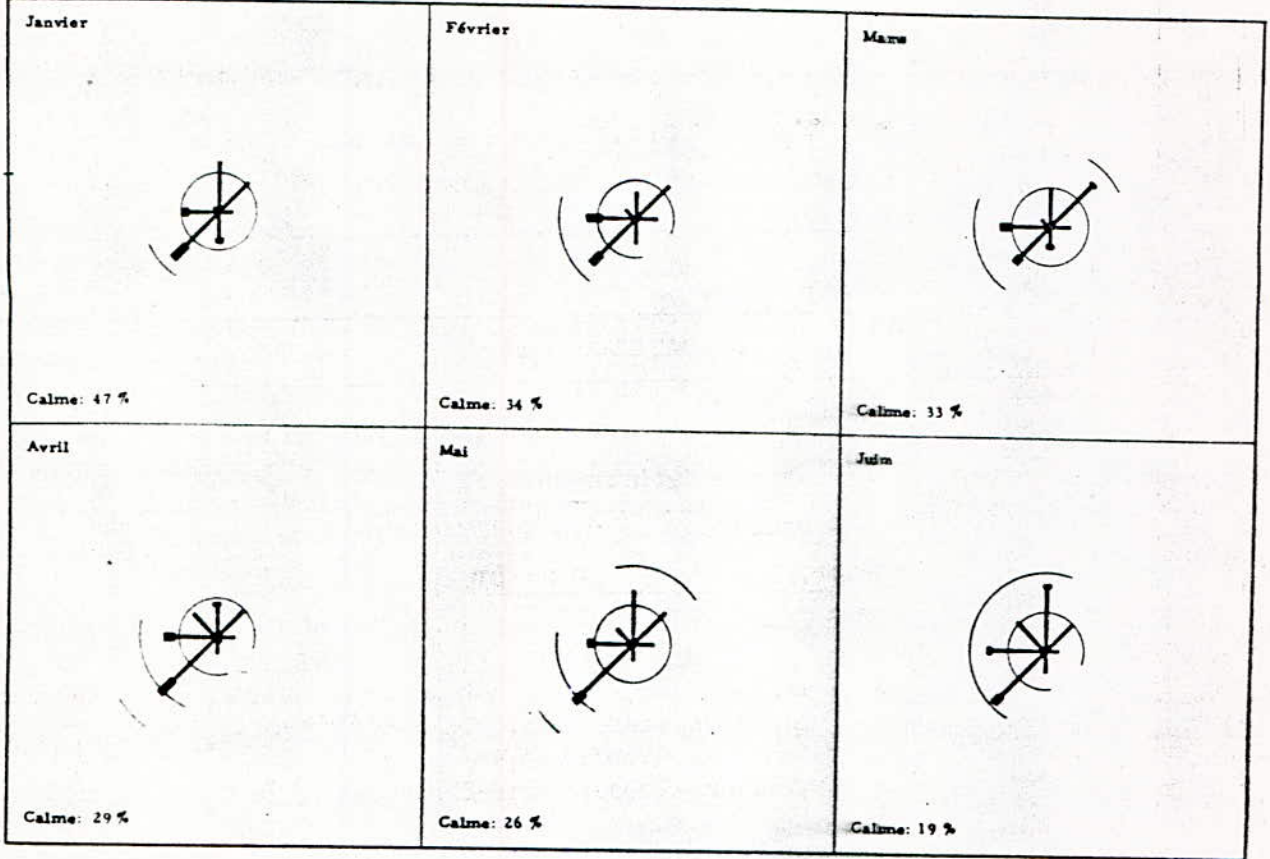
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : TIMIMOUN



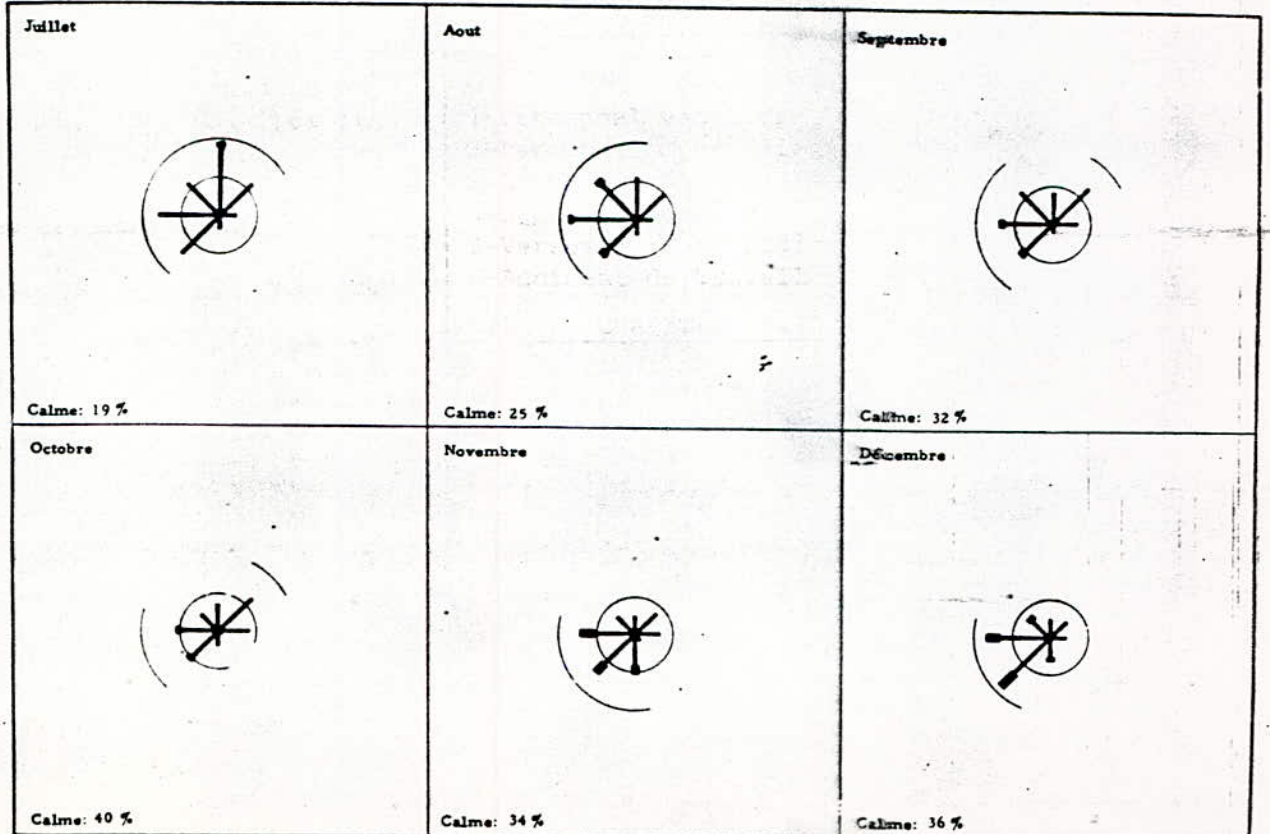
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : AL ASNAM



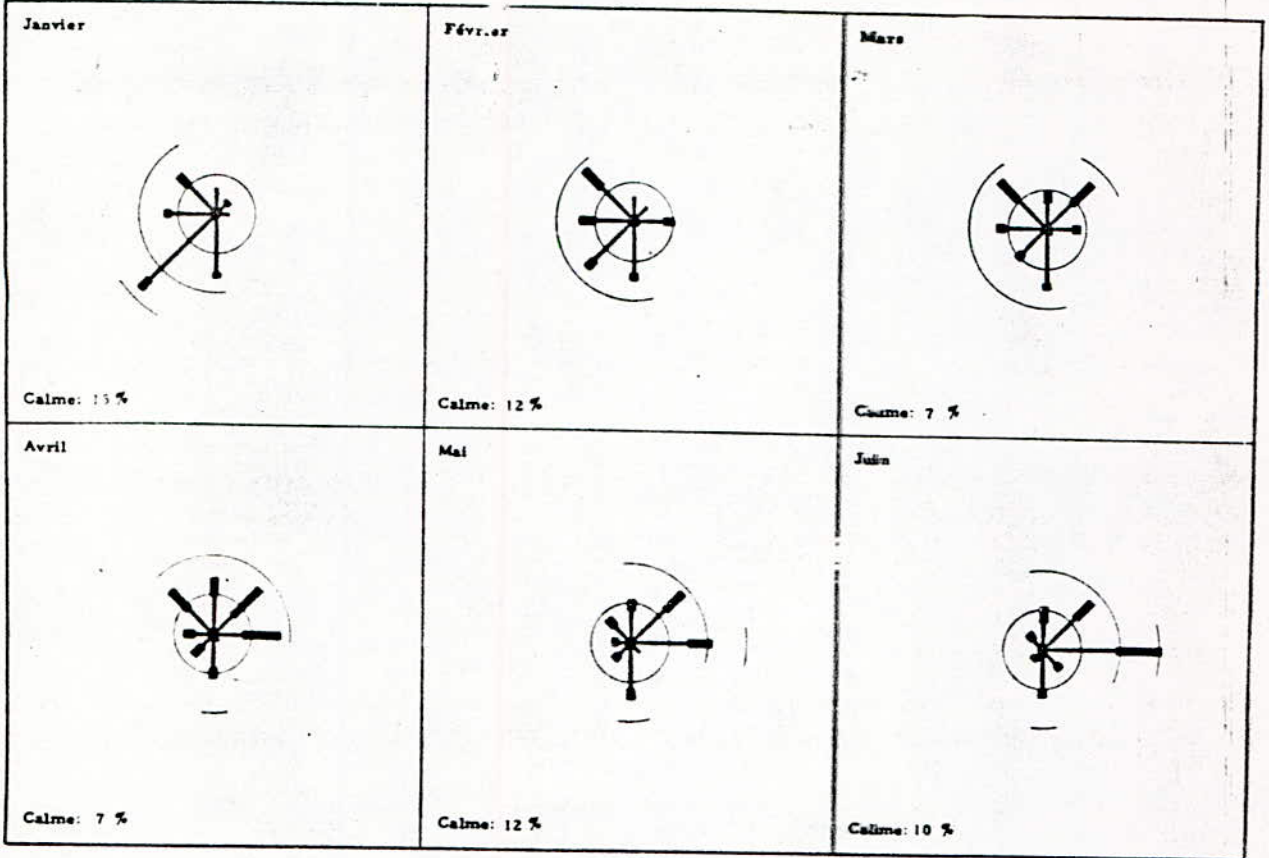
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : AL ASNAM



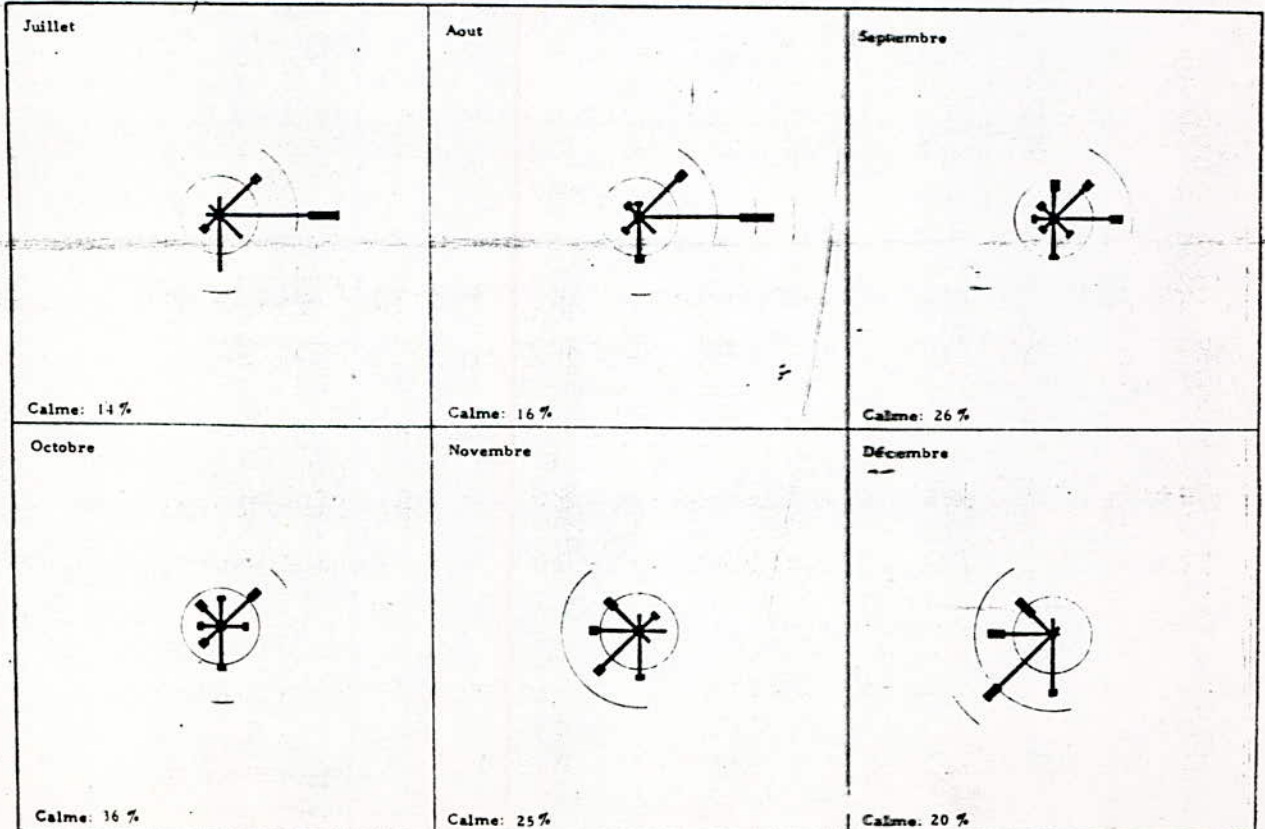
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : EL OUED



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

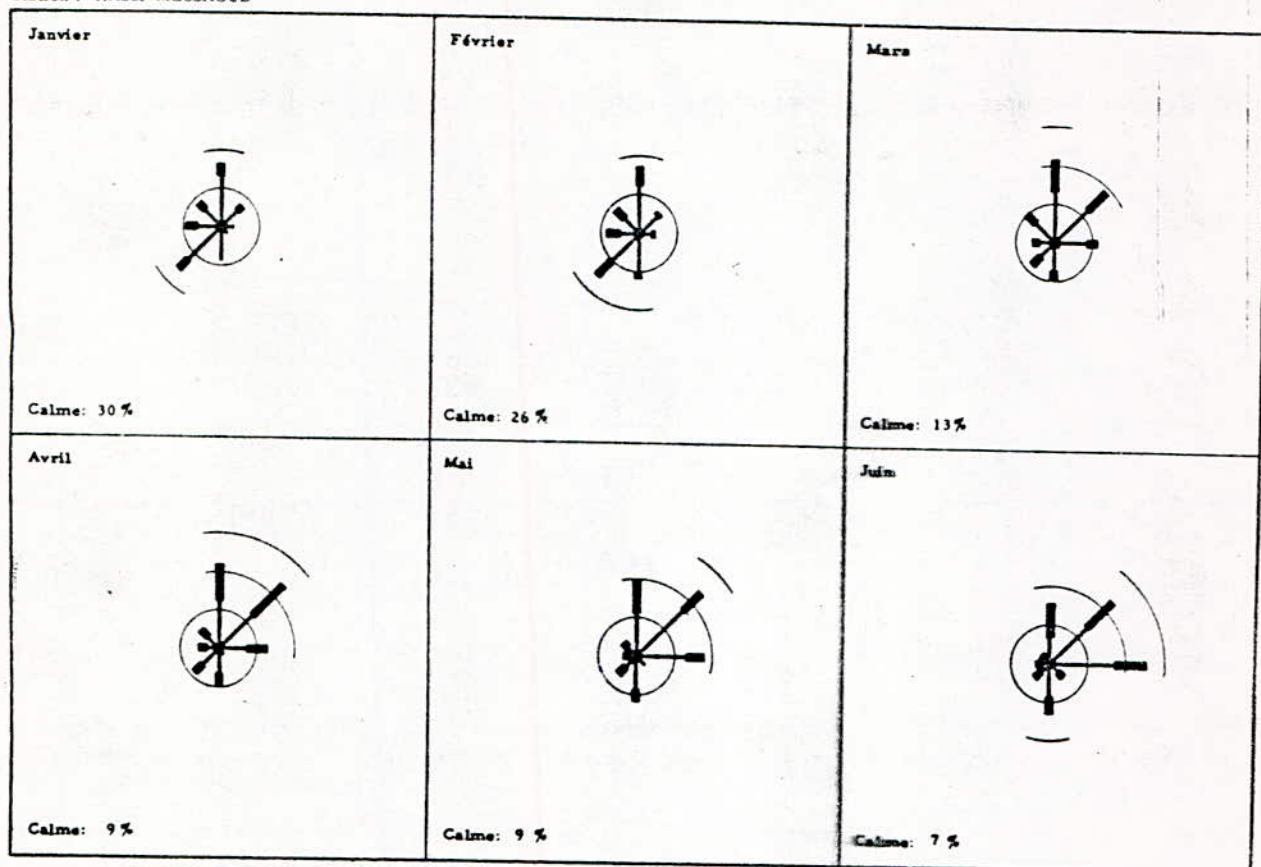
Station : EL OUED



22

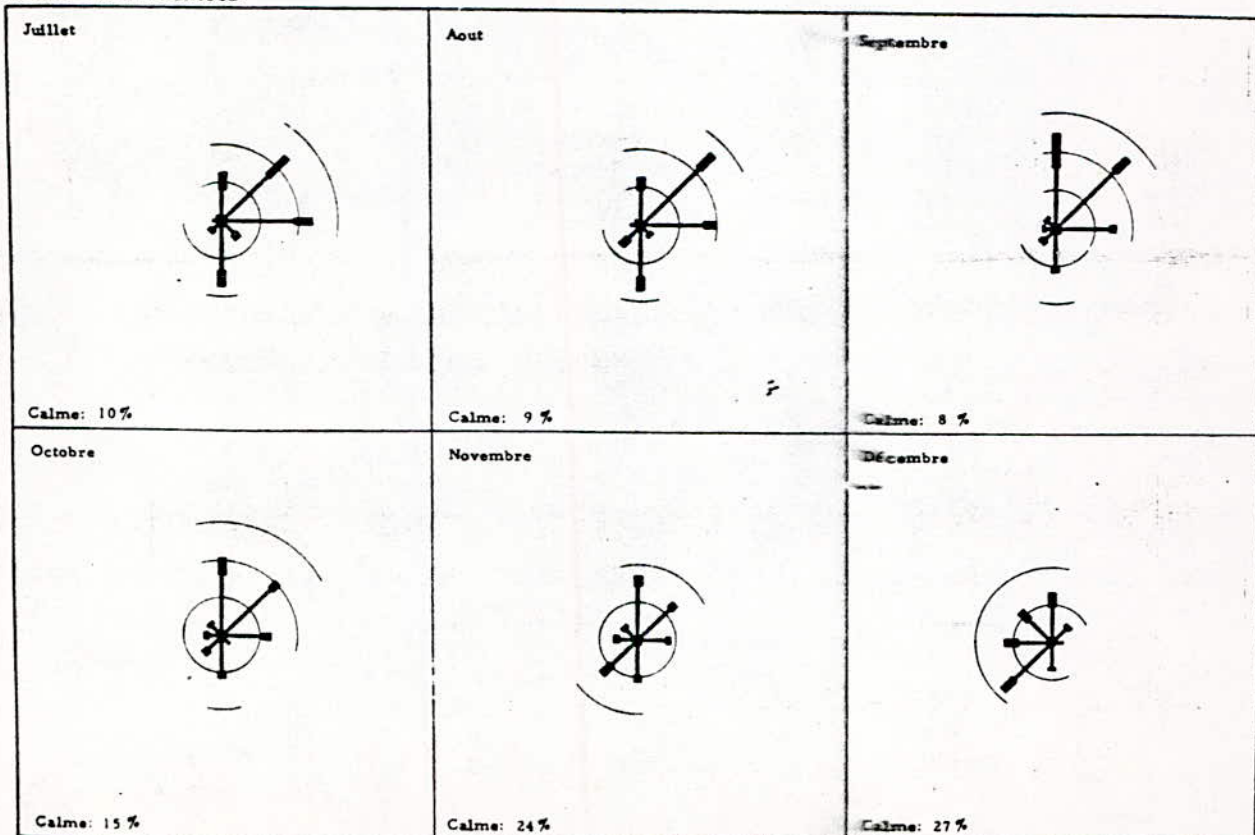
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : HASSI-MESSAOUD



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

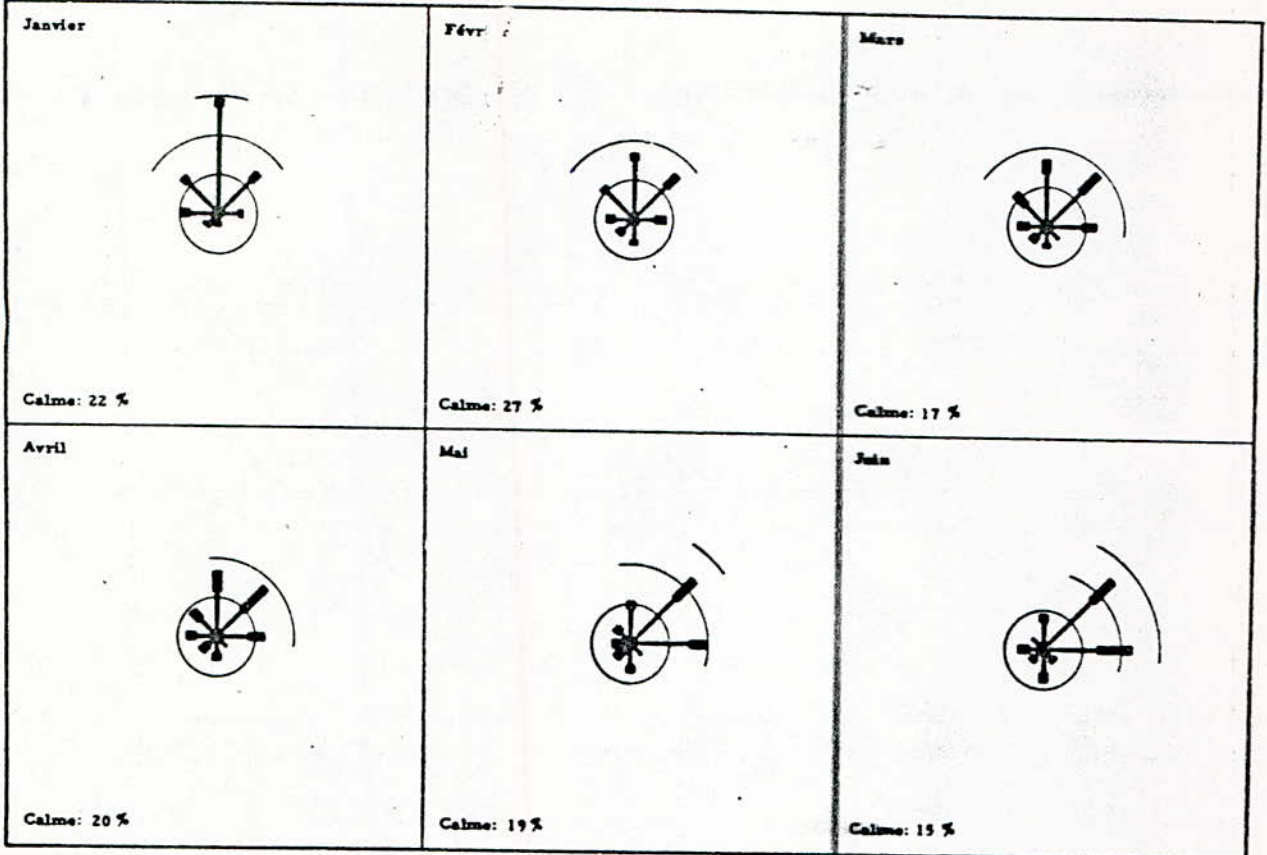
Station : HASSI-MESSAOUD



A

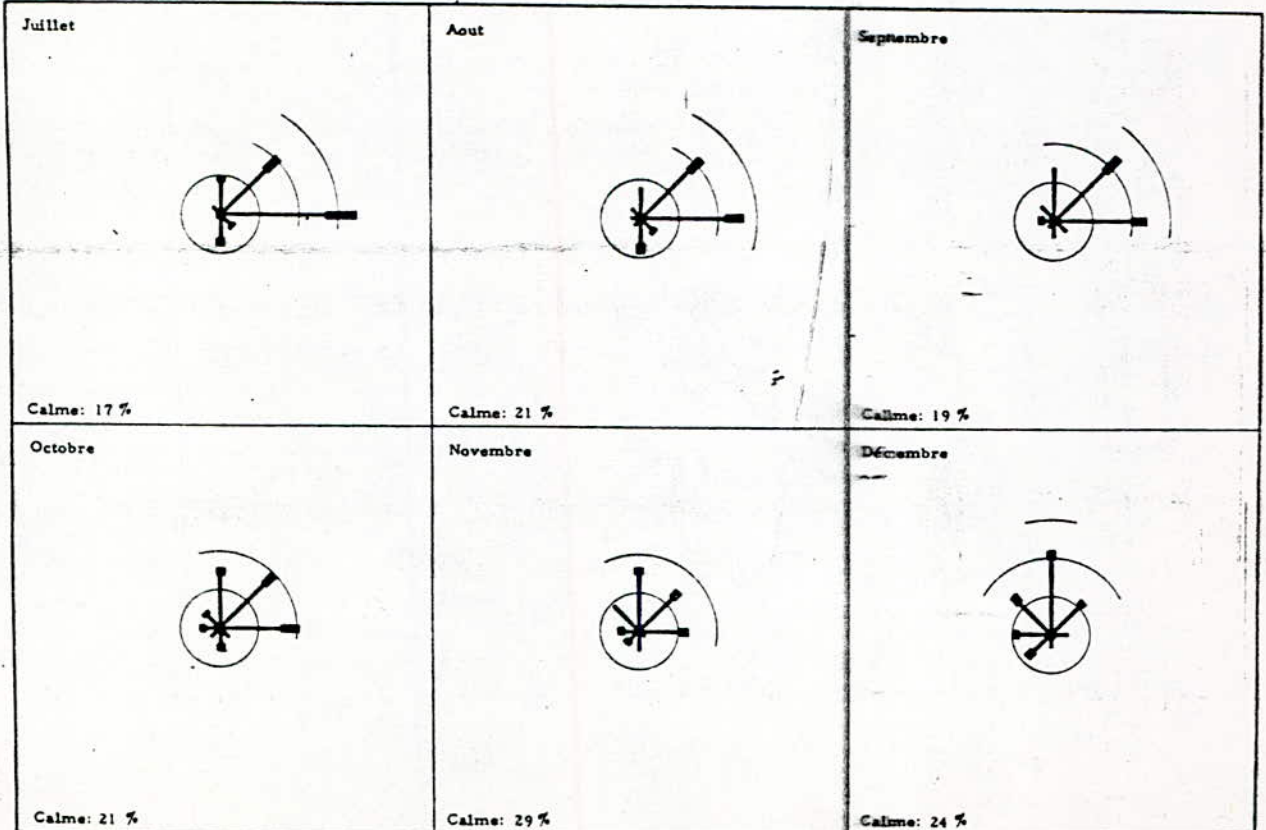
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : EL GOLEA



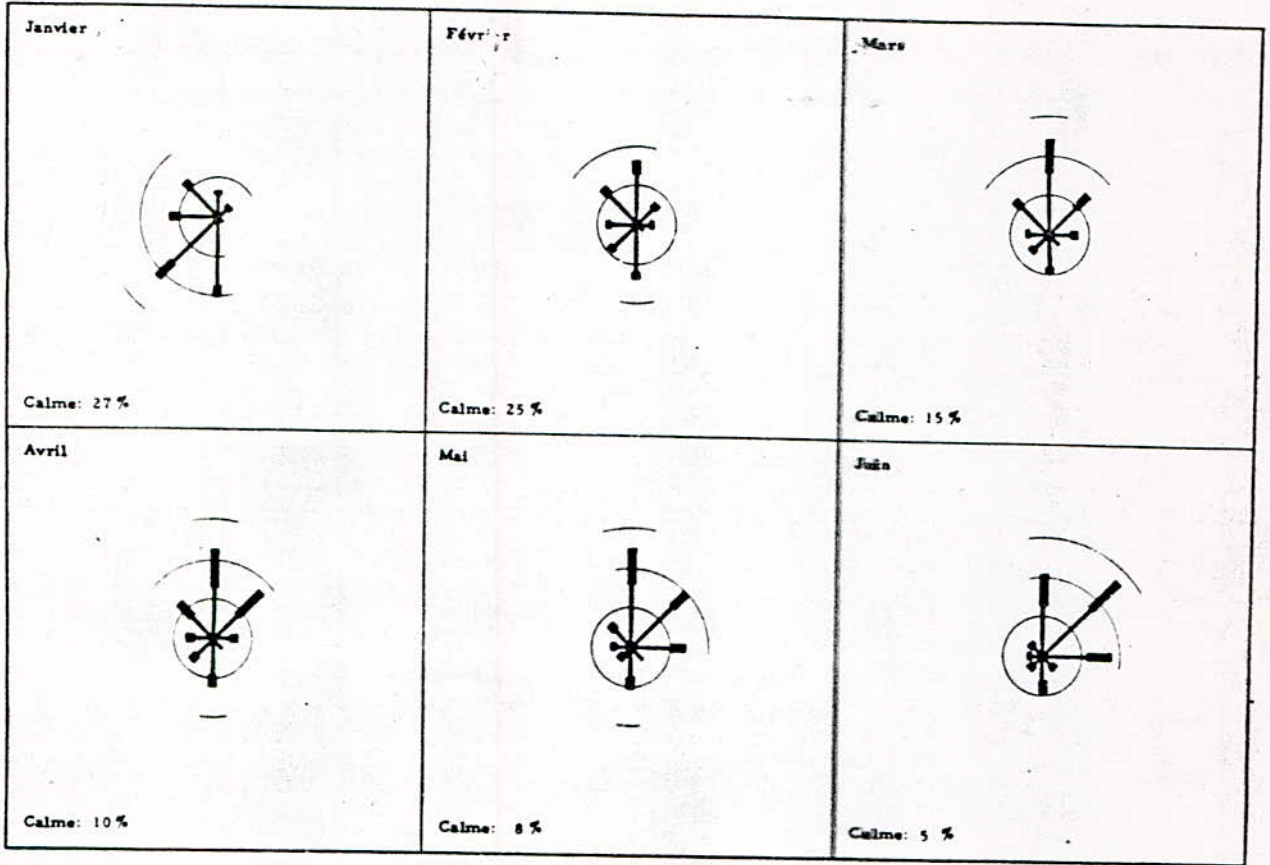
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : EL GOLEA



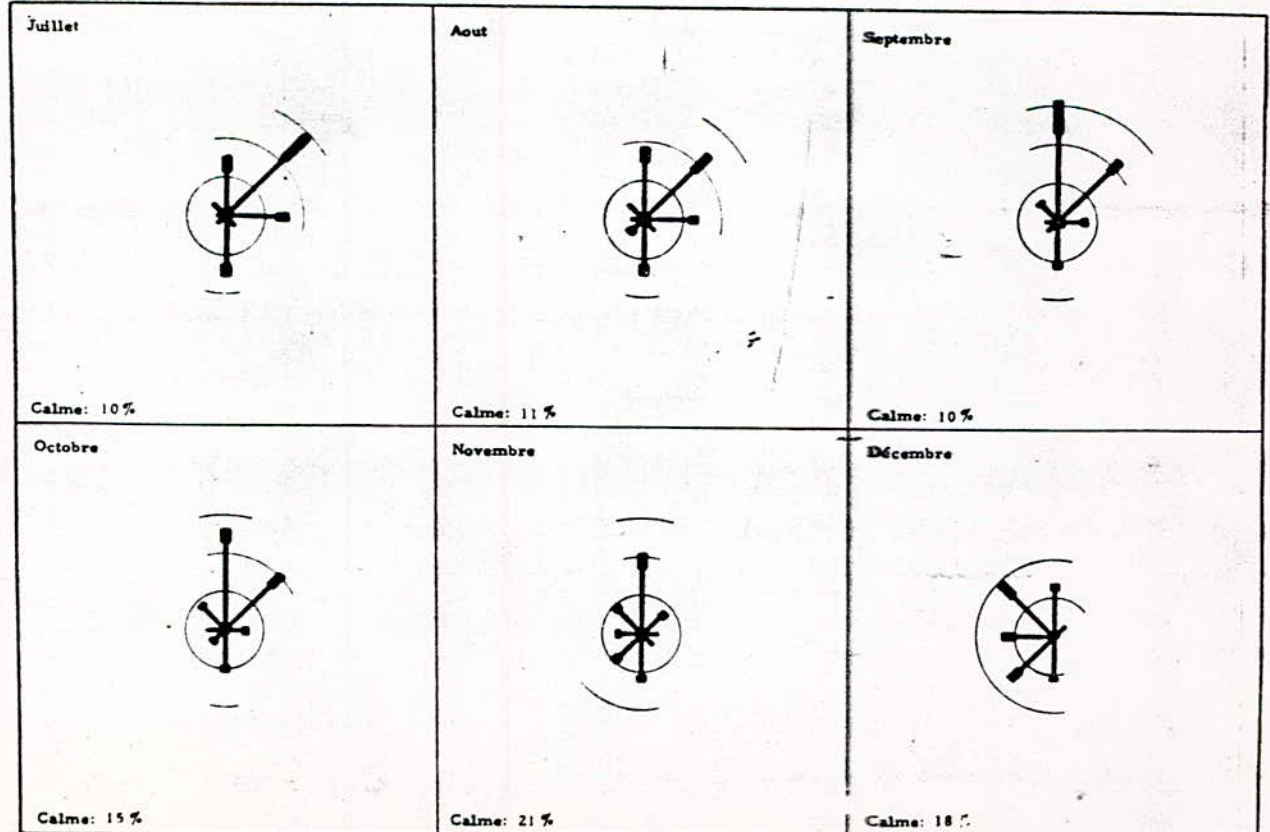
9
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : OUARGLA



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

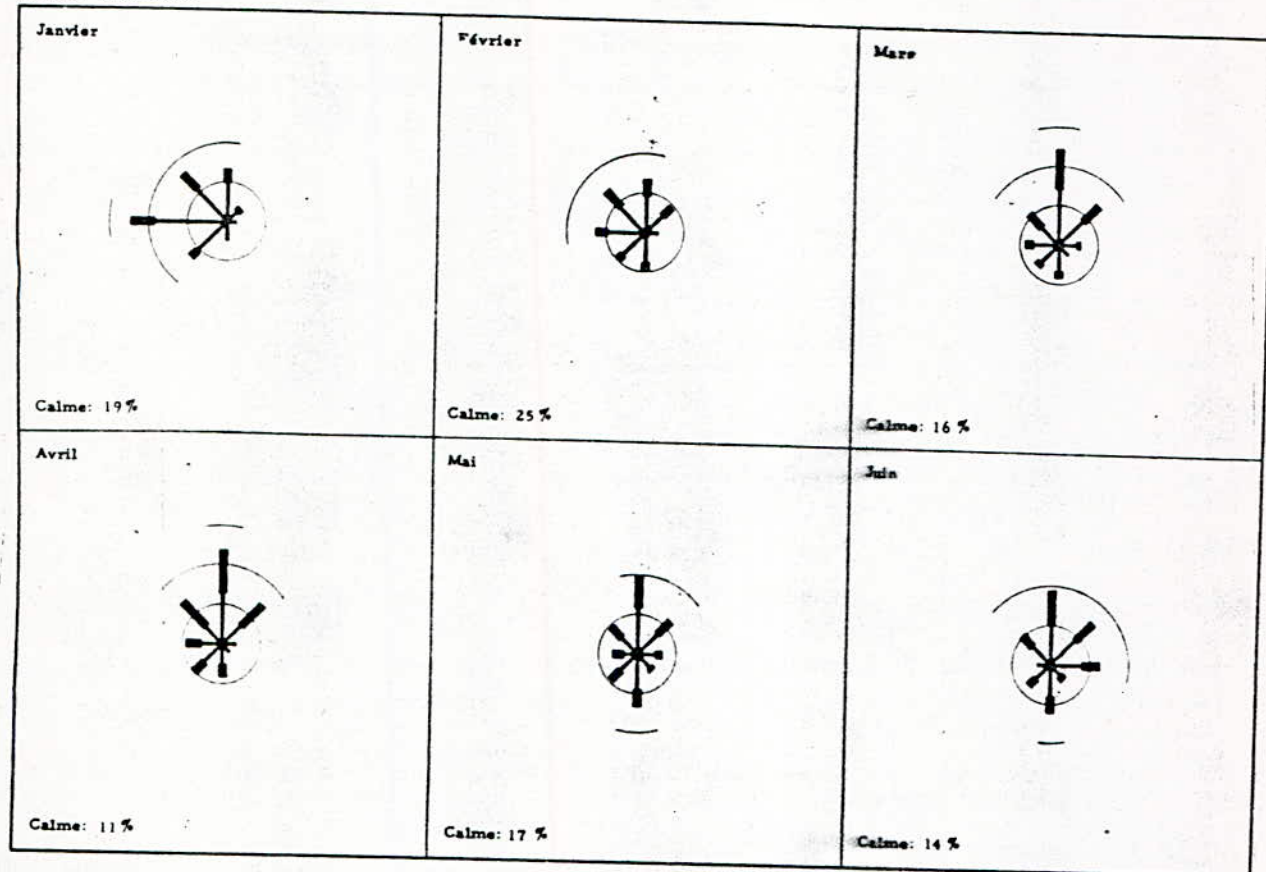
Station : OUARGLA



10

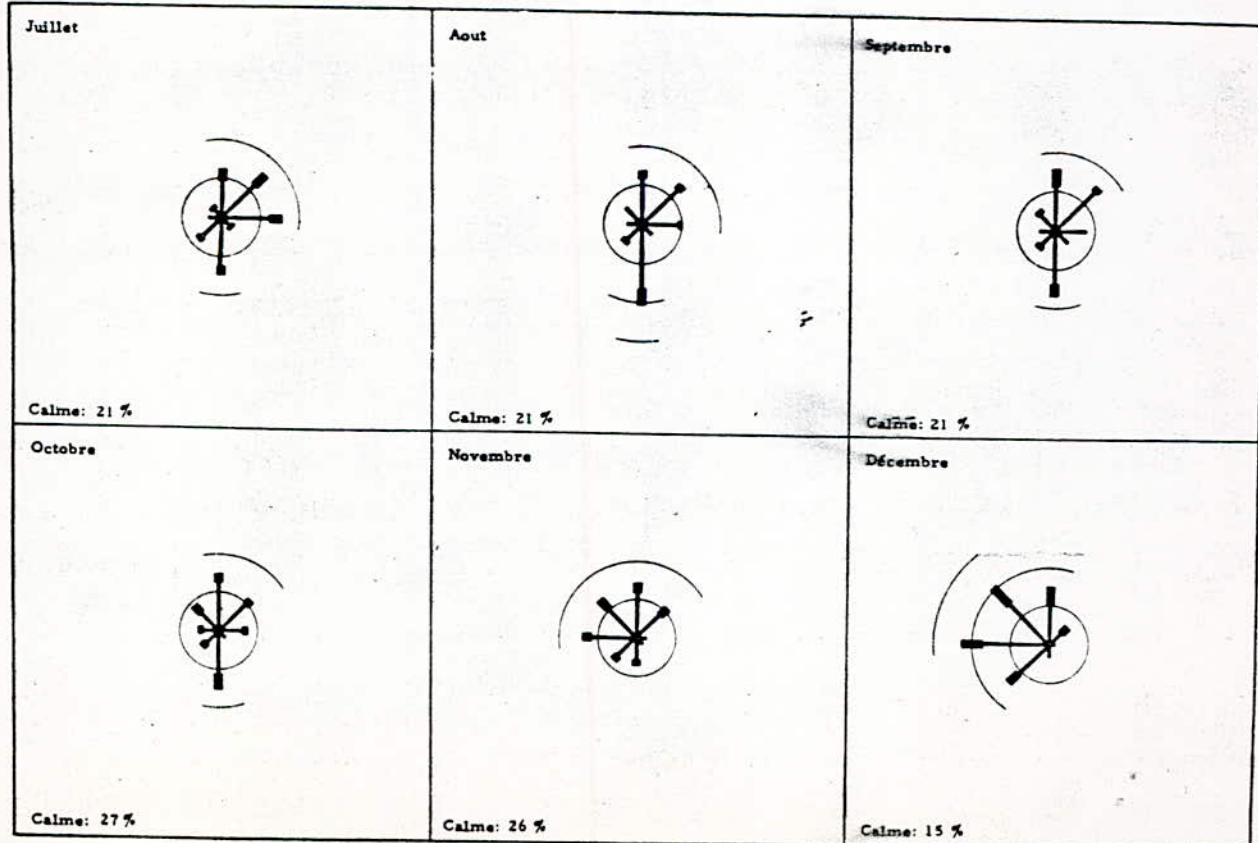
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : GHARDALA



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : GHARDALA

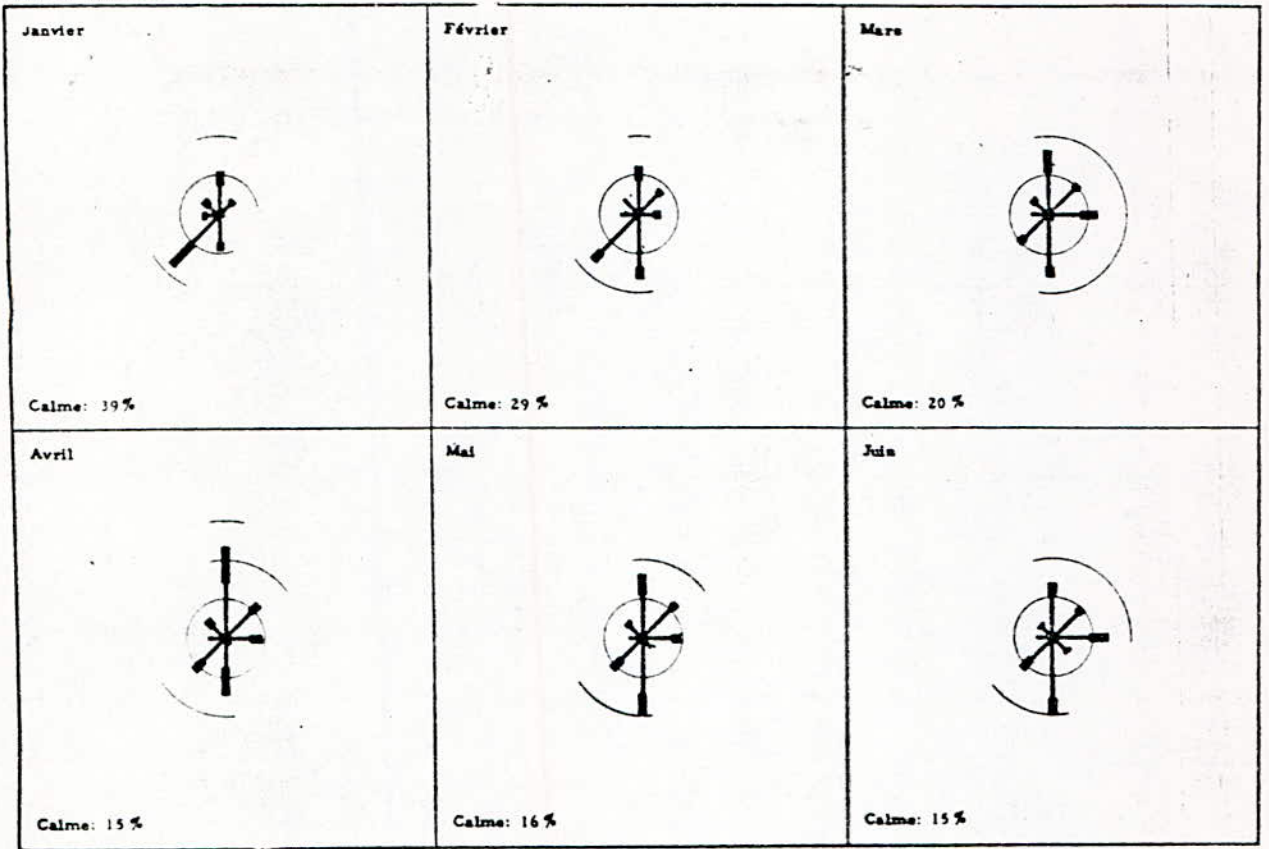


123

12

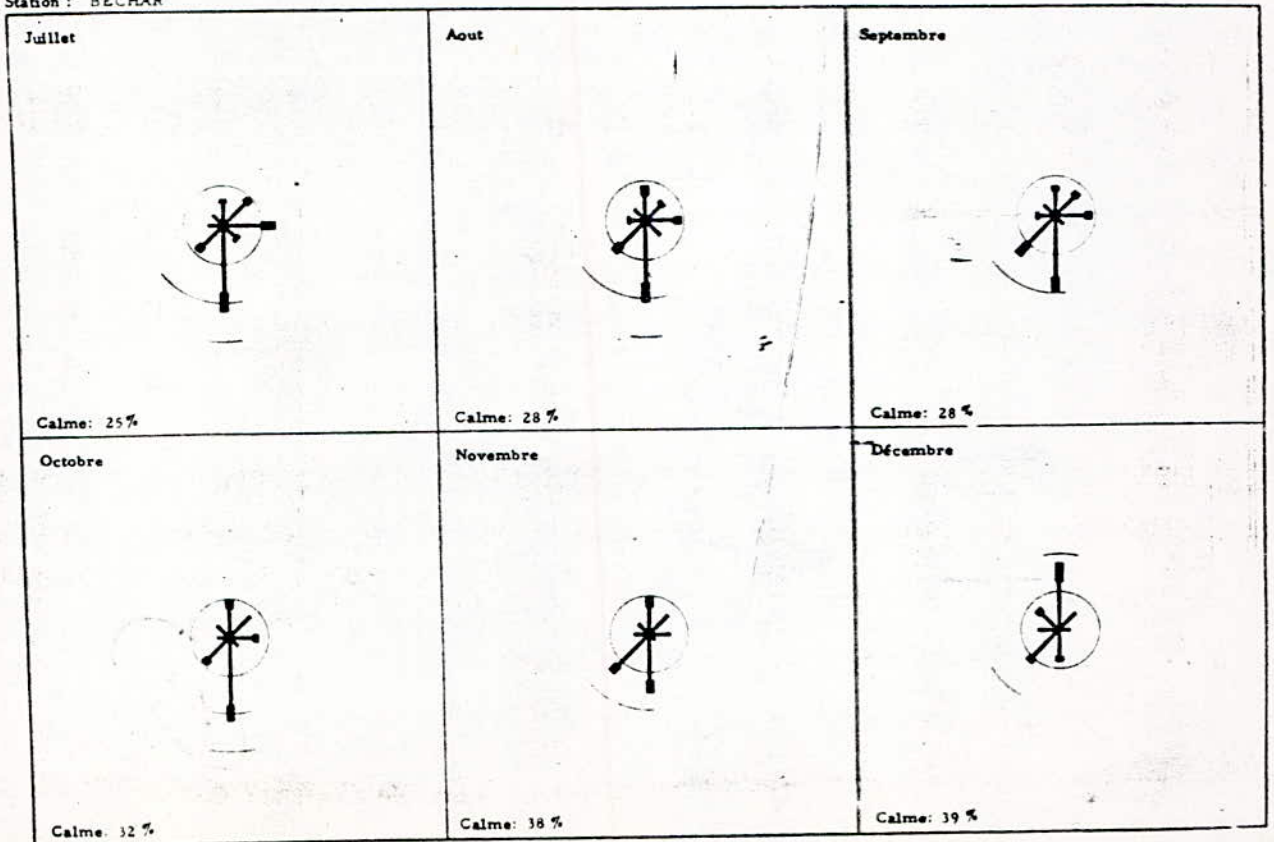
REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : BECHAR



REPARTITION FREQUENTIELLE DES VENTS

Station : BECHAR



32

124

1971

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	2,0	2,8	2,5	3,9	3,3	1,6	3,4	1,9	2,6	3,4	2,1	5,6
2	4,0	3,0	3,4	2,1	5,6	2,1	2,8	3,4	2,9	2,8	2,3	2,5
3	2,3	1,4	5,1	1,4	7,4	1,6	3,1	5,4	2,5	4,0	4,9	3,8
4	0,3	2,6	6,6	2,0	3,9	3,4	3,0	4,5	3,9	2,4	2,5	3,8
5	4,5	3,3	9,8	4,1	2,3	2,6	5,1	2,1	3,8	2,9	3,6	4,5
6	4,5	8,5	7,4	2,5	2,5	3,5	2,5	2,3	3,1	2,1	3,4	3,6
7	2,3	6,6	7,4	2,1	2,1	1,8	4,5	3,0	4,5	3,7	0,5	1,9
8	2,8	7,3	2,8	3,8	2,5	4,3	3,3	3,0	4,6	1,5	1,4	3,0
9	2,6	6,8	4,5	2,1	3,1	3,1	3,5	2,5	2,1	2,9	2,0	2,5
10	6,3	6,6	6,1	6,9	1,4	2,1	3,0	3,3	4,0	1,5	1,4	3,8
11	4,1	7,6	1,8	6,4	1,5	2,5	2,9	2,1	4,4	3,7	2,9	3,8
12	4,0	8,4	2,5	7,0	1,9	2,8	4,1	3,0	5,6	3,9	2,8	4,5
13	6,9	6,4	3,4	6,0	3,9	2,8	6,4	5,3	3,8	6,6	0,8	4,5
14	2,8	7,3	5,4	1,9	6,9	3,6	3,6	5,1	4,1	4,5	2,9	2,6
15	2,4	2,5	2,8	4,0	4,8	4,5	2,5	2,9	4,0	1,3	3,6	1,4

15	5,5	4,5	7,3	1,4	4,5	4,3	4,9	2,6	2,6	3,4	1,5	2,3
16	3,9	8,4	7,0	1,4	7,4	5,6	4,3	1,8	3,3	2,8	2,0	2,6
17	1,5	7,3	5,8	2,5	2,9	6,8	3,9	2,2	1,6	1,5	2,6	1,6
18	4,6	5,8	2,5	7,9	2,5	6,0	1,5	3,6	3,3	3,0	1,6	1,0
19	3,1	5,5	4,4	2,1	3,8	2,9	3,0	4,3	3,3	3,8	5,0	1,1
20	7,0	2,1	5,6	1,6	3,3	1,6	2,3	3,0	6,0	2,9	3,9	1,0
21	6,5	1,0	5,0	2,4	3,5	3,1	1,4	4,2	5,8	1,8	3,0	0,6
22	7,4	0,5	7,8	3,9	5,4	1,8	3,0	4,6	3,8	1,8	6,6	2,3
23	3,5	2,1	4,9	6,9	5,8	3,3	3,1	3,6	2,8	2,9	4,5	0,6
24	5,3	1,5	3,9	5,9	6,1	2,1	3,0	2,9	2,0	2,8	5,4	0,8
25	3,8	2,4	2,3	2,3	5,3	4,4	2,5	3,1	5,9	2,0	1,0	0,9
26	2,0	1,5	1,1	1,4	6,1	1,6	2,1	3,1	3,1	1,9	8,6	0,8
27	2,3	2,6	4,1	1,9	6,4	2,8	2,5	3,1	3,9	2,5	4,3	1,1
28	0,9	3,9	2,6	3,1	4,6	2,0	2,6	2,8	2,5	3,0	6,5	1,9
29	2,1	/	2,3	2,9	4,1	2,6	2,0	3,3	0,9	2,7	8,0	4,1
30	4,9	/	3,5	2,3	2,4	3,5	2,1	3,9	2,5	2,1	8,1	6,9
31	6,6	/	6,9	/	2,6	/	1,3	2,8	/	1,8	/	5,0

1972

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	3,0	8,4	3,3	1,3	2,6	2,6	6,3	2,5	3,1	3,9	2,0	7,8
2	5,6	1,3	2,9	4,8	7,1	5,0	3,8	2,4	4,3	3,4	2,5	5,6
3	3,0	1,9	2,1	2,1	2,1	2,3	4,5	3,1	2,3	2,4	2,8	4,8
4	5,1	1,9	1,5	2,3	1,5	5,3	2,9	2,4	3,0	2,3	1,3	2,5
5	3,3	2,9	1,8	6,8	1,5	4,9	4,1	2,6	2,4	2,1	0,8	1,1
6	3,8	1,0	2,8	1,3	1,0	6,3	4,5	1,9	3,1	3,5	2,3	3,9
7	2,8	1,4	5,3	4,3	5,6	5,3	4,0	2,9	3,4	3,9	6,6	5,9
8	0,9	0,4	5,5	2,5	5,5	1,9	4,4	3,3	2,9	7,8	8,4	4,4
9	0,6	1,4	5,0	5,9	1,8	4,1	2,8	3,3	2,3	4,8	0,3	3,9
10	0,5	2,4	3,0	4,6	3,0	4,8	3,3	3,5	3,6	4,4	5,0	3,5
11	2,4	2,9	5,9	1,5	4,0	4,4	2,0	2,5	2,0	3,0	5,8	2,8
12	1,9	0,8	6,3	3,4	2,5	2,1	3,1	2,9	2,6	1,5	6,1	1,8
13	1,9	3,3	3,9	2,9	1,1	2,5	3,1	1,4	2,9	1,3	4,3	3,3
14	1,9	1,6	2,4	1,3	1,3	2,8	3,3	5,5	2,5	4,0	2,9	0,5

16	6,0	3,5	2,6	3,5	3,8	4,6	4,0	4,5	3,5	1,6	1,8	1,3
17	8,4	5,3	3,5	3,0	1,9	2,0	1,9	4,6	2,0	4,5	1,5	1,0
18	7,9	3,5	2,9	3,6	4,8	1,5	2,1	3,6	2,0	2,3	3,6	1,8
19	8,8	6,5	3,0	4,0	1,9	1,5	3,3	5,9	3,1	4,5	3,3	0,9
20	6,8	3,9	2,6	4,0	2,5	3,8	2,0	5,4	3,1	2,3	4,9	4,3
21	6,9	4,8	4,0	3,6	2,5	6,6	2,8	4,8	4,9	4,0	3,1	3,3
22	8,4	7,0	3,5	2,5	3,1	5,4	2,0	3,1	4,4	3,5	1,6	5,0
23	7,3	9,8	3,0	2,0	2,9	1,1	1,9	2,3	5,1	3,0	2,5	4,8
24	2,6	6,9	3,1	4,0	2,5	2,5	3,0	4,3	3,1	1,6	3,4	3,4
25	5,3	8,0	3,0	3,0	2,4	2,6	3,1	3,4	4,5	3,9	3,6	2,3
26	6,4	5,3	1,1	5,8	...	2,0	2,5	4,6	6,4	4,0	2,1	2,5
27	5,6	3,6	2,9	5,1	1,1	2,1	3,9	2,8	5,5	3,6	3,4	1,0
28	4,6	2,5	1,6	2,3	3,9	2,3	4,6	2,6	3,0	5,3	2,9	4,3
29	4,9	4,0	1,4	1,8	2,0	2,1	4,1	2,8	4,6	3,4	3,5	3,7
30	4,1	/	1,9	4,3	1,6	2,5	2,4	3,5	2,5	1,5	5,6	3,9
31	3,5	/	2,0	/	2,0	/	1,5	4,9	/	3,0	/	9,8

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déc.	Année	
ENT (m/s) 974	N	5	16	10	6	7	5	6	6	5	0	4	6,33	
	NNE	3	0	5	3	5	7	8	7	6	3	5	4,83	
	NE	4	2	5	5	8	15	11	10	8	10	5	7,33	
	ENE	8	0	9	10	8	13	10	9	8	7	4	7,76	
	E	5	3	10	5	4	10	7	5	3	6	2	4	6,83
	ESE	0	4	6	0	0	0	4	2	3	0	0	0	1,58
	SE	0	0	3	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0,58
	SSE	2	5	3	2	2	0	0	0	0	2	2	3	1,75
	S	2	3	5	5	5	8	3	3	5	0	10	3	4,33
	SSW	5	7	9	0	5	1	2	4	5	4	18	4	4,86
	SW	6	6	18	5	7	6	6	2	7	5	8	5	6,83
	WSW	7	10	7	8	7	9	5	8	6	13	9	7	8,83
	W	8	20	11	13	11	10	6	6	12	12	7	9	10,41
	WNW	8	13	15	9	9	12	0	8	8	10	5	3	8,33
NW	6	19	17	10	7	9	4	11	9	10	12	4	9,75	
NNW	5	7	14	8	6	8	8	10	9	8	6	4	7,75	
ENT (m/s) 975	N	7	10	5	5	7	11	9	9	6	5	9	3	7,083
	NNE	5	7	9	9	9	6	8	9	10	9	3	6	7,5
	NE	8	8	6	10	12	4	6	8	9	8	0	7	7,16
	ENE	2	6	7	4	4	0	0	6	6	5	2	4	3,83
	E	2	4	3	0	0	0	0	5	5	4	4	4	2,41
	ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,083
	SE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	7	0,83
	SSE	0	6	3	0	13	0	3	3	3	0	5	7	3,58
	S	12	5	3	0	7	5	3	5	3	6	5	8	5,166
	SSW	17	7	8	3	11	4	3	4	5	3	9	10	7,83
	SW	8	6	4	5	5	7	6	6	6	6	7	11	6,41
	WSW	7	8	8	6	8	7	4	7	5	6	10	12	7,33
	W	10	12	13	8	10	9	8	10	7	8	11	8	10,33
	WNW	8	9	12	9	9	10	9	11	7	10	9	13	9,66
NW	10	8	11	8	9	8	7	7	8	7	5	6	7,5	
NNW	8	10	6	7	7	9	7	8	6	6	10	8	7,66	

Mois de l'année		Jan	FEV	MAR	AVR	Mai	Juin	Juill	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC	Année	
ENT (m/s) 976	N	6	7	9	8	6	4	7	6	7	5	10	4	6,58	
	NNE	6	6	9	11	7	8	7	6	6	10	6	0	6,83	
	NE	7	9	7	10	9	13	11	11	8	8	8	5	11,58	
	ENE	10	11	7	7	4	9	10	10	8	10	8	5	8,25	
	E	3	4	5	0	0	7	7	5	5	5	6	6	4,41	
	ESE	0	3	0	0	0	0	0	0	2	3	3	6	1,41	
	SE	0	0	0	12	3	5	0	0	2	2	7	7	3	
	SSE	2	3	8	9	0	0	0	2	2	0	4	11	11	3,41
	S	5	12	7	8	7	4	1	2	9	11	7	15	15	7,33
	SSW	4	7	5	6	5	8	6	3	12	4	9	8	8	6,41
	SW	8	7	8	7	5	10	5	4	10	12	8	9	9	7,75
	WSW	9	11	7	10	7	5	3	6	5	13	9	18	18	8,58
	W	11	15	12	11	7	9	7	6	9	16	12	17	17	11
	WNW	10	13	8	7	4	6	5	9	8	14	8	6	6	8,16
NW	10	4	7	9	7	9	12	9	11	8	9	14	14	9,08	
NNW	5	4	7	6	5	8	10	9	7	8	11	7	7	7,25	

ENT (m/s) 977	N	7	6	6	7	7	6	7	7	8	6	6	6	6,66
	NNE	8	0	7	7	5	8	6	9	7	8	4	2	5,91
	NE	11	0	10	7	8	9	11	9	10	8	13	7	8,58
	ENE	8	0	6	7	11	14	14	9	11	8	6	7	8,41
	E	8	6	3	6	12	6	7	10	8	6	5	5	6,83
	ESE	7	4	1	0	13	4	1	0	0	6	3	8	3,91
	SE	8	0	1	4	1	0	3	0	0	8	3	8	3,08
	SSE	12	4	3	4	0	4	2	3	0	9	4	8	4,66
	S	14	8	5	6	3	3	3	0	3	16	4	7	6
	SSW	9	5	0	6	5	4	2	3	3	8	4	8	4,83
	SW	7	6	9	7	12	10	4	7	4	11	6	11	7,83
	WSW	15	10	12	6	9	8	7	7	5	10	7	12	9
	W	14	18	17	13	12	13	10	8	13	10	13	12	12,75
	WNW	9	12	9	14	10	11	10	10	2	8	9	5	9,08
NW	11	9	10	14	9	11	11	11	8	11	8	5	9,83	
NNW	3	8	7	7	8	10	9	7	14	8	7	0	5,83	

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octo.	Nov.	Déc.	Année	
VENT (m/s) 1978	N	1	4	6	6	7	7	7	7	5	5	4	5,75	
	NNE	3	2	5	9	6	6	5	7	6	5	2	5,16	
	NE	9	0	5	9	8	9	10	15	9	6	5	4,83	
	ENE	9	0	2	7	7	12	9	10	9	7	2	6,83	
	E	7	4	3	6	6	10	2	6	8	7	5	5,33	
	ESE	3	0	0	3	4	2	0	3	0	4	2	1	1,83
	SE	0	2	2	1	0	2	0	2	0	0	0	0	0,75
	SSE	5	14	6	2	13	3	0	0	3	3	2	10	5,08
	S	3	16	1	3	5	0	0	3	4	6	3	13	4,75
	SSW	8	4	4	4	4	3	4	5	3	3	5	10	4,75
	SW	8	6	7	10	4	7	7	9	5	9	8	9	7,42
	WSW	13	15	9	11	12	5	6	6	6	10	7	10	9,16
	W	14	11	15	17	14	11	7	6	8	16	16	14	12,4
	WNW	13	11	8	16	13	11	0	9	9	0	9	8	8,42
NW	14	10	8	10	9	13	10	9	10	13	10	6	10,46	
NNW	15	8	8	8	10	9	8	8	8	12	10	8	9,33	

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	AOÛT	Sept.	Octo.	Nov.	Déc.	Année
VENTS DOMINANTS	SW	WSW	SW	SW	NNE	NW	NE	NW	NNW	SW	SW	SW	
<u>MOYENS</u>	et W	à WNW	à W	à WNW	à ENE et NW à NNW	à E	à ENE	à ENE	à ENE	à W	à W et WSW	à W	
<u>MENSUELLE</u>													

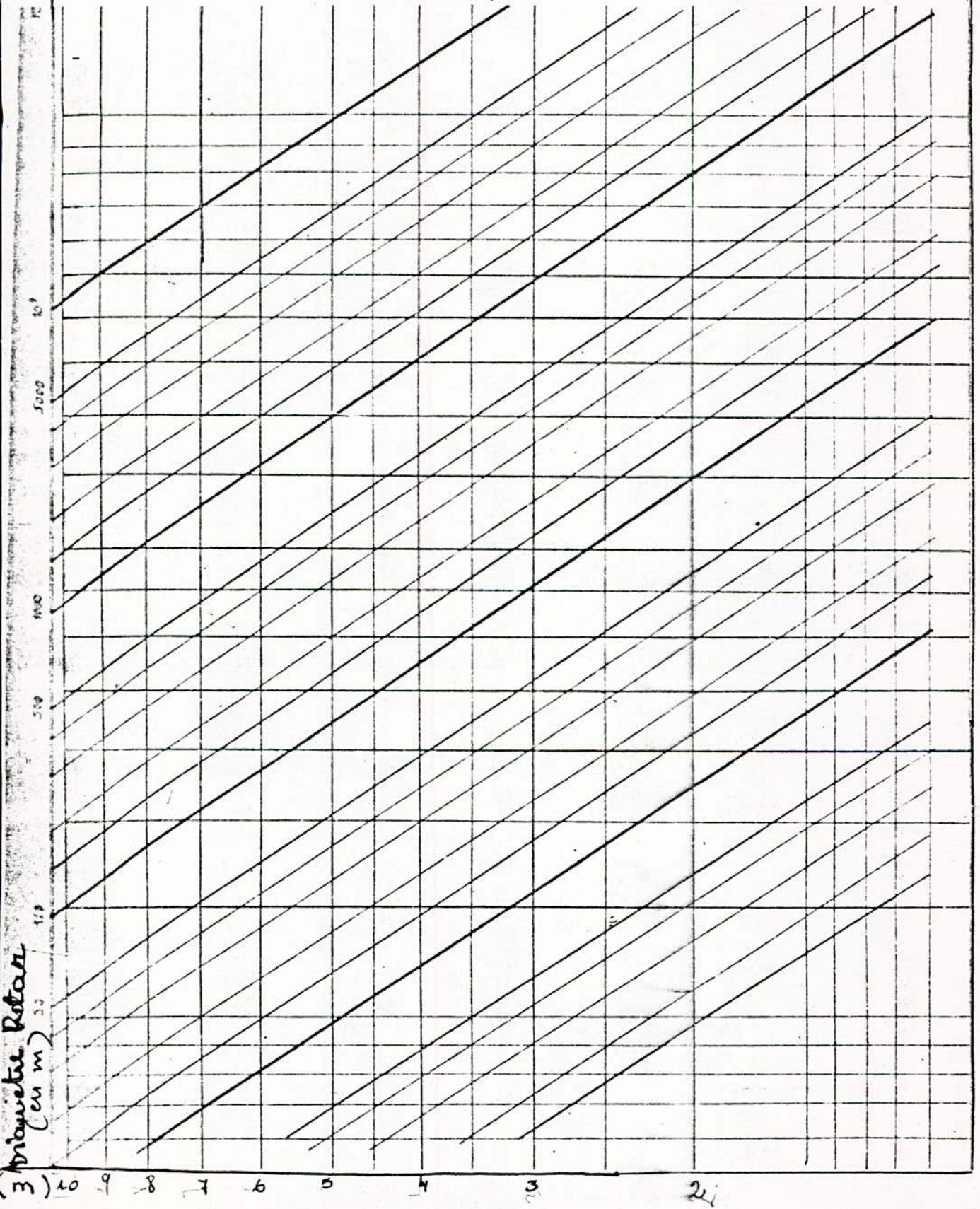
ANNÉE 1979

7

Puissance
en W

ABBAQUE A 40% DE LA PUISSANCE DE BETZ

Vitesse des

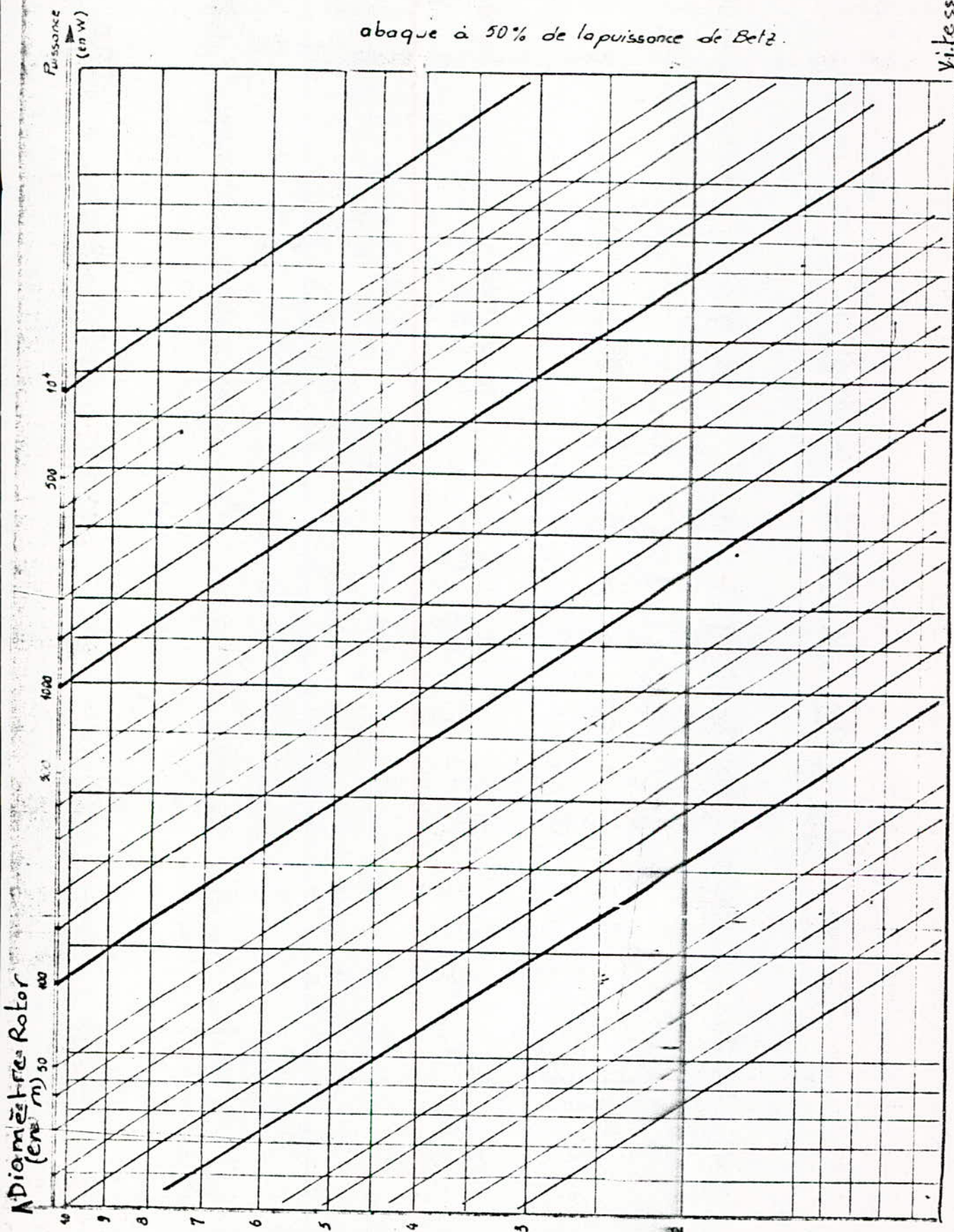


Diamètre Rotatif
(en m)

10 9 8 7 6 5 4 3 2

abaque à 50% de la puissance de Betz.

Vitesse
du vent



abaque à 60% de la puissance de Betz

Vitesse du

Puissance
(en w)

47

500

1500

50

150

50

50

50

50

Diamètre Rotor
(en m)

4

5

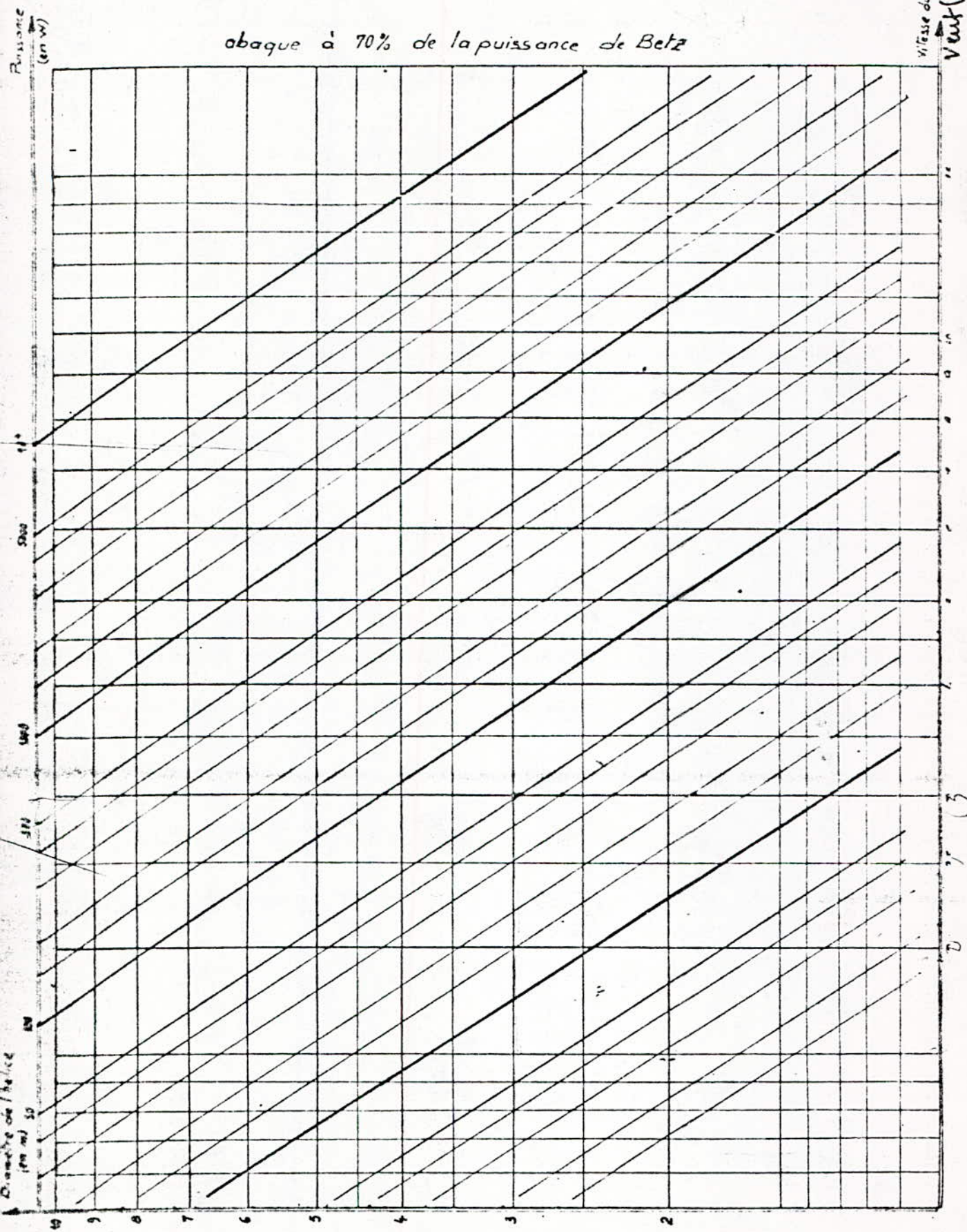
6

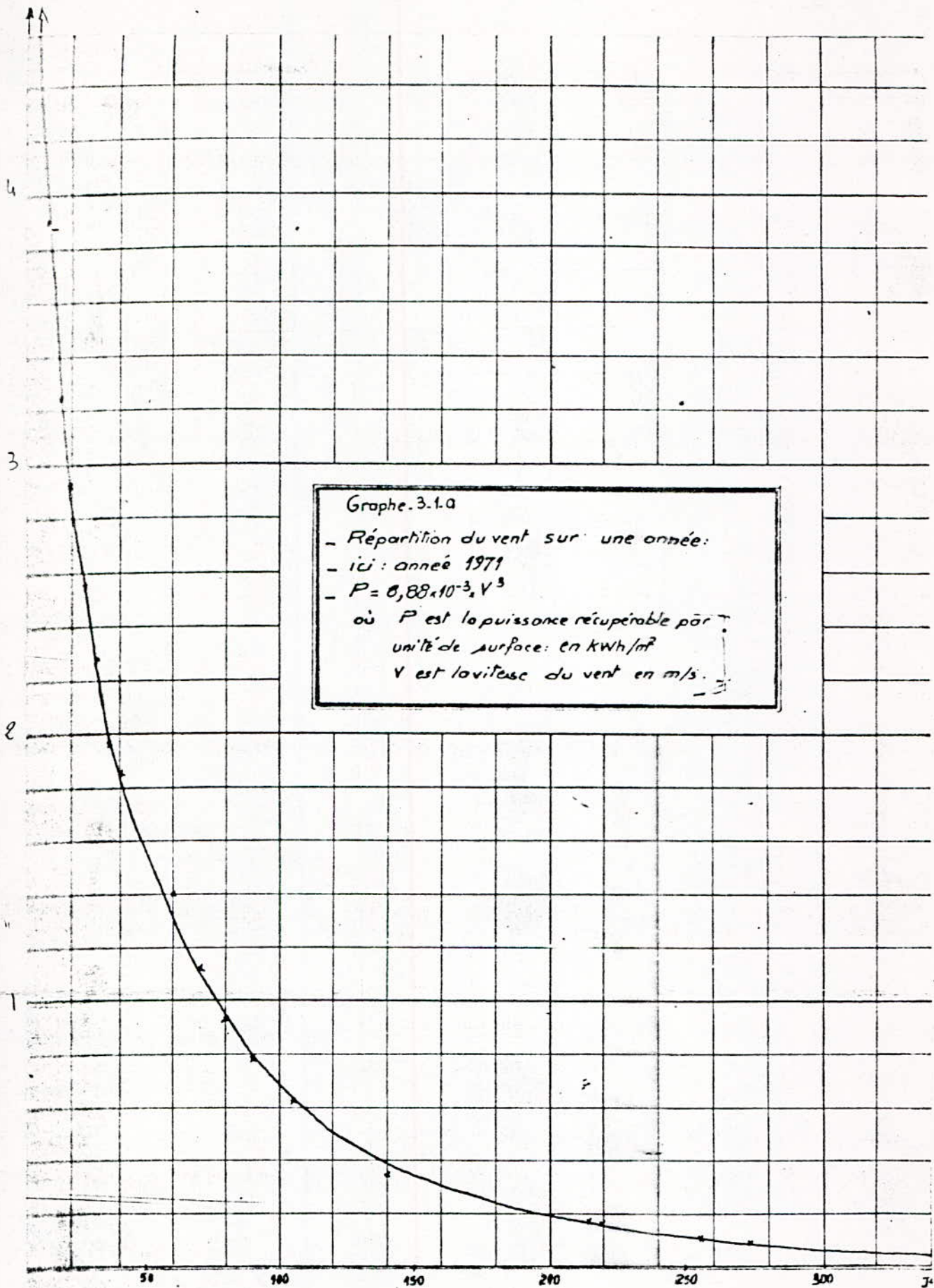
7

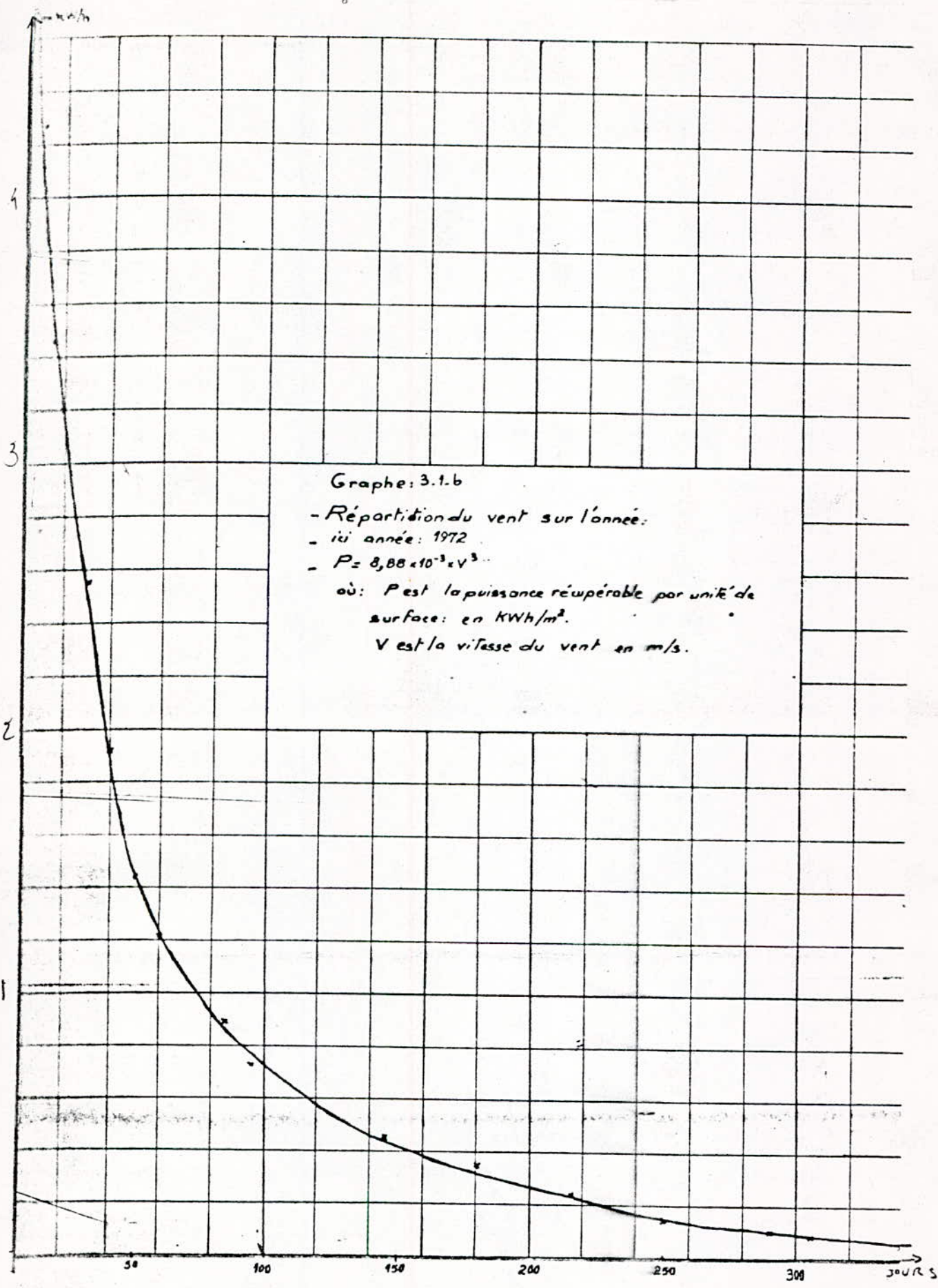
8

9

abaque à 70% de la puissance de Betz







Graphe: 3.1.b

- Répartition du vent sur l'année.

- in année: 1972

- $P = 8,88 \times 10^{-3} \times V^3$

où: P est la puissance récupérable par unité de surface: en KWh/m^2 .

V est la vitesse du vent en m/s .

Graphe: 3.1-c.

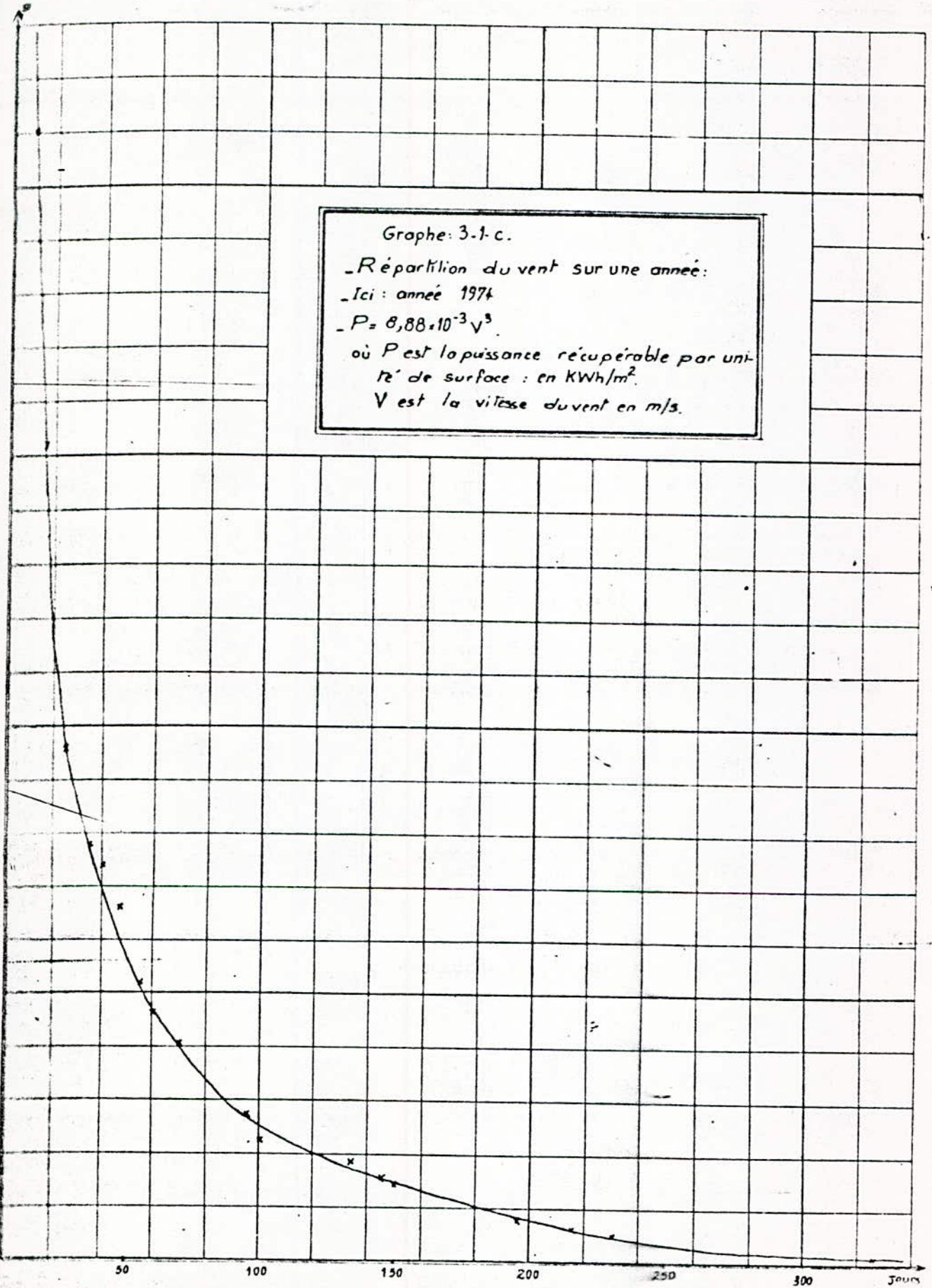
- Répartition du vent sur une année:

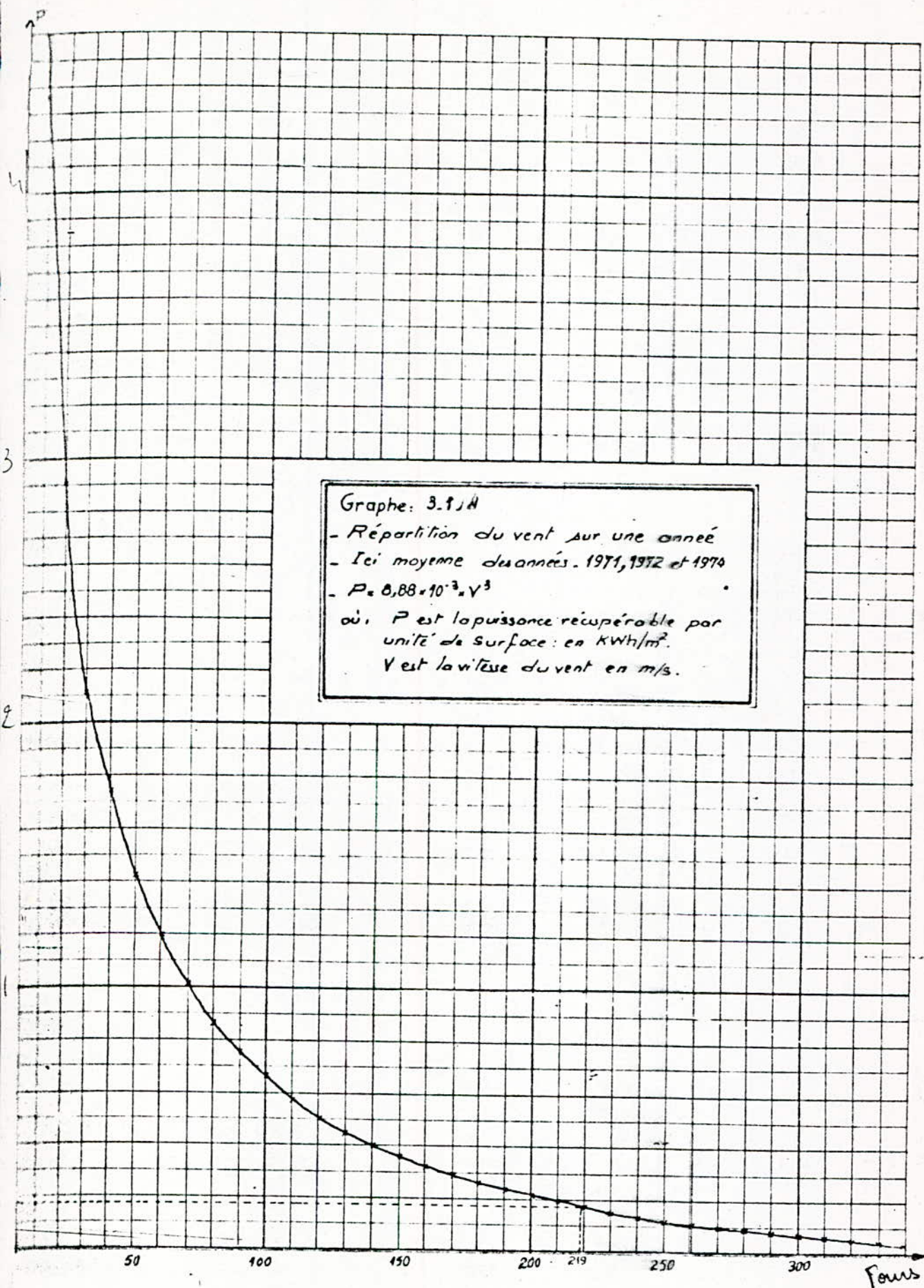
- Ici: année 1974

- $P = 8,88 \cdot 10^{-3} V^3$

où P est la puissance récupérable par unité de surface: en KWh/m^2 .

V est la vitesse du vent en m/s .





Graphe: 3.11A
 - Répartition du vent sur une année
 - Ici moyenne des années: 1971, 1972 et 1974
 - $P = 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot V^3$
 où: P est la puissance récupérable par
 unité de surface: en kWh/m².
 V est la vitesse du vent en m/s.

PRATIQUEMENT RECUPERABLE

STATION	VITESSE DU VENT m/s	NOMBRE D'HEURES AN.	%	ENERGIE EN KWH		
				∅ 3m	∅ 4m	∅ 5m
ORAN	3	3819	43,6	269	478	747
	4	2913	32,2	486	965	1351
	5	1921	20,8	594	1056	1650
	6	543	6,2	306	544	850
MILIANA	3	3531	40,3	249	442	691
	4	1281	14,6	214	380	594
	5	552	6,3	190	320	500
ALGER (D.E.B)	3	4539	51,8	320	568	998
	4	2376	27,1	397	705	1106
	5	1911	21,8	623	1108	1732
	6	549	6,3	309	550	859
BEJAIA	3	5904	67,4	416	739	1155
	4	4195	47,9	699	1242	1942
	5	1638	18,7	534	950	1484
	6	360	4,0	203	361	563
SKIKDA	3	3102	35,4	218	389	607
	4	642	7,3	107	190	298
ANNABA	3	4749	54,2	334	595	929
	4	2184	24,9	365	648	1013
	5	1461	16,7	476	847	1324
	6	732	8,3	412	733	1146
CONSTANTINE	3	2733	31,2	192	342	535
	4	1017	11,6	170	302	472
BATNA	3	6654	7,6	469	833	1302
	4	4834	55,2	807	1435	2243
	5	3012	34,4	992	1746	2729
	6	1668	19	940	1671	2612

STATION	VITESSE DU VENT, m/s	NOMBRE D'HEURES AN.	%	ENERGIE EN KWH		
				∅ = 3m	∅ = 4m	∅ 5m
TEBESSA	3	2739	31,2	193	343	536
	4	1092	12,3	182	324	506
- SETIF	3	3201	36,5	225	401	626
	4	2286	26,1	381	679	1060
	5	915	10,4	299	530	829
	6	273	3,1	154	273	427
MASCARA	3	3195	36,5	225	400	625
	4	2106	24	352	625	977
	5	1085	12,5	357	635	992
	6	552	6,3	311	553	864
BISKRA	3	6186	70,6	436	775	1211
	4	2271	25,9	379	674	1054
	5	549	6,3	179	318	497
EL-OUED	3	6381	72,8	450	799	1249
	4	4377	50	731	1300	2031
	5	1545	17,6	504	896	1400
	6	360	4,1	203	361	561
OUARGLA	3	5757	65,7	406	721	1127
	4	2643	30,2	441	785	1226
	5	543	6,2	177	315	492
HASSI- MESSADUD	3	6675	76,2	470	836	1306
	4	4563	52,1	762	1355	2117
	5	2280	26	74	1322	2066
	6	456	5,2	257	457	714
GHARDAIA	3	5016	57,2	353	628	982
	4	2724	31,1	455	808	1264
	5	900	10,3	293	522	815
EL-GOLEA	3	7302	83,3	514	915	1429
	4	3654	41,7	610	1085	1695
	5	1818	20,7	593	1054	1647
	6	552	6,3	311	553	864

STATION	VITESSE DU VENT m/s	NOMBRE D'HEURES AN.	%	ENERGIE EN KWH		
				∅ 3 m	∅ 4 m	∅ 5 m
TLEMCEM	3	1626	18,6	114	203	318
	4	84	0,96	14	85	39
BECHAR	3	4560	52	321	571	892
	4	2469	28,2	412	733	1145
	5	921	10,5	300	534	834
EL BAYADH	3	6024	68,7	424	754	1179
	4	3477	39,7	581	1032	1613
	5	1737	19,8	566	1007	1574
LAGHOVAT	3	5937	67,7	418	744	1162
	4	3285	37,5	549	975	1524
	5	909	10,3	296	527	823
TINDOUF	3	7743	88,4	545	970	1515
	4	4581	52,3	765	1360	2126
	5	999	11,4	326	579	905
	6	90	1	50	90	140

TABLEAU N° 13

Notation:

V: Vitesse moyenne journalière

P: Puissance en Kw/m² calculée à partir de la formule

$$P = 0,37.24.V^3.1000 \text{ EN KWH/m}^2$$

NJ: Nombre de jours de l'année où V est observée

CJ: Nombre de jours de l'année où la vitesse est supérieure ou égale à V.

ANNÉES		1971		1972		1974	
V	P	NJ	CJ	NJ	CJ	NJ	CJ
0,3	$2,39 \times 10^{-4}$	1	365	1	366	2	365
0,4	$5,68 \times 10^{-4}$	1	364			2	363
0,5	$1,11 \times 10^{-3}$	3	363	1	365	4	361
0,6	$1,91 \times 10^{-3}$	3	360			2	357
0,7	$3,05 \times 10^{-3}$					5	355
0,8	$4,54 \times 10^{-3}$	4	357	1	365	10	350
0,9	$6,47 \times 10^{-3}$	4	353	1	363	6	340
1,0	$8,88 \times 10^{-3}$	6	349	2	362	3	334
1,1	$1,18 \times 10^{-2}$	5	343	3	360	11	331
1,2	$1,53 \times 10^{-2}$			1	357	2	320
1,3	$1,95 \times 10^{-2}$	8	338	2	356	10	318

		1971	1972	1974
1,4	$2,44 \times 10^{-2}$	7 330	7 354	5 308
1,5	$2,99 \times 10^{-2}$	11 323	8 347	7 303
1,6	$3,64 \times 10^{-2}$	7 312	7 339	11 296
1,7	$4,36 \times 10^{-2}$			1 285
1,8	$5,18 \times 10^{-2}$	8 305	5 332	10 284
1,9	$6,09 \times 10^{-2}$	10 297	9 327	12 274
2,0	$7,10 \times 10^{-2}$	9 287	13 318	18 262
2,1	$8,22 \times 10^{-2}$	14 278	15 305	14 244
2,2	$9,46 \times 10^{-2}$	1 264		4 230
2,3	$1,08 \times 10^{-1}$	14 263	11 290	11 226
2,4	$1,23 \times 10^{-1}$	10 249	4 279	8 215
2,5	$1,38 \times 10^{-1}$	16 239	25 275	12 207
2,6	$1,56 \times 10^{-1}$	13 223	11 250	7 195
2,7	$1,75 \times 10^{-1}$	1 210		2 188
2,8	$1,95 \times 10^{-1}$	12 209	13 239	8 186
2,9	$2,16 \times 10^{-1}$	15 197	11 226	9 178
3,0	$2,40 \times 10^{-1}$	13 182	16 215	10 169

		1 9 7 1	1 9 7 2	1 9 7 4
3,1	$2,64 \times 10^{-1}$	1	169	12 199 10 159
3,2	$2,91 \times 10^{-1}$			5 149
3,3	$3,19 \times 10^{-1}$	13	156	7 187 10 144
3,4	$3,49 \times 10^{-1}$	4	143	12 180 10 134
3,5	$3,80 \times 10^{-1}$	7	139	12 168 13 124
3,6	$4,14 \times 10^{-1}$	3	132	11 156 9 111
3,7	$4,45 \times 10^{-1}$			3 145
3,8	$4,87 \times 10^{-1}$	7	129	9 142 2 102
3,9	$5,27 \times 10^{-1}$	13	122	10 133 7 100
4,0	$5,68 \times 10^{-1}$	3	109	14 123 5 95
4,1	$6,12 \times 10^{-1}$	5	106	6 109 5 88
4,2	$6,58 \times 10^{-1}$	1	101	
4,3	$7,06 \times 10^{-1}$	7	100	5 103 5 83
4,4	$7,56 \times 10^{-1}$	6	93	2 98 8 78
4,5	$8,09 \times 10^{-1}$	5	87	15 96 6 70
4,6	$8,64 \times 10^{-1}$	4	82	7 81 4 64
4,7	$9,22 \times 10^{-1}$			2 60

		1 9 7 1	1 9 7 2	1 9 7 4
4,8	$9,81 \times 10^{-1}$	4 78	6 74	3 58
4,9	1,04	4 74	5 68	1 55
5,0	1,11	6 70	1 63	5 54
5,1	1,17	1 64	5 62	3 49
5,2	1,25			1 46
5,3	1,32	4 63	5 57	2 45
5,4	1,40	2 59	4 52	3 43
5,5	1,48	5 57	1 48	5 40
5,6	1,56	5 52	5 47	6 35
5,8	1,74	6 47	1 42	1 29
5,9	1,82	5 41	1 41	3 28
6,0	1,92	2 36	2 40	3 25
6,1	2,01	3 34	1 38	
6,2	2,12			1 22
6,3	2,22	3 31	1 37	
6,4	2,32	3 28	5 36	2 21
6,5	2,44	2 27	1 31	

		1971	1972	1974
6,6	2,55	3 25	4 30	
6,7	2,67			1 18
6,8	2,79	2 22	2 26	
6,9	2,92	3 20	5 24	2 17
7,0	3,04	3 17	2 19	1 15
7,1	3,18	1 14		
7,2	3,31			1 14
7,3	3,45	2 13	3 17	
7,4	3,60	2 11	3 14	
7,5	3,75			1 13
7,6	3,89		1 11	2 12
7,8	4,21	3 9		2 10
7,9	4,37		1 10	2 8
8,0	4,55	1 6	1 9	
8,1	4,72	1 5		1 8
8,4	4,72	3 4	3 8	

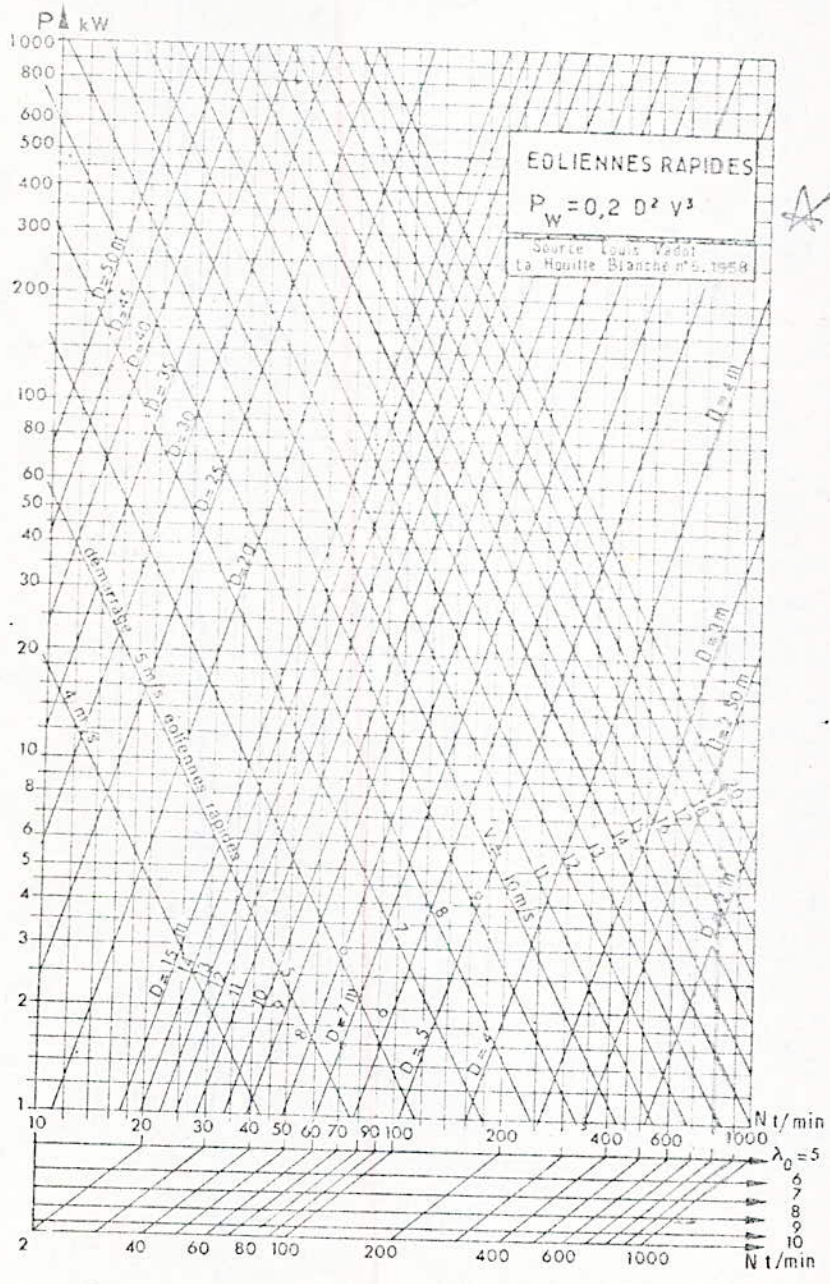
		1 9 7 1	1 9 7 2	1 9 7 4
8,5	5,45		1 5	1 5
8,6	5,65	1 1		
8,8	6,05		1 4	
9,0	6,47			1 4
9,8	8,35		3 3	
11,3	1,28x10			1 3
11,4	1,32x10			1 2
14,1	2,49x10			1 1

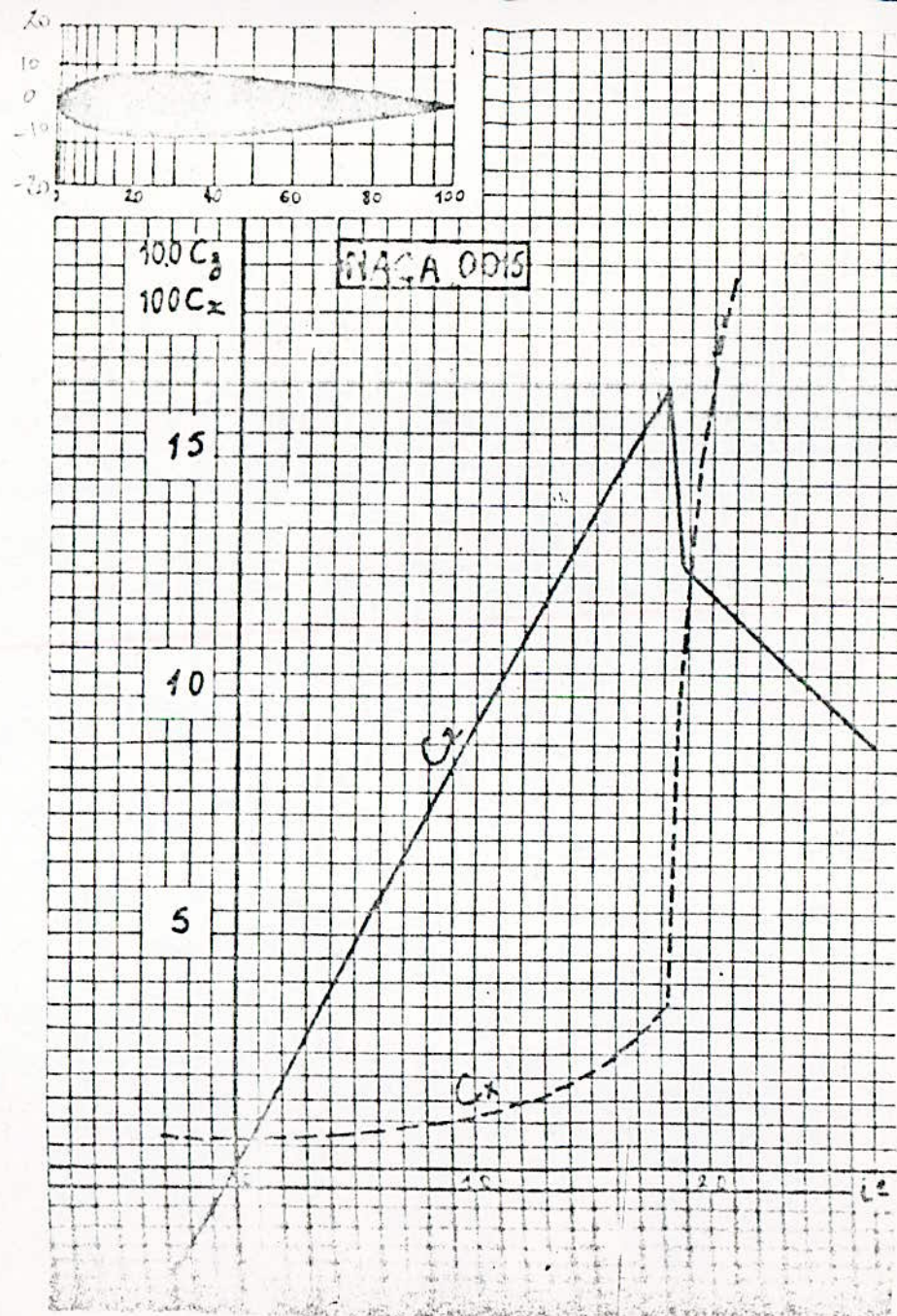
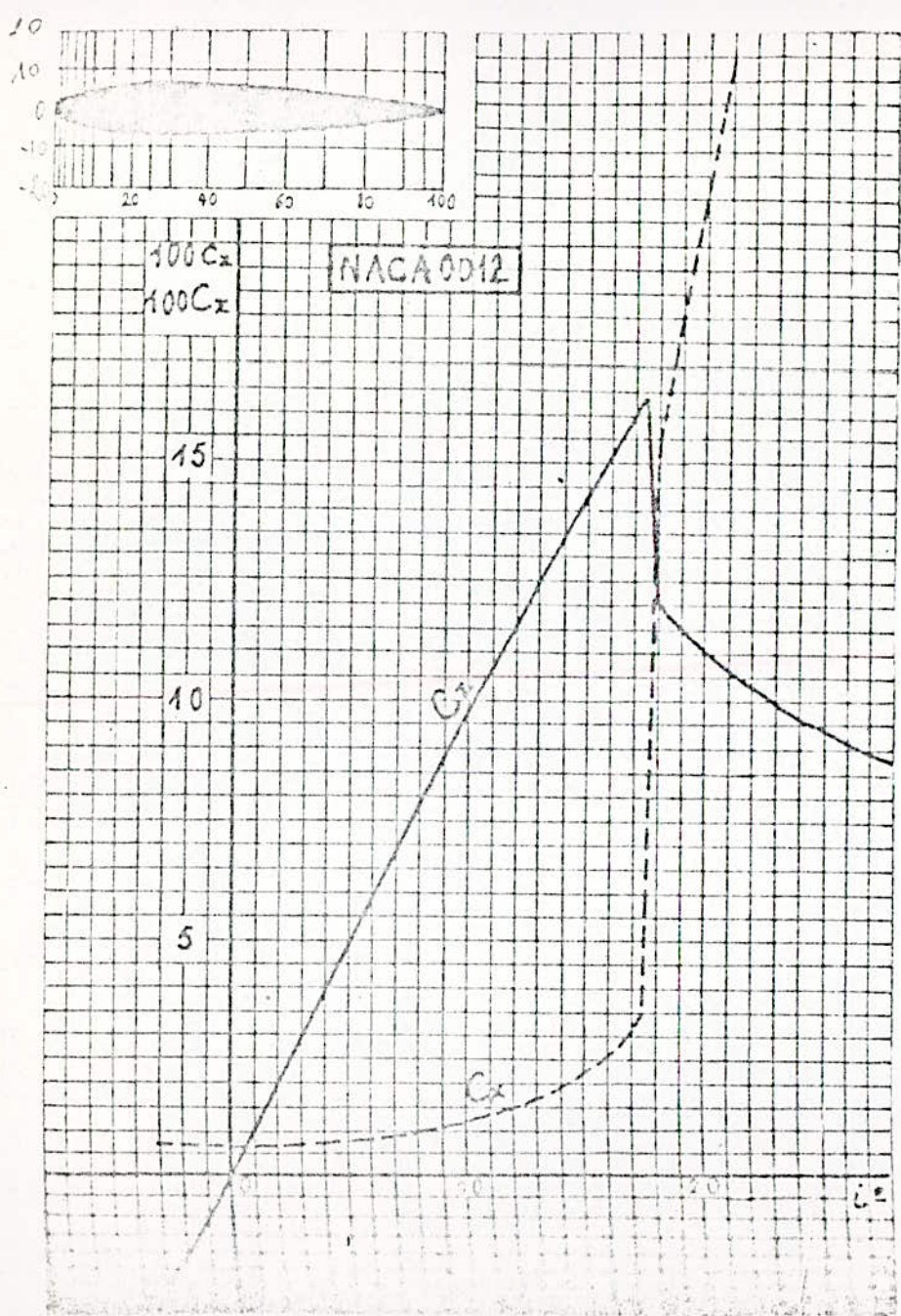
Profondeur	Année: 1971		Année: 1972		Année: 1974		Moyenne	
	P ₇₁	V ₇₁	P ₇₂	V ₇₂	P ₇₄	V ₇₄	P _m	V _m
10	4,72	8,10	4,37	7,90	4,00	7,67	4,36	7,89
20	3,18	7,10	2,60	6,64	2,92	6,90	2,90	6,89
30	2,43	6,49	1,16	5,66	2,28	6,36	2,11	6,19
40	1,96	6,04	1,41	5,42	1,84	5,92	1,74	5,81
50	1,56	5,60	1,16	5,07	1,55	5,59	1,42	5,43
60	1,29	5,26	0,95	4,45	1,32	5,30	1,19	5,12
70	1,10	4,98	0,81	4,50	1,11	5,00	1,01	4,85
80	0,95	4,75	0,69	4,27	0,945	4,74	0,86	4,59
90	0,85	4,57	0,58	4,03	0,81	4,50	0,75	4,39
100	0,76	4,41	0,55	3,96	0,70	4,29	0,66	4,20
110	0,67	4,23	0,45	3,70	0,59	4,05	0,57	4,00
120	0,56	3,98	0,345	3,39	0,51	3,86	0,50	3,82
130	0,53	3,91	0,365	3,45	0,44	3,67	0,445	3,69
140	0,47	3,75	0,33	3,34	0,38	3,50	0,393	3,54
150	0,43	3,64	0,30	3,23	0,345	3,39	0,36	3,44

160	0,39	3,53	0,27	3,12	0,30	3,23	0,32	3,30
170	0,355	3,42	0,245	3,02	0,27	3,12	0,29	3,20
180	0,32	3,30	0,215	2,89	0,245	3,02	0,26	3,08
190	0,295	3,21	0,185	3,75	0,225	2,94	0,235	2,98
200	0,27	3,12	0,16	2,62	0,205	2,85	0,216	2,90
210	0,25	3,04	0,14	2,51	0,19	2,78	0,193	2,79
220	0,225	2,94	0,115	2,35	0,185	2,75	0,175	2,70
230	0,195	2,80	0,095	2,20	0,15	2,57	0,147	2,55
240	0,17	2,68	0,08	2,08	0,13	2,45	0,127	6,51
250	0,155	2,59	0,065	1,94	0,12	2,38	0,113	2,33
260	0,14	2,51	0,055	1,84	0,105	2,28	0,10	2,24
270	0,13	2,45	0,045	1,72	0,095	2,20	0,09	2,16
280	0,12	2,38	0,04	1,65	0,085	2,12	0,082	2,10
290	0,105	2,28	0,035	1,58	0,08	2,08	0,073	2,02
300	0,095	2,20	0,03	1,50	0,07	1,99	0,065	1,94
310	0,085	2,12	0,025	1,41	0,06	1,89	0,057	1,86
320	0,075	2,04	0,02	1,31	0,05	1,78	0,048	1,75
330	0,065	1,94	0,015	1,19	0,045	1,72	0,042	1,68

	J	F	M	A	M	JJ	J	A	S	O	N	D
1	2,1	1,6	1,6	2,9	6,0	4,7	3,9	3,5	1,8	2,0	2,3	0,8
2	2,8	2,3	3,4	1,5	3,2	7,2	3,6	1,8	1,3	4,5	0,6	1,3
3	2,1	6,9	4,0	2,6	5,6	5,3	2,4	2,3	3,0	2,0	4,1	0,7
4	3,4	5,5	5,6	2,9	6,9	4,3	4,8	4,8	4,3	1,5	2,0	0,7
5	0,9	5,6	5,9	6,2	4,4	4,0	2,1	3,3	4,3	1,9	3,1	0,8
6	3,1	7,9	1,1	1,9	0,7	3,2	3,6	2,4	2,8	2,9	3,1	2,1
7	4,5	8,1	5,5	3,4	2,0	5,6	4,4	3,0	2,1	2,0	4,0	2,5
8	1,5	2,3	4,5	2,0	2,0	2,0	2,6	3,5	1,5	3,4	3,3	0,4
9	4,1	1,1	1,6	2,4	1,2	2,6	2,2	2,3	2,9	1,3	0,8	0,3
10	6,4	0,9	2,1	5,4	1,9	2,7	3,3	1,5	3,3	0,8	0,8	0,7
11	1,6	1,4	3,6	5,5	2,4	3,5	3,1	2,5	2,3	1,3	0,9	2,9
12	0,3	5,8	2,5	2,9	2,8	4,5	3,0	5,0	3,3	3,6	0,8	4,6
13	2,8	14,1	3,4	7,0	2,5	3,2	3,9	2,6	4,6	1,3	5,4	2,5
14	2,0	11,3	5,9	4,9	1,9	5,1	2,2	1,9	2,1	3,5	0,8	3,0
15	2,5	3,4	6,4	4,4	0,9	5,4	5,0	3,1	2,8	2,7	3,6	0,6

16	0,9	7,8	5,6	4,6	3,0	3,6	3,5	2,5	2,4	2,8	1,8	1,1
17	1,6	5,5	1,8	3,6	1,9	2,8	2,3	2,8	2,5	0,5	3,1	0,5
18	2,1	7,6	1,8	2,4	3,5	2,3	3,9	2,5	3,4	4,5	7,5	1,1
19	1,1	5,6	3,3	4,7	1,9	2,5	5,2	2,9	3,8	4,5	2,1	0,8
20	0,8	0,9	4,4	1,2	2,1	3,0	4,0	3,8	2,1	5,5	0,8	3,9
21	1,0	1,1	2,1	1,4	1,7	2,5	3,5	1,5	1,0	4,4	1,1	0,5
22	1,1	2,6	2,1	1,1	3,0	3,1	6,0	2,0	1,8	7,6	0,4	1,6
23	0,5	6,0	3,2	2,0	1,4	3,3	5,0	2,5	1,6	3,0	1,3	1,0
24	1,5	3,1	3,2	3,4	1,9	1,9	2,0	3,4	5,9	4,5	7,9	0,7
25	1,6	3,5	2,0	2,4	1,3	3,9	3,1	3,1	4,3	4,1	2,9	2,4
26	2,8	2,3	2,0	1,9	1,3	4,0	4,4	2,3	3,6	3,1	3,3	2,0
27	3,4	2,9	3,6	3,5	1,1	4,3	3,5	2,6	3,3	5,1	4,1	1,8
28	1,6	3,5	3,3	5,0	2,0	3,5	3,0	2,3	3,0	5,3	4,1	1,9
29	2,1	/	9,0	6,4	2,1	5,0	1,6	1,8	2,0	4,4	1,8	1,3
30	1,3	/	11,4	6,7	3,9	1,6	2,2	4,8	1,4	3,5	1,4	1,9
31	2,0	/	7,8	/	1,1	/	3,9	4,4	/	5,1	/	2,6





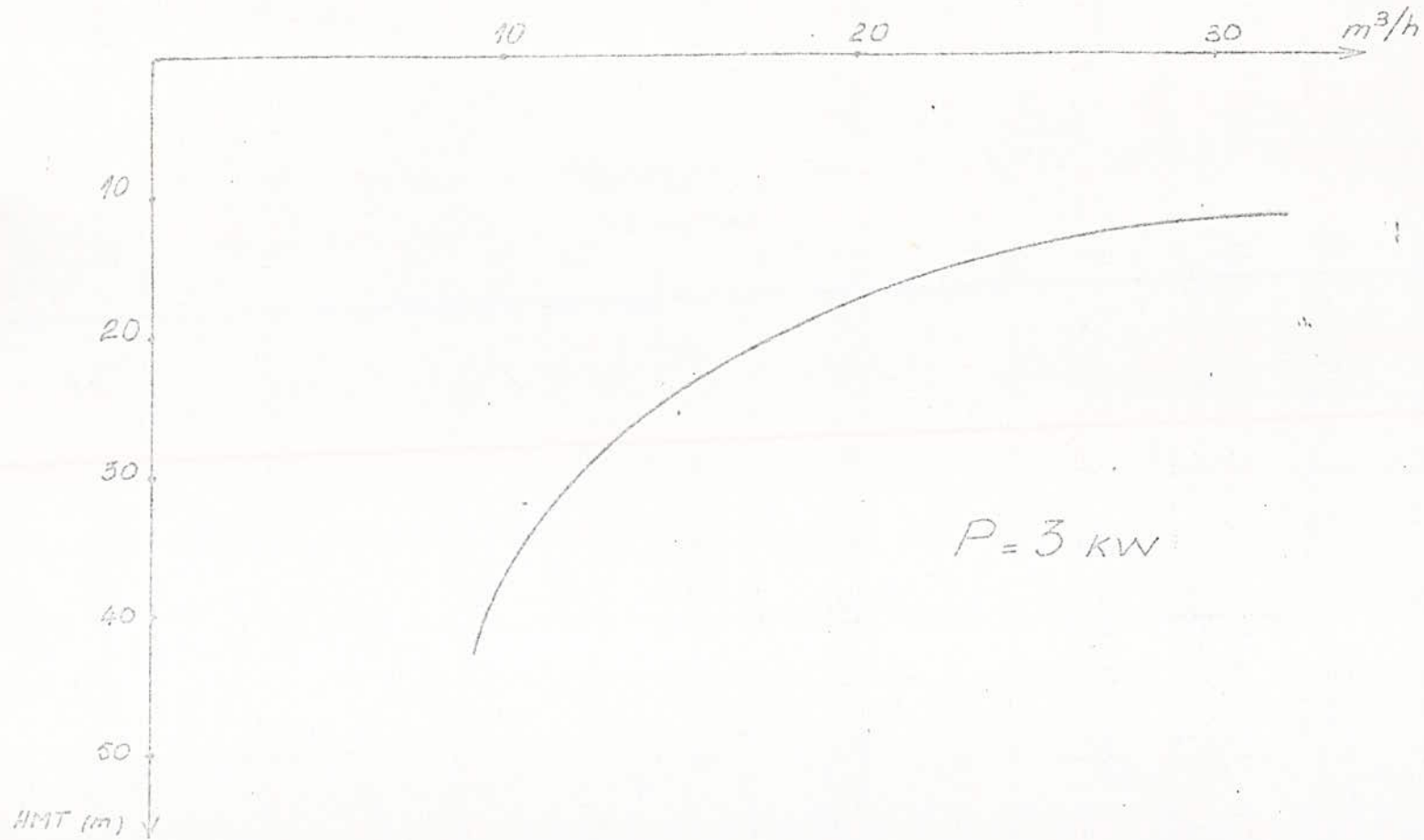
θ (°)	REND	Valeurs de la puissance utile en watts pour les différentes vitesses du vent			
		V = 3 m/s	V = 4 m/s	V = 5 m/s	V = 6 m/s
0	0,063	20,170	47,812	99,384	161,567
1	0,128	37,537	88,978	173,785	300,301
2	0,128	34,068	80,754	157,723	272,545
3	0,131	31,495	74,656	145,812	251,964
4	0,106	22,781	54,001	105,471	182,254
5	0,058	10,983	26,035	50,858	87,871
6	-0,003	-0,493	-1,170	-2,285	-3,949
7	-0,198	-24,610	-58,336	-113,937	-196,883
8	-0,437	-44,639	-105,790	-206,621	-347,042
9	-0,939	-72,498	-171,848	-335,641	-571,980

θ (°)	REND	PUISSANCE UTILE EN WATTS			
		V = 3 m/s	V = 4 m/s	V = 5 m/s	V = 6 m/s
0	0,039	12,593	29,852	58,305	100,751
1	0,080	23,447	55,579	108,552	264,881
2	0,085	22,740	53,902	105,278	181,921
3	0,063	15,358	36,407	72,107	122,874
4	0,053	11,594	27,482	53,677	92,753
5	0,0111	2,198	5,212	10,179	17,590
6	-0,061	-10,109	-23,964	-46,805	-80,879
7	-0,213	-29,062	-68,888	-134,546	-232,496
8	-0,471	-51,363	-121,749	-237,791	-410,904
9	-0,926	-75,492	-178,945	-349,502	-603,939

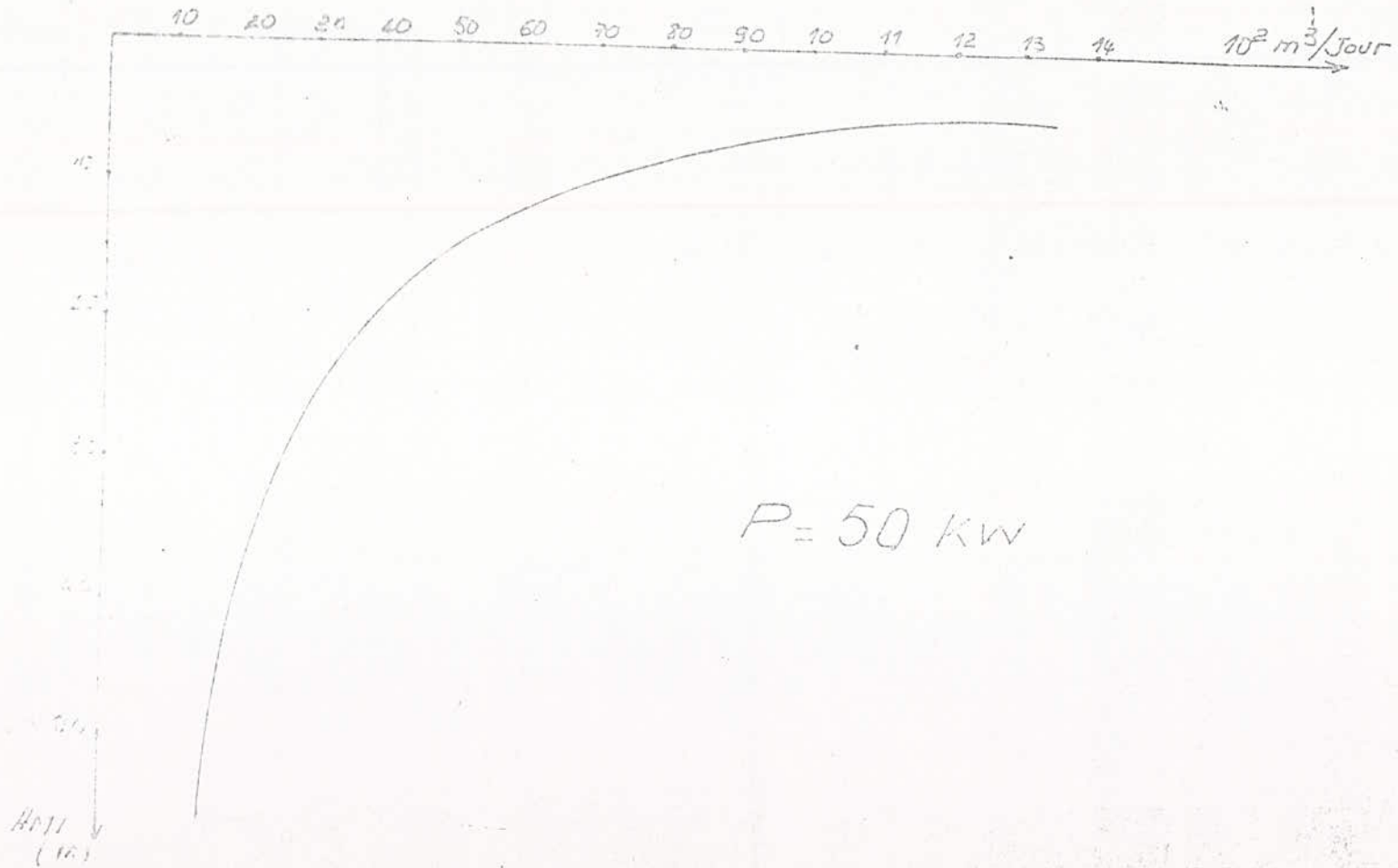
θ (°)	REND	Valeurs de la puissance utile en watts pour les différentes vitesses du vent			
		V = 3 n/s	V = 4 n/s	V = 5 n/s	V = 6 n/s
0	0,025	5,552	13,161	25,705	44,418
1	0,011	2,222	5,268	10,290	17,782
2	-0,060	-9,964	-23,620	-46,133	-79,780
3	-0,173	-23,878	-56,599	-110,546	-191,024
4	-0,353	-38,757	-91,869	-179,433	-310,061
5	-0,724	-59,312	-140,592	-274,594	-474,498
6	-1,528	-82,611	-195,819	-382,459	-660,890
7	-4,095	-107,422	-259,632	-497,328	-859,382
8	83,442	-133,096	-315,487	-616,186	-1064,770
9	5,416	-159,292	-377,581	-737,464	-1274,338

θ (°)	REND	Valeurs de la puissance utile en watts pour les différentes vitesses du vent			
		V = 3 n/s	V = 4 n/s	V = 5 n/s	V = 6 n/s
0	0,031	6,700	15,881	21,019	53,601
1	-0,015	-2,885	-6,839	-13,357	-23,081
2	-0,081	-13,169	-31,217	-60,970	-105,353
3	-0,202	-27,052	-64,124	-125,243	-216,420
4	-0,380	-40,772	-96,647	-188,763	-326,183
5	-0,756	-60,685	-143,846	-280,930	-485,482
6	-1,578	-83,564	-198,079	-386,873	-668,518
7	61,246	-108,075	-256,179	-500,350	-864,605
8	62,752	-133,555	-316,577	-618,314	-1068,447
9	5,510	-164,653	-390,890	-762,287	-1337,231

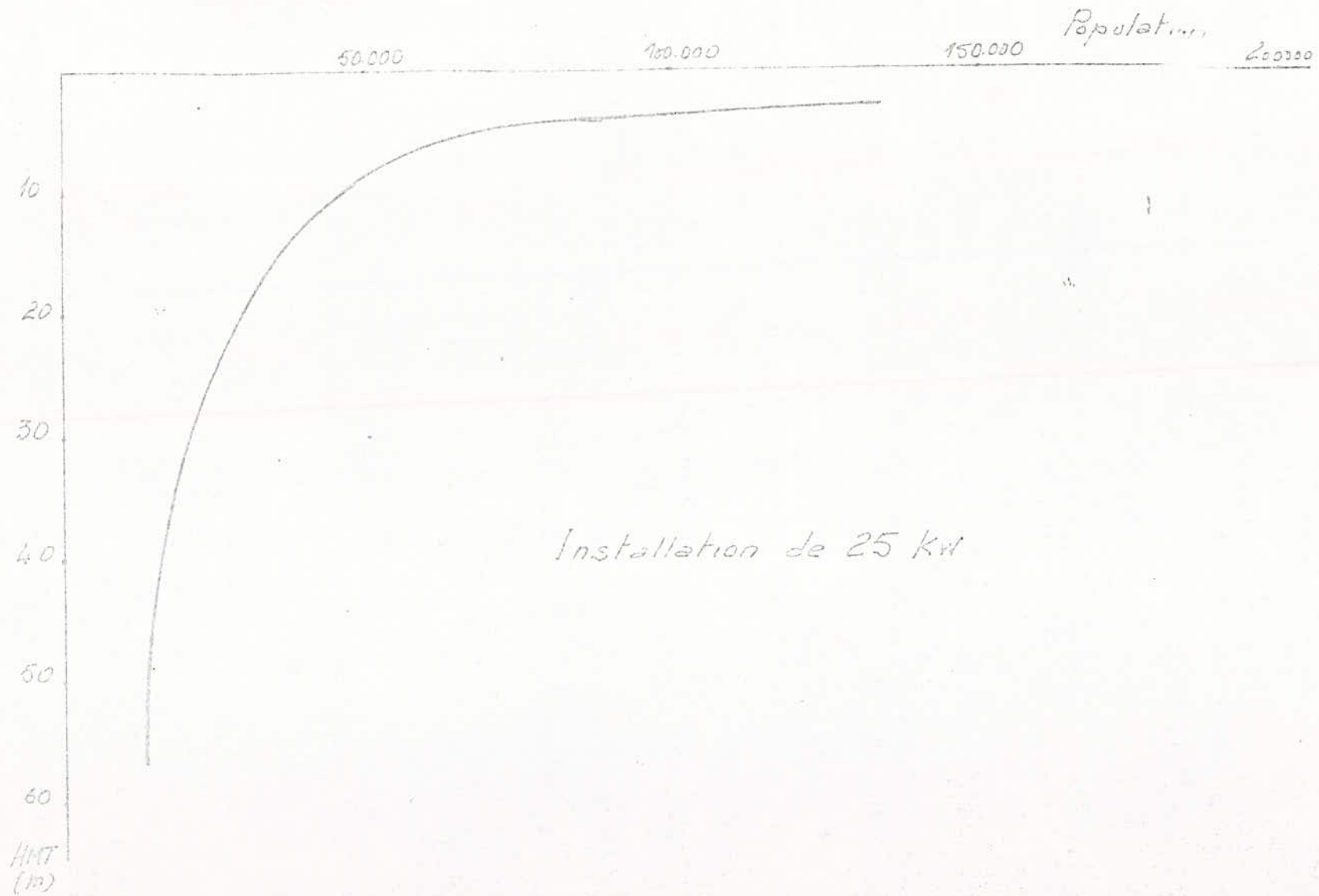
Débit d'eau pompée



Débit d'eau pompée

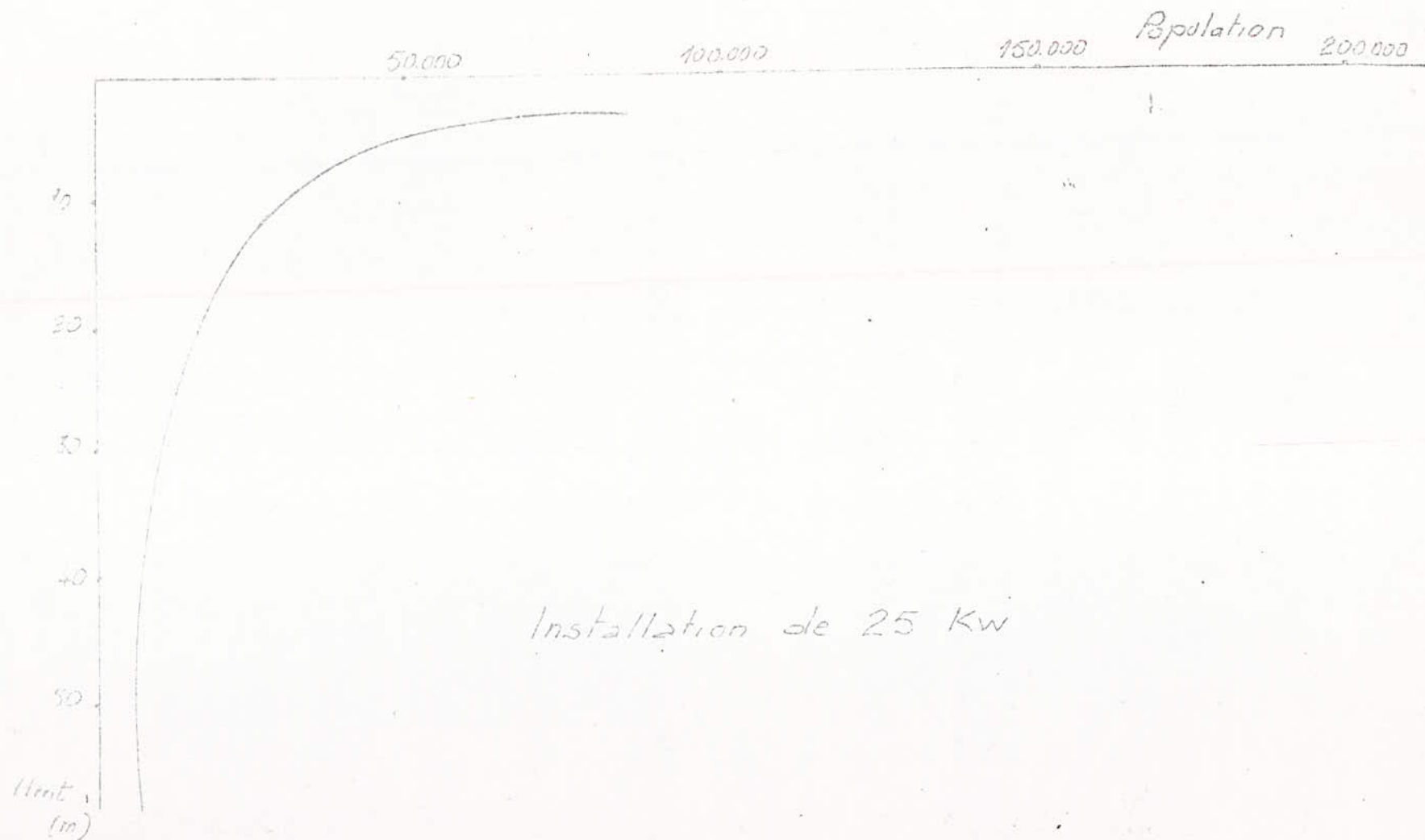


Besoin moyen : 50 litres/habitant/Jour



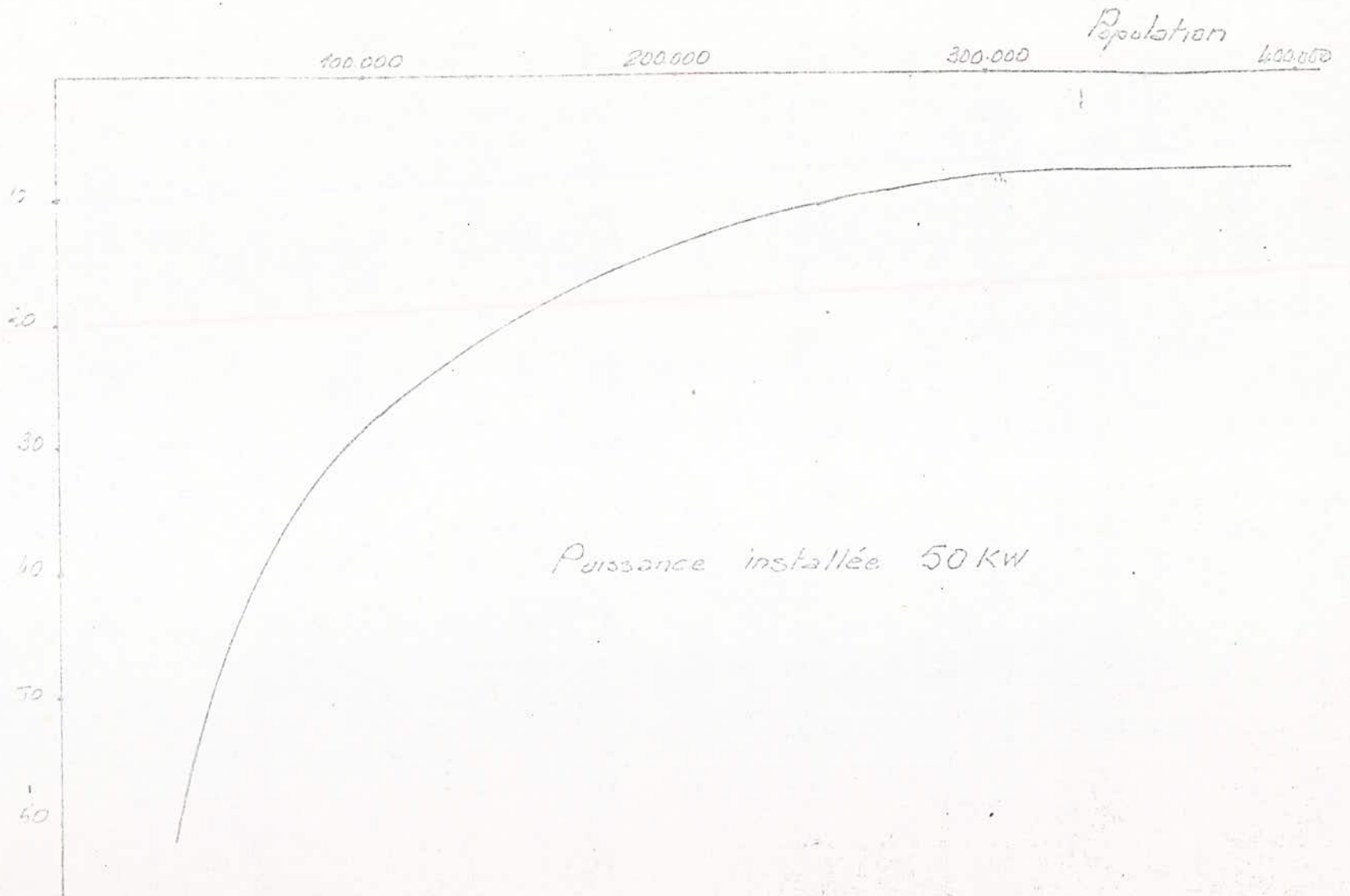
Demande en eau satisfaite

Besoin moyen : 80 litres/habitant/jour.



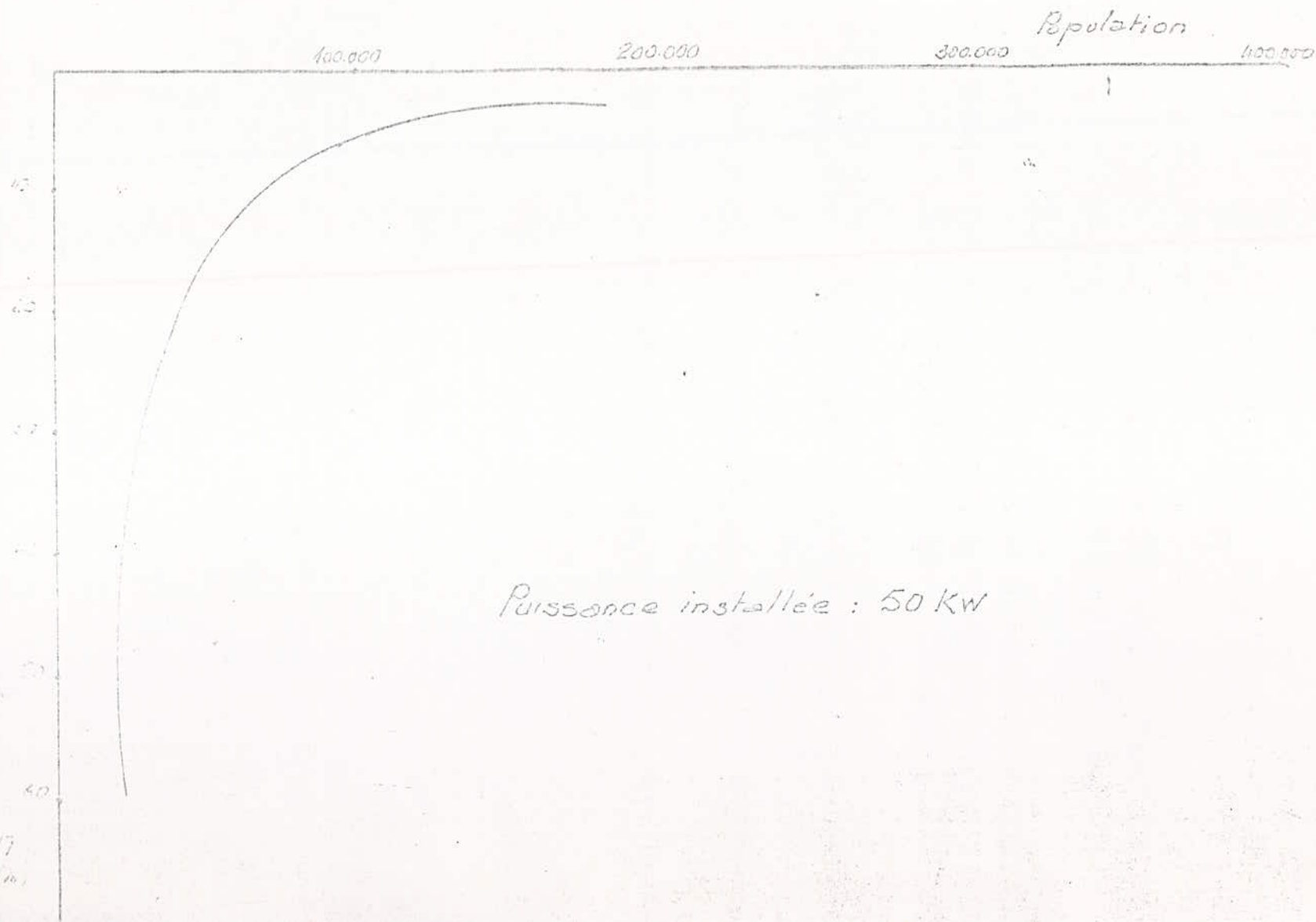
Demande satisfaite en eau

Besoin moyen : 20 litres/habitant/jour

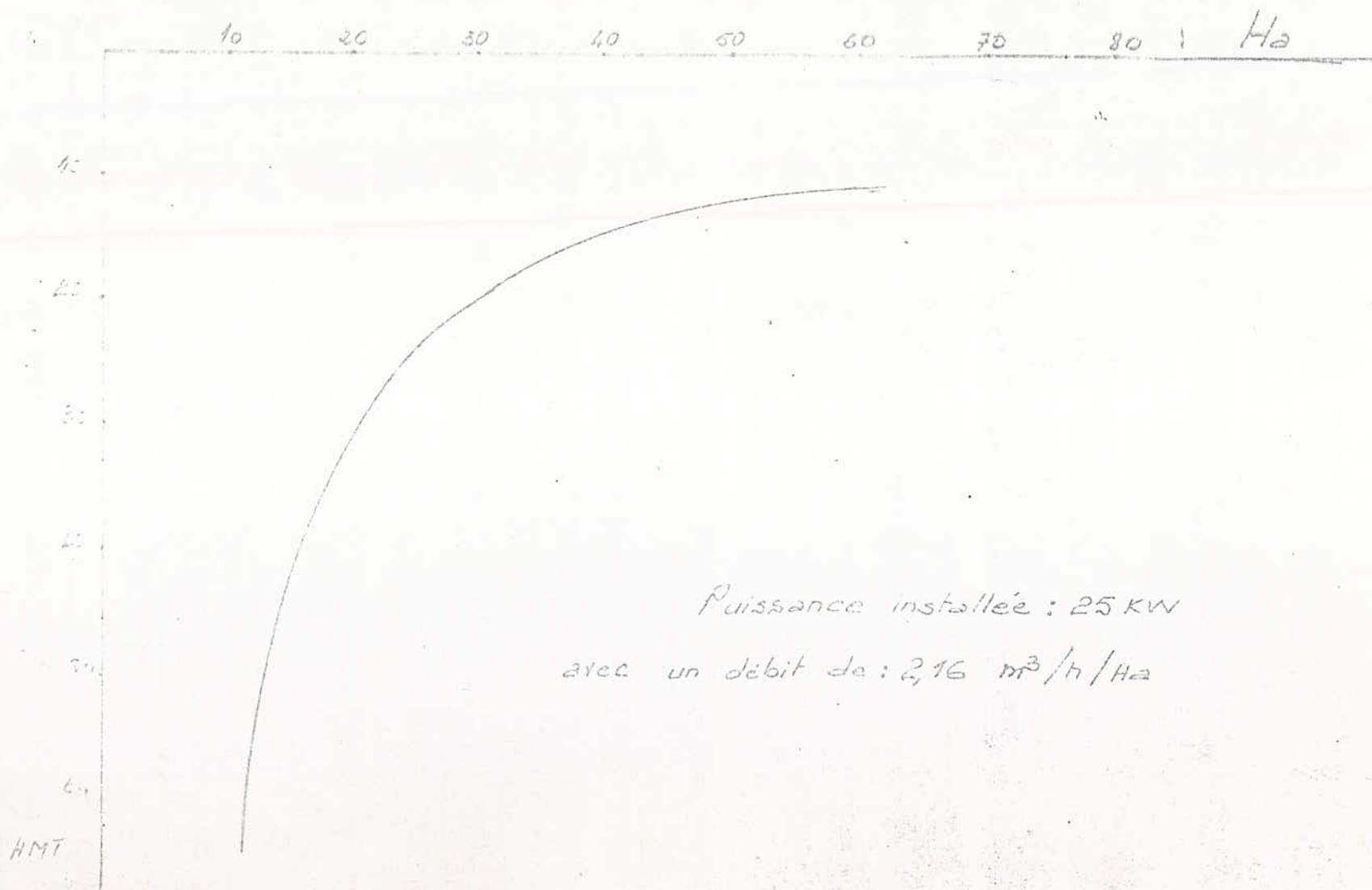


Demande en eau satisfaite

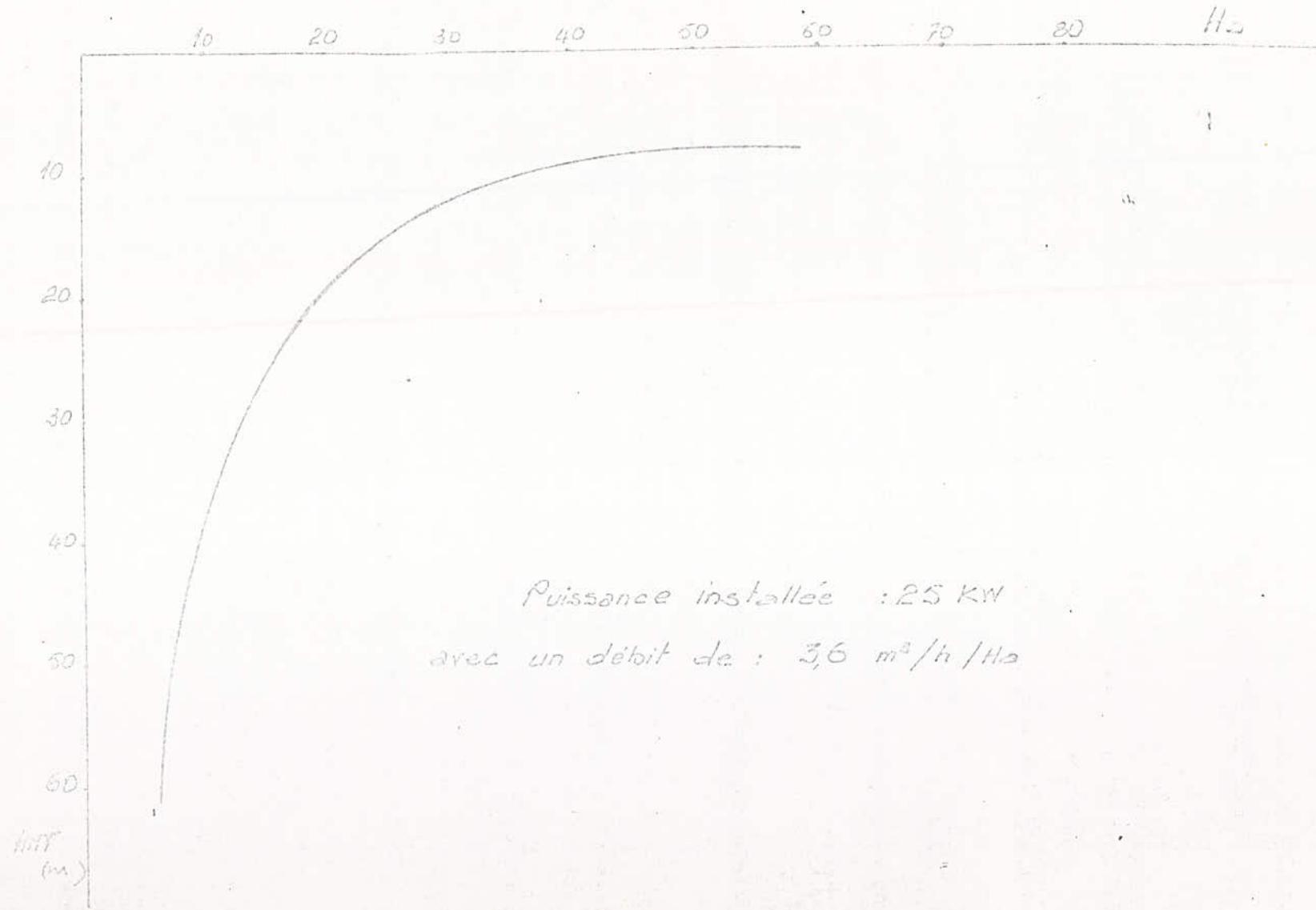
Besoin moyen : 80 litres/habitant / Jour



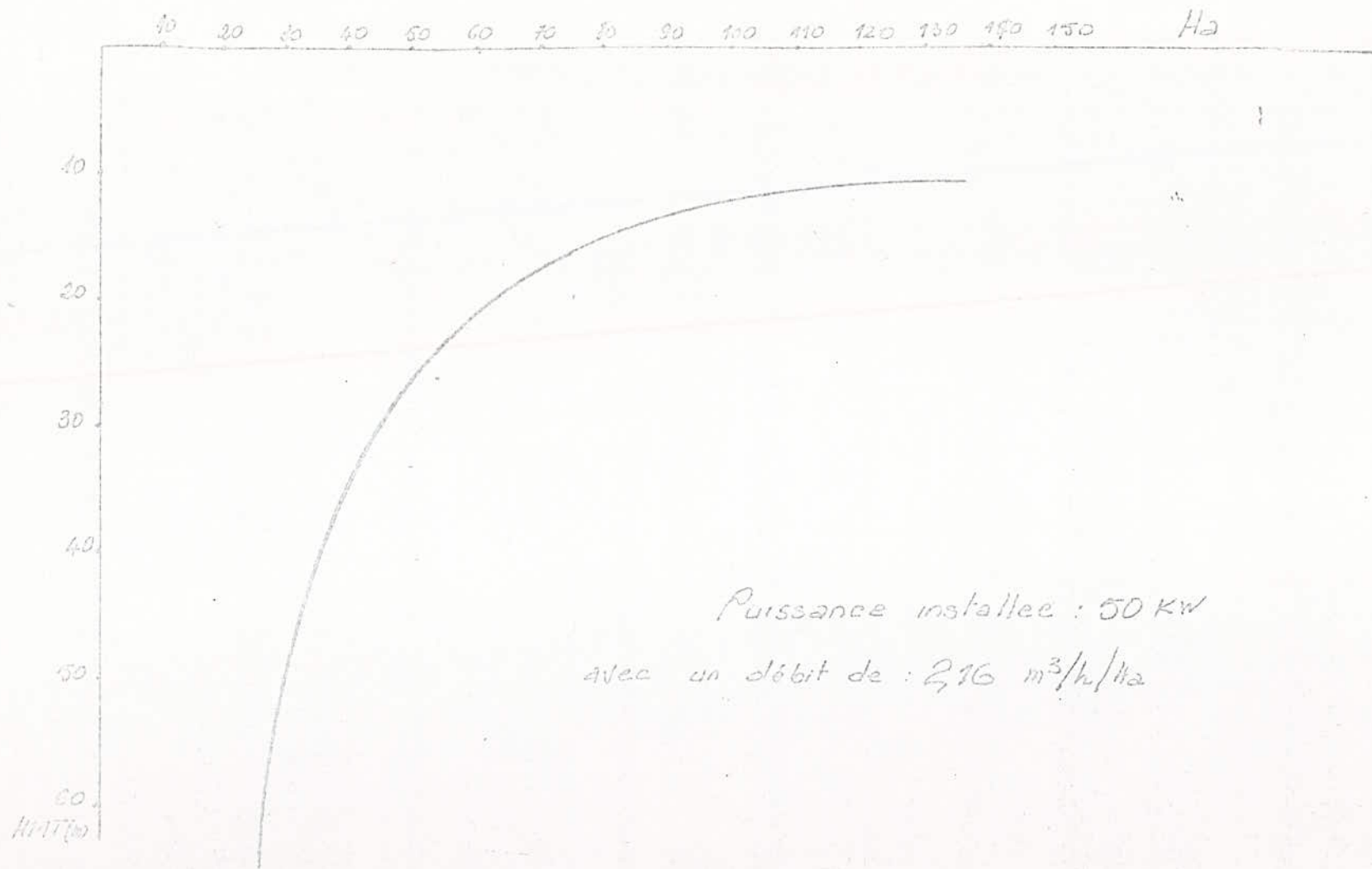
Surfaces agricoles irrigables



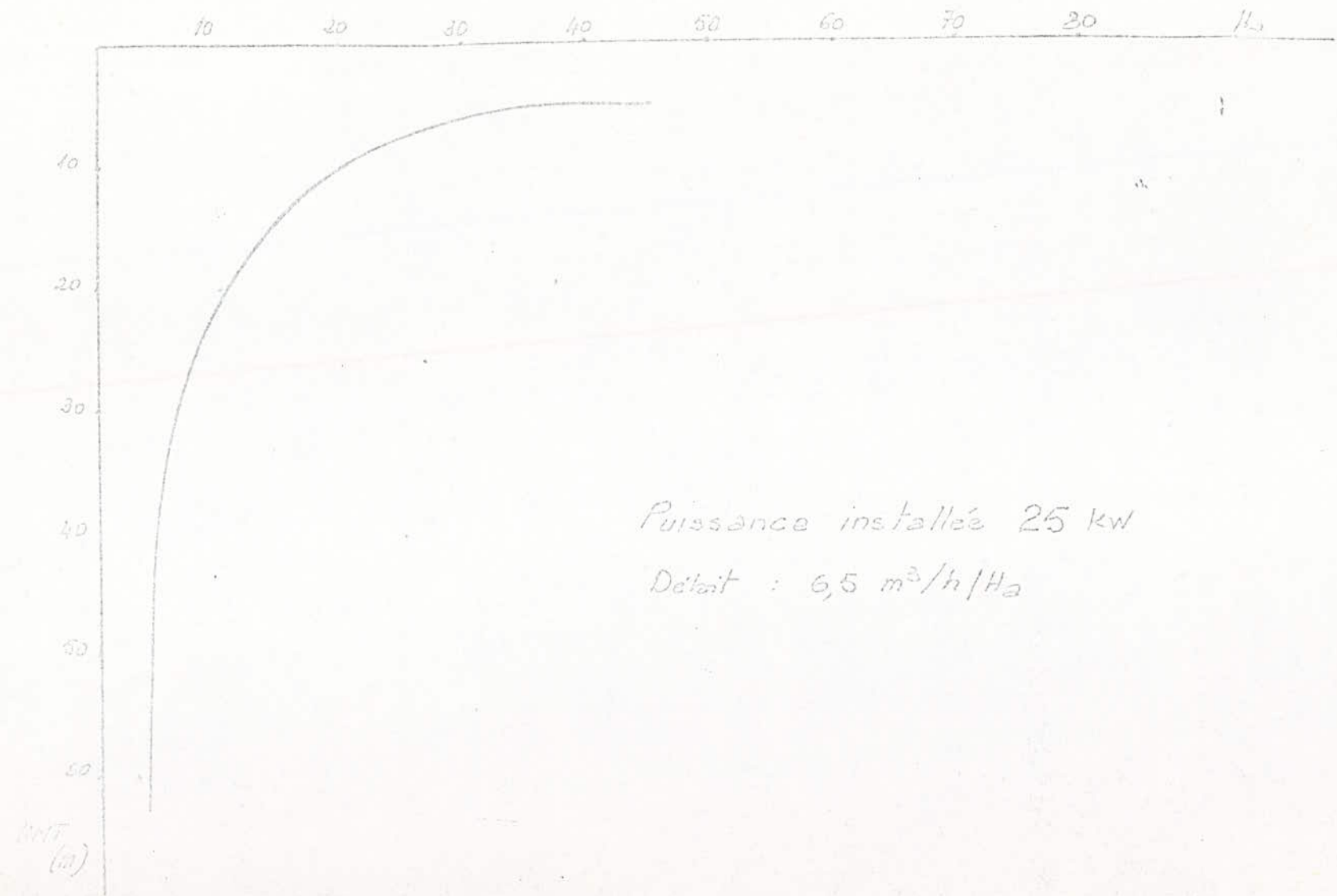
Surfaces agricoles irrigables



Surfaces agricoles irrigables

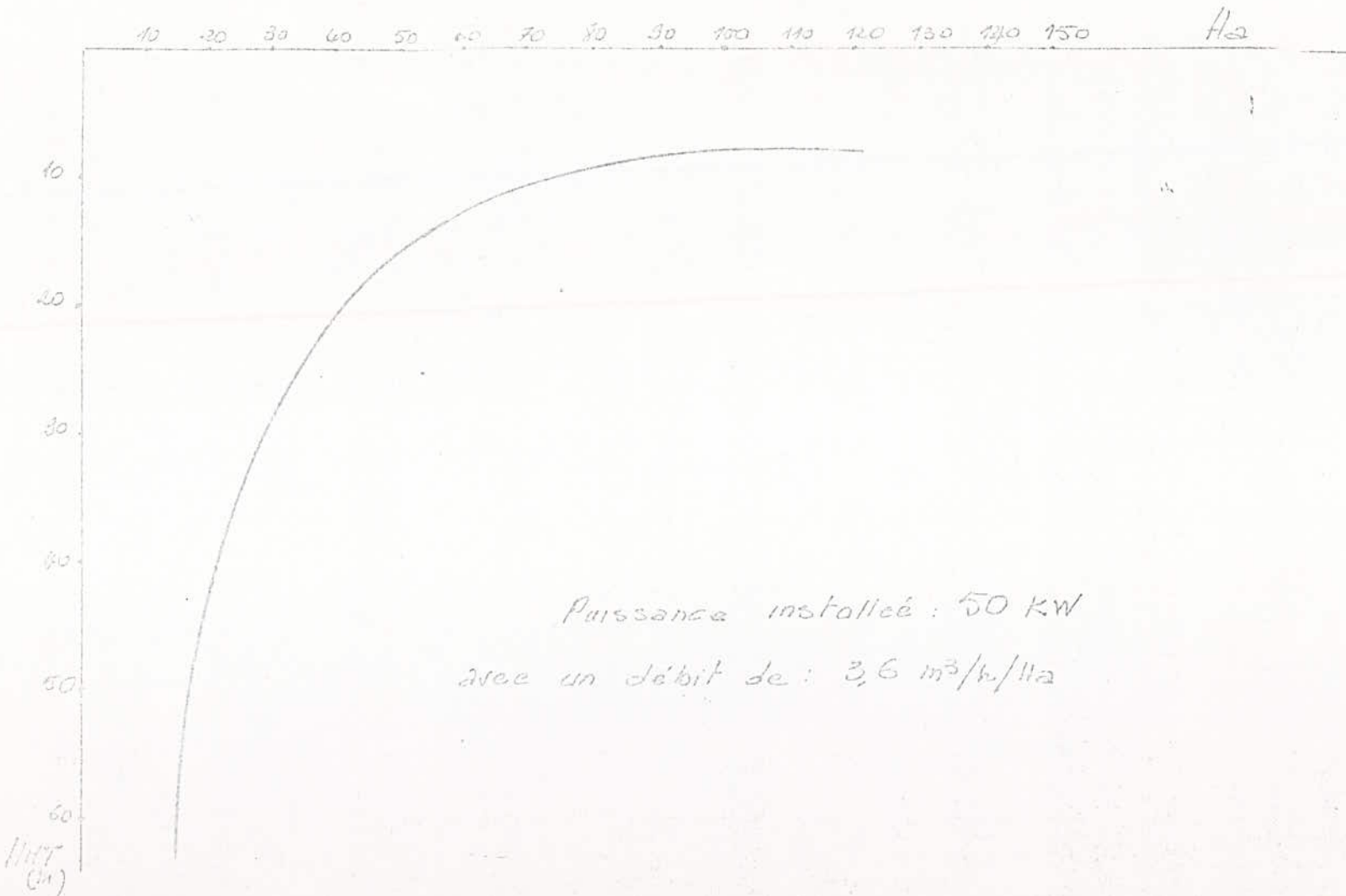


Surfaces agricoles irrigables



74

Surfaces agricoles irrigables



Surfaces agricoles irrigables

