

ETUDE AEROLOGIQUE ET CALCUL DES DEPLACEMENTS POTENTIELS DES SABLES DANS LA PROVINCE DE LAAYOUNE

Tarik OULEHRI

*Etudiant en Thèse de Doctorat à l'Université P et M Curie
Laboratoire de Géodynamique des Milieux Continentaux*

RESUME

Jusqu'à présent, les déplacements des sables éoliens dans la province de Laayoune ont été abordés de 2 manières distinctes :

- mesure et suivi du déplacement des massifs dunaires par photos aériennes.
- étude statistique des vitesses et directions des vents à l'origine de ces déplacements.

Dans la présente étude, un lien est établi entre ces 2 approches, c'est-à-dire que les déplacements potentiels des sables sont calculés à partir des relevés de vents disponibles et sont comparés aux observations de terrain, aux photos aériennes et aux images satellites qui prouvent la fiabilité de ce type de calcul.

Différents paramètres de ces déplacements (intensité, résultante, direction, variabilité directionnelle) sont calculés à diverses échelles de temps (décennie, année, mois, heure) et permettent ainsi d'analyser le fonctionnement de ces déplacements.

MOTS-CLES : Province de Laayoune * Vents * Ensalement * Déplacements potentiels des sables * Variabilité directionnelle * Roses des déplacements des sables * Cycles de fonctionnement *

Le problème de l'ensablement des plates-formes routières est le plus crucial parmi tous ceux qui se posent pour la construction et l'entretien des routes en milieu désertique.

Cet article présente les résultats préliminaires d'une étude en cours (Thèse de Doctorat) sur le phénomène d'ensablement dans la Province de laayoune. Cette étude s'intéresse aux déplacements du "Fleuve de sable" qui prend sa source au Cap Juby et se dirige vers le SSW, poussé par les Alizés, en passant entre la ville de Laayoune et son port, ensablant ainsi la RP. 41 sur près de 8 Km (fig 1).

Cette étude ne prétend pas apporter une solution immédiate à ce problème mais se propose d'en approfondir la connaissance pour optimiser la gestion des moyens de lutte déjà mis en oeuvre.

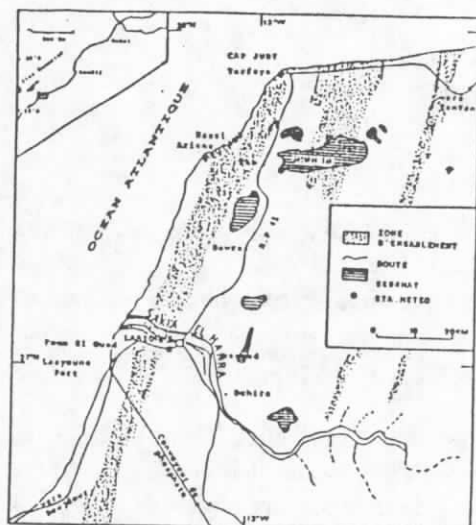


Fig 1 : Carte de situation

Cette meilleure connaissance passe entre autre par le calcul et l'analyse des déplacements potentiels des sables à partir des relevés de vents disponibles dans la région. Ces déplacements potentiels calculés sont ensuite comparés à des déplacements effectifs mesurés en vue de vérifier la fiabilité de la méthode.

I/ RELEVES DE VENTS DISPONIBLES.

Ces calculs sont faits d'après les vitesses et directions de vents enregistrées sur Tableaux Climatiques Mensuels à la station météorologique de l'aéroport de Laayoune, de janvier 1980 à décembre 1988. Sur ces relevés figurent les vitesses de vents en m/s réparties dans les 16 directions observées à 06, 12 et 18 heures TU (à peu près 9855 observations).

II/ CHOIX DE LA VITESSE MINIMALE D'ARRACHEMENT (V_t).

Cette vitesse minimale du vent à partir de laquelle le sable se mobilise varie selon les auteurs entre 4,5 et 6 m/s. En attendant de pouvoir préciser cette vitesse par des expériences *in situ* et après une granulométrie détaillée, tous les calculs ont été faits avec ces 2 vitesses-seuils pour obtenir une fourchette de valeur entre les déplacements minimum ($V_t=6$ m/s) et maximum ($V_t=4,5$ m/s).

III/ FORMULE DE FRYBERGER.

Le calcul des déplacements potentiels du sable s'appuie sur l'équation de K. et H. LETTAU, simplifiée par Fryberger :

$$q = V'^2 (V' - V_t) \frac{C'' \cdot o}{g} \quad (1)$$

où q = quantité de sable transporté

g = constante de gravité

C'' = constante empirique fondée sur la taille des grains

o = densité de l'air

V' = vitesse du vent

V_t = vitesse minimale d'arrachement

avec $C'' = C' (o/o')^n$

où C' = constante universelle pour le sable $\sim (6,7)$

o = diamètre des grains de sables transportés

$o' = 0,25$ mm (diamètre standard)

n = constante empirique

On constate que la quantité de sable transportée est fonction de paramètres difficiles à déterminer avec exactitude hors du contexte expérimental qui a permis

l'élaboration de ces formules (rugosités du sol, taux de recouvrement de la végétation, o moyen, etc).

Aussi Fryberger propose-t-il une formule simplifiée, n'estimant plus la quantité de sable transportée mais le potentiel d'arrachement des sables :

$$q = V'^2 (V' - V_t) \quad (2)$$

Avec V' = Vitesse du vent à 10 m de hauteur (en noeuds)

V_t = Vitesse-seuil à 10 m de hauteur (en noeuds)

Cette formule permet alors la comparaison dans le temps pour une même station et/ou dans l'espace entre deux stations pour lesquelles ce calcul a été appliqué, des effets du vent de manière quantitative, en direction et en intensité.

On peut calculer avec cette formule un **coefficient de transport des sables** pour chaque vitesse dans chaque direction portée sur les relevés météorologiques.

Pour une direction donnée, il faut multiplier la fréquence (f) d'observation de chaque vitesse supérieure à la vitesse d'arrachement par le potentiel d'arrachement obtenu par la formule (2).

Pour rendre l'utilisation de ce coefficient plus pratique et compatible avec des vitesses exprimées en noeuds, il faut le diviser par 12,5.

Coefficient de transport de sable :

$$Q = \frac{q \cdot f}{12,5}$$

Pour chacune des 16 directions, on fait la somme des coefficients de transport de sable de toutes les vitesses supérieures au seuil d'arrachement et qui sont exprimées dans cette direction. On obtient un nombre qui est le module de la représentation vectorielle de la capacité de transport dans la direction considérée.

IV/ LOGICIEL "SABLE".

Tous ces calculs ont nécessité la création d'un logiciel actuellement en cours de développement et d'amélioration dans le cadre de cette étude.

Ce logiciel nommé "SABLE" permet, après saisie des données brutes sous forme de fichiers, de calculer :

* *La capacité de transport total (CT)* : elle exprime la totalité du déplacement potentiel du sable. C'est la **somme des modules** des déplacements des 16 directions.

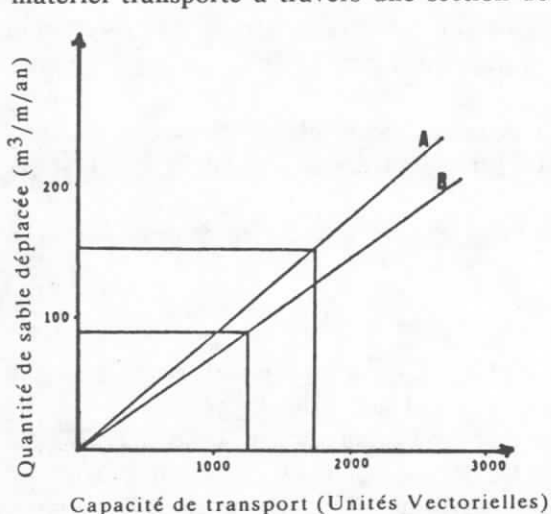
* *La direction résultante (en N°) et son potentiel de migration (MR)* : elle exprime la direction de migration finale issue des 16 directions. C'est la **somme Vectorielle** des capacités de transport des 16 directions.

* *La variabilité directionnelle* : c'est le rapport MR/CT , il exprime le caractère plus ou moins orienté des déplacements de sable. Quand ce rapport tend vers 1, la variabilité est faible, le vent a tendance à souffler dans la même direction et engendre des déplacements sur de longues distances. Quand il tend vers 0, le vent a tendance à souffler dans toutes les directions et remuer le sable sans qu'il n'engendre de déplacement notable.

V/ QUANTIFICATION DES DEPLACEMENTS SABLEUX.

Les coefficients de transport du sable par le vent s'expriment donc en "Unités Vectorielles". Or le problème immédiat de la Direction Provinciale de l'Équipement de Laayoune est de quantifier ce déplacement.

Il faut passer d'un calcul théorique à une estimation en masse ou en volume du matériel transporté à travers une section donnée et pendant un temps donné.



Pour cela, nous avons utilisé des droites de corrélation en accord avec l'équation de Lettau (1) qui permettent de passer du déplacement potentiel en Unités Vectorielles à une estimation du déplacement en m³/an (m³ de sable passant à travers une section de 1 m durant une année).

Fig.2 : Droites de corrélation entre Capacité de transport et Quantité de sable déplacée (A : $V_t = 4,5$ m/s B : $V_t = 6$ m/s)

VI/ COEFFICIENTS DES TRANSPORTS DE SABLE A LAAYOUNE.

Les coefficients calculés par le logiciel "Sable" sont présentés et commentés pour la décennie, année par année, mois par mois et heure par heure.

A/ Pour l'ensemble de la période 1980-1988.

On trouve les coefficients suivants :

Station	Laayoune	
Période	1890	— 1988
Vitesse seuil	4,5 m/s	6 m/s
Angle d'orientation	23	25
Capacité de transport (CT)	1.775	1.252
Module de la Résultante	1.165	813
MR/CT	0,656	0,649

a)- Direction résultante.

Cette direction atteste indubitablement de la représentativité de la décennie (1980-1988) choisie pour le calcul de ce phénomène car on la retrouve à 2 échelles d'observation sur le terrain :

1°) Echelle centimétrique : un angle de même valeur ($25^{\circ} \pm 2^{\circ}$) est observé pour l'orientation des stries de corrosion faites par le déplacement des sables éoliens sur la dalle moghrébienne calcaréo-gréseuse.

2°) Echelle kilométrique : l'orientation du "Fleuve de sable" est de direction NNE ($=22,5^{\circ}$).

b)- Capacité de transport total.

En utilisant les droites de corrélation (fig 2), cette capacité de transport donne une quantité de sable déplacé de l'ordre de $152 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$ ($V_t=4,5 \text{ m/s}$).

Cette estimation issue d'un calcul théorique est à comparer avec celle de la DPE de Laayoune qui donne une quantité de sable déplacée de l'ordre de $160 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$. En précisant d'une part le seuil d'arrachement et d'autre part l'origine du chiffre avancé par la DPE de Laayoune, nous pourrions affiner la comparaison et juger de l'efficacité de l'estimation théorique.

Ces constatations préliminaires incitent à s'intéresser davantage aux coefficients calculés avec $V_t=4,5 \text{ m/s}$.

2) Année par Année : (tableau I)

Cette analyse permet de faire un bilan annuel des déplacements sableaux et pouvoir comparer les années entre elles et/ou avec les effets de ces déplacements sur les moyens de lutte contre l'ensablement (usure du matériel, envahissement important des chaussées).

a)- Direction résultante.

Le transport se fait toujours selon une direction comprise entre 344° (pour l'année 1984) et 55° (pour l'année 1983). Les directions de déplacement de 1983, 1985 et plus spécialement 1984 se démarquent des autres années.

b)- Capacité de transport (fig 3).

L'année 1984 est exceptionnelle par son calme relatif qui se traduit par une faible quantité de sable déplacé ($55 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$). Le transport n'a cessé d'augmenter depuis pour atteindre une quantité de sable déplacée égale à $220 \text{ m}^3/\text{m}/\text{an}$ en 1988.

3) Mois par mois (tableau II et fig 4).

a)- Direction résultante.

Celle-ci permet de distinguer 2 époques dans l'année :

- de mars à octobre où les déplacements sableaux se font selon une direction N à NE.
- de novembre à février où les déplacements sableaux suivent une direction E à NE.

b)- Capacité de transport total.

Ce coefficient permet également de distinguer 2 époques de l'année : (fig 4)

- de mars à septembre : la capacité de transport est supérieure à la moyenne avec un maximum en juillet et août.
- de septembre à février la capacité de transport est inférieure à la moyenne avec un minimum en décembre.

c)- Roses des sables : (fig 5)

Les roses des sables mensuelles (appelées ainsi par analogie avec les roses de vent) se répartissent en 2 catégories qui correspondent, à peu près, aux époques précédemment mises en évidence.

d)- Variabilité directionnelle (rapport MR/CT) : (fig 4)

Ce rapport MR/CT met en évidence les mois de mars et de novembre, charnières entre l'époque du déplacement à tendance NNE et l'époque du déplacement à tendance E.

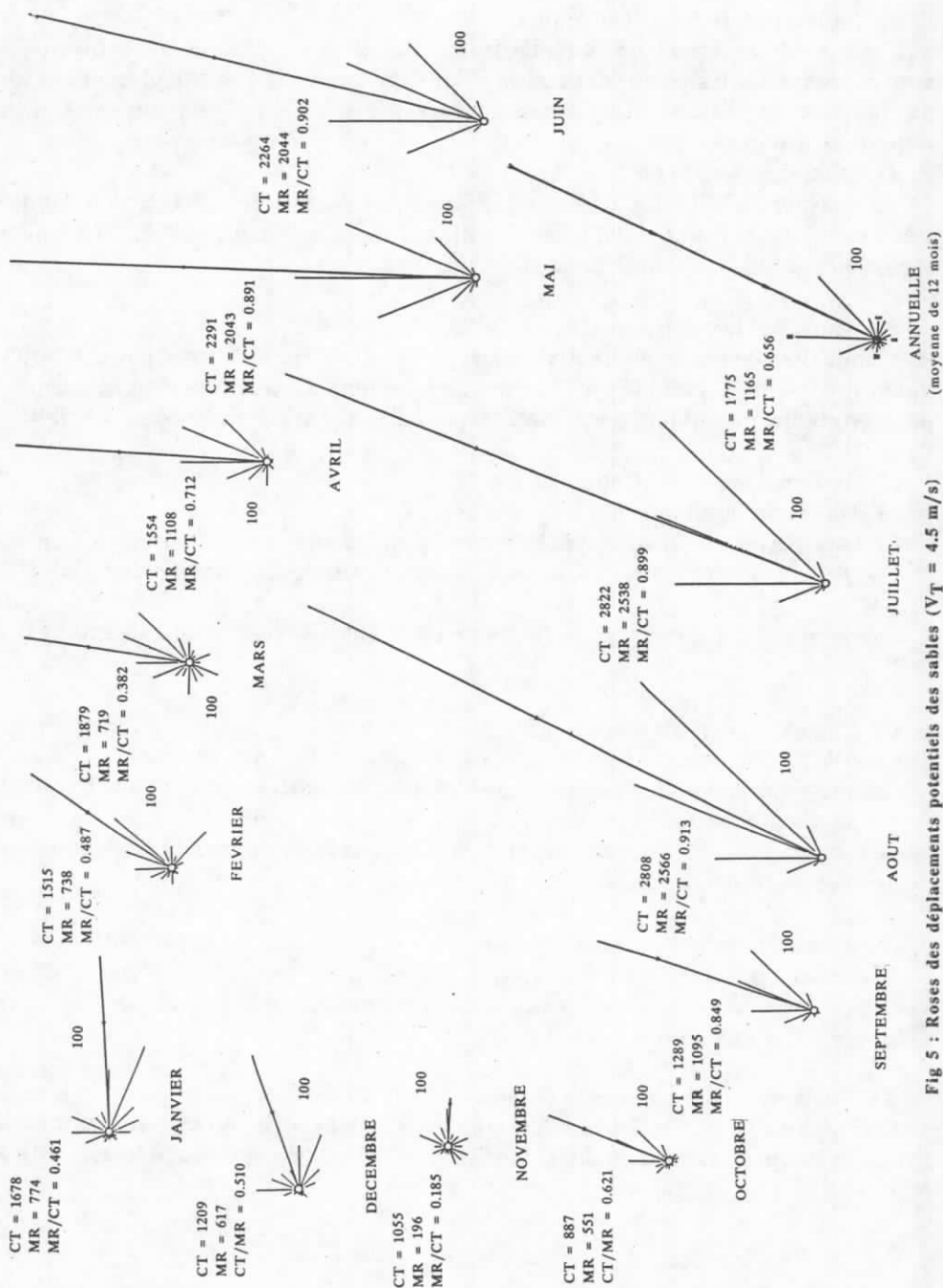


Fig 5 : Roses des déplacements potentiels des sables ($V_T = 4.5 \text{ m/s}$)

ANNEES	1980		1981		1982		1983		1984		1985		1986		1987		1988	
VITESSE SEUIL (m/s)	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6
ANGLE D'ORIENTATION	5°	5°	16°	18°	38°	40°	47°	55°	347°	344°	356°	356°	7°	6°	29°	29°	36°	37°
CAPACITE DE TRANSPORT	1730	1190	1077	686	2570	1908	1847	1312	654	356	1192	764	1901	1306	2472	1821	2538	1911
MODULE DE LA RESULTANTE	1218	843	687	424	1533	1096	1015	726	464	241	856	550	1439	981	1774	1319	2012	1536
HR/CT	0.704	0.708	0.637	0.618	0.596	0.574	0.549	0.553	0.709	0.676	0.718	0.719	0.757	0.751	0.717	0.724	0.792	0.803

Tableau I: Coefficients de transport de sable année par année

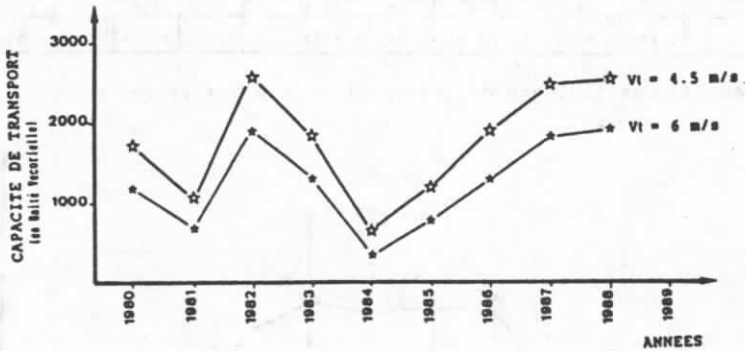


fig 3: Capacités de transport annuelles de 1980 à 1988.

MOIS	JANVIER		FEVRIER		MARS		AVRIL		MAI		JUIN	
VITESSE SEUIL (m/s)	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6
ANGLE D'ORIENTATION	87°	94°	37°	43°	9°	9°	4°	5°	2°	3°	13°	14°
CAPACITE DE TRANSPORT	1678	1235	1515	1081	1879	1329	1554	1059	2291	1656	2264	1607
MODULE DE LA RESULTANTE	774	623	738	513	719	463	1108	763	2043	1485	2044	1455
HR/CT	0.461	0.504	0.487	0.474	0.382	0.348	0.713	0.720	0.891	0.896	0.902	0.905

MOIS	JUILLET		AOÛT		SEPTEMBRE		OCTOBRE		NOVEMBRE		DECEMBRE	
VITESSE SEUIL (m/s)	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6	4.5	6
ANGLE D'ORIENTATION	21°	23°	27°	28°	19°	21°	21°	24°	94°	110°	72°	77°
CAPACITE DE TRANSPORT	2822	2047	2808	2044	1289	838	887	540	1055	714	1209	832
MODULE DE LA RESULTANTE	2538	1851	2566	1879	1095	719	551	327	196	156	617	434
HR/CT	0.899	0.904	0.914	0.919	0.849	0.858	0.621	0.605	0.185	0.218	0.510	0.521

Tableau II: Coefficients de transport de sable mois par mois

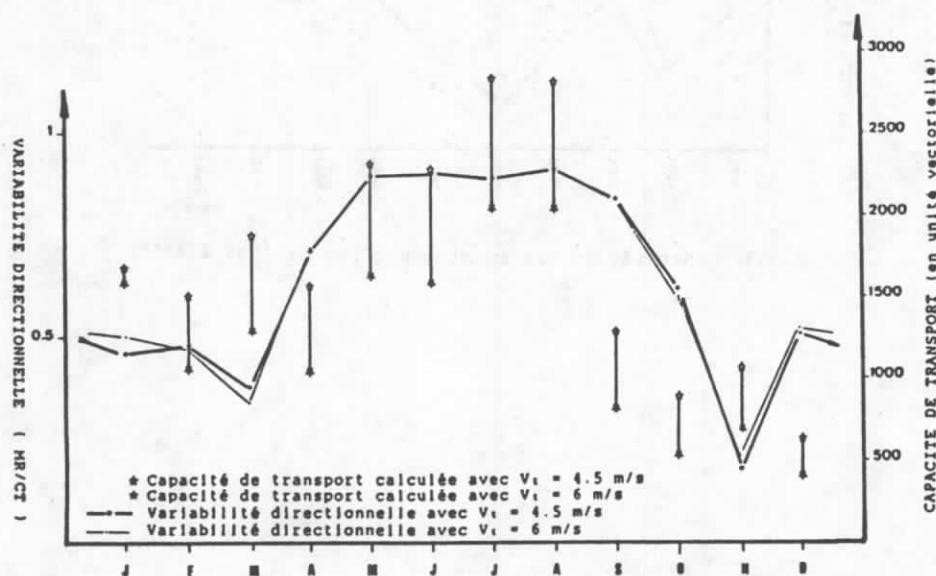


fig 4: Capacité de transport et variabilité directionnelle pour les 12 mois de l'année.

Ces 2 mois ont une forte variabilité directionnelle (respectivement 0,382 et 0,185).

Le déplacement pendant ces 2 mois de l'année ne revêt aucun aspect caractéristique, le vent remue le sable dans tous les sens avec peu de déplacement notable.

Ici une critique peut être apportée quant au choix de l'époque d'observation choisie par la SOGREAH (24 mars - 26 avril 1984) pour son étude. Une analyse préliminaire de ce type aurait imposé une autre époque d'observation dans l'année. A cela s'ajoute le fait que l'année 1984 n'est pas du tout représentative. Aussi les déplacements dunaires observés durant cette période ont peu d'intérêt pour la compréhension du phénomène dans sa globalité.

4) Variation diurne.

C'est en fait le commentaire des coefficients de transport de sable aux 3 heures d'observation.

a)- Direction résultante.

Nous considérons la direction résultante aux 3 heures d'observation et mois par mois. Les directions de transport ont été consignées en "transport à caractère NNE" et "transport à caractère E" (fig 6).

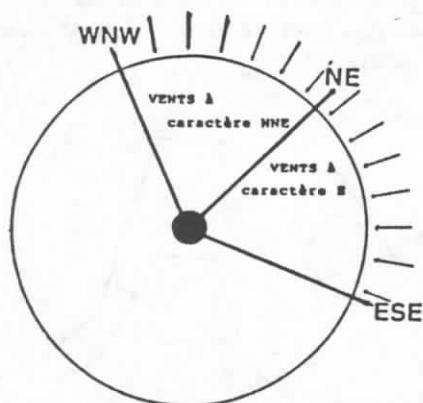


Fig6 : Les deux caractères directionnels des transports

Ainsi on obtient le tableau suivant :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
06h TU	*	*	*	+	+	+	+	+	+	*	*	*
12h TU	*	*	+	+	+	+	+	+	+	+	*	*
18h TU	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

* caractère E

+ caractère NNE

Il apparaît également 2 époques différentes dans l'année.

- D'avril à septembre : les 2 premières heures d'observation ont un "caractère E" et le 3^{ème} heure (15 h) garde son "caractère NNE".

Ces deux époques sont séparées par 2 mois (mars et octobre) qui assurent le passage d'un caractère à l'autre.

On peut conclure que les déplacements se font souvent selon une direction NNE à 18 h quelque soit la saison, alors qu'ils changent en fonction des saisons pour 06 et 12 h.

b)- Capacité de transport : (fig 7).

Ici apparaissent également 2 époques dans l'année quand on considère les Capacités de Transport à 12 et 18 h :

- De mars à octobre la Capacité de Transport à 18 h est supérieure à celle de 12 h. Le transport des sables croît tout au long de la journée pour atteindre son maximum en début de soirée.

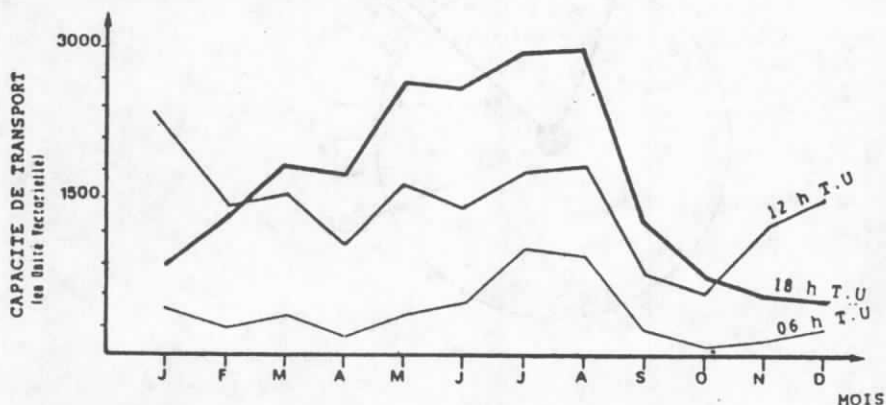


fig 7: Capacité de transport des sables aux 3 heures d'observation quotidiennes pour les 12 mois de l'année.

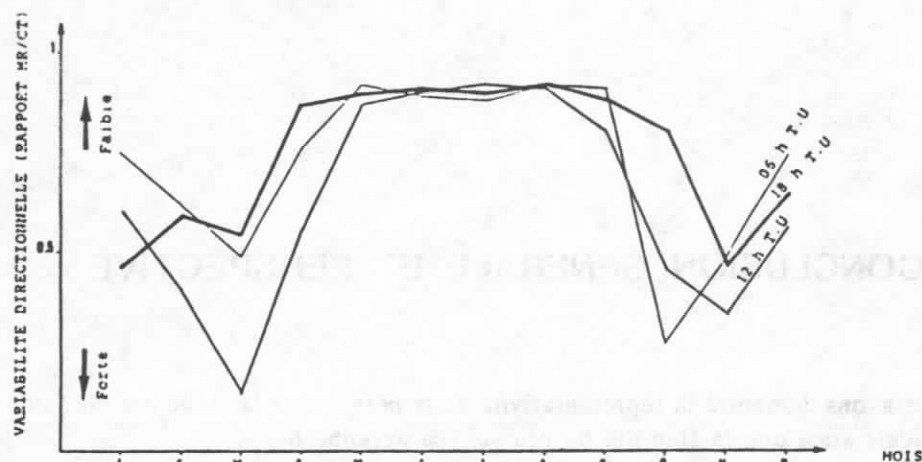


fig 8: Variabilité directionnelle des déplacements de sable aux 3 heures d'observation quotidienne pour les 12 mois de l'année.

- De novembre à février la Capacité de Transport à 12 h est supérieure à celle de 18 h. L'essentielle des transports s'effectue en milieu de journée.

c)- Variabilité directionnelle (rapport MR/CT) (fig 8).

On constate une forte variabilité directionnelle, toutes heures confondues, en mars et en novembre. Celle-ci reste cependant élevée de novembre à décembre pour les transports à 12 et 18 h.

De mai à septembre, les transports se font selon une direction constante, quelque soit l'heure.

5) Conclusion.

Si un cycle à l'échelle de la décennie n'a pu être mis en évidence, il apparaît nettement que le transport des sables est un phénomène cyclique, en intensité et en direction, aux échelles annuelle et quotidienne.

Ce cycle comporte 2 phases :

a)- De mars à octobre-novembre.

Les capacités de transport sont les plus élevées (avec un maximum en juillet et août) et les sables se déplacent du NNE vers le SSW. Durant cette phase, la Capacité de Transport est assez faible le matin, elle s'accroît régulièrement pour être à son maximum en fin de journée et chuter pendant la nuit.

b)- D'octobre-novembre à mars.

Les Capacités de Transport sont plus faibles avec un minimum en décembre et les sables se déplacent d'E en W. Durant cette phase, la Capacité de Transport est faible le matin, atteint son maximum en milieu de journée et décroît l'après-midi.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Nous avons démontré la représentativité de la période sur laquelle ont été faits nos calculs ainsi que la fiabilité de ceux-ci (paragraphe 6 - A).

Ces résultats peuvent être utilisés pour améliorer la gestion et la prévision du phénomène d'ensablement mais auparavant il convient de :

- Préciser par des mesures *in situ* la vitesse d'arrachement minimale.
- Appliquer ces calculs aux relevés de vent enregistrés à la station météorologique de la Sebkhat Tah (données météorologiques actuellement demandées à l'ONE).
- Comparer tous les coefficients calculés à des déplacements effectifs observés sur le terrain pour mettre au point des courbes de corrélation propres à la Province de Laayoune. Une méthode de suivi dans le temps du déplacement de dunes types doit être mise au point pour cela (repères terrain, photos aériennes, images SPOT Panchromatique). Une méthode similaire a été appliquée par la SOGREAH mais malheureusement pendant une année (1984) et une période de cette année (24 mars-26 avril) nullement représentative de ce phénomène. Donc il faudra, en fonction de ces résultats préliminaires, choisir judicieusement la période d'observation.
- Relier le mécanisme de ces déplacements au schéma climatique général de cette partie du Globe (position des cellules anticycloniques, variations de température du Courant des Canaries passant à proximité, etc) pour améliorer la prévision du phénomène.