

8 2 4

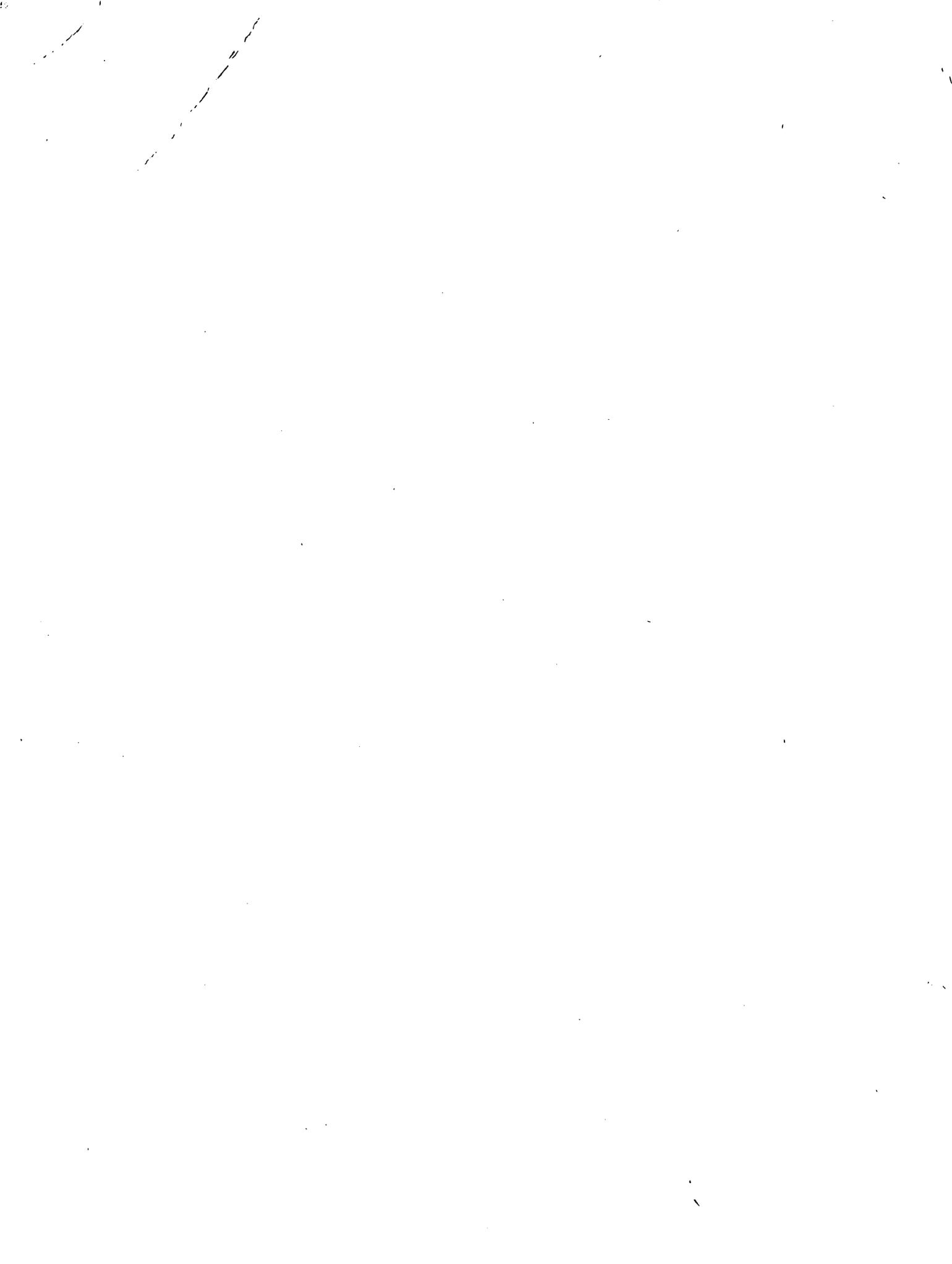
A F W 6 2

ÉTUDE DU RÉGIME DES VENTS EN AFRIQUE OCCIDENTALE

Possibilités d'utilisation des éoliennes
pour l'exhaure de l'eau

Rédigé par I. CHERET

824-AFW62-1
9406



9406

ÉTUDE DU RÉGIME DES VENTS EN AFRIQUE OCCIDENTALE

Possibilités d'utilisation des éoliennes
pour l'exhaure de l'eau

Rédigé par I. CHERET

L'initiative du présent ouvrage,
dont l'idée remonte à quelques années, revient à l'ancien
« SERVICE DE L'HYDRAULIQUE DE L'A. O. F. »

Sa réalisation a été rendue possible par une subvention du FIDES

Service de l'Hydraulique
de l'A. O. F.

POSSIBILITÉS D'UTILISATION DES ÉOLIENNES

POUR L'EXHAURE DE L'EAU

L'idée d'utiliser l'énergie gratuite du vent pour la production d'électricité ou l'exhaure de l'eau à partir de puits profonds est tentante et elle a fait dans le monde l'objet de très nombreuses applications.

Dans les États francophones d'Afrique occidentale, pourtant, bien que des projets aient été envisagés à plusieurs reprises, aucune réalisation importante n'avait vu le jour dans ce domaine jusqu'aux années 1954-1955. Ce fait tient pour une grande part aux conditions un peu particulières de ces pays tant du point de vue des caractéristiques du vent que des désirs et possibilités des utilisateurs.

En 1954, cependant, l'ancien Service de l'Hydraulique de l'A. O. F. jugea utile de procéder à une étude plus approfondie de l'ensemble du problème de l'utilisation de l'énergie du vent pour l'exhaure de l'eau.

Après l'analyse des archives des services météorologiques, il était apparu nécessaire de préciser davantage les données disponibles sur le régime des vents. Une campagne de mesures systématiques fut entreprise et vingt anémomètres enregistreurs furent mis en place dans les diverses régions intéressées.

Par ailleurs le service météorologique procéda au dépouillement statistique systématique des données en sa possession.

Parallèlement, des offres de fourniture de matériel éolien furent sollicitées auprès des constructeurs du monde entier. Un premier dépouillement sur pièces écrites permit de choisir trois modèles qui apparaissaient particulièrement adaptés aux besoins du pays. Mais comme les caractéristiques fournies par les constructeurs ne permettaient pas d'orienter davantage le choix des utilisateurs, il fut décidé de monter un centre expérimental à Louga (Sénégal) où une éolienne de chacun des types retenus fut installée dans des conditions identiques et où l'on mesurait à la fois le vent et le débit pompé.

Enfin, à la lumière des premiers résultats et compte tenu des caractéristiques des nappes aquifères de la région de Gao (Mali), il fut décidé de lancer dans ce secteur une action-test d'équipement de points d'eau à l'aide d'éoliennes.

Les résultats de ces quatre séries d'opérations sont maintenant connus. Il paraît intéressant de les diffuser à tous ceux que les problèmes d'équipement des points d'eau ruraux peuvent intéresser. Tel est l'objet du présent ouvrage.

Celui-ci est encore bien imparfait. L'on trouvera au fil de ses chapitres, la relation des difficultés rencontrées et des approximations auxquelles on a dû se résoudre et qui réduisent sa portée scientifique. Des ordres de grandeurs ont cependant été précisés et les zones où l'éolienne pouvait fonctionner valablement ont été circonscrites. Nous espérons que ces renseignements seront profitables et permettront notamment d'éviter des investissements inutiles et de mieux délimiter le champ des études futures.

*
* *

Pour faciliter la compréhension de l'ensemble de l'ouvrage il nous a paru utile de commencer par un exposé du problème tel qu'il se pose pour les points d'eau d'Afrique Occidentale.

Chapitre I

INFLUENCE DES BESOINS EN EAU ET DU VENT SUR LES CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR ÉOLIEN

1,1 — *LE POINT D'EAU TYPE*

L'approvisionnement en eau des hommes et du bétail est fréquemment insuffisant en Afrique Occidentale et certaines populations de campagne sont obligées, en saison sèche d'aller chercher l'eau à 10, 15 ou même 20 km de leur lieu d'habitation. Des programmes importants de construction de points d'eau ont été réalisés depuis longtemps; d'autres sont en cours ou envisagés pour les années à venir. Étant donné l'immensité de l'Afrique occidentale, les conditions géologiques, météorologiques, économiques, etc. sont extrêmement diverses et les types de point d'eau (barrage, puits, forage) ainsi que leurs caractéristiques sont très variables d'un point à un autre.

De vastes étendues du territoire ont cependant la chance de disposer dans leur sous-sol de nappes souterraines suffisamment abondantes et le problème alors est d'amener l'eau à la surface de la manière la plus économique possible.

Les populations autochtones ont depuis longtemps fait appel à cette ressource et de très nombreux puits indigènes existent en Afrique occidentale. Leur diamètre varie de 1 m à 2 m et le puisage de l'eau y est fait à la main à l'aide d'outres suspendues à des cordes. Cependant, le fonçage de ces ouvrages est une tâche ardue dès que l'on descend à cinquante ou soixante mètres sous terre et il n'existait par suite, avant 1900, pratiquement aucun point d'eau dépassant 100 m de profondeur. L'apparition du matériel moderne, treuils, marteaux pneumatiques, etc., a grandement facilité le travail des puisatiers mais celui-ci reste pénible au-delà de 80 m de profondeur dans ces pays où la température au fond du puits dépasse 30° toute l'année dans une atmosphère saturée d'humidité. Le rendement tombe, même si l'on installe un système de ventilation, et les prix de revient augmentent très vite.

Les forages étroits, au rotary ou au battage, résolvent ce problème technique mais y substituent celui du choix du moyen d'exhaure. Or, celui-ci doit nécessairement être constitué d'une pompe mécanique mue par un moteur étant donné les dimensions réduites du trou. Lorsque le point d'eau est situé dans une agglomération disposant de personnel qualifié ou lorsque son importance économique justifie l'installation d'un tel personnel, la solution la meilleure est évidemment de poser un moteur électrique ou à explosion. Mais ces cas sont encore exceptionnels en Afrique occidentale. Dans ces pays le point d'eau type est situé en pleine brousse, loin de tout centre. Il doit satisfaire les besoins de villages groupant moins d'un millier d'habitants ou de troupeaux nomades, le nombre de bêtes venant s'abreuver journallement étant également de l'ordre d'un millier. Le débit nécessaire avoisine 10 à 20 m³/jour. L'installation permanente d'un mécanicien semble donc difficile à justifier. Or, les pompes à main et les norias à traction animale actuelles ne semblent convenir pour diverses raisons, que dans les zones à nappes peu profondes.

La seule énergie utilisable est dans ces conditions celle du vent. D'où l'intérêt porté aux éoliennes.

Il faut noter, d'ailleurs, que la puissance nécessaire est très faible. Puiser 2 m³/heure à 75 m de profondeur représente environ 0,5 kW. Étant donné toutes les pertes aux transmissions, l'éolienne doit pouvoir capter dans le vent entre 1,5 et 2 kW : on est loin des énergies en jeu dans les centrales électriques. Le problème posé est beaucoup plus facile. Mais pour bien comprendre la suite de l'exposé, il convient d'explicitier quelque peu le processus permettant l'utilisation de l'énergie du vent et pour cela il est commode de faire un parallèle avec la houille blanche à l'exploitation de laquelle chacun est maintenant bien habitué.

1,2 — *LE PRINCIPE DE L'ACTION DU VENT*

L'on sait qu'une turbine hydraulique ne tourne que sous une certaine charge d'eau et que son fonctionnement est d'autant plus facile que cette charge est plus forte. Les premières réalisations industrielles consistèrent d'ailleurs en l'équipement de chutes naturelles importantes. Petit à petit, cependant, l'industrie fit des progrès et l'on arrive maintenant à fabriquer des appareils à rendement convenable même pour de très basses chutes.

Il en est de même en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie du vent et il est plus facile d'obtenir des rendements satisfaisants d'une éolienne par vent fort que par vent faible, les appareils dans le premier cas étant d'ailleurs plus simples et plus légers que dans le deuxième.

Mais il ne suffit pas de réaliser des appareils industriels capables de fonctionner sous n'importe quelle chute ou pour n'importe quelle vitesse de vent. Les besoins en eau ou en électricité d'une agglomération humaine sont en effet assez constants dans le temps, et il faut lorsqu'on réalise une usine être sûr qu'on pourra tel jour à telle heure faire face à la demande. Or, les débits aussi bien des rivières que des courants aériens sont très variables suivant les saisons et, ceux du vent même au cours d'une journée. Il est donc nécessaire de prévoir un stockage de l'énergie disponible. Ce problème est résolu facilement en ce qui concerne la houille blanche par l'édification de barrages réservoirs, qui notons-le en passant, permettent en plus d'augmenter la charge sur les turbines. Par contre, la construction de barrages aériens dont l'objectif serait de permettre au vent de souffler à une vitesse donnée au moment voulu est évidemment irréalisable et le stockage dans ce cas ne peut être envisagé qu'après transformation de l'énergie éolienne, soit en électricité (batteries d'accumulateurs) soit en eau (réservoirs). Ces aménagements sont cependant coûteux et il n'est bien souvent rentable de placer des moteurs aériens qu'à des emplacements où les vents sont relativement réguliers.

Il faut donc avant tout achat d'éoliennes procéder à une étude systématique du régime des vents dans la région que l'on envisage d'équiper afin de préciser, en fonction de leurs caractéristiques de vitesse et de constance, le modèle de moteur éolien, disponible dans l'industrie, le mieux adapté, ainsi que l'importance des installations annexes nécessaires. Cette étude est d'autant plus indispensable que l'énergie disponible dans le vent et le rendement des aéromoteurs sont très sensibles aux variations de vitesse de courant aérien.

1,3 — L'ÉNERGIE DU VENT

L'énergie produite par un corps en mouvement de masse « m » et passant dans un moteur, d'une vitesse « v₁ » à une vitesse « v₂ » est donnée par le théorème des forces vives.

$$E = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2)$$

Dans le cas du vent, il existe un débit continu et il est plus simple de parler de puissance. Il suffit pour cela de diviser les deux membres de l'équation ci-dessus, par le facteur temps. La formule devient :

$$P = \frac{1}{2} q (v_1^2 - v_2^2)$$

P étant la puissance

q le débit de masse passant chaque seconde dans le moteur, donné par la formule :

$$q = d S v_1$$

d étant la masse spécifique de l'air

S la surface totale de la roue du moteur

v₁ la vitesse du vent arrivant sur l'éolienne

v₂ la vitesse du vent à la sortie.

La puissance théorique maximum récupérable s'obtient en admettant que l'air sort du moteur à une vitesse nulle.

$$v_2 = 0$$

La formule devient alors :

$$P = \frac{1}{2} d S v \times v^2 = \frac{1}{2} d S v^3$$

Si l'on prend :

$$\begin{aligned} d &= 1,2 \text{ kilogramme-masse par m}^3 \\ S &\text{ en m}^2 \\ v &\text{ en m/sec.} \end{aligned}$$

La puissance P est donnée en Kw par la formule :

$$P = 0,6 S v^3 \times 10^{-3}$$

En pratique, cependant, l'air devant obligatoirement sortir du moteur la vitesse v₂ n'est jamais nulle et la puissance obtenue est inférieure à celle donnée par la formule ci-dessus. Le rendement intervient et l'on a : P = 0,6p S v³ × 10⁻³.

Le rendement varie avec la vitesse (cf § 1,4).

Mais de toute façon, la puissance disponible étant de la forme :

$$P = K v^3$$

il est indispensable d'adapter, le mieux possible, le moteur aérien aux vitesses existantes dans la région considérée.

1,4 — LES MOTEURS AÉRIENS

Or, le problème posé au moteur aérien « produire dans l'année le maximum d'énergie mais aussi fonctionner en toutes saisons et pendant le plus grand nombre d'heures possible par jour » comporte des exigences contradictoires.

Si l'on est tenté, en effet, vu la formule :

$$P = Kv^3$$

de choisir un moteur aérien donnant le maximum de rendement pour les fortes vitesses, la nécessité de le faire tourner tous les jours en toutes saisons afin d'éviter les installations de stockage importantes, conduit à rechercher un compromis car, hélas, le moteur idéal ayant un rendement constamment élevé pour toutes les vitesses de vent, n'existe pas encore dans l'industrie. Celle-ci offre deux types principaux de moteurs éoliens :

— le premier dit « Hélice » comporte 2, 3 ou 4 pales le plus souvent orientables. Il peut tourner à des vitesses importantes et utilise de façon satisfaisante toute la gamme des vents puissants. Il est assez proche de ce fait du moteur idéal.

Par contre, la petite superficie de sa voilure ne lui permet de développer qu'un couple réduit par vent faible et place sa vitesse de démarrage à une valeur relativement élevée (fig. 1).

— le second dit « Multipale » comporte, au contraire, pour pallier cet inconvénient, un grand nombre de pales. Il offre au vent une grosse surface de voilure et développe, par conséquent, un couple fort, même par vent faible. Sa vitesse de démarrage est basse. Par contre, l'impossibilité pratique d'orienter ces pales en fonction de la vitesse du vent et le poids de l'installation font que le rendement des moteurs de ce type diminue rapidement lorsque la vitesse croît (fig. 2).

A l'intérieur de ces deux classes, il existe bien sûr toutes sortes de modèles et un échantillonnage assez continu de courbes de rendement en fonction de la vitesse du vent mais sans qu'aucun type satisfasse toutes les exigences.

Un choix s'impose donc et ce choix exige pour chaque cas une connaissance poussée du régime des vents.

1,5 — LES PREMIÈRES CONNAISSANCES SUR LE VENT EN AFRIQUE OCCIDENTALE

Les premières études systématiques du régime des vents au sol ont été entreprises en Afrique occidentale par les services météorologiques pour les besoins de l'aéronautique. Les mesures ont été faites à l'aide, soit d'anémomètres enregistreurs donnant la vitesse instantanée en m/s sur un diagramme journalier, soit de chronototalisateurs mesurant le chemin parcouru par le vent en fonction du temps.

D'autre part, dans toutes les stations, pendant les heures d'ouverture, les observations horaires de vitesse et de direction sont consignées sur un cahier spécial en même temps que les autres renseignements météorologiques. Pour ces observations horaires, la vitesse notée sur les documents est, conformément aux normes internationales, la vitesse moyenne observée pendant les dix minutes précédant l'observation. Ce sont ces moyennes de dix minutes qui sont qualifiées ici de vitesse instantanée.

L'altitude de ces appareils varie malheureusement selon les lieux entre 6 m et 15 m, ce qui diminue considérablement le nombre de postes utilisables pour l'étude de l'emploi de l'éolienne.

Néanmoins, les renseignements recueillis ont permis de se rendre compte du fait

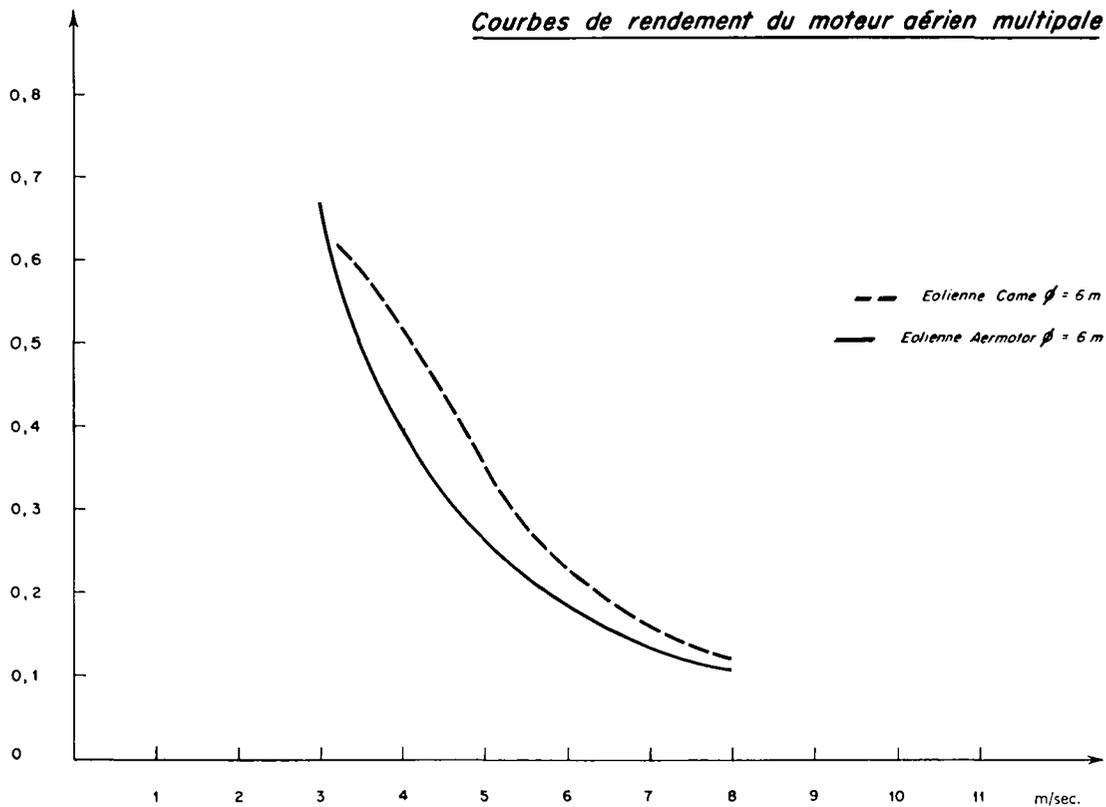
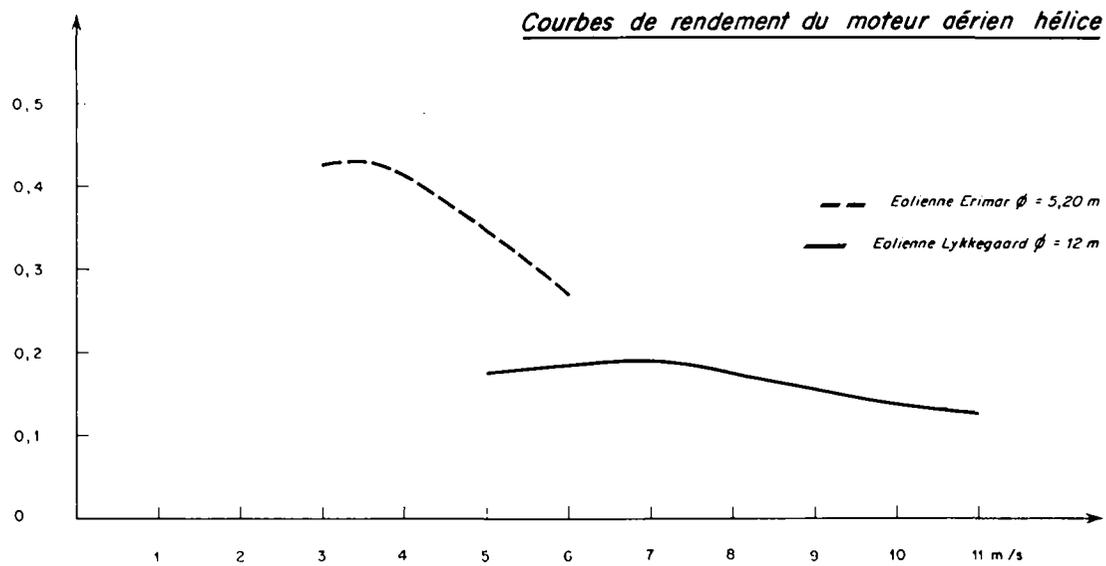


Fig. 1 et 2 — Courbes de rendement (d'après les Fabricants)

que les vents étaient en Afrique occidentale extrêmement faibles, sauf dans la bande côtière au nord de Dakar où les alizés se font sentir. A Gao (Mali) par exemple, plus des 3/4 des vents ont une vitesse inférieure à 5 m/s; dans le sud de l'État du Niger les 5/6 des vents ne dépassent pas 4 m/s. La carte ci-jointe (fig. 3) donne d'ailleurs une idée de la vitesse moyenne annuelle des vents.

Dans ces conditions, la production à partir de l'énergie éolienne d'électricité en quantité suffisante pour satisfaire les besoins des villes ou même des villages de brousse n'est ni intéressante, ni rentable. Les premières conclusions recommandèrent donc l'abandon de ces études et un certain nombre d'appareils de mesure furent enlevés.

Quelques années plus tard, cependant, le Service Hydraulique fut amené à reprendre la question mais cette fois non plus sous l'angle de la production d'électricité mais en vue d'une exhaure économique de l'eau à partir de puits profonds. Dans ce cas, comme on l'a vu, on est, en effet, très en dessous des besoins de l'électrification. Le problème méritait donc d'être repris à la base. C'est ce qui a justifié le lancement d'un nouveau programme de mesure des vents, destiné à préciser certains points et à déterminer les conditions dans lesquelles les mesures faites par les services météorologiques pouvaient s'appliquer au cas de l'éolienne.

Moyennes des observations quotidiennes à 06, 12 et 18 h TU; sur la période 1951-1955

Vitesses en mètres par seconde

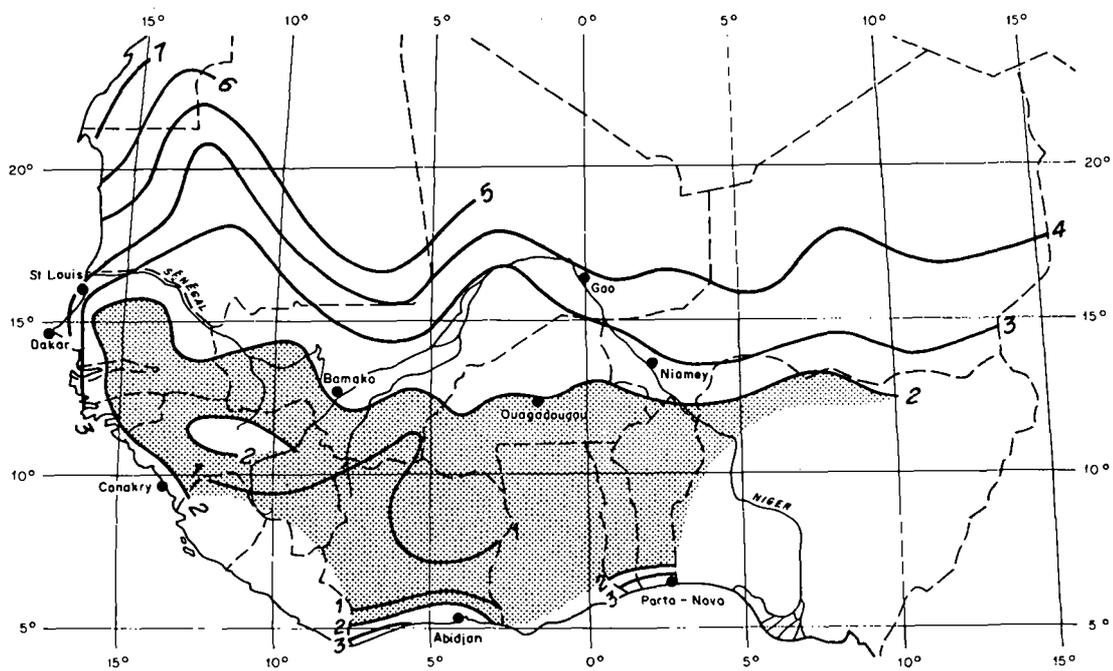


Fig. 3 — Isotaches moyennes annuelles de vent (*Service Météorologique*)

Chapitre II

LE VENT — MÉTHODES DE MESURE

2,1 — CHOIX DU TYPE D'APPAREIL DE MESURE

Le nouveau programme de mesures du vent fut préparé soigneusement. Les caractéristiques des divers appareils de mesure disponibles dans le commerce furent étudiées en fonction des conditions de l'Afrique occidentale. En bref, deux notions fondamentales retiennent surtout l'attention.

En premier lieu, il apparut qu'il était possible de mesurer le vent sous deux formes :

- la forme simple donnant la vitesse instantanée du vent ;
- la forme intégrée, donnant suivant les appareils, soit le chemin parcouru par le vent dans un temps donné, soit directement l'énergie reçue (kWh) par m^2 de surface alaire.

Comme les besoins de leur côté peuvent toujours être évalués en kWh par jour, par mois ou par an, l'on voit que les compteurs de ce dernier type sont d'un emploi très facile et par suite très séduisant. Ils ont pourtant des inconvénients sérieux du fait de leur principe même. Étant donné qu'ils intègrent automatiquement les renseignements reçus et ne livrent qu'un chiffre total d'énergie, leurs indications ne sont valables que dans la mesure où leur courbe de rendement en fonction de la vitesse du vent est identique (à un facteur constant près) à celle de l'appareil utilisateur. Ceci est à peu près réalisé pour les éoliennes hélices, dans les zones de vent moyen et fort mais ne l'est pas pour les éoliennes multipales dont le rendement est maximum à la vitesse de démarrage (qui n'est très souvent pas la même que celle du compteur) et décroît très vite ensuite (alors que celui du compteur reste constant) (fig. 4). Ainsi le compteur indiquera le même chiffre qu'il y ait

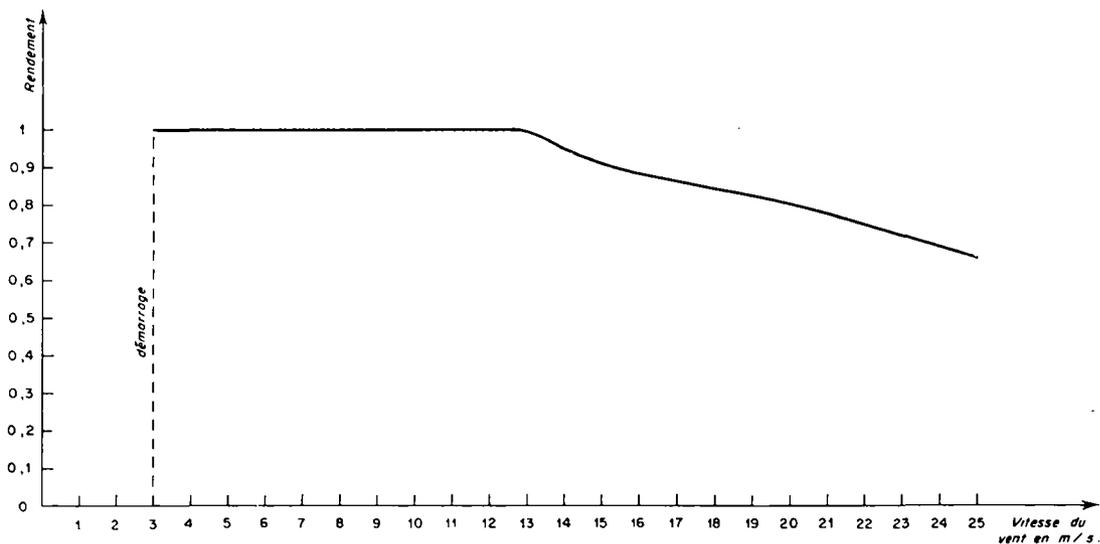


Fig. 4 — Courbe de rendement d'un anémomètre.

eu 16 heures de vent de 4 m/s, ou 2 heures de vent de 8 m/s (1), alors qu'une éolienne multiple ayant un rendement de 0,4 par vent de 4 m/s et de 0,13 par vent de 8 m/s élèvera trois fois plus d'eau dans le premier cas que dans le second.

Il fallait donc absolument choisir pour l'Afrique occidentale des appareils mesurant simplement la vitesse instantanée du vent, ceci au moins pour les premières études de base. Il est possible que plus tard, une fois connues les caractéristiques principales du vent, on revienne aux appareils intégrateurs notamment pour faire des études locales comparatives et choisir, dans des limites relativement étroites, des zones plus favorables que d'autres.

La seconde notion fondamentale à préciser fut celle de la fréquence des observations. Fallait-il un enregistrement continu ou suffisait-il de faire des lectures intermittentes et dans ce dernier cas, à quels intervalles de temps? L'analyse des besoins a montré qu'il était nécessaire dans le cas de points d'eau, non seulement de connaître le nombre d'heures total de fonctionnement d'un appareil donné dans une année ou dans un mois mais également de préciser la durée des arrêts éventuels et leur espacement afin de choisir une puissance d'éolienne et une capacité de stockage suffisantes pour ne jamais priver d'eau les usagers. Or, le vent est un phénomène essentiellement capricieux : cette condition conduit à faire une étude poussée de ses variations journalières et par conséquent à adopter un appareil enregistreur.

Le modèle finalement retenu est le rectigraphe Chauvin-Arnoux démarrant à 2 m/s, dont la sensibilité est maximum pour des vitesses comprises entre 3 m/s et 15 m/s. La vitesse de déroulement de la bande d'enregistrement peut être 15, 30, 60, 120 ou encore 240 mm/h. Nous avons choisi 60 mm/h.

A la demande du Service, la Société adopta un rouleau spécial de papier dont la longueur totale est de 23 m ce qui permet 16 jours de lecture entre chaque changement et autorise par suite l'installation des appareils en pleine brousse.

La hauteur du mât de support a été prise égale à 15 m, dimension maximum des pylônes standard des grandes marques d'éoliennes.

2,2 — PRÉCISION NÉCESSAIRE AU DÉPOUILLEMENT

Les premiers renseignements fournis par les études des services météorologiques avaient montré que les vents étaient très faibles en Afrique occidentale et que l'on se

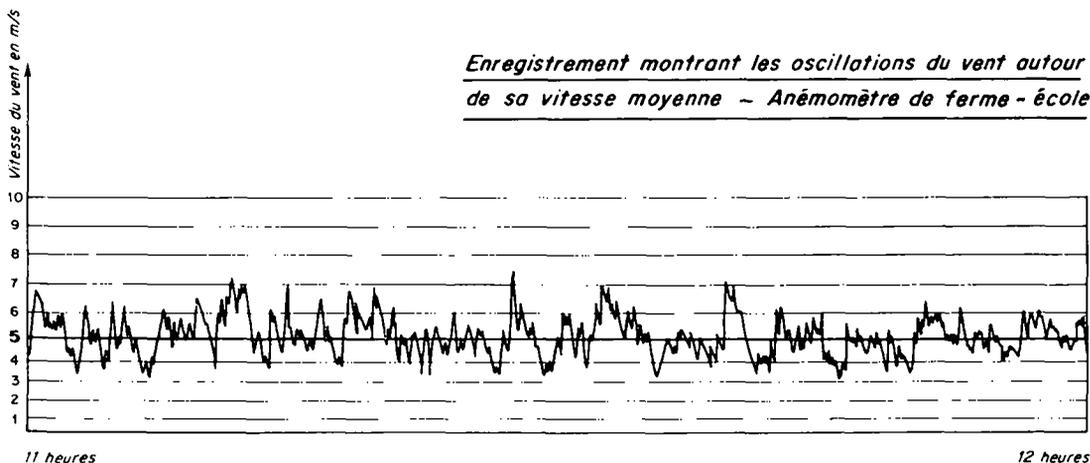


Fig. 5 — Oscillations instantanées du vent

(1) — en effet $16 \times 4^3 = 2 \times 8^3$.

trouvait dans une zone marginale du point de vue de l'utilisation des éoliennes. Ceci imposait d'effectuer les études avec le maximum de précision.

Par ailleurs, les relevés dont on a pu disposer dès le début des mesures ont montré que le vent a des oscillations très rapides autour de sa vitesse moyenne (cf. fig. 5), même lorsque celle-ci est faible. Ces oscillations compliquent le travail de dépouillement et nuisent, bien entendu, à sa précision.

Comme l'objet final des études est de déterminer les possibilités d'adaptation des éoliennes aux vents existants et non l'étude purement scientifique de ceux-ci, on a cherché à voir dans quelle mesure les éoliennes suivaient ou au contraire amortissaient ces sautes de vent.

Trois éoliennes représentant chacune les 3 grandes marques retenues après un appel d'offres général, furent donc installées côte à côte sur des forages spécialement réalisés à cet effet dans l'enceinte du Service de l'Hydraulique à Louga (Sénégal), et à une même hauteur au-dessus du sol.

Les vents furent enregistrés par un anémomètre placé à la même altitude sur une bande se déroulant à la vitesse de 240 mm à l'heure.

De son côté la tige de l'éolienne fut reliée par l'intermédiaire d'une bielle et d'une came à la dynamo d'un autre anémomètre et ses mouvements furent ainsi enregistrés sur une bande identique à la précédente.

La comparaison des deux courbes au même instant (cf. fig. 6) a permis les constatations suivantes :

- l'éolienne étudiée démarre chaque fois que le vent atteint ou dépasse 4 m/s environ pendant 10 à 15 secondes;
- elle s'arrête (assez lentement) dès que le vent s'abaisse pendant quelques secondes au-dessous de 3 m/s.
- Les sautes de vent d'une durée de quelques secondes apparaissent sur les deux courbes avec des décalages minimes.

Il semble donc, en conclusion générale, que l'éolienne étudiée est presque aussi sensible que l'anémomètre lui-même. Elle n'amortit guère les oscillations rapides du vent et toute étude se voulant complète, devrait par suite en tenir compte.

Étant donné cependant, les complications qu'une telle décision apporterait au processus de dépouillement, il a paru utile d'essayer d'évaluer l'ordre de grandeur de l'erreur qui serait commise par un polissage plus ou moins complet de la courbe, au cours duquel on remplacerait les vitesses instantanées vraies par une moyenne calculée sur une durée plus ou moins longue.

L'élément important en définitive étant le débit pompé, c'est-à-dire, l'énergie utile, proportionnelle à v^3 , il faut comparer les valeurs trouvées par les différentes méthodes pour les sommes, sur une période donnée, des cubes des vitesses. Ainsi, en une période comptant n intervalles de temps élémentaires on a dans le premier cas la somme des cubes des vitesses vraies $\sum_1^n v_i^3$, et dans le second cas le produit par n du cube de la

vitesse moyenne $v_m = \frac{\sum_1^n v_i}{n}$. L'élément intéressant est bien entendu le rapport de ces deux grandeurs :

$$Ec = \frac{\sum_1^n v_i^3}{\left[\frac{\sum_1^n v_i}{n} \right]^3}$$

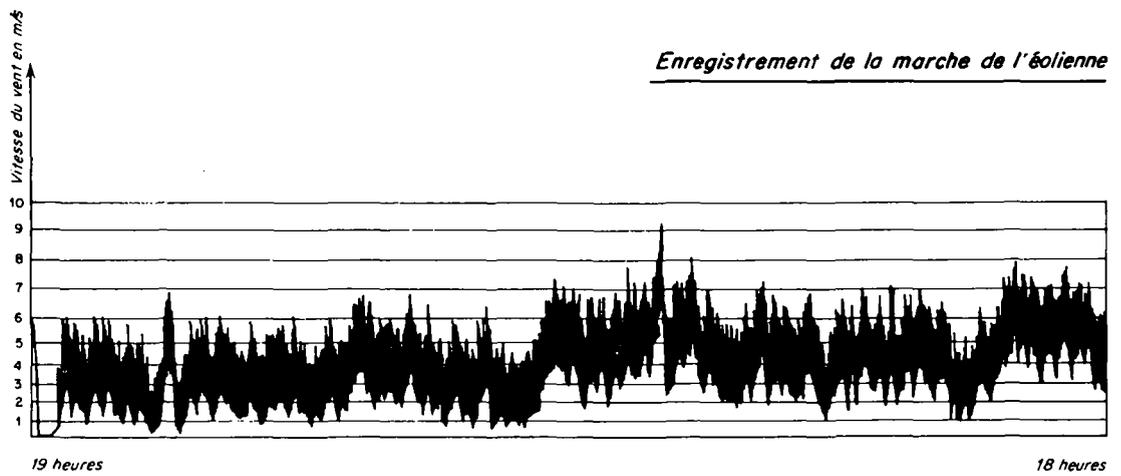
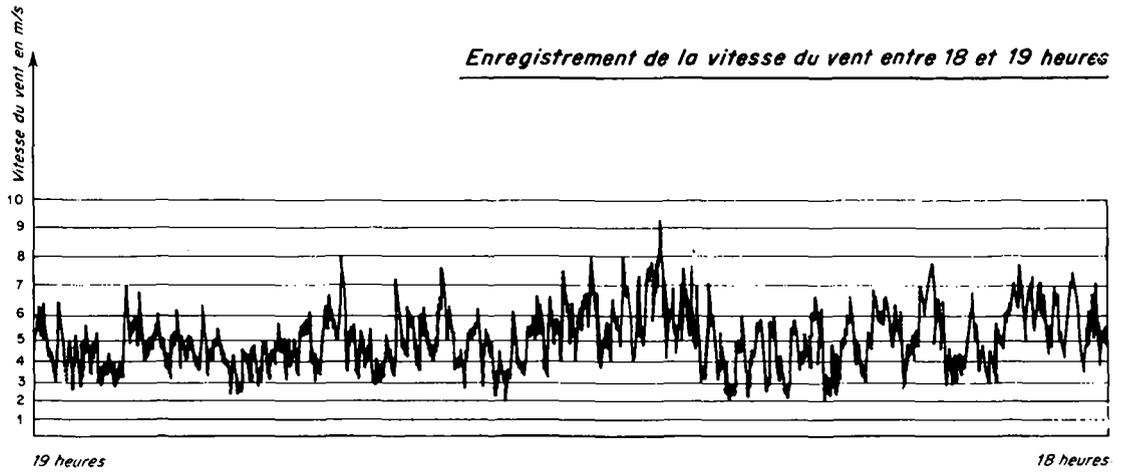


Fig. 6 — Comparaison entre l'anémomètre et l'éolienne

STRUCTURE ÉNERGÉTIQUE DU VENT

EXPÉRIENCES DE LOUGA

Durée : 3 heures Vitesse moyenne : 4,11
 Vitesse minimum : 2,87 Vitesse maximum : 5,10

Intervalles	Ec		
	Minimum	Maximum	Moyenne
5'	1,05	1,35	1,20
10'	1,10	1,31	1,20
15'	1,12	1,30	1,21
30'	1,15	1,30	1,23
1 h	1,20	1,30	1,26
3 h			1,27

EXPÉRIENCES DE TILLABERY

Durée : 3 heures Vitesse moyenne : 5,18
 Vitesse minimum : 3,25 Vitesse maximum : 7,15

Intervalles	Ec		
	Minimum	Maximum	Moyenne
5'	1,02	1,28	1,12
10'	1,03	1,24	1,13
15'	1,06	1,22	1,13
30'	1,09	1,22	1,14
1 h	1,10	1,21	1,15
3 h			1,24

Ce rapport a reçu parfois le nom de coefficient de structure énergétique du vent.

On a dans ce but, sélectionné deux enregistrements, de 3 heures chacun, faits l'un à Louga (Sénégal) l'autre à Tillabery (Niger). Ces enregistrements ont été découpés en intervalles de 15 secondes, et on a considéré comme vitesses « individuelles », v_i , représentatives des vitesses instantanées vraies, les vitesses estimées à l'œil dans chacun de ces intervalles. On a ensuite calculé pour des durées de 5', 10', 15', 30', 1 heure et 3 heures d'une part les valeurs de :

$$\sum_1^n v_i^3$$

et d'autre part celles de $n \left[\frac{\sum_1^n v_i}{n} \right]^3$

Les valeurs trouvées du coefficient de structure énergétique du vent sont condensées dans le tableau ci-contre. On y voit que ce coefficient est fonction de la vitesse du vent et de la longueur de l'intervalle considéré. De plus, il semble que pour une même vitesse de vent et un même intervalle, les écarts de Ec par rapport à la moyenne, soient faibles. M. Golding a d'ailleurs ouvert la voie par les expériences qu'il décrit dans son

ouvrage « Generation of Electricity by wind-power » et qui ont abouti à des conclusions similaires.

Si donc dans le dépouillement systématique on décide de prendre des moyennes, par exemple horaires, au lieu des vitesses instantanées, l'énergie réellement disponible dans le vent sera pour une vitesse moyenne de 4 m/s supérieure environ de 23 % à l'énergie calculée, la marge d'erreur résiduelle étant faible. Une telle méthode, qui simplifie considérablement les opérations est donc fort admissible.

Mais ceci étant, encore faut-il pouvoir déterminer rapidement ces moyennes horaires. La Société* à qui a été demandé le travail matériel de dépouillement a comparé les résultats obtenus par les trois procédés suivants :

1. Lecture de la vitesse instantanée du vent d'heure en heure directement sur la courbe d'enregistrement.

2. Tracé de la courbe de tendance à l'estime, et lecture de son ordonnée instantanée d'heure en heure aux mêmes instants que ci-dessus.

3. Par tranches de une heure axées sur les instants des lectures ci-dessus, tracé des horizontales « équisurfaces » de la courbe moyenne (c'est-à-dire des moyennes horaires de la courbe de tendance) et lecture de leurs ordonnées.

Elle a pu conclure que la méthode simple et rapide des lectures directes de vitesses instantanées était équivalente à celle de la courbe moyenne, si l'on acceptait comme limite des écarts le chiffre de 0,5 m/s.

Ceci est évidemment valable pour les courbes annuelles où sont condensées un grand nombre de mesures, et encore vrai pour les diagrammes mensuels, mais n'est probablement plus applicable aux études journalières, où l'on ne disposera que de 24 mesures, chiffre insuffisant pour que jouent les compensations.

Il a été, en conséquence, décidé :

- de réduire l'intervalle de base à 15 minutes;
- de tracer pour étudier les risques d'arrêt des éoliennes par suite d'absence de vents des diagrammes groupant deux journées à la fois, ce qui est justifié, la capacité des réservoirs installés à côté des éoliennes correspondant précisément à une consommation de cet ordre.

Le nombre des mesures est ainsi voisin de :

- 200 par couple de journées;
- 3 000 par mois;
- 36 000 par an ;

ce qui paraît amplement suffisant.

Notons enfin que l'étude des courbes de rendement des moteurs aériens ainsi que de la forme de la courbe vitesse-durée du vent montre qu'il faut absolument pouvoir classer les vents par tranches de 1 m/s au moins. La figure 7 ci-jointe, fait ressortir la distorsion que l'on obtient si l'on n'agit pas ainsi. (Deux courbes très différentes peuvent être interpolées entre des points éloignés). La figure 8 montre, de son côté, qu'une variation de 0,5 m/s des vitesses peut correspondre à des différences de plus de 15 % sur les rendements.

L'irrégularité du vent et les défauts des appareils de mesure font cependant qu'il est pratiquement inutile de chercher une précision supérieure à 0,5 m/s; mais il faut chaque fois penser que lorsqu'on dit 3 m/s, cela veut dire au mieux $3 \pm 0,50$ m/s.

La précision des différents stades des mesures et des dépouillements est donc concordante, et l'on a pu ainsi disposer d'une méthode correcte d'étude des vents.

* Il s'agit du Bureau d'Études Techniques et d'Organisation (SEBA).

2,3 — RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES APPAREILS

L'objectif de la campagne de mesures ainsi décidée était de préciser les résultats déjà obtenus par les services météorologiques. Or ceux-ci montraient que les vents étaient très faibles dans la majeure partie de l'Afrique occidentale et probablement insuffisants dans tout le Sud pour assurer un fonctionnement correct des éoliennes. Il a été, en conséquence, décidé de placer les anémomètres surtout dans la zone limite où l'apport de précisions nouvelles était le plus intéressant, ainsi que sur une ligne Nord-Sud traversant le Mali, le Niger et le Dahomey.

De plus, il est apparu indispensable de vérifier la loi de variation des vitesses du vent avec l'altitude et il a été décidé de placer 3 anémomètres en un même endroit respectivement à 15 m, 18 m, et 25 m au-dessus du sol. Cette installation a été faite à Louga (Sénégal) où étaient déjà en place les 3 éoliennes-tests.

Ce sont les résultats enregistrés par ces appareils qui vont être maintenant analysés.

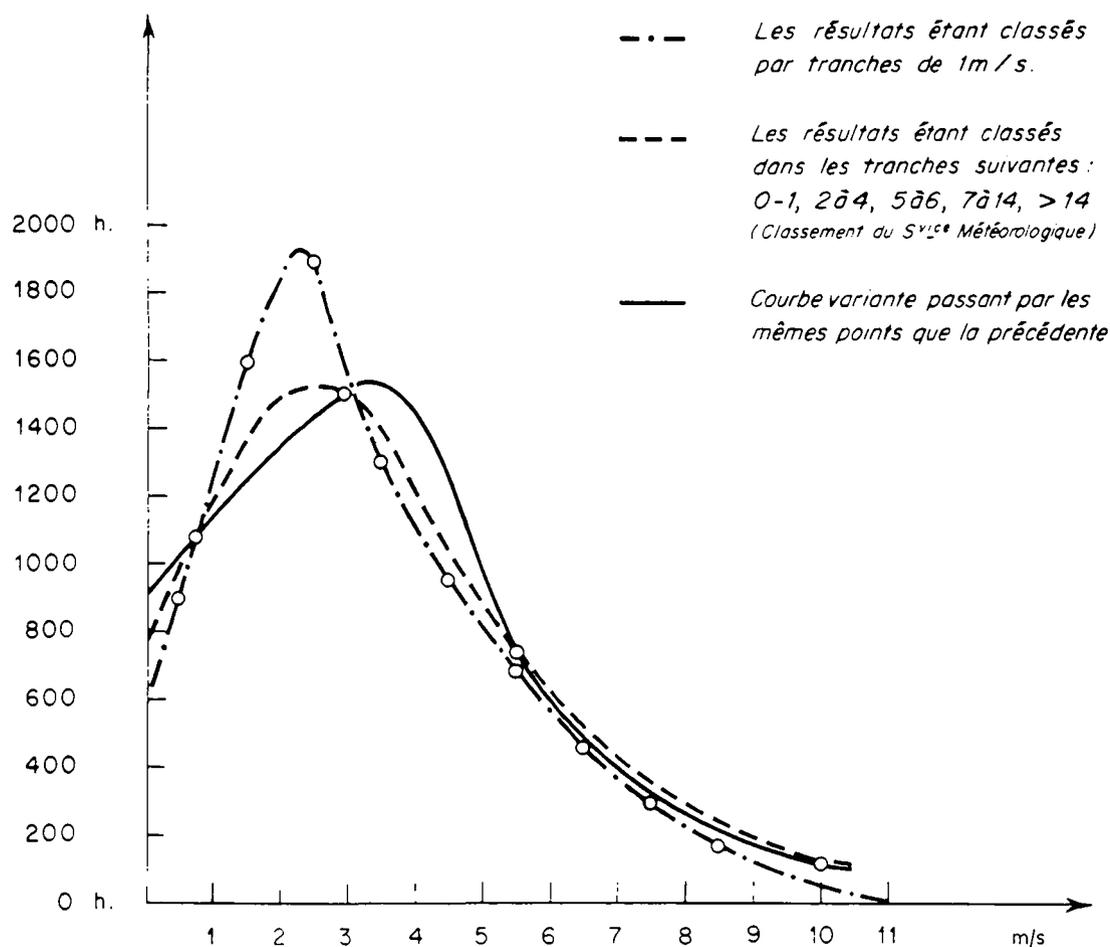


Fig. 7 — Variations du tracé des Courbes vitesses - fréquences avec la précision des données

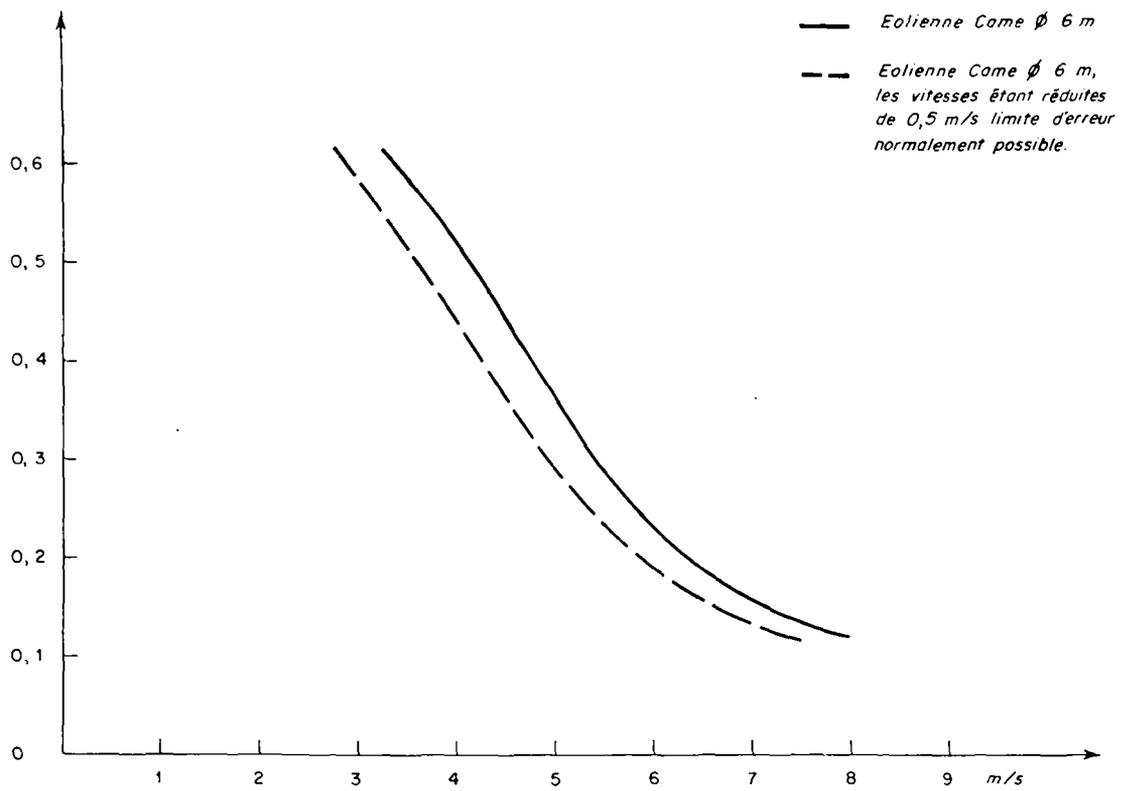


Fig. 8 — Déplacement de la Courbe de rendement du moteur aérien multipale avec la précision donnée

Chapitre III

LE VENT

RÉSULTATS OBTENUS EN AFRIQUE OCCIDENTALE

Les renseignements obtenus par le programme de mesures décrit ci-dessus ont été moins complets que prévus, à la suite notamment d'incidents matériels, mais ils ont néanmoins précisé certains faits. Leur comparaison avec les résultats du dépouillement statistique effectué par les services météorologiques de l'ensemble des données dont ils disposaient a permis par ailleurs de vérifier les conditions d'applicabilité de ceux-ci au problème de l'exhaure de l'eau par éolienne. L'ensemble donne déjà une assez bonne synthèse du régime des vents en Afrique Occidentale.

Ces différents points sont abordés ci-après en détail :

3,1 — *DIFFICULTÉS RENCONTRÉES DANS L'EXÉCUTION DU PROGRAMME DE MESURES*

De nombreuses difficultés ont été rencontrées dans l'exécution du programme de mesures qui ont gêné considérablement le dépouillement et nuï à la valeur des résultats finalement obtenus.

En premier lieu, comme la vitesse du vent qui provoque le démarrage des éoliennes est au minimum de 3 m/s, il est nécessaire d'obtenir un enregistrement suffisamment précis des vitesses de cet ordre de grandeur. Or, si les relevés sont réguliers pour des vitesses supérieures à 4 m/s la fidélité des appareils enregistreurs s'est révélée plus faible pour les vitesses de vent inférieures, sans que ce défaut soit trop accusé.

Mais en second lieu pour connaître les périodes de calme et leur fréquence, données qui déterminent la capacité de stockage à prévoir, les enregistrements doivent être continus sur de longues périodes. Or, les appareils installés se sont révélés assez délicats et des incidents nombreux se sont produits qui ont diminué la qualité des résultats obtenus jusqu'à les rendre parfois inutilisables pour certaines stations : coupure de la ligne électrique reliant l'anémomètre à l'enregistreur, dérangement de la plume, déplacement du zéro de la graduation, gêne apportée à la liberté de la plume, faiblesse d'écoulement de l'encre dans le style du fait de son épaissement dû à l'évaporation.

Par ailleurs, des insuffisances très nettes ont été constatées dans le recueil de ces divers renseignements. Le lecteur parfois ne changeait la bande que lorsqu'un mois complet s'était écoulé sans visiter l'appareil entre temps alors que son autonomie n'était que de 16 jours. Si la date de mise en route peut-être généralement considérée comme exacte il est souvent impossible de déterminer avec précision celle de l'arrêt puisque les incidents éventuels de marche n'ont pas été notés. Nous avons alors admis que l'appareil avait fonctionné autant de jours qu'il y a de périodes de 24 heures depuis la mise en route et que la vitesse du vent n'a pas été enregistrée pendant l'intervalle qui sépare cette date théorique d'arrêt de la mise en place de la nouvelle bande, ce qui provoquait ainsi parfois une interruption d'une quinzaine de jours par mois.

Certaines bandes ont d'autre part été égarées, les mentions de dates portées à l'extérieur des bandes ne correspondent pas toujours aux inscriptions intérieures d'où une certaine incertitude sur leur provenance réelle. Certaines bandes même ne portent pas le nom de la station et nous avons alors été obligés de rechercher où elles peuvent s'intercaler en fonction de la concordance des dates.

Les jours et les heures de début de bande présentent parfois des décalages pour les jours suivants, le recouplement a alors été fait compte tenu de la vitesse de déroulement. Celle-ci a subi parfois des irrégularités qui ne sont pas toujours mentionnées.

Enfin et c'est sans doute le défaut le plus grave si les dates portées sur les bandes sont exactes les heures sont souvent fantaisistes, le lecteur notant l'heure lue à sa montre sans s'inquiéter de la faire concorder avec celle du diagramme.

Ces difficultés outre qu'elles ont ralenti les opérations de dépouillement, ont provoqué une certaine imprécision dans les résultats qui ont dû être pondérés pour les rendre comparables entre eux en les ramenant à une année moyenne comme nous le verrons ultérieurement.

3,2 — *RÉSULTATS OBTENUS PAR LE PROGRAMME DE MESURES CONTINUES*

Il fut procédé au dépouillement des bandes d'enregistrement recueillies, suivant la méthode prévue à l'origine et décrite dans le § 2,2 ci-dessus.

La présentation des résultats peut être faite d'une manière commode sous deux formes :

- la courbe dite vitesses-fréquences, qui donne la fréquence d'occurrence de chaque vitesse de vent, c'est-à-dire le pourcentage du temps total pendant lequel le vent a soufflé à cette vitesse.
- la courbe dite vitesses-durées, qui donne pour chaque vitesse la durée pendant laquelle le vent a soufflé à une vitesse supérieure ou égale à cette vitesse.

Ces deux courbes se déduisent aisément l'une de l'autre.

L'idéal eût été de disposer de telles courbes pour chacune des journées des trois ou quatre années pendant lesquelles les mesures devaient se poursuivre. Des courbes mensuelles et annuelles auraient permis d'avoir une vue plus synthétique des phénomènes. Malheureusement les incidents signalés plus haut n'ont pas permis de procéder à un tel travail et l'on a dû se contenter du seul regroupement à l'échelon mensuel et annuel*.

Celui-ci s'est également heurté à des difficultés car en certaines stations les années ne sont pas complètes et des mois ne sont pas représentés du tout. Par ailleurs, certains jours manquent dans les mois.

Pour rendre aussi valables que possible les comparaisons entre les diverses stations, on a cherché à constituer pour chacune d'elles une année type.

Pour les journées manquantes dans un mois donné, on a pris comme chiffre la moyenne des autres journées du mois.

Pour les mois, on a procédé de deux façons. Lorsque des lectures étaient disponibles pour le mois en cause, on a pris comme chiffres la moyenne des données recueillies, qui suivant les stations provenaient de trois, deux ou une seule année. Lorsqu'il n'y avait aucune lecture pour un certain mois, les chiffres choisis furent établis à partir de ceux de deux mois qui précèdent et suivent le mois en cause.

* Le travail d'interprétation a été effectué par M. DERAM.

Cette méthode bien que critiquable évidemment, ne trahit pas les variations saisonnières du vent et a paru être la seule qui permette une comparaison valable des éléments assez disparates recueillis par les différents anémomètres.

Certains résultats furent d'ailleurs éliminés comme étant totalement insuffisants et l'on trouvera sur la figure A en annexe les courbes vitesse-durée des quinze stations qui furent retenues. La taille de la surface grisée donne immédiatement une bonne indication de l'importance des vents. A titre de comparaison on a reproduit côte à côte les courbes vitesse-durée d'un site d'Afrique occidentale et d'un site moyennement venté de région tempérée et provenant de l'ouvrage déjà cité de M. Golding. On se rend compte ainsi de la faiblesse des vents d'Afrique occidentale (fig. 9 et 10).

3,3 — COMPARAISON AVEC LES RÉSULTATS STATISTIQUES DES SERVICES MÉTÉOROLOGIQUES

Les dépouillements faits en 1957 par l'ancien Service Météorologique de l'A. O. F. ont permis en premier lieu de fournir pour vingt stations d'Afrique occidentale des tableaux qui donnent, pour chaque mois et l'année, la fréquence de l'occurrence de valeurs déterminées de la vitesse du vent. Ces fréquences proviennent de mesures instantanées (cf. § 1,5) faites toutes les 3 heures et représentent la moyenne de ces mesures pour la période 1951-1955. On a transcrit ces tableaux en courbes vitesse-durée qui sont reproduits sur la figure B en annexe.

Ces résultats ont du fait de la régularité des mesures une valeur statistique plus grande que celles provenant du programme de mesures du Service Hydraulique. Malheureusement ils concernent des mesures instantanées faites toutes les 3 heures et l'on peut se demander s'ils sont utilisables pour les besoins des éoliennes. La comparaison des deux séries de résultats fut l'un des objectifs de la nouvelle campagne de mesures.

La confrontation des deux séries de courbes vitesse-durée autorise cette comparaison qui permet les conclusions suivantes :

a) Les courbes vitesses-durées ont généralement la même forme et se placent au même niveau pour les vitesses de vent supérieures ou égales à 4 m. La coïncidence des courbes des mesures météo à Gao (Mali) et des mesures du Service Hydraulique à Menaka et Anefis (Mali) dans la même région est même remarquable. Partout, si l'on tient compte des petites différences de latitude ou d'implantation on aboutit à des courbes extrêmement voisines. Une seule exception notable, celle des mesures du Service Hydraulique à Gao mais il est quasi certain que cet anémomètre fut placé dans des conditions de vent très défavorables (cf. § 6,1).

La campagne d'enregistrements continus semble donc avoir démontré, ce que le service météorologique prévoyait, compte tenu de l'expérience acquise ailleurs dans le monde, à savoir que les résultats donnés par des mesures faites toutes les 3 heures donnaient une idée très correcte du spectre des vents.

b) Une réserve, cependant, est à faire touchant la conclusion précédente. La fréquence des vents de 3 m/s est nettement plus grande d'après les relevés provenant des enregistrements continus que d'après les mesures intermittentes. Les chiffres fournis par les services météorologiques semblent donc a priori légèrement pessimistes en ce qui touche l'emploi des éoliennes multipales modernes.

Quoi qu'il en soit et sous cette petite réserve, il semble que l'on puisse considérer

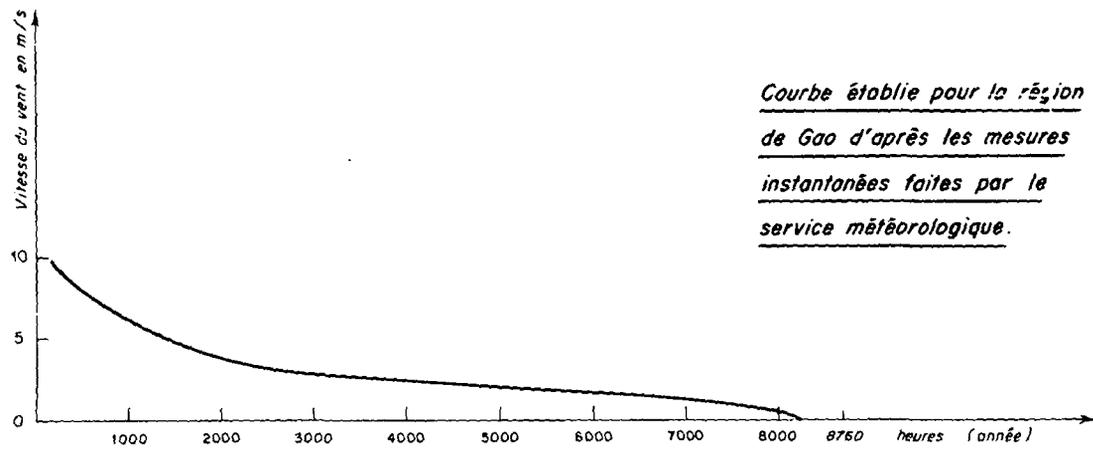


Fig. 9 — Courbe vitesse - durée d'une région ventée

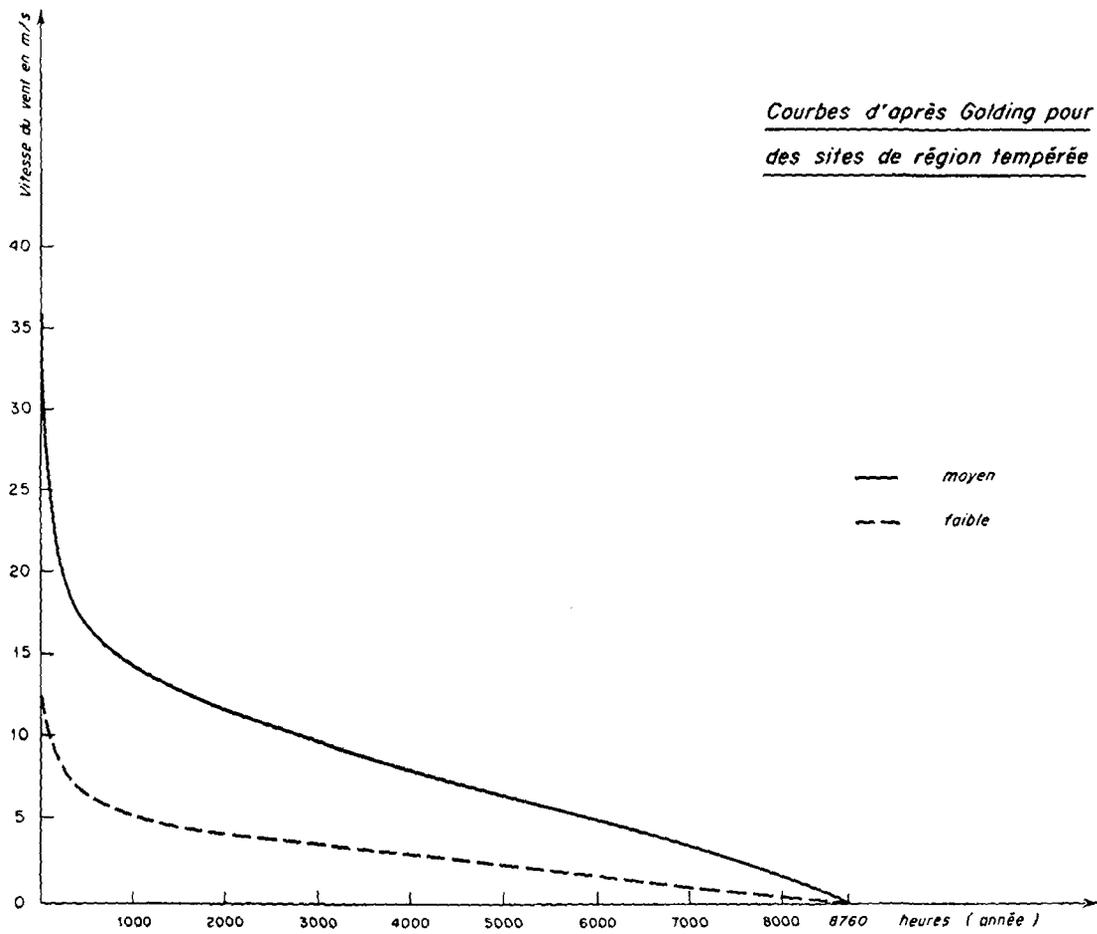


Fig. 10 — Courbes vitesse - durée d'une région de vents faibles

comme applicables aussi à l'éolienne les autres résultats déduits par le service météorologique de ses études et dépouillements statistiques et qui sont les suivants :

3,4 — LES COURANTS AÉRIENS

Les différents courants aériens spécifiques de l'Afrique occidentale sont :

a) *L'alisé maritime boréal* : Issu de l'anticyclone maritime boréal (ou anticyclone des Açores) il n'intéresse généralement que les côtes de la Mauritanie ou du Sénégal, où il est de beaucoup le vent prédominant durant la saison sèche (mi-novembre à mi-juin à Dakar). Sa direction générale est N. Sa vitesse est notable (en moyenne de l'ordre de 8 m/s).

b) *L'alisé continental ou air saharien* : Issu de l'anticyclone continental boréal, il intéresse, sans y être souvent prédominant, les régions sahariennes et sahéliennes au cœur de la saison sèche (décembre à février). Sa direction générale est N à NE. Sa vitesse est modérée.

c) *L'air soudanien ou harmattan* : De même origine que le précédent, il intéresse toute la partie de l'A. O. F. située au Nord du F. I. T. (littoral Ouest exclu). Sa direction générale est E, et sa vitesse est faible ou modérée; la variation diurne de cette dernière est importante (vitesse maximum dans l'après-midi, faible ou nulle la nuit).

d) *La Mousson* : Elle s'étend au sud du F. I. T. ; son origine lointaine est l'anticyclone austral (ou de Sainte-Hélène). Sa direction générale est SW et sa vitesse faible.

e) *L'alisé austral* : De même provenance que le précédent, il n'est susceptible d'intéresser que la côte sud de l'Afrique occidentale, et seulement au cours de la petite saison sèche (ses apparitions sont d'ailleurs fugaces). Sa direction générale est SE à S et sa vitesse assez notable.

3,5 — FRÉQUENCE DES PÉRIODES DE CALME ET INTERVALLES LES SÉPARANT

Le Service météorologique a regroupé dans des tableaux les renseignements obtenus sur les périodes de calme et les intervalles les séparant, données importantes comme on l'a vu, pour le dimensionnement des réservoirs de stockage qui doivent être adjoints à chaque éolienne.

Une période de « calme » est définie comme une suite continue d'observations tri-horaires où la vitesse du vent est égale à 0,1 ou 2 m/s. Cette période est comptée pour 1 jour si elle contient 8 observations successives de « calme », pour 2 jours si elle en contient 16, etc.

De même, un intervalle de temps séparant deux périodes de « calme » est compté pour 1 jour s'il contient 8 observations de vent de vitesse égale ou supérieure à 3 m/s, pour 2 jours s'il en contient 16, etc.

La suite d'observations composant un intervalle n'est pas forcément une suite continue d'observations de vents de vitesse égale ou supérieure à 3 m/s; elle peut comporter des périodes continues de vent « calme », mais de durée inférieure à 1 jour (soit 7 observations successives au maximum de vent inférieur à 3 m/s).

Comme les durées de vents de 3 m/s semblent dans les statistiques intermittentes

inférieures à celles des enregistrements continus, on se trouve là encore en présence de données a priori pessimistes.

On trouvera sur la figure C en annexe les courbes annuelles qui résument ces renseignements.

3,6 — VARIABILITÉ DU VENT D'UNE ANNÉE A L'AUTRE

Le Service météorologique précise que les renseignements fournis se rapportent à la moyenne des années 1951 à 1955 inclus; les valeurs obtenues pour une année donnée peuvent donc en différer assez sensiblement. Le petit nombre d'années d'observations disponibles n'a, malheureusement, pas permis d'étudier la variabilité de l'énergie d'une année à l'autre. On peut toutefois estimer que celle-ci est de l'ordre de 1 à 2. Pour un mois donné cette variabilité est naturellement bien supérieure, mais il n'est pas possible actuellement de préciser sa valeur, celle-ci dépendant beaucoup du mois et de la station considérés.

En ce qui concerne les enregistrements continus, on a procédé à un sondage sur les renseignements fournis par la station de Gao (Mali). Le tableau donne pour chaque mois et rapportée à la moyenne des années d'observation la durée pendant laquelle le vent a soufflé à plus de 3 m/s.

STATION DE GAO

Pour chaque mois, rapport entre la durée des vents > 3 m/s l'année indiquée et la durée des mêmes vents l'année moyenne.

Mois	Heures	1956	1957	1958	1959	1960	1961
Janvier	154	—	—	1,63	1,36	0,46	0,57
Février	192	—	1,90	—	0,98	0,21	0,94
Mars	196	—	1,15	—	1,19	0,84	0,82
Avril	132	—	1,70	—	1,06	0,80	0,44
Mai	167	—	1,22	—	1,40	0,86	0,60
Juin	226	—	1,38	—	1,14	0,98	0,53
Juillet	206	—	1,16	—	1,38	1,01	0,48
Août	178	1,11	1,44	0,44	0,96	1,13	—
Septembre	163	1,38	1,12	1,00	0,73	0,73	—
Octobre	113	1,38	1,46	1,27	0,53	0,39	—
Novembre	99	—	1,64	1,33	0,42	0,66	—
Décembre	129	—	1,53	1,17	0,74	0,55	—

Les écarts sont énormes et vont de 20 % à 190 % de l'année moyenne.

Il faut cependant se souvenir de deux points :

a) Seuls ont été pris en compte ici les vents de vitesse supérieure à 3 m/s. Cet « écrémage » renforce l'irrégularité, qui est certainement moins grande sur les moyennes vraies, et ce d'autant plus que la station d'enregistrement continu de Gao est située en un point de vents très faibles, ce qui renforce l'influence de l'écrémage.

b) L'éolienne ne sent en fait que le résultat de cet écrémage. Dans les régions à vent faible et sur le plan pratique des débits pompés l'irrégularité inter-annuelle est probablement aussi prononcée que celle décelée à Gao, ce qui est très défavorable à l'emploi des éoliennes dans ces régions.

3,7 — ÉVOLUTION DU VENT AVEC LA HAUTEUR

Dans l'enceinte de la station expérimentale de Louga (Sénégal) trois anémomètres enregistreurs ont été installés respectivement à 15, 18 et 25 m au-dessus du sol.

Le tableau suivant montre l'évolution du spectre du vent avec la hauteur :

% du vent de (m/s)	3	4	5	6	7	8	Utile > 3	< 3
15 m	18	9,7	5,5	1,7	0,2	-	35,1	64,9
19 m	20,1	13,2	9,5	4,1	0,7	-	47,6	52,4
25 m	21,7	15,2	10,9	6,0	1,5	0,2	55,5	44,5

La variation relative de la vitesse du vent semble plus importante entre 15 et 18 m au-dessus du sol qu'entre 18 et 25 m. Des obstacles tels que des arbustes, etc. ont pu contribuer au ralentissement des vents à 15 m bien que le terrain choisi fut assez dégagé.

Chapitre IV

LE MOTEUR ÉOLIEN CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les vents une fois connus, il faut adapter l'éolienne à leur régime au point d'utilisation, ce qui pose encore des problèmes difficiles. Dans le présent chapitre seront développées les considérations générales dont la connaissance est indispensable à la bonne compréhension des phénomènes en cause, le chapitre suivant étant consacré à la relation des résultats pratiques obtenus au centre expérimental de Louga.

4,1 — *CONSTITUTION DES ÉOLIENNES*

L'éolienne est un engin complexe dont le rendement global dépend :

- de la roue motrice;
- de la pompe;
- du système de transmission roue-pompe;
- et du tube d'exhaure de l'eau.

L'ajustement des caractéristiques de ces quatre parties au régime des vents et à la hauteur manométrique totale de pompage soulève des questions très délicates.

Comme les vents en Afrique occidentale sont faibles, on s'est limité ici à l'étude des éoliennes multipales entraînant des pompes à pistons.

Les éléments suivants sont particulièrement importants.

4,2 — *SYSTÈME DE TRANSMISSION ROUE-POMPE*

a) Le système de transmission roue-pompe est une constante caractéristique de la marque. Il ne peut faire l'objet d'une adaptation à des conditions locales diverses. Sa conception a cependant une influence certaine sur le fonctionnement de l'appareil, et il est intéressant de l'analyser.

Sur les éoliennes multipales qu'il nous a été donné d'observer il existe deux types de transmission :

— dans le premier, schématisé sur la figure 11, une petite roue dentée fixée sur l'axe de la roue motrice, entraîne une roue dentée plus grande, sur laquelle s'articule une bielle qui attaque par ailleurs, la tige de commande du piston. Le mouvement de l'extrémité amont de la bielle est ainsi circulaire, mais plus lent que celui de la roue motrice, le rapport de réduction étant approximativement de 1 à 3 ou de 1 à 4 suivant la marque. Le mouvement du piston est aussi plus lent que celui de la roue motrice et les contre-coups et vibrations dus aux sautes du vent sont amortis. Notons encore que la bielle peut

être fixée sur la grosse roue dentée, en deux points, ce qui permet d'obtenir deux courses de piston sans avoir à rien changer d'autre au mécanisme.

— dans le second, schématisé sur la figure 12, c'est une came de type Morin qui est fixée sur l'axe de la roue motrice et qui entraîne directement la tige du piston, les frottements étant réduits à l'aide de galets. Le mouvement excentrique suit ainsi le profil Morin étudié spécialement pour réduire les efforts nécessaires au franchissement des points morts, ce qui abaisse, théoriquement du moins, la vitesse de démarrage. Par ailleurs, l'attaque étant directe, il y a un aller-retour du piston pour chaque tour de la roue motrice et les sautes du vent ne sont pas amorties. Enfin, il n'y a qu'une seule course de piston possible.

4,3 — TUBE D'EXHAURE DE L'EAU

Le tube d'exhaure sert au transit de l'eau de la pompe vers l'extérieur. On a intérêt à augmenter son diamètre pour réduire les pertes de charge, mais on est très vite limité dans cette voie par :

- le faible gain réalisé sur les pertes à partir d'un certain diamètre;
- et surtout la forte élévation du prix du forage (et du tube).

On est donc amené à réduire le diamètre du tube d'exhaure au minimum compatible avec des pertes de charge raisonnables eu égard au débit transité. En pratique, on les limite de 10 à 15 % de la dépense totale d'énergie.

4,4 — LE MÉCANISME ET LA VITESSE DE DÉMARRAGE

L'utilisation optimum d'une gamme de vents donnée exige que la vitesse de vents assurant le démarrage de l'éolienne ne soit pas trop élevée. Or, cette vitesse dépend du couple résistant de l'appareil.

Le calcul de celui-ci est complexe. On peut cependant avoir une idée correcte des éléments qui entrent en jeu par l'étude du schéma de la figure 13.

Soit P le poids des tiges, H la hauteur manométrique totale, « d » le diamètre du piston de la pompe et « b » le bras de levier maximum de l'excentrique. La pression exercée sur le piston par la colonne d'eau donne une force égale à

$$\frac{\Pi d^2}{4} \times H$$

poids spécifique de l'eau étant égal à 1; le couple Γ_1 , exerçant sur l'excentrique a, par suite, pour valeur :

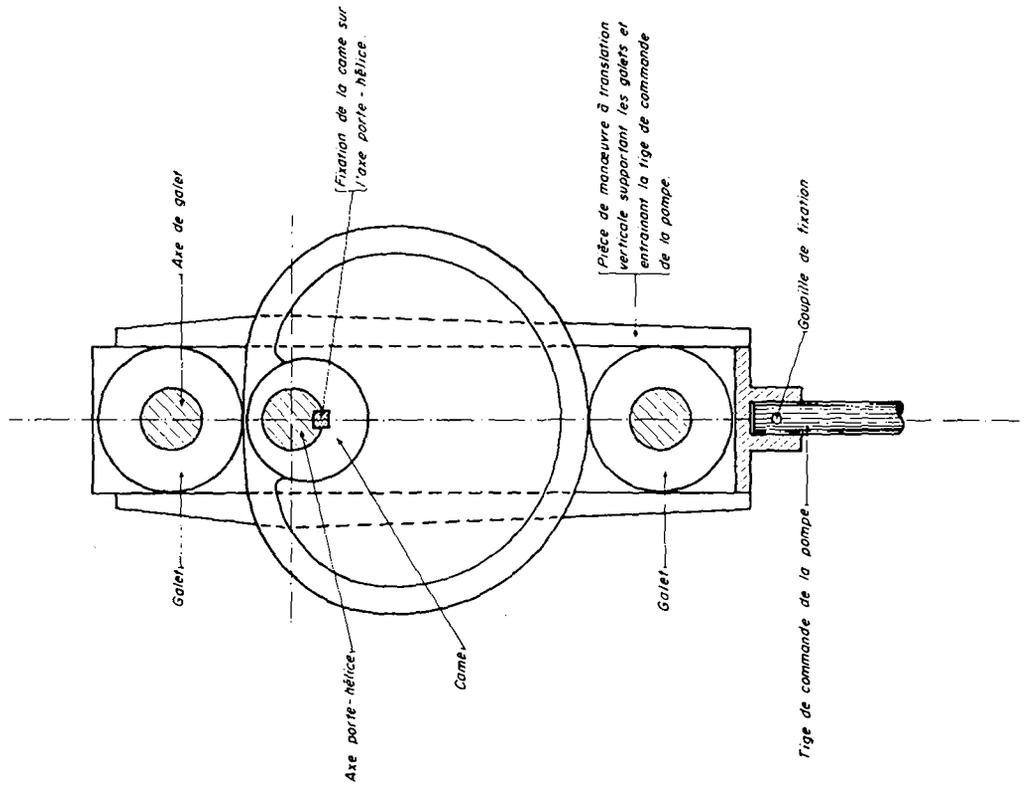
$$\Gamma_1 = b \left[P + \frac{\Pi d^2}{4} H \right]$$

Le couple résistant Γ sur la roue de l'éolienne est pour sa part égal à $r \times \Gamma_1$; « r » étant le rapport de réduction du système de transmission :

$$\Gamma = r b \left[P + \frac{\Pi}{4} d^2 H \right] \quad (1)$$

Ainsi, toutes choses restant égales par ailleurs, le couple résistant de l'appareil est proportionnel à « b », c'est-à-dire au bras de levier de l'excentrique.

2ème TYPE



1er. TYPE

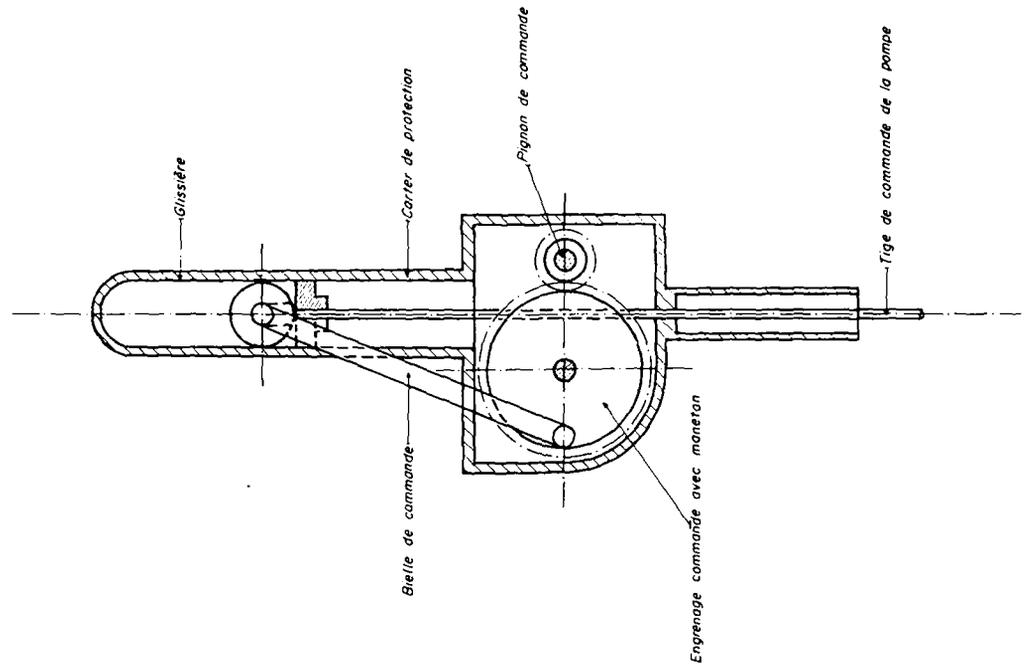


Fig. 11 et 12 — Schémas de transmission d'éolienne

Si l'on veut faciliter le démarrage, il faut par suite diminuer ce bras de levier, et donc, en définitive, la course. Mais l'on réduit alors du même coup le débit, puisque le volume d'eau pompé à chaque coup de piston est égal à $\frac{\pi d^2}{4} \times 2 b$ (la course est, en effet, le double de l'excentricité).

Si l'on veut conserver au débit sa valeur initiale, il faut augmenter le diamètre de la pompe.

Mais si l'on porte le débit « q » dans l'équation 1, on obtient :

$$\Gamma = r \left[b P + \frac{q H}{2} \right] \quad (2)$$

Cette équation montre qu'à débit constant, le couple résistant diminue lorsque l'excentricité diminue.

Par conséquent, pour faciliter le démarrage d'une éolienne, il faut diminuer le plus possible l'excentricité, c'est-à-dire la course et augmenter le diamètre de la pompe et par suite celui du forage. Ceci ne sera pas onéreux pour un forage de 30 à 40 m, mais deviendra vite prohibitif pour un forage profond. C'est pourquoi les tables des fabricants qui proposent pour chaque diamètre de roue deux courses, conseillent la petite course pour les faibles profondeurs, et la grande, pour les fortes. Mais, la limite entre ces deux catégories est une question d'optimum économique qui ne peut être le même partout et doit, chaque fois qu'un programme de travaux relativement important est envisagé, faire l'objet d'une étude particulière. Ces données nous permettront de mieux interpréter les résultats recueillis à Louga.

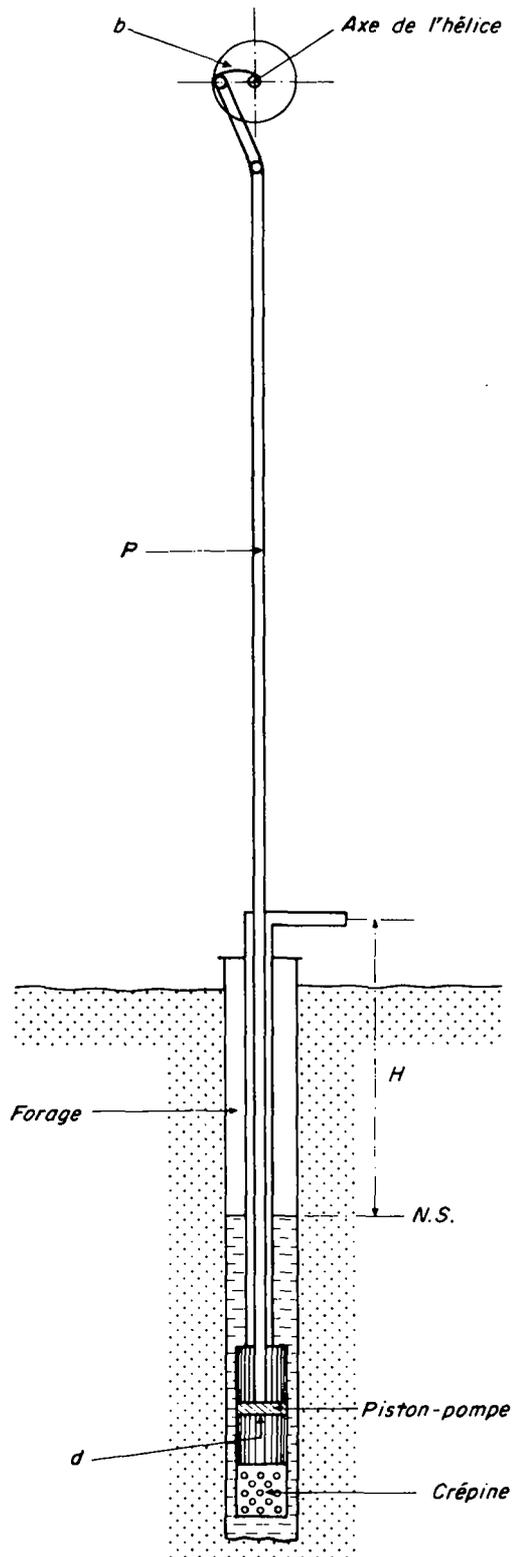


Fig. 13 — Schéma de transmission éolienne-pompe

Chapitre V

INFLUENCE DES MOTEURS DISPONIBLES ET DES VENTS EXISTANTS SUR LA SATISFACTION DES BESOINS EN EAU

5,1 — *INSTALLATION EXPÉRIMENTALE DE LOUGA*

Trois éoliennes représentant chacune des trois grandes marques retenues après un appel d'offres général, furent installées côte à côte sur des forages spécialement réalisés à cet effet dans l'enceinte du Service de l'Hydraulique à Louga (Sénégal).

Les caractéristiques des ouvrages sont données dans le tableau ci-dessous :

Marque de l'éolienne	Type	Roue ∅ (m)	Cote de l'axe de la roue	Hauteur manométrique totale	Pompe		Course mm
					Effet	∅ mm	
Hercules	Fl. 3	4,267	+ 15,64	44,45	simple	82	304
Came	H. R.	6,000	+ 15,93	43,84	double	80	240
Aermotor	3 1/4 × 68	6,096	+ 18,10	47,18	simple	82,55	508

Les vents furent enregistrés par deux anémomètres placés l'un à 15 m, l'autre à 18 m.

D'autre part, les conduites de refoulement de chaque éolienne ont été munies d'un compteur volumétrique d'eau, dont le relevé a été effectué journalièrement.

Cette installation a donc permis de recueillir simultanément des informations sur les caractéristiques du vent à 15 m et 18 m sur les débits pompés par les éoliennes. Ces données devaient permettre de déterminer le rendement utile de l'éolienne.

5,2 — *LES RÉSULTATS DISPONIBLES*

De nombreuses difficultés matérielles ont fortement réduit le nombre des résultats dont nous avons pu disposer pour l'étude du rendement pratique des trois éoliennes.

L'éolienne « Hercules » notamment a subi de nombreux incidents mécaniques provoquant des pannes prolongées. Ceci paraît être dû à son extrême sensibilité aux changements de direction du vent : la roue de l'éolienne n'arrive pas à se stabiliser et oscille énormément. Les résultats enregistrés en définitive sont trop dispersés pour être exploitables.

L'éolienne « Came » a des résultats plus satisfaisants mais il semble qu'il n'y ait pas toujours eu correspondance entre les débits pompés et les résultats donnés par l'anémomètre le plus proche en altitude (15 m). Dans l'exploitation des résultats nous avons dû prendre les enregistrements de vent correspondant à l'anémomètre situé à 18 m de hauteur.

Enfin l'éolienne « Aermotor » a pu donner certains résultats régulièrement exploitables, bien que beaucoup plus réduits que ce que l'on aurait pu espérer.

Le tableau suivant indique les mois pour lesquels les résultats peuvent être interprétés et définit par là-même les limites des conclusions que l'on peut tirer de cette expérience.

		Aermotor	Came			Aermotor	Came
1956	Novembre	*	*	1958	Janvier	*	
	Décembre	*	*		Février	*	
1957	Janvier	*	*	Mars	*		
	Février	*	*	Avril	*		
	Mars			Mai	*		
	Avril			Juin	*		
	Mai			Juillet	*	*	
	Juin			Août		*	
	Juillet			Septembre		*	
	Août			Octobre		*	
	Septembre			Novembre		*	
	Octobre			Décembre		*	
	Novembre	*		1959	Janvier	*	*
	Décembre	*			Février	*	*
			Mars			*	

5,3 — EXPLOITATION DES RÉSULTATS

5,31 — Méthode

Les bandes d'enregistrement anémométriques donnent à chaque instant la vitesse du vent. Elles ont été exploitées par tranches de 15 minutes suivant la méthode expliquée au § 2,2. On obtient ainsi 4 indications par heure qui sont transcrites sur des feuilles journalières indiquant la durée pendant laquelle le vent a soufflé à une vitesse donnée. Les vitesses comprises entre 3 m/s et 8 m/s, pour lesquelles la roue de l'éolienne fonctionne avec un rendement aérodynamique donné par les constructeurs, ont seules été considérées.

Grâce aux relevés concomitants des volumes d'eau pompés, nous connaissons pour chaque période de 24 heures, le volume extrait par l'éolienne.

Nous obtenons ainsi la courbe vitesse-fréquence du vent et le débit de l'éolienne dans une période de 24 heures. Par exemple, pour « Aermotor » dans la journée du 1^{er} au 2 juillet 1958 :

Vitesse du vent en m/s	3	4	5	6	7	8	Débit m ³
Nombre de quarts d'heure	21	17	5	16	1	0	13,40

On peut ainsi déterminer la relation qui existe entre le vent et le débit pompé.

5,32 — Calcul du rendement réel

On sait (§ 1,4) que la puissance P d'une éolienne est donnée par la formule :

$$P = 0,6 \rho S v^3 \cdot 10^{-3}$$

v = vitesse du vent en m/s.

P = Puissance en kW

S = Surface offerte au vent, en m²

ρ = rendement

Le travail accompli en un nombre d'heures « n » et exprimé en kWh est alors :

$$T = 0,6 \cdot 10^{-3} \times S n p V^3$$

Ce travail consiste en l'élévation d'un certain nombre de m³ d'eau à une hauteur donnée. Il est plus commode de l'exprimer en tonnes-mètres Tm. Comme 1 kWh = 360 Tm, on obtient :

$$T = 0,6 \times 360 \cdot 10^{-3} \times n p S V^3$$

Ce même travail est égal à :

$$T = Q h$$

où Q est le volume d'eau pompé en « n » heures
et h la hauteur manométrique de pompage d'où :

$$Q = \frac{0,216 S}{h} \times p n V^3$$

Si le vent n'est pas constant, mais que l'on connaît les temps n_i pendant lesquels il a soufflé à une vitesse V_i, l'éolienne ayant le rendement p_i, le débit total pompé Q devient :

$$Q = \frac{0,216 S}{h} \times \sum p_i n_i V_i^3$$

Pour chaque éolienne étudiée, on connaît S et h. Les tableaux de correspondance donnent pour chaque jour d'une part le nombre d'heures n_i pendant lequel le vent a soufflé à une vitesse V_i et d'autre part le cube pompé Q. On obtient ainsi une équation par jour dont l'ensemble donne tous les éléments pour déterminer p.

Malheureusement pour une éolienne donnée ce rendement est variable avec la vitesse et chacune des équations journalières est à plusieurs inconnues. Or, la solution d'un système d'équations à plusieurs inconnues est très difficile en pratique lorsque les données sont entachées d'erreurs et qu'il faut procéder par approximations successives. On a par suite cherché à réduire le nombre d'inconnues à une seule, en décomposant le rendement total en deux éléments : le premier p₁, variable avec la vitesse, correspond au rendement aérodynamique de la roue : on l'a pris égal pour chaque vitesse au chiffre donné par le constructeur; le second p₂, correspond au rendement pratique de la transmission et de la pompe, on l'a supposé invariable avec la vitesse. C'est ce rendement p₂ qui était désormais l'inconnue et la seule inconnue, dans chaque équation journalière, qui était devenue :

$$Q = K p_2 \sum n_i p_{1i} V_i^3$$

où K est une constante numérique.

En pratique, on a porté en abscisses le débit pompé Q, en ordonnées le chiffre théorique $K n_i p_{1i} V_i^3$ et le nuage de points obtenus a permis de déterminer p₂ pour chaque mois en traçant la droite à l'origine traversant au mieux le nuage de points (cf. fig. D en annexe).

Pour certains mois, le nuage de points est très aligné pour d'autres il est plus dispersé. L'ensemble a cependant permis de définir des coefficients p₂ valables pour les mois qui figurent aux § 5,2 —

5,4 — LES RENDEMENTS PRATIQUES DES ÉOLIENNES

La fraction p_2 du rendement a ainsi varié suivant les saisons entre 0,26 et 0,47 pour l'éolienne : « Aermotor » et entre 0,19 et 0,37 pour l'éolienne « Came ». Cette variation montre que cette fraction du rendement, qui correspond, rappelons-le, aux pertes « mécaniques » dans la transmission et la pompe est également fonction de la vitesse. Mais elle l'est infiniment moins que la fraction p_1 et pour les besoins de la prévision des débits que l'on peut espérer pomper en un endroit donné, on peut se contenter de prendre une valeur constante pour p_2 .

Nous proposons $p_2 = 0,30$

Ce coefficient doit se combiner avec le rendement aérodynamique en soufflerie (cf. les courbes du § 1,4). Le rendement total de l'éolienne est ainsi voisin de 0,20 à 3 m/s et 0,07 à 6 m/s.

5,5 — COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS PAR LES ÉOLIENNES CAME ET AERMOTOR

En reportant sur un même graphique (fig. E en annexe), les débits extraits mensuellement par les éoliennes « Came » et « Aermotor » ainsi que les relevés anémométriques effectués à 18 m, pour pouvons préciser quelque peu les caractères de celles-ci.

Il faut noter toutefois que faute de relevés anémométriques suffisants, nous avons dû utiliser la moyenne interannuelle qui ne peut donc rendre compte des variations annuelles que l'on observe dans les débits extraits et que cette moyenne résulte d'une certaine extrapolation pour combler les manques de données d'enregistrement et présente donc une certaine incertitude.

Néanmoins, on observe immédiatement une certaine concordance entre le montant des heures pendant lequel le vent a soufflé à une vitesse supérieure à 3 m/s et le débit extrait.

Les débits extraits par « Aermotor » bien qu'en moyenne légèrement plus faibles que ceux extraits par Came sont beaucoup plus constants que ces derniers. « Aermotor » présente donc une plus grande régularité de production. On voit ainsi sur le graphique qu'en dehors du mois de septembre 1958 son débit mensuel ne descend pas en dessous de 260 m³ alors que celui de « Came » a une pointe basse à 130 m³ et de nombreux points en dessous de 300 m³. Le débit « Aermotor » de septembre 1958 peut d'ailleurs être considéré comme erroné car l'éolienne est tombée en panne à ce moment-là.

D'autre part, on observe d'une manière continue un croisement des courbes « Aermotor » et « Came », « Came » accuse très fortement les variations du vent, son rendement est élevé lorsque le vent est fort et au contraire bas lorsque le vent est plus faible alors qu'« Aermotor » paraît amortir mieux les sautes de vents et présente un rendement plus homogène.

Cette différence de comportement est probablement due à la différences des vitesses de démarrage des éoliennes, provoquée elle-même par les différences de conception des systèmes de transmission et de pompe signalés au chapitre IV.

Ajoutons que dans les conditions d'exploitation de la République du Mali, la marque Aermotor seule a donné satisfaction. Les éoliennes Came ont eu des pannes fréquentes, qui ont nécessité leur enlèvement et leur remplacement.

Chapitre VI

EMPLOI DE L'ÉOLIENNE EN AFRIQUE OCCIDENTALE

6,1 -- DÉBITS ESCOMPTABLES EN DIFFÉRENTS POINTS D'AFRIQUE OCCIDENTALE

Les données sur les vents recueillies au chapitre III combinées avec les rendements pratiques des éoliennes aux différentes vitesses évaluées au chapitre V permettent maintenant de calculer les débits que l'on peut escompter d'une éolienne en un point d'Afrique occidentale.

On procédera en appliquant la formule (cf. § 5,32) :

$$Q = \frac{0,216 S}{h} \times \sum p_i n_i V_i^3$$

où S est la surface de la roue en m²

h la hauteur manométrique totale en m

V_i la vitesse du vent en m/s

n_i le nombre d'heures pendant lequel le vent a soufflé à la vitesse V_i

p_i le rendement total p₁ × p₂ à la vitesse V_i

Nous avons effectué ces calculs à l'emplacement des quinze anémomètres enregistreurs et les débits journaliers moyens obtenus sont reportés sur la figure F en annexe.

Un recoupement a pu être fait grâce aux comptages de débit effectués sur les éoliennes du Mali. Le Service Hydraulique du Mali a bien voulu nous communiquer les débits mesurés effectivement du 14-4-1956 au 31-12-1957 à l'éolienne de Argabèche à 20 km au N.-E. de Gao. Le débit moyen journalier ressort à 13,3 m³.

Les calculs faits par application de la formule précédente donnent 17,4 m³/jour à Anefis, 17,3 m³/jour à Menaka, chiffres vraiment très proches de ceux constatés.

Les calculs faits sur la base des enregistrements continus de Gao donnent 4,9 m³/jour chiffre très faible, ce qui confirme la mauvaise qualité de l'emplacement choisi pour l'anémomètre. Par contre, les mêmes calculs faits sur les données tri-horaires de l'aérodrome de Gao donnent un débit de 18,6 m³/jour, proche des précédents.

6,2 — INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES LOCALES

L'exemple de Gao montre l'importance fondamentale du choix précis de l'implantation de l'éolienne. A très peu de distance, la vitesse moyenne des vents peut baisser de 1 m/s et le débit pompé, dans ces régions où les vitesses des vents sont très proches de la vitesse de démarrage de l'éolienne, peuvent être divisés par cinq très facilement.

Il faut absolument, fut-ce au prix d'une plus grande profondeur du forage, se placer au point le plus favorable du point de vue des vents. Notons que l'expérience mondiale à

cet égard conduit aux conclusions suivantes que nous extrayons du rapport déjà cité du Service météorologique :

— *comme emplacement favorable typique* : une éminence ou colline à pentes douces, occupant une position dominante et bien dégagée, tout au moins dans la direction du vent dominant ;

— *comme emplacements défavorables typiques* : un piton isolé abrupt ; une crête étroite et escarpée ; un terrain inégal avec des vallées étroites et profondes et des pitons déchiquetés ; une hauteur dominée par d'autres situées en amont dans le lit du vent dominant.

Les fonds de vallées sont bien entendu déconseillés.

Rappelons encore la variation rapide de la vitesse du vent avec l'altitude. Une augmentation de quelques mètres de la hauteur du pylône supportant l'éolienne peut être décisive dans ces régions de vent faible, aussi bien pour accroître les débits moyens que pour réduire la durée des périodes de calme.

Il est bien évident qu'en toute logique, il ne faudrait pas se contenter de telles appréciations sommaires et qu'une recherche locale des sites les plus favorables devrait précéder la mise en place d'une éolienne. Elle devrait être menée en suivant les lectures d'un certain nombre d'anémomètres installés en des emplacements a priori favorables. Pour une telle étude, dans une région où les caractéristiques générales du vent sont déjà dégrossies, il semble que les anémomètres chronototalisateurs, dont les résultats peuvent être dépouillés très vite, puissent convenir.

A défaut d'une telle étude, les conseils rappelés ci-dessus ne doivent jamais être perdus de vue, car le choix local de l'emplacement est d'une importance capitale.

6,3 — CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Nous ne reviendrons que brièvement sur ce sujet déjà traité au chapitre V pour rappeler quelques idées très importantes :

a) Comme le vent en Afrique occidentale est faible, il est bon d'installer partout des éoliennes à roue multipale de 6 m de diamètre. Certaines fabrications nouvelles de roues-hélices se réclament de vitesses de démarrage comparables à celles des roues multipales. Il ne nous a pas été possible de vérifier ce point dans le cadre de la présente étude.

b) Il ne faut en aucun cas se limiter à passer commande d'une éolienne une fois le forage construit mais l'ensemble puits-moteur-éolienne doit faire l'objet d'une étude d'ensemble de façon à définir les caractéristiques techniques les meilleures compte tenu des vents, du débit souhaité, de la hauteur manométrique totale prévue de refoulement. Ces caractéristiques sont notamment le diamètre et la course de la pompe, et par suite le diamètre du forage et l'excentricité de la transmission de l'éolienne.

Notons aussi que la pompe doit être descendue suffisamment bas pour qu'elle ne soit jamais dénoyée, car une pompe fonctionnant hors d'eau est très vite détruite. La profondeur du forage doit donc tenir compte aussi de l'ensemble des données d'exploitation.

c) Il faut absolument prévoir à côté de l'éolienne un réservoir qui permette de faire face aux besoins pendant les périodes de calme.

Dans l'équipement de la région de Gao, par exemple, on avait prévu au départ, des réservoirs en béton, placés au sol et d'une capacité de 40 m³. Après quelques expériences, il fut décidé d'abandonner ce système et de creuser à côté du forage étroit un puits de grand

diamètre, relié hydrauliquement au forage et dans lequel les utilisateurs pouvaient puiser de l'eau à l'aide de seaux. Ces puits sont moins profonds que les forages, car la nappe sise vers 100 m -120 m de profondeur est douée d'un certain artésianisme et son niveau statique s'établit à 40 m de profondeur. L'éolienne dans ce cas économise simplement la peine de l'homme.

d) Il ne faut jamais oublier de prévoir dès le départ l'entretien des appareils. Les éoliennes de certaines marques sont robustes et peuvent fonctionner de longues années, l'entretien est peu important, mais un contrôle et un graissage périodiques (tous les deux ou trois mois) sont indispensables. *Aucune production de la technique moderne ne peut d'ailleurs se passer d'entretien.*

6,4 — ASPECTS FINANCIERS

L'objet essentiel de la présente étude est d'ordre technique. Aucun problème d'équipement ne peut cependant être résolu en dehors de toute considération financière et nous dirons quelques mots sommaires de cette question.

Une éolienne représente un investissement onéreux pour une puissance installée faible. Le prix d'un moteur à essence qui fournirait une puissance comparable est voisin du quart de celui de l'éolienne. En fonctionnement, par contre, l'éolienne est peu coûteuse, alors que le moteur exige non seulement du carburant, mais encore et surtout un préposé et un entretien bien plus considérable. La comparaison des dépenses sur un certain nombre d'années, actualisées, ne fournit néanmoins pas un critère décisif valable pour toutes les régions et le choix dépend beaucoup des circonstances locales : vitesse du vent, situation monétaire, qui peut être différente suivant les états et inciter soit à grossir les investissements soit à les réduire quitte à augmenter le fonctionnement, disponibilités en main-d'œuvre, facilités de ravitaillement en carburant etc.

Une étude est nécessaire dans chaque cas et l'on ne peut conclure que d'une manière assez nuancée.

Ainsi aux conditions financières de début 1962, la situation se présente ainsi dans la région de Gao, au Mali :

La nappe est à une profondeur de l'ordre de 120 m. Il faut pour la prendre un ouvrage de cette profondeur, qu'il est économique de réaliser sous la forme d'un forage étroit. Le prix du forage est de l'ordre de 6 millions de frs C. F. A.

La nappe est semi-artésienne et son niveau statique s'établit à 40-45 m. Pour l'exploitation, on a mis en œuvre deux solutions :

a) installation d'une éolienne Aermotor 20/53 feet, d'un réservoir de 40 m³ et d'un abreuvoir.

- coût de l'investissement 5.500.000 CFA
- coût de l'entretien 150.000 CFA/an

Le débit moyen extrait est de 20 m³/jour.

b) creusement d'un puits de 1 m. 80 de diamètre et de 50 m de profondeur l'eau passe du forage dans le puits, à partir duquel elle est prélevée par les moyens traditionnels : seaux, outres, délous.

- coût de l'investissement 5.400.000 CFA
- coût de l'entretien 30.000 CFA

Le débit extrait varie de 10 à 40 m³/jour suivant l'intensité du puisage.

Le lecteur dispose ainsi de tous les éléments du choix. Rappelons simplement que dans le cas de l'éolienne, l'eau est fournie au niveau du sol, dans le cas du puits, l'homme doit encore l'extraire des profondeurs.

6,5 — CONCLUSION

L'ensemble des informations recueillies permet néanmoins d'affirmer que l'on se trouve en Afrique occidentale à la limite de l'emploi de l'éolienne pour l'exhaure de l'eau. Cet emploi nous paraît même déconseillé pour toute la partie située au sud, grosso modo du 15^e parallèle, où seules les bandes côtières et des sites montagneux particuliers présentent des vents sensibles.

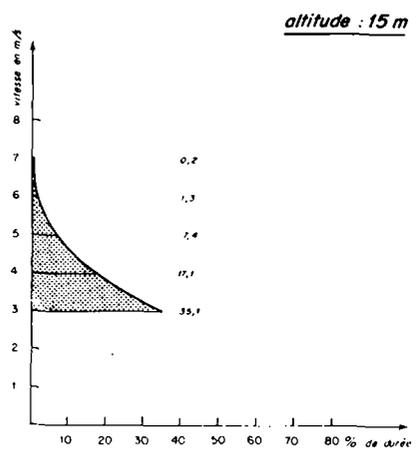
Au nord du 17^e parallèle, l'éolienne doit fonctionner correctement : la majeure partie de la Mauritanie, le Nord-Mali, le Nord-Niger, le Nord-Tchad, doivent pouvoir être équipés sans gros risque d'échec par insuffisance de vent.

Entre le 15^e et le 17^e parallèles, on se trouve dans la zone frontière où les résultats dépendent au premier chef des conditions locales et où l'échec ou le succès repose sur le choix judicieux de l'emplacement précis de l'éolienne.

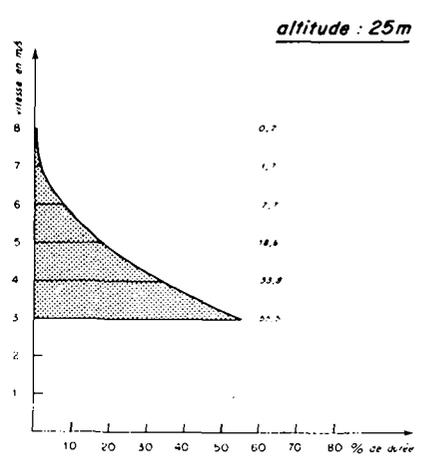
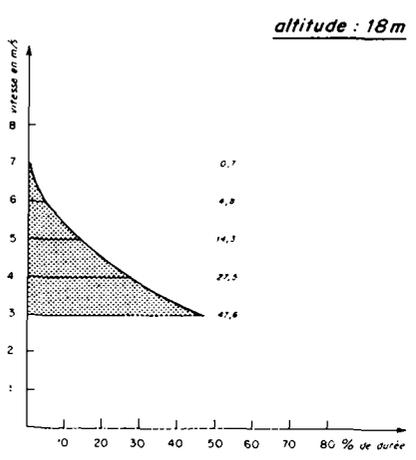
Ajoutons qu'il ne faut en aucun cas attendre de gros débits d'une éolienne installée sur un puits de quelques dizaines de mètres de profondeur. Des chiffres compris entre 10 et 20 m³ jour représentent une excellente moyenne. L'éolienne ne doit être installée que si les besoins sont de cet ordre de grandeur. Il ne faut pas en attendre plus.

Répetons enfin que l'ensemble éolienne, pompe, forage, réservoir est indissociable et doit faire l'objet avant décision d'une étude complète.

Il nous reste à espérer en terminant que ces éléments, bien imparfaits, relatifs aux conditions d'emploi de l'éolienne en Afrique occidentale, pourront néanmoins rendre des services aux responsables de l'équipement hydraulique de ces pays. Il ne faut pas qu'il se dégage de leur lecture une impression trop pessimiste, l'éolienne peut être employée dans la partie septentrionale de l'Afrique occidentale, mais ce moyennant certaines précautions. A l'inverse, elle ne constitue pas la panacée universelle qui permet de résoudre partout le problème de l'exhaure de l'eau : d'autres moyens doivent être utilisés dans beaucoup de régions, la moitié méridionale notamment.



SÉNÉGAL
LOUGA



MAURITANIE

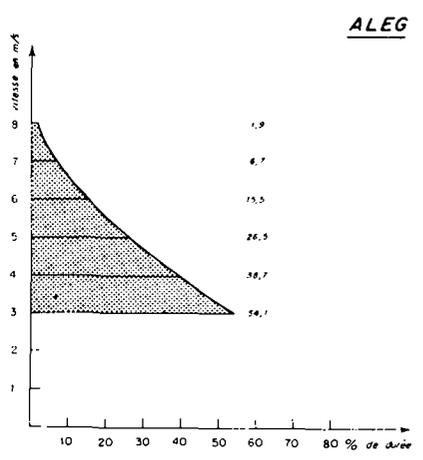
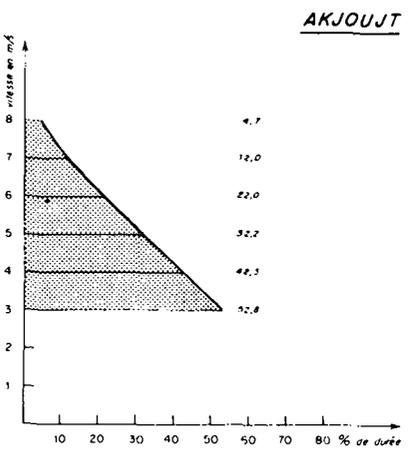
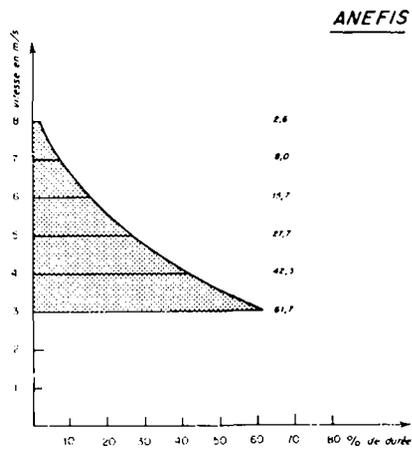
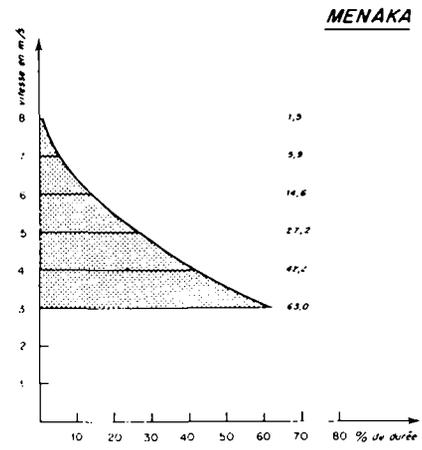
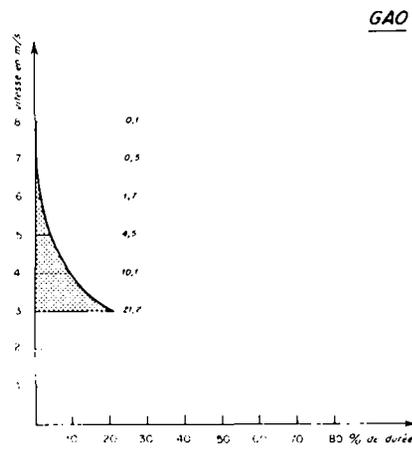


Fig. A-1 — Courbes vitesse-durée des anémomètres à enregistrement continu



MALI



NIGER

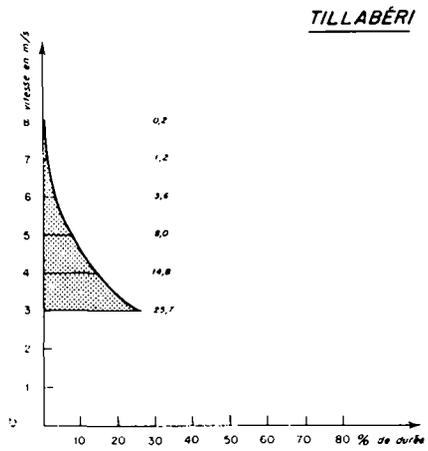
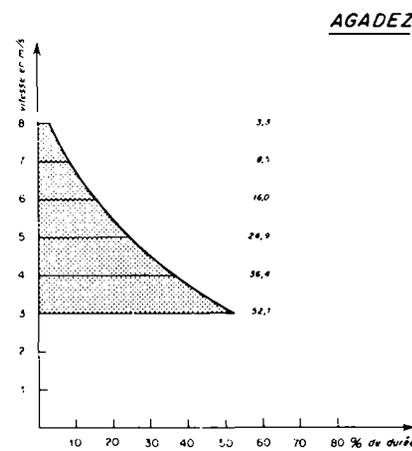
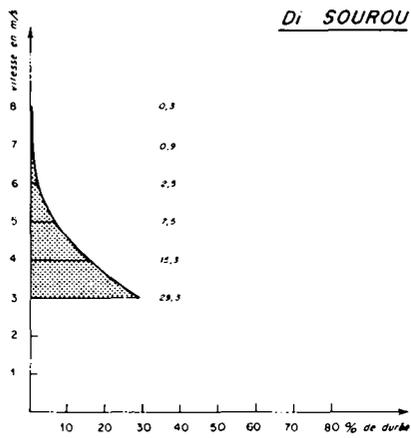


Fig. A-2 — Courbes vitesse-durée des anémomètres à enregistrement continu



HAUTE - VOLTA

DAHOMEY

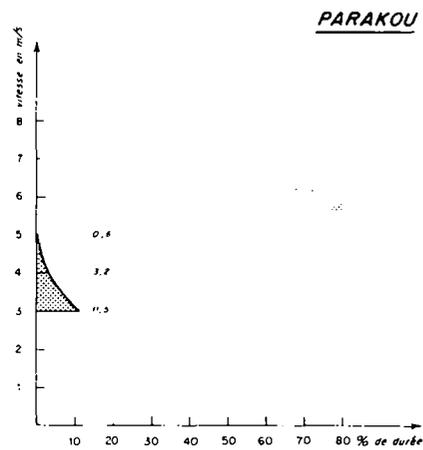
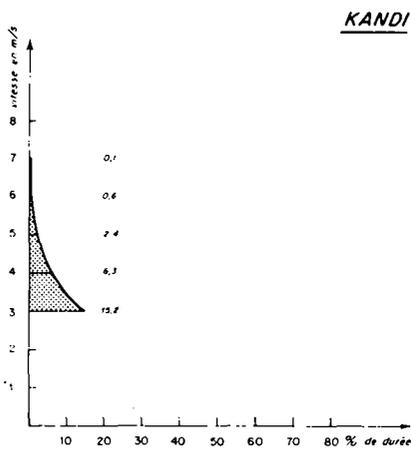
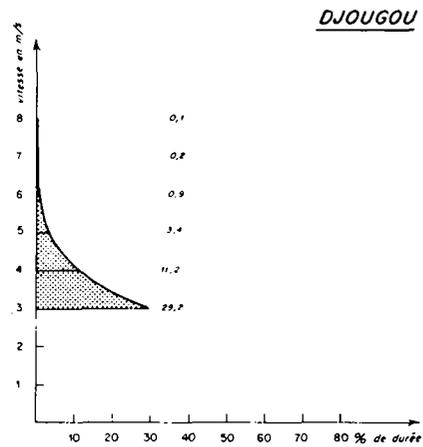
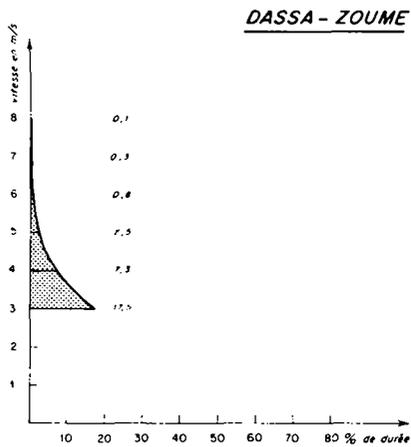


Fig. A-3 — Courbes vitesse-durée des anémomètres à enregistrement continu

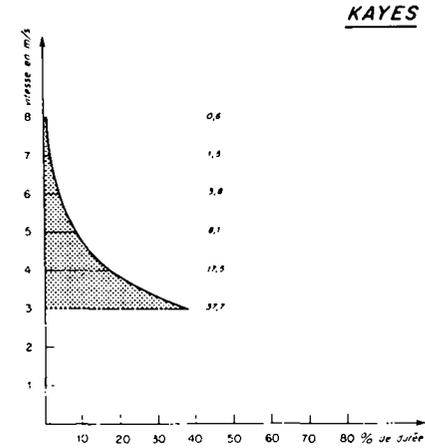
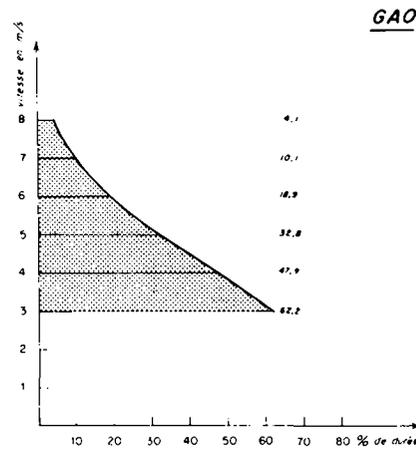
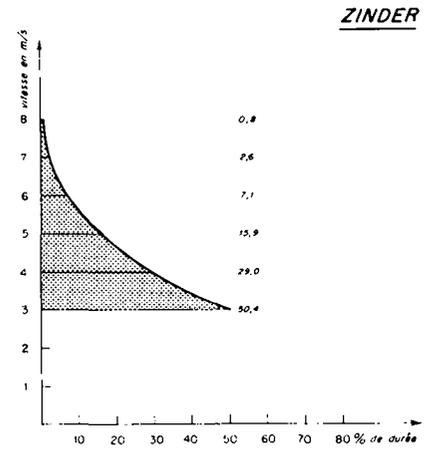
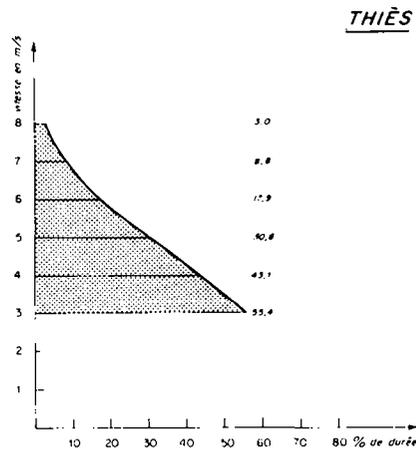
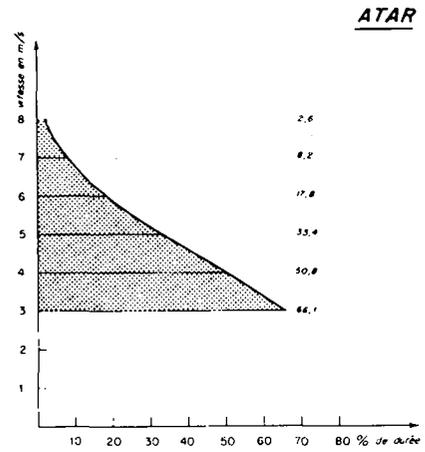
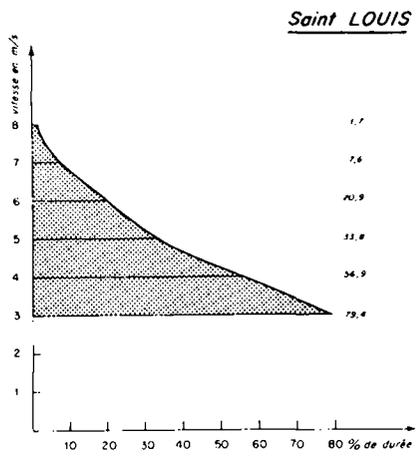


Fig. B-1 — Courbes vitesse - durée des stations du service météorologique

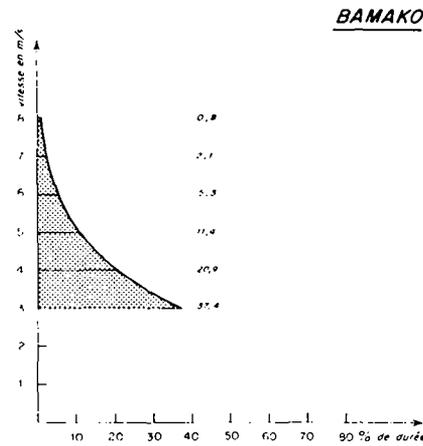
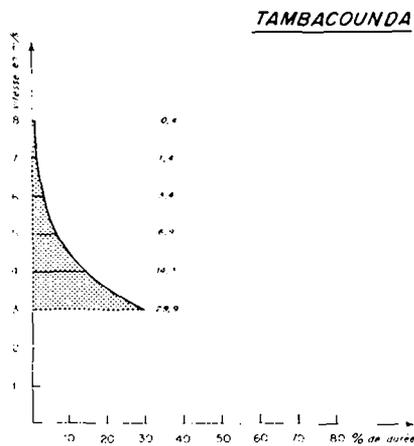
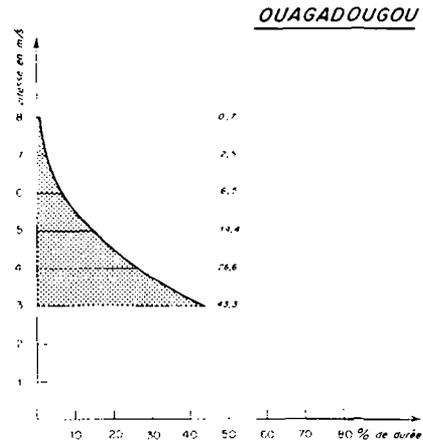
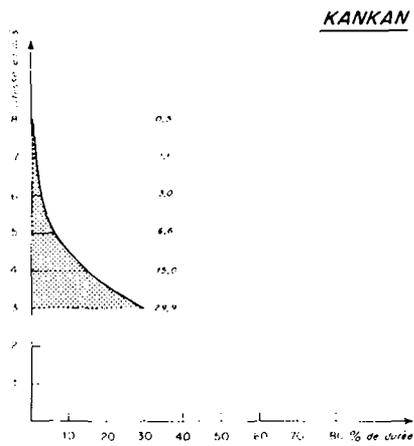
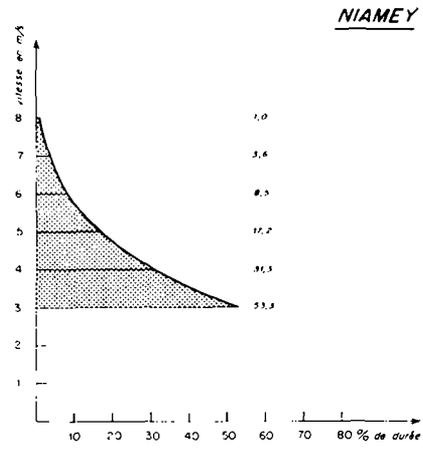
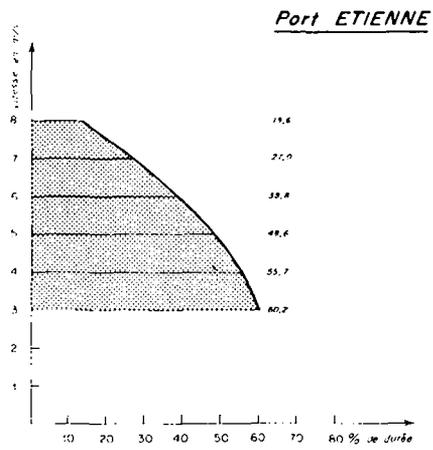


Fig. B-2 — Courbes vitesse - durée des stations du service météorologique

Fig. C - Nombre moyen de périodes de calme
et fréquence moyenne des périodes de vent

La lecture des courbes qui suivent est assez délicate. Il nous a semblé utile en conséquence de donner un exemple :

Pour chaque site, il y a deux courbes :

- 1^o - La courbe de gauche donne en ordonnées le nombre moyen annuel des périodes de calme dont la durée est supérieure à la durée précisée en abscisses.

Ainsi à Atar, il y a par an, en moyenne,

- 8 périodes de calme d'une durée supérieure à 1 jour
- 1,6 périodes de calme d'une durée supérieure à 2 jours

- 2^o - La courbe de droite donne en ordonnées la fréquence moyenne en % de l'occurrence de période de vent, comprise entre deux périodes de calme et de durée supérieure à une durée donnée, ou inférieure à un jour.

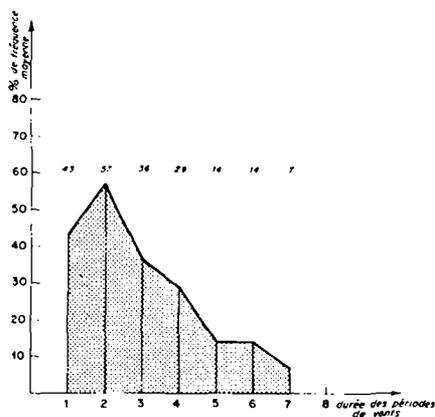
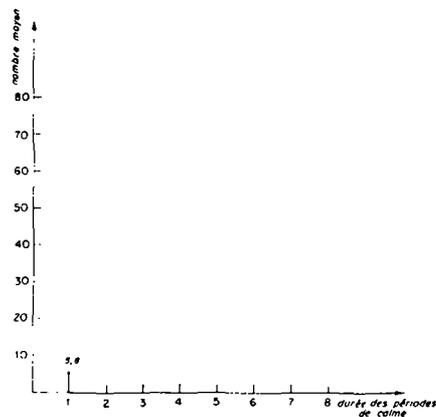
Ainsi à Atar, il y a dans l'année,

- 27% de périodes de vents séparant deux calmes et d'une durée inférieure à 1 jour,
- et 73% de périodes de vents, d'une durée supérieure à 2 jours.

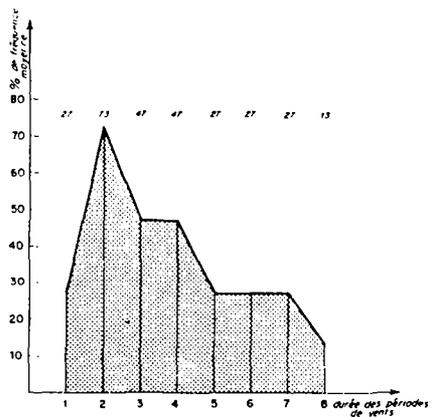
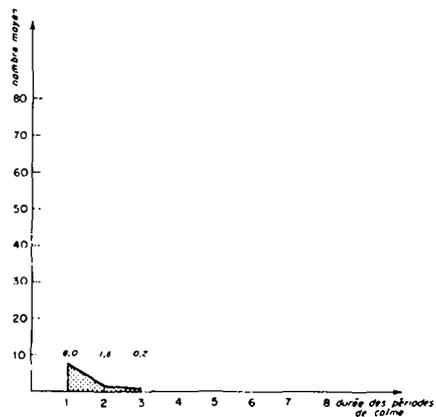
Si l'on désire plus de précision sur ces périodes longues on trouve encore sur la courbe qu'il y a :

- 47% de périodes de vents d'une durée supérieure à 4 jours
- 27% de périodes de vents d'une durée supérieure à 7 jours.
- 13% de périodes de vents d'une durée supérieure à 8 jours.

Saint - LOUIS



ATAR



THIÈS

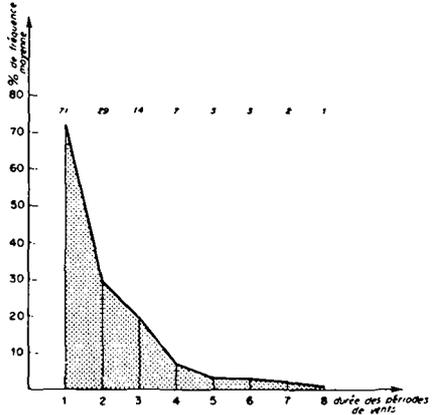
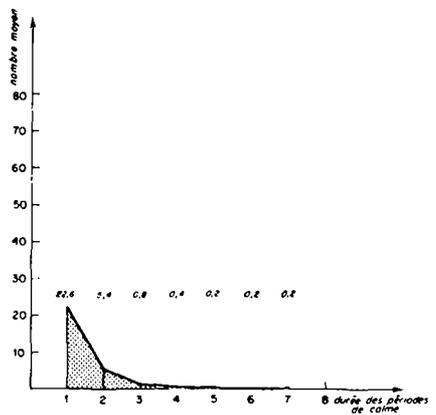
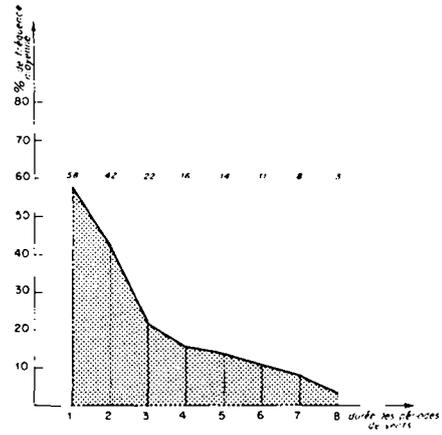
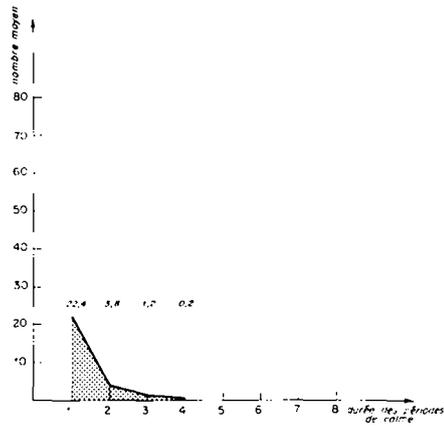


Fig. C-1 — Nombre moyen de périodes de calme de durée supérieure à une durée donnée et

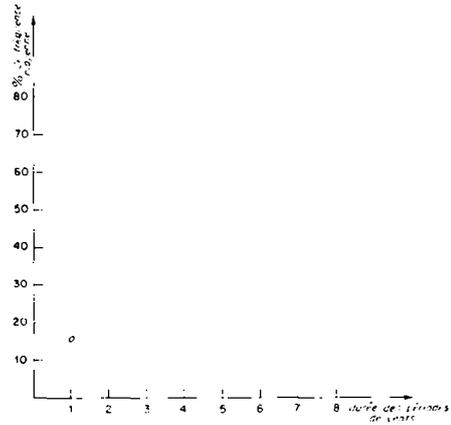
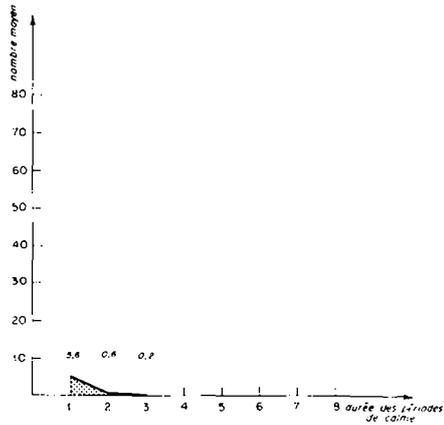
fréquence moyenne des périodes de vents, comprises entre deux périodes de calme, et de durée donnée.

[Source : Services Météorologiques]

ZINDER



GAO



KAYES

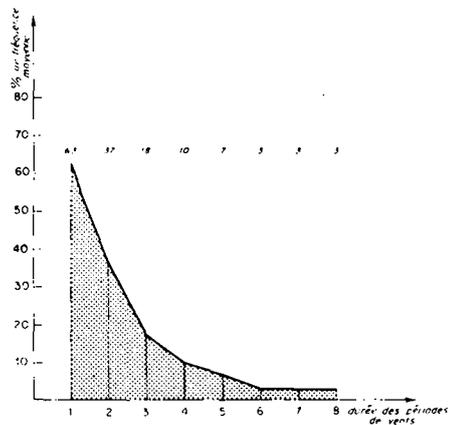
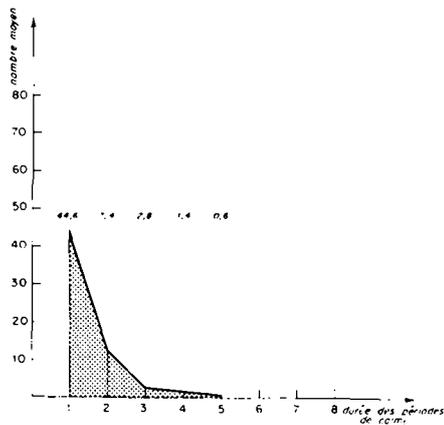
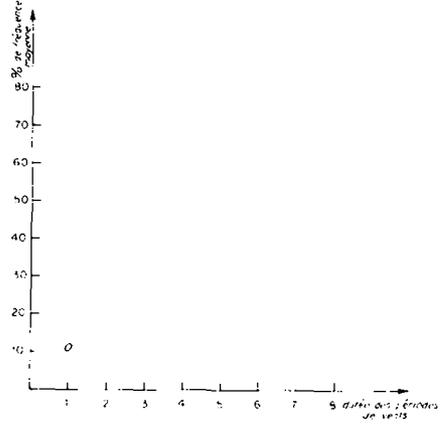
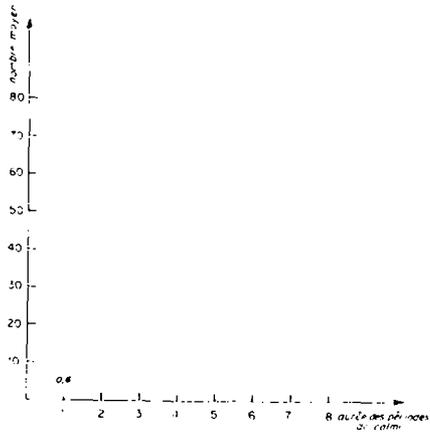


Fig. C-2 — Nombre moyen de périodes de calme de durée supérieure à une durée donnée

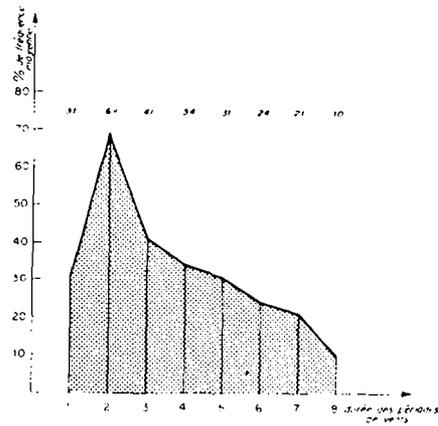
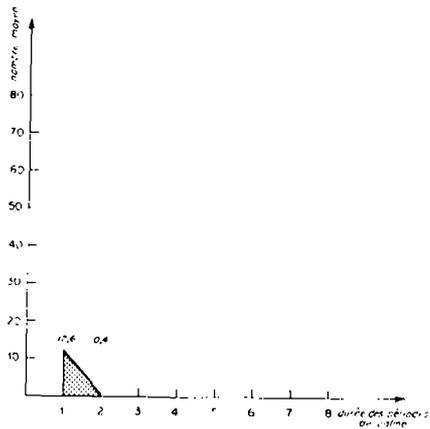
fréquence moyenne des périodes de vents, comprises entre deux périodes de calme, et de durée donnée.

[Source : Services Météorologiques]

Port ETIENNE



NIAMEY



KANKAN

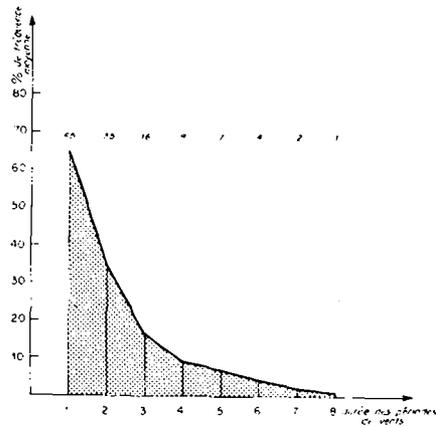
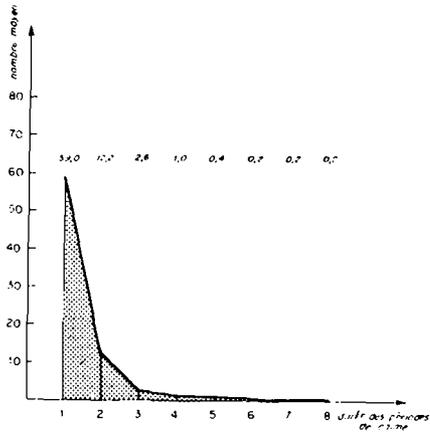
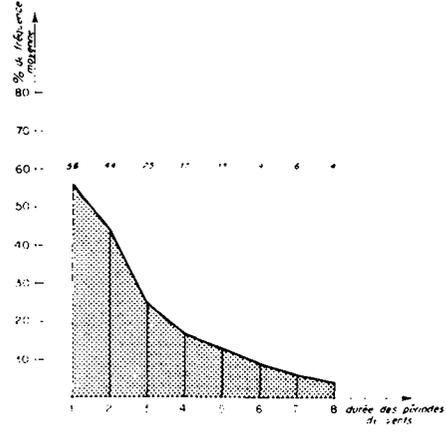
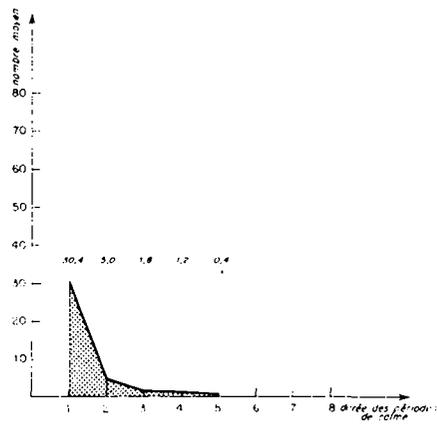


Fig. C-3 — Nombre moyen de périodes de calme de durée supérieure à une durée donnée

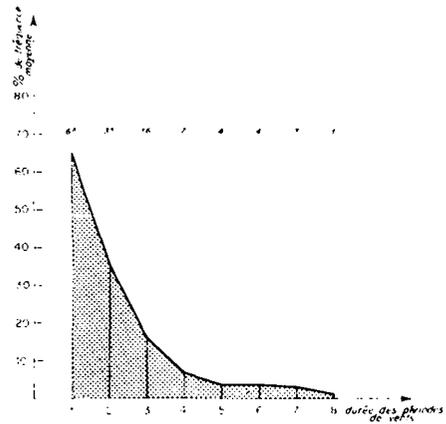
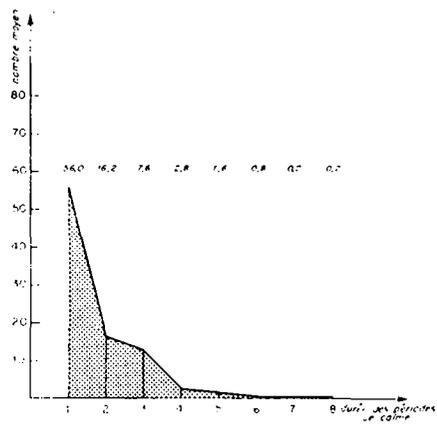
et fréquence moyenne des périodes de vents, comprises entre deux périodes de calme, et de durée donnée.

[Source : Services Météorologiques]

OUAGADOUGOU



TAMBACOUNDA



BAMAKO

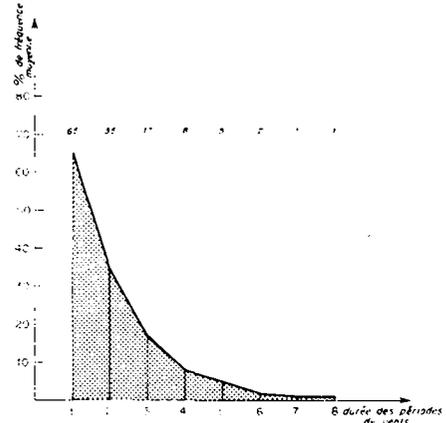
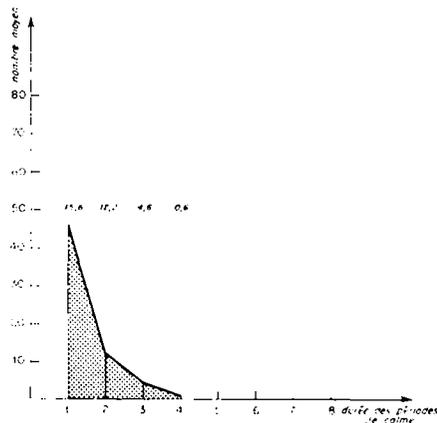


Fig. C-4 — Nombre moyen de périodes de calme de durée supérieure à une durée donnée et

fréquence moyenne des périodes de vents, comprises entre deux périodes de calme, et de durée donnée.

[Source : Services Météorologiques]

Fig. D — Détermination graphique du rendement pratique

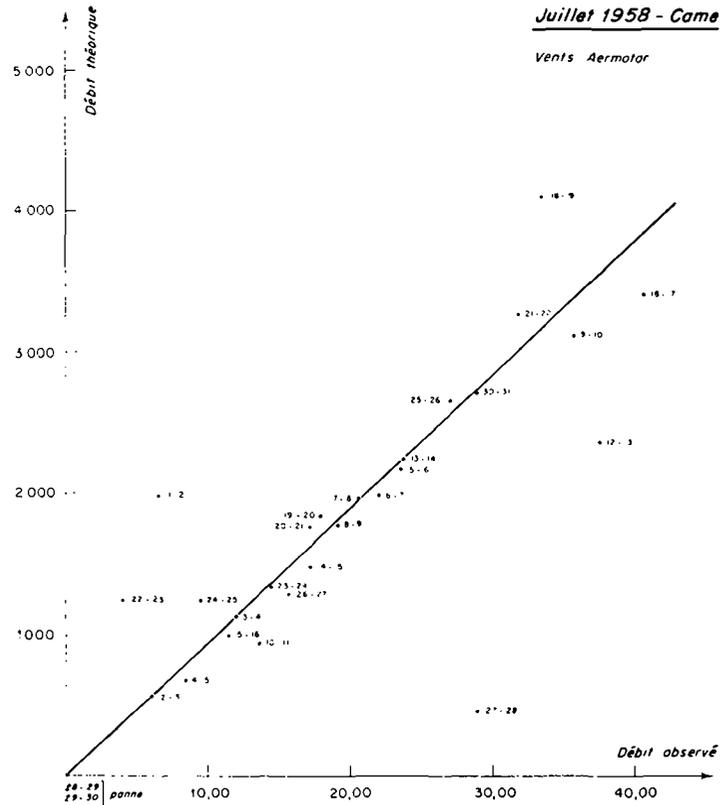
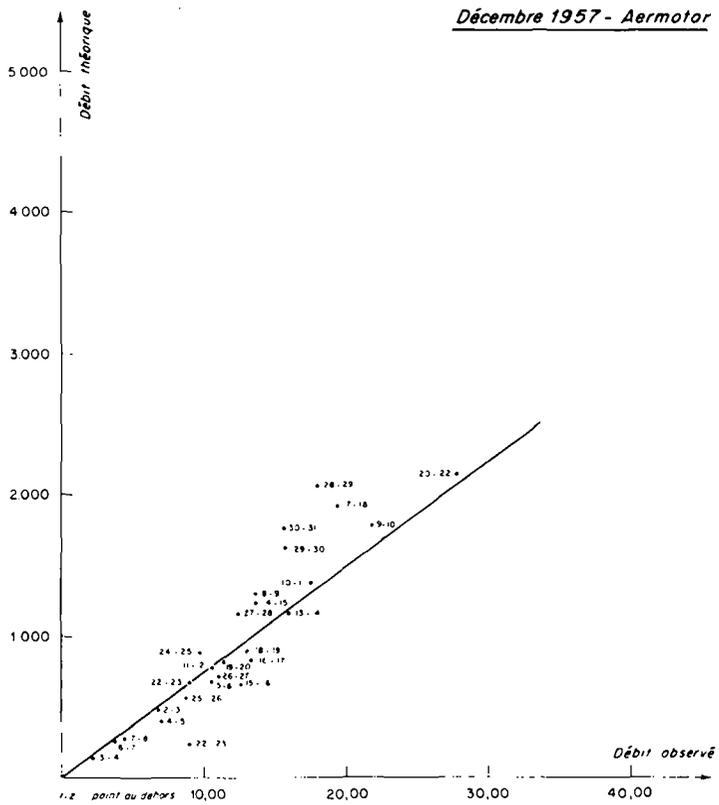
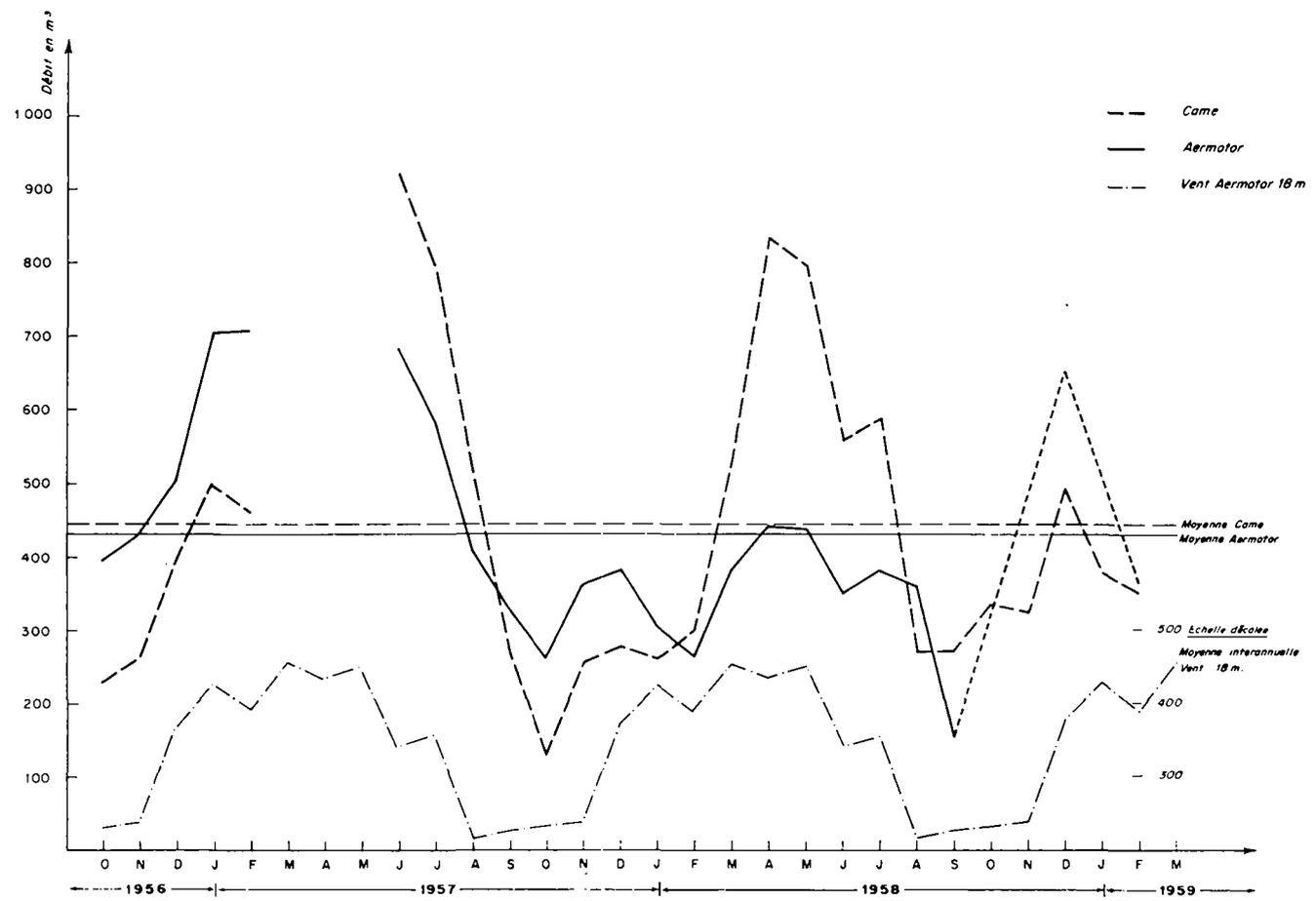


Fig. E — Comparaison entre les vents et les débits pompés par les deux éoliennes de Louga



Débits journaliers moyens que pourrait donner une éolienne aermotor de 6m. pour une hauteur de refoulement de 45m. et rappel des vitesses moyennes de vent de la figure 3.

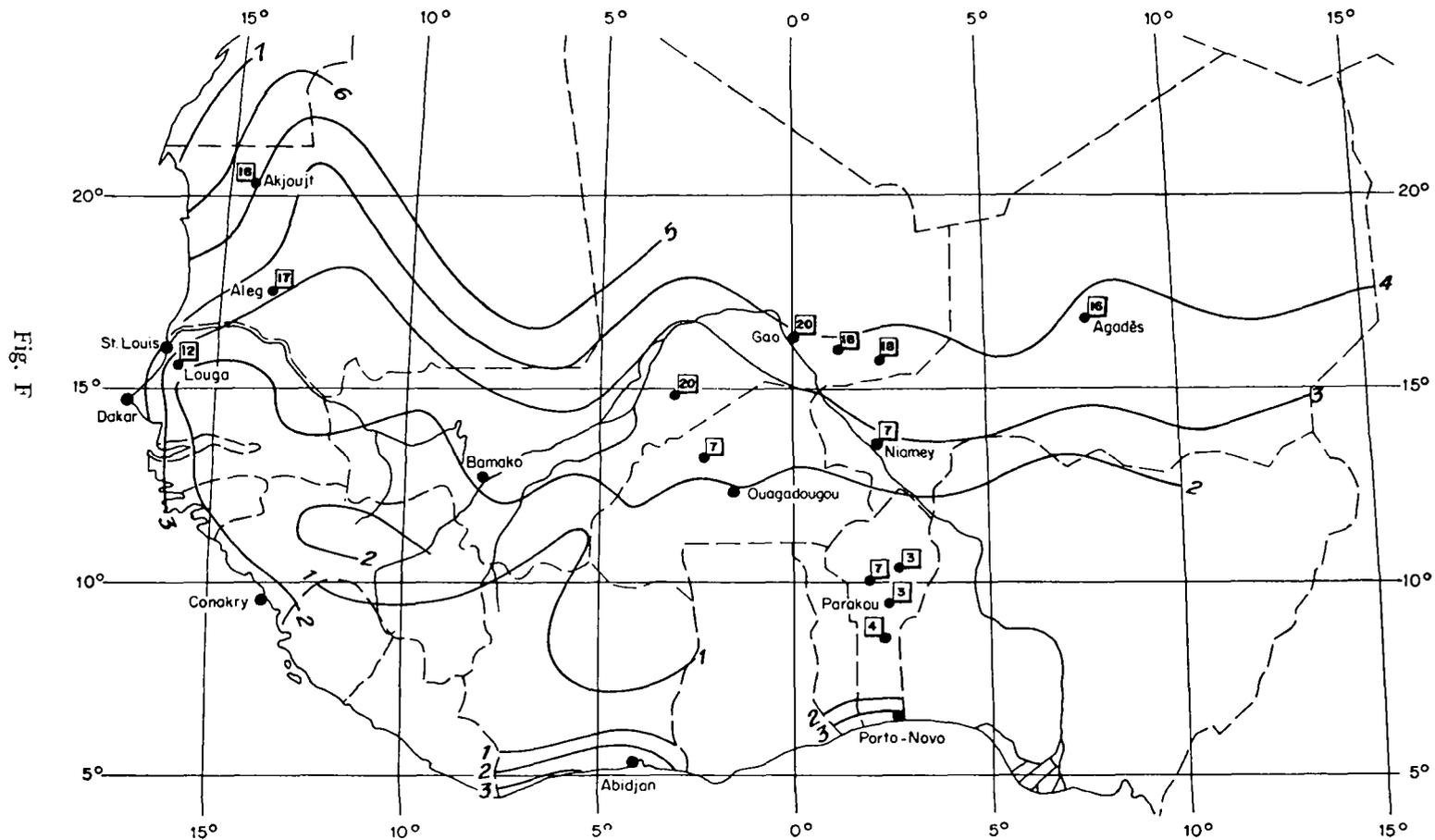


Fig. F

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction</i>	4
<i>Chapitre I</i> — INFLUENCE DES BESOINS EN EAU ET DU VENT SUR LES CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR ÉOLIEN	
1,1 Le point d'eau type.	6
1,2 Le principe de l'action du vent	7
1,3 L'Énergie du vent ($P = k V_3$)	8
1,4 Les moteurs aériens.	9
1,5 Les premières connaissances du vent en Afrique Occidentale	9
<i>Chapitre II</i> — LE VENT — MÉTHODES DE MESURE	
2,1 Choix du type d'appareil	13
Vitesse instantanée.	
Énergie reçue par m ² .	
Choix du rectigraphe Chauvin Arnoux.	
2,2 Précision nécessaire au dépouillement	14
(Structure énergétique du vent)	17
Comment analyser les anémographes et les solutions retenues	17
2,3 Répartition géographique des appareils	19
<i>Chapitre III</i> — LE VENT — RÉSULTATS OBTENUS EN AFRIQUE OCCIDENTALE	
3,1 Difficultés rencontrées dans l'exécution du programme de mesures	21
3,2 Résultats obtenus par le programme de mesures continues.	22
3,3 Comparaison avec les résultats statistiques des services météorologiques	23
3,4 Les courants aériens	25
3,5 Fréquence des périodes de calme et intervalles les séparant	25
3,6 Variabilité du vent d'une année à l'autre.	26
3,7 Évolution du vent avec la hauteur	27
<i>Chapitre IV</i> — LE MOTEUR ÉOLIEN -- CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES	
4,1 Constitution des éoliennes	28
4,2 Système de transmission roue-pompe	28
4,3 Tube d'exhaure de l'eau	29
4,4 Le mécanisme et la vitesse de démarrage.	29
	55

Chapitre V — INFLUENCE DES MOTEURS DISPONIBLES ET DES VENTS EXISTANTS SUR LA SATISFACTION DES BESOINS EN EAU

5,1 Installation expérimentale de Louga (Sénégal)	33
5,2 Les résultats disponibles.	33
5,3 Exploitation des résultats	34
5,31 Méthodes	34
5,32 Calcul du rendement réel	34
5,4 Les rendements pratiques des éoliennes	36
5,5 Comparaison des résultats obtenus par les éoliennes « Came » et « Aermotor »	36

Chapitre VI — EMPLOI DE L'ÉOLIENNE EN AFRIQUE OCCIDENTALE

6,1 Débits escomptables en différents points de l'Afrique Occidentale	37
6,2 Influence des caractéristiques locales	37
6,3 Caractéristiques techniques	38
6,4 Aspects financiers	39
6,5 Conclusion	40