

ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

DIRECTION DES ÉTUDES ET RECHERCHES

SERVICE DES ÉTUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES

DIVISION ÉNERGIE DU VENT
20, Rue Homelin - PARIS

Tél. : KLEber 95-20

AÉROGÉNÉRATEUR EXPÉRIMENTAL

Type B.E.S.T. - ROMANI

Description - Montage
Programme d'essai

MAI 1958

ELECTRICITE DE FRANCE
Direction des Etudes et Recherches
Service des Etudes et Recherches Hydrauliques
Division Energie du Vent
20, rue Hamelin - PARIS XVI^e (Tél : KLE.95.20)

STATION D'ETUDES DE L'ENERGIE DU VENT
Route de Courville à NOGENT-LE-ROI (Eure et Loir)
(tél. 204 à Nogent-le-Roi)

AEROGENERATEUR EXPERIMENTAL DE
PUISSANCE 640 kW et DIAMETRE 30,19 mètres (Hélice Eolienne)
Système BEST-ROMANI

- I - Situation et Implantation (fig. 1)
- II - Description de la Station d'études et de l'Aérogénérateur (fig. 2)
 - A) Infrastructure
 - B) Partie basculable
 - a) Pylône tripode (fig. 3)
 - b) Pivot caréné orientable (fig. 4)
 - c) Nacelle (fig. 5)
 - d) Génératrice
 - e) Hélice éolienne (fig. 6)
 - f) Transmission (fig. 7)
 - g) Limiteurs de vitesse et de puissance (fig. 8)
 - h) Orientation
 - i) Devis des poids
 - C) Schéma de l'installation électrique (fig. 9)
- III - Montage
- IV - Mise en service
- V - Mesures
 - A) But des essais - Grandeurs à mesurer
 - B) Matériel à employer
 - C) Durée des essais
- VI - Quelques photographies
- VII - Remarques

Avril 1958

8

I - SITUATION ET IMPLANTATION

La Station d'Etudes de l'Energie du Vent au centre de laquelle se dresse l'aérogénérateur à hélice éolienne tripale de diamètre 30,19 mètres, est un quadrilatère de deux hectares et demi environ, situé à deux kilomètres au Sud-Ouest de Nogent-le-Roi (Eure et Loir), le long de la route départementale n° 148, dite de Courville (fig. 1).

Bien que la région ne soit pas balayée par des vents spécialement forts ni fréquents, elle a été choisie à cause de la régularité de ceux-ci à l'échelle de la minute, due à l'étendue considérable du vaste plateau dénudé qui entoure la Station de tous côtés, principalement dans la direction des vents dominants.

Ainsi on ne risquera pas que la présence de maisons, d'arbres, d'ondulations marquées du terrain voisin ou la proximité de la mer, ne soient éventuellement la cause inéluctable de performances apparemment incohérentes de l'appareil, lorsque les conditions météorologiques varieront.

Ce site en outre sans appartenir à la région parisienne et être soumis de ce fait à toutes sortes de servitudes "non aedificandi", n'en est cependant pas très éloigné, ce qui facilitera l'expérimentation au cours des mois et des années à venir.

Autour de l'appareil ont été érigés des pylônes légers dont l'un atteint 60 mètres. Ils sont aussi transparents que possible aux vents qui balaient la Station et supportent les appareils de contrôle de la direction et de la vitesse de ces vents.

II - DESCRIPTION DE LA STATION D'ETUDES ET DE L'AEROGENERATEUR

L'appareil représenté fig. 2, a été construit par la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, sur les plans et avec le concours des techniciens du Bureau d'Etudes Scientifiques et Techniques, 12, rue Léonidas, Paris XIV^e, lequel est dirigé par Monsieur L. ROMANI, Ingénieur Conseil.

A) Infrastructure

L'infrastructure comporte une plateforme avec terrasse de montage à quelques mètres au-dessus du sol, en forme d'étoile dont deux branches ont été traitées en construction légère facilement amovible (tubes Entrepose) et la troisième constitue un petit bâtiment qui abrite le poste de transformation, la salle de commande et de mesures, le local contenant les accumulateurs, la salle du groupe assurant la charge de ceux-ci et l'excitation de l'alternateur, et un petit atelier. Un hangar servant de magasin complète ce bâtiment.

Les fondations de l'aérogénérateur comprennent trois massifs en béton placés aux sommets d'un triangle équilatéral de 26 mètres environ de côté, chacun d'eux reposant sur le bon sol (limon des plateaux, à une profondeur de 1 mètre environ).

Les massifs B et C symétriques, d'un volume de 70 m³ environ chacun, supportent, au niveau zéro, par le moyen d'appuis articulés, les deux pieds du pylône autour desquels se fait le basculement. Le massif A, d'un volume de 60 m³ environ, supporte à l'aide d'un dispositif mécanique à verrou, le pied qui se déplace lors de ce basculement.

Deux massifs en béton supplémentaires (dits Nord et Sud), d'un volume de 50 m³ environ chacun, supportent les baraques dans lesquelles sont logés des treuils de mines à moteurs asynchrones, sur lesquels s'enroulent les câbles de traction et de retenue de l'aérogénérateur, au cours du basculement de celui-ci. (La commande de l'opération se fait par interphone à partir d'une baraque située à l'Est dans le plan vertical passant par les charnières B et C). Le massif Nord sert en même temps de support au portique sur lequel repose l'aérogénérateur basculé.

La liaison au réseau général se fait par l'intermédiaire d'une ligne 15 kilovolts de 12 kilomètres de long environ, dont le tracé est représenté sur la carte de la figure 1, ainsi que d'un transformateur de capacité surabondante (3 MVA) installé à Maintenon (Eure et Loir), à la jonction de cette ligne 15 kV avec la ligne 63 kV Elancourt-Luisant.

B) Partie basculable

a) Pylône tripode

Le pylône représenté fig. 3 a été construit à Montereau (Seine et Marne), par les Etablissements BESSON & LEPEU.

La structure primaire du pylône est, dans ses grandes lignes, un système triangulé dans l'espace, formé de 4 tétraèdres juxtaposés (15 barres, 7 noeuds). Le tétraèdre central a l'une de ses faces horizontale formant au niveau 15 mètres la plateforme supérieure du pylône. Le sommet opposé à cette face constitue au niveau 8,5 mètres, le centre d'épure du noeud-crapaudine supportant le pivot. Les trois autres tétraèdres, identiques entre eux, ont respectivement une face commune avec chacune des trois faces latérales du précédent. Les sommets opposés à ces faces sont au niveau zéro, les points d'épure des noeuds formant les pieds du pylône.

Pour diverses raisons, notamment par suite du fait que l'acier nécessaire a été pris pour gagner du temps sur le parc du constructeur, le pylône tripode pèse 102 tonnes, (partie basculable seule).

b) Pivot caréné orientable

Le pivot représenté fig. 4 est un tube composé de deux cônes opposés de longueur totale 22 mètres, en tôle d'acier roulé et soudé d'épaisseur 18 mm.

Il comporte dans sa partie centrale une bande de roulement cylindrique rapportée, en acier dur, sur laquelle appuient des galets montés deux par deux sur six palonniers dont les axes verticaux sont liés au pylône.

Un carénage extérieur en tôle mince d'acier contenant l'échelle d'accès à la nacelle, équipe le pivot afin de réduire l'interaction du sillage sur l'hélice éolienne placée en aval.

c) Nacelle

A l'intérieur de l'extrémité supérieure du pivot est fixée la nacelle (fig. 5) en tôle mince d'acier rivé, qui porte la carénage amont et le carénage du frein.

La nacelle se prolonge vers l'aval par le frein et une fusée en acier

forgé, laquelle par l'intermédiaire de roulements à rouleaux de grandes dimensions supporte l'hélice éolienne. Elle est entourée de deux passerelles superposées, dont l'une supporte les armoires contenant les commandes hydrauliques.

d) Génératrice

L'alternateur GRAMME (Pantin - Seine), 3000 Volts, 1000 tours/min., 640 kW, 800 kVA, est fixé aux cadres de la nacelle.

Cette génératrice à excitation séparée (placée au sol) qui est munie d'un puissant amortisseur en cage d'écureuil, peut démarrer en moteur asynchrone.

Les câbles souples de liaison au sol (3 phases, excitation, câbles des mesures et des sondes) cheminent verticalement à l'intérieur du pivot et tolèrent une torsion correspondant à un peu plus d'un tour.

e) Hélice éolienne

Chacune des trois pales (fig. 6) est constituée d'alliage léger inoxydable (AZ 4 G, dit T 35, des Tréfileries et Laminoirs du Havre) rivé. Les pieds des pales en acier rivé et boulonné, constituent avec deux flasques en acier soudé l'essentiel du moyeu. Le dièdre est de 8 degrés sexagésimaux.

Le moyeu se prolonge par un cylindre amont relié au frein et un cône aval recevant l'accouplement. Ces structures auxiliaires sont en acier. Le moyeu est caréné entre les pales et derrière elles par des carénages démontables en T 35.

L'hélice qu'un vireur permet de faire tourner manuellement, tourne normalement à 47 tours/minute. Elle a été construite à Bordeaux (Gironde) et en partie à Valenciennes (Nord), dans les usines de la Compagnie Industrielle de Matériel de Transport.

f) Transmission

Par un dispositif déjà utilisé sur les locomotives électriques mais considérablement extrapolé, l'hélice éolienne entraîne un premier train d'engrenages à planétaires dont les caractéristiques sont les suivantes : Couronne fixe à denture intérieure (module 11) de 109 dents, 3 satellites de 46 dents, planétaire de 17 dents.

Un arbre intermédiaire de diamètre 260 mm extérieur, tournant à 350 tours/minute, relie ce premier train à un second train d'engrenages, en passant à l'intérieur de la fusée supportant l'hélice. Des accouplements à canelures "bateau" permettent un certain désalignement, rendu inévitable par les déformations des grandes structures.

Les caractéristiques du second train sont les suivantes : Couronne entraînée par l'arbre intermédiaire (77 dents, module 8) 4 satellites de 25 dents reliés à l'embrayage par l'arbre porte-satellites passant à travers l'arbre creux de la génératrice, planétaire de 27 dents.

Les dentures des deux trains sont droites.

La partie fixe de l'embrayage est montée en balance et des barreaux à jauges résistantes permettent de mesurer le couple de réaction sur la nacelle.

Cette transmission comme le pivot et la nacelle ont été construits par les Forges et Chantiers de la Méditerranée (Usine du Havre - Seine Maritime).

Le schéma de lubrification des deux trains est représenté fig. 7.

g) Limiteurs de vitesse et de puissance

Si les pales d'une hélice éolienne sont à calage fixe, une régulation très efficace peut être automatiquement et gratuitement obtenue du seul fait que la génératrice entraînée est accrochée sur un réseau alternatif interconnecté.

En effet, le vent incident est la somme géométrique d'une composante relative due à la rotation et du vent naturel. Lorsqu'à vitesse de rotation constante, celui-ci augmente, le triangle des vitesses se déforme et par suite d'un effet analogue à la "perte de vitesse" sur une aile d'avion, la puissance fournie par l'hélice à la génératrice peut décroître après être passée par un maximum pour ne recommencer à croître lentement que pour des vitesses de vent considérables.

En contre partie l'hélice emballe dès que le réseau tombe en panne. Aussi quatre procédés de lutte contre cet inconvénient ont-ils été prévus sur l'aérogénérateur BEST-Romani.

Le plus classique est un frein à disque à commande hydraulique, qui permet d'appliquer à l'hélice un couple résistant de 40.000 m.kg. Les garnitures choisies ont une efficacité croissante avec la température, contrairement à celles qu'on est amené à employer en automobile.

Un freinage électrique peut être en outre obtenu en substituant au réseau défaillant une résistance électrique constituée par une ligne aérienne triphasée de longueur 160 mètres, refroidie par le vent, composée de trois longueurs de ruban méplat de TOPIET montées en étoile. Cette résistance permet de dissiper jusqu'à 1100 kW.

Sur chaque pale des ralentisseurs, encore appelés "spoilers", normalement dissimulés dans le bord d'attaque, peuvent émerger sous l'influence d'un excès de force centrifuge et détruire momentanément les qualités aérodynamiques des profils employés.

Enfin, si aucun de ces procédés n'a suffi à ralentir l'hélice, il n'est pas exclu qu'on ne désorienté volontairement l'ensemble de l'aérogénérateur.

Les schémas des commandes hydrauliques sont représentés fig. 8.

h) Orientation

En dessous de la plateforme supérieure du pylône sera fixé un mécanisme à engrenages à commande électrique qui permettra de modifier l'orienta-

tion du pivot. Cette commande pourra être elle-même servo-commandée par une manche à air placée en permanence en dehors du sillage de l'hélice éolienne.

i) Devis des poids de la partie basculable

Pylône	102 tonnes
Pivot caréné	25 "
Nacelle	10 "
Génératrice	6 "
Hélice éolienne et carénages tournants	8 "
Transmission	9 "
<hr/>	
Total	160 tonnes

c) Schéma électrique

Il est représenté sur la figure 9. Le sectionneur permettant un fonctionnement de secours sur le 15 kilovolts local est normalement ouvert.

Des consignes de fonctionnement de l'installation de Nogent-le-Roi, très précises, ont été élaborées avec divers Services intéressés d'Electricité de France, afin que le déversement inopiné d'énergie d'origine éolienne sur le réseau général 63 kilovolts ne risque pas de produire d'incidents.

III - MONTAGE

Les travaux d'implantation de l'aérogénérateur ont débuté fin 1955. Les bâtiments et massifs de fondation ont été exécutés en 1956, ainsi qu'une partie des installations électriques qui ont été réalisées par la Société Electro-France d'Antony (Seine).

Mais c'est seulement au printemps 1957 qu'a pu commencer le montage de la partie basculable, grâce au concours des spécialistes de la Société Monteurs Levageurs de Villejuif (Seine).

Un certain nombre d'opérations restent encore à exécuter (équilibrage de l'hélice, montage des carénages amont et aval, mise en place du mécanisme d'orientation, montage des spoilers, peinture de l'ensemble) qui nécessiteront d'ailleurs l'abaissement prochain de la partie basculable.

On peut considérer que le montage aura finalement exigé environ 18 mois au total, mais au cours cette période l'appareil aura fonctionné et la plus grande partie du rodage et de la mise au point aura été faite.

IV - MISE EN SERVICE

A Nogent-le-Roi, l'alternateur a été couplé au réseau une première fois le 15 mars 1958, pour fonctionnement en compensateur synchrone.

L'hélice débrayée a été d'autre part libérée dans le vent le 19 mars 1958. Elle a démarré par vent de 4,50 m/sec environ. Lorsqu'elle a atteint une vitesse de 53 tours environ, correspondant à un vent de 6 m/sec environ et à un coefficient de vitesse périphérique $\left(\frac{\omega R}{V}\right)$ à l'emballément de l'ordre de 14, elle a été arrêtée par

freinage mécanique en 7 secondes environ.

L'ensemble alternateur-hélice éolienne a débité sur le réseau pour la première fois le 2 avril 1958. Le 11 avril, on a atteint en pointe des puissances de l'ordre de 200 kW, par vents variables de 7 à 11 m/s environ. Le seuil de charge semble être un peu inférieur à 7 mètres/sec. Pour le moment et jusqu'à la fin du rodage, on ne désire pas dépasser ces valeurs.

Entre 0 et 200 kW, aucun pompage et aucune vibration anormale ne se sont manifestés.

V - MESURES

A - But des essais - Grandeurs à mesurer

- a) Mesurer les performances de l'appareil. Etablir les courbes :
Puissance utile. Vitesse du vent (Orientation libre,
(Orientation asservie,
(Orientation décalée, etc..
- b) Analyser les pertes énergétiques et en déduire les courbes :
Coefficient de puissance de l'hélice - Vitesse du vent.
- c) Déterminer le meilleur réglage d'excitation (Stabilité,
(Production maximum, etc..
- d) Mettre au point les méthodes d'exploitation :
Couplage permanent ou découplage par vent inférieur au seuil de charge,
Nécessité de prévoir un collecteur dans le pivot, etc..
- e) Comparer les différents procédés de freinage et de ralentissement :
Freinage mécanique, électrique, aérodynamique,
Changement d'orientation de 90°.
- f) Etudier les possibilités de simplification des servitudes :
Carénage du pivot,
Orientation,
Mouvement lent, etc..
- g) Vérifier les calculs aérodynamiques et de résistance des matériaux,
Fournir éventuellement des informations sur les vibrations qui
auraient été constatées, par mesure des contraintes à l'aide
de jauges à fils résistants (dans l'hélice éolienne,
(dans l'infrastructure, etc..
et par micromanomètres différentiels.
- h) Etudier les sillages.

B - Matériel à employer

- a) Mesure de la direction et de la vitesse du vent
 - 1) Manche à air munie de selsyns et girouette Papillon.
 - 2) Anémomètre Papillon (sensible à V) et anémomètres comptabilisant l'énergie théoriquement récupérable, fabriqués par la Compagnie des Compteurs à Montrouge (Seine).

- 3) Anémomètres à cylindres rugueux (à temps de réponse de l'ordre de 0,2 sec. et sensibles à $\sqrt{V^2}$).
- au début, anémomètres ancien modèle montés en girouette,
 - par la suite, anémomètres astatiques à deux composantes orthogonales.

Nota : Le problème de la référence-vitesse sera très difficile à résoudre à cause :

- 1°) des interactions aérogénérateur - anémomètres,
- 2°) de l'irrégularité du vent dans l'espace,
- 3°) du caractère non stationnaire du vent,
- 4°) du gradient vertical variable de sa vitesse,
- 5°) des mouvements d'orientation de l'aérogénérateur,
- 6°) de l'intervention de la vitesse par son cube dans l'exploitation des mesures.

Si l'anémomètre est unique, il devrait pour bien faire, être monté sur le même pivot que l'aérogénérateur. Mais comme ceci est impossible, il doit être porté vers l'amont par un mât horizontal juste dans l'axe de l'hélice et tout tarage préalable est impossible. Cette méthode n'est donc utilisable que si l'on dispose d'une autre, plus sûre, pour tarage en plein air. (On a prévu de monter sur le carénage amont un support d'anémomètre, pour tenter un tel tarage).

On doit employer, ainsi que le recommande d'ailleurs le Fascicule de documentation E.50.001 sur les Aérogénérateurs de petite puissance édité par l'A.F.N.O.R., deux anémomètres situés à droite et à gauche de l'hélice égale à hauteur de l'axe de celle-ci et à des distances égales et suffisantes sans être exagérées. A Nogent-le-Roi, on a adopté un écartement de 120 mètres, valeur prohibitive pour qu'on puisse faire supporter les deux anémomètres par l'aérogénérateur lui-même, de sorte que trois paires de pylônes supports ont été jugés nécessaires (voir fig. 1). Une seule paire sera utilisée à chaque instant.

b) Enregistrements ou lectures d'appareils

- 1) A l'aide d'un camion laboratoire de la Direction des Etudes et Recherches : enregistrement des régimes transitoires lors de la mise en route de l'alternateur en asynchrone, pendant son accrochage au réseau et pendant le couplage de l'hélice.
- 2) A l'aide d'un enregistreur photographique simple : enregistrement de la vitesse de rotation de l'hélice (emballement - décélération au moment du freinage, etc...).
- 3) A l'aide d'un appareil photographique à plaque ou à l'aide d'un oscilloscope, sur lequel on enverra n'importe quelle grandeur en abscisse (par exemple la puissance avec un montage de modulation en anneau) et n'importe quelle autre en ordonnée : étude des corrélations éventuelles. Possibilité de cinématographier l'oscilloscope.
- 4) A l'aide d'une caméra ultra-rapide, possibilité de cinématographier l'hélice en mouvement pour observation ultérieure au ralenti.
- 5) A l'aide de deux accéléromètres en quadrature dans un plan horizontal, placés dans la nacelle, et d'un enregistreur : détection et mesure des balourds susceptibles d'exister au départ.

6) A l'aide d'un enregistreur photographique multivoie : enregistrement des indications du wattmètre, du voltmètre, de l'écart angulaire vent-éolienne, du couplemètre, de la vitesse angulaire, de la référence vitesse et du temps, ou jauges de pivot, référence vitesse et temps, jauges du pylône, référence vitesse et temps.

7) A l'aide d'un enregistreur embarqué dans le moyeu : enregistrement des indications des jauges et capteurs placés dans les pales, avec déclenchement télécommandé et synchronisation avec l'enregistreur précédent.

Nota : Un programme plus ambitieux avait d'abord été élaboré comportant en outre des mesures simultanées sur les trois pales à l'aide de nombreux capteurs et de jauges connectées sur enregistreur multivoie avec transmission hertzienne. Pour limiter les dépenses il a été abandonné. Grâce au basculement possible et aux équipements de fils et tuyaux laissés en attente dans les parties inaccessibles des pales, on pourrait éventuellement y revenir, au moins en partie.

8) Il existe à Nogent-le-Roi un certain nombre d'appareils supplémentaires portatifs ou figurant sur le tableau de la Salle de commande et de mesures. Leurs indications seront relevées par simple lecture au cours des essais, soit parce qu'elles varient lentement (intensités des courants, températures des sondes logées dans les encoches du stator de la génératrice, etc..), soit parce qu'elles sont liées mathématiquement à des grandeurs enregistrées ou entrant dans la catégorie précédente (masse volumique de l'air, facteur de puissance), soit parce qu'on aura seulement besoin de leur moyenne sur un certain intervalle de temps (débit d'huile).

En ce qui concerne, par exemple, la mesure de la masse volumique de l'air, on dispose d'un baromètre à mercure et de thermomètres sec et mouillé.

9) On a l'intention de faire des études sur le vent à Nogent-le-Roi, à l'aide par exemple d'appareils électroniques permettant de classer les fréquences, ou encore d'appareils fabriqués par la Compagnie des Compteurs permettant d'enregistrer les courbes : Energies éoliennes intégrées sur 1 minute, en fonction du temps. On pourra de même étudier les corrélations entre vent et pluie (pluviographe enregistreur)...

Enfin la présence permanente (de nuit et de jour) de personnel à l'intérieur de la Station d'Etudes, pourra au besoin être utilisée, notamment si des lectures sont à faire, d'heure en heure, pendant une période de quelques jours.

c) Durée des essais

Les essais s'étendront vraisemblablement sur de nombreux mois, répartis au moins sur une année, de manière à avoir chance de rencontrer le plus grand nombre de structures de vent possibles.

VI - QUELQUES PHOTOGRAPHIES

Des photographies prises au cours des essais préalables, du montage et de l'érection de l'aérogénérateur à Nogent-le-Roi et une vue de la machine dressée ont été rassemblées ci-après, afin de donner une idée des difficultés rencontrées.

VII - REMARQUE

Ainsi pour essayer de transformer un peu d'énergie éolienne en énergie électrique, on a dû construire un premier appareil expérimental, à des dimensions qui peuvent paraître monumentales, en regard du million et demi de kilowattheures environ, qu'il serait capable de produire en moyenne annuellement, s'il était placé sur les côtes de Bretagne ou du Cotentin, en un endroit bien choisi. On voit que l'énergie éolienne est très peu dense.

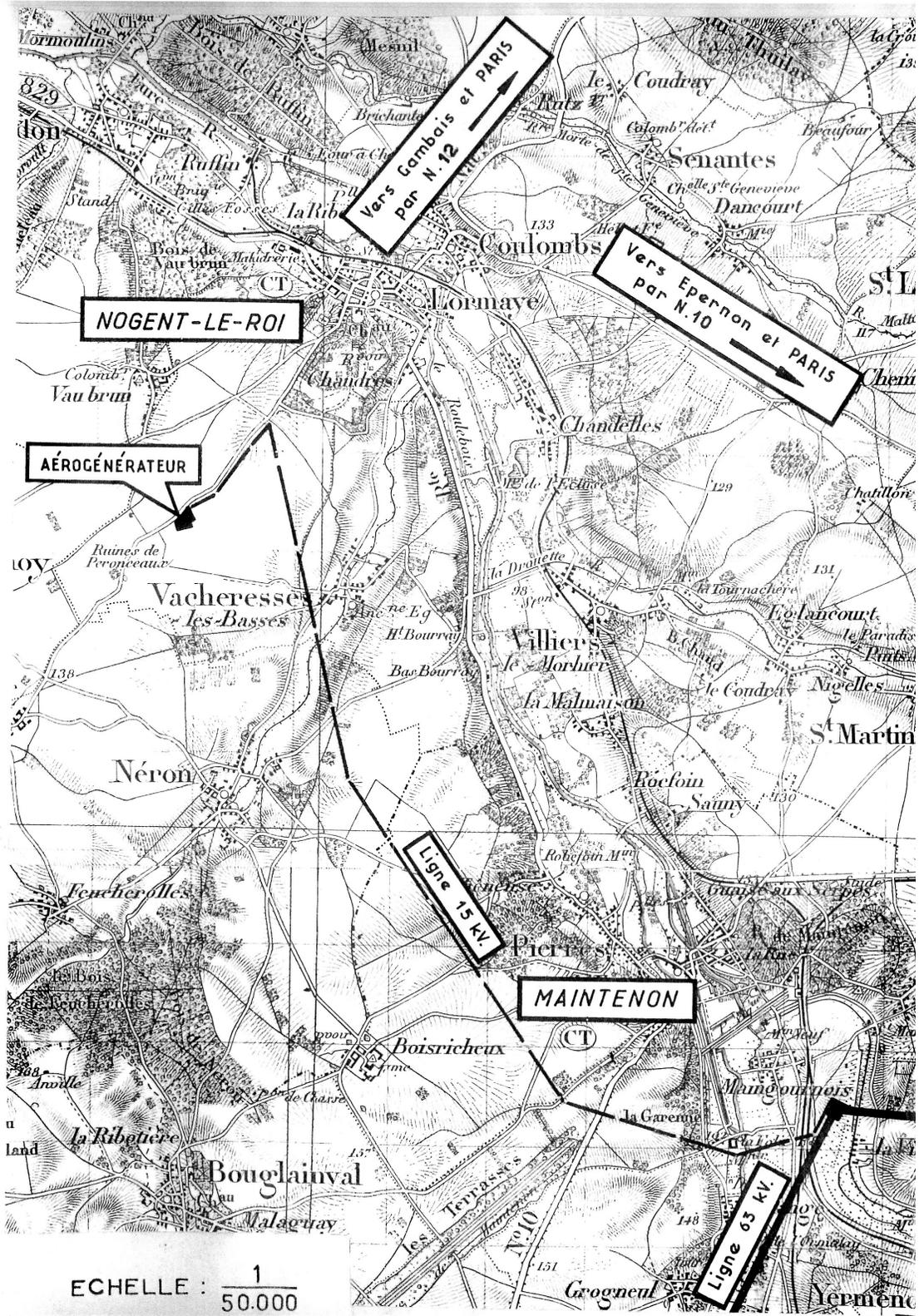
En outre les organes de cette machine sont inspirés de ceux en usage dans des industries où la fabrication en très grande série est de règle (automobile, chemins de fer, pylônes supports de ligne électrique, servo-mécanismes) à moins qu'ils ne s'apparentent à des techniques principalement orientées jusqu'ici vers la sécurité et non vers le bas prix de revient (aéronautique, marine, construction de ponts).

On a été très gêné par le fait qu'on ne disposait pas de précédent. Et on espère pouvoir simplifier considérablement dans l'avenir la solution ci-dessus décrite, principalement par suppression éventuelle d'organes qu'il aurait été quasi-impossible d'ajouter, si leur présence s'était au contraire, par la suite, avérée indispensable (embrayage, multiplicateur, freins, commandes hydrauliques, orientation, basculement, transformation électrique intermédiaire à moyenne tension, etc, etc..).

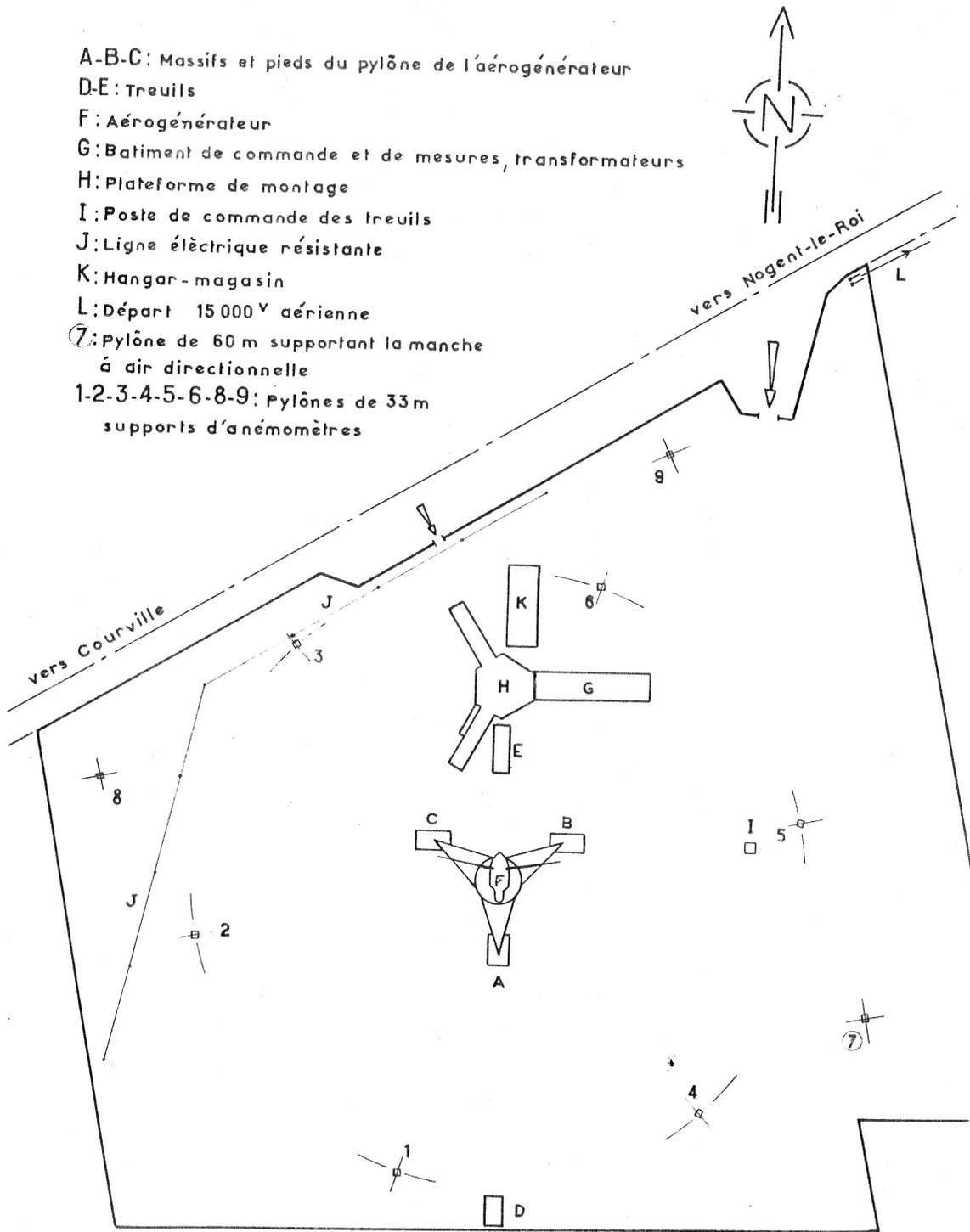
L'appareil de Nogent-le-Roi n'est donc en rien un prototype et les grands aérogénérateurs qui seront peut être construits plus tard en petites séries, si le coût s'en révèle modéré et la durée de vie suffisante, risquent de se présenter assez différemment, tant dans leur silhouette générale que dans leurs dimensions relatives.

Fig.1

STATION D'ÉTUDES
DE L'ÉNERGIE DU VENT
_ NOGENT LE ROI _
(Eure et Loir)
SITUATION ET IMPLANTATION



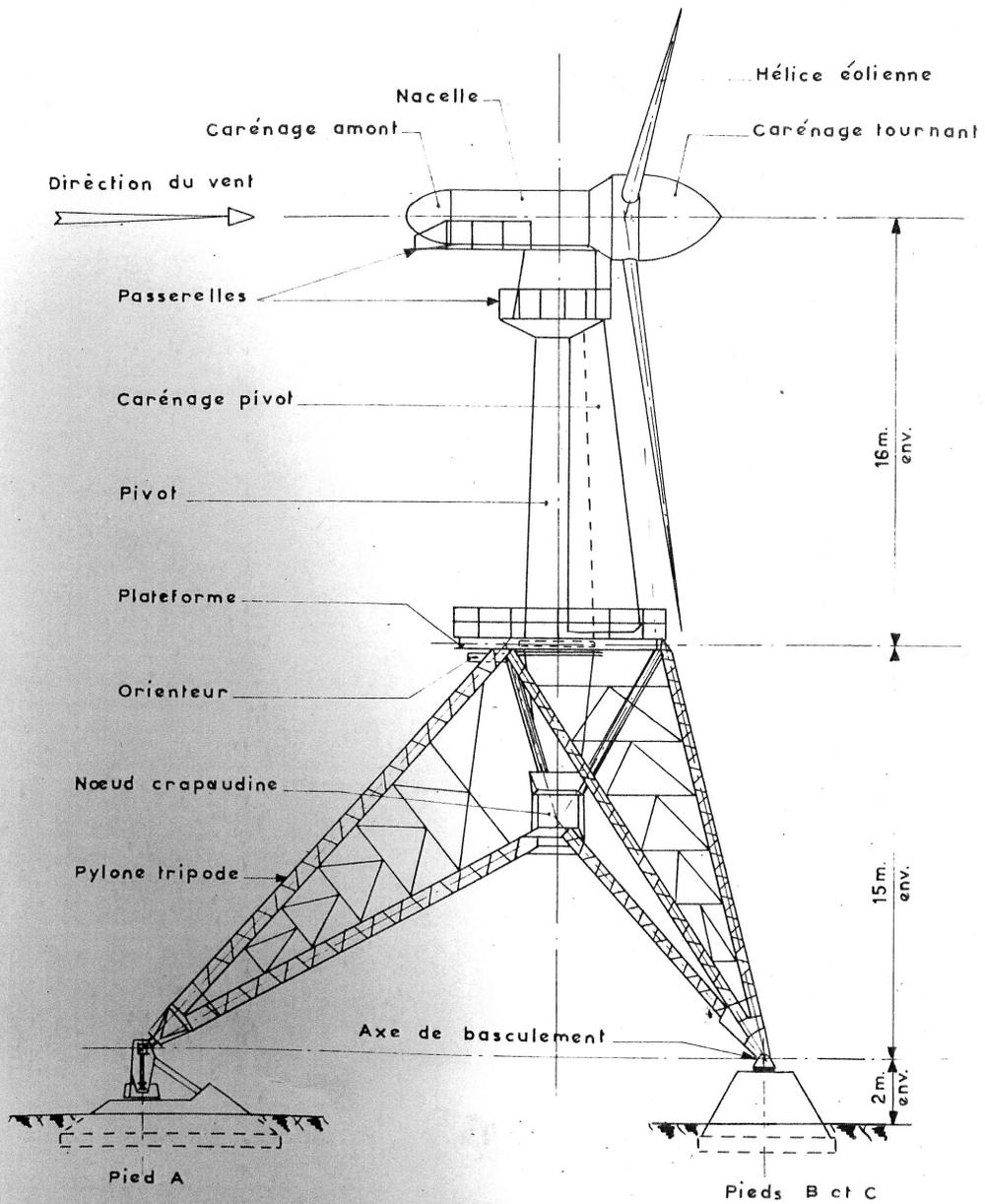
- A-B-C: Massifs et pieds du pylône de l'aérogénérateur
- D-E: Treuils
- F: Aérogénérateur
- G: Batiment de commande et de mesures, transformateurs
- H: Plateforme de montage
- I: Poste de commande des treuils
- J: Ligne électrique résistante
- K: Hangar-magasin
- L: Départ 15 000 V aérienne
- ⑦: Pylône de 60 m supportant la manche à air directionnelle
- 1-2-3-4-5-6-8-9: Pylônes de 33 m supports d'anémomètres



ECHELLE: $\frac{1}{1000}$

Fig. 2

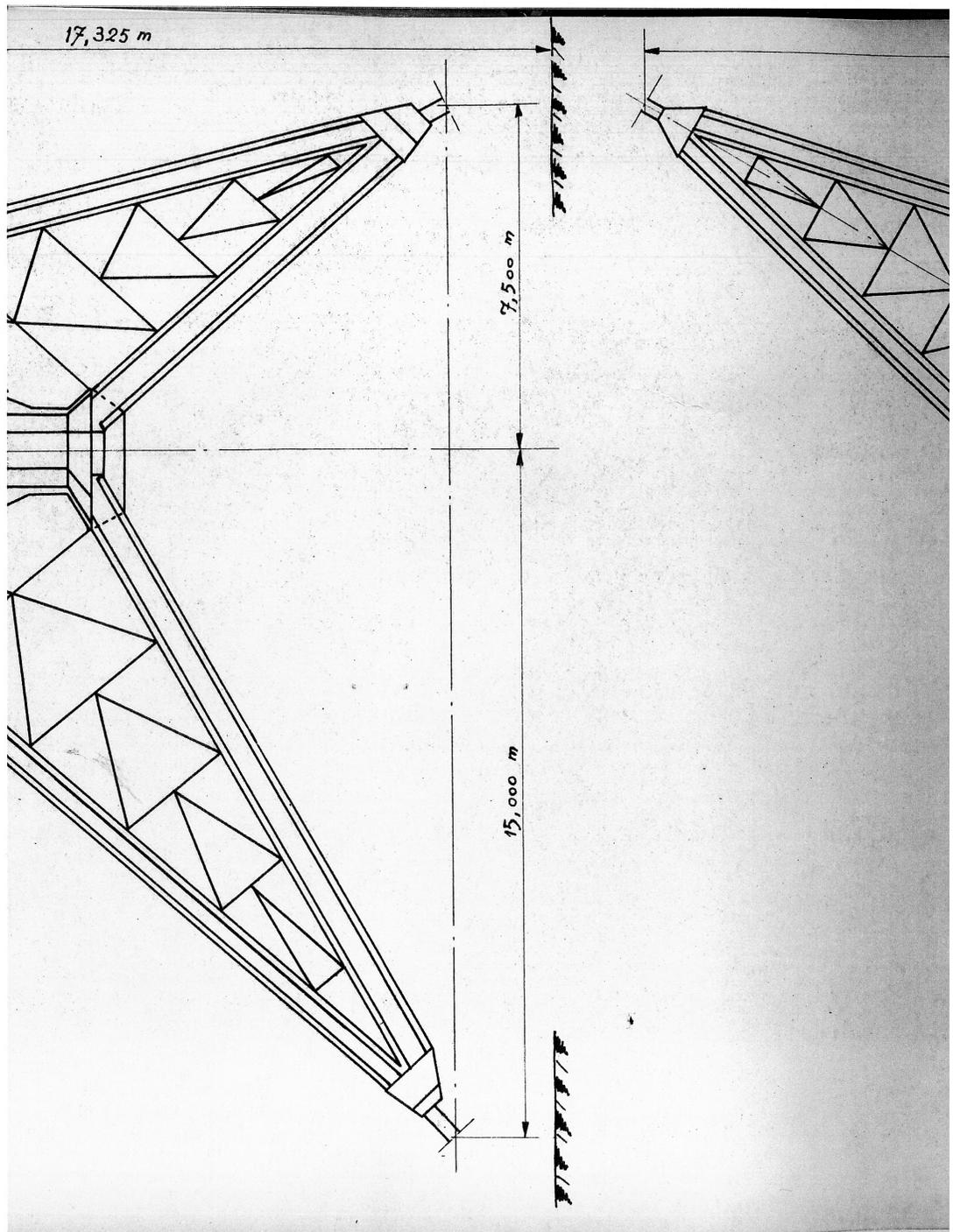
ENSEMBLE
DE
L'AÉROGÉNÉRATEUR

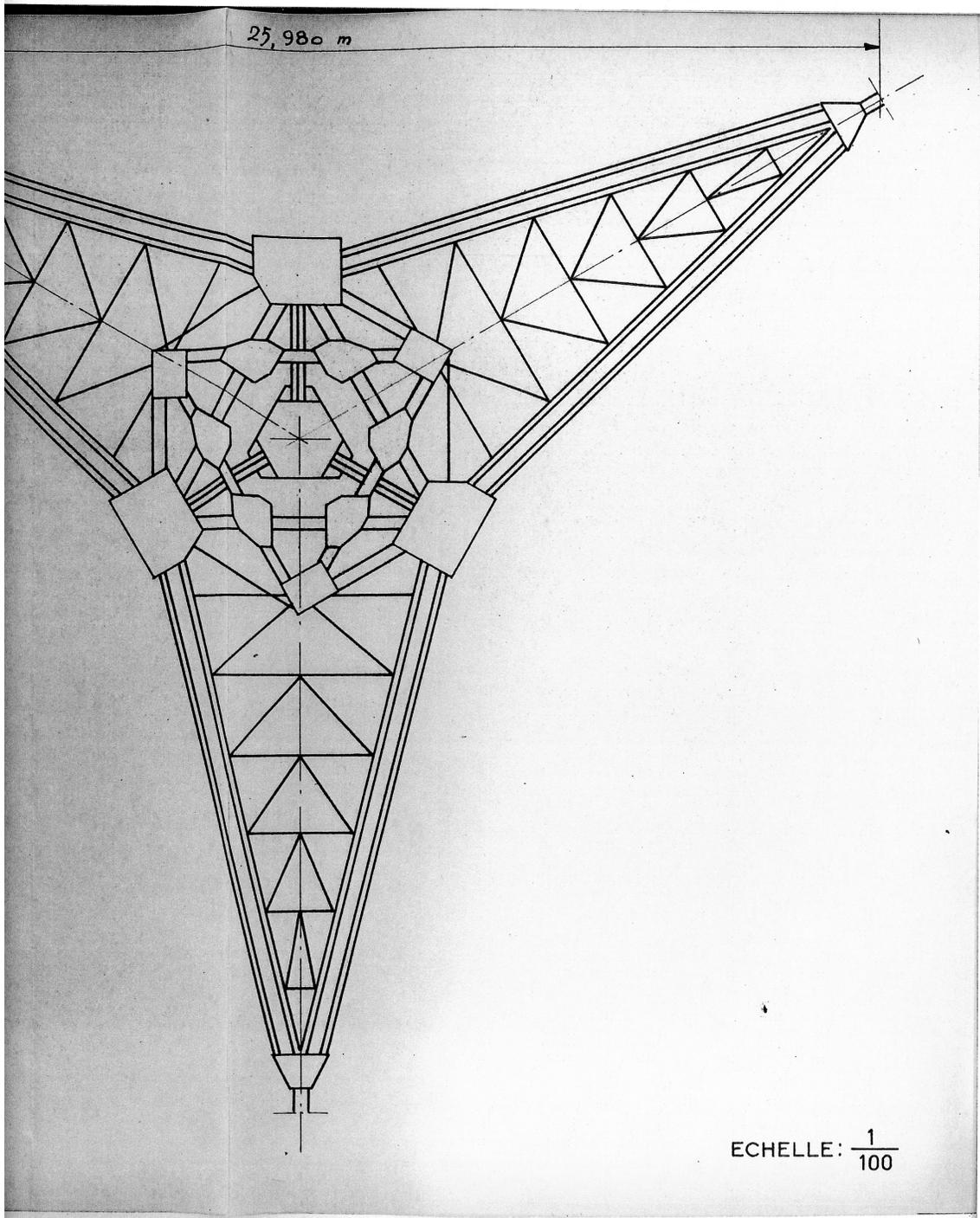


ECHELLE : $\frac{1}{200}$

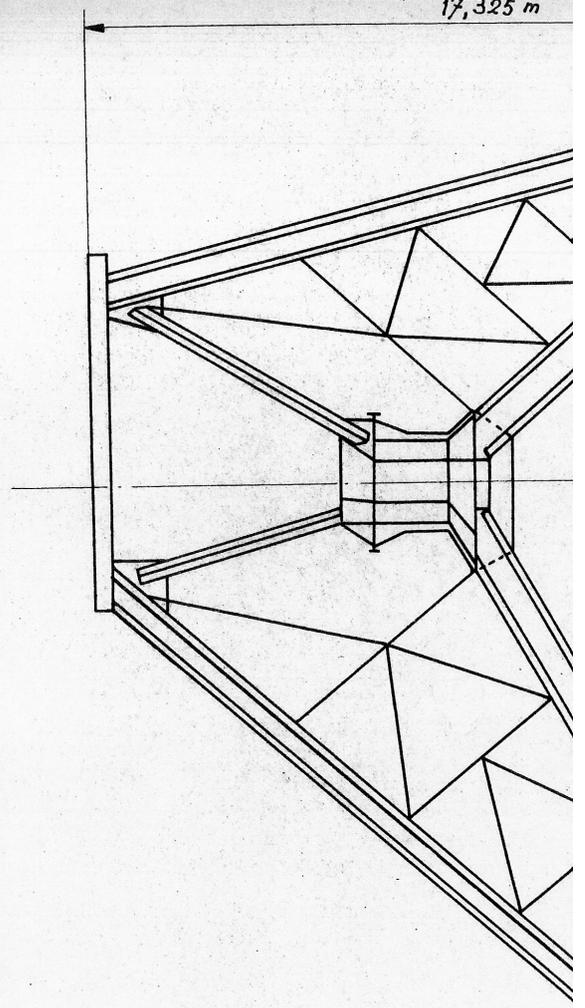
Fig.3

PYLONE TRIPODE





17,325 m



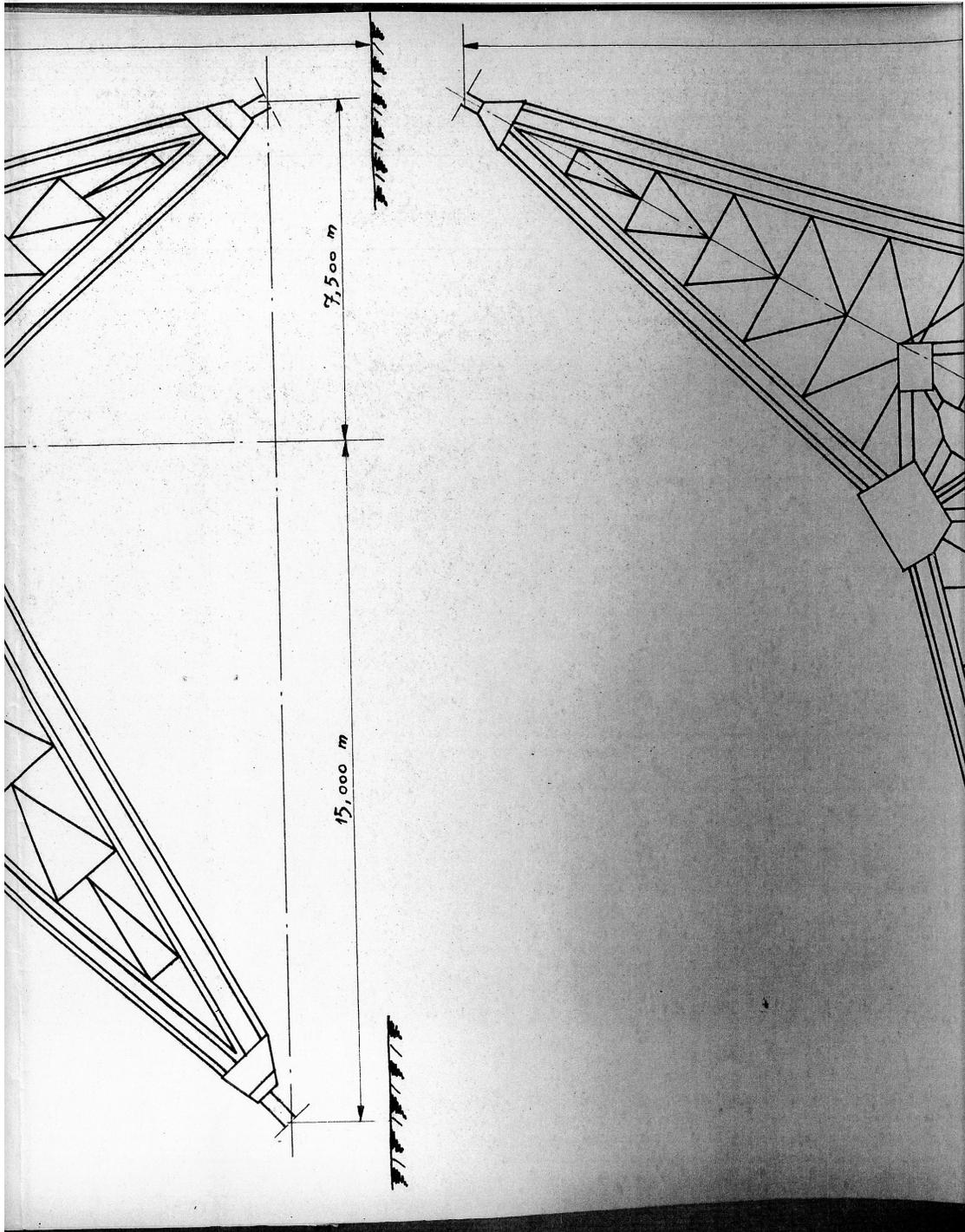
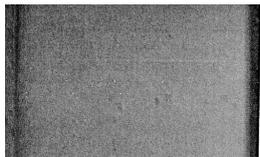


Fig.4

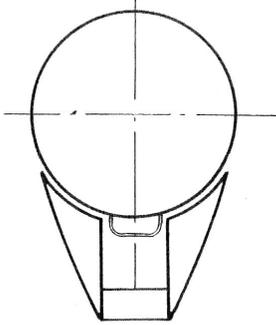
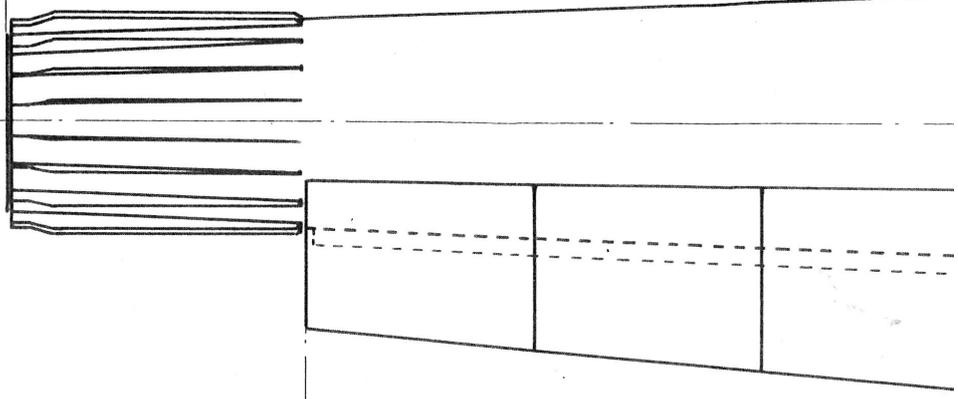
PIVOT CARÉNÉ



Axe de rotation de l'hélice éolienn

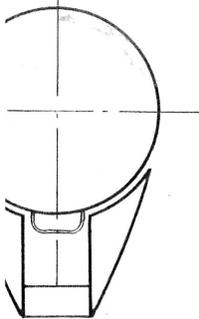
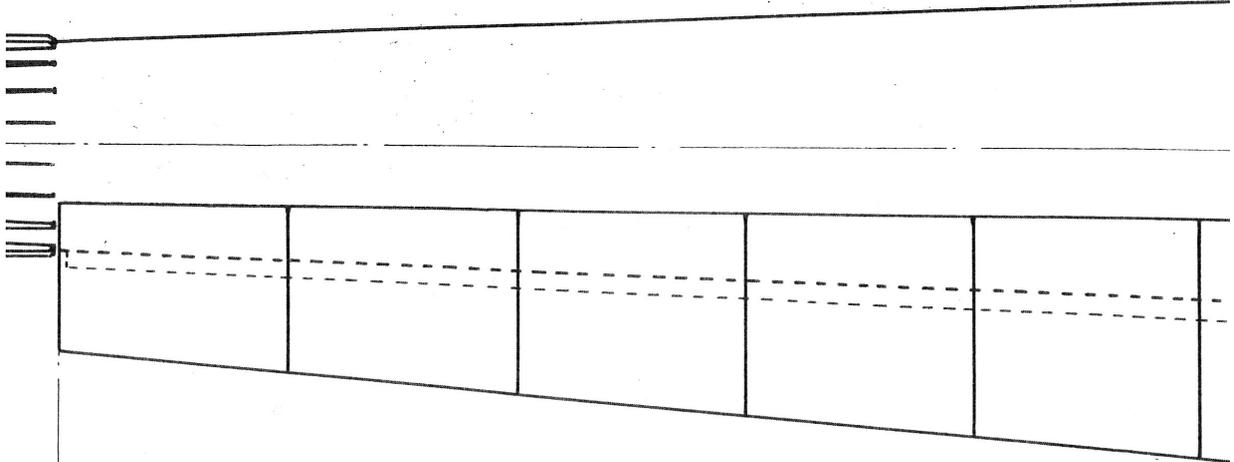
1,350 m

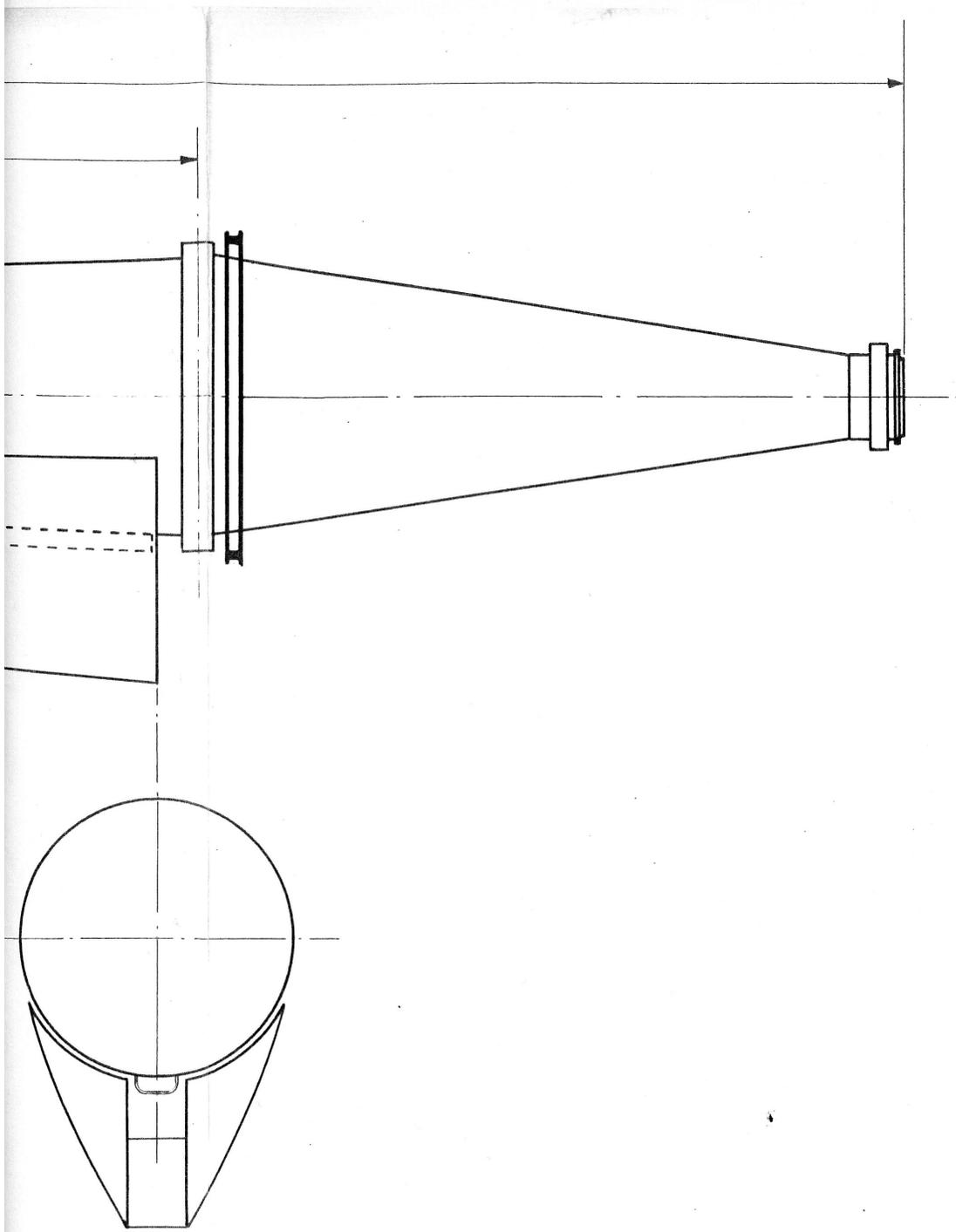
14,250 m



20,952 m

14,250 m



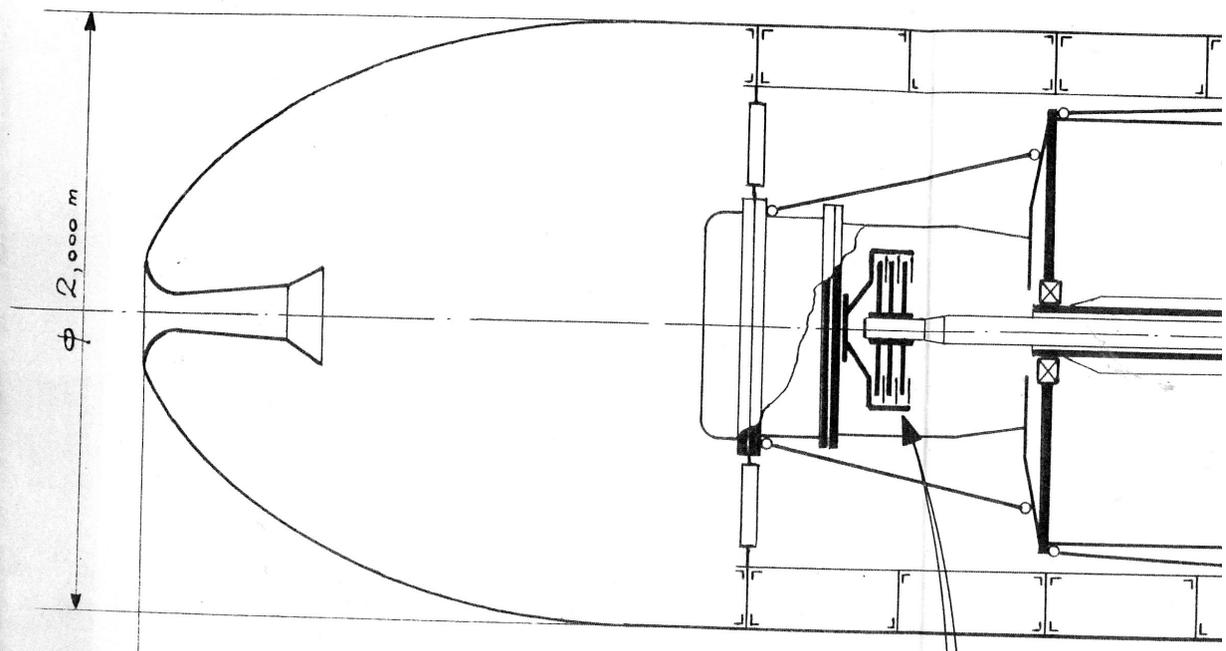


ECHELLE: $\frac{1}{50}$

Fig. 5

COUPE LONGITUDINALE
DE LA NACELLE

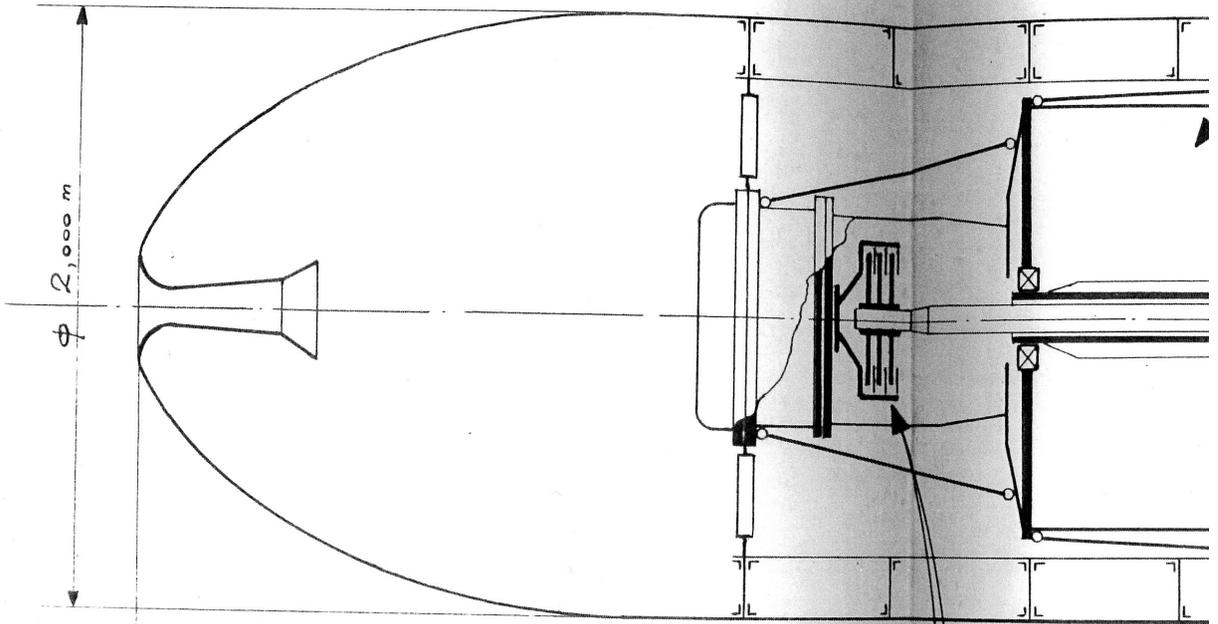
ALTERN.



EMBAYAGE

6,000 m

ALTERNA



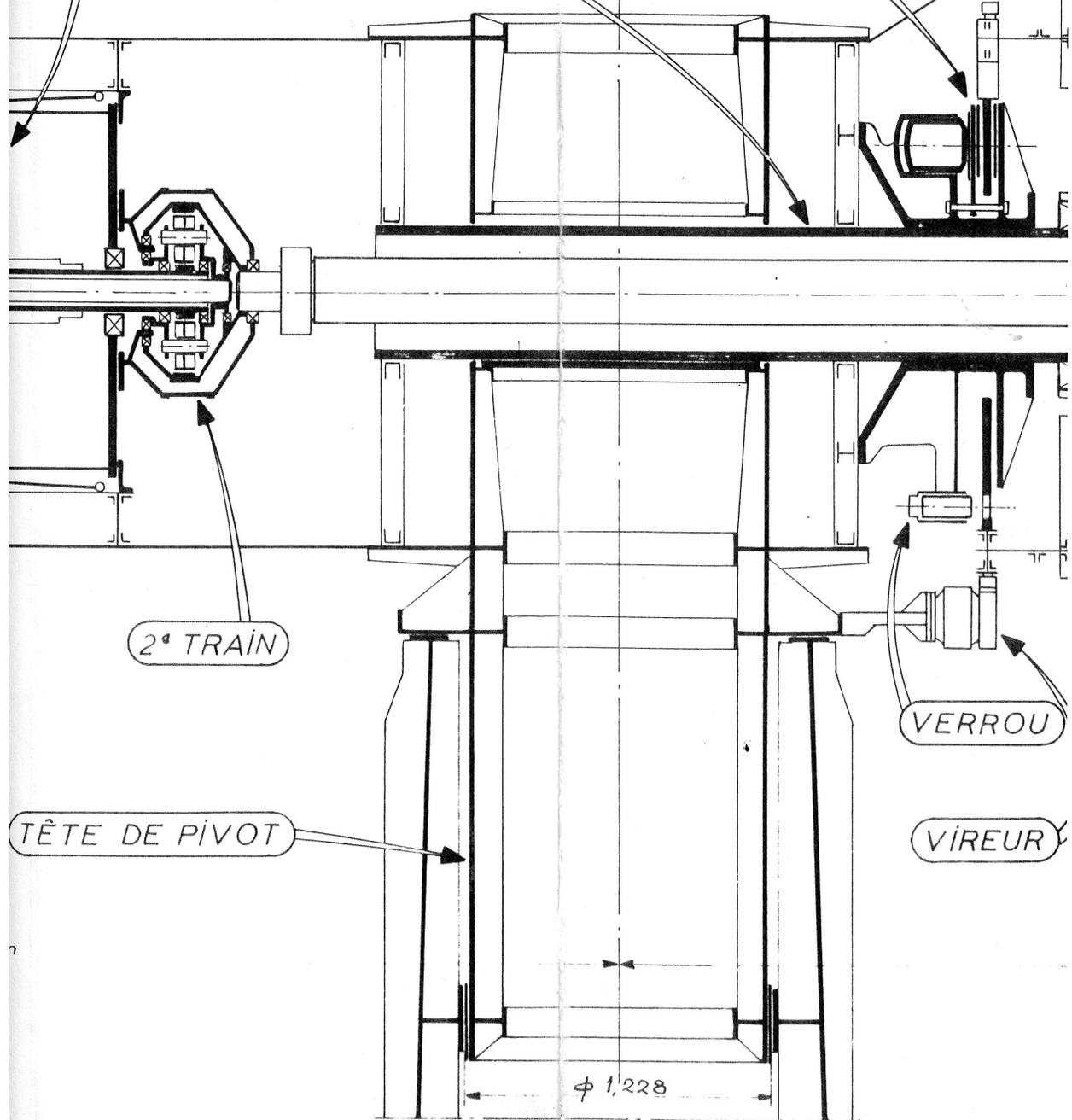
EMBAYAGE

6,000 m

ATEUR

FUSÉE

FREIN À DISQUE



2° TRAIN

TÊTE DE PIVOT

VERROU

VIREUR

$\phi 1,228$

Page manquante

Visible sur la version de la N.A.S.A. et sur le site Web
(Caractéristiques techniques)

Fig.6

PALE DE L'HÉLICE ÉOLIENNE

ures

36

35

34

33

32

31

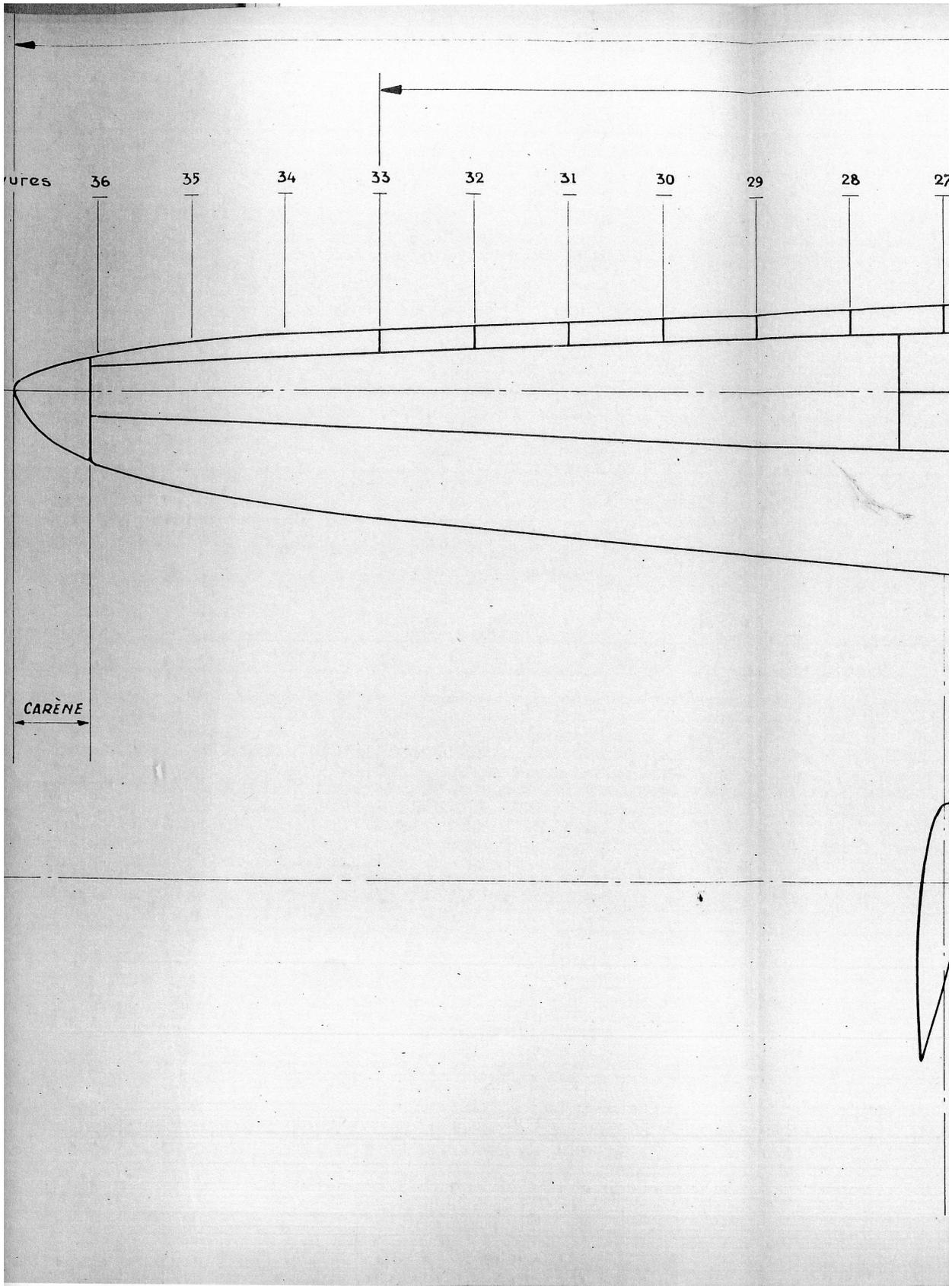
30

29

28

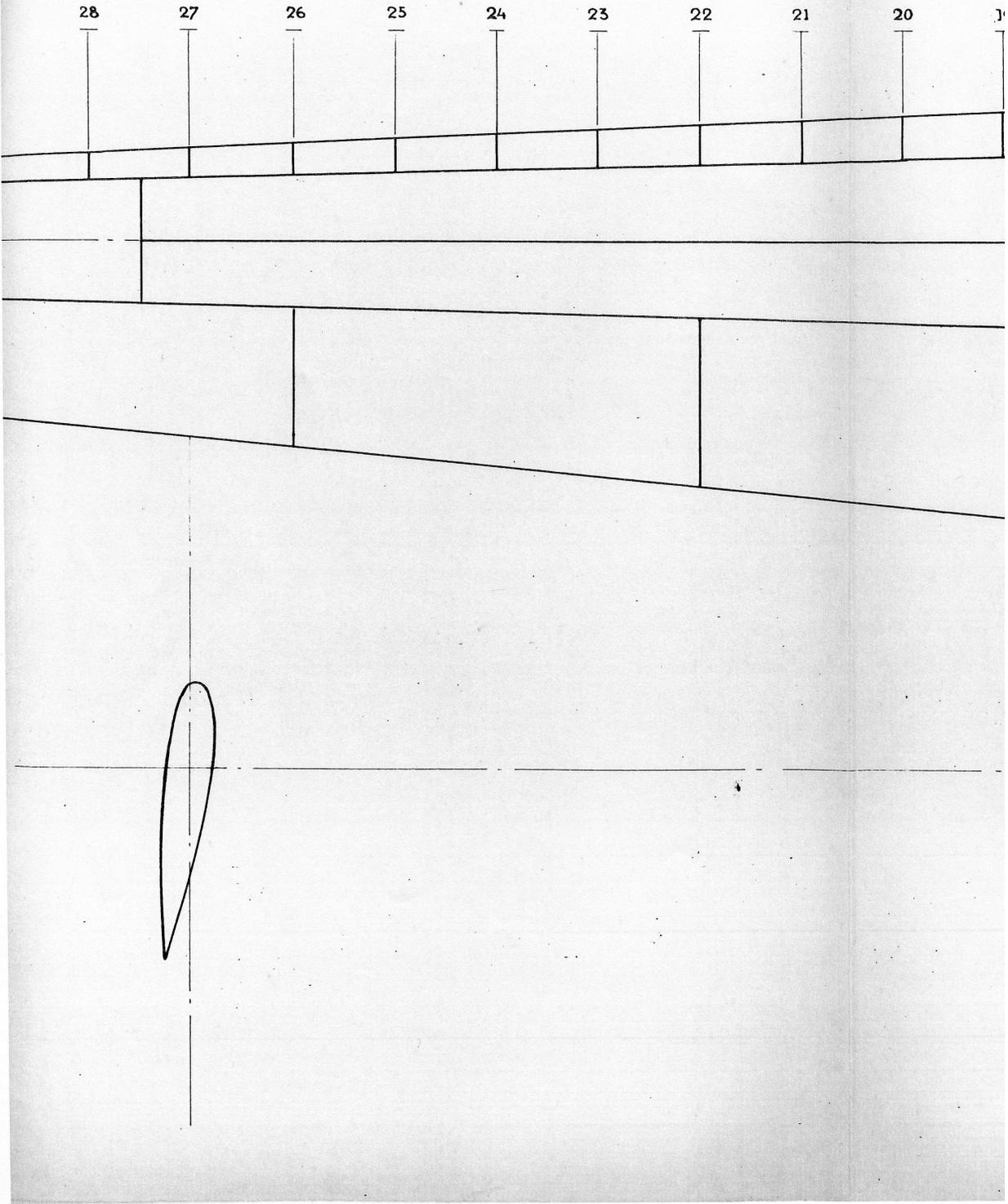
27

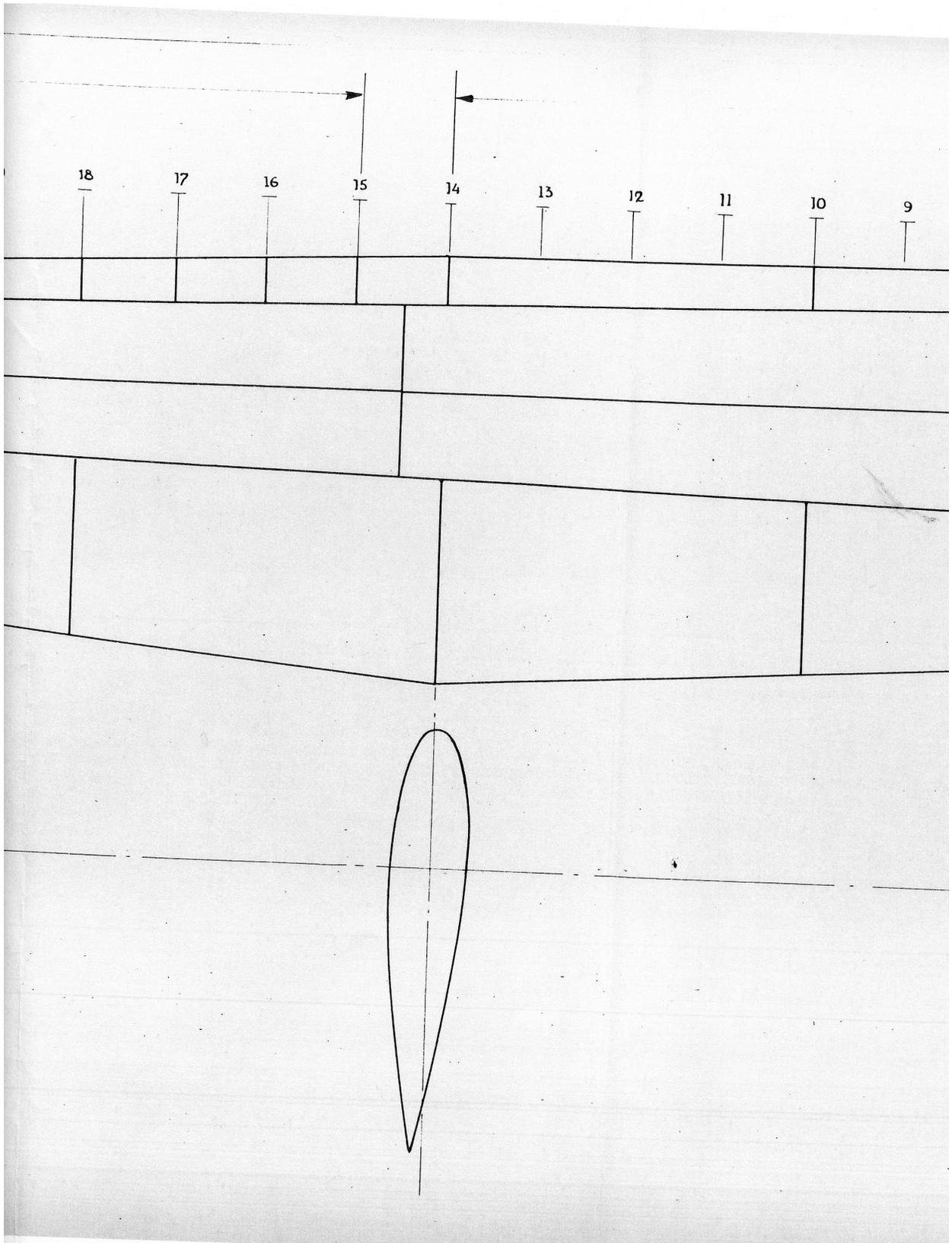
CARÈNE

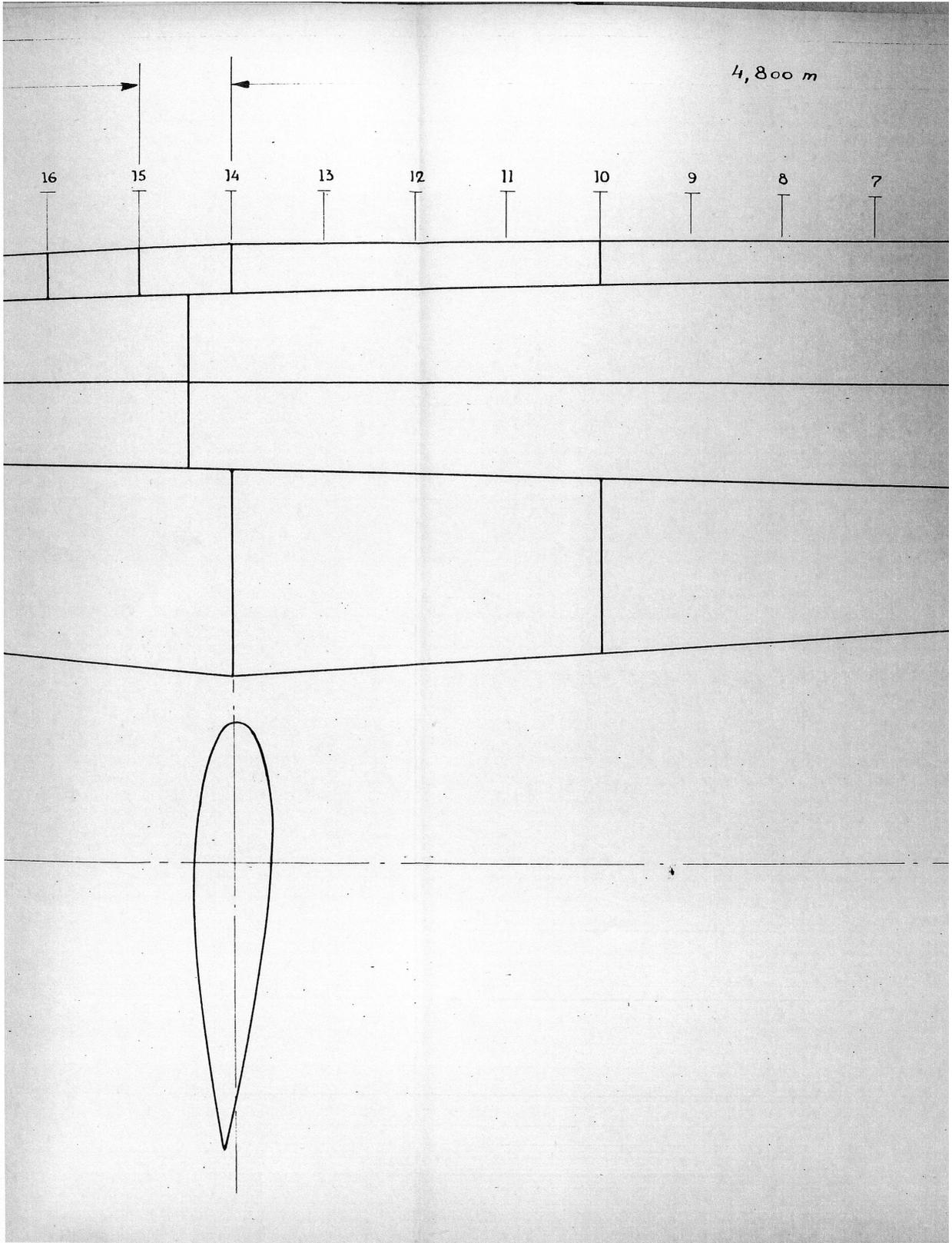


13,944 m

REGION DES SPOILERS







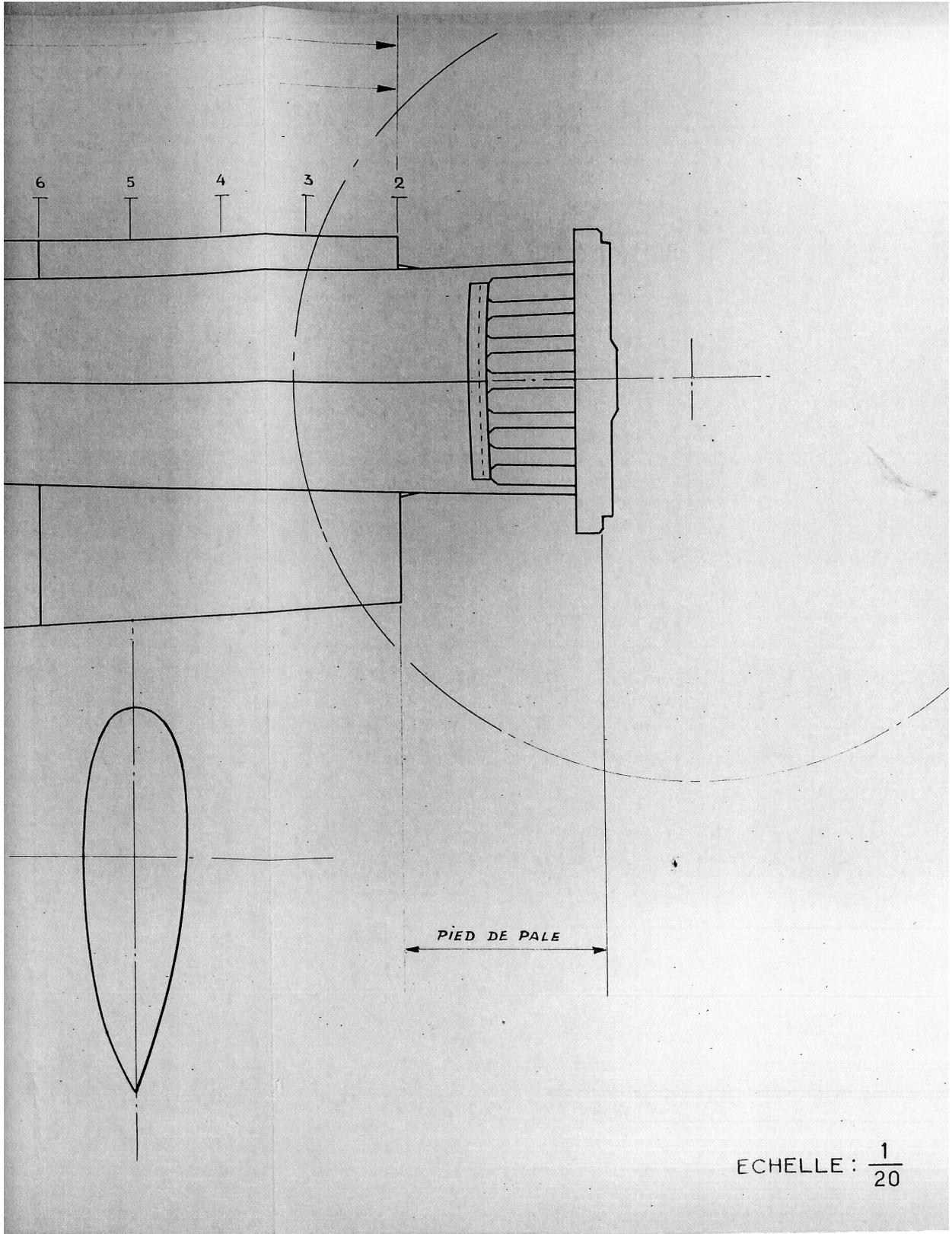
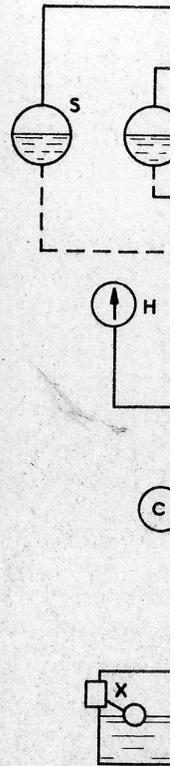
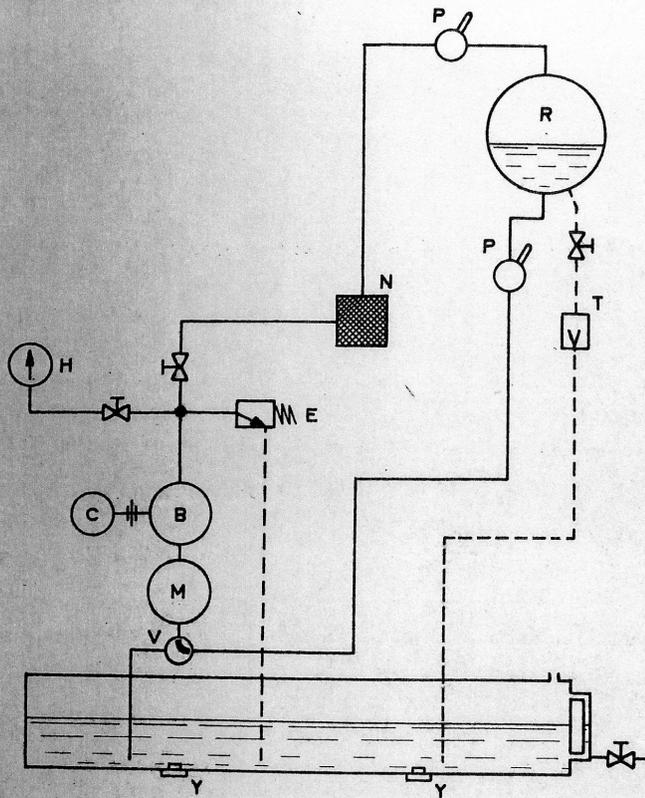


Fig. 7

CIRCUITS DE LUBRIFICATION

1^{er} TRAIN

2^{ème} TRA

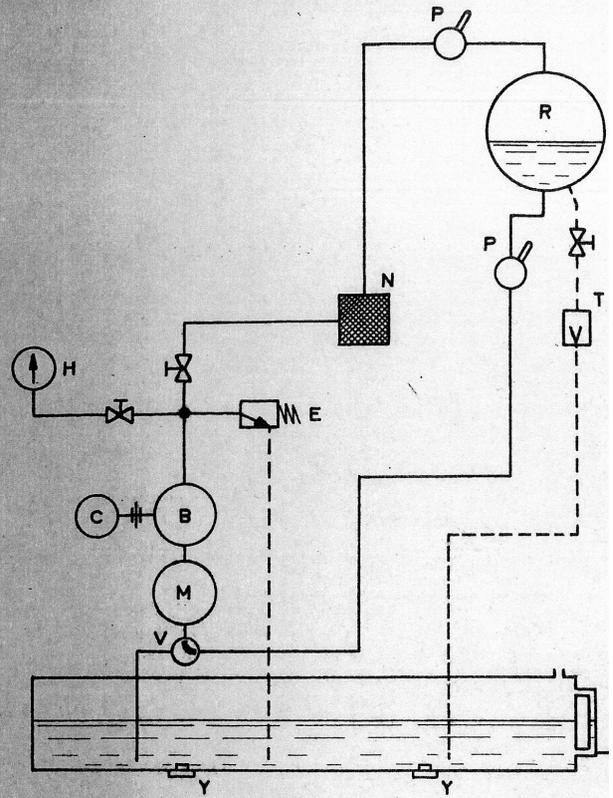


- | | |
|-----------------------|---------------|
| B : Pompe | P : Sonde Ih |
| C : Moteur électrique | R : Carters 1 |
| E : By-pass | S : Paliers a |
| H : Manomètre | T : Contrôle |
| M : Filtre | U : Contrôle |
| N : Radiateur | V : Dispatch |
| | X : Niveau-cc |
| | Y : Bouchon |

Fig. 7

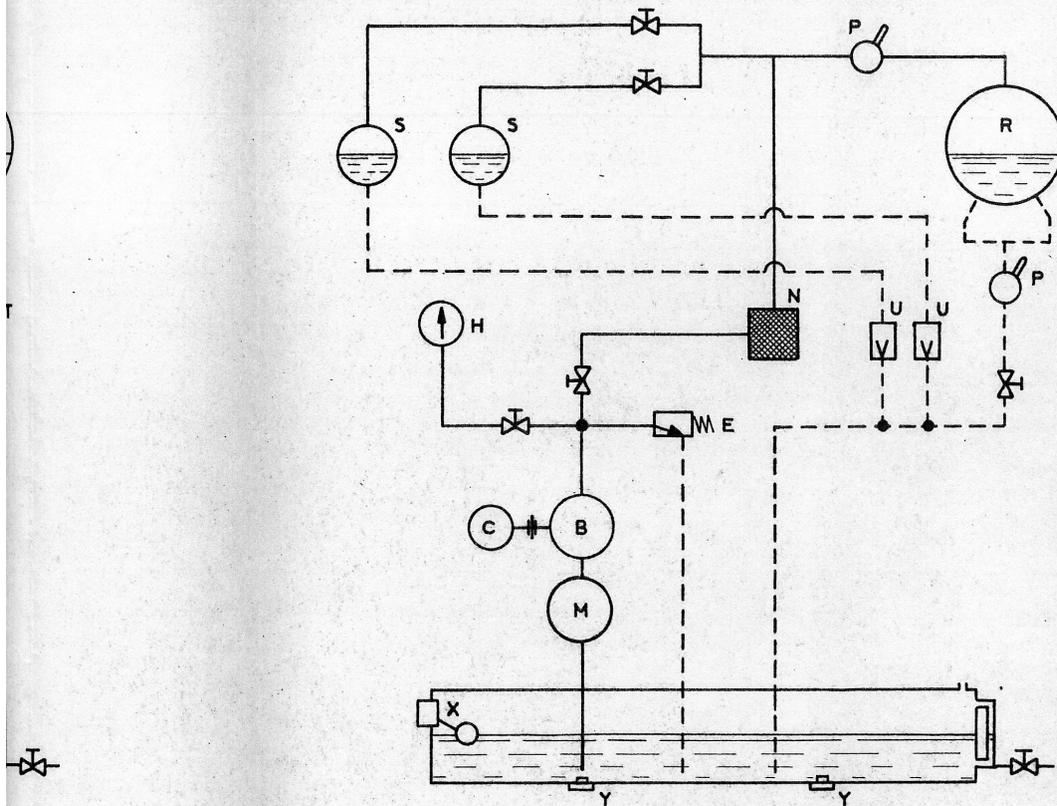
FICATION

1^{er} TRAIN



- B : Pompe
- C : Moteur
- E : By-pas
- H : Manom
- M : Filtre
- N : Radiate

2^{ème} - TRAIN et PALIERS ALTERNATEUR



- P : Sonde thermique
- R : Carters 1^{er} et 2^{ème} train
- S : Paliers alternateur
- T : Contrôle trop-plein
- U : Contrôle débit
- V : Dispatch
- X : Niveau-contact
- Y : Bouchon magnétique

ir électrique

ss

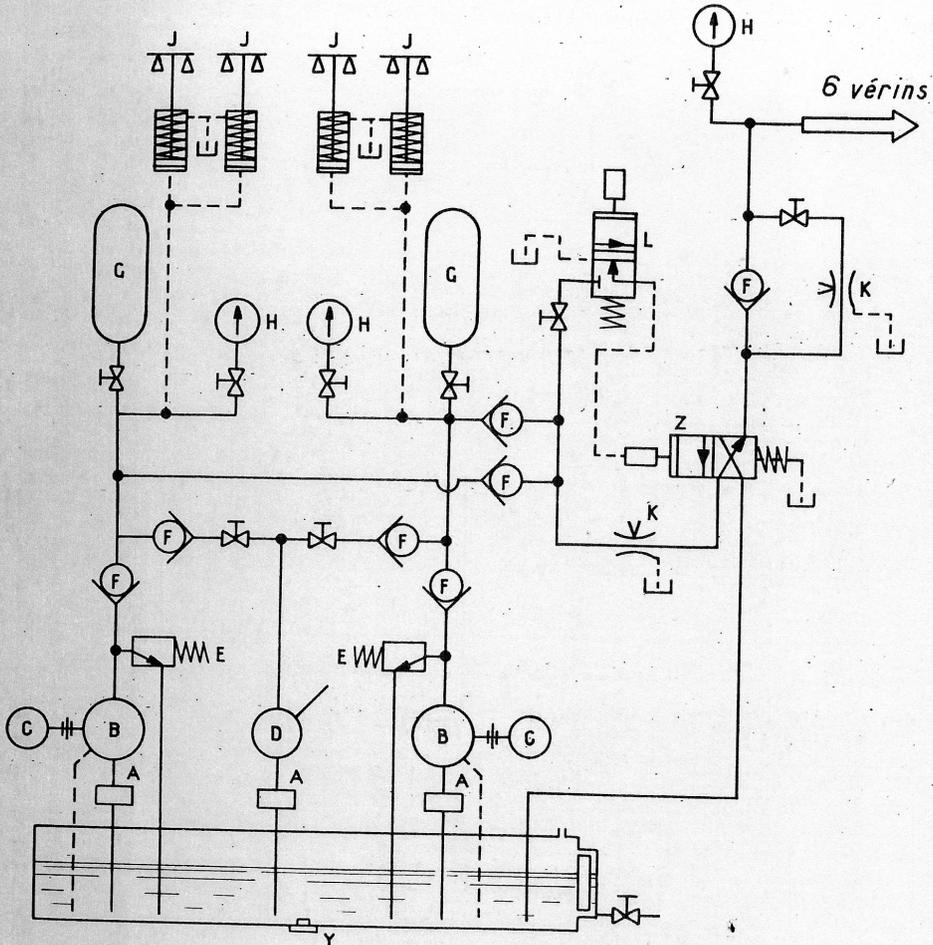
mètre

leur

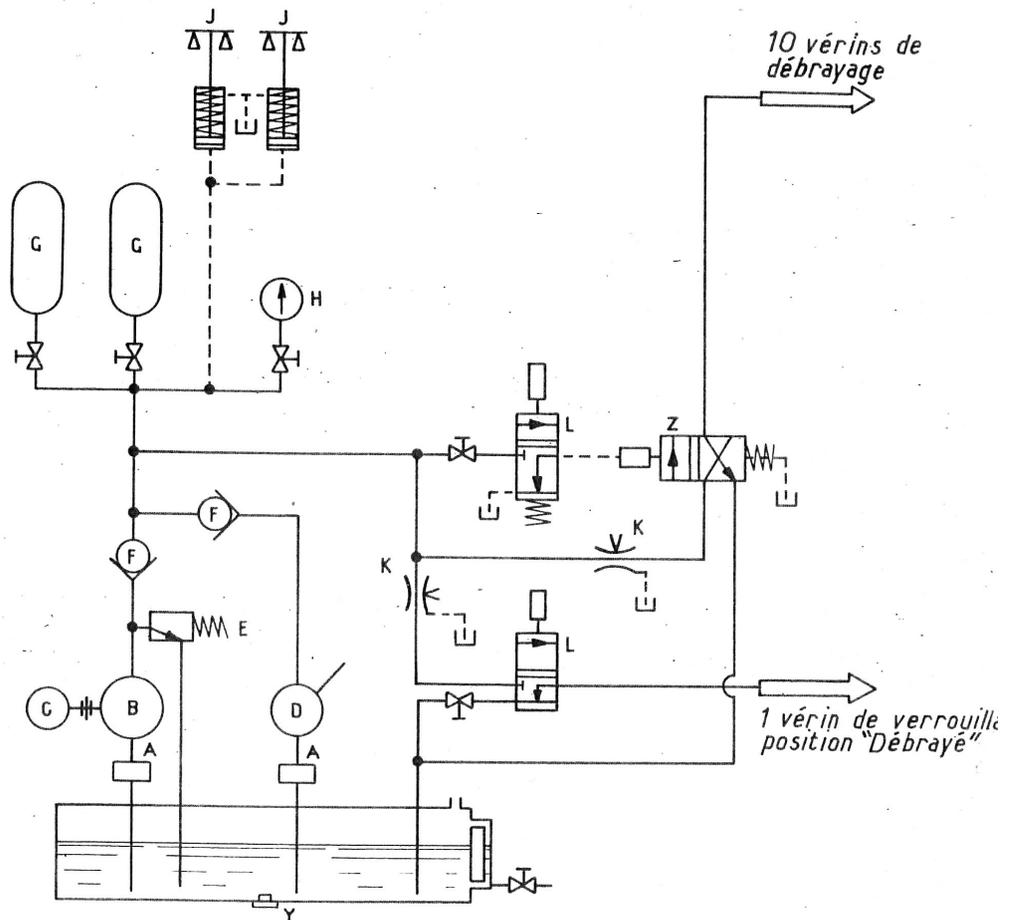
Fig. 8

COMMANDES HYDRAULIQUES

FREINAGE

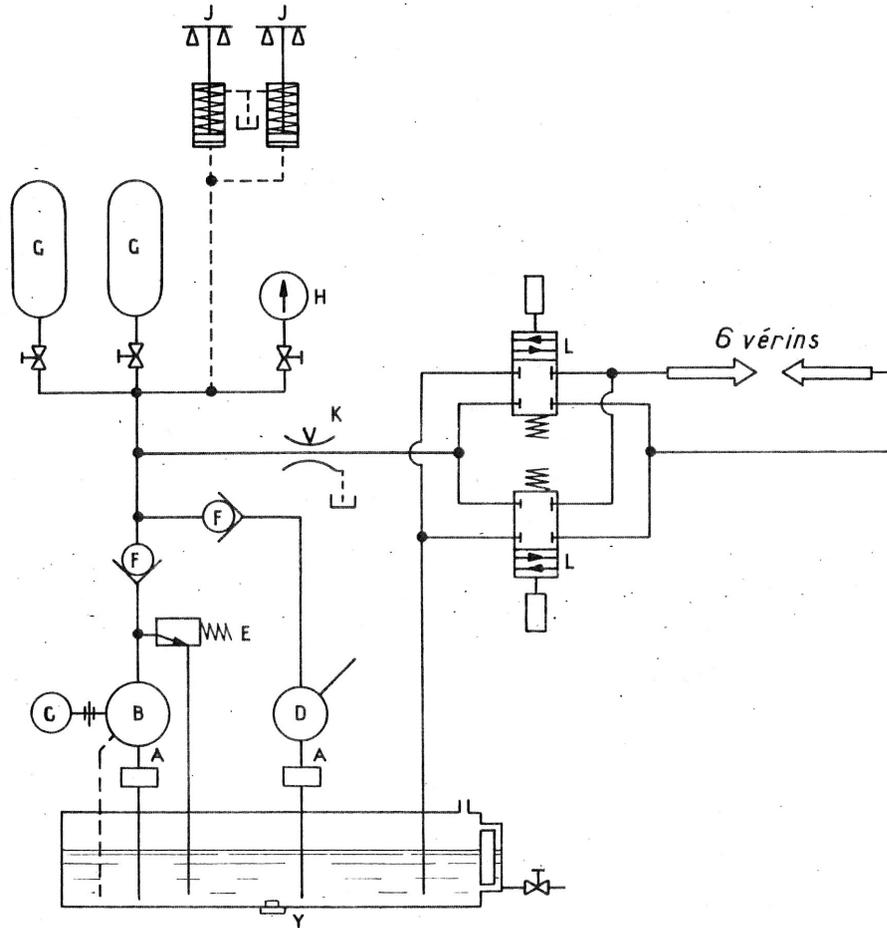


EMBRAYAGE



- | | |
|------------------------|------------------------|
| A : Filtre | G : Accumulateur |
| B : Pompe | H : Manomètre |
| C : Moteur électrique | J : Mano-contact |
| D : Pompe à main | K : Etrangleur |
| E : By-pass | L : Electro-valve |
| F : Clapet anti-retour | Y : Bouchon magnétique |
| | Z : Hydro-valve |

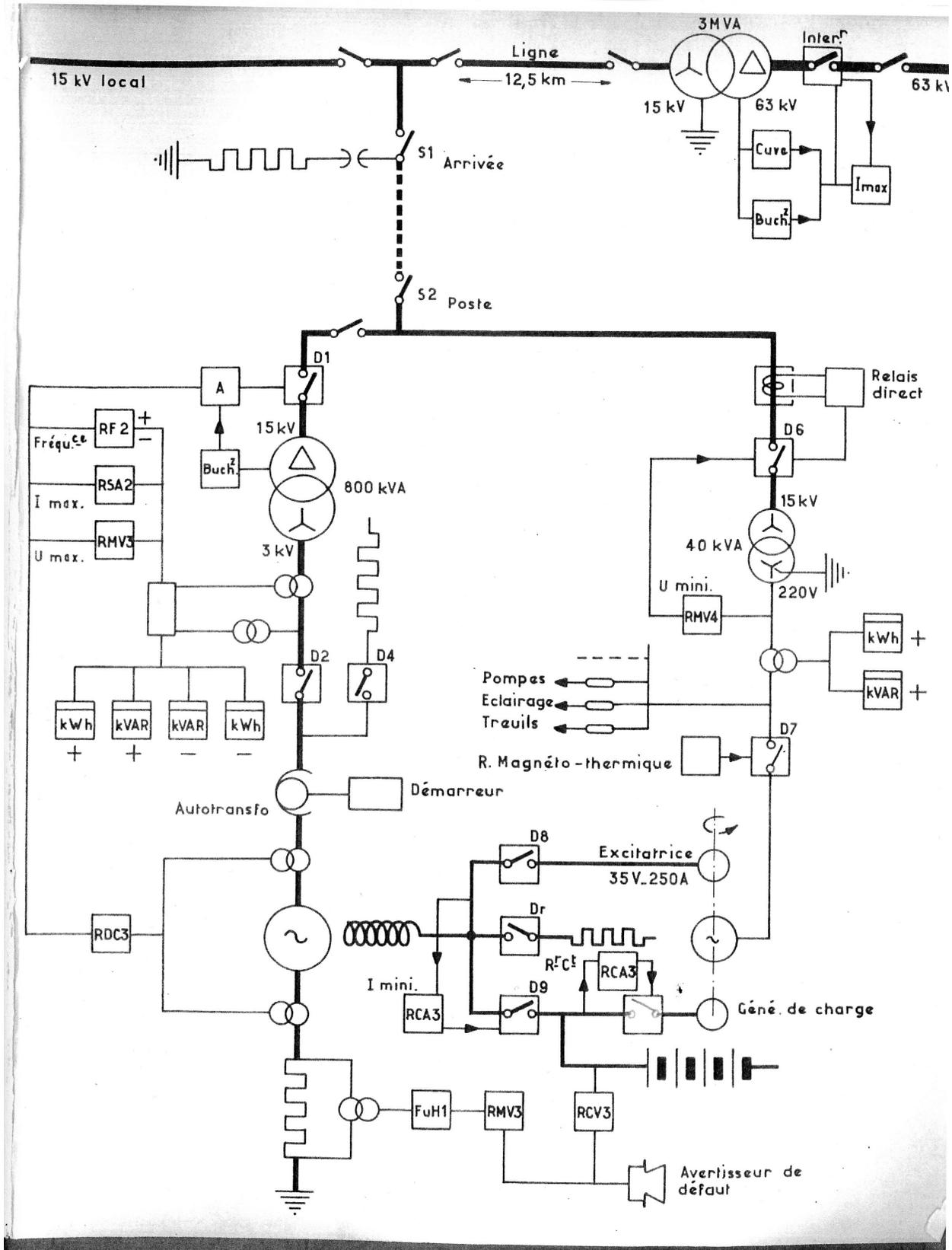
VERROUILLAGE HELICE

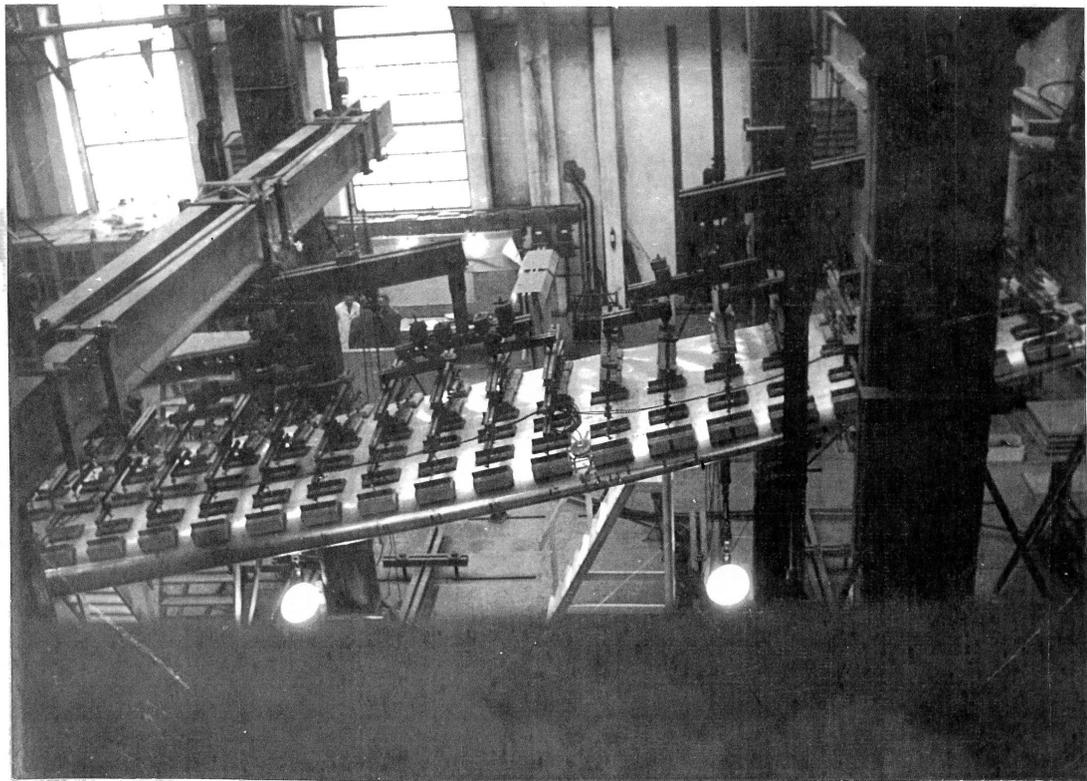
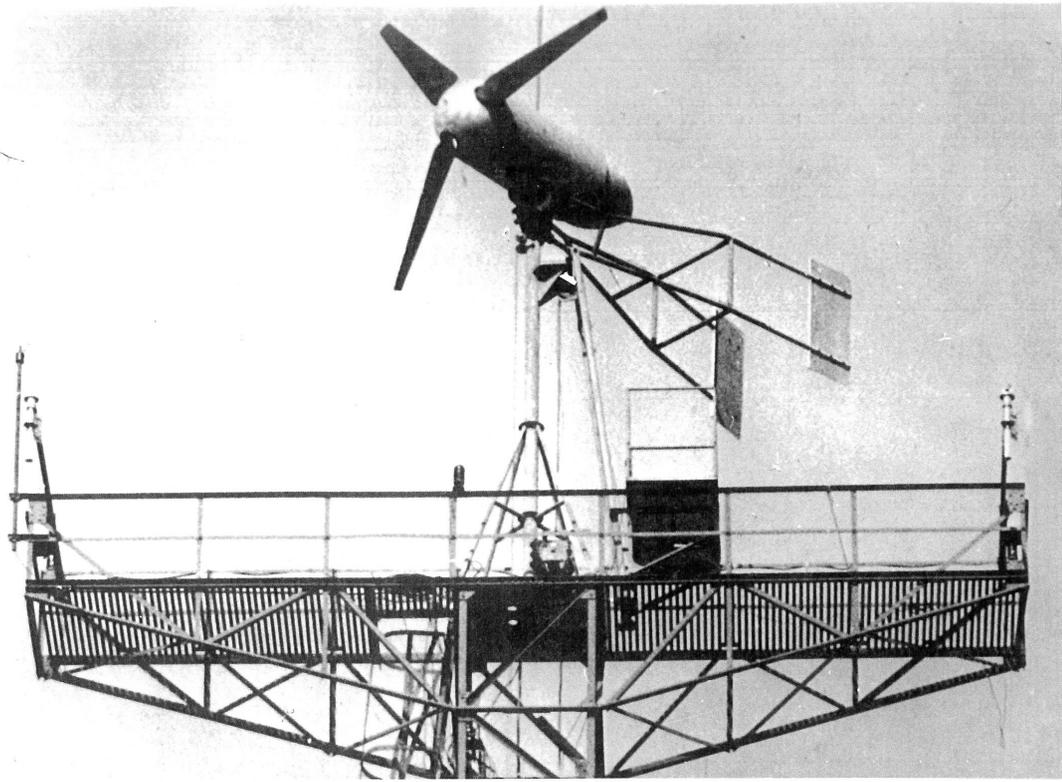


uillage en

Fig.9

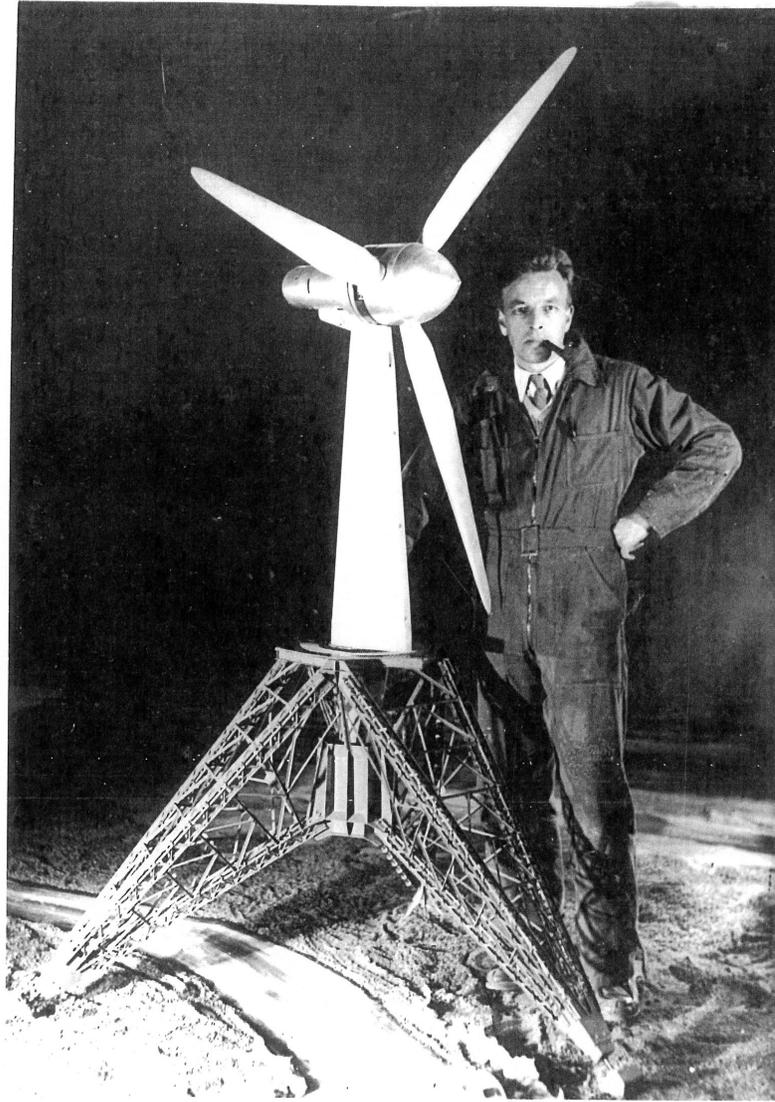
SCHEMA
DE
L'INSTALLATION ÉLECTRIQUE





1

2



3

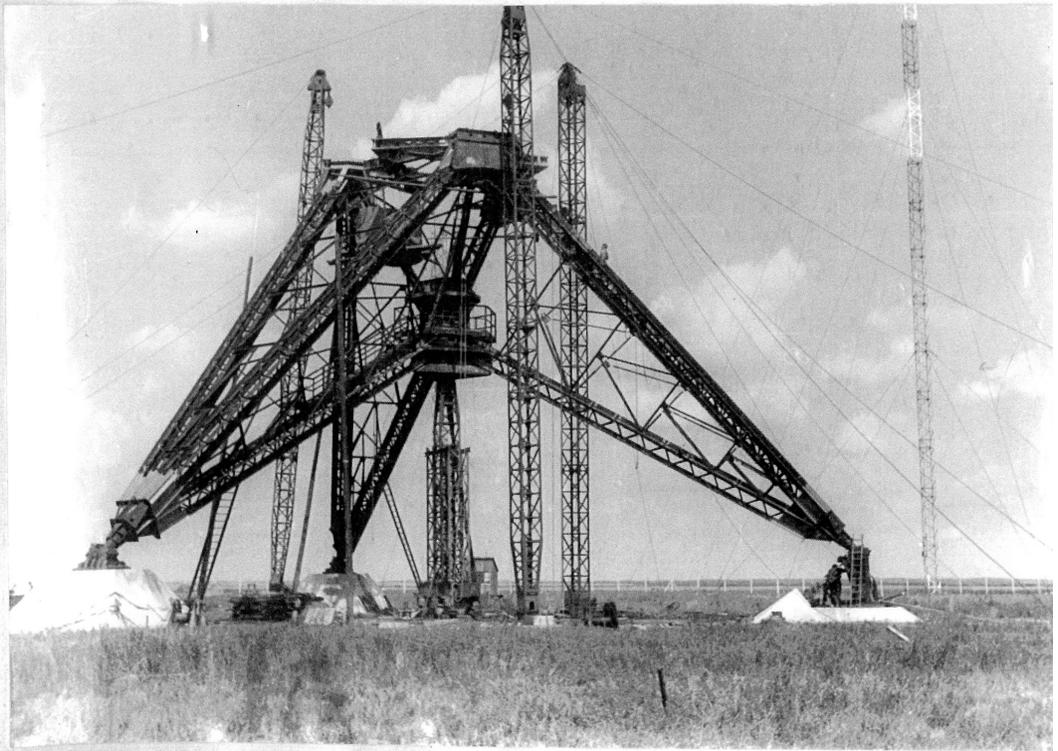
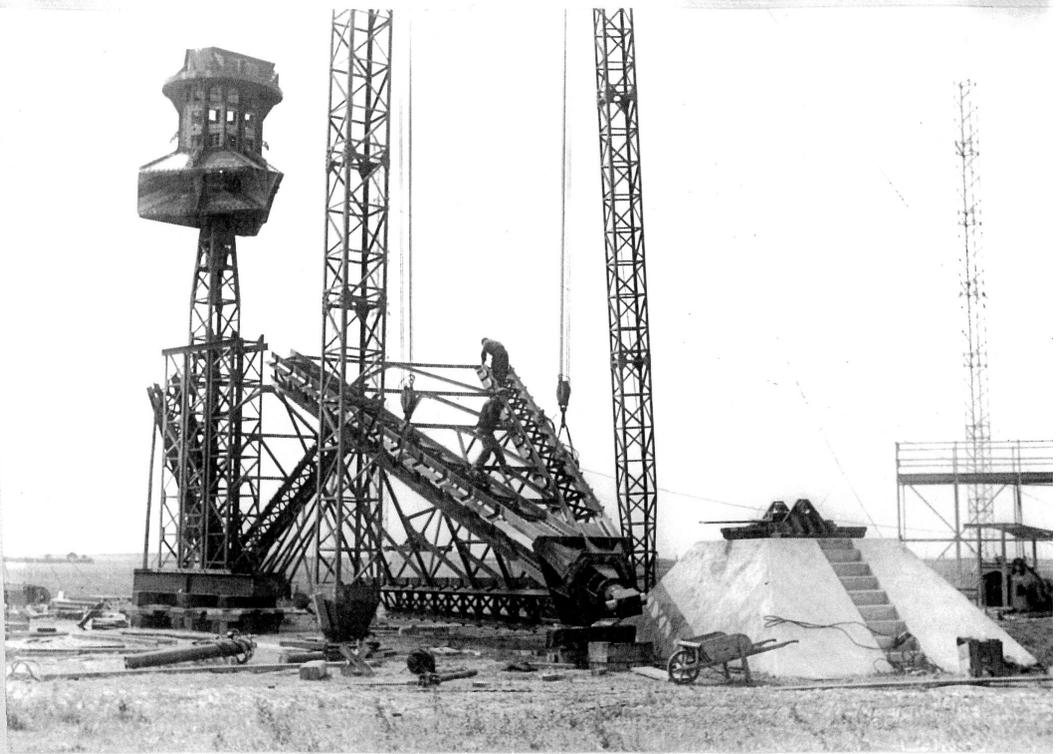
1/20

1 - 2 - Avant de construire l'aérogénérateur de 30,19 mètres (diamètre de l'hélice éolienne), de nombreuses études aérodynamiques ont été faites, notamment dans les Souffleries Eiffel, de Chalais Meudon, de St. Cyr l'École et de Poitiers ou dans le vent naturel.

Ci-contre et ci-dessus appareil d'essai au 1/8 et maquette au 1/20 de l'aérogénérateur.

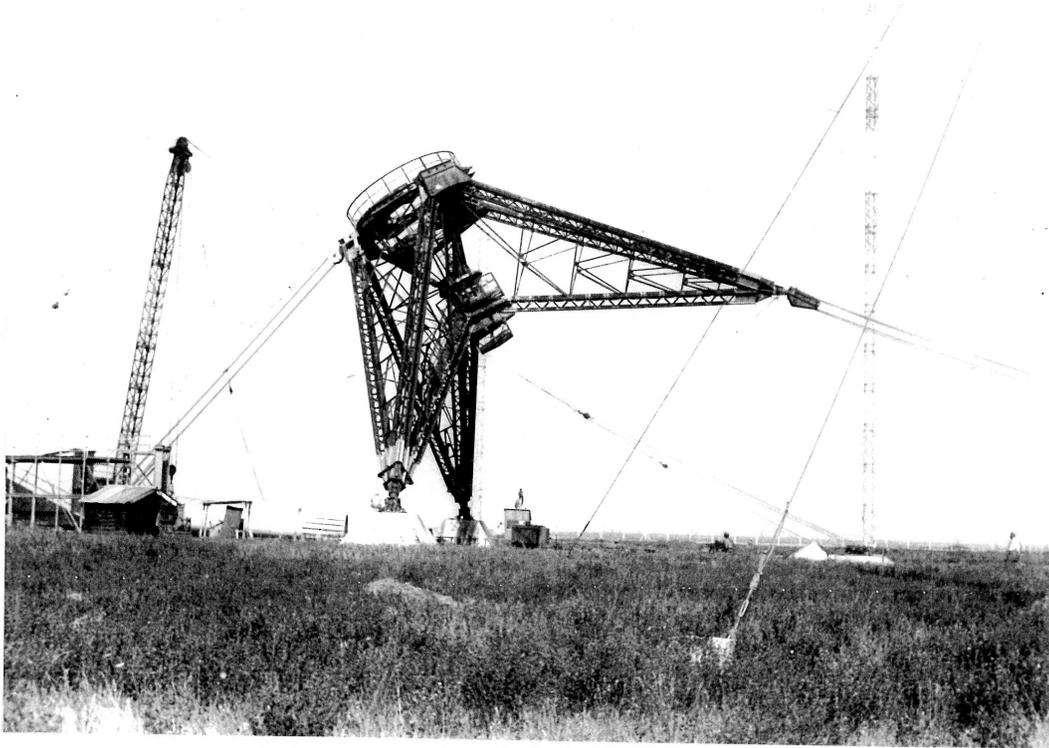
3 - Il en a été de même au point de vue de la résistance des matériaux (déformations sous charge, fatigue aux efforts alternés, mesure des périodes vibratoires, etc...) Divers éléments de l'hélice éolienne et de la transmission ont été essayés, notamment au Laboratoire des Travaux Publics et du Bâtiment, au Laboratoire des Ponts et Chaussées, ou chez les Constructeurs.

Ci-contre, essai destructif d'une pale grandeur normale à l'Établissement Aéronautique de Toulouse.



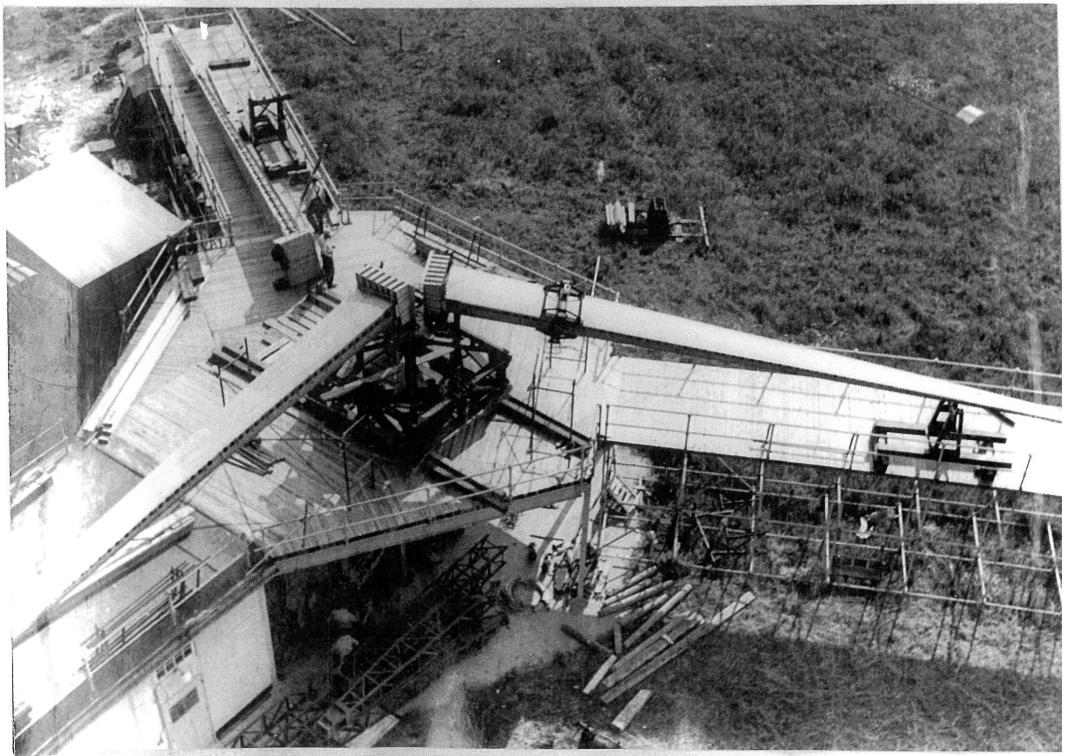
4

6

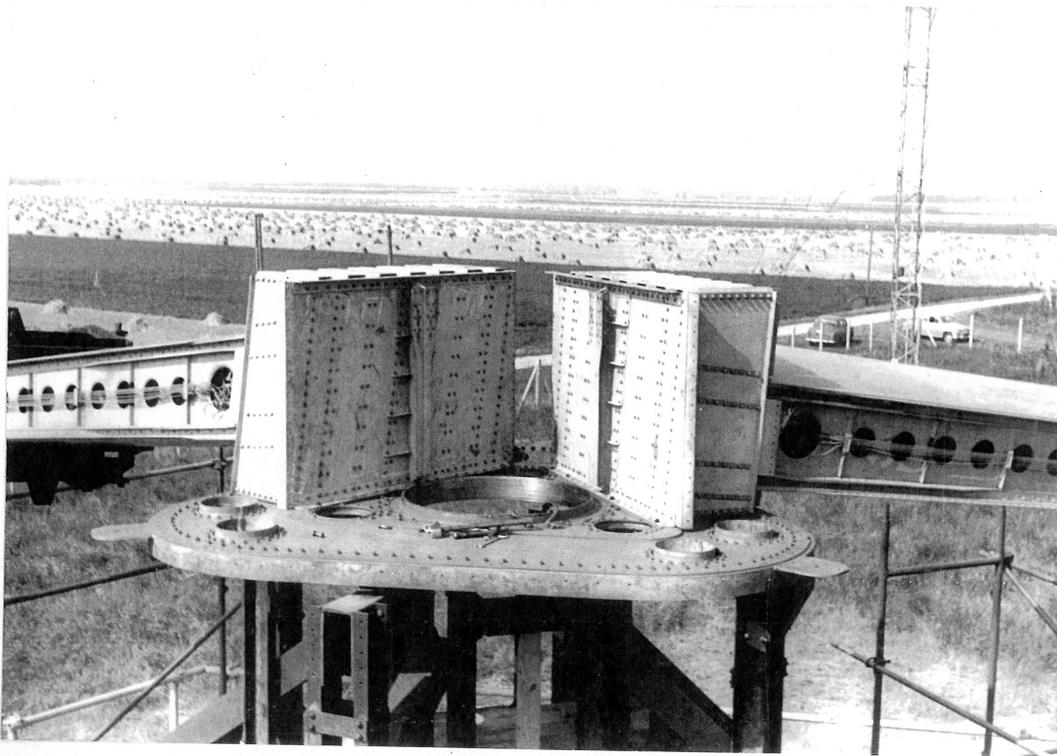


5

- 4 - On distingue sur le massif en béton, le support sur lequel tourillonnera le pied du pylône basculable, qui repose encore sur le scl. En l'air, on aperçoit le noeud qui contiendra la crapaudine sur laquelle s'appuiera la partie inférieure du pivot orientable.
- 5 - Le montage du pylône est en voie d'achèvement.
- 6 - Autour de deux de ses pieds, le pylône est en cours de basculement. Les câbles qui relient celui-ci au treuil Nord sont encore tendus. Après que l'ensemble mobile aura dépassé sa position d'équilibre momentanée, la liaison du pied mobile au treuil Sud entrera en action, afin de limiter la vitesse de descente.



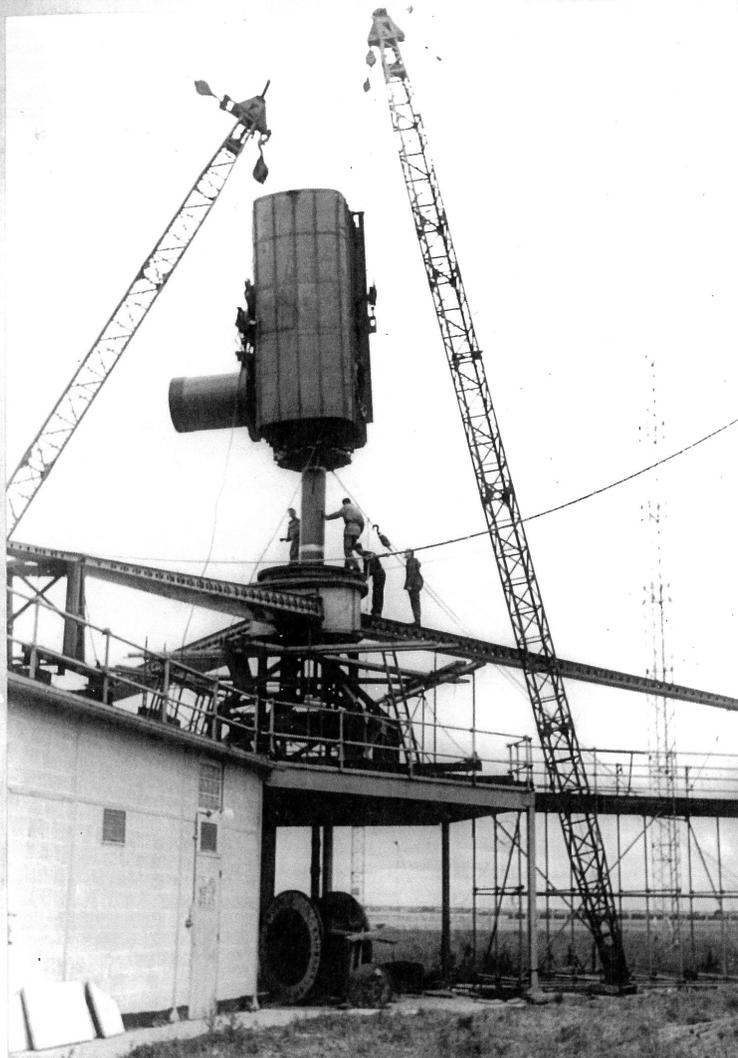
7



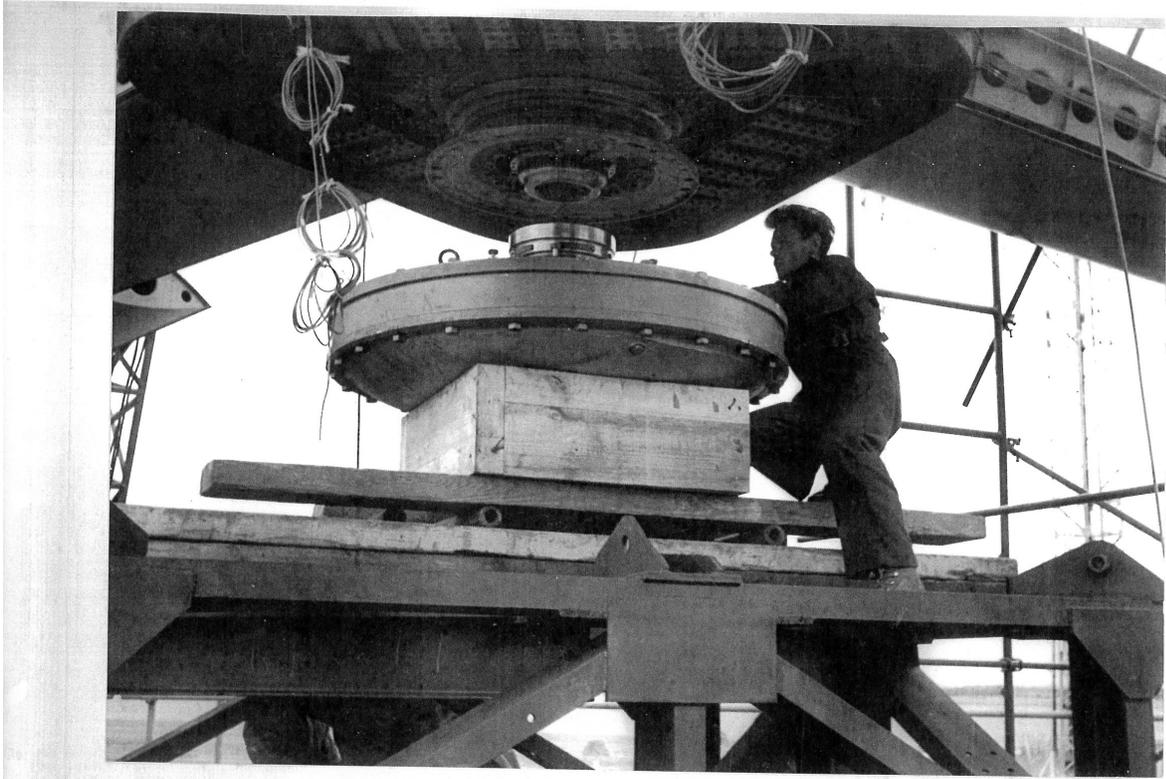
9

8

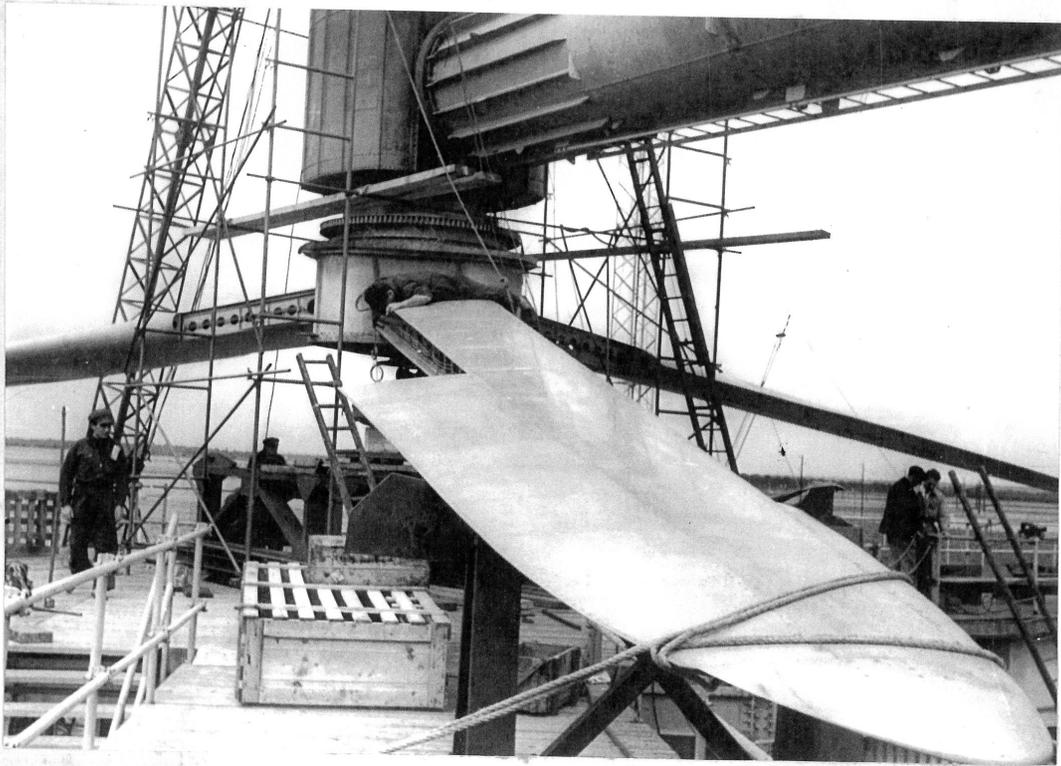
- 7 - Sur cette photographie, on voit à gauche la partie supérieure du pylône basculé qui repose sur un portique et dans lequel le pivot va prendre place. On aperçoit à droite les portes du poste électrique de transformation et, à travers les vitres, la Salle de commande et de mesures.
- 8 - 9 - Les caissons des pales, en alliage léger inoxydable, sont en cours d'assemblage sur leur moyeu en acier dont l'élément inférieur repose sur un bâti porté par la plateforme de montage. Des câbles électriques qui permettront la mesure des contraintes dans les pales, sont visibles.



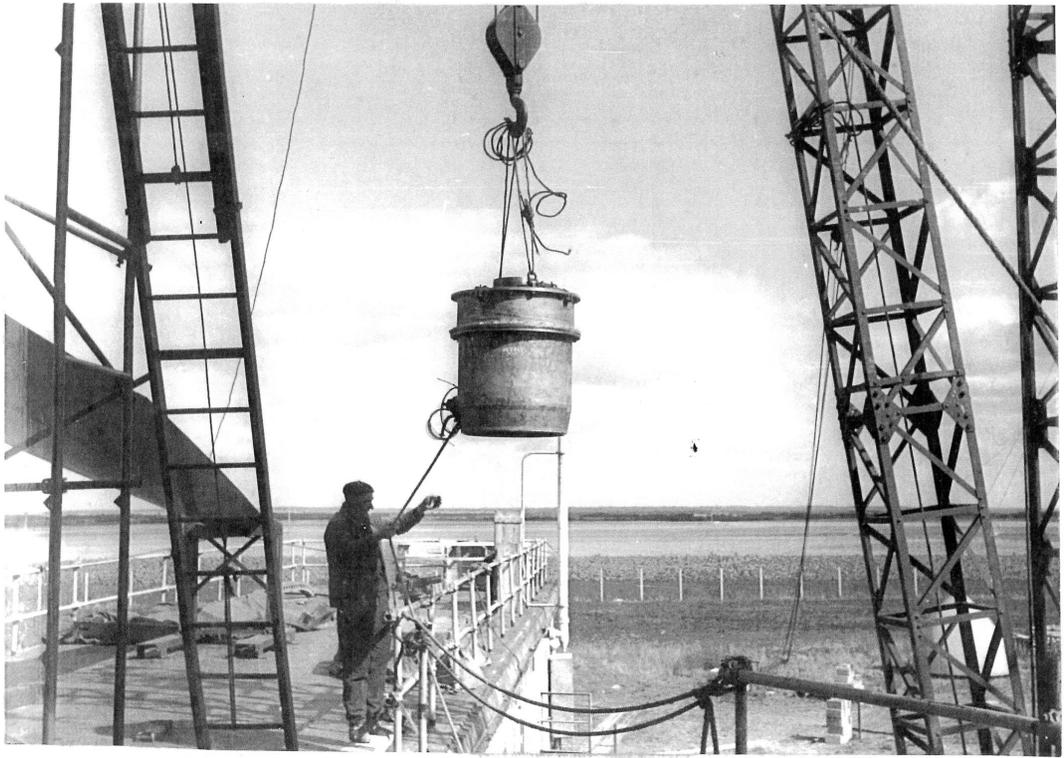
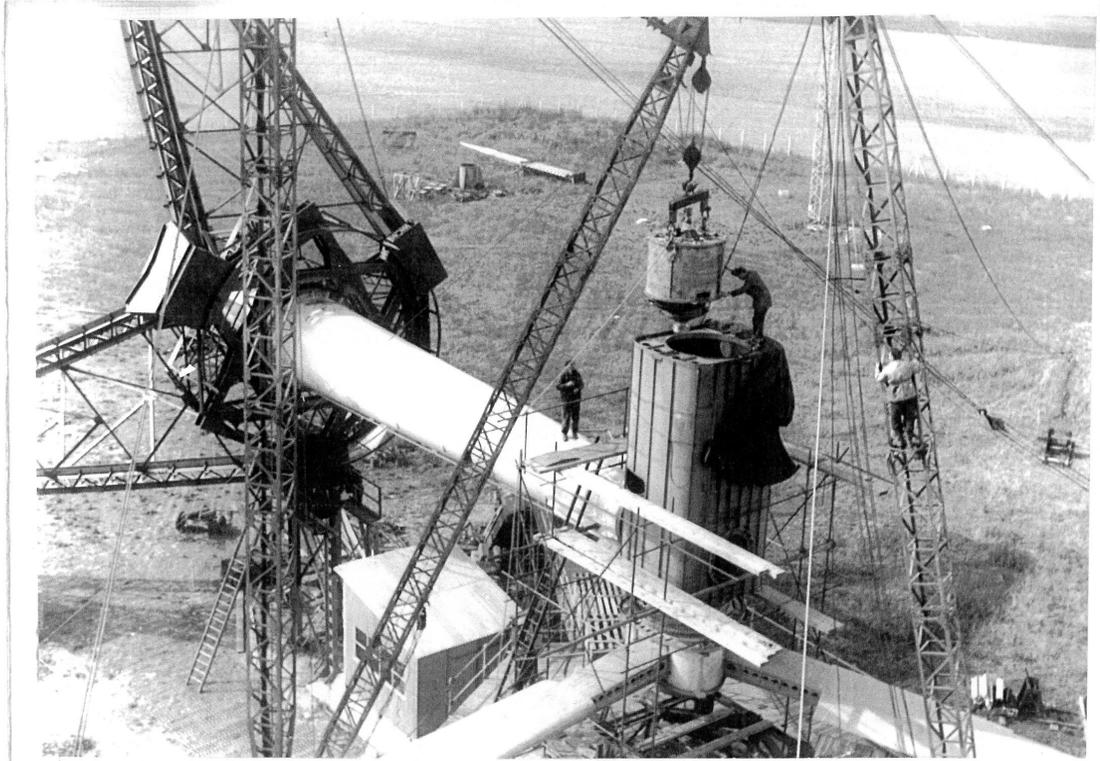
- 10 - Au-dessus du moyeu de l'hélice éolienne, on aperçoit du bas vers le haut, la roue à lanterne sur laquelle agira un pignon du vireur permettant de faire tourner l'hélice manuellement, puis la fusée, le frein et la nacelle.
- 11 - Le premier train d'engrenages est amené au-dessous du moyeu de l'hélice, préalablement soulevé.
- 12 - En même temps, on procède à la fixation des bords de fuite des pales et des bords d'attaque munis de "spoilers".



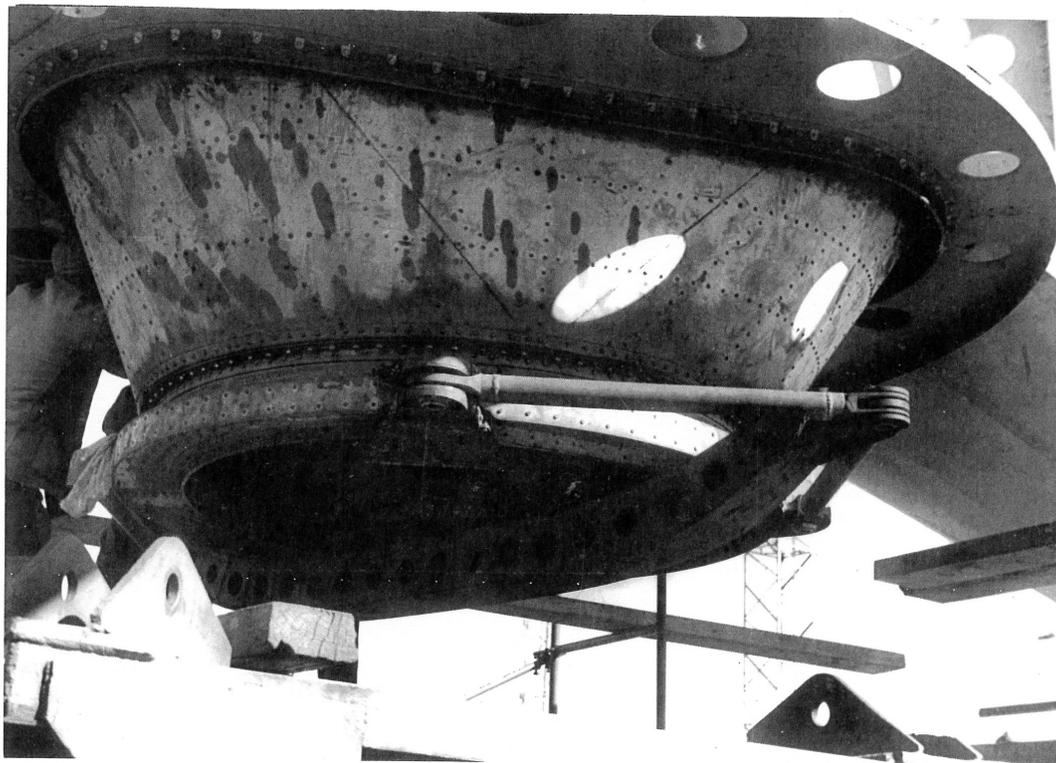
11



12



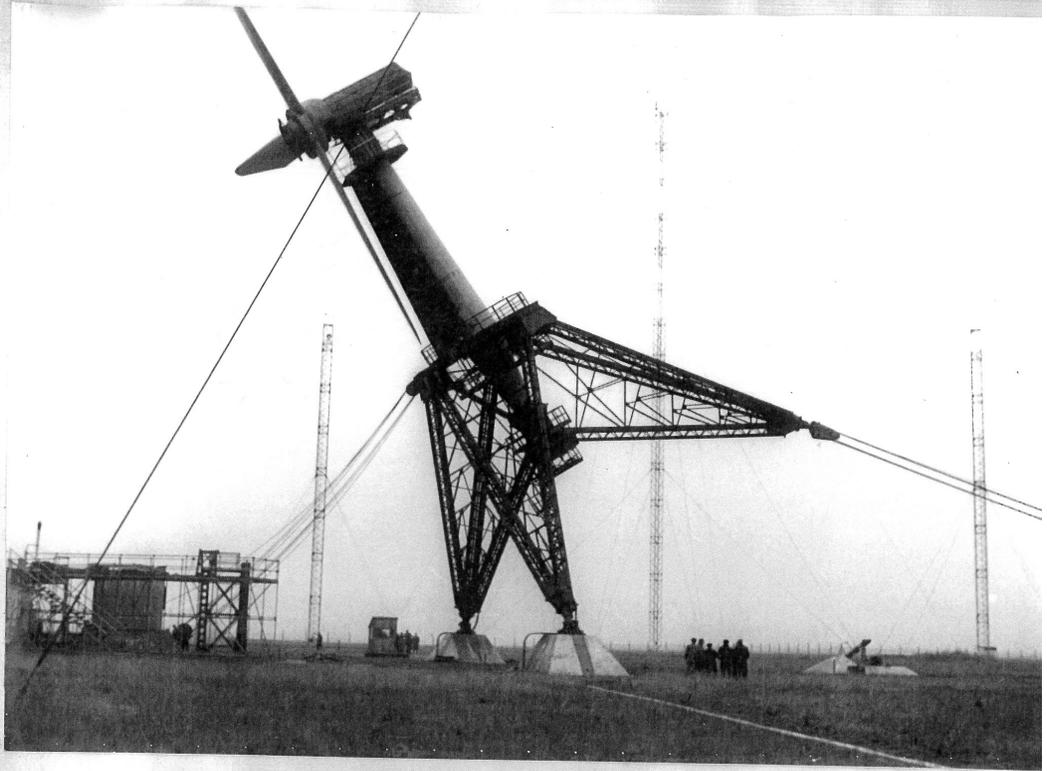
13



15

14

- 13 - Une fois la nacelle emmanchée dans le pivot, la génératrice de 640 kW est amenée jusqu'à son emplacement définitif. Au flasque inférieur de celle-ci, le second train d'engrenages est déjà fixé.
- 14 - L'embrayage est hissé à son tour.
- 15 - Un accouplement du modèle utilisé sur les locomotives électriques relie le moyeu de l'hélice au premier train d'engrenages. Il ne peut transmettre que des couples.



16



18

17

16 - L'aérogénérateur est en cours de levage. L'opération dure 55 minutes, au total.

17 - Le pied mobile va être fixé sur son massif en béton.

18 - L'aérogénérateur est érigé. En attendant la pose des derniers carénages, sa nacelle est encore entourée de bûches de protection contre les intempéries.