

621.453  
C7147e  
1984



colloque sur

# LES ÉOLIENNES

10 mai 1984

Dans le cadre du Congrès Annuel de l'ACFAS  
(Association canadienne-française pour l'avancement des sciences)  
à l'Université Laval



Bibliothèque Nationale du Québec

INTRODUCTION

**LES EOLIENNES**

Actes du colloque

tenu dans le cadre

du 52e congrès de

l'Association canadienne-française

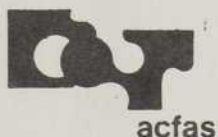
pour l'avancement des sciences

(ACFAS)

les 9, 10 et 11 mai 1984

à l'Université Laval

Québec



ISBN 2-89245-031-4

D8700363

TJ  
825  
C64  
1984

## INTRODUCTION

Le but de ce colloque était de regrouper les divers intervenants québécois dans le domaine des éoliennes et de permettre à chacun de faire part de leurs projets, leurs réalisations et leurs problèmes. Ce colloque s'adressait aux manufacturiers et aux utilisateurs d'éoliennes, aux chercheurs dans les institutions de recherche et universités et finalement aux responsables gouvernementaux des programmes sur les énergies nouvelles.

Une journée entière a été consacrée à cet effet. Quinze communications par différents spécialistes et intervenants dans le domaine ont été présentées. Le colloque fut clos par un forum où l'on a pu discuter des divers problèmes rencontrés dans le développement et l'utilisation des éoliennes et dans l'implantation d'une industrie québécoise dans le domaine.

52iEME CONGRES DE L'ACFASCOMITE ORGANISATEUR DU COLLOQUE SUR LES EOLIENNES

- Président de la section : M. Dinh Nguyen  
Génie mécanique/industriel/  
manufacturier intégrant  
le colloque sur les éoliennes Directeur dép.  
génie mécanique  
Université Laval
  
- Président du colloque : M. Albert Watts  
IREQ
  
- Co-président du colloque : M. John Dickinson  
Génie mécanique  
Université Laval
  
- Membres du comité : M. Léandre Bernier, DPEN  
MER Québec  
M. Hervé Caron, Energie  
Nove - CRIQ  
M. Vinh Nguyen,  
génie mécanique  
Université Laval

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
INTRODUCTION.....	i
COMITE ORGANISATEUR.....	ii
LA RECHERCHE SUR L'ENERGIE EOLIENNE A HYDRO-QUEBEC A. Watts (IREQ).....	1
RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DE L'AEROGENERATEUR DROIT A L'UNIVERSITE LAVAL J. Dicksinson (Université Laval).....	31
TRAVAUX RECENTS SUR L'AERODYNAMIQUE DES EOLIENNES A L'UNIVERSITE DE SHERBROOKE P. Vittecoq et A. Laneville (Université de Sherbrooke).....	51
THE IDEAL EFFICIENCY OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES B.G. Newman (Université McGill).....	71
SIMULATION D'UN TRAIN DE PUISSANCE D'AEROGENERATEUR DARRIEUS POUR L'ETUDE DES FLUCTUATIONS DE PUISSANCE G.E. April et G. Olivier (Ecole Polytechnique).....	72
SYSTEMES ELECTRIQUES ASSOCIES AUX EOLIENNES P. Viarouge, Y. Jean et M. Bédard (Université Laval).....	94
WIND TUNNEL SIMULATION OF GROUPS OF WIND TURBINES AND OF THE AUGMENTATION OF THE WIND SPEED OVER HILLS G. Fekete (Université McGill).....	95
DEVELOPPEMENT DE PETITES EOLIENNES UTILISANT DES PRIN- CIPES DE LA TECHNOLOGIE APPROPRIEE. T.A. Lawand (Institut de Recherches Brace).....	102

PROJET EOLE, PROJET D'UN AEROGENERATEUR DE 4 MW J. Dery (Hydro-Québec).....	103
L'UTILISATION DE GRANDS AEROGENERATEURS INTEGRES A UN RESEAU ELECTRIQUE G. Beausoleil (Experts-Conseils Shawinigan Inc.).....	118
UTILISATION DE LA SIMULATION POUR EVALUER L'APPORT DES EOLIENNES DANS UN RESEAU DIESEL G. Desrochers (IREQ).....	131
L'EOLIENNE DES ILES DE LA MADELEINE, ETAT ACTUEL R. Reid (IREQ).....	146
LES AEROGENERATEURS D'EXTRAWATT M. Cloutier (Extrawatt).....	—
RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DES EOLIENNES AU CANADA M. Carpentier (Energie, Mines et Ressources, Canada).....	172
UNE EOLIENNE EN MILIEU URBAIN: LE DEFI D'UN BRICO- LEUR B. Belisle (Ordinateurs P.M.E. Inc.).....	180
TABLE RONDE .....	181
THEME: RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT DES EOLIENNES. OU EN EST L'IMPLANTATION D'UNE INDUSTRIE QUEBECOISE? MODERATEUR: L. Bernier (Energie et Ressources Québec).	

## La recherche sur l'énergie éolienne à Hydro-Québec

Albert Watts

Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)

### SOMMAIRE

Hydro-Québec, par son institut de recherche IREQ, est déjà impliqué dans le domaine de l'énergie éolienne depuis une dizaine d'année et plus activement depuis 1975 avec la mise sur pied d'un programme de recherche. Diverses études analytiques et expérimentales ont été exécutées relativement à la conception et à l'utilisation des éoliennes et une expertise considérable a été développée sur les divers aspects technologiques des aérogénérateurs. Toutefois, en raison de l'attrait du concept de l'éolienne à axe vertical de type Darrieus et de ses possibilités d'application à bon marché sur une grande échelle, les activités du programme se sont orientées principalement vers le développement et l'utilisation des grands aérogénérateurs de ce type.

La communication présente brièvement le programme et les études faites à Hydro-Québec sur les aérogénérateurs ainsi que quelques résultats obtenus. Seulement une copie des acétates est ci-incluse.

## Recherche sur l'énergie éolienne à Hydro-Québec

### Programme

MIS SUR PIED EN 1975

### Intérêt

- POTENTIEL CONSIDÉRABLE AU QUÉBEC (> 55 000 MW)
- SOURCE RENOUVELABLE D'ÉNERGIE
- CONVERTIBLE EN PLUSIEURS FORMES D'ÉNERGIE
- SE PRÊTANT À DIVERSES APPLICATIONS

### Objectifs

- PROMOUVOIR LE DÉVELOPPEMENT ET L'INTÉGRATION RENTABLE DES ÉOLIENNES COMME SOURCE DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À HYDRO-QUÉBEC
- AIDER L'INDUSTRIE QUÉBÉCOISE DANS LA FABRICATION DES ÉOLIENNES.

## Activités de recherche

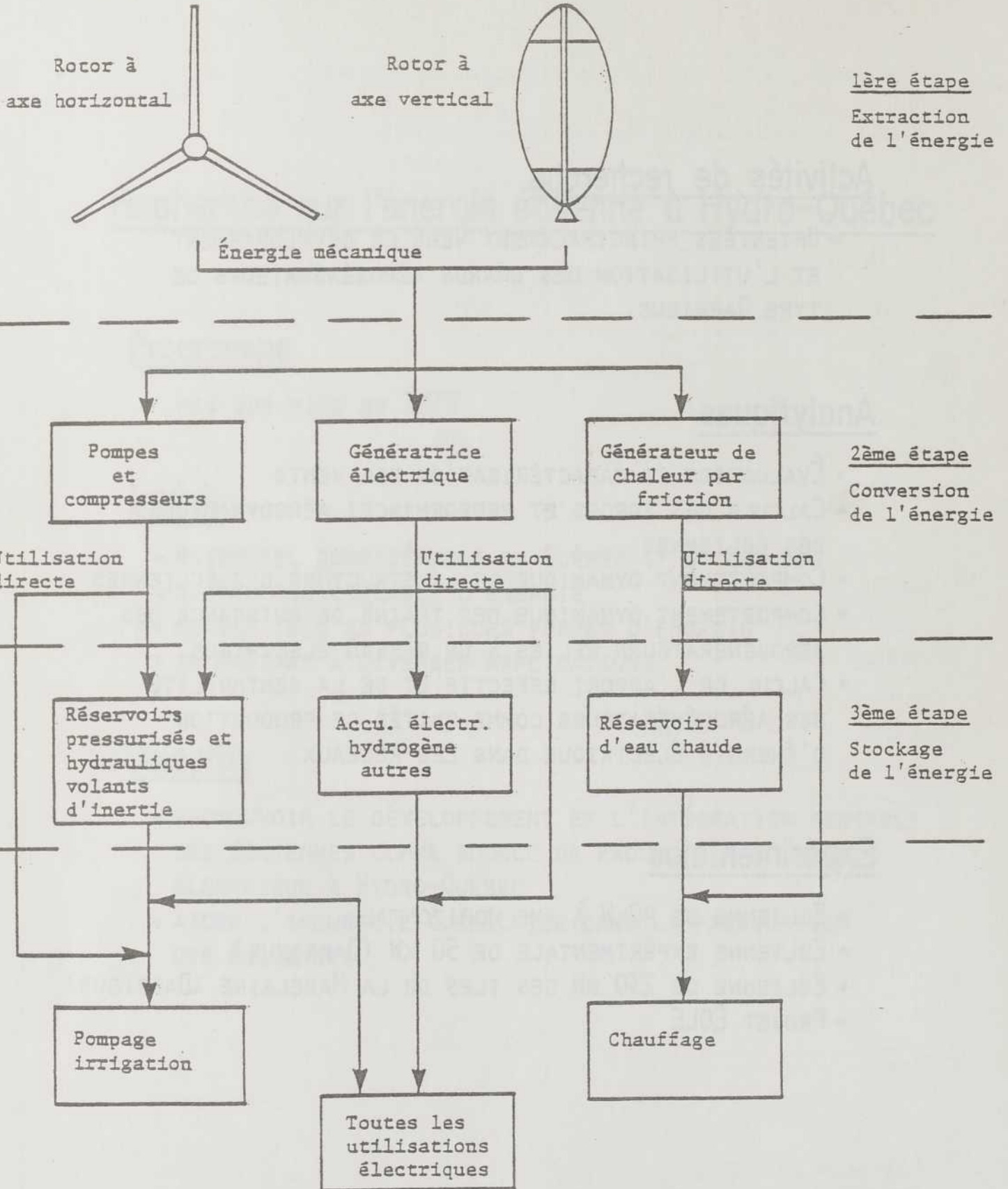
- ORIENTÉES PRINCIPALEMENT VERS LE DÉVELOPPEMENT ET L'UTILISATION DES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS DE TYPE DARRIEUS.

## Analytiques

- ÉVALUATION ET CARACTÉRISATION DES VENTS
- CALCULS DES FORCES ET PERFORMANCES AÉRODYNAMIQUES DES ÉOLIENNES
- COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA STRUCTURE DES ÉOLIENNES
- COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES TRAINS DE PUISSANCE DES AÉROGÉNÉRATEURS RELIÉS À UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE
- CALCUL DE L'APPORT EFFECTIF ET DE LA RENTABILITÉ DES AÉROGÉNÉRATEURS COMME UNITÉS DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS LES RÉSEAUX

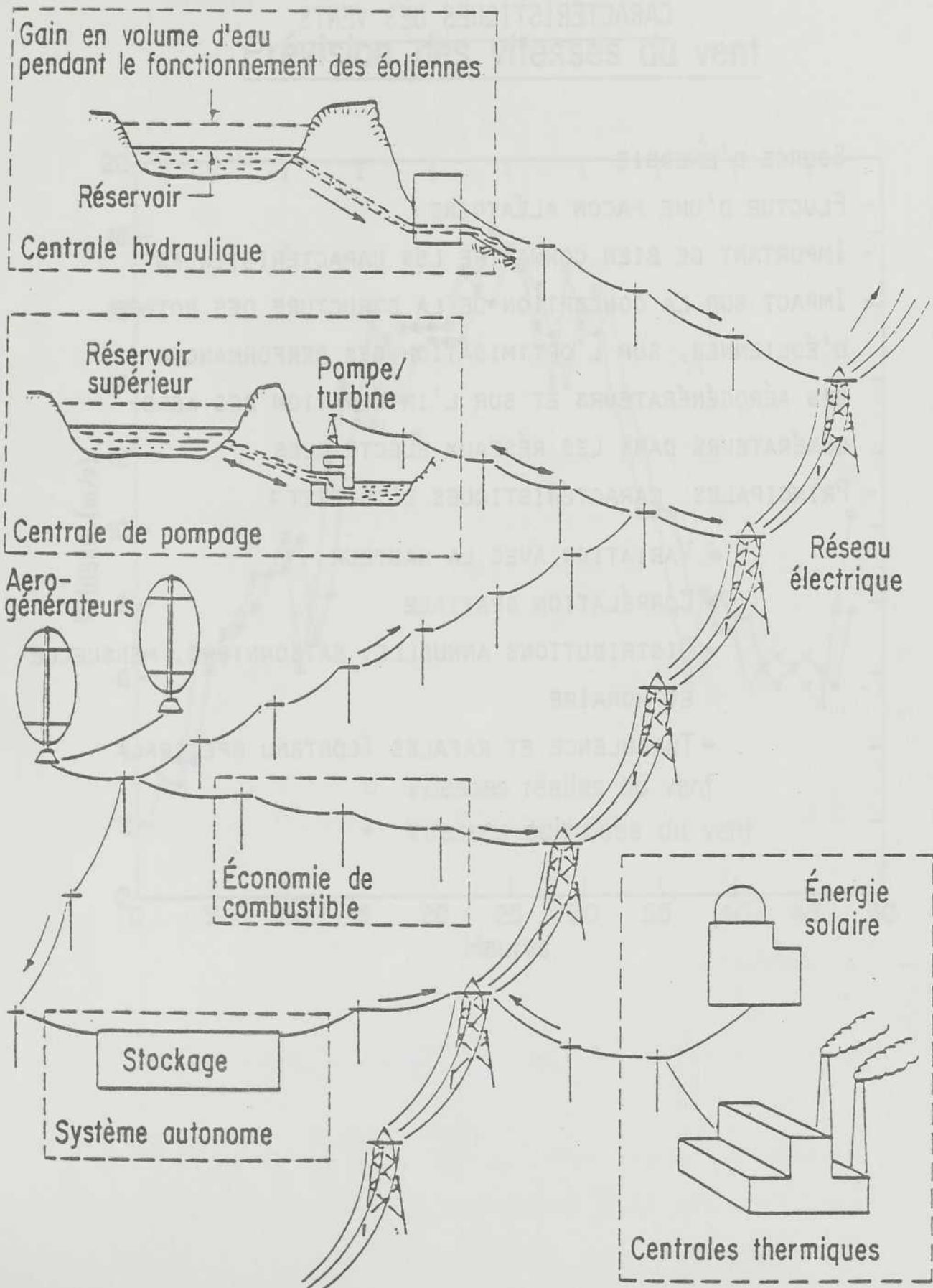
## Expérimentales

- ÉOLIENNE DE 40kW À AXE HORIZONTAL
- ÉOLIENNE EXPÉRIMENTALE DE 50 kW (DARRIEUS)
- ÉOLIENNE DE 230 kW DES ILES DE LA MADELEINE (DARRIEUS)
- PROJET ÉOLE



UTILISATION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

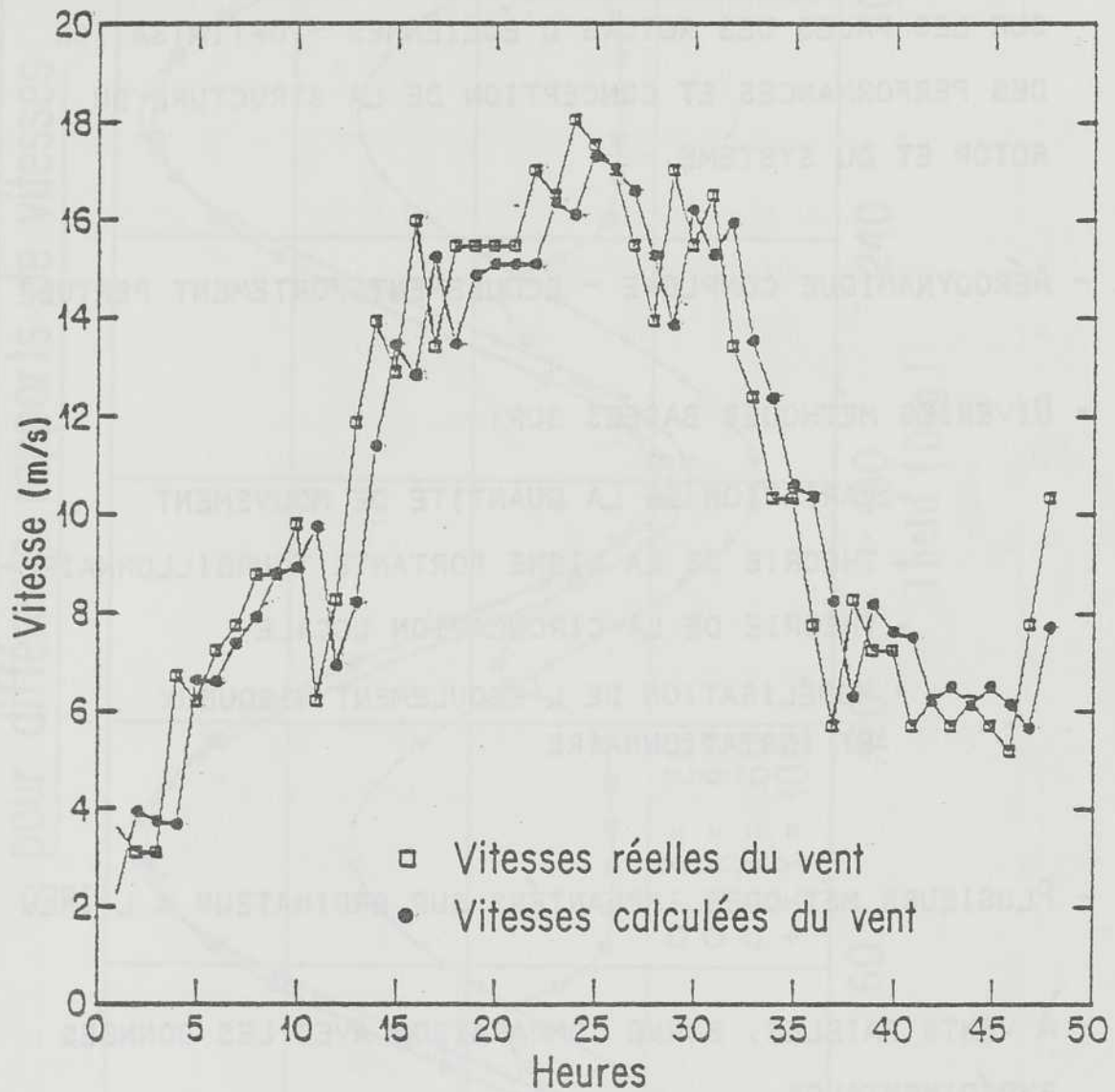
# Utilisation des aérogénérateurs pour la production d'électricité



## CARACTÉRISTIQUES DES VENTS

- SOURCE D'ÉNERGIE
- FLUCTUE D'UNE FAÇON ALÉATOIRE
- IMPORTANT DE BIEN CONNAÎTRE LES CARACTÉRISTIQUES
- IMPACT SUR LA CONCEPTION DE LA STRUCTURE DES ROTORS D'ÉOLIENNES, SUR L'OPTIMISATION DES PERFORMANCES DES AÉROGÉNÉRATEURS ET SUR L'INTÉGRATION DES AÉROGÉNÉRATEURS DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES
- PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES D'INTÉRÊT :
  - VARIATION AVEC LA HAUTEUR
  - CORRÉLATION SPATIALE
  - DISTRIBUTIONS ANNUELLE, SAISONNIÈRE, MENSUELLE ET HORAIRE
  - TURBULENCE ET RAFALES (CONTENU SPECTRAL)

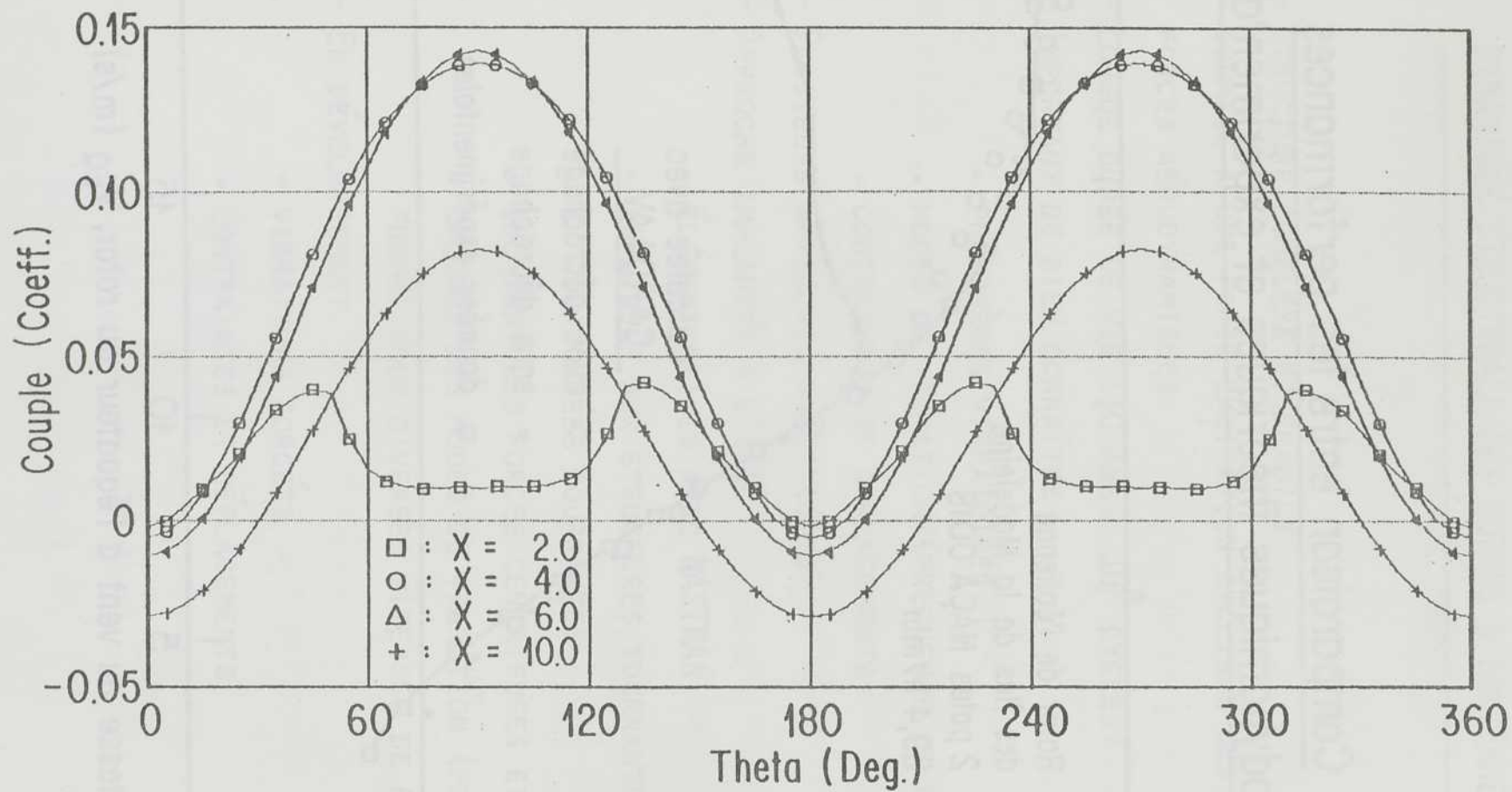
## Prévision des vitesses du vent



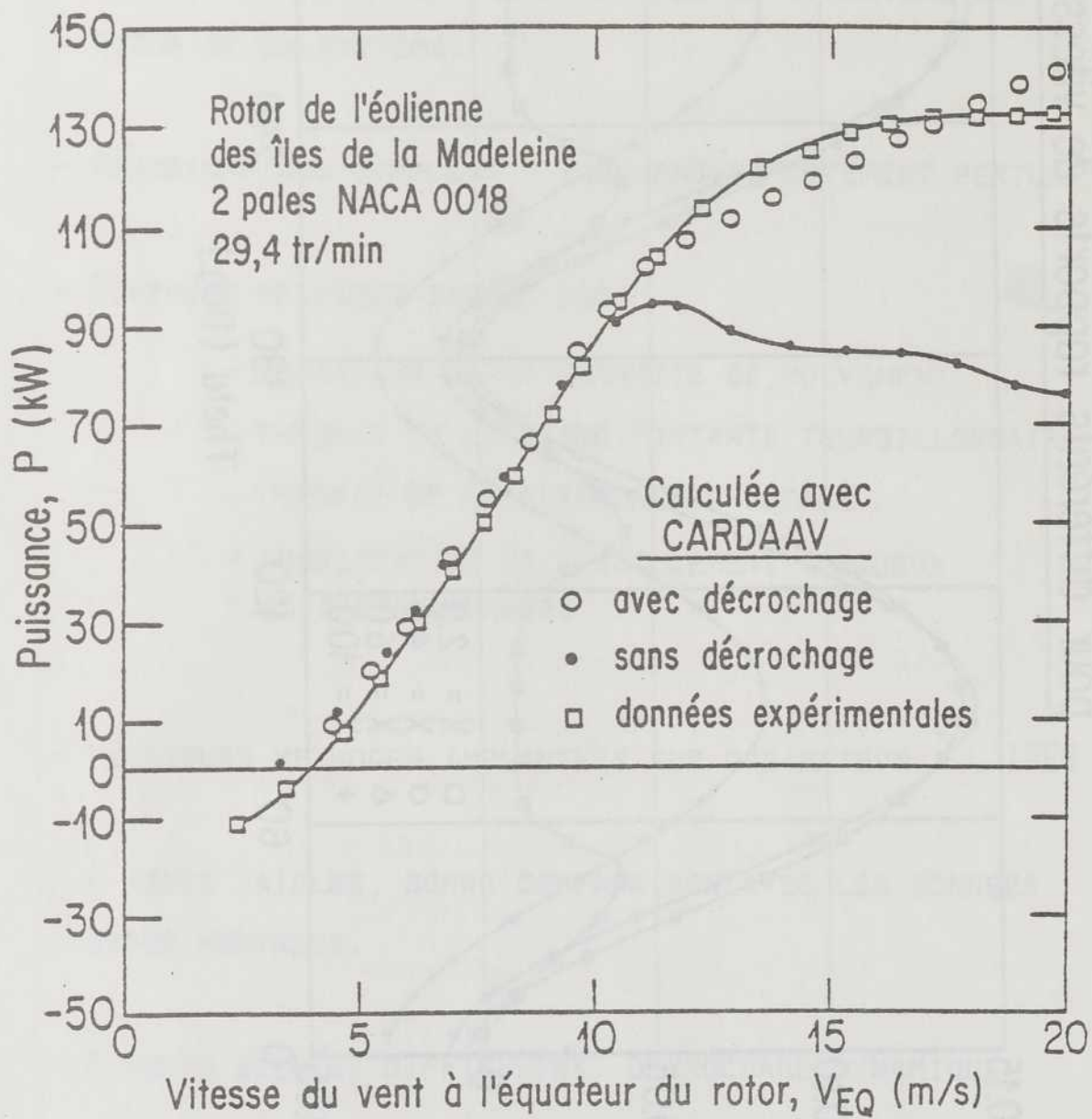
## FORCES ET PERFORMANCES AÉRODYNAMIQUES

- IMPORTANT DE BIEN PRÉDIRE LES FORCES AÉRODYNAMIQUES SUR LES PALES DES ROTORS D'ÉOLIENNES - OPTIMISATION DES PERFORMANCES ET CONCEPTION DE LA STRUCTURE DU ROTOR ET DU SYSTÈME.
- AÉRODYNAMIQUE COMPLEXE - ÉCOULEMENT FORTEMENT PERTUBÉ
- DIVERSES MÉTHODES BASÉES SUR:
  - VARIATION DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT
  - THÉORIE DE LA LIGNE PORTANTE TOURBILLONNAIRE
  - THÉORIE DE LA CIRCULATION LOCALE
  - MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT VISQUEUX ET INSTATIONNAIRE
- PLUSIEURS MÉTHODES IMPLANTÉES SUR ORDINATEUR À L'IREQ
- À VENTS FAIBLES, BONNE COMPARAISON AVEC LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES.
- À VENTS ÉLEVÉS, DIFFICULTÉS, DÉCROCHAGE DYNAMIQUE
- MANQUE DE DONNÉES SUR LES PROFILS - EFFET DU  $Re$  ET DE LA TURBULENCE DE L'ÉCOULEMENT.

Couple aérodynamique comparé à l'angle azimutal  
pour différents rapports de vitesses



## Comparaison entre les performances aérodynamiques théoriques et expérimentales



## DYNAMIQUE STRUCTURALE DES ROTORS D'ÉOLIENNE

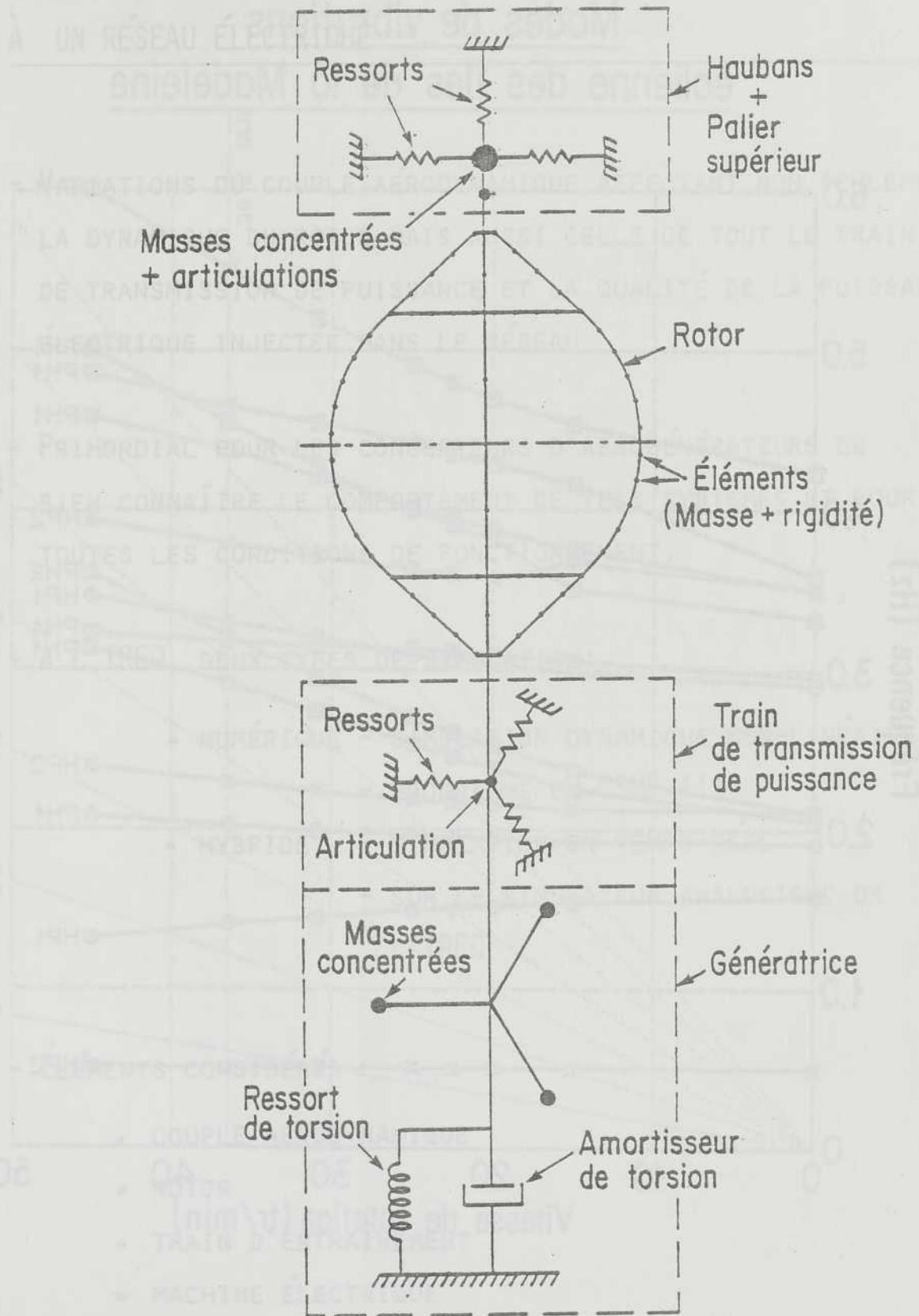
---

- STRUCTURE COMPLEXE ET FRAGILE
- SOUMISE À UNE FORTE EXCITATION CYCLIQUE DES FORCES AÉRODYNAMIQUES
- LONGUE DURÉE DE VIE (30 ANS,  $10^8$  CYCLES)
- IMPORTANT DE BIEN CONNAÎTRE :
  - PHÉNOMÈNES VIBRATOIRES
  - MODES DE VIBRATION (FRÉQUENCE ET FORME)
  - CONTRAINTES ET DÉPLACEMENTS
- PLUSIEURS APPROCHES ANALYTIQUES
- APPROCHE IMPLANTÉE À L'IREQ
  - ÉLÉMENTS FINIS AVEC NASTRAN
  - APPLIQUÉE AUX STRUCTURES TOURNANTES
  - EN COORDONNÉES TOURNANTES
  - INCLUANT LES FORCES CENTRIFUGES ET DE CORIOLIS
  - CALCULÉ LES MODES DE VIBRATION (FRÉQUENCE ET FORME) POUR DIVERSES VITESSES DE ROTATION
- EN DÉVELOPPEMENT
  - VIBRATIONS FORCÉES
  - CONTRAINTES ET DÉPLACEMENTS

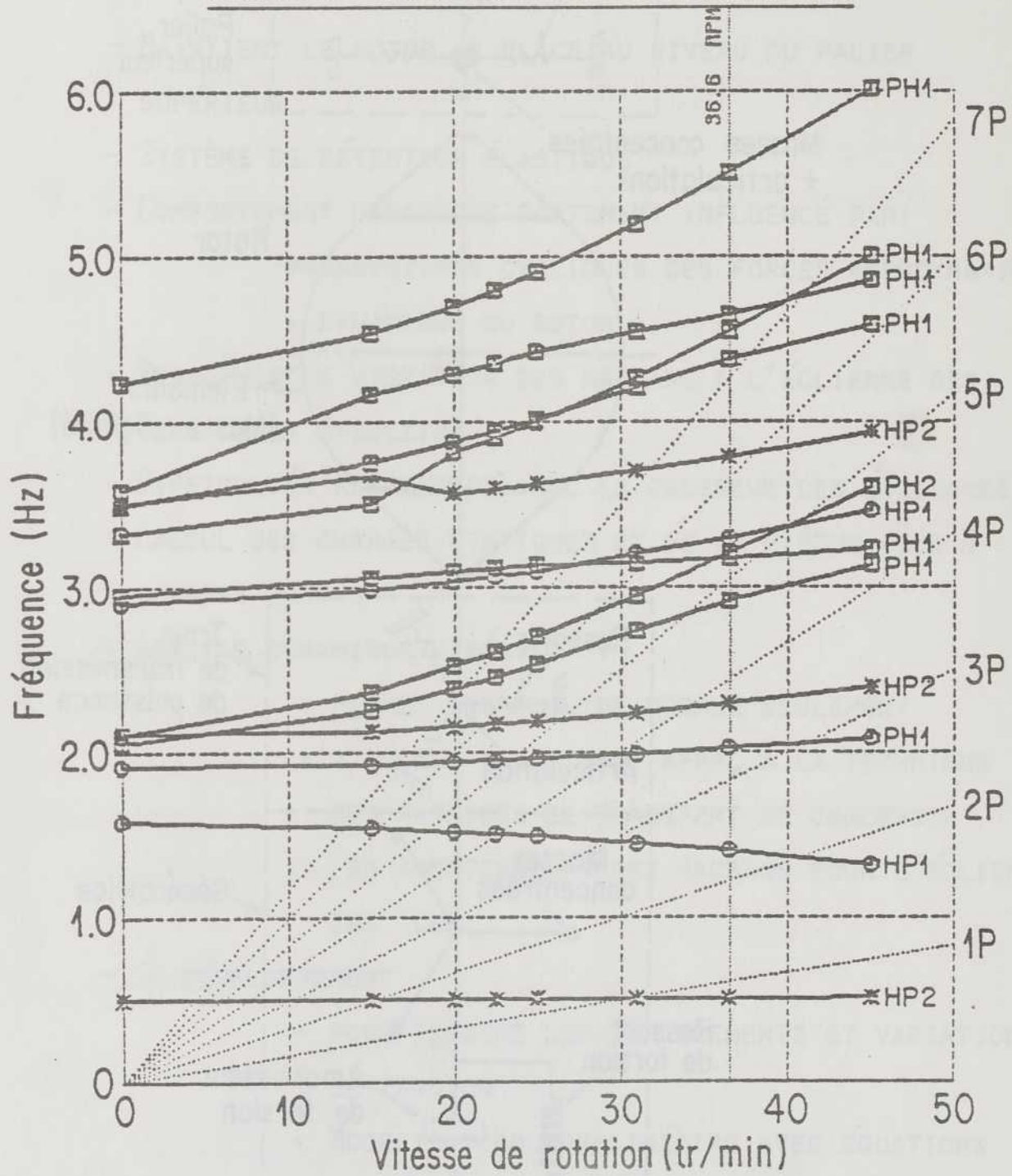
## STATIQUE ET DYNAMIQUE DES HAUBANS

- MAINTIENT LE ROTOR EN PLACE AU NIVEAU DU PALIER SUPÉRIEUR
- SYSTÈME DE RÉTENTION ÉLASTIQUE
- COMPORTEMENT DYNAMIQUE FORTEMENT INFLUENCÉ PAR:
  - VARIATIONS CYCLIQUES DES FORCES AÉRODYNAMIQUES
  - DYNAMIQUE DU ROTOR
- PROBLÈMES DE VIBRATION DES HAUBANS À L'ÉOLIENNE DES ÎLES DE LA MADELEINE
- DIFFICULTÉS AUGMENTENT AVEC LA GROSSEUR DES ÉOLIENNES
- CALCUL DES CHARGES STATIQUES ET DE LA FLÈCHE POUR N HAUBANS
- ANALYSE DYNAMIQUE LINÉAIRE
  - PERMET UNE ANALYSE MODALE SEULEMENT
  - A PERMIS EN FAISANT APPEL À LA TECHNIQUE DES MATRICES DE TRANSFERT DE CONCEVOIR LES AMORTISSEURS DES HAUBANS POUR L'ÉOLIENNE DES ÎLES
- EN DÉVELOPPEMENT
  - POUR PRÉDIRE LES DÉPLACEMENTS ET VARIATIONS DE TENSION
  - MODÉLISATION NON-LINÉAIRE AVEC ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES PARTIELLES.

## Modélisation d'un rotor d'éolienne



## Modes de vibrations éolienne des îles de la Madeleine

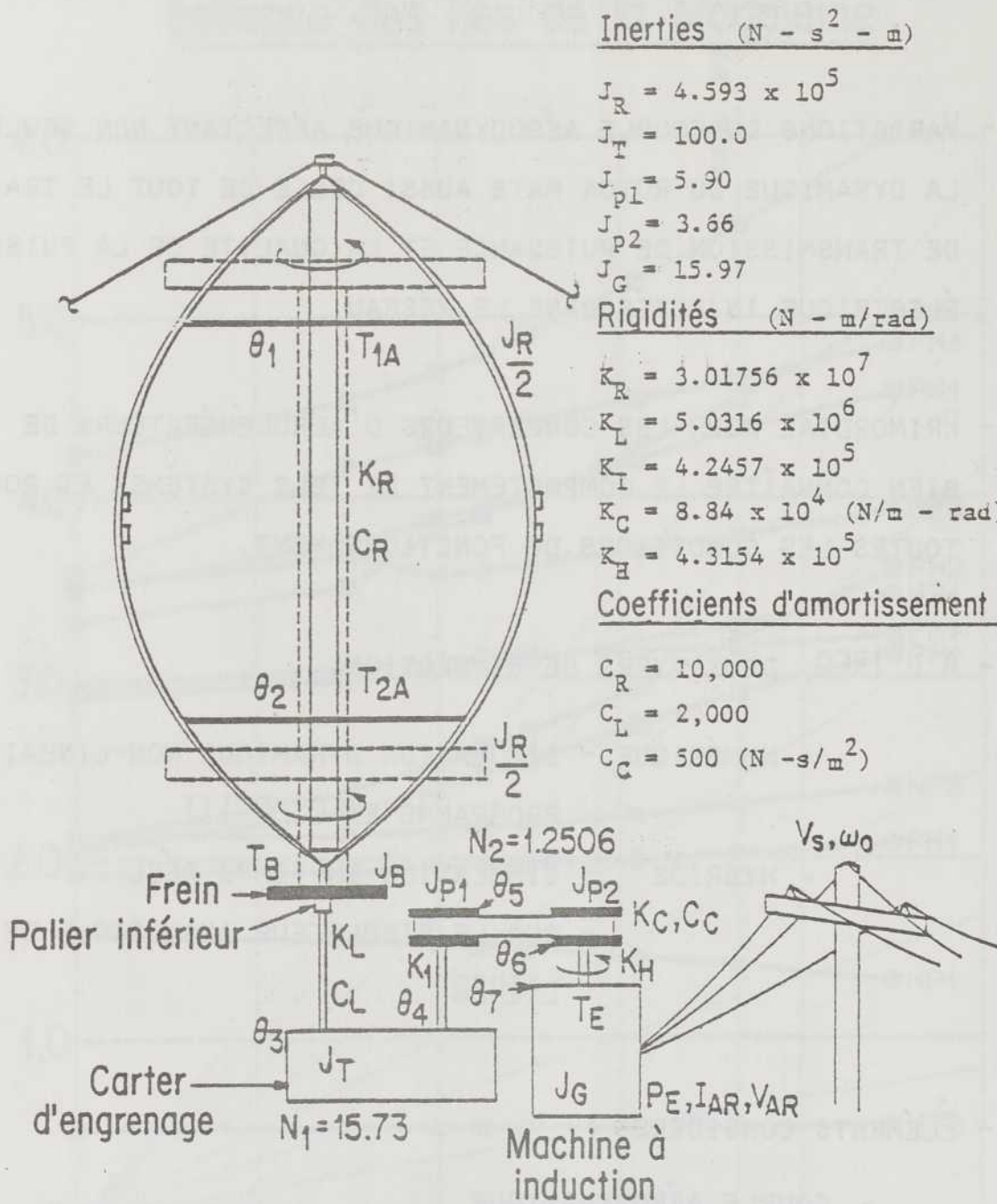


## DYNAMIQUE DU TRAIN DE PUISSANCE DES AÉROGÉNÉRATEURS RELIÉS À UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE

---

- VARIATIONS DU COUPLE AÉRODYNAMIQUE AFFECTANT NON SEULEMENT LA DYNAMIQUE DU ROTOR MAIS AUSSI CELLE DE TOUT LE TRAIN DE TRANSMISSION DE PUISSANCE ET LA QUALITÉ DE LA PUISSANCE ÉLECTRIQUE INJECTÉE DANS LE RÉSEAU
- PRIMORDIAL POUR LES CONCEPTEURS D'AÉROGÉNÉRATEURS DE BIEN CONNAÎTRE LE COMPORTEMENT DE TELS SYSTÈMES ET POUR TOUTES LES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT.
- À L'IREQ, DEUX TYPES DE SIMULATION:
  - NUMÉRIQUE - SIMULATION DYNAMIQUE NON-LINÉAIRE
    - PROGRAMME EN CSMP III
  - HYBRIDE - SIMULATION EN TEMPS RÉEL
    - SUR LE SIMULATEUR ANALOGIQUE DE L'IREQ
- ÉLÉMENTS CONSIDÉRÉS :
  - COUPLE AÉRODYNAMIQUE
  - ROTOR
  - TRAIN D'ENTRAÎNEMENT
  - MACHINE ÉLECTRIQUE
  - RÉSEAU
- ÉOLIENNE DES ILES DE LA MADELEINE A ÉTÉ MODELÉE

# Simulation de l'aérogénérateur des îles de la Madeleine



Inerties (N - s<sup>2</sup> - m)

- $J_R = 4.593 \times 10^5$
- $J_T = 100.0$
- $J_{p1} = 5.90$
- $J_{p2} = 3.66$
- $J_G = 15.97$

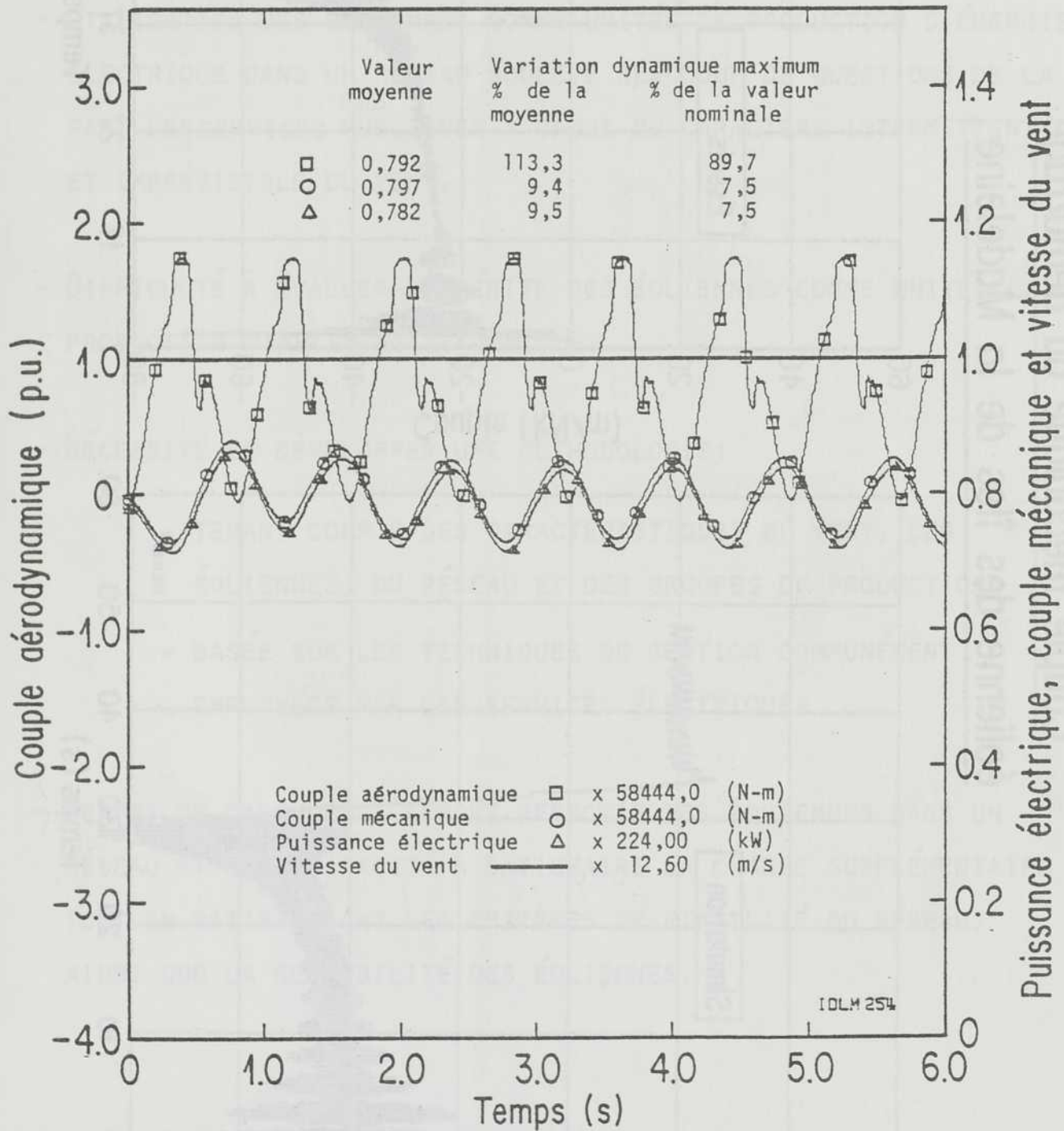
Rigidités (N - m/rad)

- $K_R = 3.01756 \times 10^7$
- $K_L = 5.0316 \times 10^6$
- $K_I = 4.2457 \times 10^5$
- $K_C = 8.84 \times 10^4$  (N/m - rad)
- $K_H = 4.3154 \times 10^5$

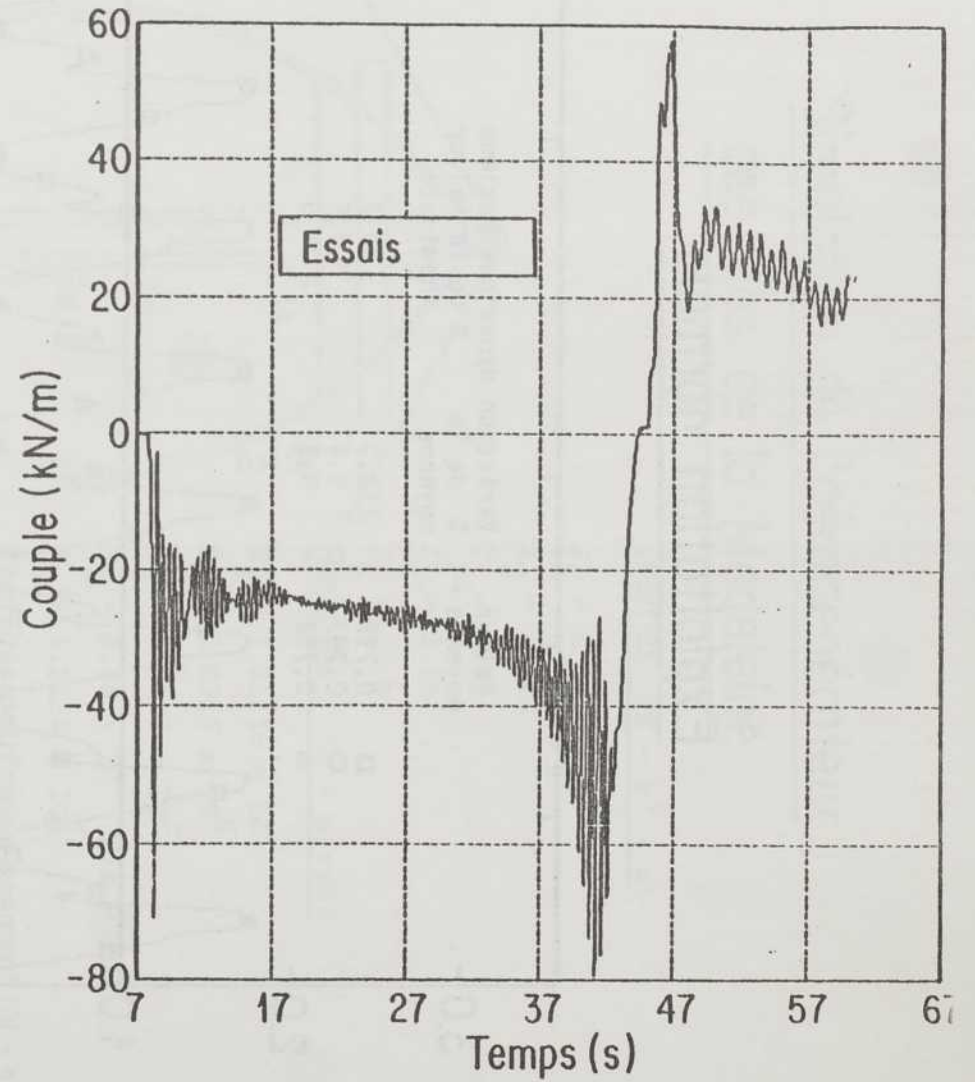
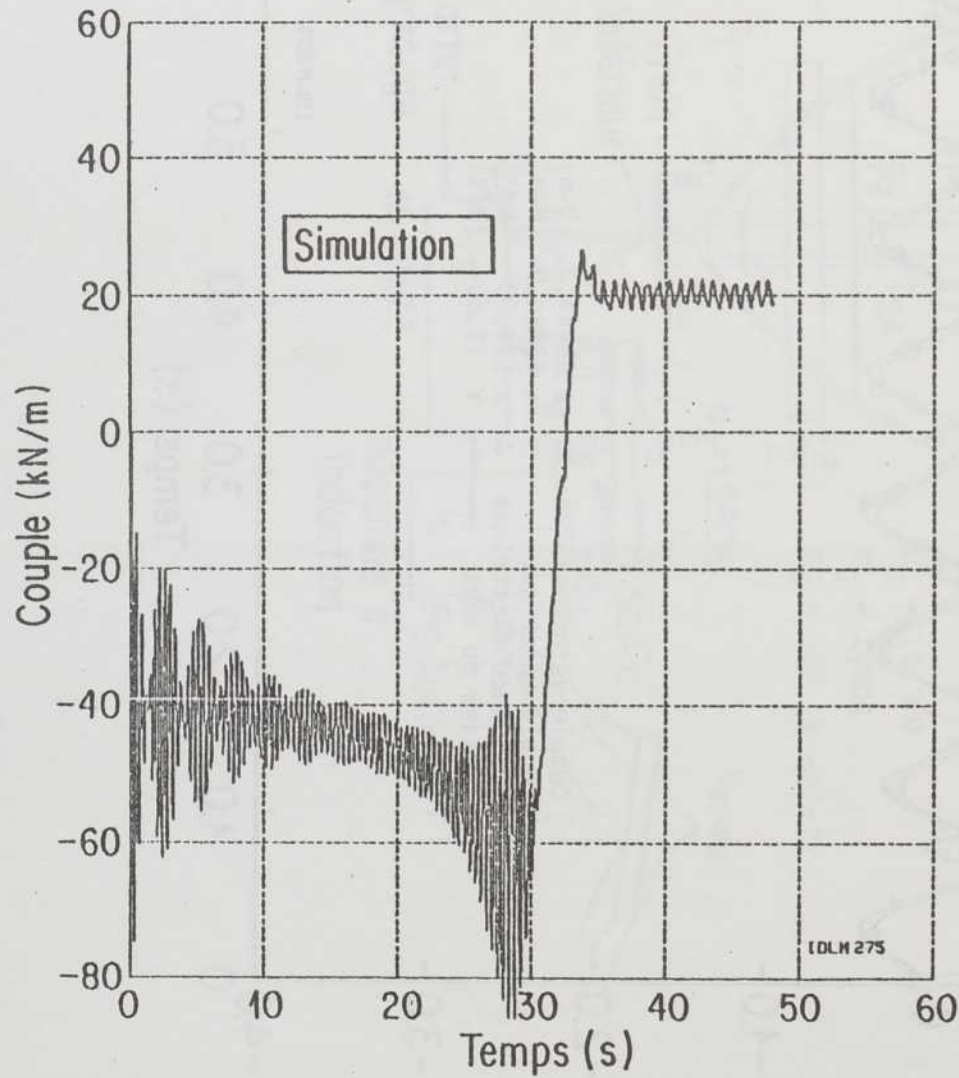
Coefficients d'amortissement (N - s)

- $C_R = 10,000$
- $C_L = 2,000$
- $C_C = 500$  (N - s/m<sup>2</sup>)

## Exploitation normale



# Couple mécanique au démarrage éolienne des îles de la Madeleine

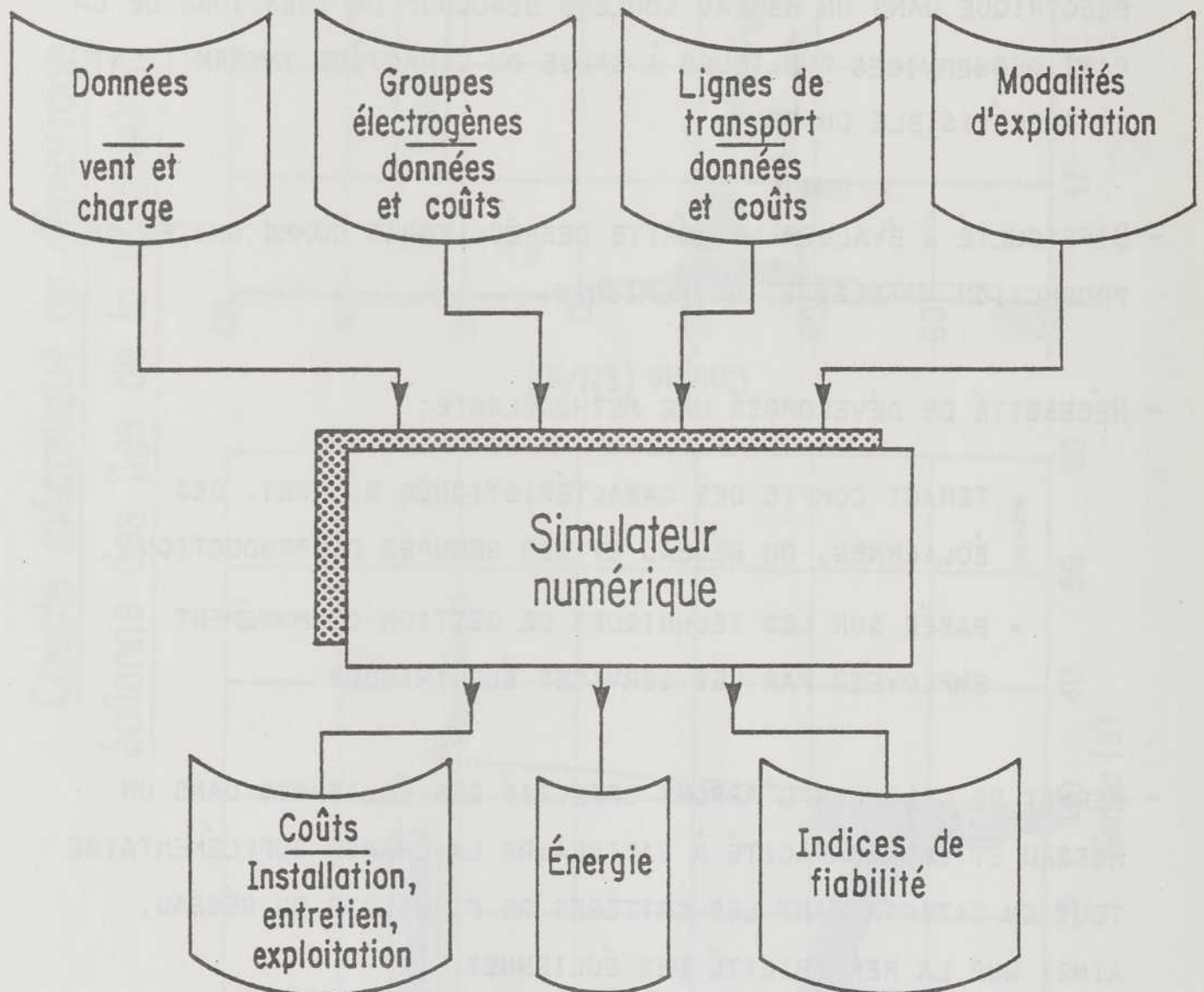


## APPORT EFFECTIF, GESTION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ET RENTABILITÉ DES ÉOLIENNES DANS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE

---

- UTILISATION DES ÉOLIENNES COMME UNITÉS DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS UN RÉSEAU SOULEVE BEAUCOUP DE QUESTIONS DE LA PART DES SERVICES PUBLIQUES À CAUSE DU CARACTÈRE INTERMITTENT ET IMPRÉVISIBLE DU VENT.
- DIFFICULTÉ À ÉVALUER LE MÉRITE DES ÉOLIENNES COMME UNITÉS DE PRODUCTION VIABLES ET ÉCONOMIQUES.
- NÉCESSITÉ DE DÉVELOPPER UNE MÉTHODOLOGIE:
  - TENANT COMPTE DES CARACTÉRISTIQUES DU VENT, DES ÉOLIENNES, DU RÉSEAU ET DES GROUPES DE PRODUCTION
  - BASÉE SUR LES TECHNIQUES DE GESTION COMMUNÉMENT EMPLOYÉES PAR LES SERVICES ÉLECTRIQUES
- PERMET DE CALCULER L'APPORT EFFECTIF DES ÉOLIENNES DANS UN RÉSEAU ET LEUR CAPACITÉ À SATISFAIRE LA CHARGE SUPPLÉMENTAIRE TOUT EN SATISFAISANT LES CRITÈRES DE FIABILITÉ DU RÉSEAU, AINSI QUE LA RENTABILITÉ DES ÉOLIENNES.

## Schéma du simulateur numérique



# Principales données pour le simulateur numérique

## Unités de production

- PUISSANCE NOMINALE
- CHARGE MINIMALE
- COURBES VENT/PUISSANCE (ÉOLIENNES)
- TEMPS DE DÉMARRAGE
- PRIORITÉS DES GROUPES
- COÛT DU CARBURANT
- UNITÉS DE BASE
- CÉDULES D'ENTRETIEN
- TAUX DE PANNE
- TEMPS MOYEN DE REMISE EN SERVICE
- COÛTS D'ENTRETIEN ET D'EXPLOITATION

## Vent/Charge

- HISTORIQUE (HORAIRE SUR UNE ANNÉE)
- RÉPARTITION DE LA DEMANDE DANS LE RÉSEAU
- FACTEURS DE PONDÉRATION (CHARGE ET VENT)

## Lignes de distribution

- TAUX DE PANNE
- TEMPS MOYEN DE REMISE EN SERVICE
- COÛTS D'ENTRETIEN

## Politiques d'opération

- RÉSERVE TOURNANTE
- DÉMARRAGE DES UNITÉS
- GESTION DE LA CHARGE

## Principaux résultats du simulateur

### Énergie

- ÉNERGIE PRODUITE PAR CHAQUE UNITÉ
- CARBURANT CONSOMMÉ PAR CHAQUE UNITÉ
- ÉNERGIE ÉOLIENNE NON ABSORBÉE

### Fiabilité

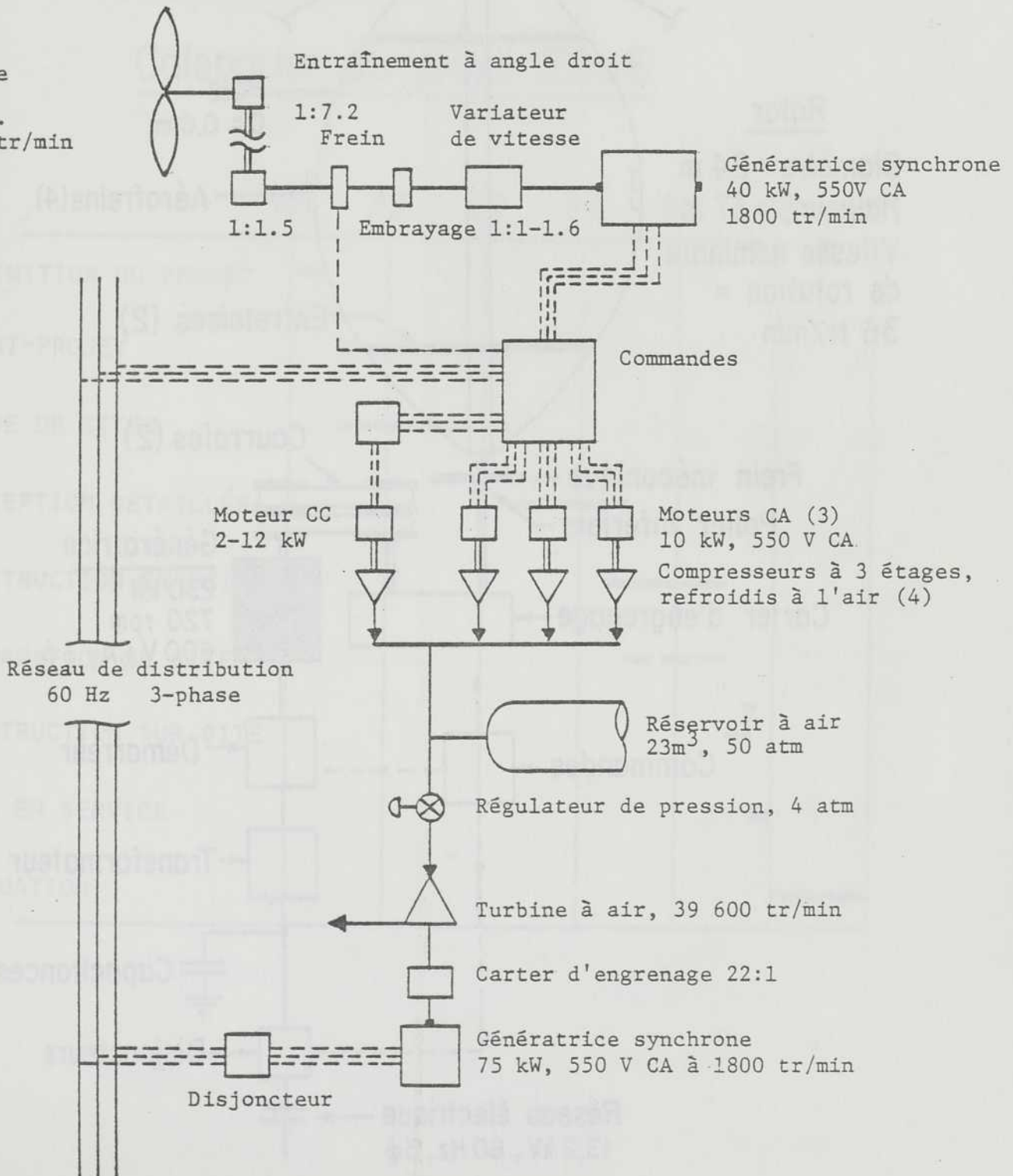
- ÉNERGIE NON LIVRÉE
- FRÉQUENCES ET DURÉES DES COUPURES

### Coûts

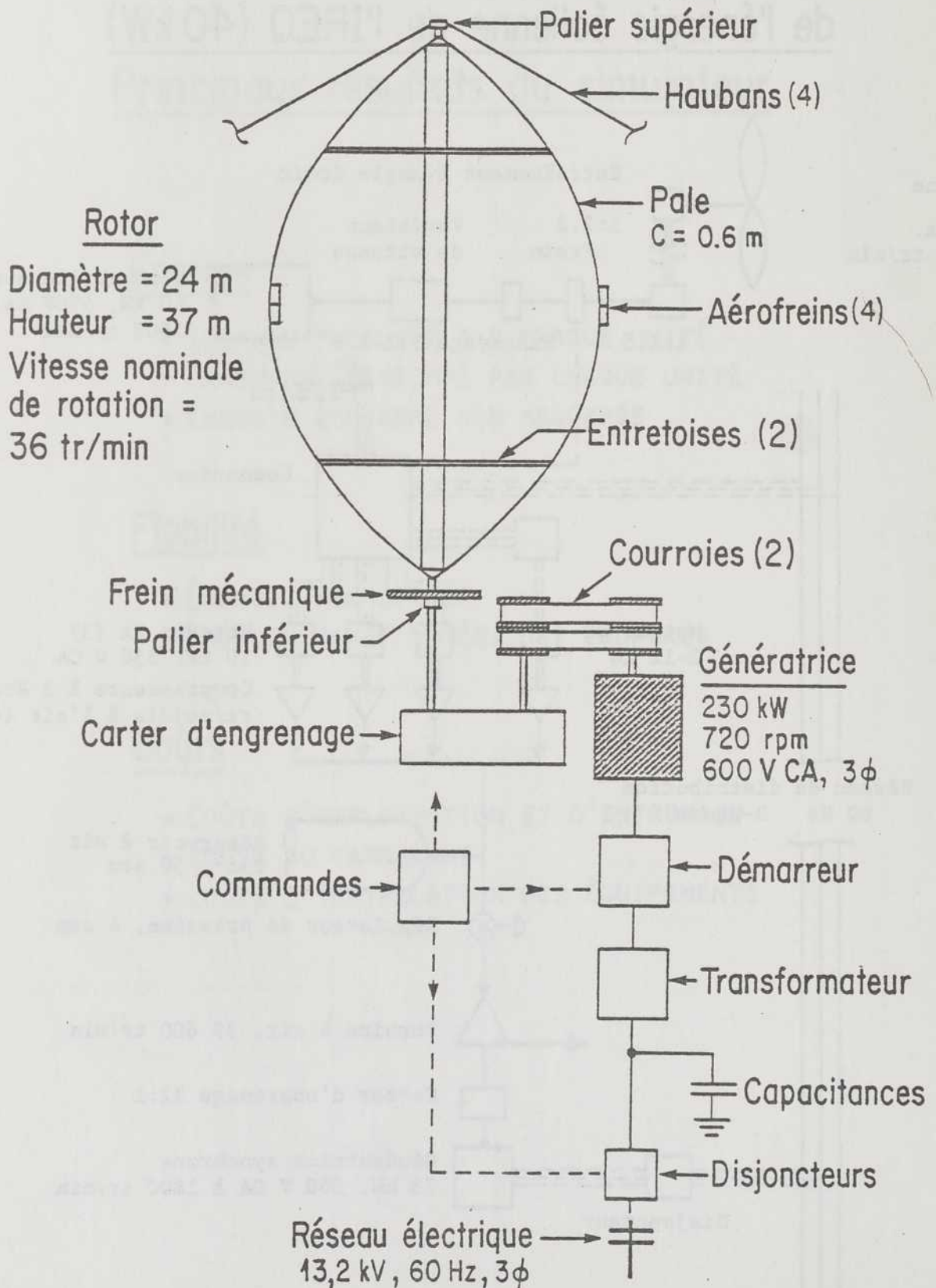
- COÛTS D'EXPLOITATION ET D'ENTRETIEN
- COÛTS DU CARBURANT
- COÛTS D'INSTALLATION DES ÉQUIPEMENTS

## Systèmes de conversion et de stockage de l'énergie éolienne de l'IREQ (40 kW)

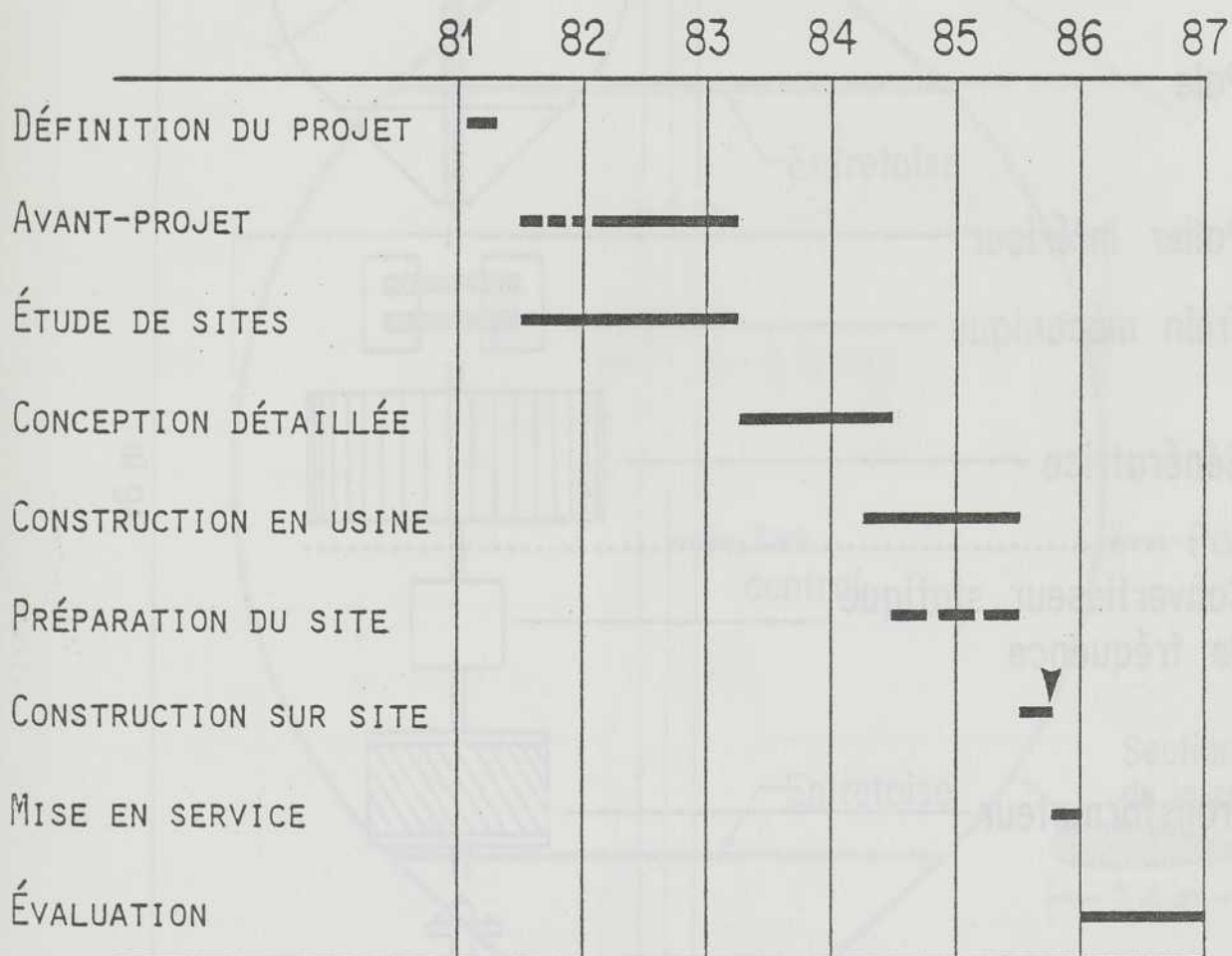
Éolienne  
10m dia.  
80-160 tr/min



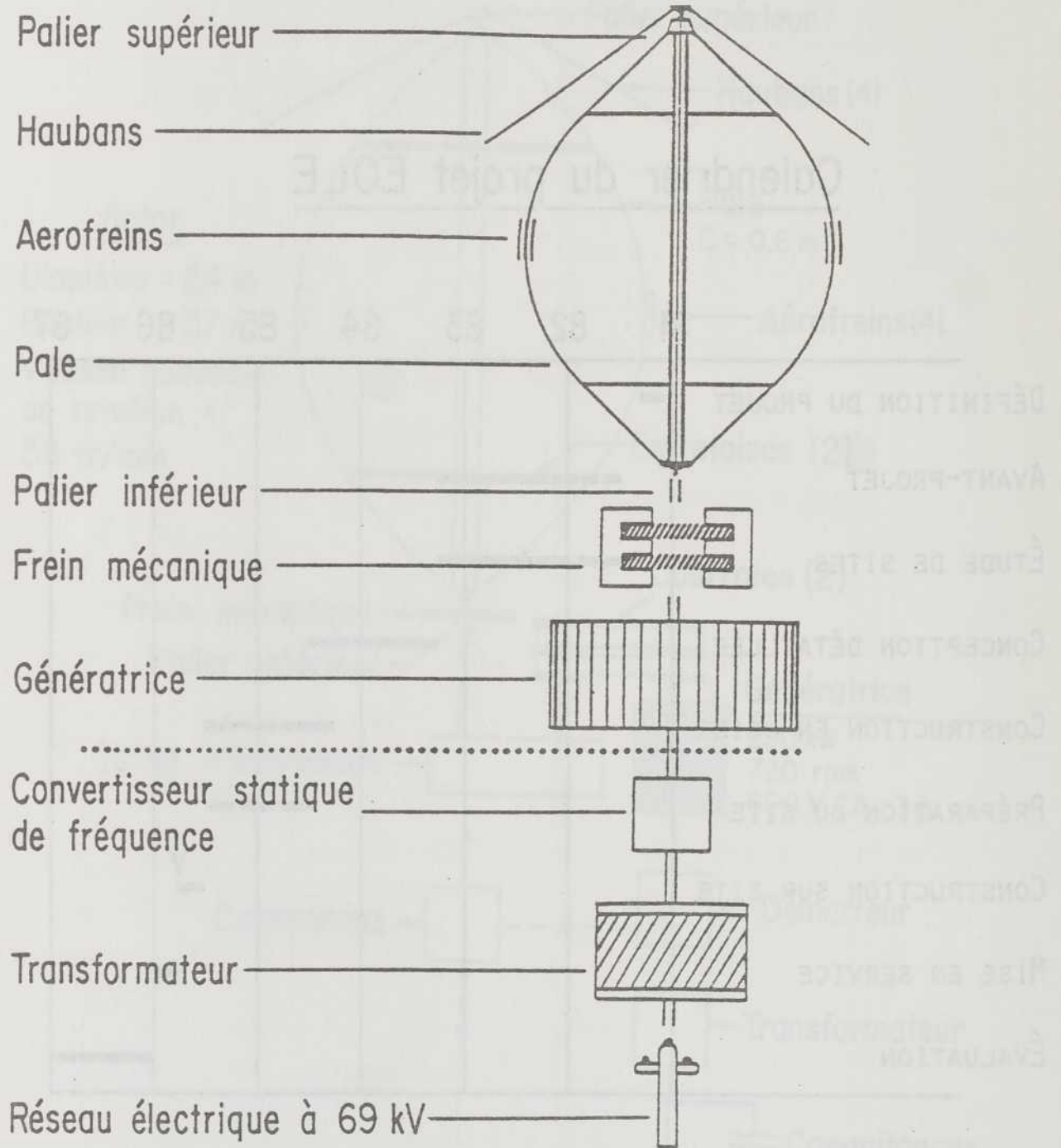
## Diagramme schématique de l'éolienne des îles de la Madeleine



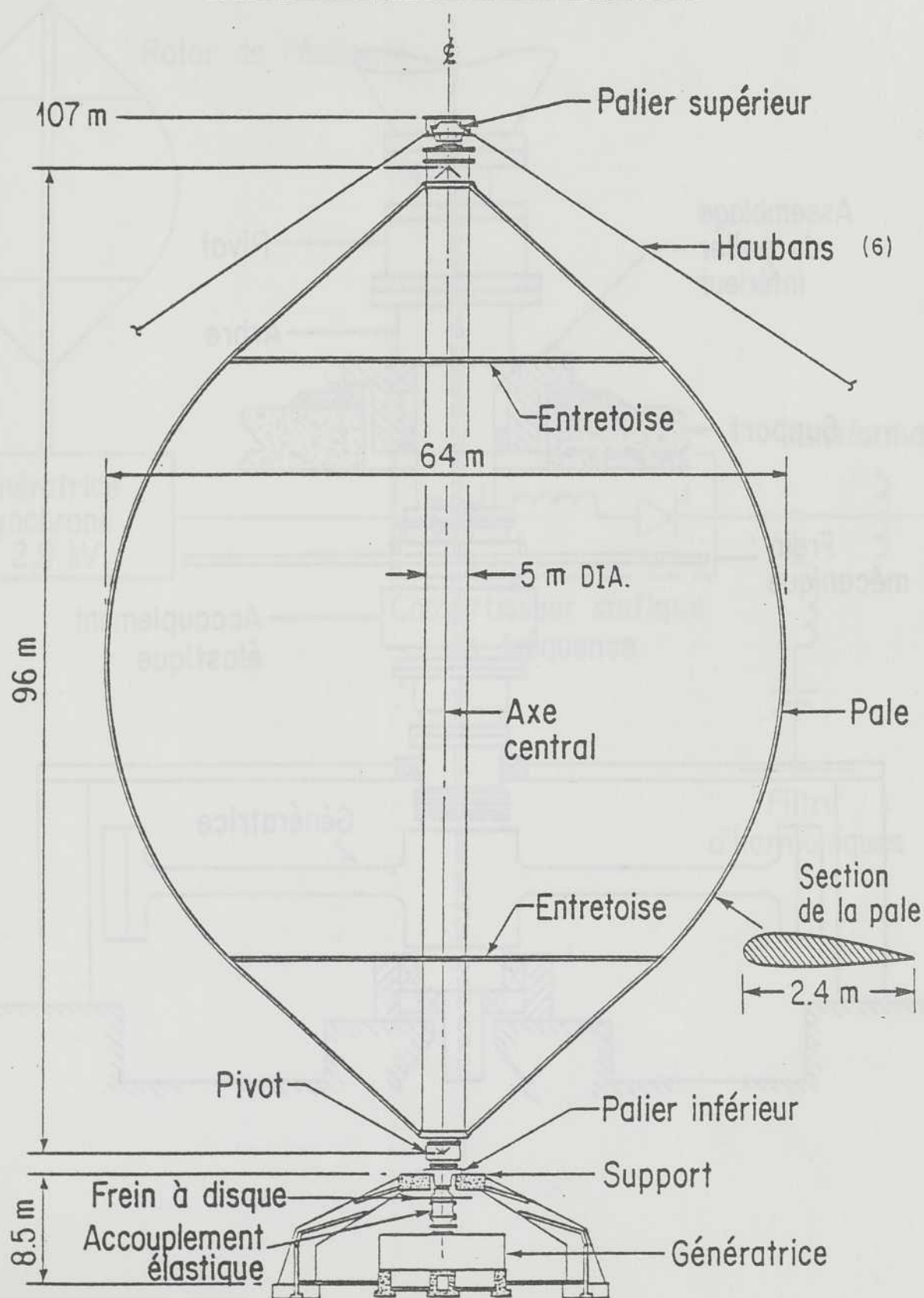
## Calendrier du projet ÉOLE



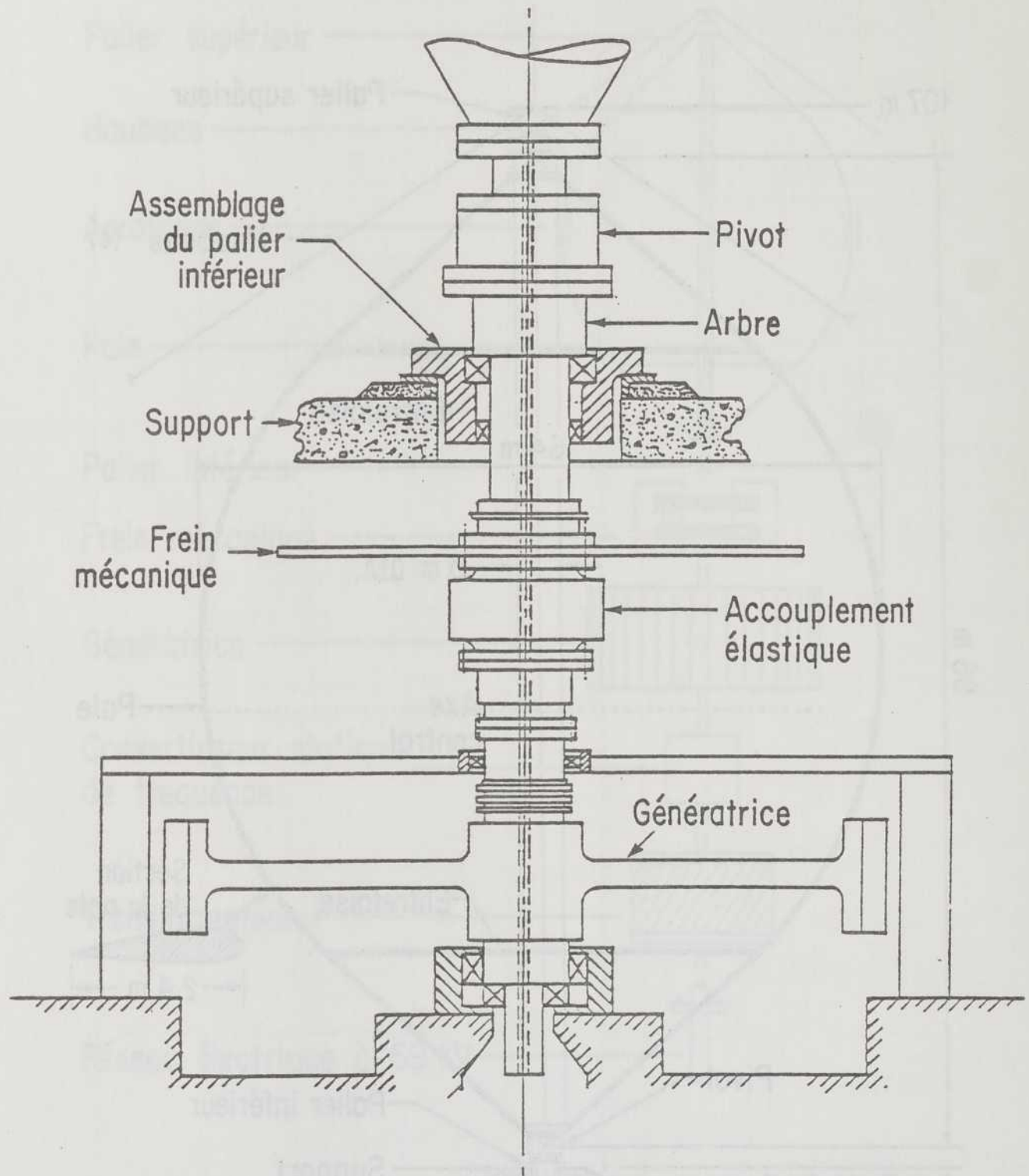
## Composants d'ÉOLE



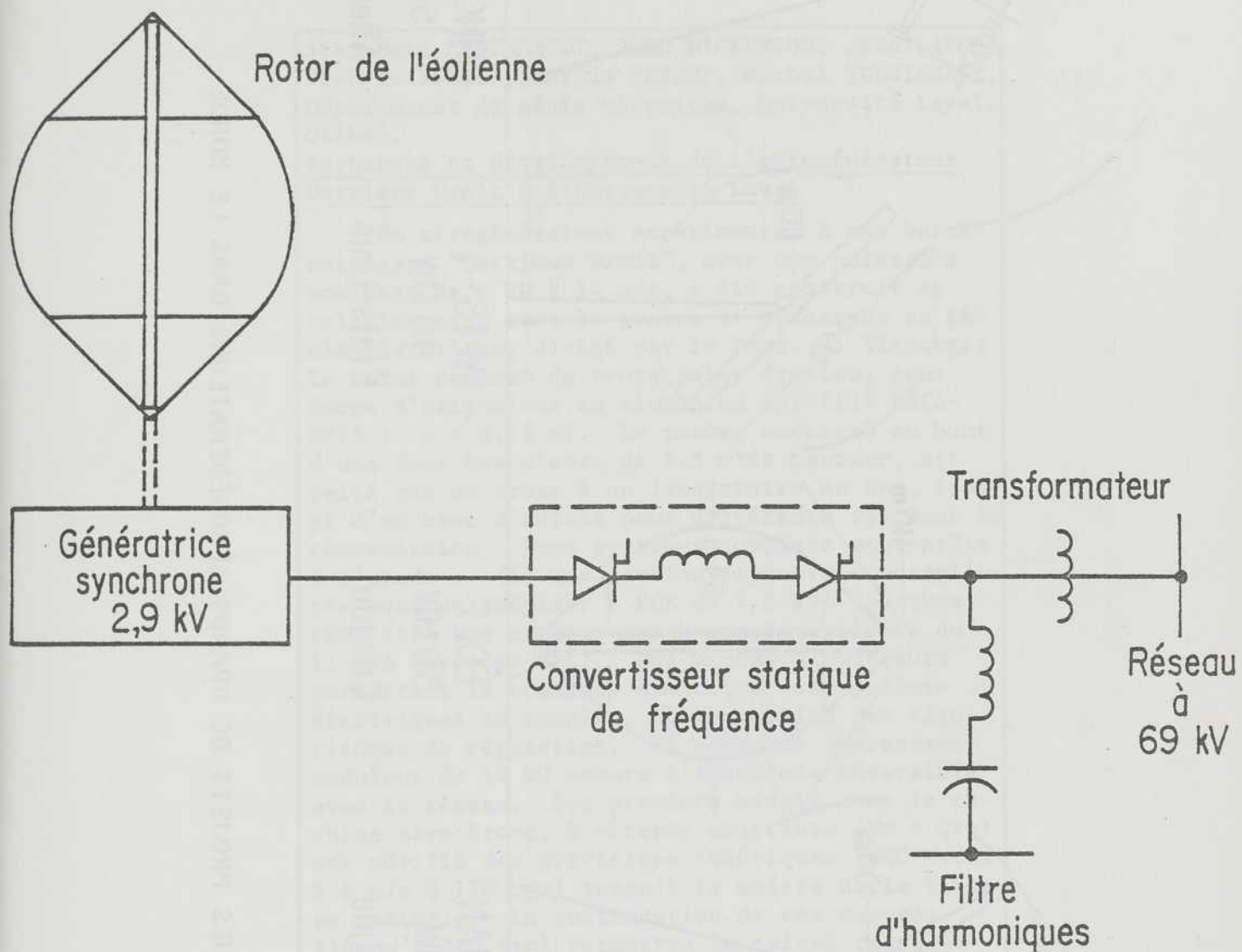
## Schéma général de l'aérogénérateur ÉOLE

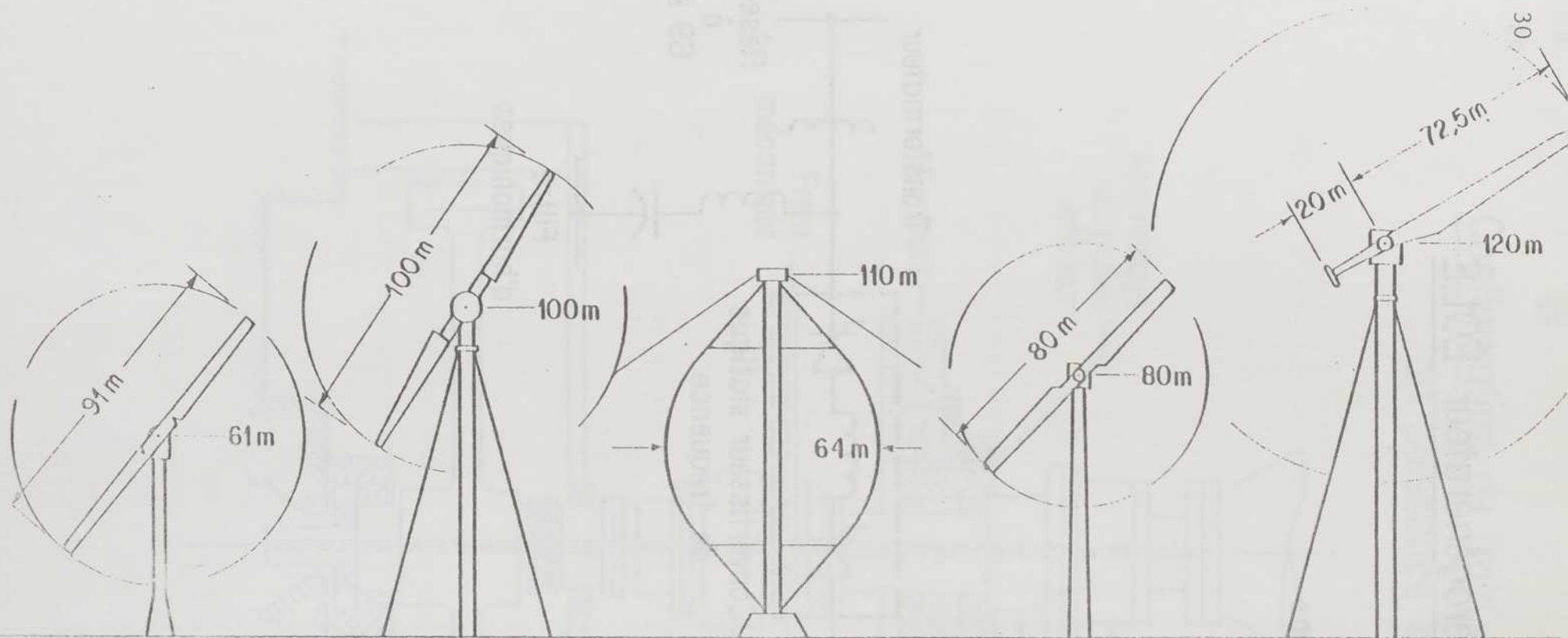


## Configuration du train de transmission de puissance d'ÉOLE



## Schéma de l'aérogénérateur ÉOLE





MOD-2  
2.5MW  
États-Unis

GROWIAN  
3.0MW  
Allemagne

ÉOLE  
3.8 MW  
Canada

WTS-4  
4.0 MW  
États-Unis

MONOPTEROS  
5.0 MW  
Allemagne

QUELQUES PROJETS DE GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS DANS LE MONDE

Jean-Marc ARSENEAULT, John DICKINSON, Jean LAVOIE  
Vinh D. NGUYEN, Martin PESANT, Michel TOUSIGNANT,  
Département de génie mécanique, Université Laval,  
Québec.

Recherche et développement de l'aérogénérateur  
Darrieus Droit à l'Université Laval

Un aérogénérateur expérimental à axe vertical, type "Darrieus Droit", avec une puissance nominale de 6 kW à 14 m/s, a été construit en collaboration avec le groupe de recherche en génie électrique, dirigé par le Prof. P. Viarouge; Le rotor composé de trois pales droites, sous forme d'extrusions en aluminium (profil: NACA-0015 :  $c \leq 0.15$  m). Le rotor, encastré au bout d'une tour basculante de 8.5 m de hauteur, est relié par un arbre à un laboratoire en bas, équipé d'un banc d'essais pour différents systèmes de transmission. Deux systèmes complets sont prêts à l'étude : (i) une machine asynchrone autopilotée avec un onduleur à SCR de 7.5 kVA (système PWM) (ii) une machine synchrone autopilotée de 11 kVA (système SFC). Des micro-calculateurs permettent la commande numérique des systèmes électriques au complet, et la gestion des algorithmes de régulation. Un ensemble redresseur-onduleur de 12 kW assure l'interface réversible avec le réseau. Des premiers essais avec la machine asynchrone, à vitesse constante ( $R\omega = Cte$ ) ont vérifié des prévisions théoriques (800 Watts à 8 m/s à 120 rpm) jusqu'à la moitié de la vitesse maximale. La continuation de ces mesures (jusqu'à 240 rpm) permettra le calcul des algorithmes de contrôle afin d'optimiser le rendement de l'aérogénérateur par fonctionnement à "vitesse variable" et "vitesse spécifique ( $\lambda = R\omega/V$ ) constante".

ETUDE DE LA PERFORMANCE D'UNE DARRIEUS A PALES DROITES

par

Jean Lavoie

présentée au

52e Congrès de l'ACFAS

Québec, 9-10-11 mai 1984

1001-2  
2018  
Québec

## SOMMAIRE

Une éolienne Darrieus à pales droites à été construite à l'Université Laval par les Départements de génie mécanique et de génie électrique. Ce prototype expérimental érigé sur le toit de la Faculté de génie permettra l'étude des divers aspects reliés à la production d'énergie par les éoliennes. D'un diamètre de 4 m et d'une hauteur de 3,75 m, le rotor possède 3 pales dont le profil est un NACA-0015. Le rotor entraîne une machine électrique de 10 Kw reliée au réseau électrique. Dans un premier temps, un programme d'expérimentation a été mis au point dans le but d'évaluer les performances globales de l'éolienne. Les premiers essais effectués à une vitesse de rotation constante de 120 RPM, soit la moitié de la vitesse nominale, sont fort encourageants. Le coefficient de puissance maximum obtenu est d'environ 0,20 et les modèles théoriques prédisent assez bien la puissance produite par l'éolienne. Une description de l'éolienne ainsi que de l'instrumentation sera donnée au cours de l'exposé. De plus, les résultats expérimentaux y seront présentés.

Le Département de génie mécanique de l'Université Laval débutait à l'automne 1980 des études sur les aérogénérateurs de faible puissance. En mai 1981, il entreprit, en collaboration avec le Département de génie électrique et les industries Pylonex inc. de Québec, la construction d'une éolienne Darrieus à pales droites de 10 Kw (figures 1 et 2). Le prototype érigé sur le toit du pavillon Adrien Pouliot permettra l'étude des aspects suivants: les caractéristiques aérodynamiques du capteur éolien, la dynamique de la structure et les commandes électroniques des machines électriques. De plus, ce prototype servira à évaluer les composantes en vue d'une version commerciale.

### DESCRIPTION DU MONTAGE

#### Rotor

Le rotor (figure 3) d'une surface de  $15 \text{ m}^2$ , a un diamètre de 4 mètres et une hauteur de 3,75 mètres. Il possède 3 pales droites en aluminium fabriquées par extrusion. Le profil utilisé est un NACA-0015 avec une longueur de corde de 15 cm. La figure 4 montre une section de pale. Le rotor est conçu pour fonctionner à une vitesse de rotation maximum de 240 RPM. Chaque pale est reliée à l'arbre central par 2 entretoises et 2 câbles.

Pour relier les entretoises et les câbles avec les pales, un système d'attache spécial a été mis au point (figures 5 et 6). Il s'agit de formes profilées attachées aux pales par des bandes d'acier inoxydable à haute résistance.

Le système d'attache entre les entretoises et l'arbre central permet de faire varier l'angle de calage des pales (figure 7).

L'arbre central du rotor se compose d'un tube en acier d'un diamètre nominal de 152 mm. Il est retenu en porte-à-faux par un tube d'encastrement (figure 8) fixé au haut de la tour.

## Tour

Le rotor est monté sur une tour auto-portante d'une hauteur de 8,5 mètres. La tour repose sur une grande base de 21' X 16' fixée à la structure du bâtiment. Elle est articulée au niveau de la chambre des machines. Un système de bascule (figure 9) permet de descendre et de lever la tour (figure 10) afin de faciliter l'entretien du rotor et d'effectuer les modifications nécessaires lors de l'expérimentation.

## Système de transmission

Un arbre de transmission est utilisé pour transmettre la puissance du rotor à la chambre des machines, située au pied de la tour. A l'intérieur de la chambre des machines un système de courroies entraîne une boîte d'engrenage. Le rapport des diamètres des poulies permet de multiplier la vitesse de rotation par un facteur de 5. La machine électrique utilisée est accouplée à l'une des sorties de la boîte d'engrenage.

## Système de régulation

La régulation de l'éolienne est assurée par le système électrique. La figure 11 montre un schéma simplifié du système électrique utilisé. Le système se compose d'une machine électrique DC d'une puissance de 10 Kw, de deux convertisseurs statiques de puissance et d'un circuit de contrôle électronique. La puissance produite est injectée au réseau électrique. Ce système est réversible et peut être utilisé pour démarrer l'éolienne. Le système de contrôle est basé sur une boucle de régulation de la vitesse de rotation avec une boucle interne de contrôle du courant.

## Système de freinage

Le freinage de l'éolienne est assuré par deux freins introduits dans le système de transmission. Le frein principal placé au-dessus de la colonne d'instrumentation sert lors des arrêts normaux et des arrêts d'urgence. Le frein utilisé est un frein à tambour d'une camionnette 3/4 tonnes. Un frein à disque placé dans la chambre des machines est utilisé comme frein auxiliaire. Ce frein sert donc de frein de sécurité dans le cas où le frein principal ne fonctionnerait pas.

## Instrumentation

### Système anémométrique

Pour mesurer la vitesse du vent lors des essais, 4 anémomètres et une girouette ont été placés sur le site (figure 2). Un premier anémomètre est situé à un mètre au-dessus du rotor. Les 3 autres anémomètres et la girouette sont montés sur une tour anémométrique. Cette tour se trouve à 5 mètres du centre du rotor et peut être facilement basculée. L'anémomètre placé au niveau du centre du rotor sert à mesurer la vitesse du vent de référence.

### Colonne d'instrumentation

Juste au-dessus de la chambre des machines se trouve la colonne d'instrumentation (figure 12). Celle-ci est composée de deux parties distinctes. Dans la partie supérieure, les anneaux connecteurs (slip-ring) servent à transmettre les signaux de la partie tournante à la partie fixe. Dans la partie du bas, le couplemètre permet de mesurer le couple mécanique.

### Tachymètre

Pour mesurer la vitesse de rotation de l'éolienne, un petit générateur DC a été monté sur l'extrémité de l'arbre de l'éolienne à l'intérieur de la chambre des machines.

### RESULTATS EXPERIMENTAUX

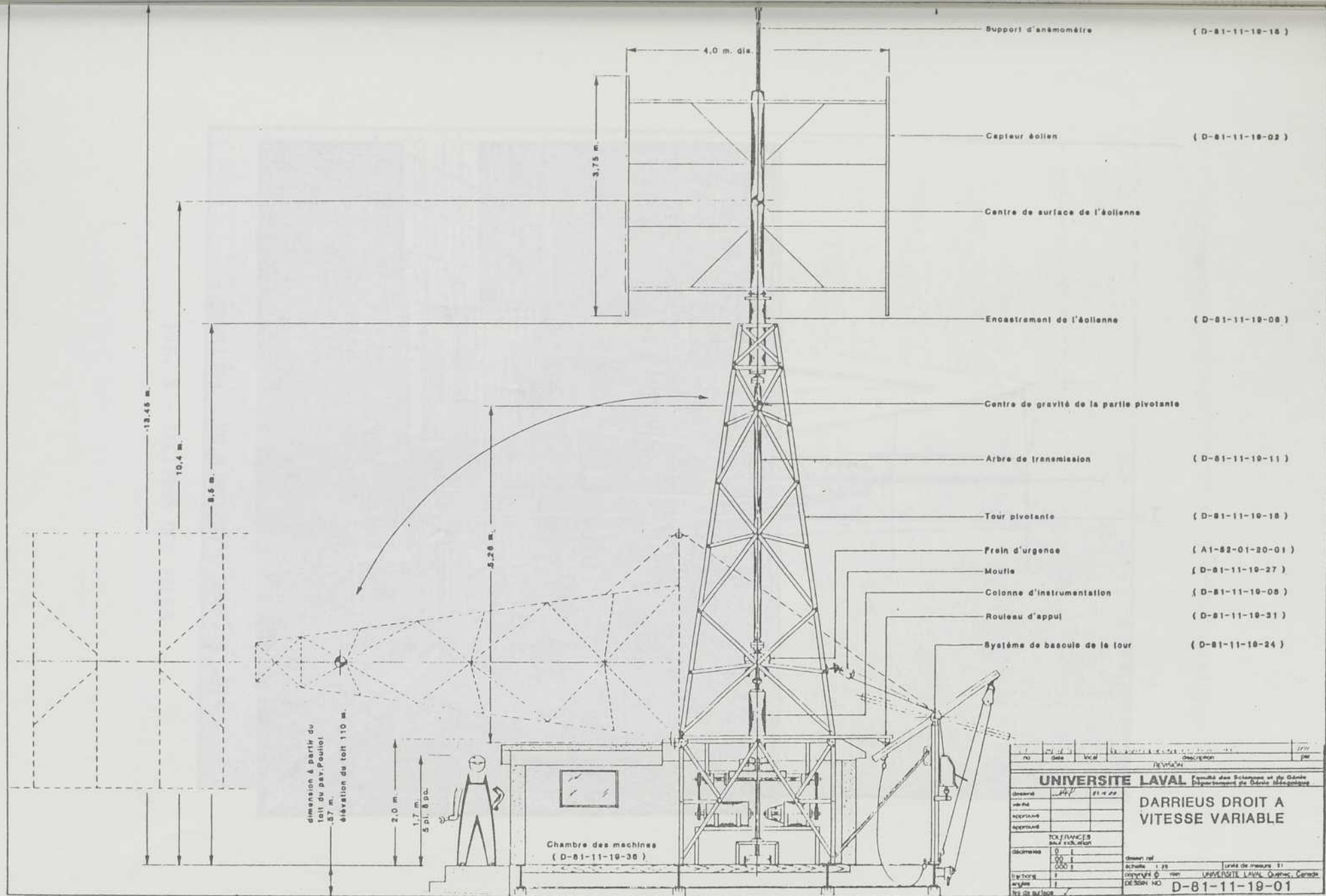
Dans un premier temps, nous avons évalué les performances globales du rotor pour une vitesse de rotation constante de 120 RPM, et ce dans une gamme de vitesse de vent variant entre 4 et 12 m/s (14 Km/h - 43 Km/h). La figure 13 montre la puissance mécanique produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent (m/s). Le trait continu représente les résultats théoriques provenant du modèle à plusieurs tubes de courant mis au point par François Dubé, dont la thèse sera bientôt accessible. Chaque point expérimental représente une moyenne de 1 024 points pris sur une période de 10 secondes. Ces données sont aussi corrigées pour tenir compte de la variation de pression et de température. Ces résultats indiquent que la puissance produite par l'éolienne semble assez bien prédite par le modèle théorique, quoique légèrement décalée vers la droite. Une puissance de 900 W est atteinte pour une vitesse de vent de 9 m/s (32 Km/h). Pour cette vitesse de rotation l'éolienne commence à produire de l'énergie à une vitesse de 5 m/s (18 Km/h).

Sur la figure 14 nous avons tracé la courbe du coefficient de performance en fonction de la vitesse spécifique. Le coefficient de puissance maximum est d'environ 0,20, et ce pour une vitesse spécifique de  $\lambda = 3,5$ . On note que la performance de l'éolienne est légèrement inférieure à la valeur prédite par la théorie.

La figure 15 montre la réponse instantanée de l'éolienne à une rafale de vent. On remarque que la puissance de l'éolienne peut chuter

dramatiquement lors d'une rafale de vent. Cette perte de puissance est principalement due au phénomène du décrochage dynamique. Ce phénomène du décrochage réduit la puissance produite par l'éolienne et peut entraîner une fatigue prématurée des pièces.

FIG. 1 - DESSIN D'ENSEMBLE



no	date	vue	description	dessiné	par
<b>UNIVERSITE LAVAL</b> Faculté des Sciences et de Génie Département de Génie Mécanique					
dessiné	J.P.P.	21.4.22			
vue					
échelle					
approuvé					
<b>DARRIEUS DROIT A VITESSE VARIABLE</b>					
DOLFINCES sans rotation					
dimension	0 - 1				
	00 - 1				
	000 - 1				
échelle	1				
échelle	1				
type de surface					
UNIVERSITE LAVAL				Unité de mesure: SI	
DESIGN NO: D-81-11-19-01				UNIVERSITE LAVAL, Québec, Canada	

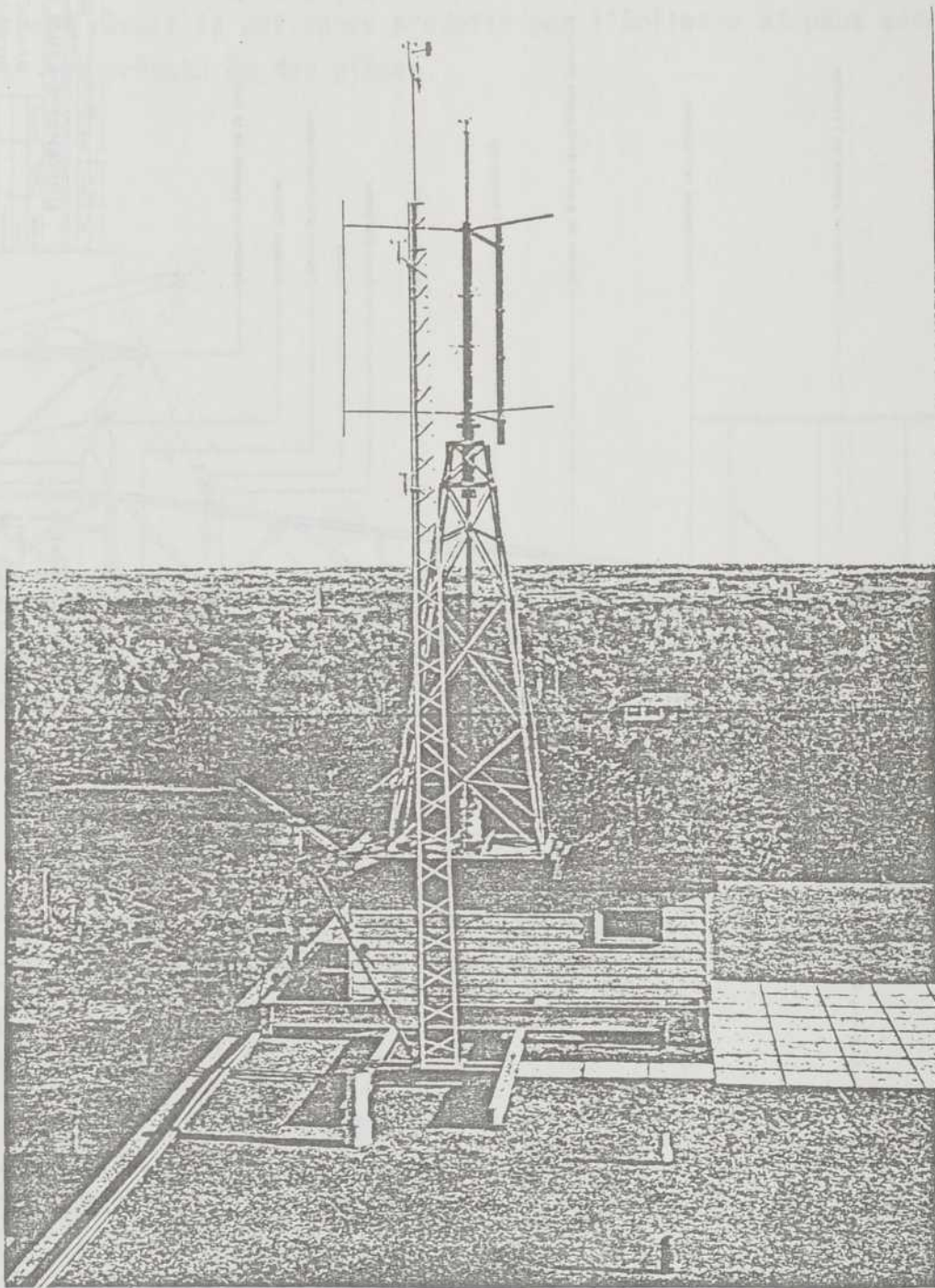


FIG. 2 - VUE D'ENSEMBLE DE L'EOLIENNE

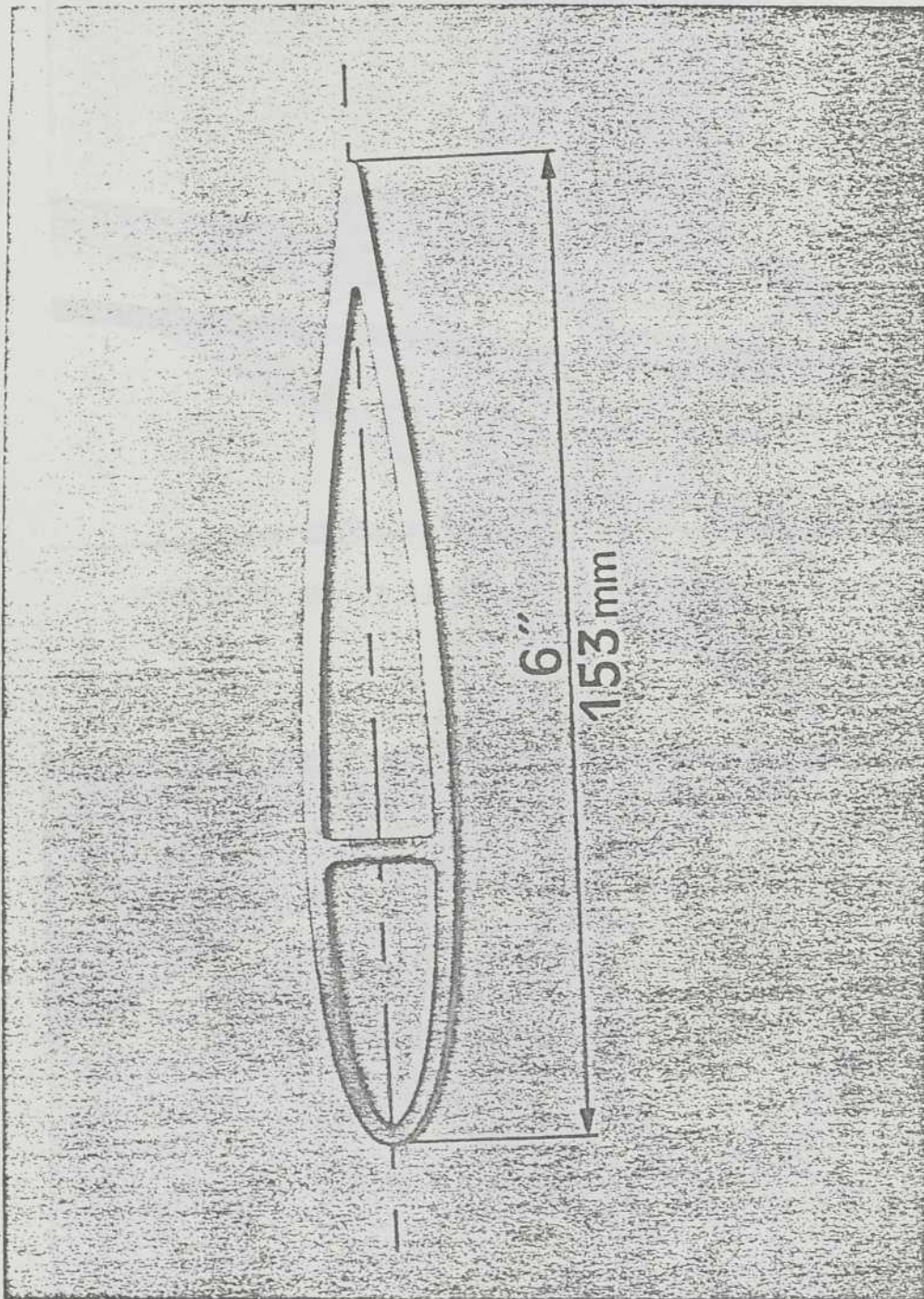


FIG. 4 - SECTIONS DES PALES

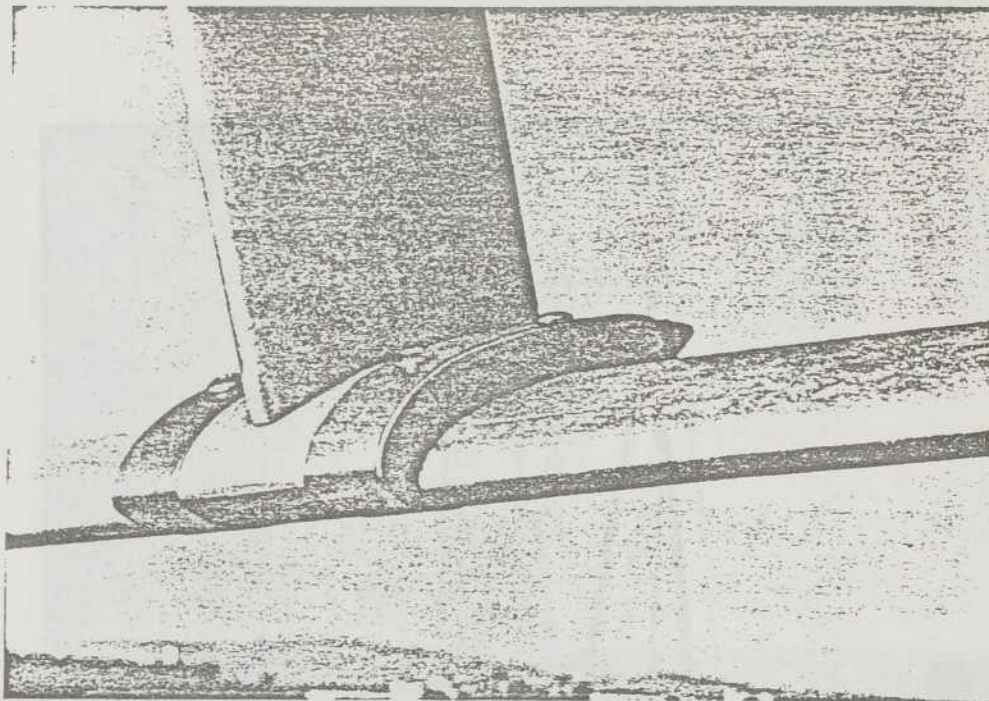


FIG. 5 - ATTACHE ENTRE UNE PALE ET UNE ENTRETOISE

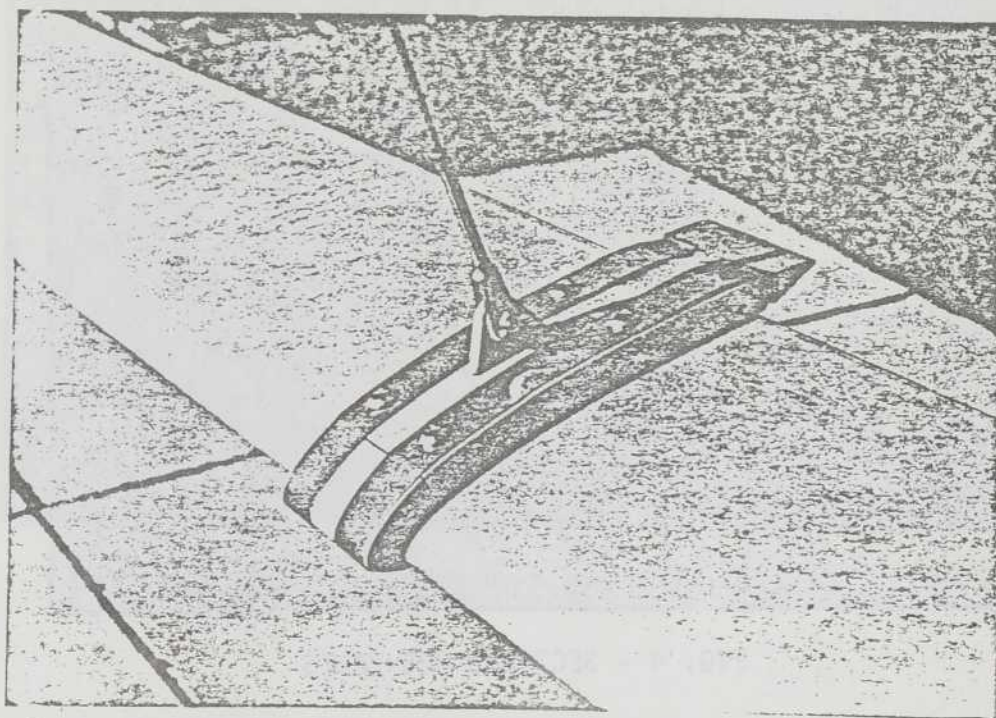


FIG. 6 - ATTACHE ENTRE UNE PALE ET UN CABLE

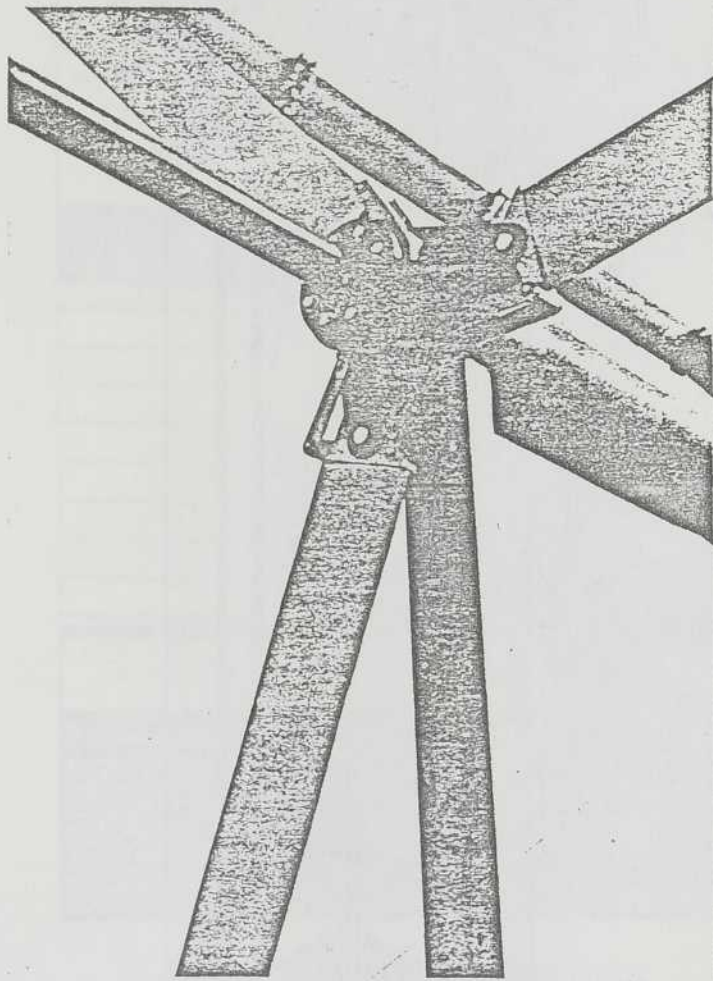


FIG. 7 - SYSTEME DE CALAGE DES PALES

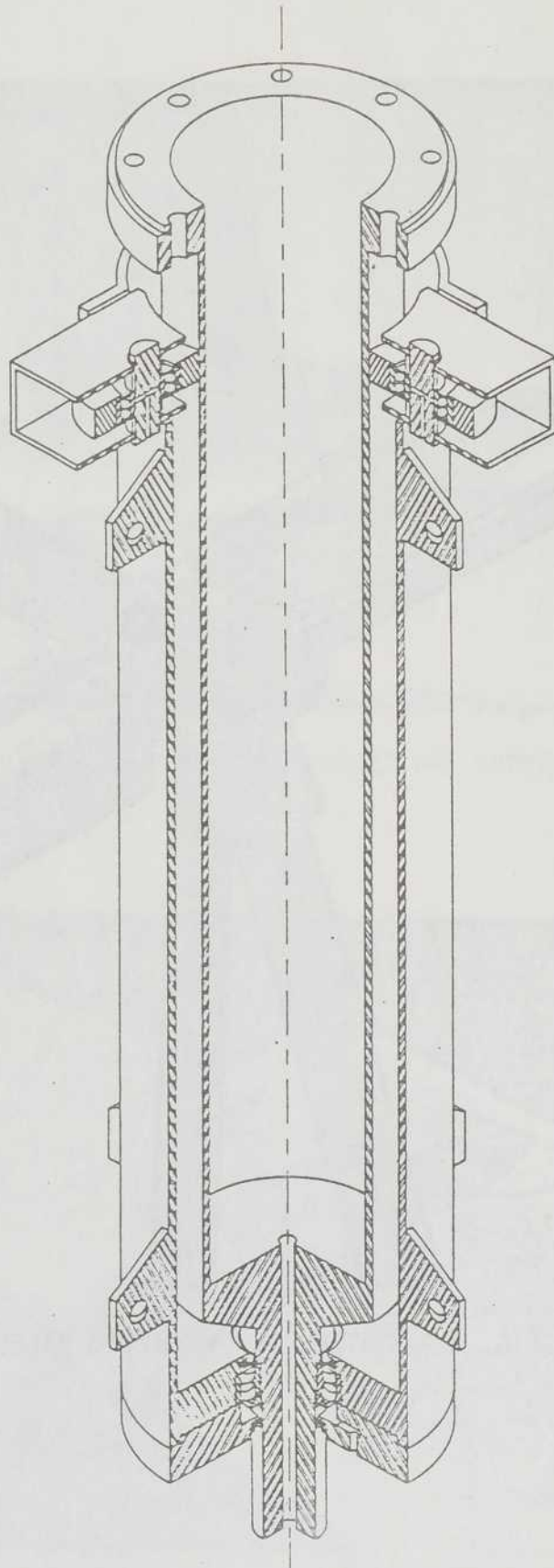


FIG. 8 - TUBE D'ENCASTREMENT

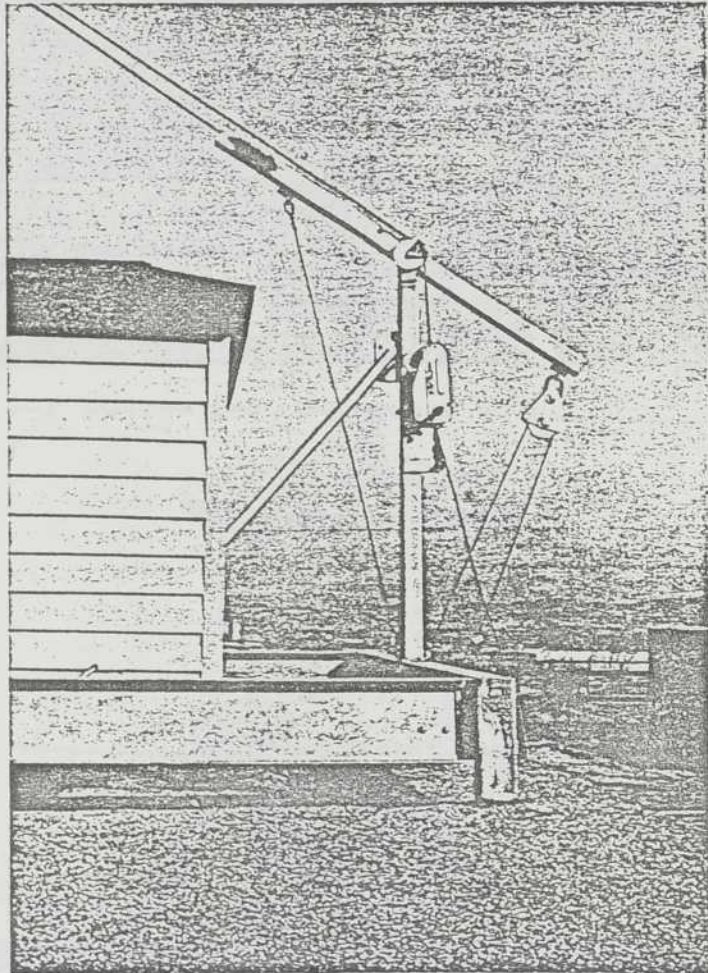


FIG. 9 - SYSTEME DE BASCULE

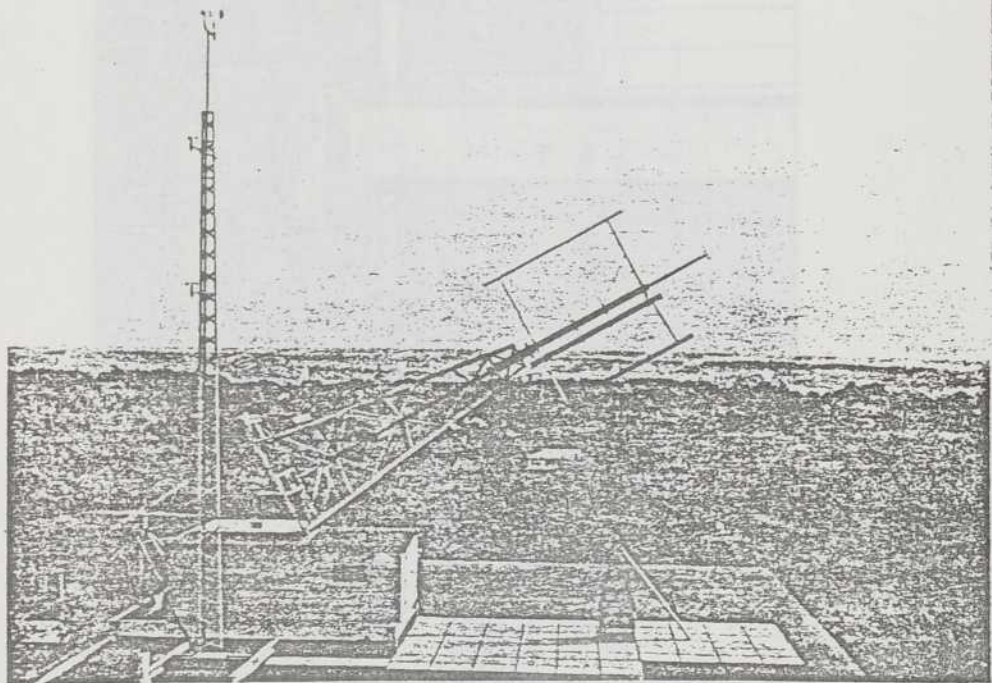
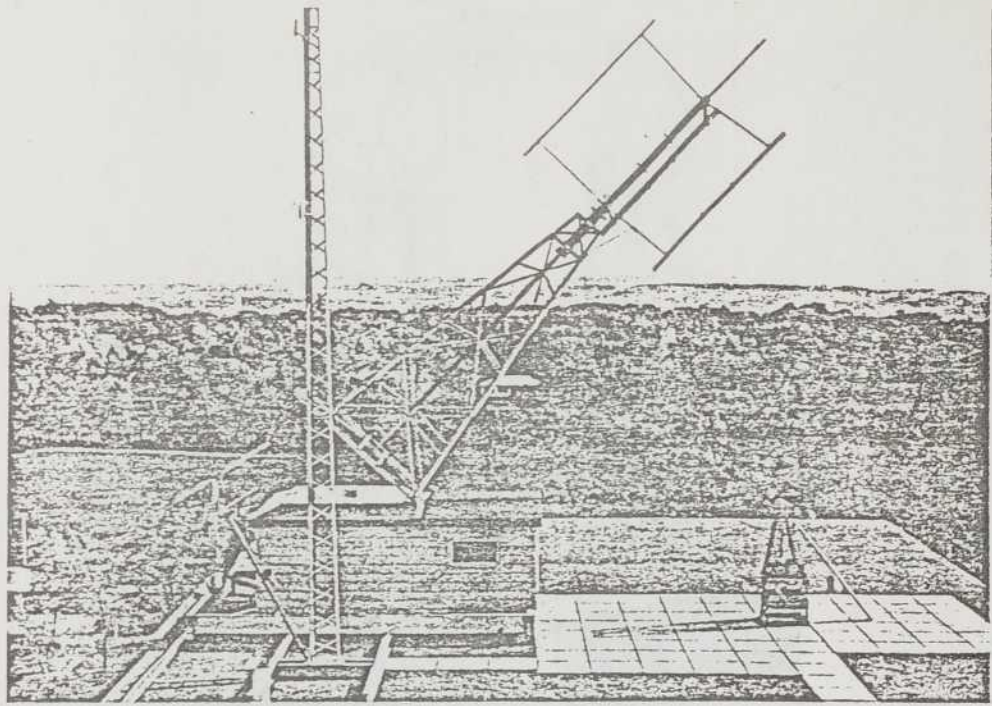
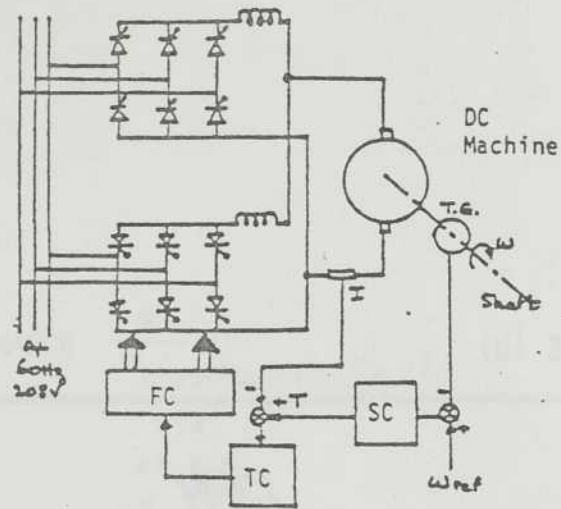


FIG. 10 - DESCENTE DE LA TOUR



FC : Firing circuit  
 TC : Torque controller  
 SC : Speed controller  
 TG : Tachymetric generator

FIG. 11 - SCHEMA SIMPLIFIE DU SYSTEME ELECTRIQUE

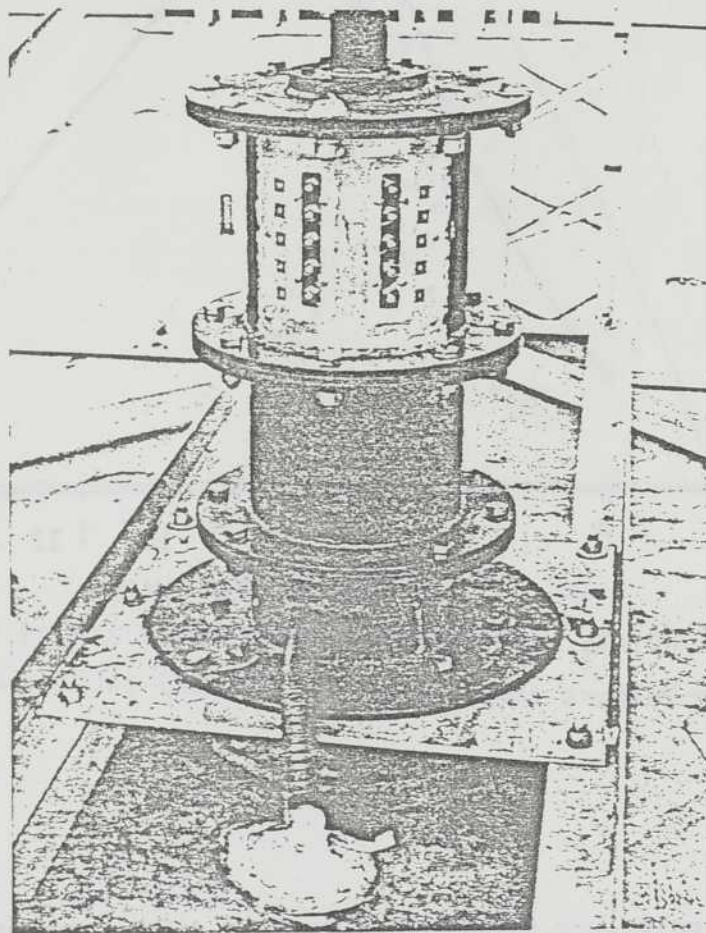


FIG. 12 - COLONNE D'INSTRUMENTATION

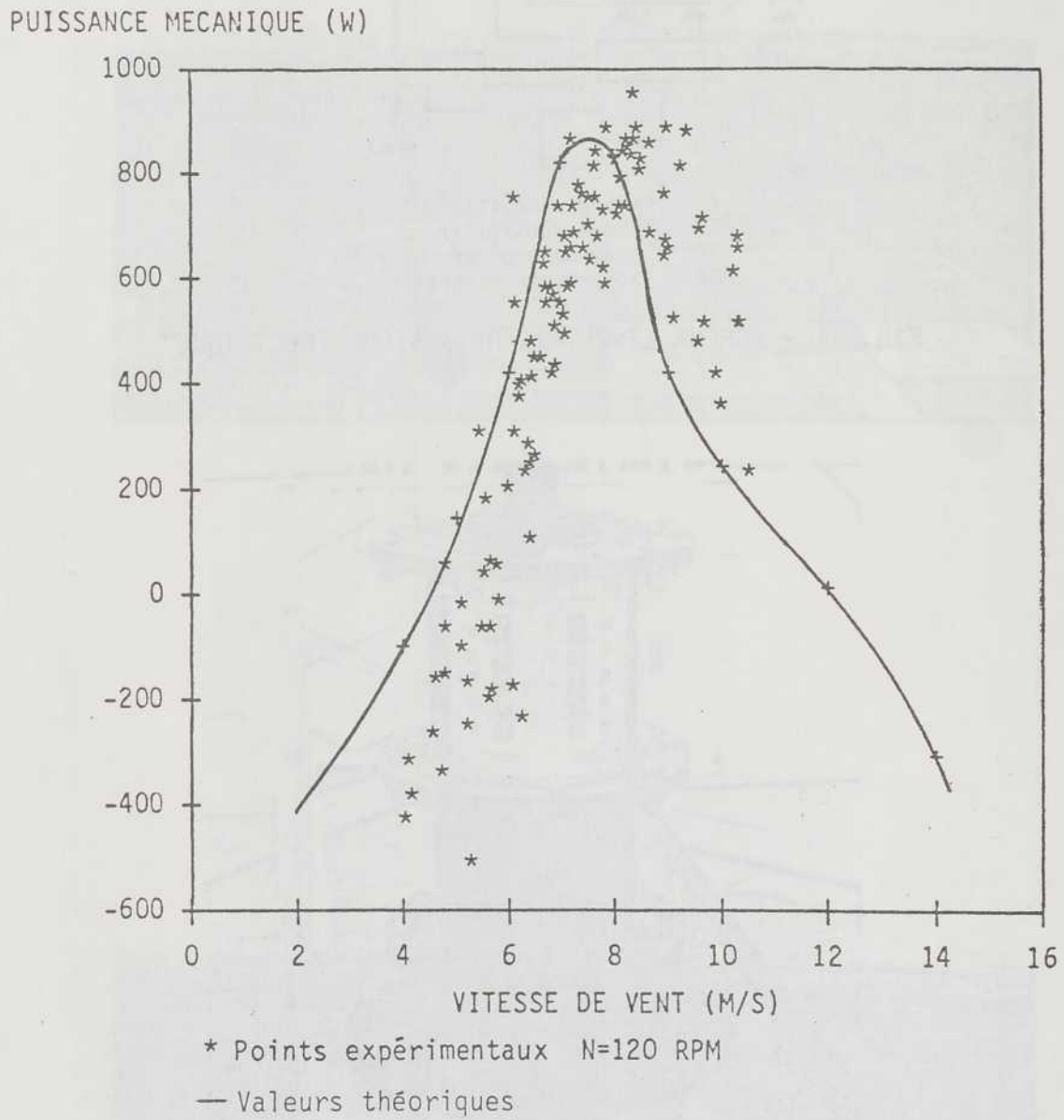


FIG. 13 - PUISSANCE MECANIQUE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT

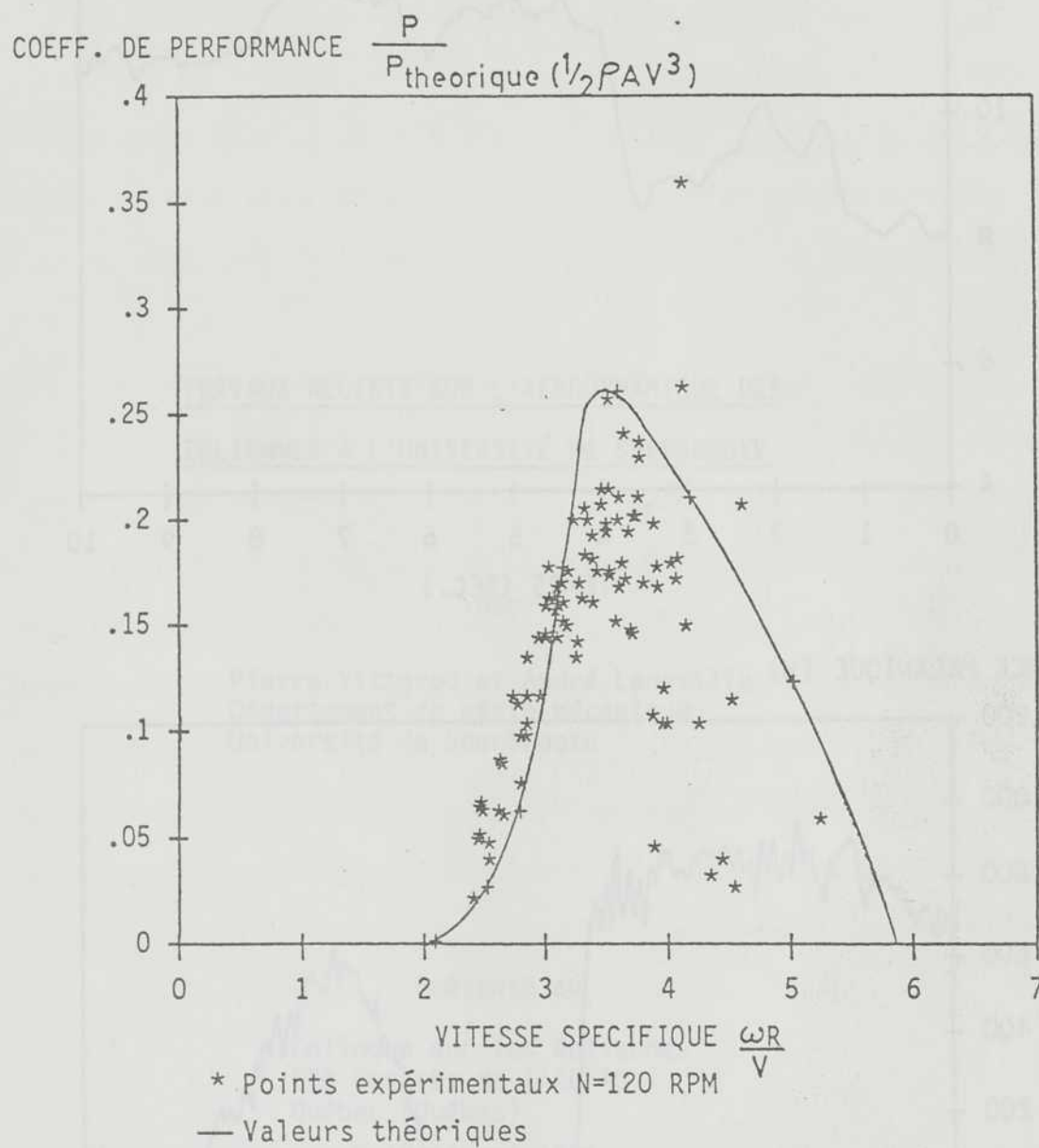
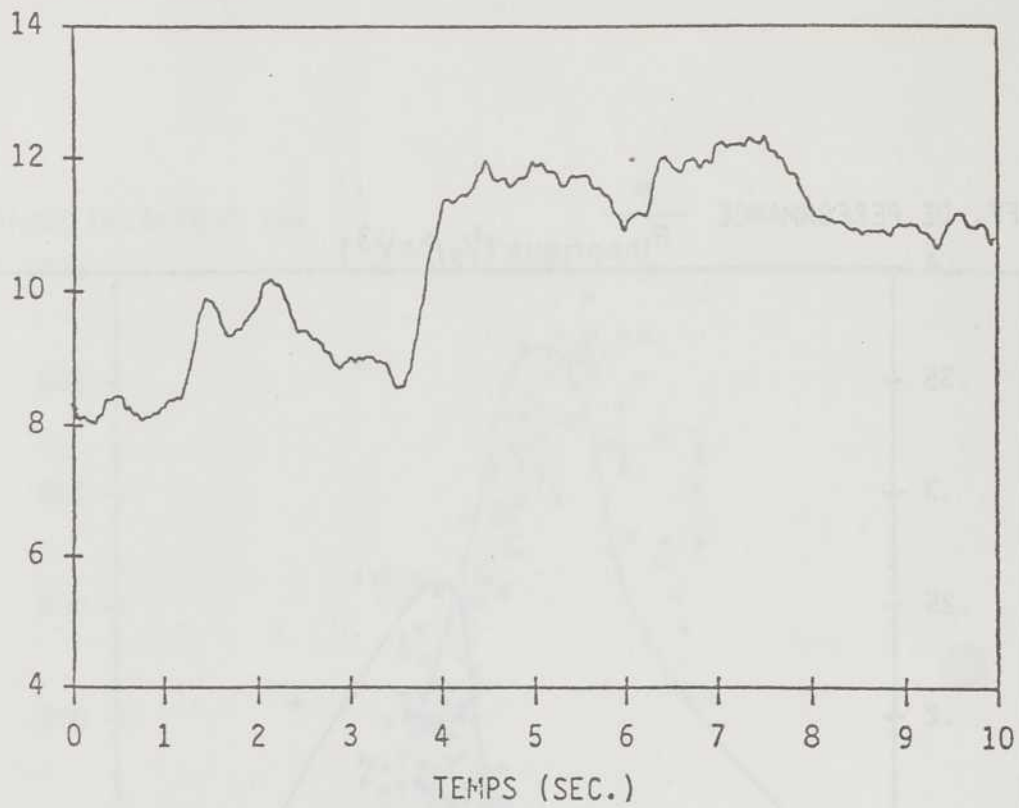


FIG. 14 - COEFFICIENT DE PERFORMANCE EN FONCTION DE LA VITESSE SPECIFIQUE

VITESSE DU VENT (M/S)



PUISSANCE MECANIQUE (W)

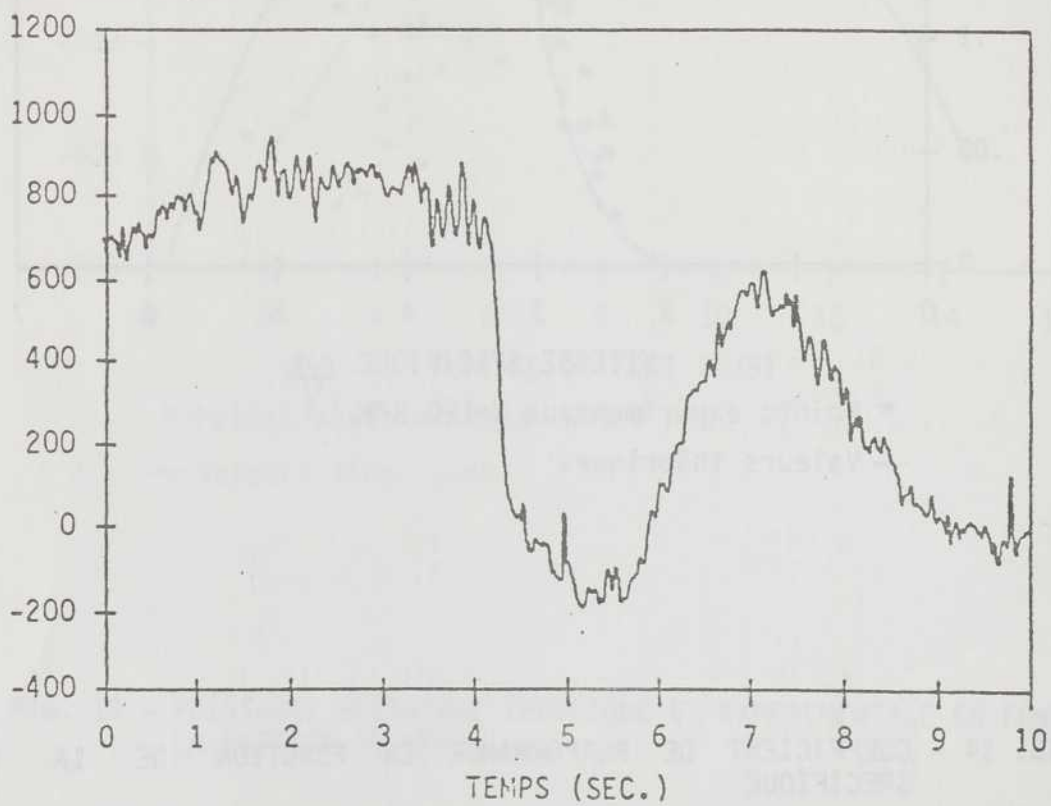


FIG. 15 - REPONSE DE L'EOLIENNE A UNE RAFALE DE VENT

TRAVAUX RÉCENTS SUR L'AÉRODYNAMIQUE DES  
ÉOLIENNES À L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

par

Pierre Vittecoq et André Laneville  
Département de génie mécanique  
Université de Sherbrooke

Présenté au

Colloque sur les éoliennes  
52<sup>e</sup> Congrès de l'ACFAS  
Québec (Québec)

9-10-11 mai 1984

## SOMMAIRE

La recherche en éolienne a débuté en 1969 à l'Université de Sherbrooke. Elle était surtout axée sur le développement de petites unités à axe horizontal. Depuis 1981, des études expérimentales portant sur l'aérodynamique du rotor Darrieus ont été effectuées dans la soufflerie du département de génie mécanique avec le support de l'IREQ et du CRSNG.

En 1981 et 1982, les premières mesures de forces aérodynamiques sur des pales droites de rotor Darrieus ont été obtenues dans l'air.

En 1983, la distribution de pression a été mesurée sur un profil NACA 0018. Le montage réalisé a permis de simuler en soufflerie la cinématique d'une pale de rotor Darrieus, dans des conditions de décrochage dynamique. Le programme actuel a pour but d'obtenir une meilleure modélisation du décrochage dynamique pour le rotor Darrieus. La communication présente brièvement le programme et les études faites à Sherbrooke depuis 1981 avec quelques résultats obtenus sur le décrochage dynamique. Une copie des acétates est ci-incluse.

REFERENCES

1. Nguyen, V.D., Vittecoq, P., Bourassa, P. et Mercadier, Y., "Etude en soufflerie d'un rotor de type Darrieus", Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, rapport MEC-81-2, août 1981 (rapport soumis à l'IREQ).
2. Vittecoq, P. et Laneville, A., "Etude en soufflerie d'un rotor de type Darrieus", rapport MEC-82-2, août 1982, (rapport soumis à l'IREQ).
3. Vittecoq, P. et Laneville, A., "The aerodynamic forces for a Darrieus rotor with straight blades: wind tunnel measurements", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics", 15 (1983) 381-388.
4. Paraschivoiu, I., "Predicted and Experimental Aerodynamic Forces on the Darrieus Rotor", Journal of Energy, Vol. 7, No. 6, Nov.-Dec., 1983, p. 610.
5. McCroskey, W.J., "Some Current Research in Unsteady Fluid Dynamics", The 1976 Freeman Scholar Lecture, Journal of Fluids Engineering, Vol. 99, March 1977.
6. McCroskey, W.J., Carr, L.W. and McAlister, K.W., "Dynamic Stall Experiments on Oscillating Air Foils", AIAA Journal, Vol. 14, No. 1. January 1976.
7. McCroskey, M.J., "The phenomenon of dynamic stall", NASA AD/A-098191, 1981.
8. Laneville, A., Vittecoq, P., "Simulation de l'écoulement autour d'un profil de pale d'un rotor Darrieus à axe vertical dans des conditions de décrochage et mesure de la distribution de pression", Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, rapport MEC-84-1, janvier 1984. (Rapport soumis à l'IREQ).

I - MESURE DES FORCES AÉRODYNAMIQUES SUR LES  
PALES DROITES D'UN ROTOR DE TYPE DARRIEUS

OBJECTIF:

- Obtenir pour un profil NACA 0018 d'une pale de rotor Darrieus en rotation les coefficients de force (normale et tangentielle) en fonction du temps.
- Obtenir les coefficients  $C_L$  et  $C_D$  statiques à faible nombre de Reynolds.
- Obtenir des informations sur le décrochage.

APPROCHE:

- Mesure des forces sur les pales droites d'un modèle placé en soufflerie en configuration de jet libre.
- Utilisation d'un système de balance à jauges semi-conductrices et transmission des données par contact tournant.

CONDITION DES ESSAIS

$$10^4 < \text{Rey} < 5 \times 10^4$$

$$1 < \lambda < 5$$

Modèle: Darrieus droit      hauteur 61 cm  
   diamètre 61 cm  
   nombre de pales 1 ou 2  
   corde  $c = 6.1$  cm et  $3.05$  cm

Résultats: réf. 1 et 2.

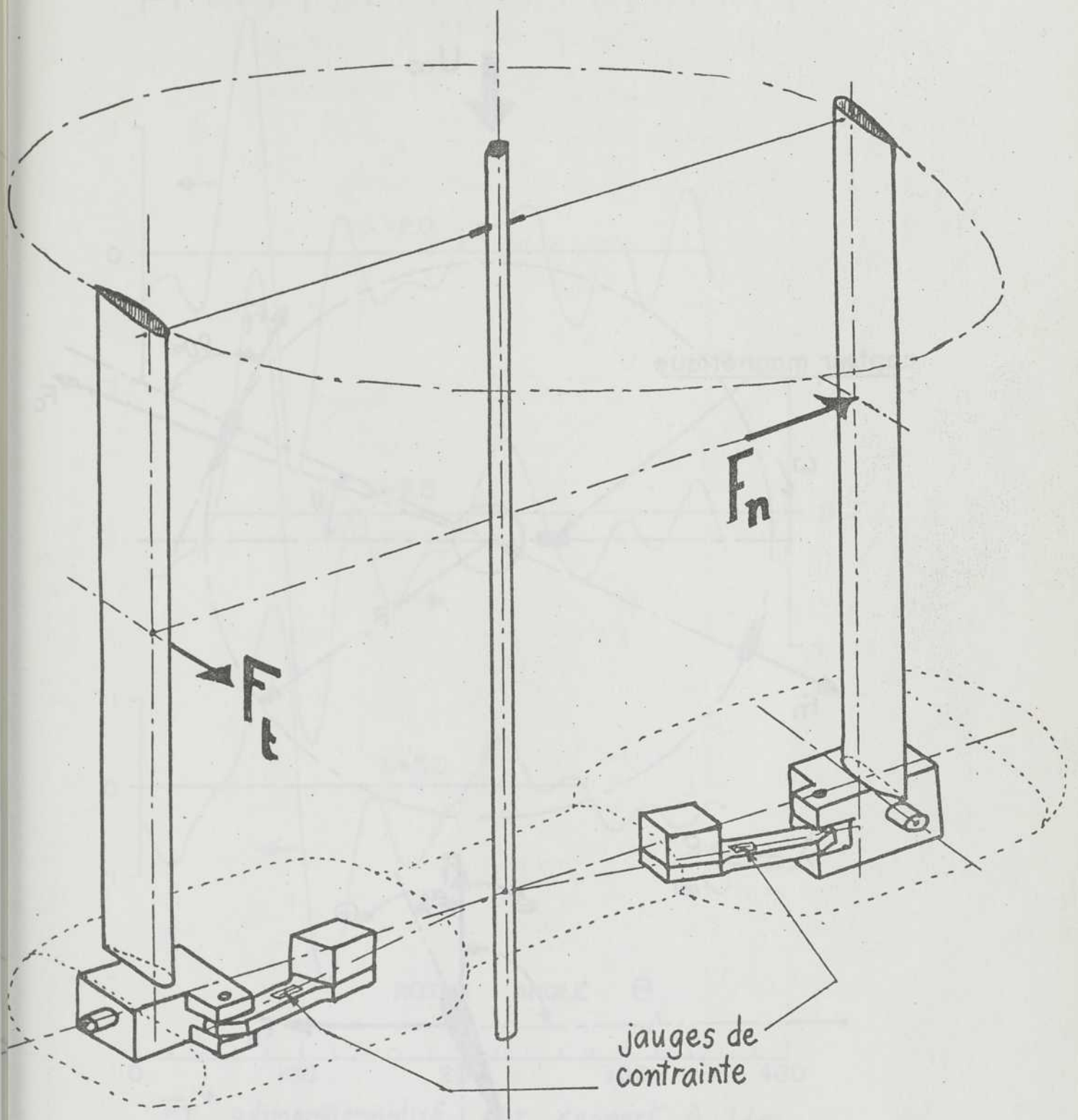


Fig. 12: Schéma du système de mesure de force

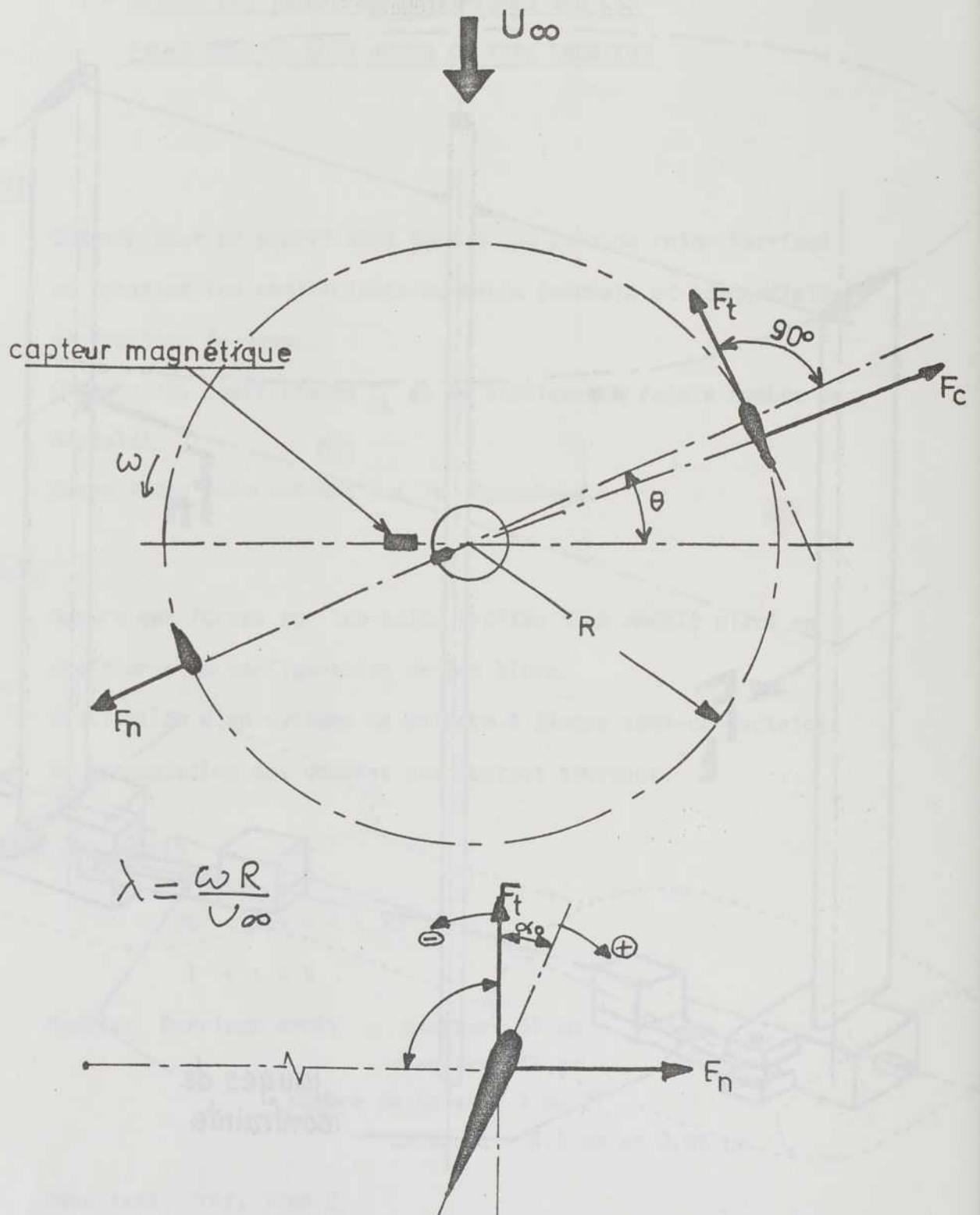
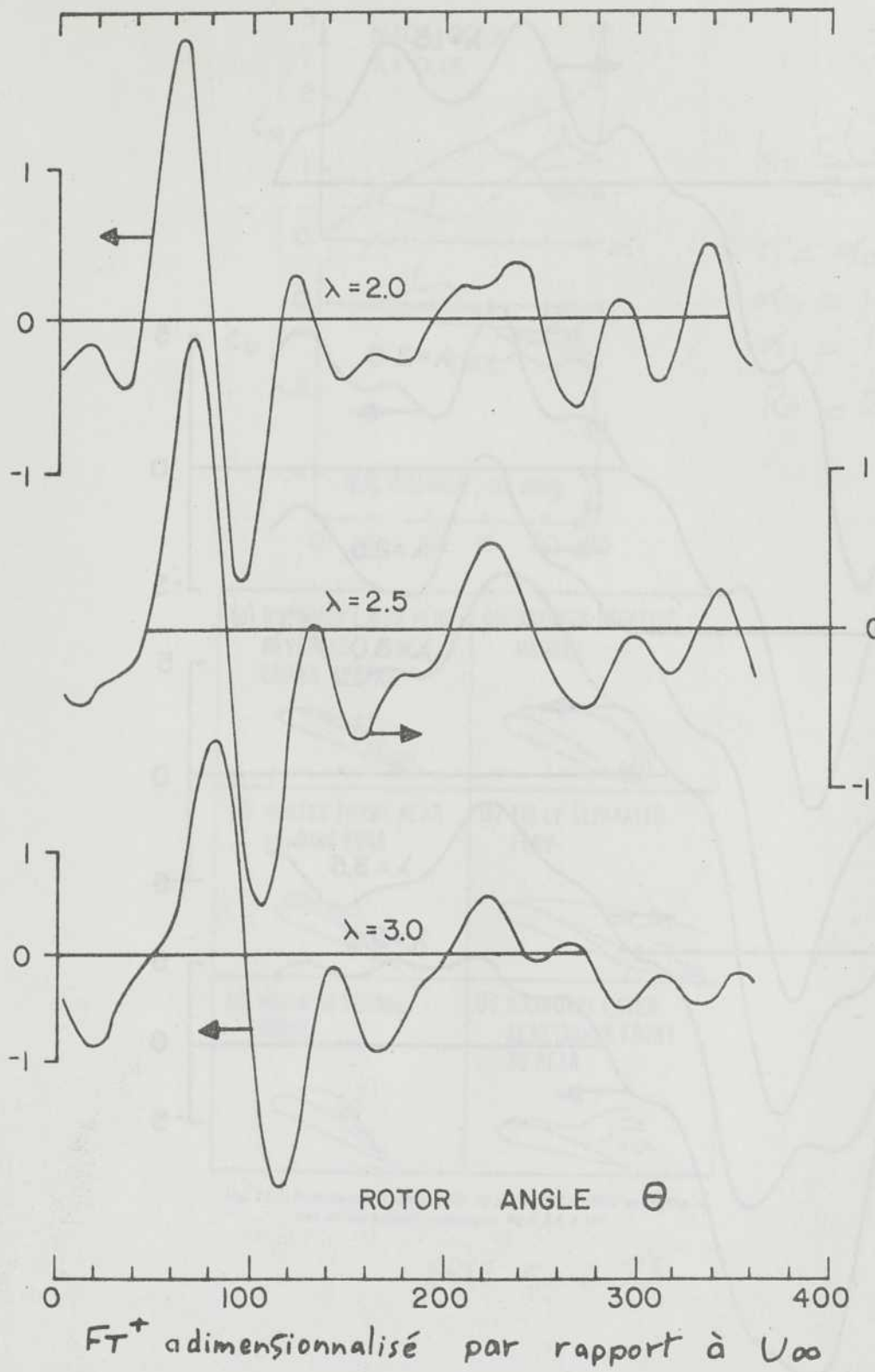
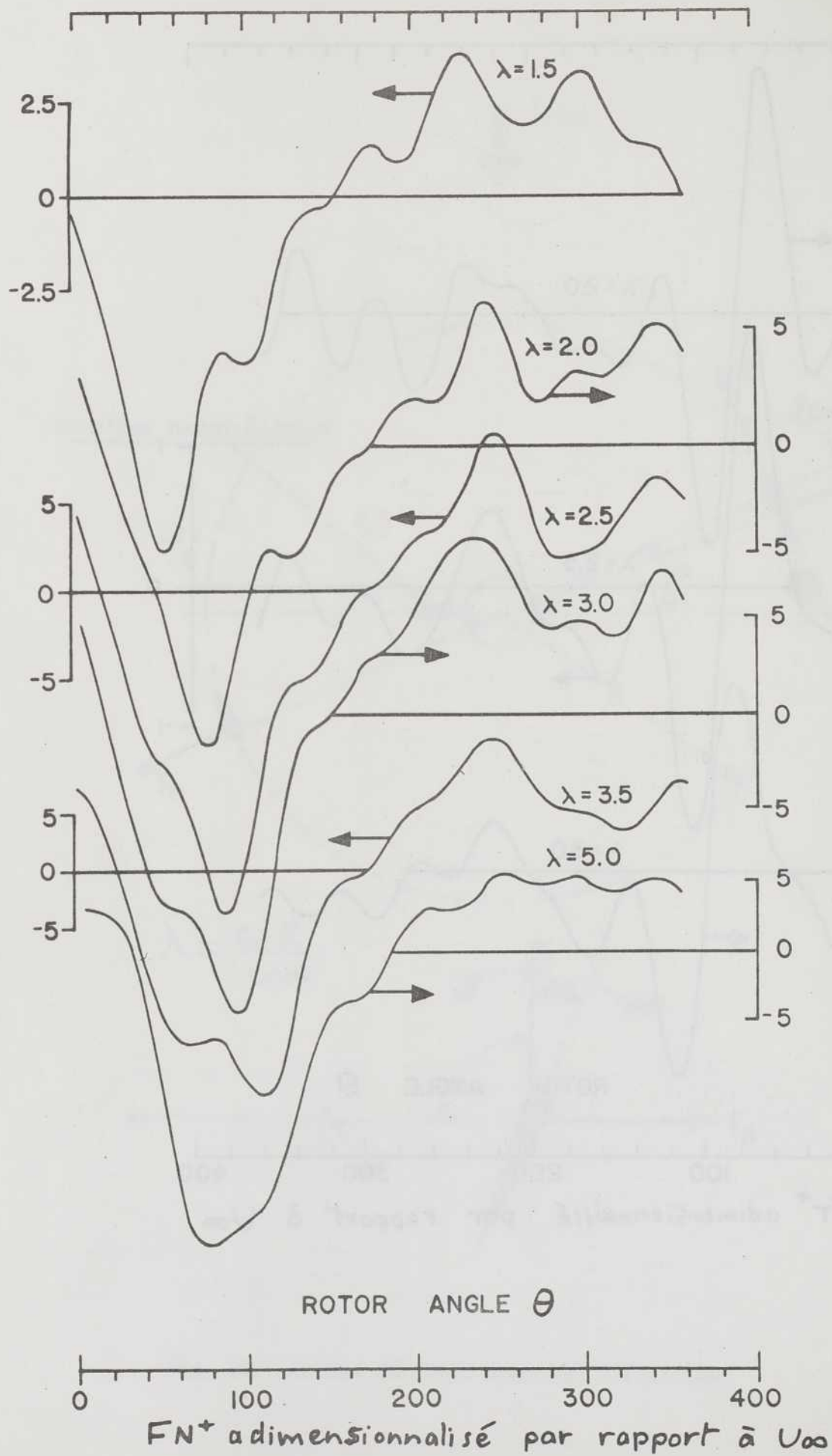
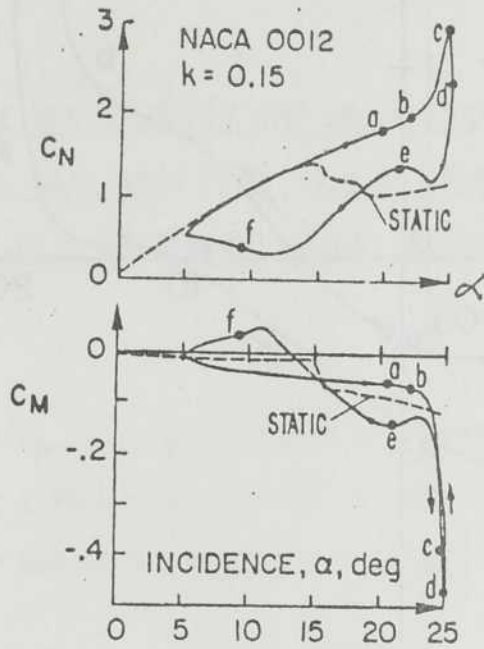


Fig. 13: Schéma du rotor avec les définitions







$$k = \frac{c \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{\max}}{2\alpha_1 U_{\infty}} = \frac{c\omega}{2U_{\infty}}$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \sin \omega t$$

$$\alpha_0 = 15^\circ$$

$$\alpha_1 = 10^\circ$$

$$Re = 2,5 \times 10^6$$







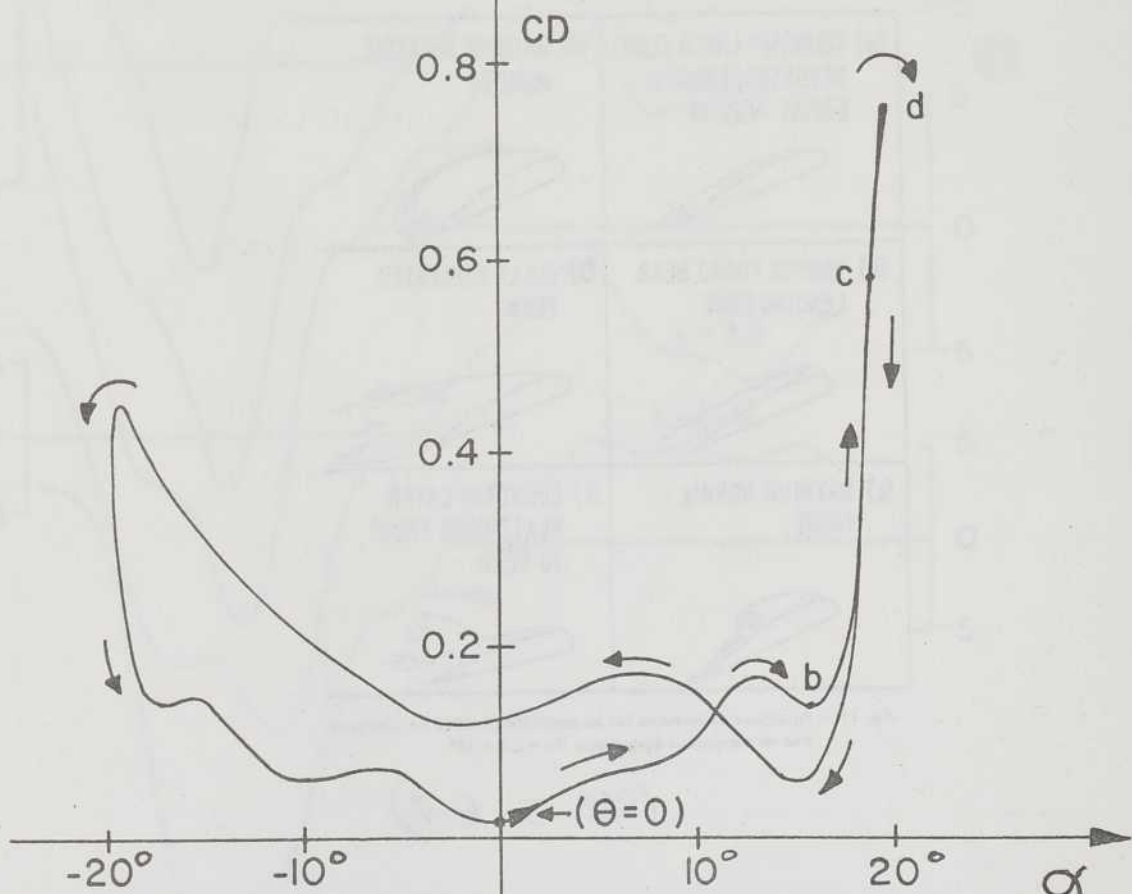
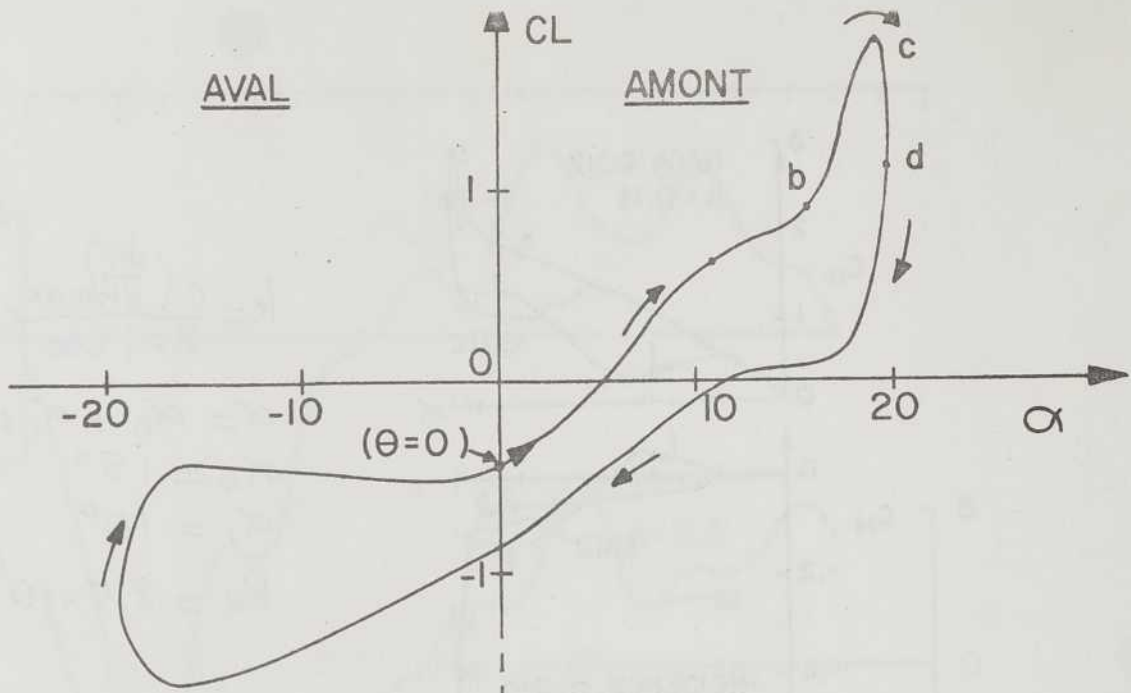
<p>(a) BOUNDARY LAYER FLOW REVERSES, LARGE EDDIES APPEAR</p> 	<p>(d) MAXIMUM NEGATIVE MOMENT</p> 
<p>(b) VORTEX FORMS NEAR LEADING EDGE</p> 	<p>(e) FULLY SEPARATED FLOW</p> 
<p>(c) MAXIMUM NORMAL FORCE</p> 	<p>(f) BOUNDARY LAYER REATTACHES FRONT TO REAR</p> 

Fig. 11 - Principaux événements liés au profil NACA 0012 en configuration de décrochage dynamique.  $Re = 2,5 \times 10^6$

(Réf. 5 - 6 - 7)



$$k = \left| \frac{c(d\alpha/dt)_{\max}}{2(\alpha_{\max})\omega R} \right| = \frac{c}{2R^*} \frac{1}{(\lambda-1) \arctg(1/\sqrt{\lambda^2-1})}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}$$

Résultats de Sherbrooke pour le Darrieus

NACA 0018     $Re_{yc} = 38000$      $\lambda = 3$      $\alpha_0 = 0$      $n = 2$      $k = 0.147$   
 angle de décrochage statique mesuré  $\alpha = 10.5^\circ$

II - MESURE DES DISTRIBUTIONS DE PRESSION SUR UN  
PROFIL NACA 0018 D'UNE PALE DE DARRIEUS ET  
ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT AUTOUR DU PROFIL

OBJECTIFS:

- Obtenir  $C_p$ ,  $C_L$ ,  $C_M$  statiques et dynamiques (pour le Darrieus)
- Etudier l'écoulement autour du profil
- Obtenir des informations sur le décrochage dynamique

APPROCHE:

1. Donner au profil un mouvement qui permet d'obtenir une analogie cinématique avec le Darrieus pour la vitesse relative de l'air.
2. Pressions de surface mesurées en fonction du temps en 40 points répartis sur le profil à l'aide d'un seul capteur de pression et d'un scanivalve.
3. Visualisation (à venir)

CONDITIONS GÉNÉRALES DES ESSAIS:

- Configuration jet libre
- $4 \times 10^4 < \text{Rey}_c < 6 \times 10^5$
- $0 < \lambda < \infty$
- $-20^\circ < \alpha_0 < +20^\circ$

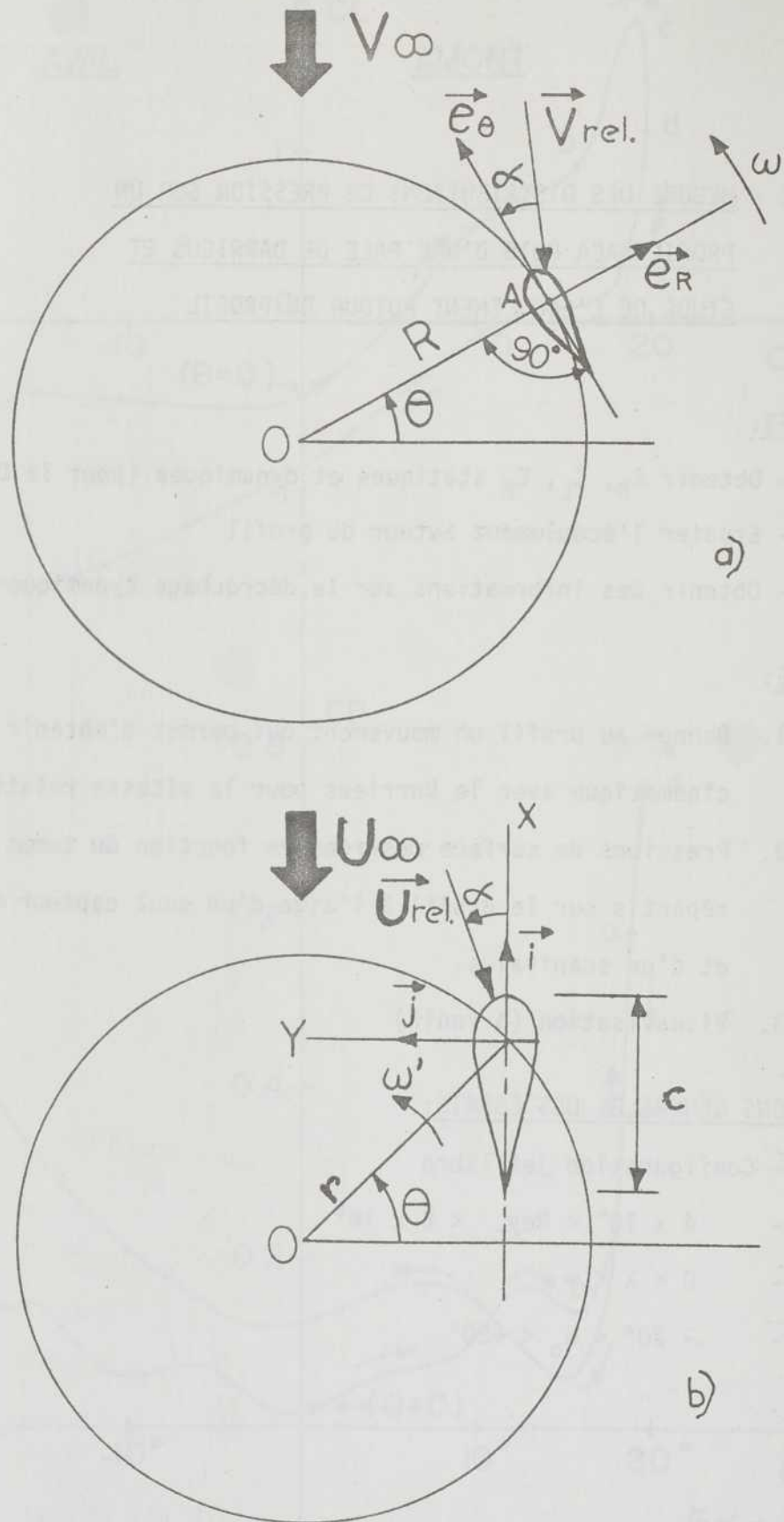
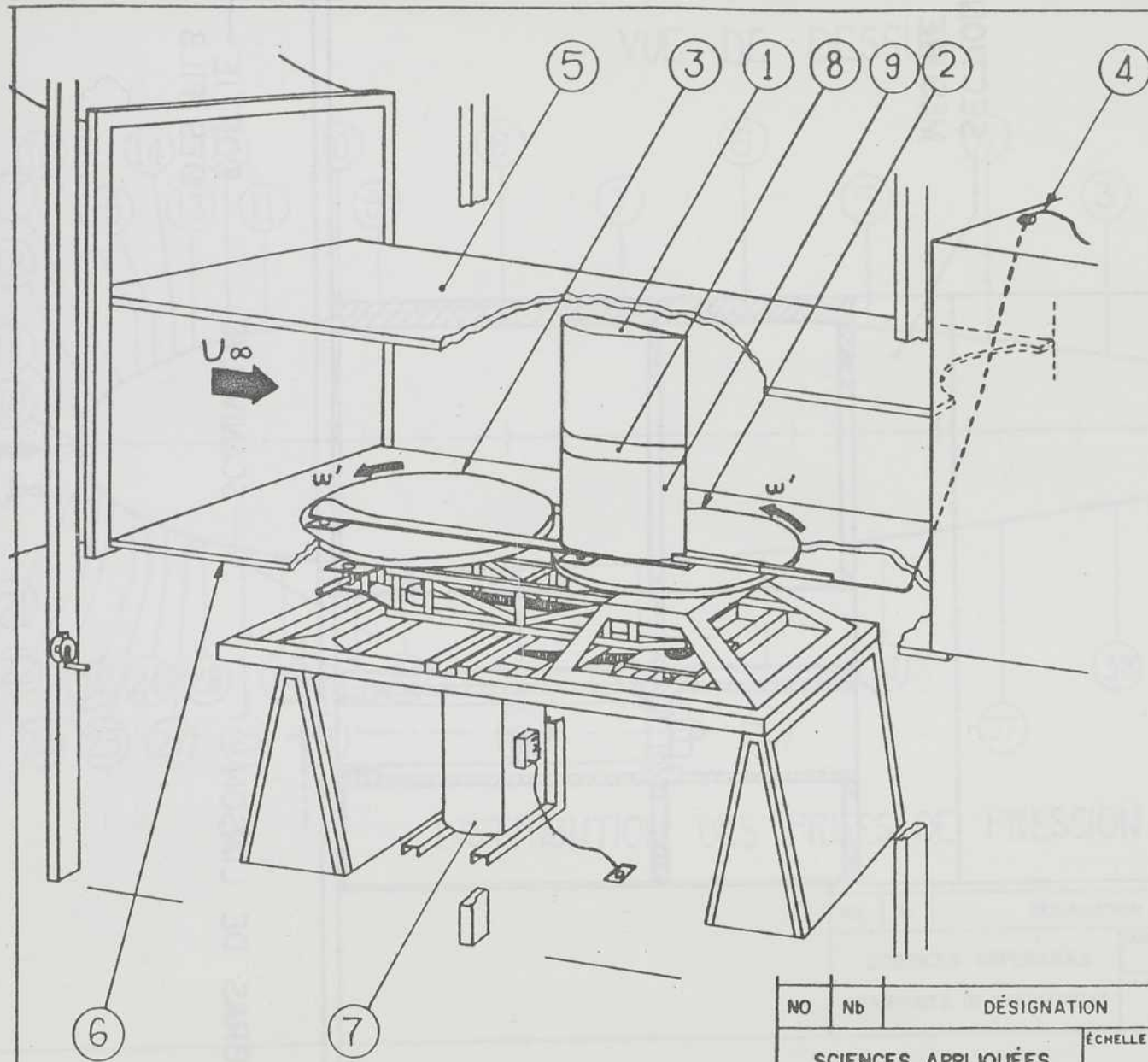


Fig. 1 : Schéma du rotor avec définitions  
 a) prototype      b) modèle

Fig. 2 : Schéma d'ensemble du montage expérimental



9	PALE (SECTION INFÉRIEURE)
8	PRISES DE PRESSION
7	MOTEUR
6	FAUX-PLANCHER
5	FAUX-PLAFOND
4	FILS
3	PLATEAU AMONT
2	PLATEAU AVANT
1	PALE (SECTION SUPÉRIEURE)
No.	Description

NO	Nb	DÉSIGNATION	MATIÈRE		REMARQUES	
			ÉCHELLE	DESSINATEUR	DATE	APPROB.
SCIENCES APPLIQUÉES						
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE			TITRE		DESSIN NO	
			SCHEMA DE L'EXPERIENCE			

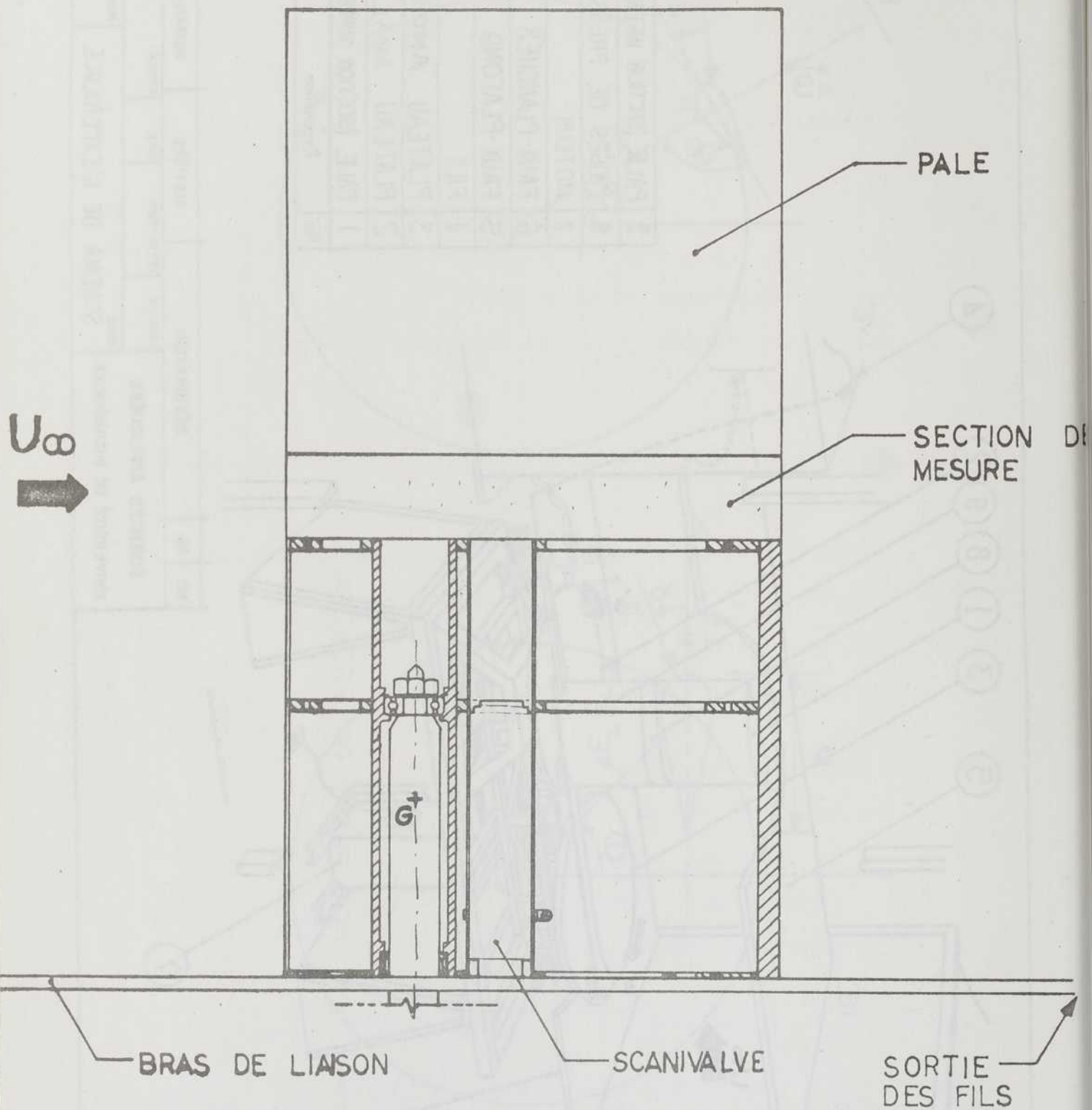
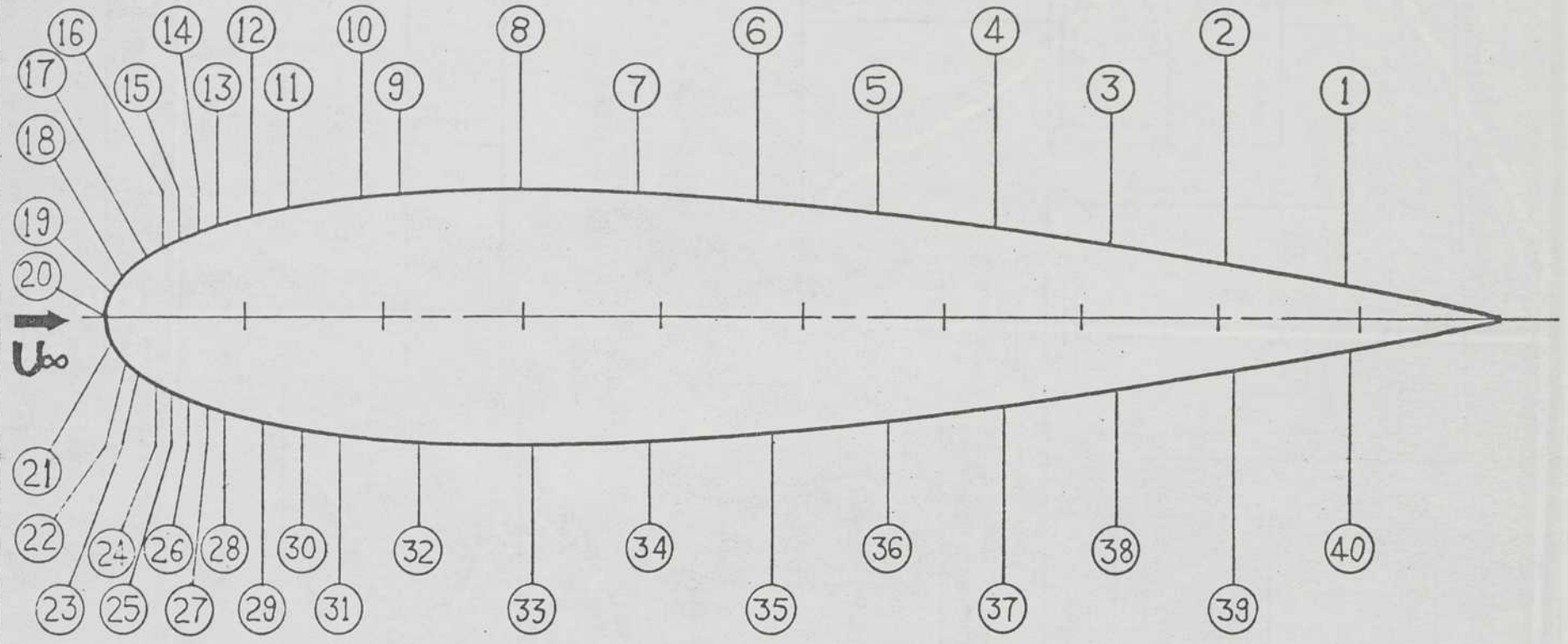


Fig. 7 : Schéma de la pale

# VUE DE DESSUS



## DISTRIBUTION DES PRISES DE PRESSION

NO	Nb	DÉSIGNATION	MATIÈRE		REMARQUES	
		ÉCHELLE	DESSINATEUR	DATE	APPROB.	DATE
		TITRE				DESSIN NO
		SCIENTES APPLIQUÉES				
		UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE				

Fig. 9 : Schéma du profil indiquant la position des prises de pression

SCHEMA DE LA CHAINE DE MESURE

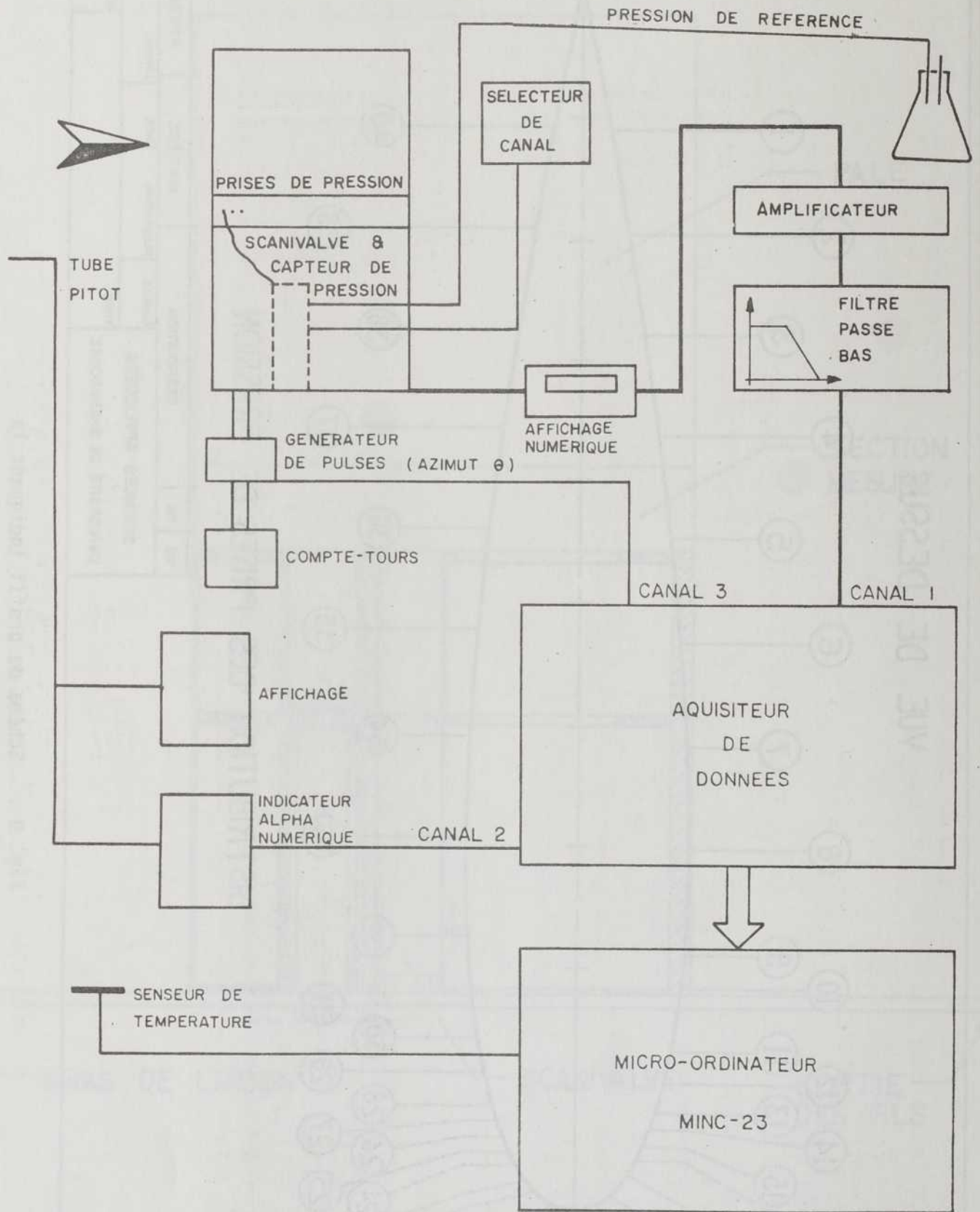


Fig. 10 : Ensemble du système de mesure, d'acquisition et de traitement

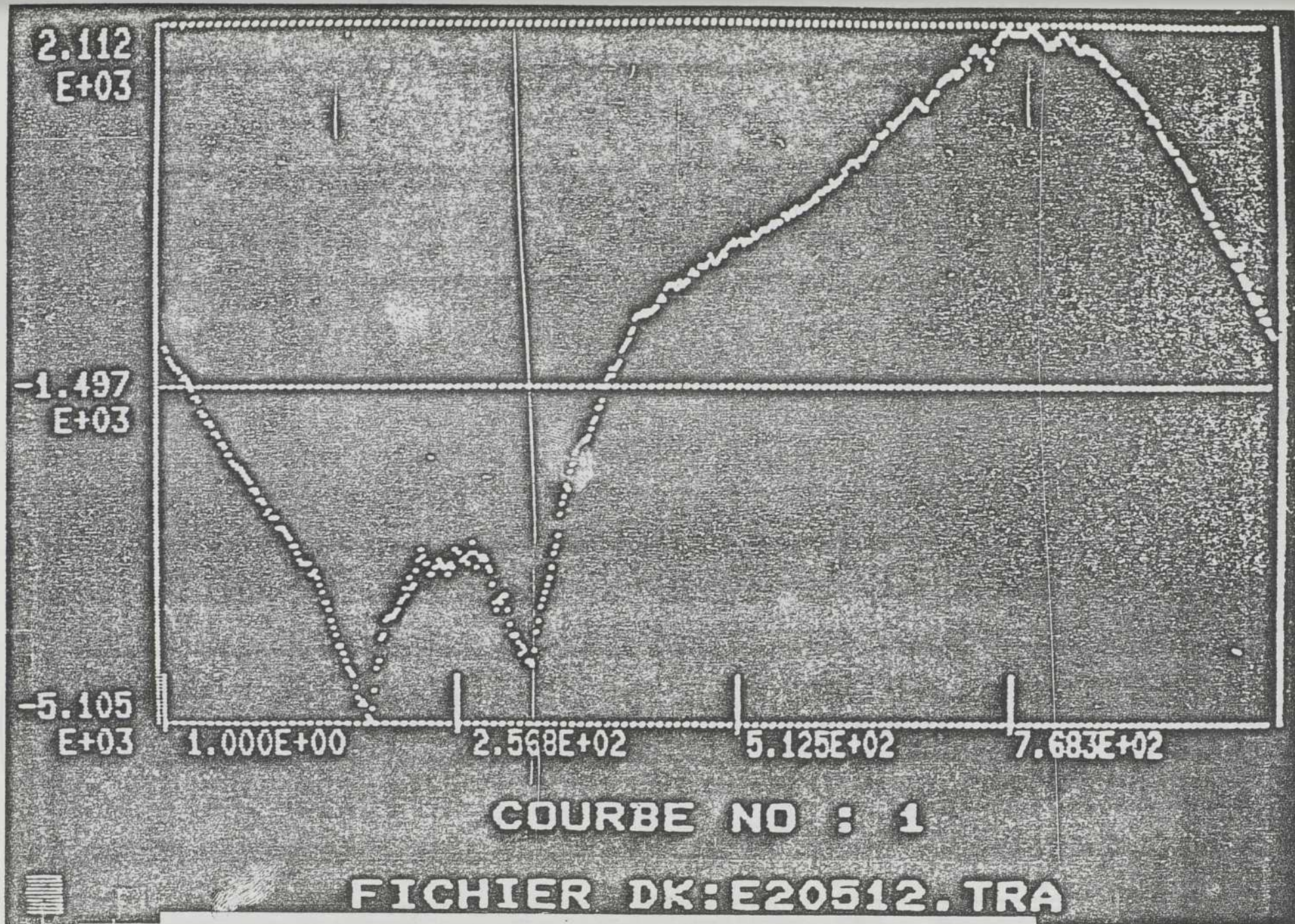


Fig. 25 : Signal de la prise no. 12 pour les conditions  $\lambda = 2$ ,  $Re\gamma = 153\ 000$  et  $r = 0.3$  m, en fonction de la position sur 1 tour (équivalent à 1024 points).

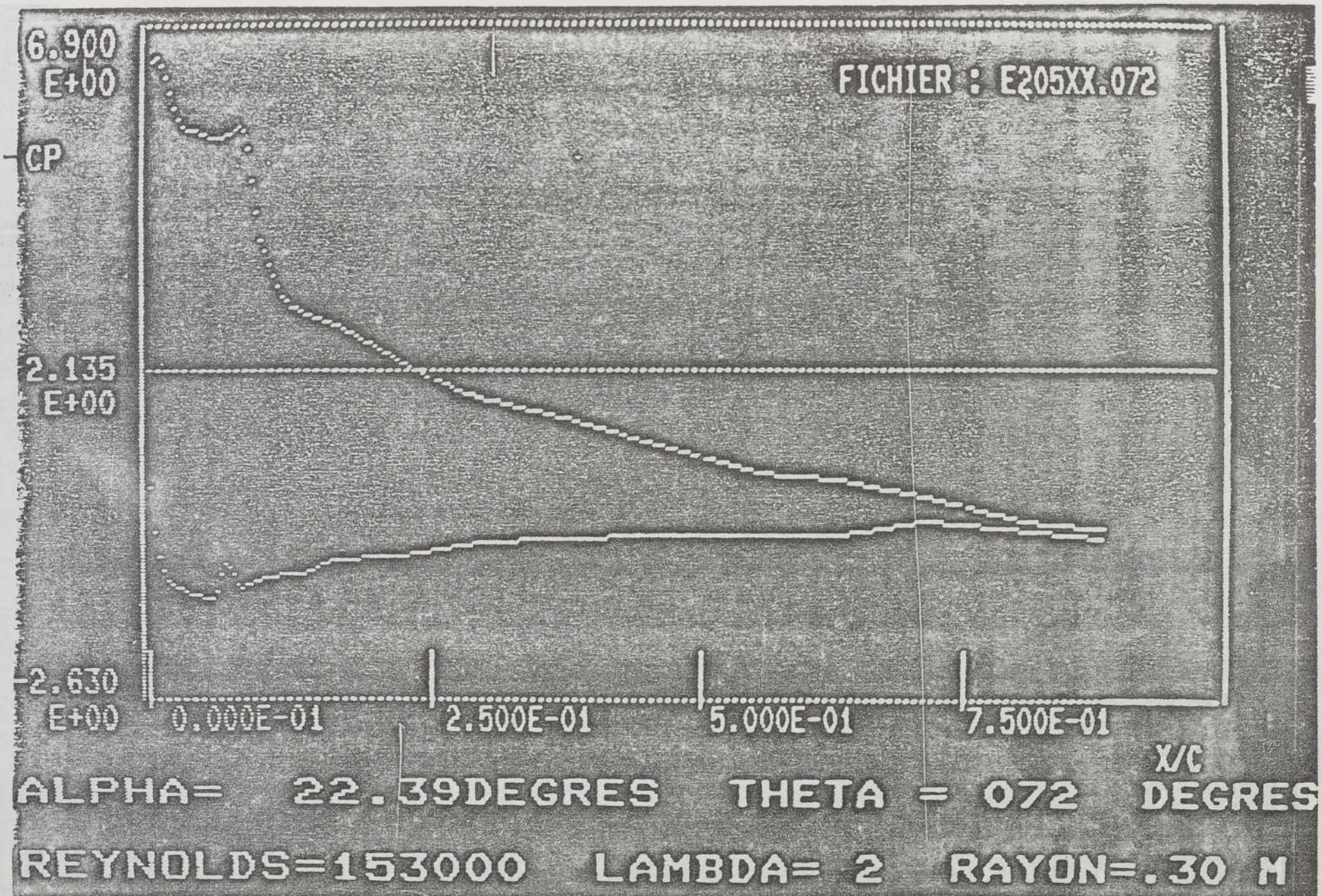
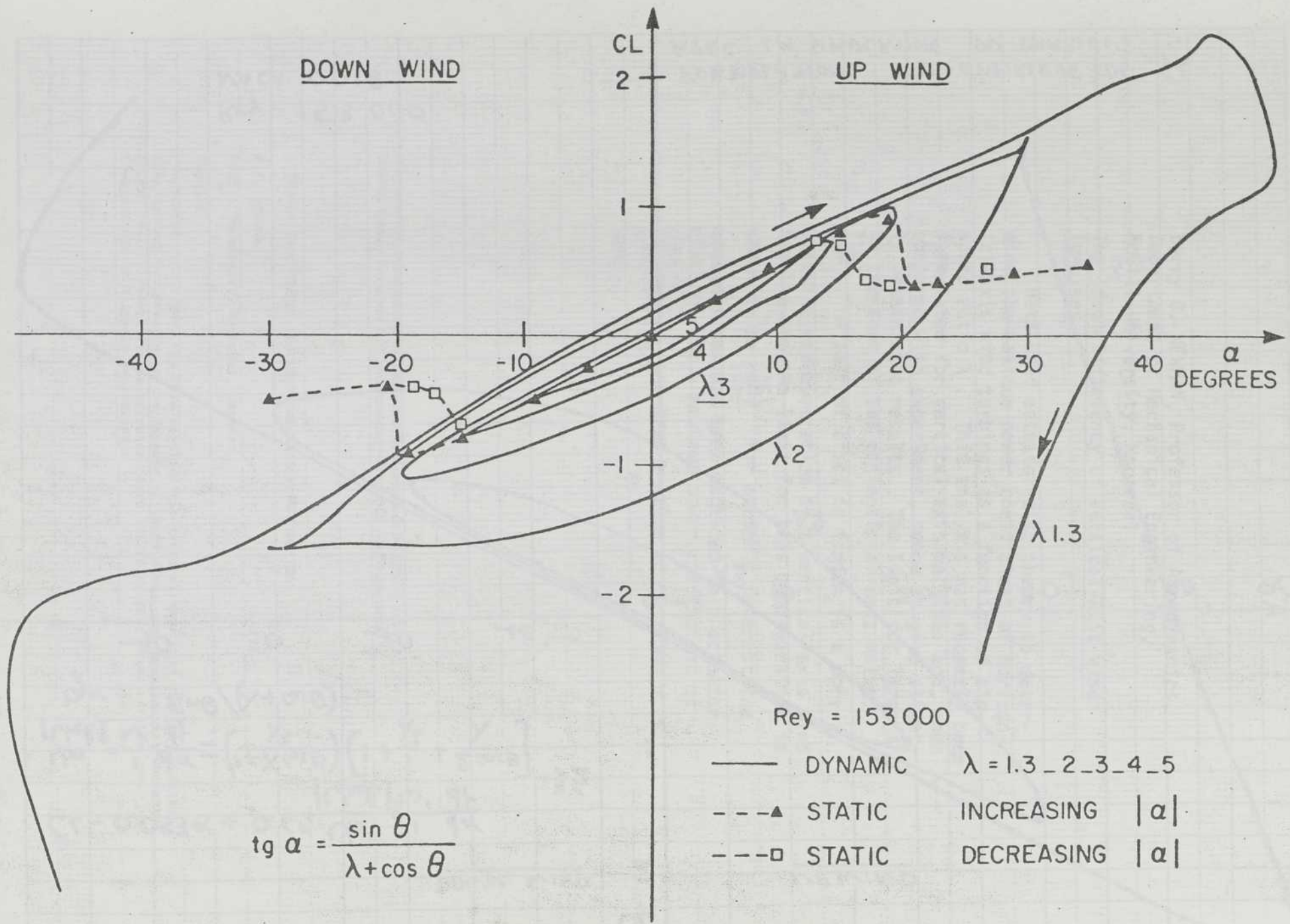


Fig. 23. Distribution de la pression avec décrochage en fonction de  $x/c$ .  
(adimensionnalise par rapport à  $U_\infty$ )

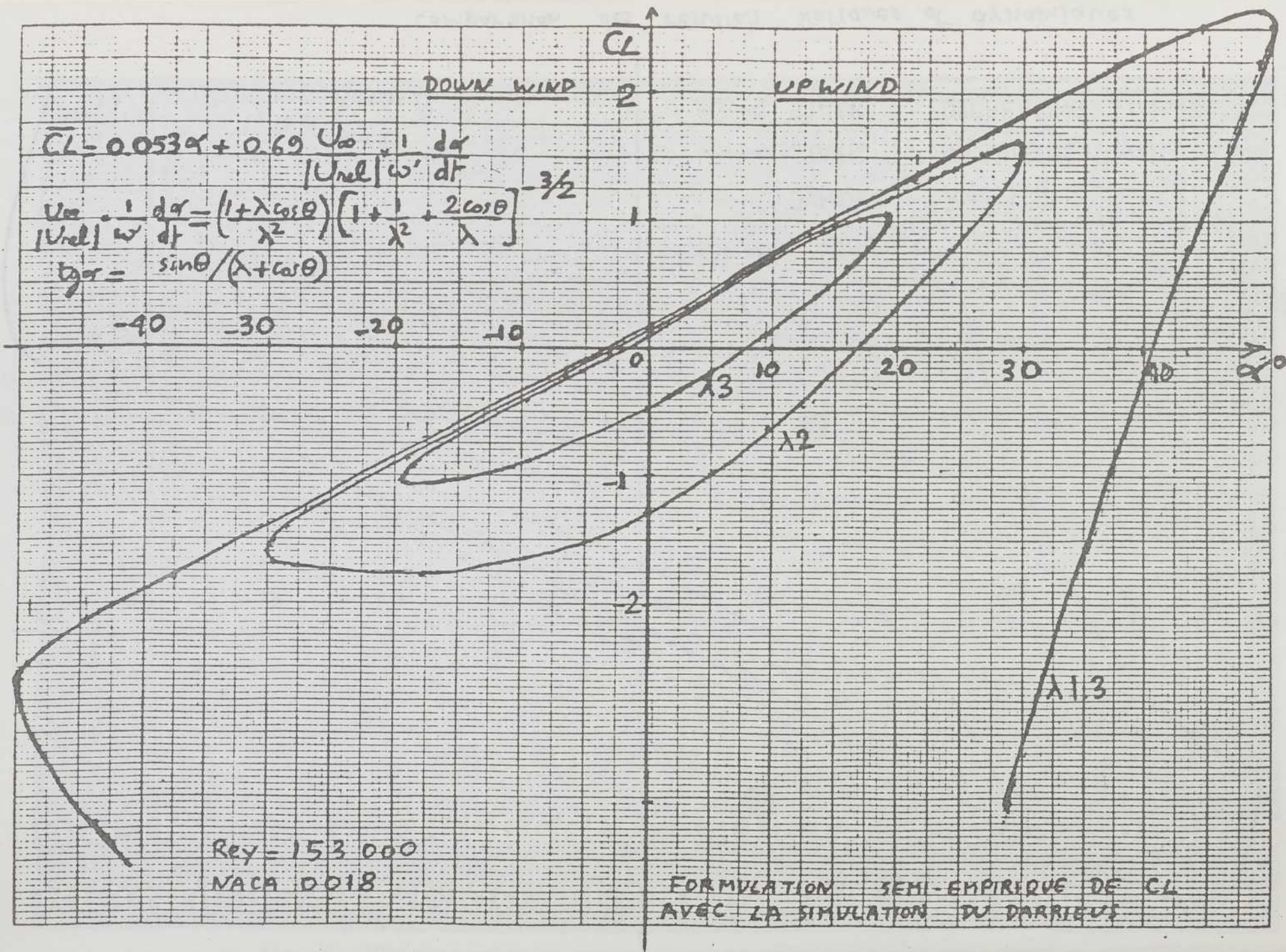
Fig 23. Distribution de la pression avec décrochage en fonction de  $x/c$ .



$$\text{tg } \alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}$$

- Rey = 153 000
- DYNAMIC  $\lambda = 1.3 \text{ } 2 \text{ } 3 \text{ } 4 \text{ } 5$
  - ▲ STATIC INCREASING  $|\alpha|$
  - STATIC DECREASING  $|\alpha|$

Comparaison des résultats statiques et dynamiques



Barry G. NEWMAN, Professor of Aerodynamics,  
Department of Mechanical Engineering,  
McGill University, Montreal

The Ideal Efficiency of Vertical-Axis Wind  
Turbines

Betz used actuator-disc theory to determine the maximum power coefficient of horizontal-axis wind turbines as a function of tip-speed ratio  $\lambda$ . This analysis has recently been formulated for vertical-axis machines and, when compared with experiment, seems to give slightly pessimistic results. The limit for large  $\lambda$  is the same as the conventional Betz value,  $\left(\frac{16}{27}\right)$ . A pair of discs in tandem is a more suitable representation of a vertical-axis wind turbine and the limit for this configuration is shown to be  $\left(\frac{16}{25}\right)$ . For academic interest the analysis has now been extended to  $n$  actuator discs giving a maximum power coefficient of  $\left(\frac{8n(n+1)}{3n(2n+1)^2}\right)$  and thus a value of  $\frac{2}{3}$  when  $n$  is large.

*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 15 (1983) 347-355  
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands

347

ACTUATOR-DISC THEORY FOR VERTICAL-AXIS WIND TURBINES

B.G. NEWMAN

McGill University, Montreal, Canada

SUMMARY

Actuator disc theory has been applied to a vertical axis wind turbine to determine optimum performance in the absence of blade drag. An analysis with uniform inflow factor through tandem actuator discs indicates that these earlier predictions may be slightly pessimistic.

SIMULATION DU TRAIN DE PUISSANCE D'UN AEROGENERATEUR DE TYPE DARRIEUS  
POUR L'ETUDE DES VARIATIONS DE PUISSANCE

G.-E. APRIL

G. OLIVIER

Département de Génie électrique  
Ecole Polytechnique de Montréal  
C.P. 6079, Succursale "A", Montréal H3C 3A7

Résumé: Les éoliennes de type Darrieus, avantageuses à plusieurs points de vue, souffrent cependant de quelques problèmes dont les fluctuations violentes et inévitables du couple moteur ne constituent pas le moindre. Pour étudier les effets de ces variations sur la puissance générée et pour évaluer les palliatifs possibles, nous avons construit, avec l'aide financière de l'IREQ, un banc d'essai capable de simuler, à l'échelle, le couple à l'axe d'une telle machine. Nous avons mis au point un système de commande très simple et fiable basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné et qui permet d'abaisser d'au moins un ordre de grandeur les oscillations de la puissance produite. D'autres techniques sont à l'étude et seront vérifiées sur le banc d'essai.

## 1. INTRODUCTION

Pour situer le problème posé par la gestion de la puissance produite par un aérogénérateur de type Darrieus, il convient de nous référer à la figure 1 qui montre, pour diverses conditions de vent, les variations du couple aérodynamique en fonction de la position angulaire du rotor [1].

On constate que pour toutes les conditions de vent, le couple aérodynamique présente des oscillations importantes à une fréquence égale à deux fois la vitesse de rotation et en particulier, que pour la majorité des conditions, ces oscillations atteignent une amplitude considérablement supérieure à la valeur moyenne du couple.

Il en résulte que, pour toutes les approches simples à la génération électrique, des oscillations fortes et rapides de la puissance seront transmises au réseau, ce qui, pour de grands aérogénérateurs reliés à un petit réseau, pourrait avoir une influence désastreuse sur la stabilité de ce dernier.

C'est dans le but d'étudier ces variations et les palliatifs possibles que nous avons conçu et construit, avec le support financier d'IREQ, le banc d'essai décrit ci-dessous.

## 2. LE BANC D'ESSAI

Conceptuellement, le banc d'essai, figure 2, est constitué de trois sections principales:

- A) Le simulateur d'éolienne
- B) La génératrice électrique
- C) L'électronique de commande et de mesure

Nous allons maintenant porter successivement notre attention sur chacune de ces sections.

## 3. LE SIMULATEUR D'EOLIENNE

Celui-ci est lui-même constitué de quatre éléments essentiels, soit:

- i) Le moteur d'entraînement
- ii) Le volant d'inertie
- iii) Le convertisseur
- iv) Le micro-ordinateur de gestion

Les figures 3 et 4 montrent ces éléments et leurs rapports fonctionnels (à l'exclusion de l'inertie).

### i) Le moteur d'entraînement

Il s'agit d'une machine à courant continu à excitation séparée (Leroy-Somer LSC1321 M22) spécifiée pour une puissance nominale de 6 kW à une vitesse de 1500 T/min.

Il convient de rappeler ici qu'en première approximation et avec une précision suffisante pour les besoins de notre étude, le couple électromagnétique d'une machine de ce type est proportionnel au courant d'induit et c'est donc ce dernier qui servira de variable asservie, en lieu et place du couple dont la mesure aurait demandé des instruments coûteux et qu'il nous aurait été impossible d'obtenir à l'intérieur des limites de temps qui nous étaient imposées pour cette étude.

### ii) L'inertie

L'inertie du système est constituée principalement d'un volant d'acier de 16" de diamètre, taillé dans une feuille de 10 pouces d'épaisseur. Il en résulte une inertie de 5 kg-m<sup>2</sup> ce qui, à la vitesse nominale, permet d'accumuler une énergie équivalente à 12.5 secondes de la puissance nominale du système. Les résultats escomptés seront en conséquence, conservateurs, car l'inertie des pales du système original accumule une énergie équivalente à 16 secondes de la puissance nominale.

### iii) Le convertisseur

Il s'agit d'un convertisseur classique à courant de circulation (fig. 5) [2] dont l'opération est gérée par un micro-ordinateur dédié utilisant une variante d'un logiciel décrit ailleurs [5].

### iv) Le micro-ordinateur de gestion (#1, fig. 3)

Il s'agit d'un micro-ordinateur dédié basé sur un micro-processeur de type 6502, entouré de deux circuits d'interface de type 6522 (VIAs) et d'une faible quantité de mémoire "RAM" et "EPROM" (figure 6).

Pour les fins de notre étude, le micro-ordinateur est programmé pour produire un couple qui dépende de façon quasi-sinusoidale de la position des pales simulées, d'une part, et de la force du vent d'autre part.

L'information sur la force du vent, ou plus exactement sur le couple moyen à produire, est communiquée au micro-ordinateur sous la forme d'un nombre de huit bits appliqué sur un des ports d'entrée. Un deuxième port d'entrée reçoit une deuxième information de huit bits qui établit l'amplitude de l'oscillation de couple désiré. Cette amplitude est ajustable entre 0% et 120% environ. Un bit d'entrée informe le micro-processeur quant au fait que la machine simulée soit ou non auto-démarrante. Cet input nous permet de démarrer le simulateur sans le concours de la génératrice lorsque des tests de commande de la puissance sont désirés, tout en permettant des tests de démarrage par entraînement. Le micro-ordinateur de gestion reçoit en outre les impulsions d'un détecteur magnétique de soixante dents, monté sur l'arbre

de la machine. Cette information permet au micro-ordinateur d'évaluer la position et la vitesse des pales en tout temps.

Enfin, le micro-ordinateur de gestion reçoit les données d'un convertisseur analogique à numérique qui l'informe de la valeur du courant d'induit, donc du couple. Armé de ces informations, le micro-ordinateur de gestion (#1, figure 3) évalue la tension requise au moteur, suivant un algorithme P.-I. modifié. Cette information, sous forme d'un nombre de huit bits, est transmise au micro-ordinateur #2 (figure 3) dont la fonction est de produire les impulsions d'allumage.

Il convient de mentionner à ce point que tout autre type de couple variable pourrait être simulé en changeant simplement un tableau dans le "EPROM".

#### 4. LA GENERATRICE

Pour notre étude, nous avons utilisé une machine asynchrone à rotor bobine et la plaque signalisatrice se lit: CGE # 291538, 4 KW, 5 KVA, 1200 RPM. Un rotor synchrone et un rotor à cage d'écureuil sont également disponibles pour cette machine.

Le circuit extérieur du rotor est constitué d'un redresseur triphasé à diodes, d'une inductance de lissage et d'un onduleur qui sera décrit ci-dessous sous la rubrique "Electronique de commande".

La figure 7 illustre l'heureuse relation qui existe, pour ce type de montage, entre le couple électromagnétique et le courant dans l'inductance de lissage [5].

#### 5. ELECTRONIQUE DE COMMANDE ET DE MESURE

L'électronique de commande de la génératrice ainsi que ses relations avec cette dernière sont illustrées à la figure 8.

Elle est constituée de:

- un onduleur triphasé à huit thyristors (figure 9) abondamment décrit dans la littérature récente [3] [4] [5] [6] qui en discute également les avantages et inconvénients.
- un micro-ordinateur servant à asservir le courant dans le lien à courant continu, suivant une consigne établie d'après un algorithme de commande décrit ci-dessous.

Ce micro-ordinateur, identique à celui qui a été décrit plus haut (#1, figure 3), reçoit essentiellement les mêmes informations que ce dernier, sauf que le courant mesuré est, bien sûr, celui du lien à courant continu, et que l'information sur le couple moyen devient une information sur la puissance que l'on désire retourner au réseau.

L'algorithme de commande dont nous voulions évaluer les mérites est très simple. Il consiste à maintenir constant le produit du couple électromagnétique de la génératrice par la vitesse instantanée de l'ensemble. La logique de ce choix est discutée ailleurs [7]. La réalisation de cet algorithme est facilitée par la relation de la figure 7.

L'électronique de mesure est surtout constituée d'un transducteur de puissance à effet Hall et de divers enregistreurs.

## 6. RESULTATS

Le tableau 1 résume les détails principaux des essais effectués.

La figure 10 montre les résultats de contrôle obtenus lorsque la génératrice est opérée sans algorithme de commande (rotor en court-circuit). A noter, les importantes oscillations de la puissance produite.

La figure 11 illustre quelques-uns des résultats obtenus lorsque la commande est en place. Le résultat se passe de commentaires.

La figure 12 illustre la perte partielle de la capacité de commande qui résulte d'une opération trop proche de la vitesse synchrone. Il convient de noter ici que, contrairement à ce qui se produit avec une machine à cage d'écureuil, l'efficacité du montage n'exige pas l'opération dans cette région car la puissance rotorique n'est pas dissipée mais retournée au réseau.

Les figures 13 et 14 montrent respectivement les essais de démarrage et de freinage dynamique.

Pour une discussion plus complète, le lecteur devra se référer au rapport soumis à l'I.R.E.Q. à la fin des essais [8].

## 7. CONCLUSION

Un simulateur d'éolienne a été construit et a permis de vérifier la faisabilité d'une stratégie de lissage de la puissance électrique produite par un aérogénérateur de type Darrieus.

D'autres types de génératrices et de convertisseurs sont présentement à l'étude et feront l'objet de communications futures s'ils s'avèrent intéressants.

## 8. REFERENCES

- [1] BEAULIEU, G., MASSE, B., DUBE, B., "Darrieus Wind Turbine Power Train Dynamics", Wind and Solar Energy Technology Conference, Kansas City, avril 1982.
- [2] MOLTGEN, G., "Line Commutated Thyristor Converters", Siemens Co. et Pitman Publishing, Londres, 1972.
- [3] STEFANOVIC, V.R., "Power Factor Improvement with a Modified Phase-Controlled Converter", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-15, No. 2, mars-avril 1979, pp. 193-201.

- [4] OLIVIER, G., STEFANOVIC, V.R., "Thyristor Current Source with an Improved Power Factor", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-29, No. 4, novembre 1982, pp. 299-307.
- [5] OLIVIER, G., "Etude comparative et commande de convertisseurs triphasés avec application aux machines électriques", Thèse de doctorat, Université de Concordia, janvier 1982.
- [6] OLIVIER, G., STEFANOVIC, V., APRIL, G.-E., "Evaluation of Phase-Commutated Converters for Slip-Power Control in Induction Drives", IEEE-1981 Industry Applications Society, Annual Meeting, Philadelphie, 4 au 6 octobre 1981, pp. 536-542.
- [7] G.-E. APRIL, G. OLIVIER, R.-P. BOUCHARD, "Control Schemes for Darrieus Wind Turbines", Energex, Regina, du 13 au 18 mai 1984, pp. 639-644.
- [8] G. OLIVIER, G.-E. APRIL, "Etude de faisabilité d'une commande de puissance pour éolienne Darrieus avec génératrice asynchrone", Ecole Polytechnique, Rapport #CDT P-783, janvier 1983, Rapport technique No. EP-83-R-25, 90 pages.

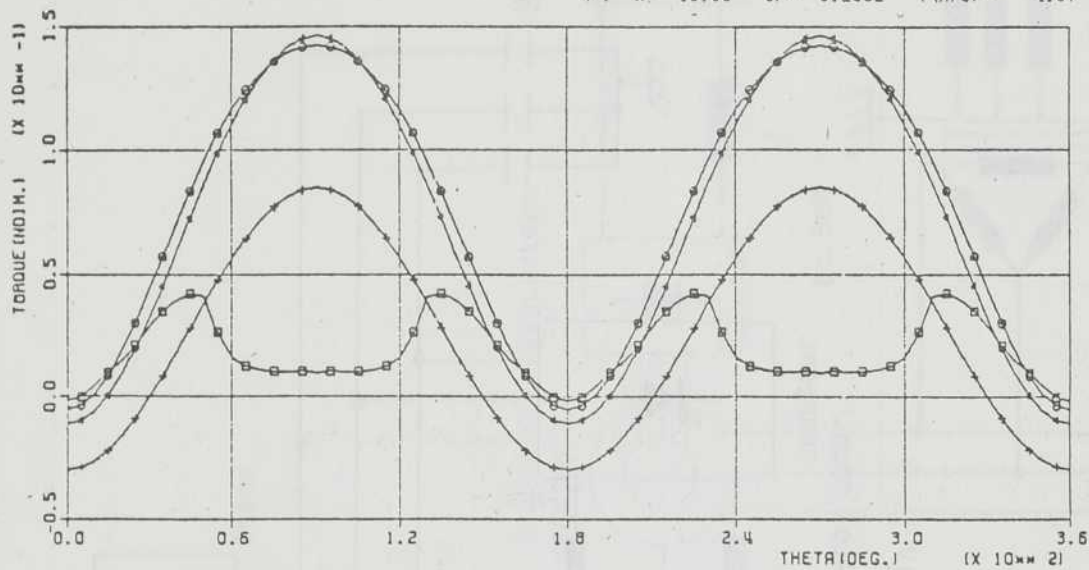
Order	Year	Author(s)	Title	Journal/Source	Page(s)
1	1982	OLIVIER, G., STEFANOVIC, V.R.	"Thyristor Current Source with an Improved Power Factor"	IEEE Transactions on Industrial Electronics	299-307
2	1982	OLIVIER, G.	"Etude comparative et commande de convertisseurs triphasés avec application aux machines électriques"	Thèse de doctorat, Université de Concordia	janvier 1982
3	1981	OLIVIER, G., STEFANOVIC, V., APRIL, G.-E.	"Evaluation of Phase-Commutated Converters for Slip-Power Control in Induction Drives"	IEEE-1981 Industry Applications Society, Annual Meeting	536-542
4	1984	G.-E. APRIL, G. OLIVIER, R.-P. BOUCHARD	"Control Schemes for Darrieus Wind Turbines"	Energex, Regina	639-644
5	1983	G. OLIVIER, G.-E. APRIL	"Etude de faisabilité d'une commande de puissance pour éolienne Darrieus avec génératrice asynchrone"	Ecole Polytechnique, Rapport #CDT P-783	90 pages

TABLEAU 1 - POINTS EXPÉRIMENTAUX

Point	Vitesse t/min	$I_{\ell}$ (A)		P (kW)		$Q_1$ (kvars)		$S_1$ (kVA)		$S_t$ (kVA)		$E_d$ V	$I_d$ A	$P_r$ W
		6T	8T	6T	8T	6T	8T	6T	8T	6T	8T			
1	1405	13.0	9.3	-2.72	-2.84	4.30	2.01	5.08	3.48	5.18	3.70	-15.5	25	-385
2	1405	11.9	8.5	-2.48	-2.62	4.02	1.91	4.72	3.24	4.74	3.38	-15	22	-330
3	1405	4.70	3.95	-0.86	-1.08	1.63	1.04	1.84	1.50	1.87	1.57	-15.5	10	-155
4	1350	5.2	4.2	-0.88	-1.16	1.67	1.04	1.88	1.56	1.98	1.67	-11	10.5	-115
5	1405	9.0	6.7	-1.68	-1.94	2.91	1.77	3.36	2.62	3.58	2.67	-15	15.5	-232
6	1350	9.4	6.4	-1.76	-1.94	3.05	1.49	3.52	2.45	3.74	2.55	-10.5	15.5	-163
7	1425	-	7.2	-	-2.10	-	1.70	-	2.70	-	2.93	-17.5	17.5	-301

NOTE: $I_{\ell}$  = courant total $P_{\ell}$  = puissance produite $Q_1$  = puissance réactive $S_1$  = puissance apparente de la fondamentale $S_t$  = puissance apparente totale $E_d, I_d, P_r$  = Tension, courant et puissance rotoriqueTension d'alimentation  $E_{\ell} = 235$  V

□	X = 2.00	CP = 0.0379	Y (M/S) = 23.96	P (KW) = 175.91
○	X = 4.00	CP = 0.3047	Y (M/S) = 11.68	P (KW) = 176.94
+	X = 6.00	CP = 0.4207	Y (M/S) = 7.79	P (KW) = 72.38
+	X = 10.00	CP = 0.2602	Y (M/S) = 4.87	P (KW) = 10.41



AERODYNAMIC TORQUE (BLADE A + BLADE B)  
VS AZIMUTH AND TIP SPEED RATIO

I.O.M. - 230KW \*\*\* CARDAS \*\*\* 36.6 RPM

Figure 1: Couple aérodynamique (d'après [1])

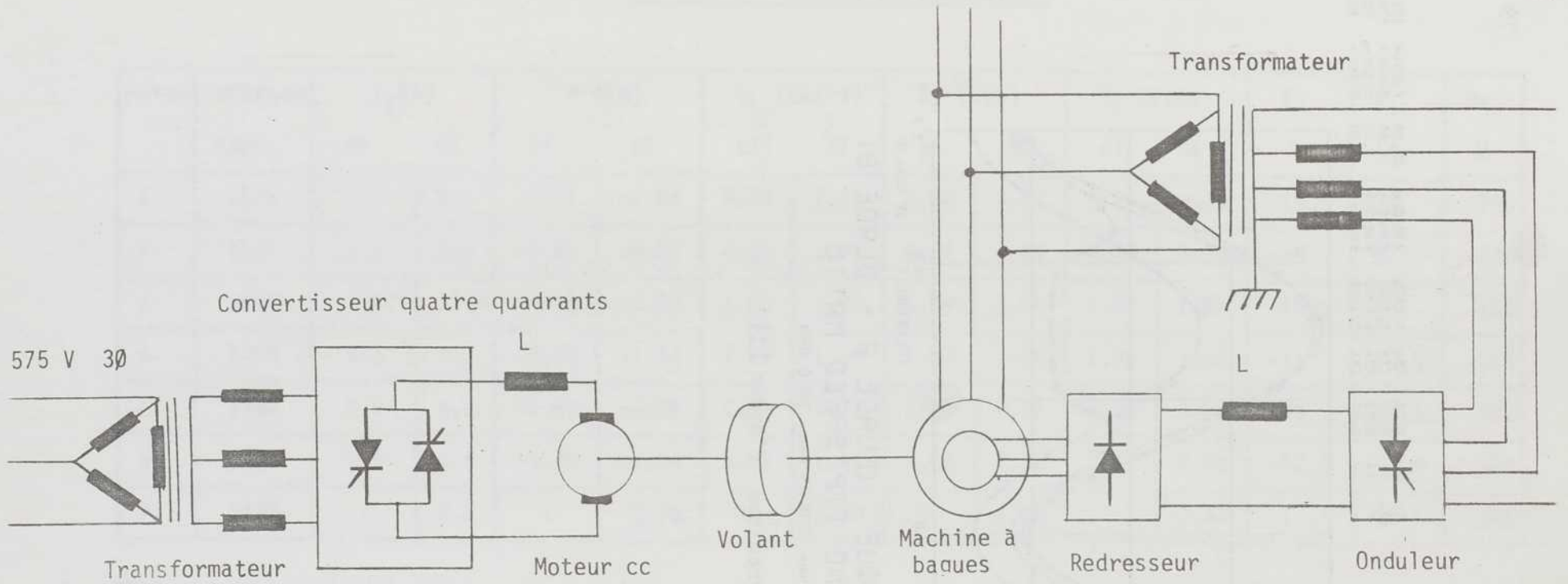


Figure 2: Schéma synoptique du banc d'essai

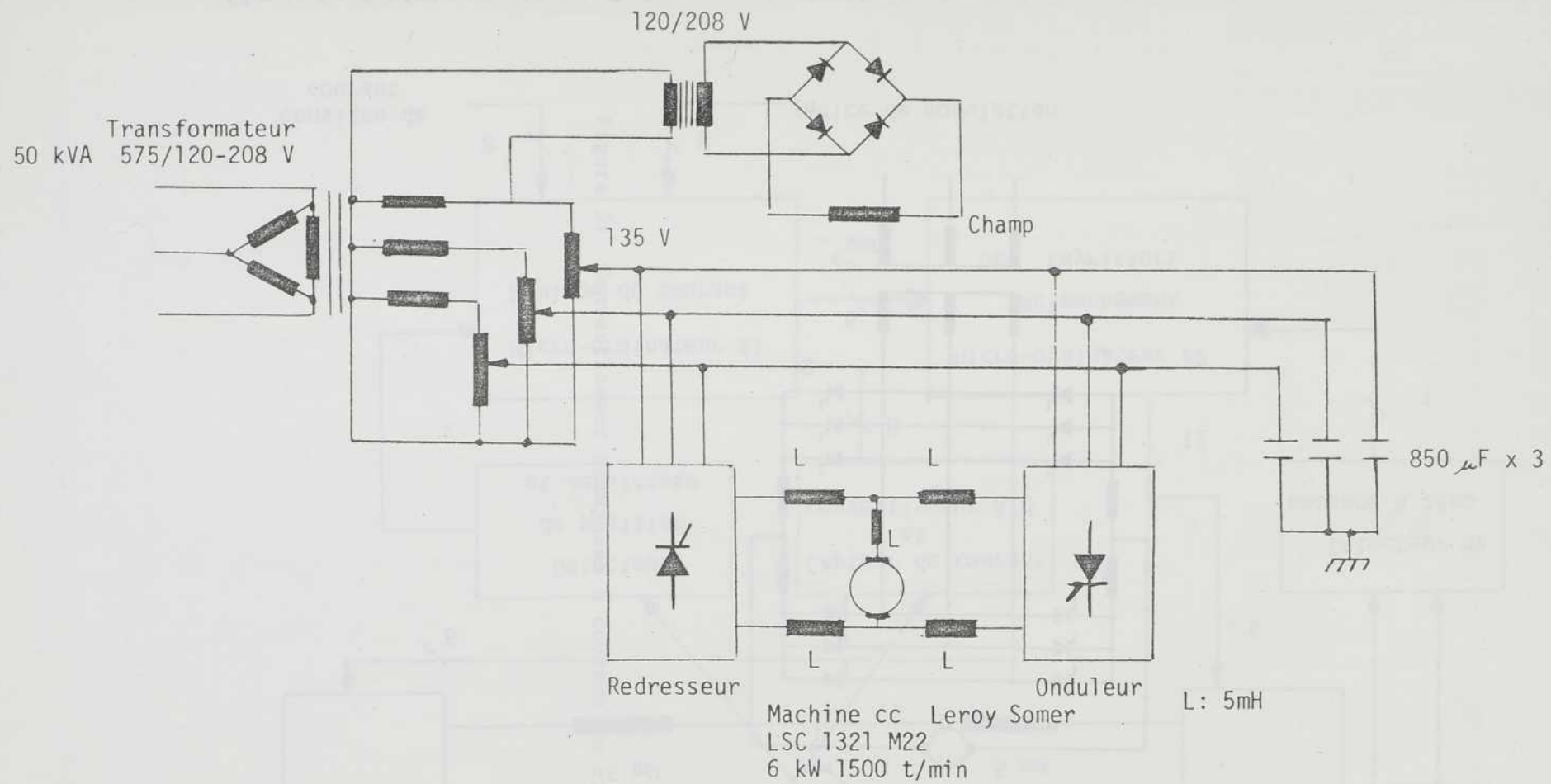


Figure 3: Schéma du circuit du moteur d'entraînement

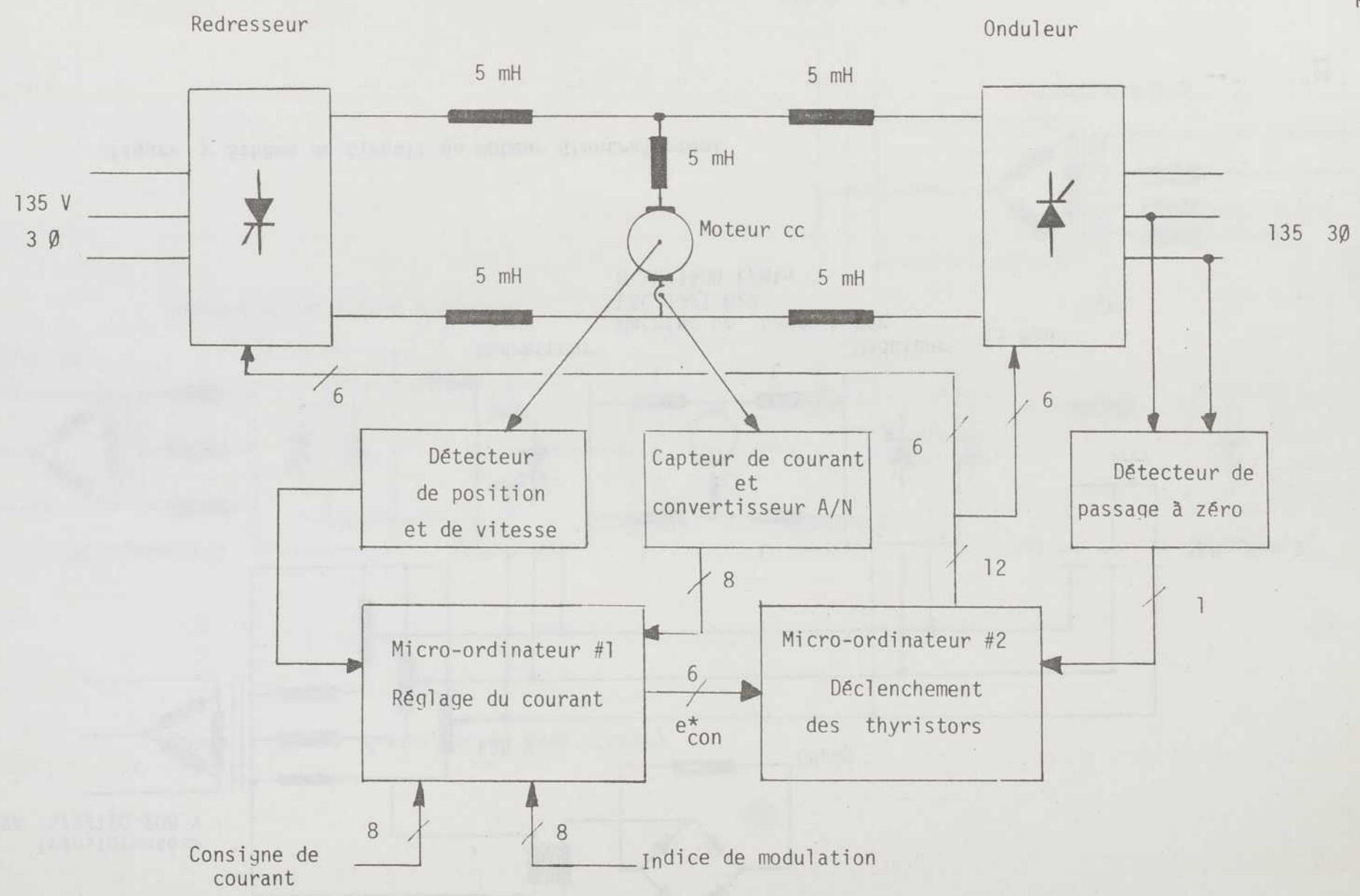


Figure 4: Schéma synoptique de la commande de l'entraînement

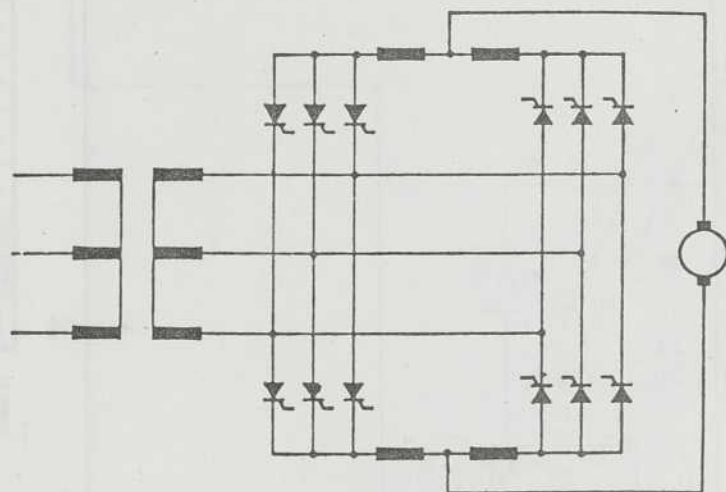
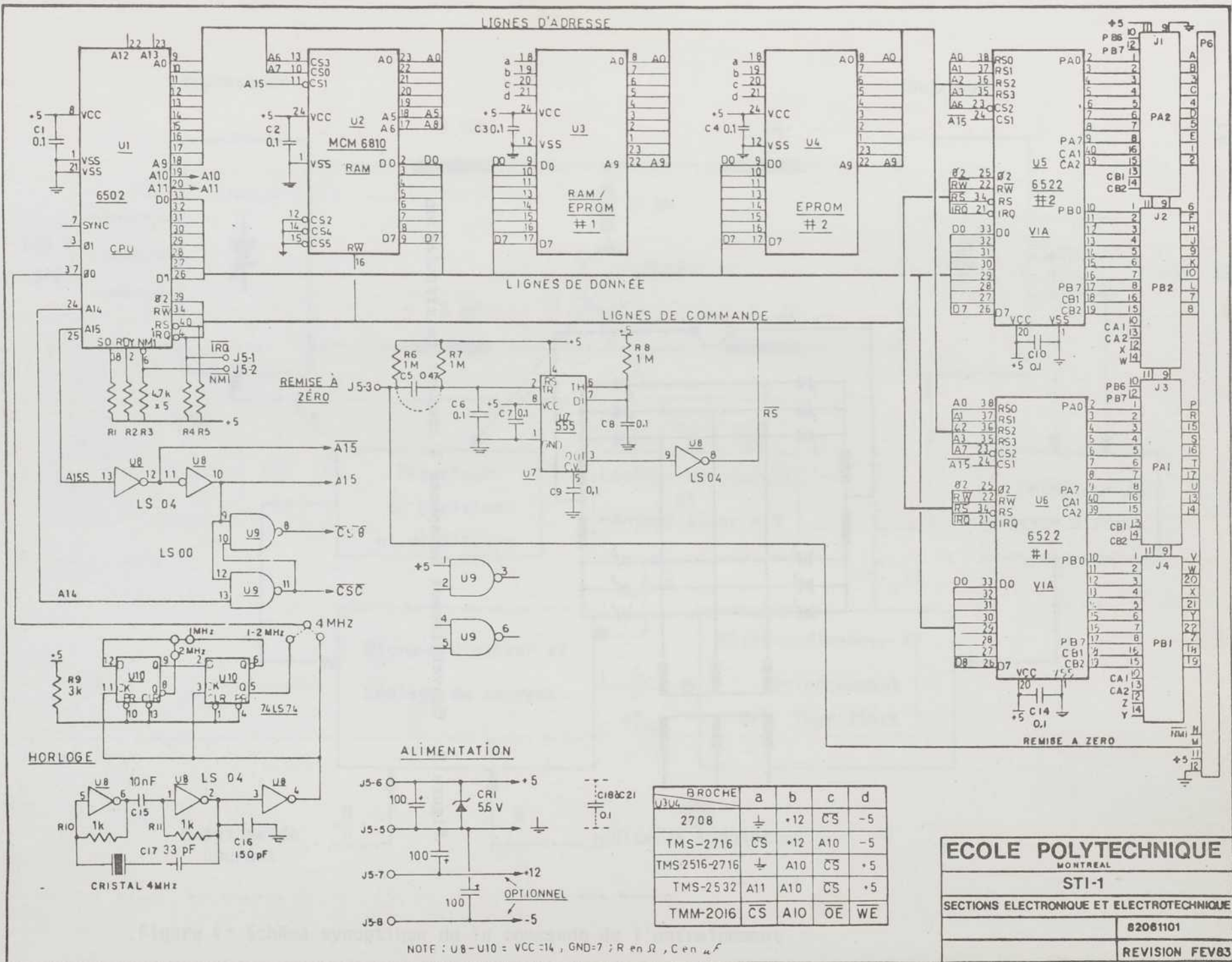


Figure 5: Convertisseur hexaphasé à courant de circulation



**ECOLE POLYTECHNIQUE**  
MONTREAL

**STI-1**

SECTIONS ELECTRONIQUE ET ELECTROTECHNIQUE

82081101

REVISION FEV83

Figure 6: Schéma du micro-ordinateur STI

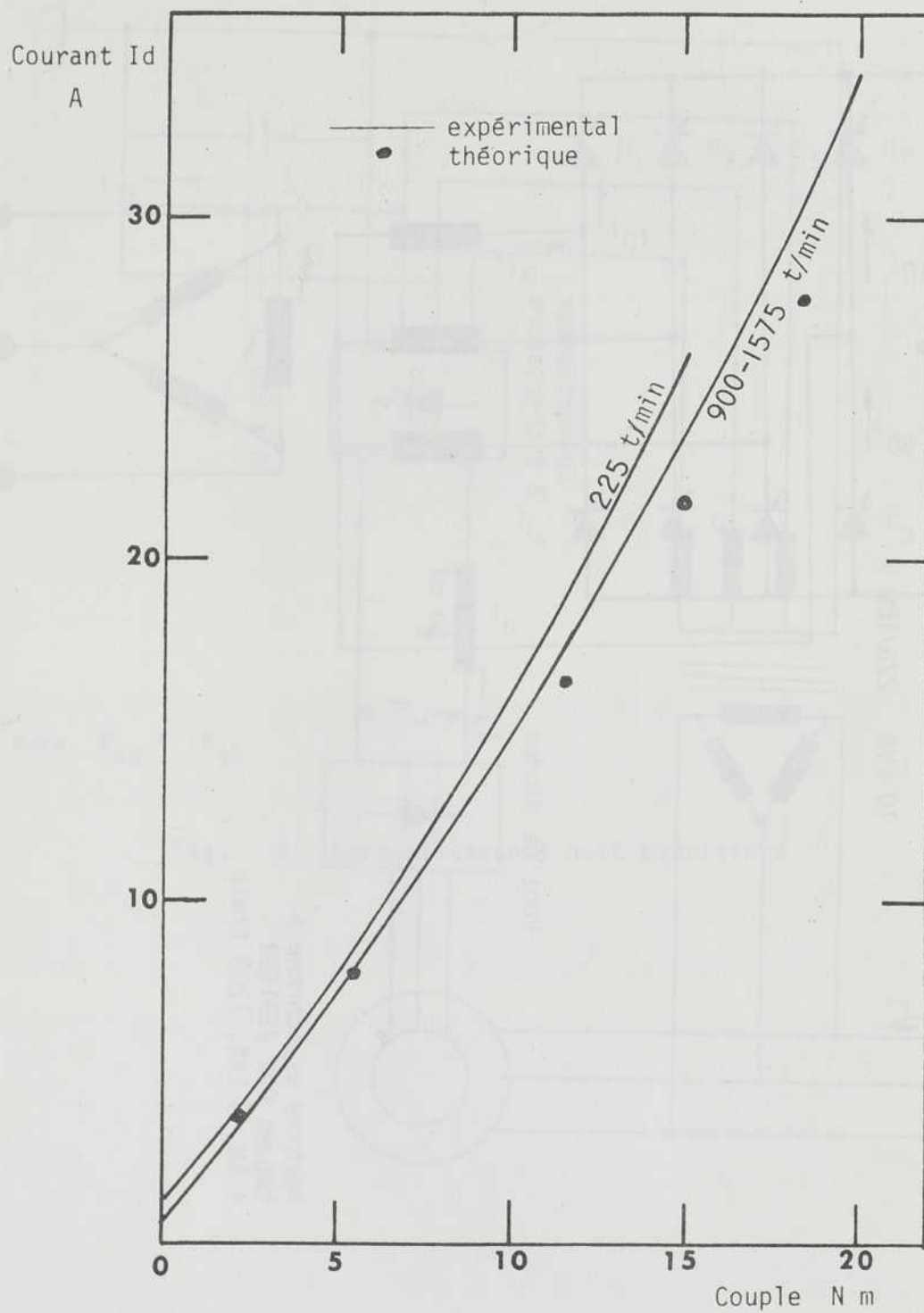


Figure 7 : Courant Id en fonction du couple de charge pour une machine typique

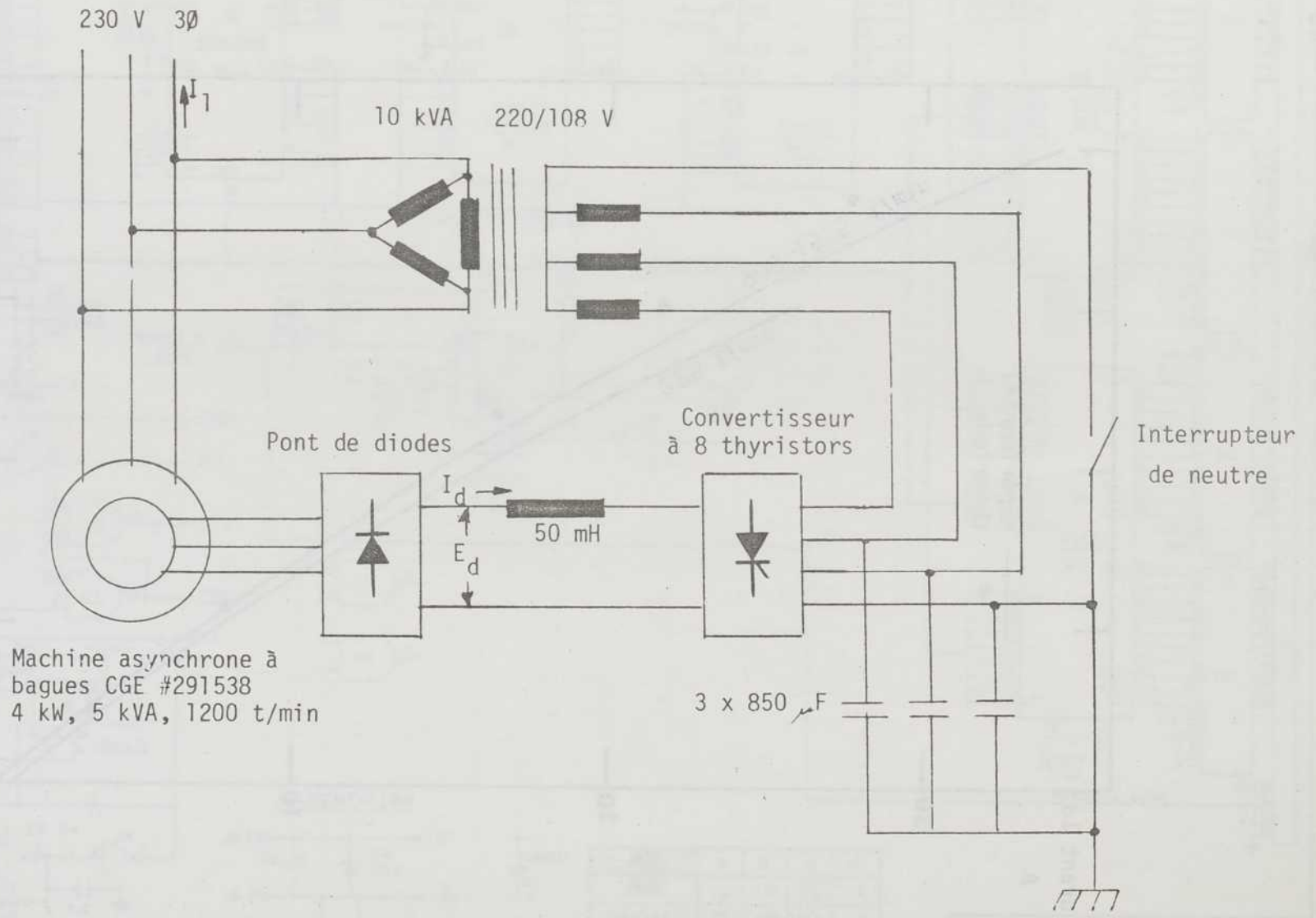
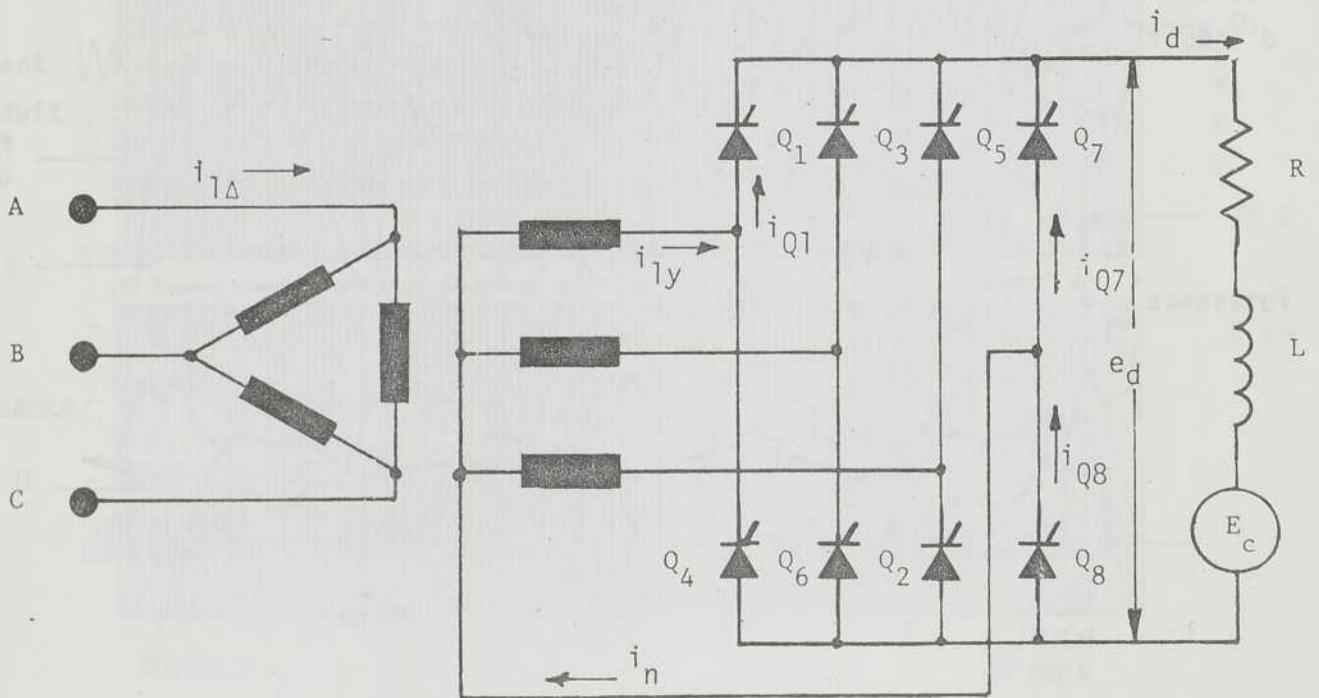


Figure 8: Schéma du circuit de la machine asynchrone

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
511  
MONTREAL, QUEBEC H3A 2K4  
1982



Note  $E_{AB} = E_{ab}$

Fig. 9 : Convertisseur à huit thyristors

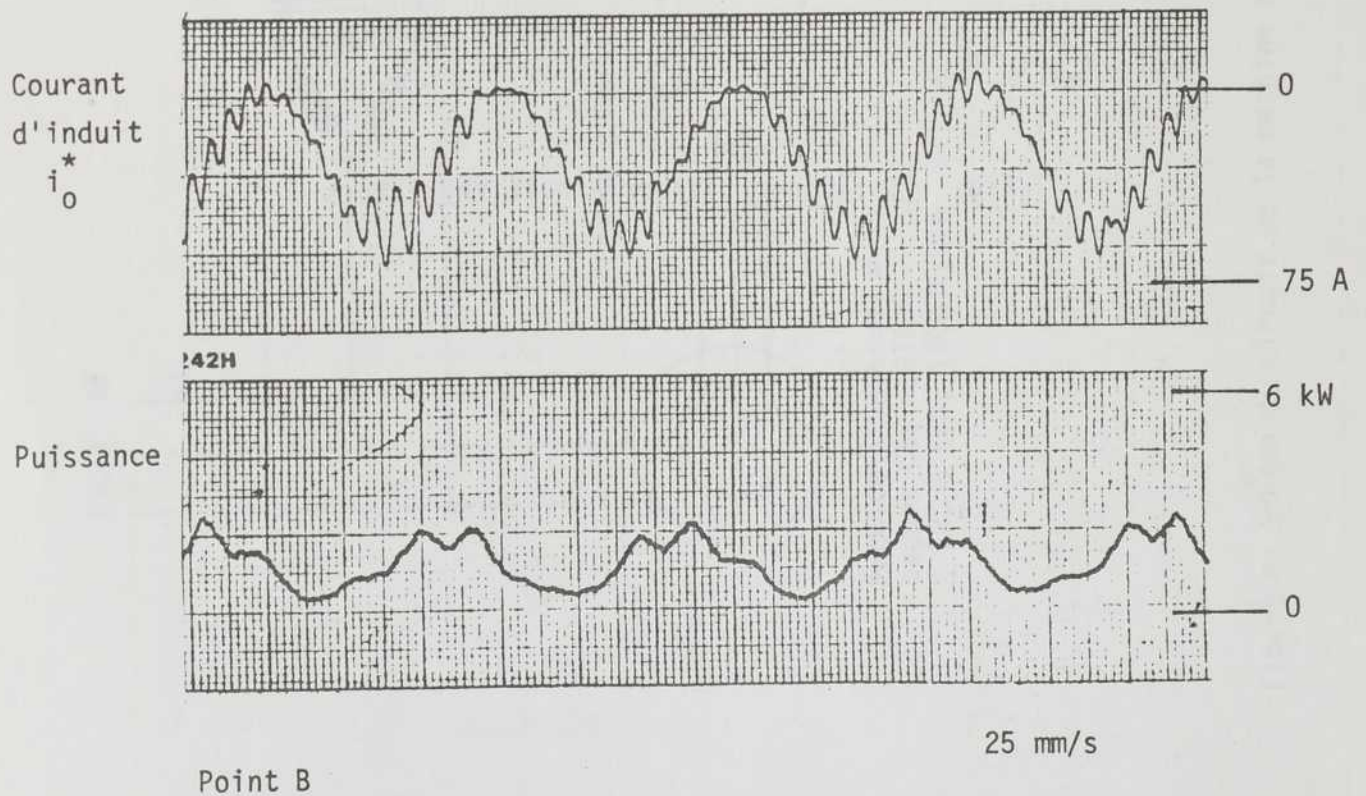
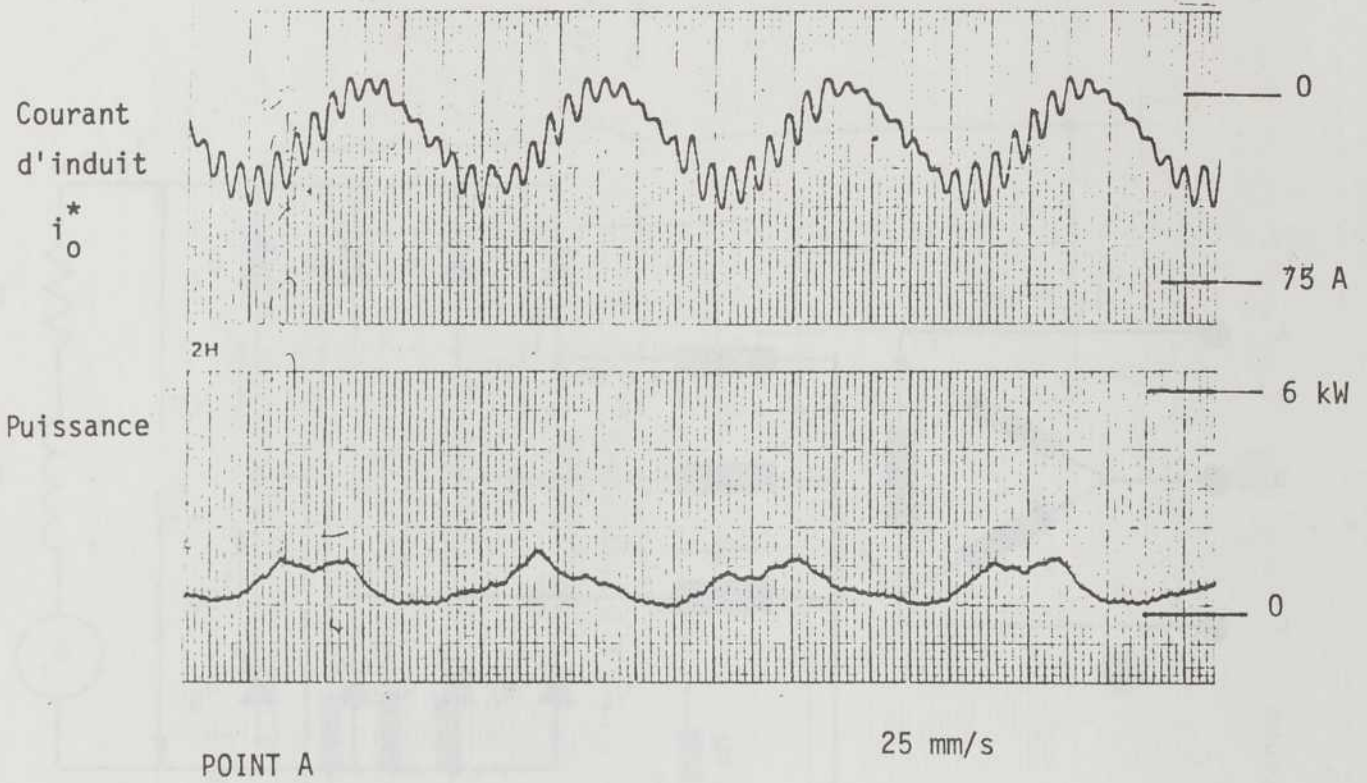


Figure 10 Essais avec le rotor court-circuité

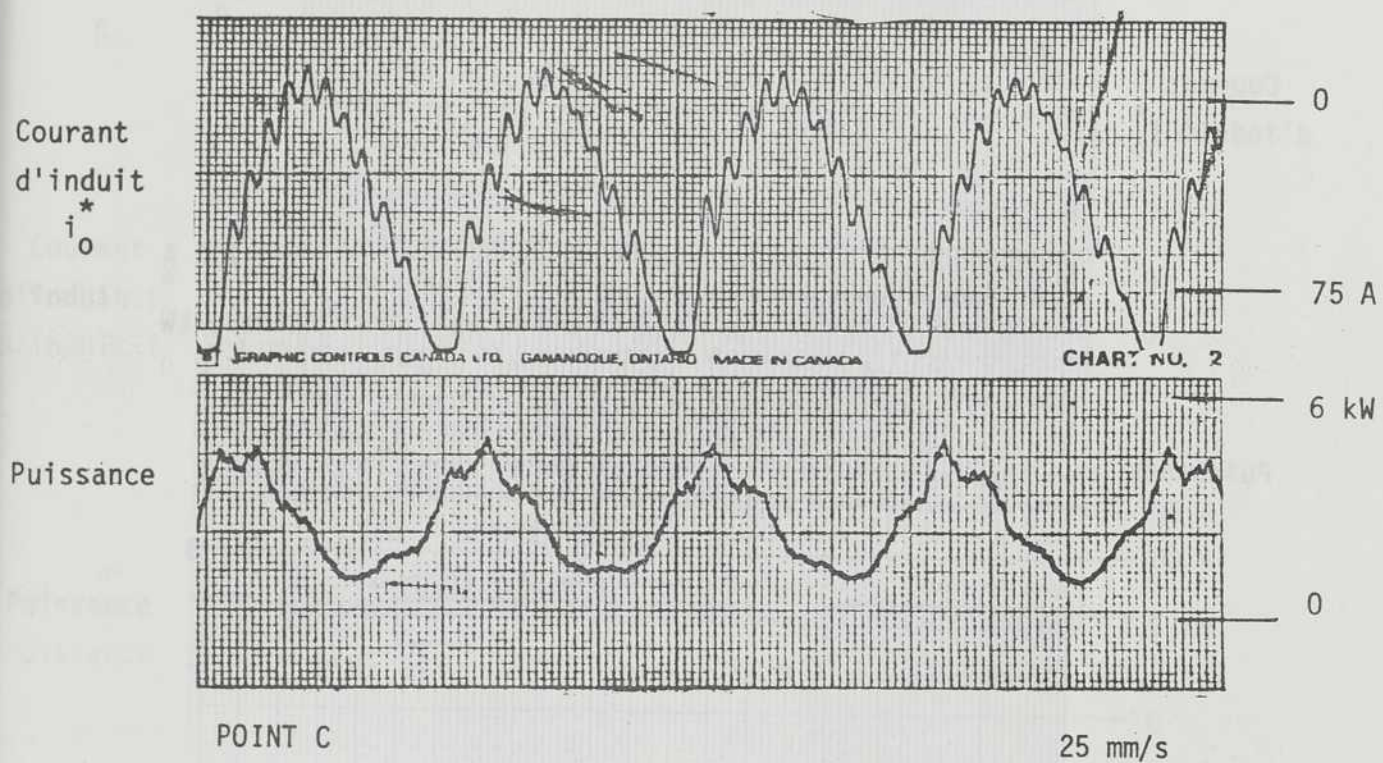


Figure 10: Essais avec le rotor court-circuité

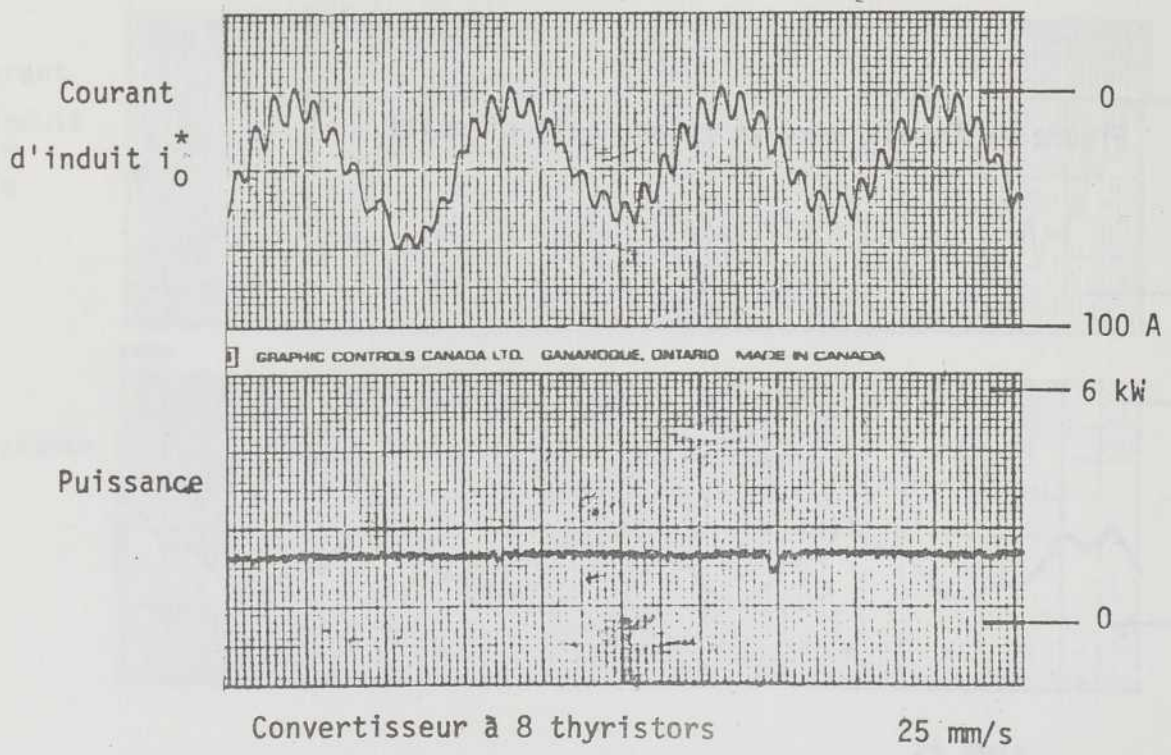
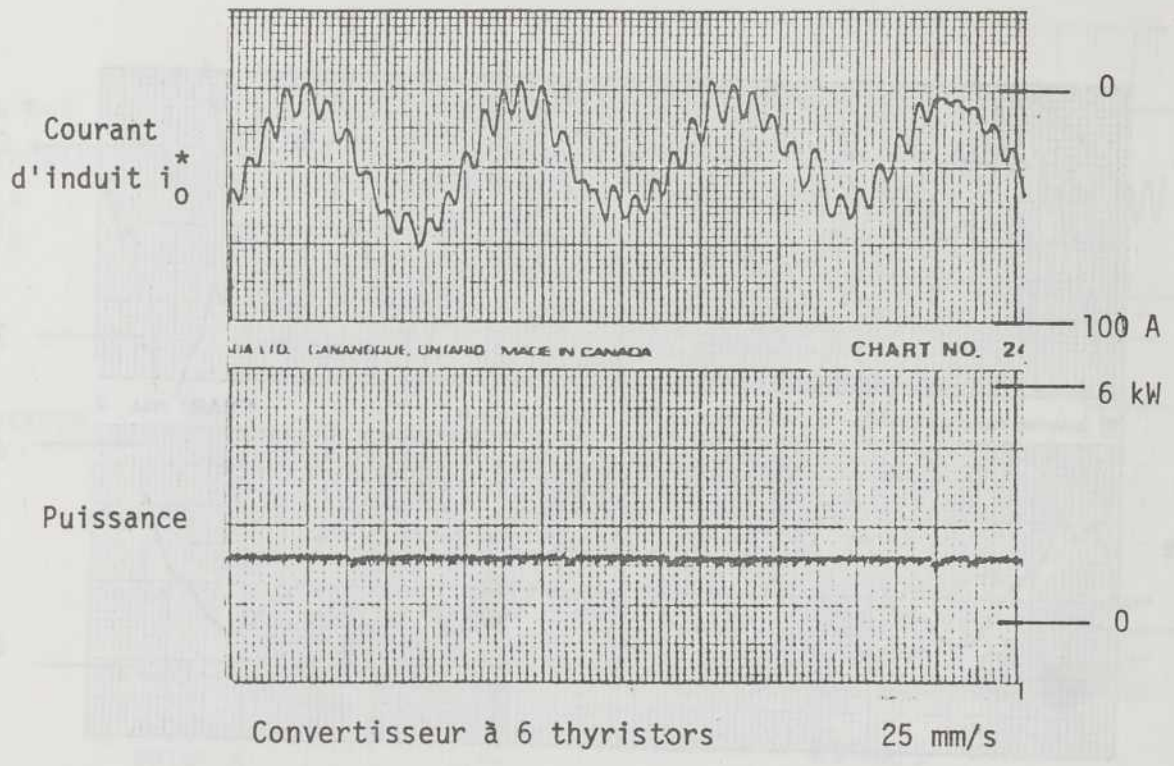
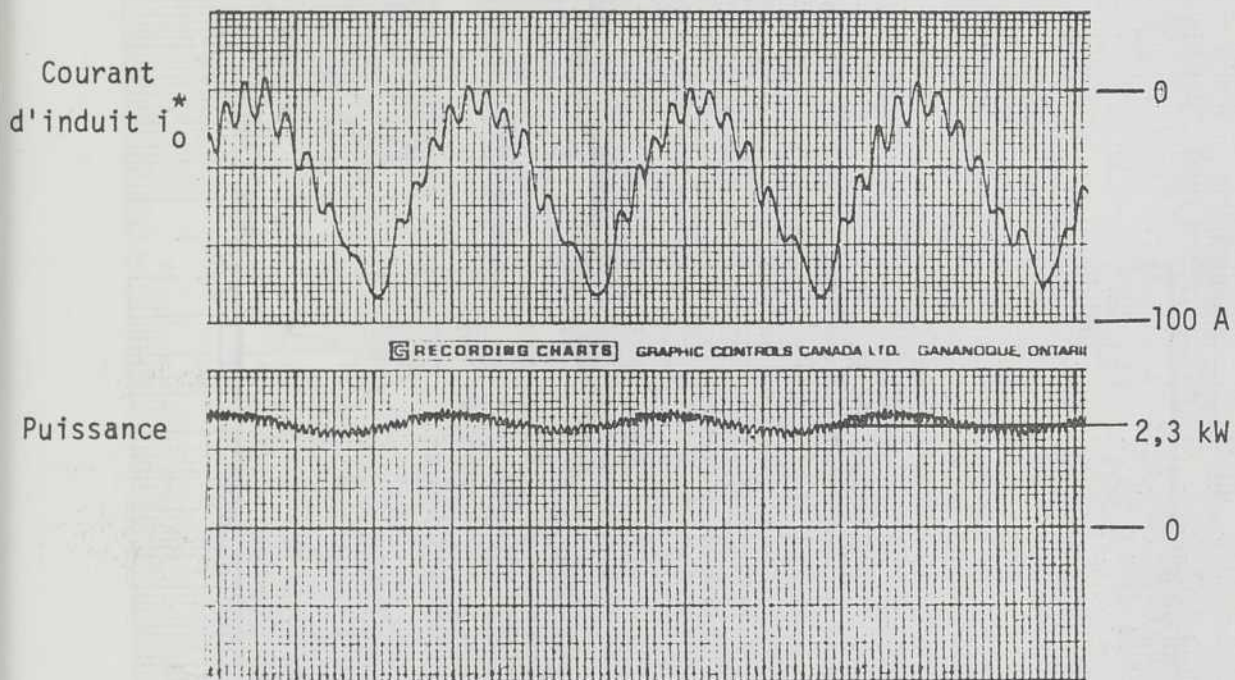


Figure 11: Essais avec la commande de puissance, point 6



Vitesse de déroulement: 25 mm/s

Vitesse de rotation: 1300 t/min

Figure 12: Opération près de la vitesse synchrone

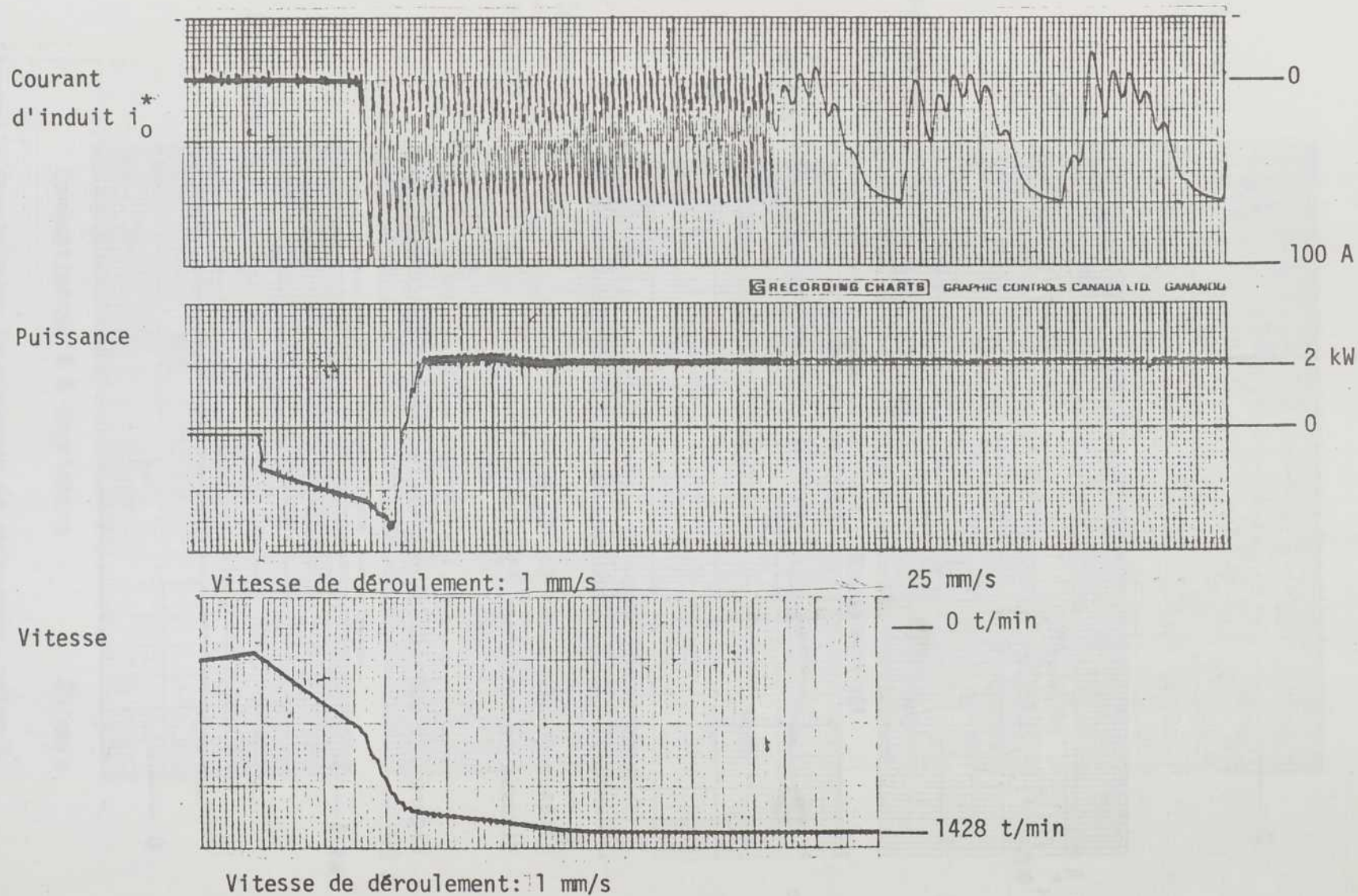
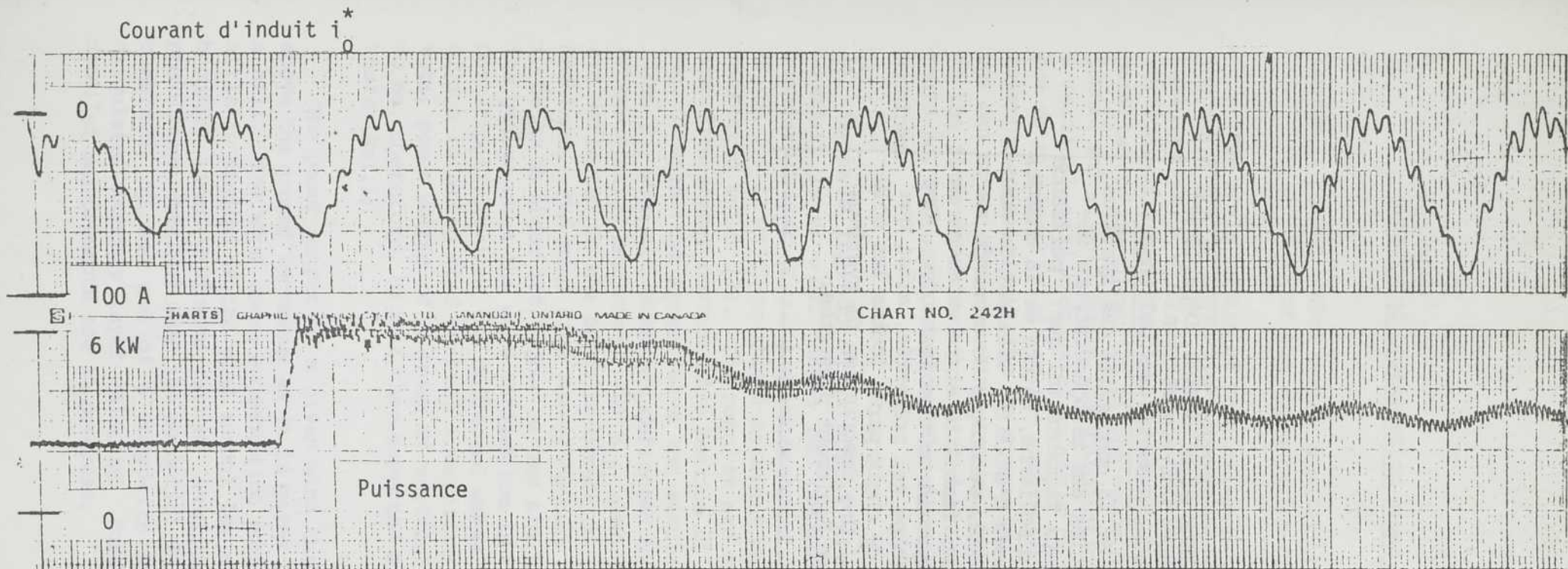
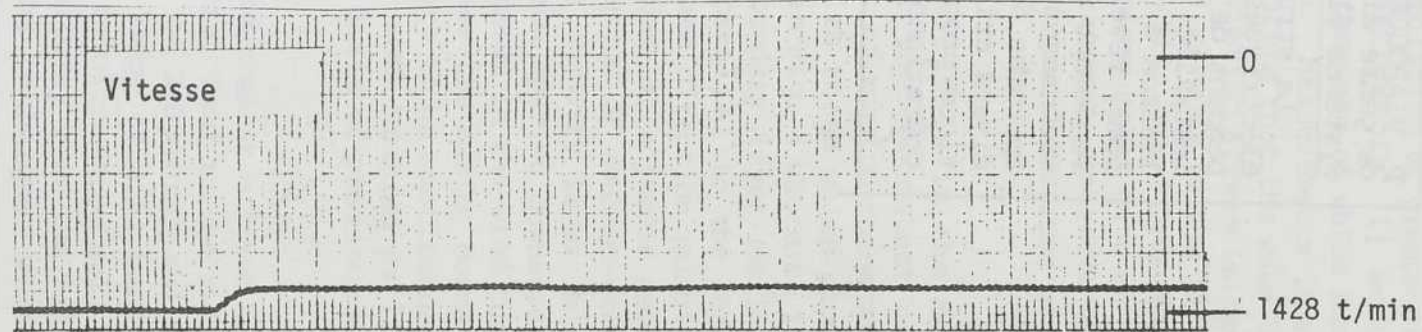


Figure 13: Démarrage



Vitesse de déroulement: 25 mm/s



Vitesse de déroulement: 7 mm/s

Figure 14: Freinage

P. VIAROUGE, Y. JEAN et M. BERARD, Département de génie électrique, Université Laval.

Systèmes électriques associés aux éoliennes.

La structure et la complexité des systèmes électriques associés aux aérogénérateurs dépendent de nombreux facteurs tel que: puissance installée, type d'éolienne, nature de la charge, liaison à un réseau d'utilité, utilisation autonome, réversibilité, stratégie de commande au rendement maximum, fiabilité et robustesse, environnement, compromis coût performances. Une approche de synthèse est présentée, ainsi que divers critères de choix parmi toutes les solutions proposées. Une description de systèmes opérationnels est également présentée.

Summary of presentation given at ACFAS 1984 Quebec

George I. FEKETE, Wind tunnel simulation of groups of wind turbines and of the augmentation of the wind speed over hills.

True scale models of vertical-axis wind turbines do not function at the small scales which are required for the simulation of groups of wind turbines in a wind tunnel. Previous investigators [1] modelled vertical-axis wind turbines by static devices the wake of which remained parallel to the direction of the oncoming flow. Measurements in a wind tunnel and at full scale, and calculations indicate that the wake leaves a vertical-axis machine at an angle to the oncoming stream (sidewash) due to an overall lift on the machine (Fig. 1a) analogous to the lift on a rotating circular cylinder in streaming flow (Fig. 1b). Consequently one can expect that rotating vertical axis machines might have an effect on the flow which is similar to vortex generators. Enhanced mixing could be, therefore, expected in the boundary layer downstream of these machines.

We have reproduced a typical atmospheric flow in the McGill boundary layer wind tunnel and compared the energy content of the boundary layer (Fig. 2) downstream of groups of wind turbine models (Figs. 3 & 4) which produced straight wakes with those which produced deflected wakes [2]. The results are shown in Fig. 5 where  $E_I$  is the mean flow energy content of a portion of the boundary layer (defined in Fig. 2) when the wakes leave the simulators parallel to the oncoming flow,  $E_{II}$  when all wakes are deflected in the same direction (simulation of co-rotating machines), and  $E_{III}$  when the wakes of adjacent machines are deflected in the opposite direction (simulation of counter-rotating machines). The mean flow energy content of the boundary layer is shown to be up to about 10% higher at one simulator row spacing downstream of the groups when the wake deflection is reproduced in the wind tunnel. Our stipulation that the deflected wakes increase the mixing downstream of non-rotating wind turbine simulators appears to be confirmed. The total power output of a group of vertical axis wind turbines is likely to be, therefore, higher than expected on the basis of previous model tests (Ref.1).

The power output of a given wind turbine mounted at a fixed height above the ground increases as it is moved from flat land to the ridge of a hill. The wind speed augmentation potential of 2-D smooth and rough hills is studied in the wind tunnel for a wide range of hill height to boundary layer thickness ratios. Preliminary results agree well with predictions obtained when the potential flow velocity over the hill is combined, by the use of a composite matching technique, with the calculated boundary layer velocity. Further theoretical work and more detailed measurements are in progress.

References

- [1] D.J.H. Builtjes, "The Interaction of Windmill Wakes", Proceedings of the Second International Symposium on Wind Energy Systems, Amsterdam, October 1979, paper 35.
- [2] J. Goldenberg and G.I. Fekete, "Mean Flow Energy Content of Boundary Layer Downstream of Vertical-Axis Wind-Turbine Simulators", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V 12 (1983) 1-14.

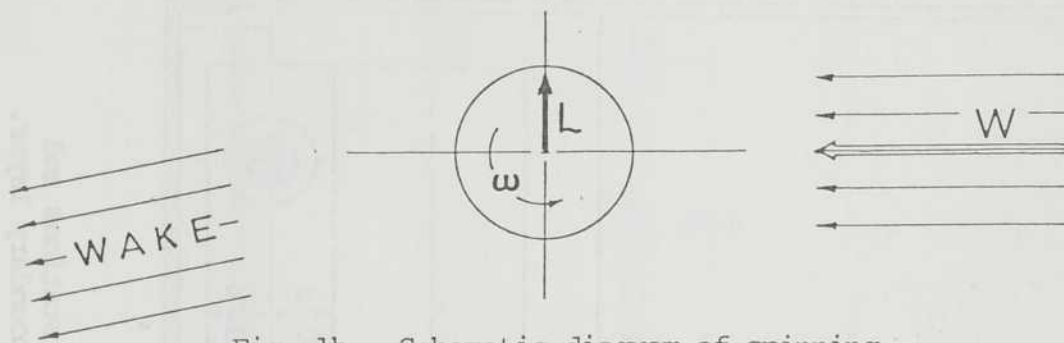


Fig. 1b, Schematic diagram of spinning cylinder in uniform flows.

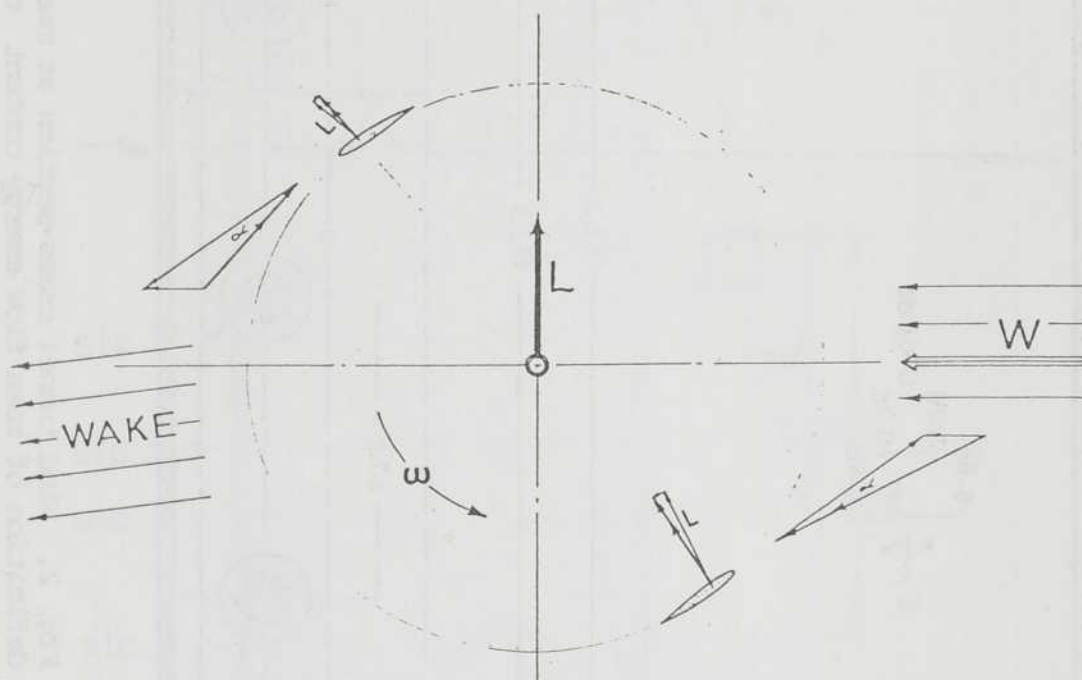


Fig. 1a, Schematic diagram of vertical axis wind turbine showing overall lift and the deflected wake.

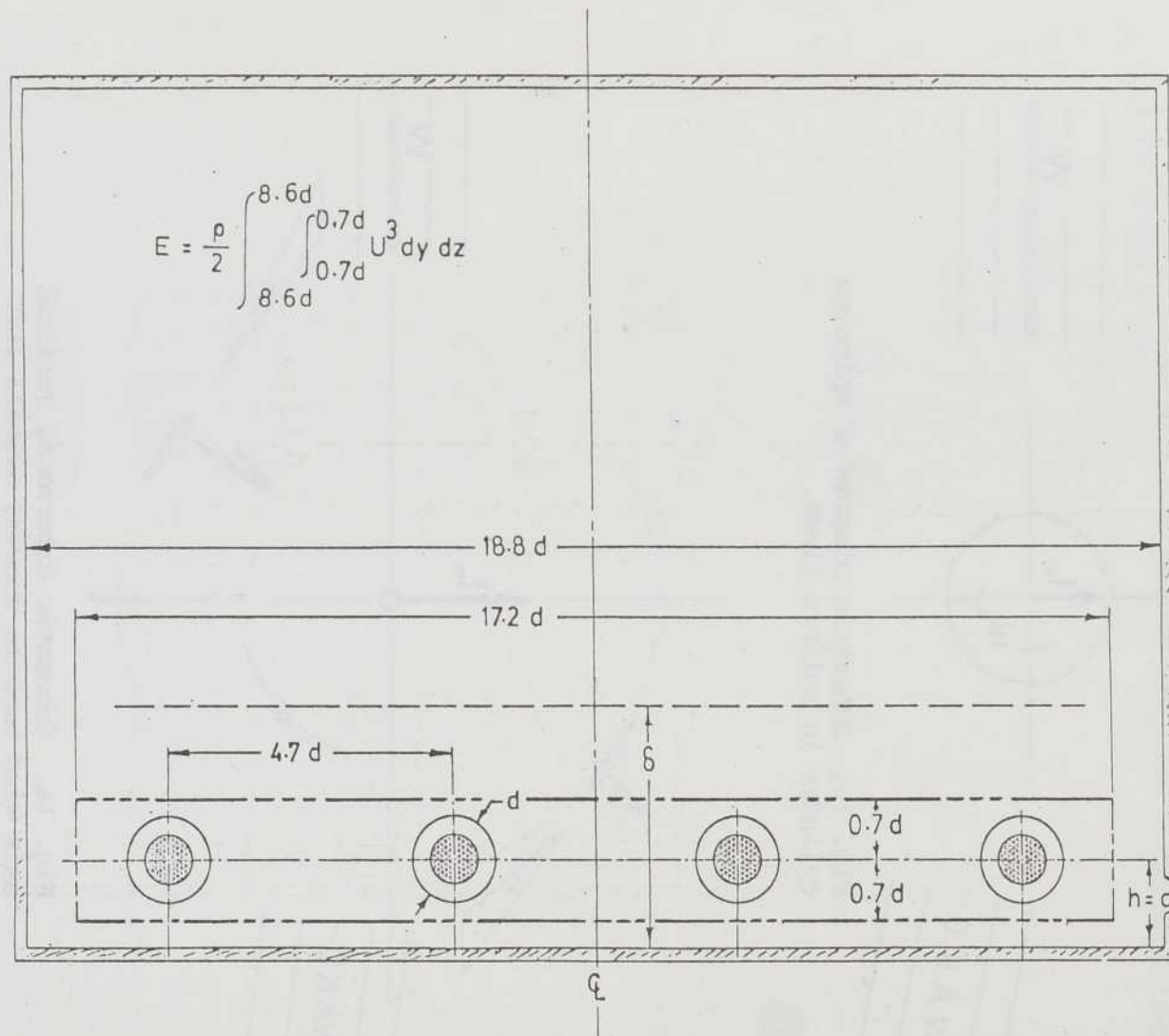


Fig. 2, Wind tunnel cross-section at measuring stations and definition of mean flow energy content of the boundary layer.

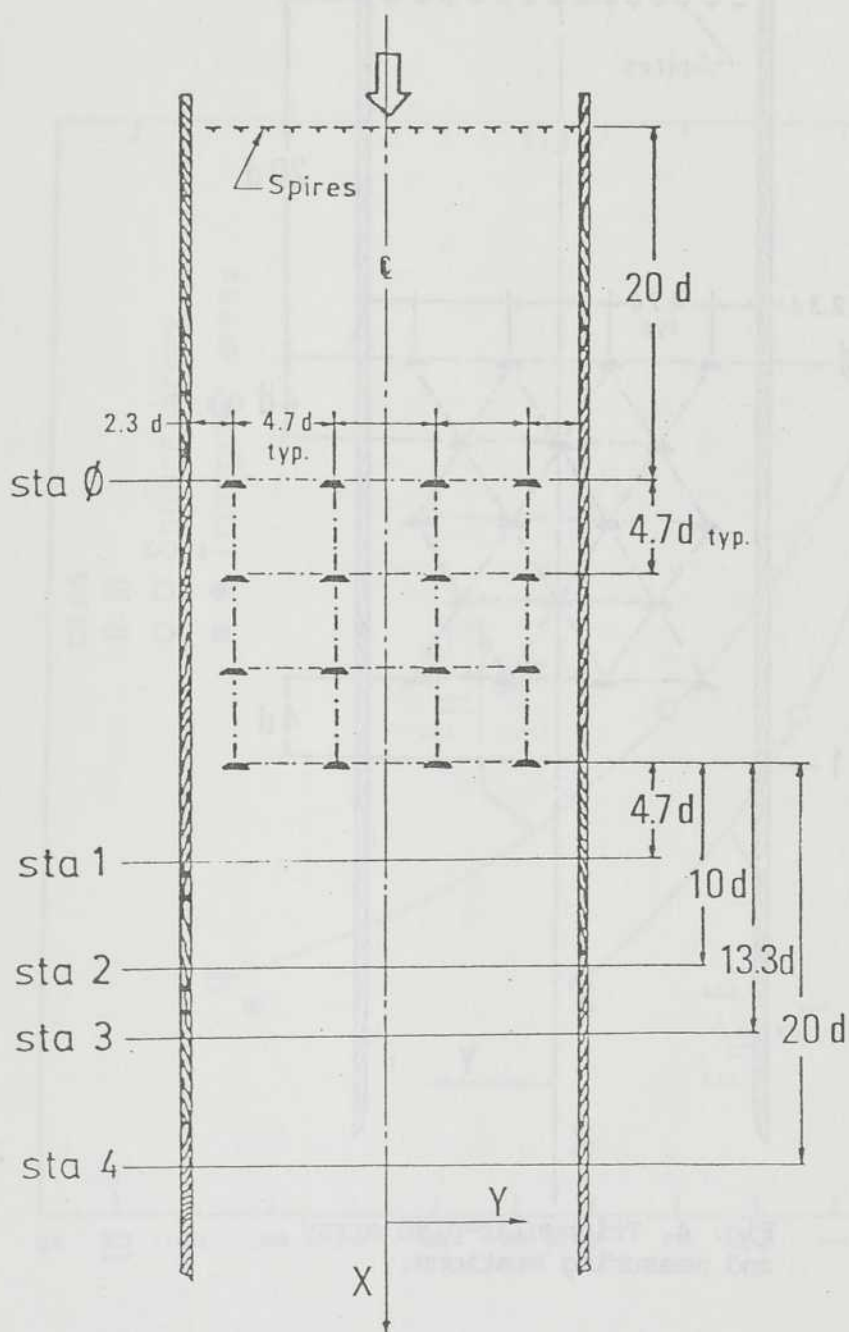


Fig. 3, Square-plan array and measuring stations.



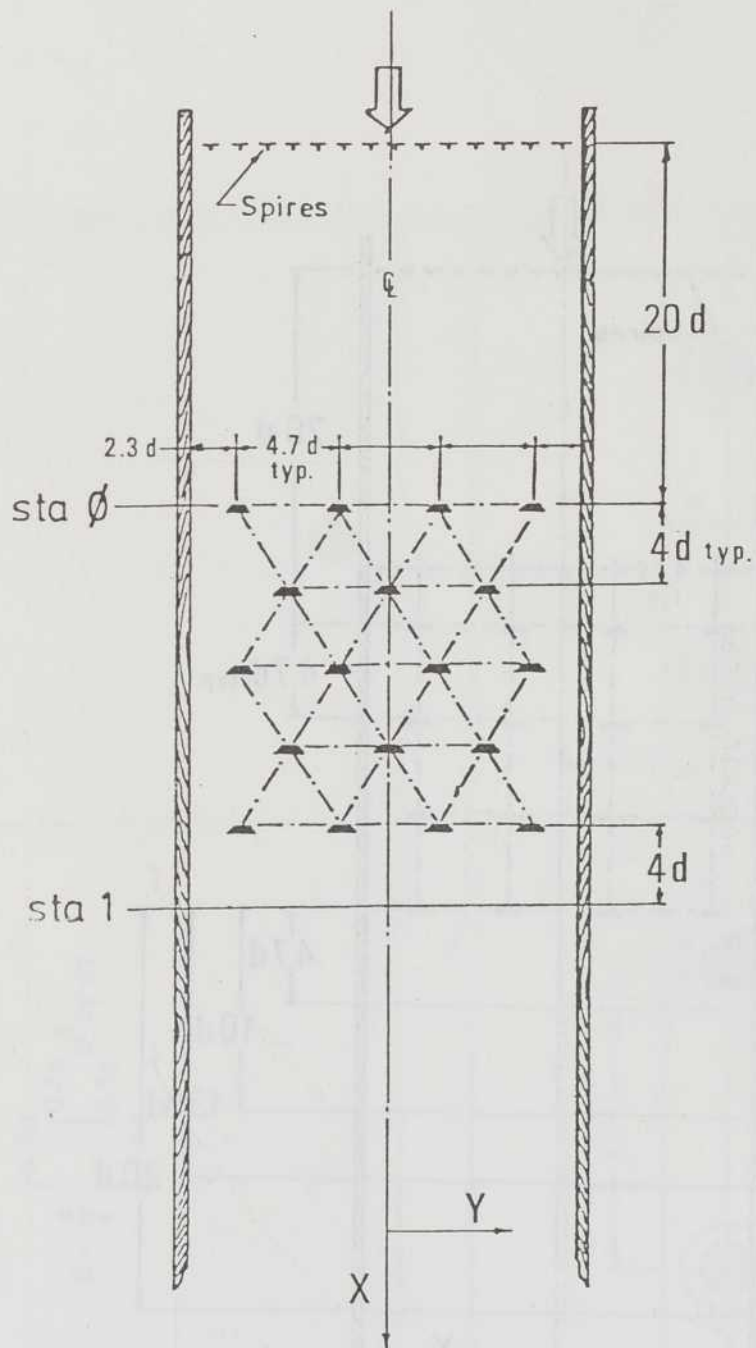


Fig. 4 Triangular-plan array and measuring stations.



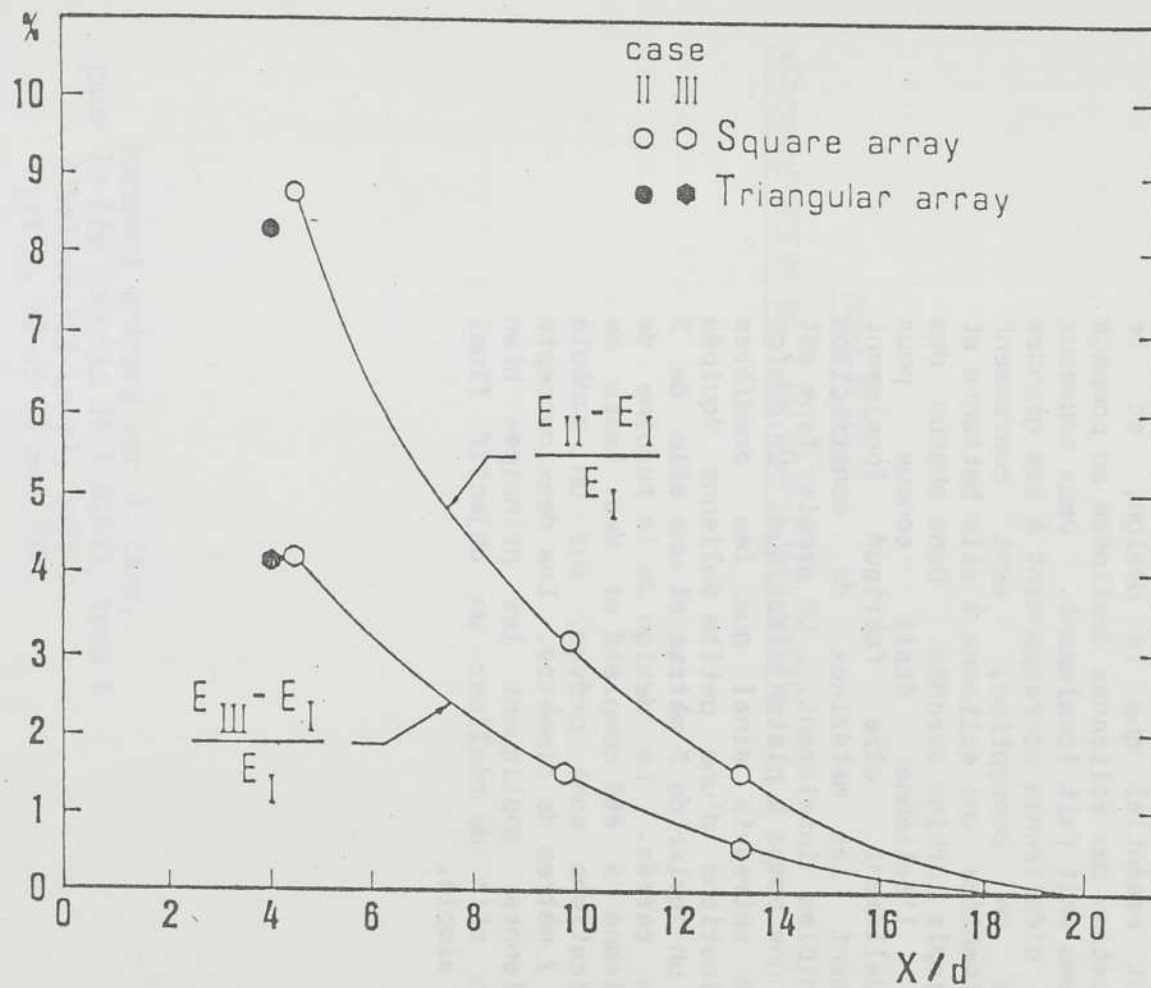


Fig. 5, Relative mean flow energy content of boundary layer downstream of simulators:  $E_I$  straight wake;  $E_{II}$  (co-rotation); and  $E_{III}$  (counter-rotation) wake deflection modelled.

T.A. LAWAND, Institut de Recherches Brace,  
Campus Macdonald de l'Université McGill,  
Montreal.

Développement de petites éoliennes utilisant  
des principes de la technologie appropriée.

La grande majorité des éoliennes ayant fonctionnés sur la terre ont servies et servent au pompage de l'eau; en effet, pour stimuler le développement. Comme la plupart de la population de la terre oeuvre dans les domaines agricoles et comme un grand nombre de ces gens sont malheureusement assez dépourvus, il est essentiel que le design, et la fabrication des éoliennes destinées au pompage de l'eau soit fait localement. Deux nouveaux types d'éoliennes correspondant à ces grandes lignes de conception, sont couramment expérimentés: une éolienne à aile battante et une simple turbine carenée. Dans chacun des cas, l'éolienne était conçue pour éventuellement être fabriqué localement utilisant les matériaux de construction disponibles localement. Le premier type est lié à une pompe à piston classique. Le design a été entrepris ainsi que les premières vérifications d'une petite éolienne équipée avec un levier de 3 mètres et une aile de 5 mètres carrés. Le design de la turbine de l'éolienne a été complété et des tests de vérifications sont prévus, sur un modèle ayant 2 mètres de diamètre. Ces deux concepts d'éoliennes appliquent les principes bien connus afin de réaliser un objectif final assez simple.



HYDRO-QUÉBEC

PROJET ÉOLE

AÉROGÉNÉRATEUR DE 4 MW, CAP-CHAT, QUÉBEC

Document préparé par J. Déry,  
pour le 52e Congrès de l'ACFAS, tenu à  
l'Université Laval, Québec,  
les 9, 10 et 11 mai 1984

## INTRODUCTION

L'administration de projet ÉOLE remercie l'ACFAS de l'avoir invitée à venir exposer brièvement le projet ÉOLE aux scientifiques ici réunis.

Le projet ÉOLE est un effort concret réunissant des représentants des principaux intervenants de la communauté scientifique canadienne pour la réalisation d'un projet de technologie nouvelle.

Le projet s'inscrit dans la ligne de la collaboration entre le Conseil national de recherches Canada et l'Institut de recherche d'Hydro-Québec pour le développement des aérogénérateurs. Le financement du projet se fait à part égale entre les deux instituts.

## GESTION DU PROJET

L'organigramme du projet est présenté à la planche no 1.

La méthode de gestion est conforme à la pratique d'Hydro-Québec pour ses projets d'équipements. Elle s'articule autour d'une administration de projet.

Pour la circonstance, trois comités mixtes ont été créés comprenant des membres de différents niveaux hiérarchiques des deux firmes assurant le financement.

L'administrateur de projet rend compte de sa gestion au Comité d'évaluation de projet pour tous les aspects du projet. Le Comité d'évaluation technique est un comité d'experts nommés par le CNRC et l'IREQ pour conseiller l'administrateur de projet sur tous les aspects techniques.

L'administration de projet, dont je fais partie, utilise les ressources internes d'Hydro-Québec et des ressources externes selon les besoins. Les ressources externes sont retenues sur une base compétitive et des exigences de qualité sont appliquées.

Les principaux intervenants externes dont les ressources ont été retenues sont:

- . La firme Experts-Conseils Shawinigan Inc. pour la conception et l'ingénierie;
- . La Compagnie Générale Electrique du Canada Limitée pour la génératrice et l'appareillage électrique;
- . La firme Versatile Vickers Inc. pour le rotor.

## DESCRIPTION D'ÉOLE

La planche no 2 représente la zone d'investigation du régime des vents avant le choix de Cap-Chat comme emplacement d'ÉOLE.

Des relevés d'une année ont été faits par Environnement Atmosphérique Canada à Pointe-au-Tonnerre, Pointe Nord-Ouest et Fonderie sur des tours de 60 m alors que les Iles de la Madeleine ont continué à être suivies avec les tours anémométriques existantes.

Les résultats des études ont conclu que Fonderie offrait un meilleur emplacement d'analyse pour l'implantation d'ÉOLE.

L'aménagement général est montré à la planche no 3. La surface au sol est environ 10 000 m<sup>2</sup>. L'équipement est réparti entre la base du rotor et des modules en périphérie de la zone clôturée.

Les planches nos 4 et 5 montrent la vue d'ensemble du rotor et du train de puissance. La planche no 4 ne montre pas les volets de freinage aérodynamiques situés à l'équateur.

Les caractéristiques générales d'ÉOLE sont montrées à la planche no 6 et la planche no 7 fait ressortir les caractéristiques inhérentes aux aérogénérateurs à axe vertical de type Darrieus.

## CALENDRIER DU PROJET

L'ingénierie est en cours depuis la mi-1982. Les travaux au chantier doivent débuter en juin 1984.

Le programme de l'année 1984 comprend les aménagements de terrains: routes, clôtures, installations sanitaires et d'eau; les travaux de bétonnage: structure de support, fondations et la fermeture de l'enceinte; les travaux électriques enfouis: mise à la terre, liaisons électriques entre les éléments.

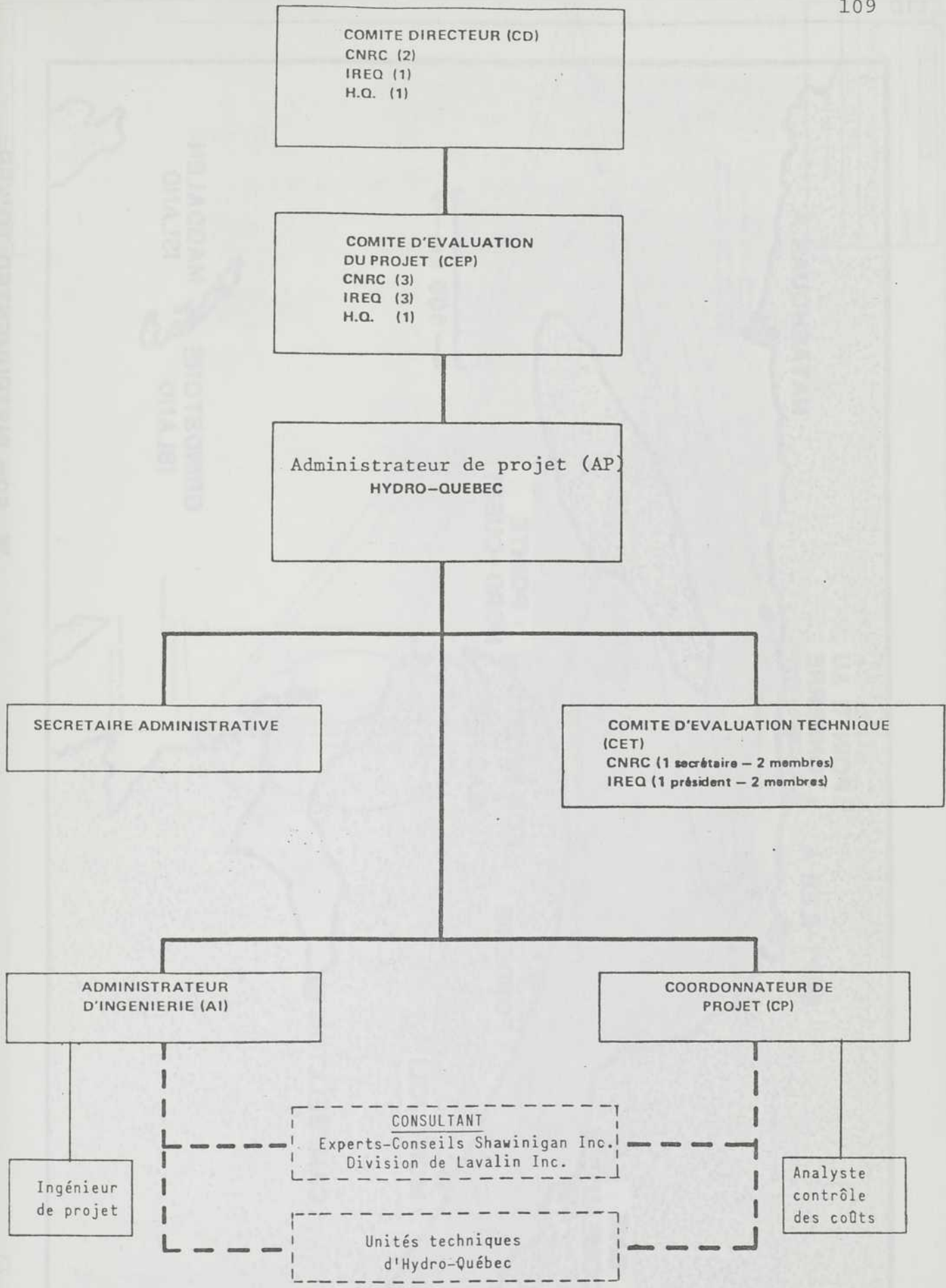
En 1985, le montage de l'installation s'échelonnera d'avril à septembre et sera immédiatement suivi de la mise en service.

L'année 1986 sera consacrée à l'évaluation de l'aérogénérateur.

## COMPARAISON D'ÉOLE AVEC D'AUTRES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS

Les planches nos 8 et 9 sont deux représentations différentes comparant ÉOLE à d'autres grands aérogénérateurs. L'écart de puissance d'ÉOLE 3,8 MW de la planche 8 et 4 MW de la planche 9 est attribuable au fait que l'une est la puissance mécanique à l'arbre du rotor et l'autre la puissance électrique au point de raccordement.

- . MOD-2 est une machine américaine dont 3 exemplaires ont été installés dans l'état de Washington et un exemplaire dans l'état du Wyoming de 1980 à 1982.
- . WTS-4 est une machine américano-suédoise dont un exemplaire a été installé dans l'état du Wyoming en 1982 et deux exemplaires ont été installés en Suède en 1982 et 1983.
- . MOD-5A est une machine américaine qui devait être installée à Hawaii en 1985; ce projet est compromis pour le moment.
- . GROWIAN est une machine allemande qui a été démarrée au printemps 1984.
- . MONOPTEROS est un projet allemand d'un aérogénérateur à pale unique. Actuellement, un modèle réduit est à l'essai (environ 400 kW).



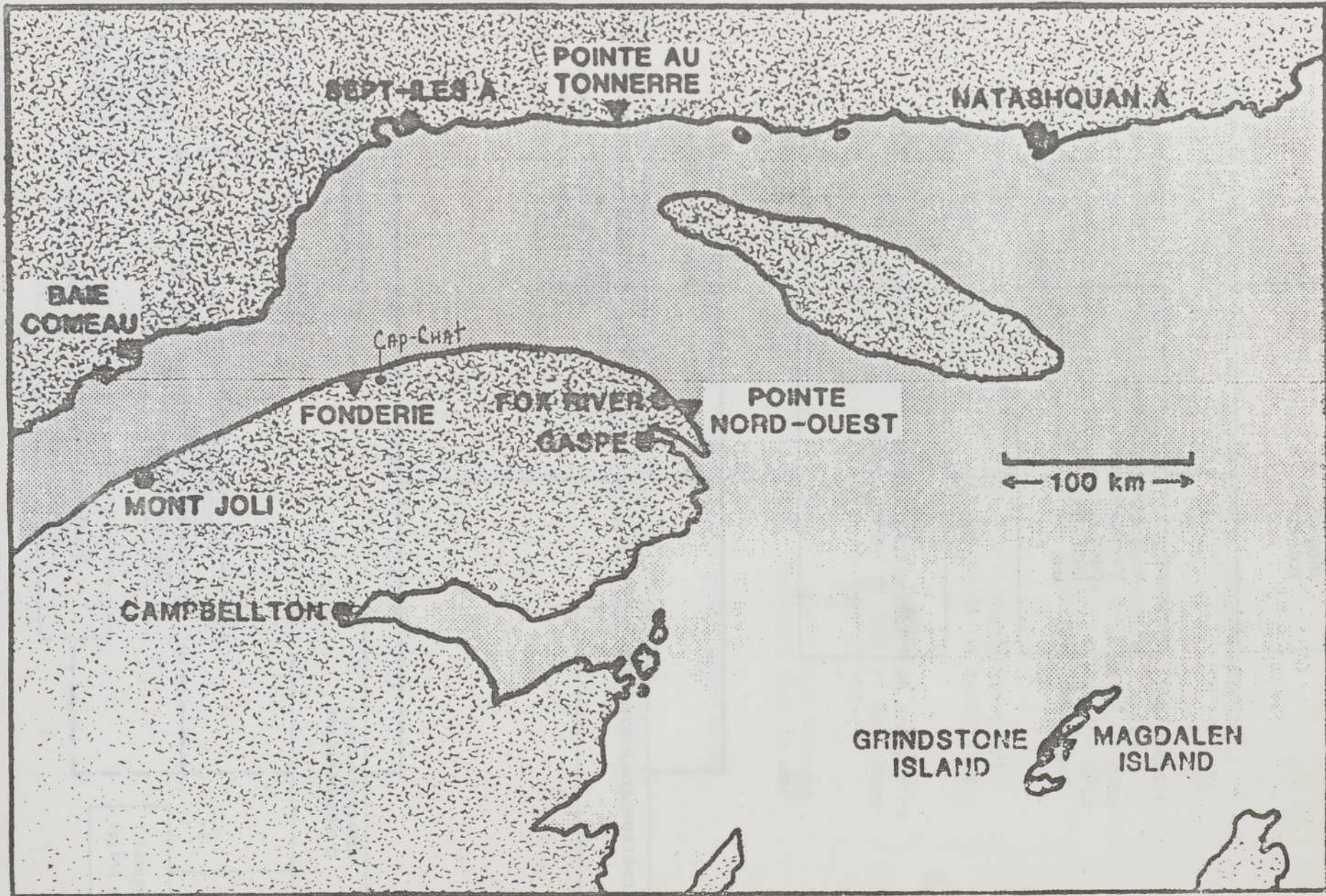


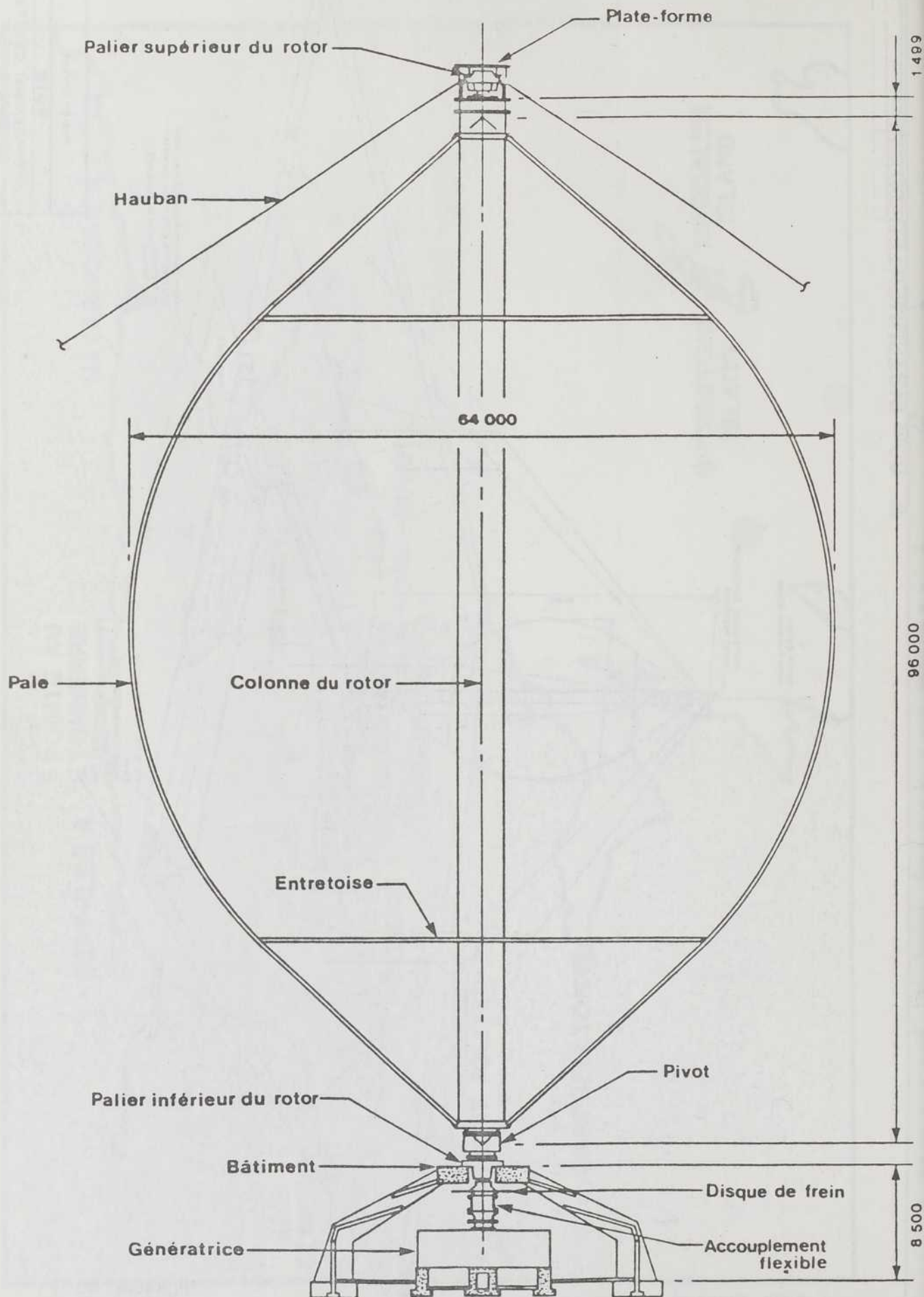
PLANCHE NO 2

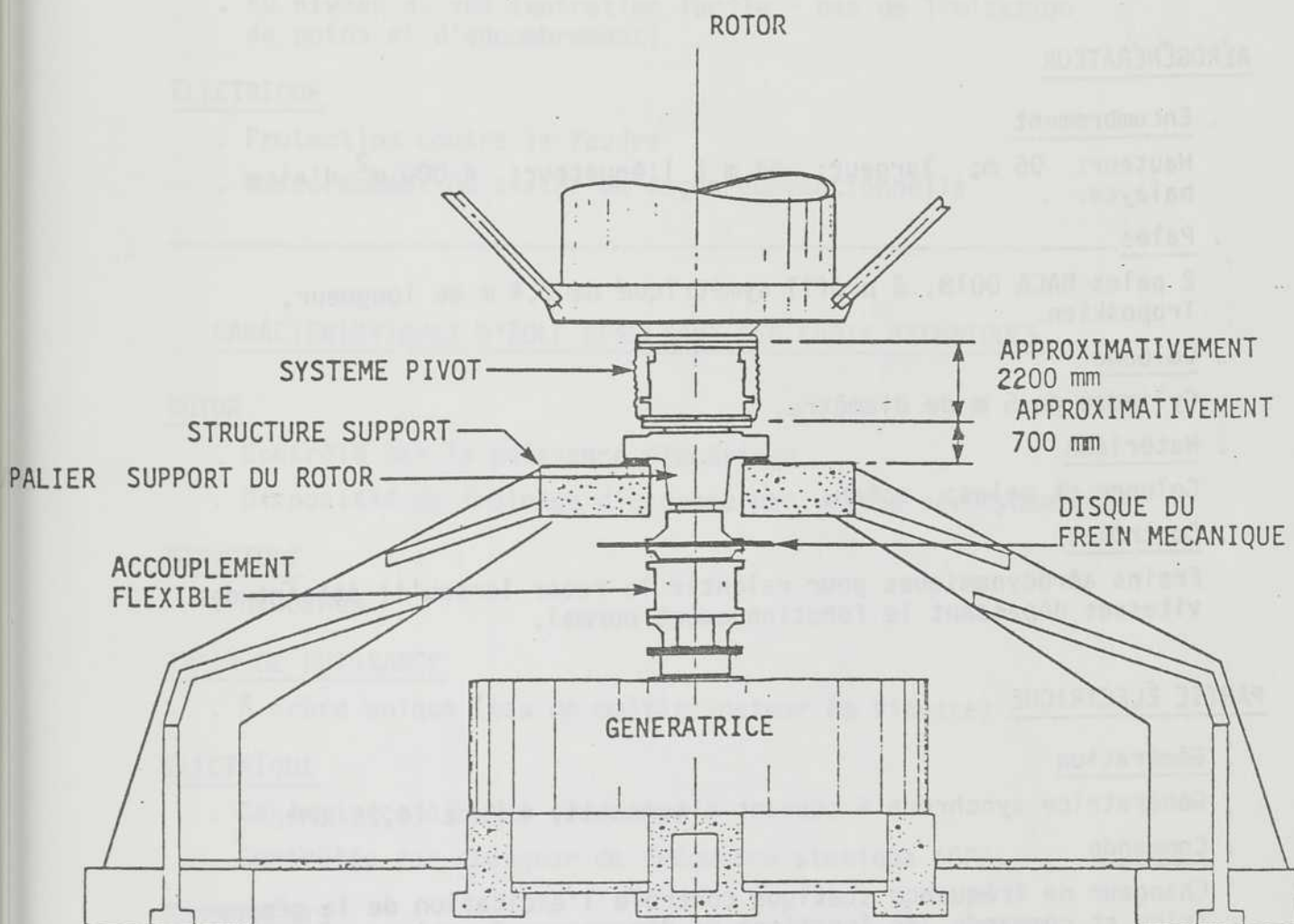
# AEOLUS SITE EVALUATION

- ▼ 60m INSTRUMENTED TOWER
- SYNOPTIC WEATHER RECORD SITE



# ÉOLE VUE EN ÉLÉVATION





VUE D'ENSEMBLE DU TRAIN DE PUISSANCE

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES - ÉOLEAMBIANCE

Air marin: -40 à +40 C; zone sismique: 3; chargement de verglas jusqu'à 60 mm à densité 0,9; vent extrême: 62 m/s.

FORCE DE VENT DE FONCTIONNEMENT

Minimal (amorce): 4,36 m/s; nominal: 20,7 m/s; limite maximale de fonctionnement: 27 m/s.

AÉROGÉNÉRATEUR. Encombrement

Hauteur: 96 m; largeur: 64 m à l'équateur; 4 000 m<sup>2</sup> d'aire balayée.

. Pales

2 pales NACA 0018, à profil symétrique de 2,4 m de longueur, Tropskien.

. Colonne

Cylindre de 5 m de diamètre.

. Matériaux

Colonne et pales: acier.

. Contrôles

Freins aérodynamiques pour ralentir le rotor lorsqu'il atteint des vitesses dépassant le fonctionnement normal.

PARTIE ÉLECTRIQUE. Génération

Génératrice synchrone à courant alternatif, 4 MW à 14,25 RPM.

. Commande

Changeur de fréquence statique contrôle l'excitation de la génératrice et commande les fonctions de démarrage; fonctionnement à vitesse variable ou sélectionnée, de freinage; commande locale ou à distance.

. Raccordement au réseau

Selon les normes habituelles d'Hydro-Québec sur le réseau 69 kV voisin.

CARACTÉRISTIQUES INHÉRENTES AUX AÉROGÉNÉRATEURS  
À AXE VERTICAL DE TYPE DARRIEUS

ROTOR

- . Omnidirectionnel (système de contrôle très simple)
- . Plusieurs points de support des pales
- . Surface de pale importante à la trajectoire de capture maximale

TRAIN DE PUISSANCE

- . Au niveau du sol (entretien facile - pas de limitation de poids et d'encombrement)

ÉLECTRIQUE

- . Protection contre la foudre
  - . Raccordement du stator de façon conventionnelle
- 

CARACTÉRISTIQUES D'ÉOLE RÉSULTANT DES CHOIX TECHNIQUES

ROTOR

- . Contrôlé par la puissance électrique
- . Dispositif de freinage d'urgence par volets aérodynamiques

STRUCTURE

- . Haubanée

TRAIN DE PUISSANCE

- . À arbre unique (pas de multiplicateur de vitesse)

ÉLECTRIQUE

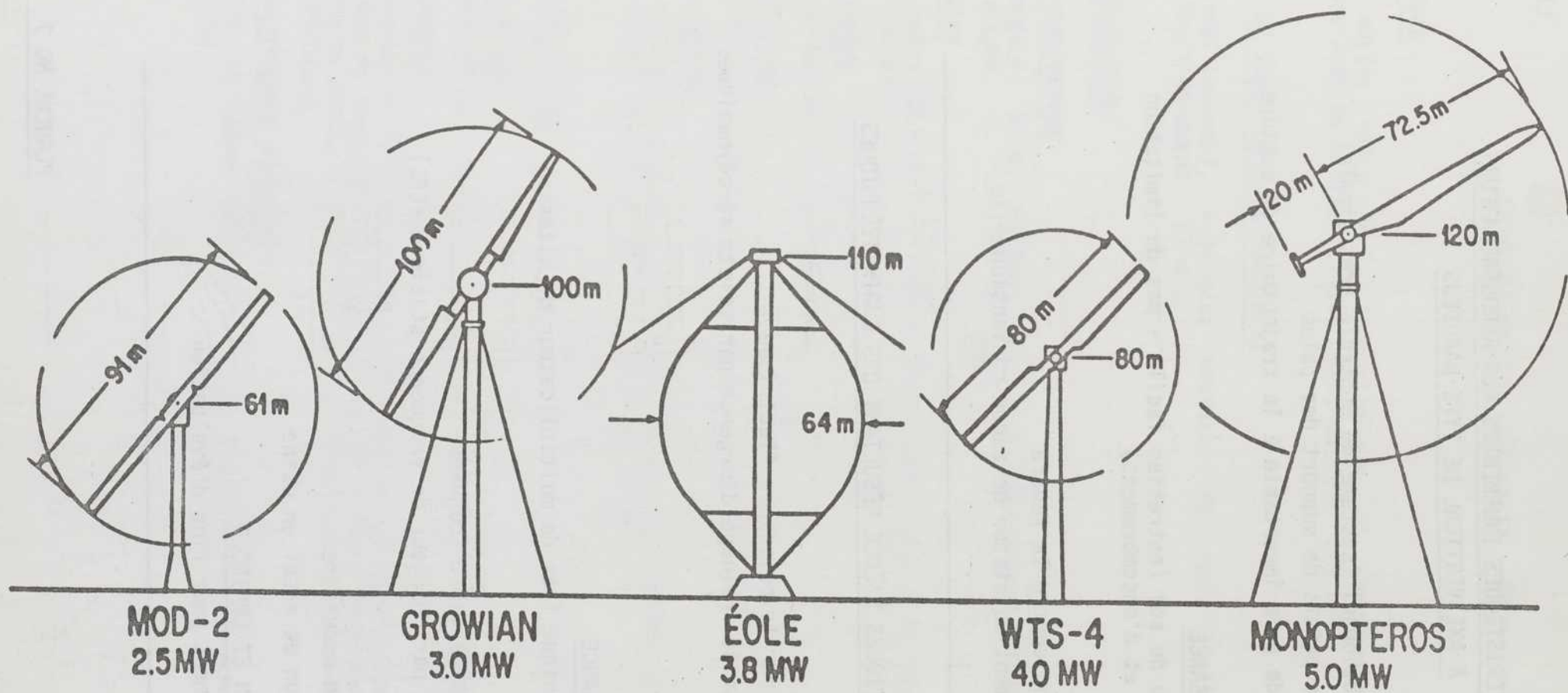
- . Génératrice à basse fréquence
- . Contrôlée par changeur de fréquence statique (CFS)

ÉQUIPEMENTS

- . Conception modulaire
- . Fabrication et essai en usine

INSTRUMENTATION ET CONTRÔLE

- . Suréquipement pour fins d'évaluation
-



EL. 205m  
(16.0 MW EST.)  
16,513 m<sup>2</sup>

EL. 174m  
(12.0 MW EST.)  
11,690 m<sup>2</sup>

EL. 146m  
(8.0 MW EST.)  
8000 m<sup>2</sup>

EL. 135m  
6.6 MW  
6567 m<sup>2</sup>

EL. 108m  
4.0 MW  
4000 m<sup>2</sup>

## COMPARISON OF VAWTG's AND HAWTG's

WIND DIRECTION  
DIRECTION DU VENT →

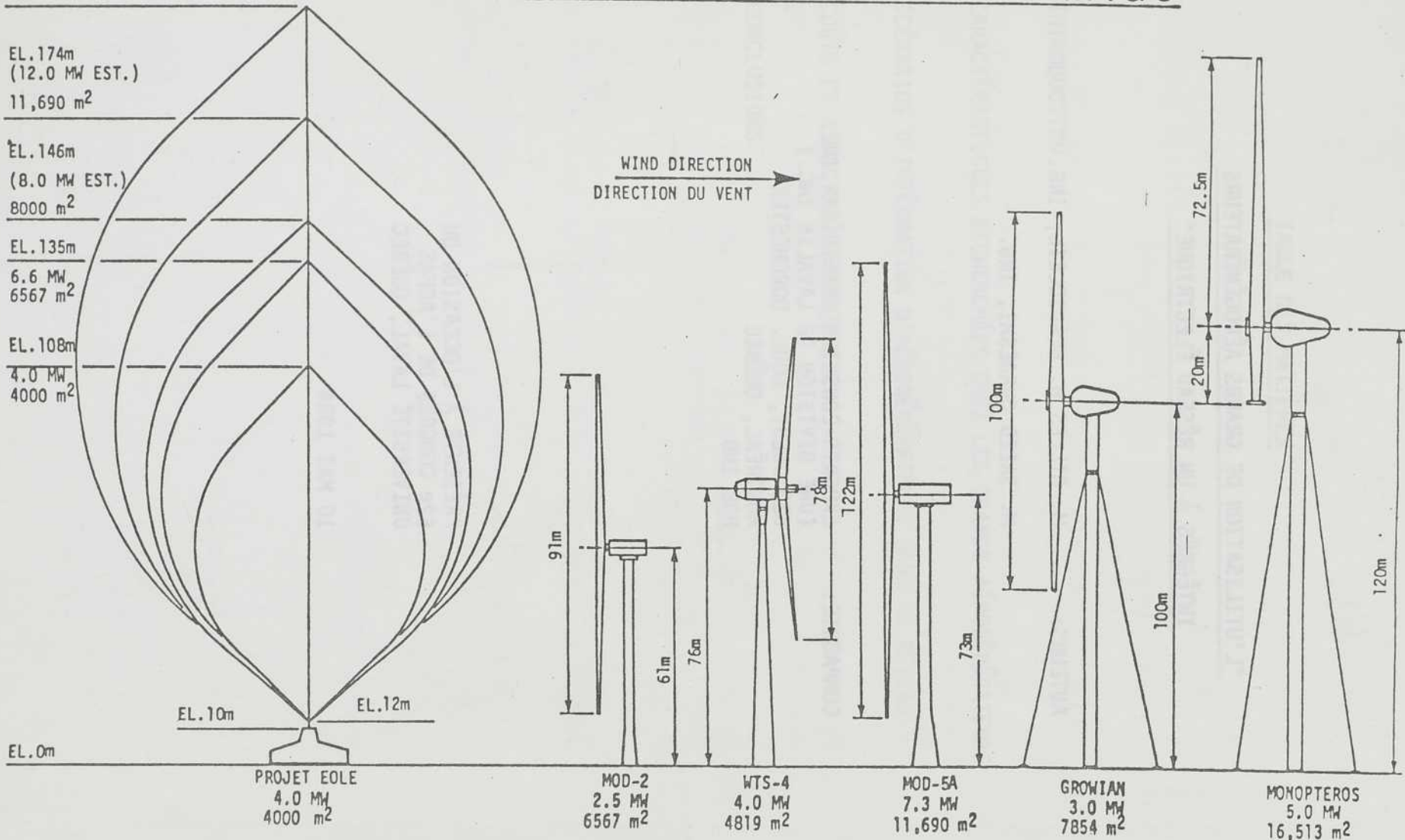


PLANCHE NO 9

"L'UTILISATION DE GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS  
INTÉGRÉS À UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE"

**AUTEURS:** M. GILLES H. BEAUSOLEIL, ING.  
M. SAEED QURAESHI, ING.

**COMPAGNIE:** EXPERTS-CONSEILS SHAWINIGAN INC.  
(UNE DIVISION DE LAVALIN INC.)  
620 OUEST, BOUL. DORCHESTER  
MONTRÉAL, QUÉBEC  
H3B 1N8

PRÉSENTÉ À L'OCCASION DU  
52<sup>e</sup> CONGRÈS DE L'ACFAS  
UNIVERSITÉ LAVAL, QUÉBEC

10 MAI 1984

## TABLE DES MATIÈRES

- INTRODUCTION
- CARACTÉRISTIQUES RECHERCHÉES CHEZ LES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS
- SCÉNARIOS D'INTÉGRATION D'AÉROGÉNÉRATEURS DANS UN RÉSEAU
- COÛTS ET ASPECTS ÉCONOMIQUES
- CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

- LES GRANDES ÉOLIENNES SE REGROUPENT EN DEUX CATÉGORIES PRINCIPALES SELON L'ORIENTATION DE LEUR AXE DE ROTATION PAR RAPPORT À LA DIRECTION DU VENT ET À LA SURFACE DU SOL: AÉROGÉNÉRATEURS À AXE HORIZONTAL (AGAH) ET AÉROGÉNÉRATEURS À AXE VERTICAL (AGAV).
  
- LES DIFFÉRENCES MAJEURES ENTRE CES DEUX TYPES SONT LES SUIVANTES:
  - LES MACHINES À AXE HORIZONTAL POSSÈDENT DES PALES DROITES RELIÉES À UN MOYEU ET TOURNANT COMME UNE HÉLICE AVEC L'AXE DE ROTATION PARALLÈLE AU COURANT D'AIR. LES MACHINES À AXE VERTICAL ONT DES PALES FIXÉES À UNE COLONNE TOURNANTE AYANT SON AXE PERPENDICULAIRE À LA FOIS AU COURANT D'AIR ET AU SOL.
  
  - LE TRAIN DE PUISSANCE D'UN AGAH SE RETROUVE DANS UNE NACELLE À LA HAUTEUR DU MOYEU ALORS QUE POUR UN AGAV, IL SE SITUE AU SOL.
  
  - LE ROTOR ET LA NACELLE D'UN AGAH DOIVENT ÊTRE ALIGNÉS DANS LA DIRECTION DU VENT. LE FONCTIONNEMENT D'UN AGAV EST INDÉPENDANT DE LA DIRECTION DU VENT.
  
  - UN AGAH UTILISE NORMALEMENT UNE HÉLICE À PAS VARIABLE TANDIS QU'UN AGAV POSSÈDE DES PALES MAINTENUES EN PLACE SOLIDEMENT.
  
  - LES AGAH SONT DE PLUS APPELÉS AMONT OU AVAL SELON QUE LEUR ROTOR SE SITUE EN AVANT OU EN ARRIÈRE DE LA NACELLE, PAR RAPPORT À LA DIRECTION DU VENT.

EXEMPLES DE GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS

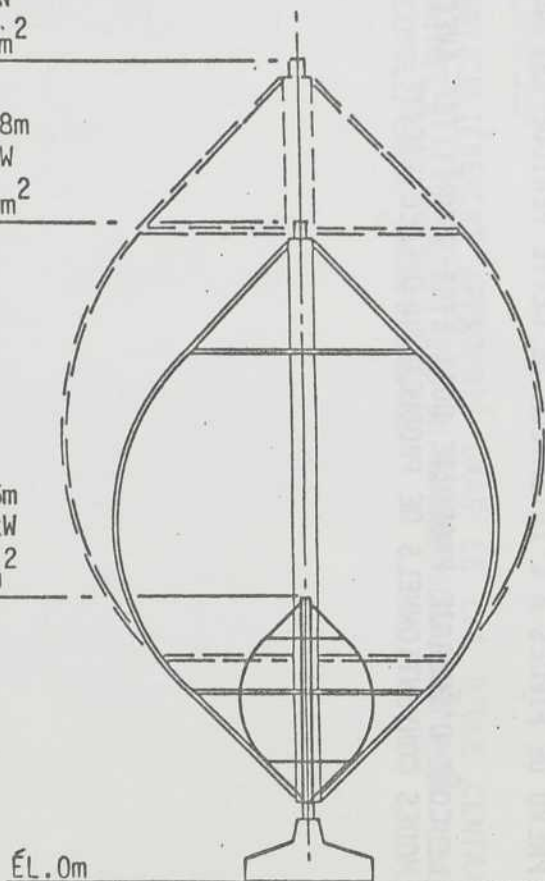


747 À L'ÉCHELLE

ÉL. 135m  
6.6 MW  
6567 m<sup>2</sup>

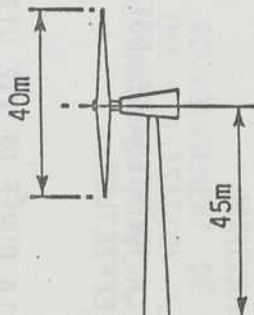
ÉL. 108m  
4.0 MW  
4000 m<sup>2</sup>

ÉL. 46m  
230 kW  
580 m<sup>2</sup>

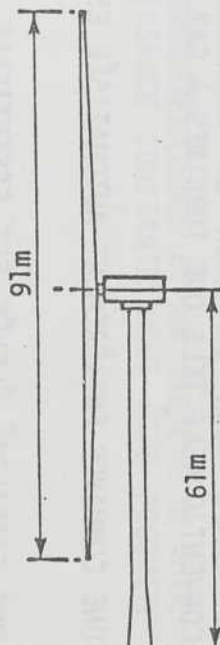


ÎLES-DE-LA-MADELEINE: 230 kW  
ÉOLE: 4 MW  
CANADA

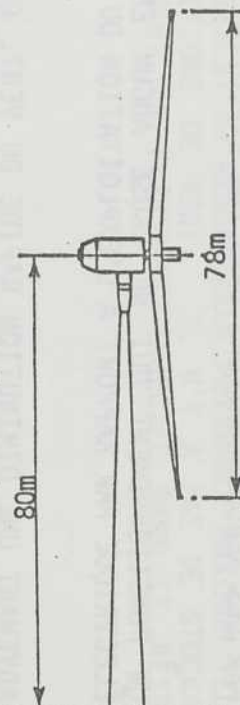
DIRECTION  
DU VENT →



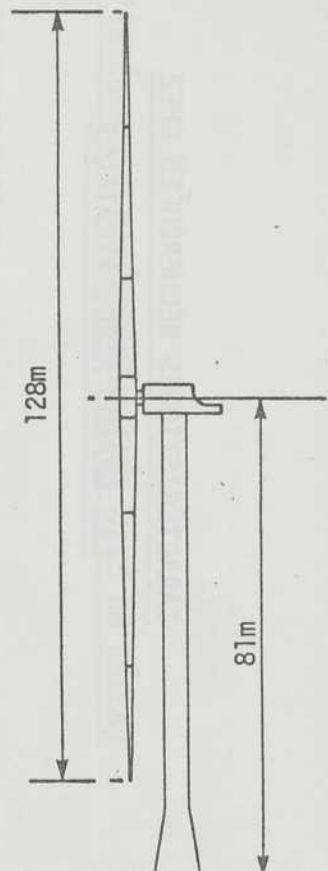
NIBE  
650 kW<sub>2</sub>  
1257 m<sup>2</sup>  
DANEMARK



MOD-2  
2.5 MW<sub>2</sub>  
6567 m<sup>2</sup>  
É.-U.



WTS-4  
4 MW  
4819 m<sup>2</sup>  
SUÈDE



MOD-5B  
7.2 MW  
12,870 m<sup>2</sup>  
É.-U.

CARACTÉRISTIQUES RECHERCHÉES CHEZ  
LES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS

- AUCUNE RESTRICTION PARTICULIÈRE QUANT À LA PUISSANCE MAXIMALE PRODUITE PAR LES AÉROGÉNÉRATEURS DANS UNE EXPLOITATION DONNÉE.
- UN FONCTIONNEMENT QUI NE CAUSE AUCUN EFFET DÉFAVORABLE AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE PAR RAPPORT À L'EXPLOITATION DU SYSTÈME ET À SA STABILITÉ.
- ADVENANT UNE DIMINUTION RAPIDE DU VENT, ON DOIT PRÉVOIR SUFFISAMMENT DE TEMPS POUR DÉMARRER ET BRANCHER DES ALTERNATEURS DE RELÈVE CONVENTIONNELS TELS QUE TURBINES À GAZ, DIÉSEL OU HYDRAULIQUES.
- UNE COMMANDE ENTIÈREMENT AUTOMATISÉE EST REQUISE.
- UNE FIABILITÉ ÉLEVÉE EST ESSENTIELLE POUR ASSURER UNE DISPONIBILITÉ MAXIMUM.
- LA MAINTENANCE DOIT ÊTRE RÉDUITE AU MINIMUM TOUT EN ÉTANT FACILE À EFFECTUER.
- LA DURÉE DE VIE UTILÈ DEVRAIT ÊTRE D'AU MOINS 30 ANS. LE REMPLACEMENT PRÉVU DE PIÈCES À L'INTÉRIEUR DE CETTE PÉRIODE EST ACCEPTABLE.
- LE COÛT D'ÉNERGIE PRODUITE DOIT ÊTRE COMPÉTITIF AVEC CELUI DES AUTRES MODES CONVENTIONNELS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ.

## SCÉNARIOS D'INTÉGRATION D'AÉROGÉNÉRATEURS DANS UN RÉSEAU

### MODE D'ÉCONOMIE DE COMBUSTIBLES:

LES AÉROGÉNÉRATEURS FOURNISSENT AU RÉSEAU LEUR PUISSANCE MAXIMUM TELLE QUE DICTÉE PAR LES CONDITIONS DE VENT. IL N'Y A PAS DE STOCKAGE D'ÉNERGIE ET PAR CONSÉQUENT LA PUISSANCE INJECTÉE DANS LE RÉSEAU FLUCTUE.

### MODE DE PRODUCTION CONTINUE:

AVEC UN NOMBRE SUFFISANT D'AÉROGÉNÉRATEURS ET UN SYSTÈME DE STOCKAGE D'ÉNERGIE APPROPRIÉ, UNE PUISSANCE CONSTANTE PEUT ÊTRE PRODUITE DE FAÇON CONTINUE.

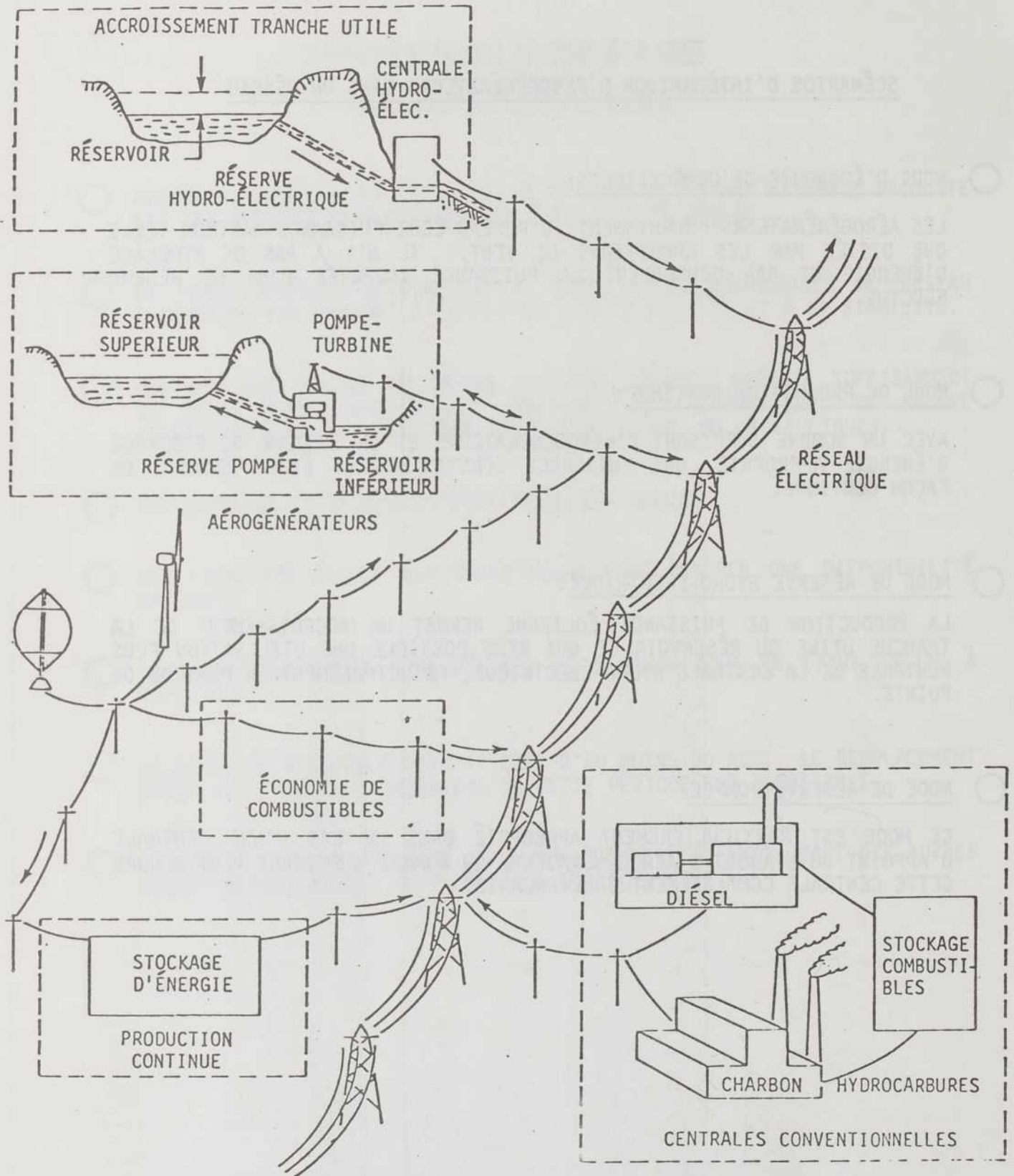
### MODE DE RÉSERVE HYDRO-ÉLECTRIQUE:

LA PRODUCTION DE PUISSANCE ÉOLIENNE PERMET UN ACCROISSEMENT DE LA TRANCHE UTILE DU RÉSERVOIR CE QUI REND POSSIBLE UNE UTILISATION PLUS RENTABLE DE LA CENTRALE HYDRO-ÉLECTRIQUE, PRINCIPALEMENT EN PÉRIODE DE POINTE.

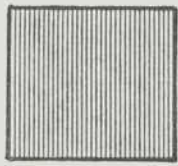
### MODE DE RÉSERVE POMPÉE:

CE MODE EST PARTICULIÈREMENT APPROPRIÉ DANS LE CAS D'UNE CENTRALE D'APPOINT OÙ L'AJOUT D'AÉROGÉNÉRATEURS EN NOMBRE SUFFISANT PEUT RENDRE CETTE CENTRALE COMPLÈTEMENT INDÉPENDANTE.

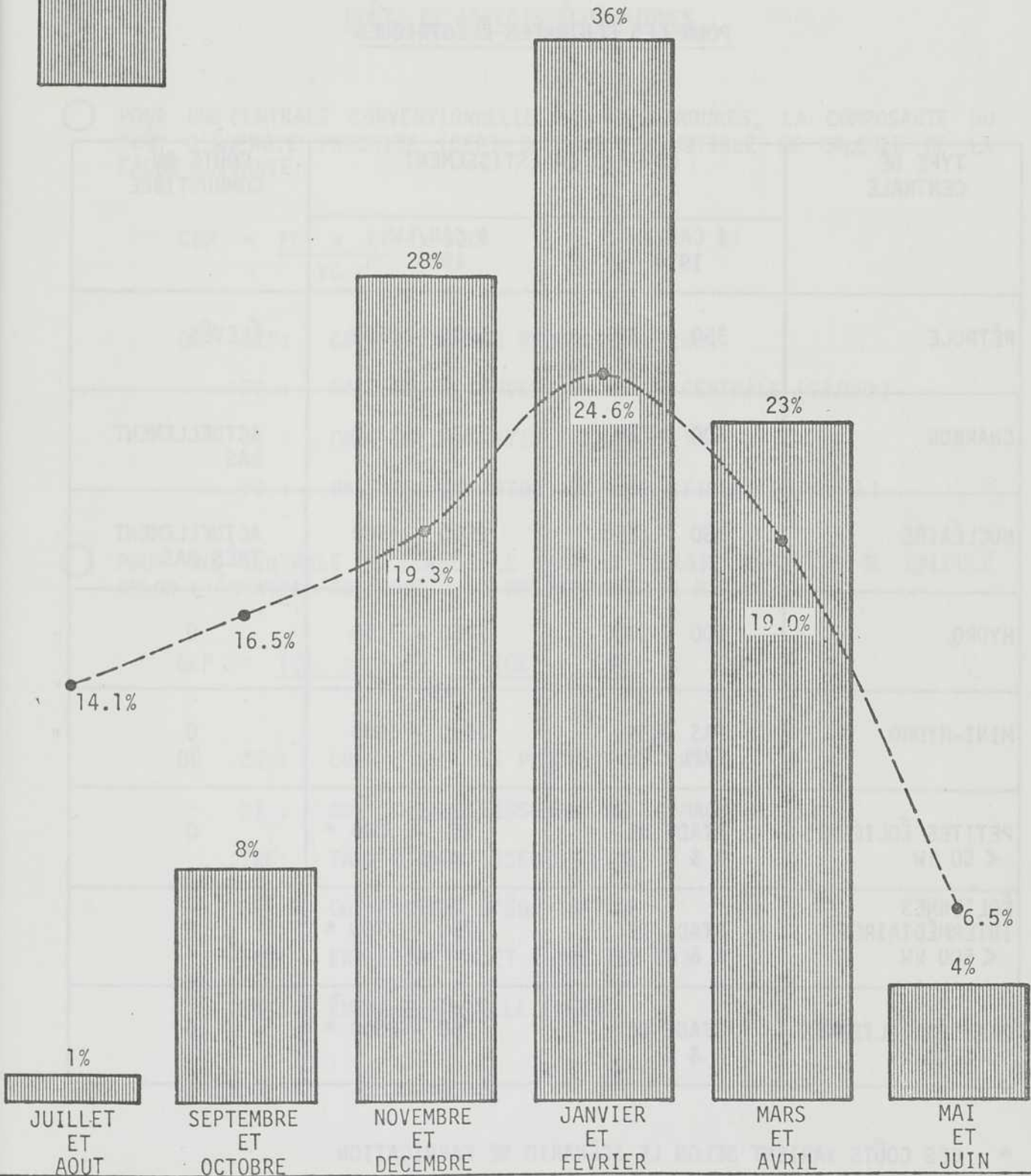
MODES D'UTILISATION DES AÉROGÉNÉRATEURS



—●— : ENERGIE EOLIENNE A LA FONDERIE



: BESOINS DE CHAUFFAGE TYPIQUES (SOURCE: HYDRO-QUEBEC)



COMPATIBILITE ENTRE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE ET L'ENERGIE EOLIENNE

COÛTS D'INVESTISSEMENT ET DE COMBUSTIBLE  
POUR LES CENTRALES ÉLECTRIQUES

TYPE DE CENTRALE	COÛTS D'INVESTISSEMENT		COÛTS DU COMBUSTIBLE
	\$ CAN/kW 1974	\$ CAN/kW 1984	
PÉTROLE	350 - 650	1000 - 1500	ÉLEVÉS
CHARBON	500 - 750	1250 - 1750	ACTUELLEMENT BAS
NUCLÉAIRE	750 - 1150	2500 - 4400	ACTUELLEMENT TRÈS BAS
HYDRO	600 - 1000	1250 - 3150	0
MINI-HYDRO	PAS TRÈS EXPLOITÉ	1500 - 5000	0
PETITES ÉOLIENNES < 50 kW	STADE DE R & D	750 - 5000 *	0
ÉOLIENNES INTERMÉDIAIRES < 500 kW	STADE DE R & D	750 - 3750 *	0
GRANDES ÉOLIENNES > 1000 kW	STADE DE R & D	750 - 2500 *	0

\* : CES COÛTS VARIENT SELON LE SCÉNARIO DE FABRICATION

## COÛTS ET ASPECTS ÉCONOMIQUES

- POUR UNE CENTRALE CONVENTIONNELLE À HYDROCARBURES, LA COMPOSANTE DU COÛT D'ÉNERGIE PRODUITE (CEP) DUE AU COMBUSTIBLE SE CALCULE DE LA FAÇON SUIVANTE:

$$CEP = \frac{FC \times CC}{VC} \times 100$$

- OÙ CEP: COÛT D'ÉNERGIE PRODUITE (¢/kWh)  
 FC : FACTEUR DE CONVERSION DE LA CENTRALE (GJ/kWh)  
 CC : COÛT DU COMBUSTIBLE (\$/BARIL)  
 VC : VALEUR CALORIFIQUE DU COMBUSTIBLE (GJ/BARIL)

- POUR UNE CENTRALE ÉOLIENNE, LE COÛT D'ÉNERGIE PRODUITE SE CALCULE SELON L'ÉQUATION CONFORME À LA RECOMMANDATION D'EPRI:

$$CEP = \frac{(CI \times TAF) + (CE \times E\&E)}{EA} \times 100$$

- OÙ CEP: COÛT D'ÉNERGIE PRODUITE (¢/kWh)  
 CI : COÛT D'INVESTISSEMENT DE LA MACHINE (\$)  
 TAF: TAUX D'AMORTISSEMENT FIXE  
 CE : COEFFICIENT D'ÉGALISATION  
 E&E: EXPLOITATION ET ENTRETIEN (\$)  
 EA : ÉNERGIE ANNUELLE (kWh)

COMPARAISON DES COÛTS D'ÉNERGIE PRODUITE  
CENTRALES À HYDROCARBURES ET CENTRALES ÉOLIENNES

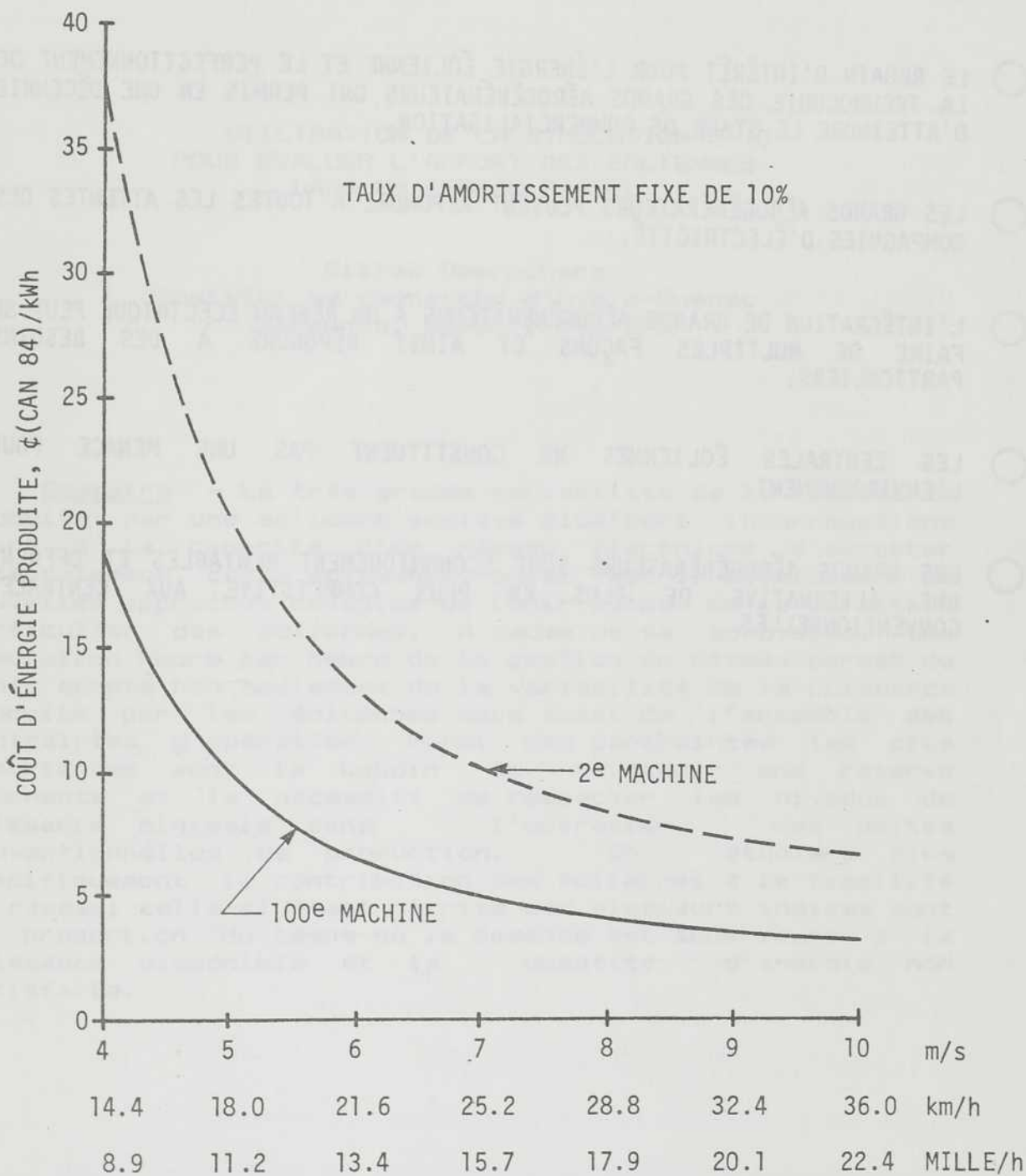
PRIX INTERNATIONAL PÉTROLE BRUT \$ US/BARIL	PRIX LOCAL * MAZOUT NO 6 \$ US/BARIL	CEP MAZOUT NO 6 ¢(CAN)/kwh	CEP ** ÉNERGIE ÉOLIENNE ¢(CAN)/kwh	
			@ 7m/s ***	@ 10m/s ***
2	2.6	0.51	5.03	3.36
10	13.0	2.58	5.03	3.36
15	19.5	3.86	5.03	3.36
20	26.0	5.16	5.03	3.36
25	32.5	6.45	5.03	3.36
30	39.0	7.74	5.03	3.36
35	45.5	9.03	5.03	3.36
40	52.0	10.33	5.03	3.36

\* : PRIX À LA LIVRAISON; VARIE SELON LA DESTINATION

\*\* : SCÉNARIO DE FABRICATION EN SÉRIE, 6.6 MW ET 10% DE TAUX D'AMORTISSEMENT FIXE

\*\*\* : VITESSE DU VENT ANNUELLE MOYENNE À 10 m DU SOL

COÛT D'ÉNERGIE PRODUITE POUR  
UN AÉROGÉNÉRATEUR DARRIEUS DE 6.6 MW



VITESSE MOYENNE ANNUELLE DU VENT À 10 m DU SOL

## CONCLUSIONS

- LE REGAIN D'INTÉRÊT POUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE ET LE PERFECTIONNEMENT DE LA TECHNOLOGIE DES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS ONT PERMIS EN UNE DÉCENNIE D'ATTEINDRE LE STADE DE COMMERCIALISATION.
- LES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS PEUVENT RÉPONDRE À TOUTES LES ATTENTES DES COMPAGNIES D'ÉLECTRICITÉ.
- L'INTÉGRATION DE GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS À UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE PEUT SE FAIRE DE MULTIPLES FAÇONS ET AINSI RÉPONDRE À DES BESOINS PARTICULIERS.
- LES CENTRALES ÉOLIENNES NE CONSTITUENT PAS UNE MENACE POUR L'ENVIRONNEMENT.
- LES GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS SONT ÉCONOMIQUEMENT RENTABLES ET OFFRENT UNE ALTERNATIVE DE PLUS EN PLUS COMPÉTITIVE AUX CENTRALES CONVENTIONNELLES.

ACFAS 52ième congrès annuel  
Université Laval, mai 1984

UTILISATION DE LA SIMULATION  
POUR EVALUER L'APPORT DES EOLIENNES  
DANS UN RESEAU DIESEL

Gilles Desrochers  
Institut de recherche d'Hydro-Québec  
Varenes, Québec, J0L 2P0

Sommaire - La très grande variabilité de la puissance produite par une éolienne soulève plusieurs interrogations quant à la capacité d'un réseau électrique d'accepter intégralement cette puissance, aussi faut-il développer de nouvelles approches capables de tenir compte de ce caractère particulier des éoliennes. A cause de sa souplesse, une simulation heure par heure de la gestion du réseau permet de tenir compte non seulement de la variabilité de la puissance produite par les éoliennes mais aussi de l'ensemble des contraintes d'opération. Parmi ces contraintes les plus importantes sont le besoin de maintenir une réserve tournante et la nécessité de respecter les niveaux de puissance minimale dans l'opération des unités conventionnelles de production. On étudiera plus spécifiquement la contribution des éoliennes à la fiabilité du réseau; celle-ci étant décrite par plusieurs indices dont la proportion du temps où la demande est supérieure à la puissance disponible et la quantité d'énergie non satisfaite.

## INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie éolienne, n'est pas quelque chose de nouveau. Ce qui est plus nouveau toutefois c'est l'utilisation de cette énergie pour la production commerciale d'électricité.

Or, avant d'installer une capacité de production éolienne de plusieurs dizaines, voir centaines, de mégawatts le producteur d'énergie voudra évaluer quelle sera la contribution de cette source d'énergie qui pour lui est nouvelle.

Cette contribution peut-être quantifiée de plusieurs façons. Les différents aspects qui intéressent le producteur sont:

- Le déplacement de l'énergie produite par des moyens conventionnels.
- Les effets sur les coûts.
- L'impact sur la fiabilité de l'alimentation.

Les producteurs possèdent déjà des méthodes pour choisir les nouveaux équipements de production qu'il faut installer dans un réseau pour rencontrer l'accroissement de la demande. Ces méthodes font appel à des techniques d'optimisation complexes, et étudient l'évolution du réseau sur plusieurs dizaines d'années. Ces méthodes ont été pensées pour des moyens conventionnels de production et ne peuvent représenter que de façon simplifiée les éoliennes. Elles ne permettent pas, entre autres, choses de tenir compte de la grande variabilité de la puissance de sortie des éoliennes et de la capacité du réseau d'accepter cette puissance.

La simulation heure par heure de l'opération du réseau est l'approche idéale pour évaluer la contribution d'équipement nouveaux. Elle permet:

- La représentation détaillée du comportement des équipements et du réseau.
- La prise en compte des politiques d'opération.
- L'évaluation des couts de production.
- Le calcul de l'énergie non absorbée par le réseau.

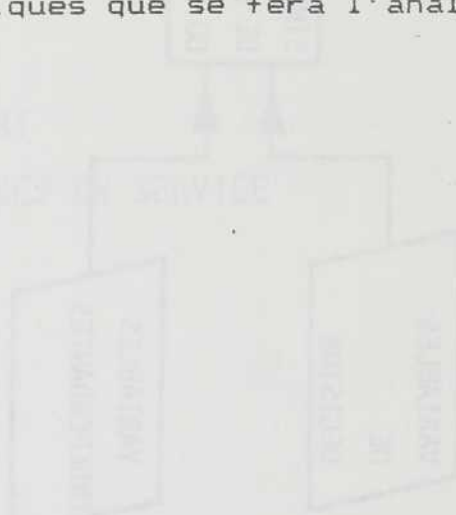
Dans un premier temps on va décrire le simulateur que l'on a développé à l'IREQ pour analyser l'intégration d'éoliennes dans des réseaux diésels. Dans un deuxième temps, on détaillera comment l'information obtenue du simulateur permet de quantifier certains effets de l'addition des éoliennes sur le réseau.

## DESCRIPTION DU SIMULATEUR

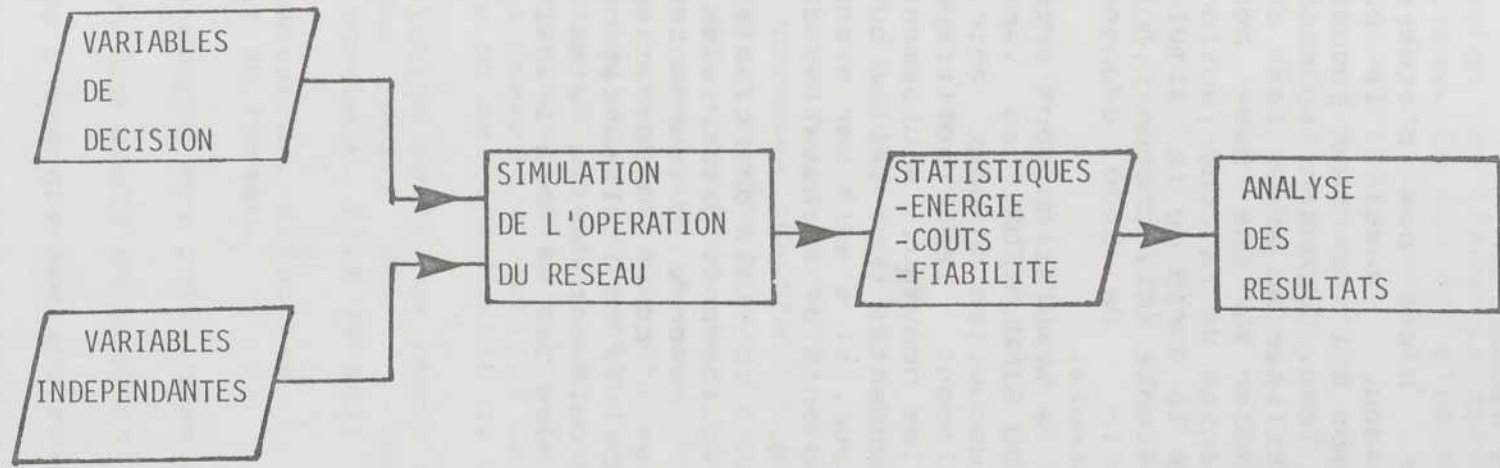
Le but de ce simulateur n'est pas d'étudier le comportement dynamique du réseau, aussi le pas de simulation, c'est-à-dire le temps à l'intérieur duquel tout reste constant peut être assez long. Cependant pour obtenir une bonne précision et pour utiliser au mieux les données disponibles on a choisi de simuler sur une base horaire. Pour obtenir une évaluation précise de la contribution des éoliennes on a fixé à une année la durée de la simulation. Enfin dans l'exemple qui est présenté ici, chaque simulation a été reprise 16 fois afin de bien dégager les caractéristiques du processus simulé.

Les différents éléments de la simulation sont présentés dans la figure **SCHEMA GENERAL DU SIMULATEUR**. Les variables de décision sont celles sur lesquelles on peut agir, ces variables concernent principalement les politiques de gestion du réseau ainsi que les nouveaux équipements de production. Les variables indépendantes sont celles qui sont hors du contrôle du planificateur, il s'agit par exemple de la demande, du vent, des équipements déjà installés dans le réseau et du coût des carburants.

La simulation à chaque heure consiste principalement à répartir la demande entre les équipements disponibles et à réévaluer périodiquement la réserve tournante. Des statistiques qui décrivent les coûts d'opération, la production d'énergie et la fiabilité de l'alimentation sont accumulées tout au long du déroulement de la simulation. C'est à partir de ces statistiques que se fera l'analyse de la contribution des éoliennes.



SCHEMA GENERAL DU SIMULATEUR.



- VARIABLES INDEPENDANTES -

REPRESENTATION DES EQUIPEMENTS

- EQUIPEMENT DE PRODUCTION
  - PLAGE DE PUISSANCE
  - CONSOMMATION DE CARBURANT
  - TEMPS DE DEMARRAGE
  - DEFAILLANCES ET REMISES EN SERVICE
  - ENTRETIENS
  - COUTS
  
- EQUIPEMENT DE TRANSPORT
  - DEFAILLANCES ET REMISES EN SERVICE

- VARIABLES INDEPENDANTES -  
RERESANTATION DE LA CHARGE ET DU VENT

- MODELES AUTOREGRESSIFS (BOX & JENKINS)

- CHARGE:

$$Q_T = F(Q_{T-1}, Q_{T-2}, Q_{T-168}, Q_{T-169}, Q_{T-170}, Q_{T-336}, \\ Q_{T-337}, Q_{T-338})$$

- VENT:

$$V_T = G(V_{T-1}, V_{T-2})$$

- VALEURS GENEREES PAR LES MODELES POSSEDENT LES  
CARACTERISTIQUES DES DONNEES REELLES

-MOYENNE

-VARIANCE

-AUTOCORRELATION

- VARIABLES DE DECISION -

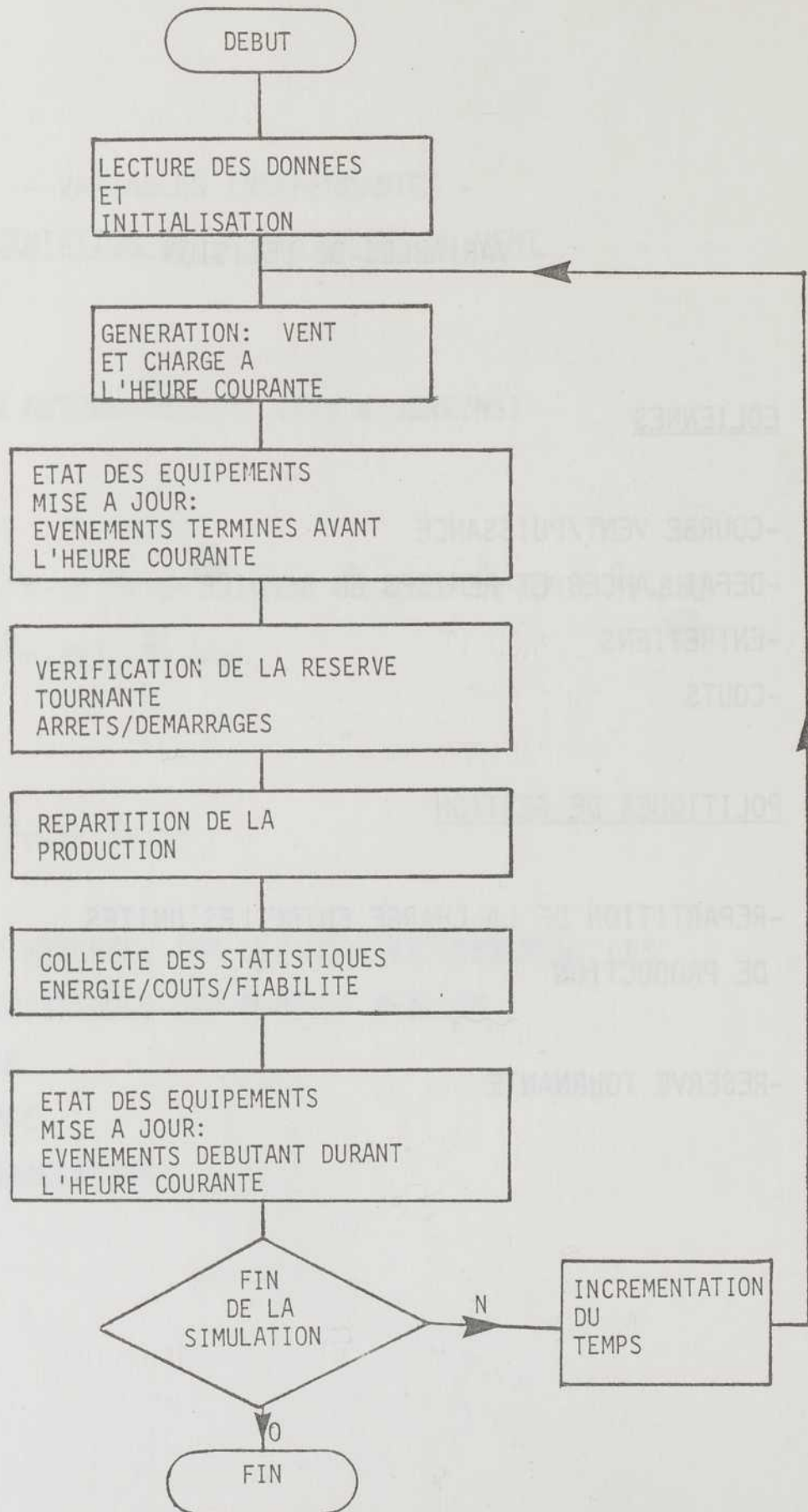
EOLIENNES

- COURBE VENT/PUISSANCE
- DEFAILLANCES ET REMISES EN SERVICE
- ENTRETIENS
- COUTS

POLITIQUES DE GESTION

- REPARTITION DE LA CHARGE ENTRE LES UNITES DE PRODUCTION
- RESERVE TOURNANTE

## SIMULATION



## RESULTATS DE LA SIMULATION

### • ENERGIE

- ENERGIE APPELEE
- ENERGIE PRODUITE PAR CHAQUE UNITE
- CARBURANT CONSOMME
- ENERGIE EOLIENNE NON ABSORBEE

### • COUTS

- COUT DU CARBURANT CONSOMME
- COUT DES ENTRETIENS
- COUT DES REPARATIONS
- COUT AU KWH DES EOLIENNES

### • FIABILITE

- FREQUENCES ET DUREES DES INTERRUPTIONS
- ENERGIE NON LIVREE

## ADDITION D'ÉOLIENNES DANS UN RESEAU DIESEL

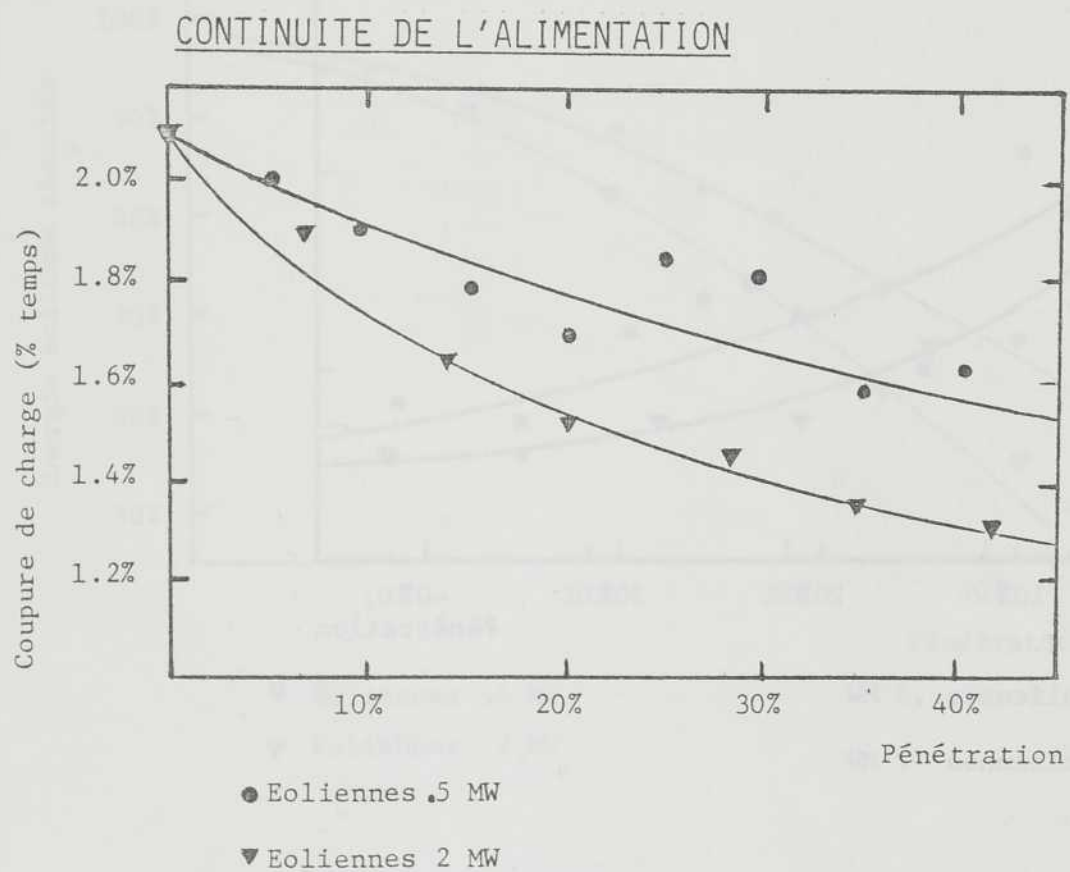
A titre d'exemple on a étudié l'influence de l'addition d'éoliennes sur la fiabilité du réseau des Iles de la Madeleine. A cause du coût élevé du carburant diesel et de la présence d'un régime de vent favorable, les Iles de la Madeleine constituent un emplacement prometteur pour l'installation d'éoliennes. Dans cet exemple on a étudié deux éoliennes à axe verticale, une éolienne de 500 KW et une éolienne de 2000 KW.

Une première mesure de la fiabilité d'un réseau est donnée par la continuité de l'alimentation. La figure **CONTINUITÉ DE L'ALIMENTATION** montre la variation de la continuité du service, c'est-à-dire le pourcentage du temps où il y a de la demande non satisfaite dans le réseau en fonction de la pénétration des éoliennes. Pour une pénétration de 42% (6 éoliennes de 2 MW) on a une amélioration de 40% dans le pourcentage du temps où la demande n'est pas satisfaite. Il y a donc un impact positif réel de l'addition des éoliennes sur la fiabilité.

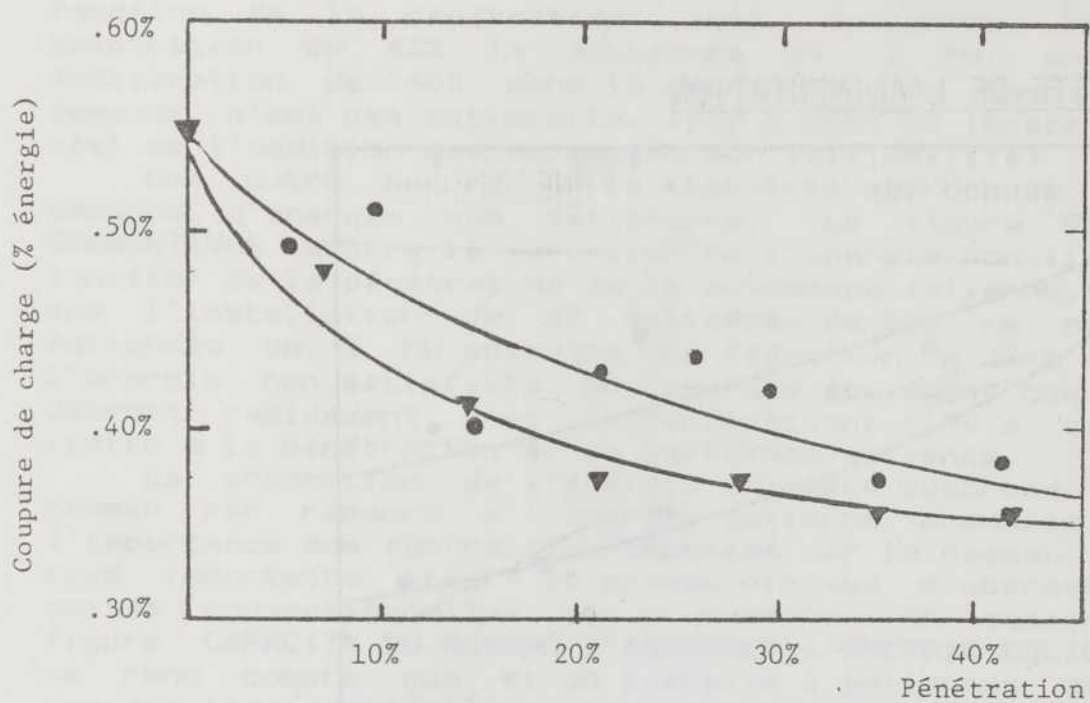
Une autre mesure de la fiabilité est donnée par la demande d'énergie non satisfaite. La figure **FIABILITÉ ÉNERGETIQUE** montre la variation de l'énergie non livrée en fonction de la pénétration de la puissance éolienne. On note que l'installation de 22 éoliennes de 500 KW ou de 6 éoliennes de 2 MW entraîne une réduction de 30 à 36% de l'énergie non satisfaite. On remarque également que le gain décroît rapidement avec la pénétration: il y a donc une limite à la pénétration de la puissance éolienne.

La proportion de l'énergie éolienne absorbée par le réseau par rapport à l'énergie éolienne produite montre l'importance des contraintes imposées par le réseau, une des plus importantes étant le niveau minimum d'opération des unités conventionnelles de production. En examinant la figure **CAPACITÉ DU RESEAU D'ABSORBER L'ÉNERGIE ÉOLIENNE** on se rend compte que si on installe 6 éoliennes de 2 MW (pénétration de 42%) la puissance éolienne absorbée par le réseau n'est que de 54% de celle productible. De telles constatations sont fondamentales au moment du choix de nouveaux équipements de production.

Une autre mesure de l'impact de l'addition d'éoliennes dans un réseau est la quantité d'énergie conventionnelle déplacée. Cet indice présenté dans la figure **DEPLACEMENT D'ÉNERGIE** est à la base de l'évaluation économique de la contribution des éoliennes aux réseaux électriques. Encore une fois on remarque dans cette figure qu'il y a une limite à l'addition d'éoliennes.



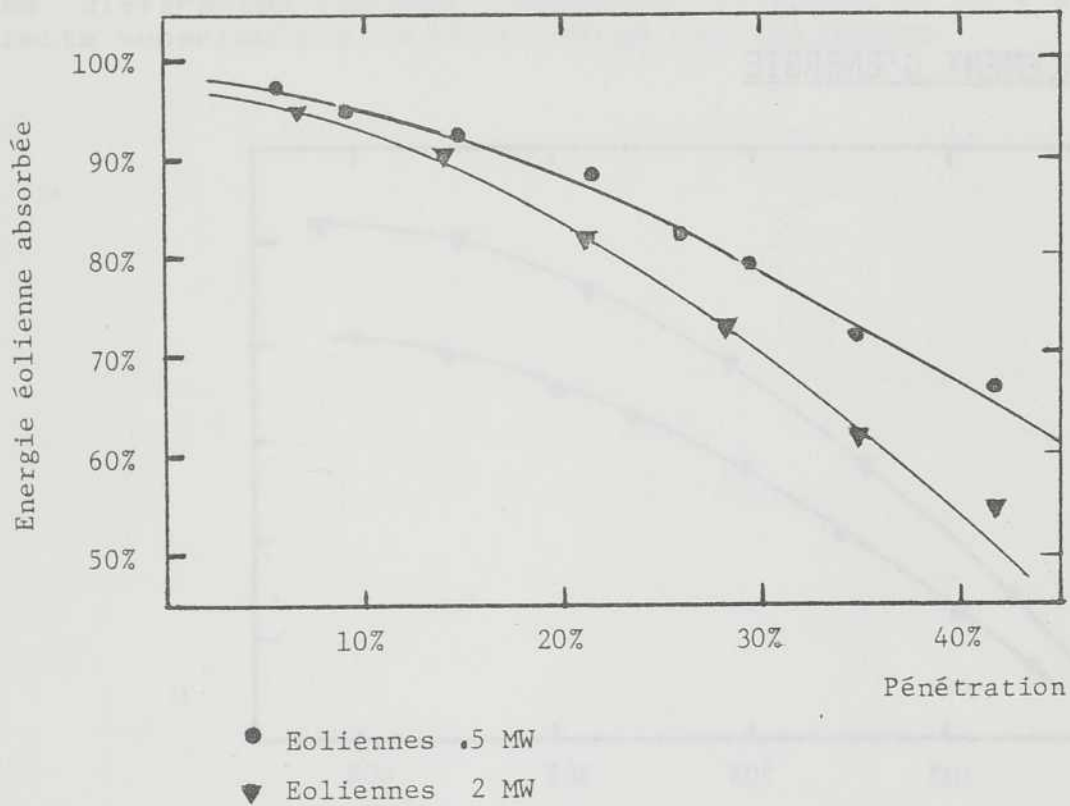
### FIABILITE ENERGETIQUE

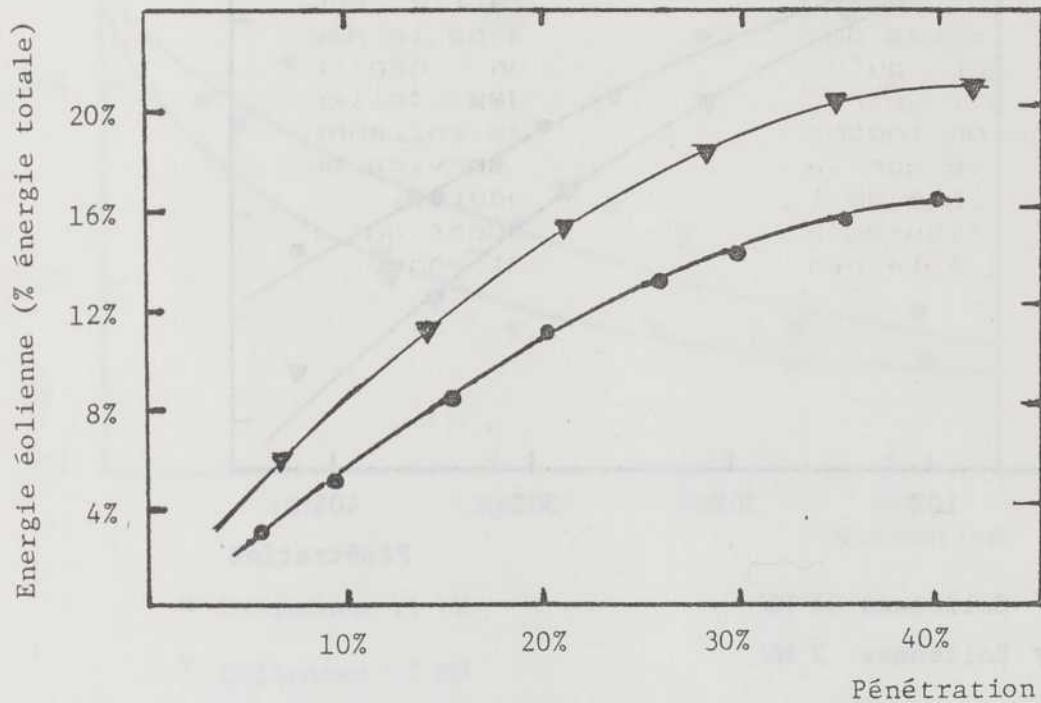


● Eoliennes .5 MW

▼ Eoliennes 2 MW

### CAPACITE DU RESEAU D'ABSORBER L'ENERGIE EOLIENNE



DEPLACEMENT D'ENERGIE

● Eoliennes 0,5 MW

▼ Eoliennes 2 MW

### CONCLUSIONS

Cette étude démontre qu'une estimation de la contribution des éoliennes qui ignorerait les diverses contraintes imposées par le réseau électrique conduirait à des prévisions beaucoup trop optimistes.

Ceci ne veut pas dire qu'il faille oublier les éoliennes. Dans le cas du réseau des Iles de la Madeleine il ressort clairement qu'une partie non négligeable de l'énergie pourrait être produite par des éoliennes. Une autre constatation importante est que les éoliennes ont une influence positive sur la continuité du service en dépit de la grande variabilité de la puissance produite. Les différentes figures présentées indiquent qu'il y a une limite supérieure à la pénétration des éoliennes.

CONCLUSIONS

Cette étude démontre qu'une estimation de la contribution des éoliennes au parc éolien des îles de la Madeleine est possible. Les données de la Commission de l'énergie de la province de Québec ont permis de déterminer les conditions de vent et de température qui sont les plus défavorables à la production d'énergie éolienne. Les données de la Commission de l'énergie de la province de Québec ont permis de déterminer les conditions de vent et de température qui sont les plus défavorables à la production d'énergie éolienne.

L'EOLIENNE DES ILES DE LA MADELEINE

Présenté par

Réal Reid

Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)

au

Colloque sur les éoliennes

52<sup>e</sup> Congrès de l'ACFAS

10 mai 1984

Université Laval-Québec

## SOMMAIRE

Quelques-uns des derniers résultats de performance et de contraintes sont présentés pour deux vitesses de rotation, soit la vitesse nominale et une vitesse réduite pour permettre une meilleure évaluation du décrochage dynamique.

Une description de quelques montages utilisés pour étudier les modes de vibration naturels du rotor et des haubans est donnée.

A la fin du programme expérimental, le comportement de l'éolienne a été jugé assez prometteur pour envisager sa mise en production sur une base expérimentale. Une révision de l'éolienne a été faite et le système de protection et contrôle a été modifié.

La philosophie de contrôle pour le fonctionnement en mode automatique est décrite avec une attention spéciale à la protection contre le verglas et à l'interprétation de la lecture du vent pour fins de contrôle.

Un projet d'une mini-centrale éolienne aux îles de la Madeleine est discuté.

## INTRODUCTION

L'éolienne des îles de la Madeleine figure 1 et 2 est une éolienne à axe vertical de type "DARRIEUS". Le rotor, figure 3, a 36,6m de hauteur et 24,4m de diamètre, sa vitesse de rotation est de 36,6 r/min. La puissance est transmise à une génératrice à induction de 224 kW via une transmission comprenant deux étages à engrenage et un étage à courroies. Une description plus complète a été donnée ailleurs (1, 2, 3 et 4).

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

### Performance

La figure 4 montre la puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent à la vitesse nominale de 36,6 r/min. Bien que le régime des vents soit assez élevé aux îles de la Madeleine (140 heures par année avec vent supérieur à 20 m/s), il a été très difficile d'obtenir des données dans le domaine du décrochage dynamique (rapport  $V_{\text{vent}}/V_{\text{pale}}$  élevé). La vitesse de rotation de l'éolienne a été réduite pour obtenir des données à un  $V_{\text{vent}}/V_{\text{pale}}$  plus élevé. Pour ce faire, la transmission à courroies a été modifiée, ce qui a donné une vitesse de rotation de 29,4 r/min et un rapport  $V_{\text{vent}}/V_{\text{pale}}$  de 25% plus élevé qu'à 36,6 r/min.

La figure 5 montre un plafonnement de la puissance pour des vitesses de vent plus élevées que 14 à 15 m/s, ce qui est une bonne indication du décrochage dynamique. Nous avons été chanceux d'obtenir des résultats avec des vents de 20 m/s sur une moyenne de 5 minutes. A 36,6 r/min nous n'avons pu obtenir de résultats au delà de 16 m/s excepté pour un point à 18,5 m/s, (moyenne d'une minute) et les données ne montraient pas le décrochage de façon bien évidente.

### Contraintes

Les figures 7 et 8 montrent la contrainte principale en fonction de la vitesse du vent mesuré à la hauteur de l'équateur de l'éolienne. Les données représentent des lectures de variation crête-crête de la contrainte en fonction du vent lu au même temps. Ces données proviennent d'enregistrement pris par l'oscillographe tel que montré à la figure 6.

La figure 7 montre la contrainte au bord d'attaque à la racine de la pale (jonction pale-colonne centrale) ( $A_{4LE}$ ) pour la vitesse de rotation nominale ( $NR = 36,6$  r/min) avec entretoises amorties, taux d'amortissement de  $14 \text{ kNsm}^{-1}$  (1 amortisseur par entretoise).

La corrélation n'est pas très bonne, ceci est principalement dû au fait que l'anémomètre est situé à 60m de l'éolienne et aussi du à l'instabilité du réseau où les variations de fréquence font que la génératrice peut donner des impulsions assez importantes pour influencer les résultats (5).

La figure 8 compare la contrainte principale pour les conditions suivantes:

- la courbe de la figure 7, vitesse de rotation  $NR = 36,6$  r/min, taux d'amortissement  $k = 14 \text{ kNsm}^{-1}$  et contrainte  $A_{4LE}$ .
- les trois autres courbes montrent les résultats pour  $NR = 29,4$  r/min et des taux d'amortissement,  $k$ , de  $14 \text{ kNsm}^{-1}$ ,  $28 \text{ kNsm}^{-1}$  et  $\infty$  (entretoises bloquées). Dans ce dernier cas, entretoises bloquées, la contrainte principale est située au niveau de l'entretoise, sur le bord d'attaque ( $B_{3LE}$ ).

La différence entre la contrainte à  $36,6$  r/min et la même contrainte à  $29,4$  r/min est probablement causée par l'excitation du mode papillon qui est assez près de  $36$  r/min.

La figure illustre assez clairement l'effet de l'amortissement de l'entretoise (à 29,4 r/min) où l'entretoise bloquée donne les meilleurs résultats. Cette conclusion est contraire aux résultats à  $NR = 36,6$  présentés antérieurement (3, 4) où à cause de la proximité du mode papillon, les contraintes étaient plus élevées avec entretoises bloquées.

### MONTAGES EXPERIMENTAUX

#### Essais de dynamique du rotor

Vers la fin du programme expérimental, un système permettant de générer des impulsions dans le rotor a été utilisé pour exciter les différents modes de vibration du rotor. Ce système montré en figure 9 permettrait de relâcher subitement une force radiale (vers le centre du rotor) exercée sur les deux pales.

Les essais furent faits par vents faibles ( $< 5$  m/s) à vitesse de rotation à peu près constante, entre 0 et 29 r/min. Les figures 10 et 11 montrent des résultats typiques de lectures d'accéléromètres montés dans les pales. Plusieurs autres signaux étaient aussi enregistrés tels que contraintes, couple, etc...

Ces résultats en cours d'analyse à l'IREQ et au CNRC permettront, tout en déterminant les modes naturelles de vibration de l'éolienne des îles de la Madeleine, de calibrer les modèles mathématiques de dynamique du rotor Darrieus (6, 7, 8).

### Vibration des haubans

Un des 4 haubans de l'éolienne a été instrumenté (2 accéléromètres près de son point milieu), son lien avec son amortisseur a aussi été instrumenté (déplacement et force) pour vérifier l'efficacité de l'amortisseur de hauban et pour aider au développement et à la calibration des modèles mathématiques de calcul et de conception des haubans en cours de développement à l'IREQ (6, 9).

### MISE EN SERVICE

Le programme expérimental s'est terminé au début de décembre 1982. Basé sur les résultats encourageants obtenus, une entente de mise en service sur une base expérimentale fut alors conclue entre le CNRC, la région Matapédia d'Hydro-Québec et l'IREQ.

### Revision mécanique

Une revision mécanique complète fut faite durant l'année 1983. Les systèmes suivants reçurent une attention particulière:

- revision et mise à date du système hydraulique des freins (pompe et contrôles)
- revision et inspection des étriers de freins.
- changement d'huile et inspection de la transmission à engrenages.
- revision complète de la transmission à courroies, changement du rapport de vitesses pour ramener NR à 36,6 r/min.
- revision et modification des boîtes de coussinet des entretoises.

### Système de protection et contrôle

Le système de protection et contrôle a été modifié pour s'assurer d'un bon fonctionnement en mode automatique avec un minimum d'intervention humaine tout en restant très sécuritaire.

Le système montré schématiquement en figure 12 fait appel à des techniques et à des composantes fréquemment employées par Hydro-Québec et est conçu pour assurer les fonctions de protection suivantes:

- Protection mécanique:

- survitesse
- haute ou basse tension des haubans
- vents forts
- perte de pression hydraulique du système de freinage
- déplacement anormal des entretoises.

- Protection électrique:

- baisse ou perte de tension
- surintensité de ligne ou du moteur (protection thermique)
- inversion de puissance

Un groupe d'accumulateurs est maintenant prêt à assurer la protection en cas de panne de réseau.

Pour minimiser les interventions humaines, le nombre d'alarmes opérant sur des relais à verrouillage a été réduit aux seules conditions jugées potentiellement dangereuses, ce qui comprend:

- survitesse
- déplacement anormal des entretoises

- tension des haubans trop faible ou trop élevée, ce qui indiquerait que l'anémomètre de contrôle permet à l'éolienne de fonctionner par vents trop forts.
- démarrage incomplet (temps pour atteindre vitesse synchrone trop long), ce qui pourrait indiquer la présence de verglas.

L'opération des volets nous présentait deux choix, fermeture automatisée ou manuelle. La fermeture manuelle a été choisie pour sa simplicité. Pour éviter les visites trop nombreuses au site, les volets ne seront déclenchés que pour les alarmes mécaniques:

- survitesse
- déplacement des entretoises
- tension des haubans

une source d'alimentation autonome maintiendra les volets fermés pour des pannes de réseau allant jusqu'à deux heures.

La protection contre le verglas fait appel au phénomène de perte de portance qui se produit lorsqu'un profil aérodynamique est exposé au verglas. Cette perte de portance se traduit par une perte de puissance, figure 13. Lorsque la puissance deviendra négative, le relais d'inversion de puissance fera déclencher un arrêt. L'anémomètre indiquant toujours un vent normal, un nouveau départ s'amorcera mais la puissance de l'éolienne n'étant pas bonne due à la présence de glace sur les pales, la vitesse synchrone ne pourra être atteinte et la protection de démarrage incomplet fera déclencher un relais à verrouillage. Une visite au site quand le verglas aura fondu sera nécessaire pour faire un rappel (déverrouiller le relais) et permettre à l'éolienne de repartir.

La vitesse du vent est le contrôle principal décidant de la marche ou de l'arrêt de l'éolienne. Ce contrôle est assuré par un anémomètre situé sur le dessus de l'éolienne. Pour éviter des arrêts et départs trop fréquents,

de l'hystérésis a été construite dans le système, la vitesse du vent est filtrée sur une moyenne d'une minute et comparée à des seuils prédéterminés par des relais comparateurs.

Deux limites sont utilisées pour la basse vitesse et deux pour la haute vitesse. Par exemple, les limites pour la basse vitesse ont été fixées à 22 et 25 km/h. D'un vent faible, les deux limites doivent être franchies avant qu'un départ ne s'amorce, c'est-à-dire que le vent doit dépasser 25 km/h sur une moyenne d'une minute avant que l'éolienne ne se mette en marche. D'une marche, les deux limites doivent être franchies avant que l'éolienne ne s'arrête (vent inférieur à 22 km/h sur une moyenne d'une minute). La même philosophie s'applique aux limites supérieures.

Un compteur enregistre le nombre d'heures où ces conditions sont respectées, soit le nombre d'heures où les vents auraient permis à l'éolienne de fonctionner. Les données de ce compteur seront comparées au nombre d'heures de marche pour obtenir la fiabilité de l'éolienne.

#### Etat actuel

Les travaux de modification du système de protection et contrôle ainsi que les travaux d'entretien et de modifications mécaniques furent terminés le 9 décembre 1983. L'éolienne est opérationnelle depuis cette date, excepté pour des problèmes d'entretien d'équipement appartenant au réseau (disjoncteur, cuve de mesurage, etc...). Ces derniers problèmes ont été amplifiés par l'hiver assez sévère du point de vue verglas que les îles de la Madeleine viennent de subir.

Nous avons maintenant 1700 heures sur le rotor et sommes confiants de pouvoir accumuler de 4000 à 6000 heures de marche par année.

## PROJETS FUTURS

Les îles de la Madeleine étant un site quasi idéal pour l'implantation de l'énergie éolienne (bons vents et électricité dispendieuse), il était normal que des projets d'implantation d'éoliennes à plus grande échelle soient mis de l'avant. En 1982, l'IREQ faisait une étude technico-économique (10) sur la construction d'un parc de 6 éoliennes DAF 6400 de 500 kW.

L'éolienne DAF de 500 kW diffère de l'éolienne des îles de la Madeleine par la corde de la pale (0.74 vs 0.61m) et par sa vitesse de rotation (45 vs 36 r/min).

Les coûts du combustible économisé par la centrale Diesel (6¢/kWh produit par les éoliennes) comparés aux coûts de construction et d'entretien du parc d'éoliennes montrait un manque à gagner d'environ 1 700 000\$ actualisés sur une base de 20 ans.

Cette étude ne tenait pas compte des derniers développements de l'éolienne DAF dont la principale du point de vue coûts d'assemblage et d'érection est une construction modulaire. En tenant compte de ces nouvelles données et en utilisant le concept "clef en mains", le manque à gagner est réduit à 500 000\$ pour un parc de 6 éoliennes.

Le projet pourrait être rentable si les éoliennes étaient installées là où les vents sont plus forts. Grâce à une subvention d'EM&R, des études sont en cours sur un site où 6 éoliennes pourraient être installées à une hauteur moyenne de 73m (le site actuel est à environ 6m au-dessus du niveau de la mer). Une évaluation préliminaire à l'aide de l'anémomètre TALA a donné des vents moyens d'environ 10% plus élevés qu'au site actuel.

La figure 14 montre que l'installation de 6 éoliennes à ce site pourrait générer des revenus nets de 1 590 000\$ actualisés sur 20 ans. Ce tableau montre les effets des corrections pour la construction modulaire de l'éolienne, pour l'augmentation des vents au site de 73m d'altitude et pour la fia-

bilité que le manufacturier est prêt à garantir.

### Prochaine étape

Nous espérons que l'étape de l'étude d'avant-projet à Hydro-Québec pourra commencer sous peu. Une étude d'avant-projet à Hydro-Québec définit complètement les coûts, échéanciers, exigences environnementales, etc... d'un projet, l'amenant au niveau de la présentation au conseil d'administration d'Hydro-Québec, au niveau de la demande des décrets requis, de la signature des contrats avec les fournisseurs, etc...

### CONCLUSION

Le programme expérimental de l'éolienne des îles de la Madeleine s'est terminé vers la fin de 1982.

Basé sur les résultats encourageants obtenus, l'éolienne fut modifiée pour être mise en service. Quelques problèmes d'entretien d'équipement appartenant au réseau restent à résoudre pour la mise en service.

L'implantation d'une mini-centrale de 3 MW aux îles de la Madeleine semble avoir de bonnes chances de se réaliser.

REFERENCES

- 1 - SOUTH, P. et Watts, A., "Magdalen Islands VAWT Field Test" March 1979.
- 2 - TEMPLIN, R.J. "Design Characteristics of the 224 kW Magdalen Islands VAWT", April 1979.
- 3 - REID, R. "Magdalen Islands 230 kW Vertical Axis Wind Turbine: An Up-date", Energex 82, Regina, Saskatchewan, Aug. 23-29, 1982.
- 4 - REID, R., VIGNEAU, Y. et MARTELL, L. "Eolienne expérimentale de 230 kW à axe vertical, îles de la Madeleine, Rapport d'essais, période juin 1980 - décembre 1981" Rapport IREQ-2681, 30 novembre 1982.
- 5 - REID, R. et VIGNEAU, Y. "Analyse de la précision des mesures de contrainte. Eolienne expérimentale des îles de la Madeleine", rapport IREQ-2912, 29 novembre 1983.
- 6 - MASSE, B. et BEAULIEU, G. "Excitation Forces on the Darrieus Wind Turbine" Wind Workshop VI Proceedings, ASES 83, Minneapolis/St-Paul, Minnesota, June 1-3, 1983
- 7 - BEAULIEU, G. "Le calcul des modes de vibration du rotor de l'éolienné des îles de la Madeleine", Rapport IREQ-2880, 21 octobre 1983.
- 8 - BEAULIEU, G., MASSE, B., and DUBE, B., "Darrieus Wind Turbine Power Train Dynamics" Proc. of the Wind and Solar Energy Technology Conference, Kansas City, April 1982.
- 9 - BEAULIEU, G. "Conception, construction et essais d'amortisseurs pour les haubans de l'éolienne des îles de la Madeleine", rapport IREQ-2817, 30 mai 1980.
- 10 - LAITHIER, B., DESROCHERS, G., JOFFROY, N. et REID, R., "Analyse technico-économique sur l'implantation d'un parc d'éoliennes aux îles de la Madeleine", Rapport IREQ-2709, 7 décembre 1982.



FIGURE 1.

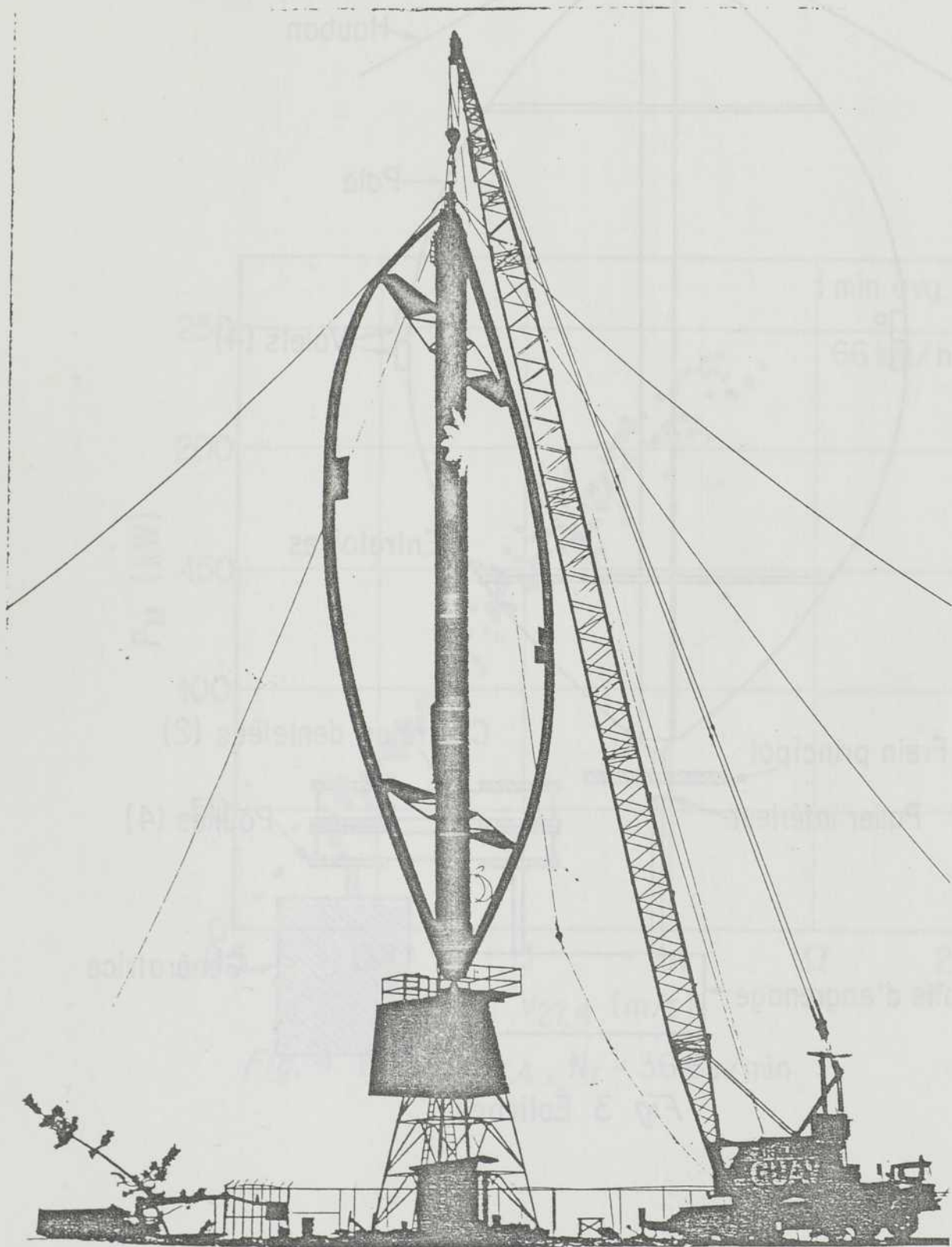


FIGURE 2.

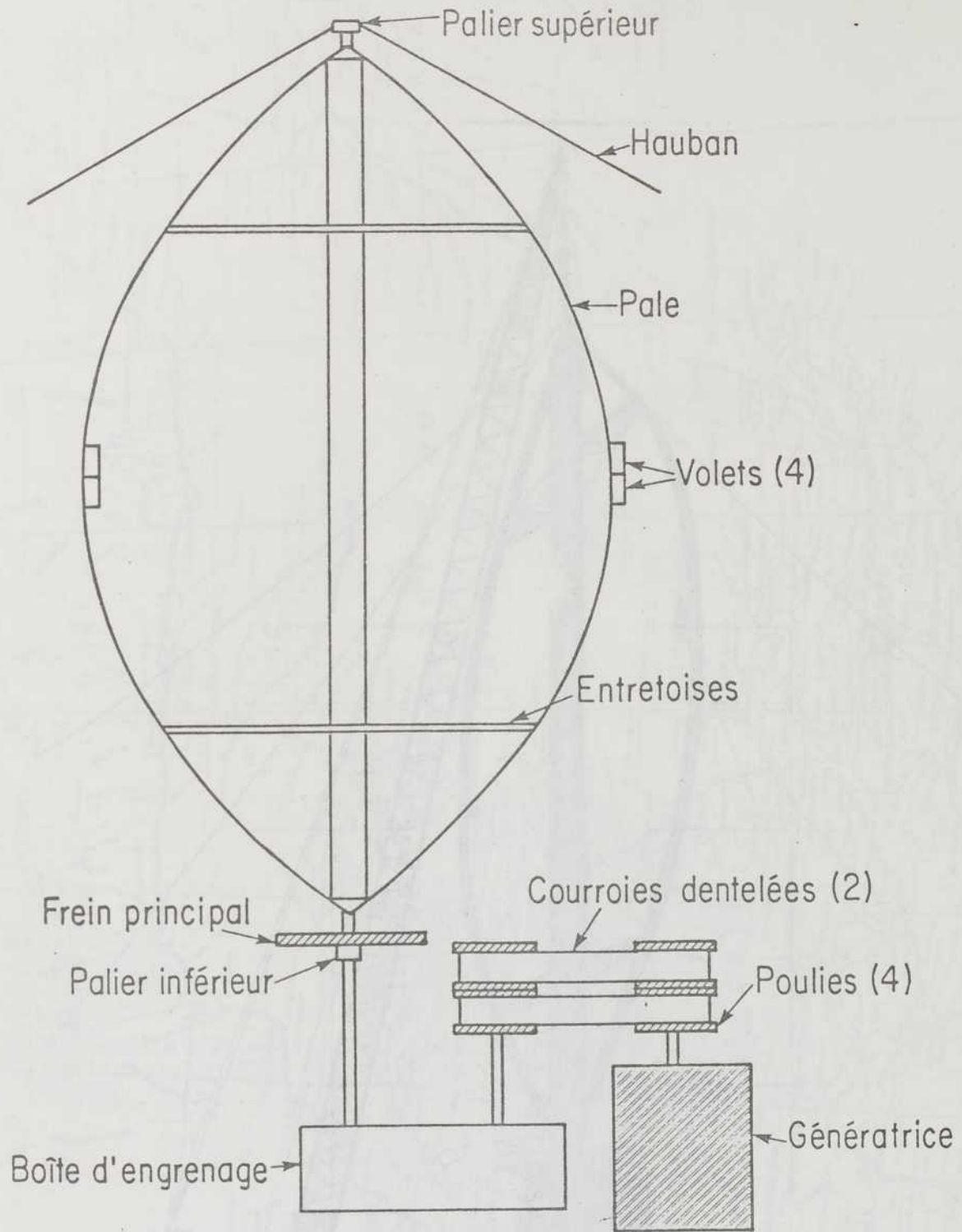


Fig. 3 Éolienne

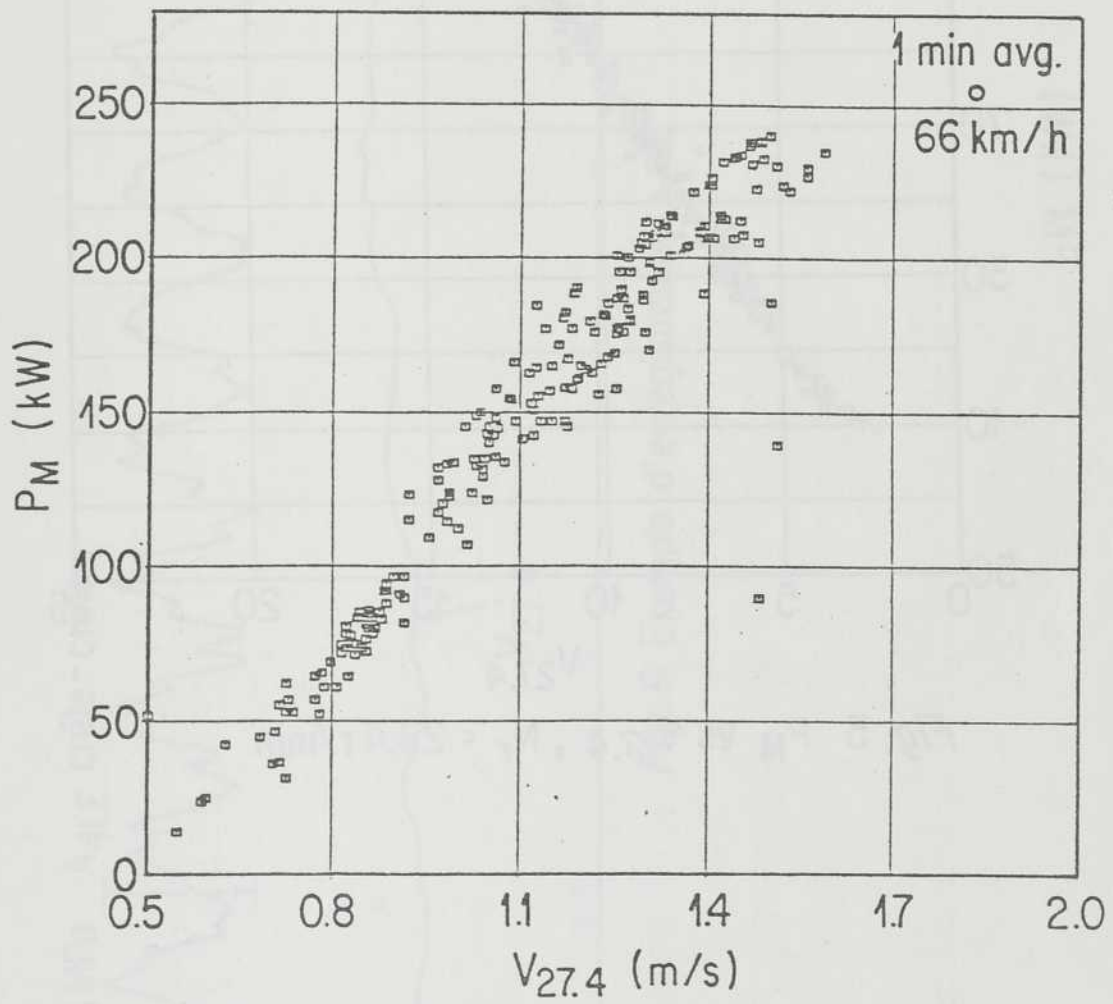


Fig. 4  $P_M$  vs  $V_{27.4}$ ,  $N_r = 36.6$  r/min

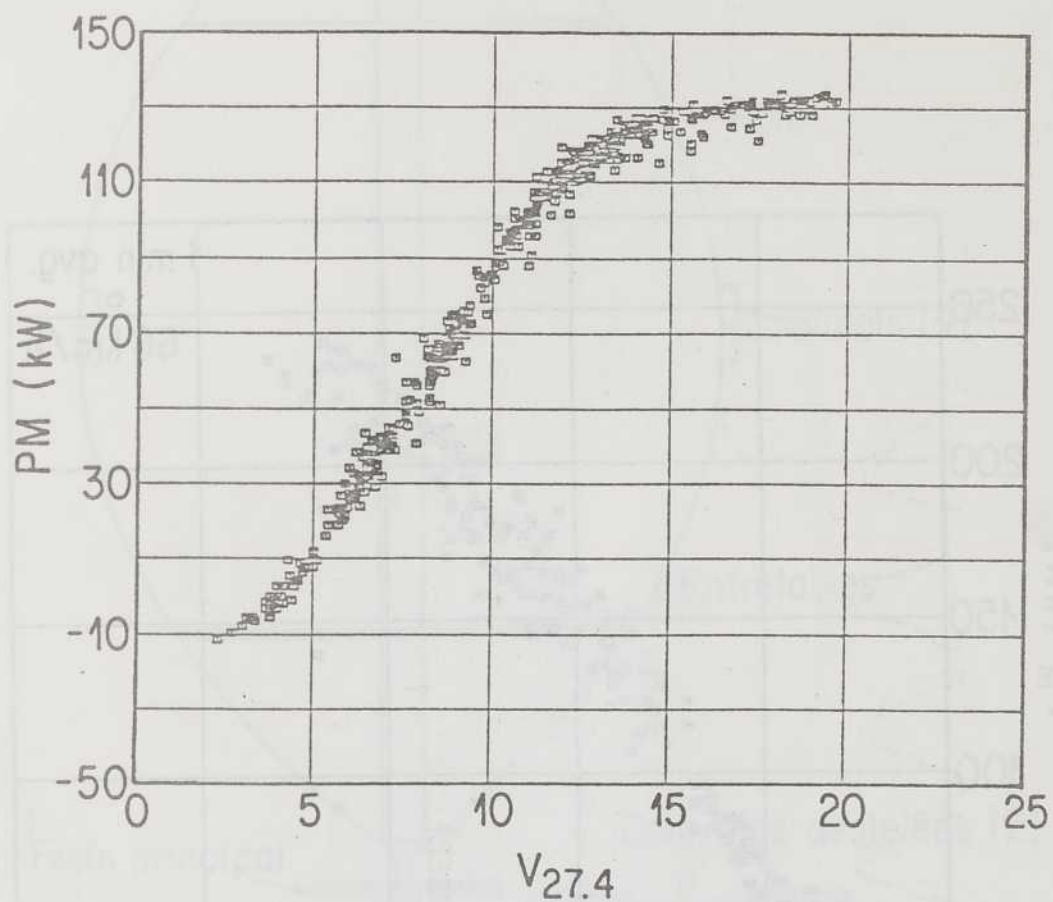


Fig. 5  $P_M$  vs  $V_{27.4}$ ,  $N_r = 29.4$  r/min

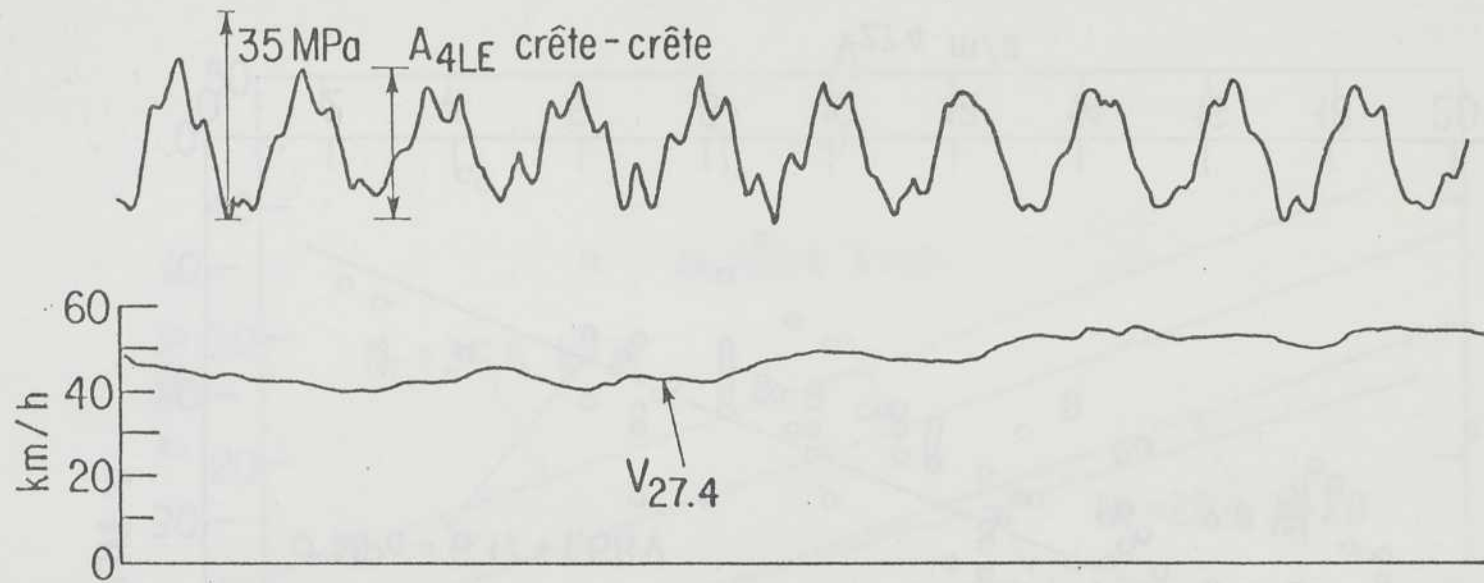


Fig. 6 Exemple d'enregistrement

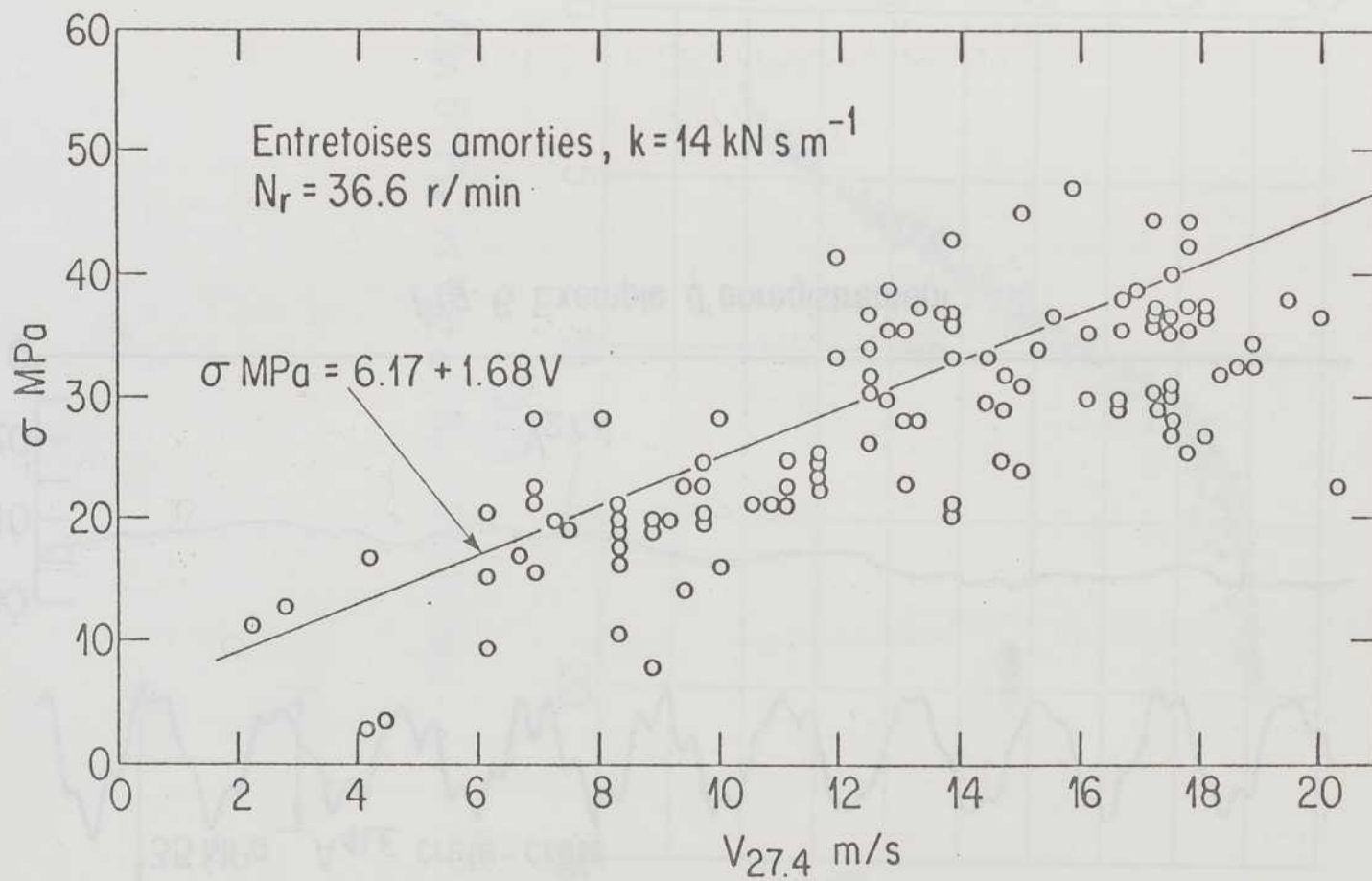


Fig. 7  $A_{4LE}$  vs  $V_{27.4}$

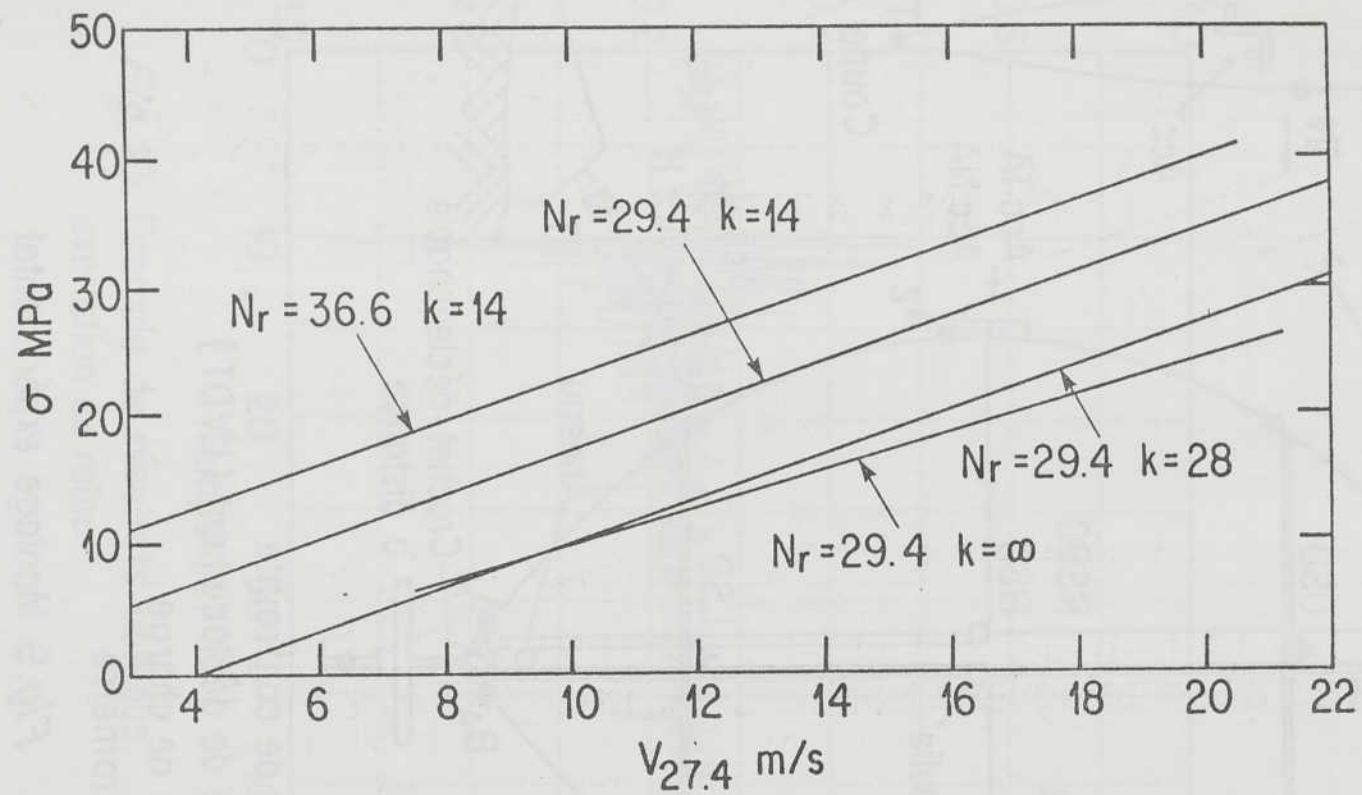


Fig. 8 Contrainte principale vs  $V_{27.4}$

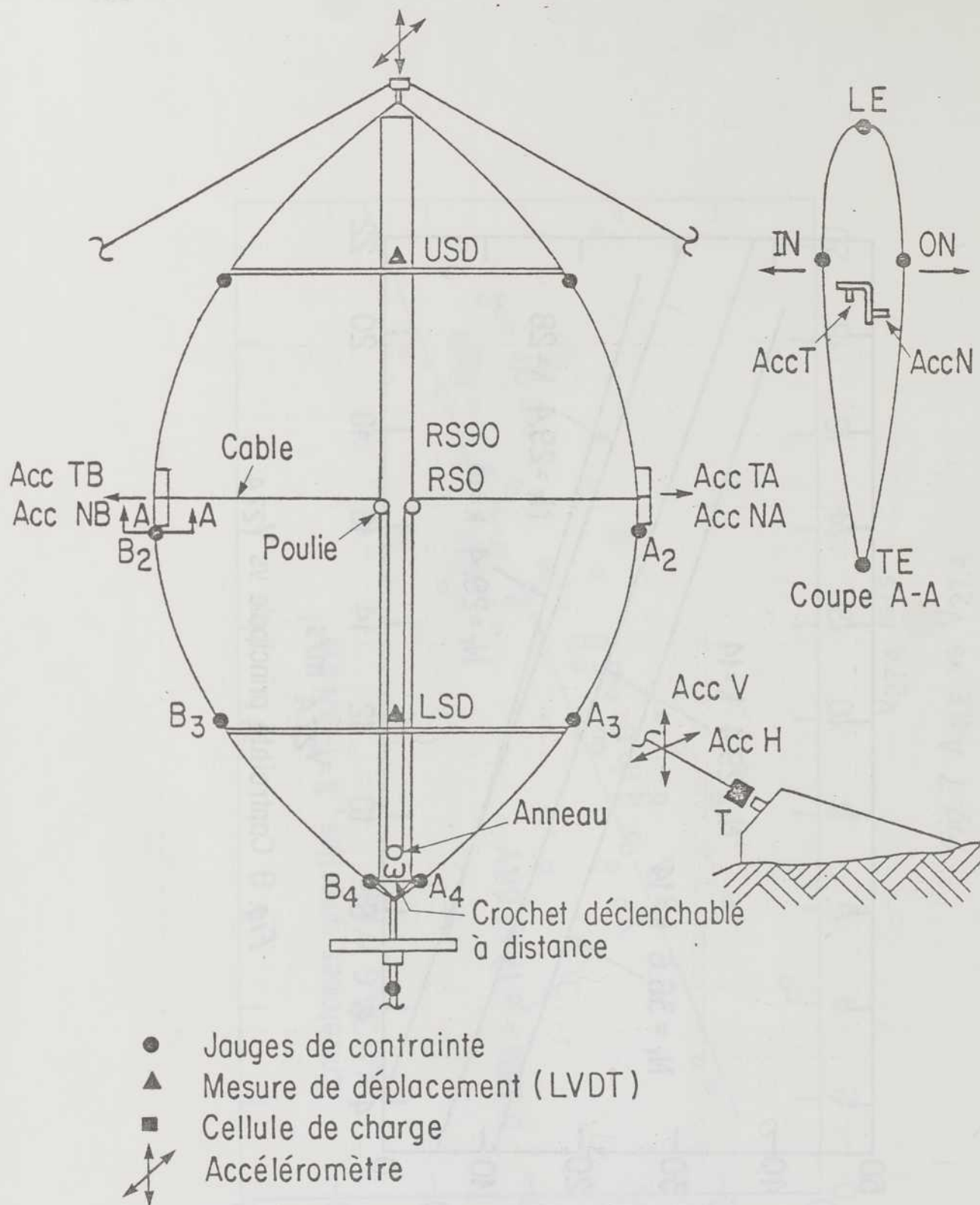


Fig. 9 Montage expérimental  
excitation du rotor

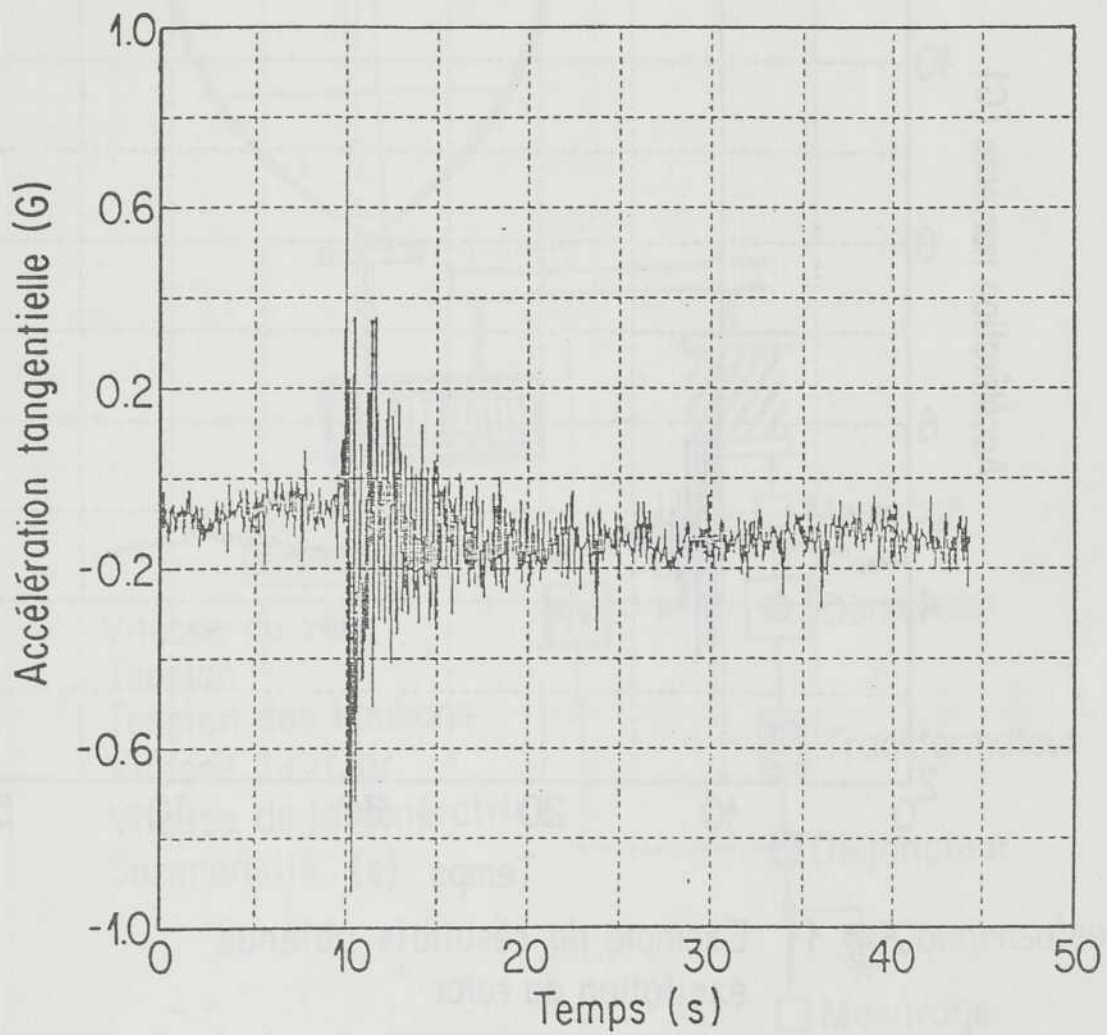


Fig. 10 Exemple de résultats obtenus  
excitation du rotor.

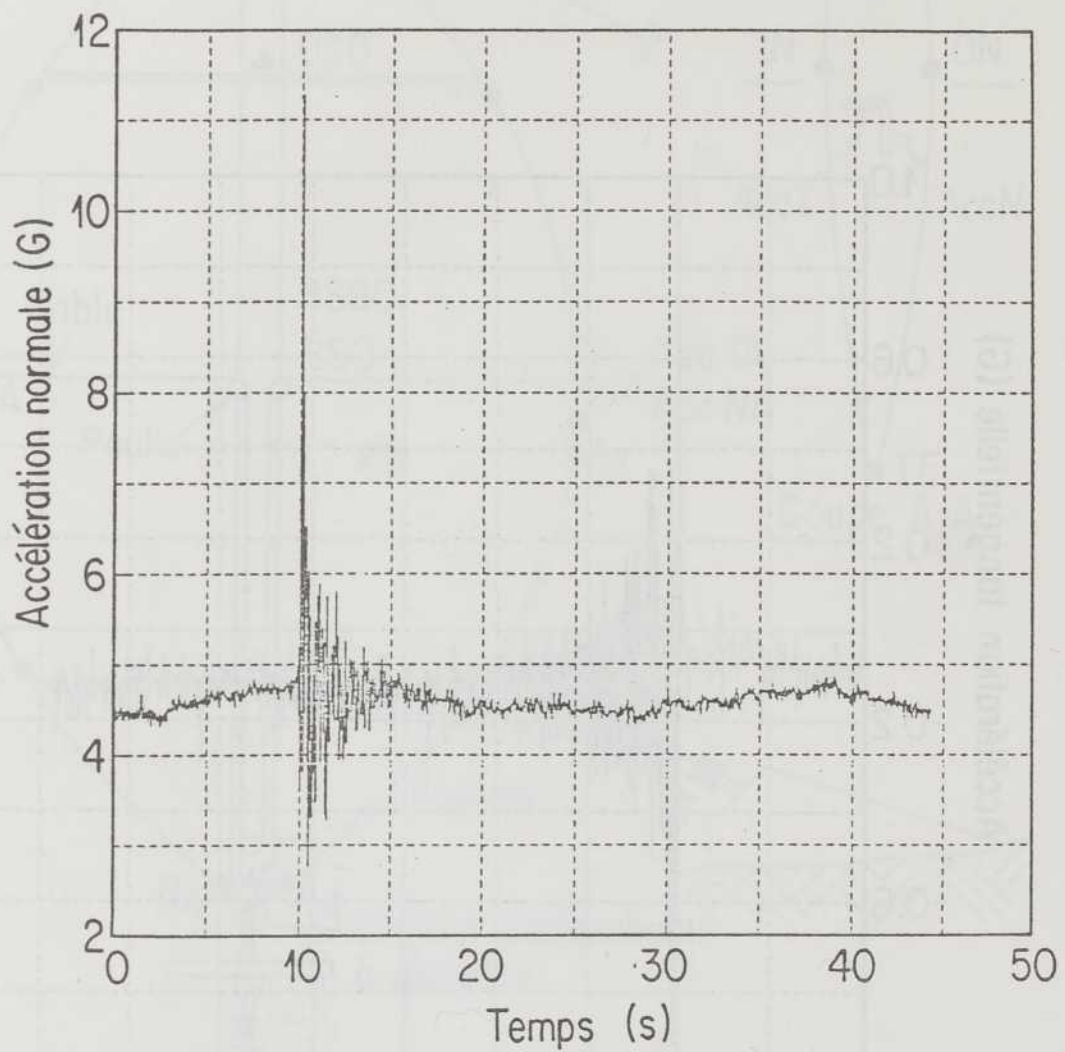


Fig. 11 Exemple de résultats obtenus  
excitation du rotor

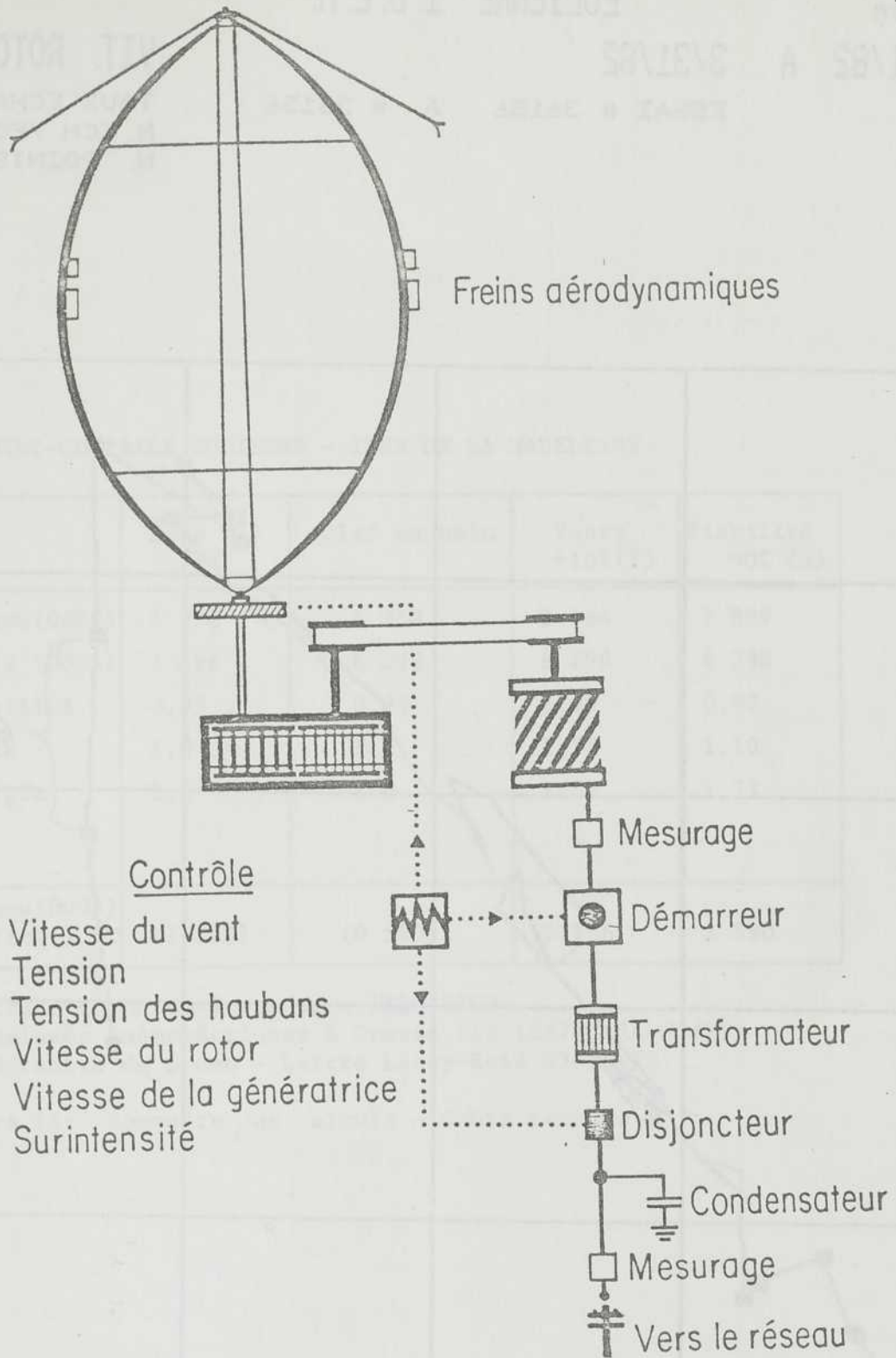


Fig. 12 Système de protection et contrôle

DATE= 3/31/82 A 3/31/82

ESSAI # 36156 A # 36156

VIT. ROTOR = 36.00 T/M

TAUX ECHANT. = 10.00 P/S

N. ECH. /POINT= 2999

N. POINTS = 76

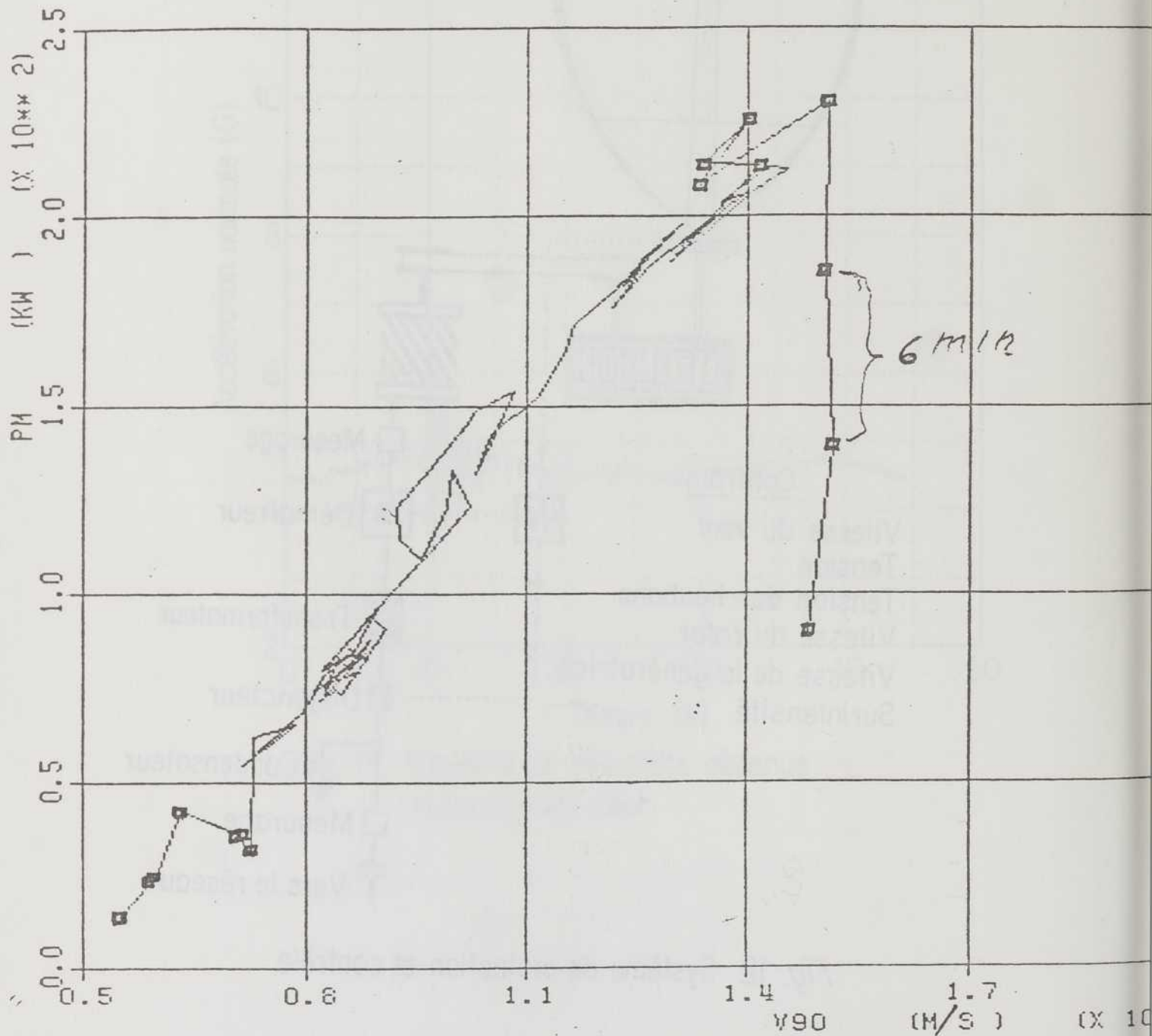


FIGURE 13. EFFET DU VERGLAS

## MINI-CENTRALE EOLIENNE - ILES DE LA MADELEINE

	Base (1)	Clef en main	Vents +10%(2)	Fiabilité 90% (3)
Revenu(000\$)	5 758	5 758	8 464	7 889
Coûts (000\$)	7 486	6 298	6 298	6 298
Fiabilité	0,95	0,95	0,95	0,90
Vents	1,0	1,0	1,10	1,10
Energie	1,0	1,0	1,33	1,33
Revenu(000\$) (déficit)	(1 728)	(0 540)	2 166	1 590

- 1 - Etude technico-économique IREQ-2709
- 2 - Relevés anémométriques à Grosse Ile (08743-RA-83/79)
- 3 - Garantie de 5 ans - Lettre Lacey-Reid 83-10-18

Figure 14: Sommaire des calculs - Coûts revenus

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT DES ÉOLIENNES  
AU CANADA

Année	Montant (M\$)	Source
1980	100	Énergie, Mines et Ressources Canada
1981	150	Énergie, Mines et Ressources Canada
1982	200	Énergie, Mines et Ressources Canada
1983	250	Énergie, Mines et Ressources Canada
1984	300	Énergie, Mines et Ressources Canada

PAR: Monique Carpentier  
Ingénieur: Énergie éolienne  
Énergie, Mines et Ressources Canada

POUR PRÉSENTATION AU:  
Colloque "Les éoliennes"  
Congrès annuel de l'ACFAS  
Université Laval  
10 Mai 1984

## INTRODUCTION:

### PRINCIPALES RÉALISATIONS:

Les politiques actuelles sont centrées autour des programmes de recherche et développement et démonstrations. Les programmes sont majoritairement administrés par le Conseil National de la Recherche (CNRC) et par Énergie, Mines et Ressources.

Au Canada, le CNRC est sûrement l'organisme le plus impliqué dans le domaine éolien. Il est responsable de la direction et de la gestion des activités de recherche fédérale en énergie éolienne. Leur programme se compose de quatre principaux éléments:

- 1- Évaluation des ressources et des sites, lequel est effectué en majeure partie par le Service de l'Environnement Atmosphérique du Ministère de l'Environnement.
- 2- Recherche et mise au point de la technologie.
- 3- Essais sur le terrain et soutien technique à l'industrie.
- 4- Le projet ÉOLE, construction d'un prototype de 4 MW à axe vertical.

Comme vous pourrez le constater, le CNRC est impliqué directement ou indirectement dans plusieurs projets éoliens, leur nom reviendra souvent lors de ma présentation. Au lieu de décrire en détail chacune de leur activités, je vais plutôt passer en revue les principaux projets et installations d'éoliennes qui sont présentement en cours au Canada.

Commençons par ce qui est probablement l'une des installations les plus connues: le Centre d'essais éolien de l'Atlantique. Ce centre situé à l'Ile-du-Prince-Édouard a été mis sur pied par les gouvernements du Canada et de l'Ile-du-Prince-Édouard. Les buts visés étant d'offrir les services d'un personnel expérimenté et de l'équipement approprié pour des essais d'éoliennes

fabriquées au Canada ou ailleurs. Le centre peut accommoder des éoliennes de différentes puissances allant jusqu'au mégawatt. Jusqu'à maintenant, dix systèmes ont été évalués. La plus imposante de leur unité est un Darrieus de 500 kW construit par DAF Indals. Ce Darrieus a été acheté par le CNRC, ce projet a été baptisé "Aquila". L'installation et l'érection s'est fait à la fin de l'année dernière et présentement une série de tests sont en cours. Aquilo est et demeurera la plus importante éolienne à être installée au Canada jusqu'à la construction d'ÉOLE.

Afin d'obtenir plus d'expérience avec des installations reliées au réseau, cinq Darrieus de 50 kW ont été achetés par le CNRC. Les Darrieus furent installés dans quatre provinces différentes: Terre-Neuve, Manitoba, Saskatchewan et la Colombie-Britannique. L'éolienne de Hollyroad à Terre-Neuve fut démantelée en novembre 1981 afin de subir une inspection détaillée. L'unité fut remplacée par une autre plus récente. Ces installations permettent aux différents réseaux électriques de se familiariser avec l'opération et l'entretien de ce qui est pour eux une unité de production non conventionnelle. Au 29 février 1984, plus de 268 MWh avaient été produits.

Une autre installation d'importance pour les communautés éloignées est présentement en cours à Sudbury. Cette installation est composée d'une éolienne à axe vertical de 40 kW couplée mécaniquement à une génératrice diesel de 50 kW. Le projet comprend l'étalonnage précis des différents éléments de la centrale, ainsi que l'évaluation détaillée de l'effet de l'aérogénératrice sur le régime du diesel en fonction de la charge, des coûts de fonctionnement et de l'entretien. La suite normale de ce projet serait l'installation de ce système hybride dans une communauté éloignée de l'Ontario.

Parmi les autres projets d'importance, on retrouve l'éolienne des Iles de la Madeleine, projet conjoint du CNRC et de l'Hydro-Québec, Réal Reid a déjà décrit le projet.

Finalement, il y a le projet ÉOLE, dont M. Dery nous a entretenu. Je crois que l'on peut dire sans risque de se tromper, que beaucoup de gens de par le monde, suivent avec impatience la réalisation de ce projet que l'on peut qualifié d'ambitieux.

Ceci complète un survol des projets qui ont, ou auront un impact substantiel au niveau national pour l'énergie éolienne.

### RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Maintenant regardons à ce qui servira probablement de base pour l'établissement d'un véritable marché pour l'énergie éolienne: les réseaux électriques et la qualité des produits offerts par l'industrie éolienne canadienne.

L'utilisation la plus prometteuse pour les éoliennes est sûrement pour la production d'électricité. L'utilisation de l'énergie éolienne devient beaucoup plus attrayante si les réseaux acceptent de raccorder les installations éoliennes appartenant à des particuliers sur leur réseau. De plus, le prix payé pour l'énergie transférée au réseau peut également déterminer la rentabilité d'un projet. Ces deux facteurs ont grandement contribué à l'établissement en grand nombre des parcs d'éoliennes aux États-Unis. Une loi appelée PURPA (Public Utility Regulatory Policies Act) oblige les réseaux publics américains d'accepter que des producteurs indépendants puissent être reliés à leur réseau et de plus, à payer, ce qu'ils appellent le coût évité pour chaque kilowatt-heure produit. Certains offrent même des crédits pour la capacité disponible.

Ici au Canada, l'établissement d'une telle loi est compromise étant donné que les réseaux électriques sont de juridiction provinciale. À ma connaissance Hydro-Québec n'a pas de règles écrites concernant l'interconnection de systèmes éoliens, mais l'Hydro-Québec accepte d'évaluer cas par cas toute demande en ce sens. D'ailleurs certains raccordements ont déjà eu lieu comme c'est le cas de l'éolienne du Parc des Anciens Combattants de Lauzon.

La plupart des autres réseaux canadiens ont des règlements qui régissent l'interconnection, deux réseaux se distinguent des autres. La "Saskatchewan Power Commission" est la seule qui accepte de payer le même tarif pour l'énergie qu'elle achète que pour l'énergie qu'elle vend. La "Northern Canada Power Commission" quant à elle, spécifie qu'aucun coût ne lui

sera imposé pour tous kwh(s) absorbés par son réseau. Ceci ne favorisant aucunement le développement de l'énergie éolienne pour les communautés éloignées.

#### INDUSTRIE ÉOLIENNE CANADIENNE:

Maintenant regardons de plus près l'industrie éolienne existante. Il existe au Canada moins de dix compagnies qui fabriquent des éoliennes, parmi celles-ci, une seule compagnie offre des éoliennes de plusieurs centaines de kilowatts. Les compagnies sont en majeure partie au stade de développement et leur produit a encore besoin d'être amélioré. Des garanties sont rarement offertes et la durabilité de même que la performance du produit est souvent surestimé.

Il y a également près de vingt distributeurs d'éoliennes étrangères, celles-ci ont déjà commencé à se tailler une réputation à l'étranger.

Environ 500 unités sont présentement installée au Canada. Presque tous sont de petits systèmes utilisés pour pomper de l'eau ou générer de l'électricité. Les autres sont utilisés pour la recherche et le développement ou des projets de démonstration.

#### ÉNERGIE, MINES ET RESSOURCES CANADA:

Maintenant, j'aimerais vous parler de mon Ministère, Énergie, Mines et Ressources Canada et de ce qu'il fait dans le domaine des éoliennes. Il existe présentement trois programmes dans lesquelles l'énergie éolienne est considérée; deux sont pour des démonstrations et un, pour la recherche.

#### Enerdemo Canada:

Le tout dernier des programmes ENERDEMO CANADA vient remplacer le Programme des démonstrations des économies d'énergie et des énergies renouvelables qui était en vigueur depuis 1978 et qui s'est terminé au 31 mars dernier. Pour ce programme le gouvernement fédéral a fourni \$40 millions dont approximativement \$1.5 millions a été consacré à des projets impliquant

l'énergie éolienne. Le programme était administré et subventionné conjointement avec la plupart des provinces. Quant au nouveau programme ENERDEMO CANADA, il aura une durée de cinq ans et est administré uniquement par le gouvernement fédérale, il est officiellement entré en vigueur le 1<sup>er</sup> avril dernier.

Au Québec, ce programme a commencé en juin 1983 et se terminera dans cinq ans, c'est-à-dire en Mars 1989. Vingt-sept millions sont disponibles au Québec pour des projets de conservation et d'énergies renouvelables, évidemment ceci inclus l'énergie éolienne.

#### Programme de démonstration des communautés éloignées:

Le deuxième programme en est un de démonstrations pour les communautés éloignées et leur est exclusivement réservé. Pour être éligible, une communauté ne doit pas être reliée au réseau électrique provincial ni avoir accès au gaz naturel. La Phase I du programme subventionne des études de faisabilité, la Phase II qui débutera en octobre prochain subventionne les démonstrations. À ce moment, six études impliquant l'énergie éolienne ont été approuvées et deux autres sont considérées (Territoires du Nord-Ouest et Terre-Neuve).

- 1- Colombie Britannique - Kitkala
- 2- Ontario - Mud River
  - Wind/Diesel, Nord de l'Ontario
- 2- Québec - Iles de la Madeleine
- 1- Terre-Neuve - Sud de l'Ile

#### Programme de conventions de recherche:

Il y a également un autre programme disponible pour les groupes de recherche appelé "Programme de convention de recherche". Des subventions sont accordées sur une base annuelle mais en considérant un plan de recherche de quelques années. La recherche en énergie éolienne peut être subventionnée sous ce programme. La sélection des récipients se fait selon la qualité des sousmissions, les objectifs du ministère et la disponibilité des fonds. Des

formulaire d'inscription sont envoyées directement aux universités au début de l'année scolaire et doivent être retournés au Ministère dûment remplis avant le 15 novembre de chaque année.

Donc pour le proche avenir, il existe plusieurs possibilités pour l'énergie éolienne à l'intérieur des programmes actuels. Ces programmes seront en place pour quelques années et même s'ils ne sont pas complètement dédiés à l'énergie éolienne, de tels projets se qualifient. Je vous suggère fortement de prendre connaissance des opportunités qui existent.

J'aimerais également vous mentionner un autre programme offert par l'Expansion industrielle régionale, le PDIRE qui peut subventionner jusqu'à 75% des déboursés pour des études de faisabilité, des nouvelles installations de production, de la mise au point de nouveaux produits et bien d'autres aspects de l'industrie. Ce programme s'adresse à tous les secteurs industriels.

#### CONCLUSION:

Quel est l'avenir pour l'énergie éolienne au Canada?

C'est une question difficile à répondre mais certainement la technologie canadienne doit être améliorée si elle veut se tailler une place sur le marché et compétitionner favorablement avec les produits étrangers. La situation énergétique canadienne est également particulière, la majorité des réseaux électriques font maintenant face à un surplus de capacité, il est donc moins intéressant pour eux d'accepter de raccorder sur leur réseau des producteurs indépendants. À l'exception des communautés éloignées et de cas particuliers, le kilowatt-heure du réseau coûte de 3 à 5¢ alors que l'énergie produite par éolienne coûte de 10 à 20¢. Il existe présentement des endroits où les installations éoliennes peuvent être rentables, c'est-à-dire des régions où le régime de vent est élevé, où les coûts de l'énergie sont élevés et que les coûts d'achat, de transport, d'installation et d'opération de l'éolienne sont raisonnables. Il apparaît évident que le marché canadien prendra premièrement force dans les communautés éloignées, mais les éoliennes devront être capable de supporter des conditions climatiques extrêmes, ce qui n'est pas toujours le cas présentement. Les éoliennes devraient dans l'avenir

être construite en accord avec les standards présentement en développement par l'ACNOR. Ces standards seront très bientôt disponibles. De plus les programmes de démonstration sont justement mis sur pied pour accélérer la commercialisation d'un produit, pour lui permettre de diminuer ses coûts.

Afin de pénétrer le marché plus rapidement, les manufacturiers devraient considérer sérieusement d'offrir une garantie d'au moins trois ans sur leur produit. Le risque perçu serait ainsi largement diminué et le produit serait plus facile à commercialiser.

Je suis tout de même très optimiste pour l'avenir. D'ici quelques mois il y aura formation d'une Association canadienne pour l'énergie éolienne, dans laquelle vous pourrez tous jouer un rôle important. Les démonstrations actuelles et futures démontreront, je l'espère, la viabilité des systèmes éoliens de même que leur durabilité.

## UNE ÉOLIENNE EN MILIEU URBAIN un défi pour un bricoleur

-Importance du choix du SAILWING ROTOR - facilité à trouver les matériaux - possibilité d'atteindre l'autosuffisance en ville - les contraintes d'un tel projet - à la portée de tout bricoleur averti - coûts - système de contrôle électronique - efficacité vs coût - connaissances minimales de base et capacité à entreprendre le projet - où prendre les renseignements requis - outillage nécessaire à la réalisation du projet - pourquoi bâtir plutôt que de restaurer une éolienne - contraintes de l'installation en ville - comment trouver les solutions de ces contraintes - ne pas viser l'autosuffisance uniquement avec une éolienne - 12 volts ou 110 volts lequel choisir pour ses besoins - toujours penser pratique - comment en venir à l'auto suffisance -

Bernard Belisle

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT DES ÉOLIENNES

OÙ EN EST L'IMPLANTATION D'UNE INDUSTRIE QUÉBÉCOISE?

Modérateur: Léandre Bernier, Énergie et Ressources Québec

Invités: Madame Monique Carpentier, Énergie, Mines et  
Ressources Canada

Messieurs John Dickinson, Université Laval  
Dpt de génie mécanique

Martin Cloutier, Extrawatt

Albert Watts, Institut de recherche  
d'Hydro-Québec (IREQ)

Hervé Caron, Centre de recherche in-  
dustrielle du Québec,  
Programme Énergie Nove

Au Québec, l'industrie éolienne se divise en deux types: la grande industrie représentée par les grandes entreprises publiques et d'ingénierie pour réaliser les projets de grandes éoliennes, les petites entreprises manufacturant en série des petites éoliennes de moins de 25 kW.

La technologie éolienne a beaucoup progressé au cours des dernières années et une expertise de grande qualité s'est développée dans les centres de recherche, le génie-conseil et dans les entreprises manufacturières. Le développement des éoliennes se compare avantageusement aux activités des autres pays tant au niveau de la démonstration et de la fabrication que des travaux de recherche et développement, des technologies et des outils analytiques (design, interaction avec les réseaux publics, etc.).

Les petites éoliennes font présentement la démonstration de leur durabilité et fiabilité. Les progrès sont de plus en plus rapides à mesure que les entreprises manufacturières prennent de l'expansion sur des nouveaux marchés. D'autre part, les grandes éoliennes sont des prototypes de développement et permettent le développement de l'expertise dans les entreprises de services et d'ingénierie.

La conjoncture énergétique a beaucoup évolué depuis 1977, où le développement de nouvelles sources d'énergies complémentaires aux énergies conventionnelles étaient nécessaires. Actuellement, la

crise pétrolière s'est pratiquement résorbée. Ces nouvelles sources d'énergies sont maintenant devenues concurrentielles aux sources conventionnelles, plus particulièrement à l'électricité et le gaz naturel; car les prévisions laissent voir une sur-capacité de production pour les prochaines années. Le marché des éoliennes s'est donc refermé au cours des années précédentes et sera très difficile à percer, autant au niveau local qu'extérieur.

Même si la conjoncture énergétique a changé, il y a nécessité de maintenir les efforts de développement de l'énergie éolienne et de poursuivre les grands travaux. L'énergie éolienne est déjà viable pour certains créneaux spécialisés du marché comme les sites éloignées. Toutefois, les éoliennes ne bénéficieraient pas à court et moyen terme d'un marché de grande diffusion, même à l'exportation.

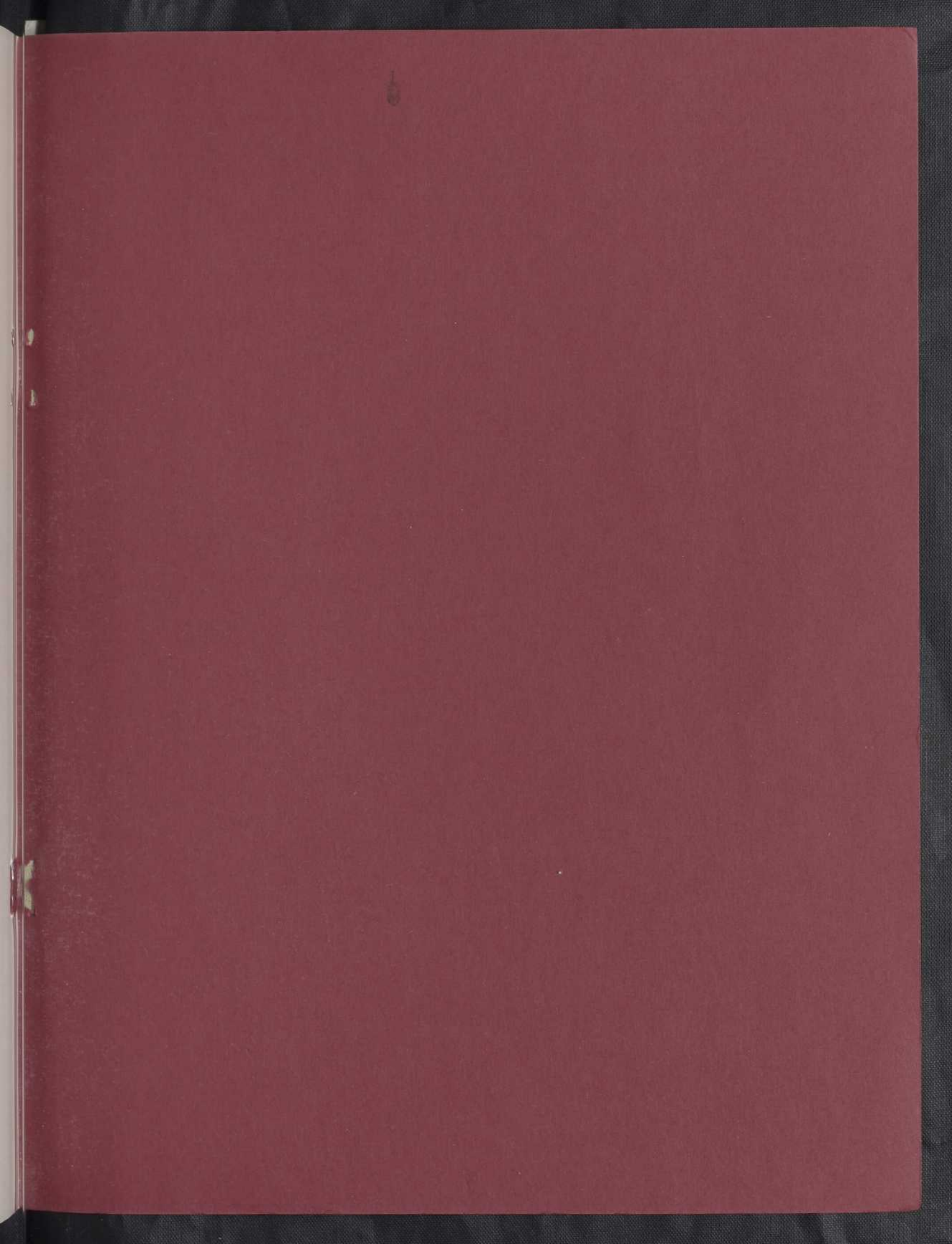
Le marché québécois et canadien est petit et les manufacturiers devront s'orienter vers les marchés extérieurs, où différents problèmes se manifesteront: la concurrence internationale est vive et les manufacturiers devront offrir un produit de très bonne qualité, fiable et durable, à un prix concurrentiel vis-à-vis les autres alternatives offertes aux acheteurs.

Au niveau de la petite entreprise manufacturière, plusieurs problèmes se présentent comme le manque de ressources financières, les difficultés souvent insurmontables pour se prévaloir des programmes d'aides, le coût élevé du personnel spécialisé en développement technologique, en gestion et mise en marché des produits.

Le regroupement des intervenants en énergie éolienne est une partie de la solution au problème. Cette action permettra à l'énergie éolienne de progresser et de se doter des outils adéquats requis pour son développement futur (recherche, développement et démonstration). La concertation entre les intervenants dégagera des objectifs précis et définira le plan d'action approprié.

DPEN, 14 mai 1984

LB/gdg



BNQ



000 227 674