

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE  
PRESENTÉ A  
L'UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN RESSOURCES ET SYSTEMES

PAR  
SYLVIE BERNARDIN

ETUDE ET ANALYSE  
DU DELESTAGE DE GLACE ATMOSPHERIQUE  
SUR LES CABLES

OCTOBRE 1989



### **Mise en garde/Advice**

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## RESUME

Les ouvrages soumis à des conditions climatiques hivernales sont susceptibles de recevoir une accumulation de glace pouvant nuire à leur intégrité ou à leur fonctionnement. Le travail présenté ici s'inscrit dans l'ensemble de l'analyse des données fournies par le système de mesure installé au site du Mont-Valin (Québec) et qui vise à étudier les caractéristiques des dépôts de glace sur différents types de conducteurs électriques, sans tension électrique, de courte et moyenne portées (35 et 100 m). L'objectif de cette étude est d'analyser la validité des valeurs expérimentales recueillies, de les utiliser pour identifier des exemples typiques des différents modes de délestage (réduction de la charge de glace sur un câble), et d'approfondir l'étude d'un de ces modes.

On rappelle quelques caractéristiques sur le givrage des câbles:

L'évolution d'un événement de givrage se déroule généralement sur trois phases, une phase d'accumulation, une phase d'endurance et une phase de délestage.

Trois grands types de glace sont identifiés selon l'apparence de la glace et sa densité. Ce sont le givre léger, le givre dur et le verglas.

La glace déposée sur un câble tend à prendre une forme intermédiaire entre celle d'un manchon circulaire et celle d'un manchon elliptique.

Les différents types de délestage décrits sont le délestage par fonte, caractérisé par une température ambiante positive, le délestage par sublimation, caractérisé par une température négative et un faible taux de décroissance de la charge de glace, et enfin, le délestage par bris mécanique de la glace caractérisé par une température négative et un fort taux de décroissance de la charge de glace.

On présente ensuite les conditions expérimentales. L'installation du Mont-Valin comprend quatre types de câbles ou groupe de câbles. Les conditions météorologiques ainsi que le poids de glace obtenu grâce aux cellules de charge fixées à une extrémité de chaque câble sont enregistrés localement puis transmis quotidiennement au centre de calcul du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (GRIEA) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) par liaisons téléphoniques. Une telle installation engendre généralement de larges perturbations aléatoires des signaux électroniques correspondant aux différentes mesures. Il est donc essentiel d'évaluer la validité des données afin de déterminer quels ensembles de valeurs sont utilisables.

La validation des données est effectuée en évaluant l'amplitude des perturbations aléatoires. Pour ce faire, on étudie les variations fictives de la charge de glace enregistrées alors qu'aucun dépôt de glace n'est présent sur les câbles. Pour chaque câble et chaque saison, un seuil minimum de variation de la charge de glace, en-deçà duquel les valeurs ne sont pas retenues, est défini. Ces valeurs-seuils varient entre 20 g/m et 500 g/m selon les cas. L'étendue de cette variation s'explique par les différences de qualité des conditionneurs de signal utilisés, qui ne sont pas les mêmes pour tous les câbles, et qui sont souvent changés d'une année à l'autre pour un même câble. L'erreur

commise en utilisant cette méthode est calculée, pour chaque seuil, par une méthode de Bayes. Les erreurs obtenues se situent entre 1 % et 12 %, et sont jugées acceptables.

A l'aide des critères dérivés des définitions données pour chaque mode de délestage ainsi que des limites imposées par la validation des données, on identifie quelques exemples typiques de décroissance de la charge de glace. Les exemples de délestage par fonte montrent des taux de décroissance de l'ordre de 1 kg/m.h sur des périodes de quelques heures. Les exemples de délestage par sublimation ont des taux de décroissance variant entre 10 et 50 g/m.h sur des périodes de plusieurs jours. Les remarques apportées par les comparaisons entre les différents cas de sublimation rencontrés sont en accord avec le modèle analytique proposé par G. Lambrinos et al. (1987). Finalement, un exemple de délestage par bris mécanique de la glace est présenté. Le taux de décroissance est de l'ordre de 250 g/m sur une période de quelques heures.

Le délestage par bris mécanique de la glace étant le plus susceptible de provoquer des accidents (S. Fuheng et H. Shixiong, 1988), il apparaît le meilleur choix pour une étude plus approfondie. Une analyse systématique des corrélations entre les taux de délestage et les conditions climatiques montre que le vent observé pendant la période de délestage et la charge de glace accumulée sur le câble sont les facteurs les plus influents. Le mécanisme de rupture de la glace se produit par perte d'adhésion de la glace au câble, suivie, dans certains cas, d'une rupture de la glace en tension. Une estimation des contraintes en adhésion, normale et en cisaillement, montre que les efforts créés par le vent sont négligeables par rapport à ceux causés par le poids de glace. L'influence du vent, mise en évidence dans l'étude statistique, peut s'exercer soit sous forme d'effet

v

dynamique, soit en amorçant le processus de délestage.

En conclusion, les données expérimentales du Mont-Valin permettent de prédire l'ordre de grandeur des phénomènes de délestage de glace accumulée sur les câbles de courte et moyenne portées. On a pu mettre en évidence les facteurs les plus importants de délestage par bris mécanique de la glace. Le type de glace observé, pendant les saisons étudiées, se limitant au givre léger, il serait intéressant de poursuivre le programme d'acquisition de données, afin de compléter l'analyse par l'étude du délestage pour d'autres conditions météorologiques. On pourrait ainsi déterminer l'influence du type de glace sur le délestage par bris mécanique de la glace.

## REMERCIEMENTS

Pour sa disponibilité et ses conseils, je désire remercier mon directeur de recherche, Monsieur Jacques Druez.

Je tiens aussi à remercier Messieurs Gilles Bouchard et Jean-Louis Laforte pour leur enseignement et les diverses informations qu'ils m'ont communiquées. Enfin, je remercie vivement tous les membres du personnel pour leur coopération, et, en particulier, Messieurs Bernard Desbiens, Serge Gauthier et André Falgueyret.

## TABLE DES MATIERES

TITRE .....	i
RESUME .....	ii
REMERCIEMENTS .....	vi
TABLE DES MATIERES .....	vii
LISTE DES TABLES .....	x
LISTE DES FIGURES .....	xii
INTRODUCTION .....	1
1 DESCRIPTION GENERALE DU GIVRAGE SUR LES CABLES .....	2
1.1 Evolution d'un évènement de givrage de câble ..	2
1.2 Classification des types de glace atmosphérique ..	3
1.3 Formes du dépôt de glace .....	4
2 DESCRIPTION GENERALE DES DIFFERENTS TYPES DE DELESTAGE .....	10
2.1 Caractéristiques d'un délestage par fonte .....	10
2.2 Caractéristiques d'un délestage par sublimation ..	11
2.3 Caractéristiques d'un délestage par bris mécanique de la glace .....	11

3	DESCRIPTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES .....	13
3.1	Problématique .....	13
3.2	Description du site .....	14
3.3	Instrumentation et méthode de mesure .....	15
3.4	Méthode d'acquisition des données .....	16
3.5	Traitements des données .....	17
3.6	Effet du vent sur les câbles .....	19
4	PRESENTATION DE LA METHODE DE VALIDATION DES DONNEES .....	25
4.1	Définition d'un niveau seuil .....	25
4.2	Critère d'erreur de la méthode .....	27
5	VALIDATION DES DONNEES DU MONT-VALIN .....	31
5.1	Identification des périodes de référence .....	31
5.2	Répartitions fréquentielles des variations aléatoires .....	34
5.3	Identification des valeurs-seuils .....	36
5.4	Analyse d'erreur .....	38
6	CAS REPRESENTATIFS DE CHAQUE MODE DE DELESTAGE .....	40
6.1	Cas de délestage amorcé par fonte .....	40
6.2	Cas de délestage par sublimation .....	41
6.3	Cas de délestage par bris mécanique de la glace	43
7	ETUDE DU DELESTAGE PAR BRIS MECANIQUE DE LA GLACE ..	44
7.1	Analyse statistique des délestages par bris mécanique de la glace .....	44
7.1.1	Sélection des événements pertinents ..	44

7.1.2 Description statistique des facteurs influençant le délestage .....	46
7.1.3 Classification des facteurs influençant le délestage .....	50
7.2 Mécanismes de rupture du dépôt de glace possibles .....	54
7.3 Mécanismes de rupture du dépôt de glace étudiés .....	54
7.3.1 Description des mécanismes étudiés ....	54
7.3.2 Estimation des contraintes en adhésion .	57
7.3.3 Essai d'interprétation de la classification des facteurs influençant le délestage .....	61
CONCLUSION ET PERSPECTIVE .....	66
BIBLIOGRAPHIE .....	68
ANNEXE A : TABLES 1 A 27 .....	73
ANNEXE B : FIGURES 1 A 62 .....	92

## LISTE DES TABLES

- Table 1: Caractéristiques des types de glace  
Table 2: Caractéristiques des câbles  
Table 3: Caractéristiques des cellules de charge  
Table 4: Valeurs du coefficient K  
Table 5: Valeurs-seuils pour la saison 1985-1986  
Table 6: Valeurs-seuils pour la saison 1986-1987  
Table 7: Valeurs-seuils pour la saison 1987-1988  
Table 8: Résultats d'analyse d'erreur pour la saison 1985-1986  
Table 9: Résultats d'analyse d'erreur pour la saison 1986-1987  
Table 10: Résultats d'analyse d'erreur pour la saison 1987-1988  
Table 11: Conditions atmosphériques liées au délestage du 24 décembre 1986  
Table 12: Conditions atmosphériques liées au délestage du 27 décembre 1986  
Table 13: Conditions atmosphériques liées au délestage du 30 décembre 1986  
Table 14: Conditions atmosphériques liées au délestage du 02 janvier 1987  
Table 15: Conditions atmosphériques liées au délestage du 22 janvier 1987  
Table 16: Conditions atmosphériques liées au délestage du 30 janvier 1987  
Table 17: Conditions atmosphériques liées au délestage du 09 février 1987  
Table 18: Conditions atmosphériques liées au délestage du 27 février 1987  
Table 19: Conditions atmosphériques liées au délestage du

07 décembre 1987

Table 20: Conditions atmosphériques liées au délestage du  
15 décembre 1987

Table 21: Conditions atmosphériques liées au délestage du  
31 décembre 1987

Table 22: Types de glace des dépôts étudiés au Mt-Valin  
(1985-1988)

Table 23: Conditions caractéristiques des délestages étudiés

Table 24: Résultats de l'étude de régression linéaire portant  
sur les délestages étudiés

Table 25: Valeurs de référence du coefficient d'épaisseur  $c_h$

Table 26: Valeurs typiques de contraintes en adhésion,  
manchon elliptique légèrement incliné

Table 27: Valeurs typiques de contraintes en adhésion,  
manchon circulaire

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Evènement de givrage, trois phases
- Figure 2 : Evènement de givrage sans phase d'endurance
- Figure 3 : Evènement de givrage sans phase de délestage
- Figure 4 : Relation entre les types de glace et les conditions météorologiques de formation
- Figure 5 : Relation entre la densité de la glace et la température de formation
- Figure 6 : Position du dépôt de glace sur le câble
- Figure 7a: Formation d'un manchon circulaire, givre dur
- Figure 7b: Formation d'un manchon circulaire, givre léger
- Figure 7c: Formation d'un manchon elliptique, givre dur
- Figure 7d: Formation d'un manchon elliptique, givre léger
- Figure 8 : Câbles givrés au Mont Valin
- Figure 9 : Manchon elliptique sur les câbles (Mt-Valin)
- Figure 10 : Caractéristiques géométriques du manchon circulaire théorique
- Figure 11 : Caractéristiques géométriques du manchon elliptique théorique
- Figure 12 : Installation au Mt-Valin
- Figure 13 : Influence de la force de trainée sur l'évaluation de la charge de glace sur un câble
- Figure 14 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis manchon circulaire, densité 0,5
- Figure 15 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis manchon circulaire, densité 0,7
- Figure 16 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis manchon circulaire, densité 0,9
- Figure 17 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis manchon elliptique, densité 0,5
- Figure 18 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis

- manchon elliptique, densité 0,7
- Figure 19 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis  
manchon elliptique, densité 0,9
- Figure 20 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis  
période du 15 avril 1987
- Figure 21 : Effet du vent sur la charge du câble Bersimis  
période du 25 décembre 1986
- Figure 22 : Température mai 1986
- Figure 23 : Température avril 1987
- Figure 24 : Température mai 1988
- Figure 25 : Variations aléatoires, câble témoin, 1986
- Figure 26 : Variations aléatoires, câble Bersimis, 1986
- Figure 27 : Variations aléatoires, câble de garde, 1986
- Figure 28 : Variations aléatoires, câble témoin, 1987
- Figure 29 : Variations aléatoires, câble du faisceau, 1987
- Figure 30 : Variations aléatoires, câble Bersimis, 1987
- Figure 31 : Variations aléatoires, câble de garde, 1987
- Figure 32 : Variations aléatoires, câble témoin, 1988
- Figure 33 : Variations aléatoires, câble Bersimis, 1988
- Figure 34 : Variations aléatoires, câble de garde, 1988
- Figure 35 : Histogrammes des variations, câble témoin, 1986
- Figure 36 : Histogrammes des variations, câble Bersimis, 1986
- Figure 37 : Histogrammes des variations, câble de garde, 1986
- Figure 38 : Histogrammes des variations, câble témoin, 1987
- Figure 39 : Histogrammes des variations, câble du faisceau,  
1987
- Figure 40 : Histogrammes des variations, câble Bersimis, 1987
- Figure 41 : Histogrammes des variations, câble de garde, 1987
- Figure 42 : Histogrammes des variations, câble témoin, 1988
- Figure 43 : Histogrammes des variations, câble Bersimis, 1988
- Figure 44 : Histogrammes des variations, câble de garde, 1988
- Figure 45 : Délestage par fonte, câble Bersimis
- Figure 46 : Délestage par fonte, câble de garde
- Figure 47 : Délestage par sublimation, câble Bersimis,

01 février 1987

Figure 48 : Délestage par sublimation, câble témoin,  
01 février 1987

Figure 49 : Délestage par sublimation, câble Bersimis,  
17 février 1987

Figure 50 : Délestage par sublimation, câble Bersimis,  
21 février 1987

Figure 51 : Délestage par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 24, 27, 30 décembre 1986 et 02 janvier  
1987

Figure 52 : Délestage par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 23 janvier 1987

Figure 53 : Délestages par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 30 janvier et 09 février 1987

Figure 54 : Délestage par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 28 février 1987

Figure 55 : Délestage par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 07 décembre 1987

Figure 56 : Délestage par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 15 décembre 1987

Figure 57 : Délestage par bris mécanique de la glace, câble  
Bersimis, 31 décembre 1987

Figure 58 : Conditions atmosphériques de formation des dépôts  
de glace étudiés au Mt-Valin (1985-1988)

Figure 59 : Givre typique observé au Mt-Valin

Figure 60 : Efforts exercés sur un manchon elliptique  
horizontal

Figure 61 : Efforts exercés sur un manchon elliptique incliné

Figure 62 : Efforts exercés sur un manchon circulaire

## INTRODUCTION

Les dépôts de glace atmosphérique sur les ouvrages exposés sont à l'origine de nombreux problèmes : forces aérodynamiques sur les structures et vibrations, surcharges mécaniques (structures élancées), pertes énergétiques, rupture des conducteurs, modifications aérodynamiques (aéronautique), etc. Dans chaque domaine, les mécanismes d'accumulation de glace font l'objet de nombreux travaux, (E. P. Lozowski et J.-F. Gayet, 1988; J. Druez, 1988; L. Makkonen, 1987; McComber, P. et al., 1983 et 1984). Par contre, les mécanismes de réduction du poids de glace, ou délestage, sont encore mal connus. C'est pourtant un phénomène qu'il est important d'étudier, puisque dans le cas des câbles, le délestage est responsable d'une grande partie des accidents liés à la glace (S. Fuheng et H. Shixiong, 1988).

L'objectif de ce travail est de fournir des données expérimentales sur la dynamique du délestage des câbles conducteurs en absence de tension électrique. Dans cette perspective, on rappellera d'abord certaines caractéristiques des événements de givrage, puis on donnera une description générale des différents modes de délestage. Ensuite, on définira et on validera les données expérimentales recueillies sur le site du Mont-Valin (Québec, Canada). On procédera alors à l'analyse des résultats expérimentaux en identifiant les cas les plus représentatifs de chaque mode de délestage. Enfin, on étudiera plus en détail le cas particulier du délestage par bris mécanique de la glace.

## CHAPITRE I

### DESCRIPTION GENERALE DU GIVRAGE SUR LES CABLES

Le problème de givrage sur les câbles a fait l'objet de nombreux travaux tant en laboratoire (J. Druez et al., 1986; P. Personne et J.-F. Gayet, 1986), que sur site (J. Druez et al., 1987; P. McComber et J. W. Govanni, 1985). On s'intéressera ici à trois aspects particuliers de ce phénomène: l'évolution générale d'un événement de givrage, le type de glace déposée et la forme du dépôt de glace.

#### 1.1 Evolution d'un événement de givrage de câble

L'étude de la formation et de l'évolution d'un dépôt de glace sur un câble montre que cet événement se déroule généralement selon un même processus, (J. Druez, 1988; M. Csomor et F. Rezsofi, 1988). On peut, en effet, distinguer trois phases: la première est une phase d'accumulation caractérisée par une croissance rapide du dépôt de glace, la seconde, qu'on appellera phase d'endurance, présente une croissance ou décroissance lente du dépôt ou encore un palier, et la troisième phase est celle du délestage caractérisée par une décroissance rapide (figure 1).

On peut cependant remarquer que ce processus peut être altéré de deux façons. En effet, un ou plusieurs délestages peuvent survenir pendant une longue période de croissance; on observe alors une succession de phases d'accumulation et de

délestage alternés, la phase d'endurance se trouvant ainsi supprimée (figure 2). D'autre part, on observe aussi des événements de givrage ne présentant pas de délestage mais seulement une accumulation de glace suivie d'une phase d'endurance qui se poursuit pendant plusieurs jours, jusqu'à ce qu'un autre événement de givrage se produise (figure 3).

### 1.2 Classification des types de glace atmosphérique

La glace accumulée sur les câbles est formée par accrétion de gouttes ou gouttelettes surfondues qui gèlent au contact d'une surface. On distingue trois grands types de glace d'origine atmosphérique: le verglas, le givre dur ou givre lourd, et le givre léger. Cette classification est basée essentiellement sur la transparence et la densité de la glace obtenue. Le verglas est une glace transparente ou claire présentant une densité relative supérieure à 0,80. Le givre dur est moins transparent que le verglas et quelquefois opaque selon la quantité d'air contenue dans la glace. Sa densité relative varie de 0,60 à 0,80. Le givre léger est une glace blanche et opaque, d'apparence granulaire ou en forme d'aiguilles, et de densité relative inférieure à 0,60, (D. Kuroiwa, 1958 et 1965; B. Michel, 1978).

Le type de glace dépend principalement du contexte particulier de formation dont les paramètres les plus importants sont la température et la vitesse du vent. La table 1 et les figures 4 et 5 présentent les conditions atmosphériques de formation pour chaque type de glace. La table 1 et la figure 4 ont été réalisées à partir de prélèvements de glace en site naturel montagneux, en Hokkaido (Japon), (D. Kuroiwa, 1958). Les mesures effectuées au laboratoire par J.-L. Laforte et L. C. Phan (1981) ont été obtenues à l'aide de gouttelettes de 20  $\mu\text{m}$  de diamètre. Les

résultats sont présentés à la figure 5 et confirment ceux de D. Kuroiwa (1958).

### 1.3 Formes du dépôt de glace

Une accumulation de glace sur un câble se produit sous des conditions atmosphériques spécifiques, qui déterminent, non seulement le type, mais aussi la forme du dépôt de glace accumulée. L'accrétion est due soit à des précipitations, soit à des nuages givrants. De façon générale, les précipitations sont accompagnées d'un vent relativement fort, alors que les nuages givrants sont associés à des vents de plus faible intensité, (D. Kuroiwa, 1965). Dans tous les cas, le vent est un facteur très influent lors de la formation du dépôt de glace car il présente toujours une direction dominante. L'accumulation de glace se produira, par conséquent, essentiellement sur la partie du câble faisant face au vent dominant, (figure 6).

Si la tempête dure longtemps, l'accrétion pourra être suffisamment importante pour que l'action conjuguée du vent (forces de portance et de trainée) et du poids du dépôt de glace exerce des forces non-négligeables sur le câble. La force verticale  $F$  étant excentrée par rapport à l'axe du câble, elle entraînera la création d'un moment de torsion. Selon sa rigidité, le câble résistera plus ou moins à ce moment de torsion. La rigidité en torsion du câble dépend évidemment des matériaux utilisés pour sa construction. Lorsque les mêmes matériaux sont utilisés pour différents câbles, c'est alors le diamètre qui sera le facteur décisif de la rotation du câble, le moment d'inertie de torsion étant une puissance quatrième du diamètre. Si le diamètre est petit, la rigidité du câble est relativement faible et le câble pourra donc tourner progressivement sur lui-même et

s'entourer d'un manchon circulaire (figures 7.a et 7.b, selon les schémas de D. Kuroiwa, 1965 et de P. Personne et J.-F. Gayet, 1986). Si le diamètre du câble est suffisamment grand, la résistance en torsion sera assez forte pour que le câble tourne peu ou pas du tout, et le câble chargé de glace offrira un profil elliptique (figures 7.c et 7.d, D. Kuroiwa, 1965). Dans la nature, on trouvera des formes intermédiaires (figure 8). Il faut aussi signaler que la rotation en torsion du câble sera plus forte au centre qu'aux extrémités qui sont fixées aux supports. Par conséquent, on peut s'attendre à observer des manchons à tendance elliptique aux extrémités du câble et circulaire au centre du câble (figure 9).

Le vent est un facteur atmosphérique très important dans l'étude du givrage et du délestage. Quantitativement, c'est la composante de la vitesse du vent dont la direction est perpendiculaire au câble qui sera utilisée. Dans la suite de ce travail, afin d'alléger le texte, les figures et les tableaux, on ne fera mention que de la vitesse du vent pour référer à sa composante normale telle que définie ci-dessus.

Il faut signaler dès maintenant qu'il est d'usage courant d'utiliser la notion de charge de glace par unité de longueur,  $C$ , plutôt que celle de poids de glace,  $P$ . Ces deux grandeurs sont liées par la relation suivante:

$$C = P / (g l)$$

où  $g$  est l'accélération due à la gravité,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$l$  est la longueur du câble (m)

$P$  est le poids de glace (N)

$C$  est la charge de glace par unité de longueur (kg/m)

$C$  représente donc la masse d'un dépôt de glace de 1m de long, en supposant que la charge est uniformément répartie

sur le câble. Dans la suite du texte, chaque fois que l'on mentionnera charge de glace on référera à la charge de glace par unité de longueur telle que décrite ci-dessus.

Il est souvent nécessaire d'évaluer l'épaisseur de glace accumulée sur un câble, connaissant la charge de glace. La forme d'un dépôt de glace se situe généralement entre celle d'un manchon circulaire et celle d'un manchon elliptique. Par conséquent, l'épaisseur réelle d'un dépôt sera comprise entre les valeurs théoriques d'épaisseur des manchons circulaire et elliptique. D'autre part, dans le cas d'accumulation de givre léger sur un câble fixe, la surface d'adhésion de la glace au câble sera généralement de trois à six fois plus réduite dans les premières heures de formation que par la suite, (D. Kuroiwa, 1965) (figure 7.d).

#### Calcul de l'épaisseur d'un manchon circulaire.

La figure 10 représente les caractéristiques géométriques d'un manchon circulaire théorique auquel on se référera dans la suite de ce travail.

Soit  $C$  la charge de glace par mètre du câble,  
 $l$  la longueur du câble,  
 $\rho_g$  la masse volumique de la glace  
 $V$  le volume du dépôt de glace  
 $A$  la surface de la section du dépôt  
 $h$  l'épaisseur du dépôt  
 $D_o$  le diamètre du câble

alors

$$C_1 = \rho_a V$$

$$C_1 = \rho_a A_1$$

$$C = \rho_a A \quad (1.3.1)$$

or

$$A = \pi ((D_o + 2h) / 2)^2 - \pi (D_o / 2)^2$$

$$A = \pi (h^2 + hD_o)$$

donc

$$C = \rho_a \pi (h^2 + hD_o)$$

donc

$$h^2 + hD_o = C / (\rho_a \pi)$$

$$h = (-D_o + (D_o^2 + (4C / (\rho_a \pi)))^{1/2}) / 2 \quad (1.3.2)$$

### Calcul de l'épaisseur d'un dépôt elliptique

La figure 11 représente les caractéristiques géométriques d'un manchon elliptique théorique auquel on se référera dans la suite de ce travail.

En gardant les mêmes notations que pour le calcul de l'épaisseur d'un dépôt circulaire, on reprend l'équation 1.3.1:

$$C = \rho_a A$$

or  $A$  est la moitié de la différence entre deux surfaces: celle de l'ellipse de grand axe  $D_o+2h$  et de petit axe  $D_o$ , et

celle du cercle de diamètre  $D_o$ , donc:

$$A = (\pi (D_o + 2h) (D_o) / 4 - \pi (D_o^2 / 4)) / 2$$

donc

$$A = (2\pi h D_o) / 8$$

$$A = (\pi h D_o) / 4$$

donc

$$C = (\rho_a \pi D_o h) / 4$$

donc

$$h = (4C) / (\rho_a \pi D_o) \quad (1.3.3)$$

La connaissance de l'épaisseur du dépôt de glace est très utile, en particulier pour le calcul de la force de trainée exercée par le vent sur le câble chargé de glace. C'est alors la plus grande dimension de la section du manchon qu'on voudra déterminer, soit le diamètre dans le cas circulaire et la valeur du grand axe de l'ellipse dans l'autre cas.

#### Calcul du diamètre de la section du manchon circulaire

$$D = D_o + 2h$$

D'après l'équation 1.3.2, on a

$$D = D_o + 2 \left( \left( D_o^2 + (4C / (\rho_a \pi)) \right)^{1/2} - D_o \right) / 2$$

donc

$$D = \left( D_o^2 + (4C / (\rho_a \pi)) \right)^{1/2} \quad (1.3.4)$$

Calcul du grand axe de la section du manchon elliptique

$$D = D_0 + h$$

D'après l'équation 1.3.3, on a

$$D = D_0 + (4 C) / (\rho_0 \pi D_0) \quad (1.3.5)$$

## CHAPITRE II

### DESCRIPTION GENERALE DES DIFFERENTS TYPES DE DELESTAGE

On identifie trois modes de délestage selon le phénomène physique qui engendre la réduction de la charge de glace sur le câble. Ces trois phénomènes sont les délestages par fonte, par sublimation et par bris mécanique de la glace. Ils sont caractérisés par des conditions spécifiques.

#### 2.1 Caractéristiques d'un délestage par fonte

Une caractéristique évidente d'un délestage par fonte est la valeur de la température qui devra être supérieure à 0 °C. La quantité de glace délestée devrait être relativement faible lorsque seulement la partie la plus externe du manchon de glace est affectée par la température. Par contre, si une ou plusieurs zones du câble sont libres de glace, celles-ci vont pouvoir se réchauffer rapidement et transmettre ce réchauffement de température à tout le câble. Cette augmentation de la température au niveau de l'interface câble-glace provoquera une diminution de la force d'adhésion de la glace au câble. Lorsque la force d'adhésion sera trop faible pour compenser les forces aérodynamiques et de gravité, de gros blocs de glace vont se détacher. Il s'agit donc d'un délestage mécanique amorcé par la fonte. On pourra alors observer un taux élevé de réduction de la charge de glace sur le câble.

## 2.2 Caractéristiques d'un délestage par sublimation

La sublimation, pour un corps donné, correspond au passage direct de la phase solide à la phase gazeuse, c'est-à-dire, dans notre cas, de la glace à la vapeur d'eau. L'étude de G. Lambrinos, J. Aguirre-Puente et M. Sakly (1987) montre que la température, l'humidité relative, la vitesse du vent et les dimensions du dépôt de glace sont des facteurs importants pour l'évaluation de la quantité de glace sublimée. Dans cette étude, la sublimation atteint de plus grandes valeurs lorsque la température et la vitesse du vent sont plus élevées, et quand le taux d'humidité relative est plus faible. La sublimation se produit au niveau de l'interface glace-air et sera donc plus importante lorsque la surface du dépôt sera plus grande. Par conséquent, on devrait observer un taux de sublimation plus élevé lorsque, pour une même charge de glace, la densité de la glace déposée est plus faible et lorsque, pour une même densité de glace, la charge de glace est plus grande. Selon les conditions des expériences de Lambrinos et al., la quantité de glace sublimée en dix heures peut varier de 3 à 40 % de la masse totale.

## 2.3 Caractéristiques d'un délestage par bris mécanique de la glace

On a observé, à des températures négatives, des délestages qui, sur une période d'une heure, atteignent jusqu'à 100 % de la masse totale du dépôt. Ces pourcentages sont beaucoup trop élevés pour être explicables par la sublimation. La fonte, qui se produit à des températures

positives, ne peut pas non plus être la cause de ce phénomène. Les observations mentionnées ci-dessus correspondent donc à un ou des mécanismes spécifiques que l'on regroupera sous le terme de délestage mécanique. Ces phénomènes sont liés à une rupture de la glace causée par un dépassement des limites rhéologiques du matériau. L'amorçage et la propagation de telles ruptures sont complexes et peuvent être attribués aux charges statiques (flexion, torsion) ou dynamiques (déplacements, vibrations, etc.). On peut donc s'attendre à ce que le type de glace, la vitesse du vent, la température et la charge de glace déposée sur le câble soient les facteurs prépondérants du délestage mécanique. On précise que le type de délestage mécanique amorcé par la fonte tel que décrit à la section 2.1 n'est pas reconnu, ici, comme un délestage mécanique proprement dit.

En résumé, un délestage par fonte sera identifiable par une décroissance de la charge de glace se produisant à température positive. Cette décroissance pourra être faible, de l'ordre de la sublimation, ou élevée, de l'ordre du délestage mécanique. Un délestage par sublimation se reconnaîtra à une faible décroissance de la charge de glace se produisant à des températures négatives. Un délestage mécanique sera caractérisé par une forte décroissance de la charge de glace à température négative.

## CHAPITRE III

### DESCRIPTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES

#### 3.1 Problématique

L'analyse détaillée du délestage requiert la connaissance de l'évolution du poids de glace en fonction du temps et des paramètres météorologiques tels que la température et la vitesse du vent. Quelques études expérimentales de ce genre ont été effectuées à travers le monde, citons par exemple J.W. Govanni et S. F. Ackley au Mont Washington aux U.S.A (1983), K. Yano au Mt Zao au Japon (1988). Mais, dans la plupart des cas, l'analyse se limite à un traitement des données moyennées dans le temps sur de longues périodes. Pour déterminer les différents modes de délestage, il est par contre nécessaire de disposer de données expérimentales obtenues à des intervalles de temps suffisamment rapprochés. Cependant, de telles mesures sont sujettes à de nombreuses perturbations inhérentes à l'utilisation d'une station en site naturel éloigné: dérèglement des instruments de mesure, instabilité des signaux, accidents naturels tels que la foudre, etc. En conséquence, l'analyse sera basée sur un échantillonnage serré des mesures effectuées en site naturel, et, avant l'analyse, les données expérimentales seront soumises à une étude approfondie afin de déterminer leur validité et leur domaine d'utilisation.

### 3.2 Description du site

Pour étudier les différents phénomènes liés au givrage des lignes de transport d'électricité, plusieurs câbles électriques ont été installés dans un site montagneux approprié. Les paramètres importants, caractérisant les conditions de givrage, sont enregistrés à intervalles de temps réguliers.

Le site a été choisi de façon à ce que les câbles soient soumis à des conditions de givrage critiques. Il se trouve au Mt Valin (902 m d'altitude), à 45 km au nord-est de Chicoutimi, Québec, Canada (48 degrés de latitude nord).

Les données météorologiques annuelles typiques sont les suivantes: 183 jours en-dessous de 0 °C, minimum de température aux alentours de -40 °C, environ cinq événements de givrage importants par saison s'étendant chacun sur 2 ou 3 jours en général. Les vents dominants ont une direction est-ouest et leur vitesse moyenne enregistrée sur une période d'une demi-heure atteint 15 m/s.

Deux lignes expérimentales ont été installées sur ce site (figure 12). La ligne principale est constituée de six câbles fixés à deux poteaux de bois de 25 m de hauteur et distants de 96.505 m. Elle est orientée de façon à être perpendiculaire aux vents dominants, soit à 18 degrés est de la direction nord. Les six câbles utilisés sont un câble de garde de 12,5 mm de diamètre et cinq câbles Bersimis de 35 mm de diamètre. Quatre de ces cinq câbles sont groupés en faisceau et maintenus à 406 mm de distance les uns des autres par des entretoises. Ces lignes expérimentales ne sont pas sous tension électrique.

On peut mentionner que l'un des deux poteaux supporte

aussi quatre isolateurs de types variés, sur les caractéristiques desquels on ne s'attardera pas puisqu'ils ne sont pas considérés dans cette étude.

La ligne secondaire, constituée d'un câble témoin de 7,93 mm de diamètre, est orientée perpendiculairement à la ligne principale, soit dans une direction presque parallèle aux vents dominants.

Les caractéristiques des câbles composant les deux lignes sont présentées dans la table 2.

### 3.3 Instrumentation

L'instrumentation du site expérimental vise à enregistrer les données environnementales et celles concernant la charge de glace sur les câbles. Ainsi, les données atmosphériques suivantes sont recueillies: température, vitesse et direction du vent, détection d'accrétion de glace. La température est mesurée par une sonde thermique protégée du vent et des rayons solaires, avec une précision de 0,1 °C. La vitesse du vent est mesurée par un anémomètre de type turbine, maintenu libre de glace par une résistance électrique chauffante. Ce type d'anémomètre, robuste, a été choisi pour résister aux dommages causés par les chutes de blocs de glace provenant d'une antenne voisine. En conséquence, sa précision est relativement basse (0,5 m/s) et son temps de réponse assez lent (environ 10 secondes). La direction du vent est mesurée par une girouette connectée à un rhéostat donnant une précision de la position angulaire d'un degré environ. Un détecteur de givre, tel que modifié par Hydro-Québec, donne des indications sur l'accumulation de glace. Cet appareil est muni d'un compteur qui augmente d'une unité chaque fois qu'une quantité de glace équivalente à 0,5 mm d'épaisseur s'est accumulée sur la sonde, qui est

dégivrée automatiquement après chaque cycle. La charge de glace sur les câbles est obtenue à partir de lectures de cellules de charge. Chaque câble est relié, à une extrémité, à une cellule de charge, elle-même attachée au poteau, qui mesure la tension (T) dans la direction du câble. Les cellules de charge varient selon les câbles pour lesquels elles sont utilisées et leurs caractéristiques sont présentées dans la table 3. L'anémomètre et le détecteur de verglas sont situés au sommet de l'un des poteaux de la plus grande ligne expérimentale (figure 12).

#### 3.4 Méthode d'acquisition des données

Le signal provenant de chaque instrument de mesure est transmis à un conditionneur de signal avant d'être recueilli par une balise Handar située dans le bâtiment de Radio-Québec. La balise est programmée de telle façon qu'un échantillon de mesures est constitué pour chaque demi-heure écoulée. Les méthodes de formation de cet échantillon varient selon la nature des données, et selon la saison hivernale étudiée.

Au cours de la saison 1985-1986, toutes les mesures ont été enregistrées toutes les 2 minutes, pendant une période de 30 minutes, constituant ainsi des échantillons de 15 données.

Au cours de la saison 1986-1987, les mesures concernant la tension des câbles et la direction du vent ont été enregistrées toutes les 10 secondes pendant 30 minutes, constituant des échantillons de 180 données. Dans le cas de la vitesse du vent, les mesures ont été prises toutes les 30 secondes, formant ainsi un échantillon de 60 données. En ce qui concerne la température et le détecteur de givre, une seule mesure a été enregistrée à la fin de la demi-heure

étudiée.

Au cours de la saison 1987-1988, l'échantillonnage des mesures a été réalisé de façon semblable à celui de la saison précédente, sauf dans le cas de la vitesse du vent pour laquelle les mesures ont été prises toutes les 3 secondes pendant les 10 minutes précédent la fin de la demi-heure étudiée, constituant ainsi un échantillon de 200 données.

La balise calcule ensuite la moyenne des valeurs mesurées pour chaque échantillon et accumule ces nouvelles données pendant 24 heures. Chaque matin, un micro-vax, installé dans un laboratoire du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (G.R.I.E.A) à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), entre en contact avec la balise par ligne téléphonique et reçoit les 48 données calculées et mémorisées par la balise pour chaque grandeur: tension à l'extrémité des câbles, température, vitesse et direction du vent, et nombre d'alarmes de verglas.

### 3.5 Traitement des données

Les données reçues par le microvax concernant la tension mécanique dans les câbles mesurée par les cellules de charge sont exprimées en millivolts. Si on désigne par  $V$  cette valeur, alors la tension  $T$ , en Newton, est directement proportionnelle à  $V$ , donc:

$$T = c V \quad (3.5.1)$$

où  $c$  est une constante caractéristique de chaque cellule de charge, s'exprimant donc en Newton par millivolt.

Connaissant l'angle  $\theta$ , mesuré entre le câble au niveau

des attaches et l'axe horizontal, et la mesure de la tension  $T$ , on peut aisément déterminer la force,  $P_N$ , qui correspond au poids total de la glace et du câble, selon la relation suivante (P. Mc Comber et al., 1986, 1987) :

$$P_N / 2 = T \sin \theta$$

Au lieu d'utiliser le poids vertical  $P_N$ , en Newton, on exprime la charge de glace en masse par unité de longueur, en  $\text{kg/m}$ , notée  $C$ :

$$C / 2 = (T / (g_1)) \sin \theta$$

où  $g$  représente la constante de gravité  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

Donc

$$C = k T$$

où  $k = (2 / (g_1)) \sin \theta$

et  $k$  est une constante caractéristique de chaque câble, exprimée en  $\text{s}^2/\text{m}^2$  ou  $\text{kg/N.m}$ .

En utilisant l'équation ci-dessus, on suppose que la charge de glace est uniformément répartie sur le câble et que les variations de l'angle  $\theta$  dues à l'accumulation de la glace sur le câble sont négligeables.

En remplaçant  $T$  par  $c V$ , d'après l'équation 3.5.1, on obtient:

$$C = K V$$

où  $K = c k$ .

Le facteur constant  $K$  a été calculé pour chaque type de câble

et peut se trouver modifié lorsqu'un conditionneur de signal est changé. Les valeurs de K déterminées sont présentées dans la table 4. On peut remarquer que le coefficient correspondant au faisceau de câbles est négatif pour la saison 1986-1987. Durant cette période, on ne disposait, en effet, que d'une cellule en compression de la force nécessaire, 226 870 N (50 000 lbf). Pour que le signal varie dans le même sens que la charge de glace, il a donc fallu affecter le coefficient K d'un signe négatif.

Aux fins de comparaison, lorsqu'on étudiera l'évolution du dépôt de glace sur le faisceau, on ne considérera que la charge accumulée sur un seul des quatre câbles. La valeur de cette charge sera estimée en divisant la charge totale mesurée sur le faisceau par quatre.

Remarques:

Le détecteur de verglas n'était pas installé pendant la saison 1985-1986.

Le signal du faisceau de câble n'est pas disponible pour la saison 1985-1986.

Les données obtenues sur le faisceau de câbles, pendant la saison 1987-1988, ne sont pas quantitativement utilisables à cause des sérieux problèmes rencontrés avec le conditionneur de signal du faisceau, tout au long de la saison.

3.6 Effet du vent sur les câbles

En présence de vent, une force aérodynamique vient

s'ajouter au poids du câble et à celui de la glace. La tension, évaluée par la cellule de charge, correspond alors à ces deux effets. En conséquence, la force aérodynamique intervient comme une erreur dans le calcul du poids de la glace (et du câble) à partir des valeurs de la tension mesurée. Les forces aérodynamiques ne dépendent que de la vitesse du vent et de la géométrie du manchon, par conséquent, on pourra obtenir une estimation de l'erreur qu'elles induisent à partir des mesures obtenues par l'anémomètre et d'hypothèses simples sur la forme du manchon de glace. La force aérodynamique, dans le plan d'une section du câble, possède deux composantes: l'une parallèle à la direction du vent moyen, donc horizontale, appelée trainée,  $F_D$ , l'autre perpendiculaire à la direction du vent moyen, donc verticale, appelée portance,  $F_L$ . L'ordre de grandeur de ces composantes peut être examiné à l'aide des coefficients de trainée,  $c_D$ , et de portance,  $c_L$ , qui sont définis selon les conventions usuelles en aérodynamique, de la façon suivante:

$$c_D = F_D / (0,5 \rho_a u^2 l D)$$

et

$$c_L = F_L / (0,5 \rho_a u^2 l D)$$

où

$u$  est la vitesse du vent perpendiculaire au câble

$D$  est défini à la section 1.3, (voir équations 1.3.4 et 1.3.5)

$l$  est la longueur du câble

$\rho_a$  est la masse volumique de l'air

Pour les deux types de manchons, circulaire et elliptique, il est suffisant de calculer l'erreur en se basant sur la force de trainée seulement. En effet, dans le cas du manchon circulaire, la portance est nulle. D'autre part, dans le cas

du manchon elliptique, les valeurs des forces de trainée et de portance vont dépendre de l'angle d'attaque, c'est-à-dire de l'angle d'inclinaison du grand axe de l'ellipse avec le plan horizontal. Compte tenu de son processus de formation, (absence de rotation du câble), voir section 1.3, un manchon elliptique ne peut être qu'horizontal ou très faiblement incliné (angle d'attaque inférieur à 5°). Dans ces conditions, en se basant sur les études effectuées pour de faibles charges, on peut estimer que le coefficient de portance restera inférieur à 0,2 (L.T. Koutselos et M.J. Tunstall, 1988). (On ne dispose pas de résultats sur les coefficients de portance pour des moyennes et grandes charges de glace). Par contre, le coefficient de trainée, très sensible à la rugosité, peut varier de 0,2 à 1,5 (F.M. White, 1979). La valeur exacte dépend essentiellement de la rugosité, de la géométrie (c'est-à-dire de l'écart par rapport à l'ellipse parfaite), du niveau de turbulence et de l'inclinaison de l'ellipse. Par conséquent, en l'absence d'informations précises sur ces facteurs, on prendra une valeur intermédiaire égale à celle retenue dans le cas du manchon circulaire, soit  $c_D = 0,99$ . La force de portance, avec un coefficient de portance  $c_L = 0,2$ , sera donc négligeable par rapport à la force de trainée lorsque celle-ci est affectée du coefficient  $c_D = 0,99$ . La force de trainée induit donc une sur-évaluation de la charge de glace (figure 13). Dans le développement qui suit, on évaluera donc l'ordre de grandeur de l'erreur,  $E$ , induite par le vent.

On définit les grandeurs suivantes:

$\tilde{F}_m$ : Poids calculé à partir de la mesure de tension du câble.  $\tilde{F}_m$  représente donc la valeur observée du poids total du dépôt de glace et de celui du câble.

$\tilde{P}$  : Poids réel total du câble et de la glace.

L'erreur,  $E$ , induite par l'effet du vent est donc donnée par la relation suivante:

$$E = P_m - P$$

or

$$P_m = (\tilde{P}^2 + F_D^2)^{1/2}$$

donc

$$E = (\tilde{P}^2 + F_D^2)^{1/2} - P \quad (3.6.1)$$

L'intensité de la force de trainée est donnée par la relation:

$$F_D = (C_D \rho_a u^2 D_1) / 2$$

où

$$\rho_a = 1,39 \text{ kg/m}^3$$

et

$$C_D = 0,99$$

donc

$$F_D = 0,688 u^2 D_1$$

En remplaçant  $F_D$  dans l'équation 3.6.1, on obtient:

$$E = (\tilde{P}^2 + (0,688 u^2 D_1)^2)^{1/2} - P \quad (3.6.2)$$

Pour mieux visualiser l'importance de l'erreur commise sur l'évaluation du poids,  $P$ , on l'évalue en terme de masse par unité de longueur,  $C$  (kg/m), plutôt que de force (N). On manipule donc l'équation 3.6.2 pour obtenir:

$$e = (\tilde{C}^2 + (0,688 u^2 D_1 / (g_1))^2)^{1/2} - C \quad (3.6.3)$$

où

$$C = P / (gl) \quad (\text{kg/m})$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

donc

$$e = ( C^2 + (0,0701 u^2 D)^2 )^{1/2} - C \quad (3.6.4)$$

et

$$C = C_0 + C_a$$

où

$C_0$  est la masse du câble par unité de longueur  
et  $C_a$  est la masse du dépôt de glace par unité de longueur.

La valeur  $D$  dépend de la forme du manchon de glace. Comme il a été décrit dans la section 1.3, le dépôt de glace tend à prendre une forme intermédiaire entre le cercle et l'ellipse. Si  $D_0$  est le diamètre du câble,

dans le cas du manchon circulaire, l'équation 1.3.4 donne:

$$D = ( D_0^2 + (4C_a / (\rho_a \pi)) )^{1/2}$$

dans le cas du manchon elliptique, en se basant sur le grand axe de l'ellipse, on obtiendra la plus grande surface apparente donnée par l'équation 1.3.5:

$$D = D_0 + ( 4C_a / (\rho_a \pi D_0) )$$

Afin d'obtenir des informations quantitatives sur l'erreur induite par le vent, on a calculé les valeurs théoriques prises par cette erreur dans le cas du câble Bersimis, en considérant différentes valeurs pour la charge de glace, la densité, la vitesse du vent et le type du manchon.

Les figures 14 à 19 montrent l'évolution de l'erreur induite par le vent en fonction de la vitesse du vent pour une densité de glace fixée. Trois courbes sont tracées sur chaque figure, chacune d'entre elles correspondant à une charge de glace différente sur le câble, soit 0 kg/m, 10 kg/m et 20 kg/m. Les figures 14 à 16 présentent les cas où le manchon de glace serait circulaire, et les figures 17 à 19, les cas où le manchon serait de forme elliptique. Les figures 14 et 17, 15 et 18, et, 16 et 19, correspondent respectivement aux densités 0,5 (givre léger), 0,7 (givre dur), et 0,9 (verglas). L'erreur la plus grande correspond à un manchon elliptique de 20 kg/m, lorsque le type de glace est du givre léger (0,5), et le vent 20 m/s (figure 19). Cette erreur est de 25 kg/m, soit 125 % de la masse du manchon. On constate, cependant, sur les courbes, que pour un vent inférieur à 8 m/s, l'erreur induite par le vent est négligeable par rapport à la charge de glace.

Au Mt Valin, les vitesses de vent observées pendant les saisons 1985 à 1988 étaient inférieures à 10 m/s et les charges de glace inférieures à 20 kg/m. Pour une vitesse de vent de 10 m/s et une charge de givre léger de 10 kg/m, on aurait, dans le cas d'un manchon elliptique, une erreur de l'ordre de 1,100 kg/m, soit 11 % de la masse totale du manchon. Les charges de glace mesurées sur le câble Bersimis (en noir) et les erreurs de mesures correspondantes induites par le vent (en rouge) sont présentées pour deux cas extrêmes: le premier correspond à une charge de glace réelle nulle, observée pendant la période du 15 au 23 avril 1987 (figure 20), et le second cas correspond à une charge de glace maximale, observée pendant la période du 25 décembre 1986 au 02 janvier 1987 (figure 21). Dans les deux cas, l'erreur induite par le vent est tout à fait négligeable.

## CHAPITRE IV

### PRESENTATION DE LA METHODE DE VALIDATION DES DONNEES

#### 4.1 Définition d'un niveau seuil

Ainsi qu'on l'a mentionné dans la problématique, le signal correspondant à la charge de glace sur les câbles est perturbé par un "signal d'erreur" qu'il convient d'évaluer de la façon la plus précise possible afin de déterminer le niveau de précision des valeurs numériques recueillies.

Les conditions expérimentales et l'observation des courbes de charge de glace sur les câbles permettent de supposer que le signal d'erreur est constitué de bruits électroniques de haute fréquence qu'il s'agit d'éliminer. On serait donc tenté d'utiliser une méthode d'analyse spectrale du signal pour filtrer le bruit. Cependant, à cause des variations des conditions expérimentales au cours d'une saison, on se trouve en présence d'un système non-stationnaire et l'analyse spectrale n'est donc pas valable dans ce cas. Une autre possibilité pour éliminer les hautes fréquences est d'utiliser une méthode de lissage. Pour ce faire, il faut déterminer une période de durée optimale sur laquelle on peut baser le lissage, afin, d'une part d'éliminer les hautes fréquences, et d'autre part, de conserver les évènements significatifs du signal correspondant aux accumulations et aux délestages de glace. Les nombreuses tentatives, appliquées dans le cadre de ce travail à la banque de données du Mt-Valin, ont montré que

les lissages basés sur des périodes de durée inférieure à cinq heures n'éliminaient pas les hautes fréquences et que ceux basés sur des périodes de durée supérieure à cinq heures diminuaient significativement les taux des délestages et parfois éliminaient même ce phénomène. La fréquence du délestage est donc du même ordre de grandeur que celle de l'erreur, par conséquent ce type de filtrage ne convient pas. On a donc utilisé une approche différente, en abordant l'étude du signal d'erreur comme celle d'un phénomène aléatoire.

Selon cette approche, on considère le vent comme la seule source d'erreur déterministe. Toutes les autres sources d'erreur (dérive électronique, bruit blanc électronique, perturbations électromagnétiques) seront identifiées comme l'erreur aléatoire du signal correspondant à la charge de glace. Bien que la dérive thermique soit théoriquement de nature déterministe, le manque d'informations pertinentes conduit à la considérer comme un évènement aléatoire. Pour évaluer l'importance relative de la variation aléatoire par rapport à la valeur réelle de la charge, on va déterminer une valeur-seuil,  $v_g$ , représentant la variation minimum significative de la charge de glace (en kg/m). Autrement dit, une variation de charge inférieure à la valeur-seuil sera considérée comme imputable aux perturbations aléatoires, alors que toute variation supérieure à la valeur-seuil sera considérée comme une variation réelle de la charge. Une valeur-seuil sera calculée pour chaque câble et chaque saison.

Pour obtenir la valeur-seuil, on utilise une période de référence de plusieurs jours, pendant laquelle on ne constate aucune charge de glace sur les câbles. Dans ces conditions, toutes les variations observées sont des perturbations aléatoires du signal. Ces variations peuvent être présentées sous forme d'histogrammes des fréquences. La période de

référence choisie doit être suffisamment longue pour contenir un nombre important de valeurs de façon à correspondre à une bonne approximation de la densité de probabilité. Dès lors, la distribution permet de définir  $v_s$  comme la plus grande valeur telle qu'une large proportion des variations soit de valeur inférieure à  $v_s$ . Il est d'usage en statistique d'introduire un nombre  $\alpha$  très petit, appelé erreur de première espèce, pour établir un seuil en-deçà duquel l'événement considéré (ici une variation aléatoire ou erronée) est très fréquent. La valeur  $v_s$  pourra donc être déterminée d'après l'histogramme des fréquences des variations pour la période de référence comme la plus grande valeur telle qu'une proportion  $1-\alpha$  de variations lui soit inférieure. La valeur  $\alpha$  est généralement choisie égale à 10 %, 5 %, ou 1 %; la valeur  $1-\alpha$ , appelée niveau de confiance, sera donc égale à 90 %, 95 %, ou 99 %, selon les cas. Pour éliminer les variations aléatoires, il est bon d'utiliser un niveau de confiance élevé. Par contre, pour ne pas écarter trop de valeurs dans l'ensemble des données, il est préférable de maintenir  $v_s$  aussi petit que possible. On fera le choix du niveau de confiance en examinant le caractère utilisable des données.

#### 4.2 Critère d'erreur de la méthode

Pour qu'un ensemble de valeurs, correspondant à un câble et à une saison donnés, puisse être considéré comme utilisable, il faut que ces valeurs soient, en majorité, largement supérieures à la valeur-seuil de cet ensemble. En effet, dans ce cas, il y aura peu de chance que des valeurs erronées soient incluses parmi les valeurs retenues. Afin de définir de façon quantitative le caractère utilisable d'un

ensemble de variations de charge de glace, on va évaluer la probabilité que les valeurs retenues (supérieures au seuil) soient erronées.

Soit les événements suivants:

I : ensemble des variations observées inférieures ou égales à la valeur-seuil  $v_s$ .

S : ensemble des variations observées supérieures à la valeur-seuil  $v_s$ .

E : ensemble des variations dues aux perturbations aléatoires.

La probabilité cherchée, qui est la probabilité qu'une variation, supérieure à la valeur-seuil  $v_s$ , observée pendant la saison étudiée soit une perturbation est  $P(E/S)$ .

D'après le théorème de Bayes, on a :

$$P(S/E) = \frac{P(E/S)P(S)}{P(E)} \quad (4.2.1)$$

On applique de nouveau le théorème de Bayes à  $P(E/I)$ , on a :

$$P(I/E) = \frac{P(E/I)P(I)}{P(E)}$$

donc:

$$P(I) \\ P(E) = \frac{P(E/I)}{P(I/E)}$$

or

$$P(I) = 1 - P(S)$$

et

$$P(I/E) = 1 - P(S/E)$$

donc:

$$P(E) = \frac{1 - P(S)}{1 - P(S/E)} \cdot P(E/I)$$

En remplaçant  $P(E)$  par son expression, dans l'équation 4.2.1, on obtient:

$$P(E/S) = \frac{P(S/E)}{P(S)} \cdot \frac{1 - P(S)}{1 - P(S/E)} \cdot P(E/I)$$

La probabilité  $P(S)$  peut être calculée comme suit :

$$P(S) = \frac{N_S}{N} \quad (4.2.2)$$

où  $N_s$  est le nombre de variations supérieures à  $v_s$  et  $N$  le nombre de variations totales , pendant la saison étudiée.

La probabilité  $P ( S / E )$  est telle que:

$$P ( S / E ) = 1 - P ( I / E )$$

or la probabilité  $P ( I / E )$  est connue et égale au niveau de confiance  $1 - \alpha$  associé à la valeur-seuil, donc

$$P ( S / E ) = \alpha \quad (4.2.3)$$

Par contre, la probabilité  $P ( E / I )$  est inconnue. On ne peut donc pas obtenir une valeur exacte de la probabilité cherchée. Cependant,  $P ( E / I )$  étant en général proche de 1, on peut avoir une majoration intéressante de  $P ( E / S )$  en remplaçant  $P ( E / I )$  par 1.

Par conséquent, on pourra évaluer le caractère utilisable des variations de charge de glace pour un câble et une saison donnés, en sachant que la proportion des variations aléatoires est inférieure à la probabilité  $P$  définie par :

$$P = \frac{P ( S / E )}{P ( S )} = \frac{1 - P ( S )}{1 - P ( S / E )} \quad (4.2.4)$$

où  $P ( S / E )$  est calculée par la formule de l'équation (4.2.3) et  $P ( S )$  est calculée par la formule de l'équation (4.2.2).

## CHAPITRE V

### VALIDATION DES DONNEES DU MONT-VALIN

#### 5.1 Identification des périodes de référence

Les figures 22 à 24 présentent les températures observées pendant les trois périodes de référence choisies, soit du 07 au 18 mai 1986, du 10 au 21 avril 1987 et du 02 au 13 mai 1988.

Les figures 25 à 34 présentent la charge de glace mesurée, pour chaque période de référence et chaque type de câbles de l'installation. La mise à zéro des mesures de dépôt de glace n'a pas été effectuée car ce sont les variations de charge, et non pas les valeurs absolues, qui sont étudiées. Pour sélectionner de telles périodes, on peut se baser sur les mesures de température et du détecteur de verglas. En s'assurant que la température reste positive et que le compteur du détecteur de verglas n'augmente pas pendant la période considérée, on peut être certain qu'aucune accumulation ne s'est produite. De plus, pour s'assurer que les câbles sont libres de glace au moment où commence la période étudiée, on ne retiendra que les périodes précédées de quelques heures de température nettement positive. Enfin, en comparant l'évolution de la charge de glace sur les différents câbles, on peut montrer qu'une variation positive du signal d'un câble ne peut pas correspondre à une accumulation, lorsqu'elle n'apparaît pas au même moment dans le signal des autres câbles.

En ce qui concerne la saison 1985-1986, le détecteur de verglas n'était pas encore installé. En se basant sur les deux autres critères, température et charge de glace, on a pu retenir la période du 07 au 18 mai 1986, pour laquelle la température est toujours positive (figure 22). Cette période est précédée de quinze heures de température positive. L'observation des courbes présentant les charges de glace des câbles indique que celles-ci sont vraisemblablement à leur minimum au début de la période retenue (figures 25, 26 et 27).

Pendant la saison 1986-1987, le détecteur de verglas fonctionnait de façon assez fiable. Il n'a pas été possible de trouver une période de onze jours consécutifs présentant une température positive. La période sélectionnée, du 10 au 21 avril 1987, présente environ quarante heures de température négative, atteignant  $-7^{\circ}\text{C}$  au minimum et réparties du 11 au 14 avril (figure 23). Pendant ces quatre jours, le détecteur de verglas n'a enregistré qu'un seul compte, soit celui du 13 avril. L'évolution de la charge de glace sur les différents câbles relativement à cette journée ne présente pas de particularité en comparaison avec les trois journées précédentes et les quatre jours suivants (figures 28, 29, 30 et 31). D'autre part, la présence d'une seule augmentation du compteur signifie une accumulation très faible de glace. On estime que celle-ci serait de l'ordre de 25 g/m sur le câble Bersimis si la glace est de type verglas (densité la plus élevée). Pour revenir à un état libre de glace, les câbles devront donc perdre cette charge de 25 g/m, soit par fonte, soit par sublimation. De toutes façons, le nombre de données perturbées et le niveau de perturbation seront très faibles par rapport à la taille de l'échantillon et à l'intensité des variations aléatoires observées. Par conséquent, cet événement est négligeable.

Le détecteur de verglas fonctionnait irrégulièrement à

la fin de la saison 1987-1988. Il n'a donc pas pu être utilisé comme référence. La période du 02 au 13 mai 1988 a été sélectionnée bien que présentant environ vingt-quatre heures de température négative, atteignant  $-5^{\circ}\text{C}$  au minimum et réparties sur trois jours, soit les 2, 7 et 12 mai (figure 24). Une observation minutieuse des évolutions des signaux relatifs à chaque câble permet, en effet, de conclure à l'absence d'accumulation pendant cette période: les variations susceptibles d'être interprétées comme charges réelles de glace, parce que se produisant à température négative, sont indissociables (en amplitude et en fréquence) des variations purement aléatoires, observables sans ambiguïté quand la température est positive. De plus, ces variations ne se produisent pas au même moment pour tous les câbles, elles ne peuvent donc pas représenter une accumulation de glace.

On a donc ainsi déterminé des périodes de référence telles que les câbles ne présentent pas de dépôt de glace pendant un certain nombre de jours consécutifs. Ce nombre a été choisi le plus grand possible, et, aux fins de comparaison, le même pour les trois saisons. Ainsi, on a retenu des périodes de onze jours. Une telle période permet d'accumuler 528 données, ce qui représente une taille d'échantillon suffisante pour obtenir des résultats statistiques valables.

Une observation directe des figures 25 à 34 montre que l'ensemble du système de mesure engendre des variations aléatoires du signal de la charge de glace pour des périodes caractérisées par une absence de dépôt de glace. Toutes les courbes présentent des variations de courte durée comprises entre une demi-heure et cinq heures. Certaines de ces courbes sont caractérisées par une périodicité marquée de durée supérieure à la journée. En général, les amplitudes maximales

de ces variations de longue durée sont de l'ordre de grandeur des amplitudes de variation de plus courte durée (inférieure à cinq heures).

Le câble témoin est caractérisé par un signal faiblement perturbé pendant les saisons 1985-1986 et 1986-1987 (figures 25 et 28). Durant la saison 1987-1988 (figure 32), ce sont essentiellement les perturbations de longue durée qui ont gagné en amplitude.

Le câble de garde présente des perturbations d'amplitude moyenne et approximativement identiques sur les trois saisons (figures 27, 31 et 34).

Les perturbations aléatoires sur le câble Bersimis, pour les saisons 1986-1987 (figure 30) et 1987-1988 (figure 33) sont à peu près analogues à celles identifiées sur le câble de garde. Par contre, la figure 26, correspondant à la saison 1985-1986, présente de très larges amplitudes de perturbation.

Finalement, la figure 29 représentant les perturbations du signal de la charge de glace sur le faisceau, durant la saison 1986-1987, montre un comportement également caractérisé par de très grandes amplitudes de variation.

## 5.2 Répartition fréquentielle des variations aléatoires

La période d'échantillonnage du système de mesure est de 30 minutes. Cependant, les variations aléatoires peuvent avoir des périodes supérieures à la demi-heure. On étudie donc la répartition des variations correspondant à des intervalles de temps variant de une demi-heure à cinq heures. L'analyse n'a pas été poursuivie pour des intervalles de temps supérieurs à cinq heures par souci de la stabilité statistique des histogrammes: en effet, pour une période de

onze jours, le nombre de variations observables sur cinq heures est déjà réduit à 51 valeurs. Cependant, l'évolution des histogrammes (figure 35 à 44) montre qu'en général, l'amplitude des variations sur de longues périodes est du même ordre que celle observée sur des périodes comprises entre une demi-heure et cinq heures.

Les figures 35 à 44 montrent les histogrammes de fréquences des variations du signal de charges de glace fictives, pour les périodes et les câbles identifiés précédemment. Chaque figure présente les histogrammes relatifs aux variations observées sur des intervalles de temps de 0,5 h, 1,0 h, 1,5 h, 2,0 h, 2,5 h et 5,0 h. Les classes des histogrammes ont une amplitude constante égale à 20 g/m et sont centrées sur les valeurs 10 g/m, 30 g/m, 50 g/m, etc... jusqu'à 170 g/m. La dernière classe (infinie) regroupe toutes les variations supérieures à 180 g/m.

Tout d'abord, on note la similarité des histogrammes pour un câble et une saison donnés, quel que soit l'intervalle de temps: En effet, les fréquences observées dans chaque classe sont à peu près du même ordre. On remarque que dans la majorité des cas, les fréquences les plus élevées correspondent aux classes liées aux faibles variations, ce qui justifie l'utilisation d'un seuil pour éliminer ces variations considérées comme aléatoires.

De façon plus détaillée, le câble témoin, pour la saison 1985-1986 (figure 35) présente une convergence très rapide, l'essentiel des variations aléatoires étant regroupé dans la classe centrée sur la valeur de 10 g/m. La distribution des fréquences est un peu plus étalée pour la saison 1986-1987 (figure 38).

Pour le câble Bersimis, saison 1987-1988 (figure 43), la distribution est également concentrée autour de la valeur de 10 g/m, et est un peu plus étalée au cours de la saison

1986-1987 (fig. 40).

En ce qui concerne le câble de garde, l'histogramme est à peu près identique pour toutes les saisons, et présente un étalement notable jusqu'aux variations de l'ordre de 70 g/m.

Cependant, quelques cas sont caractérisés par des histogrammes non convergents, c'est-à-dire que, dans les classes de grandes variations, les fréquences correspondant aux longues périodes sont plus élevées que celles correspondant aux courtes périodes. Il s'agit du câble Bersimis pour la saison 1985-1986 (figure 36), du câble du faisceau pour la saison 1986-1987 (figure 39) et du câble témoin pour la saison 1987-1988 (figure 42). Dans ces conditions, l'utilisation d'un seuil devrait mener à la définition d'un ensemble de données significatives difficilement utilisables.

### 5.3 Identification des valeurs-seuils

Pour chaque cas, les valeurs-seuils, telles que définies précédemment, sont présentées dans la table 5 pour la saison 1985-1986, dans la table 6 pour la saison 1986-1987, et dans la table 7 pour la saison 1987-1988. Les valeurs-seuils calculées correspondent aux niveaux de confiance à 90 %, 95 % et 99 %. On peut remarquer tout d'abord que les valeurs-seuils sont essentiellement indépendantes des intervalles de temps de variation. Ceci vient confirmer l'hypothèse que les variations de longue durée ont des amplitudes de même ordre que celles de courte durée, et, par conséquent, l'analyse des variations de durée de quelques heures suffit pour évaluer l'amplitude des variations aléatoires du signal de charge de glace. On peut ensuite noter que les valeurs-seuils varient de 20 g/m à 500

37

g/m. Nous sommes donc en présence de phénomènes qui ne peuvent être dus aux erreurs de précision des instruments de mesure, qui sont, en général, inférieures aux valeurs-seuils (voir section 3.3). D'autre part, les accumulations et les délestages de glace atteignent, dans certains cas, des valeurs de l'ordre de plusieurs kilogrammes par mètre sur une période d'environ une heure. Les variations aléatoires demeurent donc plus faibles que les phénomènes étudiés. On peut donc en conclure que l'ensemble du système de mesure du Mont-Valin est suffisamment bien ajusté pour que l'information ne soit pas absorbée par les perturbations, ce qui est une difficulté majeure de ce type d'installation. Une analyse plus fine des erreurs associées à chaque valeur-seuil sera développée dans la section suivante et permettra de décider si les phénomènes moins évidents (faible taux de variation de charge), tels que la sublimation, seront identifiables dans un ensemble de valeurs pour un câble et une saison donnés.

La valeur des seuils,  $v_s$ , varie en fonction des niveaux de confiance  $1-\alpha$  de la façon indiquée à la section 4: plus le niveau de confiance est élevé, plus la valeur-seuil augmente. On considère que des valeurs-seuils strictement supérieures à 500 g/m sont inacceptables car elles conduisent à une trop grande réduction du nombre de données. D'autre part, dans le but de diminuer  $v_s$ , on ne peut pas trop abaisser le niveau de confiance car, alors, la probabilité d'erreur dans l'ensemble des données retenues devient trop grande. D'après l'examen des tables 5, 6, et 7, on constate qu'un niveau de confiance à 99 % est acceptable dans la majorité des cas. Uniquement en ce qui concerne le faisceau pendant la saison 1987-1988, il est nécessaire de recourir à un niveau de confiance de 95 % afin d'abaisser le niveau de seuil. Il faut citer aussi le cas isolé du câble Bersimis durant la saison 1987-1988 pour les variations d'une durée de 1,5 h où le niveau de confiance

utilisé est aussi de 95 %.

#### 5.4 Analyse d'erreur

Pour chaque câble, les probabilités d'erreur telles que définies précédemment, sont présentées à la table 8 pour la saison 1985-1986, à la table 9 pour la saison 1986-1987 et à la table 10 pour la saison 1987-1988. Ces probabilités d'erreur correspondent aux seuils de variation définis à un niveau de confiance de 99 %. Ce choix permet d'obtenir un niveau acceptable pour les probabilités d'erreur (de l'ordre de 10 %) tout en maintenant une valeur de seuil pas trop élevée. On rappelle que les probabilités données correspondent à des majorations des probabilités d'erreur.

En général, pour les variations sur les intervalles de temps d'une heure ou plus, les probabilités d'erreur sont acceptables. Elles sont proches de 10 % pour le câble témoin pendant la saison 1985-1986, le câble Bersimis pendant la saison 1986-1987, et le câble de garde pendant la saison 1987-1988, proches de 5 % pour le câble de garde pendant la saison 1985-1986, le câble témoin pendant la saison 1986-1987 et le câble Bersimis pendant la saison 1987-1988 et finalement proches de 1 % pour le câble de garde pendant la saison 1986-1987.

Les probabilités d'erreur concernant les variations sur des intervalles de temps d'une demi-heure sont trop élevées.

En accord avec les conclusions tirées de l'observation des histogrammes correspondant aux mesures du câble Bersimis pendant la saison 1985-1986, d'un câble du faisceau pendant la saison 1986-1987 et du câble témoin pendant la saison 1987-1988, on constate que les probabilités d'erreur sont très élevées, bien que correspondant à des valeurs-seuils

très grandes (entre 200 et 500 g/m). Par conséquent, ces trois ensembles de données doivent être considérés inutilisables pour l'obtention de résultats quantitatifs.

## CHAPITRE VI

### CAS REPRESENTATIFS DE CHAQUE MODE DE DELESTAGE

#### 6.1 Cas de délestage amorcé par fonte

Afin de présenter les caractéristiques fondamentales de la physique des délestages par fonte, on a isolé deux exemples typiques dans l'ensemble des données.

On rappelle qu'on peut classer le délestage par fonte en deux catégories. La première est caractérisée par une faible décroissance de la charge de glace, qui correspond à la simple fusion de la glace et à la chute de l'eau ainsi formée. La seconde catégorie est caractérisée par de forts taux de décroissance. Elle correspond à la chute de masses importantes de glace ayant perdu ses propriétés d'adhésion à la suite du phénomène de fusion à l'interface câble-glace. Les évènements de la première catégorie ne peuvent être détectés à cause du niveau élevé des perturbations aléatoires du signal, lesquelles ne permettent pas d'identifier un phénomène de faible décroissance et de courte durée.

Les figures 45 et 46 présentent deux cas de délestage par fonte à fort taux de décroissance. Ces deux cas ont été choisis pendant la même période s'étendant du 01 au 09 novembre 1987, les figures 45 et 46 correspondant respectivement au câble Bersimis et au câble de garde. Plus précisément, le phénomène s'est produit dans la journée du 03 novembre pour le câble Bersimis, et les 03 et 04 novembre pour le câble de garde, la température enregistrée pendant

ces journées étant nettement positive.

Dans le cas du câble Bersimis, le phénomène se produit sur une durée de 3 heures et le taux de décroissance est de 1,340 kg/m.h.

Dans le cas du câble de garde, le phénomène se décompose en deux phases. La première dure une heure et présente un taux de décroissance de 1,650 kg/m.h, et la seconde a une durée de quatre heures et un taux de décroissance de 0,900 kg/m.h.

Les taux de décroissance mentionnés ci-dessus peuvent être considérés comme significatifs. En effet, les valeurs-seuils des variations sont de l'ordre de 100 g/m pour le câble Bersimis avec un pourcentage d'erreur associé de l'ordre de 10 %, et de l'ordre de 80 g/m pour le câble de garde avec un pourcentage d'erreur associé inférieur à 5 %. Les variations totales sont donc nettement supérieures aux valeurs-seuils.

## 6.2 Cas de délestage par sublimation

Tel que mentionné dans la section 2, la sublimation est caractérisée par une faible décroissance de la charge de glace, se produisant à des températures négatives.

De façon pratique, pour identifier des phénomènes de sublimation, il faudra s'assurer qu'on étudie une période où la température reste négative, que la variation totale de la charge de glace est largement supérieure à la valeur-seuil et que le taux de décroissance de la charge de glace reste faible. Afin de vérifier les deux dernières conditions, il est nécessaire de ne s'intéresser qu'aux événements de sublimation s'étendant sur au moins deux jours consécutifs.

Les figures 47 à 50 présentent les effets, sur le câble Bersimis et le câble de garde, de trois périodes de

sublimation, toutes situées au mois de février 1987, soit du 01 au 03, du 17 au 19 et du 21 au 23. Pour la première période, la masse totale perdue est de l'ordre de 3 kg/m pour le câble Bersimis et de 1,5 kg/m pour le câble témoin. Pour la deuxième et la troisième période, on a seulement retenu le cas du câble Bersimis, car le dépôt de glace était négligeable sur le câble témoin à ces moments-là. Pour ces deux événements, la charge de glace perdue était de l'ordre de 2 kg/m.

Les périodes retenues ont été sélectionnées pour leur longue durée. De cette façon, bien que les taux de décroissance soient relativement faibles, les variations totales sont de l'ordre de plusieurs kilogrammes et sont donc largement supérieures aux seuils définis pour la saison 1986-1987 : pour le câble Bersimis 100 g/m (erreur d'ordre 10 %), pour le câble de garde 80 g/m (erreur d'ordre 5 %). Les températures enregistrées sont respectivement - 10 °C (figure 47), - 10 °C (figure 48), - 18 °C (figure 49) et - 12 °C (figure 50). Par conséquent, les exemples retenus vérifient bien les conditions énoncées pour le délestage par sublimation. Un modèle de lissage linéaire a été appliqué aux courbes de charge de glace pour les cas décrits ci-dessus. La faible dispersion enregistrée dans chaque cas démontre que le taux de décroissance est essentiellement constant durant ces périodes.

On constate sur les figures 48, 50 et 47 que les taux de décroissance (11, 28, et 52 g/m.h) augmentent avec la charge initiale de glace (3, 4, et 8 kg/m). Puisque, pour ces trois cas, la température est sensiblement la même, on peut conclure que ces résultats expérimentaux sont en accord avec le modèle de Lambrinos et al. (1987) donnant le taux de délestage comme une fonction croissante de la charge initiale.

En utilisant les trois figures précédentes, il est donc

possible d'estimer que, pour une charge initiale de 5 kg/m et une température de - 10 °C, le taux de décroissance devrait se situer entre 40 et 45 g/m.h. Or, pour une telle charge initiale, on constate qu'à - 18 °C, le taux de décroissance est égal à 27 g/m.h (figure 49). Ce résultat est également en accord avec le modèle de Lambrinos et al. qui prédit que le taux de décroissance de la glace diminue avec la température. Il faut enfin signaler que le taux d'humidité relative est un paramètre important dans le phénomène de sublimation. Cette valeur n'étant pas enregistrée par le système de mesure du Mont-Valin, les observations indiquées ci-dessus ne peuvent pas être considérées comme une validation définitive des résultats analytiques de Lambrinos et al.

### 6.3 Cas de délestage par bris mécanique de la glace

Un délestage par bris mécanique de la glace s'est produit le 24 décembre 1986. Il est le premier d'une série de phénomènes du même type qui sont présentés sur la figure 51. Les températures enregistrées les 24 et 25 décembre sont négatives, variant entre -11,4 et -8,4 °C, et le taux de décroissance est élevé, 0,255 kg/m.h. Il ne s'agit donc pas d'un délestage créé par la fonte, ni d'un délestage dû à la sublimation de la glace. Etant donnée la durée du phénomène, la valeur du taux de décroissance obtenue est significative. En effet, elle correspond à une variation totale de masse de 4,470 kg/m, alors que le seuil des variations pour le câble Bersimis durant la saison 1986-1987 est de l'ordre de 100 g/m, avec une probabilité d'erreur de l'ordre de 10 % pour un phénomène de durée supérieure à quatre heures (table 6).

## CHAPITRE VII

### ETUDE DU DELESTAGE PAR BRIS MECANIQUE DE LA GLACE

#### 7.1 Analyse statistique des délestages par bris mécanique de la glace

##### 7.1.1 Sélection des événements pertinents

Parmi les différents modes de délestage, le délestage par bris mécanique de la glace est à la fois le moins connu et le plus critique. En effet, les délestages par fonte et par sublimation sont essentiellement liés aux propriétés thermodynamiques de la glace telles que mises en évidence dans les laboratoires (Lambrinos et al., 1987). Le délestage par bris mécanique de la glace, par contre, est entièrement déterminé par les conditions naturelles: charge initiale de glace sur le câble, vent, température, structure de la glace, sur lesquelles l'information disponible est très limitée. D'autre part, beaucoup d'accidents survenant sur les lignes et câbles extérieurs sont dus à des délestages subits. Par exemple, lorsque de gros blocs de glace tombent des différents câbles d'une ligne ou de différentes parties d'un câble, de façon non-simultanée, un très grand déséquilibre des forces peut se produire, pouvant créer de sérieux dommages matériels aux pylônes. D'autre part, un délestage brusque et important peut provoquer un déplacement du conducteur suffisamment grand pour qu'il frappe le câble de garde ou un autre conducteur causant alors un court-circuit,

(S. Fuheng et H. Shixiong, 1988). Par conséquent, on concentrera l'analyse des données telles que validées par la méthode décrite précédemment, sur les périodes associées aux délestages par bris mécanique de la glace.

Afin d'identifier parmi toutes les périodes celles correspondant à des délestages par bris mécanique de la glace, on rappelle qu'on a défini ce type de délestage par un fort taux de décroissance de la charge de glace sur le câble se produisant à des températures négatives. Les observations effectuées sur les périodes de sublimation, voir section 6.2, ont montré que les taux de décroissance de la charge de glace se situent entre 0,020 et 0,060 kg/m.h. Dans des conditions plus favorables, telles qu'un faible taux d'humidité relative et un plus grand dépôt de glace, on peut s'attendre à obtenir des taux de décroissance plus élevés. On peut donc fixer, avec une bonne marge de sécurité, à 0,100 kg/m.h le taux de décroissance critique séparant le phénomène de sublimation de celui du bris mécanique de la glace.

Pour étudier statistiquement l'influence des conditions atmosphériques sur les délestages, c'est-à-dire sur les taux de décroissance de la charge de glace, il n'est pas possible de regrouper, dans un même échantillon, les cas de délestage correspondant à des câbles différents. En effet, un tel regroupement supposerait que les taux de délestage sont indépendants du type de câble. Une telle hypothèse n'est pas justifiée. Il faudra donc choisir un câble spécifique pour cette étude. D'autre part, plus la taille d'un échantillon est grande, plus les résultats statistiques sont fiables. On choisira donc le câble présentant le plus grand nombre de délestages du type étudié. On a d'abord identifié pour chaque câble, en se basant sur les données validées des trois saisons, les cas de délestage par bris mécanique de la glace. Ensuite, parmi les quatre types de câbles, on a sélectionné le câble Bersimis qui présentait le plus de cas du mode de

délestage étudié présentement. Ces différents délestages ont eu lieu aux dates suivantes:

- 24 décembre 1986 (figure 51, #1)
- 27 décembre 1986 (figure 51, #2)
- 30 décembre 1986 (figure 51, #3)
- 02 janvier 1987 (figure 51, #4)
- 22 janvier 1987 (figure 52)
- 30 janvier 1987 (figure 53, #1)
- 09 février 1987 (figure 53, #2)
- 27 février 1987 (figure 54)
- 07 décembre 1987 (figure 55)
- 15 décembre 1987 (figure 56)
- 31 décembre 1987 (figure 57)

Les huit premiers événements se sont produits pendant la saison hivernale 1986-1987. Les trois derniers événements ont eu lieu pendant la saison 1987-1988. Le fait que seulement trois délestages par bris mécanique de la glace se soient produits pendant cette saison s'explique par deux raisons: d'une part, les accumulations de glace ont été beaucoup moins importantes que lors de la saison précédente, (maximum de l'ordre de 8 kg/m comparativement à 19,8 kg/m en 1986-1987) et, d'autre part, la plupart des événements de givrage notables en 1987-1988 se sont terminés par un délestage par fonte. On rappelle que les données du câble Bersimis ne sont pas utilisables pour la saison 1985-1986.

#### 7.1.2 Description statistique des facteurs influençant le délestage

Les tables 11 à 21 présentent, pour chaque cas de délestage, les valeurs des statistiques descriptives

(moyenne, écart-type, minimum et maximum) concernant les conditions atmosphériques importantes, température et vitesse du vent, pendant les phases d'accumulation et de délestage de la glace. Il faut noter que les conditions atmosphériques ne concernent que la dernière couche de glace déposée sur le câble avant le délestage étudié. En effet, par phase d'accumulation, on réfère à la dernière période, précédant le délestage, où la glace s'est accumulée sur le câble. Le manchon de glace peut donc être formé de couches déposées antérieurement et correspondant à des conditions atmosphériques différentes.

Les valeurs présentées dans ces tables permettent de faire quelques remarques intéressantes.

En ce qui concerne les températures relevées lors de la phase d'accumulation, deux valeurs se situent dans l'intervalle  $-4^{\circ}\text{C}$  à  $-6^{\circ}\text{C}$ , six se trouvent dans l'intervalle  $-8^{\circ}\text{C}$  à  $-10^{\circ}\text{C}$  et trois sont inférieures à  $-13^{\circ}\text{C}$ . Les écarts-types sont en moyenne  $3^{\circ}\text{C}$ . Ils atteignent leurs plus grandes valeurs ( $4,9^{\circ}\text{C}$  et  $6,9^{\circ}\text{C}$ ) lorsque la température moyenne est très basse (inférieure à  $-13^{\circ}\text{C}$ ) et leurs plus petites valeurs (de l'ordre de  $1^{\circ}\text{C}$ ) lorsque la température moyenne est élevée ( $-4^{\circ}\text{C}$  à  $-6^{\circ}\text{C}$ ). Par conséquent, on peut conclure que les températures moyennes relevées traduisent bien les valeurs réelles de température auxquelles se produisent les accumulations de glace. On pourra donc se baser sur les températures moyennes d'accumulation, pour déterminer le type de glace accrétée.

Les valeurs se rapportant aux moyennes de la vitesse du vent perpendiculaire peuvent être réparties comme suit: deux sont inférieures à  $2 \text{ m/s}$  ( $7,2 \text{ km/h}$ ), sept sont dans l'intervalle  $2$  à  $4 \text{ m/s}$  ( $7,2$  à  $14,4 \text{ km/h}$ ), et deux sont supérieures à  $4 \text{ m/s}$  ( $14,4 \text{ km/h}$ ). Les écarts-types ont une valeur moyenne de  $1,31 \text{ m/s}$  ( $4,7 \text{ km/h}$ ), atteignant un maximum de  $1,89 \text{ m/s}$  ( $6,8 \text{ km/h}$ ) pour une vitesse moyenne de  $3,31 \text{ m/s}$ .

(11,9 km/h). Relativement aux valeurs moyennes, ces écarts-types sont un peu plus élevés que ceux relevés pour la température. Ceci exprime le fait que le vent varie plus que la température en fonction du temps. En fait, on devrait s'attendre à observer de plus grandes variations de la vitesse du vent, mais celles-ci sont pondérées par l'inertie de l'anémomètre et par l'utilisation de mesures moyennées de la vitesse du vent. Comme il a été décrit dans la section 1.2.2, la glace atmosphérique a été classée en différents types dont la formation dépend des conditions atmosphériques, et, en particulier, de la température et de la vitesse du vent (voir table 1, et figures 4 et 5). A partir de cette table, de ces figures et des données atmosphériques obtenues sur les phases d'accumulation correspondant aux onze délestages étudiés présentement, une estimation du type de glace accrétée a pu être réalisée pour chaque événement. Les valeurs relativement faibles des écarts-types concernant la température et la vitesse du vent permettent de supposer qu'un seul type de glace est formé lors d'une période d'accrétion. Comme on l'a remarqué précédemment, la phase d'accumulation ne réfère qu'à la dernière période d'accumulation et par conséquent le type de glace trouvé ne concerne que la dernière couche déposée sur le câble. La figure 58 montre les conditions atmosphériques de formation de la glace accumulée, et la table 22 présente les différents types de glace trouvés. La température et la vitesse du vent concernent les valeurs déterminées pendant la phase d'accumulation.

On constate que la glace accumulée au Mt-Valin se classe pour chaque événement dans la catégorie du givre léger. La figure 59 présente une photographie prise au Mt-Valin, le 18 décembre 1986, montrant qu'effectivement le givre déposé est du type léger.

En ce qui concerne la température et la vitesse du vent perpendiculaire lors de la phase de délestage, on observe des écarts-types encore plus faibles, 1,8 °C et 1,24 m/s (4,46 km/h) respectivement pour des moyennes de -12,17 °C et 3,44 m/s (12,38 km/h). En comparant les températures moyennes enregistrées pendant les périodes d'accrétion à celles relevées pendant les périodes de délestage, on constate que neuf fois sur onze, les températures sont plus basses pendant la phase de délestage. La même comparaison effectuée en ce qui concerne la vitesse du vent montre que, cinq fois sur onze, les valeurs sont plus élevées pendant la période d'accrétion.

La table 23 présente, pour chacun des onze événements étudiés, les valeurs moyennes de température et de vitesse du vent perpendiculaire pour les phases d'accrétion et de délestage, notées respectivement  $T_a$ ,  $T_d$ ,  $V_a$ ,  $V_d$ , ainsi que la charge de glace,  $P$ , relevée sur le câble Bersimis avant le début du délestage, la durée et le taux de décroissance du délestage.

La durée de la phase de délestage est très variable, de six heures trente minutes à soixante heures, pour une valeur moyenne de près de 24 heures et un écart-type d'environ 16 heures. La valeur de la charge de glace sur le câble avant le délestage varie aussi de façon significative, puisqu'elle présente un écart-type d'environ 6 kg/m pour une moyenne de 10,40 kg/m. Le taux de décroissance de la charge de glace varie de 0,097 à 0,658 kg/m.h. On remarque que le cas du délestage du 27 décembre 1986 avec un taux de 0,097 kg/m.h a été retenu, bien que le taux critique minimum du délestage par bris mécanique de la glace ait été fixé à 0,100 kg/m.h. Il faut tout d'abord rappeler que le seuil de 0,100 kg/m.h a été choisi de façon assez arbitraire (voir section 7.1.1). Une différence de 0,003 kg/m.h par défaut peut donc être

considérée comme négligeable. D'autre part, le délestage du 27 décembre 1986 se produit au cours d'un évènement de givrage qui s'étend du 23 décembre 1986 au 4 janvier 1987 et qui comporte une succession d'accumulations et de délestages alternés. Or les trois autres délestages survenant pendant cette période, soit ceux des 24 et 30 décembre 1986 ainsi que celui du 2 janvier 1987 présentent des taux de décroissance suffisamment élevés, 0,255, 0,142 et 0,128 kg/m.h respectivement, pour que leur type de délestage soit clairement identifié comme étant celui du bris mécanique de la glace. Il est donc très improbable que les conditions atmosphériques, et en particulier le taux d'humidité qui devrait devenir très bas dans le cas de la sublimation, soient subitement différents le 27 décembre, au point qu'un taux de décroissance de 0,097 kg/m soit attribuable à la sublimation. C'est pourquoi le délestage du 27 décembre 1986 est considéré comme un délestage par bris mécanique de la glace.

La valeur moyenne des taux de décroissance est de près de 0,200 kg/m.h et l'écart-type est d'environ 0,160 kg/m.h. La quantité de glace délestée est donc très variable. Une modélisation statistique multilinéaire basée sur les données rassemblées dans la table 23 permettra de déterminer les facteurs les plus influents sur la valeur du taux de décroissance de la charge de glace. Dans cette étude, on a exclus la colonne des données correspondant à la durée du délestage puisque celle-ci, tout comme le taux de décroissance, est une caractéristique du délestage et non pas un facteur susceptible de l'influencer.

#### 7.1.3 Classification des facteurs influençant le délestage

Lorsqu'on veut étudier l'influence d'un évènement Y sur un évènement X, on utilise souvent la régression linéaire. Grâce au coefficient de corrélation simple,  $r$ , on peut quantifier cette influence.

$$r = (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})) / (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)^{1/2}$$

où  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  représentent les moyennes des valeurs  $x_i$  et  $y_i$ , pour  $i = 1, \dots, n$ , prises par les évènements X et Y, et  $n$  est le nombre d'observations de chaque évènement.

Lorsqu'on s'intéresse à l'influence de plusieurs évènements  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  sur un évènement X, on utilise la régression linéaire multiple. L'influence respective des divers facteurs peut alors être quantifiée par le coefficient de corrélation multiple ou coefficient de détermination,  $R^2$ .

$$R^2 = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \right)$$

où  $n$  est le nombre d'observations

$$B = (Y'Y)^{-1} Y'X$$

X est le vecteur dont les composantes sont les observations  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  et Y est la matrice dont les colonnes sont formées par les composantes des vecteurs  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ , soit les observations  $y_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

La notation  $(\cdot)'$  est utilisée pour indiquer la transposée d'un vecteur.

Dans notre cas, l'évènement X étudié est le taux de délestage et les facteurs Y, susceptibles de l'influencer sont au nombre de cinq:

- Y<sub>1</sub>: Température durant la période d'accumulation.
- Y<sub>2</sub>: Température durant la période de délestage.
- Y<sub>3</sub>: Vitesse du vent perpendiculaire durant la période d'accumulation.
- Y<sub>4</sub>: Vitesse du vent perpendiculaire durant la période de délestage.
- Y<sub>5</sub>: Charge de glace supportée par le câble avant le délestage.

La table 24 présente les résultats de la régression linéaire multiple, obtenus en utilisant les sous-routines CORVC et RBEST du logiciel IMSL. En se basant sur les valeurs prises par le coefficient de corrélation multiple, on peut faire plusieurs remarques:

1. Le facteur le plus important est le vent observé pendant la phase de délestage (Y<sub>4</sub>), puisque le coefficient R<sup>2</sup> qui lui est associé atteint 44,64 %, montrant ainsi que ce facteur influence fortement le délestage.
2. Le second facteur entrant dans le modèle de régression est celui correspondant à la charge de glace accrétée avant le délestage. Ce facteur permet au coefficient de détermination R<sup>2</sup> d'augmenter de 17,91 %, atteignant ainsi 62,55 %.
3. Les troisième et quatrième facteurs entrant dans le modèle sont la température durant la période de délestage, puis la température durant la période d'accrétion, augmentant respectivement le coefficient R<sup>2</sup> de 10,04 % et 3,89 %.
4. La vitesse du vent pendant la phase d'accumulation

est le cinquième et dernier facteur à entrer dans le modèle, bien qu'il augmente le coefficient  $R^2$  de 6,07 %. Le fait que ce facteur soit classé en dernière position est probablement dû à la corrélation significative qui prévaut entre les vitesses du vent pendant la phase d'accumulation et celle de délestage (-66,80 %).

L'importance du vent pendant la période de délestage est considérable puisque la vitesse du vent pendant cette période est responsable de plus de la moitié de la valeur du coefficient de corrélation multiple  $R^2$ . La force aérodynamique étant une fonction quadratique de la vitesse du vent, on pourrait utiliser, dans le modèle statistique, le carré de la vitesse du vent plutôt que la vitesse elle-même. Quantitativement l'importance relative du facteur vent serait sans doute un peu augmentée, mais qualitativement l'influence relative des facteurs étudiés ne devrait pas être modifiée. La force aérodynamique du vent variant en fonction de la surface sur laquelle elle s'exerce, pour une densité constante, plus la charge de glace est élevée, plus la surface sera grande et plus la force exercée par le vent sera grande. Si le vent est effectivement le facteur primordial responsable du délestage, la charge de glace devrait être aussi un facteur important. Effectivement, la charge de glace s'est classée en deuxième position. On peut constater que les conditions atmosphériques pendant la période d'accumulation et, par conséquent le type de glace, affectent moins le délestage que les conditions observées pendant la phase de délestage. Il serait néanmoins hasardeux d'en conclure que le type de glace a peu d'influence sur le délestage. En effet, l'entrée des conditions de formation dans le modèle permet au coefficient de corrélation multilinéaire d'augmenter de près de 10 %, ce qui n'est pas négligeable. D'autre part, on a vu

dans la section 7.1.2, que le type de glace formé était du givre léger dans tous les cas de notre étude. Bien qu'on puisse s'attendre à des variations de la densité de la glace selon les cas, celles-ci ne sont pas suffisamment importantes pour avoir une bonne idée de l'influence du type de glace sur le délestage.

## 7.2. Mécanismes de rupture du dépôt de glace possibles

Les mécanismes de rupture possibles sont très variés. Il peut s'agir d'une perte d'adhésion du dépôt de glace par rapport au câble ou de fracture à l'intérieur de la glace. Ces phénomènes peuvent être provoqués par des charges statiques, des charges dynamiques ou par des mouvements importants qui en résultent. Certains facteurs peuvent influencer fortement le mécanisme de délestage par bris mécanique de la glace, en particulier l'effet de la torsion du câble sous le poids de l'accumulation, ainsi que les particularités du givre léger qui, tout en étant moins résistant, offre plus de prise au vent.

## 7.3 Mécanismes de rupture du dépôt de glace étudiés

### **7.3.1 Description des mécanismes étudiés**

On peut toutefois essayer de déterminer quels mécanismes peuvent intervenir dans le cas des délestages par bris mécanique de la glace au cours des périodes étudiées dans la section 7.1. Ces mécanismes, brièvement décrits dans la section 7.2, sont nombreux, complexes, peu étudiés et mal connus. On se restreindra donc à l'étude de quelques uns d'entre eux seulement, et ce, en se basant sur des hypothèses

simples. Malgré l'importance des phénomènes dynamiques (vibrations, galop, etc...), on se limitera à l'étude des phénomènes statiques. On ne tiendra pas compte non plus, dans la suite, de l'effet de torsion, bien que ce phénomène puisse avoir une certaine influence sur ce type de délestage. En effet, dans l'état actuel des connaissances sur la rhéologie du type de glace intervenant dans la formation des manchons, il n'est pas possible d'estimer dans quelle mesure la glace reprend une partie de la torsion imposée à une section donnée du câble givré. Par conséquent, dans la suite de cette étude, on ne prendra pas en considération l'effet de torsion. Etant donné que la géométrie des manchons réels n'est pas connue de façon exacte, on reprendra les modèles circulaire et elliptique tels que décrits précédemment, ou légèrement modifiés. Malgré ce manque d'informations sur la géométrie des manchons, on tentera d'estimer les efforts et contraintes appliqués au câble, afin d'obtenir un ordre de grandeur de ces différents phénomènes.

La rupture du dépôt de glace peut être due:

1. à une perte d'adhésion entre le câble et le dépôt de glace.
2. à une fracture à l'intérieur du dépôt de glace.

Le premier cas se produit lorsque les contraintes normale et tangentielle à la surface d'adhésion dépassent les valeurs limites qui dépendent de la nature de la surface du substrat et du type de glace. Le deuxième cas se produit lorsque les contraintes normale et tangentielle en un point à l'intérieur du dépôt dépassent les valeurs limites qui, cette fois, ne dépendent que du type de glace.

Dans le cadre de ce travail, seules les valeurs

positives des contraintes normales nous intéressent, soit les contraintes en tension et, en ce qui concerne les contraintes tangentialles, on se limitera à l'étude des contraintes en cisaillement. Essentiellement, on ne dispose de valeurs expérimentales que dans les cas du givre dur et du verglas. En ce qui concerne la rhéologie interne de la structure de la glace, diverses études ( B. Michel, 1978; J. Druez et al., 1989 ), donnent des valeurs limites, en tension et en cisaillement, qui varient entre 1 et 3 MPa selon le type de rupture (fragile ou ductile). En ce qui concerne l'adhésion sur l'aluminium, les travaux de J. Druez et al. (1985) permettent d'estimer la contrainte limite de tension en adhésion entre 50 et 200 kPa. D'autre part, les études de J. Druez et al. (1984 et 1986) donnent les valeurs limites, pour les contraintes de cisaillement en adhésion, variant entre 50 et 120 kPa. Les propriétés mécaniques du givre léger étant plus faibles que celles du givre lourd, les valeurs données ci-dessus représentent donc une valeur supérieure.

Etant donnée la géométrie assez compacte des dépôts de glace sur les câbles, les valeurs des contraintes sur les surfaces d'adhésion et à l'intérieur du dépôt sont du même ordre de grandeur. D'autre part, d'après les résultats expérimentaux mentionnés ci-dessus, généralisés à tous les types de glace, les limites en adhésion sont largement inférieures aux limites de la structure cristalline interne. On peut donc conclure que, dans le cas des dépôts de glace sur câble d'aluminium toronné, la rupture s'effectue d'abord en adhésion. Dans le cas des manchons de forme elliptique, la perte d'adhésion suffira à provoquer le délestage. Dans le cas des manchons circulaires, la perte d'adhésion devra être suivie d'une rupture interne de la structure cristalline occasionnant des fractures suffisantes pour que le dépôt se détache.

### 7.3.2 Estimation des contraintes en adhésion

Le délestage étant amorcé par la rupture en adhésion, il faut déterminer les paramètres liant les efforts appliqués aux dépôts de glace à la contrainte en adhésion.

L'estimation des contraintes en adhésion, normale et tangentielle, sera simplifiée de la façon suivante. On limitera l'étude de la contrainte normale,  $\sigma$ , à l'action de l'effort normal,  $\vec{F}_N$ , en traction, et celle de la contrainte en cisaillement,  $\tau$ , à l'action de l'effort tranchant,  $\vec{F}_T$ .

La nature des efforts normal et tranchant varie selon la forme et la position du manchon. Ainsi, dans le cas d'un manchon elliptique parfaitement horizontal, lorsque le vent est dans le sens opposé à celui du vent de formation, l'effort normal en traction sera uniquement dû à la force de trainée aérodynamique,  $\vec{F}_D$ , et l'effort tranchant sera dû au poids de la glace,  $\vec{P}$ , seulement, car le coefficient de portance dû au vent sera nul comme dans le cas d'un cylindre circulaire (figure 60). Ce phénomène se produit souvent au Mt-Valin, les accumulations correspondent généralement à des vents d'est, le vent tournant par la suite dans la direction ouest, qui est la direction des vents dominants. Dans le cas d'un manchon elliptique en position inclinée par rapport à l'axe horizontal, la force résultante  $\vec{F}_R$  sera composée de la force de trainée  $\vec{F}_D$  d'une part, et de la force de portance  $\vec{F}_L$  et du poids de glace  $\vec{P}$  d'autre part (figure 61). Les efforts normal et tranchant,  $\vec{F}_N$  et  $\vec{F}_T$ , qui sont en fait les projections respectives de  $\vec{F}_R$  sur le grand axe et le petit axe de l'ellipse, sont donc dus aux trois forces,  $\vec{F}_D$ ,  $\vec{F}_L$  et  $\vec{P}$ .

On peut évaluer la contrainte normale due à  $\vec{F}_N$ ,  $\sigma$ , par la formule générale :

$$\tau = F_N / A$$

où  $A = p l$

$p$  périmètre d'adhésion (figure 60)  
 $l$  longueur du dépôt.

En définissant le coefficient d'adhésion de la façon suivante:

$$c_a = p / R$$

où  $R$  est le rayon du câble, on peut estimer  $\tau$  par:

$$\tau = f_N / (c_a R) \quad (7.3.1)$$

où  $f_N = F_N / l$  : force normale par unité de longueur.

On peut évaluer la contrainte en cisaillement due à  $\vec{F}_T$ ,  $\zeta$ , en établissant l'équilibre des moments du système câble-dépôt de glace.

Le moment induit par la force  $\vec{F}_T$ , appliquée à un manchon d'épaisseur  $h$  est:

$$M_1 = F_T h/2$$

La force appliquée au câble est  $\zeta A$ . Le moment induit sur le câble est donc:

$$M_2 = \zeta A R$$

Si on suppose que le câble est fixe, on aura:

$$M_1 = M_2$$

donc

$$C = F_T \cdot h / (2\pi R)$$

On définit le coefficient d'épaisseur du dépôt,  $c_h$ , par:

$$c_h = h / R ,$$

ce qui permet d'estimer par:

$$C = (c_h / (2Rc_a)) \cdot f_T \quad (7.3.2)$$

où  $f_T = F_T / l$  : force tranchante par unité de longueur.

Les estimations des contraintes données par les formules 7.3.1 et 7.3.2 permettent de mettre en évidence le rôle de la géométrie du dépôt sur l'ordre de grandeur des contraintes. Cette géométrie est, ici, caractérisée par les coefficients d'adhésion et d'épaisseur,  $c_a$  et  $c_h$ , qui interviennent comme facteurs multiplicatifs des efforts normal et tranchant. Afin de donner une idée de l'ordre de grandeur de ces coefficients, on présente, dans la table 25, quelques valeurs de référence du coefficient d'épaisseur. Ces valeurs correspondant au câble Bersimis, pour une configuration de manchon elliptique théorique telle que définie sur la figure 11, représentent donc des cas limites. Le coefficient d'épaisseur,  $c_h$ , peut être calculé à partir de l'épaisseur  $h$  évaluée par la formule 1.3.3., soit

$$h = (4C) / (\rho_a \pi D_o)$$

La valeur du coefficient d'adhésion dépend principalement du périmètre d'adhésion. Celui-ci est difficile à estimer puisque la surface d'adhésion réelle du manchon au câble n'est pas connue. En première approximation, on prendra comme référence la surface correspondant au demi-périmètre du câble soit  $\pi R$  (figures 60 et 61). D'autre part, dans le cas d'un câble toronné, la surface d'adhésion est environ le double de celle d'un câble lisse. Par conséquent, on peut estimer à  $2\pi R$ , l'ordre de grandeur du périmètre d'adhésion, et donc à  $2\pi$  celui du coefficient d'adhésion  $c_a$ .

L'évaluation des efforts normal et tranchant, telle que réalisée dans le cas elliptique, ne convient pas dans le cas du manchon circulaire car une part importante de la charge de glace provoque des contraintes en compression sur une partie de la surface d'adhésion. En effet, dans le cas du manchon circulaire, deux forces agissent principalement sur le câble, soit le poids de glace,  $\vec{P}$ , et la force de trainée,  $\vec{F}_D$ , due au vent, qui se combinent pour former la force résultante  $\vec{F}_R$  (figure 62). La force de portance est négligeable puisque le coefficient de portance est nul dans le cas d'un cylindre parfaitement circulaire. En première approximation, on peut considérer qu'une moitié du manchon circulaire agit sur la surface d'adhésion en compression, et que l'autre moitié agit en traction. Pour obtenir un ordre de grandeur des contraintes, on pourra estimer que la moitié de la force résultante, soit  $F_R/2$ , exerce un effort normal en traction sur la moitié de la surface d'adhésion, soit  $\pi R/2$ .

On aura donc :

$$\sigma = F_R / (\pi R)$$

ou

$$\sigma = f_R / (c_a R)$$

où  $f_R = F_R / l$  : force résultante par unité de longueur.

Le coefficient  $c_a$  peut être estimé de la façon suivante. Puisque le câble est toronné, le périmètre d'adhésion est égal à deux fois celui du câble, soit  $4\pi R$ . Par conséquent, le coefficient d'adhésion sera estimé par  $4\pi$ .

Un raisonnement similaire, basé sur la répartition des efforts en compression et en adhésion, permet de dire que les contraintes en cisaillement seront du même ordre que les contraintes normales.

Il faut cependant remarquer que les formules d'estimation des contraintes obtenues dans le cas du manchon circulaire sont plus grossières que celles dérivées dans le cas du manchon elliptique. Néanmoins, elles devraient être suffisamment réalistes pour donner un ordre de grandeur des contraintes.

### 7.3.3 Essai d'interprétation de la classification des facteurs influençant le délestage

Grâce aux formules développées à la section précédente, il est maintenant possible de calculer des contraintes en adhésion, normale et tangentielle, pour les charges et efforts aérodynamiques existant lors des événements de délestage par bris mécanique de la glace sélectionnés à la section 7.1. Pour ce faire, on étudiera deux cas, celui du manchon elliptique légèrement incliné et celui du manchon circulaire, relativement à trois événements typiques de délestage par bris mécanique de la glace.

Dans le cas d'un manchon elliptique incliné, si l'angle

formé par le grand axe de l'ellipse et l'axe horizontal est petit, on pourra considérer que l'effort tranchant correspond à la charge de glace à laquelle s'ajoute ou se retranche la portance selon la direction du vent, et, l'effort normal à la trainée (figure 61). On peut donc estimer la contrainte en cisaillement par:

$$\mathcal{C} = (c_h/(2c_s)) (g/R) (C \pm (f_L/g))$$

et la contrainte normale par:

$$\mathcal{N} = (f_D/g) / (c_s R/g)$$

On remarque que la trainée provoque une traction de la surface d'adhésion seulement dans le cas du manchon elliptique soumis à un vent venant de la direction opposée à celle du dépôt. Dans la table 26, on donne les valeurs de  $\mathcal{N}$  et  $\mathcal{C}$  correspondant à trois cas typiques de délestage par bris mécanique de la glace survenus respectivement le 24 décembre 1986, le 22 janvier 1987 et le 27 février 1987. Les calculs des forces de trainée et de portance ont été réalisés avec les coefficients de trainée et de portance déterminés à la section 2.6, soit  $c_D = 0,99$  et  $c_L = 0,2$ . Le calcul de  $\mathcal{C}$  a été effectué en ajoutant la portance à la charge de glace.

On peut tout d'abord remarquer que la contrainte due à la trainée,  $\mathcal{N}$ , est négligeable. C'est donc essentiellement la contrainte de cisaillement,  $\mathcal{C}$ , qui crée une action significative sur la surface d'adhésion. Deuxièmement, les valeurs de contraintes obtenues sont de l'ordre de plusieurs kPa, ce qui peut effectivement correspondre à des valeurs limites pour l'adhésion, compte tenu des propriétés connues pour le givre dur, voir section 7.1. Il faut cependant

remarquer qu'on n'a pas tenu compte de l'effet d'obstacle des torons. Ceci pourrait augmenter significativement la valeur limite de résistance au décollement au point d'être comparable à la valeur limite de rupture cohésive, surtout en considérant l'effet des concentrations de contrainte des torons.

Dans le cas d'un manchon circulaire, on a établi dans la section précédente, que les contraintes normale et tangentielle sont du même ordre de grandeur et que:

$$C \approx \sigma = f_R / (c_a R)$$

où  $f_R = g (C^2 + (f_D/g)^2)^{1/2}$

et  $c_a = 4\pi$ .

Les résultats de la table 27 montrent que la contribution aérodynamique est négligeable et que les valeurs de contraintes tangentielles obtenues pour les trois événements considérés, soit 0,58, 0,75 et 0,13 kPa respectivement, peuvent être de 20 à 150 fois inférieures à celles calculées sous l'hypothèse du manchon elliptique, soit 63,20, 110,32 et 3,10 kPa respectivement. En conséquence, on peut estimer que les événements de délestage sélectionnés correspondent soit à des cas de manchons elliptiques présentant une couche adhésive de givre assez dure, soit à des cas de manchons circulaires présentant une couche adhésive de givre assez léger. Cependant, on verra dans ce qui suit, que la prépondérance du facteur vent dans le phénomène de délestage rend peu probable l'hypothèse du manchon circulaire.

A l'aide du développement ci-dessus, on peut tenter d'analyser l'importance relative des facteurs influençant le délestage tels qu'obtenus par l'analyse statistique de la

section 7.1. Tout d'abord, l'importance de la valeur absolue de la charge apparaît immédiatement puisque c'est elle qui donne l'ordre de grandeur des efforts sur la surface d'adhésion. Cependant, un examen de la table 26 montre que les efforts aérodynamiques, trainée ou portance, n'altèrent pas de façon significative les efforts sur la surface d'adhésion. En conséquence, la prédominance du facteur vent telle qu'elle apparaît dans l'analyse statistique, ne semble pas être directement justifiée. Cependant, l'importance du vent au niveau de la distribution statique des contraintes pourrait se faire sentir dans le cas d'une forte portance négative du dépôt. Une telle possibilité n'existe évidemment que dans le cas d'un manchon elliptique et d'un vent faisant face au manchon, la portance étant essentiellement nulle pour un manchon circulaire et positive lorsque la direction du vent est opposée à celle du vent de formation. La rotation du câble augmente au centre de portée et peut conduire à la formation d'un manchon circulaire, alors qu'aux extrémités du câble les manchons seront de forme elliptique. Ceci peut expliquer les observations montrant que les délestages se produisent de préférence aux extrémités. D'après les valeurs numériques de la table 26 la portance devient significative par rapport à la charge (de l'ordre de 10% et plus), pour des valeurs du coefficient de portance de l'ordre de 1. (On rappelle qu'on a utilisé une valeur de 0,2 pour les calculs de la table 26). Selon les études expérimentales de L. T. Koutselos et M. J. Tunstall (1988), ceci n'est possible que dans le cas d'un manchon elliptique dont le grand axe est incliné de plus de 10° (et moins de 20°) par rapport à l'axe horizontal. Le manchon elliptique étant approximativement horizontal de par son mécanisme de formation, il doit donc être basculé sous l'effet du vent au moment du délestage afin de créer une portance négative significative. Le mécanisme décrit précédemment peut s'appliquer aussi lorsque la

direction du vent est opposée à celle du vent de formation, créant ainsi une force de portance positive. Dans les deux cas, le mécanisme conduit à un mouvement du câble qui pourrait entraîner un phénomène dynamique suffisamment important pour provoquer des délestages, la rupture pouvant être adhésive ou cohésive.

Enfin l'influence relative des autres facteurs sur le délestage par bris mécanique de la glace: température lors du délestage, température de formation, et vitesse du vent de formation, s'interprètent de par leur relation avec la rhéologie et la géométrie du dépôt, voir section 1.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Au cours de ce travail, on a décrit les conditions expérimentales d'essai de la station d'étude de câbles givrés du Mont-Valin (Québec). La problématique de l'utilisation des signaux correspondants à des mesures périodiques en site naturel éloigné a été résolue par une analyse statistique des variations aléatoires engendrées par le fonctionnement de l'ensemble de l'instrumentation. La méthode retenue a été la définition d'un seuil minimum pour les variations de la charge de glace en-deçà duquel les valeurs doivent être écartées. La pertinence du choix du seuil et du niveau de confiance qui lui est associé a été évaluée par l'estimation obtenue en utilisant cette méthode de traitement des données. Les valeurs de seuil obtenues varient entre 20 g/m et 500 g/m (pour des niveaux de confiance de 99 % généralement). Les probabilités d'erreur qu'il faut prévoir, en retenant les variations de charge plus grandes que le seuil, ont été évaluées à 10 %.

Des exemples des divers modes de délestage de glace ont été donnés et les taux de croissance calculés ont été validés par l'étude antérieure. Des exemples du délestage par fonte, caractérisé par des températures positives, ont montré des taux de décroissance de 1 à 2 kg/m.h sur des périodes de quelques heures. Des exemples de délestage par sublimation ont montré des taux de décroissance variant entre 10 et 50 g/m.h sur des périodes de plusieurs journées. Enfin, des exemples de délestage mécanique ont montré une large variété de taux de décroissance. Ces derniers peuvent être de l'ordre de 500 g/m.h sur une période de quelques heures. On a étudié de façon plus détaillée le cas du délestage par bris

mécanique de la glace. Une analyse statistique d'une série d'événements sélectionnés par une méthode objective a mis en évidence l'importance des facteurs influençant le délestage dans le cas de manchons de givre léger. Il s'agit, dans l'ordre, de la vitesse du vent, de la charge de glace et des conditions de formation du dépôt. Une hypothèse de mécanisme de rupture basée sur le dépassement des contraintes en adhésion a permis d'interpréter ces résultats statistiques.

Les limites d'utilisation des données ainsi que les méthodes d'identification des phénomènes ont été dégagées par cette étude. On dispose donc, maintenant, d'une méthode pour le traitement des données futures. Enfin, il serait utile de compléter les mesures météorologiques effectuées sur le site (humidité relative, radiation solaire, turbulence, etc....). On pourrait ainsi corrélérer les évolutions de la charge de glace avec les paramètres atmosphériques, ce qui devrait permettre une meilleure compréhension des mécanismes physiques déterminant les différentes phases d'accumulation et de délestage. Un élargissement de la base de données, obtenu grâce à la continuation de ce programme de mesures, devrait d'abord permettre d'améliorer la validité statistique des résultats, ensuite de préciser l'importance relative des facteurs mis en évidence et enfin de compléter l'analyse pour des situations météorologiques non couvertes par les saisons étudiées dans ce travail.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 Csomor, M., Rezsofi, F., (1988), 'Analysis of the meteorological process of ice depositions on transmission line conductors', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 104-108.
- 2 Druez, J., Laforte, J.-L., Tremblay, C., (1989), 'Experimental Results on the Tensile Strength of Atmospheric Ice', Eighth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The Hague, 19-23 March, 1989, Vol. IV, pp. 405-410.
- 3 Druez, J., Mc Comber, P., Félin, B., (1988), 'Icing rate measurements made for different configurations on an icing test line at Mt-Valin', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 124-128.
- 4 Druez, J., (1988), 'Etude de givrage au Mont -Valin', Rapport préparé pour Hydro-Québec, Montréal (Québec), contrat # HO 925 887, Novembre 1988, 172 p.
- 5 Druez, J., Mc Comber, P. (1987), 'Etude de givrage au Mont-Valin', Rapport préparé pour Hydro-Québec, Montréal (Québec), contrat # HO 924 345, septembre 1987, 174 p.
- 6 Druez, J., Nguyen, D.D., Lavoie, Y., (1986), 'Mechanical Properties of Atmospheric Ice', Cold

Regions Science and Technology J., Vol. 13, pp. 67-74.

- 7 Druez, J., Mc Comber, P., Bouchard, J.-P., Desbiens, B., (1985), 'Adhésion de la Glace Atmosphérique sur une Plaque d'Aluminium avec et sans Peinture Protectrice', Rapport 85-07-01 préparé pour Radio-Québec, Montréal (Québec), Juillet 1985, 15 p.
- 8 Druez, J., Laforte, J.-L., Nguyen, D.D., (1987), 'Mechanical Properties of Atmospheric Ice', Proceedings of the Second International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Trondheim, Norway, EFI Technical Report 3439, june 1987.
- 9 Finstadt, K., Fikke, S., Ervik, M. (1988), 'A Comprehensive Deterministic Model for Transmission Line Icing Applied to Laboratory and Field Observations', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 227-231.
- 10 Flocchini, G., Palau, C., Nicolini, P., Tavano, F., (1988), 'Analysis of ice overload on single and bundled conductors', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 99-103.
- 11 Fuheng, S., Shixiong, H., (1988), 'Icing on overhead transmission lines in cold mountainous districts of Southwest China and its protection', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 354-357.
- 12 Govanni, J.W., Ackley, S.F., (1983), 'Field

- measurements of combined Icing and Wind Loads on Wires', Proceedings of First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, CRREL Special Report 83-17, pp. 205-215.
- 13 Koutselos, L.T., Tunstall, M.J., (1988), 'Collection and Reproduction of Natural Ice Shapes on Overhead Line Conductors and Measurement of their Aerodynamic Characteristics', Research Report for the Central Electricity Generating Board, pp. 18-52.
- 14 Kuroiwa, D., (1958), 'Icing and Snow Accretion', Monograph Series of the Research Institute of Applied Electricity #6, 30 p.
- 15 Kuroiwa, D., (1965), 'Icing and Snow Accretion on Electric Wires', Research Report # 123 prepared for the Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, 10 p.
- 16 Laforte, J.-L., Phan, L. C., 'Détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des dépôts de givre et de verglas', Rapport préparé pour Hydro-Québec, Montréal (Québec), février 1981, 180 p.
- 17 Lambrinos, G., Aguirre-Fuente, J., Sakly, M., (1987), 'Experimental research on the sublimation of ice samples', Annales geophysicae, 1987, 58, pp. 589-594.
- 18 Lozowski, E. P., Gayet, J.-F., (1988), 'The Atmospheric Icing: a Review', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 1-6.

- 19 Makkonen, L., (1987), 'A Model of Icicle Growth', *Journal of Glaciology*, vol. 34, pp. 64-70.
- 20 McComber, P., Govonni, J.W., (1985), 'An Analysis of Selected Ice Accretion Measurements on a Wire at Mt Washington', *Proceedings of the Forty-Second Eastern Snow Conference*, pp. 34-43.
- 21 McComber, P., Druez, J., Gagnon, J., (1986), 'Etude de givrage au Mont Valin', Rapport préparé pour Hydro-Québec, Montréal (Québec), contrat # HO 922 404, Septembre 1986, 59 p.
- 22 McComber, P., Druez, J., Bouchard, D., Falgueyret, A., (1987), 'Atmospheric Icing Load Measurements on a Cable Using the End Tension', *Cold Regions Science and Technology J.*, Vol. 13, pp. 131-141.
- 23 McComber, P., (1984), 'Numerical Simulation of Cable Twisting due to Icing', *Cold Regions Science and Technology J.*, Vol. 8, pp. 253-259.
- 24 McComber, P., Morin, G., Martin, R., Luong V. V., (1983) 'Estimation of Combined Ice and Wind Load on Overhead Transmission Lines', *Cold Regions Science and Technology J.*, Vol. 6, pp. 195-206.
- 25 Michel, B., (1978), 'Ice Mechanics', Les Presses de l'Université Laval, Québec, 499 p.
- 26 Personne, P., Gayet, J.F., (1986), 'Experimental Studies of Ice Accretion on Rotating Wires in an Instrumented Wind Tunnel', *Third Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Vancouver, Canada.

- 27 White, F. M., 'Fluid Mechanics', (1979), Mc Graw-Hill Book Company, pp. 434.
- 28 Yano, K., (1988), 'Studies of icing and ice snow accretion in Mt-Zao', Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique des structures, Paris, 5-7 sept. 1988, pp. 109-113.

## ANNEXE A

## TABLES

TABLE 1 : CARACTERISTIQUES DES TYPES DE GLACE

Type	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Conditions de formation	
		Temp. (C)	Vit. Vent (m/s)
verglas	0,8 à 0,9	0 à -3	1 à 20
givre dur	0,6 à 0,8	-3 à -15	5 à 20
givre léger	inf. à 0,6	-5 à -25	0 à 20

TABLE 2 : CARACTERISTIQUES DES CABLES

Câbles	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Poids (kg/m)
Témoin	7,93	32,62	0,336
Faisceau	35 (x 4)	99,38	8,726
Bersimis	35	98,11	2,183
Garde	12,5	97,76	0,761

TABLE 3 : CARACTERISTIQUES DES CELLULES DE CHARGE

Câble	Capacité (N)	Précision (g/m)	Saison d'utilisation
Témoin	4454	50	1985-1986
	8907	100	1986-1987, 1987-1988
Faisceau	222687	150	1986-1987
	222687	200	1987-1988
Bersimis	44537	30	1985-1986, 1986-1987 1987-1988
	44537	30	1985-1986, 1986-1987 1987-1988
Garde	44537	30	1985-1986, 1986-1987 1987-1988

TABLE 4 : VALEURS DU COEFFICIENT K

Câble	Coefficient K (mv/N)	Saison
Témoin	0,15	1985-1986, 1986-1987
	0,31	1987-1988
Faisceau	- 4,18	1986-1987
	8,36	1987-1988 (jusq. 28/01/88)
	- 4,18	1987-1988 (depuis 28/01/88)
Bersimis	0,87	1985-1986, 1986-1987 1987-1988
	0,88	1985-1986, 1986-1987 1987-1988
Garde	0,88	1985-1986, 1986-1987 1987-1988

TABLE 5 : VALEURS-SEUILS (g/m), SAISON 1985-1986

Niveaux des int. de confiance (%)	CABLE TEMOIN			CABLE DU FAISCEAU			
	90	95	99	90	95	99	
Périodes de variation (h)	0,5	20	20	20	Données non disponibles pendant cette saison		
	1,0	20	20	20			
	1,5	20	20	20			
	2,0	20	20	40			
	2,5	20	20	20			
	3,0	20	20	40			
	3,5	20	20	40			
	4,0	20	40	40			
	4,5	40	40	40			
	5,0	20	20	40			
Niveaux des int. de confiance (%)	CABLE BERSIMIS			CABLE DE GARDE			
	90	95	99	90	95	99	
Périodes de variation (h)	0,5	140	200	400	40	40	80
	1,0	200	300	500	40	40	80
	1,5	200	300	500	40	60	80
	2,0	200	400	500	40	60	80
	2,5	200	400	500	40	60	80
	3,0	220	400	500	40	60	120
	3,5	220	400	500	60	80	120
	4,0	220	400	500	40	60	120
	4,5	280	400	500	40	80	120
	5,0	280	400	500	40	80	120

TABLE 6 : VALEURS-SEUILS (G/M), SAISON 1986-1987

Niveaux des int. de confiance (%)	CABLE TEMOIN			CABLE DU FAISCEAU			
	90	95	99	90	95	99	
Périodes de variation (h)	0,5	20	20	40	120	180	400
	1,0	20	20	40	120	180	400
	1,5	20	40	40	120	140	400
	2,0	40	40	40	100	140	300
	2,5	40	40	80	100	140	300
	3,0	40	40	60	100	120	400
	3,5	40	40	80	100	120	260
	4,0	40	40	40	100	120	260
	4,5	40	40	60	120	140	260
	5,0	40	60	60	120	140	260
Périodes de variation (h)	CABLE BERSIMIS			CABLE DE GARDE			
	90	95	99	90	95	99	
	0,5	60	80	100	40	40	60
	1,0	40	60	80	40	40	80
	1,5	40	60	80	40	40	80
	2,0	40	60	80	20	40	60
	2,5	60	60	80	20	40	40
	3,0	60	60	100	20	40	60
	3,5	60	60	100	20	40	60
	4,0	60	60	100	20	40	60
	4,5	60	60	100	20	40	60
	5,0	60	60	100	20	40	60

TABLE 7 : VALEURS-SEUILS (g/m), SAISON 1987-1988

Niveaux des int. de confiance (%)	CABLE TEMOIN			CABLE DU FAISCEAU			
	90	95	99	90	95	99	
Périodes de variation (h)	0,5	40	40	100	Données non- disponibles pendant cette saison		
	1,0	60	60	160			
	1,5	60	80	260			
	2,0	60	100	160			
	2,5	60	80	120			
	3,0	60	80	260			
	3,5	80	100	200			
	4,0	80	100	220			
	4,5	80	100	140			
	5,0	100	120	200			
Niveaux des int. de confiance (%)	CABLE BERSIMIS			CABLE DE GARDE			
	90	95	99	90	95	99	
Périodes de variation (h)	0,5	20	40	100	60	60	140
	1,0	20	40	60	60	60	80
	1,5	40	40	***	60	60	80
	2,0	40	40	40	60	60	80
	2,5	40	40	40	60	60	80
	3,0	40	40	60	60	60	80
	3,5	40	40	60	60	60	80
	4,0	40	40	60	60	60	80
	4,5	40	40	60	60	60	80
	5,0	40	40	60	60	80	80

TABLE 8 : RESULTATS D'ANALYSE D'ERREUR POUR LA SAISON  
1985-1986

CABLE TEMOIN			CABLE DU FAISCEAU		
Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)	Données non disponibles		
0,5	20	19			
1,0	20	10			
1,5	20	7			
2,0	40	12			
2,5	20	5			
3,0	40	10			
3,5	40	8			
4,0	40	7			
4,5	40	3			
5,0	20	3			

CABLE BERSIMIS			CABLE DE GARDE		
Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)	Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)
0,5	400	49	0,5	80	14
1,0	500	49	1,0	80	3
1,5	500	33	1,5	80	4
2,0	500	33	2,0	80	4
2,5	500	33	2,5	80	4
3,0	500	49	3,0	120	6
3,5	500	24	3,5	120	3
4,0	500	19	4,0	120	4
4,5	500	24	4,5	120	4

TABLE 9 : RESULTATS D'ANALYSE D'ERREUR POUR LA SAISON  
1986-1987

CABLE TEMOIN			CABLE DU FAISCEAU		
Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)	Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)
0,5	40	19	0,5	400	37
1,0	40	8	1,0	400	24
1,5	40	5	1,5	400	18
2,0	40	4	2,0	300	23
2,5	80	8	2,5	300	20
3,0	60	4	3,0	400	47
3,5	80	5	3,5	260	16
4,0	40	2	4,0	260	15
4,5	60	3	4,5	260	15
5,0	60	2	5,0	260	19

CABLE BERSIMIS			CABLE DE GARDE		
Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)	Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)
0,5	100	13	0,5	60	2
1,0	80	5	1,0	80	2
1,5	80	6	1,5	80	2
2,0	80	9	2,0	60	2
2,5	80	12	2,5	40	2
3,0	100	13	3,0	60	2
3,5	100	12	3,5	60	2
4,0	100	12	4,0	60	2
4,5	100	10	4,5	60	2
5,0	100	10	5,0	60	2

TABLE 10 : RESULTATS D'ANALYSE D'ERREUR POUR LA SAISON  
1987-1988

CABLE TEMOIN			CABLE DU FAISCEAU		
Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)	Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)
0,5	100	3			
1,0	160	33			
1,5	260	19			
2,0	120	12			
2,5	260	6			
3,0	200	19			
3,5	220	10			
4,0	140	9			
4,5	200	4			
5,0	20	6			
			Données non-disponibles pendant cette saison		

CABLE BERSIMIS			CABLE DE GARDE		
Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)	Période (h)	Valeur-seuil (g/m)	Erreur (%)
0,5	100	49	0,5	140	49
1,0	60	10	1,0	80	14
1,5	40	20	1,5	80	13
2,0	40	3	2,0	80	10
2,5	40	3	2,5	80	9
3,0	60	4	3,0	80	10
3,5	60	4	3,5	80	12
4,0	60	4	4,0	80	12
4,5	60	4	4,5	80	10
5,0	60	4	5,0	80	10

TABLE 11 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 24 DECEMBRE 1986

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 5,84	1,10	- 7,90	- 3,70
Température (°C) délestage	- 9,43	0,69	- 11,40	- 8,40
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	2,25 (8,10)	0,96 (3,44)	0,16 (0,53)	3,72 (13,37)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	4,19 (15,10)	1,01 (3,63)	2,20 (7,91)	5,74 (20,63)

TABLE 12 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 27 DECEMBRE 1986

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 9,58	4,75	- 18,70	- 3,30
Température (°C) délestage	-14,45	1,88	-18,90	-10,80
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	3,80 (13,67)	1,65 (5,95)	0,34 (1,22)	8,02 (28,68)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	2,28 (8,21)	1,26 (4,54)	0,13 (0,46)	4,52 (14,28)

TABLE 13 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 30 DECEMBRE 1986

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 9,41	2,54	-14,80	- 6,10
Température (°C) délestage	-11,63	2,04	-15,10	- 6,90
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	4,40 (15,83)	1,42 (5,11)	1,79 (6,43)	7,63 (27,47)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	0,96 (3,47)	1,28 (4,62)	0,00 (0,10)	4,18 (15,03)

TABLE 14 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 02 JANVIER 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 8,41	2,10	-12,50	- 5,40
Température (°C) délestage	-11,60	2,80	-16,70	- 6,50
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	1,86 (6,70)	1,17 (4,22)	0,06 (0,23)	3,79 (13,65)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	2,50 (9,00)	1,64 (5,90)	0,00 (0,00)	5,47 (19,70)

TABLE 15 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 22 JANVIER 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 8,44	2,36	-12,70	- 4,10
Température (°C) délestage	-14,56	0,74	-15,80	-13,20
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	1,94 (6,98)	1,24 (4,45)	0,00 (0,01)	4,03 (14,50)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	7,19 (25,87)	1,31 (4,72)	3,94 (14,25)	9,03 (32,49)

TABLE 16 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 30 JANVIER 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	-20,90	6,90	-32,70	-10,00
Température (°C) délestage	-15,35	2,29	-20,60	-11,50
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	2,81 (10,10)	1,47 (5,30)	0,00 (0,00)	6,06 (21,80)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	2,80 (10,07)	1,29 (4,63)	0,00 (0,00)	4,51 (16,23)

TABLE 17 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 09 FEVRIER 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	-17,20	4,90	-27,10	-6,20
Température (°C) délestage	-21,34	5,46	-31,60	-14,60
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	2,47 (8,70)	1,28 (4,60)	3,56 (12,80)	4,73 (17,20)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	5,90 (21,24)	1,80 (6,48)	1,52 (5,46)	8,36 (30,11)

TABLE 18 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 27 FEVRIER 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	-13,60	1,30	-16,10	-10,50
Température (°C) délestage	-5,98	0,59	-7,30	-5,30
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	2,61 (9,40)	0,45 (1,61)	1,46 (5,25)	3,21 (13,00)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	3,42 (12,31)	0,95 (3,42)	2,08 (7,48)	4,78 (17,20)

TABLE 19 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 07 DECEMBRE 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 9,38	1,70	- 6,20	- 1,30
Température (°C) délestage	-10,76	1,64	-14,20	- 7,20
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	3,31 (11,92)	1,89 (6,80)	1,76 (6,34)	7,34 (26,42)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	3,06 (11,02)	1,03 (3,71)	2,83 (10,19)	4,68 (16,85)

TABLE 20 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 15 DECEMBRE 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 4,46	1,12	- 6,20	- 1,30
Température (°C) délestage	- 7,24	0,86	- 8,90	- 6,10
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	2,61 (9,40)	1,48 (5,33)	0,00 (0,00)	4,79 (17,24)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	3,31 (11,92)	0,62 (2,23)	2,44 (3,78)	4,87 (17,53)

TABLE 21 : CONDITIONS ATMOSPHERIQUES LIEES  
AU DELESTAGE DU 31 DECEMBRE 1987

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Température (°C) accumulation	- 8,96	2,86	- 14,80	- 5,60
Température (°C) délestage	-11,47	0,85	-12,90	- 9,90
Vit. du vent (m/s) (accumulation) (km/h)	4,23 (15,23)	1,34 (4,81)	1,79 (6,43)	7,53 (27,47)
Vit. du vent (m/s) (délestage) (km/h)	8,19 (2,28)	5,18 (1,44)	0,53 (0,18)	15,03 (4,18)

TABLE 22 : TYPES DE GLACE DES DÉPÔTS ÉTUDES  
AU MT-VALIN (1985-1988)

Date délestage	Température (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Type de givre
24 déc. 1986	- 5,84	2,25	léger
27 déc. 1986	- 9,58	3,80	léger
30 déc. 1986	- 9,41	4,40	léger
02 jan. 1987	- 8,41	1,86	léger
22 jan. 1987	- 8,44	1,94	léger
30 jan. 1987	-20,90	2,81	léger
09 fév. 1987	-17,20	2,47	léger
27 fév. 1987	-13,60	2,61	léger
07 déc. 1987	- 9,38	3,31	léger
15 déc. 1987	- 4,46	2,61	léger
31 déc. 1987	- 8,96	4,23	léger

TABLE 23 : CONDITIONS CARACTERISTIQUES DES  
DELESTAGES ETUDES

Date du délestage	Ta (°C)	Td (°C)	Va (m/s)	Vd (m/s)	durée (h)	P (kg/m)	Taux
24 déc. 1986	- 5,84	- 9,43	2,25	4,19	17,5	12,93	0,255
27 déc. 1986	- 9,58	-14,45	3,80	2,28	22,0	16,95	0,097
30 déc. 1986	- 9,41	-11,63	4,40	0,96	32,5	15,59	0,142
02 jan. 1987	- 8,41	-11,60	1,86	2,50	60,0	16,17	0,123
22 jan. 1987	- 8,44	-14,56	1,94	7,19	13,0	15,83	0,458
30 jan. 1987	-20,90	-15,35	2,81	2,80	21,0	12,60	0,274
09 fév. 1987	-17,20	-21,34	2,47	5,90	18,0	5,85	0,101
27 fév. 1987	-13,60	- 5,98	2,61	3,42	6,5	2,86	0,156
07 déc. 1987	- 9,38	-10,76	3,31	3,06	46,5	6,05	0,109
15 déc. 1987	- 4,46	- 7,24	2,61	3,31	10,5	1,55	0,104
31 déc. 1987	- 8,96	-11,47	4,23	2,23	15,5	2,35	0,124

TABLE 24 : RESULTATS DE L'ETUDE DE REGRESSION LINEAIRE  
PORTANT SUR LES DELESTAGES ETUDIES  
(1985-1988)

Nombre de variables	Variables	Coefficient R <sup>2</sup> (%)
1	Y <sub>4</sub>	44,64
2	Y <sub>4</sub> , Y <sub>5</sub>	62,59
3	Y <sub>2</sub> , Y <sub>4</sub> , Y <sub>5</sub>	72,59
4	Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>4</sub> , Y <sub>5</sub>	76,48
5	Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>3</sub> , Y <sub>4</sub> , Y <sub>5</sub>	82,55

TABLE 25 : VALEURS THEORIQUES LIMITES DU COEFFICIENT  
D'EPATISSEUR  $c_h$

Densité	Charge (kg/m)	Epaisseur (m)	$c_h$
0,5	10	0,725	41,4
0,5	20	1,455	83,1
0,9	10	0,395	22,57
0,9	20	0,845	46,00

TABLE 26 : VALEURS LIMITES DE CONTRAINTES EN ADHESION  
MANCHON ELLIPTIQUE LEGEREMENT INCLINE

*	u	C	h	$f_B/g$	$f_L/g$	$c_B$	$\sigma$	$\tau$	Dal.
	(m/s)	(kg/m)	(m)	(kg/m)	(kg/m)		(kPa)	(kPa)	(kg/m <sup>2</sup> )
1	4,19	12,93	0,94	1,200	0,240	53,7	0,21	43,20	0,255
2	7,19	16,83	1,22	4,550	0,910	69,7	0,51	110,32	0,455
3	3,40	2,86	0,21	0,200	0,040	12,0	0,04	3,10	0,155

TABLE 27 : VALEURS LIMITES DE CONTRAINTES EN ADHESION  
MANCHON CIRCULAIRE

*	u	C	D	$f_B/g$	$\sigma$	$\tau$	Dal.
	(m/s)	(kg/m)	(m)	(kg/m)	(kPa)	(kPa)	(kg/m <sup>2</sup> )
1	4,19	12,93	0,18	0,222	0,59	0,255	
2	7,19	16,83	0,21	0,761	0,75	0,655	
3	3,40	2,86	0,06	0,050	0,13	0,194	

\* : Dates des délestages étudiés.

1 : 24 décembre 1986

2 : 22 janvier 1987

3 : 27 février 1987

## A N N E X E    B

## F I G U R E S

PERIODE DU 12 NOV. 1987

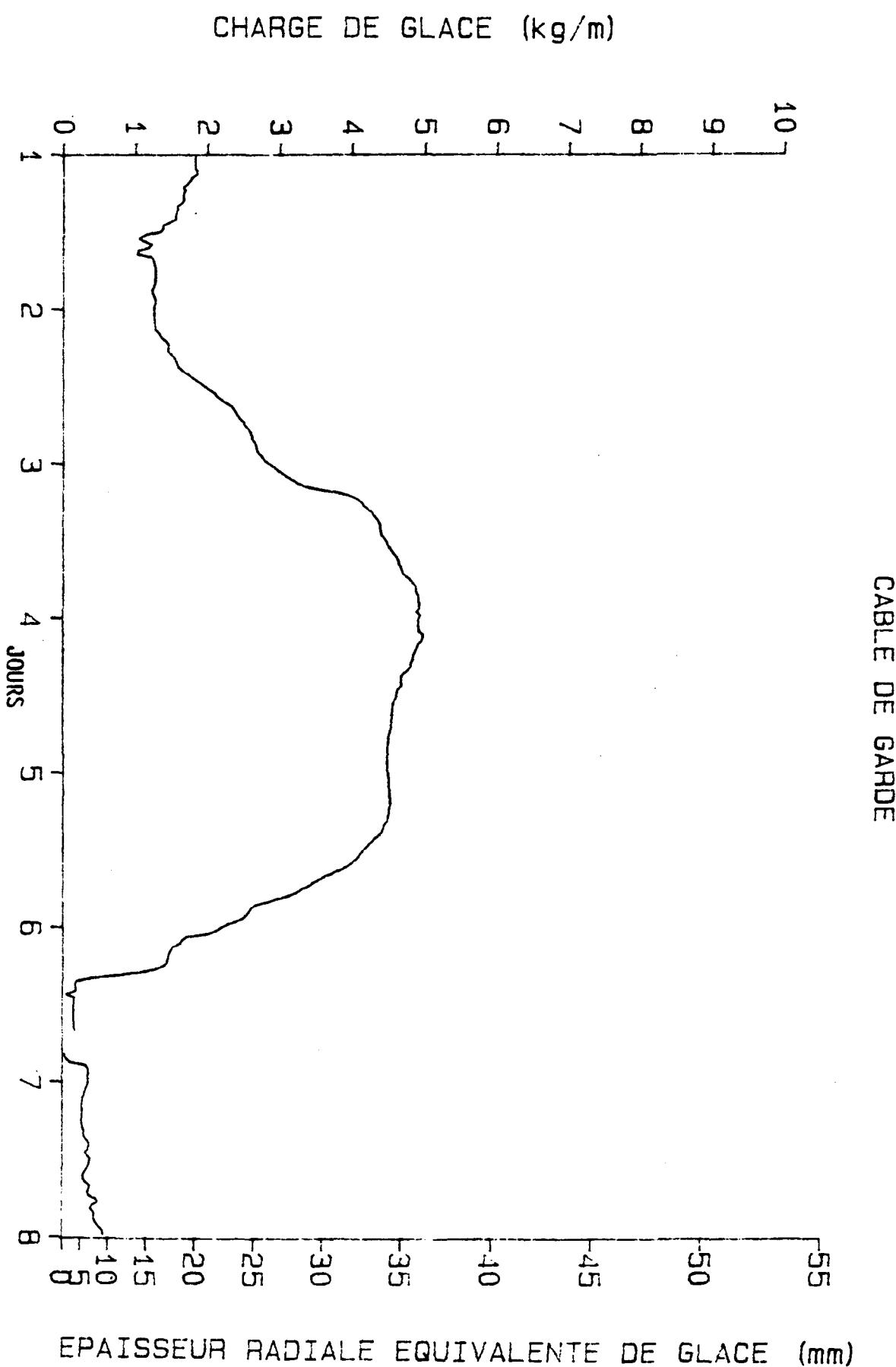


Figure 1. Evènement de givrage, trois phases

PERIODE DU 22 DEC. 1986

CABLE BERSIMIS

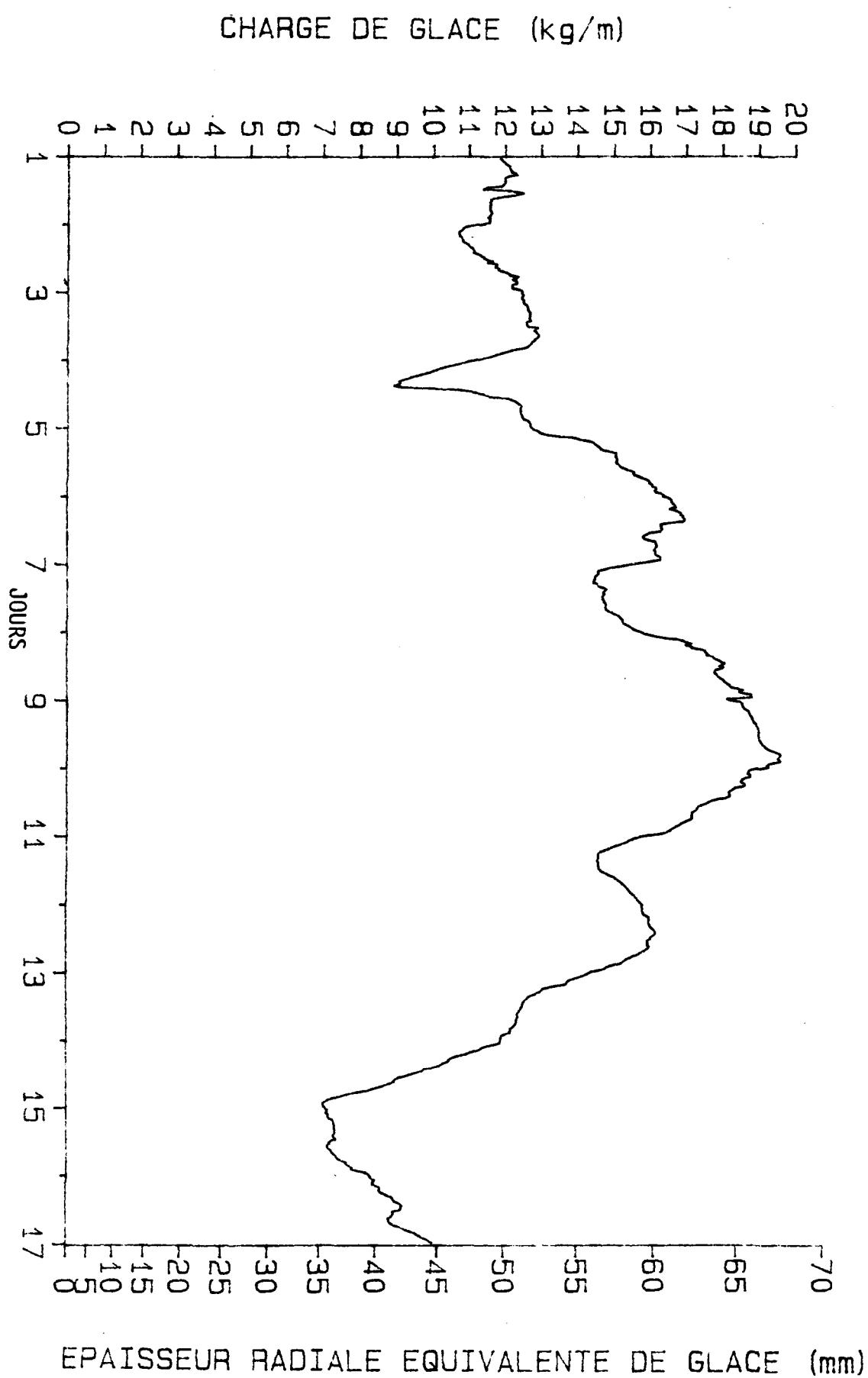


Figure 2. Evènement de givrage sans phase d'endurance

PERIODE DU 02 DEC. 1986

CABLE BERSIMIS

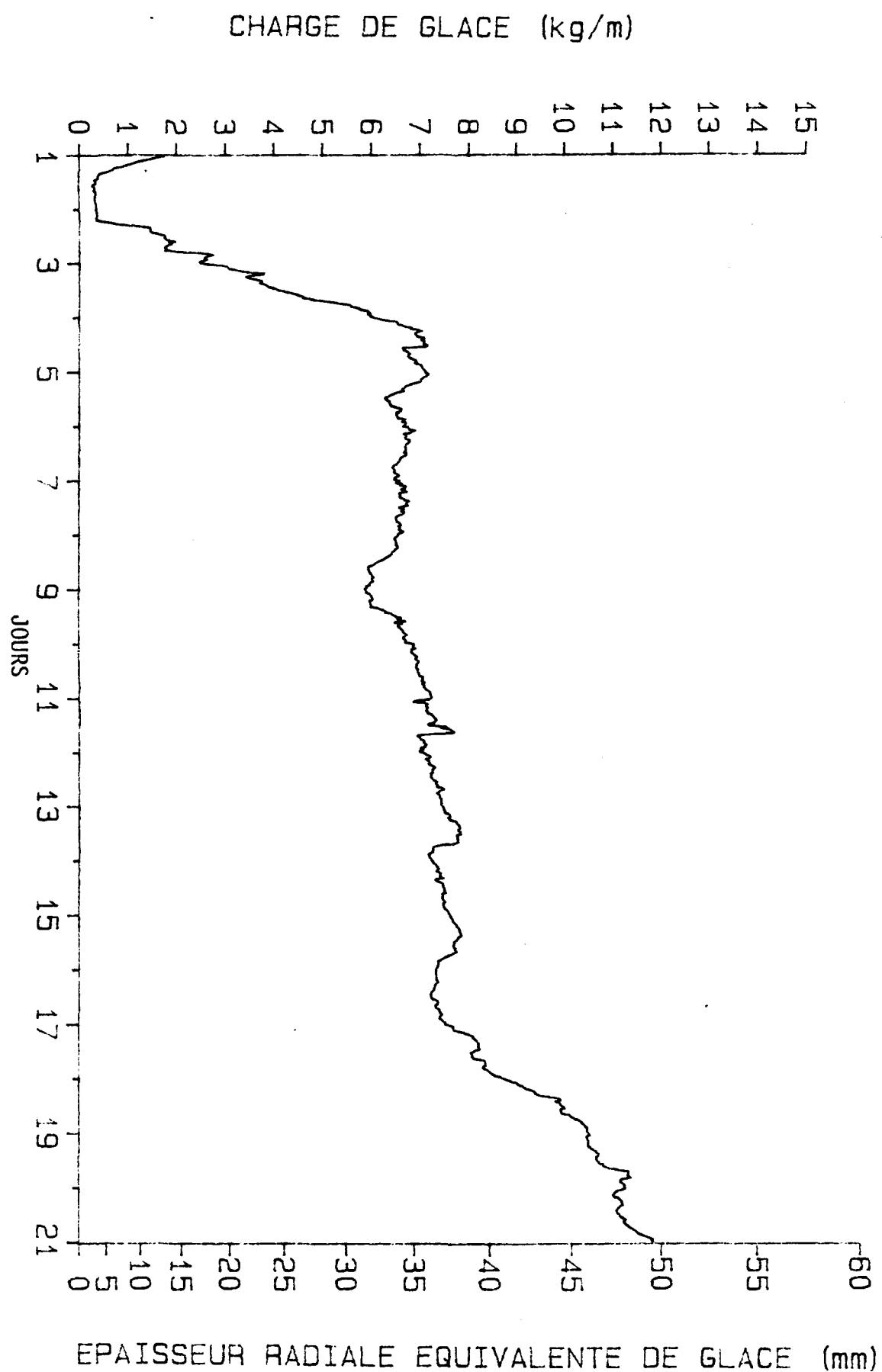


Figure 3. Événement de givrage sans phase de délestage

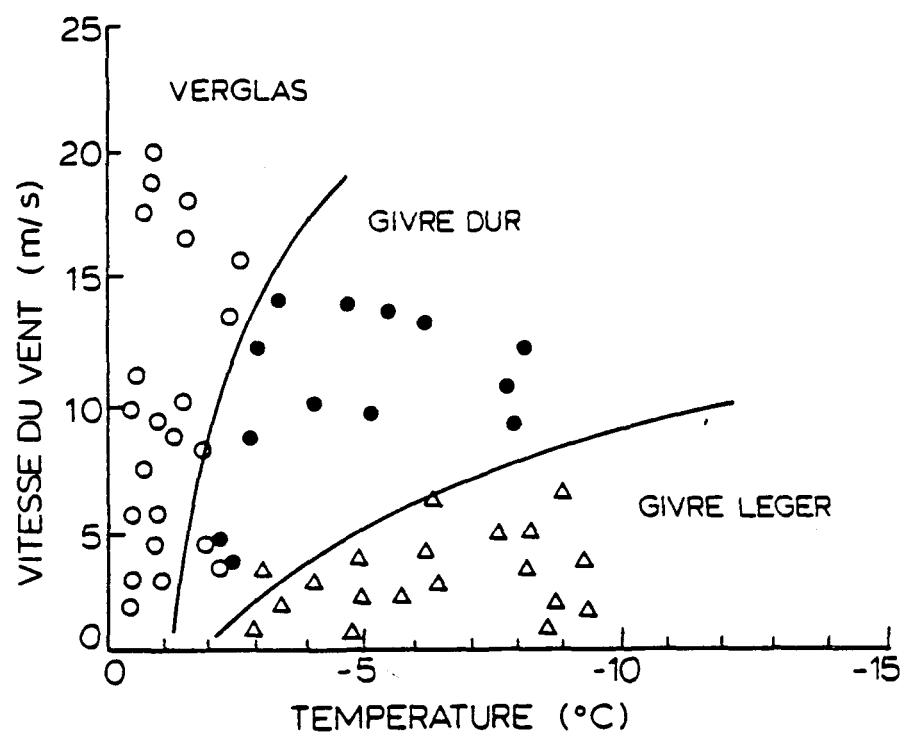


Figure 4 : Relation entre les types de glace et les conditions météorologiques de formation

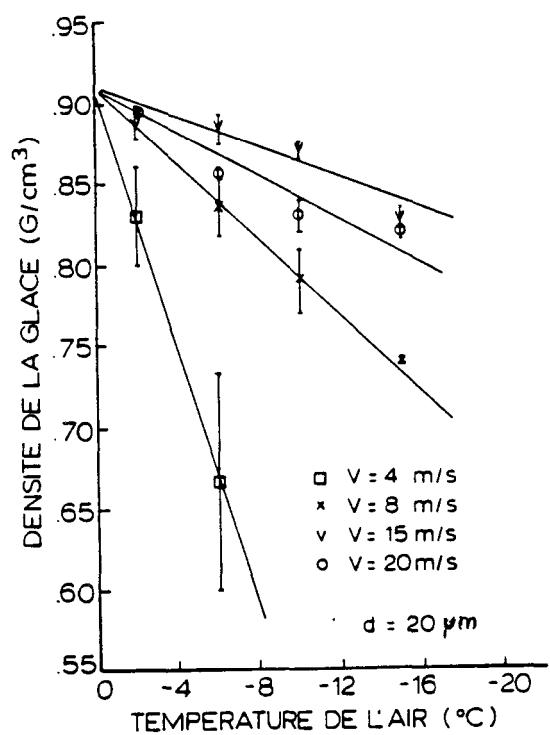


Figure 5 : Relation entre la densité de la glace et la température de formation

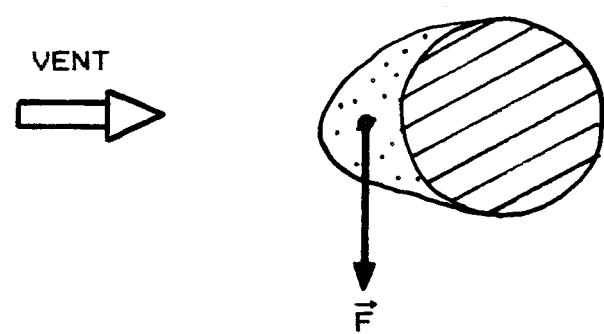


Figure 6 : Position du dépôt de glace sur le câble



Figure 7a. Manchon circulaire, givre dur



Figure 7b. Manchon circulaire, givre léger



Figure 7c. Manchon elliptique, givre dur



Figure 7d. Manchon elliptique, givre léger



Figure 8 : Câbles givrés (Mt-Valin, 18 décembre 1986)

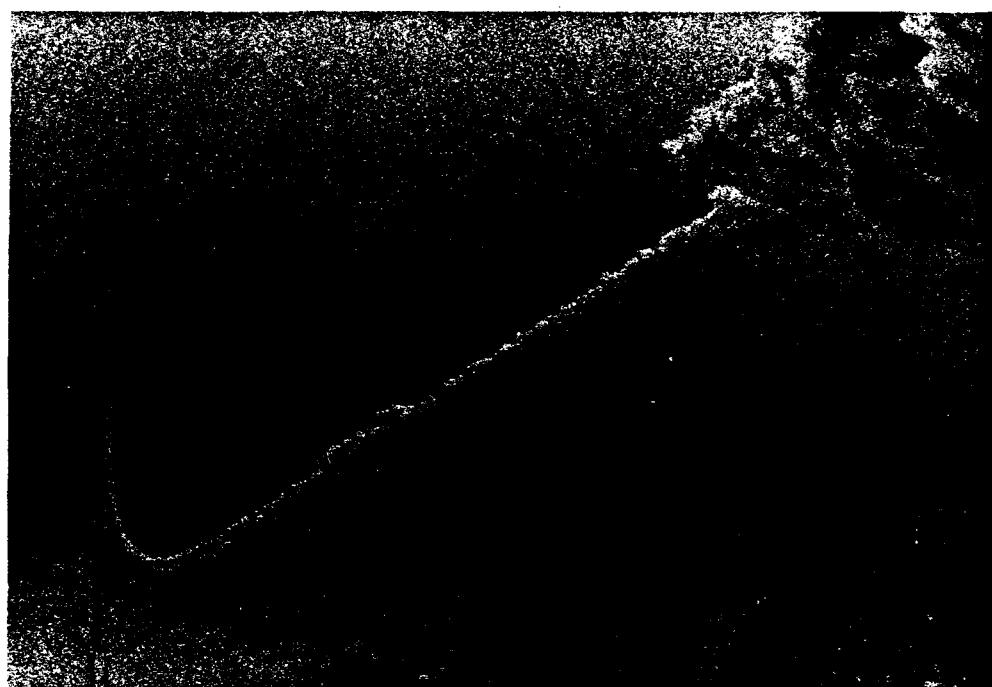


Figure 9 : Manchon elliptique sur les câbles  
(Mt-Valin, 18 décembre 1986)

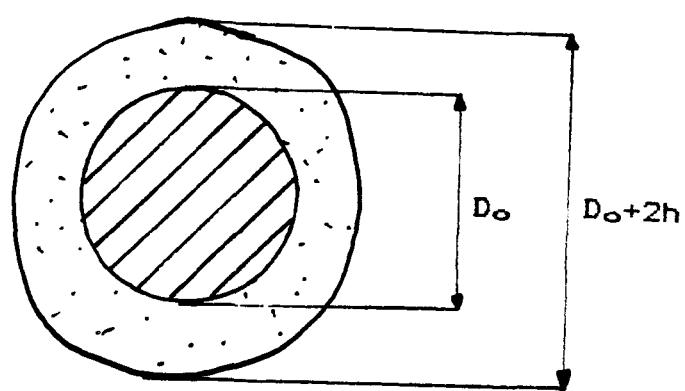


Figure 10 : Caractéristiques géométriques du manchon circulaire théorique

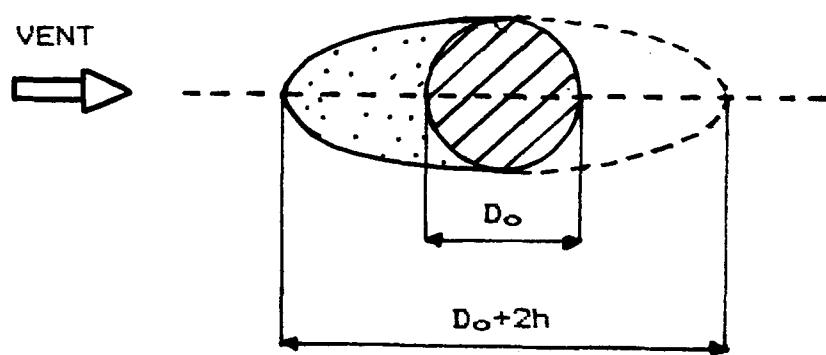


Figure 11 : Caractéristiques géométriques du manchon elliptique théorique

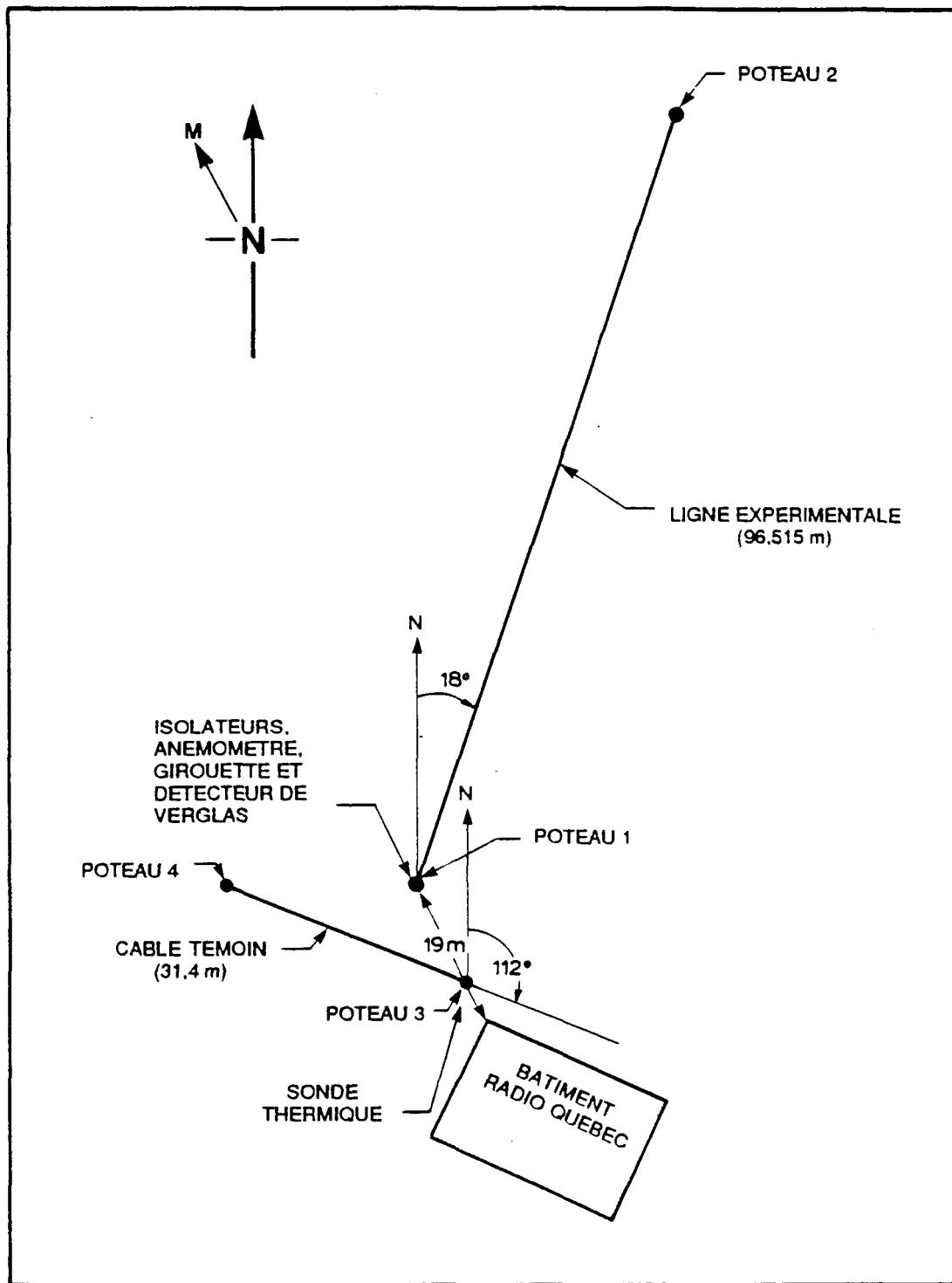


Figure 12.

Installation du Mt-Valin

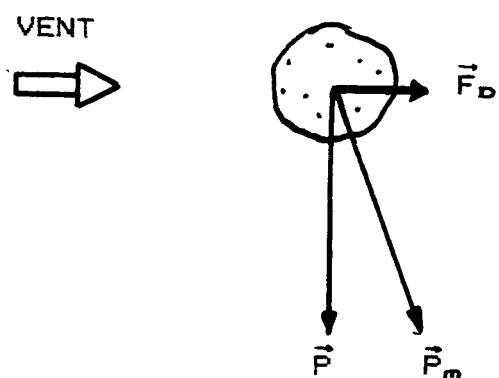


Figure 13 - Influence de la force de trainée sur l'évaluation de la charge de glace sur un câble

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

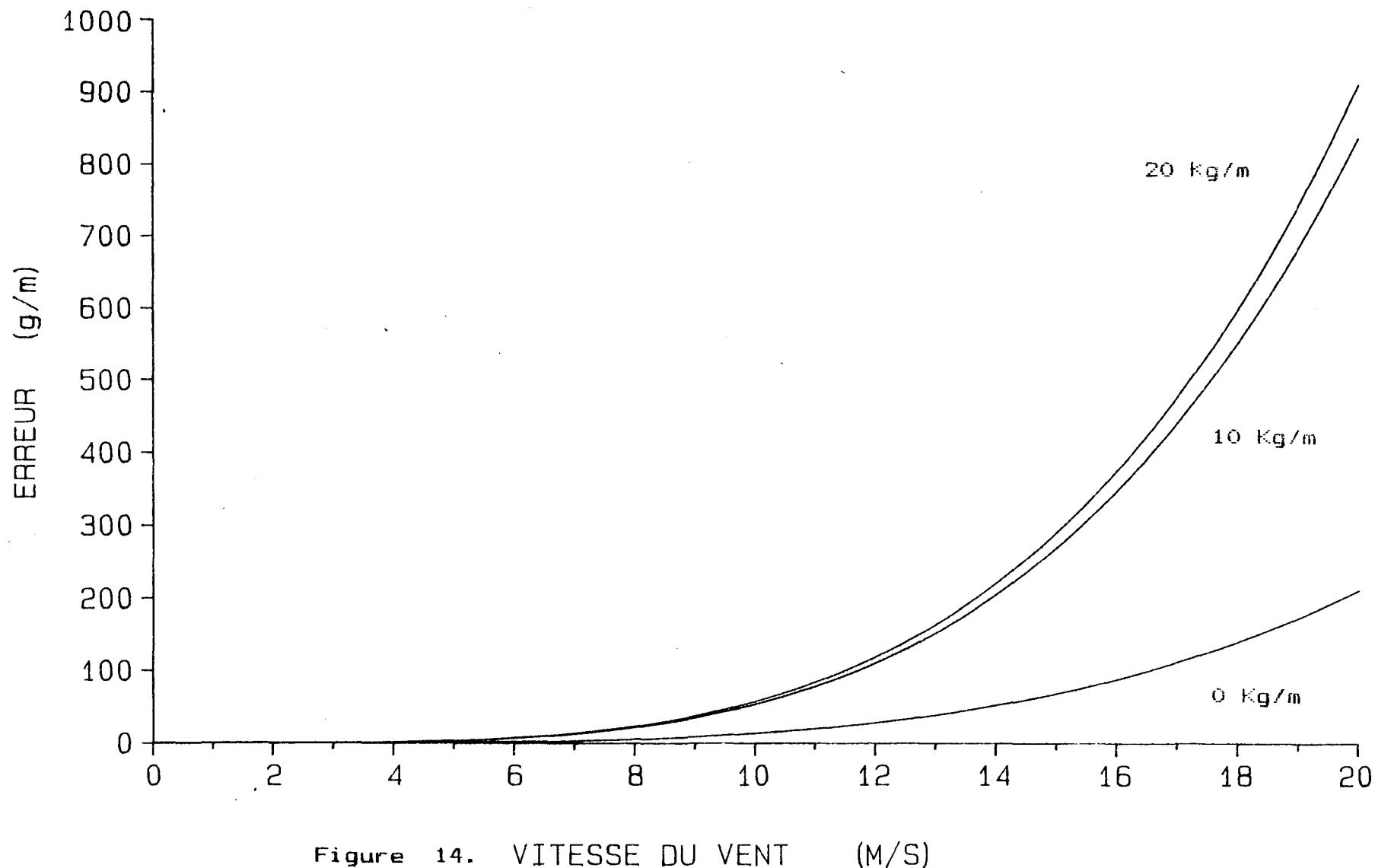


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

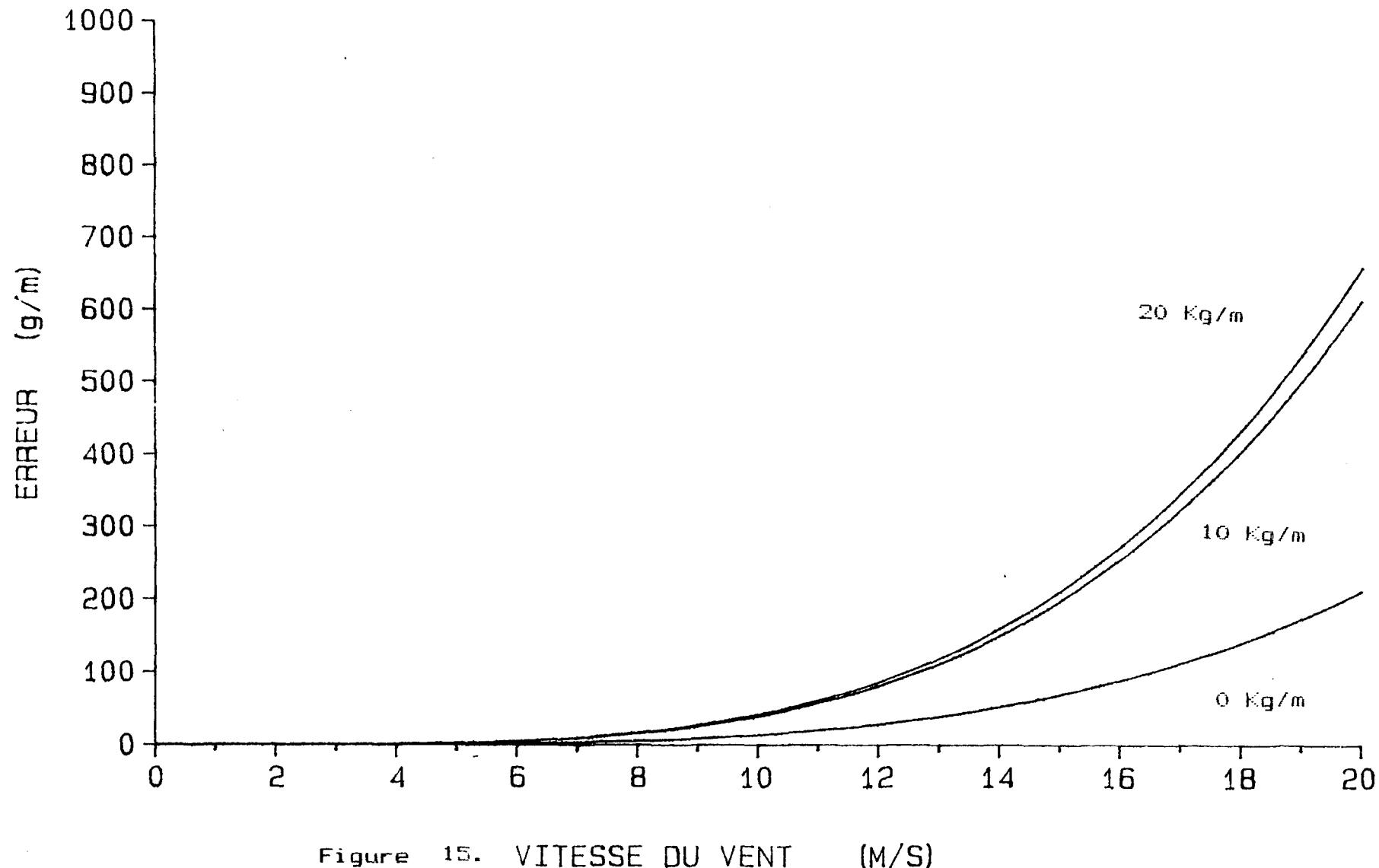


Figure 15. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM<sup>3</sup>

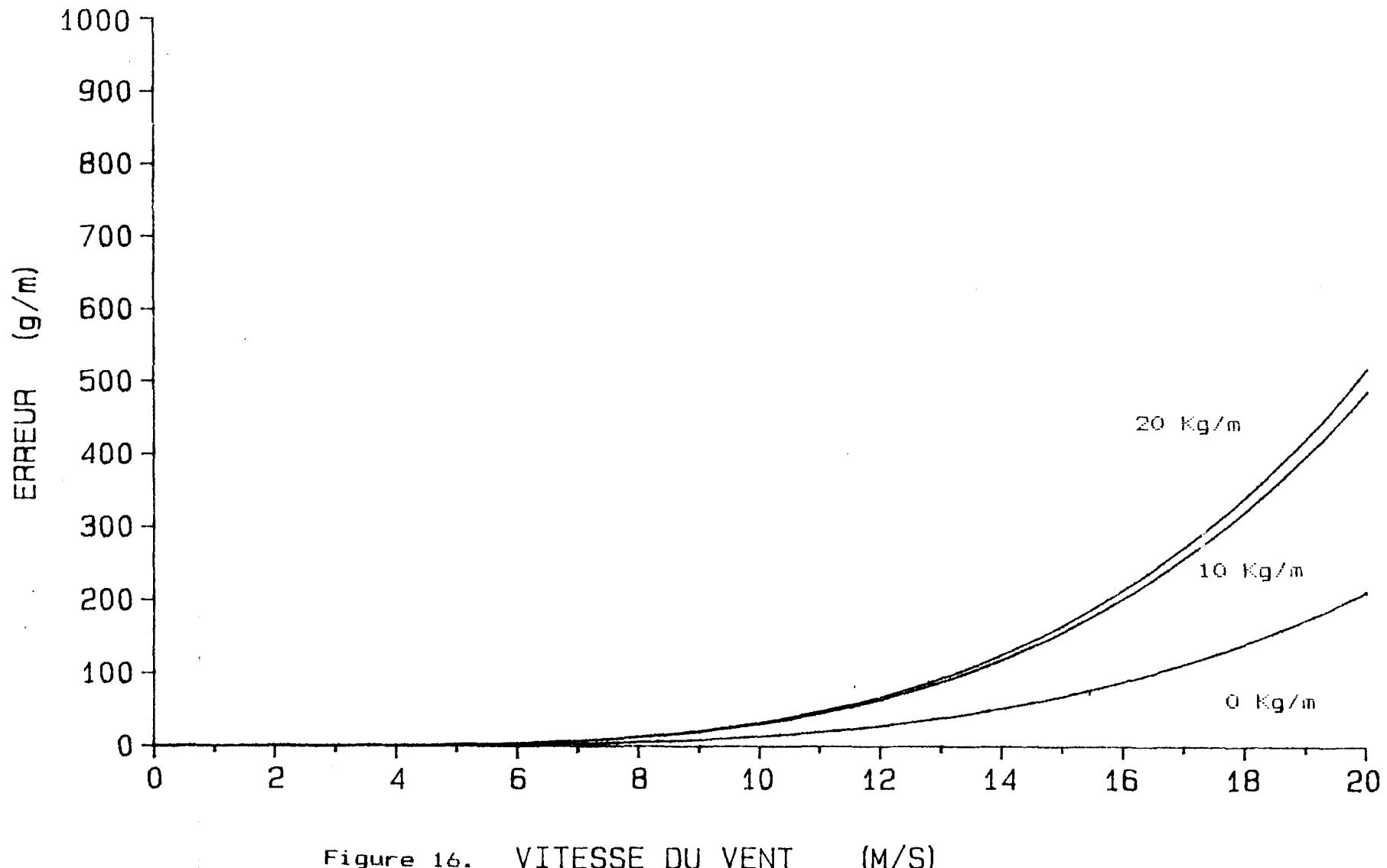
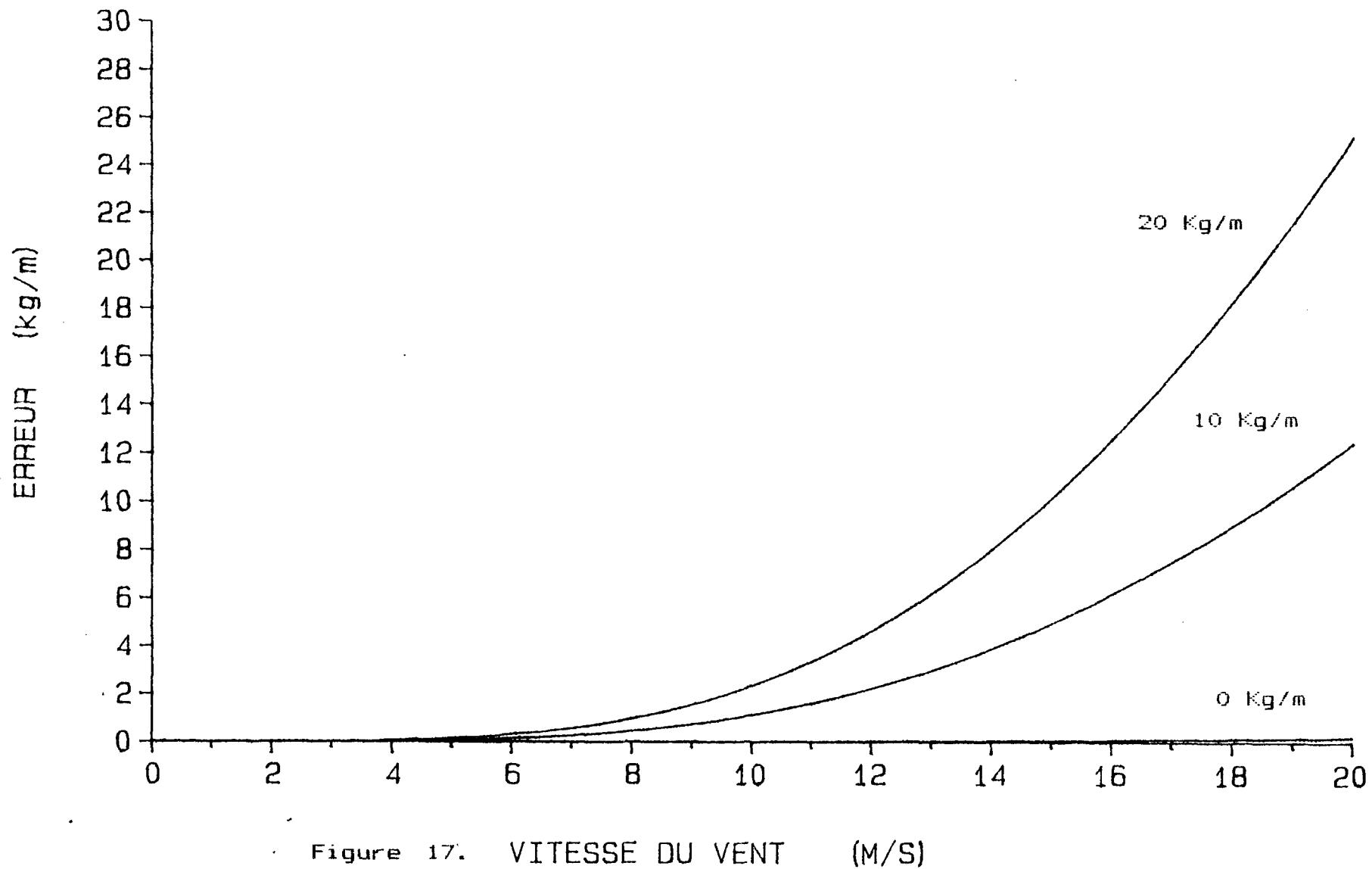


Figure 16. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

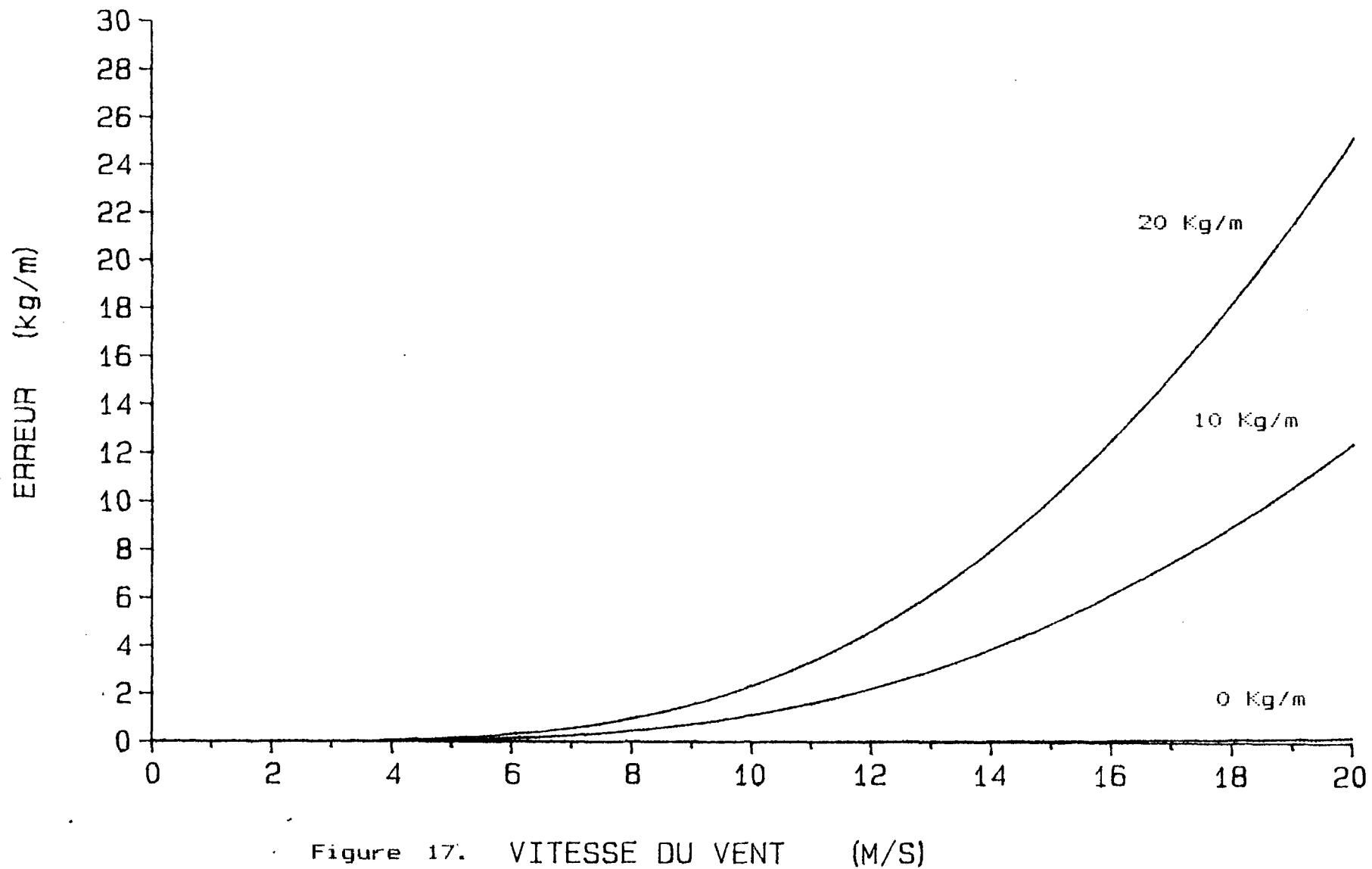
DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

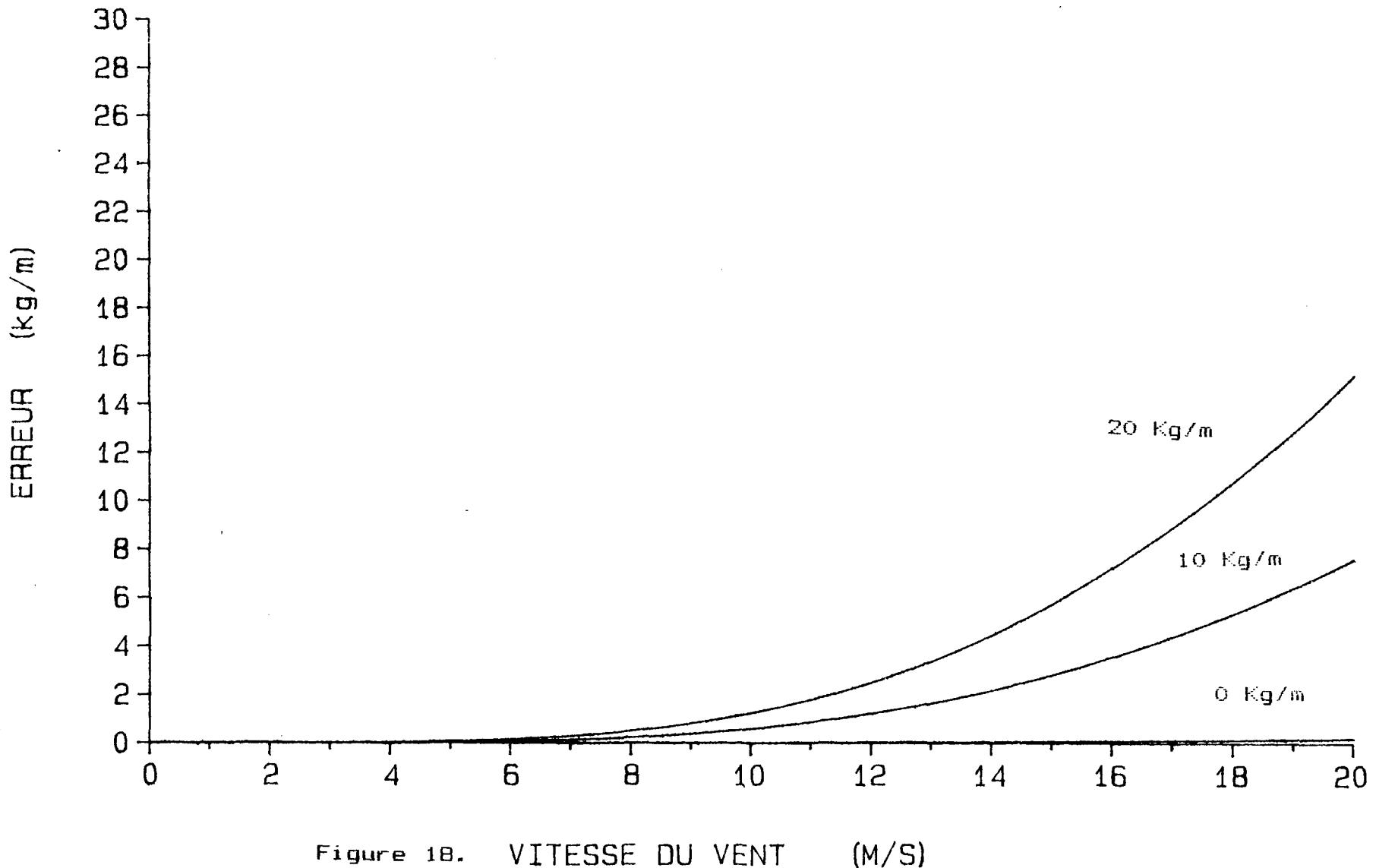
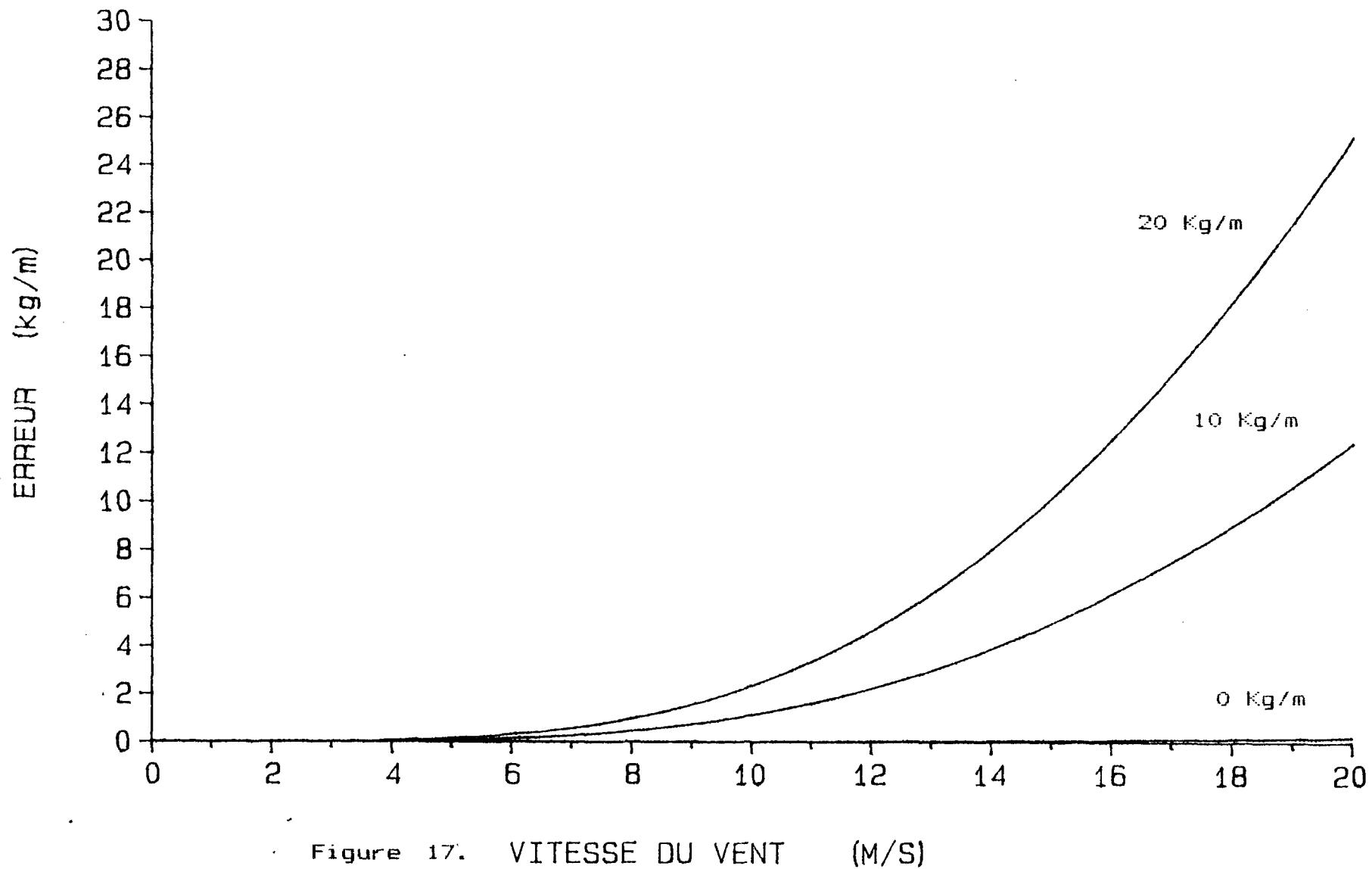


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

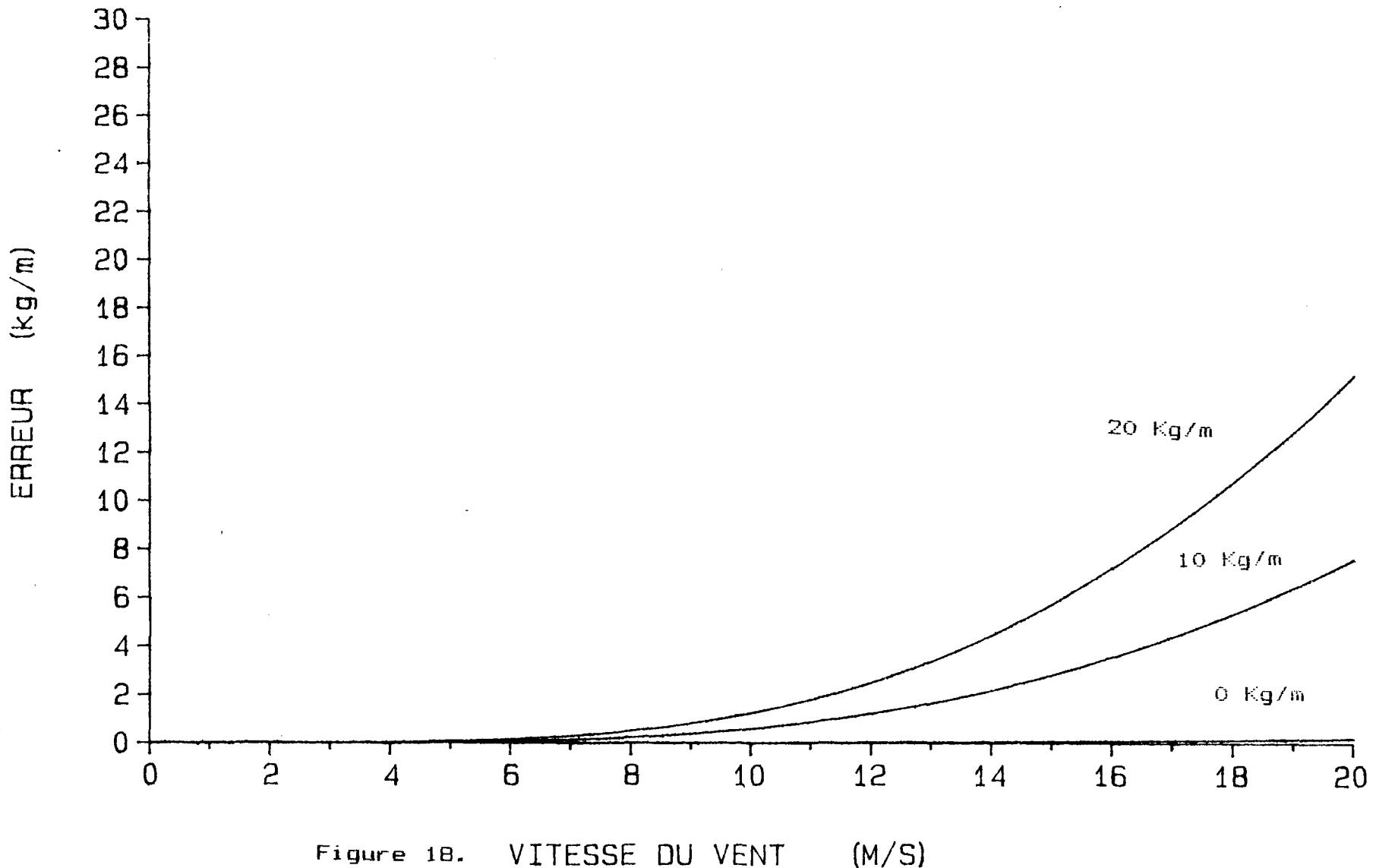
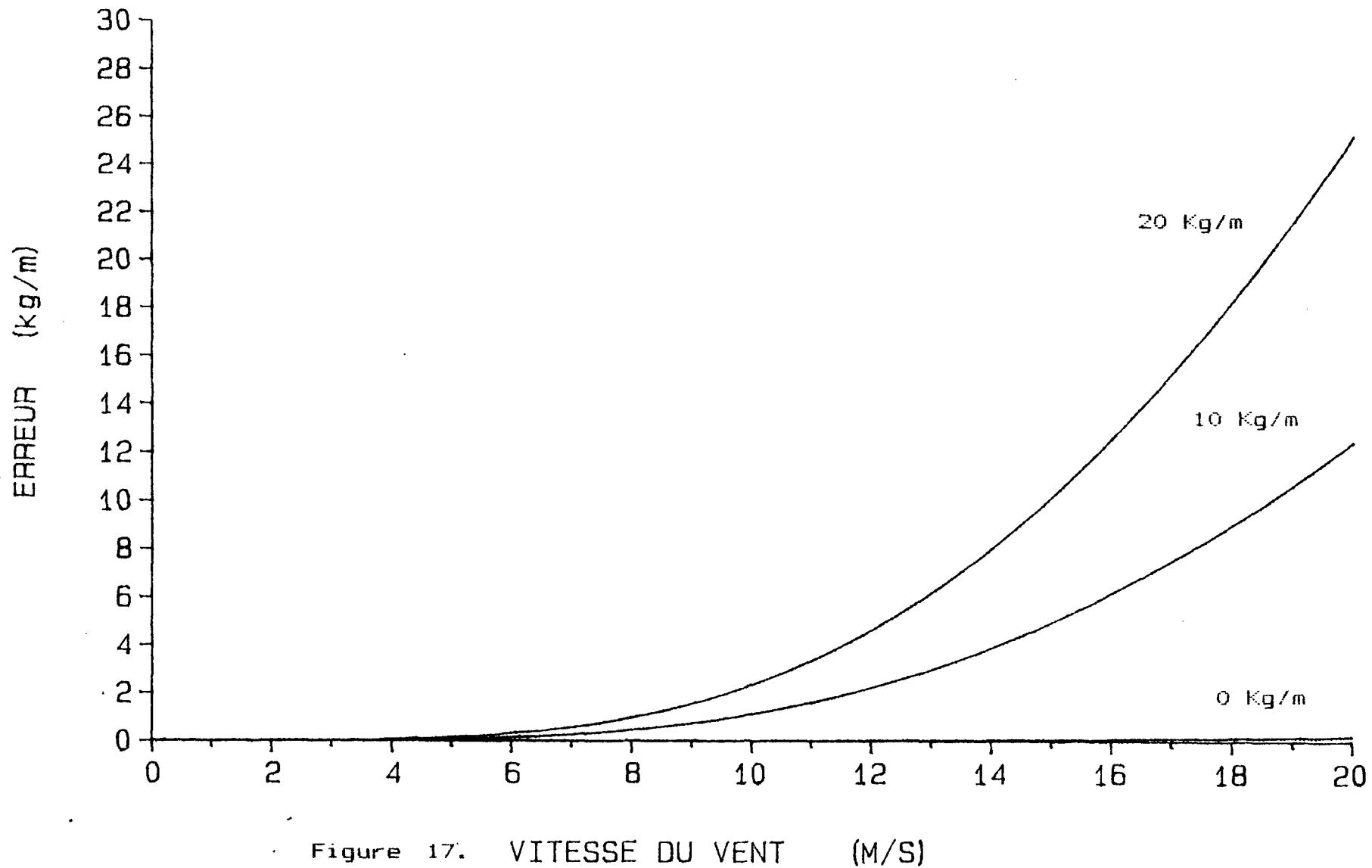


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

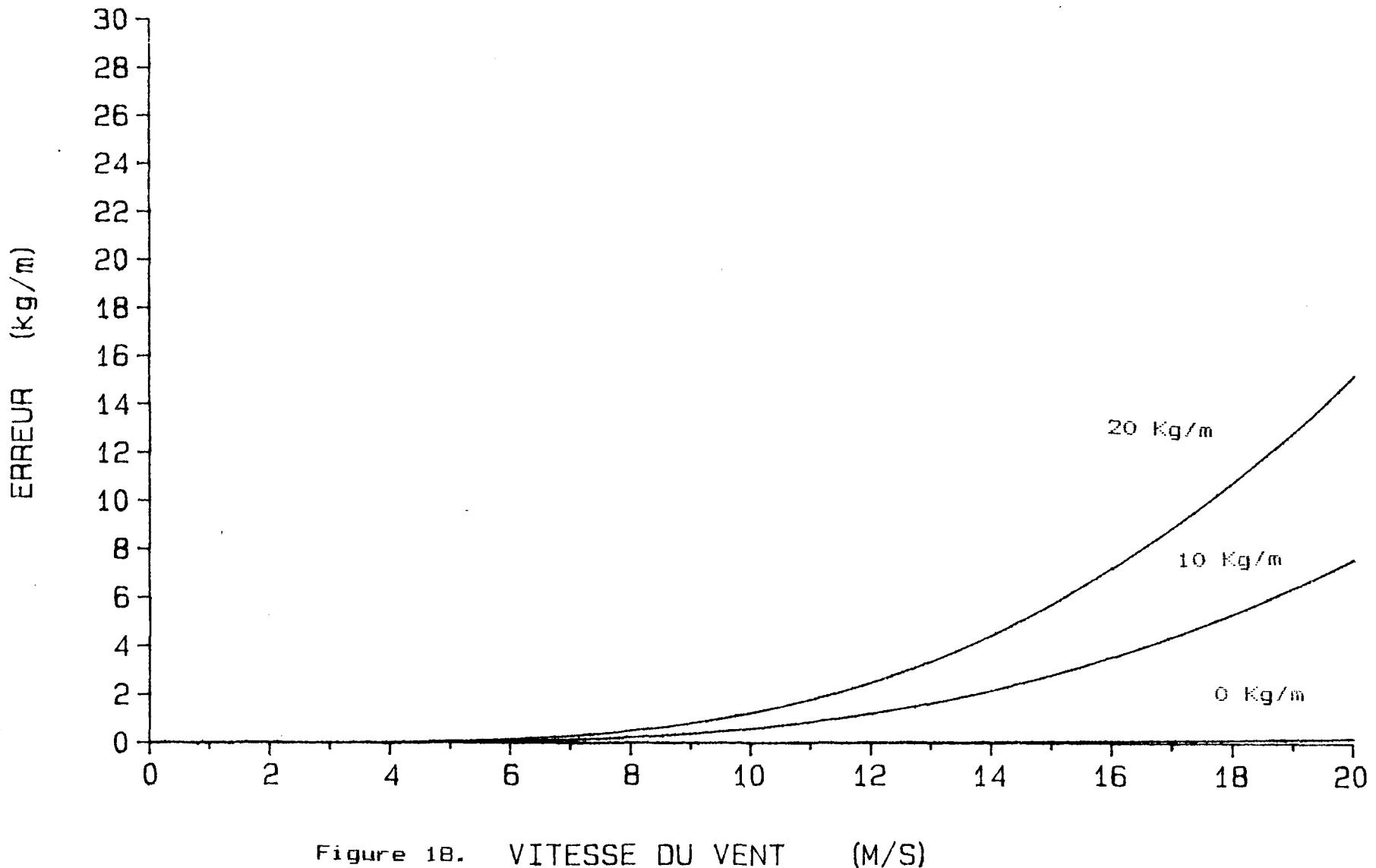
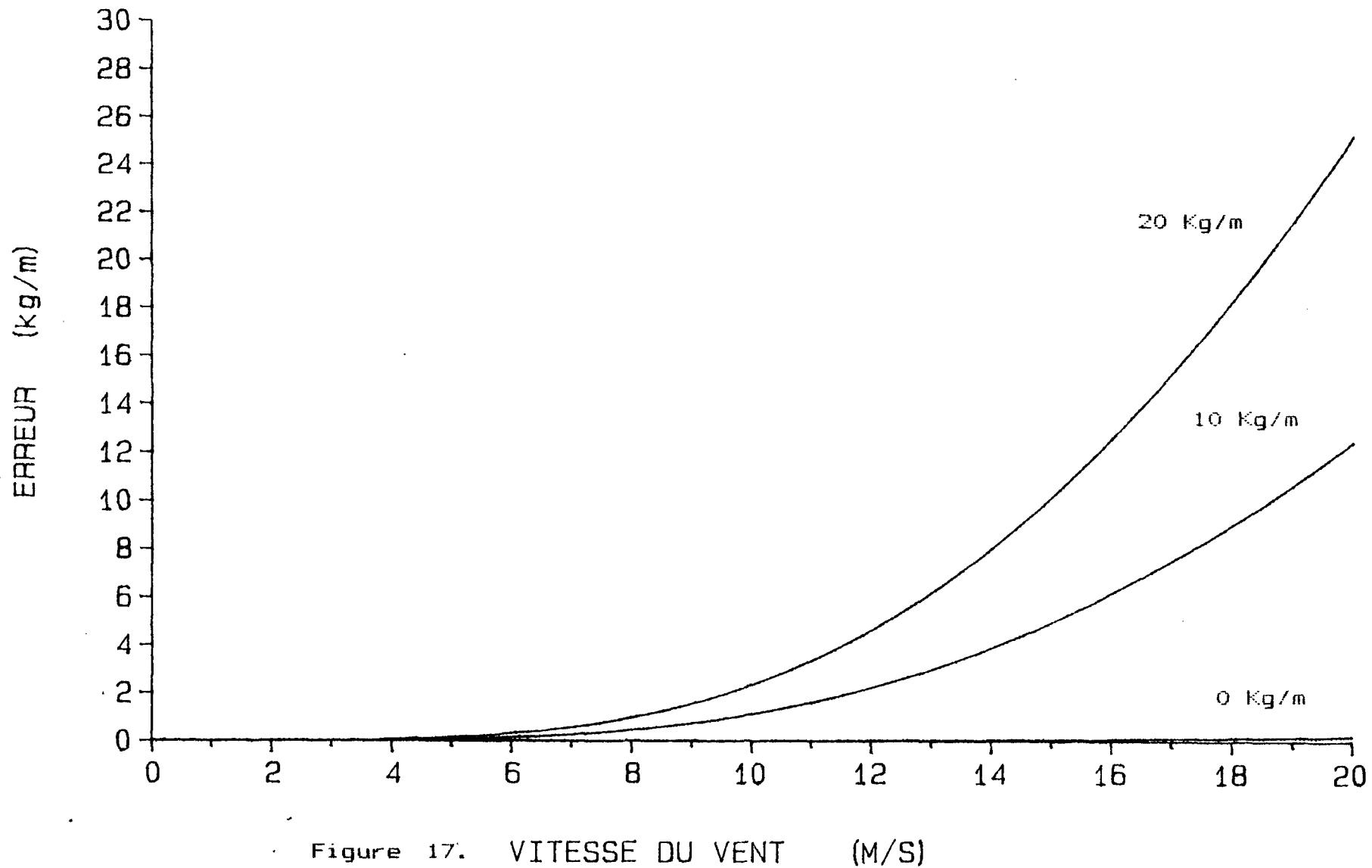


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

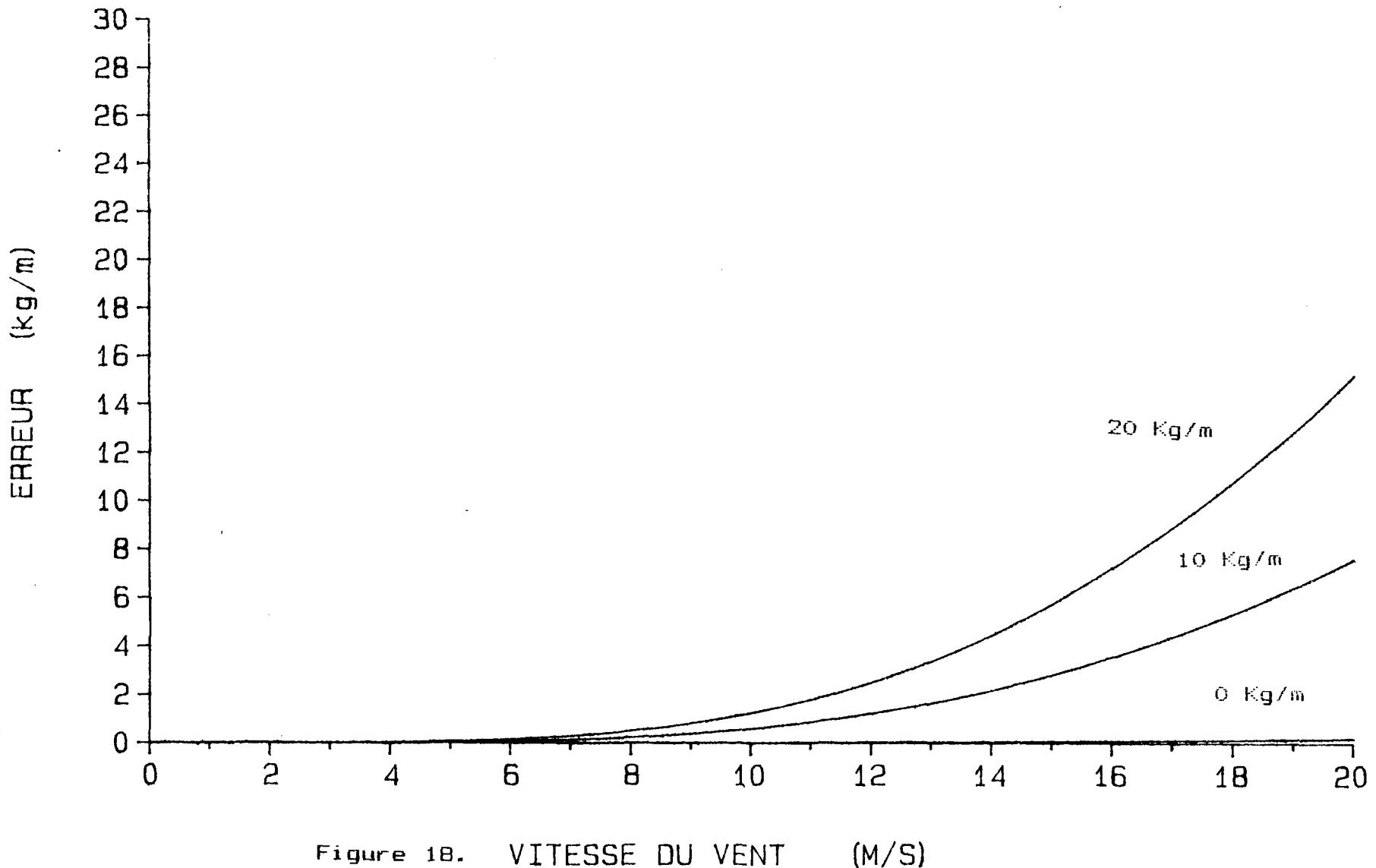


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM3

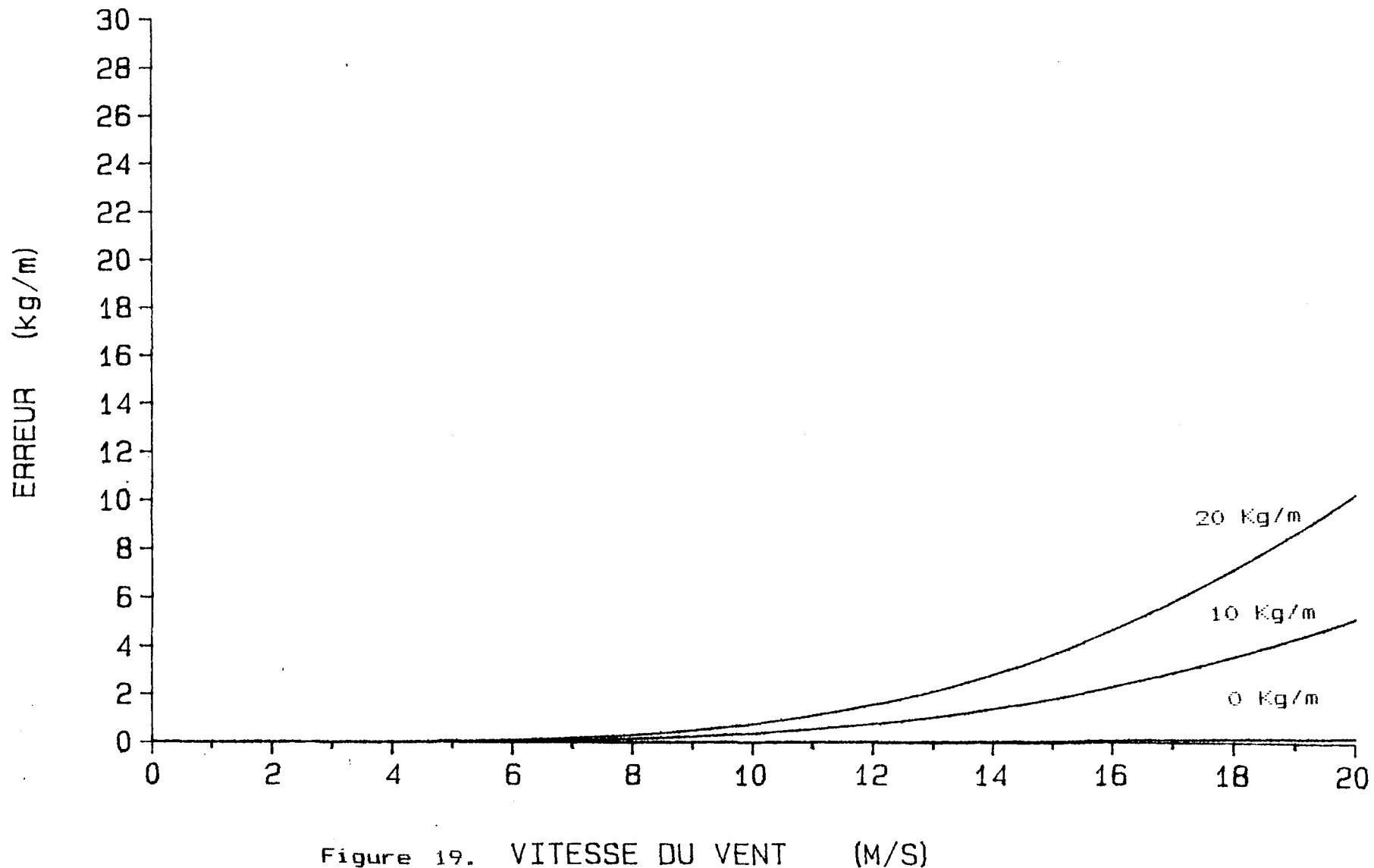


Figure 19. VITESSE DU VENT (M/S)

PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

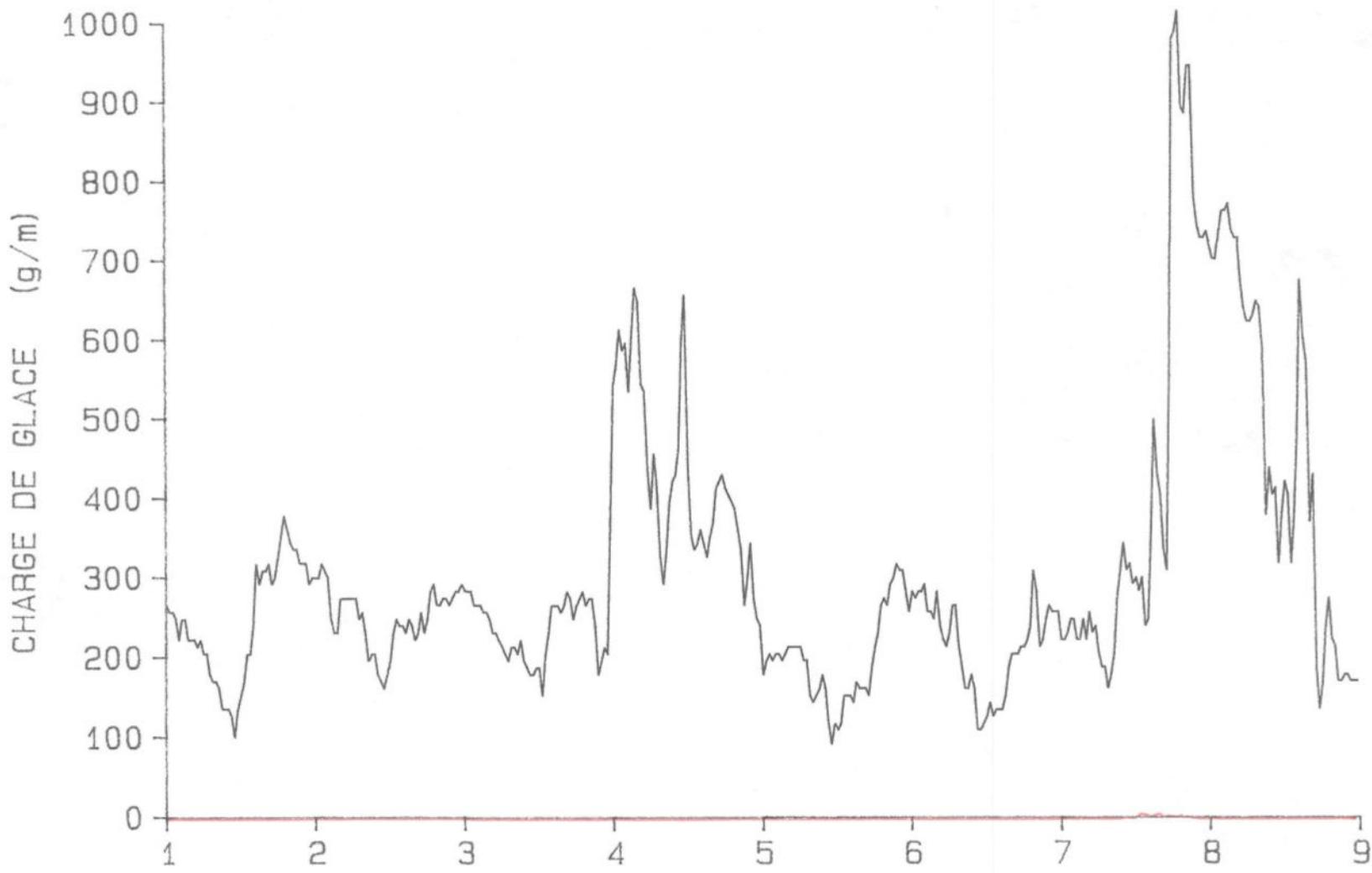


FIGURE 20-JOURS

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

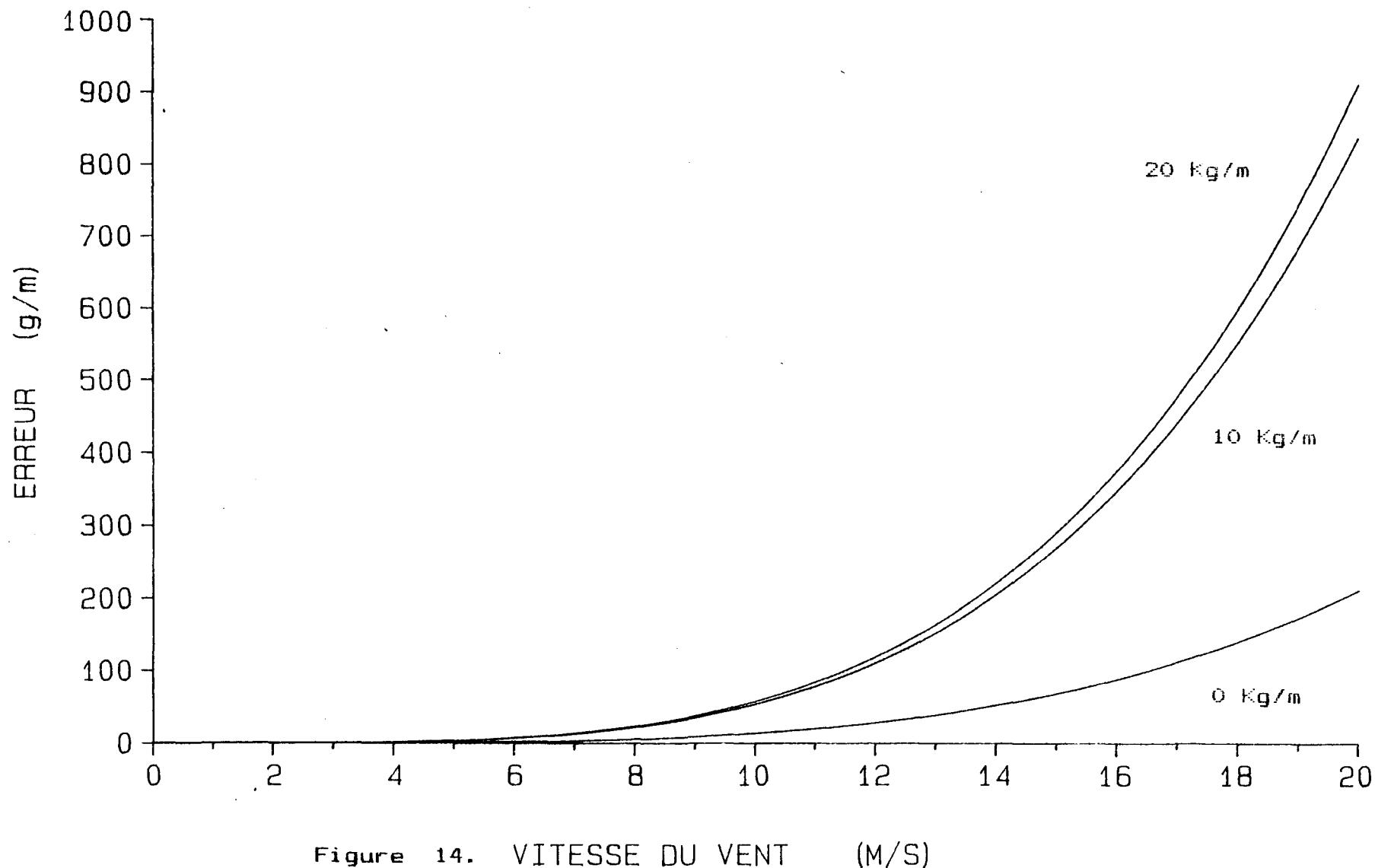


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

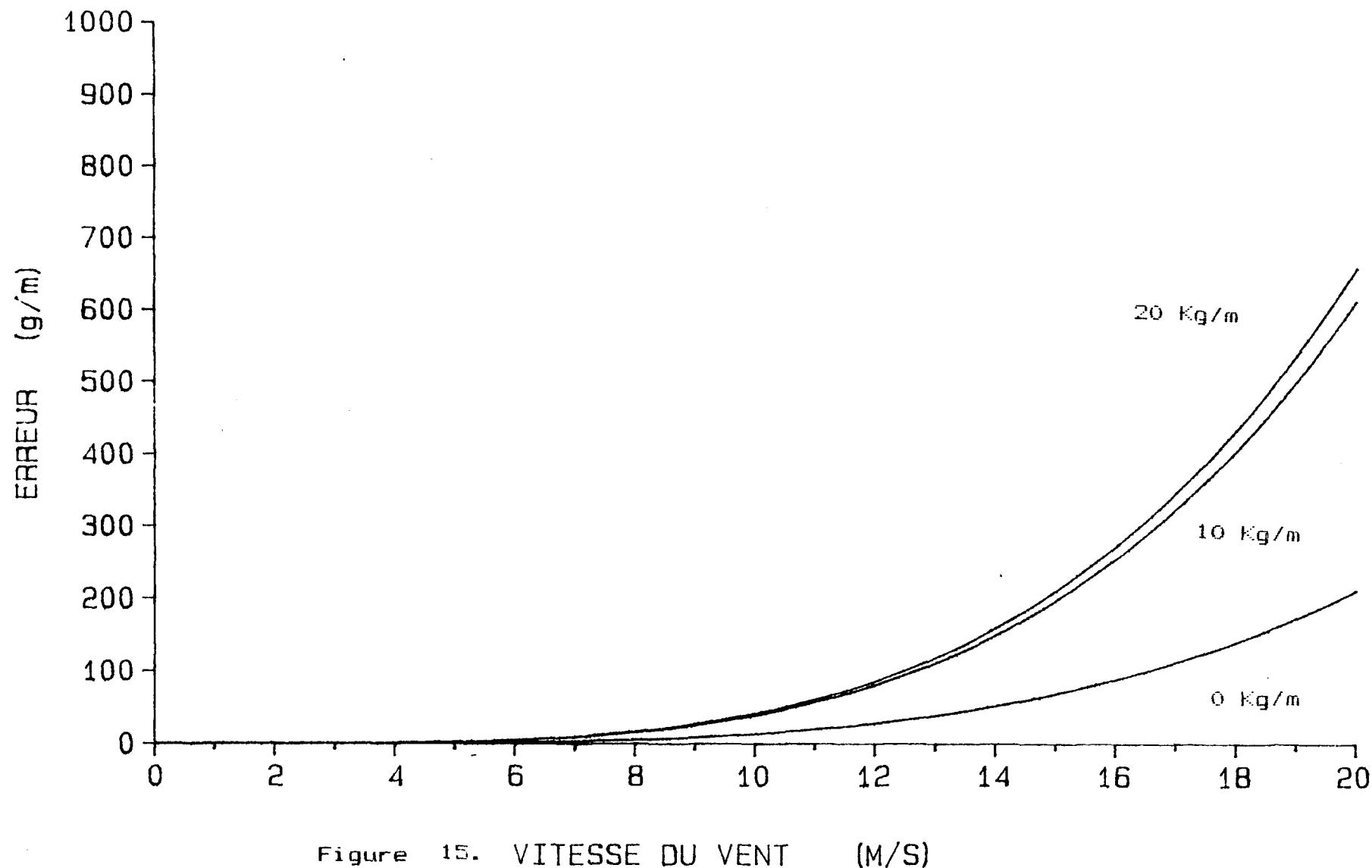


Figure 15. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

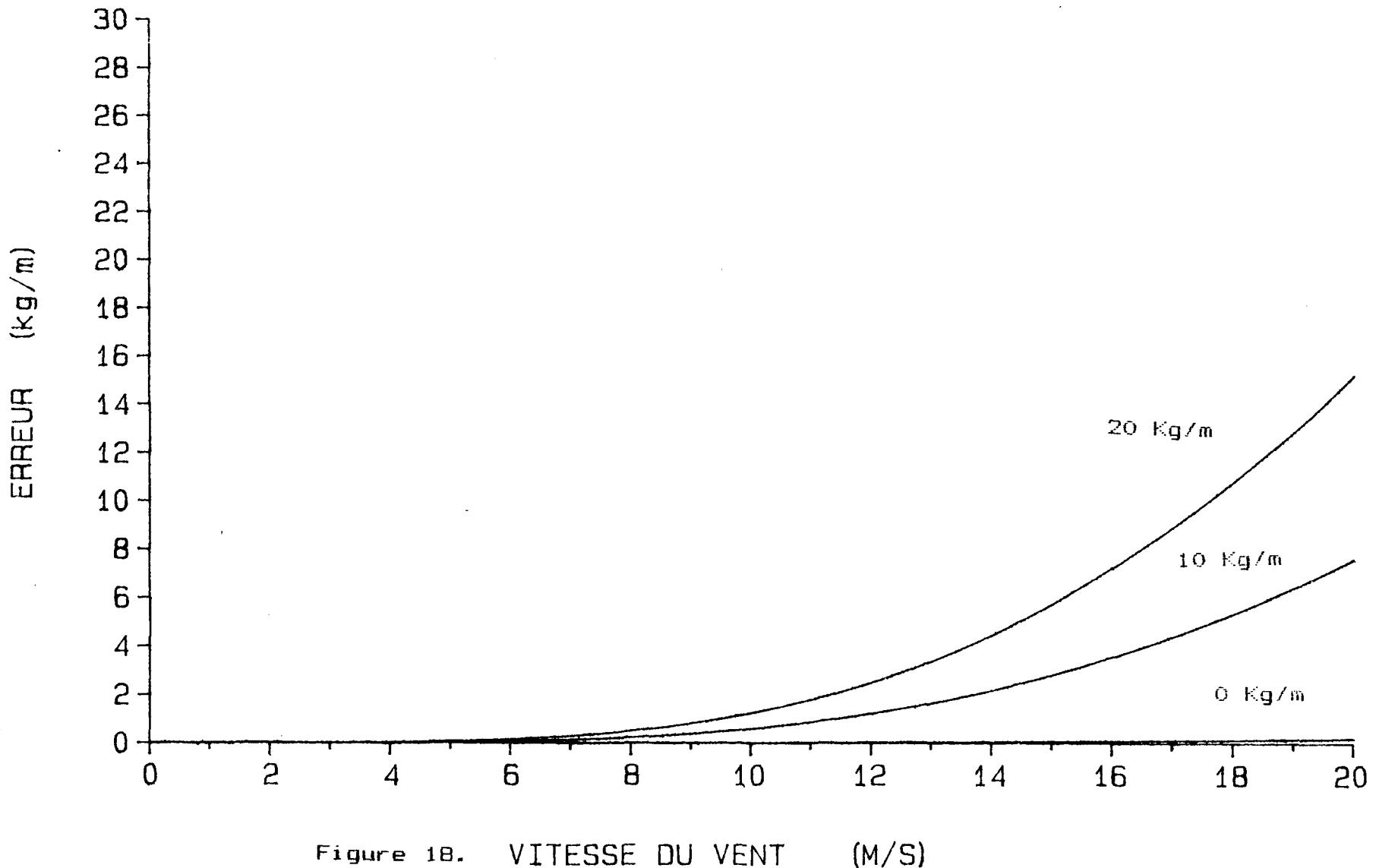


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM3

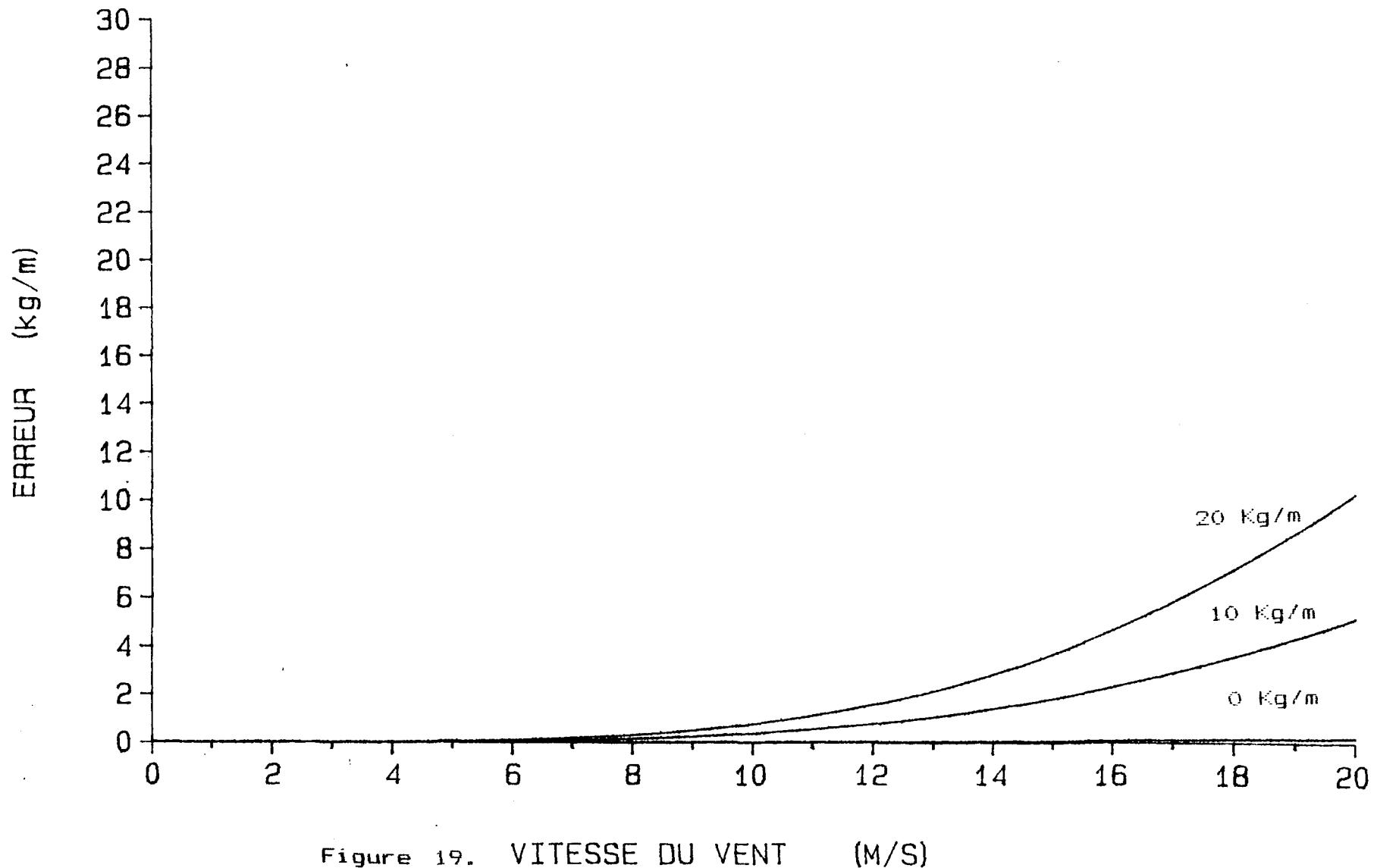
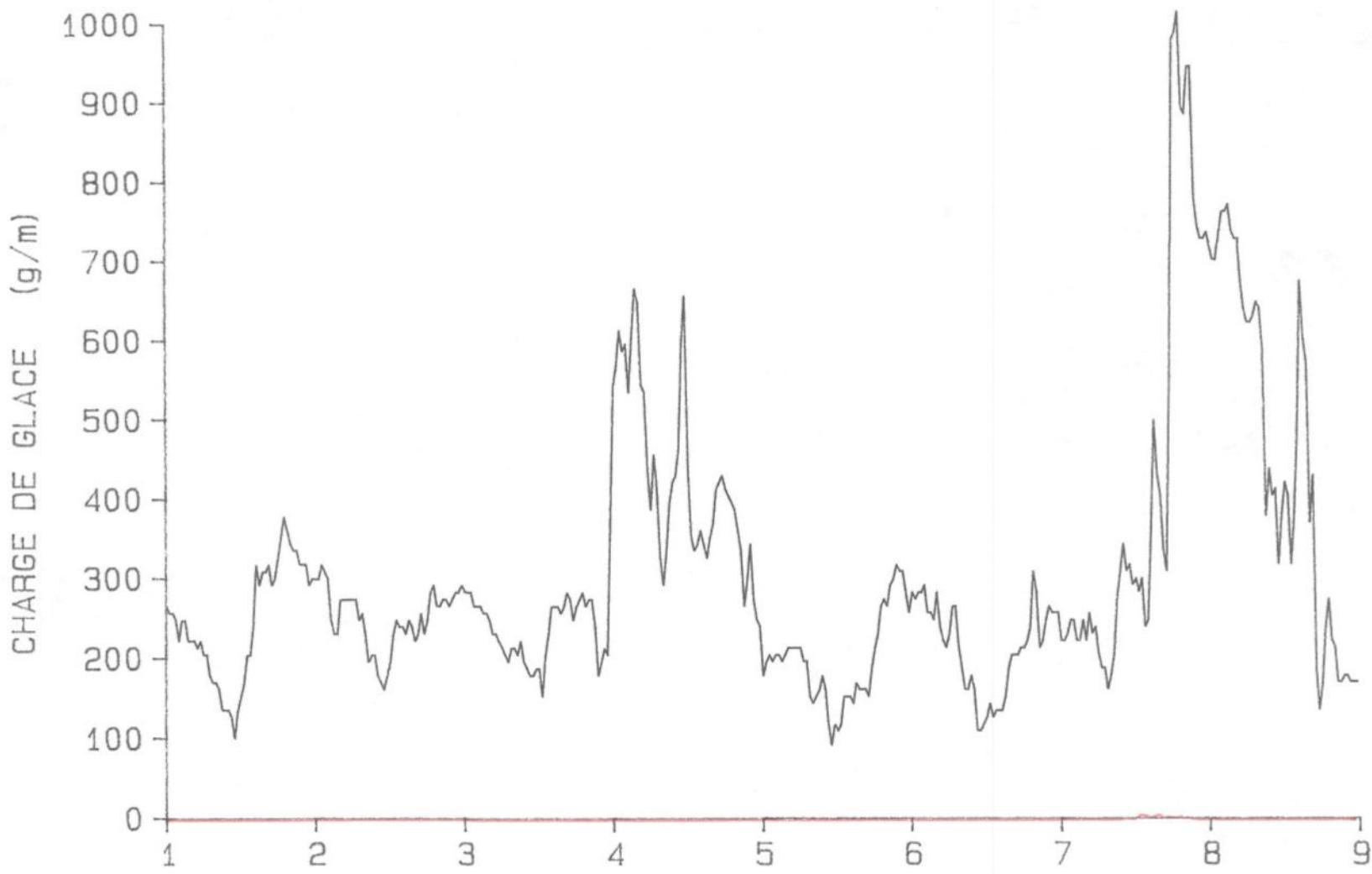


Figure 19. VITESSE DU VENT (M/S)

PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

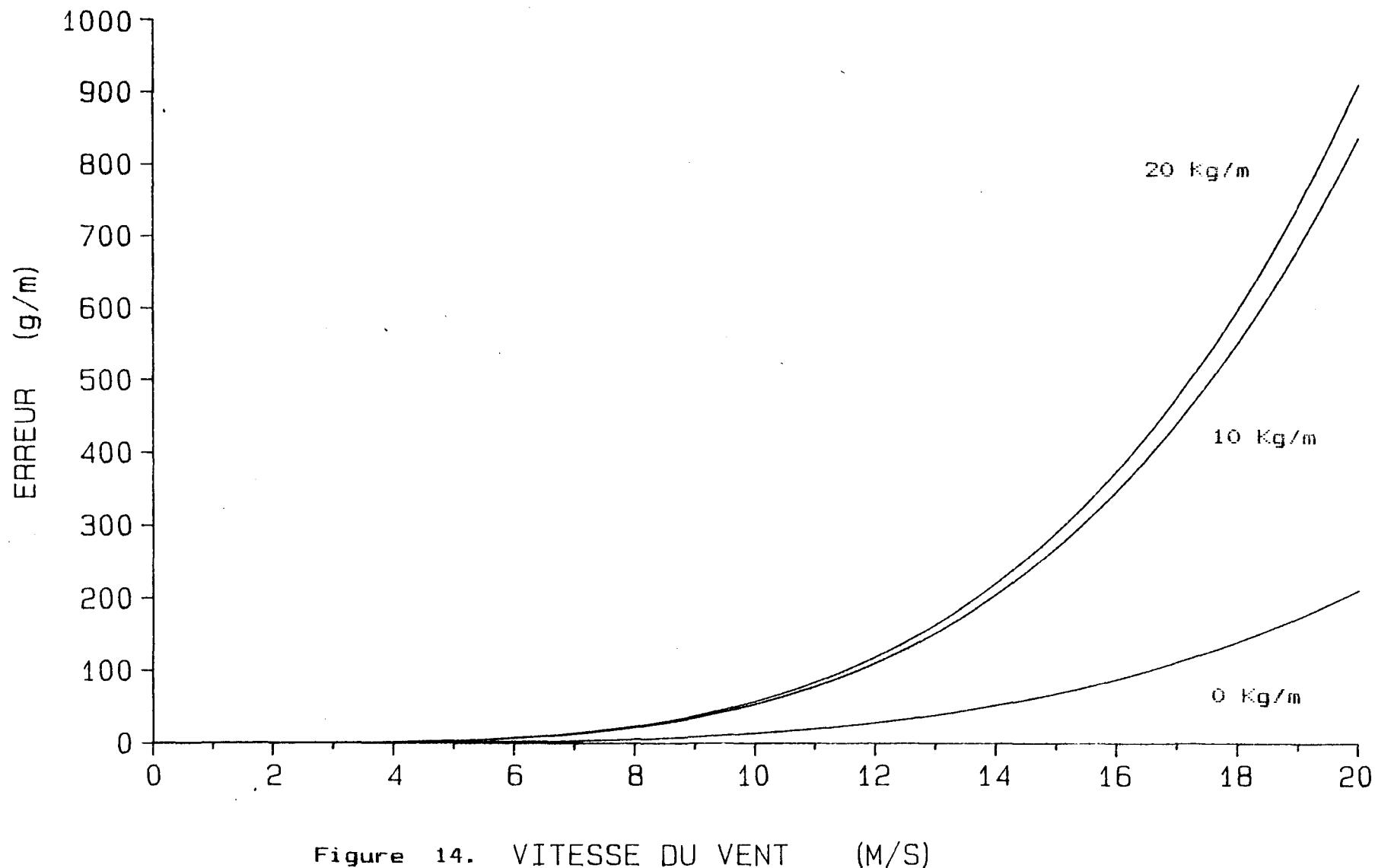


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

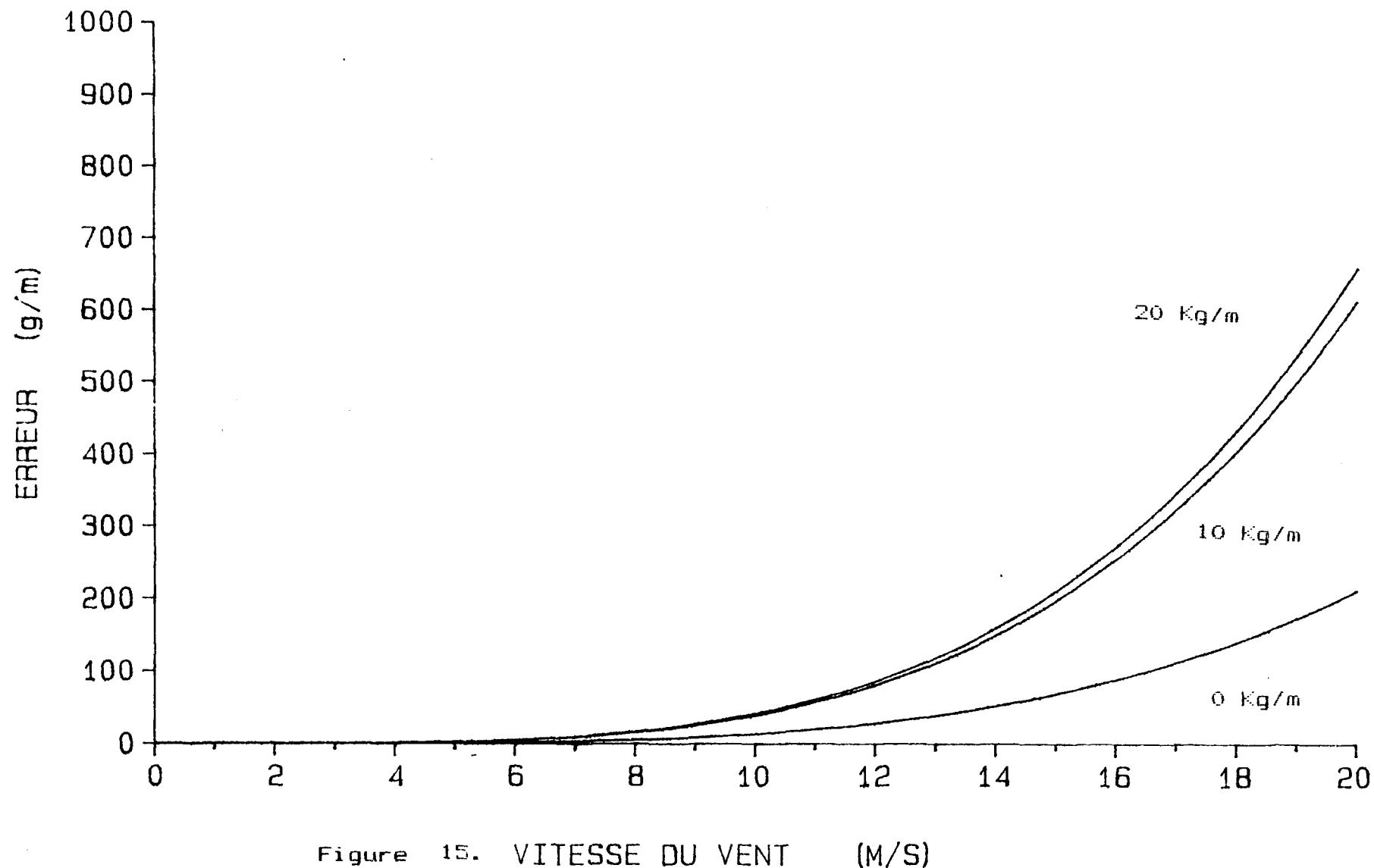


Figure 15. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM<sup>3</sup>

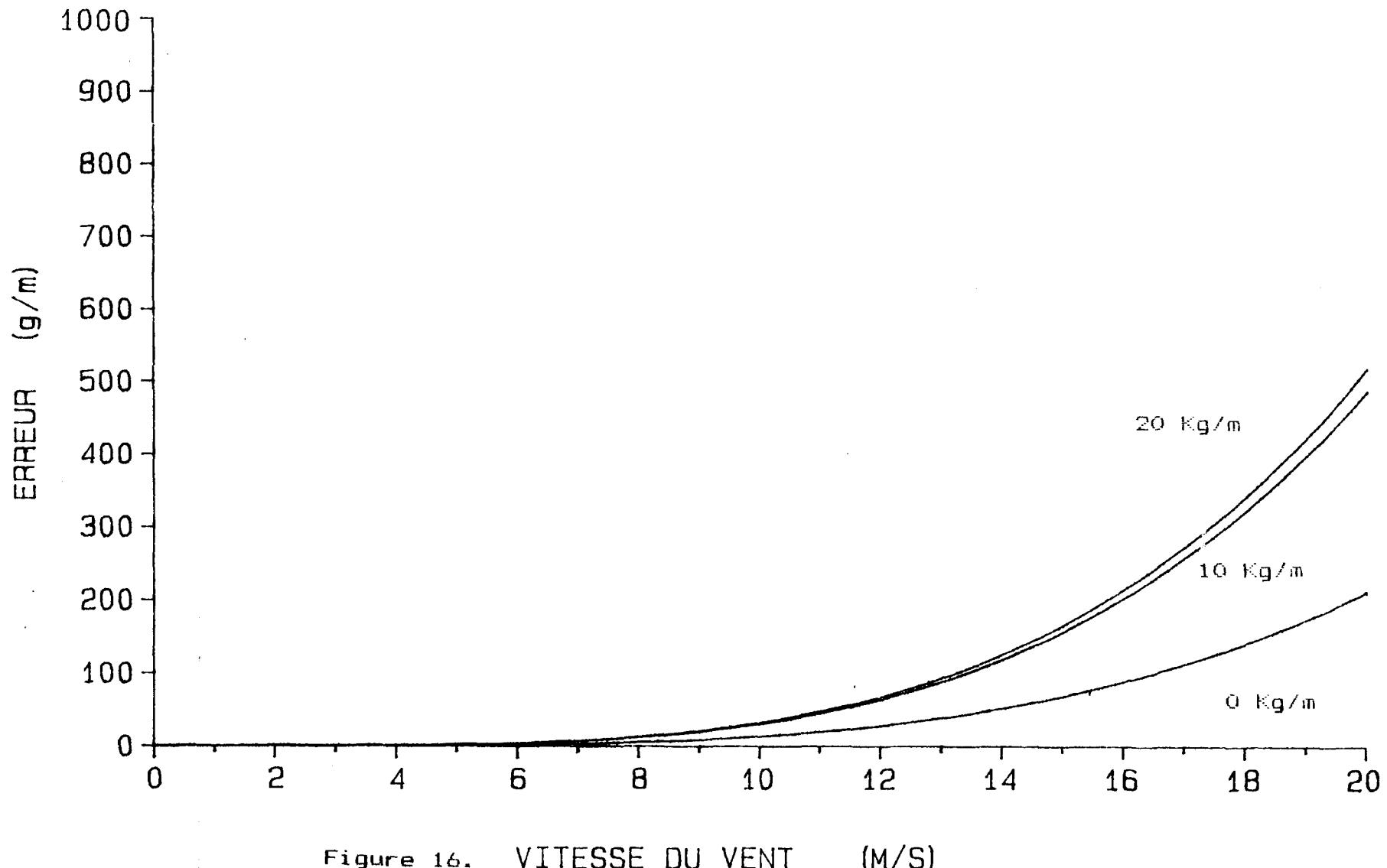
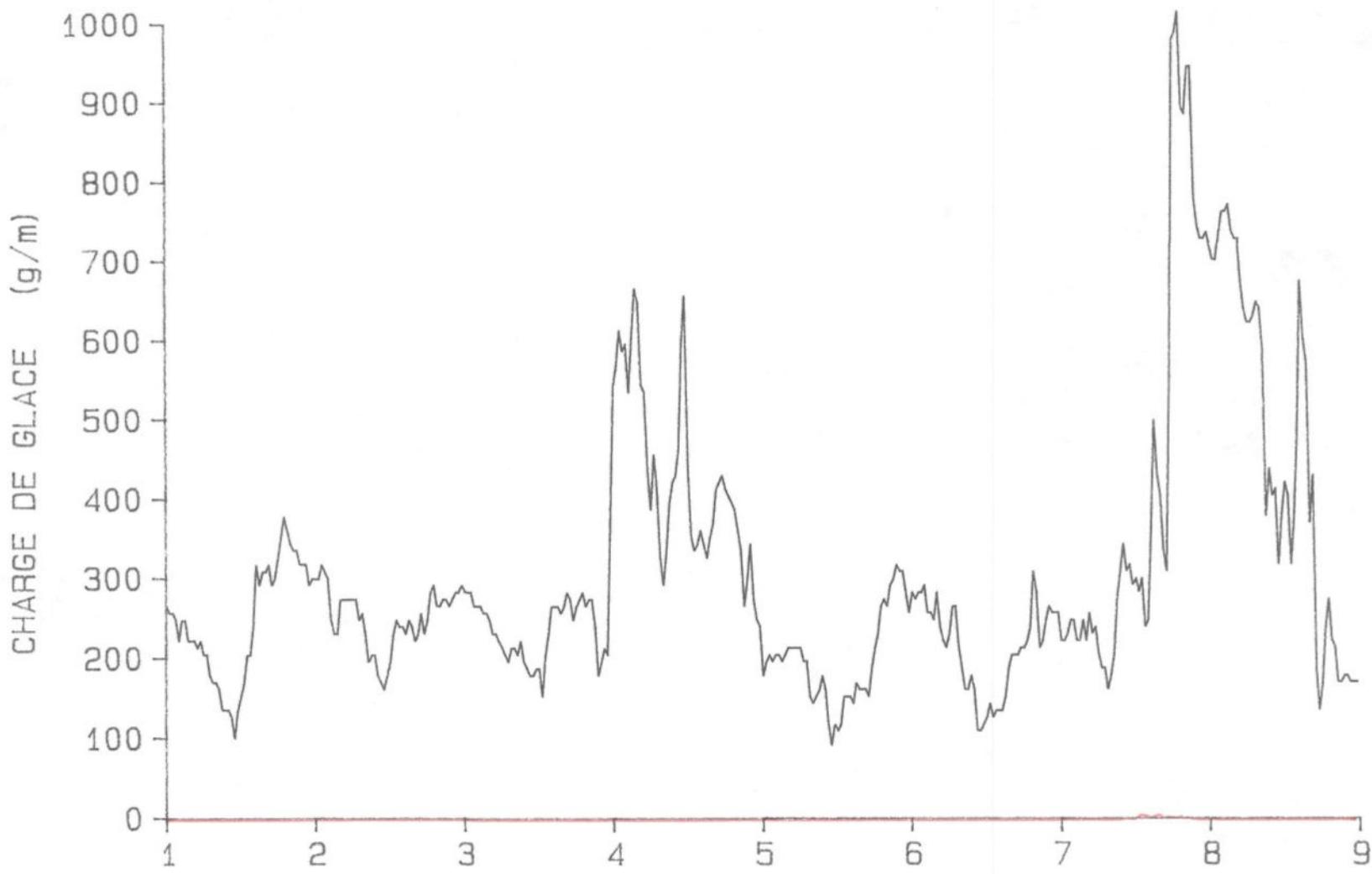


Figure 16. VITESSE DU VENT (M/S)

PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

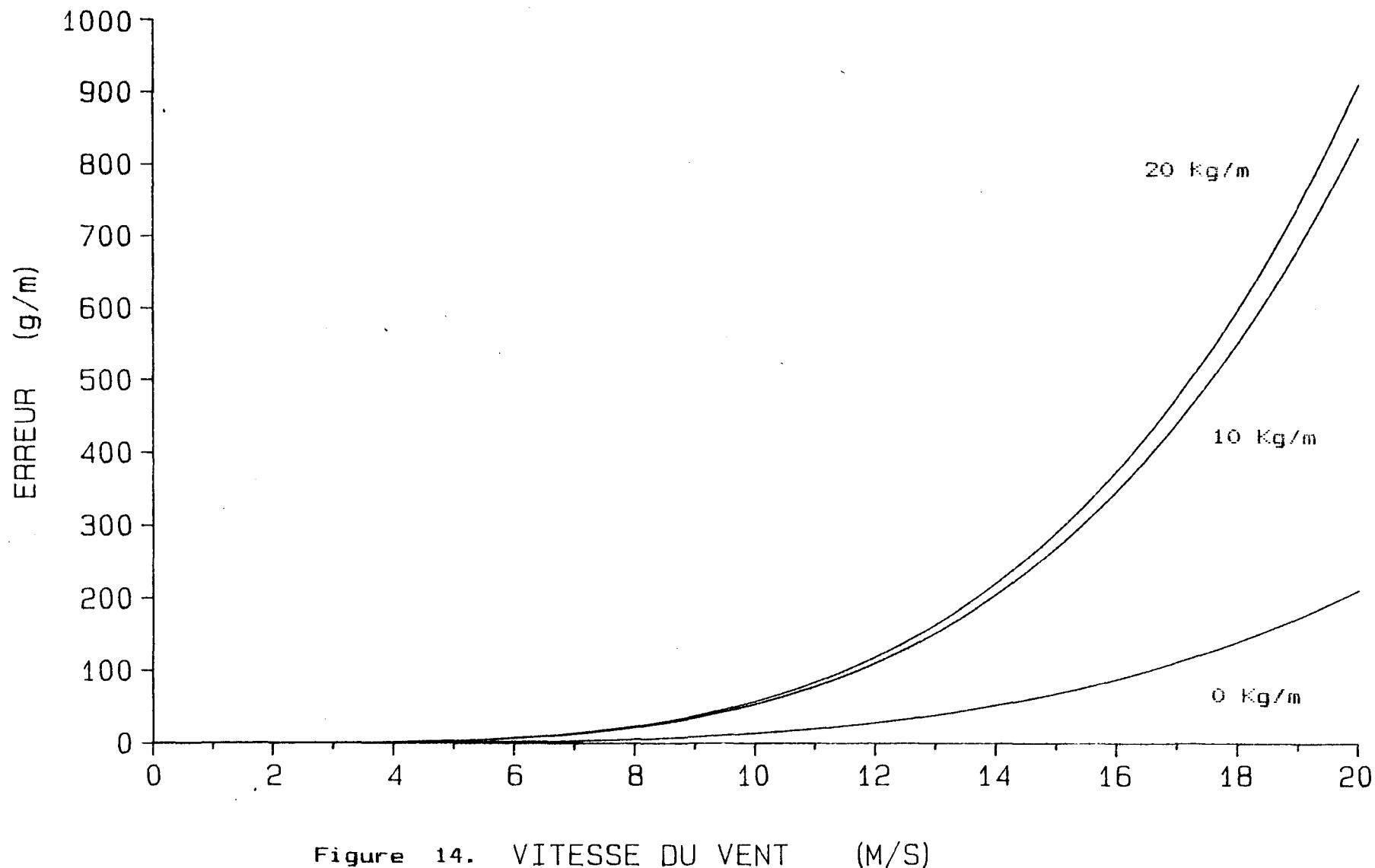


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

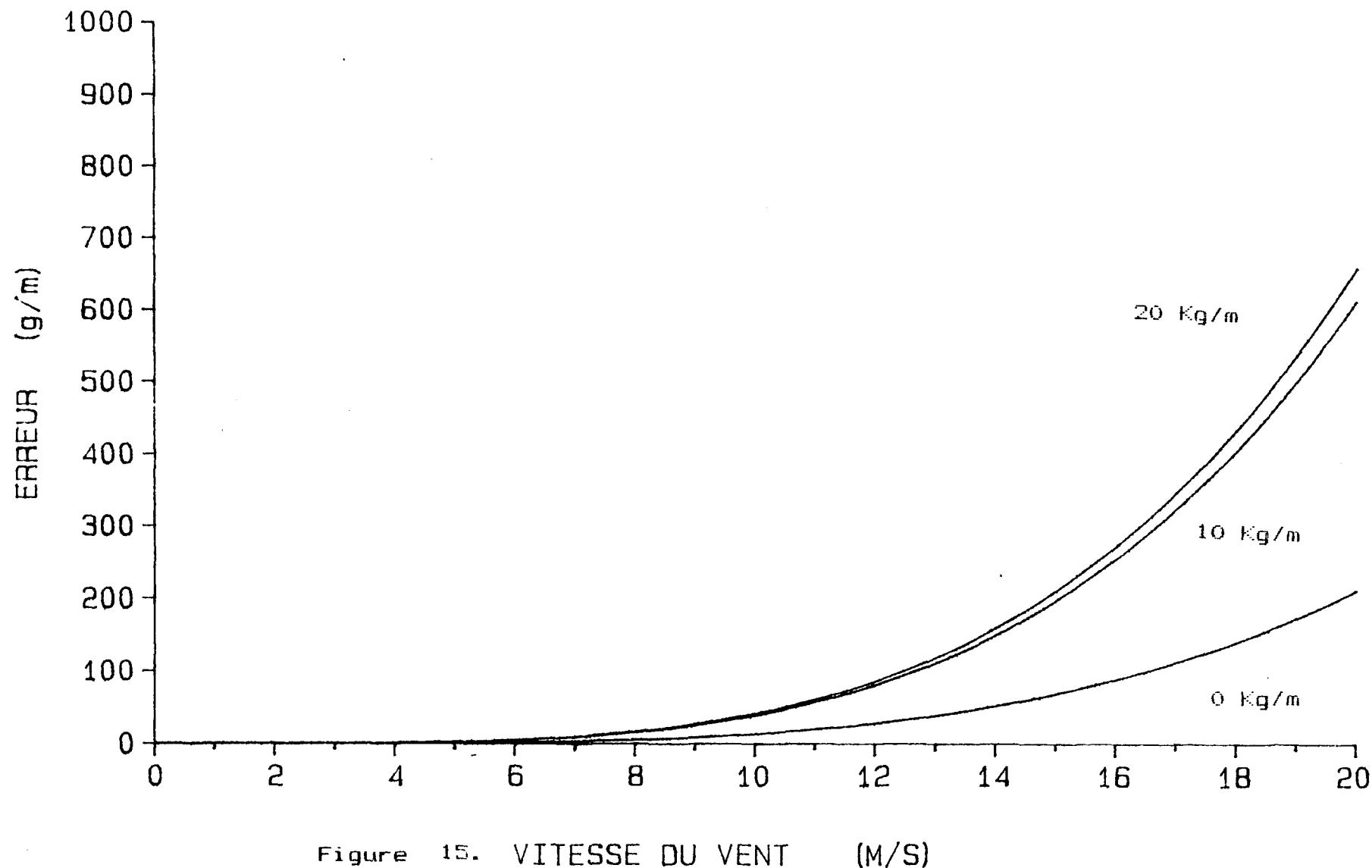


Figure 15. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM<sup>3</sup>

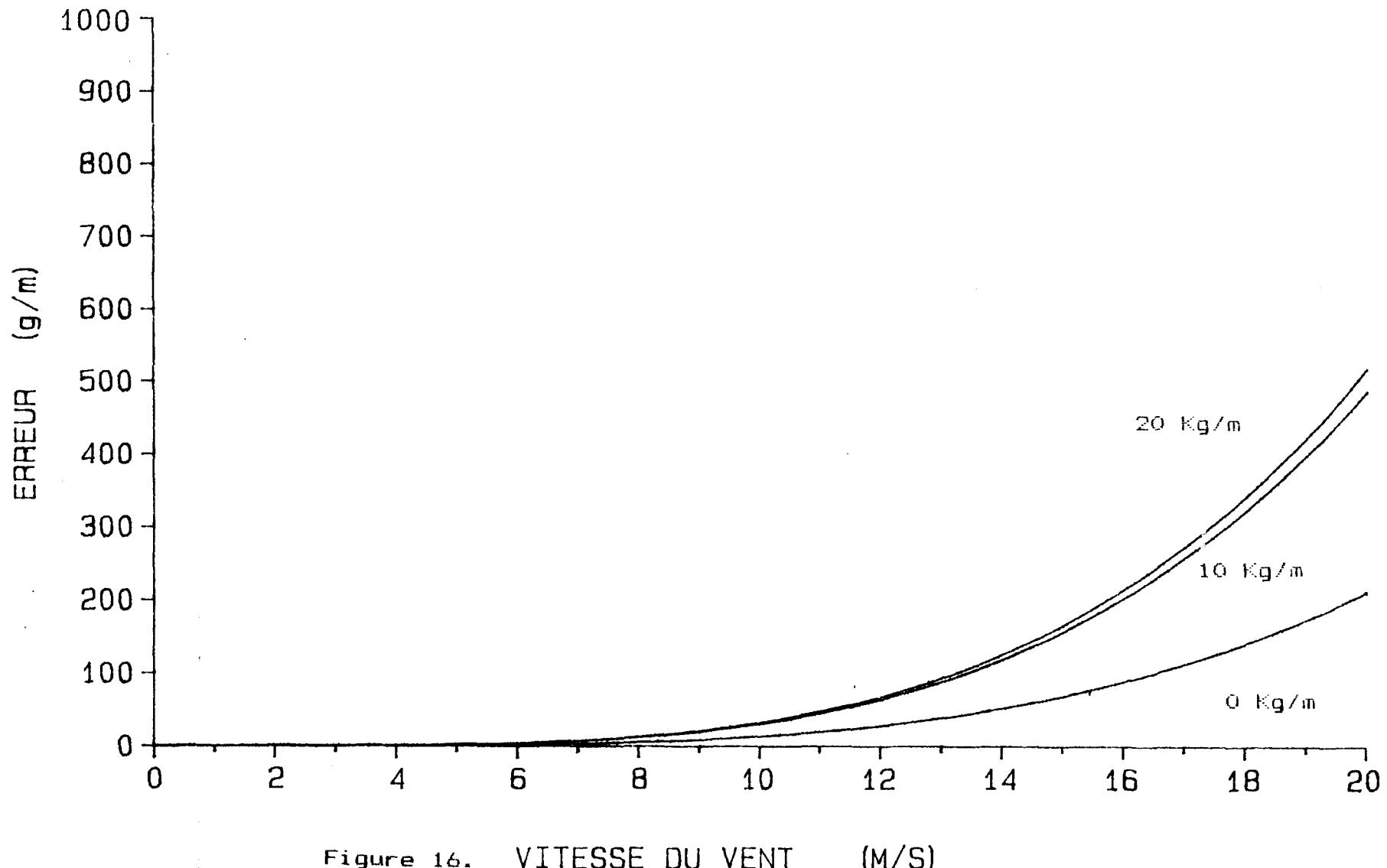


Figure 16. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

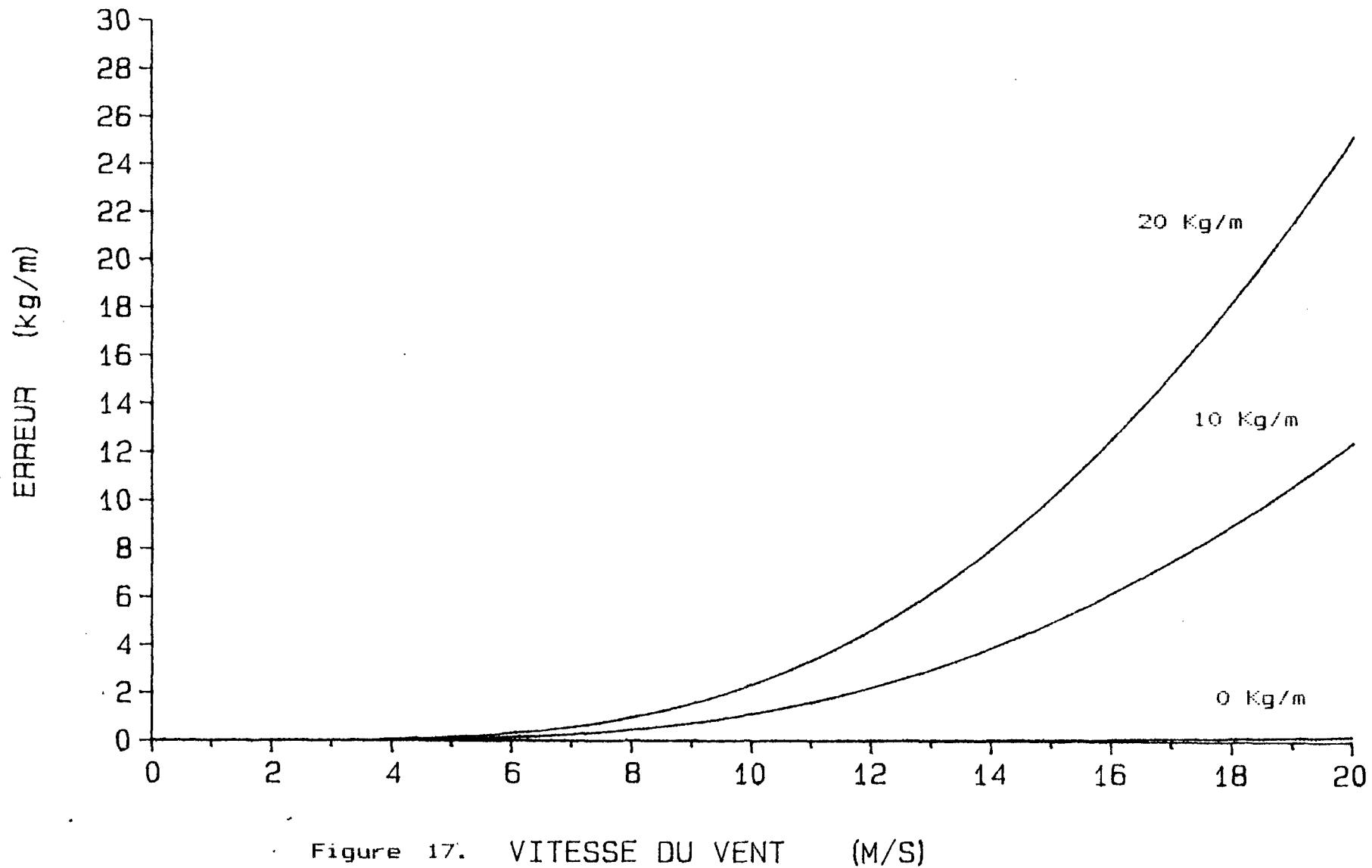
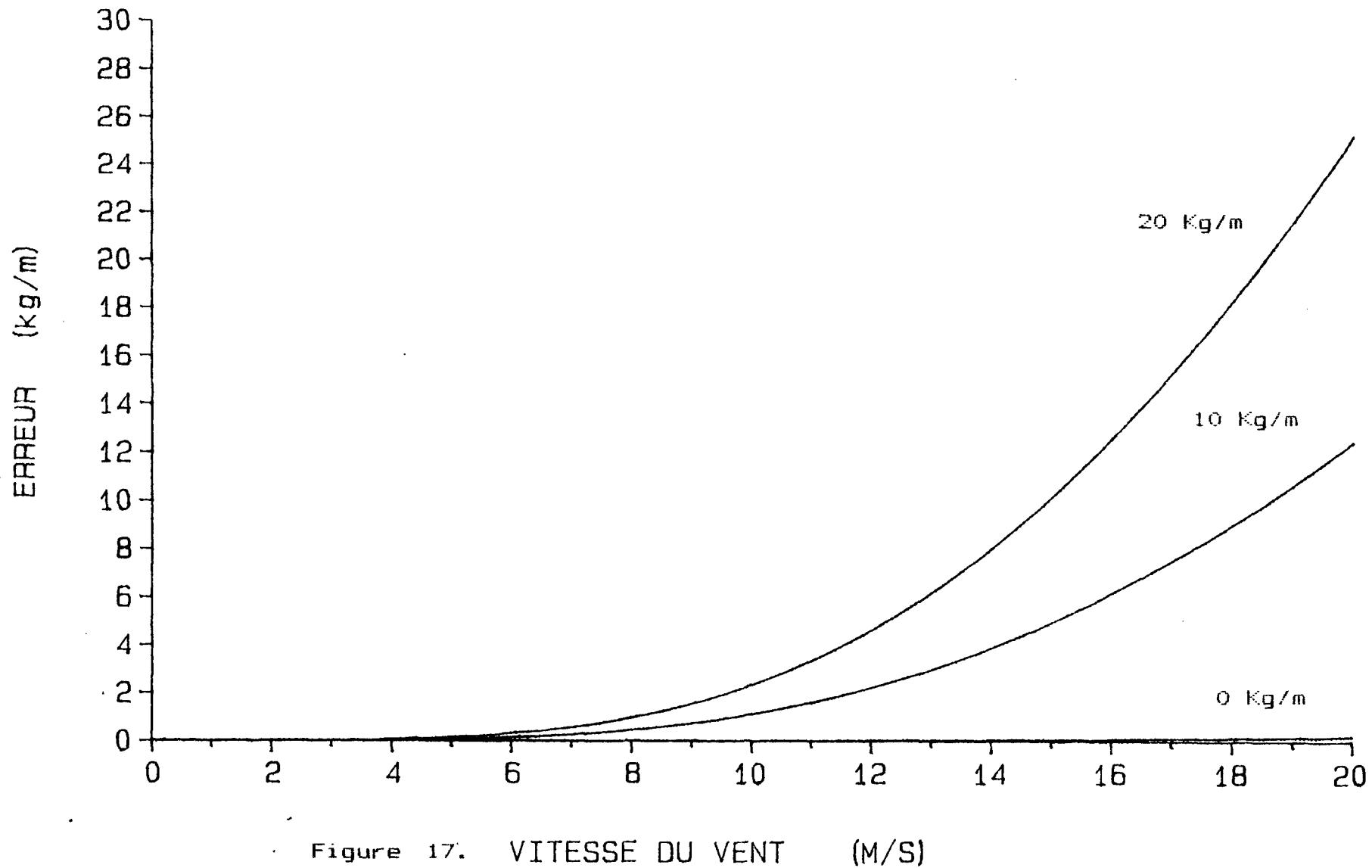


Figure 17. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

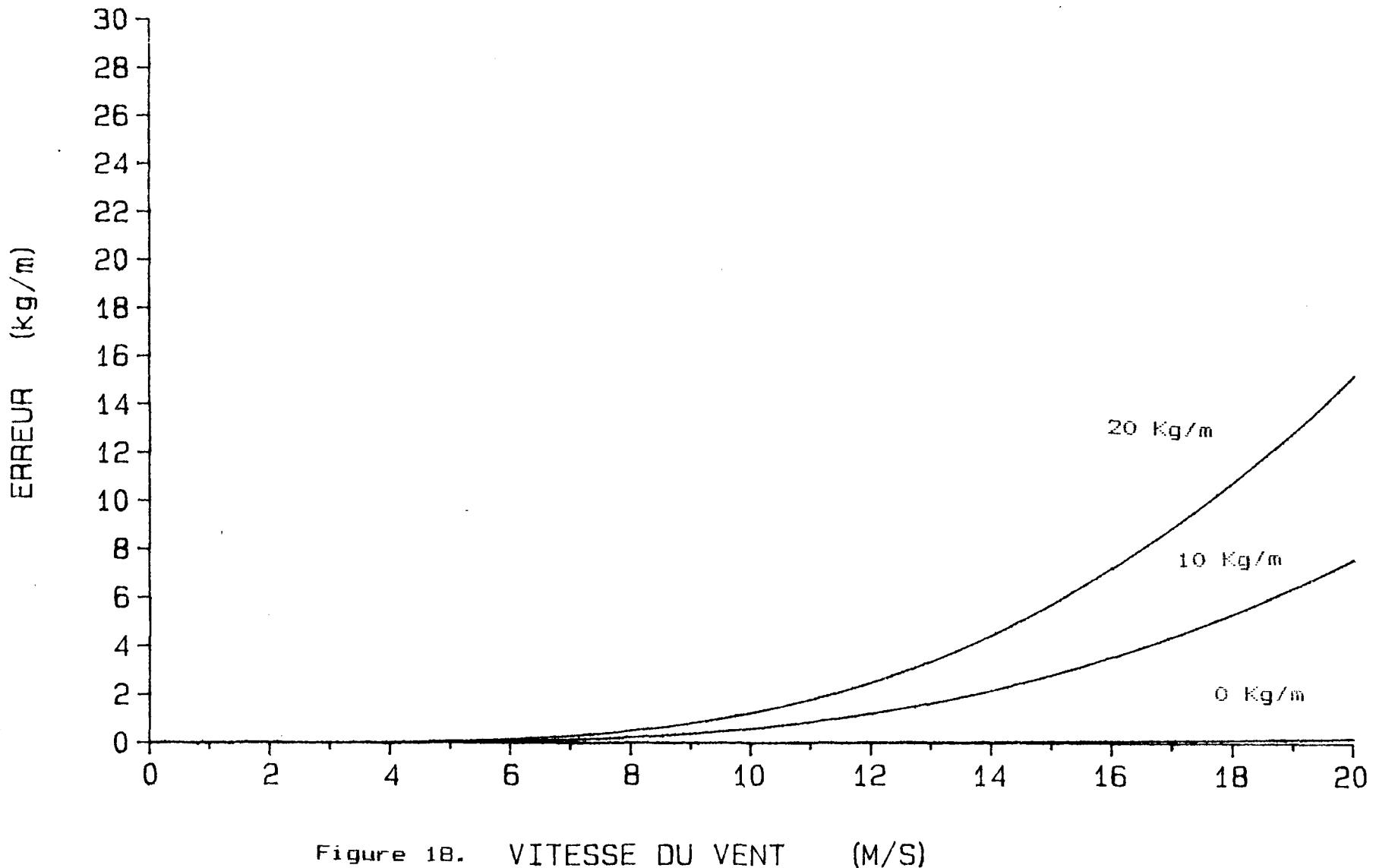


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM3

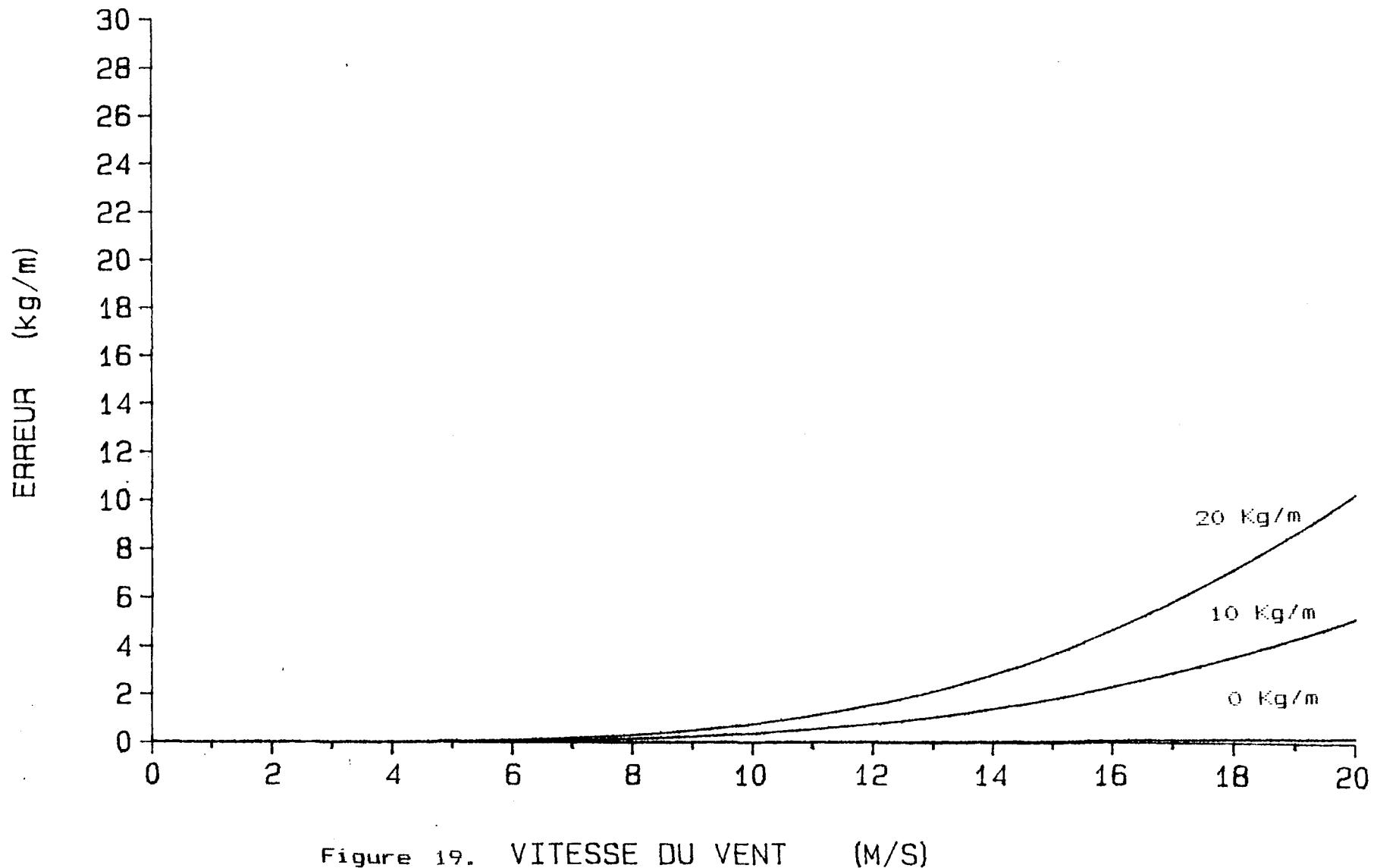
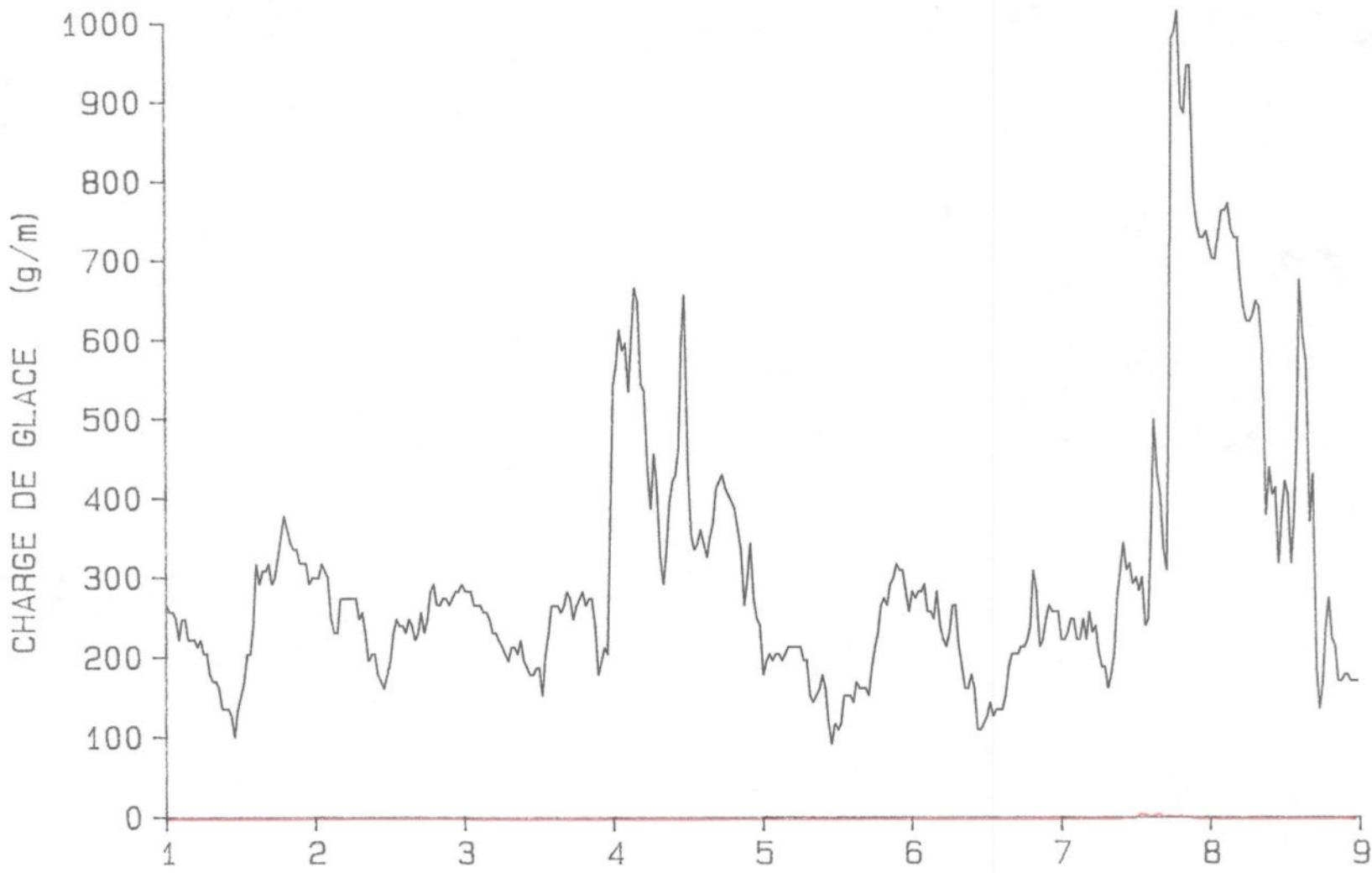


Figure 19. VITESSE DU VENT (M/S)

PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

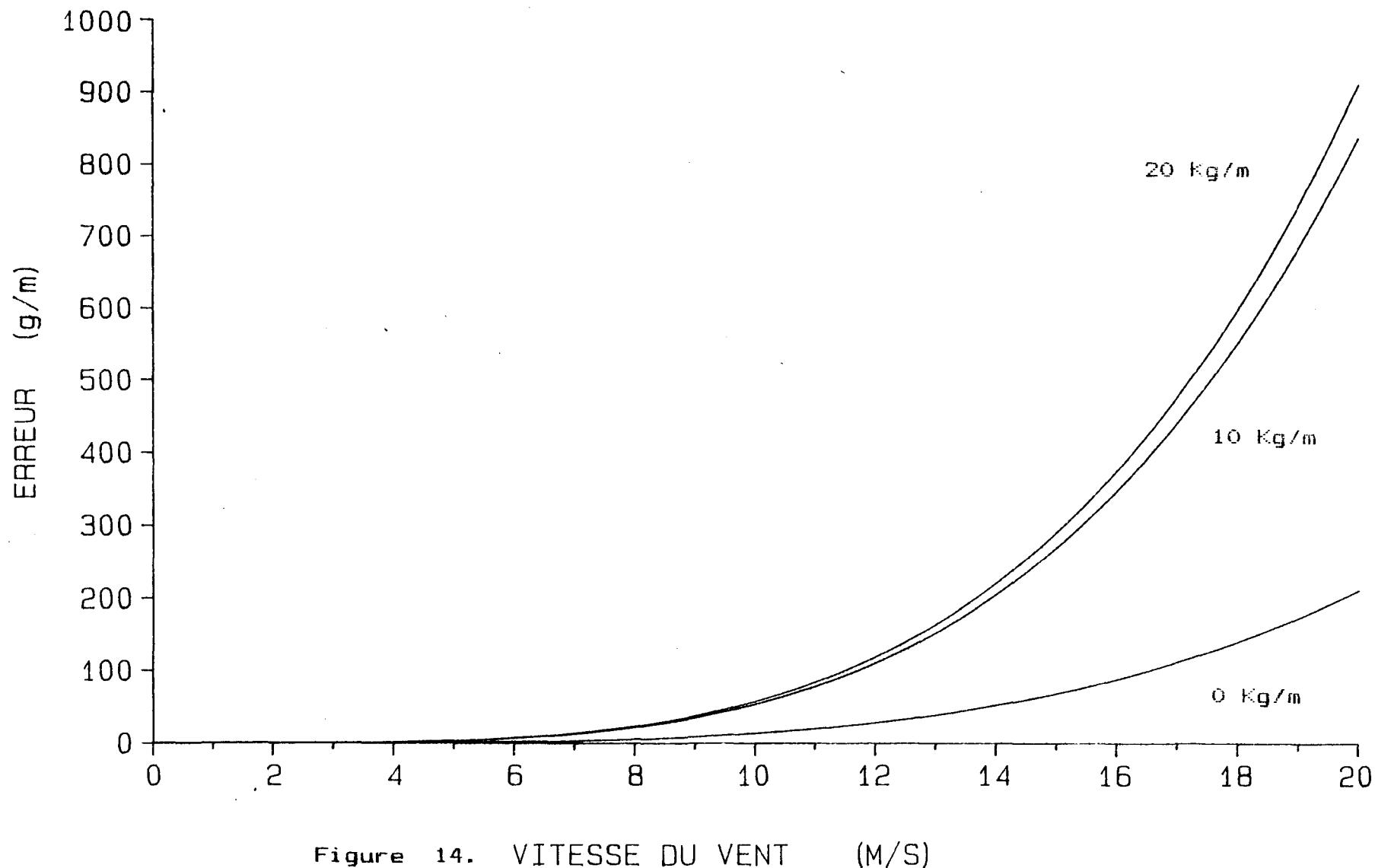


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

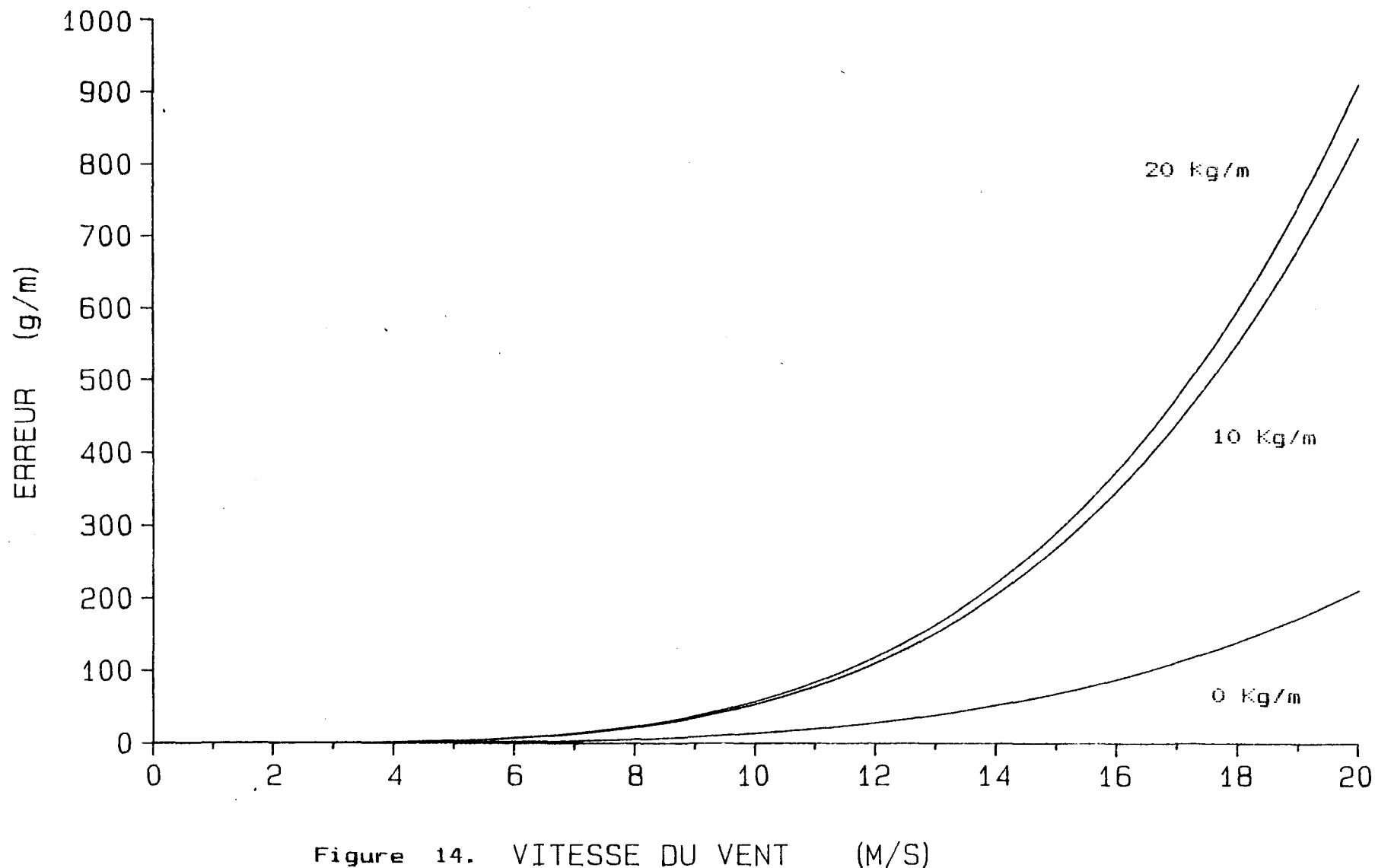


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

PERIODE DU 25 DEC. 1986

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

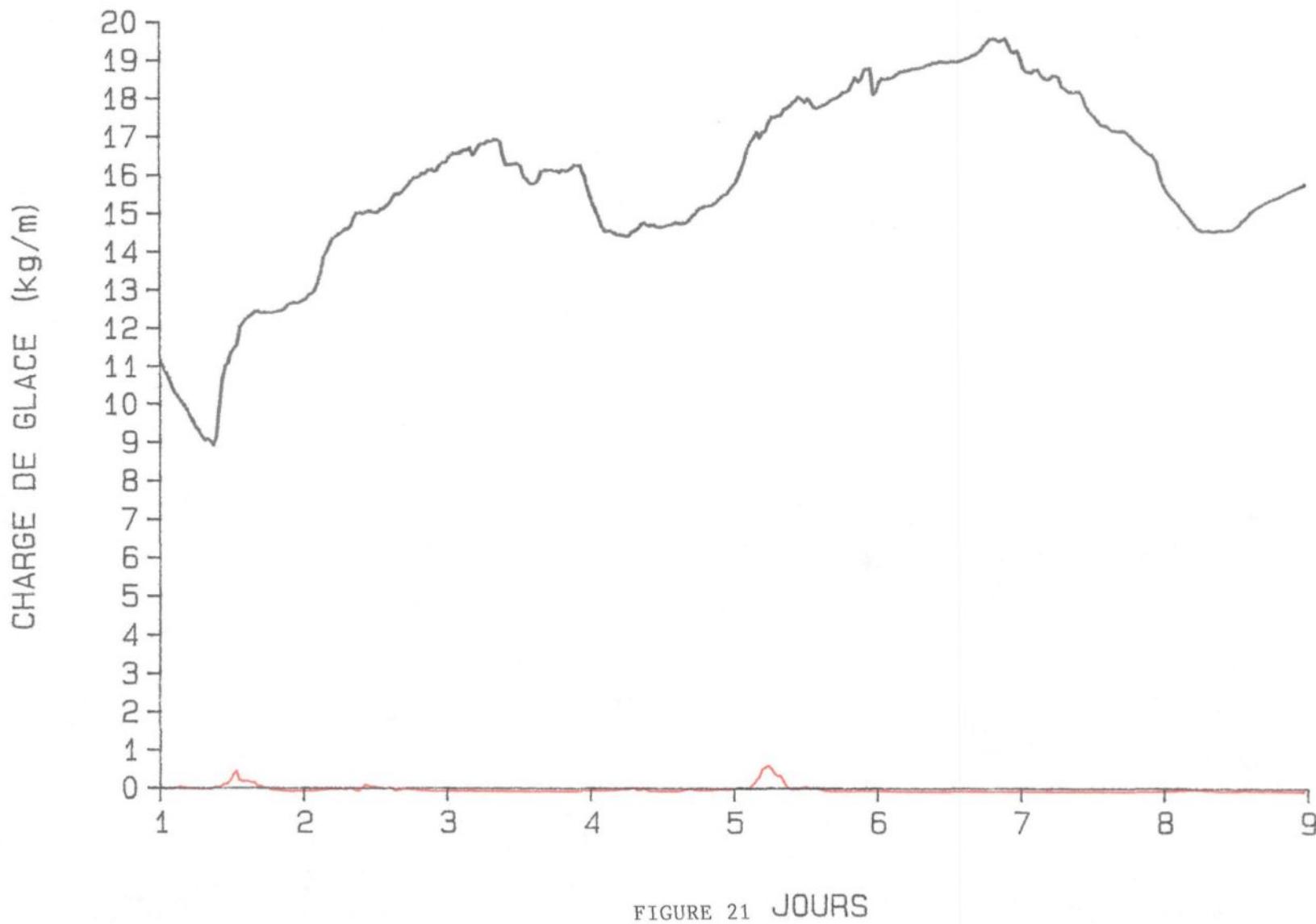
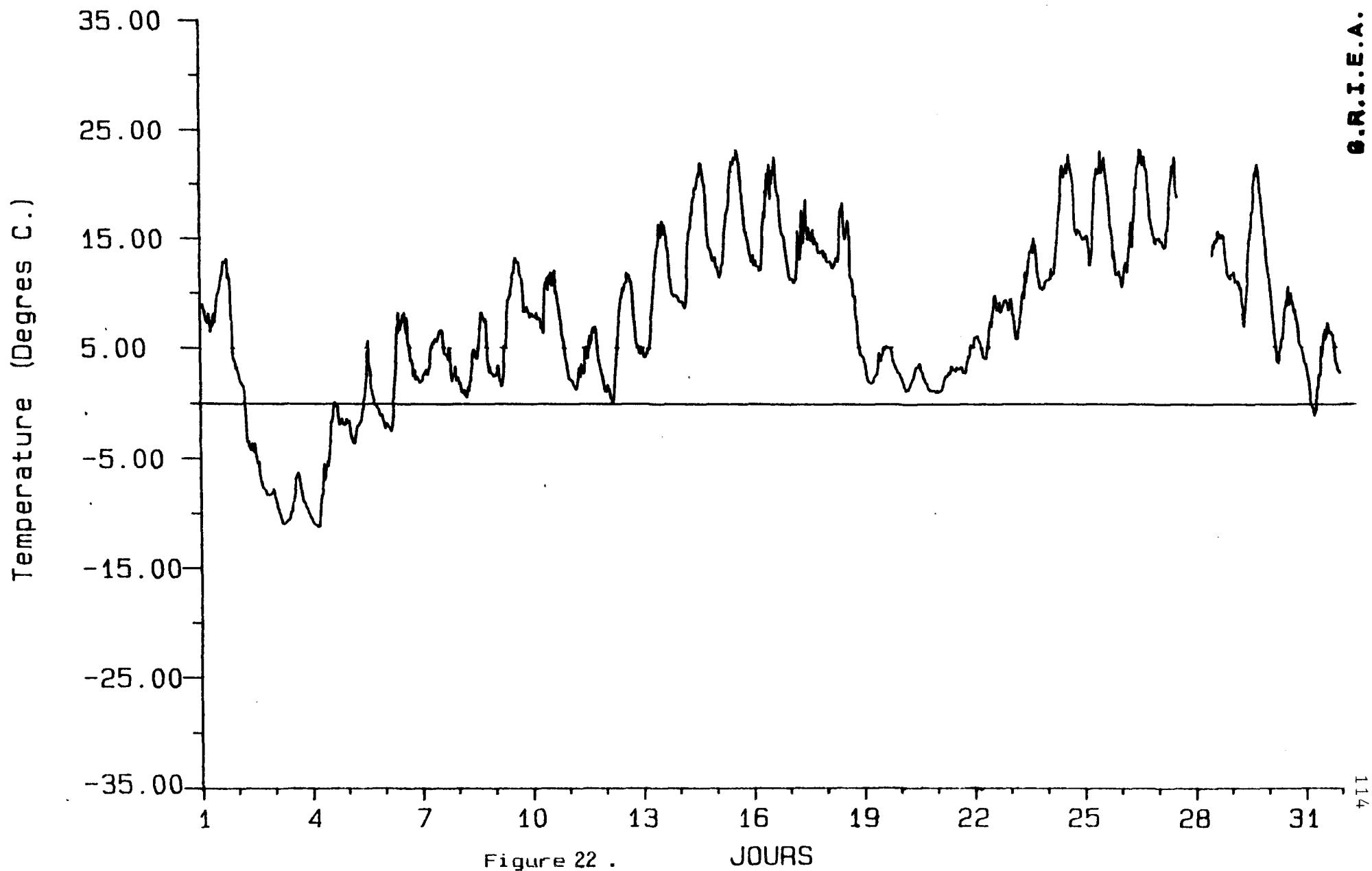
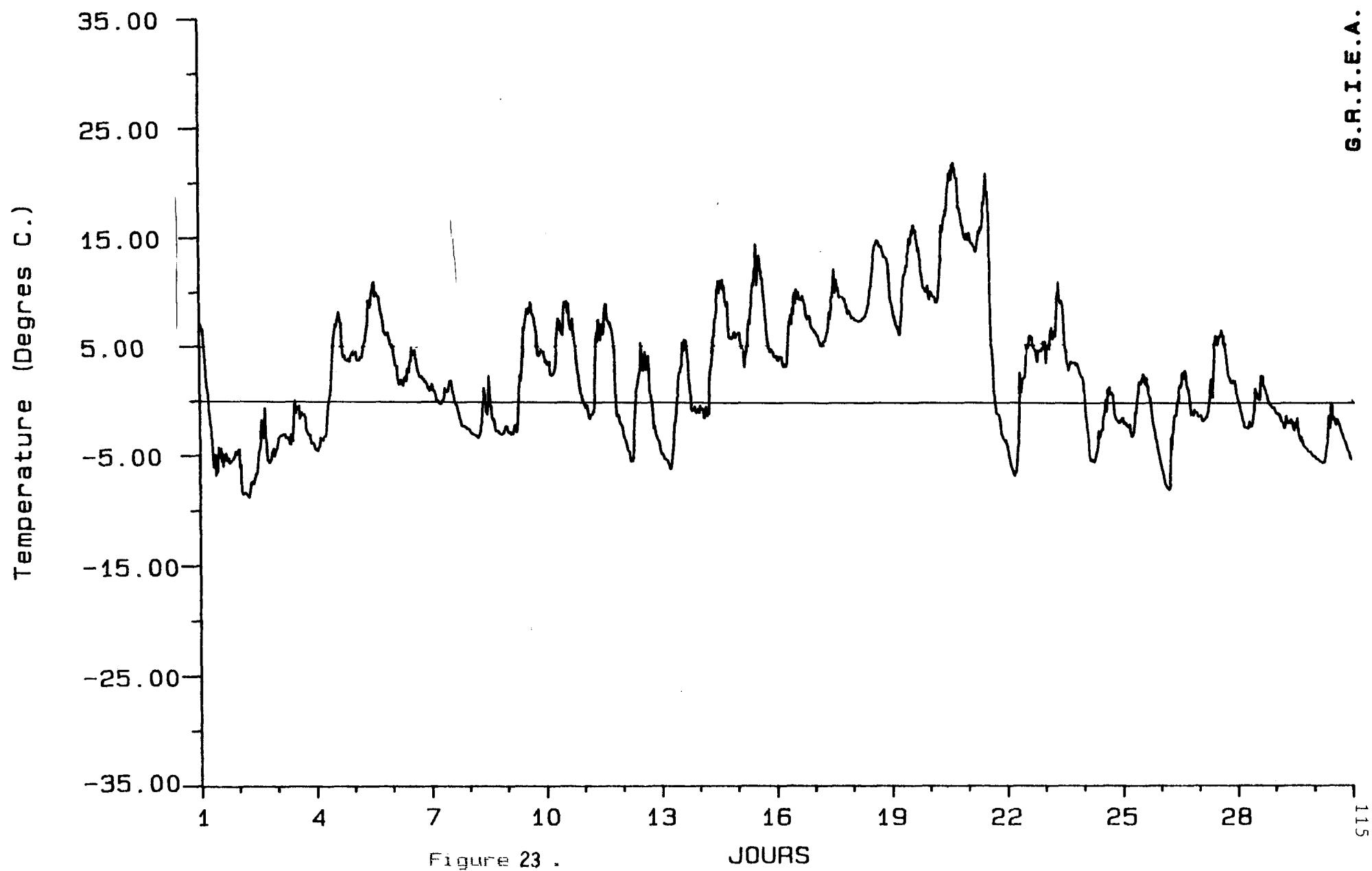


FIGURE 21 JOURS

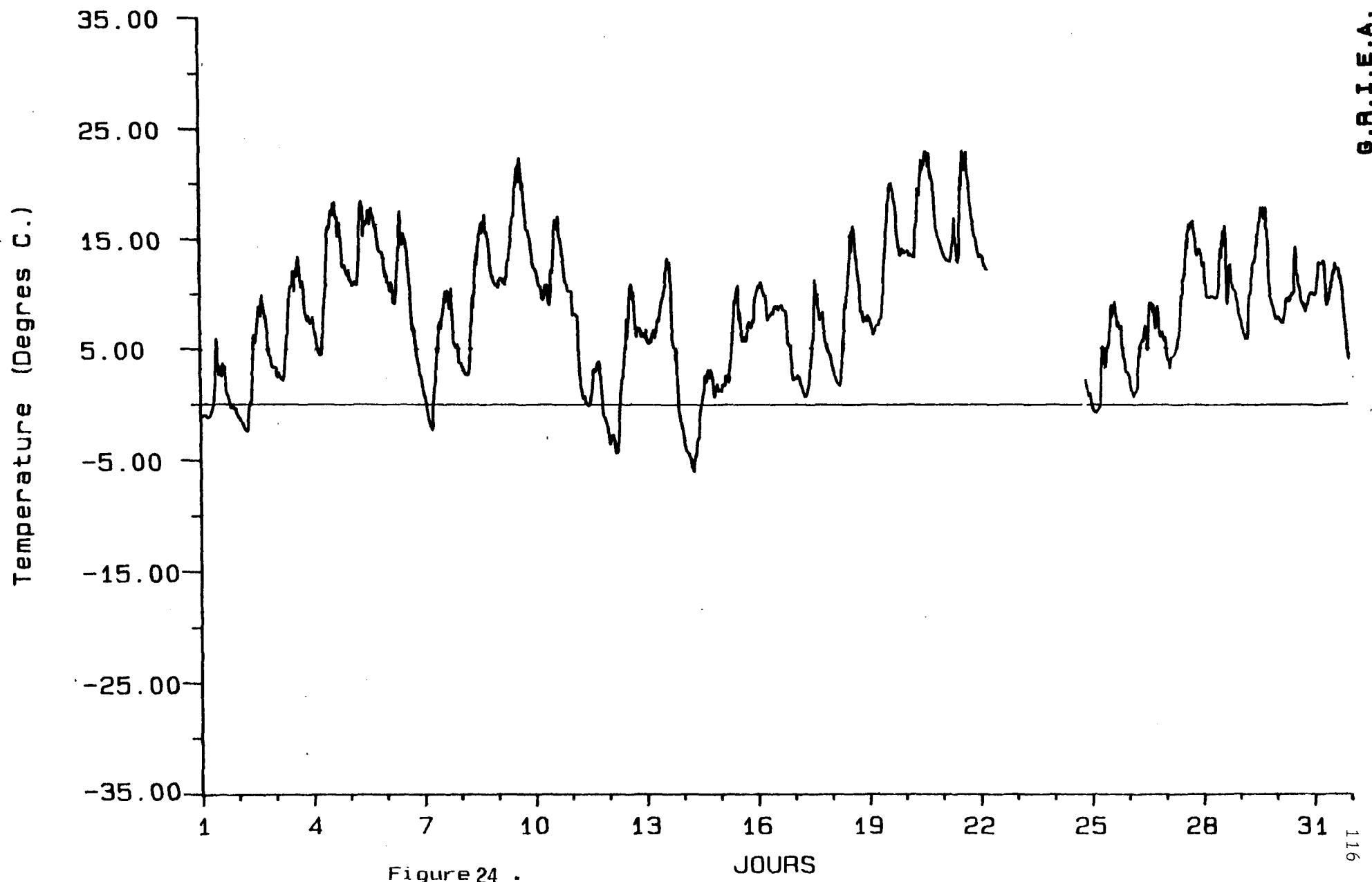
# TEMPERATURE MAI 1986



# TEMPERATURE AVRIL 1987



# TEMPERATURE MAI 1988



PERIODE DU 25 DEC. 1986

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

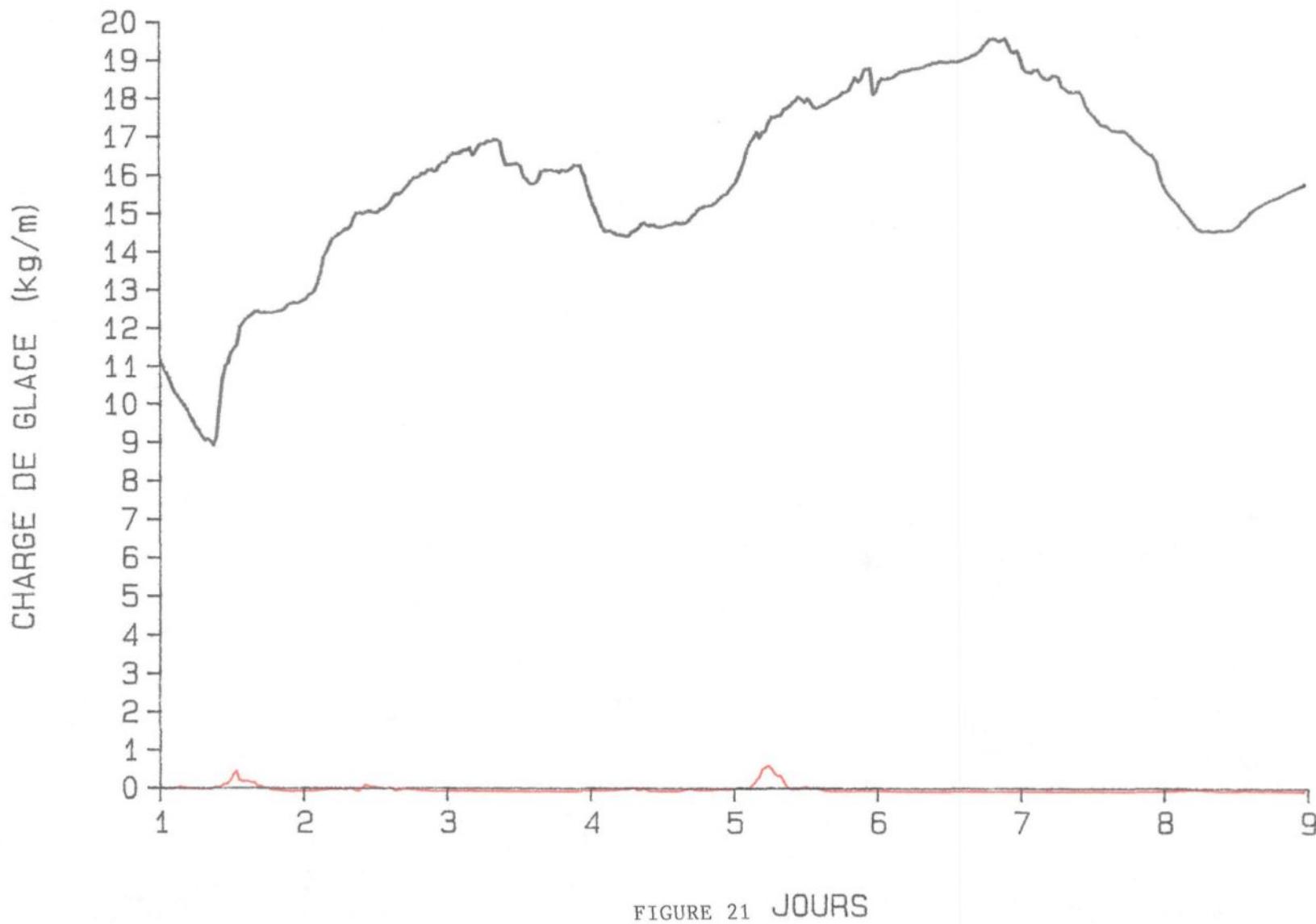
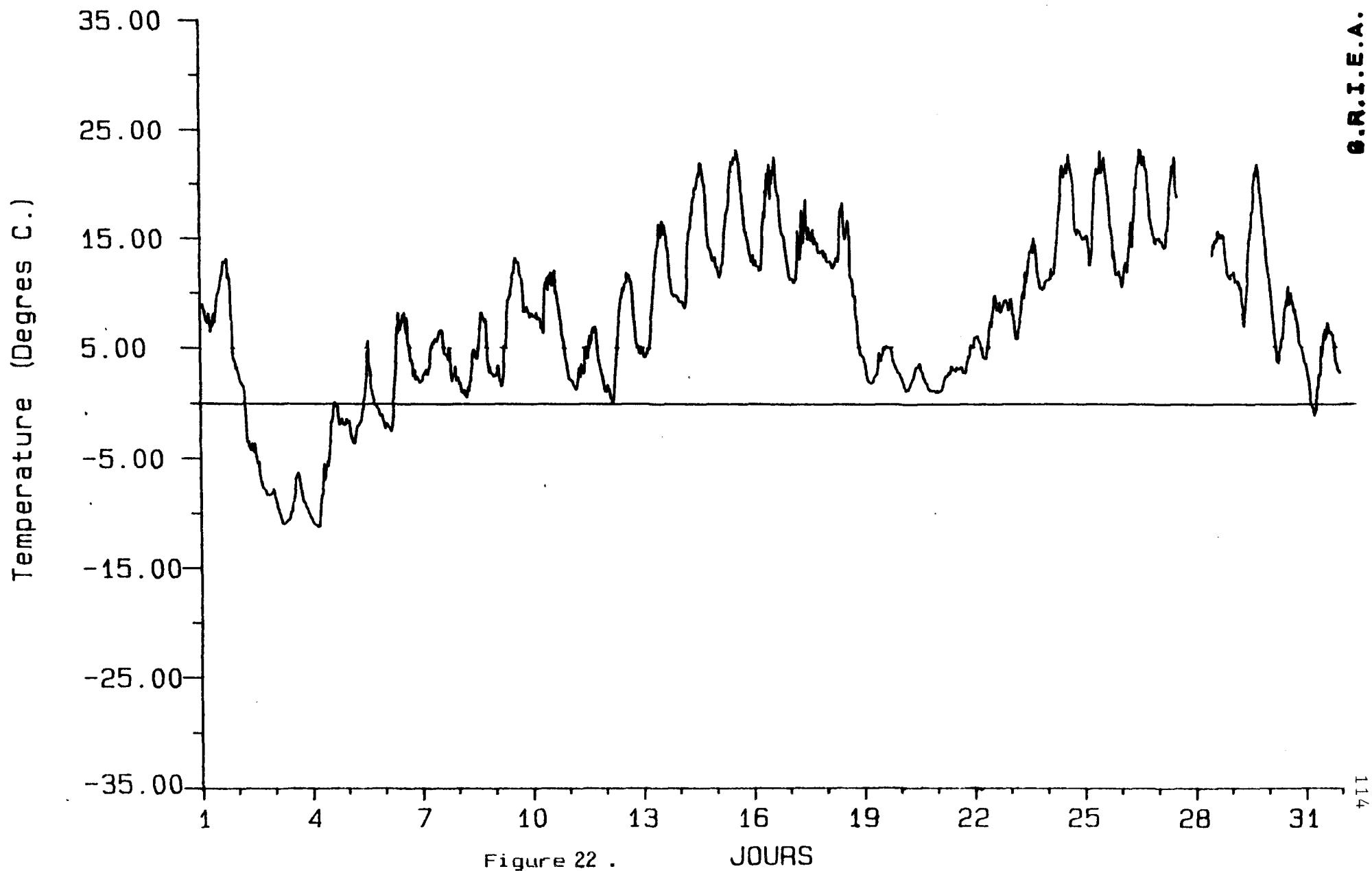
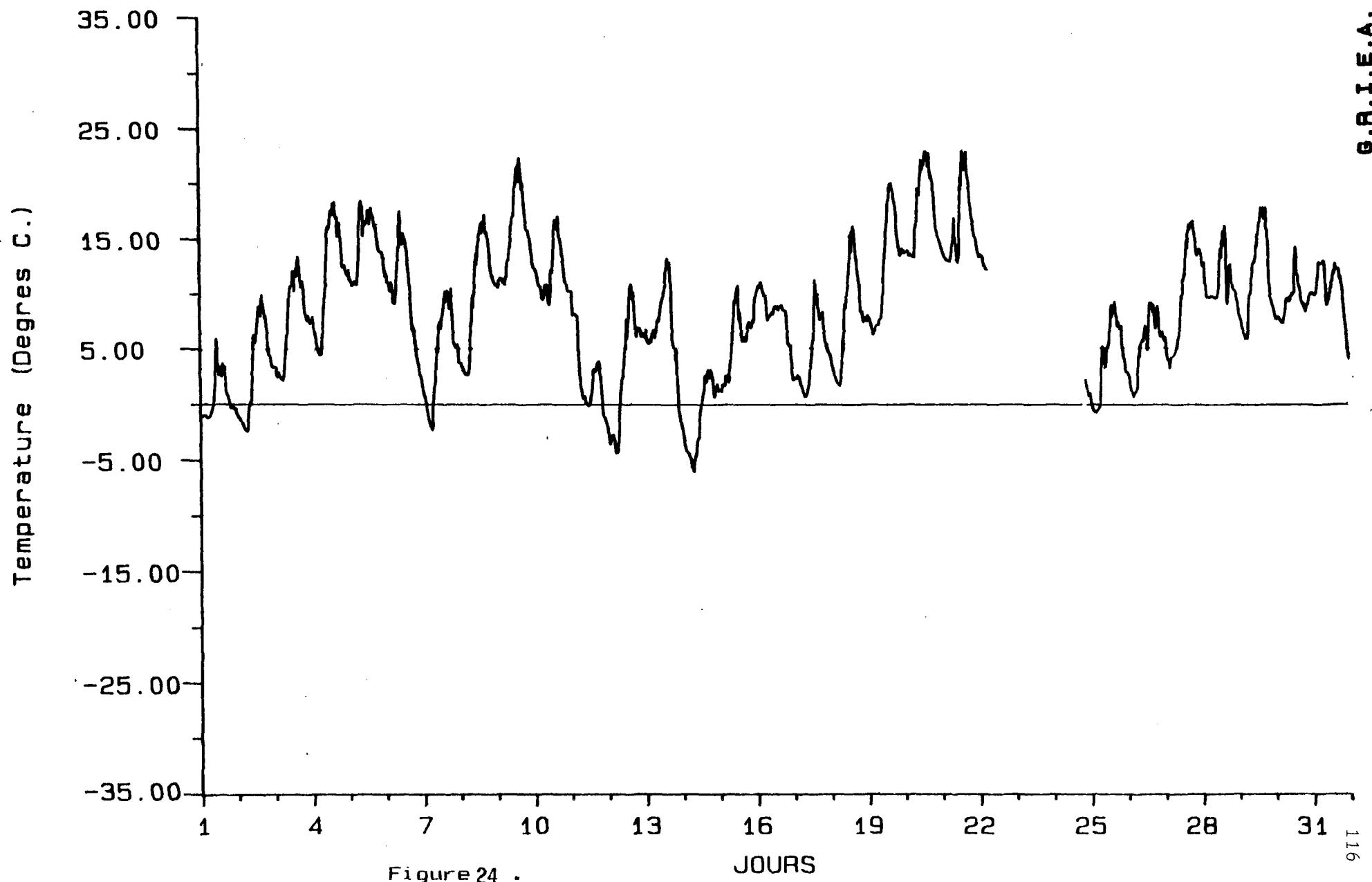


FIGURE 21 JOURS

# TEMPERATURE MAI 1986



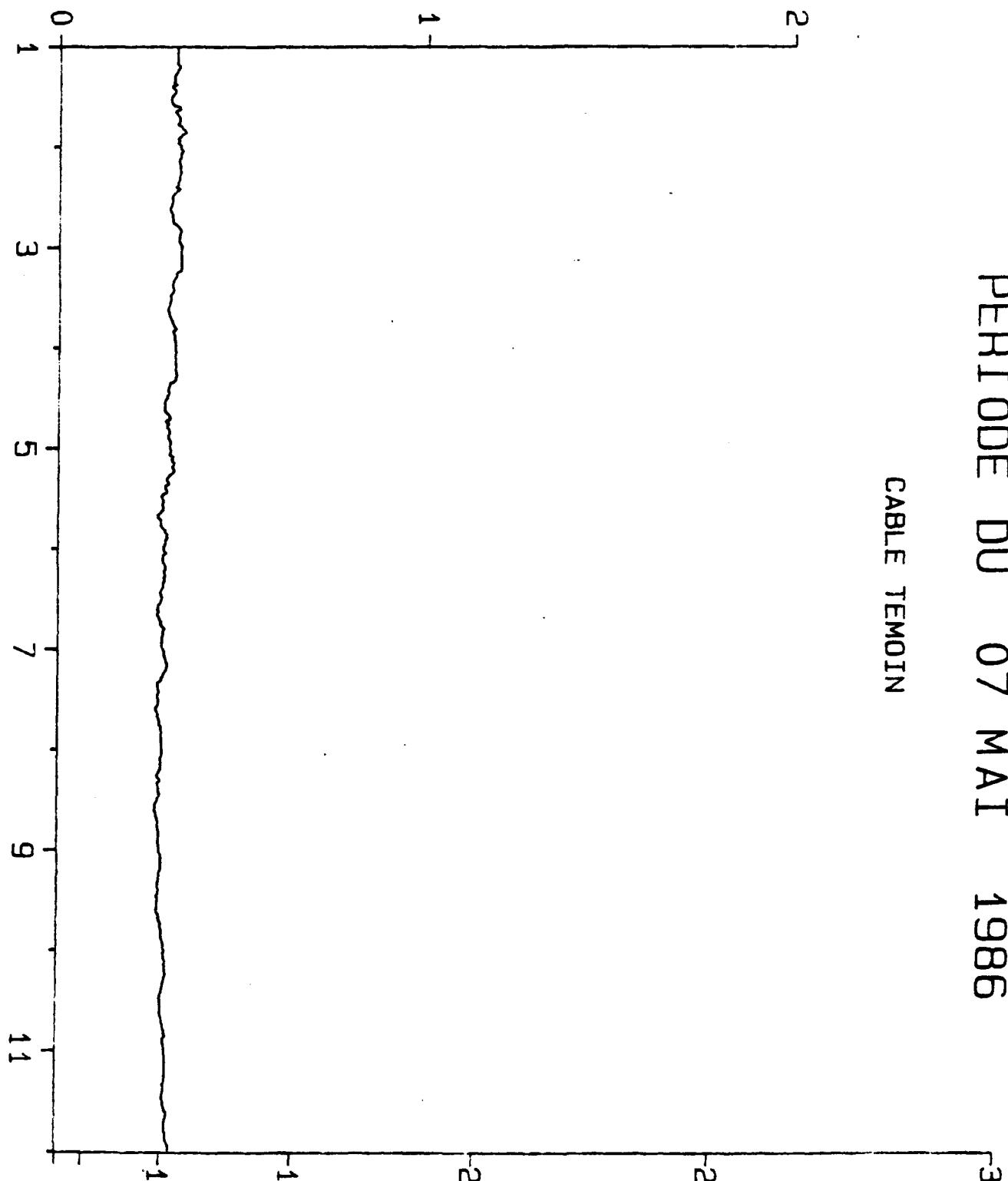
# TEMPERATURE MAI 1988



PERIODE DU 07 MAI 1986

CABLE TEMOIN

CHARGE DE GLACE (kg/m)

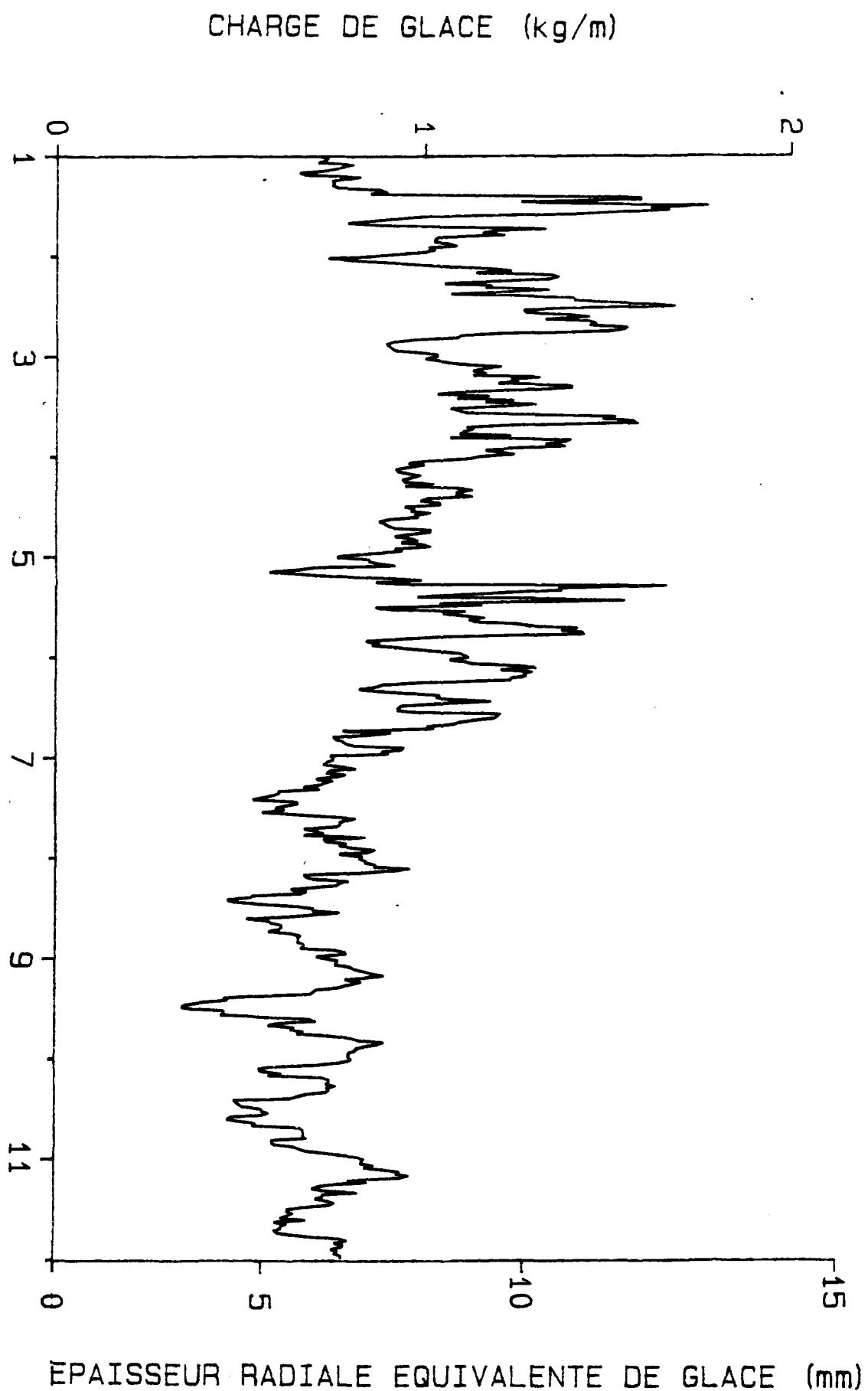


EPAISSEUR RADIALE EQUIVALENTE DE GLACE (mm)

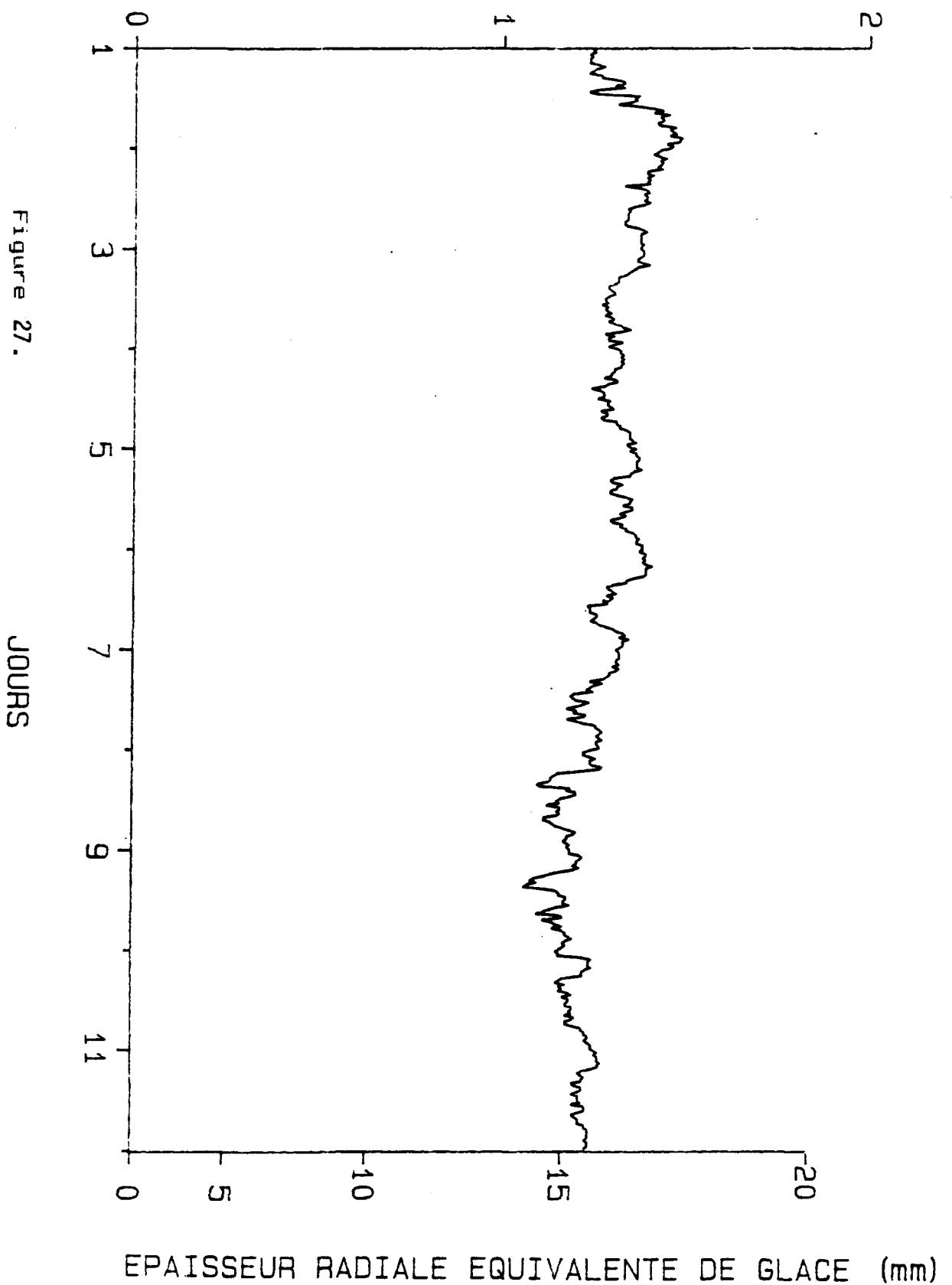
PERIODE DU 07 MAI 1986

CABLE BERSIMIS

Figure 26.

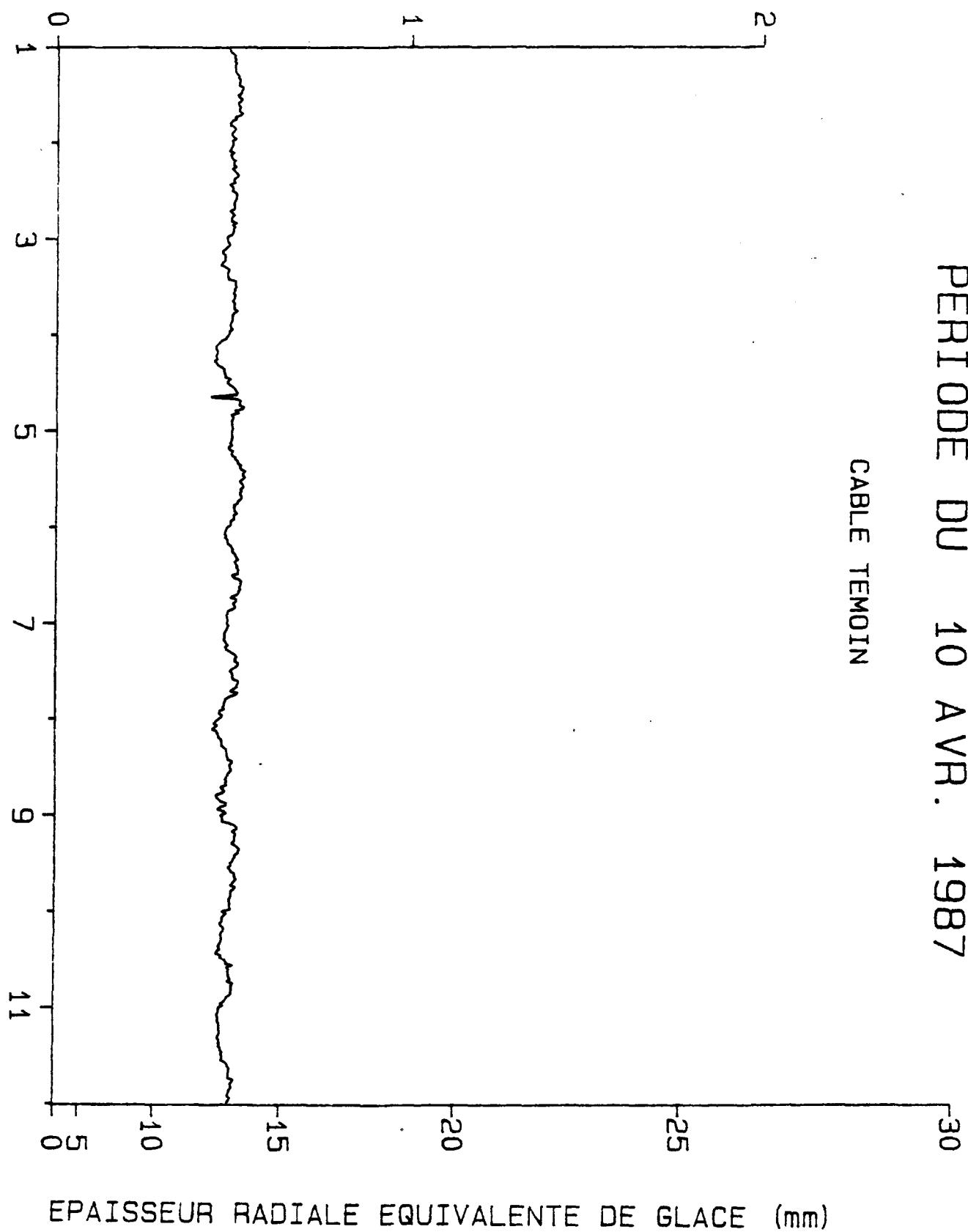


PERIODE DU 07 MAI 1986



PERIODE DU 10 AVR. 1987

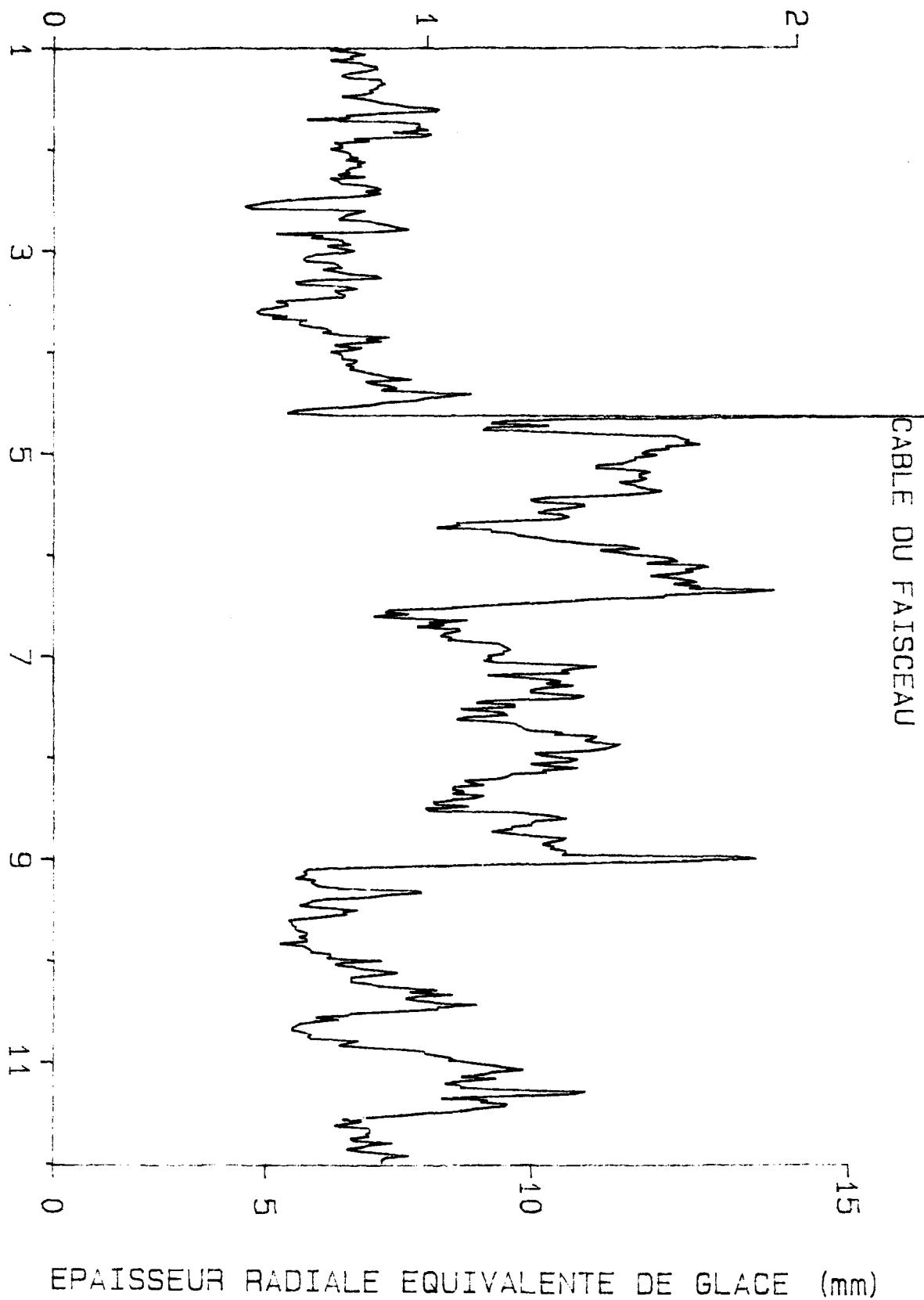
CABLE TEMOIN



PERIODE DU 10 AVR. 1987

CABLE DU FAISCEAU

Figure 29 -



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3

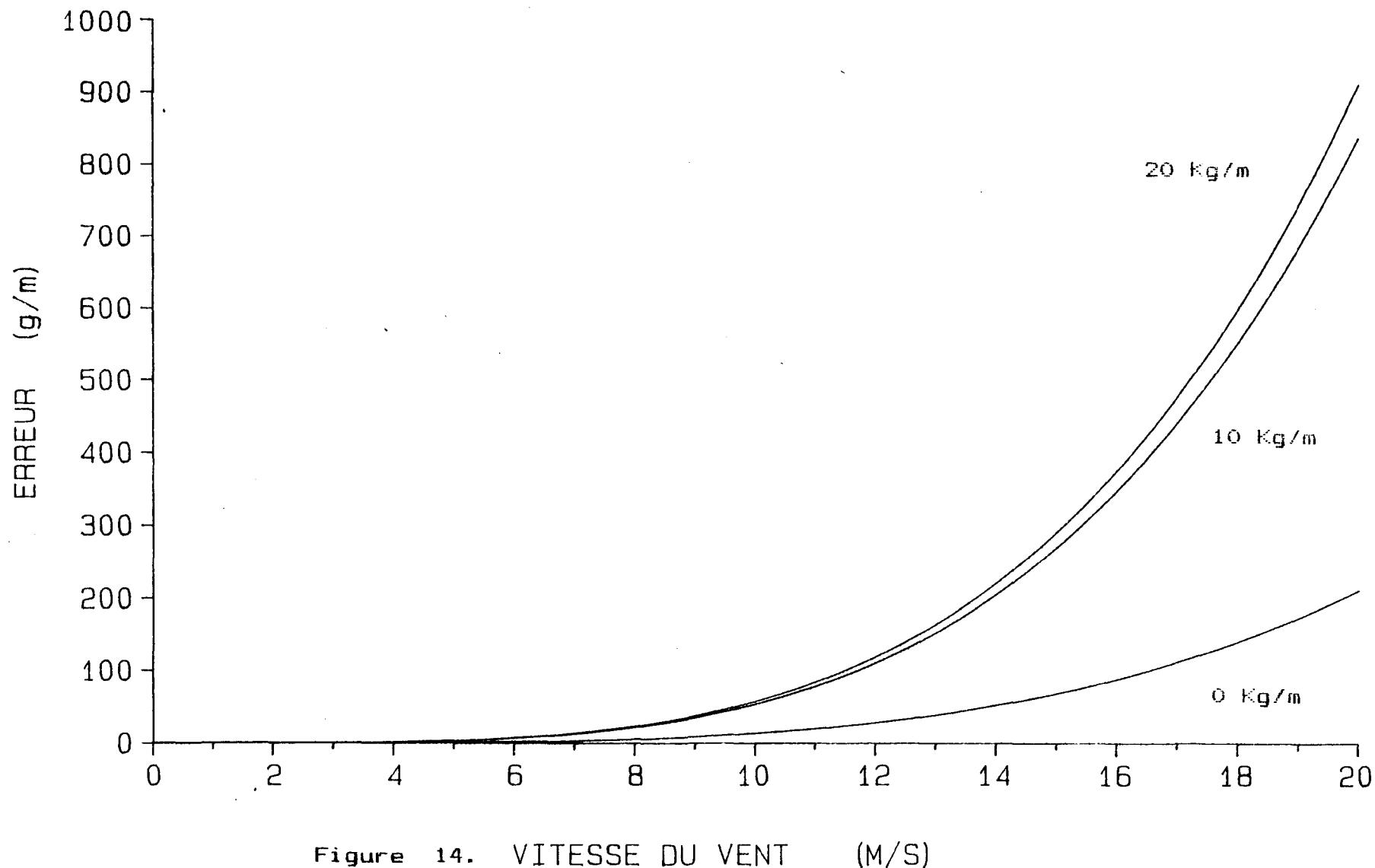


Figure 14. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

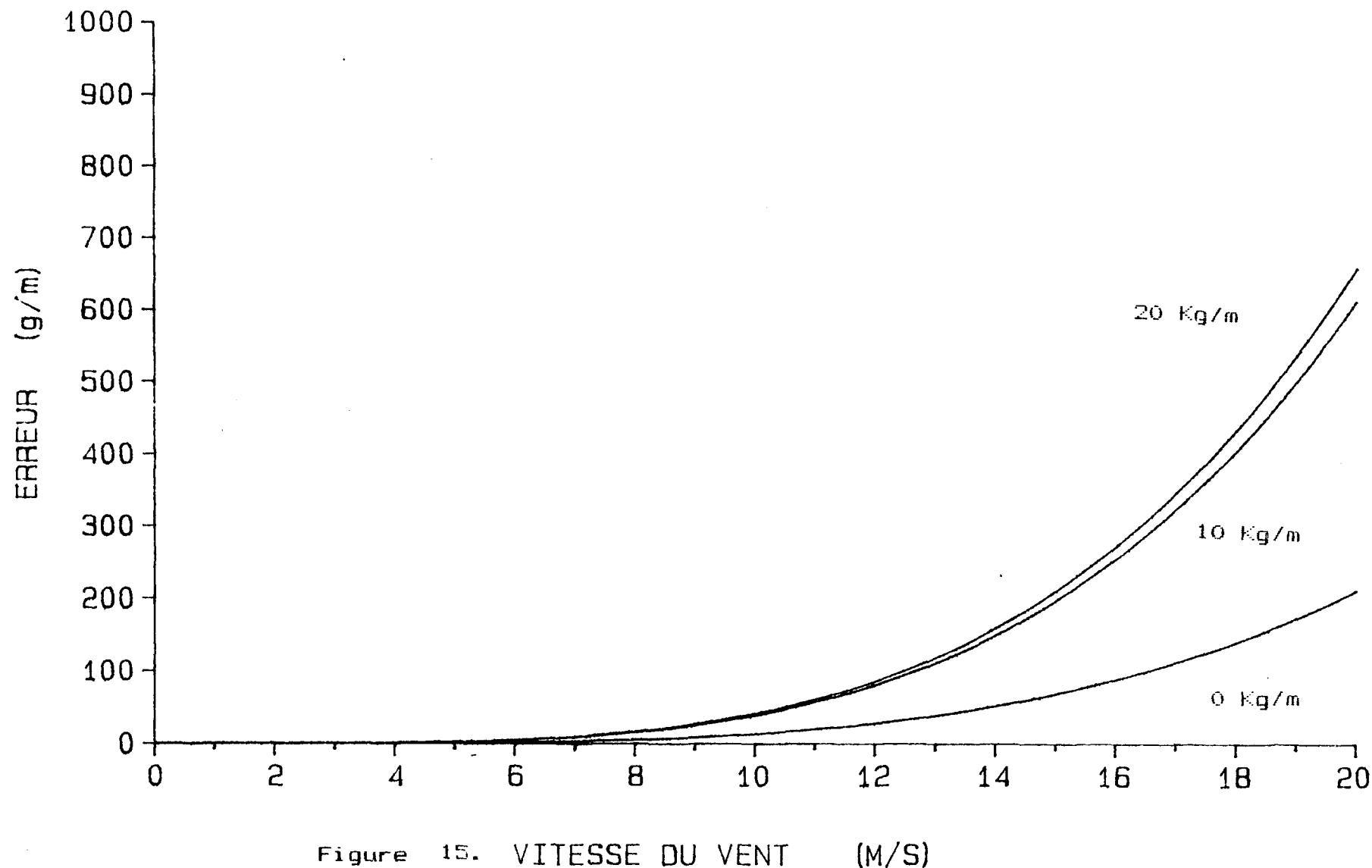


Figure 15. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON CYLINDRIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM<sup>3</sup>

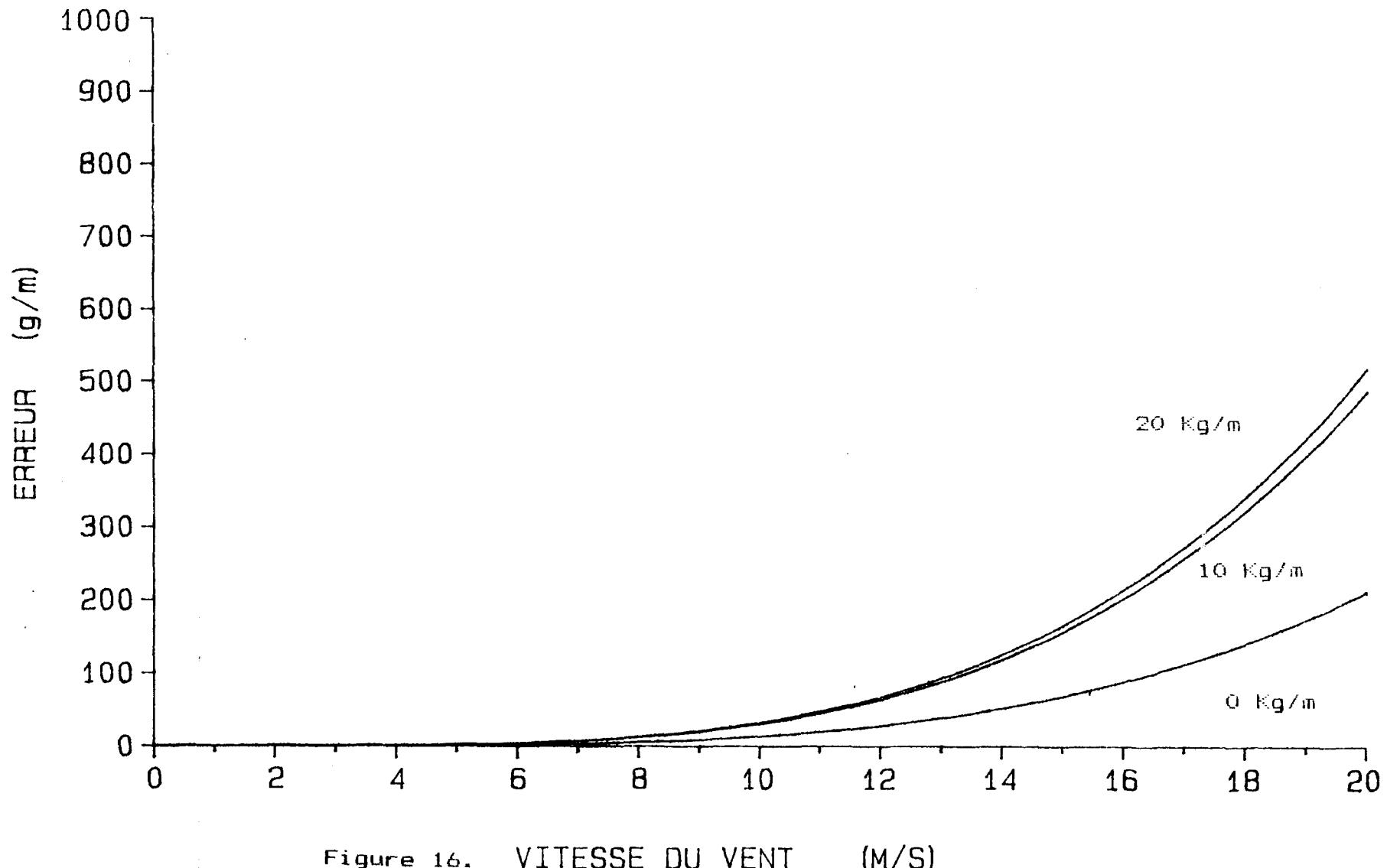
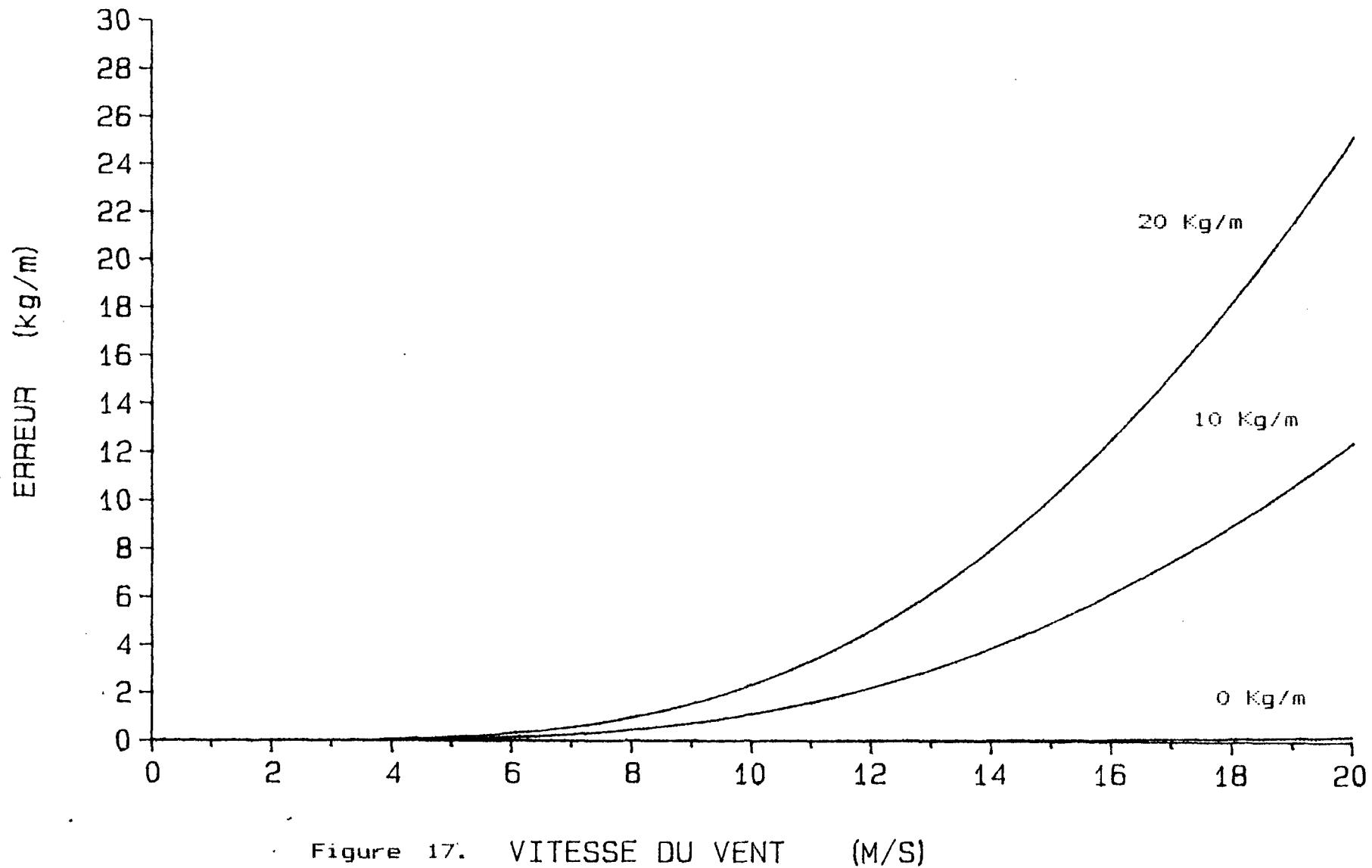


Figure 16. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,5 G/CM3



EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,7 G/CM3

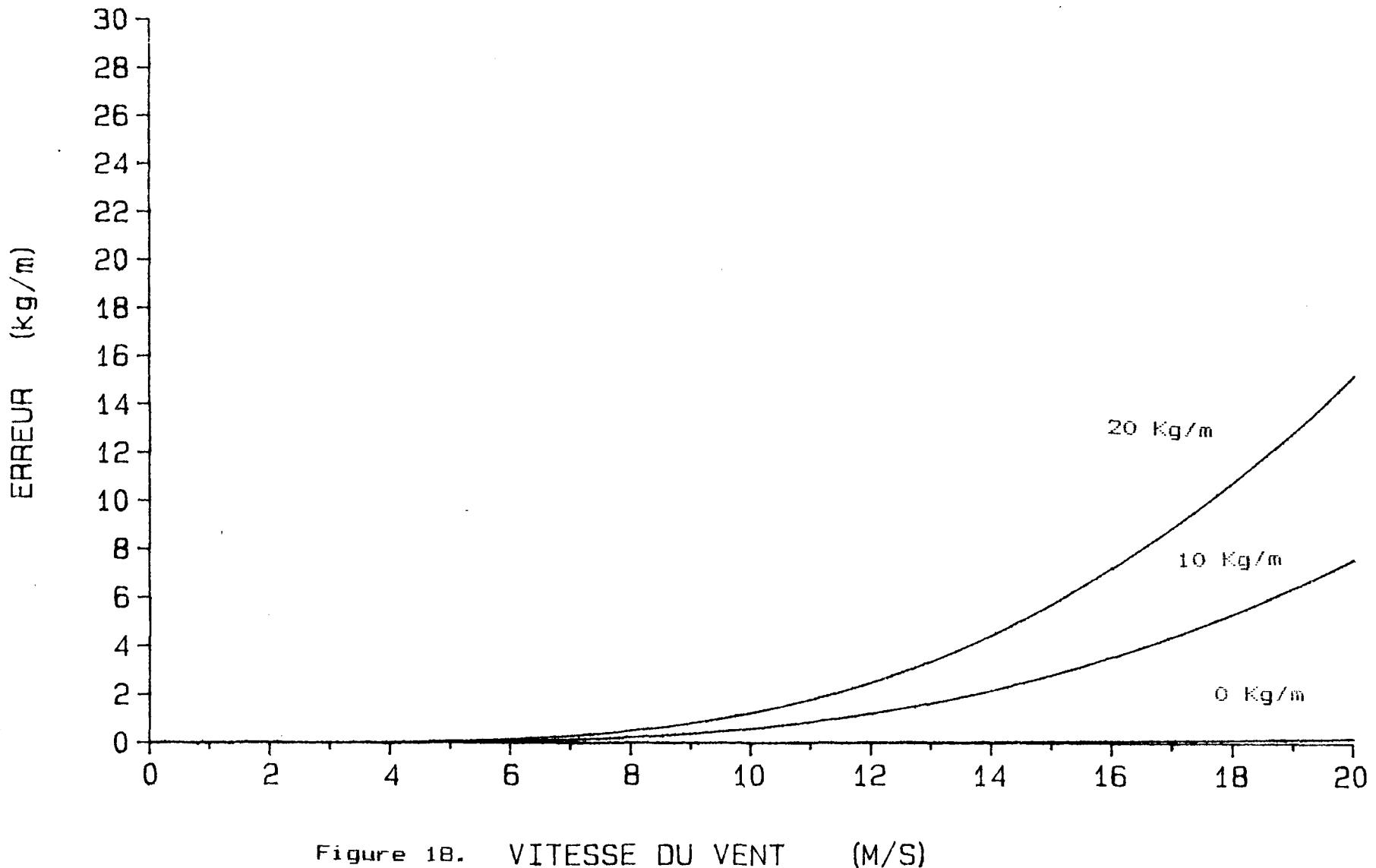


Figure 18. VITESSE DU VENT (M/S)

EFFET THEORIQUE DU VENT SUR LA CHARGE DU CABLE BERSIMIS

MANCHON ELLIPTIQUE

DENSITE: 0,9 G/CM3

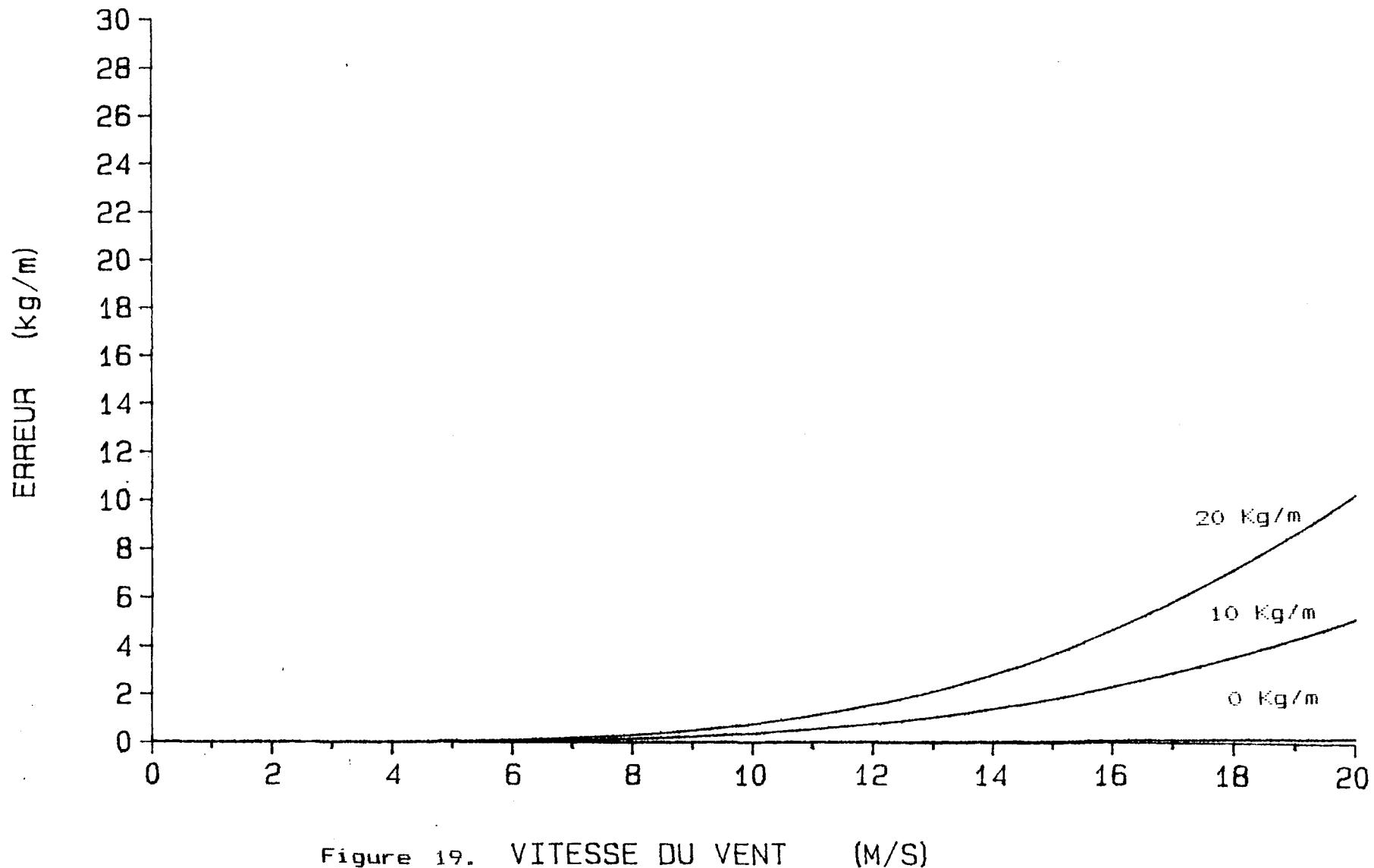
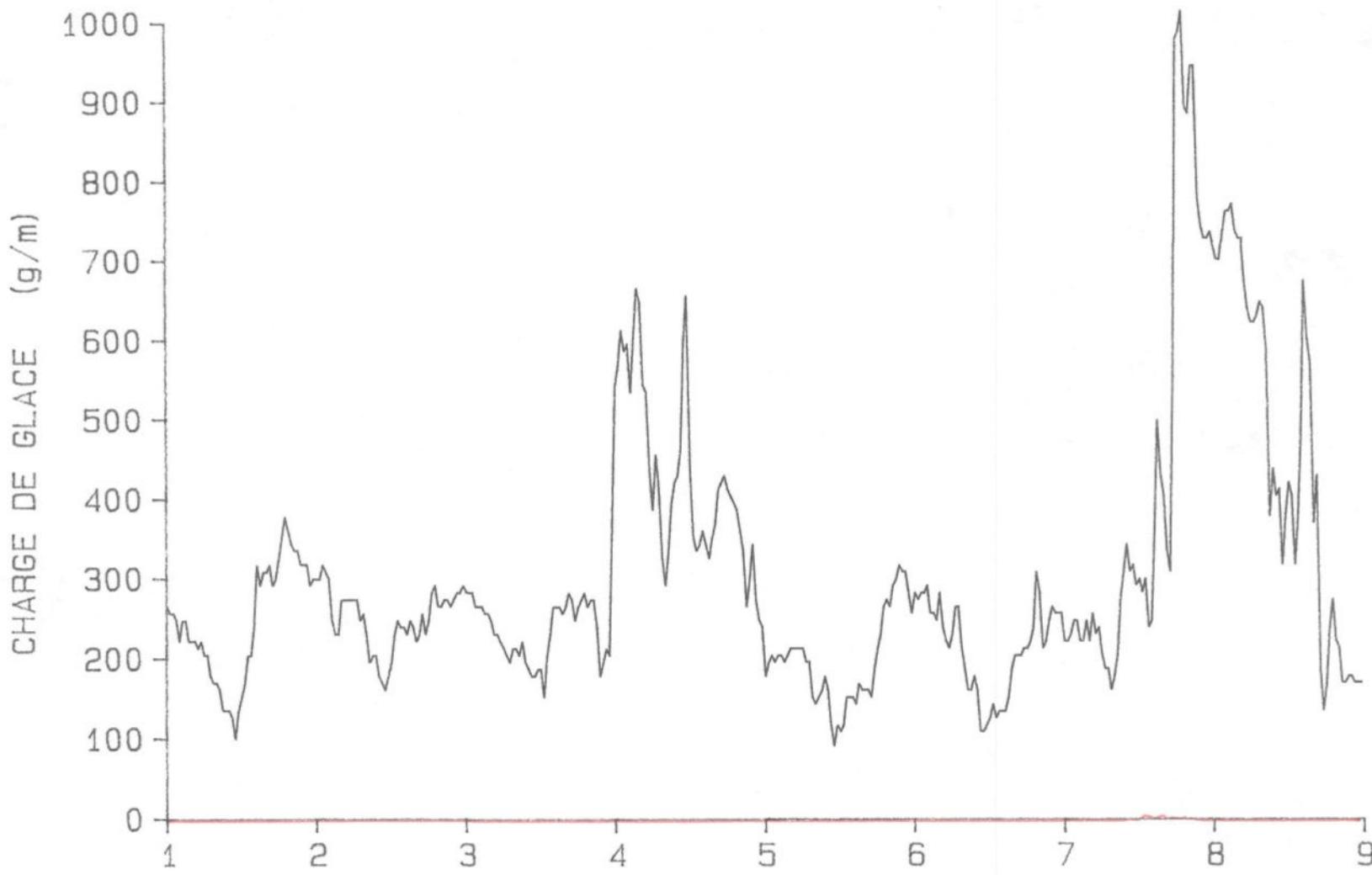


Figure 19. VITESSE DU VENT (M/S)

PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS



PERIODE DU 25 DEC. 1986

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

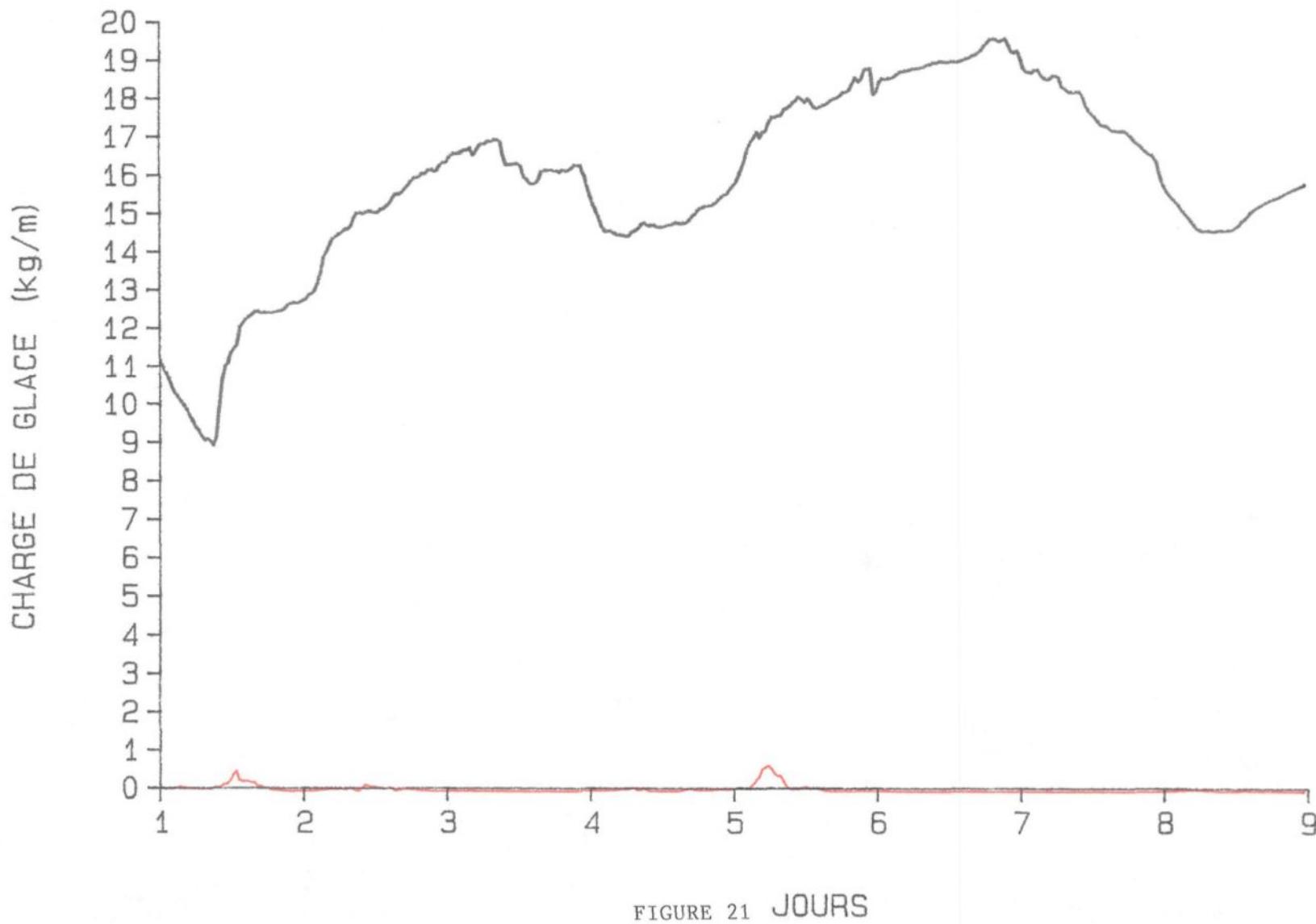
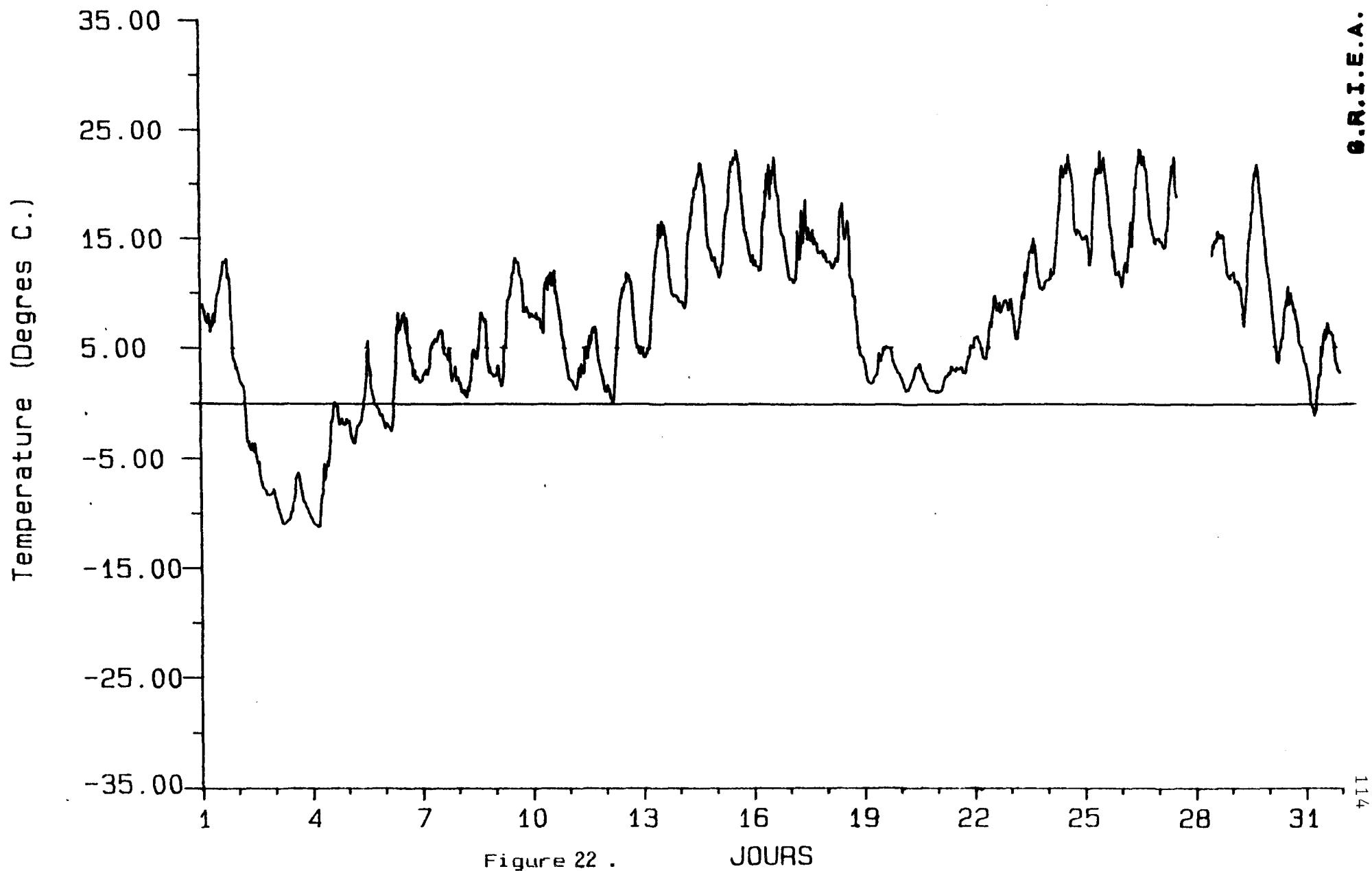
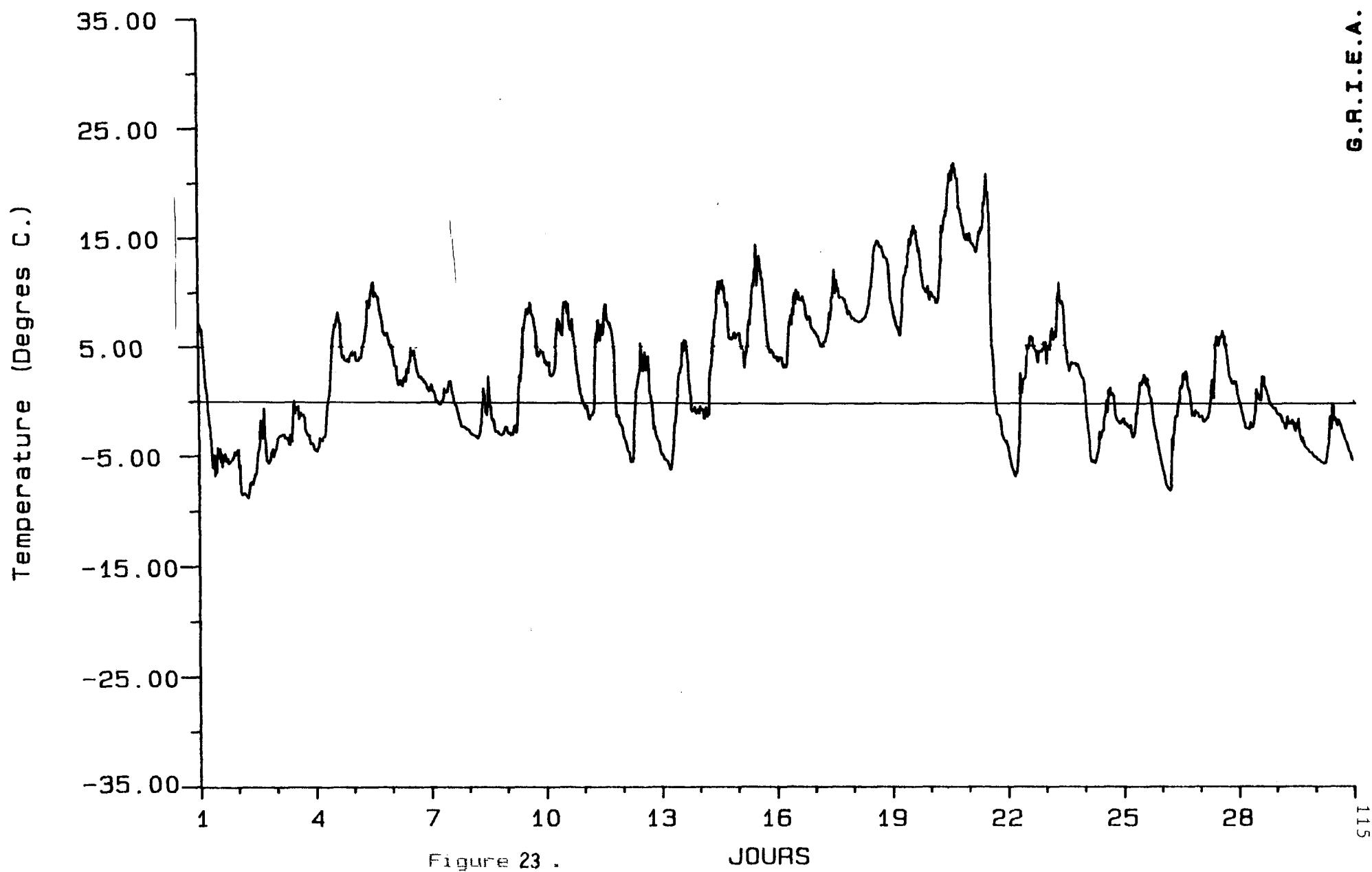


FIGURE 21 JOURS

# TEMPERATURE MAI 1986



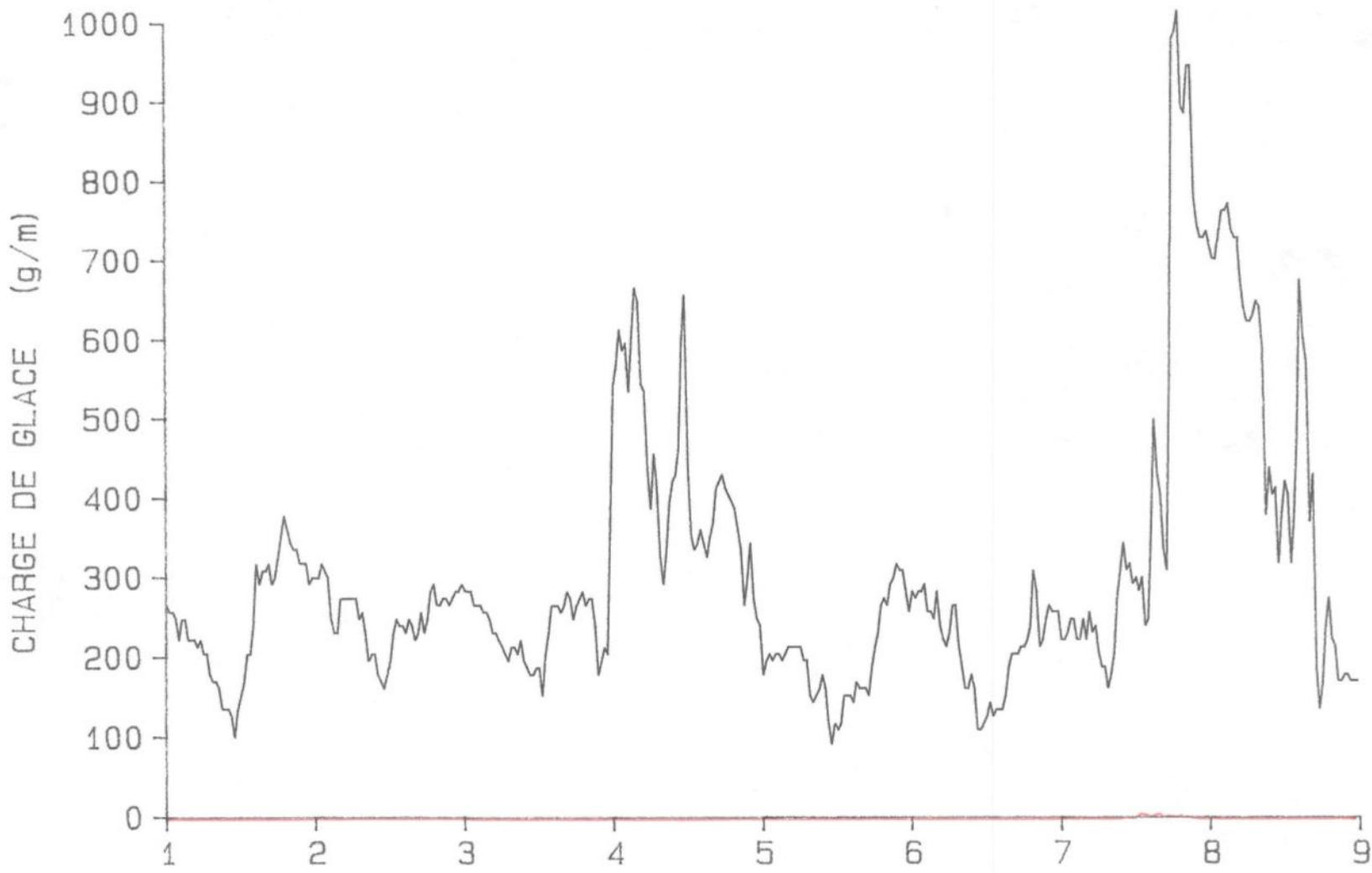
# TEMPERATURE AVRIL 1987



PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS



PERIODE DU 25 DEC. 1986

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

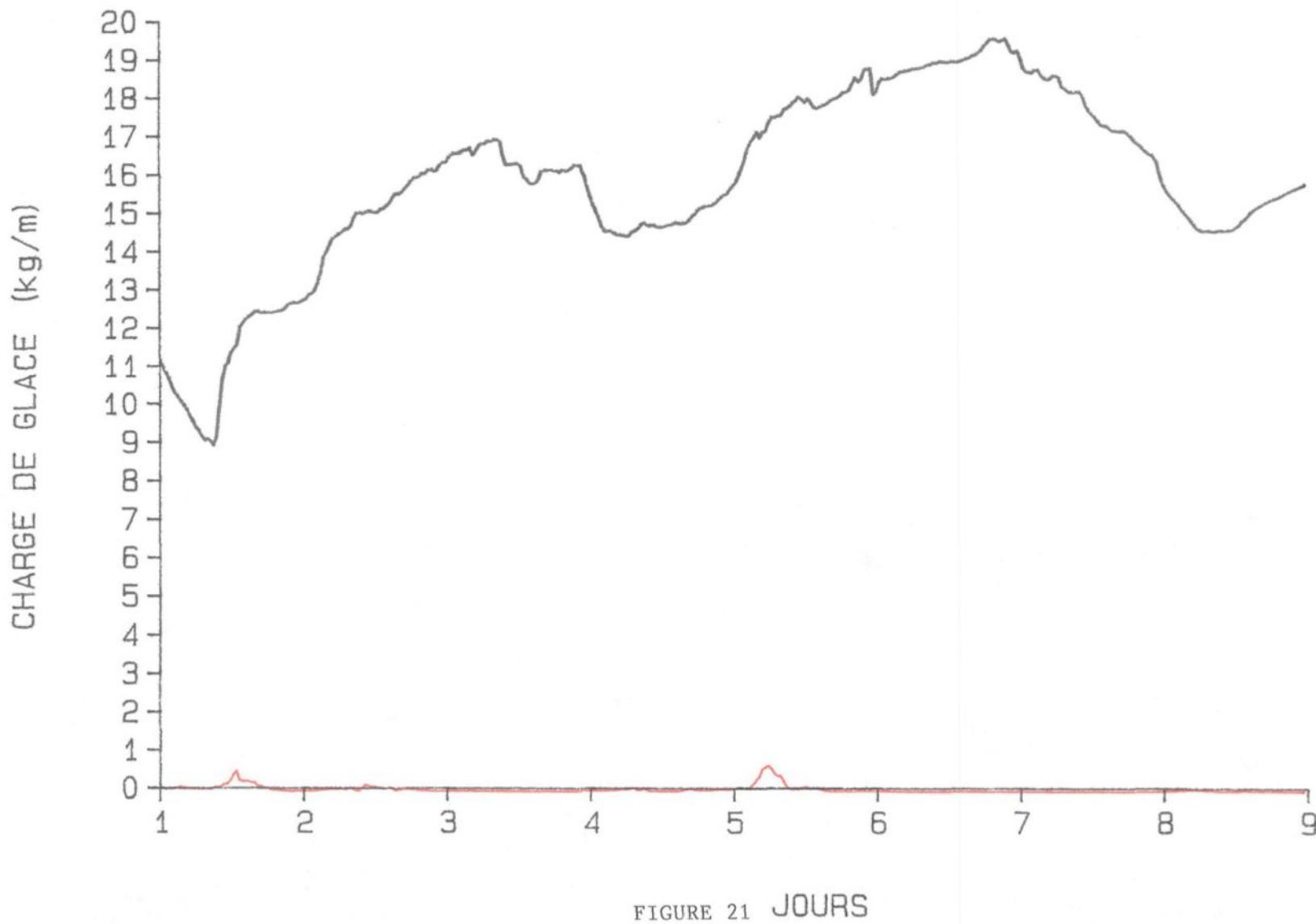
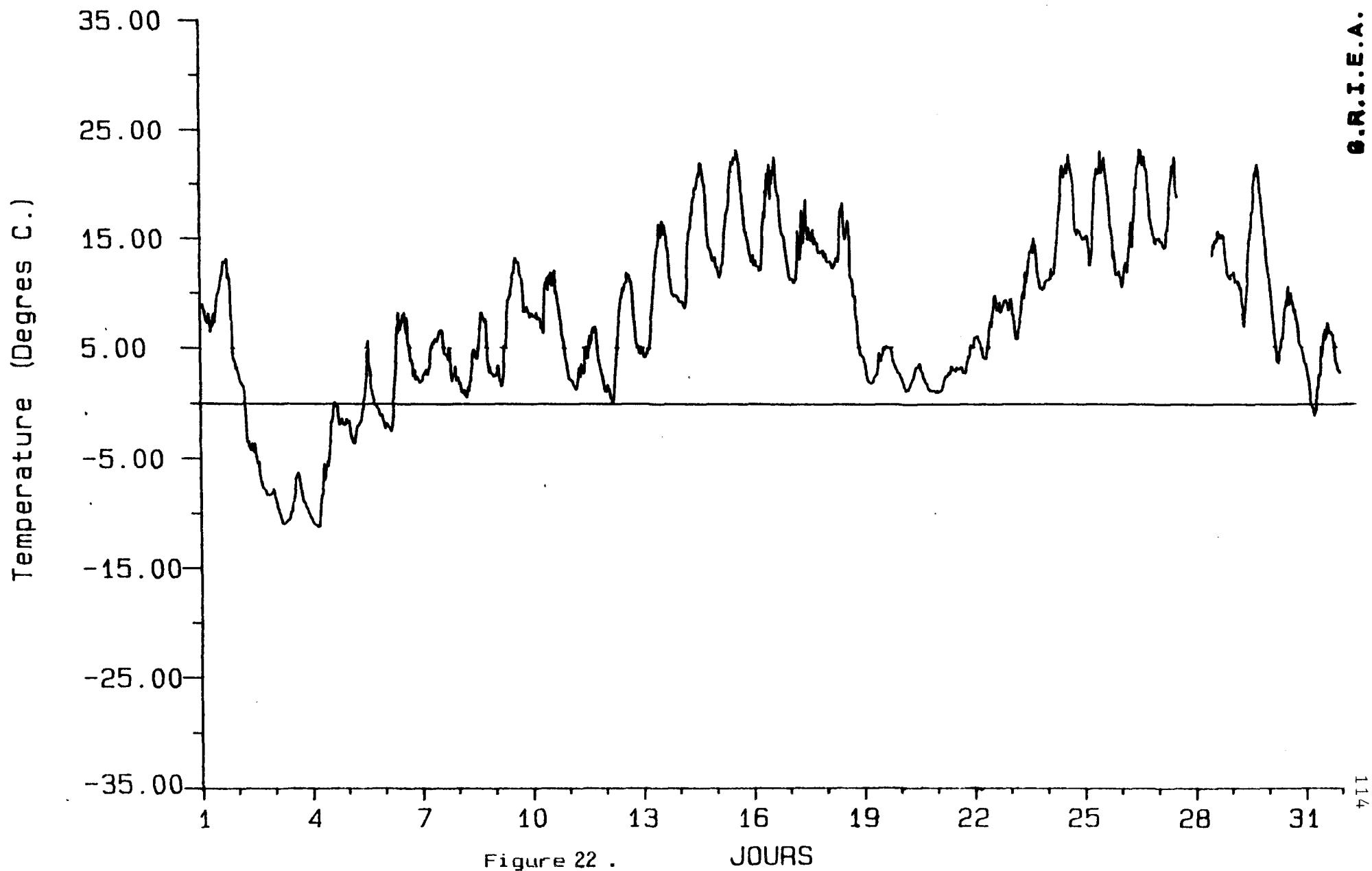
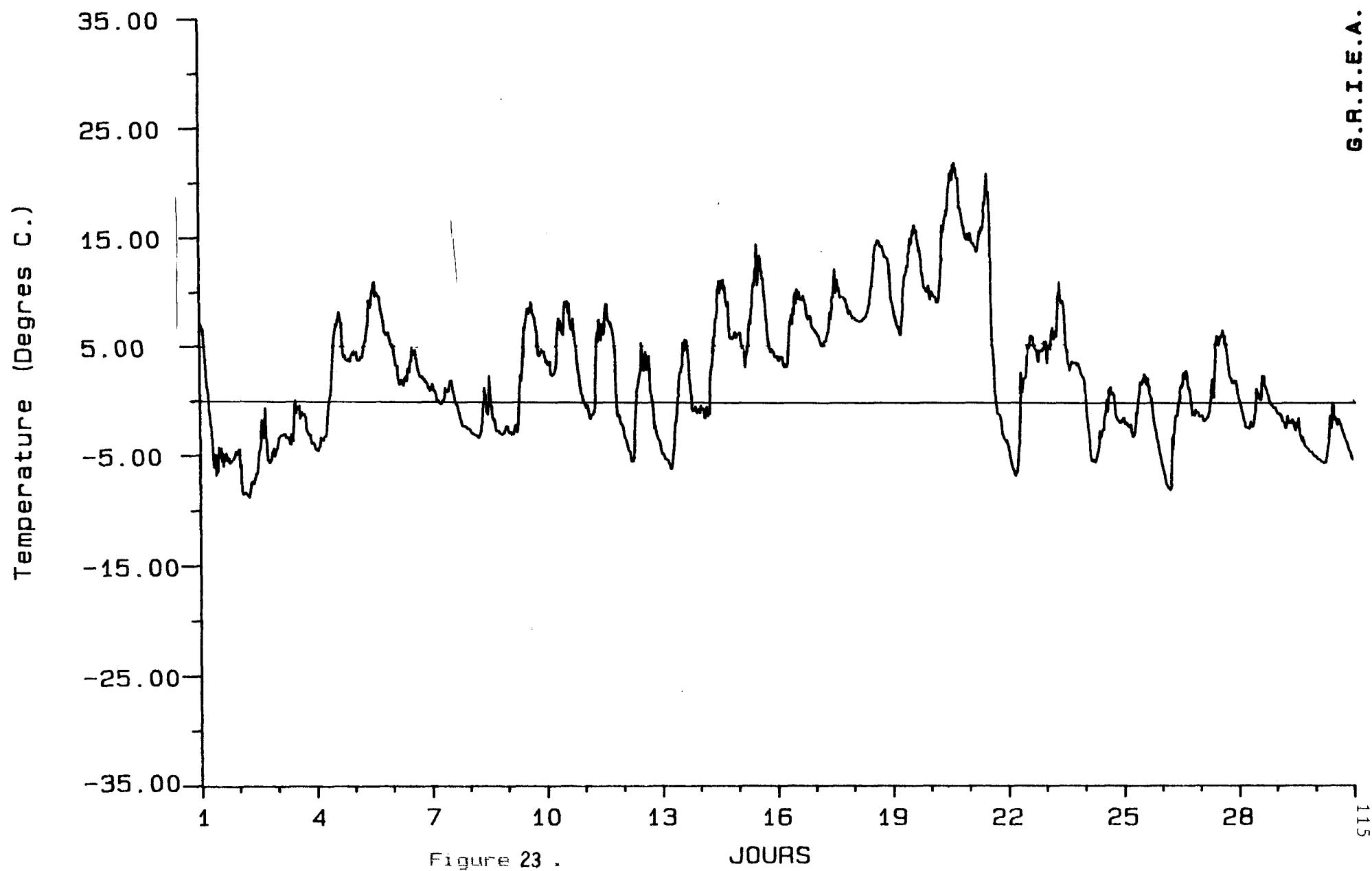


FIGURE 21 JOURS

# TEMPERATURE MAI 1986



# TEMPERATURE AVRIL 1987



PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

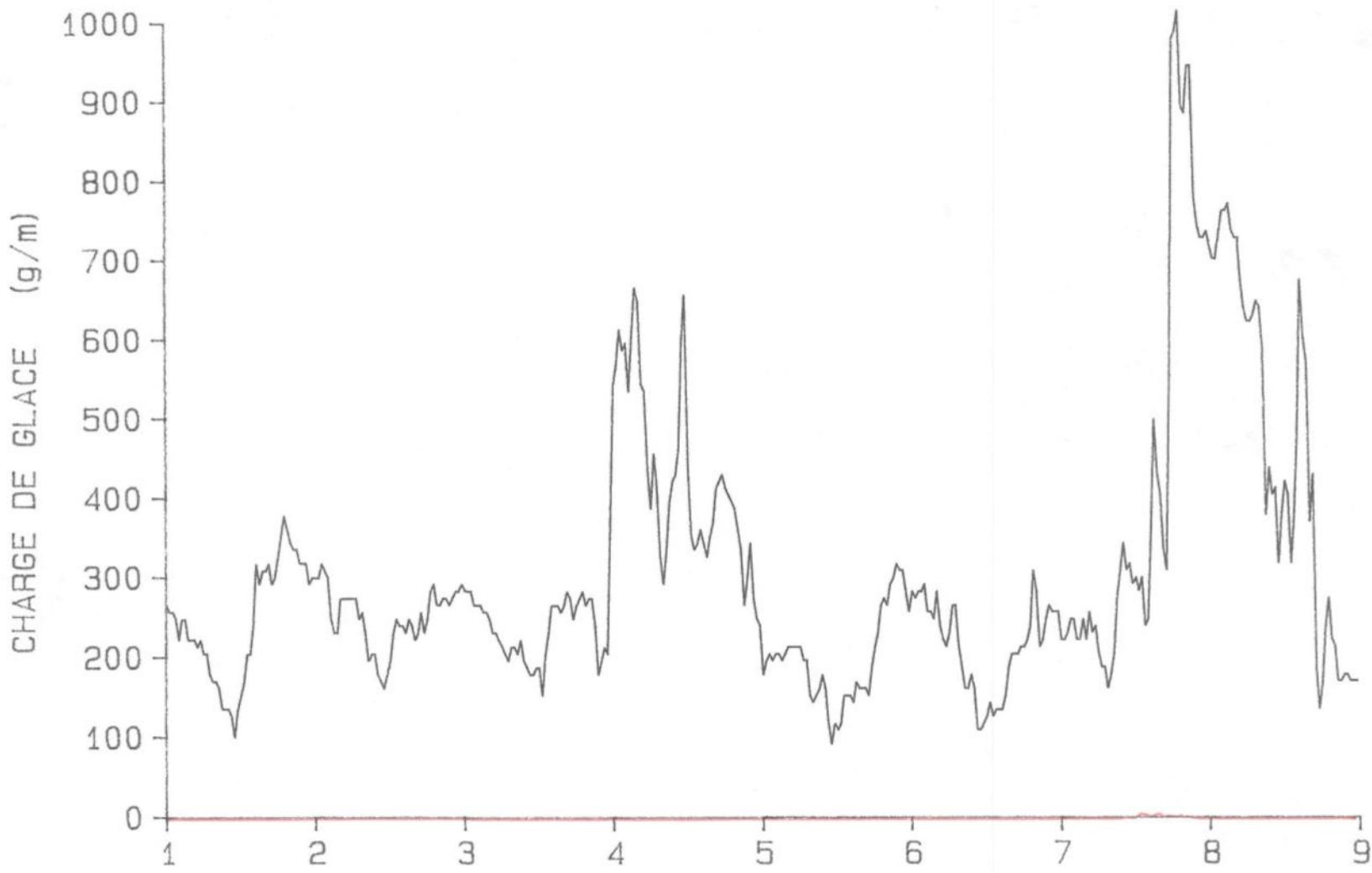
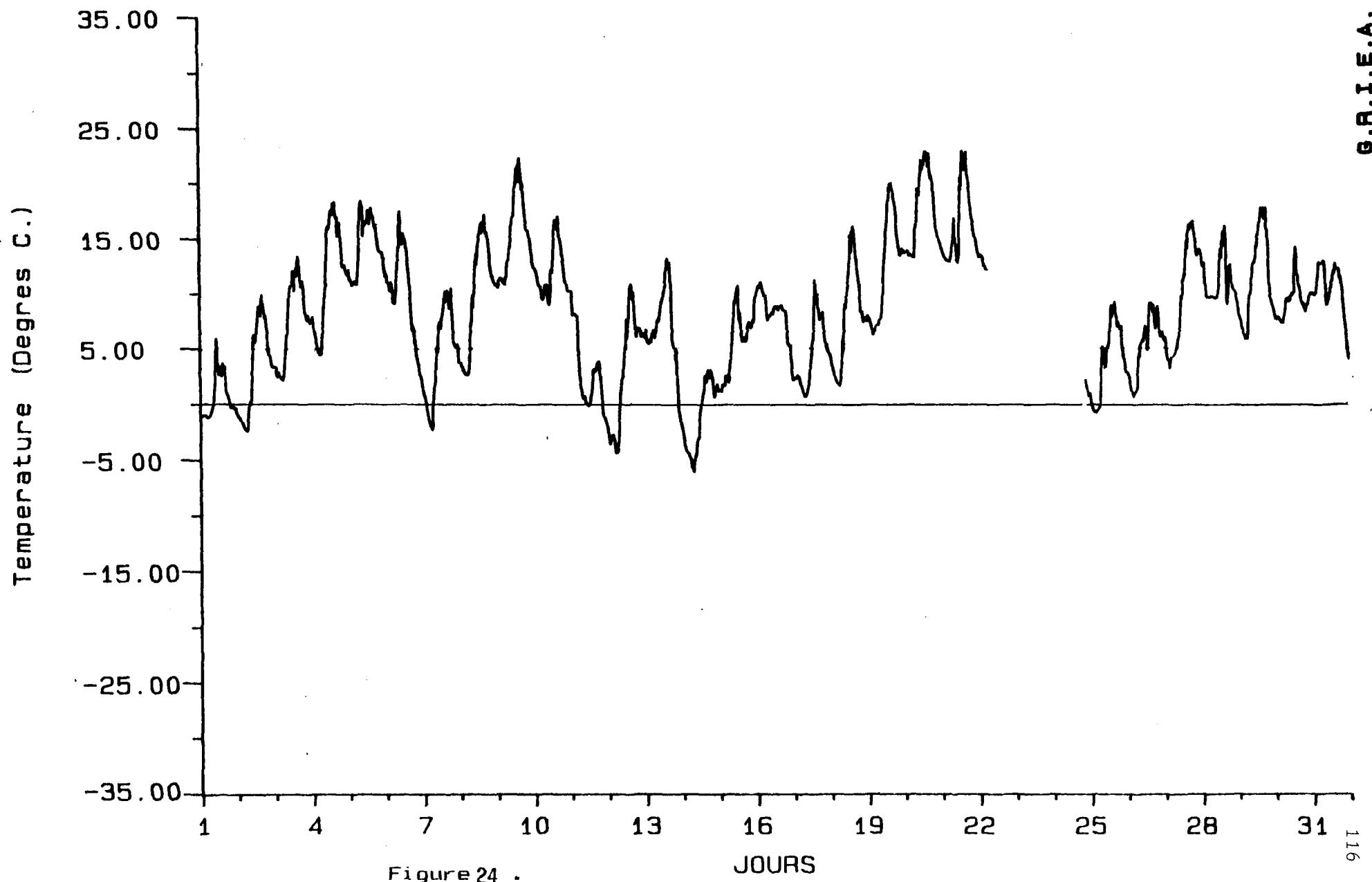


FIGURE 20-JOURS

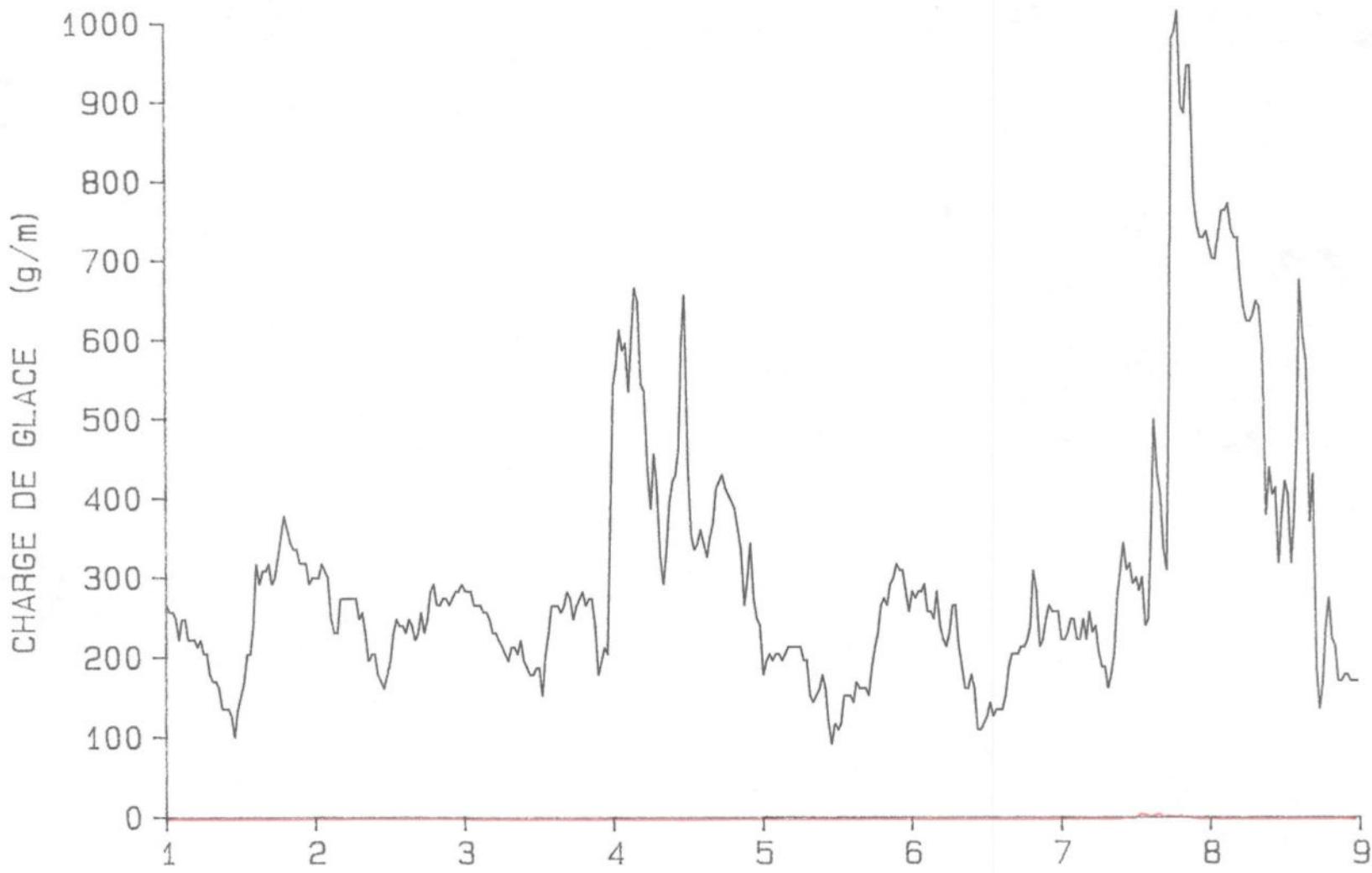
# TEMPERATURE MAI 1988



PERIODE DU 15 AVR. 1987

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS



PERIODE DU 25 DEC. 1986

CHARGE DE GLACE SUR LE CABLE BERSIMIS

EFFET DU VENT SUR LE CABLE BERSIMIS

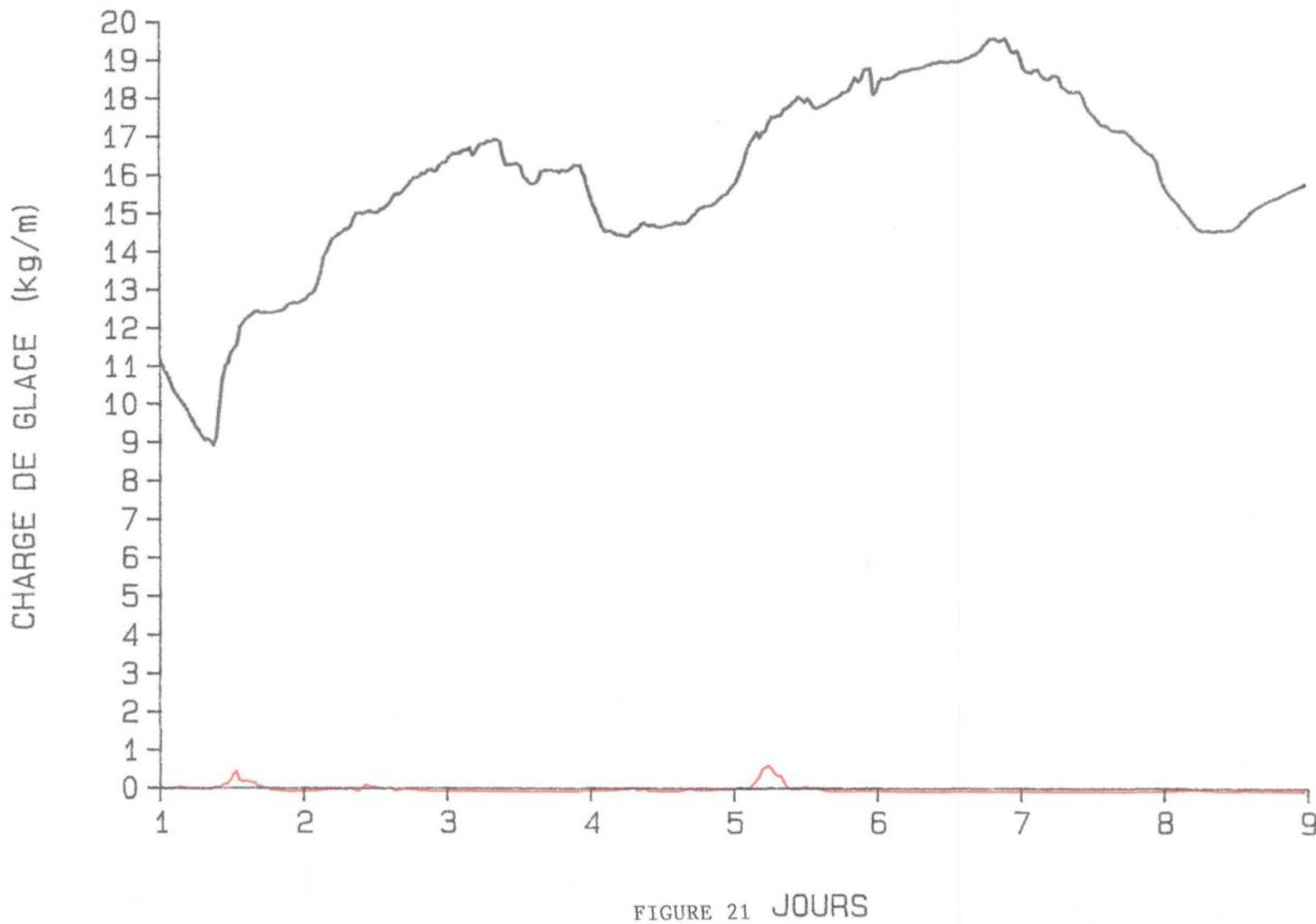
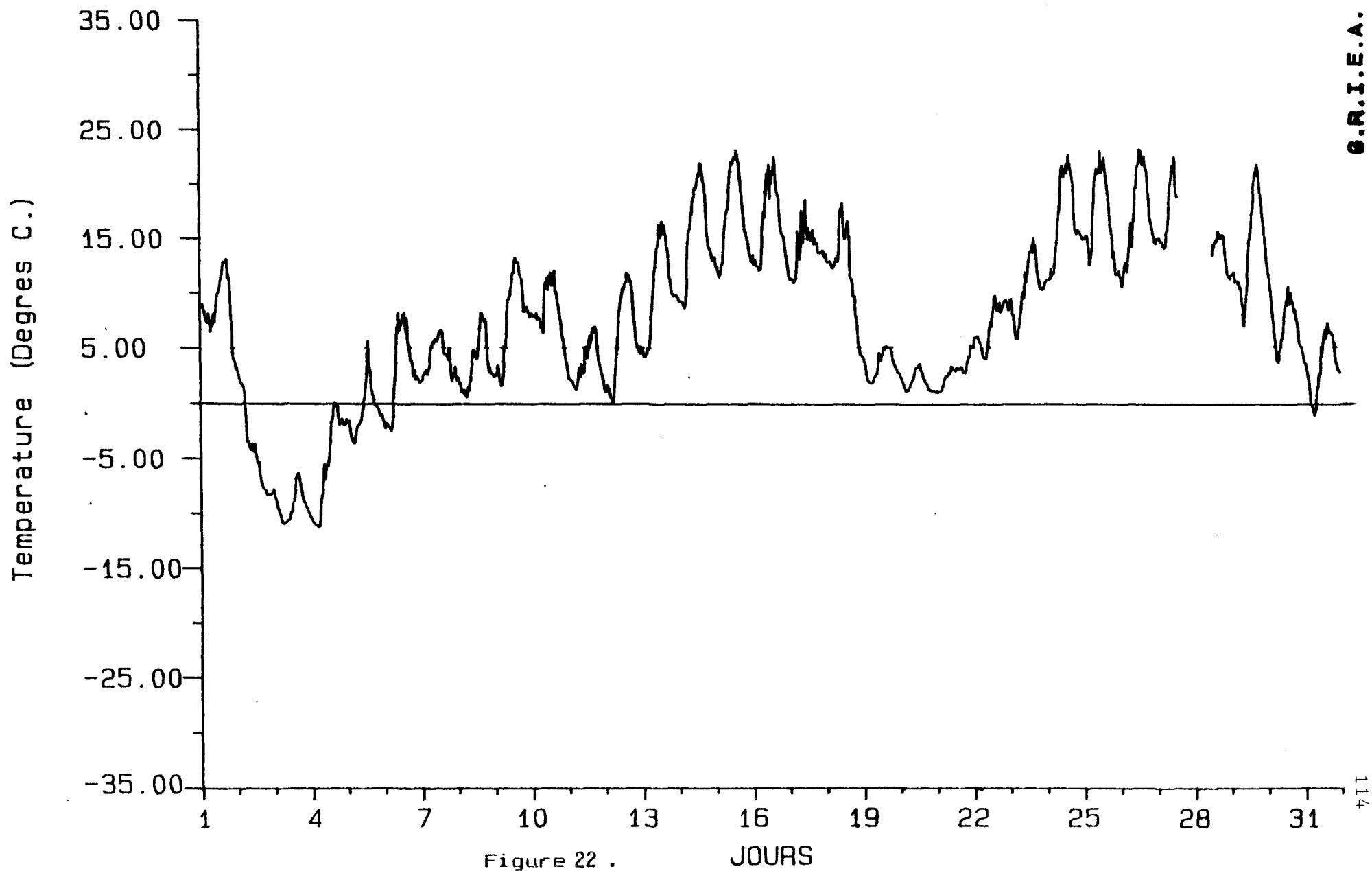
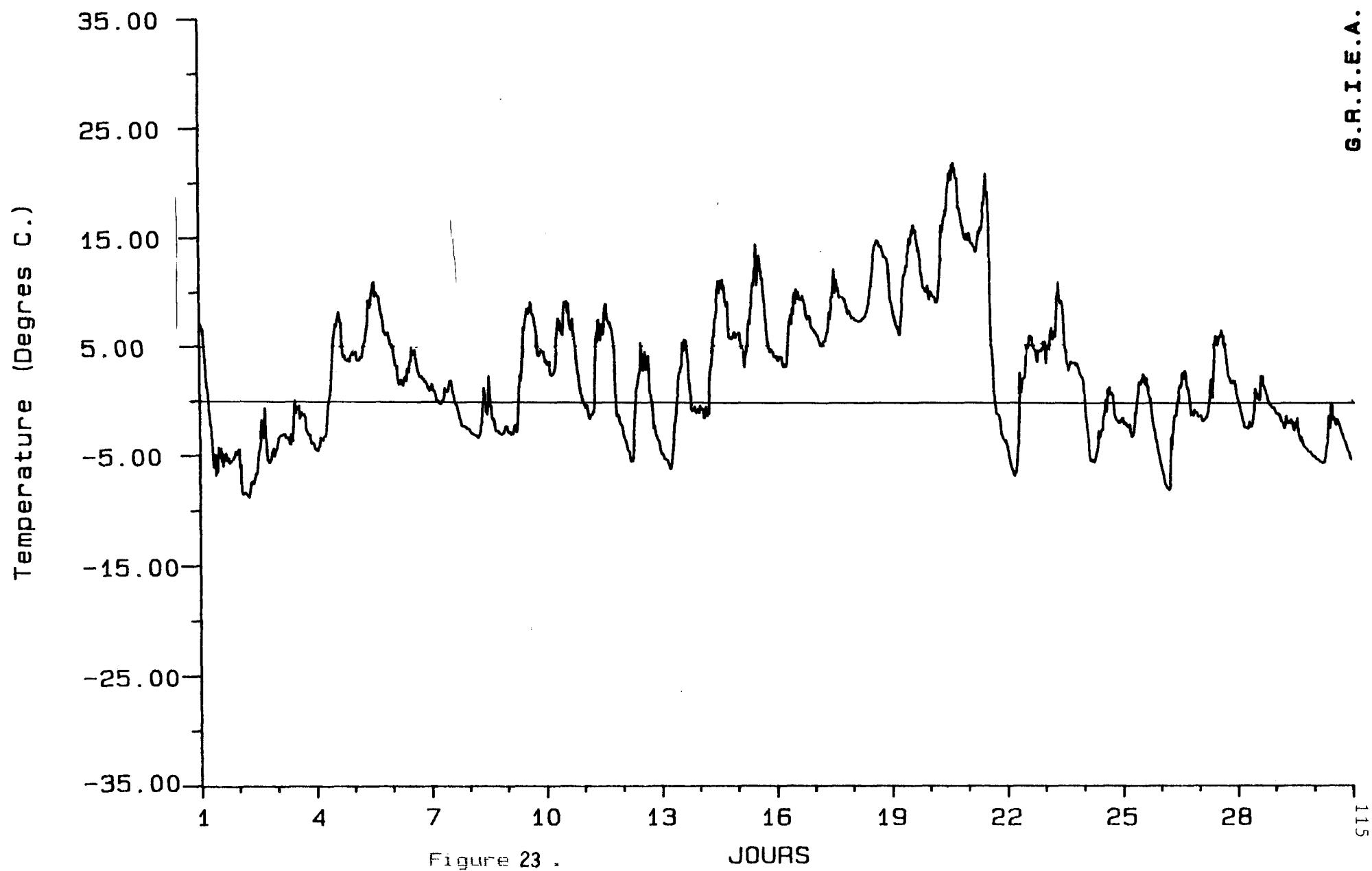


FIGURE 21 JOURS

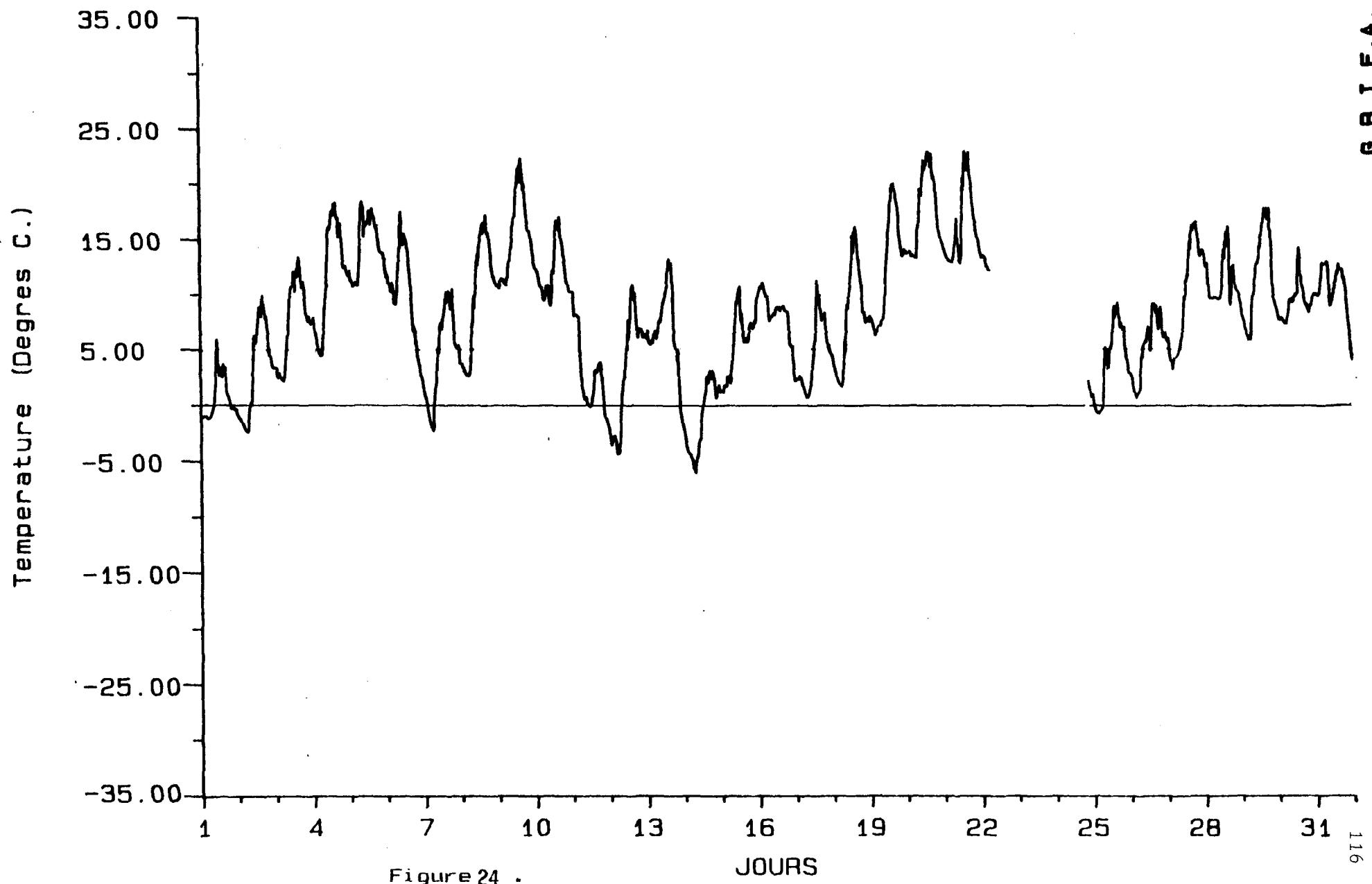
# TEMPERATURE MAI 1986



# TEMPERATURE AVRIL 1987



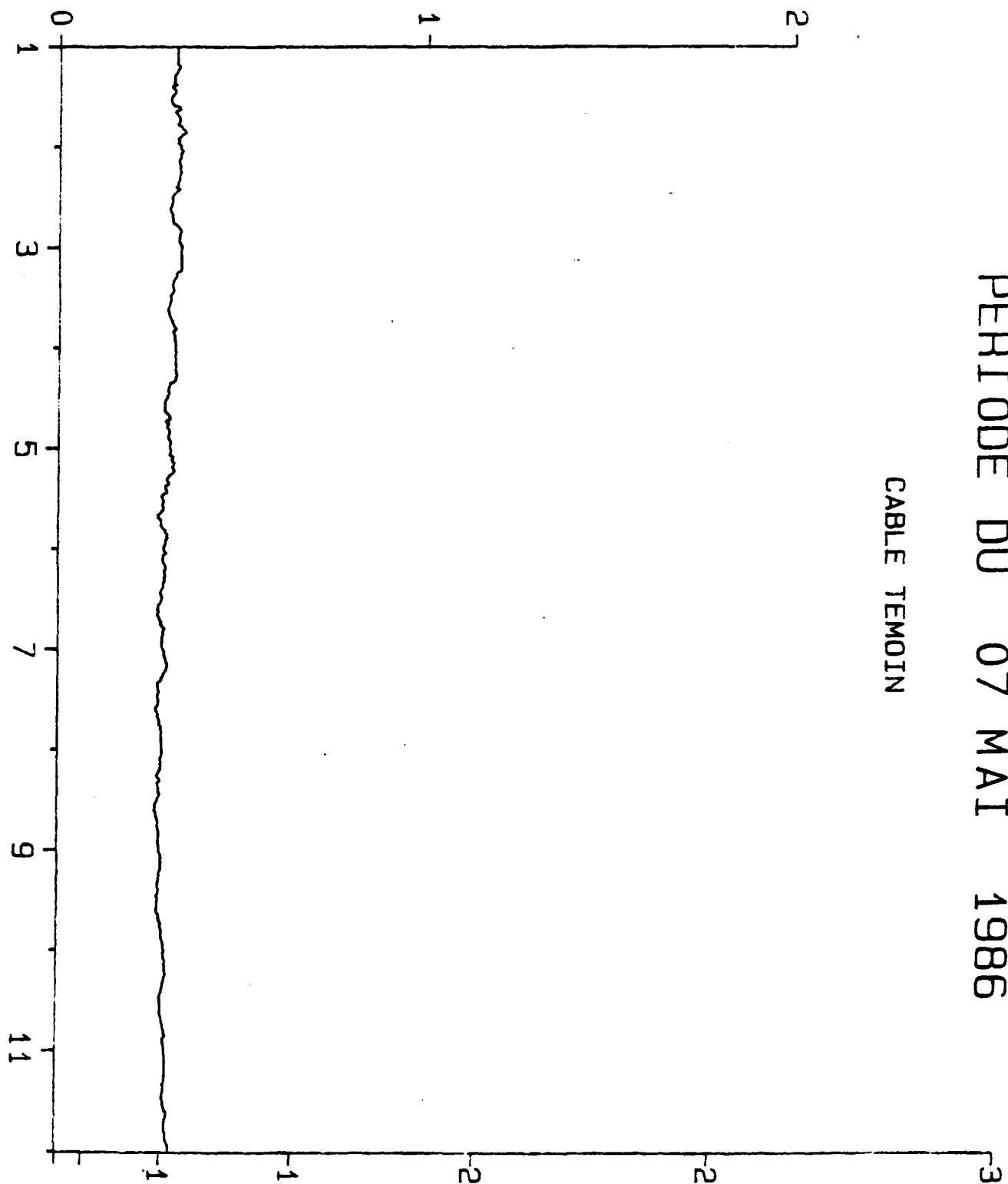
# TEMPERATURE MAI 1988



PERIODE DU 07 MAI 1986

CABLE TEMOIN

CHARGE DE GLACE (kg/m)

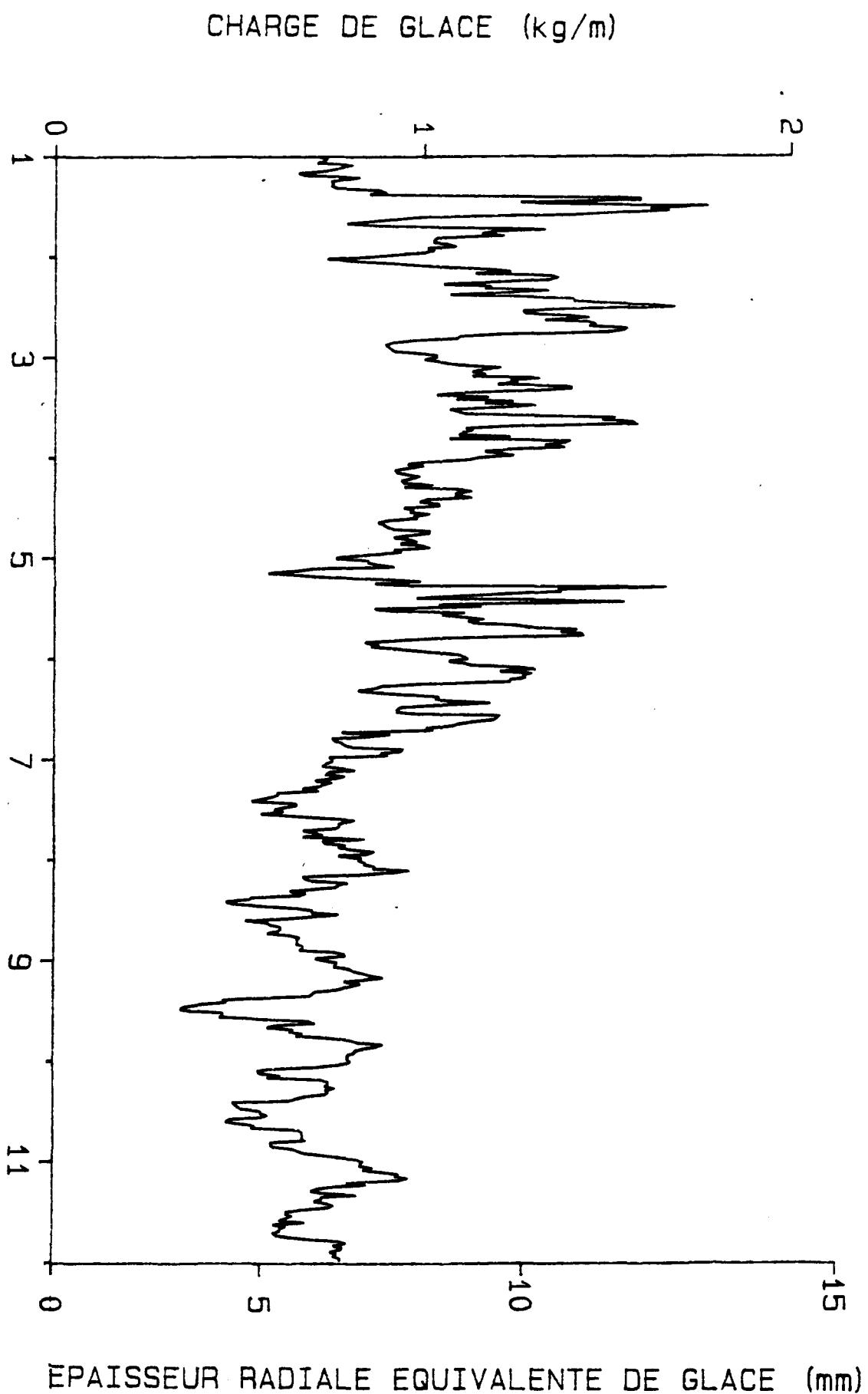


EPAISSEUR RADIALE EQUIVALENTE DE GLACE (mm)

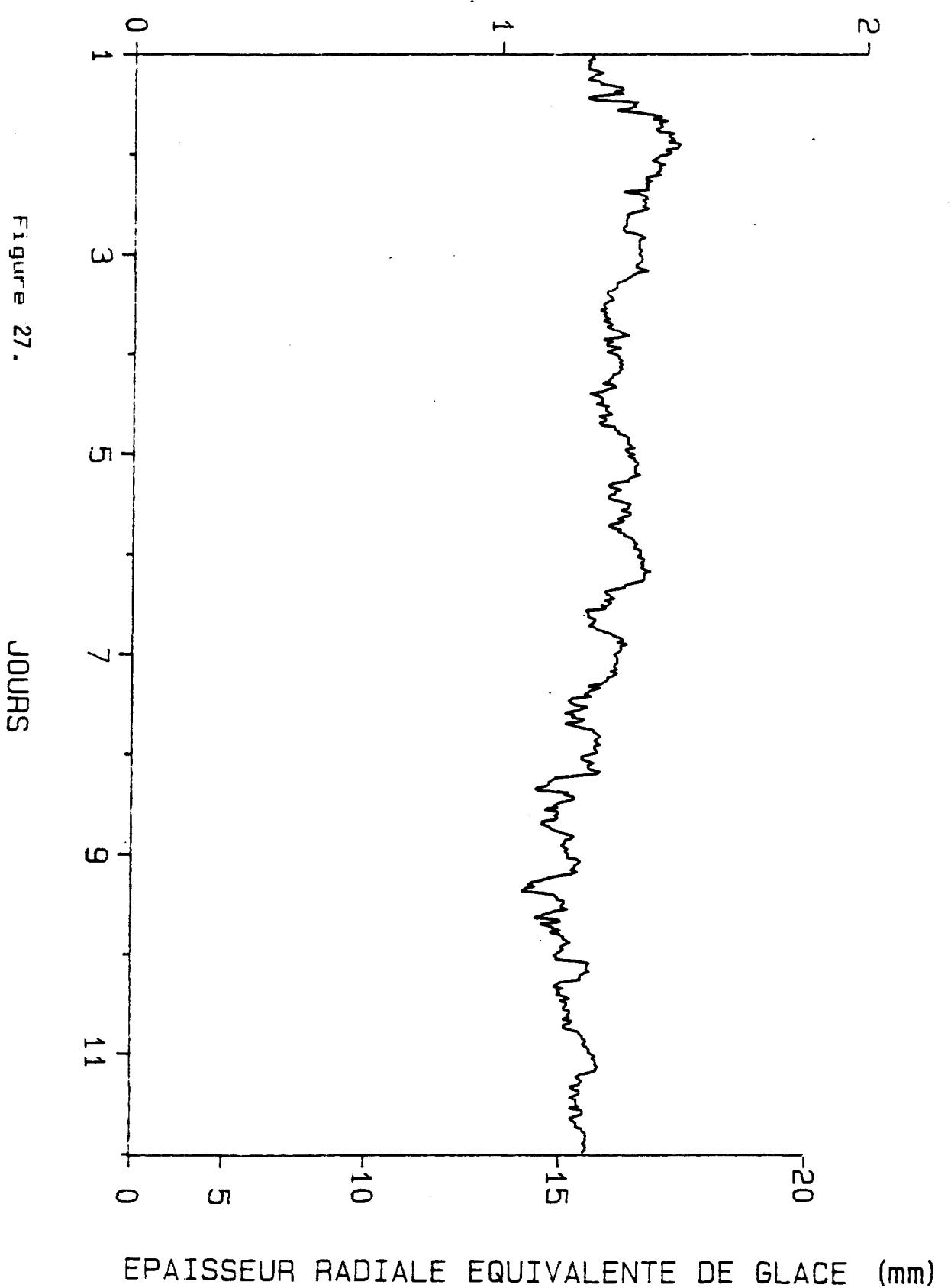
PERIODE DU 07 MAI 1986

CABLE BERSIMIS

Figure 26.

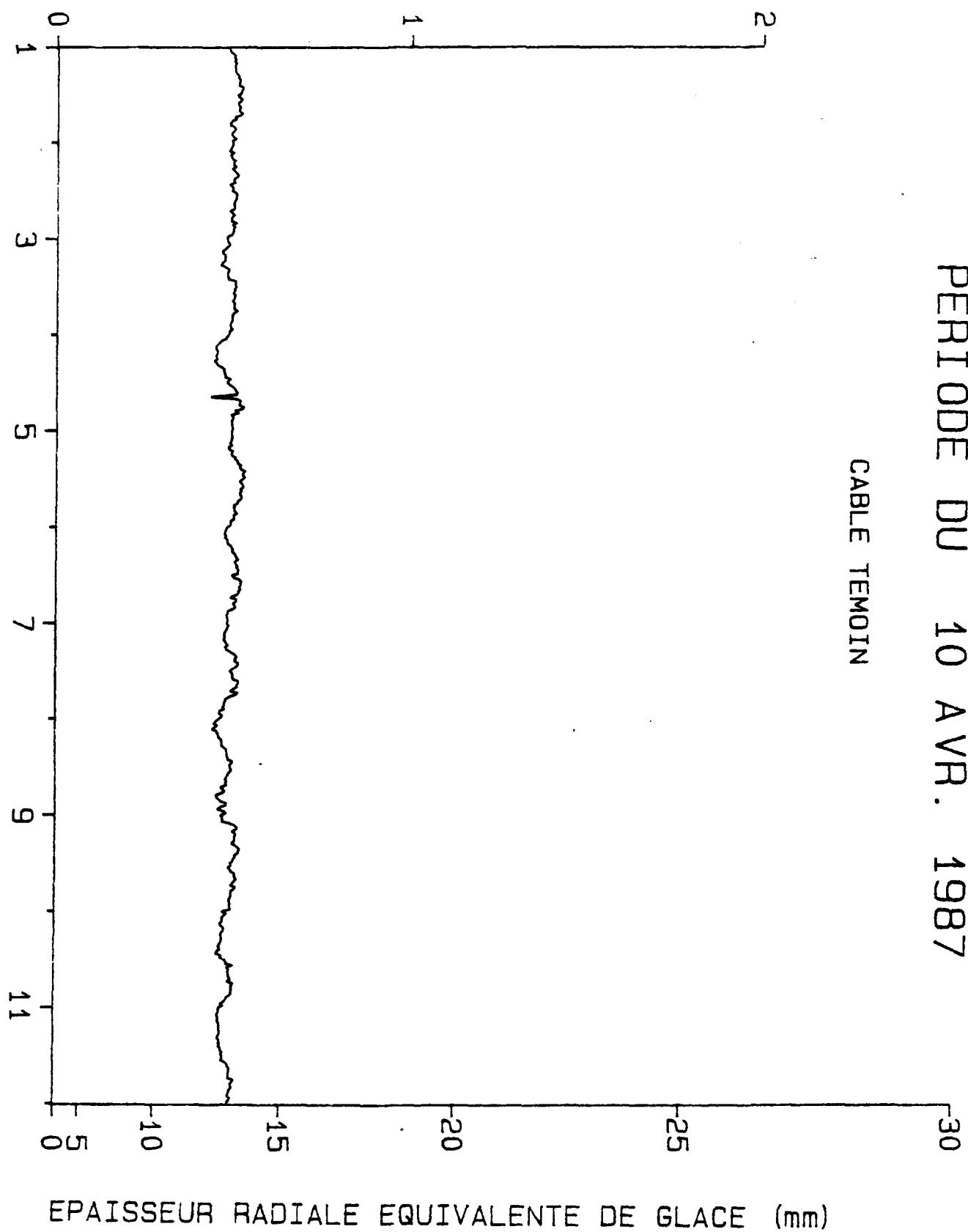


PERIODE DU 07 MAI 1986



PERIODE DU 10 AVR. 1987

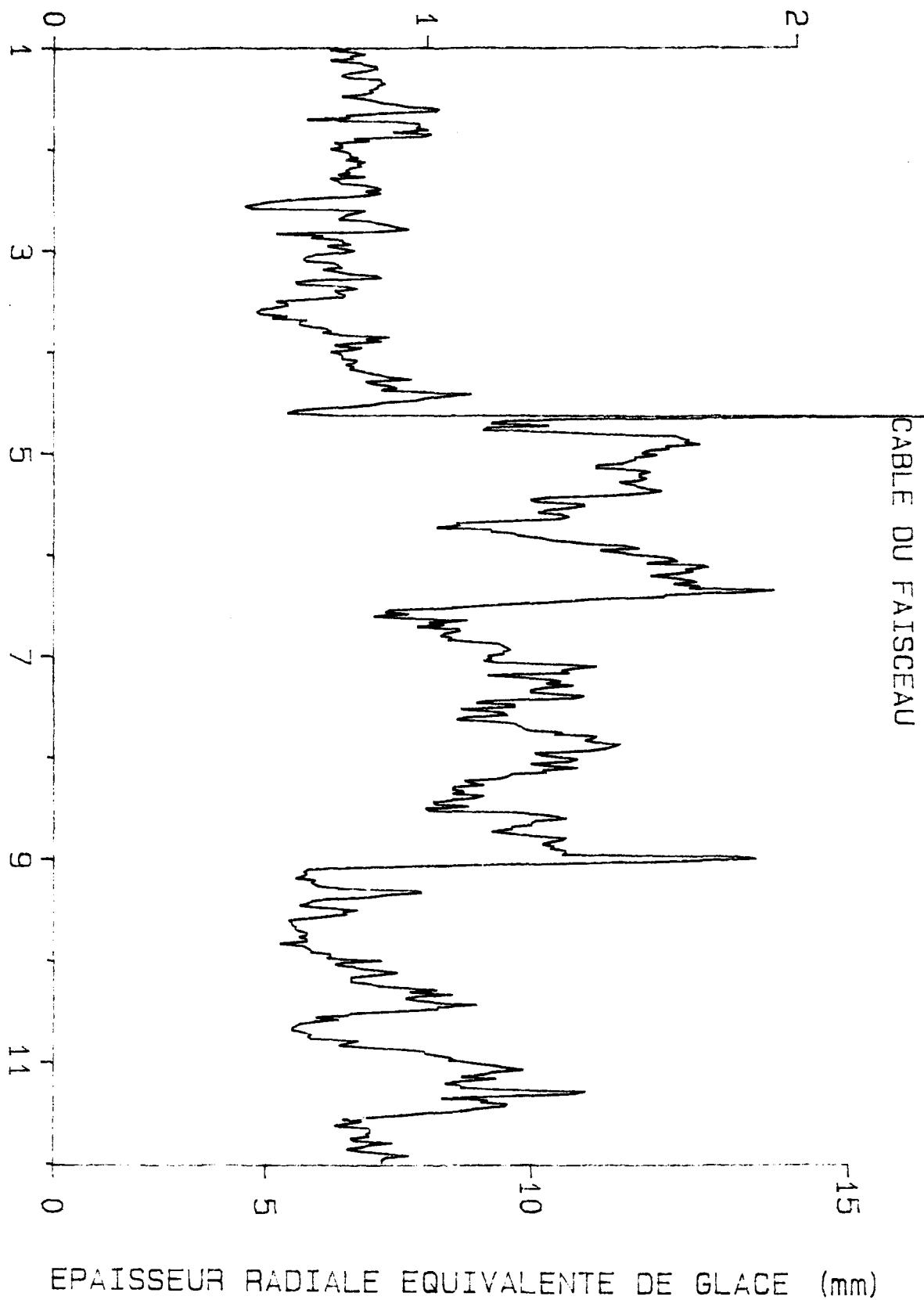
CABLE TEMOIN



PERIODE DU 10 AVR. 1987

CABLE DU FAISCEAU

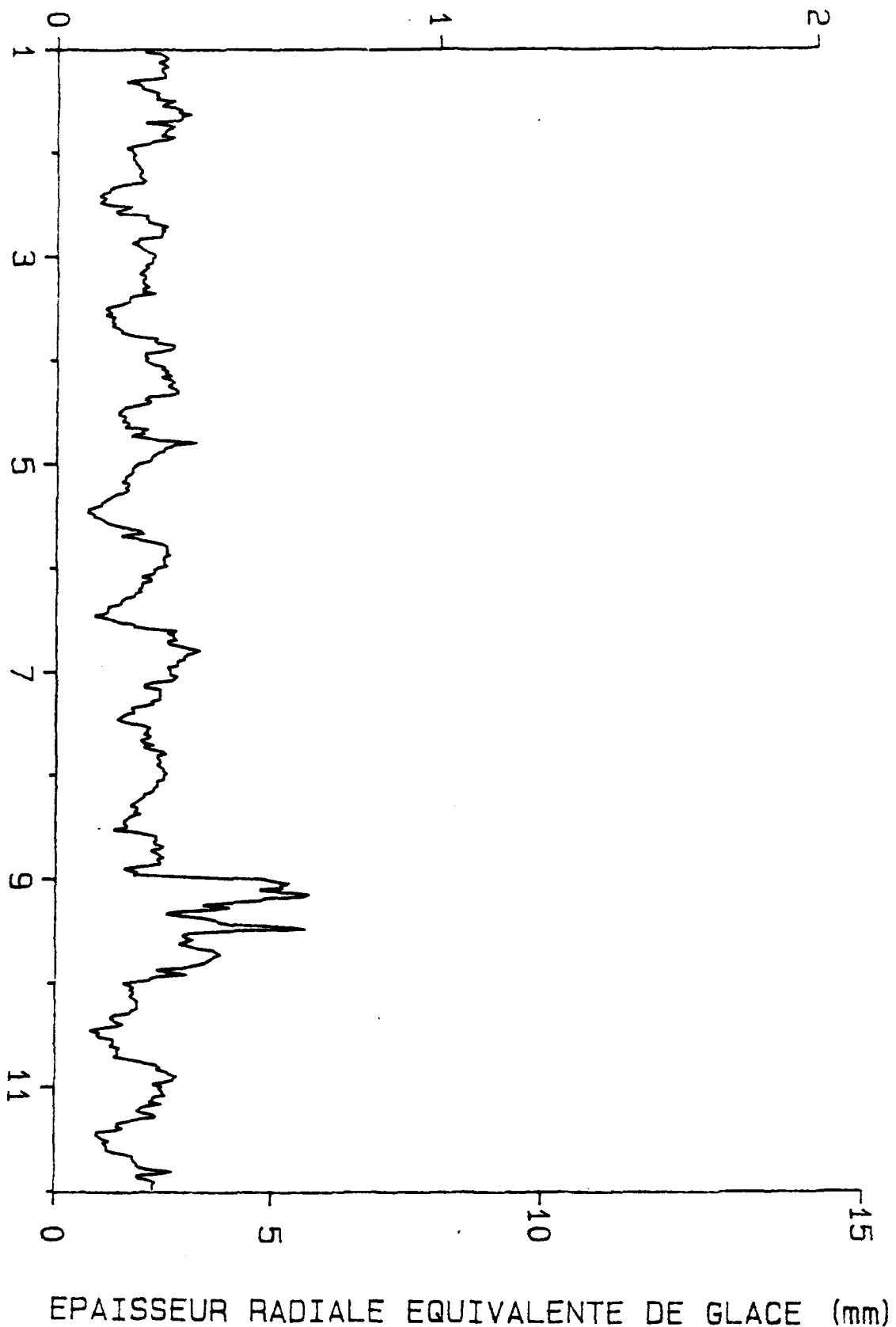
Figure 29 -



PERIODE DU 10 AVR. 1987

CABLE BERSIMIS

Figure 30.



PERIODE DU 10 AVR. 1987

CABLE DE GARDE

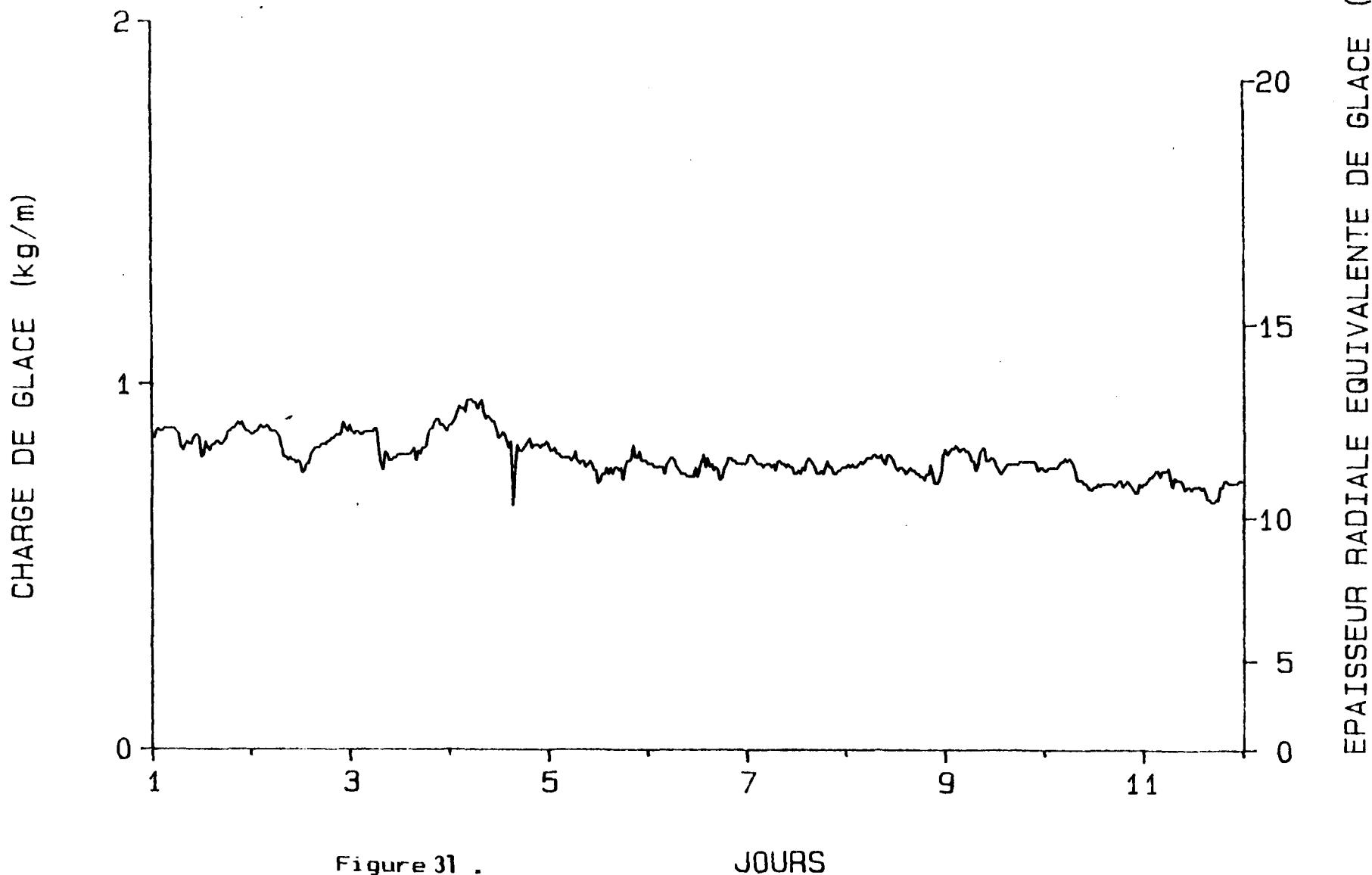
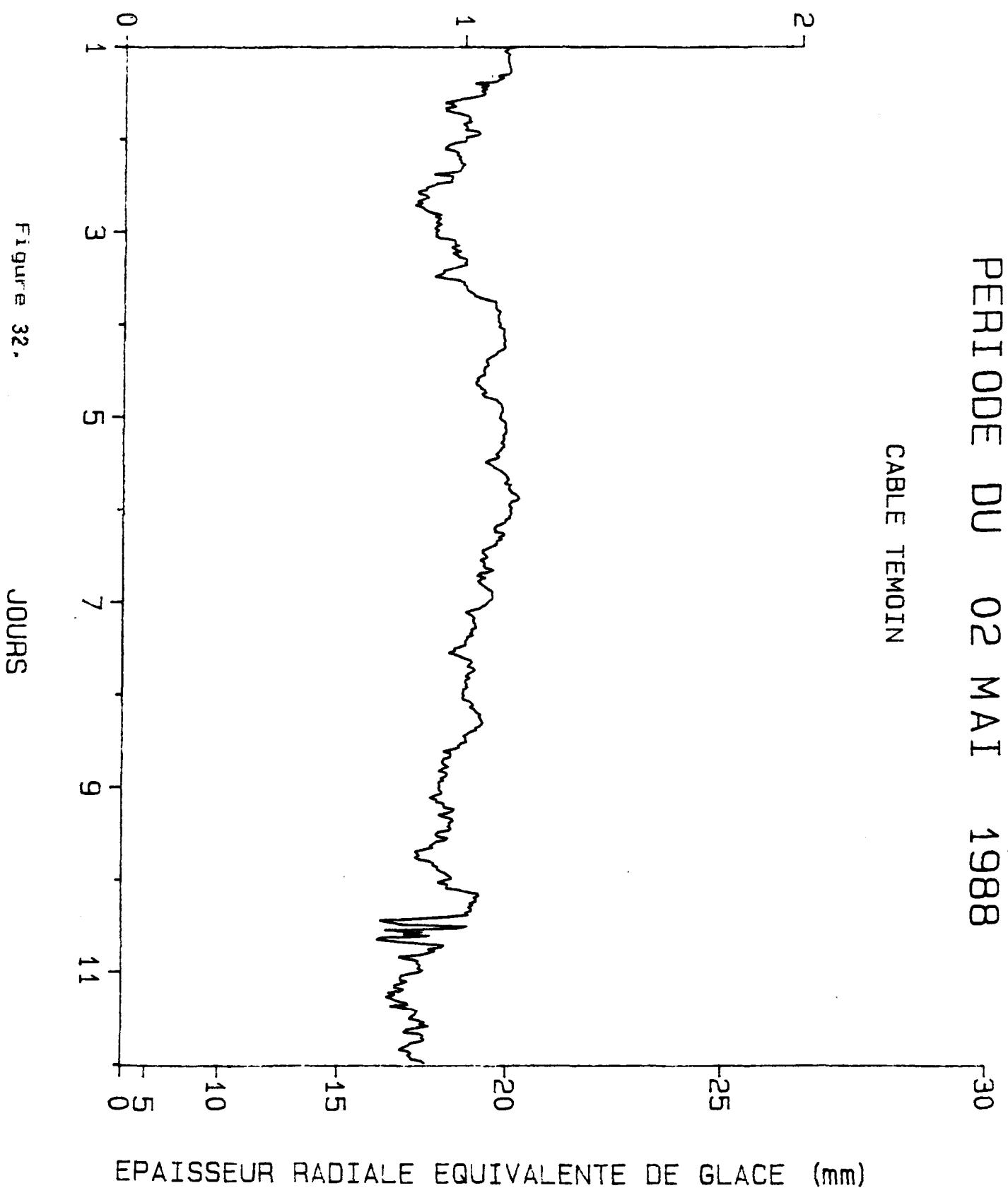


Figure 31 .

JOURS

Figure 32.

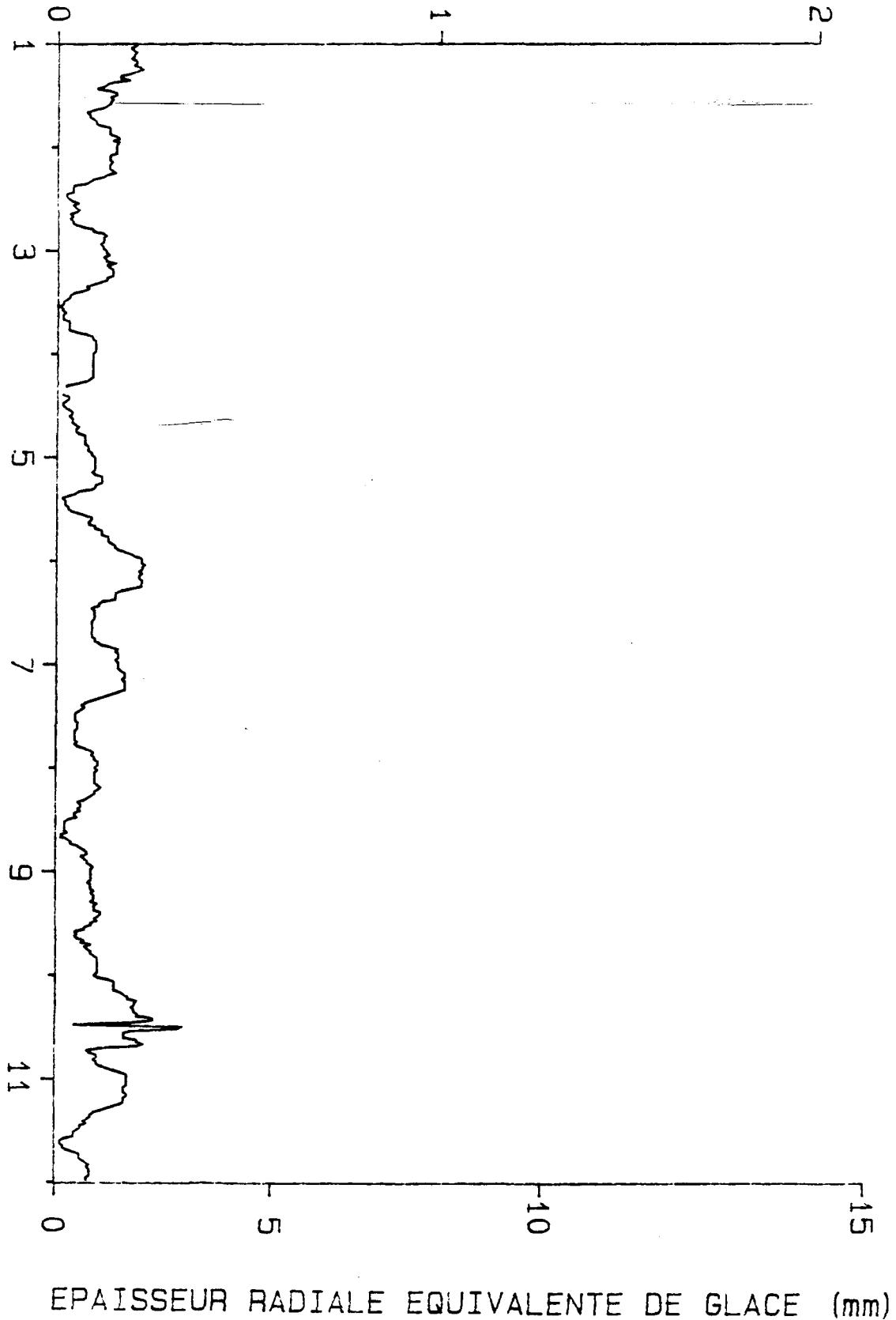


PERIODE DU 02 MAI 1988

CABLE BERSIMIS

CHARGE DE GLACE (kg/m)

Figure 33.



PERIODE DU 02 MAI 1988

CABLE DE GARDE

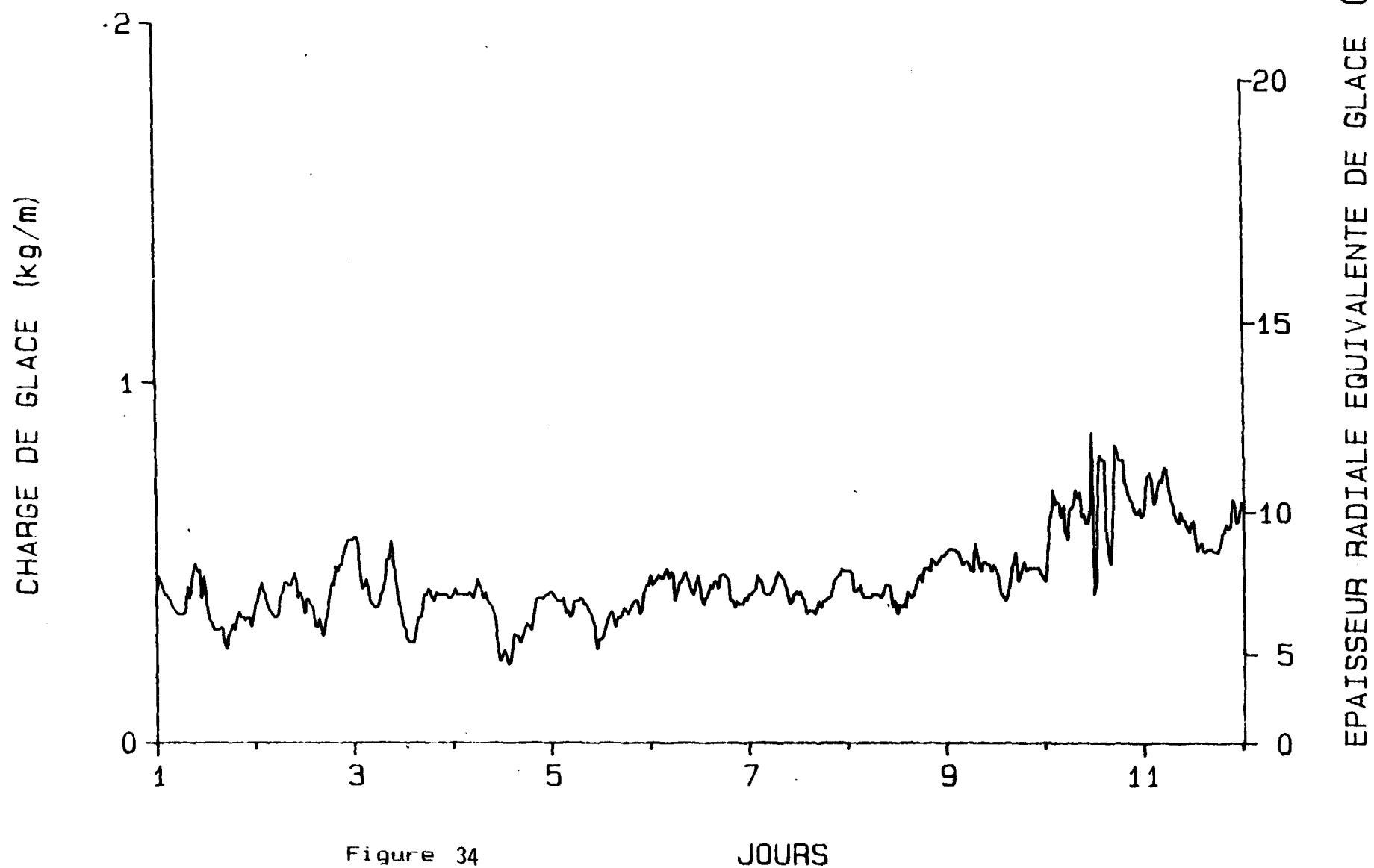
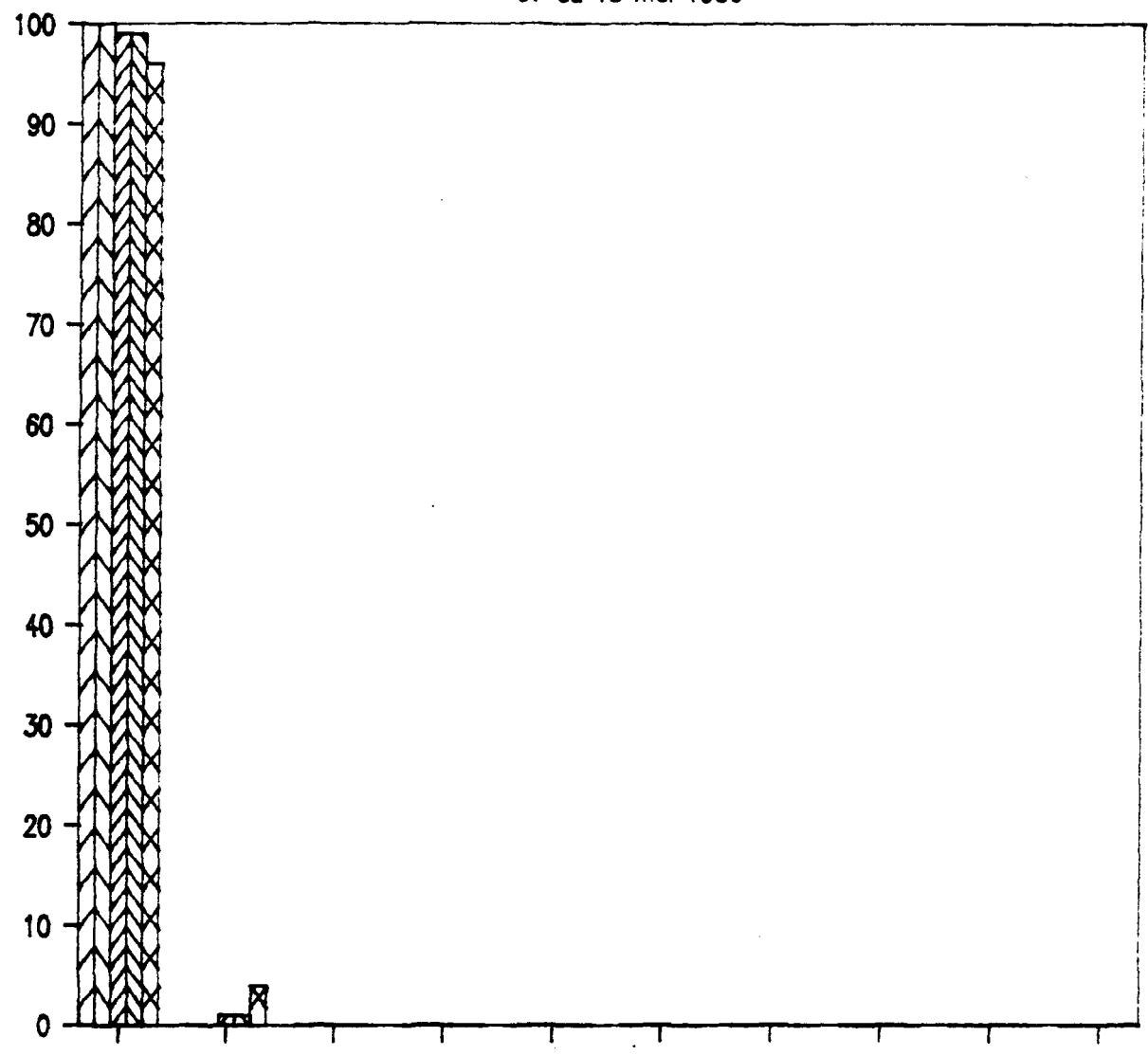


Figure 34

JOURS

## Câble Témoin: variation du signal

07 au 18 mai 1986



 Periode 0.5 h       Periode 1.0 h       Periode 1.5 h

 Periode 2.5 h

 Periode 5.0 h

Figure 35 .

## Cable bersimis: variation du signal

7 au 18 mai 1986

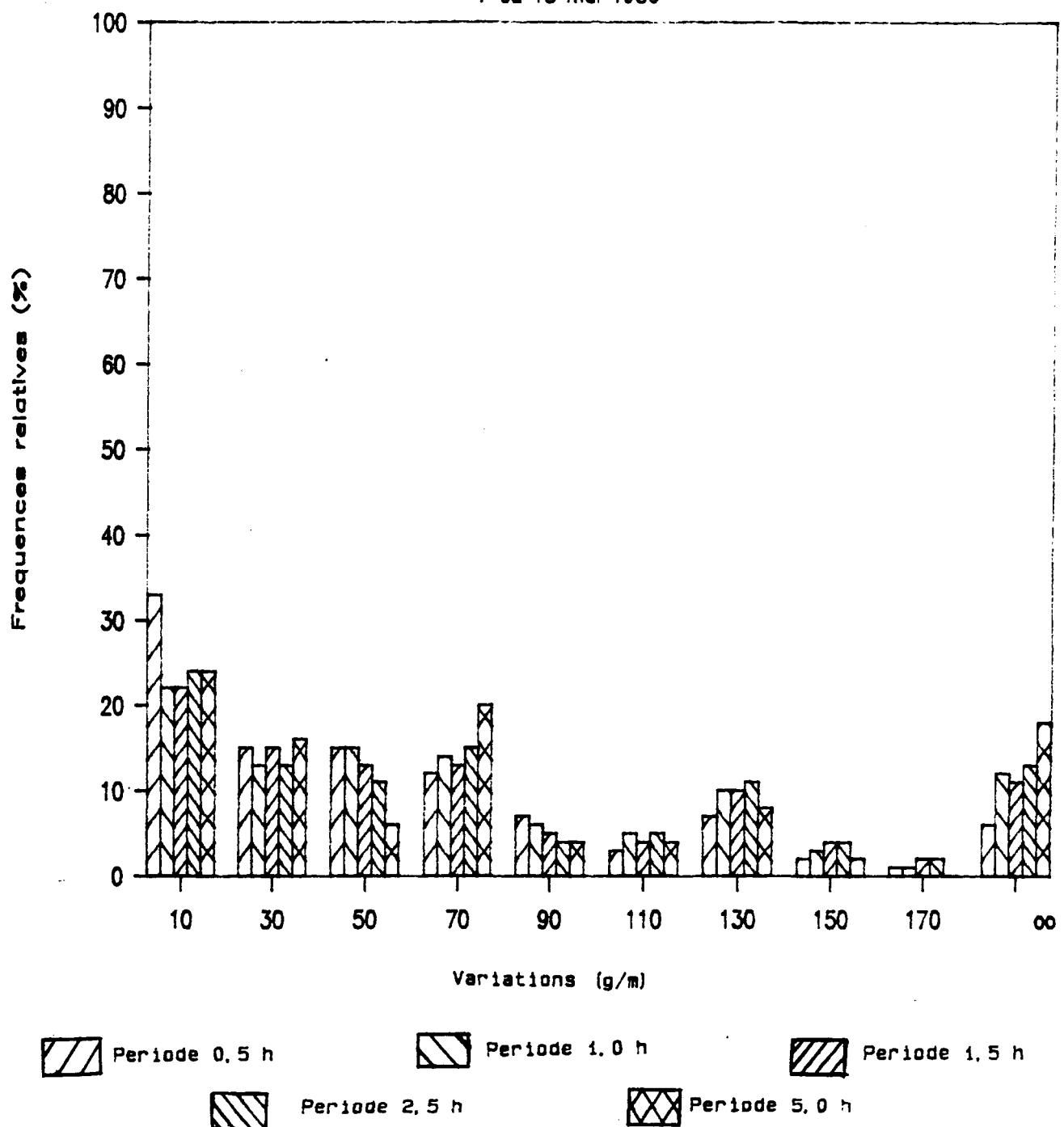


Figure 36.

## Cable de garde: variation du signal

07 au 18 mai 1986

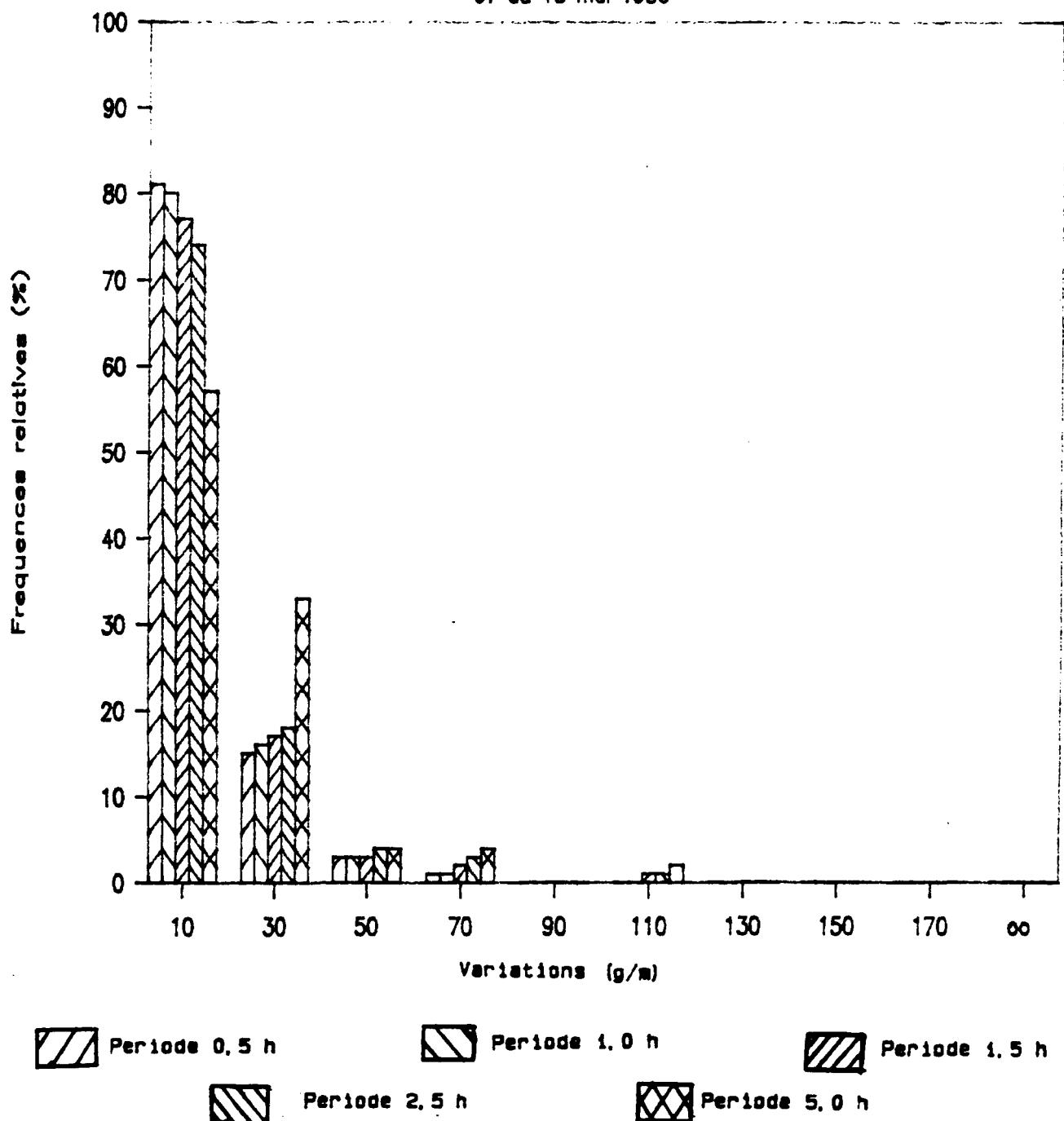


Figure 37.

## Cable témoin: variation du signal

10 au 21 avril 1987

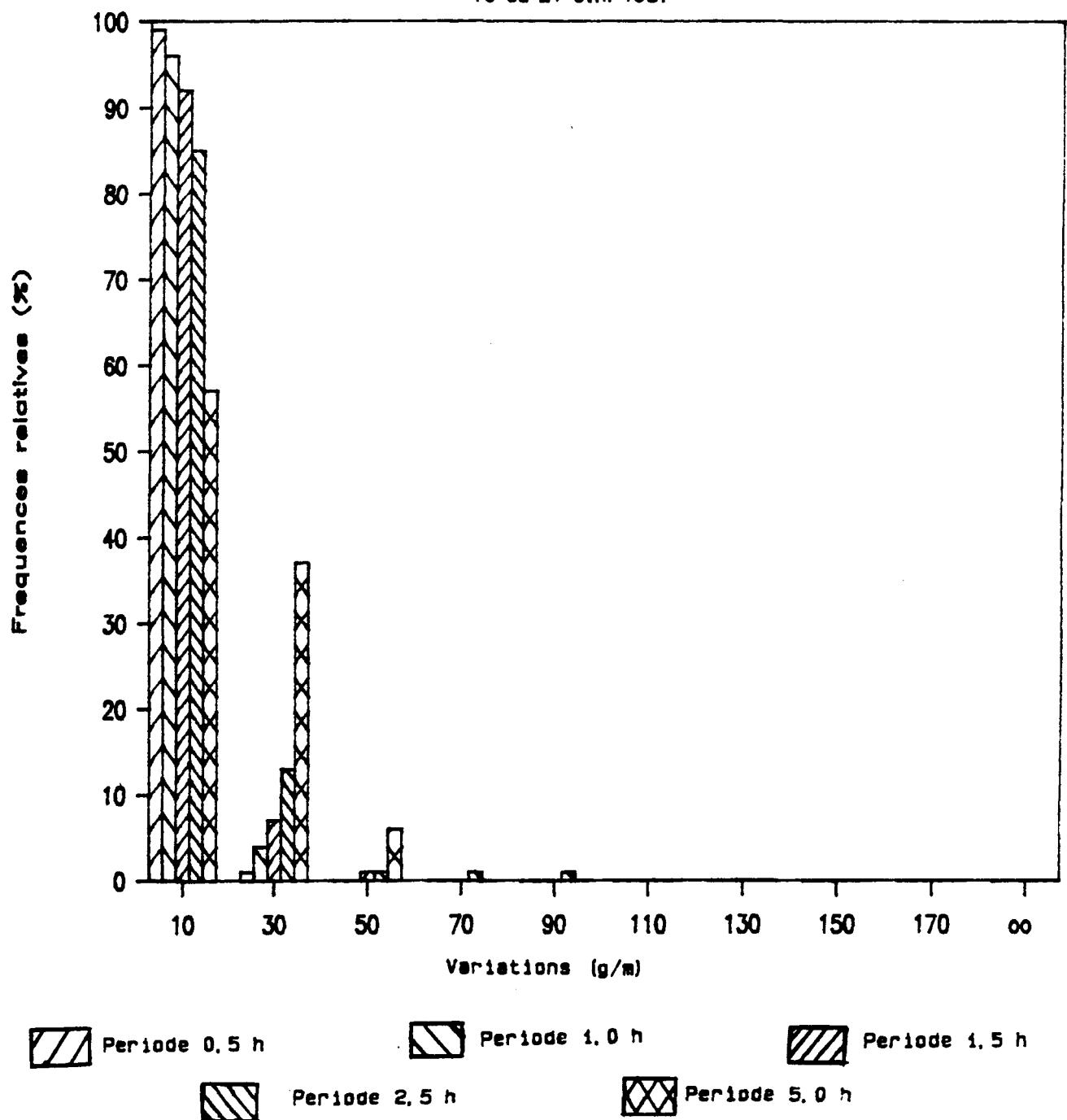


Figure 38.

## Cable du faisceau: variation du signal

10 au 21 avril 1987

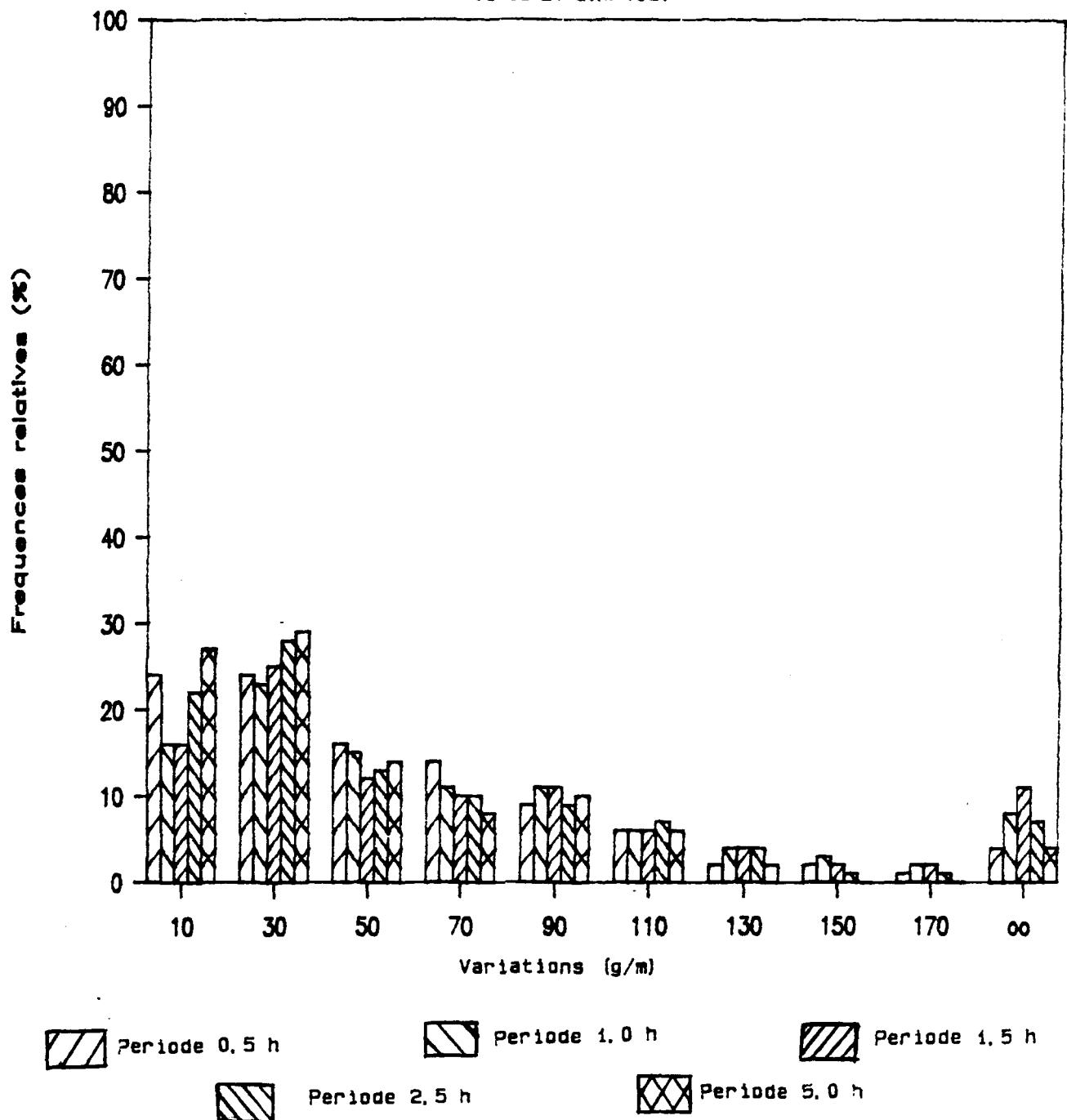


Figure 39 .

## Cable bersimis: variation du signal

10 au 21 avril 1987

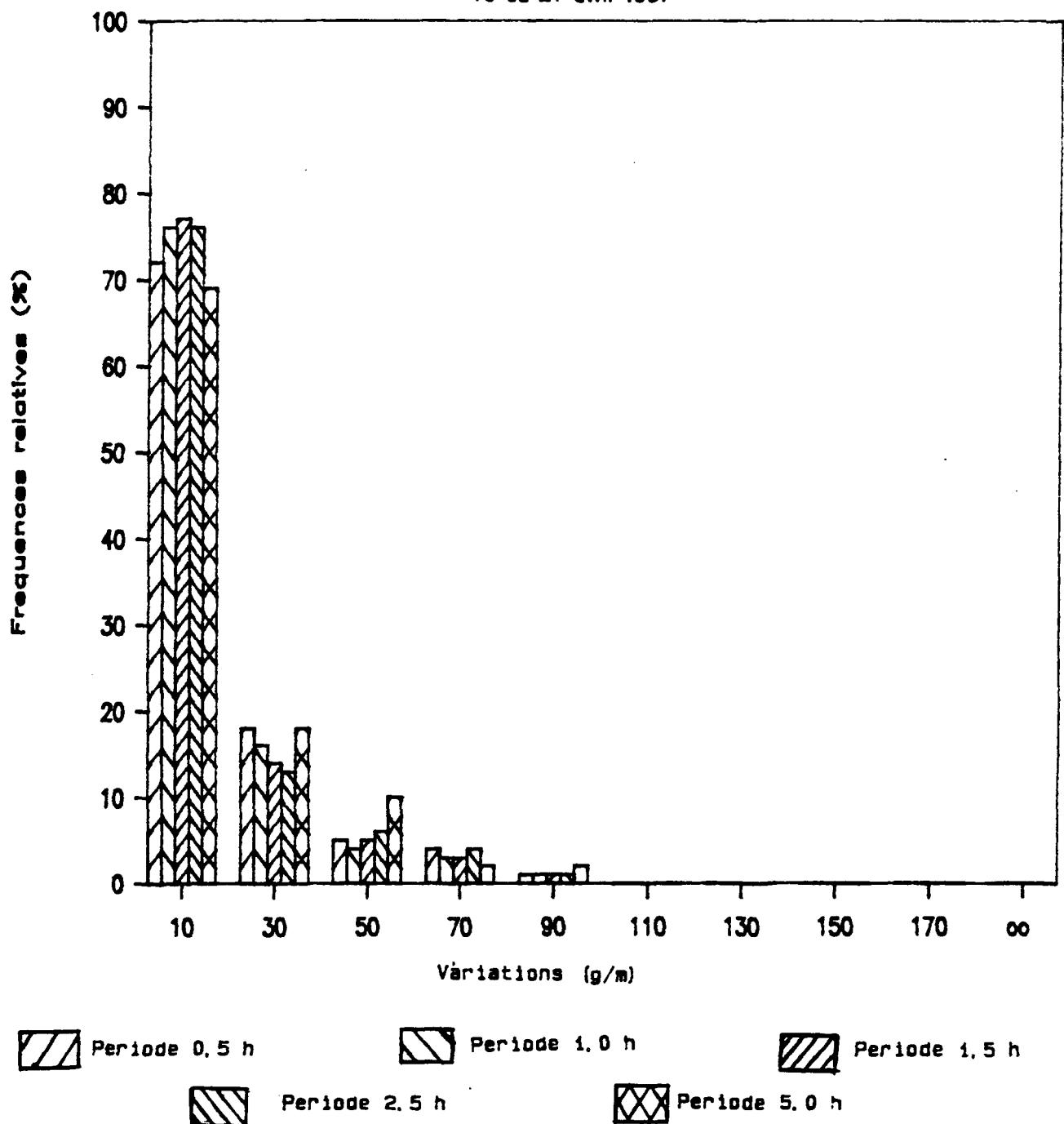


Figure 40.

## Cable de garde: variation du signal

10 au 21 avril 1987

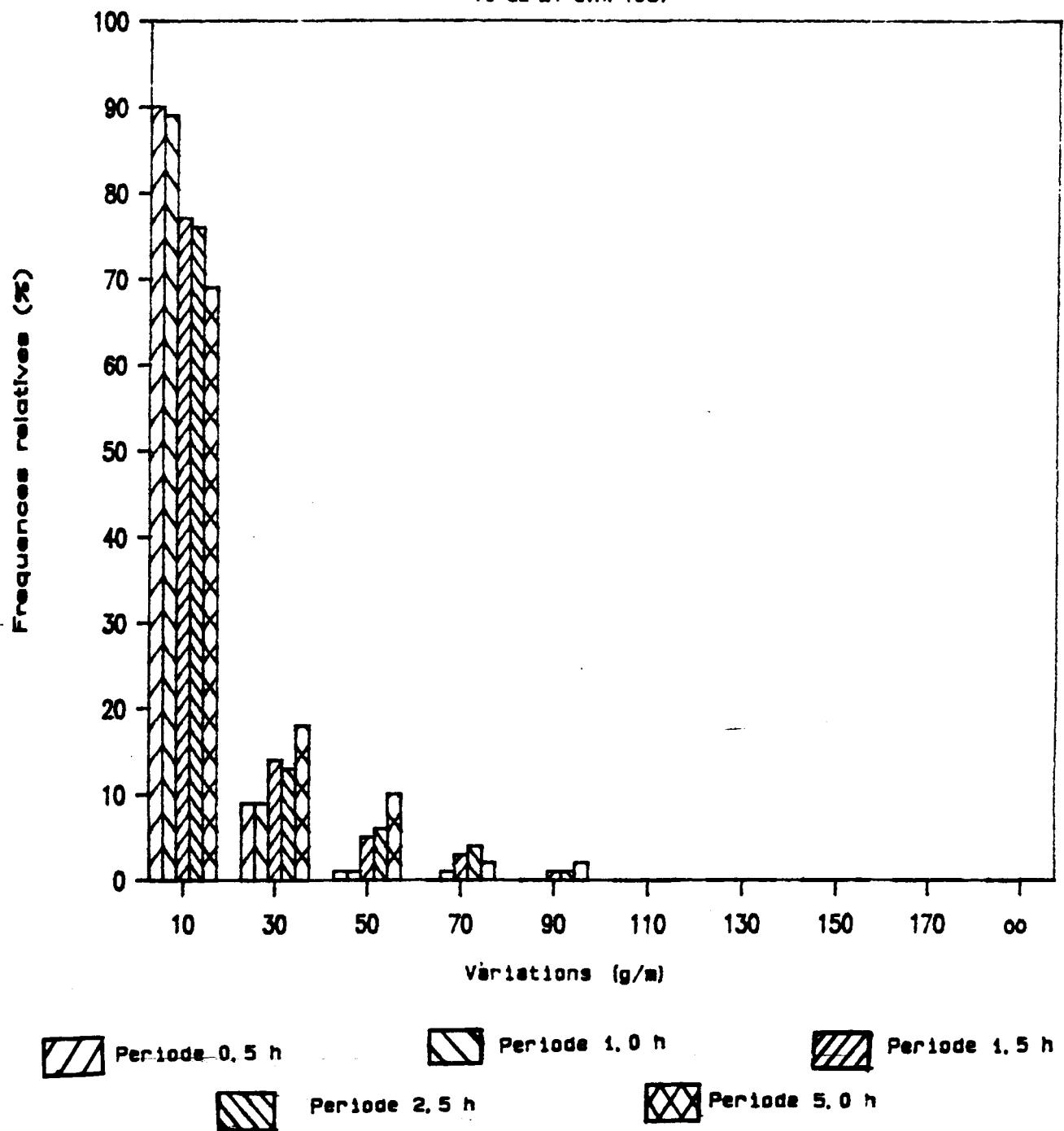


Figure 41 .

## Cable témoin: variation du signal

02 au 13 mai 1988

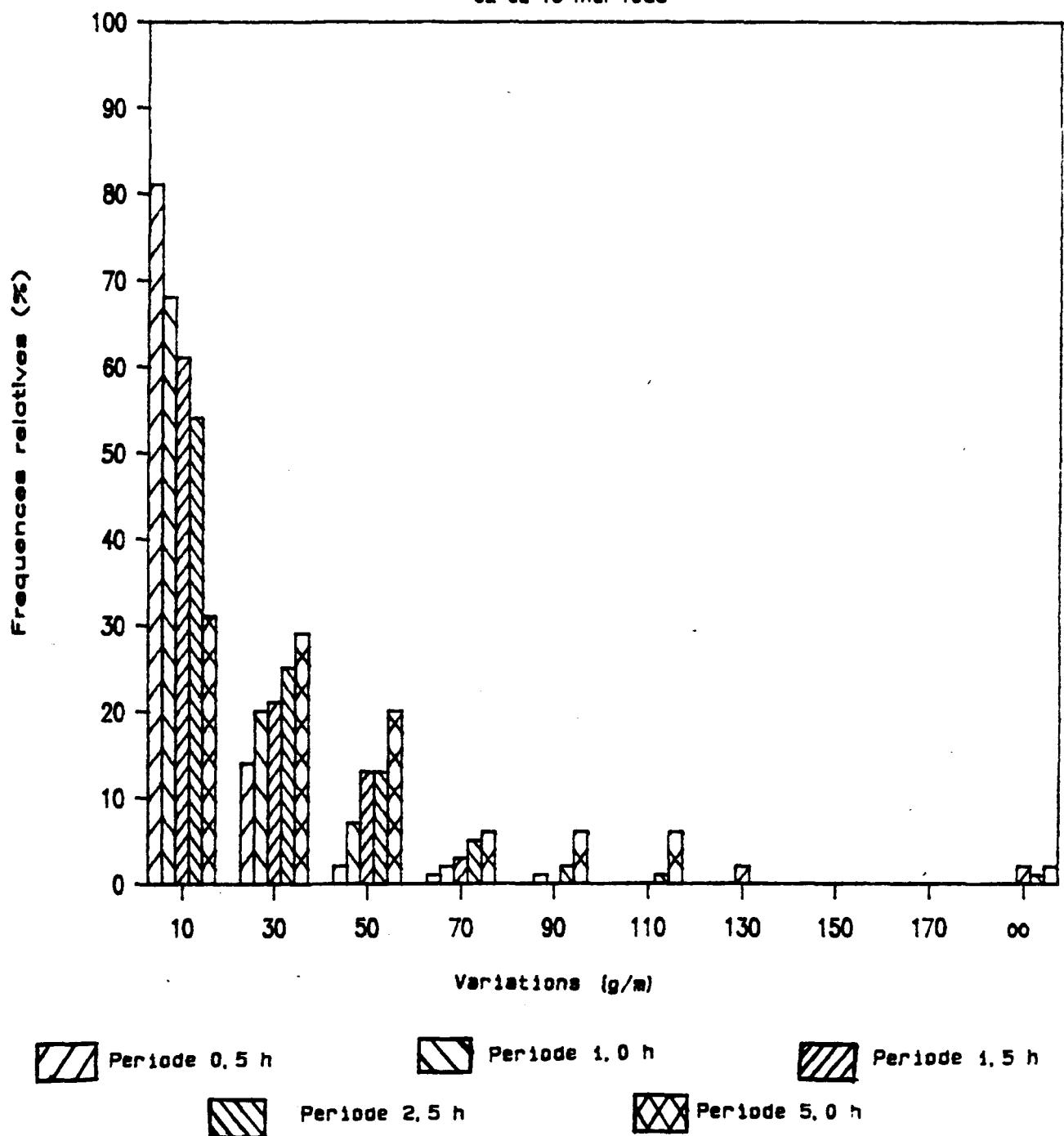


Figure 42.

## Cable Bersimis: variation du signal

02 au 13 mai 1988

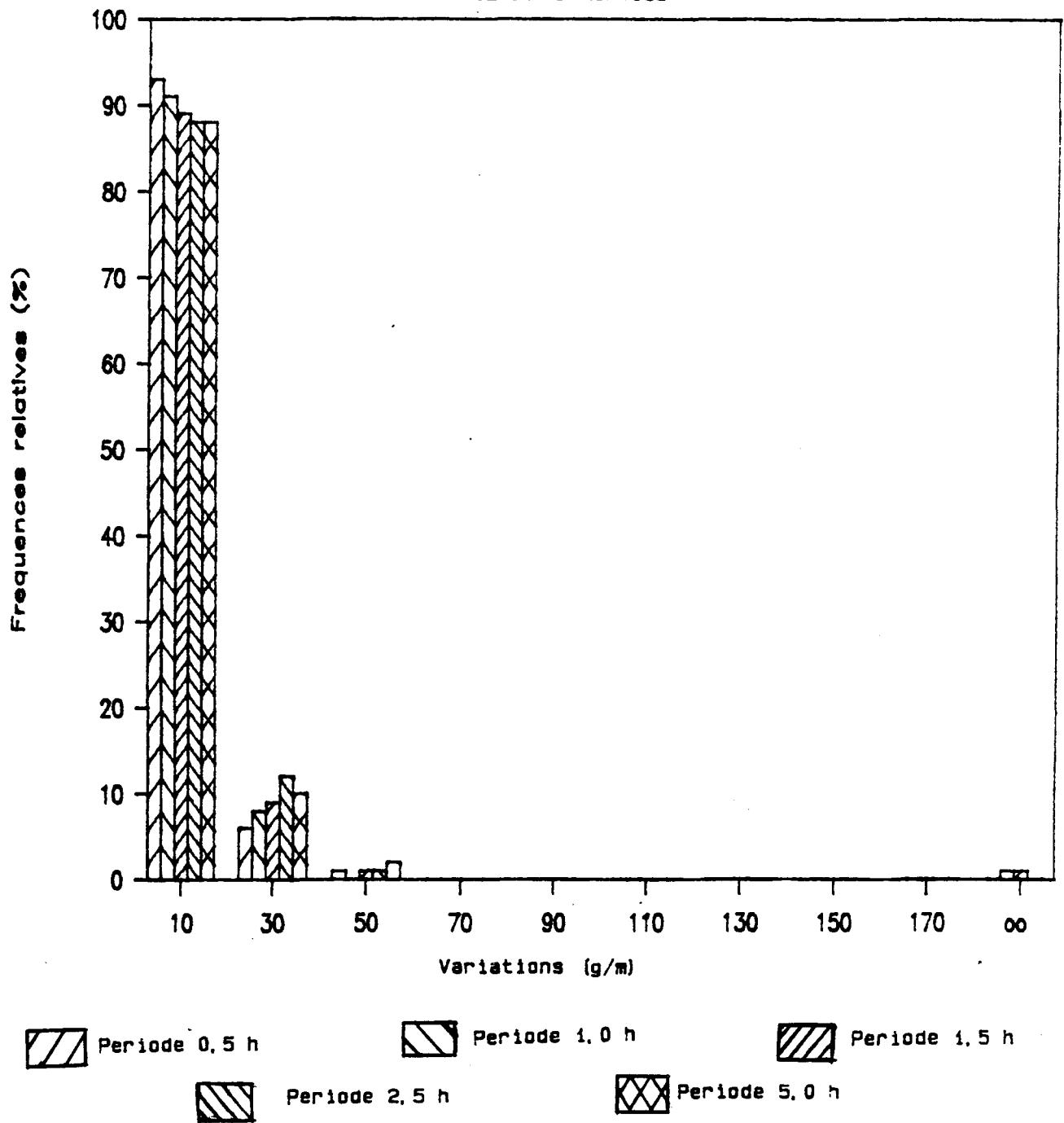


Figure 43.

## Cable de garde: variation du signal

02 au 13 mai 1988

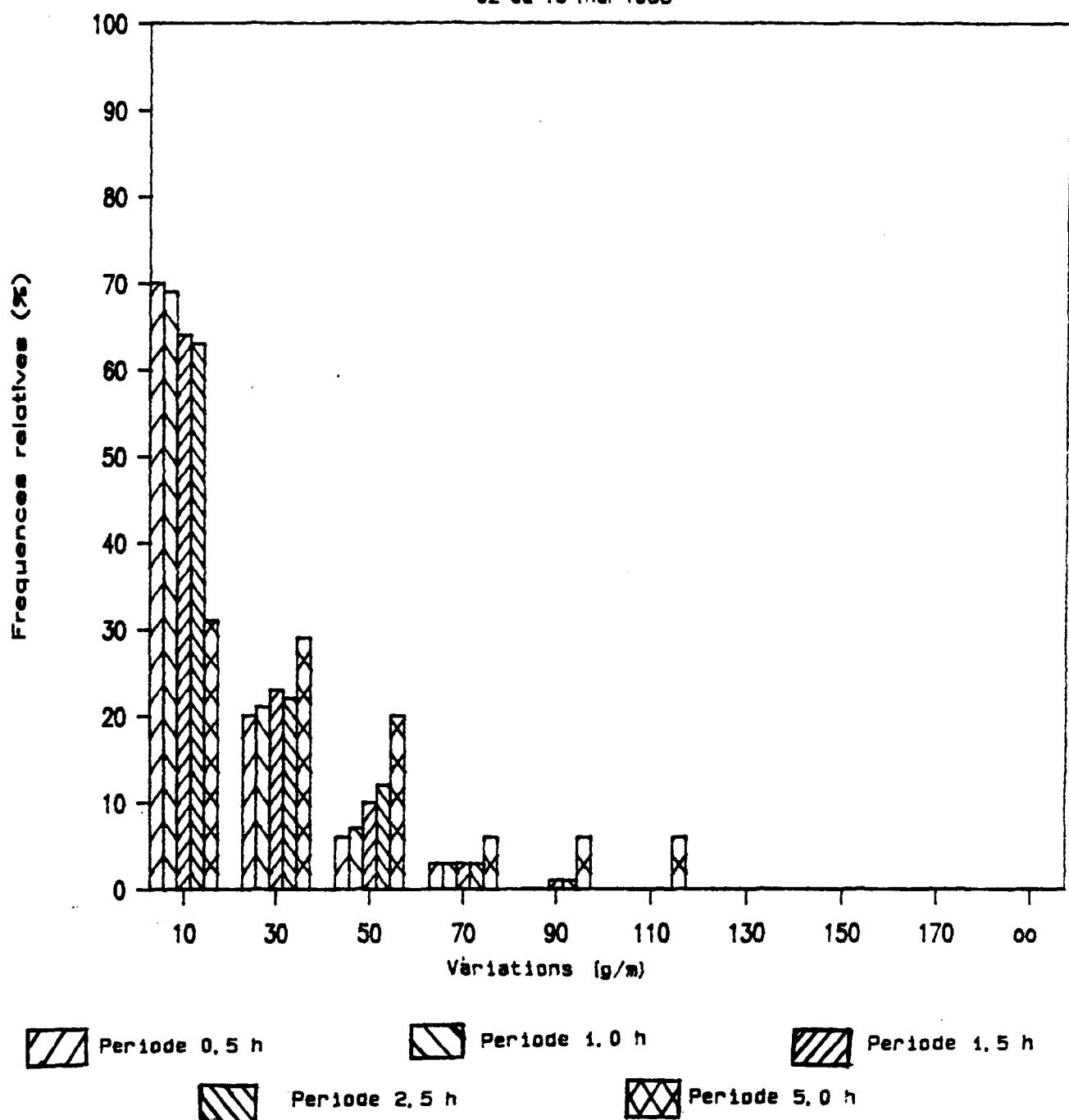
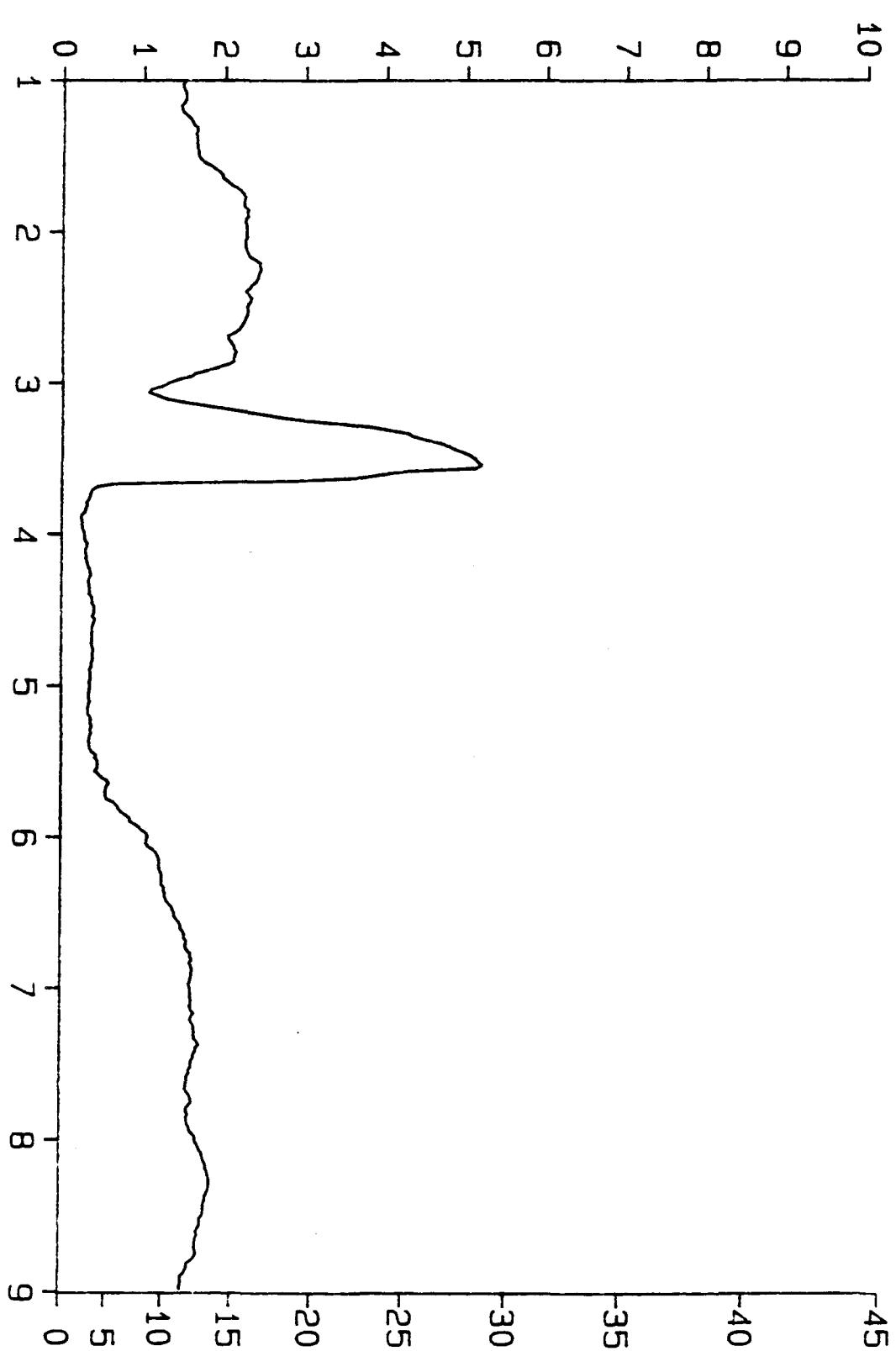


Figure 44.

PERIODE DU 01 NOV. 1987

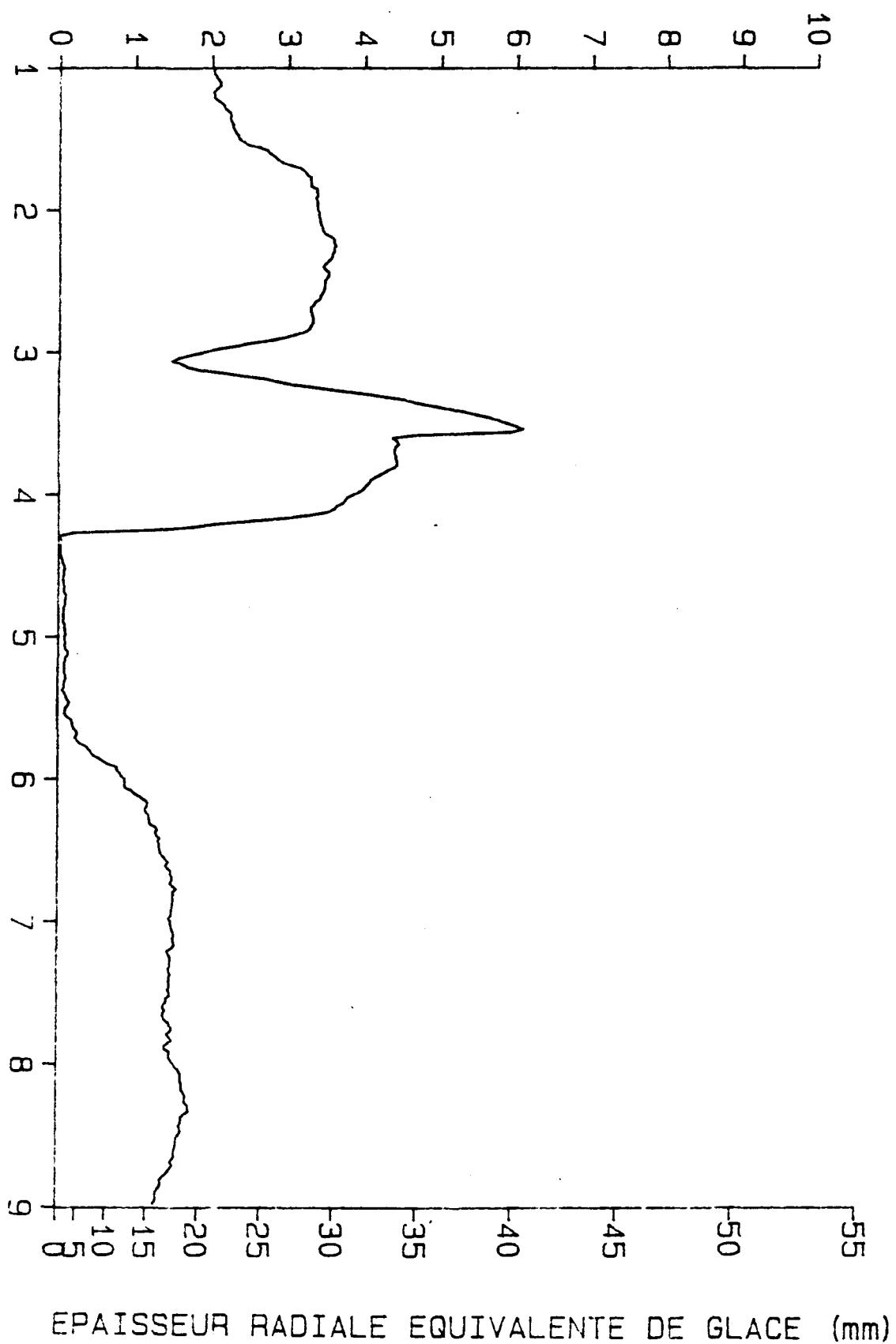
CABLE BERSIMIS



EPAISSEUR RADIALE EQUIVALENTE DE GLACE (mm)

PERIODE DU 01 NOV. 1987

CABLE DE GARDE



PERIODE DU 01 FEV. 1987

CABLE BERSIMIS

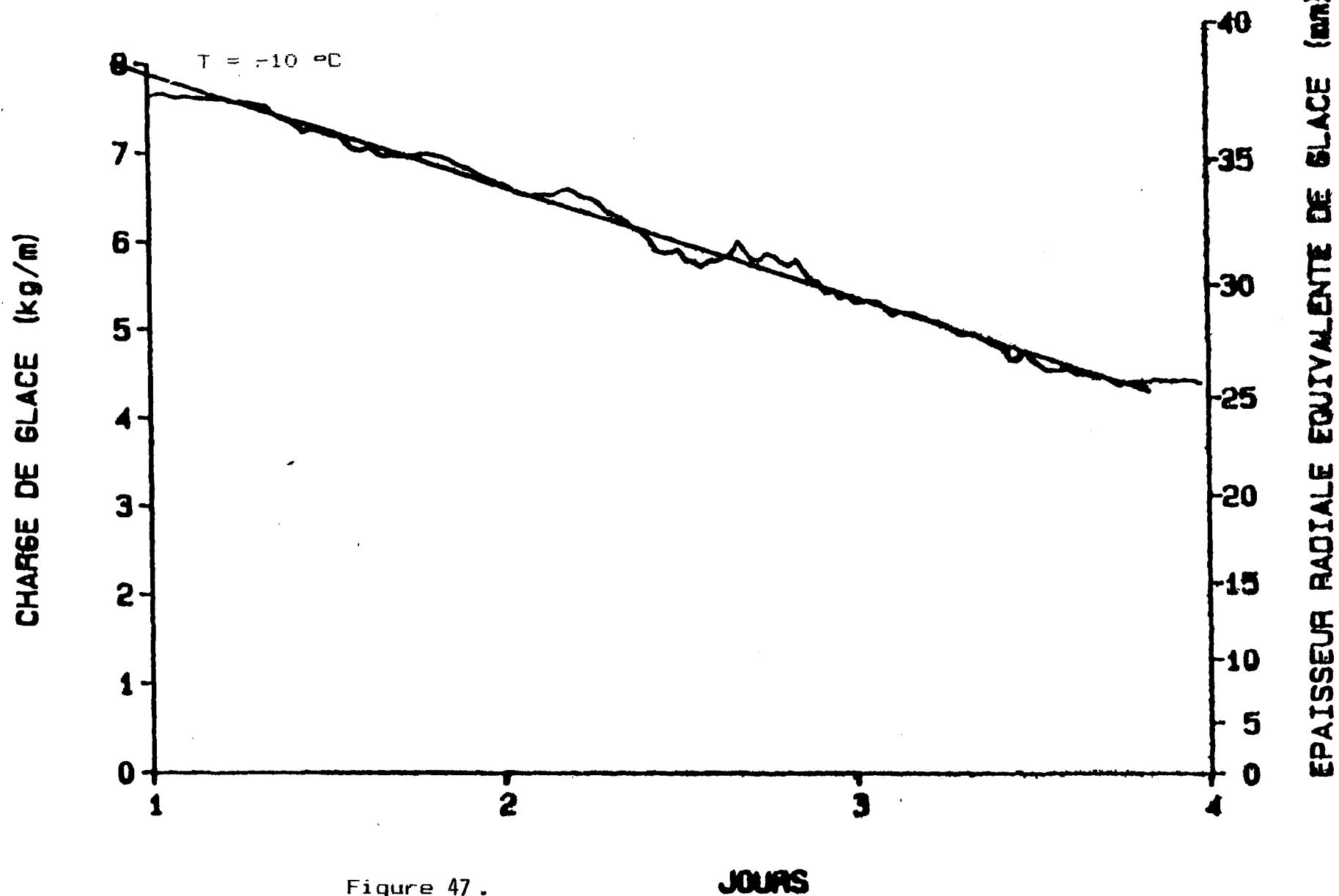


Figure 47.

PERIODE DU 01 FEV. 1987

CABLE TEMOIN

$T = -10^{\circ}\text{C}$

CHARGE DE GLACE (kg/m)

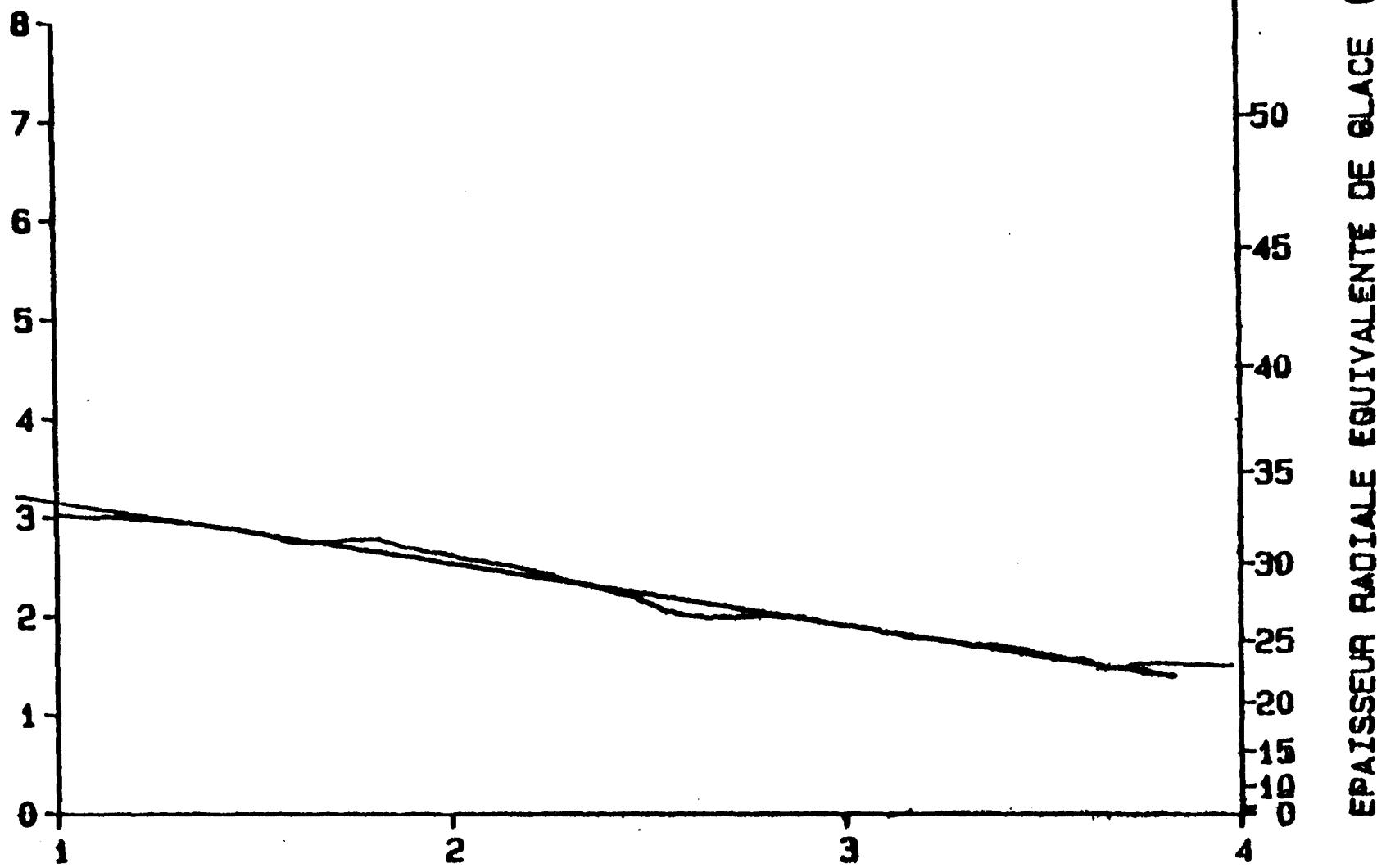
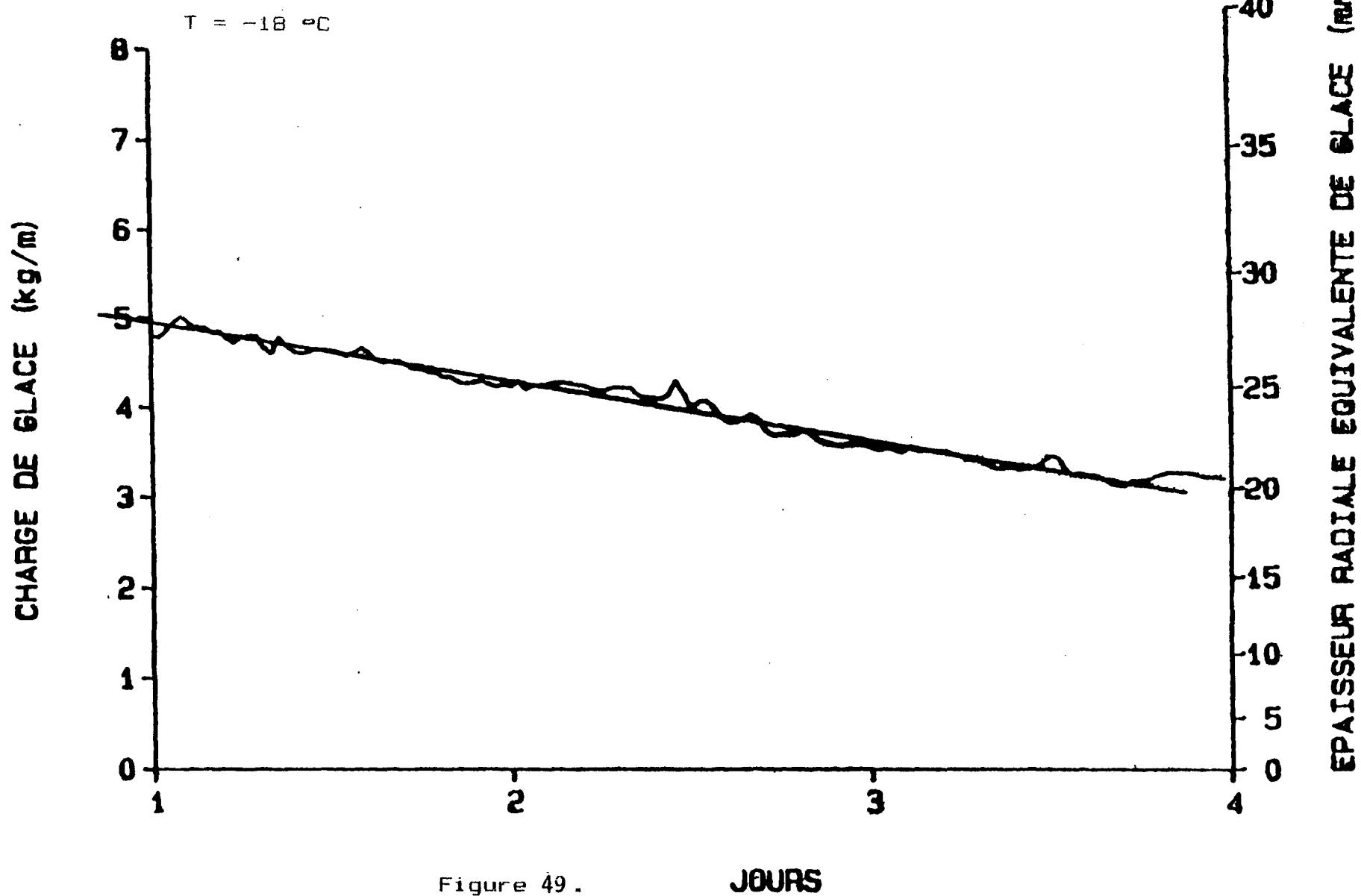


Figure 48

JOURS

PERIODE DU 17 FEV. 1987

CABLE BERSIMIS



PERIODE DU 21 FEV. 1987

CABLE BERSIMIS

$T = -12^{\circ}\text{C}$

CHARGE DE GLACE (kg/m)

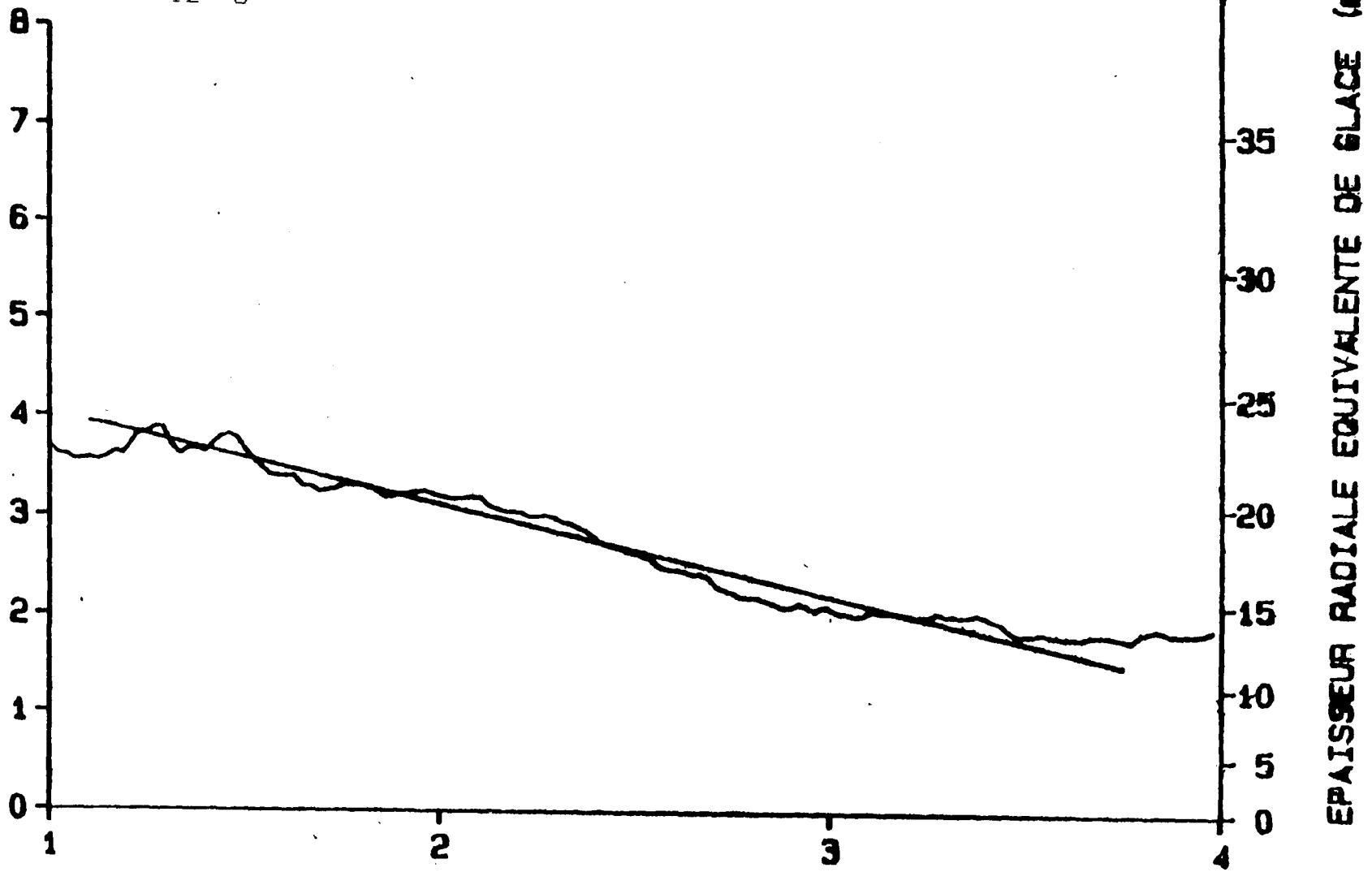
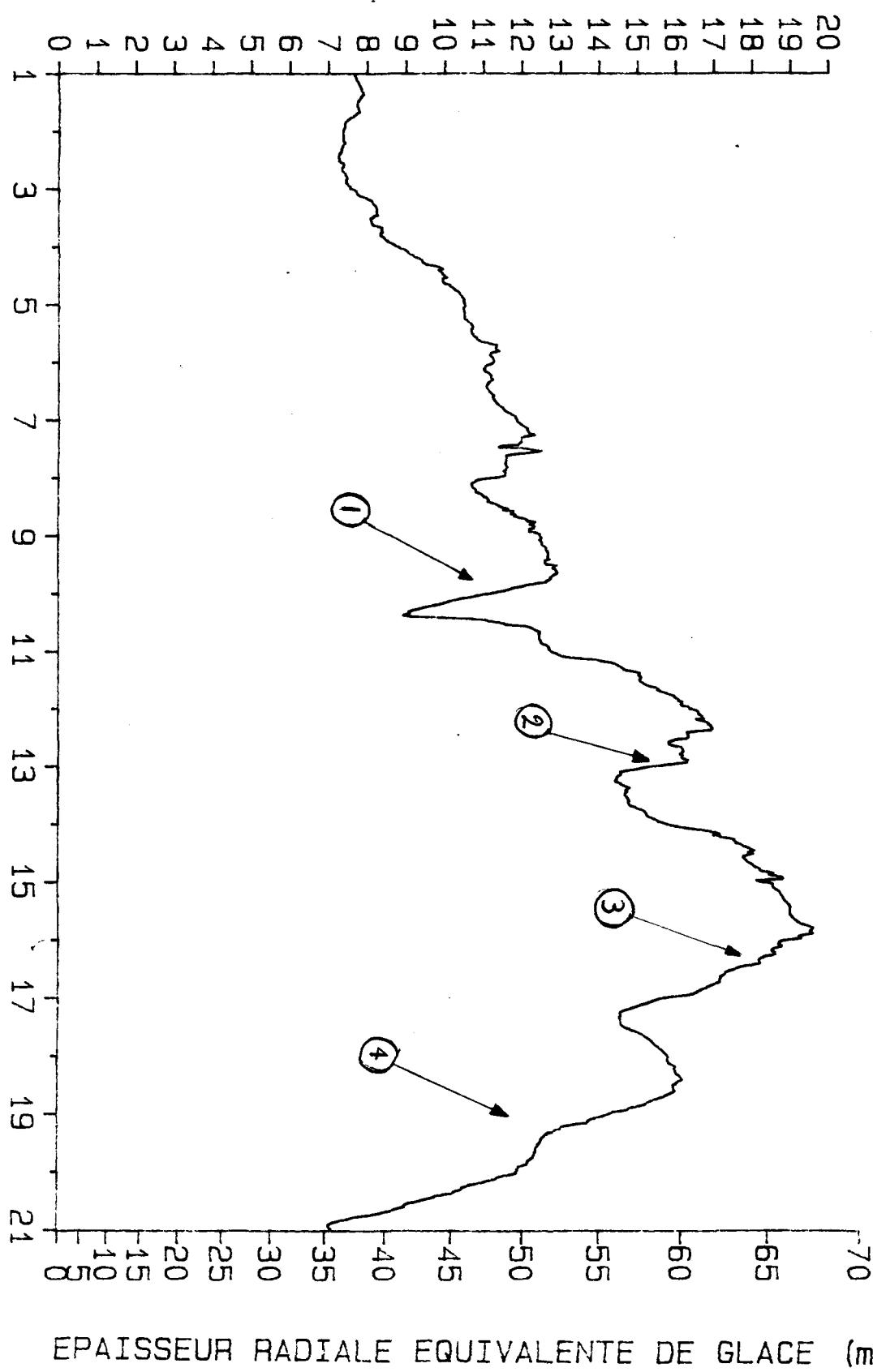


Figure 50 .

JOURS

PERIODE DU 16 DEC. 1986

CABLE BERSIMIS



PERIODE DU 04 JANV. 1987

CABLE BERSIMIS

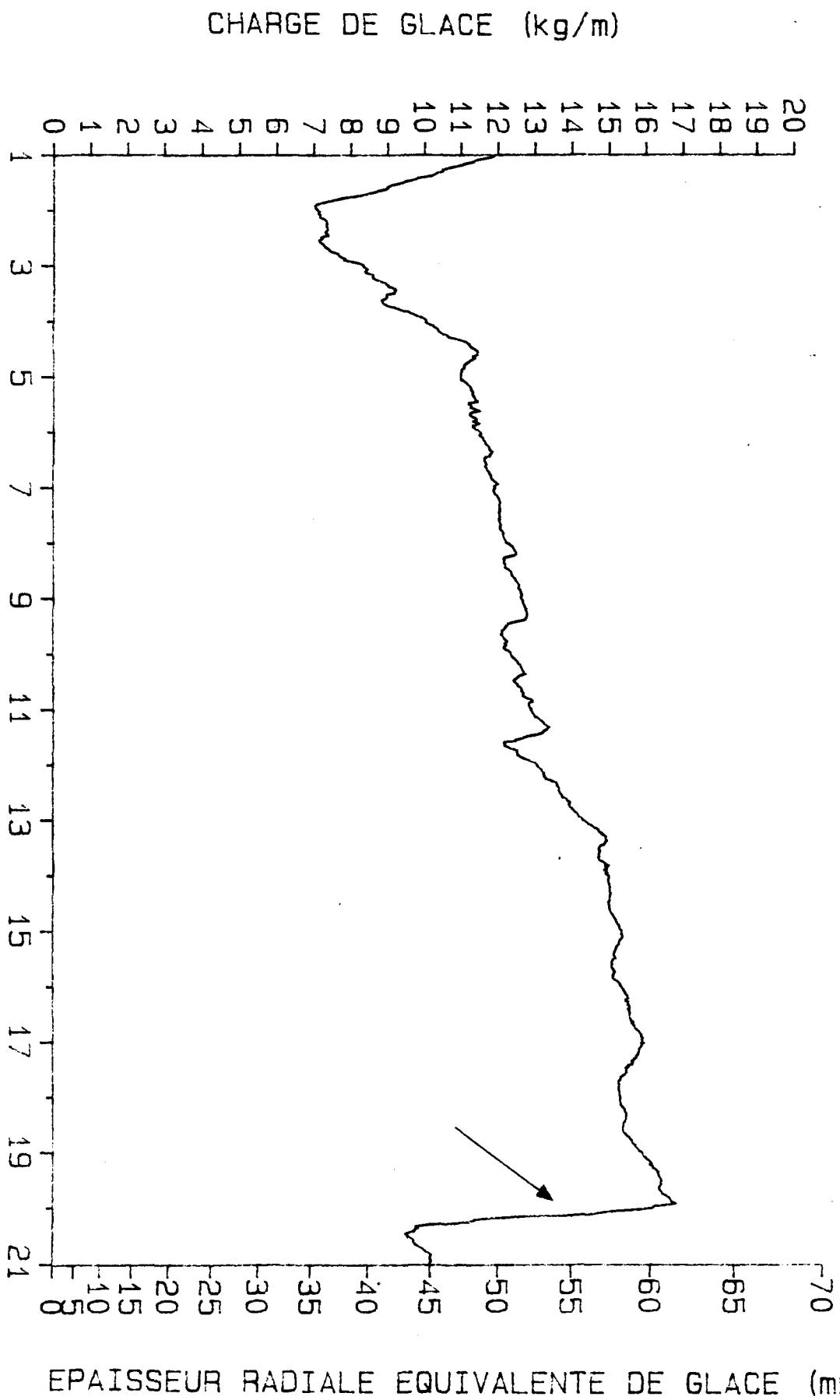
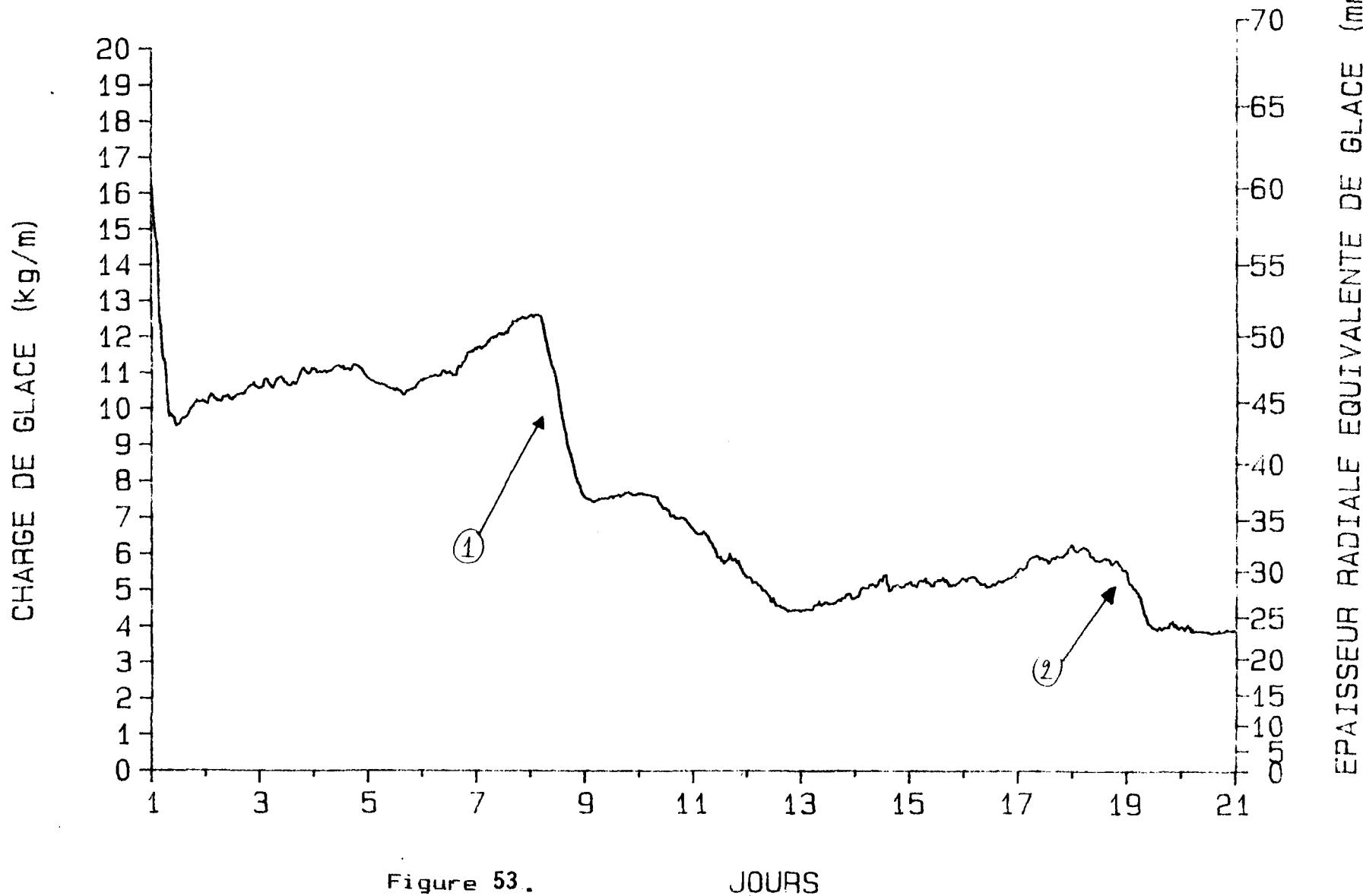


Figure 52.

PERIODE DU 23 JANV. 1987

CABLE BERSIMIS



PERIODE DU 22 FEV. 1987

CABLE BERSIMIS

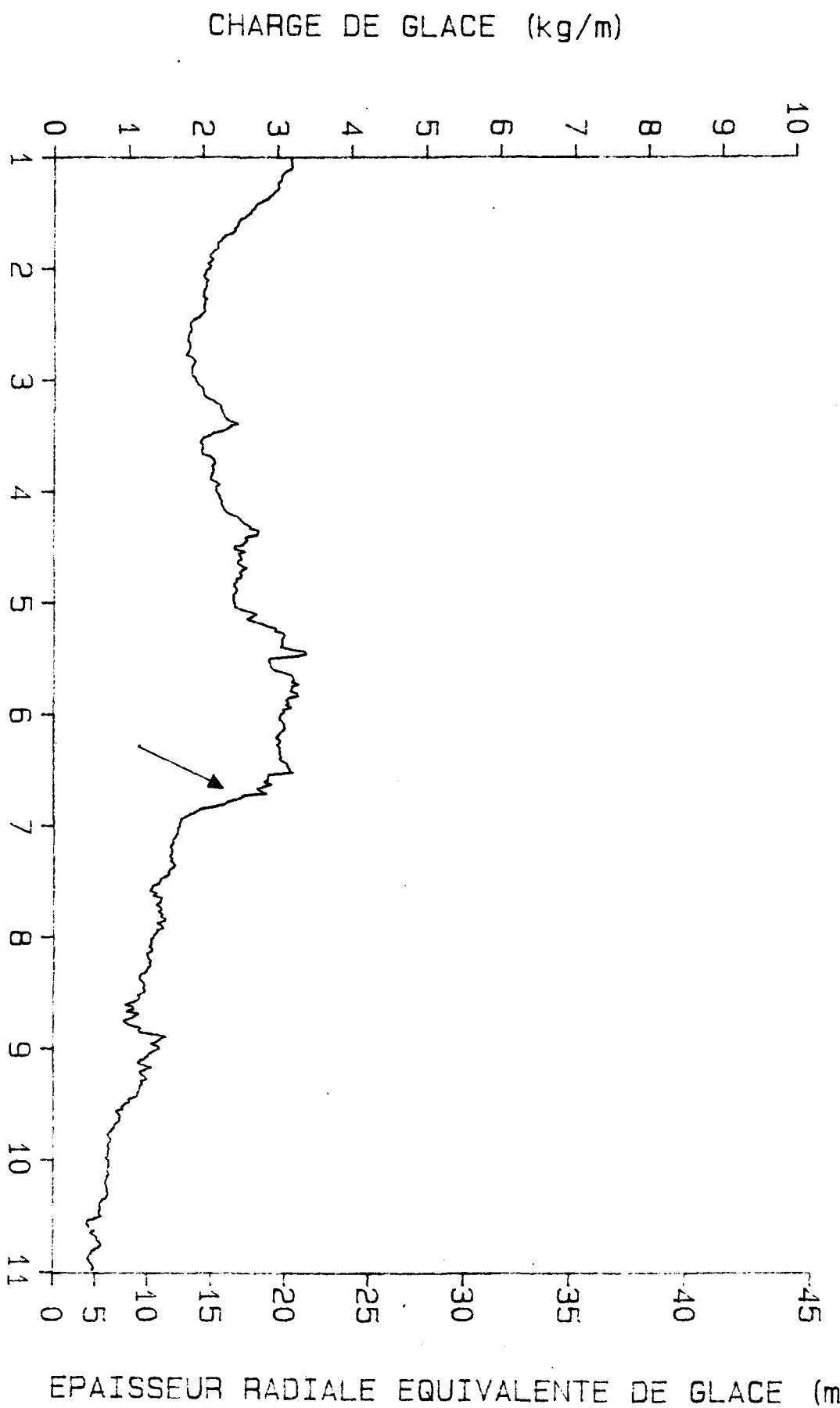


Figure 54.

PERIODE DU 01 DEC. 1987

CABLE BERSIMIS

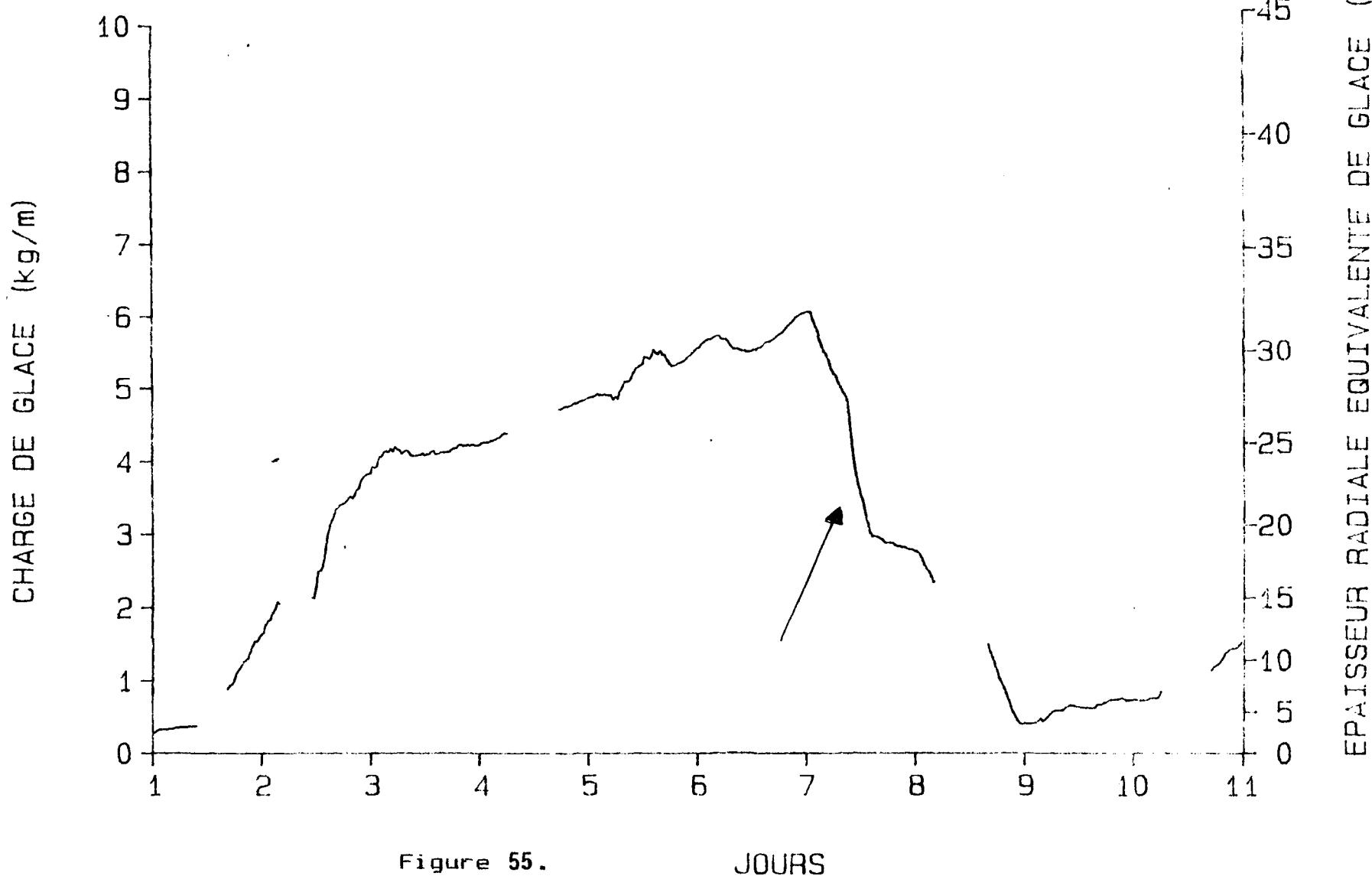


Figure 55.

JOURS

CHARGE DE GLACE (kg/m)

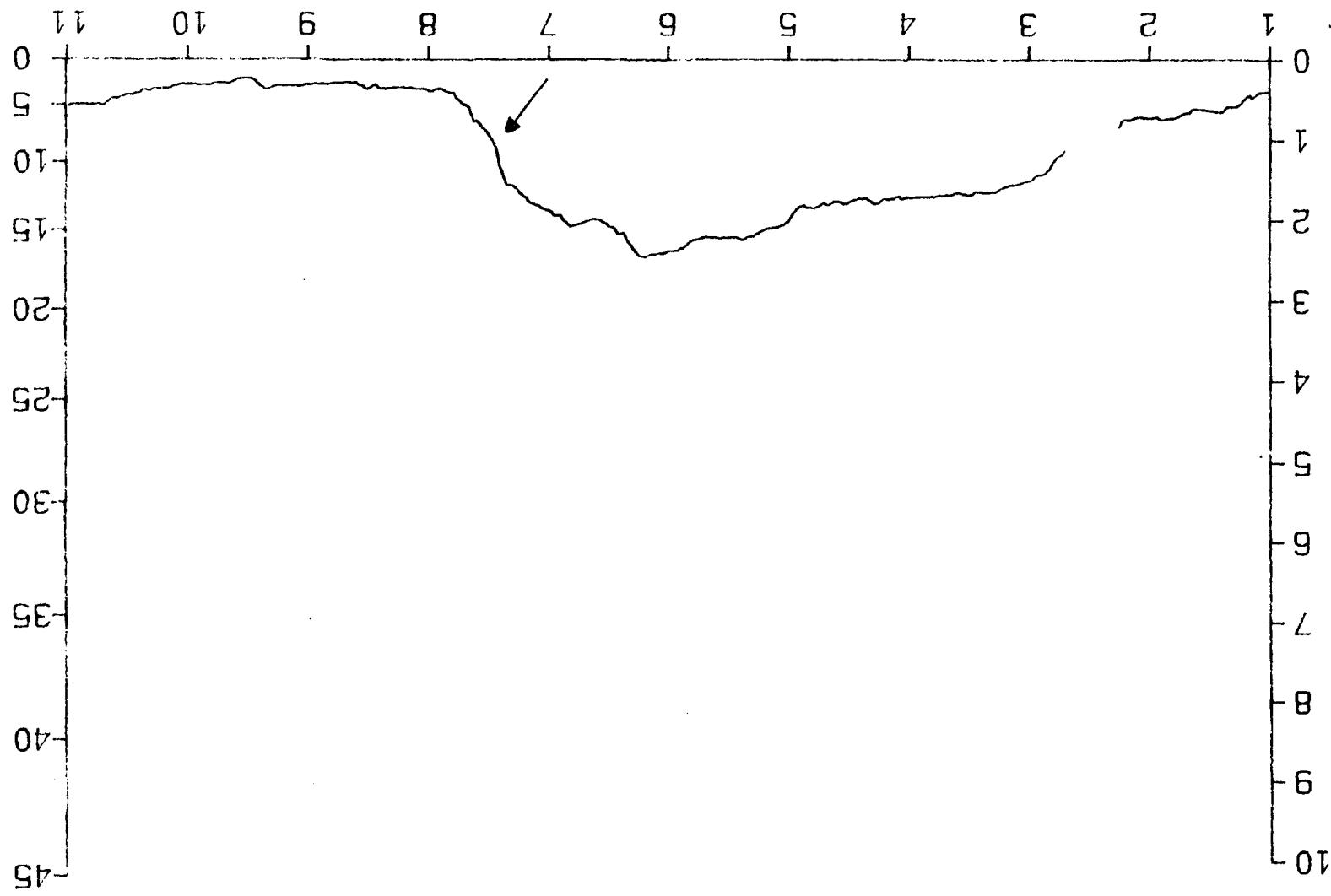
Figure 56.

JOURS

PERIODE DU 09 DEC. 1987

CABLE BERSIMIS

EPATSEUR RADIALE EQUIVALENTE DE GLACE (mm)



PERIODE DU 27 DEC. 1987

CABLE BERSIMIS

CHARGE DE GLACE (kg/m)

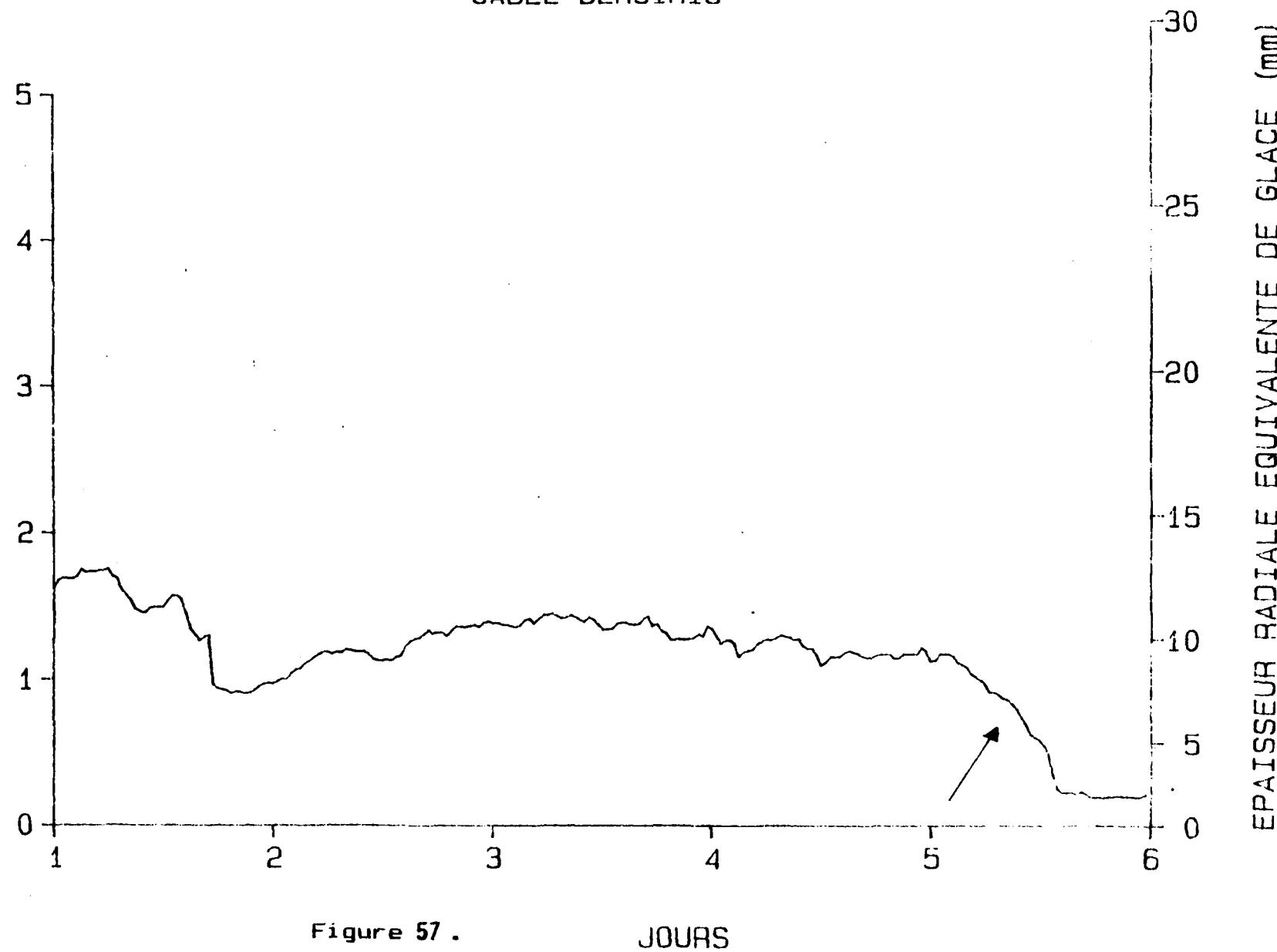


Figure 57 .

JOURS

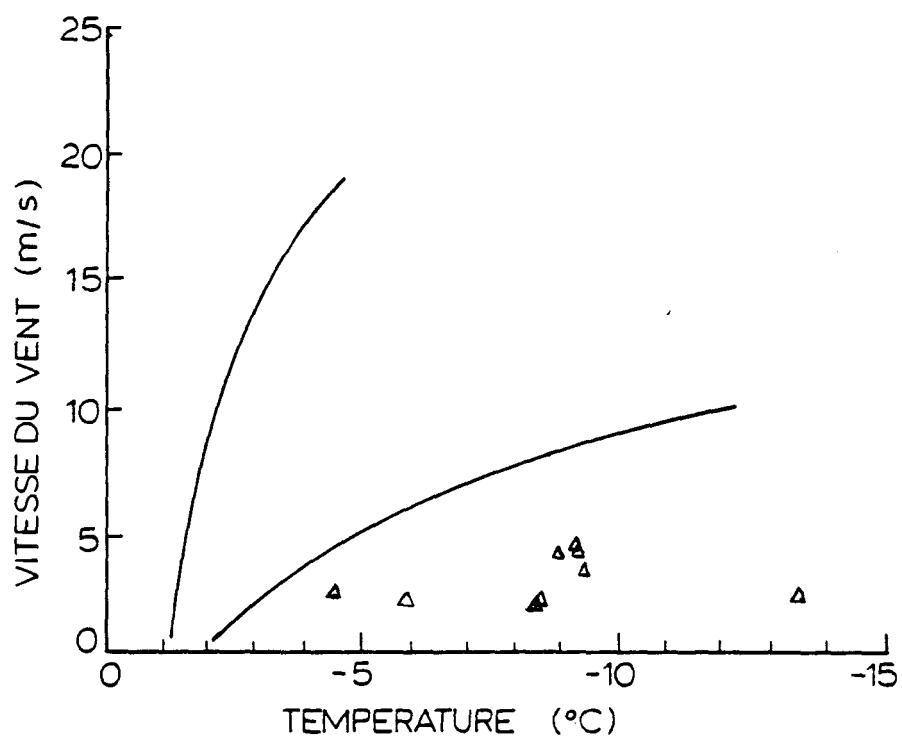


Figure 58 : Conditions atmosphériques de formation des dépôts de glace étudiés au Mt-Valin (1985-1988)

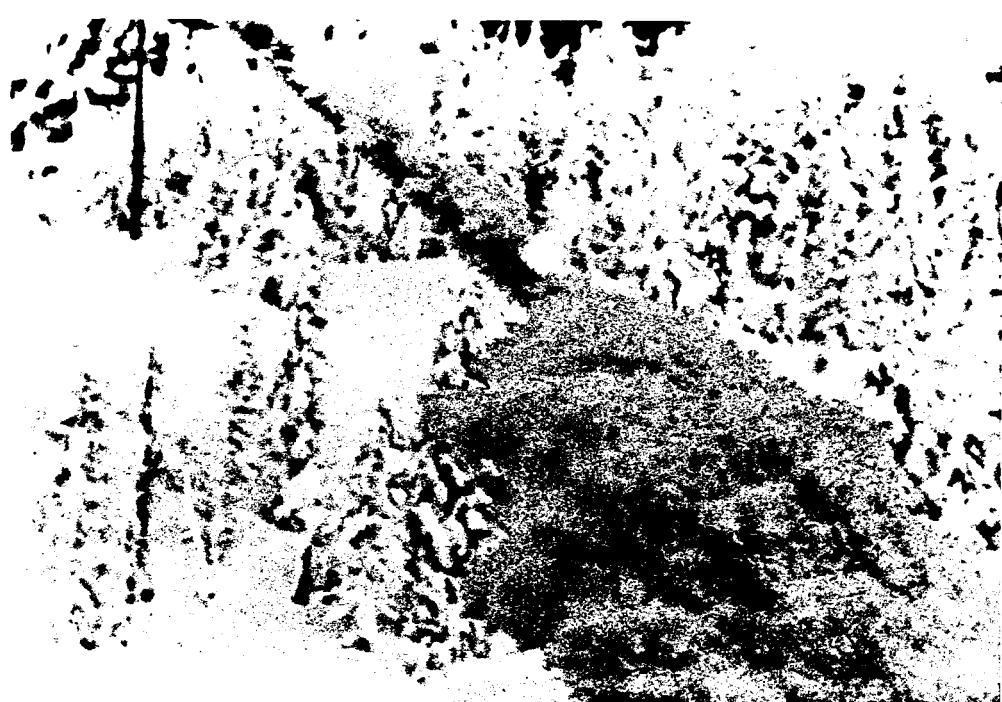


Figure 59 : Givre typique observé au Mt-Valin  
(18 décembre 1986)

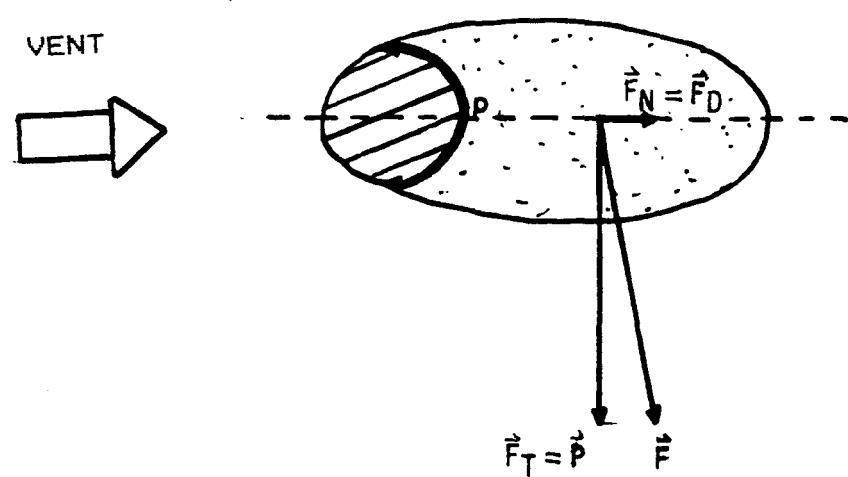


Figure 60 : Efforts exercés sur un manchon elliptique horizontal

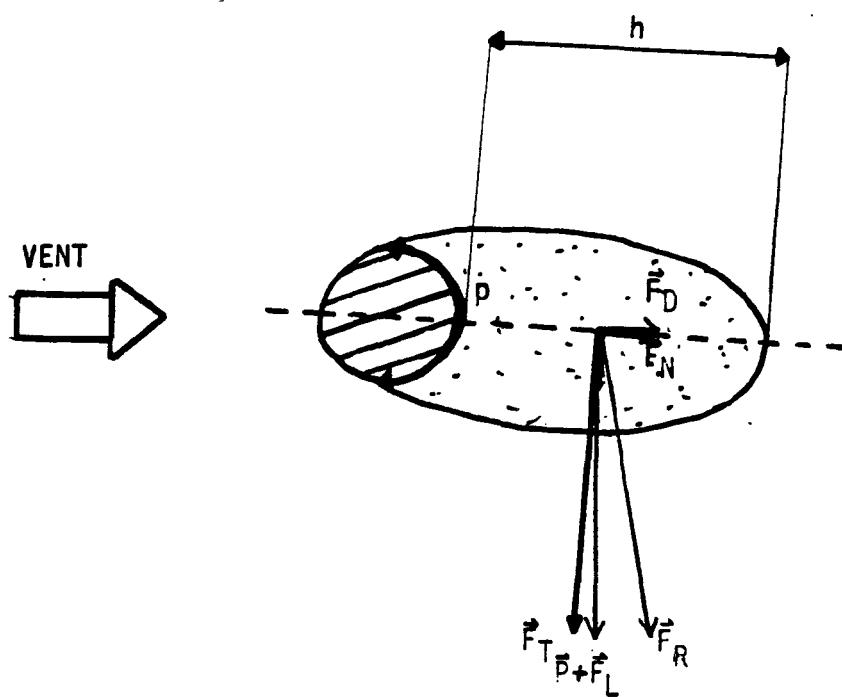


Figure 61 : Efforts exercés sur un manchon elliptique incliné

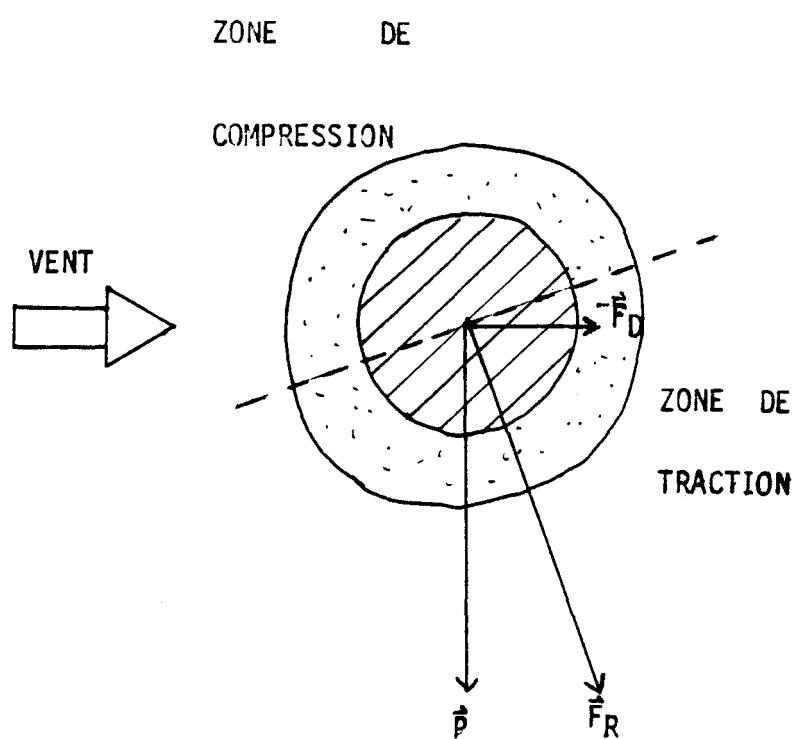


Figure 62 : Efforts exercés sur un manchon circulaire