

NWRI - UNPUBLISHED



Environment
Canada

MANUSCRIPT

Environnement
Canada

Franequin
Ed

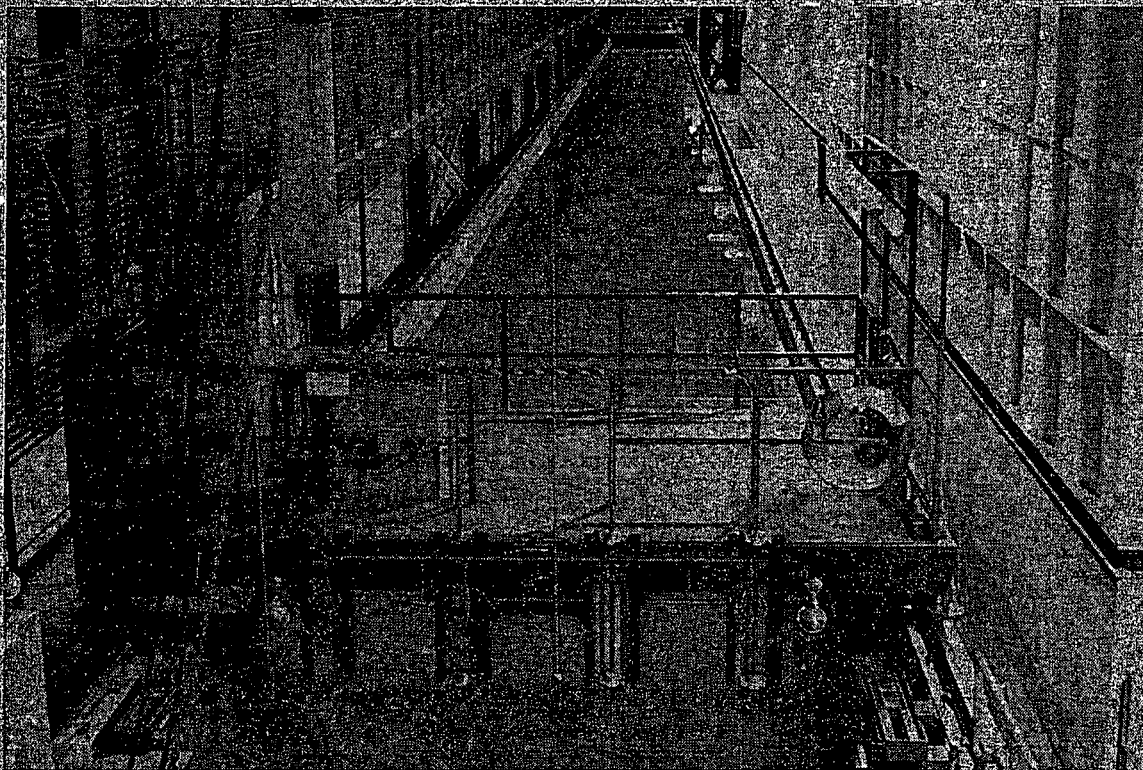
Engel, P (1982)

FRENCH

National
Water
Research
Institute,
Burlington



Institut
national de
recherche sur
les eaux,
Burlington



Calibration of the
SIAP ME4001
current meter

Étalonnage du
moulinet
SIAP ME4001

by

par

P. Engel C. Dezeeuw

TD
7
E54
1982a
fre

(Ce rapport est disponible en anglais)

ÉTALONNAGE DU MOULINET SIAP ME4001

Par

P. Engel et C. DeZeeuw

Section de l'hydraulique environnementale
Division de l'hydraulique
Institut national de recherche sur les eaux
Centre canadien des eaux intérieures
Décembre 1982

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
RÉSUMÉ	iv
PERSPECTIVE DE GESTION	v
1.0 INTRODUCTION	1
1.1 Historique	1
1.2 Portée de l'étude	1
1.2.1 Précision de l'étalonnage	2
1.2.2 Comparaison des étalonnages	2
1.2.3 Effet de la tige de suspension	2
2.0 CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES	3
3.0 INSTALLATIONS ET MÉTHODE DE DÉPLACEMENT DU MOULINET	8
3.1 Bassin de carène	8
3.2 Chariot	8
3.3 Collecte des données	9
3.3.1 Vitesse de déplacement du chariot	9
3.3.2 Vitesse de rotation de l'hélice	9
3.4 Système de suspension du moulinet	10
3.5 Méthode d'essai	10
3.6 Analyse préliminaire des données	11
4.0 PRÉCISION DES APPAREILS D'ÉTALONNAGE	14
4.1 Précision de la vitesse de déplacement	14
4.2 Précision de la vitesse de rotation de l'hélice	15
5.0 PRÉCISION DE L'ÉTALONNAGE DES MOULINETS HYDROMÉTRIQUES	15
6.0 COMPARAISON D'ÉTALONNAGES DE MOULINETS EFFECTUÉS DANS DIFFÉRENTS BASSINS DE CARENE	20
6.1 Étalonnage d'un moulinet	21
6.2 Étalonnage de groupe	23

Table des matières

	<u>Page</u>
7.0 EFFET DE LA TIGE DE SUSPENSION	25
8.0 CONCLUSIONS	27
REMERCIEMENTS	28
BIBLIOGRAPHIE	28
TABLEAUX	
Tableau 1 a	
Tableau 11 Données d'étalonnage du moulinet hydrométrique	
Tableau 12 Equations d'étalonnage pour les cinq moulinets	
Tableau 13 Equations pour cinq étalonnages consécutifs du moulinet 600594	
Tableau 14 Equation d'étalonnage utilisée pour étudier l'effet de la tige de suspension	
Tableau 15 Précision de l'étalonnage du moulinet 600594 au degré de confiance de 99%	
Tableau 16 Comparaison de l'étalonnage du moulinet 600594 dans différents bassins de carène	
Tableau 17 Incertitude pour étalonnages de groupe	
Tableau 18 Variation relative de l'étalonnage causée par la position du moulinet sur la tige de suspension	
FIGURES	
Figure 1 Graphique typique de ΔV fonction de N	
Figure 2 Représentation schématique d'équations d'étalonnage	
Figure 3 Compte-tours/chronomètre SIAP	
Figure 4 Tige de suspension du moulinet à l'arrière du chariot	
Figure 5 Étalonnage du moulinet 600591	
Figure 6 Étalonnage du moulinet 600592	
Figure 7 Étalonnage du moulinet 600593	
Figure 8 Étalonnage du moulinet 600594	
Figure 9 Étalonnage du moulinet 600595	
Figure 10 Étalonnage no 1 du moulinet 600594	

Table de matières

- Figure 11 Étalonnage no 2 du moulinet 600594
- Figure 12 Étalonnage no 3 du moulinet 600594
- Figure 13 Étalonnage no 4 du moulinet 600594
- Figure 14 Étalonnage no 5 du moulinet 600594
- Figure 15 Étalonnage du moulinet 600594 fixé à 2 cm de l'extrémité de la tige de suspension
- Figure 16 Incertitude associée à la vitesse moyenne de déplacement à un degré de confiance de 99%
- Figure 17 Incertitude associée au comptage du nombre de tours de l'hélice à un degré de confiance de 99%
- Figure 18 Incertitude d'étalonnage du moulinet 600594 à un degré de confiance de 99%
- Figure 19 Comparaison de l'étalonnage du moulinet 600594 dans différents bassins de carène
- Figure 20 Comparaison des incertitudes associées à des étalonnages de groupe de cinq moulinets à un degré de confiance de 99%
- Figure 21 Effet de la position du moulinet sur la tige de suspension

RÉSUMÉ

Grâce à l'initiative d'ingénieurs de l'Hydro-Québec, l'étalonnage de cinq moulinets hydrométriques SIAP ME4001 a été effectué dans quatre instituts différents, y compris l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE), et les résultats ont été comparés.

Des méthodes d'essai prescrites n'ayant pas été utilisées à l'INRE, il fut décidé de reprendre les essais et d'entreprendre quelques travaux additionnels. L'analyse des résultats indique qu'il est possible d'étalonner le moulinet avec une précision de 99,6%, précision qui est assurée à 99%. En outre, l'analyse des données indique que, de tous les étalonnages, les étalonnages effectués dans le bassin de l'INRE sont les moins susceptibles d'être erronés.

PERSPECTIVE DE GESTION

Grâce à l'Hydro-Québec, un programme de comparaison d'étalonnages de moulinets hydrométriques effectués dans divers laboratoires a vu jour. Nous ne pouvons que louer l'initiative des ingénieurs de l'Hydro-Québec qui ont su organiser ce programme.

Il sera ici question d'une analyse des étalonnages. Les résultats de cette analyse indiquent que le bassin et les instruments du laboratoire d'hydraulique de l'Institut national de recherche sur les eaux du Centre canadien des eaux intérieures permettent d'étalonner moulinet après moulinet avec une précision égale ou supérieure à 99,6%.

Ces résultats sont semblables ou supérieurs aux résultats obtenues dans d'autres centres d'étalonnage réputés de France, de Suisse et d'Italie.

T. Milne Dick

Chef de la division d'hydraulique

Le 21 octobre 1982

1.0 INTRODUCTION

1.1 Historique

L'Hydro-Québec utilise le moulinet hydrométrique SIAP ME4001, un instrument à hélice, pour mesurer le débit à la sortie des turbines de ses centrales hydro-électriques. Ces débits sont ensuite utilisés pour établir le rendement des turbines. Vu l'étroite relation entre les faibles erreurs de mesure et les pertes importantes de revenu, il est très important de mesurer les débits avec précision. Pour atteindre la précision nécessaire, il faut utiliser des moulinets hydrométriques qui ont été étalonnés avec soin. Pour atteindre ses objectifs, l'Hydro-Québec aimerait bien pouvoir disposer de moulinets étalonnés avec une précision de 99,75%.

En 1979, l'Hydro-Québec fournissait cinq de ses moulinets hydrométriques - les moulinets 600591, 600592, 600593, 600594 et 600595 - à quatre centres d'étalonnage (l'Institute Di Idraulica de Perdua en Italie, la Station d'étalonnage de moulinets hydrométriques de Beauvert à Grenoble en France, la Eidgenoissiches Amt für Wasserwirtschaft de Berne en Suisse et l'Institut national de recherche sur les eaux de Burlington au Canada) en leur demandant d'établir avec quelle précision il était possible d'étalonner ces moulinets. Les résultats de ces études furent analysés par J. M. Lévesque (1). L'analyse indiqua alors que les étalonnages effectués au Canada comportaient une erreur systématique, erreur reliée au système de suspension du moulinet. En outre, ces mêmes étalonnages n'avaient été effectués que pour des vitesses inférieures à 3 m/s, alors que dans les centres européens, on les avait effectués pour des vitesses pouvant atteindre 4 m/s et plus. En raison de ces divergences, il devint impossible de comparer de façon sensée les résultats des essais canadiens et les résultats des essais européens. Les moulinets furent ultérieurement fournis à nouveau à l'Institut national de recherche sur les eaux pour procéder à d'autres études d'étalonnage, en utilisant cette fois-ci un système de suspension conçu par J. M. Lévesque (1) à des vitesses pouvant atteindre 6 m/s.

1.2 Portée de l'étude

Il sera question ici de l'analyse des résultats du nouvel étalonnage des cinq moulinets et de la comparaison de ces résultats aux résultats des étalonnages effectués en Europe. Notre étude porte sur trois points: (1) la précision de l'étalonnage, (2) la comparaison des étalonnages, et (3) l'effet de la position du moulinet sur la tige de suspension.

1.2.1 Précision de l'étalonnage

Le moulinet hydrométrique 600594 a été étalonné à cinq reprises dans le but d'obtenir cinq ensembles distincts d'équations d'étalonnage. Les résultats ont été ensuite utilisés pour établir la précision d'étalonnage d'un seul moulinet hydrométrique SIAP, précision assurée à 99% avec le bassin et les instruments de l'Institut national de recherche sur les eaux.

1.2.2 Comparaison des étalonnages

Chacun des cinq moulinets hydrométriques a été étalonné à une seule reprise dans le but d'obtenir un ensemble d'équations d'étalonnage pour chaque moulinet. Ces équations ont été ensuite comparées aux équations obtenues en Europe pour chaque moulinet.

1.2.3 Effet de la tige de suspension

Dans son exposé d'analyse, J. M. Lévesque (1) mentionne que les premiers étalonnages effectués dans le bassin de l'Institut national de recherche sur les eaux comportent une erreur systématique et que cette erreur est due au fait que le moulinet étalonné est fixé à la tige de suspension avec son axe de rotation à une distance de 2 cm seulement de l'extrémité inférieure de la tige. En Europe, les moulinets étalonnés étaient fixés à la tige de suspension avec leur axe

de rotation à une distance de 20 à 30 cm de l'extrémité inférieure de cette tige. Nous avons étudié l'effet de la position du moulinet sur la tige de suspension à l'aide des nouvelles données d'étalonnage du moulinet 600594.

2.0 CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES

Lorsqu'un moulinet hydrométrique est déplacé en eau calme à une vitesse donnée, son hélice tourne à cause des forces de résistance au déplacement et des forces élévatoires exercées par le liquide sur les pales. Le nombre de révolutions effectuées par une hélice dépend de l'importance du frottement dans les roulements, de l'accouplement entre le liquide et les pales de l'hélice et du pas des pales. Un moulinet qui ne comporte aucun frottement dans ses roulements et qui offre un accouplement parfait entre le liquide et ses pales (c.-à-d. aucun glissement) constitue un moulinet parfait. La relation entre la distance parcourue par un tel moulinet et le nombre de révolutions de l'hélice est la suivante:

$$S = kR \quad (1)$$

où S est la distance parcourue en cm, k le pas réel de l'hélice et R le nombre de révolutions effectuées par l'hélice. Pour avoir la relation entre la vitesse de déplacement du moulinet et la vitesse de rotation de l'hélice, il suffit de diviser les deux membres de l'équation précédente par le temps (t) pendant lequel on compte le nombre de révolutions. Cette relation - l'équation (2) - constitue l'équation d'étalonnage d'un moulinet parfait:

$$V = kN \quad (2)$$

où V est la vitesse de déplacement du moulinet en cm/s et N la vitesse de rotation de l'hélice en tours/s. L'équation (2) indique que N est nul lorsque V est nul, ce qui signifie qu'il n'y a aucun seuil de vitesse de déplacement. On ne pouvait s'attendre à un résultat différent puisque le moulinet ne comporte aucun frottement de roulement ni glissement entre le liquide et les pales de l'hélice. Toutefois, les moulinets réels ne se comportent pas de cette façon et doivent donc être étalonnés. En raison du frottement de roulement et du glissement

entre le liquide et les pales, caractéristiques qui varient quelque peu d'un moulinet à l'autre, chaque moulinet possède son pas d'hélice "effectif", qui est supérieur au pas réel, et son seuil de vitesse de déplacement. Le pas effectif correspond à la distance parcourue par le moulinet en eau calme pour chaque révolution de l'hélice. Le seuil de vitesse correspond à la vitesse à laquelle il faut déplacer le moulinet pour avoir une vitesse de rotation uniforme minimale de l'hélice. Il faut donc modifier l'équation (2) pour tenir compte de ces caractéristiques. L'équation empirique suivante décrit bien le comportement des moulinets réels:

$$V = mN + a \quad (3)$$

où m est le pas effectif et " a " le seuil de vitesse. Les valeurs de m et a sont toutes deux établies en étalonnant le moulinet dans un bassin. On peut exprimer la valeur du pas effectif m en fonction du pas réel k de la façon suivante:

$$m = \alpha k \quad (4)$$

où α est un facteur de glissement dont la valeur dépend du degré d'accouplement entre le liquide et les pales de l'hélice. Pour un moulinet parfait (c.-à-d. sans glissement, ou offrant un accouplement parfait), $\alpha = 1$. De toute évidence, la valeur de α est supérieure à 1 pour les moulinets réels. Plus α tend vers 1, plus un moulinet constitue un instrument précis et fiable.

Pour bien illustrer la relation entre les valeurs expérimentales de vitesse de déplacement d'un moulinet SIAP ME4001 à hélice no 1 et de vitesse de rotation de son hélice, il faut utiliser deux droites, telles que décrites par l'équation (3). La caractéristique du moulinet change brusquement lorsque la valeur de N est de l'ordre de 9 à 10 tours/s. Il y a alors une diminution de la valeur du facteur de glissement α , ce qui a pour effet d'entraîner un pas effectif d'hélice plus faible aux vitesses d'utilisation plus

importantes. Pour bien étalonner ce moulinet, il faut établir avec précision les coordonnées du point où la valeur de α diminue. Puisque la valeur de α indique le degré d'accouplement entre le liquide et les pales de l'hélice, on peut supposer que la valeur de N à laquelle α change est reliée dans une certaine mesure au nombre de Reynolds de l'hélice, lequel est donné par le rapport $V_m/D/\nu$ (V_m est la vitesse expérimentale de déplacement du moulinet, D est le diamètre de l'hélice et ν est la viscosité cinétique du liquide dans lequel le moulinet est déplacé). Pour bien identifier cette valeur critique de N , valeur à laquelle les deux droites d'étalonnage se croisent, on la dénote par N_c .

La valeur de N_c est habituellement déterminée en portant sur un graphique les valeurs de ΔV en fonction de N , obtenues dans le cadre des expériences d'étalonnage. Les valeurs de ΔV sont calculées à l'aide de la relation suivante:

$$\Delta V = V_m - m'N \quad (5)$$

où ΔV est la différence de vitesse en cm/s, V_m la vitesse expérimentale de déplacement du moulinet et m' le pas nominal de l'hélice (valeur arrondie du pas effectif m). Pour le moulinet SIAP à hélice no 1, une valeur $m' = 25,0$ cm/tour est indiquée par le manufacturier. Le graphique ΔV fonction de N de la figure 1 illustre bien le comportement d'un moulinet SIAP ME4001 à hélice no 1 sur toute sa gamme de vitesses de fonctionnement, mais là n'est pas le but du graphique. On le trace plutôt pour avoir un étalement des valeurs d'ordonnée afin d'obtenir un changement de pente plus prononcé au point $N = N_c$ (voir la figure 1). Une fois la valeur de N_c établie à l'aide du graphique, les deux droites d'étalonnage peuvent être exprimées à l'aide des valeurs expérimentales de V_m et N . En termes généraux, les équations des deux droites sont les suivantes:

$$V = m_1 N + a_1 \quad 0 < N \leq N_c \quad (6)$$

$$V = m_2 N + a_2$$

$$N_c \leq N < N_{\max} \quad (7)$$

où les indices 1 et 2 dénotent la première et la seconde équation et $N_{\max}$ la limite supérieure de fonctionnement du moulinet. Les équations (6) et (7) sont illustrées de façon schématique à la figure 2. On s'aperçoit que la valeur de a_1 est légèrement inférieure à la valeur de V_0 . Ceci découle du fait que l'équation (6) constitue une approximation linéaire de la relation véritable entre V et N et que cette dernière n'est pas tout à fait linéaire lorsque N est faible.

Nous avons utilisé les concepts que nous venons d'énoncer pour établir les équations d'étalonnage du moulinet SIAP ME4001 à hélice no 1 que nous avons étudié. Nous n'avons pas tenté d'établir une relation entre N_c et $V_m D/\nu$ ni d'étudier les répercussions d'une telle relation sur la précision globale de l'étalonnage.

3.0 INSTALLATIONS ET METHODE DE DEPLACEMENT DU MOULINET

3.1 Bassin de carène

Le bassin de carène en béton armé est supporté par des pilots; sa longueur est de 122 mètres et sa largeur de 5 mètres. La profondeur du bassin est de 3 mètres et son fond est situé à 1,5 mètres sous le niveau du sol. On utilise habituellement 2,7 mètres d'eau dans le bassin. En raison de sa stabilité et de ses caractéristiques qui permettent d'éliminer les vibrations et d'atténuer les courants de convection éventuels, le béton est le matériau tout désigné pour construire un bassin de carène.

Le bassin est pourvu d'un déversoir à seuil de trop-plein à une extrémité. Les vagues produites par le déplacement des moulinets et de leur système de suspension sont éliminées par le déversoir, ce qui a pour effet de réduire les possibilités de réflexion. Des plages perforées latérales (parallèles aux côtés du bassin) servent à atténuer les perturbations latérales à la surface de l'eau. Vu l'importante section transversale du bassin, la production de vagues par l'objet déplacé est également réduite au minimum.

3.2 Chariot

Le chariot de 3 mètres de longueur sur 5 mètres de largeur pèse 6 tonnes; il se déplace sur quatre roues en acier usinées avec précision.

Les gammes de vitesses de déplacement du chariot sont les suivantes:

0,5 cm/s	-	6,0 cm/s
5,0 cm/s	-	60 cm/s
50 cm/s	-	600 cm/s

Il est possible de déplacer le chariot à sa vitesse maximale de 600 cm/s pendant 12 secondes. Des générateurs à tachymètre reliés aux arbres de commande produisent une tension proportionnelle à la vitesse

du chariot. Ces tensions sont fournies à un système d'asservissement qui maintient la vitesse à une valeur constante à l'intérieur de limites permises.

3.3 Collecte des données

3.3.1 Vitesse de déplacement du chariot

La valeur de la vitesse moyenne de déplacement du chariot est déduite de la fréquence à laquelle des impulsions électroniques sont produites par une roue qui est fixée à la charpente du chariot et qui roule sur un des rails du bassin de carène. Cette roue produit une impulsion par millimètre de déplacement et la fréquence de production de ces impulsions est mesurée à l'aide d'un fréquencesmètre automatique Hewlett-Packard 5323A. Pour transformer la fréquence en vitesse de déplacement (cm/s), il suffit de la diviser par 10 puisque les impulsions sont produites à un rythme de 1 mm/s (vitesse de 1 mm/s). Le fréquencesmètre établit la fréquence sur de très courts intervalles de temps, ce qui entraîne un grand nombre de vitesses moyennes établies pendant le déplacement du chariot le long du bassin. Ces "échantillons de vitesse" sont fournis immédiatement à un ordinateur Hewlett-Packard 85 qui s'occupe de leur traitement. L'ordinateur établit la vitesse moyenne globale pour le parcours et l'écart type de la vitesse par rapport à cette valeur afin de vérifier si les variations de vitesse sont bien à l'intérieur des limites permises.

3.3.2 Vitesse de rotation de l'hélice

Le moulinet hydrométrique SIAP ME4001 est pourvu d'un interrupteur magnétique qui produit une impulsion à chaque demi-tour effectué par l'hélice. Pour compter le nombre de tours effectués par l'hélice, il suffit donc de compter le nombre d'impulsions électriques produites par l'interrupteur. Pour avoir la vitesse de rotation de l'hélice en tours/s, nous avons utilisé le compteur numérique

d'impulsions SIAP et le chronomètre SIAP fournis avec le moulinet (voir la figure 3) pour déterminer le nombre d'impulsions produites pendant un intervalle de temps donné. Avec ce système de collecte de données, il est possible de surveiller 30 moulinets hydrométriques différents qui fonctionnent simultanément pendant un intervalle de temps fixé au préalable. Mais ce système n'est pas exempt d'erreurs: il peut ajouter au maximum un demi-tour au début de l'intervalle de mesure et retrancher au maximum un demi-tour à la fin de cet intervalle. Bien sûr, ces erreurs peuvent peut-être s'annuler mais il faut s'attendre, dans le pire cas, à avoir une erreur d'un demi-tour sur la valeur indiquée. Bien entendu, l'importance de cette erreur dépend du nombre total de tours indiqué. Elle est à son maximum lorsque le nombre de tours comptés est faible et devient de plus en plus insignifiante à mesure que le nombre de tours comptés augmente.

3.4 Système de suspension du moulinet

Pour suspendre les moulinets, nous avons utilisé la tige de suspension (75/35 mm) qui accompagnait les moulinets. Le mode de suspension utilisé est simple: la tige est solidement fixée à un cadre de montage rigide et compact, lequel est boulonné à l'arrière du chariot à proximité de l'axe de symétrie longitudinal du bassin (voir la figure 4). Il est important d'utiliser un cadre de montage compact pour réduire l'effet des vibrations produites par le système d'entraînement du chariot et la résistance de l'eau au déplacement du moulinet et de la tige de suspension. Le moulinet est fixé à la tige de suspension par une bride, conçue spécialement pour éloigner suffisamment l'hélice du moulinet devant la tige.

3.5 Méthode d'essai

Avant de procéder à l'essai d'un moulinet donné, il faut bien le fixer à la tige de suspension à l'aide de la bride en prenant soin de le placer dans l'axe longitudinal du bassin (axe parallèle aux

côtés du bassin). Tel que suggéré par J.M. Lévesque (1), le moulinet est fixé de façon à ce que son axe de rotation soit à 40 cm sous la surface de l'eau et à 30 cm de l'extrémité inférieure de la tige de suspension. Le moulinet est ensuite raccordé au compte-tours/chronomètre SIAP et l'essai peut commencer. Nos essais ont été effectués à des vitesses variant d'environ 10 cm/s à 600 cm/s, en utilisant les augmentations de vitesse suggérées par J. M. Lévesque (1), et après chaque essai, nous avons toujours pris soin d'attendre que l'eau dans le bassin redevienne calme avant de passer à un autre essai. Cette période d'attente dépend quelque peu de la vitesse de déplacement utilisée au cours de l'essai précédent: 10 minutes pour des vitesses égales ou inférieures à 60 cm/s, 15 minutes pour les vitesses situées entre 60 et 140 cm/s, 25 minutes pour 140 à 500 cm/s et 35 minutes pour 500 à 600 cm/s. En tout, nous avons utilisé 29 vitesses de déplacement différentes. Les données des tableaux 1, 2, 3, 4 et 5 sont associées aux cinq étalonnages consécutifs du moulinet 600594. Les données des étalonnages uniques des moulinets 600591, 600592, 600593, 600594 et 600595 sont énumérées aux tableaux 6, 7, 8, 9 et 10 respectivement. Les données d'étalonnage du moulinet 600594 placé à 2 cm de l'extrémité inférieure de la tige de suspension sont énumérées au tableau 11.

3.6 Analyse préliminaire des données

Afin d'établir la valeur de N_c , valeur à laquelle la réponse de l'hélice change, et les pentes et seuils de vitesse des paires d'équations pour chaque étalonnage, nous avons procédé à une analyse préliminaire des données d'étalonnage des tableaux 1 à 11.

Les figures 5, 6, 7, 8 et 9 illustrent les graphiques ΔV fonction de N pour les cinq moulinets; les graphiques des figures 10, 11, 12, 13 et 14 sont associés aux cinq étalonnages successifs du moulinet 500594 et le graphique de la figure 15 à l'étalonnage du moulinet 600594 fixé à 2 cm de l'extrémité inférieure de la tige de

suspension. Chaque graphique illustre les deux régimes de fonctionnement de l'hélice. On s'aperçoit qu'avant d'atteindre le point de transition, l'allure générale des valeurs de ΔV en fonction de N semble varier d'un moulinet à l'autre. Par exemple, en examinant le graphique de la figure 7, graphique associé au moulinet 600593, on s'aperçoit que la variation des valeurs est de nature systématique et ne correspond certainement pas à une variation causée par des erreurs de mesure de nature statistique. Ce comportement découle fort probablement d'une caractéristique propre à ce moulinet, caractéristique qui est apparue au moment de l'étalonnage. Pour les valeurs de N supérieures à N_c , la variation de ΔV en fonction de N semble peu différente d'un moulinet à l'autre, jusqu'à ce que N atteigne une valeur de l'ordre de 20. Pour $N > 20$, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les diverses valeurs. Il se peut que ce comportement soit le résultat de l'utilisation de l'hélice no 1, hélice conçue pour être utilisée à des vitesses inférieures à 500 cm/s (cette vitesse correspond à une valeur de N de l'ordre de 20). Cette analyse préliminaire indique que l'analyse des données d'étalonnage ne doit porter que sur des valeurs qui correspondent à N égal ou inférieur à 20. Notre étude fut donc limitée à ces valeurs.

Pour déterminer les valeurs de N_c , nous avons utilisé, comme le veut l'usage, les graphiques de ΔV fonction de N . Après avoir négligé les points qui, de toute évidence, étaient mauvais, nous avons tracé des droites qui, à l'oeil, semblaient le mieux représenter l'allure des points des graphiques. Le point d'intersection des deux droites correspond alors à la valeur de N_c . Bien que ces droites soient tracées de façon quelque peu subjective, elles suffisent pour obtenir la valeur de N_c car cette valeur n'est utilisée que pour définir la gamme de validité $0 < N \leq N_c$ de la seconde équation d'étalonnage.

Après avoir établi les valeurs de N_c , nous avons établi les équations des droites en fonction des données à l'aide de méthodes de régression linéaire, méthodes qui, lorsqu'elles sont bien utilisées, donnent des résultats consistants. Dans tous les cas, nous avons eu un

coefficient de corrélation de l'ordre de 1. Les valeurs de N_c , des pentes et des seuils de vitesse des cinq moulinets sont énumérées au tableau 12. Les résultats des cinq étalonnages consécutifs du moulinet 600594 sont donnés au tableau 13 et ceux de l'étalonnage du moulinet 600594 fixé à 2 cm de l'extrémité inférieure de la tige de suspension au tableau 14.

4.0

PRÉCISION DES APPAREILS D'ÉTALONNAGE

La précision d'une valeur mesurée est fonction de son degré de correspondance à une valeur reconnue comme vraie. Toutefois, la vraie valeur d'une quantité mesurée est souvent inconnue et on ne peut espérer l'évaluer qu'avec un certain degré de confiance ou d'incertitude de mesure. Le degré de confiance d'une mesure dépend de la précision voulue. Pour l'étalonnage des moulinets hydrométriques, on utilise une incertitude de mesure qui correspond à un degré de confiance de 99%.

À l'occasion de l'étalonnage d'un moulinet hydrométrique, on veut savoir avec quelle précision il sera possible de mesurer la vitesse en utilisant les équations d'étalonnage résultantes. Comme nous l'avons déjà indiqué, les équations d'étalonnage du moulinet SIAP sont de la forme générale suivante:

$$V = mN + a \quad (m = \alpha k) \quad (8)$$

Tous les paramètres de l'équation ont déjà été définis. Les valeurs de la pente (m) et du seuil de vitesse (a) sont obtenues à partir de mesures de V et N , lesquelles comportent des erreurs de mesure. Par conséquent, afin de pouvoir établir la précision avec laquelle il est possible de mesurer la vitesse à l'aide d'un moulinet étalonné (c'est-à-dire en utilisant les équations d'étalonnage), il faut établir la précision avec laquelle il est possible d'étalonner le moulinet. Cette précision dépend du degré de précision avec lequel il est possible d'établir V et N sur la gamme de fonctionnement du moulinet au cours de son étalonnage.

4.1 Précision de la vitesse de déplacement V

La vitesse de déplacement est la moyenne d'un nombre, disons n , d'échantillons de vitesse mesurés à l'aide du fréquencesmètre, tel que décrit à la section 3.3.1. La valeur de n varie de 20 à environ

270, les valeurs des plus grandes correspondant aux faibles valeurs de vitesse et les plus faibles aux vitesses les plus grandes. Une valeur de vitesse moyenne V et une valeur d'écart type S_V sont établies à l'occasion de chaque expérience. Le système de collecte de données ne comporte aucune erreur systématique et la valeur de l'écart normal par rapport à la vitesse moyenne indique bien l'erreur statistique reliée à la mesure de la vitesse. Ces erreurs sont habituellement distribuées et l'incertitude associée à la vitesse moyenne du chariot pour un degré de confiance de 99% peut être calculée à l'aide du rapport $(3 S_V / (n)^{1/2})$.

À la figure 16, on trouve un graphique de l'incertitude associée à la vitesse moyenne, exprimée en pourcentage de vitesse moyenne, en fonction de la vitesse moyenne pour des valeurs variant de 10 cm/s à 600 cm/s. Pour tracer ce graphique, nous avons utilisé les données associées à trois étalonnages indépendants du moulinet 600594. On peut voir que les trois ensembles de données sont assez dispersés mais il est tout de même possible d'identifier une certaine tendance, illustrée par la courbe qui relie les valeurs moyennes des divers points. L'allure de la courbe reflète bien les caractéristiques de comportement du système de collecte de données. On voit que l'incertitude passe rapidement de 0,045%, pour 10 cm/s, à environ 0,015%, pour 30 cm/s. Elle augmente ensuite brusquement jusqu'à environ 0,09%, pour 100 cm/s, et diminue graduellement pour atteindre une valeur d'environ 0,03% à 600 cm/s. Ces résultats sont très encourageants. L'incertitude, pour un degré de confiance de 99% en la valeur de vitesse utilisée pour l'étalonnage du moulinet, est bel et bien inférieure à 0,1% quelle que soit la vitesse. Ceci signifie que le chariot peut être utilisé pour effectuer des étalonnages de moulinets hydrométriques avec une très grande précision.

4.2 Précision de la vitesse de rotation de l'hélice

La vitesse de rotation de l'hélice en tours/s est établie en comptant le nombre de révolutions effectuées pendant un intervalle de

temps donné. L'intervalle de temps étant mesuré avec une très grande précision, on peut négliger les erreurs de mesure du temps. Par conséquent, l'erreur associée à la mesure de la réponse du moulinet à son déplacement n'est reliée qu'au comptage du nombre de révolutions effectuées. Tel qu'indiqué à la section 3.3.2, l'erreur maximale associée au comptage du nombre de révolutions effectuées par l'hélice du moulinet est de 0,5 révolution. L'erreur relative associée au nombre de révolutions dépend de ce nombre et diminue à mesure que leur nombre augmente. Cette relation est illustrée à la figure 17, où l'erreur relative maximale - $(0,5/R) 100\%$ - a été portée en ordonnée et le nombre de révolutions - R - en abscisse. Pour s'assurer à 99% que l'incertitude associée à la valeur de R est inférieure à 0,2%, il faut compter 240 révolutions. Pour des valeurs de R inférieures à 240, la valeur de l'incertitude augmente de plus en plus rapidement à mesure que la valeur de R diminue. Pour les valeurs de R supérieures à 240, on obtient une diminution additionnelle de l'incertitude mais cette diminution est négligeable et ne vaut pas le surplus de travail. L'erreur associée à la mesure de l'intervalle de temps étant négligeable, l'erreur associée à la détermination de R correspond à l'erreur associée à la détermination de la vitesse de rotation de l'hélice N . Par conséquent, pour R supérieur à 240, la valeur de N est précise à 99,8%, 99% du temps.

5.0

PRÉCISION DE L'ÉTALONNAGE DES MOULINETS HYDROMÉTRIQUES

Avec des instruments d'étalonnage si précis, il devrait être possible d'étalonner des moulinets hydrométriques avec une très grande précision. Si la précision d'étalonnage ne dépendait que de la précision des instruments d'étalonnage, il serait possible d'atteindre la précision de l'ordre de 99,75% désirée également du comportement du moulinet, de la méthode d'étalonnage et de l'utilisation de bonnes équations linéaires pour relier les données obtenues. Pour évaluer la précision d'étalonnage des divers moulinets, nous avons utilisé les cinq équations d'étalonnage du moulinet 600594; ces équations sont données au tableau 13. Bien que du point de vue statistique, cinq étalonnages individuels ne constituent qu'un petit échantillon, nous croyons qu'il est valable pour nos besoins. Conformément à la théorie des petits échantillons, nous avons utilisé la loi de Student pour déterminer l'incertitude associée à l'étalonnage du moulinet 600594 au degré de confiance de 99%.

Pour chacune des cinq paires d'équations d'étalonnage, nous avons calculé les vitesses correspondant aux mêmes valeurs fixes de N. Comme valeurs de N, nous avons utilisé des valeurs à chaque 2 tours/s, de 2 tours/s à la limite supérieure de fonctionnement du moulinet de 20 tours/s. Les vitesses ainsi calculées pour chaque étalonnage complet sont énumérées au tableau 15. Après avoir calculé ces vitesses, les vitesses moyennes et l'écart type ont été calculés pour chaque valeur de N; ces valeurs apparaissent également au tableau 15. Les valeurs d'incertitude relative pour un degré de confiance de 99%, exprimées en pourcentage de la vitesse moyenne, ont été ensuite calculées en utilisant la relation suivante:

$$E = \frac{t_{0,995} S_v}{V_5 (n - 1)^{1/2}} \times 100\% \quad (9)$$

où E est l'incertitude associée à la vitesse moyenne pour un degré de confiance de 99%, exprimée en pourcentage de la vitesse moyenne, S_v l'écart type calculé à l'aide de la relation $S_v = [\sum (V_i - V_5)^2 / n]^{1/2}$ où i réfère à la ième équation d'étalonnage, $t_{0,995}$ le coefficient de confiance pour $(n - 1)$ degrés de liberté, n le nombre d'étalonnages distincts et V_5 la vitesse moyenne calculée des cinq étalonnages pour une valeur donnée de N. Dans l'équation (9), la valeur de $t_{0,995}$ est de 4,60 - voir la loi de Student (2) - et celle de n est de 5. En utilisant ces valeurs, on obtient la relation suivante:

$$E = \frac{2,30 S_v}{V_5} \times 100\% \quad (10)$$

Les valeurs ainsi calculées de E sont également énumérées au tableau 15.

En étudiant les valeurs de E du tableau 15, on s'aperçoit que l'incertitude associée à la vitesse calculée à partir des étalonnages varie à partir d'un minimum d'environ 0,14% pour N=9 jusqu'à un maximum d'environ 0,40% pour N=20. Pour mieux se représenter la variation de E en fonction de N, nous avons porté les valeurs de E en ordonnée et les valeurs de N en abscisse et obtenons le graphique illustré à la figure 18.

On voit que l'incertitude E varie graduellement pour passer de $E = 0,36\%$ à $N = 2$ tours/s à un minimum de 0,14% à $N = 9$. L'incertitude prononcée aux faibles valeurs de N est surtout due à l'incertitude associée au seuil de vitesse a de la première équation d'étalonnage. Cet effet diminue à mesure que N augmente et ceci a pour effet de faire diminuer l'incertitude globale d'étalonnage pour la gamme de valeurs $0 < N \leq N_c$ (N_c représente le point d'intersection des deux droites d'étalonnage). À $N \approx 9$, il y a une augmentation brusque de la valeur de l'incertitude, après quoi celle-ci passe graduellement de 0,31% à $N = 10$ à 0,40% à la limite supérieure de fonctionnement de $N = 20$. L'augmentation soudaine de l'incertitude

survient pour une valeur moyenne de $N = N_c$. Par conséquent, la seconde équation d'étalonnage du moulinet comporte de plus grandes incertitudes. Ceci signifie que pour des valeurs de N supérieures à N_c , on observe un certain phénomène que l'on n'observe pas pour des valeurs plus faibles. S'agit-il de vibrations causées par la résistance au déplacement du moulinet et de sa tige de suspension dans l'eau? Pourtant, les conditions expérimentales importantes, comme la méthode d'essai, la suspension du moulinet, les temps d'attente entre les essais successifs, etc, ayant toujours été identiques, il est peu probable que l'effet de la résistance au déplacement dans l'eau soit la seule cause de cette augmentation d'incertitude.

Comme autre source d'erreur d'étalonnage, il y a le moulinet même. En étudiant les figures 10 à 14 illustrant les graphiques ΔV fonction de N pour les cinq étalonnages successifs du moulinet 600594, on s'aperçoit que les données d'étalonnage sont moins consistantes lorsque N est supérieur à N_c et qu'elles le sont de moins en moins à mesure que N augmente. De fait, pour N supérieur à 20, le moulinet se comporte de façon erratique. Ceci signifie que le moulinet répond moins bien à haute vitesse et donc que la précision de son étalonnage est limitée jusqu'à un certain point par les caractéristiques de comportement du moulinet même. En raison de ces résultats, il est peu probable que la précision globale d'étalonnage de 99,75% désirée par l'Hydro-Québec puisse être atteinte. L'incertitude la plus importante établie par suite de ces essais étant de 0,4%, il est plus réaliste de croire en une précision de 99,6% pour le moulinet hydrométrique SIAP ME4001.

6.0 COMPARAISON D'ÉTALONNAGES DE MOULINETS EFFECTUÉS DANS DIFFÉRENTS BASSIN DE CARENE

L'objectif de l'analyse entreprise par J. M. Lévesque (1) était d'établir avec quelle précision il était possible d'étalonner les moulinets hydrométriques SIAP utilisés par l'Hydro-Québec dans différents bassins de carène. Cinq moulinets numérotés de 600591 à 600595 furent envoyés en Italie, en France, en Suisse et au Canada (INRE) pour que chacun fasse l'objet d'un étalonnage unique. J. M. Lévesque (1) mentionne que le système de suspension des moulinets utilisé au Canada étant très différent de celui utilisé en Europe, il est impossible de comparer de façon sensée les étalonnages effectués en Europe et au Canada.

Dans son analyse, les équations d'étalonnage établies pour chaque moulinet sont utilisées pour calculer les vitesses aux valeurs de $N = 2, 4, 6, 8, 10$ et 12 tours/s. Pour chaque valeur de N , la vitesse moyenne et l'écart type sont calculés pour le groupe des cinq moulinets. L'écart type est ensuite utilisé pour comparer la précision des étalonnages effectués aux divers endroits. Bien que cette façon de procéder soit très pratique, elle n'est pas assez précise pour donner de bons résultats quantitatifs. En premier lieu, l'écart type est utilisé comme indicateur de précision et ceci ne donne qu'une précision pour laquelle on n'est sûr qu'à 68%; il faut une meilleure précision dans le cas qui nous occupe. En second lieu, les données associées à cinq moulinets différents sont utilisées. Chaque moulinet est quelque peu différent des autres et l'écart moyen et l'écart type reflètent les caractéristiques d'étalonnage d'un groupe plutôt que la précision avec laquelle il est possible d'étalonner un seul moulinet. Plutôt que d'étalonner chacun des cinq moulinets une seule et unique fois, il aurait valu mieux d'étalonner un seul moulinet à cinq reprises et analyser ensuite les résultats.

En dépit de ces réserves, il est possible de comparer les étalonnages effectués aux quatre endroits différents.

Dans cette section, nous utiliserons et les données fournies par J.M. Lévesque (1) et les résultats des nouveaux étalonnages des cinq moulinets effectués dans le bassin de carène de l'INRE. Il y a deux façons de comparer les étalonnages effectués aux quatre endroits différents. La première méthode consiste à comparer l'étalonnage du moulinet 600594 effectué à chaque endroit à l'étalonnage moyen du moulinet 600594 décrit à la section 5.0. Avec la seconde méthode, on compare les étalonnages de groupe des cinq moulinets effectués aux divers endroits.

6.1 Étalonnage d'un moulinet

Pour comparer l'étalonnage du moulinet 600594 effectué aux quatre endroits, il faut avoir une référence commune comme base de comparaison. Nous avons décidé d'utiliser la moyenne des cinq étalonnages différents du moulinet 600594 comme référence. Les vitesses pour les valeurs paires de N de 2 à 20 tours/s sont ensuite calculées à l'aide des équations d'étalonnage fournies par chaque institut d'étalonnage. Pour chacune de ces vitesses, l'écart relatif par rapport à la vitesse moyenne V_5 (tableau 15) est calculé à l'aide de la relation:

$$E_v = \frac{V - V_5}{V_5} \times 100\% \quad (11)$$

où E_v est l'écart relatif de la vitesse par rapport à la référence V_5 pour une valeur donnée de N, V la vitesse calculée à l'aide des équations d'étalonnage fournies par les divers instituts et V_5 la vitesse moyenne correspondant à la moyenne de cinq étalonnages du moulinet 600594 (tableau 15). Pour les essais canadiens, nous avons utilisé un étalonnage différent (no 4 du tableau 12) des cinq qui comprennent la référence. Les valeurs de E_v calculées pour les étalonnages français, italiens, suisses et canadiens du moulinet 600594

sont énumérées au tableau 16. On voit que les valeurs de E_v associées à l'étalonnage italien sont beaucoup plus importantes que toutes les autres et que toutes les valeurs sont supérieures à l'incertitude à 99% de degré de confiance associée à l'étalonnage effectué au Canada. De plus, toutes les valeurs italiennes de E_v sont négatives ce qui signifie que la vitesse basée sur cet étalonnage est toujours trop faible. Les valeurs françaises, suisses et canadiennes du tableau 16 se comparent assez bien dans l'ensemble, à l'exception de la valeur française pour $N = 18$ qui est positive et qui, en valeur absolue, est beaucoup plus faible que la valeur italienne. Afin de pouvoir mieux illustrer les relations entre les divers étalonnages, nous avons porté en ordonnée les valeurs de E_v pour les étalonnages effectués aux divers endroits en fonction des valeurs de N pour lesquelles les moulinets ont été étalonnés (figure 19). Pour fins de comparaison, l'incertitude à 99% de degré de confiance associée à l'étalonnage de référence établie à la section 5.0 est également indiquée.

Les graphiques associés aux étalonnages français, suisses et canadiens forment un groupe et pour chacun, l'écart E_v de l'étalonnage de référence est en deçà de l'incertitude de 0,4%. Toutes les courbes se comportent de la même façon pour des valeurs de N inférieures à 10. Pour des valeurs de N supérieures à 10, les valeurs de E_v associées aux étalonnages suisses et canadiens augmentent avec N alors que les valeurs de E_v pour les étalonnages français chutent brusquement pour ces mêmes valeurs de N . Nous ne connaissons pas la raison de ce comportement différent des résultats d'étalonnage français; peut-être les instruments d'étalonnage se sont-ils mal comportés à cause de vibrations? En dépit du fait que la chute soudaine des valeurs françaises de E_v entraîne une diminution d'erreur, nous sommes portés à croire que les étalonnages suisses et canadiens sont plus fiables. Pour toutes les valeurs de N utilisées, les valeurs de E_v associées aux étalonnages canadiens sont inférieures aux valeurs de E_v associées aux étalonnages suisses. Par conséquent, les étalonnages canadiens sont supérieurs aux étalonnages français et

suisses. Le classement des étalonnages par ordre décroissant de fiabilité est le suivant: 1) Canada, 2) Suisse, 3) France.

En examinant les résultats des étalonnages italiens, on s'aperçoit (figure 19) que la courbe E_v fonction de N est isolée des trois autres et que la plupart des valeurs de E_v sont supérieures à l'incertitude de 0,4% dans la moitié négative du graphique. Rien ne nous permet de savoir pourquoi les résultats italiens sont si différents des autres; il est fort possible que cette différence marquée soit due à une certaine erreur systématique qu'il sera possible d'éliminer à l'occasion d'étalonnages futurs.

6.2 Étalonnage de groupe

Pour comparer les étalonnages de groupe des cinq moulinets numérotés de 600591 à 600595 inclusivement, nous avons calculé, à l'aide des équations d'étalonnage obtenues dans chaque institut, les vitesses moyennes de groupe V_g et leur écart type pour chaque valeur de N . Les valeurs de N utilisées sont les valeurs paires de 2 tours/s à 12 tours/s, cette dernière constituant la limite supérieure utilisée en Europe, tel qu'indiqué par J.M. Lévesque (1). Nous avons ensuite calculé l'incertitude relative à un degré de confiance de 99%, exprimée comme pourcentage de la vitesse moyenne de groupe, pour chaque valeur de N ; pour ce faire, nous avons utilisé l'équation (9). Puisqu'il y a cinq moulinets par groupe, le nombre de degrés de liberté est de 4 et le coefficient de confiance de la loi de Student (2) est encore de 4,60, c'est-à-dire $t_{0,995}=4,60$. Par conséquent, pour les étalonnages de groupe, l'équation (9) devient:

$$E_g = \frac{2,30 S_v}{V_g} \times 100\% \quad (12)$$

Les valeurs obtenues pour E_g sont énumérées au tableau 17.

Un graphique de E_g fonction de N est illustré à la figure 20. Encore une fois, les résultats italiens sont très différents des autres. Dans ce cas-ci, la différence entre la courbe italienne et le groupe des trois autres est encore plus marquée que pour la comparaison des étalonnages de moulinets individuels (figure 19). Par contre, les trois autres courbes se sont peu déplacées l'une par rapport à l'autre. Ceci signifie que les données italiennes comportent d'autres erreurs.

En examinant les graphiques associés aux étalonnages de groupe français, suisses et canadiens, on s'aperçoit encore une fois que les courbes sont très rapprochées l'une de l'autre. Bien entendu, en moyenne, les incertitudes d'étalonnages de groupes à cinq moulinets sont plus importantes que les incertitudes associés à l'étalonnage d'un moulinet à cinq reprises. La raison est que chaque moulinet possède ses propres caractéristiques qui diffèrent de celles de tout autre moulinet du même type. La différence dépendra des soins apportés à la fabrication du moulinet. Ces différences sont systématiques et le fait d'utiliser une moyenne pour un groupe de plusieurs moulinets est synonyme d'un traitement statistique d'erreurs systématiques. Il ne faut donc jamais se servir d'étalonnages de groupes pour déterminer la précision d'un type particulier de moulinet. Les résultats de la figure 20 indiquent encore une fois que les étalonnages suisses et canadiens sont supérieurs aux étalonnages français, bien que ces résultats ne soient pas aussi fiables que les résultats découlant de la comparaison des étalonnages de moulinets individuels (figure 19).

7.0 EFFET DE LA TIGE DE SUSPENSION

À la suite de son analyse (1), J.M. Lévesque concluait que le premier étalonnage des cinq moulinets effectué dans le bassin de carène de l'Institut national de recherche sur les eaux comportait une erreur systématique. L'erreur était évaluée à environ -0,4%, ce qui signifie que les vitesses calculées à l'aide des équations d'étalonnage auraient été de 0,4% inférieures aux valeurs réelles. Tel qu'indiqué à la section 1.2.3, la cause de cette erreur systématique semble être due au fait que nous avons alors fixé les moulinets à la tige de suspension avec leur axe de rotation situé à une distance de 2 cm seulement de l'extrémité inférieure de la tige. En Europe, les moulinets étalonnés avaient été fixés à la tige de suspension avec leur axe de rotation à une distance de 20 à 30 cm de l'extrémité inférieure de cette tige. Pour étudier plus directement l'effet de cette différence de position de suspension sur l'étalonnage des moulinets, nous avons étalonné le moulinet 600594 avec son axe de rotation à une distance de 2 cm de l'extrémité inférieure de la tige de suspension et avons comparé les résultats avec l'étalonnage de ce même moulinet placé à 30 cm du bout inférieur de la tige.

Dans chacun des cas, les vitesses ont été calculées à l'aide des équations d'étalonnage pertinentes pour les valeurs paires de N de 2 tours/s à 20 tours/s. Les écarts relatifs des vitesses pour le moulinet placé à 2 cm du bout de la tige de suspension ont ensuite été calculés à l'aide de l'équation suivante:

$$E_2 = \frac{V_2 - V_{30}}{V_{30}} \times 100\% \quad (13)$$

où E_2 est l'écart relatif des vitesses calculées, V_2 les vitesses calculées avec le moulinet à 2 cm du bout de la tige et V_{30} les vitesses calculées avec le moulinet à 30 cm du bout de la tige. Les résultats sont donnés au tableau 18.

Les valeurs de E_2 en fonction de N sont données à la figure 21; on y a également identifié les régions où chaque équation d'étalonnage s'applique. On s'aperçoit que pour N inférieur ou égal à 9, les valeurs de E_2 sont presque toutes égales à -0,34% et sont donc très près de la valeur de -0,4% évaluée par Lévesque (1). Par contre, pour N supérieur à 9, les valeurs de E_2 sont de beaucoup supérieures à -0,4%, leur valeur moyenne est de -0,57%. Il est intéressant de noter que la différence obtenue avec la seconde équation est beaucoup plus importante qu'avec la première, même si on s'attendait à ce que l'effet de proximité du bout de la tige de suspension soit plus important aux grandes vitesses de déplacement. Les erreurs systématiques ont de l'importance car elles sont du même ordre de grandeur que l'incertitude d'étalonnage du moulinet avec un degré de confiance de 99%. Par conséquent, avant de procéder à l'étalonnage du moulinet SIAP, il est très important de s'assurer qu'il est bel et bien fixé à la tige de suspension de la façon exigée.

8.0 CONCLUSIONS

- 8.1 La vitesse moyenne de déplacement du chariot peut être déterminée avec une précision de 99,9% au degré de confiance de 99%.
- 8.2 La précision du nombre de révolutions de l'hélice du moulinet obtenu à l'aide des instruments de collecte de données fournis peut être de 99,8% lorsque le nombre de révolutions comptées est supérieur à 240.
- 8.3 Avec les installations d'étalonnage de l'INRE, il est possible d'étalonner le moulinet SIAP avec une précision de 99,6% au degré de confiance de 99%.
- 8.4 À partir du nombre de données limité à notre disposition, notre analyse de la qualité des étalonnages effectués à divers endroits nous permet de placer ces étalonnages par ordre de qualité décroissante:
1. Étalonnages canadiens
 2. Étalonnages suisses
 3. Étalonnages français
 4. Étalonnages italiens
- 8.5 Chaque moulinet étant quelque peu différent des autres, l'incertitude associée à l'étalonnage de cinq moulinets une fois chacun est plus importante que l'incertitude associée à l'étalonnage d'un seul moulinet à cinq reprises.
- 8.6 Nos essais démontrent que le fait de placer le moulinet à 2 cm plutôt qu'à 30 cm de l'extrémité de la tige de suspension entraîne des erreurs systématiques qui affectent les équations d'étalonnage. Ces erreurs sont constantes. Dans la première équation d'étalonnage, l'erreur est de -0,34%; elle est de -0,57% dans la seconde. Ces valeurs correspondent sensiblement à l'erreur de -0,4% évaluée par Lévesque (1) à la lumière de notre première série d'étalonnages à l'Institut national de recherche sur les eaux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs veulent exprimer leur reconnaissance à C. Bil et B. Near qui se sont occupés des essais.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Lévesque, J. M., 1980. "Moulinets hydrométriques - comparaison des étalonnages effectués en Italie, France, Canada et Suisse". Rapport no. 8091, Division Machines, Hydro-Québec.
- (2) Spiegel, M. R., 1961. "Theory and Problems of Statistics". Schaum Publishing Company, New York.

TABLEAUX

TABLEAU 1. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPÉRATURE DE L'EAU DE 18.8°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de Tours	Temps s	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV m/s
1	10	101	280.00	10.033	0.361	0.010
2	10	147.5	195.00	20.065	0.756	0.012
3	10	201	170.00	30.109	1.182	0.006
4	10	317	200.00	40.111	1.585	0.005
5	10	323.5	135.00	60.160	2.396	0.003
6	15	320	100.00	80.137	3.200	0.001
7	15	320	80.00	99.820	4.000	-0.002
8	15	314	65.00	120.559	4.831	-0.002
9	15	337.5	60.00	140.222	5.625	-0.004
10	25	321.5	50.00	160.290	6.430	-0.005
11	25	326.5	45.00	181.971	7.256	-0.004
12	25	281	35.00	199.863	8.029	-0.009
13	25	311	35.00	220.646	8.886	-0.015
14	25	292	30.00	240.747	9.733	-0.026
15	25	304.5	30.00	250.863	10.150	-0.029
16	25	301	27.00	275.071	11.148	-0.036
17	25	305	25.00	300.625	12.200	-0.044
18	25	291	22.00	325.676	13.227	-0.050
19	25	300	21.00	351.032	14.286	-0.061
20	25	298.5	19.50	375.748	15.308	-0.069
21	25	294	18.00	400.951	16.333	-0.074
22	25	261	15.00	425.713	17.400	-0.093
23	25	277	15.00	450.410	18.467	-0.113
24	25	273.5	14.00	476.319	19.536	-0.121
25	25	288.5	14.00	500.539	20.607	-0.146
26	35	249.5	11.50	525.619	21.696	-0.168
27	35	227	10.00	550.845	22.700	-0.167
28	35	225	9.50	576.044	23.684	-0.162
29	35	224.5	9.00	600.346	24.944	-0.233

TABEAU 2. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPÉRATURE DE L'EAU 18.8°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	101.5	280.00	10.049	0.363	0.010
2	10	148.5	195.00	20.080	0.762	0.010
3	10	200	170.00	30.020	1.176	0.006
4	10	315	200.00	40.094	1.575	0.007
5	10	322	135.00	60.117	2.385	0.005
6	15	319.5	100.00	80.019	3.195	0.001
7	15	321	80.00	100.302	4.013	-0.000
8	15	313.5	65.00	120.417	4.823	-0.002
9	15	336.5	60.00	139.976	5.608	-0.002
10	25	322	50.00	160.321	6.440	-0.007
11	25	325.5	45.00	180.061	7.233	-0.008
12	25	281	35.00	199.326	8.029	-0.014
13	25	310.5	35.00	219.836	8.871	-0.019
14	25	292.5	30.00	241.111	9.750	-0.026
15	25	304.5	30.00	250.597	10.150	-0.032
16	25	301.5	27.00	275.569	11.167	-0.036
17	25	305	25.00	300.544	12.200	-0.045
18	25	291.5	22.00	325.772	13.250	-0.055
19	25	300	21.00	351.075	14.286	-0.061
20	25	298	19.50	375.540	15.282	-0.065
21	25	294.5	18.00	401.129	16.361	-0.079
22	25	261.5	15.00	426.366	17.433	-0.095
23	25	276.5	15.00	450.520	18.433	-0.103
24	25	273.5	14.00	476.485	19.536	-0.119
25	25	288.5	14.00	500.847	20.607	-0.143
26	35	248	11.50	526.356	21.565	-0.128
27	35	227.5	10.00	551.377	22.750	-0.174
28	35	226.5	9.50	576.636	23.842	-0.194
29	35	223.5	9.00	601.226	24.833	-0.196

TABLEAU 3. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPÉRATURE DE L'EAU 19.6°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	101.5	280.00	10.077	0.363	0.010
2	10	148.5	195.00	20.115	0.762	0.011
3	10	200.5	170.00	30.093	1.179	0.006
4	10	314.5	200.00	40.001	1.573	0.007
5	10	323	135.00	60.089	2.393	0.003
6	15	318.5	100.00	79.883	3.185	0.003
7	15	320.5	80.00	100.182	4.006	0.000
8	15	313.5	65.00	120.252	4.823	-0.003
9	15	338	60.00	140.401	5.633	0.004
10	25	320.5	50.00	159.978	6.410	-0.003
11	25	325	45.00	179.656	7.222	-0.009
12	25	281	35.00	199.686	8.029	-0.010
13	25	311.5	35.00	220.352	8.900	-0.021
14	25	291.5	30.00	240.179	9.717	-0.027
15	25	305.5	30.00	251.287	10.183	-0.033
16	25	301	27.00	274.993	11.148	-0.037
17	25	305	25.00	300.459	12.200	-0.045
18	25	290.5	22.00	325.065	13.205	-0.050
19	25	299.5	21.00	350.455	14.262	-0.061
20	25	299	19.50	375.226	15.333	-0.081
21	25	294.5	18.00	400.880	16.361	-0.081
22	25	261.5	15.00	426.034	17.433	-0.098
23	25	277	15.00	450.876	18.467	-0.108
24	25	273.5	14.00	476.541	19.536	-0.119
25	25	288	14.00	500.688	20.571	-0.136
26	35	249.5	11.50	525.801	21.696	-0.166
27	35	228.5	10.00	550.922	22.850	-0.203
28	35	226	9.50	576.630	23.789	-0.181
29	35	223.5	9.00	601.048	24.833	-0.198

TABLEAU 4. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPÉRATURE DE L'EAU 12.2°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	108.5	300.00	10.082	0.362	0.010
2	10	227	300.00	20.108	0.757	0.012
3	10	311	267.00	30.073	1.165	0.010
4	10	313.5	200.00	40.084	1.568	0.009
5	10	316	133.00	60.064	2.376	0.007
6	15	319.5	100.00	80.409	3.195	0.005
7	15	320	80.00	100.064	4.000	0.001
8	15	322.5	67.00	120.213	4.813	-0.001
9	15	321	57.00	140.287	5.632	-0.005
10	25	320.5	50.00	159.999	6.410	-0.003
11	25	318	44.00	180.522	7.227	-0.002
12	25	322	40.00	200.568	8.050	-0.007
13	25	319.5	36.00	220.644	8.875	-0.012
14	25	319.5	33.00	240.451	9.682	-0.016
15	25	322	32.00	250.130	10.063	-0.014
16	25	322.5	29.00	275.647	11.121	-0.024
17	25	328.5	27.00	300.462	12.167	-0.037
18	25	290.5	22.00	325.741	13.205	-0.044
19	25	285	20.00	350.402	14.250	-0.058
20	25	290	19.00	375.447	15.263	-0.061
21	25	293.5	18.00	400.576	16.306	-0.071
22	25	277.5	16.00	425.402	17.344	-0.082
23	25	275.5	15.00	450.418	18.367	-0.087
24	25	272.5	14.00	475.971	19.464	-0.106
25	25	267	13.00	502.762	20.538	-0.107
26	35	259	12.00	527.969	21.583	-0.116
27	35	226	10.00	550.784	22.600	-0.142
28	35	212	9.00	575.925	23.556	-0.130
29	35	221	9.00	599.870	24.556	-0.140

TABLEAU 5. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPERATURE DE L'EAU 12.5°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	110.5	300.00	10.107	0.368	0.009
2	10	229	300.00	20.131	0.763	0.011
3	10	316	267.00	30.103	1.184	0.005
4	10	315	200.00	40.032	1.575	0.007
5	10	316	133.00	60.103	2.376	0.007
6	15	319	100.00	80.353	3.190	0.006
7	15	320.5	80.00	100.065	4.006	-0.001
8	15	323	67.00	120.068	4.821	-0.005
9	15	321	57.00	140.214	5.632	-0.006
10	25	321.5	50.00	160.371	6.430	-0.004
11	25	317.5	44.00	180.234	7.216	-0.002
12	25	322	40.00	200.416	8.050	-0.008
13	25	319.5	36.00	220.515	8.875	-0.014
14	25	319.5	33.00	240.445	9.682	-0.016
15	25	322.5	32.00	250.423	10.078	-0.015
16	25	323	29.00	275.662	11.138	-0.028
17	25	328.5	27.00	300.605	12.167	-0.036
18	25	290.5	22.00	325.765	13.205	-0.043
19	25	284.5	20.00	350.209	14.225	-0.054
20	25	290	19.00	375.388	15.263	-0.062
21	25	293.5	18.00	400.389	16.306	-0.072
22	25	277.5	16.00	425.482	17.344	-0.081
23	25	275.5	15.00	450.298	18.367	-0.089
24	25	272.5	14.00	476.107	19.464	-0.105
25	25	265.5	13.00	500.098	20.423	-0.105
26	35	257.5	12.00	525.074	21.458	-0.114
27	35	225.5	10.00	550.582	22.550	-0.132
28	35	212	9.00	575.819	23.556	-0.131
29	35	220.5	9.00	599.968	24.500	-0.126

TABEAU 6. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600591, TEMPÉRATURE DE L'EAU 12.9°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	105	300.00	10.113	0.350	0.014
2	10	227	300.00	20.139	0.757	0.012
3	10	308.5	267.00	30.127	1.155	0.012
4	10	310.5	200.00	40.100	1.553	0.013
5	10	315	133.00	60.218	2.368	0.010
6	15	319.5	100.00	80.417	3.195	0.005
7	15	321	80.00	100.703	4.013	0.004
8	15	322	67.00	120.220	4.806	0.001
9	15	319.5	57.00	140.407	5.605	0.003
10	25	321 5	50.00	160.681	6.420	0.002
11	25	317.5	44.00	180.604	7.216	0.002
12	25	321	40.00	200.576	8.025	0.000
13	25	317.5	36.00	220.638	8.819	0.002
14	25	319	33.00	240.745	9.667	-0.009
15	25	321.5	32.00	250.561	10.047	-0.006
16	25	321	29.00	275.924	11.069	-0.008
17	25	327	27.00	300.789	12.111	-0.020
18	25	289.5	22.00	325.882	13.159	-0.031
19	25	283	20.00	350.638	14.150	-0.031
20	25	289	19.00	375.764	15.211	-0.045
21	25	292.5	18.00	400.746	16.250	-0.055
22	25	276.5	16.00	425.828	17.281	-0.062
23	25	275	15.00	450.738	18.333	-0.076
24	25	270.5	14.00	475.422	19.321	0.076
25	25	265	13.00	500.697	20.385	-0.089
26	35	257	12.00	525.315	21.417	-0.101
27	35	225.5	10.00	550.805	22.550	-0.129
28	35	211.5	9.00	575.771	23.500	-0.117
29	35	221.5	9.00	600.862	24.611	-0.144

TABLEAU 7. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600592, TEMPÉRATURE DE L'EAU 12.9°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	106.5	300.00	10.094	0.355	0.012
2	10	224	300.00	20.115	0.747	0.014
3	10	310.5	267.00	30.164	1.163	0.011
4	10	310.5	200.00	40.060	1.553	0.012
5	10	314	133.00	60.007	2.361	0.010
6	15	317.5	100.00	80.922	3.175	0.005
7	15	317.5	80.00	100.472	3.969	0.002
8	15	322	67.00	120.223	4.806	0.001
9	15	320	57.00	140.385	5.614	0.000
10	25	320	50.00	160.121	6.400	0.001
11	25	317	44.00	180.030	7.205	-0.001
12	25	320	40.00	200.099	8.000	0.001
13	25	318	36.00	220.336	8.833	-0.005
14	25	318.5	33.00	240.219	9.652	-0.011
15	25	322.5	32.00	250.706	10.078	-0.012
16	25	320.5	29.00	274.791	11.052	-0.015
17	25	326.5	27.00	300.142	12.093	-0.022
18	25	289.5	22.00	325.620	13.159	-0.034
19	25	283.5	20.00	350.204	14.175	-0.042
20	25	289	19.00	375.058	15.211	-0.052
21	25	292.5	18.00	400.285	16.250	-0.060
22	25	276.5	16.00	425.147	17.281	-0.069
23	25	274.5	15.00	449.966	18.300	-0.075
24	25	270.5	14.00	475.224	19.321	0.078
25	25	264.5	13.00	500.505	20.346	-0.081
26	35	256.5	12.00	525.397	21.375	-0.090
27	35	224.5	10.00	550.513	22.450	-0.107
28	35	211	9.00	575.781	23.444	-0.103
29	35	219.5	9.00	600.447	24.389	-0.093

TABLEAU 8. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600593, TEMPÉRATURE DE L'EAU 13.8°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	98.5	300.00	10.103	0.328	0.019
2	10	223.5	300.00	20.160	0.745	0.015
3	10	310.5	267.00	30.059	1.163	0.010
4	10	316.5	200.00	40.131	1.583	0.006
5	10	318.5	133.00	60.195	2.395	0.003
6	15	321	100.00	80.465	3.210	0.002
7	15	321.5	80.00	100.739	4.019	0.003
8	15	323.5	67.00	120.964	4.828	0.003
9	15	320	57.00	140.470	5.614	0.001
10	25	320	50.00	160.232	6.400	0.002
11	25	316.5	44.00	180.058	7.193	0.002
12	25	321.5	40.00	200.806	8.038	-0.001
13	25	318	36.00	220.251	8.833	-0.006
14	25	318.5	33.00	240.265	9.652	-0.010
15	25	321.5	32.00	250.984	10.047	-0.012
16	25	321.5	29.00	274.284	11.086	-0.019
17	25	327	27.00	300.471	12.111	-0.023
18	25	289.5	22.00	325.584	13.159	-0.034
19	25	284	20.00	350.026	14.200	-0.050
20	25	289.5	19.00	375.063	15.237	-0.059
21	25	293.5	18.00	400.416	16.306	-0.072
22	25	277.5	16.00	425.313	17.344	-0.083
23	25	276	15.00	449.837	18.400	-0.092
24	25	271.5	14.00	475.216	19.393	0.096
25	25	265.5	13.00	500.248	20.423	-0.103
26	35	257.5	12.00	525.223	21.458	-0.112
27	35	225	10.00	550.553	22.500	-0.119
28	35	211.5	9.00	575.692	23.500	-0.118
29	35	221.5	9.00	600.051	24.611	-0.152

TABLEAU 9. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPÉRATURE DE L'EAU 16.4°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	107.5	300.00	10.101	0.358	0.011
2	10	228	300.00	20.100	0.760	0.011
3	10	311	267.00	30.064	1.165	0.009
4	10	312.5	200.00	40.042	1.563	0.010
5	10	316.5	133.00	60.068	2.380	0.006
6	15	320	100.00	80.215	3.200	0.002
7	15	321.5	80.00	100.504	4.019	0.000
8	15	323.5	67.00	120.660	4.828	0.000
9	15	320.5	57.00	140.128	5.623	-0.004
10	25	320	50.00	160.695	6.400	-0.003
11	25	317.5	44.00	180.293	7.216	-0.001
12	25	322.5	40.00	200.919	8.063	-0.006
13	25	319.5	36.00	220.407	8.875	-0.015
14	25	319.5	33.00	240.233	9.682	-0.018
15	25	323.5	32.00	250.583	10.109	-0.022
16	25	323	29.00	274.589	11.138	-0.029
17	25	328.5	27.00	300.427	12.167	-0.037
18	25	290.5	22.00	325.616	13.205	-0.045
19	25	284.5	20.00	350.653	14.225	-0.050
20	25	290	19.00	375.683	15.263	-0.059
21	25	293.5	18.00	401.048	16.306	-0.066
22	25	277.5	16.00	425.897	17.344	-0.077
23	25	276	15.00	451.291	18.400	-0.087
24	25	272	14.00	475.714	19.429	0.100
25	25	266	13.00	500.644	20.462	-0.109
26	35	259	12.00	525.842	21.583	-0.137
27	35	226	10.00	550.960	22.600	-0.140
28	35	213	9.00	575.918	23.667	-0.157
29	35	223	9.00	600.864	24.778	-0.186

TABEAU 10. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
HYDROMÉTRIQUE 600595, TEMPÉRATURE DE L'EAU 13.8°C

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	105.5	300.00	10.102	0.352	0.013
2	10	223.5	300.00	20.113	0.745	0.015
3	10	308.5	267.00	30.101	1.155	0.012
4	10	310.5	200.00	40.078	1.553	0.013
5	10	315	133.00	60.045	2.368	0.008
6	15	320	100.00	80.515	3.200	0.005
7	15	320.5	80.00	100.654	4.006	0.005
8	15	322.5	67.00	120.760	4.813	0.004
9	15	319	57.00	140.218	5.596	0.003
10	25	319	50.00	160.826	6.380	0.003
11	25	316	44.00	180.888	7.182	0.003
12	25	320.5	40.00	200.655	8.013	0.003
13	25	318	36.00	220.192	8.833	-0.006
14	25	318.5	33.00	240.069	9.652	-0.012
15	25	321.5	32.00	250.315	10.047	-0.009
16	25	321	29.00	275.068	11.069	-0.017
17	25	327	27.00	300.144	12.111	-0.026
18	25	289.5	22.00	325.563	13.159	-0.034
19	25	283.5	20.00	349.828	14.175	-0.045
20	25	289	19.00	374.991	15.211	-0.053
21	25	292.5	18.00	400.004	16.250	-0.062
22	25	276.5	16.00	424.976	17.281	-0.071
23	25	275	15.00	450.536	18.333	-0.078
24	25	271	14.00	474.991	19.357	0.089
25	25	266.5	13.00	501.737	20.500	-0.108
26	35	257.5	12.00	525.323	21.458	-0.111
27	35	224.5	10.00	550.469	22.450	-0.108
28	35	211	9.00	575.377	23.444	-0.107
29	35	221	9.00	600.247	24.556	-0.136

TABLEAU 11. DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
 HYDROMÉTRIQUE 600594, TEMPÉRATURE DE L'EAU 14.7°C
 MOULINET FIXÉ À 2 CM DU BOUT DE LA TIGÉ DE SUSPENSION

Numéro d'essai	Temps d'attente (min)	Nombre de tours	Temps (s)	Vitesse utilisée (cm/s)	N (tours/s)	ΔV (m/s)
1	10	110	300.00	10.093	0.367	0.009
2	10	228.5	300.00	20.113	0.762	0.011
3	10	310.5	267.00	30.100	1.163	0.010
4	10	314	200.00	40.049	1.570	0.008
5	10	317	133.00	59.991	2.383	0.004
6	15	322	100.00	80.432	3.220	-0.001
7	15	322	80.00	100.548	4.025	-0.001
8	15	325.5	67.00	120.874	4.858	-0.006
9	15	322	57.00	140.440	5.649	-0.008
10	25	322	50.00	160.149	6.440	-0.009
11	25	319	44.00	180.032	7.250	-0.012
12	25	323.5	40.00	200.645	8.088	-0.015
13	25	320.5	36.00	220.253	8.903	-0.023
14	25	320.5	33.00	240.976	9.712	-0.028
15	25	324.5	32.00	250.060	10.141	-0.035
16	25	324.5	29.00	275.216	11.190	-0.045
17	25	330	27.00	300.259	12.222	-0.053
18	25	292	22.00	325.567	13.273	-0.063
19	25	285.5	20.00	349.219	14.275	-0.067
20	25	291.5	19.00	374.470	15.342	-0.081
21	25	295	18.00	400.404	16.389	-0.093
22	25	279	16.00	424.402	17.438	-0.105
23	25	277.5	15.00	450.029	18.500	-0.115
24	25	273.5	14.00	474.651	19.536	0.127
25	25	267	13.00	501.935	20.538	-0.125
26	35	259.5	12.00	527.648	21.625	-0.130
27	35	226.5	10.00	551.260	22.650	-0.150
28	35	213	9.00	576.060	23.667	-0.156
29	35	223	9.00	600.939	24.778	-0.185

TABLEAU 12. ÉQUATIONS D'ÉTALONNAGE POUR LES CINQ MOULINETS

Numéro étalonnage	Numéro du moulinet	N_c tours/s	Équation pour $0 < N < N_c$			Équation pour $N_c < N < 20$		
			m_1	a_1	r_1	m_2	a_2	r_2
1	600591	10.6	24.8047	1.3865	0.999996	24.1486	8.4572	0.999993
2	600592	9.9	24.7779	1.4001	0.999996	24.1812	7.3799	0.999996
3	600593	10.3	24.7752	1.3552	0.999982	24.0243	9.0818	0.999978
4	600594	8.9	24.7417	1.2315	0.999990	24.1636	6.5912	0.999988
5	600595	8.9	24.8153	1.4042	0.999990	24.1399	7.8028	0.999998

TABLEAU 13. ÉQUATIONS POUR CINQ ÉTALONNAGES CONSECUTIFS DU MOULINET 600594

Numéro étalonnage	Numéro du moulinet	N_c tours/s	Équation pour $0 < N < N_c$			Équation pour $N_c < N < 20$		
			m_1	a_1	r_1	m_2	a_2	r_2
1	600594	8.9	24.7730	0.9524	0.999992	24.0181	7.6409	0.999947
2	600594	9.1	24.7195	1.1271	0.999996	23.9850	8.0044	0.999932
3	600594	8.9	24.7424	1.0585	0.999995	24.0031	7.6016	0.999973
4	600594	9.6	24.7490	1.2331	0.999992	24.0999	7.4590	0.999987
5	600594	9.6	24.7576	1.0593	0.999986	24.1146	7.2402	0.999993

TABLEAU 14. ÉQUATION D'ÉTALONNAGE UTILISÉE POUR
ÉTUDIER L'EFFET DE LA TIGE DE SUSPENSION

Numéro étalonnage	Numéro du moulinet	N_c tours/s	Équation pour $0 < N < N_c$			Équation pour $N_c < N < 20$		
			m_1	a_1	r_1	m_2	a_2	r_2
1	600594	8.9	24.6552	1.2396	0.999996	24.0227	8.5865	0.999995

**TABEAU 15. PRÉCISION DE L'ÉTALONNAGE DU MOULINET 600594
AU DEGRÉ DE CONFIANCE DE 99%**

N tours /s	Vitesse de déplacement (cm/s)					Vitesse moyenne V (cm/s)	Écart type S_v (cm/s)	E %
	Étalonnage no. 1	Étalonnage no. 2	Étalonnage no. 3	Étalonnage no. 4	Étalonnage no. 5			
2	50.498	50.566	50.543	50.731	50.575	50.583	0.079	0.359
4	100.044	100.005	100.028	100.229	100.090	100.079	0.080	0.184
5	149.590	149.444	149.513	149.727	149.605	149.576	0.095	0.146
8	199.136	198.883	198.998	199.225	199.120	199.072	0.119	0.138
8-9	221.432	221.131	221.266	221.499	221.402	221.346	0.132	0.137
10	247.822	247.854	247.633	248.458	248.386	248.031	0.329	0.305
12	295.858	295.824	295.639	296.658	296.615	296.119	0.429	0.333
14	343.894	343.794	343.645	344.858	344.845	344.207	0.532	0.356
15	391.931	391.764	391.651	393.057	393.074	392.295	0.635	0.372
18	439.967	439.734	439.657	441.257	441.303	440.384	0.739	0.386
20	488.003	487.704	487.664	489.457	489.532	488.472	0.843	0.397

TABLE 16. COMPARAISON DE L'ÉTALONNAGE DU MOULINET 600594
DANS DIFFÉRENTS BASSINS DE CARÈNE

Moyenne pour 5 étalonnages			Différence relative par rapport à l'étalonnage de référence E_v			
N tours/s	V_5 cm/s	*E%	Italie	France	Suisse	Canada
2	50.583	0.359	-0.994	0.192	0.330	0.271
4	100.079	0.184	-0.519	0.181	0.171	0.121
6	149.576	0.146	-0.358	0.177	0.116	0.070
8	199.072	0.138	-0.318	0.175	0.089	0.049
10	248.031	0.305	-0.577	0.391	0.290	0.080
12	296.119	0.333	-0.459	0.230	0.291	0.146
14	344.204	0.356	-0.373	0.115	0.301	0.197
16	392.295	0.372	-	0.027	0.307	0.233
18	440.384	0.386	-	-0.042	0.313	0.262
20	488.472	0.397	-	-	0.317	0.285

*E = incertitude relative à un degré de confiance de 99% associée à l'étalonnage de référence du tableau 15.

TABÉAU 17. INCERTITUDES POUR ÉTALONNAGES DE GROUPE

N tours/s	Incertitude associée à la vitesse moyenne de group en %Eg			
	Italie	France	Suisse	Canada
2	2.51	0.46	0.20	0.50
4	1.92	0.42	0.25	0.37
6	1.75	0.41	0.35	0.33
8	1.66	0.37	0.40	0.30
10	1.79	0.69	0.41	0.38
12	1.88	0.62	0.48	0.42

TABLEAU 18. VARIATION RELATIVE DE L'ÉTALONNAGE CAUSÉE PAR
LA POSITION DU MOULINET SUR LA TIGE DE SUSPENSION

N	V ₃₀	V ₂	E ₂ %
tours/s	cm/s	cm/s	
2	50.715	50.550	-0.325
4	100.198	99.860	-0.337
6	149.682	149.171	-0.342
8	199.165	198.481	-0.343
	221.433	220.671	-0.344
10	248.227	246.814	-0.569
12	296.554	294.859	-0.572
14	344.882	342.904	-0.573
16	393.209	390.950	-0.575
18	441.536	438.995	-0.576
20	489.863	487.041	-0.576

L'indice "30" signifie que le moulinet est à 30 cm du bout inférieur de la tige.

L'indice "2" signifie que le moulinet est à 2 cm du bout inférieur de la tige.

FIGURES

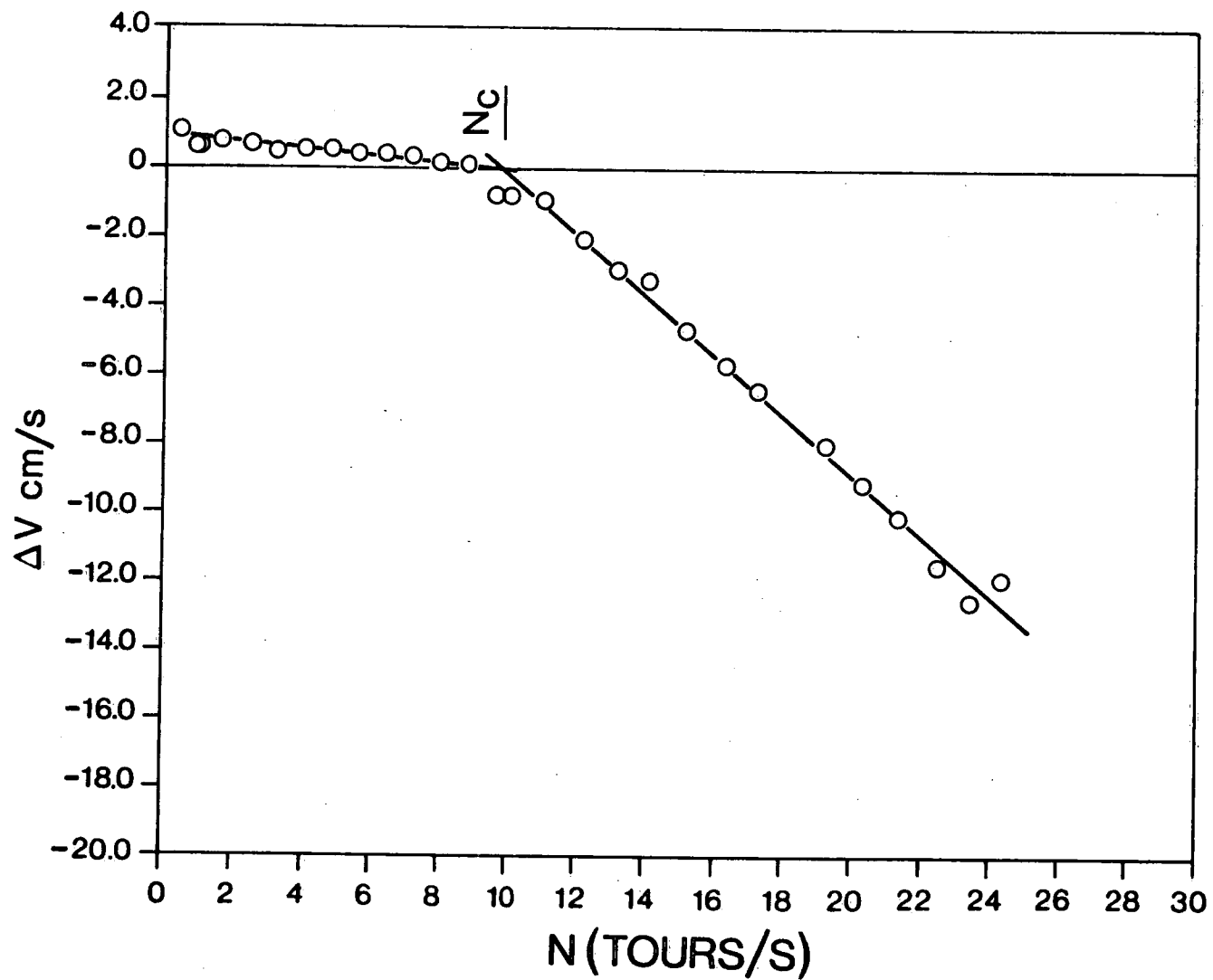


FIGURE 1. GRAPHIQUE TYPIQUE DE ΔV FONCTION DE N

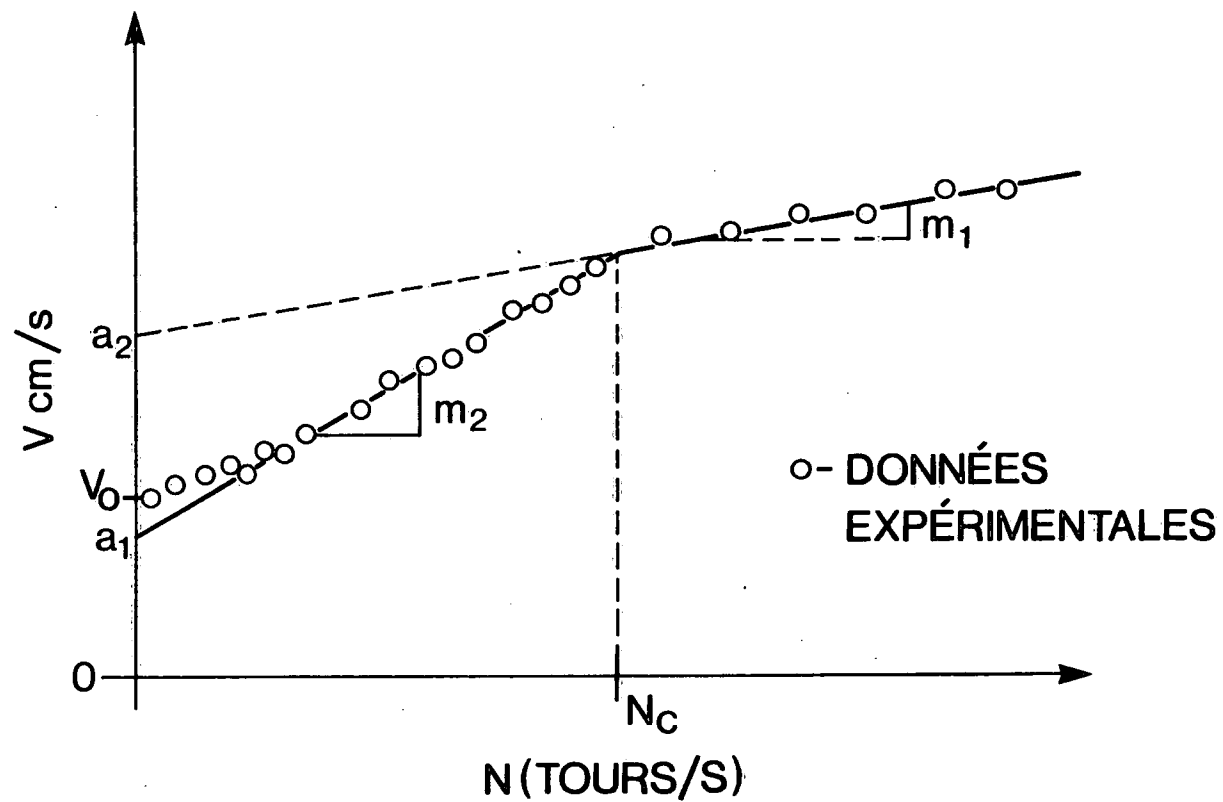


FIGURE 2. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'ÉQUATIONS D'ÉTALONNAGE

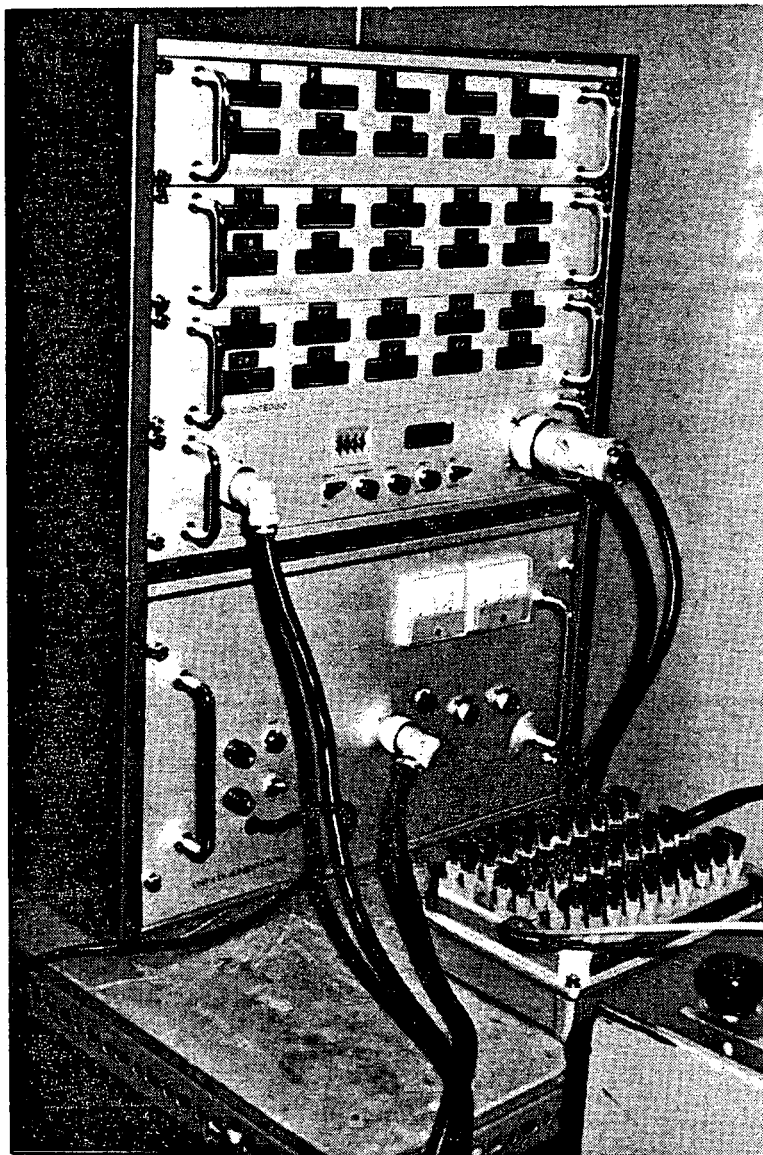


FIGURE 3. COMPTE-TOURS/CHRONOMÈTRE SIAP

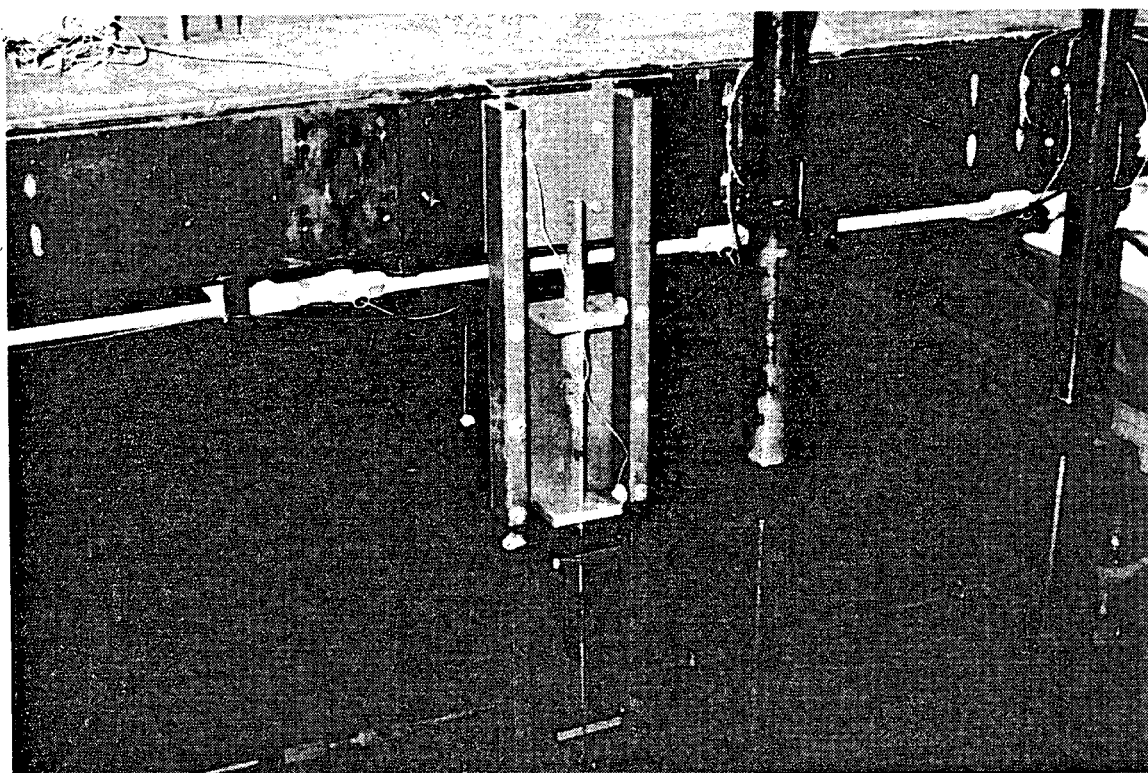


FIGURE 4. TIGE DE SUSPENSION DU MOULINET À
L'ARRIÈRE DU CHARIOT

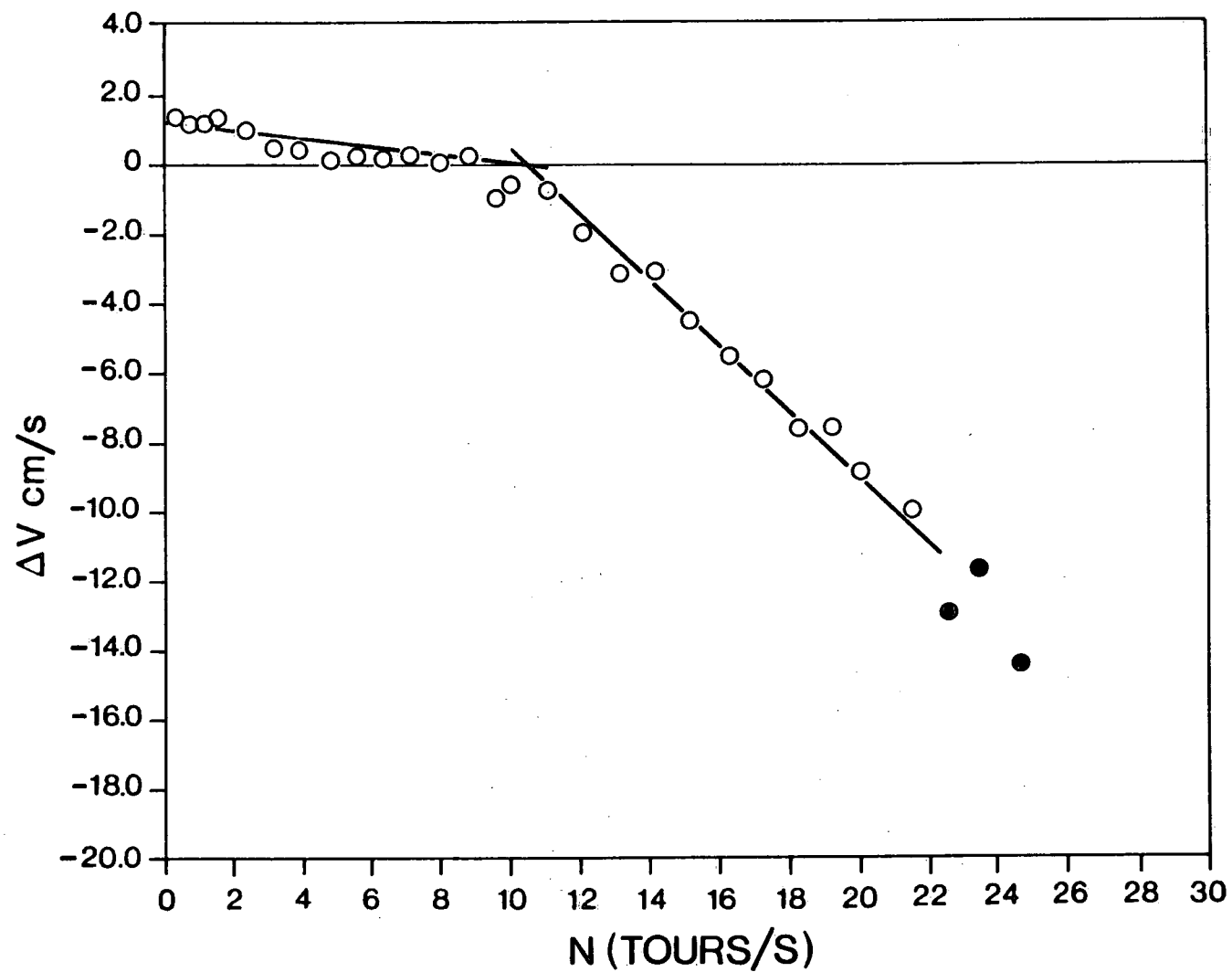


FIGURE 5. ÉTALONNAGE DU MOULINET 600591

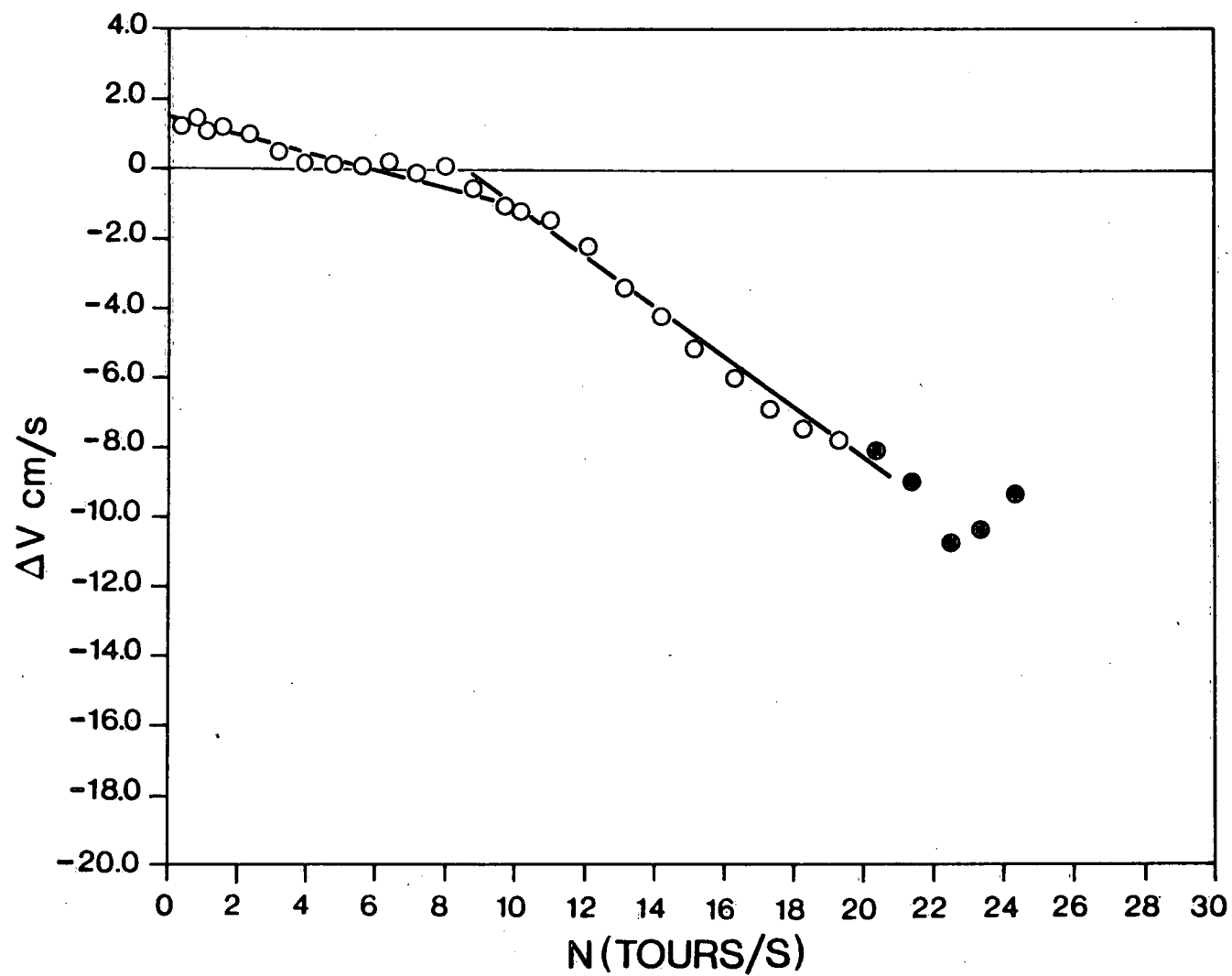


FIGURE 6. ÉTALONNAGE DU MOULINET 600592

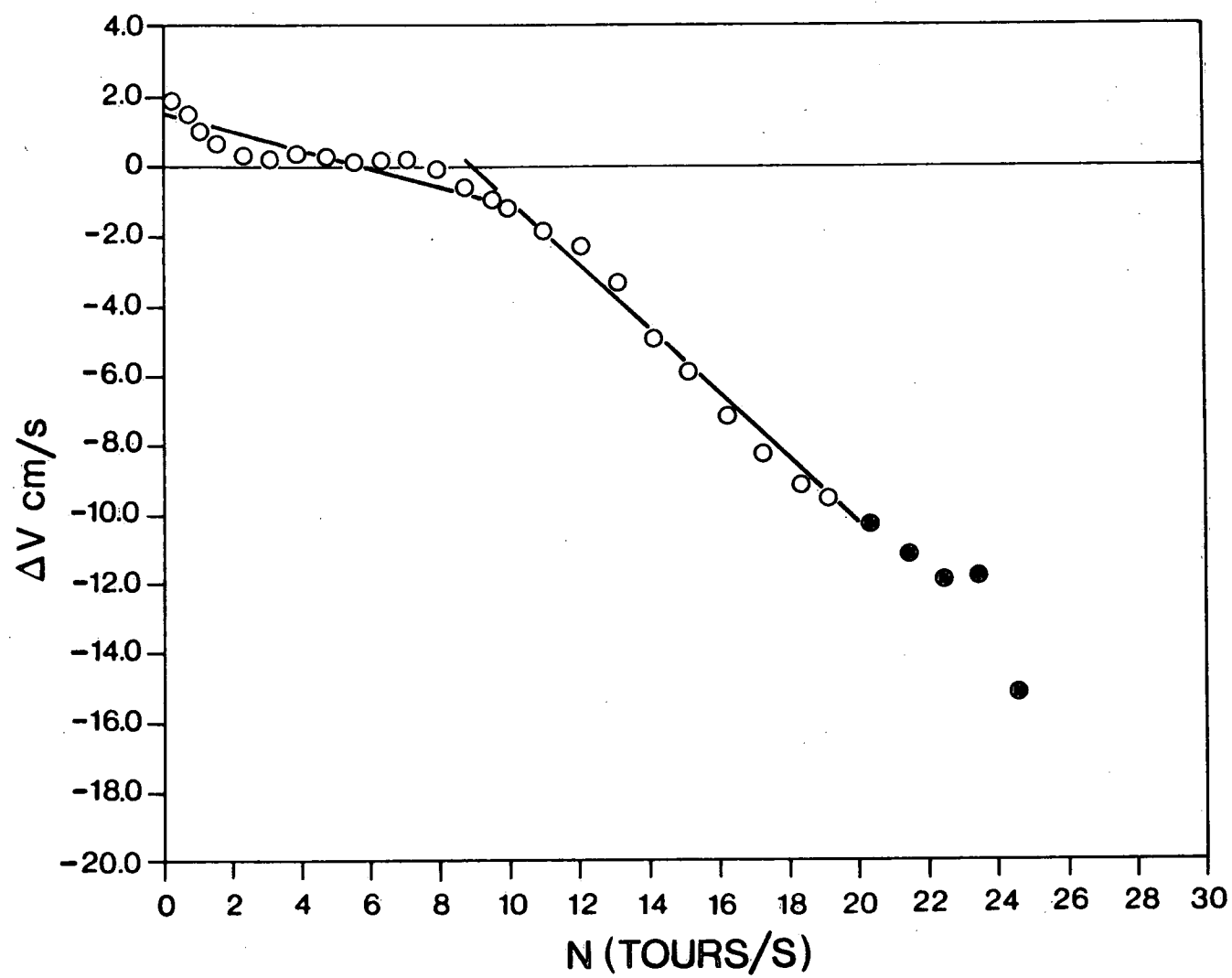


FIGURE 7. ÉTALONNAGE DU MOULINET 600593

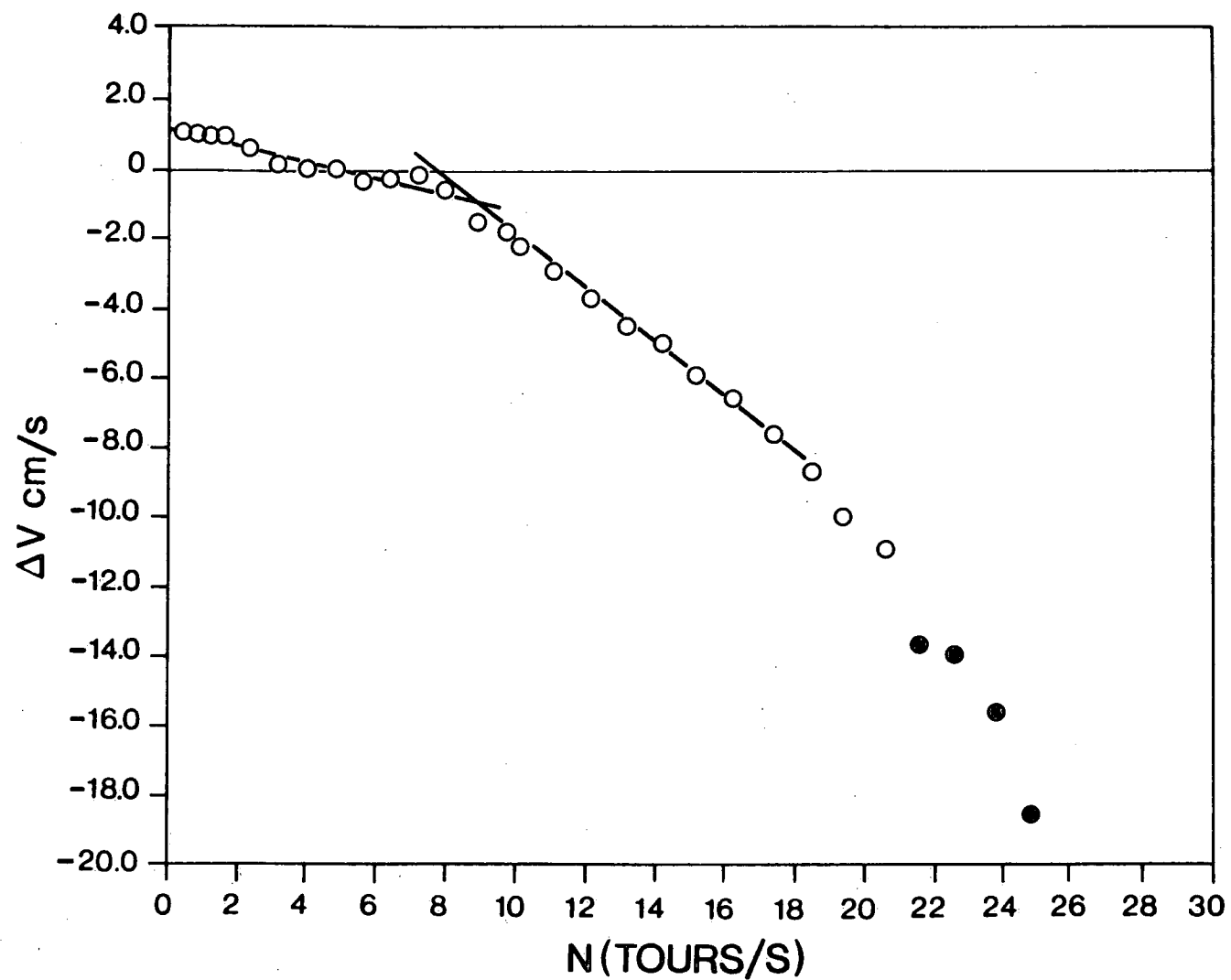


FIGURE 8. ÉTALONNAGE DU MOULINET 600594

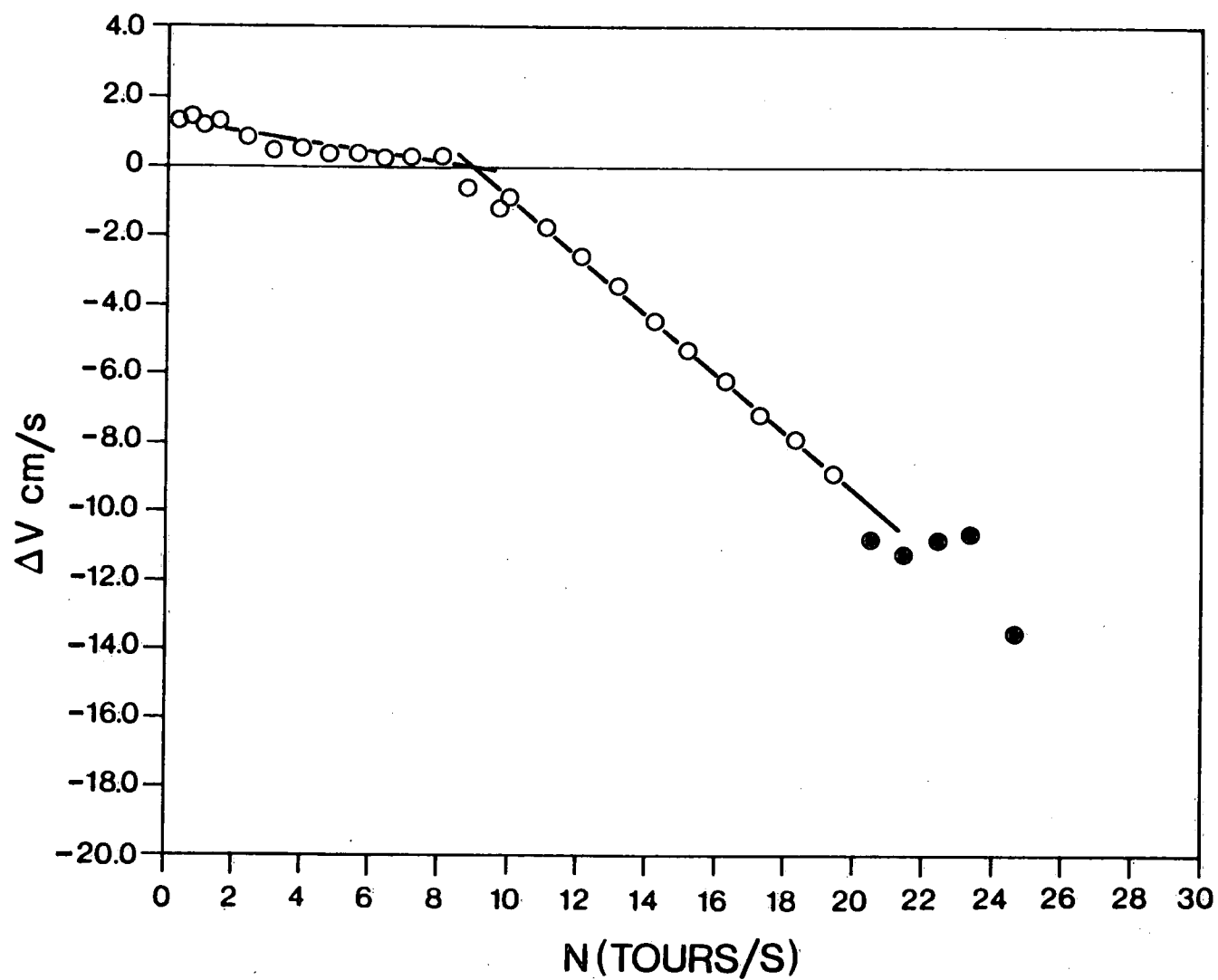


FIGURE 9. ÉTALONNAGE DU MOULINET 600595

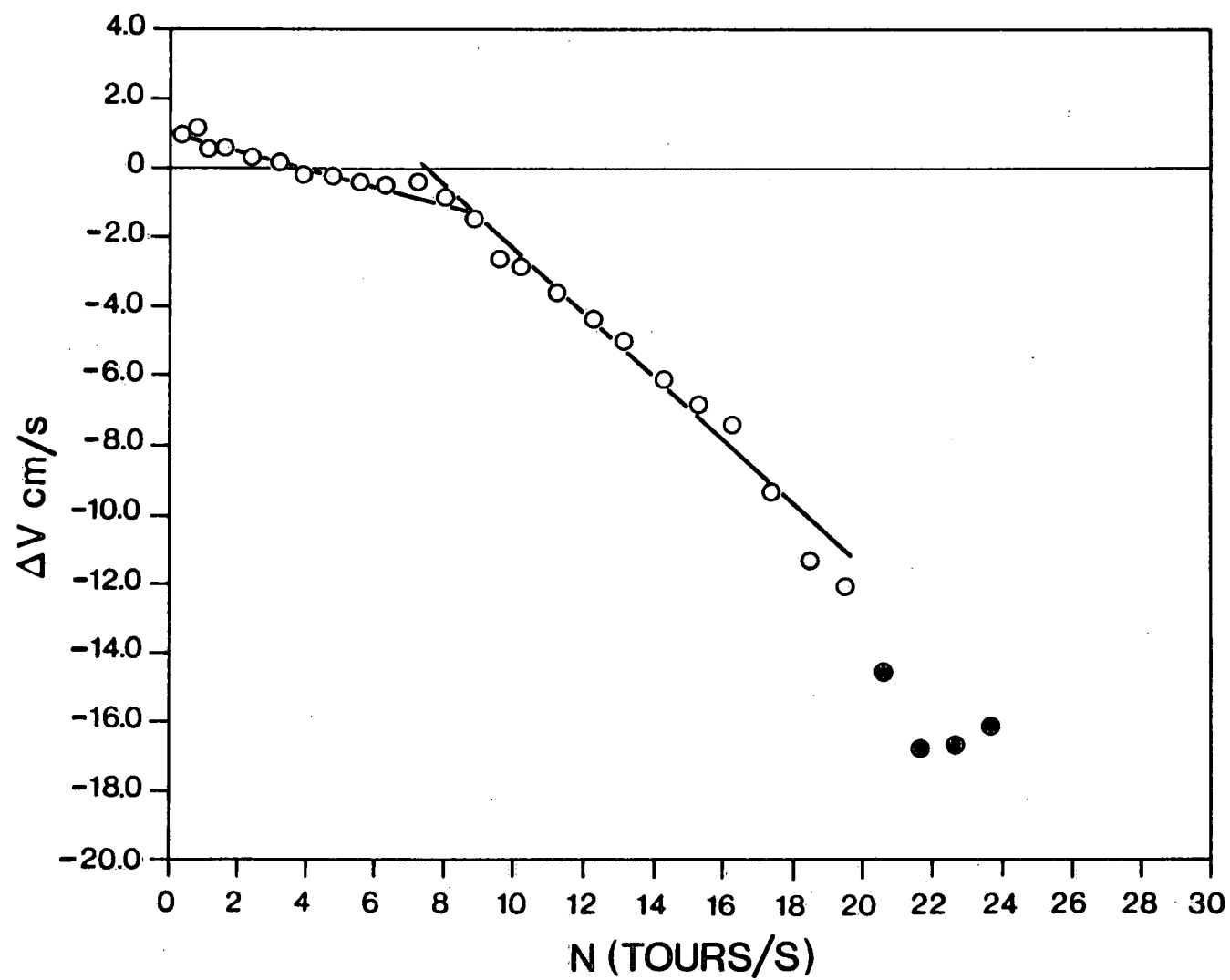


FIGURE 10. ÉTALONNAGE NO 1 DU MOULINET 600594

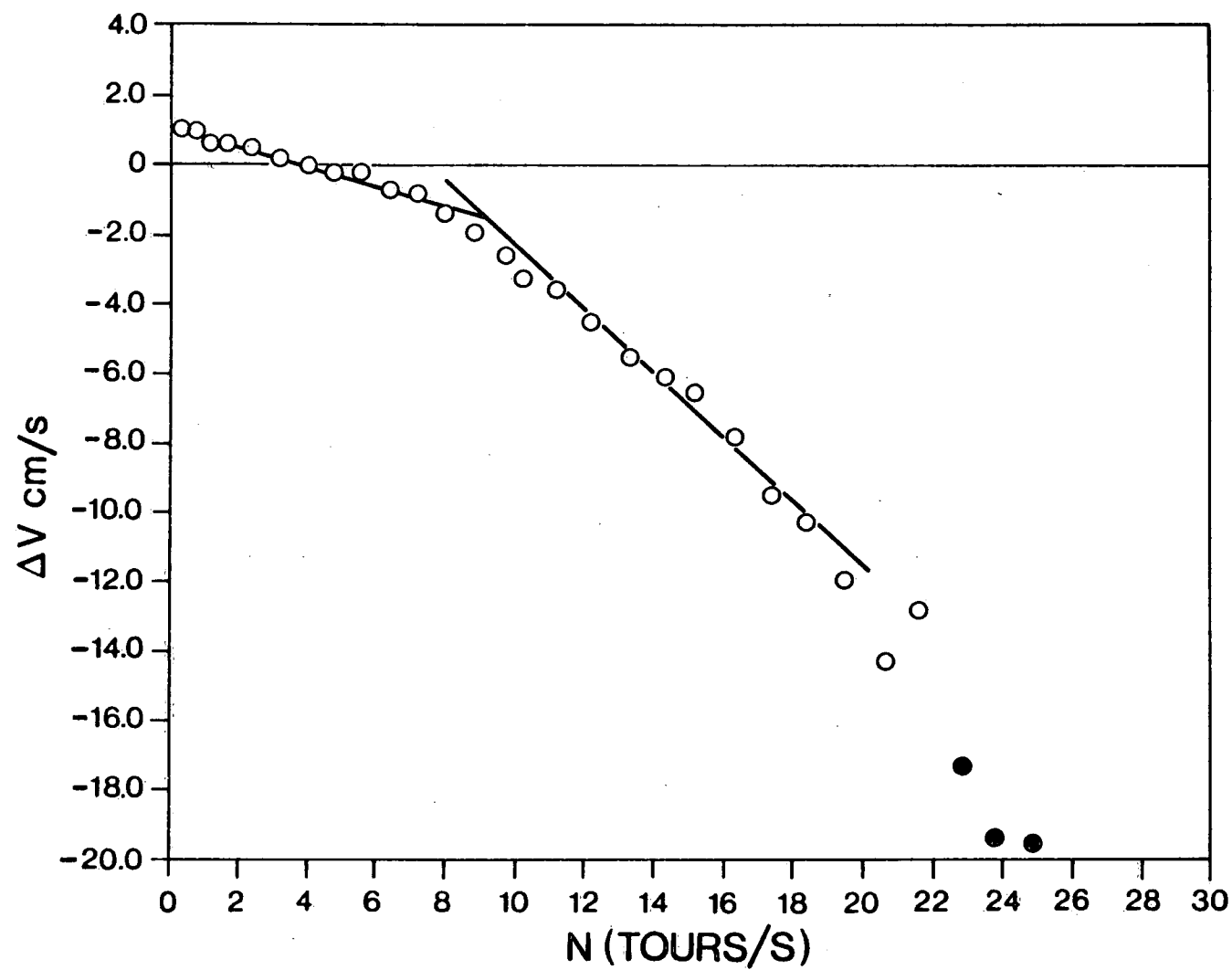


FIGURE 11. ÉTALONNAGE NO 2 DU MOULINET 600594

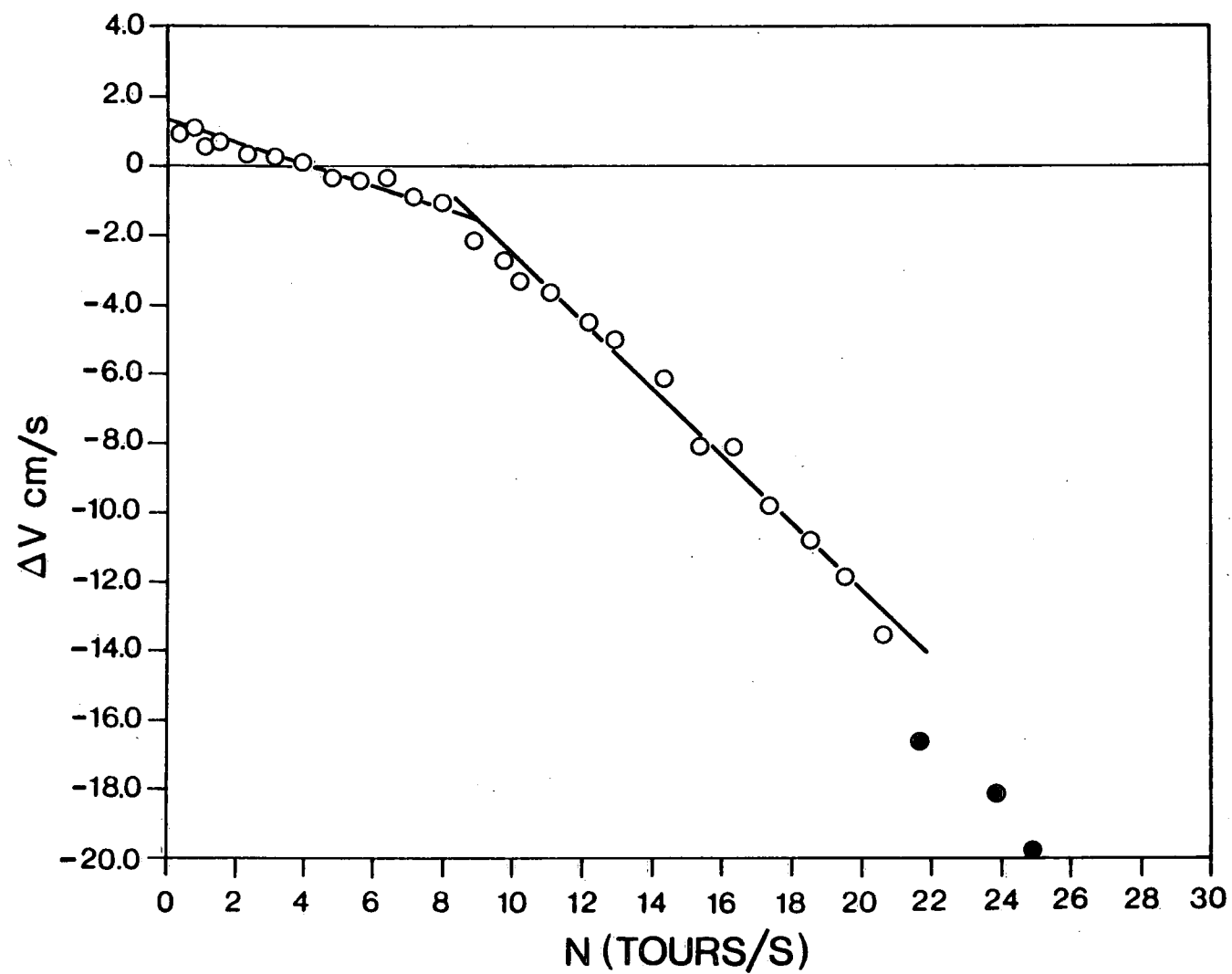


FIGURE 12. ÉTALONNAGE NO 3 DU MOULINET 600594

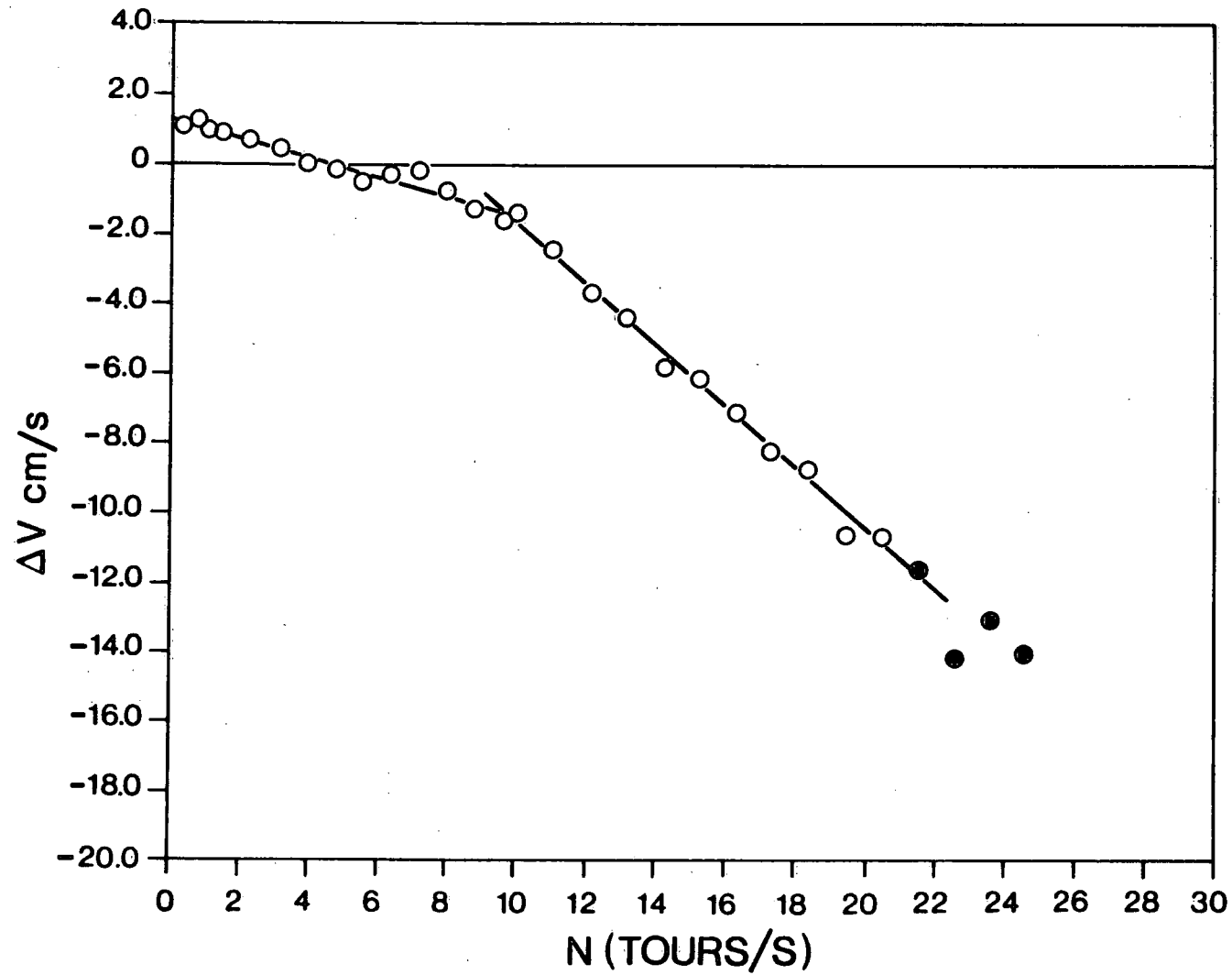


FIGURE 13. ÉTALONNAGE NO 4 DU MOULINET 600594

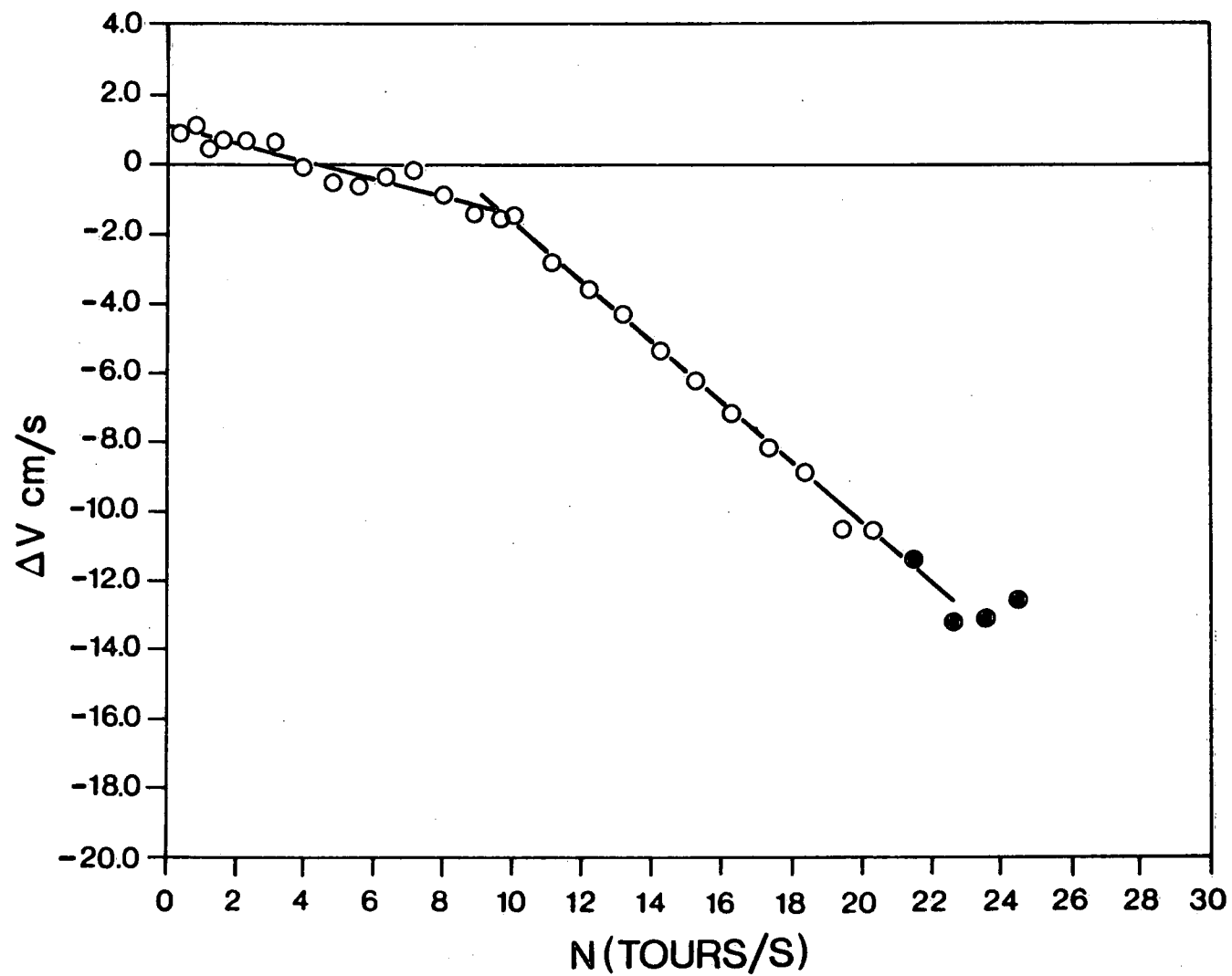


FIGURE 14. ÉTALONNAGE NO 5 DU MOULINET 600594

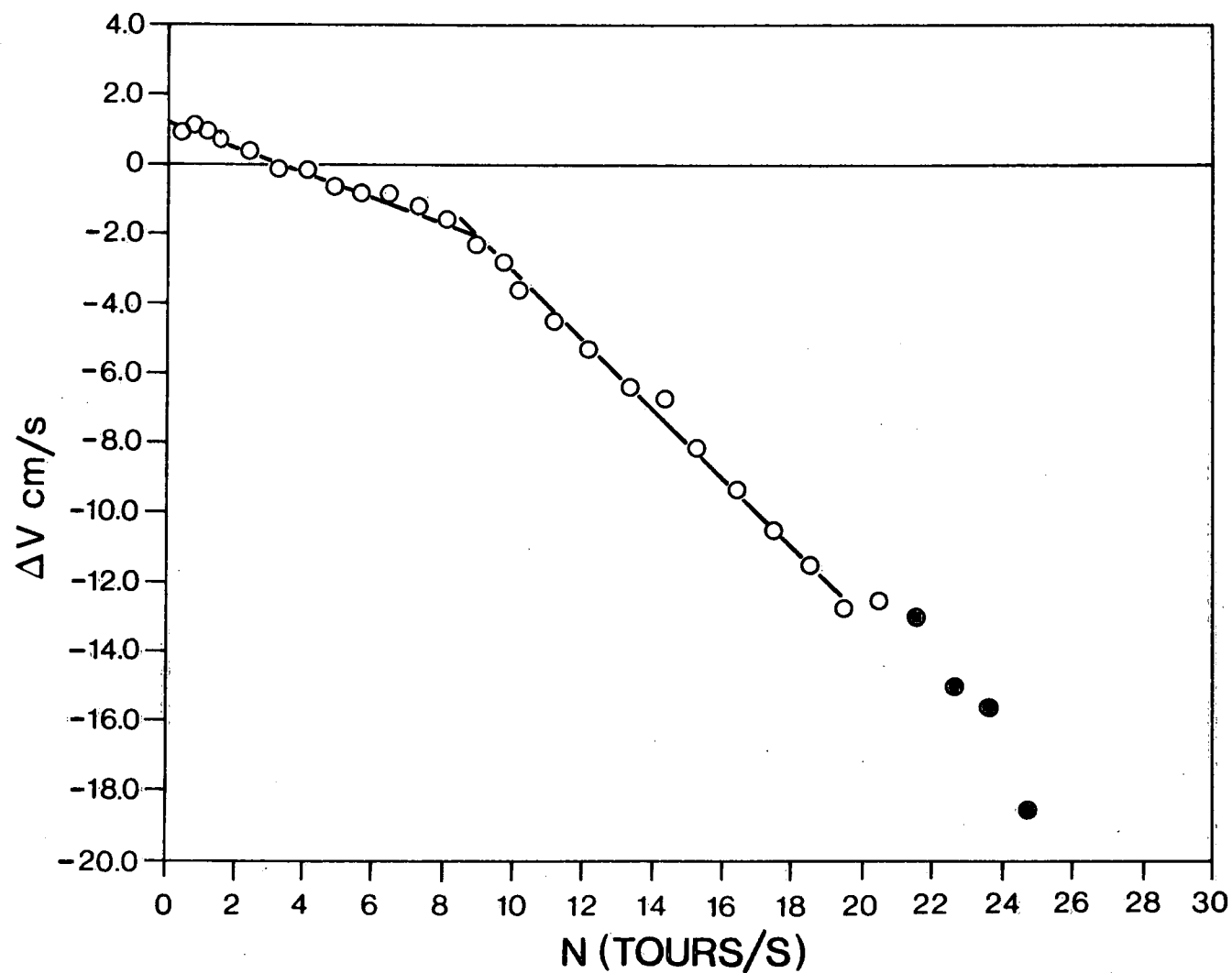


FIGURE 15. ÉTALONNAGE DU MOULINET 600594 FIXÉ À 2 CM DE L'EXTRÉMITÉ DE LA TIGE DE SUSPENSION

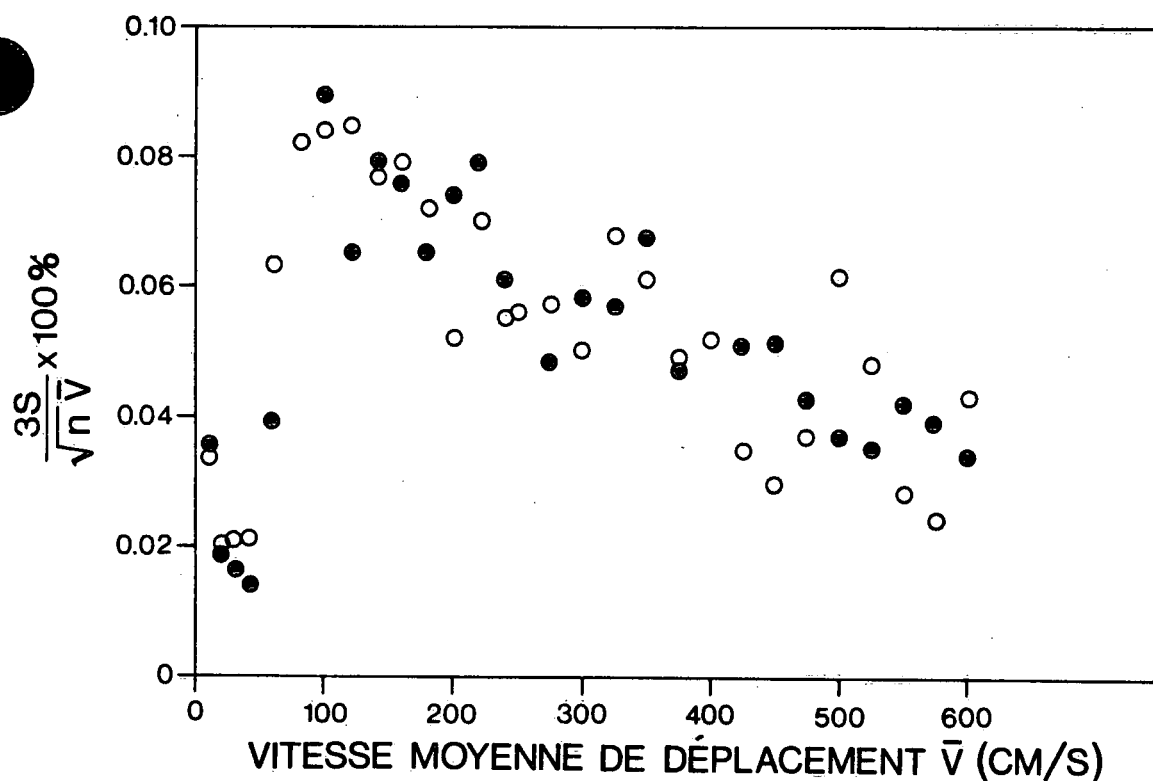


FIGURE 16. INCERTITUDE ASSOCIÉE À LA VITESSE MOYENNE DE DÉPLACEMENT À UN DEGRÉ DE CONFIANCE DE 99%

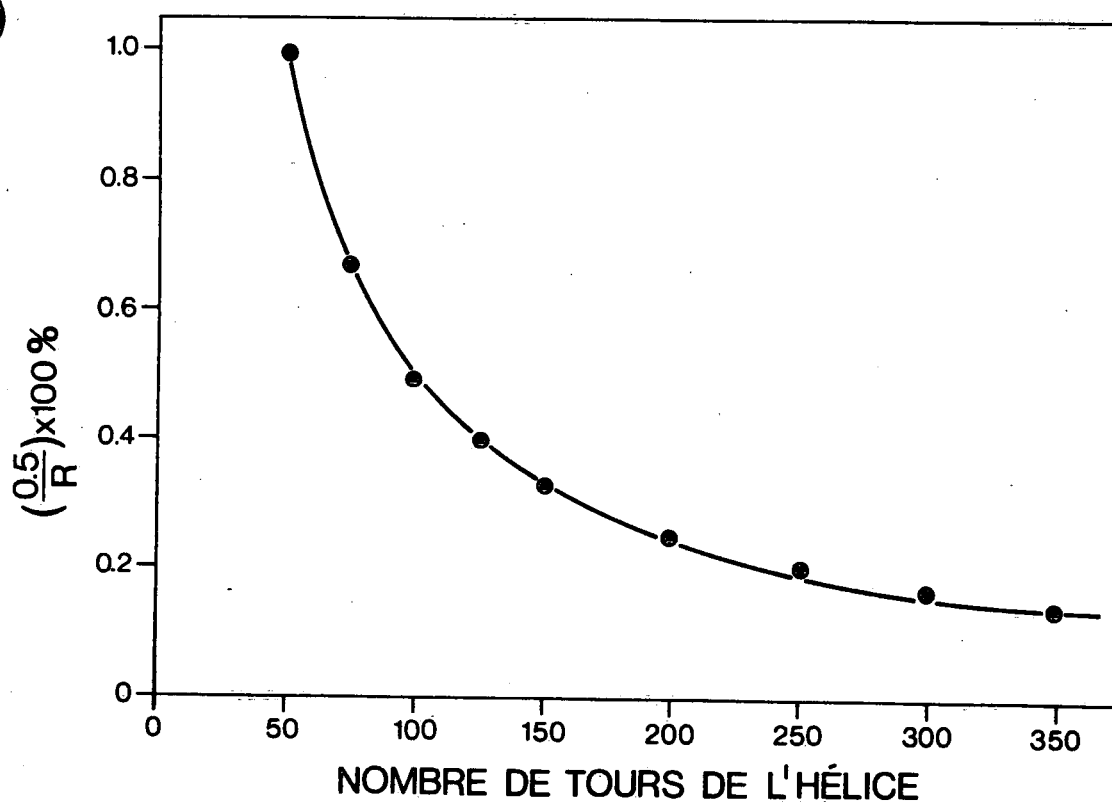


FIGURE 17. INCERTITUDE ASSOCIÉE AU COMPTAGE DU NOMBRE DE TOURS DE L'HÉLICE À UN DEGRÉ DE CONFIANCE DE 99%

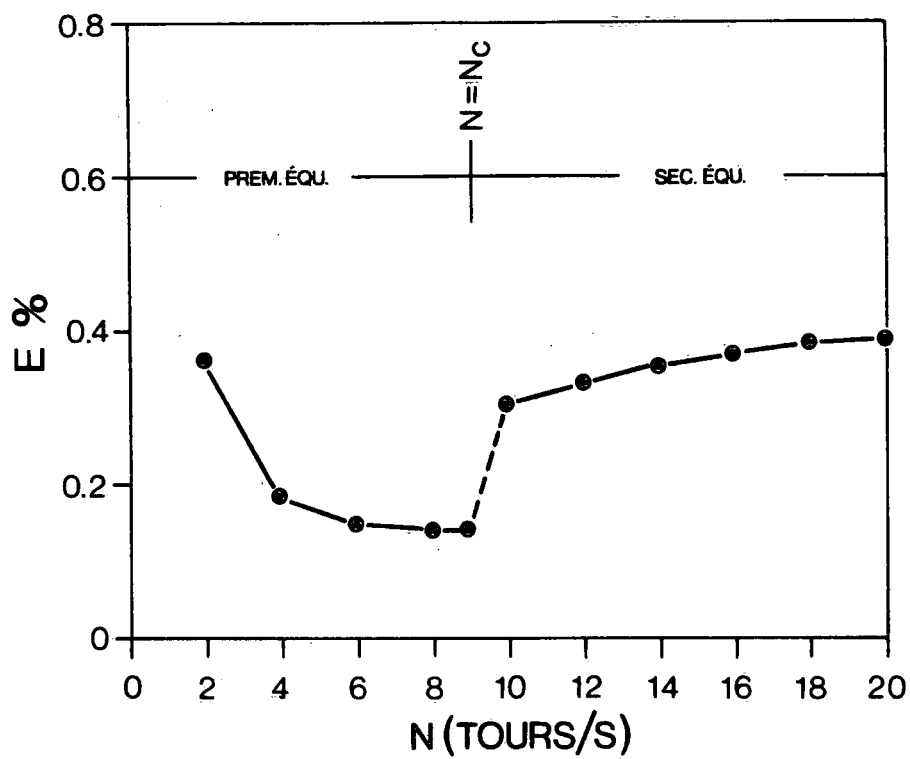
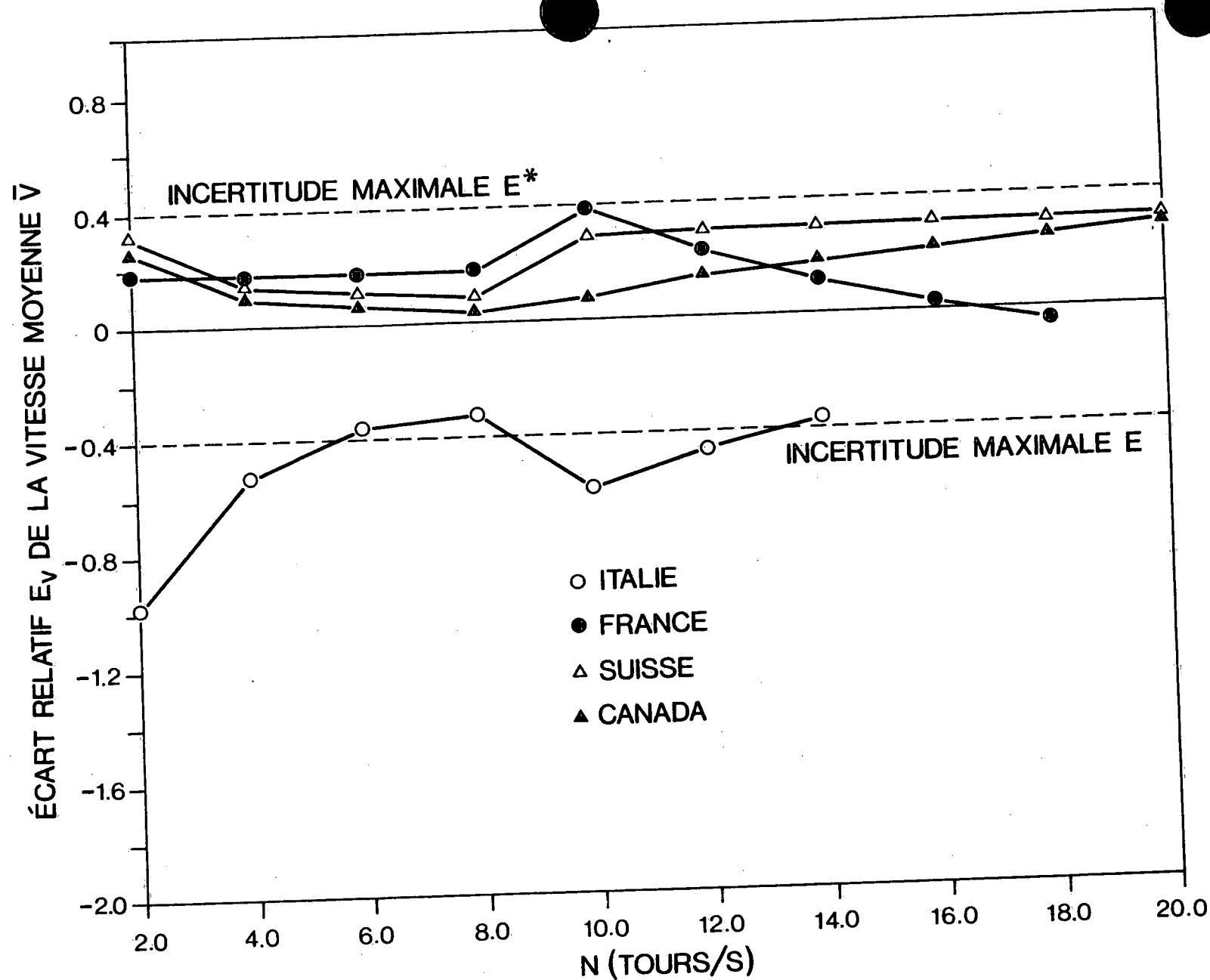


FIGURE 18. INCERTITUDE D'ÉTALONNAGE DU MOULINET
600594 À UN DEGRÉ DE CONFIANCE DE 99%



*E EST OBTENU DE 5 ÉTALONNAGES DU MOULINET 600594

FIGURE 19. COMPARAISON DE L'ÉTALONNAGE DU MOULINET 600594
DANS DIFFÉRENTS BASSINS DE CARÈNE

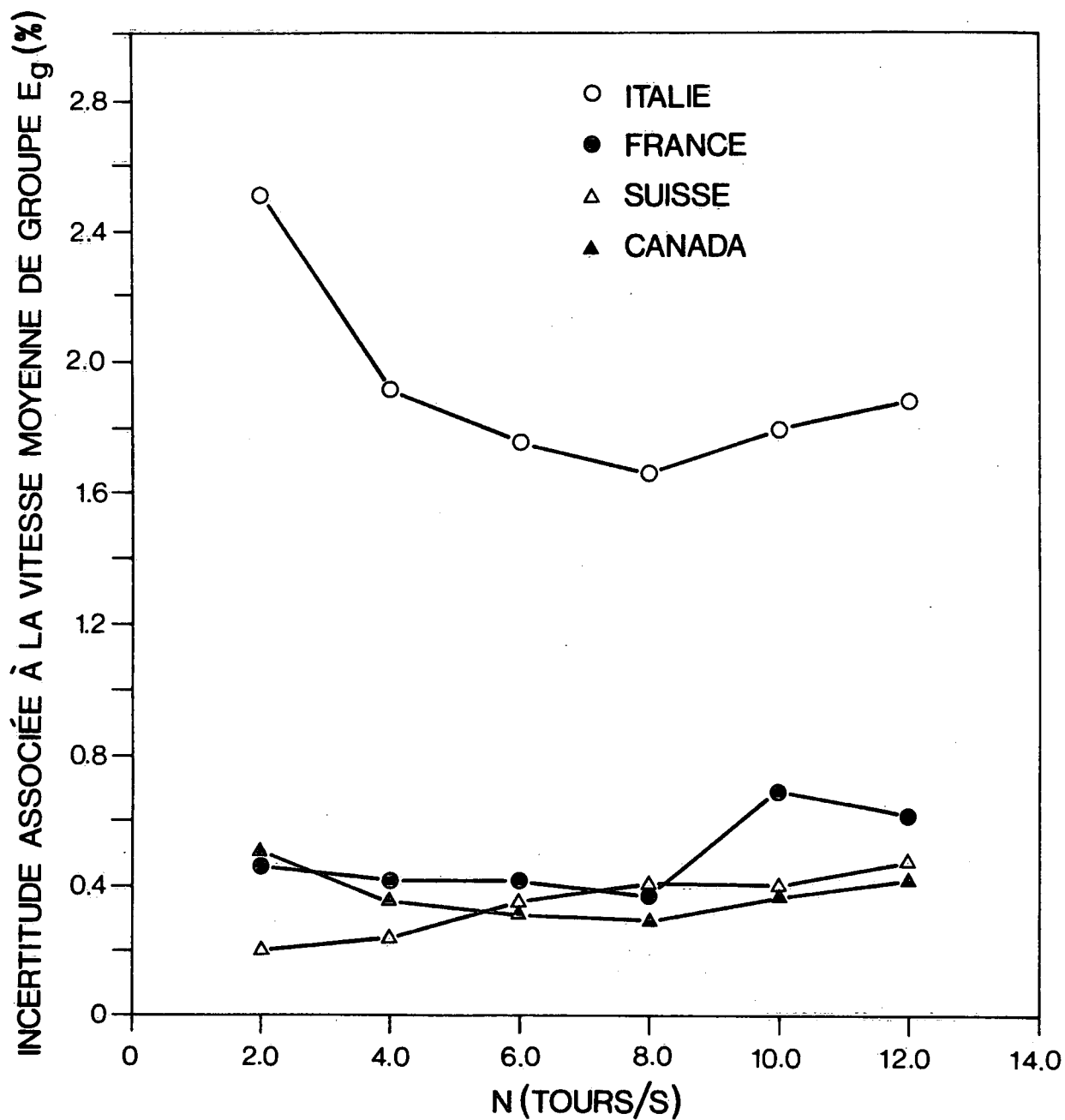


FIGURE 20. COMPARAISON DES INCERTITUDES ASSOCIÉES À DES ÉTALONNAGES DE GROUPE DE CINQ MOULINETS À UN DEGRÉ DE CONFIANCE DE 99 %

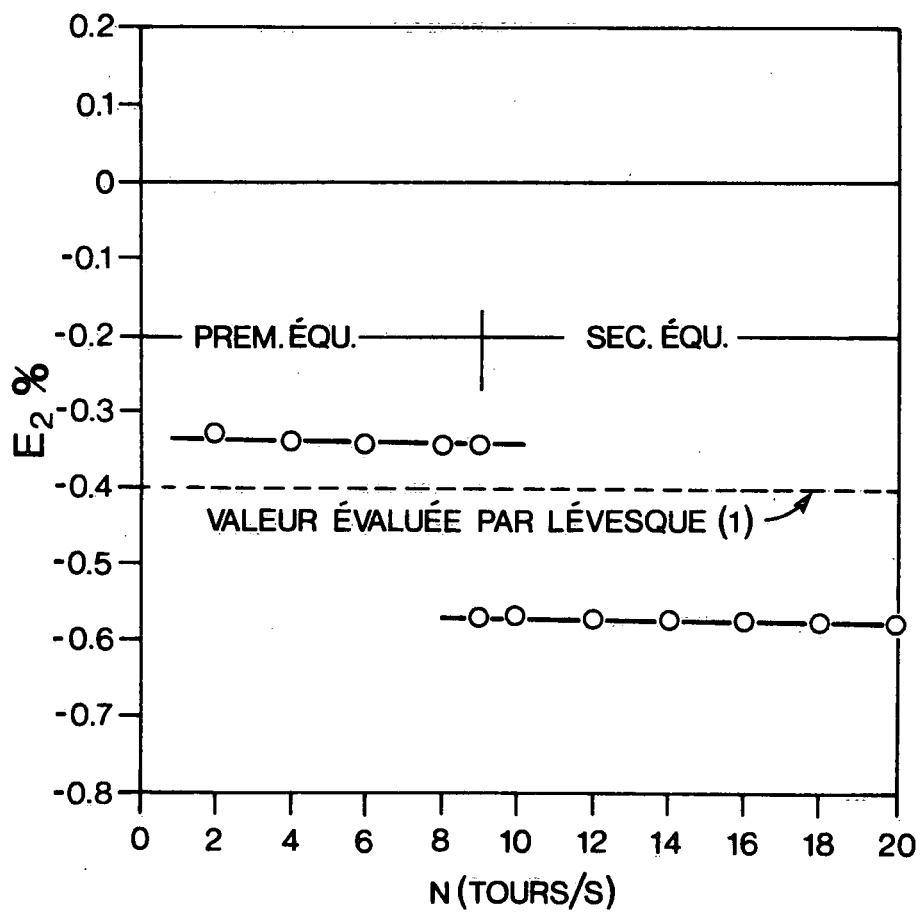


FIGURE 21. EFFET DE LA POSITION DU MOULINET SUR LA TIGE DE SUSPENSION

15740

ENVIRONMENT CANADA LIBRARY BURLINGTON



3 9055 1016 7459 5

IVORI - UNPUBLISHED

ENGEL, P (1982)

ENGEL

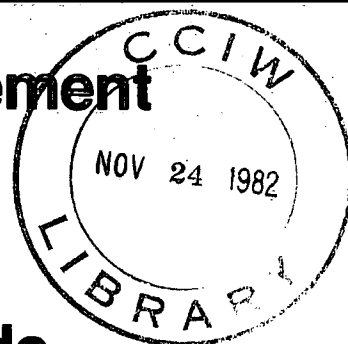


**Environment
Canada**

**Environnement
Canada**

**National
Water
Research
Institute**

**Institut
National de
Recherche sur les
Eaux**



**CHARACTERISTICS OF THE WSC
BASKET TYPE BED LOAD SAMPLER**

By

Peter Engel

TD
7
E54
1982b