

No. 155

ANEMOMETRIE REDONDANTE

- Problèmes de mesure
- Hélice Bertin
- Tests en soufflerie

par

Pierre Wasserfallen
Payerne

Juillet 1989

Mesure du vent

551.508.5

**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**



No. 155

ANEMOMETRIE REDONDANTE

- Problèmes de mesure
- Hélice Bertin
- Tests en soufflerie

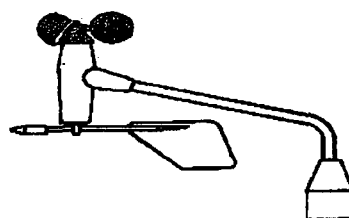
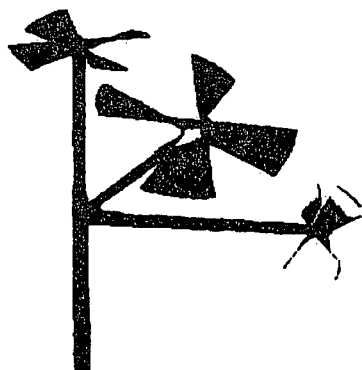
par

Pierre Wasserfallen
Payerne

Juillet 1989

Mesure du vent

551.508.5



Résumé

En métrologie, la redondance d'un système de mesure permet, d'une part, d'en augmenter par substitution la fiabilité opérationnelle et d'autre part, d'effectuer un contrôle très sélectif de la qualité et de la précision de mesure. En plus dans le cas de redondance diversifiée, les performances de mesure souvent complémentaires des deux types d'instruments peuvent se combiner judicieusement.

Le désavantage de la redondance est que les deux systèmes ne fournissent pas toujours les mêmes valeurs et que pour expliquer ces différences, des analyses approfondies sont souvent nécessaires.

Les résultats de mesure et de comparaison de 3 applications d'anémométrie redondante diversifiée sont traités pour investigations de deux types d'instruments: le capteur conventionnel moulinet + girouette et l'anémomètre tridimensionnel à hélices. Grâce aux méthodes sélectives offertes par le traitement informatique des données, certaines carences et imperfections instrumentales de mesure de la vitesse et de la direction du vent peuvent être mises en évidence.

Des tests en soufflerie sont parfois nécessaires pour déterminer certaines caractéristiques des capteurs. Là aussi apparaît la difficulté d'une mesure précise de la vitesse d'écoulement.

Zusammenfassung

In der Metrologie erlaubt es eine Doppelausrüstung, einerseits die Betriebssicherheit eines Messsystems durch Substitution zu erhöhen und andererseits eine sehr selektive Ueberprüfung der Messqualität und -genauigkeit zu erzielen. Falls zwei verschiedene Instrumententypen eingesetzt werden, können die sich oftmals ergänzenden Messleistungen der beiden Geber geschickt kombiniert werden.

Der "Nachteil" der Redundanz liegt darin, dass die beiden Messfühler nicht immer dieselben Messwerte liefern und dass deshalb, um die aufgetretenen Diskrepanzen zu erklären, häufig eingehende Analysen notwendig sind.

Anhand von drei mit einem doppelten Fühlersatz ausgeführten Messreihen wurden zwei verschiedene Fühlertypen näher untersucht: ein konventioneller Windmesser mit Schalenkreuz und Windfahne sowie ein mit Propellern ausgerüstetes Dreikomponentenanemometer. EDV-gestützte statistische Auswertemethoden lassen gewisse instrumentelle Mängel und Unzulänglichkeiten bei der Bestimmung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung sichtbar werden.

Windkanaluntersuchungen sind vielfach notwendig gewisse Messeigenschaften der Windmesser zu bestimmen. Auch dort stellt sich die Schwierigkeit der genauen Messung der Strömungsgeschwindigkeit.

Riassunto

Nella metrologia, la ridondanza di un sistema di misura permette, da una parte, di aumentare l'affidabilità operativa per sostituzione e dall'altra di effettuare un controllo molto selettivo della qualità e della precisione di misura. Nel caso di un impiego di due tipi diversi di strumenti, le prestazioni di misura dei sensori, spesso complementari, possono essere vantaggiosamente combinati.

Lo "svantaggio" della ridondanza risiede invece nel fatto che i due sensori di misura non sempre forniscono lo stesso valore e quindi, per spiegare queste discrepanze, sono spesso necessarie analisi approfondite.

In base a tre serie di misure eseguite con doppi sensori, sono stati analizzati in dettaglio due strumenti: un anemometro convenzionale con mulinello a coppe e banderuola e un anemometro a tre componenti dotato di eliche.

Grazie a metodi informatizzati di analisi statistica è stato possibile mettere in evidenza certe carenze e imperfezioni strumentali nella misura della velocità e direzione del vento. Ricerche nel canale a vento sono spesso necessarie per determinare certe caratteristiche dei sensori. Anche qui si è mostrata la difficoltà di una misura precisa della velocità di scorrimento della corrente.

Abstract

In metrology redundancy in measurement systems has two beneficial effects on the data to be measured. It increases, through substitution, the data availability and it improves, through cross-checks, the quality and precision of the data. If different instrument types are installed, their often complementary measuring performance will even enable further improvements.

The "disadvantage" of redundancy is that it usually leads to different values for the same property, the differences of which often need elaborate analyses.

In the following, data sets of three different double wind-measuring systems are studied, all configured with two instrument types, a conventional cup anemometer with wind vane and 3-axis propeller device. Detailed statistical analyses show the deficiencies and imperfections in measuring wind speed and direction of these devices.

Sometimes wind tunnel runs are necessary, in order to determine some instrument characteristics. But there readily re-appears the problem of the precise measurement of air flow speed.

Table des matières

1.Introduction.	5
2.Problématique.	7
3.Comparaison Hélice Bertin - moulinet MNF (PNR 14+).	9
3.1 1ère comparaison; tous les cas:	9
3.2 2ème comparaison; vitesses > 1 m/s:	10
3.3 3ème comparaison; vitesses > 1 m/s en fonction de la direction:	10
4.Comparaison Hélice Bertin - SCHASTA (COMVENT).	12
4.1 1ère comparaison; tous les cas:	13
4.2 2ème comparaison; vitesses > 1 m/s:	13
4.3 3ème comparaison; vitesses > 1 m/s en fonction de la direction:	14
4.4 4ème comparaison; régressions:	14
5.Comparaison Hélice Young - SCHASTA (Gösgen et Leibstadt).	15
5.1 1ère comparaison; tous les cas:	15
5.2 2ème comparaison; vitesses > 1 m/s:	16
5.3 3ème comparaison; vitesses > 1 m/s en fonction de la direction:	16
5.4 4ème comparaison; Leibstadt 10m; vitesse et direction	17
6.Tests en soufflerie.	19
6.1 Mesure de la vitesse d'écoulement.	19
6.2 Vérification du pas des 2 hélices Young, détermination du pas des 4 hélices Bertin.	20
6.3 Réponse azimutale de l'anémomètre ON - Bertin.	20
6.4 Vérification du pas du moulinet MNF.	21
6.5 Divergence entre soufflerie EPFZ-EPFL.	22
7.Conclusions, conséquences, recommandations.	23

Remerciements

Références

Adresse de l'auteur

Liste des abréviations

Figures

1. Introduction.

Dans le domaine des mesures météorologiques de l'environnement, la section météorologie de l'environnement (ENV) utilise et préconise depuis de nombreuses années l'anémomètre tridimensionnel à hélices pour la mesure du vent.

L'instrument est composé de 3 bras orthogonaux, équipés d'hélices à leur extrémité et orientés respectivement contre le Nord, l'Est et le Zénith.

Si les considérations d'ordre physique et technique de ce système de mesure sortent du cadre du présent exposé, rappelons cependant les principaux avantages de l'anémomètre en question:

- a) Mesure physiquement bien définie du vecteur du vent (y compris sa composante verticale) dans les échelles spatio-temporelles requises.
- b) Seuil de démarrage (env. 0,2 m/s) et bonne linéarité à relativement basse vitesse.
- c) Les valeurs de chaque composante sont facilement mesurées par comptage/décomptage d'impulsions (3 par tour d'hélice).
- d) La vitesse et la direction du vent sont calculées sur la base des mesures de mêmes capteurs (hélice) ayant les mêmes caractéristiques physiques (qualités et défauts).

Quant aux avantages physiques de l'hélice en tant que capteur et par rapport au moulinet, ils peuvent se résumer ainsi:

- e) Meilleure prise du vent soit meilleur pouvoir à suivre les fluctuations rapides du vent (moins d'inertie que le moulinet).
- f) Réponse quasi symétrique aux accélérations/décélérations du vent.

Voyons aussi maintenant les désavantages de l'anémomètre tridimensionnel à hélices qui peuvent se résumer comme suit, toujours par rapport à la combinaison moulinet/girouette:

- g) Plus vulnérable au givre et au verglas; malgré le chauffage des têtes de mesures, et pour les conditions du plateau suisse, les hélices peuvent être immobilisées (balourd) par le givre ou le verglas plusieurs fois par hiver; pour les mêmes conditions, la durée d'immobilisation est estimée à environ le double de celle des anémomètres conventionnels équipés d'un dispositif de chauffage. L'anémomètre à hélices ne convient donc pas pour la mesure du vent aux stations de montagnes.
- h) Prix: si pour les instruments ici en question, l'anémomètre tridimensionnel à hélice coûte environ le double du capteur conventionnel, le prix de la version à deux composantes horizontales est par contre du même ordre de grandeur.

Quant aux problèmes spécifiques à l'hélice BERTIN, qui font l'objet du présent travail, ils concernent son pas (distance par tour) ainsi que sa réponse angulaire.

Les résultats de mesures, comparaisons et tests commentés dans les prochains chapitres concernent les anémomètres suivants:

- Anémomètre tridimensionnel à hélices ONZ (Ost-Nord-Zenith) de la firme Météolabor AG à Wetzikon.
- Anémomètre à moulinet (sans girouette) WMS (WindMesser Schalenkreuz) de la firme Météolabor AG à Wetzikon.
- Anémomètre à moulinet et girouette SCHASTA (Schiltnknecht-ASTA*) de la firme E.Schiltnknecht Ing.SIA à Gossau (fig.1).

* ASTA: station automatique du réseau ANETZ (réseau suisse de stations météorologiques automatiques).

2. Problématique.

Pour augmenter la fiabilité d'une mesure importante, on peut avoir recours à une redondance de l'instrumentation.

Deux "philosophies" sont généralement appliquées:

- La redondance unifiée (2 mêmes capteurs et systèmes de mesure) qui permet d'augmenter la fiabilité de fonctionnement de l'installation et un certain contrôle par comparaison de la qualité des mesures.
- La redondance diversifiée (2 différents capteurs et principes de mesure) qui permet un contrôle plus sélectif des données ainsi que des performances de mesure, souvent complémentaires, des deux systèmes.

En Suisse, une dizaine de points de mesure du vent sont équipés d'anémomètres redondants diversifiés (hélice et moulinet / girouette).

Par exemple, les tests automatiques de plausibilité des mesures du vent aux centrales nucléaires de Gösgen et Leibstadt [1] sont basés sur la comparaison en temps réel des valeurs mesurées par le système ONZ (Hélice Young, 3 pales, pas 0,5m, fig.3) avec les valeurs mesurées par la combinaison moulinet + girouette de l'anémomètre SCHASTA (fig.1). Si, en général, la concordance est bonne entre ces deux systèmes (cf. exemples 110 m. fig. 10 et 11), on verra au § 5 que des différences importantes peuvent cependant apparaître dans certains cas.

Pour les 4 points de mesure équipés d'anémomètres ONZ avec hélices type Bertin (fig.2), soit les 3 stations du programme national de recherche "Dépérissement des forêts et pollution de l'air en Suisse" (PNR 14+) et le terrain d'essais ENV à Payerne (COMVENT), la divergence avec les capteurs redondants est telle (vitesses ONZ Bertin trop déficitaires (cf. § 3 et 4)), qu'une vérification du pas de ces hélices s'imposait; d'autant plus que les performances de mesure "Bertin" devraient être supérieures à celles des hélices Young (cf. caractéristiques techniques).

Le pas de 0,3 m indiqué par le fabricant Bertin a été mis en cause une première fois par M.Matthey [2] qui a mesuré, en soufflerie EPFZ, un pas de 0,342 m.

Ce coefficient a été adopté pour les 4 stations précitées, mais malgré cette plus-value de 14%, on constate que les comparaisons décrites aux chapitres 3 et 4 donnent toujours des valeurs trop déficitaires pour les hélices Bertin.

Lors de l'analyse des résultats qui suivent, il faut être conscient de la complexité des phénomènes en jeu et des limites des performances de mesure instrumentales.

En effet, d'un côté et pour le vent, les conditions locales sont très différentes en ce qui concerne les vitesses, la direction et la turbulence aux différents emplacements de mesure. De l'autre côté, les divers types d'anémomètres et principes de mesure réagissent différemment aux phénomènes en question. Entre deux, les conditions

d'environnement immédiat de mesure, où certains obstacles et les structures supportants les capteurs, peuvent influencer voire perturber les mesures.

Comme exemple de divergence entre les caractéristiques de mesure des anémomètres ONZ (hélice Young 4 pales, fig.4) et SCHASTA (moulinet), le tableau suivant indique, d'après J.Joss, le déficit [%] de mesure de la vitesse dans le domaine asymptotique situé entre le seuil de démarrage (V_d) et la partie linéaire de la réponse:

	V_d	Vitesse du vent [m/s]					
		0.5	1	2	5	10	20
Hélice	0.2 m/s	-33	-12	-3.6	-0.6	-0.2	0
Moulinet	0.5 m/s	--	-27	-7.0	-1.1	-0.3	-0.1

Pour cet exemple, on constate que le déficit de mesure du SCHASTA est environ le double de celui de l'anémomètre ONZ dans le domaine non-linéaire, et que l'erreur de mesure est encore conséquente pour des vitesses voisines des moyennes du plateau suisse.

Finalement on s'aperçoit que, d'une part pour les basses vitesses, les valeurs du moulinet sont plus déficitaires que celles de l'hélice, mais d'autre part pour la partie linéaire de réponse, les vitesses du moulinet sont normalement toujours supérieures aux vitesses de l'hélice pour les raisons suivantes qui agissent dans le même sens:

- La courbe de réponse azimutale des hélices présente un certain déficit pour les secteurs médians NE, SE, SW et NW (fig.14, 15 et 16).
- Dans un milieu turbulent, les fluctuations du vent (vitesse et direction) peuvent être importantes et rapides. L'inertie du moulinet, principalement à la décélération provoque dans ces situations des valeurs excédentaires.
- Même pour des temps courts d'échantillonnage (p.ex. 1 s), les hélices mesurent la vitesse résultante du vent, tandis que le moulinet mesure lui la vitesse scalaire.

Ce n'est qu'en soufflerie, dans un écoulement laminaire (c.à.d. stable et homogène) que l'on obtient les mêmes valeurs de vitesse pour le moulinet et pour l'hélice face à l'écoulement.

Mais en laboratoire, les conditions d'écoulement et de turbulence ainsi que la disposition des capteurs sont très différentes de celles des emplacements de mesure sur le terrain. C'est pourquoi les résultats des tests obtenus en soufflerie ne sont pas directement applicables à l'analyse des mesures in situ et des comparaisons y relatives.

3. Comparaison Hélice Bertin - moulinet MNF (PNR 14+).

Cette comparaison concerne les anémomètres redondants installés au niveau supérieur des mâts météorologiques des trois stations du PNR 14+ soit 1 anémomètre WMS équipé du moulinet MNF (Météorologie Nationale Française) et 1 anémomètre ONZ équipé de 3 hélices Bertin (fig.2).

La comparaison porte sur le paramètre vitesse (où le pas de l'hélice Bertin est en cause), plus précisément sur la vitesse horizontale scalaire moyenne.

Pour les deux anémomètres, le temps d'échantillonnage du système d'acquisition KLIMET est d'une seconde; la vitesse moyenne est calculée scalairement sur 10 min (intervalle de mesure).

Les coefficients KLIMET programmés correspondent aux pas mesurés expérimentalement en soufflerie EPFZ ([3], § 6) soit 0,635 m pour le moulinet MNF et 0,342 m pour l'hélice Bertin [2].

Les comparaisons sont basées sur les vitesses moyennes horaires (moyenne algébrique des 6 valeurs 10 min).

Les périodes de mesures considérées sont les suivantes:

- Lägeren-Zindelen: du 10 juillet 1985 au 30 novembre 1987 (29 mois)
- Alptal-Erlentobel: du 16 juillet 1986 au 30 novembre 1987 (17 mois)
- Davos-Seehornwald: du 25 octobre 1985 au 30 novembre 1987 (25 mois)

Les données de mesure ont été épurées selon les critères ENV en cours. Les valeurs ONZ (hélices Bertin) sont comparées aux valeurs WMS (moulinet MNF comme référence).

3.1 1ère comparaison; tous les cas:

Vitesse moyenne générale (tous les cas simultanés, sans condition).

	Lägeren	Alptal	Davos
ONZ	1,77 m/s	1,19 m/s	1,78 m/s
WMS	1,99 m/s	1,30 m/s	1,95 m/s
ONZ-WMS	-0,22 m/s	-0,11 m/s	-0,17 m/s
écart-type	0,31 m/s	0,24 m/s	0,24 m/s
% (WMS)	-11,1 %	-8,5 %	-8,7 %
nb.cas	20'625	11'786	18'099

Remarque: le sens des écarts est correct (vitesses WMS > vitesses ONZ) mais les différences moyennes sont trop importantes.

3.2 2ème comparaison; vitesses > 1 m/s:

Afin de réduire les écarts dus aux différents seuils de démarrage et de linéarité des capteurs, seules les vitesses > 1 m/s (moyennes horaires WMS) sont considérées.

	Lägeren	Alptal	Davos
ONZ	2,26 m/s	1,70 m/s	2,23 m/s
WMS	2,59 m/s	1,97 m/s	2,49 m/s
ONZ-WMS	-0,33 m/s	-0,27 m/s	-0,26 m/s
écart-type	0,29 m/s	0,23 m/s	0,23 m/s
% (WMS)	-12,7 %	-13,7 %	-10,4 %
nb.cas	14'377	6'023	12'985

Remarque: les valeurs excessives des différences s'uniformisent et se confirment.

3.3 3ème comparaison; vitesses > 1 m/s en fonction de la direction:

La fig.5 représente, pour les 3 stations, la différence de vitesse (% par rapport à WMS) entre les valeurs ONZ et WMS avec la même condition (vitesse WMS > 1 m/s) et en fonction de la direction du vent. Les écarts min. et max. s'y situent comme suit:

ONZ-WMS	Lägeren (°Az)	Alptal (°Az)	Davos (°Az)
diff. min	+7,4 % (260)	+9,4 % (30)	+6,8 % (80)
diff. max	+16,9 % (40)	+19,0 % (220)	+20,7 % (140)

Remarques:

- Pour la courbe Lägeren, on retrouve approximativement la réponse azimutale obtenue en soufflerie (fig.15 et 16) pour les secteurs N, NE, E, SW, W et NW.
- Pour la courbe Alptal, la concordance n'apparaît pas.
- Pour la courbe Davos, seul le vecteur SE correspond à l'erreur maximale de la réponse en soufflerie.

Commentaires:

- Comme démontré au § 6, les pas des deux capteurs vent (moulinet et hélice Bertin) des 3 stations "forêts" ont été malencontreusement mesurés avec un déficit d'environ 10 % dans la soufflerie EPFZ.
- Toutes les données de vitesse du vent du PNR 14+ seront corrigées dans les deux banques de données PSI et ENV par les coefficients suivants:

moulinet MNF: * 1,09
hélice Bertin: * 1,13

- La moyenne des différences de vitesse ONZ-WMS sera ainsi réduite d'environ 4 % mais comme expliqué au § 2, les valeurs ONZ resteront toujours inférieures aux valeurs WMS pour les raisons suivantes:

-La réponse azimutale des hélices Bertin accuse un certain déficit (plus de 10 %) dans les secteurs NE, SE, SW et NW (cf. § 6 et fig. 14, 15 et 16).

-Les trois points de mesure étant situés dans un milieu spécialement turbulent (quelques mètres au-dessus de la couronne des arbres), les fluctuations du vent (vitesse et direction) y sont particulièrement importantes et rapides. L'inertie du moulinet à la décélération prend vraisemblablement une certaine importance dans ces conditions (valeurs WMS excédentaires).

- D'autre part et comme le démontrent les résultats obtenus, la composante verticale du vent peut être particulièrement importante à ces trois stations de mesure (vent de pente, turbulence) et agit certainement différemment sur le moulinet que sur les hélices, ce qui doit aussi influencer les mesures. L'action de la composante verticale sur ces différents capteurs sera prochainement simulée en soufflerie.

4. Comparaison Hélices Bertin - SCHASTA (COMVENT).

Cette comparaison concerne deux des anémomètres redondants installés au niveau 10 m du mât de mesure de 30 m sur le terrain d'essais de la section ENV à Payerne (projet COMVENT) soit:

- 1 anémomètre SCHASTA type ANETZ-105 (moulinet + girouette fig.1).
- 1 anémomètre ONZ équipé de 3 hélices Bertin (fig.2).

La comparaison porte uniquement sur le paramètre vitesse (où le pas de l'hélice Bertin est en cause), plus précisément sur la vitesse horizontale scalaire moyenne.

Pour les deux anémomètres, les valeurs 10' (intervalle de mesure) sont obtenues en moyennant scalairement les mesures d'une seconde du système d'acquisition OS-9.

Les comparaisons sont basées sur les vitesses moyennes horaires (moyenne algébrique des 6 valeurs 10 min.).

Deux périodes de mesure sont considérées:

- Du 01 septembre 1988 au 30 novembre 1988 avec un pas programmé de 0,342 m (mesures Matthey EPFZ [2]) pour les hélices Bertin.
- Du 01 au 31 décembre 1988 avec le nouveau pas de 0,386 m (mesures EPFL-LASEN, § 6) pour les mêmes hélices Bertin.

Le pas programmé pour l'anémomètre SCHASTA reste lui inchangé soit 0,6 m pendant toutes les comparaisons.

Les données de mesure ont été épurées selon les critères ENV en cours. Les valeurs ONZ (hélices Bertin) sont comparées aux valeurs SCHASTA (moulinet comme référence).

4.1 1ère comparaison; tous les cas:

Vitesse moyenne générale (tous les cas simultanés, sans condition).

	Pas Bertin 0,342 m (01.09-30.11.1988)	Pas Bertin 0,386 m (01-31.12.1988)
ONZ	1,75 m/s	2,14 m/s
SCHASTA	2,11 m/s	2,27 m/s
ONZ-SCHASTA	-0,36 m/s	-0,13 m/s
écart-type	0,33 m/s	0,15 m/s
% (SCHASTA)	-17,0 %	-5,7 %
nb.cas	1'962	743

Remarque:

- L'écart moyen ONZ-SCHASTA est déjà réduit de -17,0 % à -5,7 %

4.2 2ème comparaison; vitesses > 1 m/s:

Afin de réduire les écarts dus aux différents seuils de démarrage et de linéarité des capteurs, seules les vitesses > 1 m/s (moyennes horaires SCHASTA) sont considérées:

	Pas Bertin 0,342 m (01.09-30.11.1988)	Pas Bertin 0,386 m (01-31.12.1988)
ONZ	2,18 m/s	2,65 m/s
SCHASTA	2,65 m/s	2,81 m/s
ONZ-SCHASTA	-0,47 m/s	-0,16 m/s
écart-type	0,33 m/s	0,16 m/s
% (SCHASTA)	-17,7 %	-5,7 %
nb.cas	1'412	553

Remarque:

- La réduction de l'écart moyen ONZ-SCHASTA due au changement de coefficient du pas de l'hélice BERTIN se confirme, soit de -17,7 % à -5,7 %.

4.3 3ème comparaison; vitesses > 1 m/s en fonction de la direction:

La fig.6 représente pour les deux pas Bertin (0,342 et 0,386m), la différence de vitesse (% par rapport à SCHASTA) entre les valeurs ONZ et SCHASTA en fonction de la direction du vent (SCHASTA) et avec la même condition (vitesse SCHASTA > 1 m/s).

Les écarts min. et max. s'y situent comme suit:

ONZ-SCHASTA	Pas Bertin 0,342 m (01.09-30.11.88) (°Az)	Pas Bertin 0,386 m (01-31.12.88) (°Az)
écart min.	-11,6 % (80)	-2,9 % (80)
écart max.	-23,3 % (40-50)	-12,2 % (40-50)

Remarques, commentaires:

- La réduction des différences apparaît nettement sur ce graphique.
- Avec le nouveau pas de 0,386 m, les résultats déjà obtenus en décembre 1988 sont concluants soit : des écarts et une réponse azimutale du secteur bise proche de celle obtenue en soufflerie (§ 6).
- Les vitesses SCHASTA restent cependant toujours supérieures aux vitesses ONZ, ce qui est normal (cf. § 2).

4.4 4ème comparaison; régressions:
(tous les cas simultanés, sans conditions)

La fig.7 illustre la droite de régression ONZ/SCHASTA des mesures 10 min. cette fois-ci et pour la période du 01.09 au 30.11.88 (pour un pas Bertin 0,342m).

La fig.8 représente la même régression mais pour la période du 01 au 31.12.88 (pour un pas Bertin 0,386m).

On y remarque clairement l'amélioration de la pente de 0,80 à 0,94.

5. Comparaison Hélice Young - SCHASTA (CN Gösgen et Leibstadt).

Cette comparaison concerne les anémomètres redondants installés aux niveaux 110 m. et 10 m. des mâts météorologiques des centrales nucléaires de Gösgen et de Leibstadt soit 1 anémomètre SCHASTA type ANETZ-105 (moulinet + girouette, fig.1) et 1 anémomètre ONZ équipé de 3 hélices Young (3 pales avec un pas de 0,5 m., fig.3).

Les deux anémomètres sont placés côte à côte, sur le même support orienté à peu près perpendiculairement aux directions prédominantes du vent et distants d'au moins deux côtés du mât tubulaire de section triangulaire. Dans ces conditions, et selon l'étude de G.C.Gill [4] l'influence du mât devrait être minime et se limiter qu'à un secteur de directions peu fréquentes. La comparaison porte uniquement sur le paramètre vitesse du vent. Le principe du système d'acquisition ASTA-ANETZ calcule, pour les deux anémomètres, le vecteur résultant vitesse et direction chaque 10 min. (intervalle de mesure).

Les coefficients de calcul ASTA correspondent aux pas indiqués par les fabricants soit 0,6 m pour le moulinet SCHASTA et 0,5 m pour l'hélice Young de l'anémomètre ONZ.

Les comparaisons sont basées sur les vitesses moyennes horaires (moyenne scalaire des 6 vitesses résultantes 10'). Les valeurs sont donc comparables, indépendamment bien entendu des différences de principes de mesure et d'acquisition des données ainsi que du comportement dynamique des capteurs (redondance diversifiée, cf. § 2).

Pour les deux stations de Gösgen et Leibstadt, la période considérée s'étend de septembre 1987 à février 1988 (6 mois). Les données de mesure ont été épurées selon les critères ENV en cours.

Les valeurs ONZ (hélices Young) sont comparées aux valeurs SCHASTA (moulinet comme référence).

5.1 1ère comparaison: tous les cas:

Vitesse moyenne générale (tous les cas simultanés, sans condition).

	Gösgen		Leibstadt	
	10 m	110 m	10 m	110 m
ONZ (Young 0,5m)	1,79 m/s	3,41 m/s	1,94 m/s	3,40 m/s
SCHASTA	1,80 m/s	3,48 m/s	1,85 m/s	3,44 m/s
ONZ-SCHASTA	-0,01 m/s	-0,07 m/s	+0,09 m/s	-0,04 m/s
écart-type	0,18 m/s	0,29 m/s	0,18 m/s	0,22 m/s
% (SCHASTA)	-0,6 %	-2,0 %	+4,9 %	-1,2 %
nb.cas	4289	4311	4289	4267

Remarque, commentaire:

En général, bonne concordance (voir aussi fig.10 et 11) et faibles différences des vitesses dans le bon sens (ONZ < SCHASTA) sauf pour Leibstadt 10 m (+4,9 %). Dans ce cas et pour ces basses vitesses, la meilleure sensibilité du ONZ devient prépondérante (cf.§ 2 et 5.4).

Comparé aux valeurs de Gösgen 10 m, une moins bonne sensibilité du moulinet SCHASTA peut être mise en cause à Leibstadt 10 m.

5.2 2ème comparaison; vitesses > 1 m/s:

Afin de réduire les écarts dus aux différents seuils de démarrage et de linéarité des capteurs, seules les vitesses > 1 m/s (moyennes horaires SCHASTA) sont considérées:

	Gösgen		Leibstadt	
	10 m	110 m	10 m	110 m
ONZ (Young 0,5m)	2,73 m/s	4,18 m/s	2,90 m/s	3,94 m/s
SCHASTA	2,81 m/s	4,28 m/s	2,90 m/s	4,00 m/s
ONZ-SCHASTA	-0,08 m/s	-0,10 m/s	0,00 m/s	-0,06 m/s
écart-type	0,19 m/s	0,31 m/s	0,16 m/s	0,23 m/s
% (SCHASTA)	-2,8 %	-2,3 %	0,0 %	-1,5 %
nb.cas	2434	3387	2446	3569

Remarque:

Les différences et leurs sens se confirment (ONZ < SCHASTA) sauf pour le cas LEIBSTADT 10 m (vitesse moyenne ONZ = SCHASTA, cf.§ 5.4).

5.3 3ème comparaison; vitesses > 1 m/s en fonction de la direction:

La fig.12 représente pour les deux stations Gösgen et Leibstadt ainsi que pour les deux niveaux de mesure 10 et 110 m/sol, la différence de vitesse (% par rapport à SCHASTA) entre les valeurs ONZ (hélices Young 0,5 m.) et SCHASTA en fonction de la direction du vent (SCHASTA) et avec la même condition (vitesse SCHASTA > 1 m/s).

Les écarts maxima s'y situent comme suit:

ONZ-SCHASTA	Gösgen		Leibstadt	
	10m(°Az)	110m(°Az)	10m(°Az)	110m(°Az)
diff.max - ONZ < SCHASTA	-10,2% (50)	-11,9% (50)	-7,0% (40)	-13,2% (120)
diff.max + ONZ > SCHASTA	+5,8% (250)	+5,5% (250)	+16,1% (360)	+5,7% (180)

Remarques et commentaires:

- Les réponses azimutales correspondent en partie à celles obtenues en soufflerie pour ce type d'anémomètre à hélices (cf. fig.15 et 16).
- Les différences positives (vitesses ONZ > SCHASTA) correspondent à des directions où la vitesse moyenne du vent est faible et où la meilleure sensibilité du ONZ prévaut sur celle du SCHASTA (cf. § 2 et 5.4).
- Les différences négatives (vitesses ONZ < SCHASTA) correspondent à des directions où la vitesse moyenne du vent est relativement élevée et où la réponse azimutale des hélices est déficitaire (secteur NE, SE, SW et NW; cf. § 2 et 5.4).

Concernant les différences de vitesse ONZ - SCHASTA et vu que le pas des hélices Young (0,5 m) a été vérifié avec précision (cf. § 6), le système SCHASTA pouvait aussi être mis en cause; mais cela ne semble pas devoir être le cas pour les raisons suivantes:

- Du côté capteur, la dernière comparaison ONZ Bertin 0,386m - SCHASTA (fig. 6 et 8, décembre 1988) donne des résultats concluants (vitesses ONZ < SCHASTA et réponse azimutale du secteur bise proche de celle obtenue en soufflerie, fig. 14 et 15).
- Du côté principe de mesure et d'acquisition, la comparaison SCHASTA OS-9 avec SCHASTA ASTA de Payerne donne une très bonne concordance (cf. droite de régression fig. 9).

5.4 4ème comparaison; Leibstadt 10 m; vitesse et direction:

L'analyse plus détaillée du cas Leibstadt 10 m, où les vitesses moyennes ONZ sont supérieures (4,9 %) à celles de SCHASTA, est illustrée par les fig. 12a, b et c qui représentent les différences et les vitesses correspondantes en fonction des directions pour toutes les vitesses (fig. 12a), pour les vitesses > 1 m/s (fig. 12b) et finalement pour les vitesses > 2 m/s (fig. 12c); ces conditions sur les vitesses devant démontrer les répercussions des différentes sensibilités des deux capteurs sur les résultats de mesure.

Comme deuxième condition et à l'instar des autres comparaisons, seules les moyennes portant sur plus de 5 valeurs horaires sont considérées.

Fig. 12a; tous les cas (toutes les vitesses):

Cette figure illustre parfaitement l'influence des différentes sensibilités des deux capteurs comparés.

En effet, pour les vitesses moyennes SCHASTA inférieures à 1 m/s, les écarts ONZ - SCHASTA sont très importants et les valeurs ONZ peuvent atteindre plus du double des vitesses SCHASTA (Az 360 et 180°). C'est aussi pour les axes N-S et E-W que les performances de mesure des hélices sont optimales (cf. fig. 14, 15 et 16).

Les fluctuations du secteur 120 à 190° Az sont particulièrement parlantes avec une "image reflétée" (Spiegelbild) exemplaire des différences ONZ - SCHASTA par rapport aux vitesses SCHASTA.

Comparés aux résultats de Gösigen 10 m (§ 5.1 - 5.3), la moins bonne sensibilité du moulinet SCHASTA de Leibstadt 10 m se confirme. Le capteur aurait dû être échangé et révisé.

Fig. 12b; vitesses > 1 m/s:

La courbe des différences ONZ - SCHASTA de cette figure est donc semblable à celle de Leibstadt 10 m de la fig. 12 mais complétée maintenant par la courbe des vitesses SCHASTA correspondante.

On y remarque d'emblée que la limitation inférieure des vitesses SCHASTA à 1 m/s réduit déjà notablement les écarts ONZ - SCHASTA dus aux différentes sensibilités et seuil de démarrage des capteurs.

L'image reflétée (Spiegelbild) entre les deux courbes restent apparentes mais le déficit de réponse azimutale des hélices est déjà plus marqué.

Avec cette condition (vitesse > 1 m/s) et pour cette période, la moyenne des vitesses ONZ est exactement la même que celle des vitesses SCHASTA soit 2,90 m/s (cf. § 5.2).

Fig. 12c; vitesse > 2 m/s:

Avec une limite inférieure des vitesses SCHASTA à 2 m/s, l'influence des différentes sensibilités des deux capteurs aux basses vitesses se trouve évidemment fortement réduite.

Par contre et comme on peut s'y attendre, le déficit de réponse azimutale des hélices se précise et la moyenne des vitesses ONZ (3,82 m/s) est maintenant inférieure de 1,3 % à celle de SCHASTA (3,93 m/s) ce qui est normal dans le domaine de réponse linéaire des deux capteurs (cf. § 2).

D'autre part, le nombre de cas portant sur plus de 5 valeurs horaires (2ème condition) diminue nettement (aucun cas pour le secteur W-N ainsi que pour les directions à faibles vitesses). Les seuls secteurs subsistants sont ceux du SW et de la bise avec des fréquences et des vitesses bien établies.

6. Tests en soufflerie.

Pour pouvoir répondre aux demandes de mesures du vent spécifiques à la section ENV, de nombreux développements et expérimentations ont été entrepris depuis 1968. Les tests de différents capteurs (hélices et moulinets) ont été effectués d'une part à Payerne (laboratoire et terrain d'essais) et d'autre part lors de 4 séries de mesures (1972 à 1977) dans la grande soufflerie de l'EPFZ.

Les derniers tests de l'hélice Bertin en question ont été organisés cette fois-ci dans la soufflerie à couche limite du Laboratoire de Système ENergétique (LASEN) de l'EPFL (fig.13). Cette soufflerie est spécialement conçue et équipée pour fournir un écoulement de qualité (stabilité et homogénéité) jusqu'à des vitesses inférieures voisines de 0,2 m/s. Les tests ont eu lieu le 28 novembre 1988 et comprenaient le programme suivant :

- Mesure de la vitesse d'écoulement; comparaison des valeurs des équipements du LASEN et de l'instrumentation de l'ENV.
- Vérification du pas des deux hélices YOUNG (0,5 m, 3 pales, fig.3 et 0,3 m, 4 pales, fig.4).
- Détermination du pas de l'hélice Bertin (fig.2) en question.
- Mesure de la réponse azimutale (diagramme polaire) d'un anémomètre ON équipé de 2 hélices Bertin.
- Vérification du pas du moulinet (petit modèle) de la Météorologie Nationale Française (MNF).

6.1 Mesure de la vitesse d'écoulement:

Le LASEN dispose de plusieurs possibilités: premièrement, de l'instrumentation classique généralement utilisée en soufflerie soit un micromanomètre équipé d'une sonde (tube de Pitot ou Prandtl) orientée face à l'écoulement. Comme ce principe de mesure est fonction du carré de la vitesse d'écoulement, sa précision devient problématique aux basses vitesses; en plus il faut calculer et introduire la valeur de la densité de l'air. Autres possibilités du LASEN: un anémomètre à fil chaud pour la mesure des basses vitesses et différents systèmes LASER sophistiqués pour certaines investigations particulières dans le domaine de la modélisation et simulation par maquettes.

De son côté, ENV disposait, comme équipement de mesure: de 3 bras ONZ (pouvant être équipés de différents types d'hélices) reliés à un système d'acquisition KLIMET + PC (Olivetti M21) et de deux anémomètres Schiltknecht (mini et thermo-air).

La meilleure concordance des résultats de mesures entre les équipements LASEN et ENV a été obtenue pour une vitesse de 3 m/s avec une précision de l'ordre du pourcent.

6.2 Vérification du pas des 2 hélices Young, détermination du pas des 4 hélices Bertin:

C'est donc pour cette valeur optimale de 3 m/s. que les pas ont été mesurés. En effet, cette vitesse est déjà située dans le domaine linéaire de réponse de l'anémomètre à hélice et elle correspond environ à la vitesse moyenne du vent mesurée à 110 m sur les mâts des centrales nucléaires.

D'autre part, aux plus hautes vitesses, la linéarité de réponse de l'hélice, en fonction de la vitesse d'écoulement, n'a plus besoin d'être démontrée; si bien qu'une seule vitesse de référence, mais précise, permet la mesure du pas effectif des hélices.

Pour ce test, les 3 bras de mesure ont été installés à l'intérieur du volume de référence de la soufflerie de façon à minimiser le plus possible le risque d'interactions perturbatrices entre capteurs et leurs fixations. En plus, les 3 hélices simultanément en test sont situées sur un même plan perpendiculaire et face à l'écoulement. Le temps d'échantillonnage est de 10 s, les moyennes sont établies sur plus de 10 mesures (les fluctuations sont infimes (< 0,5 %)).

Les résultats obtenus pour les 2 hélices Young sont les suivants:

- hélice Young 3 pales : pas indiqué = 0,5 m
(fig. 3) pas mesuré = 0,496 m (-0,8 %)
- hélice Young 4 pales : pas indiqué = 0,294 m
(fig.4) pas mesuré = 0,295 m (+0,3 %)

Cette excellente concordance confirme d'une part les valeurs des pas indiqués par Young, et d'autre part, la précision de la vitesse de référence et la qualité de l'écoulement. Dans les mêmes conditions, les résultats obtenus pour les 4 hélices Bertin sont les suivants:

- pas indiqué par Bertin = 0,3 m
 - pas obtenu par M.Matthey (soufflerie EPFZ) = 0,342 m (+14 %)
 - pas mesurés : hélice n°1 = 0,390 m
hélice n°2 = 0,381 m
hélice n°3 = 0,388 m
hélice n°4 = 0,386 m
-
- pas moyen mesuré = 0,386 m (+28,7 %)

Les différences de pas entre ces 4 hélices sont si faibles (± 1 % de la moyenne) qu'un calibrage individuel est superflu.

6.3 Réponse azimutale de l'anémomètre ON - Bertin:

Le diagramme polaire de la fig.14 a été établi de 10 en 10°Az, pour une vitesse de 5 m/s déjà adoptée lors de précédents tests en soufflerie EPFZ, et en tenant compte du nouveau pas expérimental mesuré de 0,386 m. On y remarque que les valeurs de vitesses

sont correctes aux 4 points cardinaux où la réponse des hélices est optimale. La distorsion des quadrants S-W-N provient de l'effet d'obstacle des supports de mesure (mât + bras) et des hélices mêmes, tandis que les vitesses sont nettement déficitaires (jusqu'à 16 %) dans les secteurs médians dont les directions NE-SW sont souvent prédominantes dans nos régions.

La raison de ce déficit incombe manifestement à une imperfection de la réponse angulaire des hélices. Ce défaut se compense dans le calcul de la direction où l'erreur de mesure reste inférieure à 4° Az.

La fig.15 représente, séparément, pour ce même test, les courbes d'erreur de vitesse et de direction en fonction de la direction du vent. Les secteurs d'erreur maximale de vitesse y ressortent clairement.

Pour illustrer ces différentes erreurs de mesure, prenons l'exemple où l'anémomètre dont le système d'acquisition est programmé selon le pas de 0,3 m donné par Bertin et qui indique un vent du sud-est (Az 130°) d'une vitesse de 10 m/s. Pour ce cas, le cumul des erreurs atteint un déficit de 53,4 % ce qui correspond à une vitesse réelle de 15,3 m/s soit plus de la moitié de la valeur mesurée.

6.4 Vérification du pas du moulinet MNF:

Un pas de 0,635 m avait été mesuré expérimentalement dans la soufflerie de l'EPFZ le 28 septembre 1972. Renseignement pris récemment auprès des services de la Météorologie Nationale, nous avons reçu un protocole de calibrage donnant un pas de 0,697 m.

La vérification en soufflerie LASEN donne un pas de 0,695 m pour l'un des moulinets et 0,694 m pour l'autre, ce qui correspond bien à la valeur française.

6.5 Divergence entre soufflerie EPFZ-EPFL:

Comparons maintenant les résultats de mesure du pas des deux capteurs (hélice Bertin et moulinet MNF) testés dans les deux souffleries:

	pas de l'hélice	pas du moulinet
EPFZ (28.09.72)	0,342 m	0,635 m
EPFL (28.11.88)	0,386 m	0,695 m
rapp.EPFL/EPFZ	1,13	1,09

On peut accorder plus de crédit aux mesures en soufflerie EPFL-LASEN pour les raisons suivantes:

- Les différentes méthodes et instrumentations LASEN-ENV pour la mesure de la vitesse d'écoulement concordent bien.
- Le pas du moulinet mesuré correspond à celui indiqué par les français.
- Dans un même écoulement, un pas d'hélice de 0,386 m est mesuré pour un pas de moulinet de 0,695 m.
- En plus, pour les deux hélices Young, les pas mesurés correspondent exactement à ceux indiqués par le fabricant.

7. Conclusions, conséquences, recommandations.

Au vu des résultats énoncés dans le présent travail, on peut en tirer les conclusions suivantes:

- 1) Les principales divergences de mesures entre anémomètres redondants diversifiés proviennent, d'une part des différences de caractéristiques et de principes de mesure des capteurs (§ 1 et 2), et d'autre part, des différentes particularités du vent et de sa turbulence inhérentes aux emplacements et conditions de mesure in situ (§ 3, 4 et 5).
- 2) Une mesure précise (de l'ordre du pourcent) de la vitesse d'écoulement de l'air s'avère difficile, même en soufflerie (§ 6.1).
- 3) Les pas de l'hélice Bertin et du moulinet (petit modèle) de la Météorologie Nationale Française ont été mesurés avec un déficit d'env. 10 % en soufflerie EPFZ (§ 6.5).
- 4) Comme le démontrent les mesures en soufflerie EPFL-LASEN, le pas de 0,3 m de l'hélice Bertin indiqué par le fabricant vaut en réalité 0,386 m (+28,7 %) (§ 6.2).
- 5) Le pas du moulinet MNF vaut effectivement 0,697 m (§ 6.4).
- 6) Pour le PNR 14+ (§ 3), les valeurs de vitesse du vent déjà disponibles seront corrigées dans les banques de données PSI et ENV (coef: Bertin * 1,13; MNF * 1,09). Dès le 01.01.89, les valeurs sont corrigées par le programme TIDOMES d'assimilation des données.
- 7) Pour le projet COMVENT (§ 4), le nouveau coefficient des hélices Bertin (0,386 m) a été introduit le 01.12.88 dans le système d'acquisition des données OS-9.
- 8) Une éventuelle correction azimutale des vitesses mesurées par les hélices Bertin sera analysée (§ 6).
- 9) Le pas de 0,5 m, indiqué par le fabricant des hélices Young utilisées aux centrales nucléaires de Gösgen et Leibstadt, est exact (§ 6.2).
- 10) Les prochains tests prévus en soufflerie EPFL-LASEN devraient comprendre entre autres:
 - La réponse azimutale d'un anémomètre ON équipé d'hélices Young, 3 pales, 0,5 m.
 - Une simulation de l'action de la composante verticale du vent sur les hélices Young et Bertin du plan horizontal, respectivement sur le moulinet MNF et SCHASTA.
 - Une vérification du pas du moulinet SCHASTA.

Remerciements à:

- LASEN, MM. J-A Hertig et J.Ehinger pour la mise à disposition de la soufflerie EPFL ainsi qu'à M.C.Alexandrou pour ses précieux conseils et sa contribution aux mesures du 28 nov. 1988.
- MM. A.Vernez et G.Celato (ISM/ENV) pour leurs participations aux tests en soufflerie et au traitement des données relatives à la présente étude.
- MM. J.Joss et Th.Gutermann pour leurs remarques pertinentes et leurs précieux conseils.

Traitement de texte et graphiques couleurs: A.Vernez

Références, bibliographie:

- [1] Plausibilitätsprüfungen für die während des Betriebs von Kernkraftwerken erforderten meteorologischen Messung. P.Viatte. Payerne. Juli 1980 - Octobre 1981.
- [2] Mesures partielles en soufflerie des caractéristiques de capteurs anémométriques équipés d'hélices en fibre de carbone. M.Matthey. Rapport provisoire. Mai 1979.
- [3] 4ème série de mesures en soufflerie EPFZ. P.Wasserfallen. Payerne. Rapport résumé. Octobre 1977.
- [4] Errors in Measurements of Wind Speed and Direction Made with Tower- or Stack-Mounted Instruments G.C.Gill. June 1966.

Adresse de l'auteur:

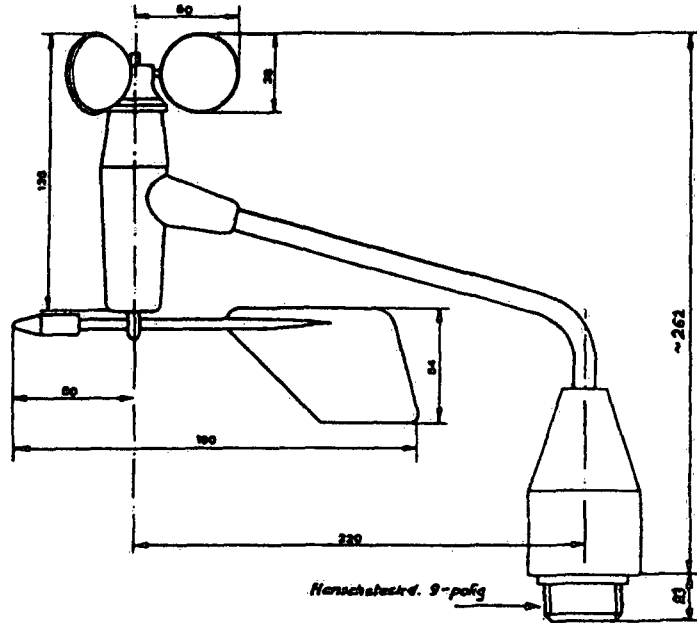
Pierre Wasserfallen
Institut suisse de météorologie
Section météorologie de l'environnement

1530 Payerne

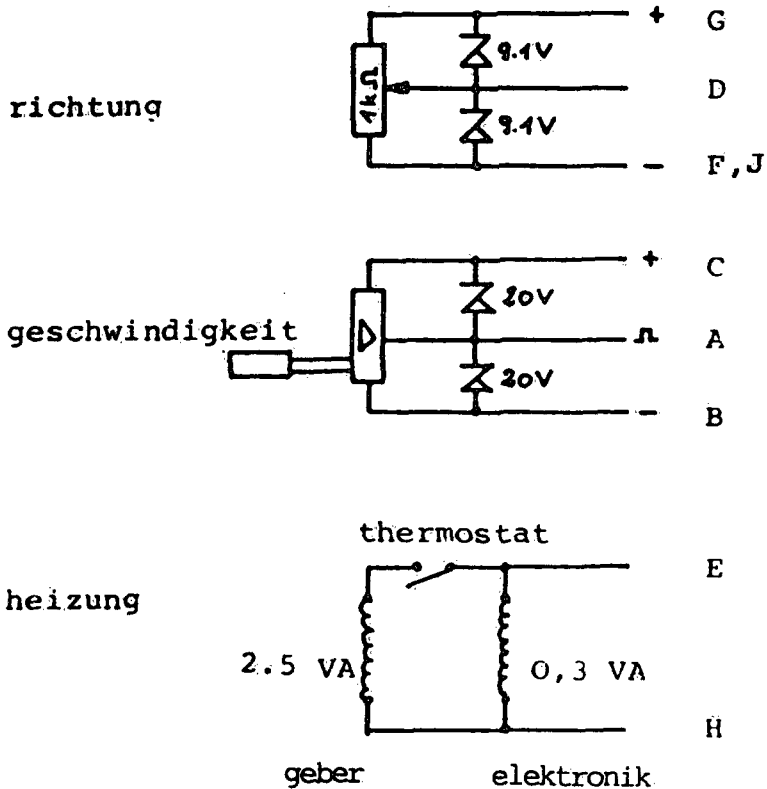
Liste des abréviations:

- ANETZ: Automatisches NETZ; réseau suisse de stations météorologiques automatiques.
- ASTA: Automatische STATION; station automatique du réseau ANETZ.
- COMVENT: COMparaison VENT; projet de comparaison d'anémomètres de la section météorologie de l'environnement sur son terrain d'essais.
- ENV: Section de météorologie de l'ENVironnement.
- MNF: Météorologie Nationale Française.
- ON: Ost-Nord; anémomètre à hélices à deux composantes horizontales de la firme Meteolabor AG, Wetzikon.
- ONZ: Ost-Nord-Zenith; anémomètre tridimensionnel à hélices de la firme Meteolabor AG, Wetzikon.
- PNR 14+: Programme National de Recherche "Dépérissement des forêts et pollution de l'air en Suisse".
- SCHASTA: SCHiltknecht-ASTA; anémomètre à moulinet et girouette de la firme E.Schiltknecht Ing. SIA à Gossau.
- TIDOMES: Traitement Intégré des DONnées MÉtéorologiques Spéciales de la section ENV.
- WMS: WindMesser Schalenkreuz; anémomètre à moulinet (sans girouette) de la firme Meteolabor AG à Wetzikon.

Anémomètre SCHASTA - ANETZ



anschlussschema 655-660/105





HELICE ANEMOMETRIQUE EN FIBRE DE CARBONE
RESINE EPOXY



CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES

Nombre de pales : 4
 Diamètre : 220 mm
 Epaisseur : 33 mm
 Epaisseur de la pale : 0,5 mm
 Alésage : 6,35 mm
 Poids : 22 à 25 gr
 Pas : 0,3 m/tour

CRITERE DE CHOIX DU MATERIAU

Maximum de raideur pour une masse donnée.
 Facilité de moulage pour forme répétitives.
 Bonne tenue aux agents atmosphériques.

RESULTATS DES ESSAIS EN SOUFFLERIE

Essais effectués à l'Institut Polytechnique de Lausanne par M. le Professeur RAVUSSIN.

- Pas de variations de vitesse pouvant provenir d'une déformation de l'hélice.
- La vitesse en soufflerie mesurée par l'anémomètre équipé de cette hélice reste dans le domaine d'erreur de la mesure de la vitesse de la soufflerie.

MODELE

Deux modèles se distinguent par un choix différent de résine et de traitement thermique de polymérisation.

- Hélice "froide" pour fonctionnement jusqu'à 80° C.
- Hélice "chaude" pour fonctionnement jusqu'à 120° C.

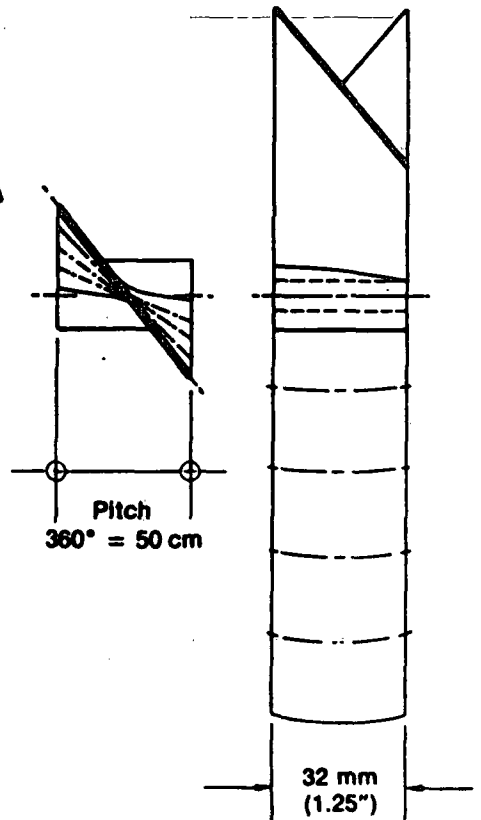
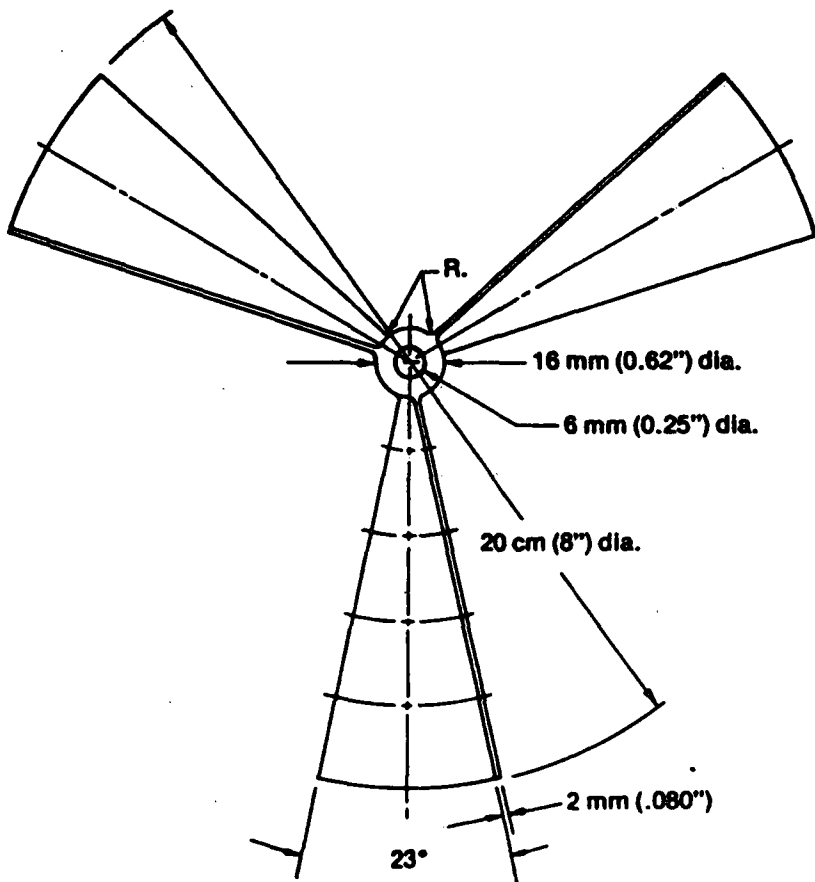
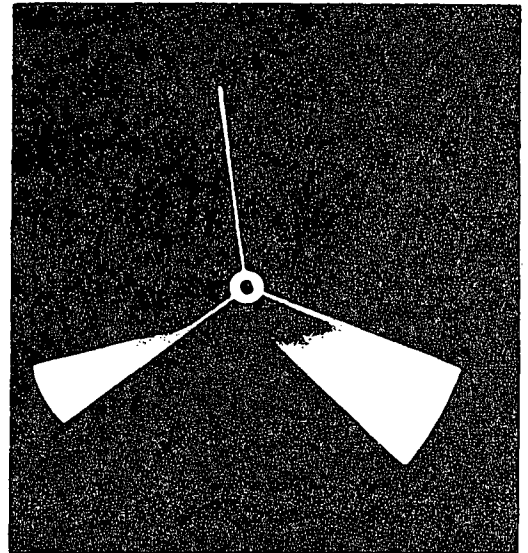


EXTENDED RANGE PROPELLER

The Extended Range Propeller is injection molded of ABS thermoplastic, a lightweight yet durable material which is very stable in the outdoor environment. The propeller is molded in the form of a helicoid to provide one revolution for each 50 centimeters of wind passage. This propeller has three blades and measures 20 cm diameter x 50 cm pitch. The working range extends above 54 m/s (120 mph). Threshold is below 0.4 m/s (0.9 mph) when used on a tachometer generator type sensor. Distance constant (63% recovery from step change in wind speed) is approximately 2.4 meters (8 feet).

This propeller has excellent linearity throughout the working range. For more rugged applications it may be used in place of the Maximum Response Propeller for measurement of axial flow (see note). While the propeller follows the cosine law quite closely for flow as much as $\pm 50^\circ$ off axial it begins to deviate rather markedly at larger angles of attack. Therefore it is not particularly suited for use on vertically mounted Propeller Anemometers or the UVW Anemometer except for very general purpose type measurements.

Note: Because of the difference in pitch the turning rate of the Extended Range Propeller is lower than the Maximum Response Propeller by the ratio of 30:50. Recalibration is necessary when propellers are changed.



ORDERING INFORMATION

PROPELLER - 20 cm dia. x 50 cm pitch 3 blade (ABS thermoplastic). Threshold below 0.4 m/s (0.9 mph); maximum speed above 54 m/s (120 mph) CAT. NO. 8253



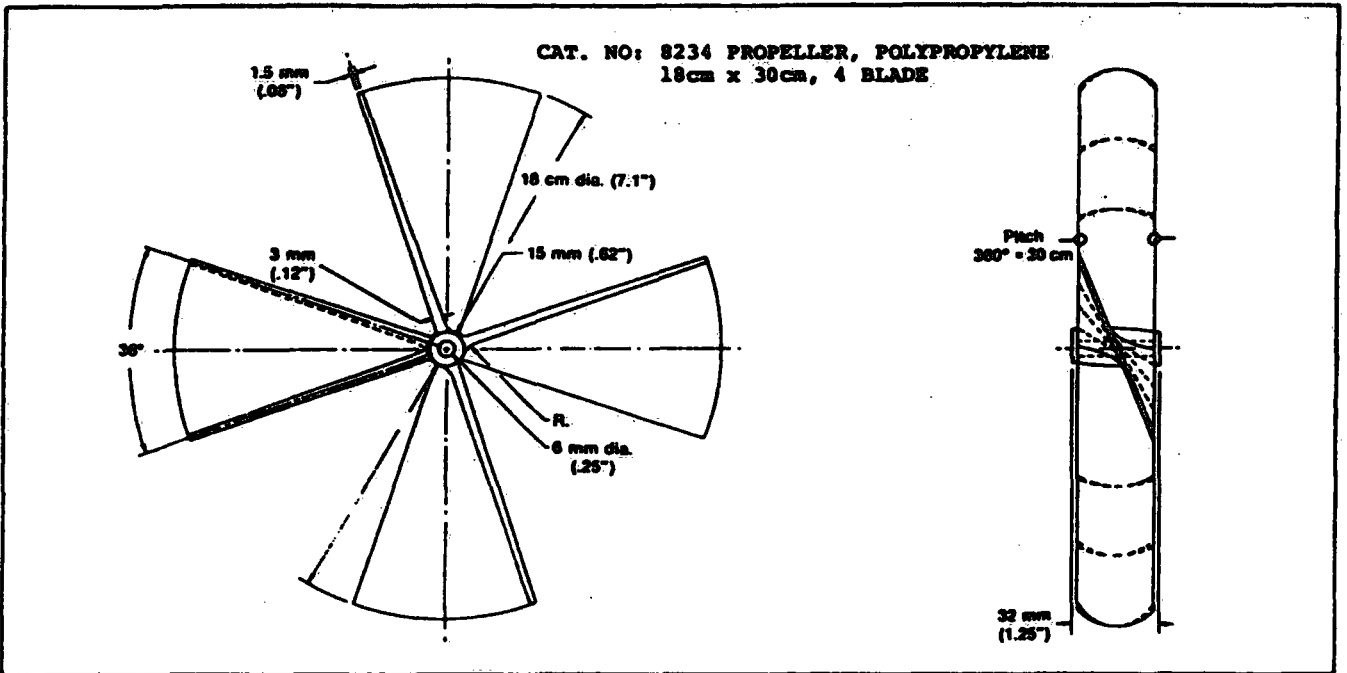
HIGH RESOLUTION PROPELLER

These injection molded thermoplastic propellers are intended for direct substitution for the polystyrene 4 blade propellers for applications requiring greater physical strength as well as an extended working range. They may be used in place of the sensitive polystyrene 4 blade propellers without significant change in calibration. Cosine response is also similar.

The helicoid shape 18cm diameter x 30cm pitch propeller is a one piece molding of polypropylene plastic with a specific gravity of 0.9, resulting in a total weight of 31gm (1.1 oz). Distance constant is 3.3m (10.5 ft). (Distance

constant is the wind passage required for 630 recovery from a step change in wind speed.) Polypropylene is a very flexible and durable material making this propeller highly resistant to failure from high winds as well as icing and hail damage.

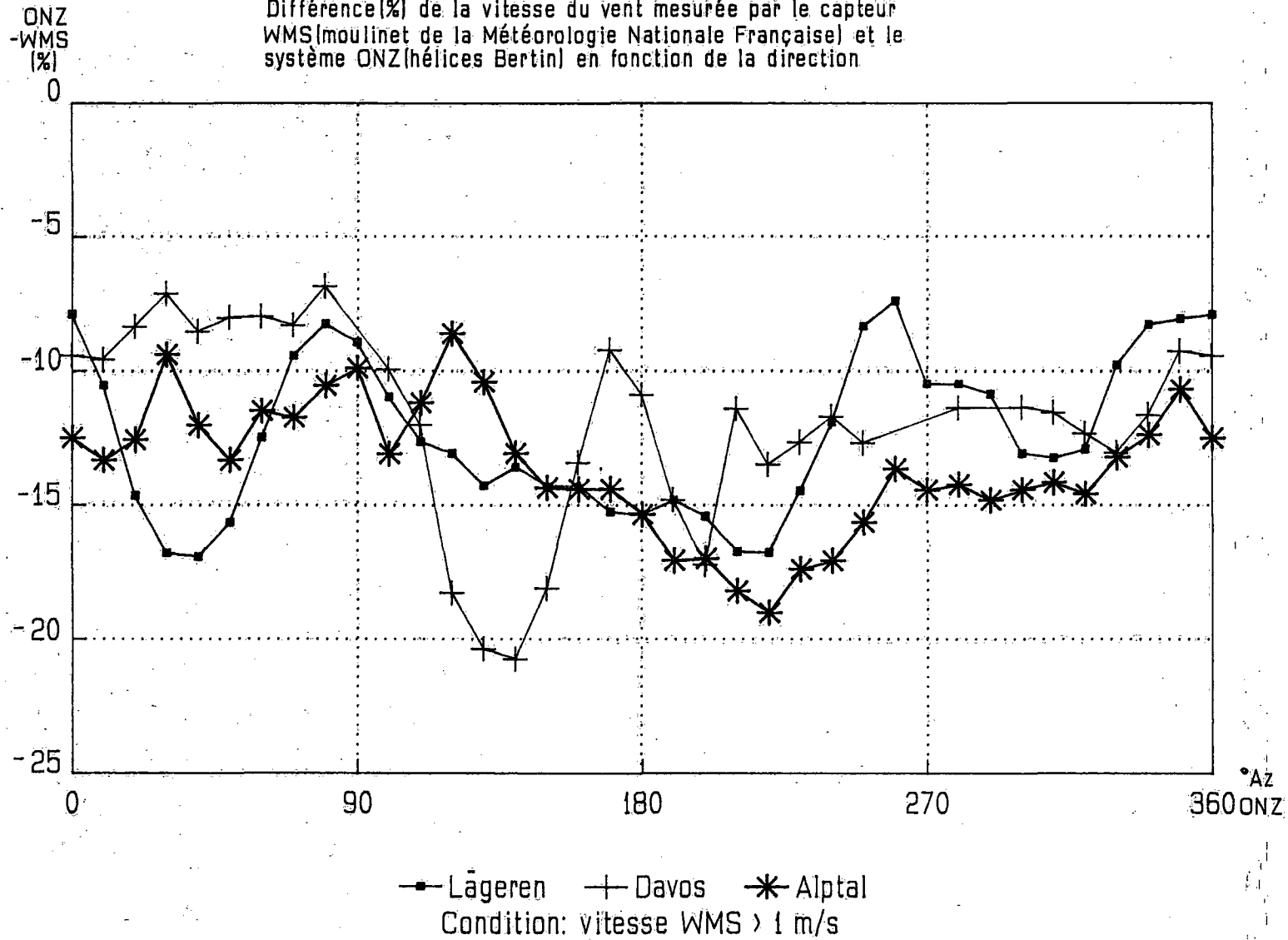
Working range is 0-50m/s (112mph). Threshold is 0.2-0.4m/s (0.5-0.9mph). Threshold is measured with the propeller mounted on a standard sensor with precision instrument grade ball bearings and driving a miniature tachometer generator.



SPECIFICATIONS:		CALIBRATION POINTS:	
RANGE - AXIAL FLOW:	50 m/s (112 mph)	HORIZONTAL - 3600 rpm	17.6 m/s (39.5 mph)
RANGE - ALL ANGLE:	50 m/s (112 mph)	3000 rpm	14.7 m/s (32.9 mph)
THRESHOLD:	0.2 - 0.4 m/s (0.5 - 0.9 mph)	1800 rpm	8.8 m/s (19.7 mph)
DISTANCE CONSTANT:	3.3m (10.5 ft.)	1500 rpm	7.4 m/s (16.4 mph)
EFFECTIVE PITCH:	29.4cm (0.96 ft.)	300 rpm	1.5 m/s (3.4 mph)
WORKING TEMPERATURE:	120°C (248°F)	250 rpm	1.2 m/s (2.7 mph)
MATERIAL:	POLYPROPYLENE (SPECIFIC GRAVITY 0.9)	VERTICAL - 1800 rpm	11.0 m/s (24.6 mph)
		1500 rpm	9.3 m/s (20.8 mph)
		300 rpm	1.8 m/s (4.0 mph)
		250 rpm	1.5 m/s (3.4 mph)

ISM/ENV/PNR 14+/Anémométrie

Différence (%) de la vitesse du vent mesurée par le capteur WMS (moulinet de la Météorologie Nationale Française) et le système ONZ (hélices Bertin) en fonction de la direction

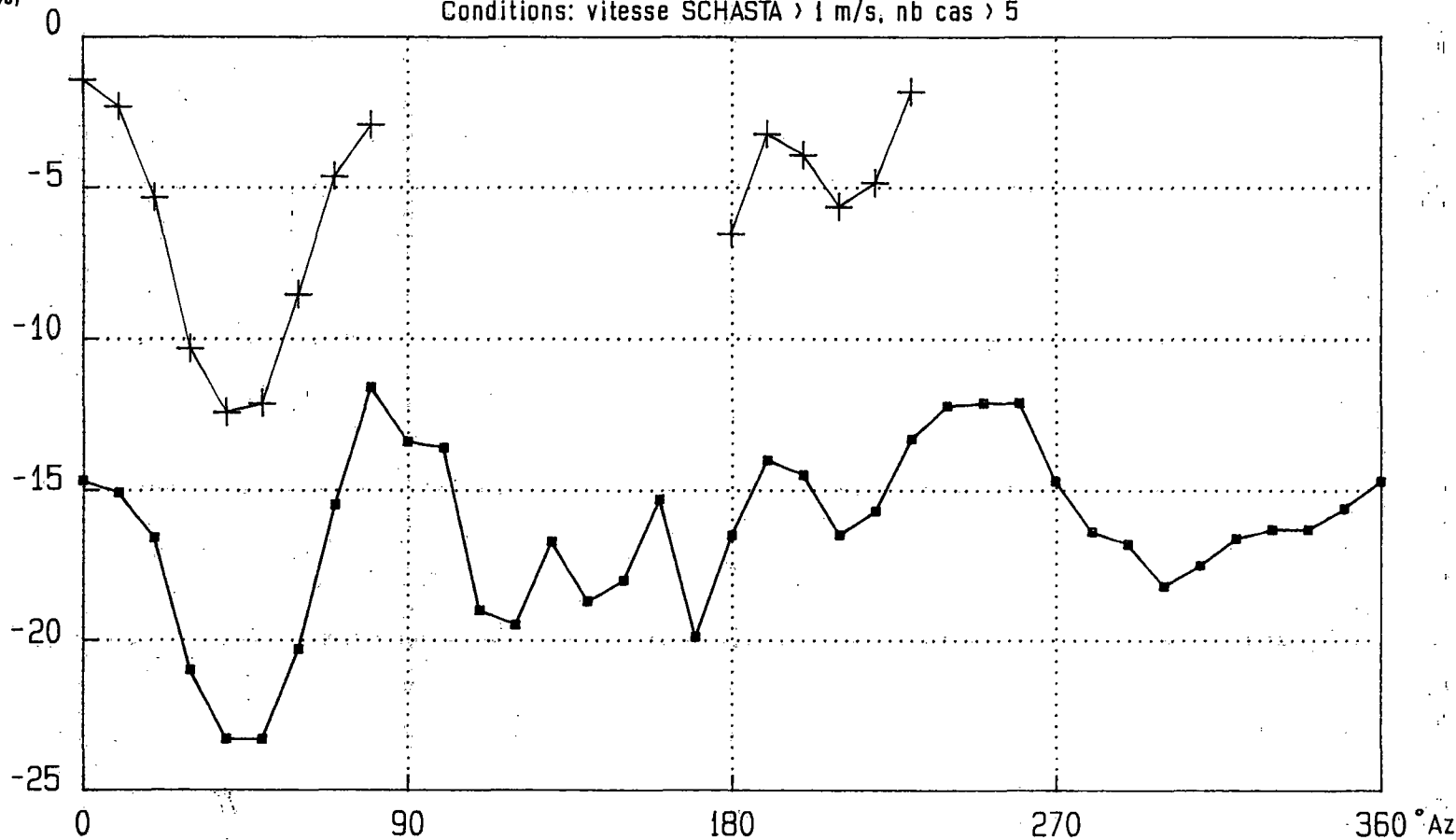


ISM/ENV/COMVENT/OS-9

Différence (%) de la vitesse du vent mesurée par le capteur SCHASTA et le système ONZ (hélice Bertin) en fonction de la direction du vent.

Conditions: vitesse SCHASTA > 1 m/s, nb cas > 5

ONZ (Bertin)
- SCHASTA
(%)



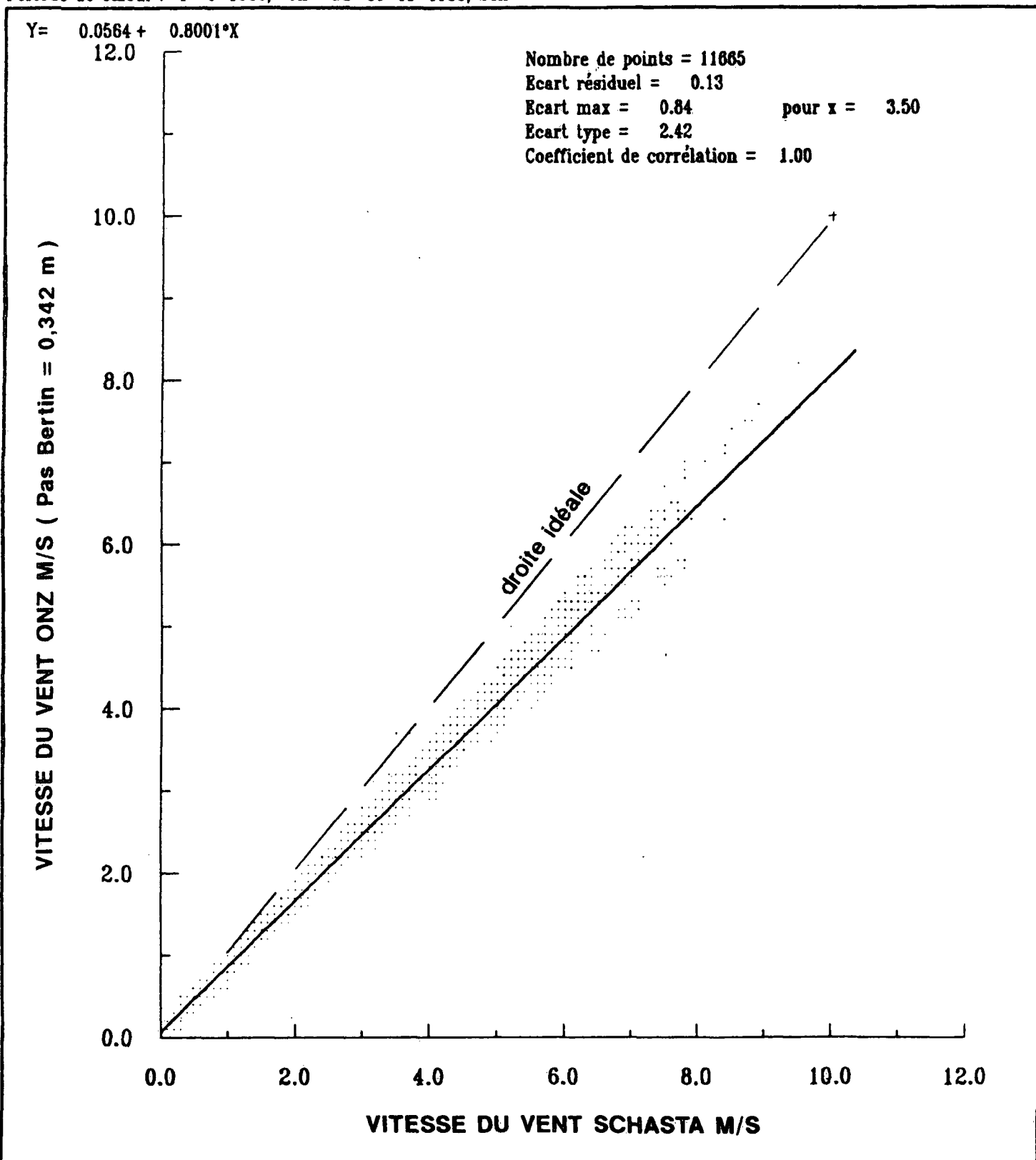
■ hélice Bertin 0,342m + hélice Bertin 0,386m
Période : sept. - nov. 1988 Période : décembre 1988

Droite de régression

AXE X: VITESSE DU VENT SPA-PAYERNE 30 FF CHAS10 1207 1002 6291 10.00M/Sol 562120/184720 486M/Mer

AXE Y: VITESSE DU VENT SPA-PAYERNE 10 FF ONZ 10 1207 1000 6291 10.00M/Sol 562120/184720 486M/Mer

Période de calcul : 1- 9-1988, 0H au 30-11-1988, 24H

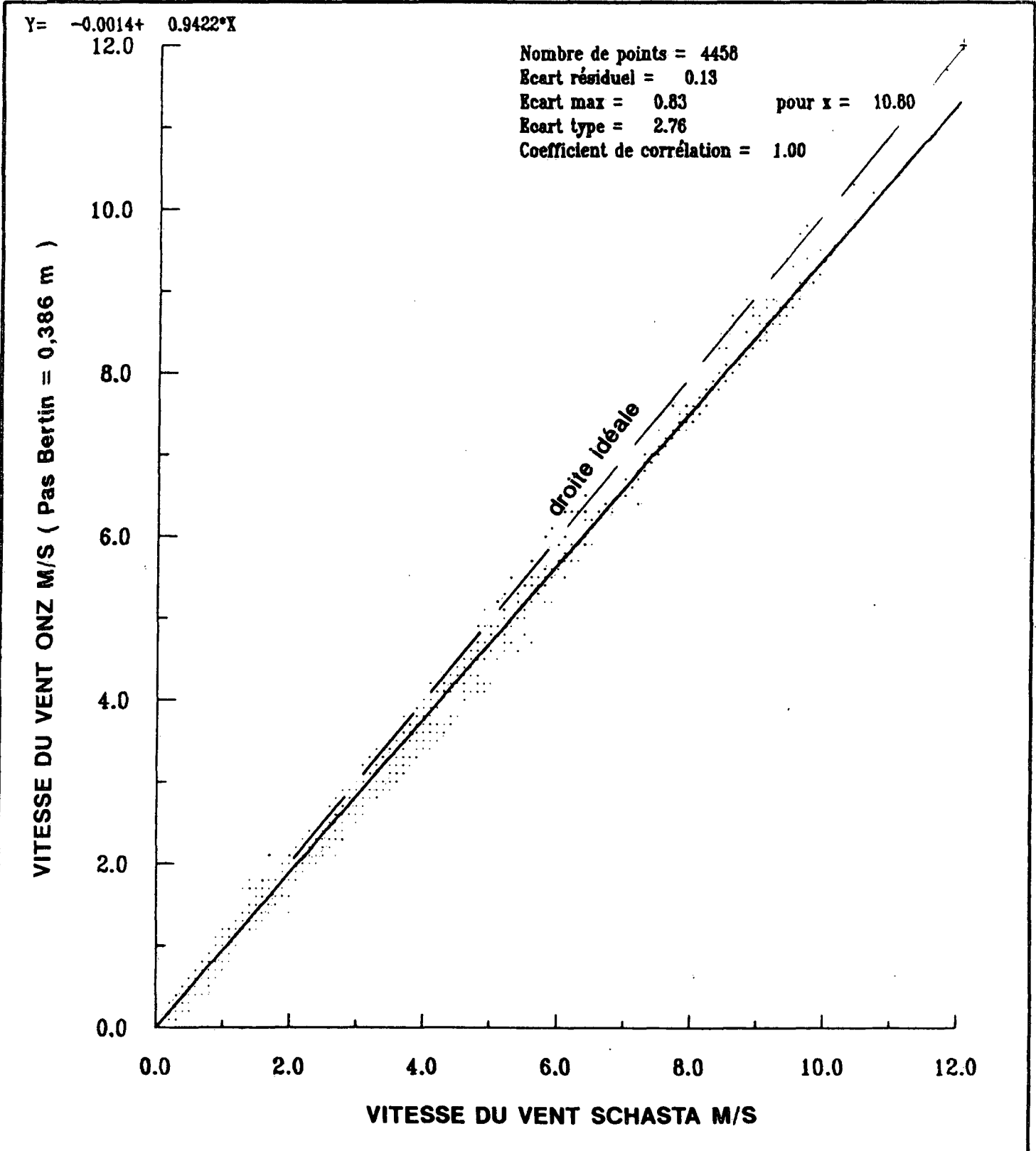


Droite de régression

AXE X: VITESSE DU VENT SPA-PAYERNE 30 FF CHAS10 1207 1002 6291 10.00M/Sol 562120/184720 486M/Mer

AXE Y: VITESSE DU VENT SPA-PAYERNE 10 FF ONZ 10 1207 1000 6291 10.00M/Sol 562120/184720 486M/Mer

Période de calcul : 1-12-1988, 0H au 31-12-1988, 24H



Droite de régression

AXE X: VITESSE DU VENT SPA-PAYERNE 31 FR CHAS10 1202 2 6291 10.00M/Sol 562120/184720 486M/Mer

AXE Y: VITESSE DU VENT PAYERNE HS270-FFR 1282 10306 6202 10.00M/Sol 562100/184700 490M/Mer

Période de calcul : 1- 9-1988, 0H au 30-11-1988, 24H

Lag = 1

$$Y = -0.0281 + 1.0294 \cdot X$$

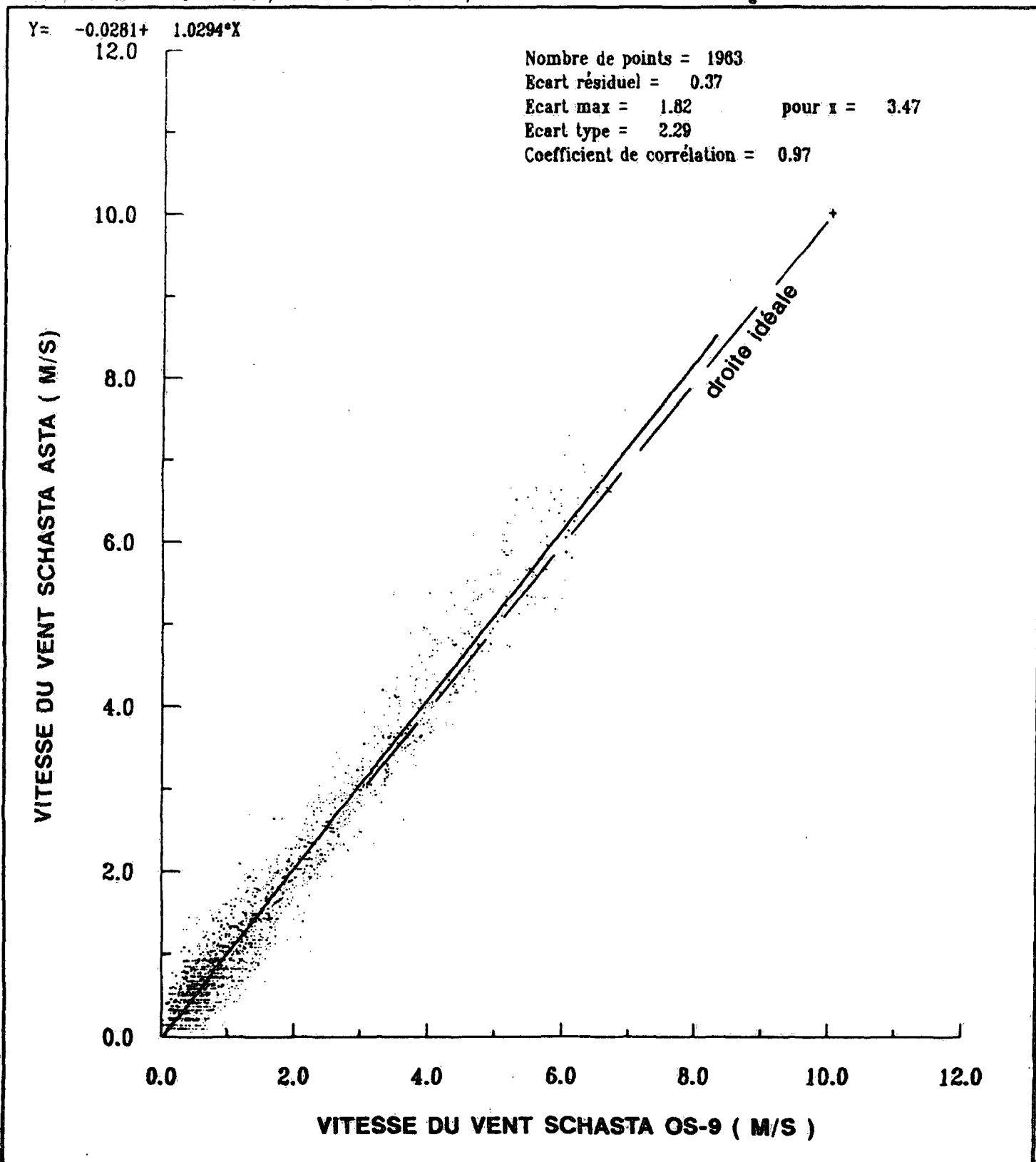
Nombre de points = 1963

Ecart résiduel = 0.37

Ecart max = 1.82 pour x = 3.47

Ecart type = 2.29

Coefficient de corrélation = 0.97

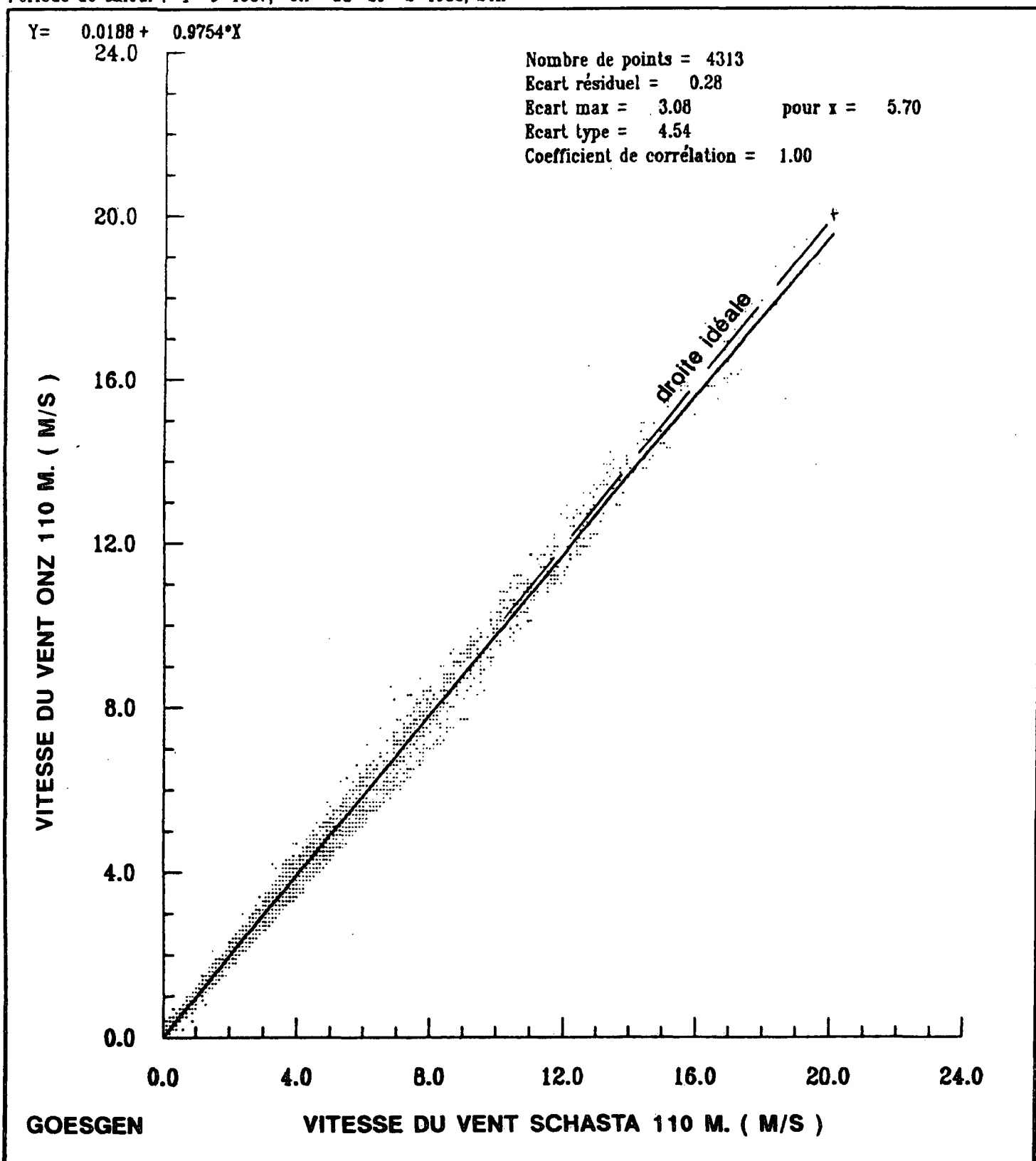


Droite de régression

AXE X: VITESSE DU VENT GOESGEN 121FFM CH110 1402 10305 8255 110.00M/Sol 641280/248130 378M/Mer

AXE Y: VITESSE DU VENT GOESGKN 143FFM ON110 1402 10306 8255 110.00M/Sol 641280/248130 378M/Mer

Période de calcul : 1- 9-1987, 0H au 29- 2-1988, 24H

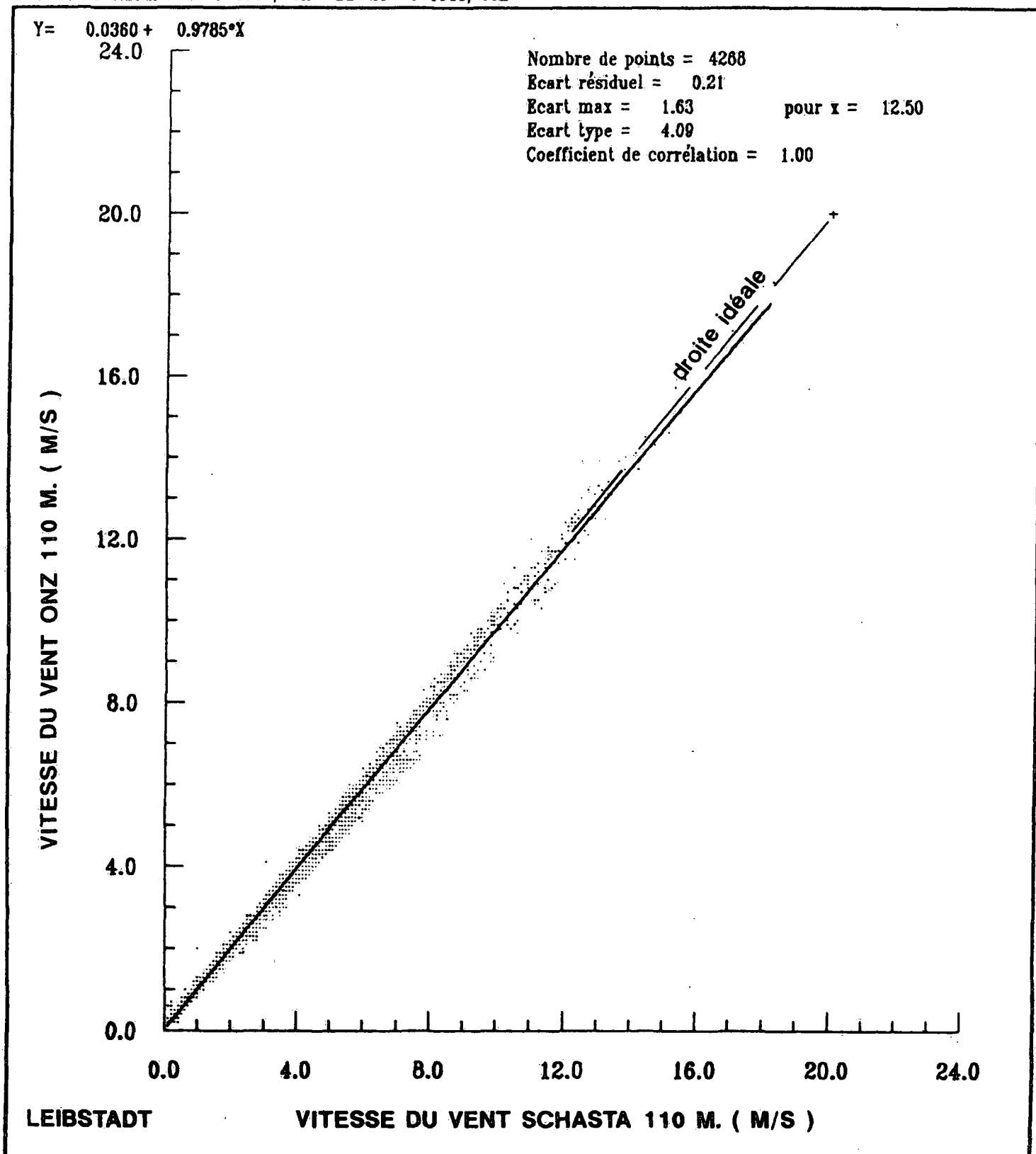


Droite de régression

AXE X: VITESSE DU VENT LEIBSTADT 121FFM CH110 1402 10305 8264 110.00M/Sol 656370/272110 341M/Mer

AXE Y: VITESSE DU VENT LEIBSTADT 143FFM ON110 1402 10306 8264 110.00M/Sol 656370/272110 341M/Mer

Période de calcul : 1- 9-1987, 0H au 29- 2-1988, 24H

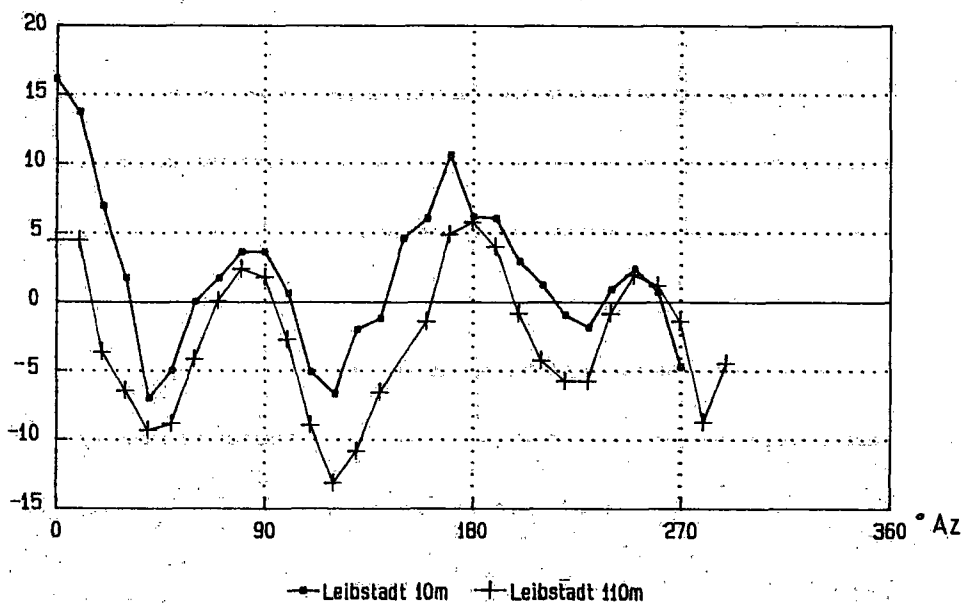
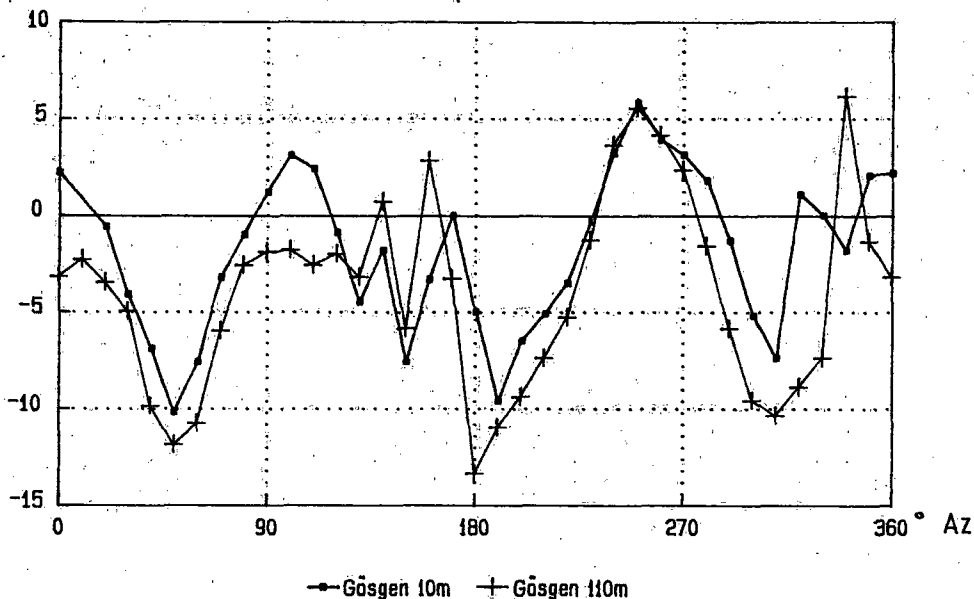


ISM/ENV/ANETZ - Centrales nucléaires/Anémométrie ASTA

Différence (%) de la vitesse du vent mesurée par le capteur
SCHASTA et le système ONZ (hélice Young 0,5m)
en fonction de la direction du vent.

ONZ (Young)
- SCHASTA
(%)

Conditions: vitesse SCHASTA > 1 m/s, nb cas > 5
Période : sept.87 - févr.88.



ISM/ENV/ANETZ-Centrales nucléaires/Anémométrie ASTA

Leibstadt 10 m. Vitesse SCHASTA [m/s] et diff. de vitesse ONZ-SCHASTA [%]

en fonction de la direction du vent Période: sept.87-févr.88

Conditions: toutes les vitesses; nb cas > 5

ONZ(Young)
- SCHASTA
[%]

SCHASTA
[m/s]

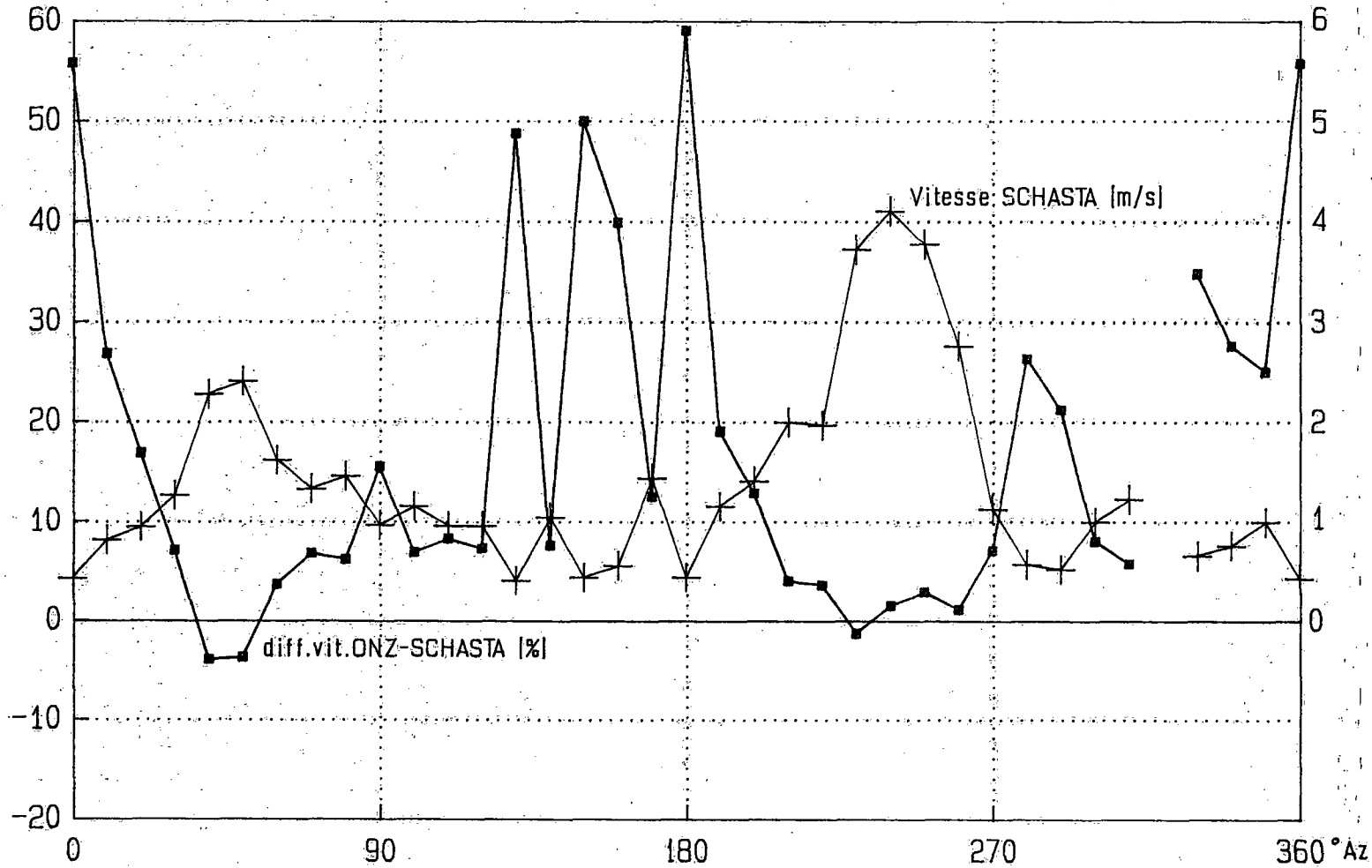


Fig. 12a

ISM/ENV/ANETZ-Centrales nucléaires/Anémométrie ASTA

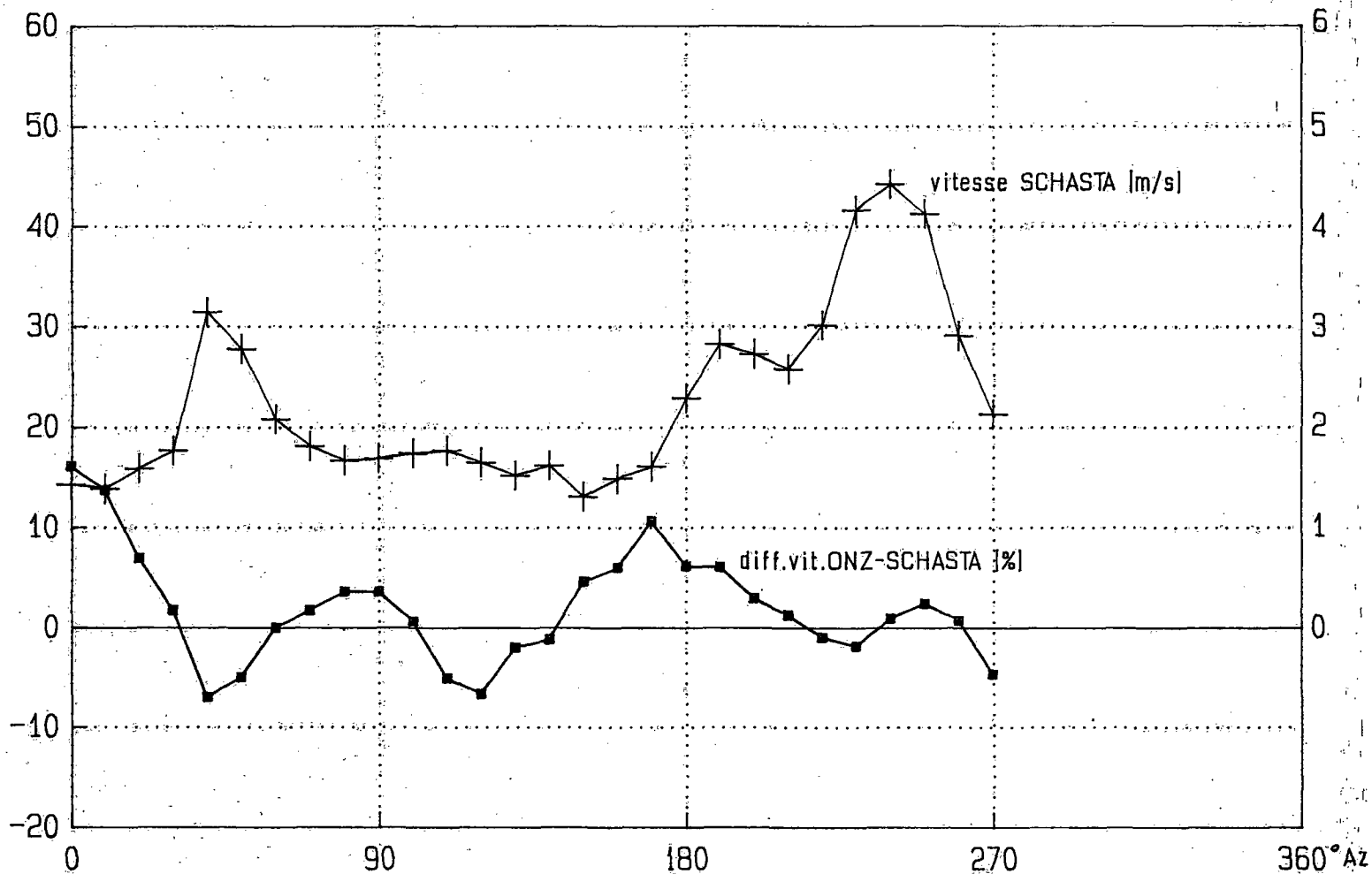
Leibstadt 10 m, Vitesse SCHASTA [m/s] et diff. de vitesse ONZ-SCHASTA [%]
en fonction de la direction du vent

Période: sept.87-févr.88

Conditions: vitesse SCHASTA > 1 m/s; nb cas > 5

ONZ(Young)
- SCHASTA
[%]

SCHASTA
[m/s]



ISM/ENV/ANETZ-Centrales nucléaires/Anémométrie ASTA

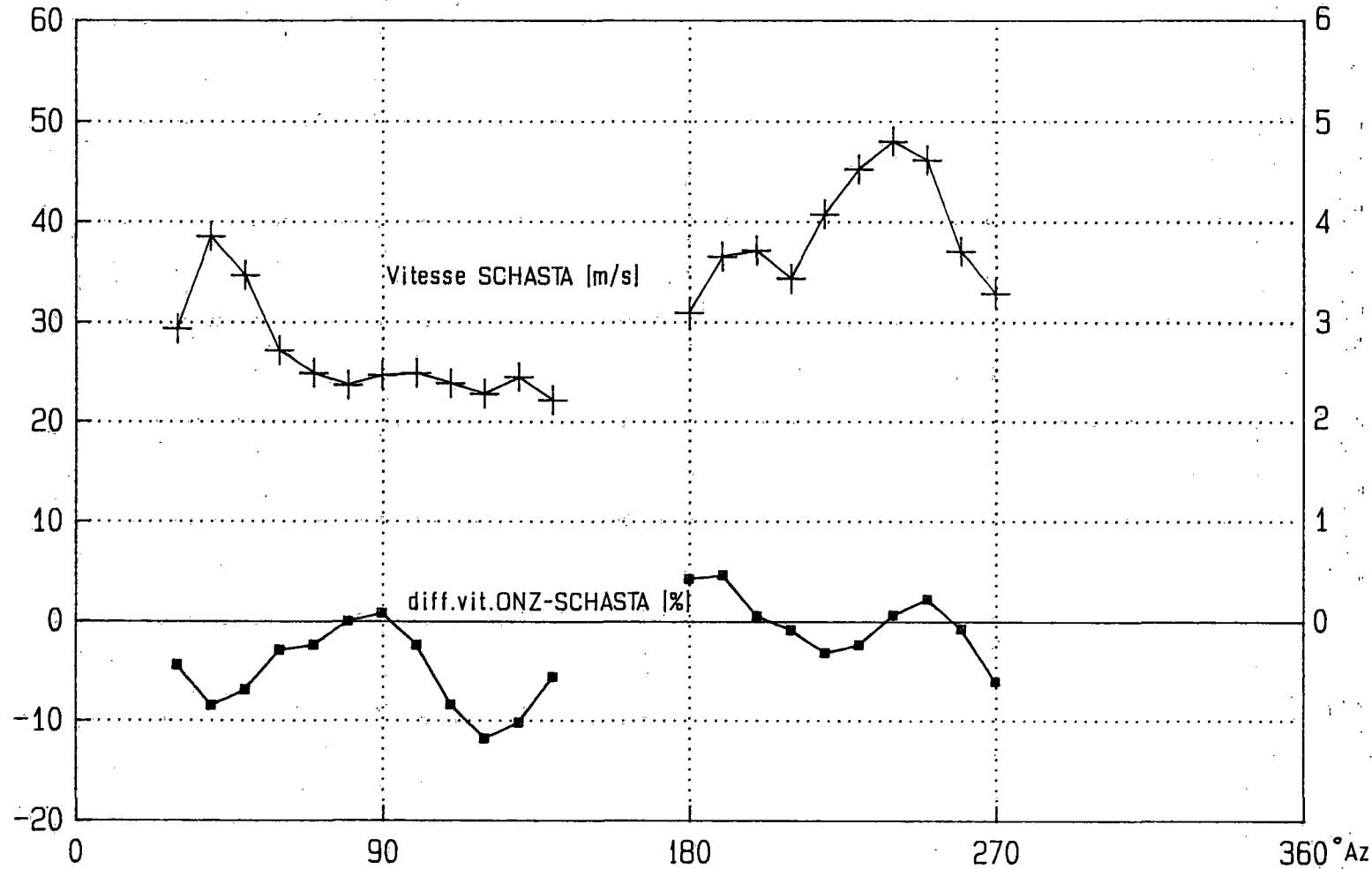
Leibstadt 10 m. Vitesse SCHASTA [m/s] et diff. de vitesse ONZ-SCHASTA [%]

en fonction de la direction du vent Période: sept.87-févr.88

Conditions: vitesse SCHASTA > 2 m/s; nb cas > 5

ONZ(Young)
- SCHASTA
[%]

SCHASTA
[m/s]



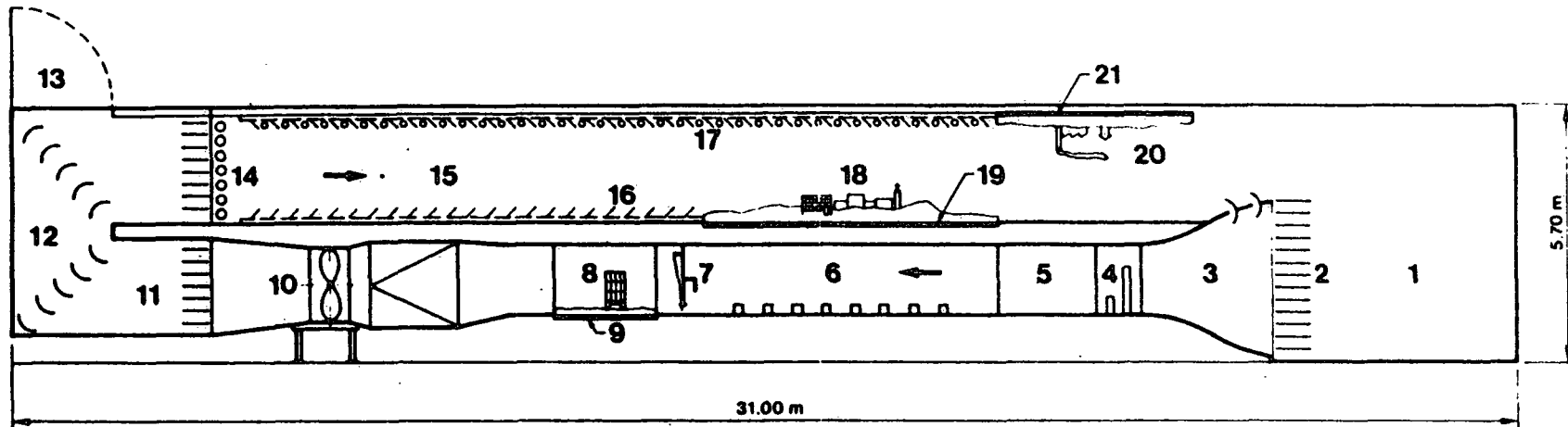


Fig. SOUFFLERIE A COUCHE LIMITE DE L'ENER COUPE VERTICALE Echelle 0 1 2 3 m
 Boundary Layer Wind Tunnel at IENER Vertical Cross-section Scale

1. Chambre de tranquillisation	Stabilization Chamber	4 x 5 x 5 m ³	12. Diffuseur en double coude	Diffuser	4 x 8 m ²
2. Grille en nid d'abeille	Honey Comb Grid		13. Panneau ouvrant pour fonctionnement en circuit ouvert	Opening Panel for Open Circuit Operation	
3. Concentration	Contraction	rapport 6:1	14. Echangeurs de chaleur	Heat Exchangers	
4. Générateurs de turbulence amovibles	Removable Vortex Generators		15. Veine de diffusion	Diffusion Test Section	4 x 2 m ²
5. Chambre d'expérimentation I	Test Section I	2,00 x 1,50 m ²	16. Plancher et rugosités refroidis	Floor and Roughness Element (Cooled)	
6. Rugosité de couche limite	Boundary Layer Roughness		17. Plafond et rugosités chauffés	Roof and Roughness Element (Heated)	
7. Porte-sonde	Probe Support		18. Chambre d'expérimentation III	Test Section III	4 x 2 m ²
8. Chambre d'expérimentation II (couche limite)	Test Section II (Boundary Layer)	2,00 x 1,50 m ²	19. Plateau tournant pour modèles topographiques	Turntable for Topographical Models	ø 6 m
9. Plateau tournant pour bâtiment	Turntable Platform for Building	ø 2 m	20. Chambre d'expérimentation IV	Test Section IV	4 x 2 m ²
10. Ventilateur	Fan	435 kW	21. Plateau tournant pour modèle de diffusion	Turntable for Diffusion Models	ø 4 m
11. Grille de redressement	Flow Straightening Grid				

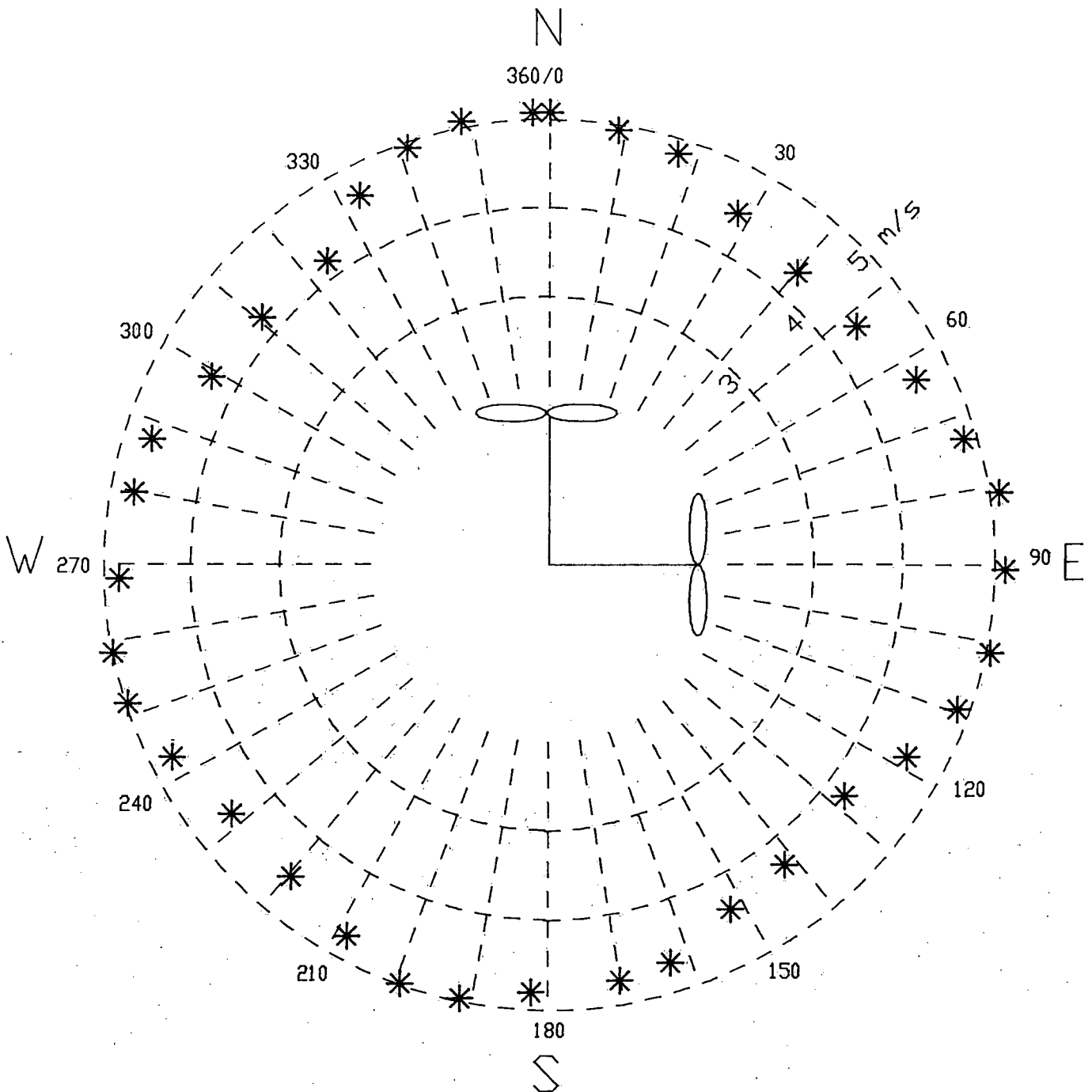
ISM/ENV/Anémométrie/Hélice Bertin

Test en soufflerie EPFL-LASEN du 28.11.88

Diagramme polaire

Pas expérimental : 0,386m
vitesse : 5 m/s

	vitesse (%)	direction (°Az)
Erreur moy.	-6,0	0,4
Erreur max.	-16,1	3,7
écart-type	5,7	1,9



ISM/ENV/Anémométrie/Hélice Bertin

Test en soufflerie EPFL-LASEN du 28.11.88.

Courbes d'erreur de vitesse et de direction

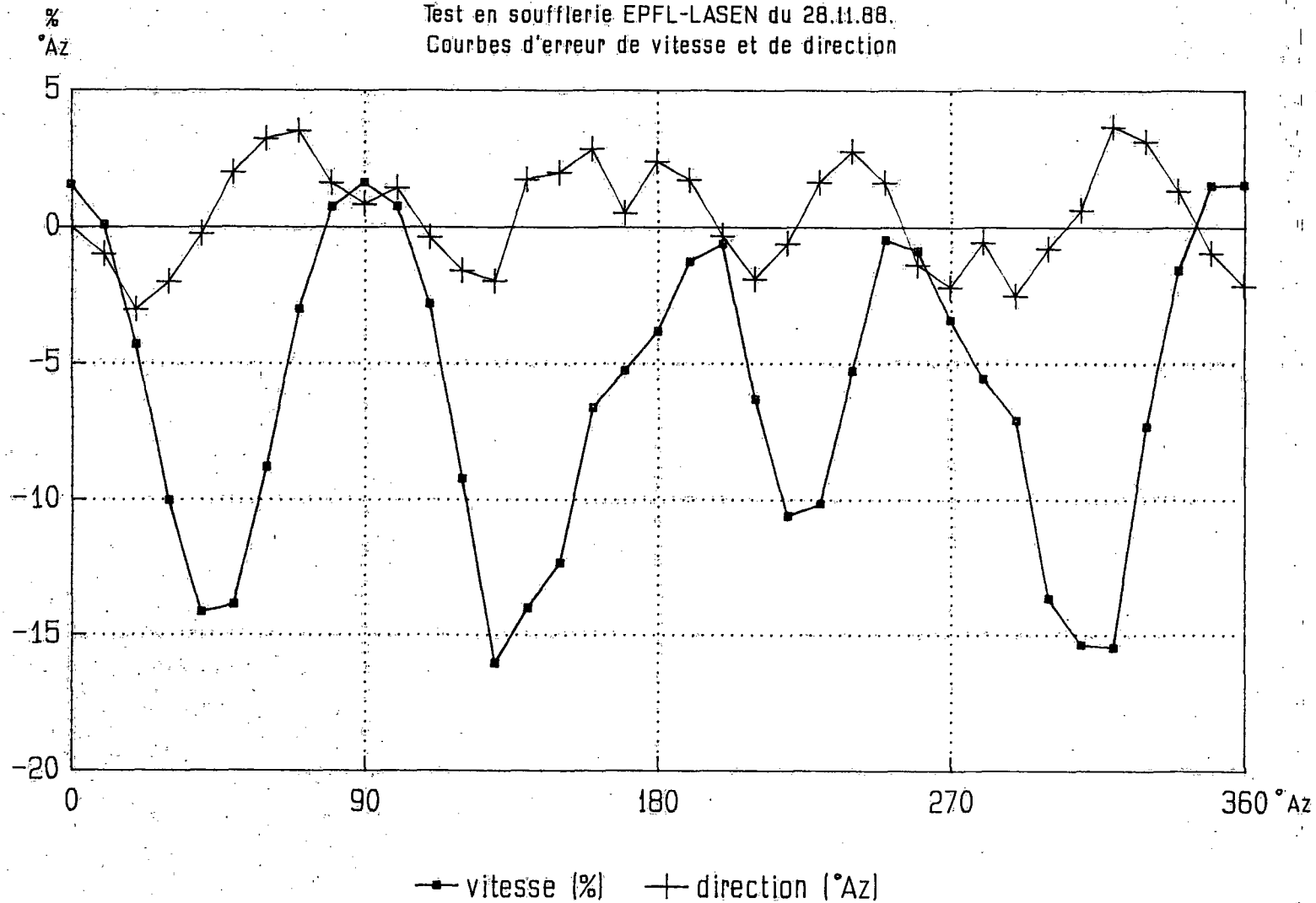


Fig. 4: REPONSE ANGULAIRE RELATIVE D'UN ANEMOMETRE TRIDIMENSIONNEL "NEZ"

