

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

Zürich

Calcul d'erreur du vecteur vent
déterminé par un radiovent

par

Jean Rieker, Payerne

Janvier 1978

Aérologie

551.508.822

Résumé

Le vecteur vent \vec{V} est défini par l'altitude h de son origine, son intensité et sa direction. L'erreur Δh est fortement dépendante de l'exactitude avec laquelle l'angle d'élévation est mesuré. L'erreur $\Delta \vec{V}$, dépendant des erreurs de mesures des coordonnées polaires des extrémités du vecteur vent \vec{V} , est exprimée en fonction des coordonnées polaires de l'origine du vecteur \vec{V} , de l'intensité V et de la direction ψ . L'erreur maximale $\Delta \vec{V}^{\max}$ pouvant se produire a été évaluée dans certaines conditions. Elle se manifeste à l'altitude du niveau de 10 mbar. Les résultats sont présentés sous forme graphique directement utilisable par les opérateurs.

Zusammenfassung

Der Windvektor \vec{V} wird durch Höhe h seines Ursprungs, seine Stärke und seine Richtung bestimmt. Der Fehler Δh hängt stark von der Genauigkeit ab, mit welcher der Höhenwinkel gemessen wird. Der Fehler $\Delta \vec{V}$, welcher von den Messfehlern der Polar-Koordinaten der Endpunkte des Windvektors abhängt, wird in Funktion der Polar-Koordinaten des \vec{V} Vektorursprungs, seiner Stärke V und Richtung ψ ausgedrückt. Der maximale Fehler $\Delta \vec{V}^{\max}$, der eintreten kann, wurde unter bestimmten Bedingungen abgeschätzt. Er zeigt sich auf der Höhe des 10 mbar Niveau. Die Resultate sind in graphischer Form dargestellt und können so direkt von den Operateuren benützt werden.

Riassunto

Il vettore vento \vec{V} è definito dall'altezza h della sua origine, dalla sua intensità e direzione. L'errore Δh dipende fortemente dall'esattezza con la quale l'angolo d'elevazione è misurato. L'errore $\Delta \vec{V}$, dipendente dagli errori di misura delle coordinate polari delle estremità del vettore vento \vec{V} è espresso in funzione delle coordinate polari dell'origine del vettore \vec{V} , dell'intensità V e della direzione ψ . L'errore massimo $\Delta \vec{V}^{\max}$ che può prodursi è stato valutato sotto certe condizioni. Esso si manifesta all'altezza del livello di 10 mbar. I risultati sono presentati sotto forma grafica direttamente utilizzabile dall'operatore.

Summary

The wind vector \vec{V} is defined by the altitude h of its origin, its intensity and its direction. The error Δh is strongly dependent of the precision used to measure the angle of elevation. The error $\Delta \vec{V}$, which depends of the measurements errors of the polar coordinates of the wind-vector \vec{V} origin and extremity, is expressed in function of the polar coordinates of the vector \vec{V} origin, of the intensity V and the direction ψ . The maximum error $\Delta \vec{V}^{\max}$ which could be produced, has been evaluated under certain conditions. It appears at the altitude level of 10 mbar. The results are shown under graphic form, directly useable by the operators.

TABLE DES MATIERES

	Page
1. Introduction	1
2. Généralités	2
2.1. Définition du vecteur vent \vec{V} et nomenclature	2
2.2. Altitude de l'origine du vecteur vent \vec{V}	4
2.3. Représentations graphiques de la distance d en fonction de l'angle d'élévation α et de l'altitude h	5
2.4. Principe du calcul d'erreur	5
3. Calcul d'erreur de l'altitude h de l'origine du vecteur vent \vec{V}	6
3.1. Equation de base	6
3.2. Erreur d'altitude Δh_α suscitée par une erreur de mesure de l'angle d'élévation α	6
3.3. Erreur d'altitude Δh_d suscitée par une erreur de mesure de la distance	7
3.4. Erreur d'altitude Δh_r suscitée par une erreur fixe de détermination du rayon terrestre r	7
3.5. Erreur d'altitude Δh_a suscitée par une erreur fixe de détermination de l'altitude a de l'antenne	9
3.6. Différence des altitudes exprimées respectivement en mètres et en mètres géopotentiels	9
3.7. Discussion	10
4. Calcul d'erreur du vecteur \vec{V}	12
4.1. Equations de base	12
4.2. Calcul d'erreur du module V du vecteur vent	13
4.3. Calcul d'erreur de l'azimut ψ du vecteur vent	14
4.4. Propriété de la fonction d'erreur $\Delta \vec{V}$ du vecteur vent \vec{V}	16
4.5. Interprétation des figures	21
4.5.1. Généralités	21
4.5.2. Erreur due à $\Delta \ell = \Delta (\alpha_2 - d_1)$ (fig. 9 et 10)	22
4.5.3. Erreur due à $\Delta \delta = \Delta (\alpha_2 - \alpha_1)$ (fig. 11 à 14)	24
4.5.4. Erreur due à $\Delta \gamma = \Delta (\theta_2 - \theta_1)$ (fig. 15 à 18)	26
5. Conclusion	28
5.1. Altitude h du vecteur vent	28
5.2. Module V du vecteur vent	28
5.3. Direction ψ du vecteur vent	31
6. Références	33

TABLE DES FIGURES.

- Fig. 1 : Définition du vecteur vent et nomenclature.
- Fig. 2 : Influence de la rotondité de la terre sur le calcul de l'altitude des niveaux de 10 mbar (31055 m) et 100 mbar (16180 m) de l'atmosphère standard.
- Fig. 3 : Distance en fonction de l'angle d'élévation.
- Fig. 4 : Distance en fonction de l'altitude.
- Fig. 5 : Influence d'une erreur de $0,1^\circ$ de l'angle d'élévation sur l'altitude.
- Fig. 6 : Influence d'une erreur de 0,1 km de la distance sur l'altitude.
- Fig. 7 : Différence Δ entre les altitudes exprimées en mètres et en mètres géopotentiels à Payerne.
- Fig. 8 : Définition du vecteur vent dans le plan horizontal passant par la base de lancement.
- Fig. 9 : Influence d'une erreur de distance sur la vitesse du vent.
- Fig. 10 : Influence d'une erreur de distance sur la direction du vent.
- Fig. 11 : Influence normalisée d'une erreur d'angle d'élévation sur la vitesse du vent.
- Fig. 12 : Influence maximale (à l'altitude de 31055 m) d'une erreur d'angle d'élévation sur la vitesse du vent.
- Fig. 13 : Influence normalisée d'une erreur d'angle d'élévation sur la direction du vent.
- Fig. 14 : Influence maximale (à l'altitude de 31055 m) d'une erreur de l'angle d'élévation sur la direction du vent.
- Fig. 15 : Influence normalisée d'une erreur d'azimut sur la vitesse du vent.
- Fig. 16 : Influence maximale (à l'altitude de 31055 m) d'une erreur d'azimut sur la vitesse du vent.
- Fig. 17 : Influence normalisée d'une erreur d'azimut sur la direction du vent.
- Fig. 18 : Influence maximale (à l'altitude de 31055 m) d'une erreur d'azimut sur la direction du vent.

1. Introduction

En aérologie le vecteur vent est défini comme devant correspondre au déplacement horizontal par unité de temps du ballon-sonde pendant son ascension dans une tranche d'atmosphère. Il est admis que le ballon se déplace avec le vent.

En définitive, les vecteurs vents représentent les vents moyens horizontaux dans des tranches d'atmosphère successives dont l'épaisseur varie en fonction de la vitesse ascensionnelle du ballon. Les différentes techniques de mesure du vent par ballon-sondes dans la haute atmosphère conduisent toutes à trouver les positions spatiales du ballon à intervalles de temps réguliers (minute ou fraction de minute) étant donné que le lieu du lâcher est l'origine spatiale et que le moment du lâcher (minute zéro) est l'origine temporelle. Les vitesses ascensionnelles du ballon sont de 340 m/min environ.

Le système suisse de poursuite est basé sur la mesure des coordonnées polaires du ballon-sonde à partir de l'antenne au sol (distance d ; angle d'élévation α qui est le complément de l'angle zénithal; azimut θ).

La mesure du vecteur vent associée à un radiosondage PTU bénéficie d'une donnée supplémentaire, l'altitude en mètres géopotentiels calculée à partir des données de pression, température et humidité. Quand les angles d'élévations α sont faibles, il est indiqué de calculer le vecteur vent à partir de l'altitude en mètres géopotentiels de la radiosonde.

Quelle que soit la technique utilisée de poursuite du ballon-sonde, les mesures des paramètres de position sont entachées d'erreurs pouvant fortement influencer, selon les conditions, le vecteur vent (module et direction) et l'altitude de son origine.

Le calcul d'erreur de l'altitude en mètres géopotentiels d'une radiosonde fait déjà l'objet du rapport de travail de l'Institut suisse de météorologie No. 65 (Rieker, 1976).

Il n'a pas été tenu compte dans le calcul d'erreur développé ci-après des phénomènes de réfraction de l'onde électromagnétique de 403 MHz utilisée pour la mesure de la distance.

* * * *

2. Généralités

2.1. Définition du vecteur vent \vec{V} et nomenclature

La direction du vent est définie en météorologie par celle d'où il vient. En aérologie c'est l'azimut ψ de la projection horizontale $\overline{P_2' P_1'}$ du déplacement inverse $\overline{P_2 P_1}$ du ballon dans l'atmosphère par unité de temps (en Suisse une minute) (fig. 1 et 8).

La position P_i (d_i ; α_i ; θ_i), ($i = 1, 2$) du ballon est une fonction de la distance d_i de l'antenne à la sonde, de l'angle d'élévation α_i (fig. 1) et de l'azimut θ_i (fig. 8).

a) Des paramètres mesurés d_i ; α_i ; θ_i ; on peut calculer l'altitude de l'origine P_2 du vecteur (fig. 1):

h_2 qui tient compte de la rotondité de la terre,
 h_2' qui la néglige.

b) Le vecteur vent tel qu'il est défini ci-avant est une approximation. En fait il devrait être représenté sur la sphère par le vecteur \vec{V}_r . Examinée dans le cas le plus défavorable, la différence $|\vec{V}_r| - |\vec{V}|$ est pratiquement nulle.

En effet, connaissant:

$a = 0,503$ km l'altitude de l'antenne sur mer
 $r = 6371$ km le rayon terrestre

et en admettant:

$|\vec{V}| = 200$ noeuds (vitesse maximale)
 $h = 30$ km pour l'altitude du ballon en P
 $d = 200$ km pour la distance de l'antenne A à la sonde P
(distance maximale mesurée à Payerne)

on aura:

$|\vec{V}_r| = 199,9$ noeuds

en sachant que

$$|\vec{V}_r| = |\vec{V}| \cos \beta$$

où

$$\cos \beta = \frac{-d^2 + (r+a)^2 + (r+h)^2}{2 (r+a) (r+h)} \quad (\text{théorème du cosinus du triangle ACP})$$

l'angle au centre ACP étant

$$\beta = 1,8^\circ.$$

En exprimant en kilomètres par minute $|\vec{V}_r| = 200 \frac{1,852}{60} = 6,173 \frac{\text{km}}{\text{min}}$,

l'angle au centre P_1CP_2 devient:

$$\nu = 0,06^\circ.$$

c) Sur la sphère la direction du vent est définie par l'angle ψ_1 que font entre-eux le plan du méridien passant par P_2 (direction du nord) et le plan déterminé par les deux positions successives $P_1 P_2$ du ballon et le centre de la terre. La mesure de l'angle ψ_1 est l'angle que font entre-eux les grands cercles des deux plans précités.

Vu que l'angle

$$\beta \leq 1,8^\circ,$$

il en résulte que

$$\psi \approx \psi_1.$$

Donc, en ce qui concerne le vecteur vent $\vec{V} (V, \psi)$, il est justifié de remplacer dans un rayon de 200 km autour de l'antenne, distance absolue mesurée à Payerne, la rotondité de la terre par le plan horizontal perpendiculaire à la verticale Z passant par le zénith de la base de lancement (antenne).

Remarque:

La durée moyenne des sondages de vent du sol à 31 km environ est de 90 minutes. La vitesse ascensionnelle moyenne est de l'ordre de 340 m par minute.

Jusqu'à la tropopause la durée est de 30 minutes environ. Un vent moyen de 50 noeuds de même direction du sol à 31 km donne donc un déplacement horizontal du ballon de l'ordre de 150 km.

2.2. Altitude de l'origine du vecteur vent \vec{V}

De la figure 1 on obtient pour la position P_2 , désignée par P pour des raisons de commodité:

a) son altitude h' , sans correction du rayon terrestre:

$$h' = a + d \sin \alpha \quad (1)$$

b) son altitude h , avec correction de la rotondité de la terre, en appliquant le théorème du cosinus au triangle AP_2C :

$$h = \{d^2 + (r+a)^2 + 2d(r+a) \sin \alpha\}^{\frac{1}{2}} - r, \quad (2)$$

où

h = altitude de l'origine du vecteur vent \vec{V} sur mer (position P_2),

r = rayon terrestre,

a = altitude de l'antenne A sur mer,

d = distance mesurée de l'antenne à l'origine du vecteur vent \vec{V} (position P_2),

α = angle d'élévation mesuré de la position P_2 .

A titre d'illustration, calculons la différence:

$$h - h' = \{d^2 + (r+a)^2 + 2d(r+a) \sin \alpha\}^{\frac{1}{2}} - (r+a) - d \sin \alpha \quad (3)$$

pour deux niveaux fixes de l'atmosphère standard, 10 mbar à 31055 m et 100 mbar à 16180 m, en résolvant l'éq. 2 par rapport à d :

$$d = - (r+a) \sin \alpha + \{(r+h)^2 - (r+a)^2 \cos^2 \alpha\}^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

La figure 2 représente la différence d'altitude $h-h'$ en fonction de l'angle d'élévation α pour les niveaux de 10 mbar et 100 mbar de l'atmosphère standard.

De l'étude du comportement de la différence $h-h'$, on conclut qu'il est nécessaire de tenir compte de la rotondité de la terre (éq. 2), l'approximation h' n'étant valable que pour des angles d'élévation α compris entre 60^0 et 90^0 .

2.3. Représentations graphiques de la distance d en fonction de l'angle d'élévation α et de l'altitude h

L'équation 4

$$d = - (r+a) \sin \alpha + ((r+h)^2 - (r+a)^2 \cos^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}$$

est représentée:

- dans la figure 3 en fonction de l'angle d'élévation α , les altitudes h des niveaux de l'atmosphère standard étant les paramètres;
- dans la figure 4 en fonction de l'altitude, les angles d'élévation α étant les paramètres.

2.4. Principe du calcul d'erreur

Le calcul d'erreur est basé sur le principe de la différentiation des fonctions. Les accroissements infiniment petits de la variable et de la fonction sont remplacés par des accroissements finis, mais suffisamment petits. La différentielle d'une fonction à plusieurs variables indépendantes est la somme des différentielles de la fonction par rapport à chacune des variables prises séparément.

* * * *

3. Calcul d'erreur de l'altitude h de l'origine P_2 du vecteur vent

3.1. Equation de base

L'équation de base est déduite de l'éq. 2 :

$$(h+r)^2 = d^2 + (r+a)^2 + 2 d (r+a) \sin \alpha . \quad (5)$$

3.2. Erreur d'altitude Δh_α suscitée par une erreur de mesure de l'angle d'élévation α

En différentiant l'éq. 5 par rapport à l'angle d'élévation α (variable), h étant la fonction, et en considérant les données r , a , d comme absolues (exemptes d'erreur), on obtient:

$$\Delta h_\alpha = \Delta \alpha \frac{\pi}{180} \frac{r+a}{r+h} d \cos \alpha . \quad (9)$$

En remplaçant d par son expression (éq. 4), Δh_α devient une fonction de l'altitude h et de l'angle d'élévation α :

$$\Delta h_\alpha = \Delta \alpha \frac{\pi}{180} \frac{r+a}{r+h} [- (r+a) \sin \alpha + ((r+h)^2 - (r+a)^2 \cos^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}] \cos \alpha \quad (10)$$

avec

$$\Delta \alpha \text{ (radians)} = \Delta \alpha^0 \frac{\pi}{180} .$$

La famille de courbes (fig. 5) représente l'erreur en mètres commise sur l'altitude h (paramètre) quand l'angle d'élévation α est lu avec une erreur $\Delta \alpha^0 = 0,1^0$.

Pour de petits angles d'élévation, l'erreur devient considérable: si par exemple $\alpha = 10^0$, l'erreur Δh est de 9,5 m à 1457; de 36 m à 5574 m; de 110 m à 11784 m; de 280 m à 31055 m. Pour des angles d'élévation compris entre zéro et 20^0 l'erreur d'angle $\Delta \alpha$ représente certainement quelques dixièmes de degré, donc pour $\alpha = 10^0$, Δh_α peut être de l'ordre de 1500 à 3000 m à l'altitude de 31055 m.

3.3. Erreur d'altitude Δh_d suscitée par une erreur de mesure de la distance d

En différentiant l'éq. 5 par rapport à la distance d (variable), h étant la fonction, et en considérant les données r, a, α comme absolues (exemptes d'erreur), on obtient:

$$\Delta h_d = \Delta d \frac{d + (r+a) \sin \alpha}{r+h} . \quad (11)$$

En remplaçant d, exprimé par l'éq. 4 en fonction de h, r et α , l'éq. 11 devient:

$$\Delta h_d = \Delta d \frac{[(r+h)^2 - (r+a)^2 \cos^2 \alpha]^{\frac{1}{2}}}{r+h} . \quad (12)$$

La fig. 6 représente l'erreur Δh_d commise sur l'altitude h (paramètre) quand la distance est mesurée avec une erreur $\Delta d = 0,1$ km. L'erreur, maximale pour $\alpha = 90^\circ$, diminue avec α . Elle est pratiquement indépendante de l'altitude h, au moins pour des angles d'élévation α supérieurs à 25° .

3.4. Erreur d'altitude Δh_r suscitée par une erreur fixe de détermination du rayon terrestre r

La terre n'étant pas une sphère, la question qui vient à l'esprit est de savoir dans quelle mesure la longueur du rayon peut influencer l'altitude.

On admettra que la terre est un ellipsoïde dont le demi-grand axe est de 6378 km (rayon à l'équateur) et dont le demi-petit axe est de 6357 km (rayon aux pôles). La différence des deux demi-axes est de 21 km.

A la latitude de la Suisse le rayon de courbure usuel est voisin de 6371 km.

Dans l'éq. 5 h est la fonction et, dans le cas particulier, r la variable, les données a, d, α étant considérées exemptes de toute erreur (données absolues).

Après différentiation et transformation, on obtient:

$$\Delta h_r = \Delta r \frac{d \sin \alpha + a - h}{r+h} . \quad (6)$$

En remplaçant d, exprimé par l'éq. 4 en fonction de h, r et α , l'éq. 6 devient:

$$\Delta h_r = \Delta r \frac{\sin \alpha \left((r+h)^2 - (r+a)^2 \cos^2 \alpha \right)^{\frac{1}{2}} - (r+a) \sin^2 \alpha + a - h}{r+h}. \quad (7)$$

Les résultats présentés dans le tableau 1 pour les altitudes des niveaux de 10 mbar (31055 m) et 100 mbar (16180 m) de l'atmosphère standard, un rayon terrestre $r = 6371$ km, une altitude $a = 0,503$ km de l'antenne et une erreur $\Delta r = 1$ km, montrent que Δh_r est négligeable quand $90^\circ \geq \alpha \geq 10^\circ$ et est notablement inférieur à Δh_α (fig. 5) quand $10^\circ > \alpha \geq 0^\circ$.

L'erreur Δh_r peut donc être négligée.

TABLEAU 1

Equation 7

$r = 6371$ km; $a = 0,503$ km; $\Delta r = 1$ km

α°	Δh_r (m)	Δh_r (m)
	h = 31055 m (10 mbar)	h = 16180 m (100 mbar)
0	- 4,77	- 2,45
1	- 3,35	- 1,50
2	- 2,37	- 0,94
3	- 1,71	- 0,62
4	- 1,26	- 0,42
5	- 0,95	- 0,30
6	- 0,74	- 0,22
7	- 0,58	- 0,17
8	- 0,47	- 0,14
9	- 0,38	- 0,11
10	- 0,32	- 0,09
15	- 0,15	- 0,04
20	- 0,08	- 0,02
25	- 0,05	- 0,01
..

3.5. Erreur d'altitude Δh_a suscitée par une erreur fixe de détermination de l'altitude a de l'antenne

En partant de l'éq. 5 et en différentiant la fonction h par rapport à l'altitude a de l'antenne, on obtient:

$$\Delta h_a = \Delta a \frac{d \sin \alpha + r+a}{h+r} .$$

En substituant d par sa valeur (éq. 4) et en transformant, l'expression devient:

$$\Delta h_a = \Delta a \frac{\sin \alpha ((r+h)^2 - (r+a)^2 \cos^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} + (r+a) \cos^2 \alpha}{h+r} = \Delta a \kappa . \quad (8)$$

Le calcul montre que le facteur κ est voisin de 1 quels que soient l'altitude h , l'angle d'élévation α et l'altitude a de l'antenne.

Donc:

$$\Delta h_a \approx \Delta a .$$

Δa étant de l'ordre du mètre, Δh_a peut être négligé.

L'éq. 8 montre en outre que, quelle que soit l'altitude de l'antenne:

- l'illustration de la fig. 2 conserve sa validité,
- les altitudes indiquées dans les fig. 2, 3, 5 et 6 doivent être corrigées de la valeur $\Delta h_a = \Delta a = a - a_x$

où

$a = 0,503$ km (altitude de l'antenne à Payerne)

$a_x =$ altitude de l'antenne d'une autre base de lancement, par exemple d'une station mobile.

3.6. Différence des altitudes exprimées respectivement en mètres et en mètres géopotentiels

A titre d'information la fig. 7 représente, pour la latitude de Payerne ($46^{\circ}49'$ N), la différence Δ des altitudes exprimées respectivement en mètres

et en mètres géopotentiels à partir des Tables Météorologiques Internationales OMM - No 188 TP.74 préparées par S. Letestu - TABLE 3.1-4.

On constate que jusqu'à 6000 gpm la différence est pratiquement nulle. Elle augmente avec l'altitude pour atteindre $\Delta = 135$ environ à 32000 gpm.

3.7. Discussion

L'exactitude du calcul de l'altitude h de l'origine P_2 du vecteur vent dépend donc de la précision des données de plusieurs paramètres:

a = altitude sur mer de l'antenne,

r = rayon terrestre,

α = angle d'élévation,

d = distance.

Il a été constaté que l'altitude a de l'antenne et le rayon terrestre r sont connus avec une précision suffisante pour ne pas influencer notablement l'altitude h .

En revanche il est nécessaire de mesurer α et d avec précision.

Dans le 80% des cas la précision des mesures de l'angle d'élévation α est de :

$\pm 0,2^\circ$ dans le domaine $90^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$,

$\pm 0,4^\circ$ dans le domaine $20^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$,

celle de la distance d :

1% ou ± 50 m.

Δh_α est directement proportionnel à $\Delta \alpha$ (éq. 9 et 10).

En tenant compte des spécifications ci-avant, on aura:

$\Delta \alpha = 0,4^\circ$ pour $90^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$,

$\Delta \alpha = 0,8^\circ$ pour $20^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$.

Il faut donc multiplier Δh_α (fig. 5) par 4, respectivement par 8, dans les domaines $90^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ et $20^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$.

Δh_D est directement proportionnel à Δd (éq. 11). En tenant compte des spécifications ci-avant, l'erreur Δh_D maximum est de 100 mètres au zénith pour toutes les altitudes, et l'erreur minimale de 10 m à 31055 m pour un angle d'élévation $\alpha = 0^\circ$.

4. Calcul d'erreur du vecteur vent \vec{V}

4.1. Equations de base

Le vecteur vent \vec{V} ($\psi; V$) est caractérisé par la direction ψ d'où il souffle et par son module ou vitesse $|\vec{V}| = V$ (fig. 8). \vec{V} est donc la projection $\overline{P_2' P_1'}$ du déplacement inverse $\overline{P_2 P_1}$ du ballon dans l'atmosphère libre (fig. 1).

Rappelons que :

$$P_i = P_i (d_i, \alpha_i, \theta_i) \quad (i = 1, 2),$$

où

d_i = distance du point P_i

α_i = angle d'élévation du point P_i

θ_i = azimut du point P_i ,

et que le trajet effectué par le ballon de P_1 et P_2 se fait en une minute, la minute étant l'unité de temps de la mesure du vent dans l'atmosphère libre à Payerne.

Résolvant le triangle $AP_1' P_2'$ par rapport à V et à $d_2 \cos \alpha_2$ (fig. 8), on déduit les équations de base:

$$V^2 = (d_1 \cos \alpha_1)^2 + (d_2 \cos \alpha_2)^2 - 2d_1 d_2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \gamma, \quad (13)$$

où

$$\gamma = \theta_2 - \theta_1,$$

et

$$(d_2 \cos \alpha_2)^2 = (d_1 \cos \alpha_1)^2 + V^2 - 2d_1 \cos \alpha_1 V \cos \omega'. \quad (14)$$

4.2. Calcul d'erreur du module V du vecteur vent

Les coordonnées polaires de la position P_2 (d_2, α_2, θ_2) sont définies par:

$$d_2 = d_1 + \ell$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \delta$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \gamma,$$

étant admis qu'elles sont mesurées avec des erreurs relatives aux coordonnées polaires de la position P_1 (d_1, α_1, θ_1), ce qui sous entend que la position P_1 (d_1, α_1, θ_1) est supposée être connue de manière absolue (sans erreur).

Donc:

$$\Delta \ell = \Delta (d_2 - d_1)$$

$$\Delta \delta = \Delta (\alpha_2 - \alpha_1)$$

$$\Delta \gamma = \Delta (\theta_2 - \theta_1).$$

En différentiant l'équation de base 13 et en regroupant les termes semblables l'erreur ΔV devient:

$$\Delta V = \Delta V (\Delta \ell, \Delta \delta, \Delta \gamma, d_2, \alpha_2, \theta_2, V, \psi) = \Delta V_\ell + \Delta V_\delta + \Delta V_\gamma$$

avec

$$\Delta V_\ell = \Delta \ell \cos \alpha_2 \frac{d_2 \cos \alpha_2 - d_1 \cos \alpha_1 \cos \gamma}{V} \quad 15a$$

$$\Delta V_\delta = -\Delta \delta d_2 \sin \alpha_2 \frac{d_2 \cos \alpha_2 - d_1 \cos \alpha_1 \cos \gamma}{V} \quad 15b$$

$$\Delta V_\gamma = \Delta \gamma d_2 \cos \alpha_2 \frac{d_1 \cos \alpha_1 \sin \gamma}{V} \quad 15c$$

comme

$$\frac{1}{V} (d_2 \cos \alpha_2 - d_1 \cos \alpha_1 \cos \gamma) = \cos \phi$$

$$\frac{1}{V} d_1 \cos \alpha_1 \sin \gamma = \sin \phi \quad \left(\frac{m}{V} = \sin \phi, \text{ fig. 8} \right),$$

les éq. 15, définies dans le système cartésien YX (fig. 8), s'écrivent:

$$\Delta V_{\ell} = - \Delta \ell \cos \alpha_2 \cos (\psi - \theta_2) \quad 16a$$

$$\Delta V_{\delta} = \Delta \delta d_2 \sin \alpha_2 \cos (\psi - \theta_2) \quad 16b$$

$$\Delta V_{\gamma} = - \Delta \gamma d_2 \cos \alpha_2 \sin (\psi - \theta_2), \quad 16c$$

où

ΔV_i , $\Delta \ell$ sont exprimés en kilomètres par minute ($i = \ell, \delta, \gamma$);

$\Delta \delta$, $\Delta \gamma$ en radians par minute,

d_2 , en kilomètres,

α_2 , ψ , θ_2 , en degrés d'angle.

Puis en exprimant ΔV_i ($i = \ell, \delta, \gamma$) en noeuds ($1 \text{ noeud} = 1,852 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1,852 \text{ km}}{60 \text{ min}}$)

et les angles $\Delta \delta$, $\Delta \gamma$ en degrés d'angle par minute, les éq. 16 prennent la forme définitive:

$$\Delta V_{\ell} = - \frac{60}{1,852} \Delta \ell \cos \alpha_2 \cos (\psi - \theta_2) \quad 17a$$

$$\Delta V_{\delta} = \frac{\pi}{180} \frac{60}{1,852} \Delta \delta d_2 \sin \alpha_2 \cos (\psi - \theta_2) \quad 17b$$

$$\Delta V_{\gamma} = - \frac{\pi}{180} \frac{60}{1,852} \Delta \gamma d_2 \cos \alpha_2 \sin (\psi - \theta_2). \quad 17c$$

4.3. Calcul d'erreur de l'azimut ψ du vecteur vent

De l'équation de base 14 différenciée, après le regroupement des termes semblables et l'application des théorèmes de trigonométrie, on obtient:

$$\Delta \omega' = \Delta \omega'(\Delta \ell, \Delta \delta, \Delta \gamma, d_2, \alpha_2, \theta_2, V, \omega') = \Delta \omega'_{\ell} + \Delta \omega'_{\delta} + \Delta \omega'_{\gamma}$$

avec:

$$\Delta\omega'_\ell = \frac{\Delta\ell}{V} \cos\alpha_2 \sin(\omega'+\gamma) \quad 18a$$

$$\Delta\omega'_\delta = -\Delta\delta \frac{d_2}{V} \sin\alpha_2 \sin(\omega'+\gamma) \quad 18b$$

$$\Delta\omega'_\gamma = \Delta\gamma \frac{d_2}{V} \cos\alpha_2 \cos(\omega'+\gamma) \quad 18c$$

Les éq. 18, exprimées dans le système cartésien Y'X', doivent l'être dans le système YX (fig. 8).

Or

$$\omega' + \gamma = 2\pi - \psi + \theta_2,$$

d'où

$$\sin(\omega' + \gamma) = -\sin(\psi - \theta_2)$$

$$\cos(\omega' + \gamma) = \cos(\psi - \theta_2),$$

et comme

$$\omega = \omega' - \theta_1,$$

$$\Delta\omega = \Delta\omega'$$

et

$$\omega = 2\pi - \psi,$$

$$\Delta\omega = -\Delta\psi,$$

il en résulte que :

$$\Delta\psi = \Delta\psi_\ell + \Delta\psi_\delta + \Delta\psi_\gamma$$

avec :

$$\Delta\psi_{\ell} = \frac{\Delta\ell}{V} \cos\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \quad 19a$$

$$\Delta\psi_{\delta} = - \Delta\delta \frac{d_2}{V} \sin\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \quad 19b$$

$$\Delta\psi_{\gamma} = - \Delta\gamma \frac{d_2}{V} \cos\alpha_2 \cos(\psi-\theta_2) , \quad 19c$$

et où

$\Delta\psi_i$ est exprimé en radians ($i = \ell, \delta, \gamma$),

$\Delta\delta, \Delta\gamma$ en radians par minute,

$\Delta\ell, V$ en kilomètres par minute,

d_2 en kilomètres.

En convertissant les angles en degrés d'angle et le module du vecteur vent \vec{V} en noeuds, les éq. 19 prennent la forme définitive:

$$\Delta\psi_{\ell} = \frac{180}{\pi} \frac{60}{1,852} \frac{\Delta\ell}{V} \cos\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \quad 20a$$

$$\Delta\psi_{\delta} = - \frac{60}{1,852} \Delta\delta \frac{d_2}{V} \sin\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \quad 20b$$

$$\Delta\psi_{\gamma} = - \frac{60}{1,852} \Delta\gamma \frac{d_2}{V} \cos\alpha_2 \cos(\psi-\theta_2). \quad 20c$$

4.4. Propriétés de la fonction d'erreur $\Delta\vec{V}$ du vecteur vent \vec{V}

a) Pour plus de clarté regroupons les équations 17 et 20 selon la forme

$$\Delta\vec{V}_i (\Delta V_i, \Delta\psi_i) \quad \text{où } i = \ell, \delta, \gamma$$

$$\text{en sachant que } \Delta\vec{V} = \sum_i \Delta\vec{V}_i ,$$

on aura :

$$\Delta\vec{V}_{\ell} \left(\begin{array}{l} \Delta V_{\ell} = - \frac{60}{1,852} \Delta\ell \cos\alpha_2 \cos(\psi-\theta_2) \\ \Delta\psi_{\ell} = \frac{180}{\pi} \frac{60}{1,852} \frac{\Delta\ell}{V} \cos\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \end{array} \right) \quad (17a)$$

$$\Delta\vec{V}_{\delta} \left(\begin{array}{l} \Delta V_{\delta} = - \frac{60}{1,852} \Delta\delta \frac{d_2}{V} \sin\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \\ \Delta\psi_{\delta} = - \frac{60}{1,852} \Delta\delta \frac{d_2}{V} \sin\alpha_2 \sin(\psi-\theta_2) \end{array} \right) \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \vec{V}_\delta & \left(\begin{array}{l} \Delta V_\delta = \frac{\pi}{180} \frac{60}{1,852} \Delta \delta d_2 \sin \alpha_2 \cos (\psi - \theta_2) \\ \Delta \psi_\delta = - \frac{60}{1,852} \Delta \delta \frac{d_2}{V} \sin \alpha_2 \sin (\psi - \theta_2) \end{array} \right) \end{aligned} \quad (17b)$$

$$\begin{aligned} \Delta \vec{V}_\gamma & \left(\begin{array}{l} \Delta V_\gamma = - \frac{\pi}{180} \frac{60}{1,852} \Delta \gamma d_2 \cos \alpha_2 \sin (\psi - \theta_2) \\ \Delta \psi_\gamma = - \frac{60}{1,852} \Delta \gamma \frac{d_2}{V} \cos \alpha_2 \cos (\psi - \theta_2) \end{array} \right) \end{aligned} \quad (17c)$$

où

$\Delta V_i, V$ sont exprimés en noeuds ($i = \ell, \delta, \gamma$),

$\Delta \ell$ en kilomètres par minute,

$\Delta \psi_i, \psi, \alpha_2, \theta_2$ en degrés d'angle,

$\Delta \delta, \Delta \gamma$ en degrés d'angle par minute.

b) Des équations 17a, b, c et 20 a, b, c, on relève les propriétés fondamentales suivantes:

- 1) L'erreur $\Delta V = \Delta V_\ell + \Delta V_\delta + \Delta V_\gamma$ est indépendante de la vitesse du vent V .
- 2) L'erreur $\Delta \psi = \Delta \psi_\ell + \Delta \psi_\delta + \Delta \psi_\gamma$ est inversement proportionnelle à la vitesse du vent V (éq. 20a, b, c), ce qui signifie que plus le vent est faible, plus sa direction est imprécise. La direction du vent est indéterminée quand la vitesse tend vers zéro.
- 3) $\Delta \vec{V}_\ell (\Delta V_\ell, \Delta \psi_\ell)$ est indépendant de la distance d (éq. 17a et 20a).
- 4) $\Delta \vec{V}_\delta (\Delta V_\delta, \Delta \psi_\delta)$ et $\Delta \vec{V}_\gamma (\Delta V_\gamma, \Delta \psi_\gamma)$ sont directement proportionnels à la distance d (éq. 17b, c et 20 b, c).
- 5) Le vecteur vent \vec{V} est indépendant d'erreurs systématiques des mesures des coordonnées polaires $(d_i, \alpha_i, \theta_i)$, ($i = 1, 2$) puisque les erreurs $\Delta \ell, \Delta \delta, \Delta \gamma$, sont relatives à la différence respective des coordonnées polaires des extrémités du vecteur vent (§ 4,2).

6) Les fonctions ΔV_i et $\Delta \psi_i$ ($i = \ell, \delta, \gamma$) sont les produits de deux fonctions trigonométriques dont l'argument α_2 (angle d'élévation) de l'une varie de 90° (zénith) à 0° (horizon) ($\frac{\pi}{2}$ et 0 radians) et l'argument $(\psi - \theta_2)$ de l'autre de 0° à 360° (0 à 2π radians).

On a donc pour

$$\frac{\pi}{2} \geq \alpha_2 \geq 0 \rightarrow \begin{cases} 0 \leq \cos \alpha_2 \leq 1 \\ 1 \geq \sin \alpha_2 \geq 0 \end{cases}$$

et

$$0 \leq \psi - \theta_2 \leq 2\pi \rightarrow 1 \geq \cos (\psi - \theta_2) \geq -1$$

ou

$$1 \geq \sin (\psi - \theta_2) \geq -1$$

avec les valeurs intermédiaires:

$$\psi - \theta_2 = \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \rightarrow \cos (\psi - \theta_2) = 0$$

$$\psi - \theta_2 = 0, \pi \text{ ou } 2\pi \rightarrow \sin (\psi - \theta_2) = 0.$$

La prise en considération du signe respectif, positif ou négatif, de chaque terme multiplicateur, fixera le signe, positif ou négatif, de la fonction d'erreur ΔV_i et $\Delta \psi_i$, en tenant compte naturellement du signe des erreurs $\Delta \ell$, $\Delta \delta$, $\Delta \gamma$.

c) L'analyse du comportement de l'argument $(\psi - \theta_2)$ et de sa relation avec la différence des azimuts $\theta_2 - \theta_1$ (fig. 8) est résumée dans le tableau II.

Les données sont déduites des relations:

$$\theta_2 + \omega + \phi = \pi \quad \text{et} \quad \gamma + \phi = \psi' - \pi$$

où $\omega = 2\pi - \psi$ et $\phi = \text{angle } AP_2'P_1'$.

TABLEAU II

Situations	φ	$\gamma = \theta_2 - \theta_1$	$\psi - \theta_2$	$\cos (\psi - \theta_2)$	$\sin (\psi - \theta_2)$
a	0	0	π	- 1	0
b	0	$\pm\pi$	π	- 1	0
c	$\frac{\pi}{2}$	$f (V;d_2;\alpha_2)$	$\frac{3\pi}{2}$	0	- 1
d	π	0	2π	1	0
e	$\frac{3\pi}{2}$	$f (V;d_2;\alpha_2)$	$\frac{\pi}{2} + 2\pi$	0	1

avec
$$f (V;d_2;\alpha_2) = \text{arctg} \frac{V}{d_2 \cos \alpha_2}$$

Dans les situations:

- a, b, d, les extrémités P'_2 et P'_1 du vecteur vent \vec{V} sont alignées sur l'antenne A.
- c et e, le vecteur vent \vec{V} est perpendiculaire à la ligne de visée AP'_2 .

1. Situation a

Dans un courant homogène d'une certaine envergure, le ballon-sonde s'éloigne de la base de lancement, de telle sorte que:

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (\text{même azimut})$$

donc $\gamma = \theta_2 - \theta_1 = 0$.

Le vecteur vent étant défini par la direction d'où il souffle:

$$\varphi = \text{angle } AP'_2 P'_1 = 0.$$

2. Situation d

Après s'être éloigné de la base de lancement, le ballon-sonde revient dans un courant contraire vers le zénith de la station, de telle sorte que:

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (\text{même azimuth})$$

donc $\gamma = \theta_2 - \theta_1 = 0$

et $\phi = \text{angle } AP'_2P'_1 = \pi$

3. Situation b

Le ballon-sonde passe par le zénith de la base de lancement. Deux cas sont à considérer:

1er cas: Le vent souffle des secteurs Nord à Est ou Est à Sud

$$0 \leq \theta_2 < \pi$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \pi \quad \rightarrow \quad \gamma = \theta_2 - \theta_1 = \pi$$

et $\phi = \text{angle } AP'_2P'_1 = 0$

2ème cas: Le vent souffle des secteurs Sud à Ouest ou Ouest à Nord

$$\pi \leq \theta_2 < 2\pi$$

$$\theta_1 = \theta_2 + \pi \quad \rightarrow \quad \gamma = \theta_2 - \theta_1 = -\pi$$

et $\phi = \text{angle } AP'_2P'_1 = 0$

4. Situations c et e

Ces deux situations se présentent lorsque le ballon traverse la zone de cisaillement de deux courants horizontaux superposés, perpendiculaires l'un à l'autre:

- si le courant inférieur est faible et le courant supérieur fort, l'angle d'élévation α_2 du ballon-sonde reste élevé dans le faible courant inférieur, pour diminuer rapidement dans le fort courant supérieur. Après un court laps de temps (10 min environ), on retrouve la situation a.
- si le courant inférieur est fort et le courant supérieur faible, l'angle d'élévation α_2 est petit quand le ballon-sonde entre dans le courant supérieur faible. Dès ce moment l'angle ϕ tendra très lentement vers zéro au fur et à mesure que le ballon s'éloigne.
- dans le cas de deux courants faibles superposés, les angle d'élévation resteront élevés, l'angle ϕ ne diminuera que lentement au fur et à mesure que le ballon s'éloigne.
- si les deux courants superposés perpendiculaires l'un à l'autre sont forts, l'angle d'élévation α_2 du ballon-sonde au moment de son entrée dans le courant supérieur est petit. L'angle ϕ tendra rapidement vers zéro et on retrouve la situation a.

4.5. Interprétation des figures

4.5.1. Généralités

Pour illustrer les équations 17 (a, b, c) et 20 (a, b, c), et faciliter l'emploi des représentations graphiques, les paramètres ont été choisis comme indiqués:

$$V = 1 \text{ noeud}$$

$$\Delta l = 0,1 \text{ km/min}$$

$$\Delta \delta = 0,1^\circ / \text{min}$$

$$0 \leq \psi - \theta_2 \leq 90^\circ \left(\frac{\pi}{2} \text{ radians} \right)$$

où ψ est la direction d'où vient le vent

et θ_2 l'azimut de l'origine du vecteur vent \vec{V} .

Comme toutes les mesures (d , α , θ) se rapportent à des intervalles de temps d'une minute, les dimensions de $\Delta\ell$, $\Delta\delta$, $\Delta\gamma$ sont donnés en "kilomètres (km)", resp. en "degrés d'angle ($^\circ$)" uniquement (fig. 9 à 18).

Les fonctions d'erreur ΔV_i et $\Delta\psi_i$ ($i = \ell, \delta, \gamma$) reportées en ordonnées sont indiquées en valeur absolue.

Les fonctions ΔV_ℓ et $\Delta\psi_\ell$ sont représentées dans les figures 9 à 10.

Les fonctions $\Delta\vec{V}_\delta$ (ΔV_δ ; $\Delta\psi_\delta$) et $\Delta\vec{V}_\gamma$ (ΔV_γ ; $\Delta\psi_\gamma$) figurent sous deux formes:

- La première, normalisée, pour laquelle $d_2 = 1$ km (fig. 11; 13; 15; 17)
- La seconde, rendue maximale, en choisissant d_2 tel que l'altitude ($h_2 = 31055$ m) de l'origine du vecteur vent corresponde au niveau de 10 mbar de l'atmosphère standard en remplaçant d_2 par sa valeur tirée de l'éq. 4 (fig. 12; 14; 16; 18).

Cette seconde forme fixe l'ampleur des erreurs $\Delta\vec{V}_\delta$ et $\Delta\vec{V}_\gamma$ maxima des vecteurs vent \vec{V} calculés au cours d'un radiovent.

4.5.2. Erreur due à $\Delta\ell = \Delta(d_2 - d_1)$ (fig. 9 et 10)

a) ΔV_ℓ (fig. 9)

En admettant, dans le cas le plus défavorable, que $\Delta\ell = 0,1$ km, il ressort de la figure 9 que l'erreur maximum est de

$$\Delta V_\ell = 3,2 \text{ noeuds}$$

$$\text{pour } \psi - \theta_2 = 0^\circ$$

$$\text{et } \alpha_2 = 0^\circ$$

quelles que soient la vitesse V du vent et la distance d_2 .

L'erreur ΔV_ℓ croît donc au fur et à mesure que le ballon s'éloigne de la base de lancement ($\alpha_2 \rightarrow 0^0$).

L'erreur ΔV_ℓ tend vers zéro quand $(\psi - \theta_2)$ tend vers 90^0 ou, en d'autres termes, quand ϕ (fig. 8) tend vers 90^0 (tableau II).

De toute façon

$$\Delta V_\ell \leq 3,2 \text{ noeuds}$$

pour $\Delta \ell = 0,1 \text{ km}$

b) $\Delta \psi_\ell$ (fig. 10).

L'erreur $\Delta \psi_\ell$ est inversement proportionnel à la vitesse du vent V ;

- elle est nulle pour

$$\psi - \theta_2 = 0^0$$

quels que soient la vitesse du vent ($V \geq 1$ noeud) et l'angle d'élévation α_2 .

- elle augmente quand l'argument $(\psi - \theta_2)$ augmente et quand l'angle d'élévation α_2 diminue, pour atteindre son maximum

$$\Delta V_\ell = 185,6^0 \quad (V = 1 \text{ noeud})$$

avec $\psi - \theta_2 = 90^0$ ($\phi - 90^0$, fig. 8).

Cette situation ne se produit en fait que par faible vent, sans courant bien défini; si le courant est faible mais bien établi, on retrouve peu à peu les situations a ou d du tableau II, selon que $\phi \rightarrow 0$ (le ballon-sonde s'éloigne de la base de lancement) ou que $\phi \rightarrow \pi$ (le ballon s'approche du zénith de la base de lancement).

4.5.3. Erreur due à $\Delta\delta = \Delta(\alpha_2 - \alpha_1)$ (fig. 11 à 14)

Les figures 11 et 13 représentent les erreurs normalisées par rapport à l'unité de distance $d_2 = 1$ km.

Les figures 12 et 14 représentent en revanche les erreurs maximales $\Delta\vec{V}_\delta$, puisque la distance d_2 en fonction de l'angle d'élévation α_2 correspond aux positions P_2 située à l'altitude de 31055 m du niveau de 10 mbar de l'atmosphère standard. Les distances relatives à des niveaux standard inférieurs à 10 mbar sont toutes plus courtes.

a) ΔV_δ (fig. 11 et 12)

La figure 11 montre que l'erreur maximale se manifeste pour des angles d'élévation α_2 élevés et pour un argument $(\psi - \theta_2) = 0^\circ$ ou 180° .

Ces conditions sont réalisées quand $\phi = 0^\circ$ ou 180° , donc toutes les fois que le ballon-sonde s'éloigne de la base de lancement (situation a) ou s'en approche (situation d) (tableau II).

L'erreur diminue quand l'argument $(\psi - \theta_2)$ augmente, donc quand $\phi \rightarrow 90^\circ$, ou quand $\alpha_2 \rightarrow 0^\circ$.

De la figure 12 il ressort que l'erreur ΔV_δ^{\max} est pratiquement constante dans le domaine:

$$90^\circ \leq \alpha_2 \leq 20^\circ$$

pour un argument

$$\psi - \theta_2 \text{ constant.}$$

L'erreur tend ensuite rapidement vers zéro, en même temps que l'angle d'élévation α_2 .

En admettant une erreur:

$$\Delta\delta = \Delta (\alpha_2 - \alpha_1) = 0,4^{\circ} (\pm 0,2^{\circ})$$

et un argument

$$\psi - \theta_2 = 0^{\circ}$$

on obtient

$$\Delta V_{\delta}^{\max} = 7 \text{ noeuds } (\alpha_2 \approx 90^{\circ})$$

b) $\Delta\psi_{\delta}$ (fig. 13 et 14)

La figure 13 montre que l'erreur est maximale dans le cas où l'argument $(\psi - \theta_2)$ et l'angle d'élévation α_2 sont égaux à 90° . En d'autres termes ce sont dans les situations à faible vent, où le ballon-sonde reste dans le voisinage du zénith de la base de lancement, que les erreurs $\Delta\delta$ joueront un rôle important sur la direction ψ du vent.

Dans un régime de vent bien établi, le ballon s'éloignera rapidement de la base de lancement, l'argument $(\psi - \theta_2)$ restera voisin de 0° et l'erreur sera réduite au minimum.

De la figure 14 il ressort que l'erreur $\Delta\psi_{\delta}^{\max}$ est pratiquement constante dans les conditions

$$90^{\circ} \leq \alpha_2 \leq 20^{\circ}$$

et un argument

$$\psi - \theta_2 \text{ constant.}$$

L'erreur tend ensuite rapidement vers zéro, en même temps que l'angle d'élévation α_2 .

En admettant comme précédemment

$$\Delta\delta = \Delta (\alpha_2 - \alpha_1) = 0,4^0 (\pm 0,2^0),$$

on constate que, si le ballon-sonde reste dans le voisinage du zénith de la base de lancement, la direction du vent est indéterminée (vent faible). Si le courant est bien établi, $V \gg 1$ noeud, $(\psi - \theta_2) \rightarrow 0^0$, et $\alpha_2 \rightarrow 0^0$, l'erreur diminue rapidement.

4.5.4. Erreur due à $\Delta\gamma = \Delta (\theta_2 - \theta_1)$ (fig. 15 à 18)

a) ΔV_γ (fig. 15 à 16)

La figure 15 montre que l'erreur ΔV_γ croît quand l'angle d'élévation α_2 diminue et que l'argument $(\psi - \theta_2)$ augmente.

Dans un régime de vent bien établi, l'argument $\psi - \theta_2$ est voisin de zéro, par conséquent l'erreur est également voisine de zéro. Dans le cas où le ballon-sonde reste dans le voisinage du zénith de la station (angles d'élévation α_2 élevés), l'erreur ΔV_γ reste petite.

La figure 16 montre que quel que soit l'argument $90^0 \geq \psi - \theta_2 \geq 0^0$, l'erreur maximale est :

$$\Delta V_\gamma^{\max} \leq 3 \text{ noeuds pour } 90^0 \leq \alpha_2 \leq 30^0$$

et

$$\Delta V_\gamma^{\max} \leq 35 \text{ noeuds pour } 30^0 \geq \alpha_2 \geq 0^0.$$

Dans un régime de vent bien établi, l'argument $(\psi - \theta_2)$ est voisin de zéro, notamment quand l'angle d'élévation $\alpha_2 \approx 0^0$. Il en résulte que ΔV_γ^{\max} n'est que de quelques noeuds.

b) $\Delta\psi_\gamma$ (fig. 17 et 18)

La figure 17 montre que l'erreur $\Delta\gamma = \Delta(\theta_2 - \theta_1)$ joue un rôle important sur la précision de la direction du vent, notamment dans un courant bien établi, c'est-à-dire quand l'angle d'élévation α_2 tend vers zéro et que l'argument $(\psi - \theta_2)$ est voisin de zéro (situations a ou d, tableau II).

Si le ballon se trouve dans le voisinage du zénith de la base de lancement l'erreur est moindre.

De la figure 18 il ressort que le cas le plus défavorable se présente chaque fois qu'un régime de vent fort règne dans la troposphère (le ballon-sonde s'éloigne de la base de lancement, $\alpha_2 \rightarrow 0$), et que le vent diminue d'intensité dans la tropopause et la stratosphère en conservant la même direction que le courant qui règne dans la troposphère.

L'erreur devient magistrale quand le vent est faible, à tel point que la direction du vent ne peut plus être définie.

Par exemple, si $\alpha_2 = 10^\circ$, $V = 1$ noeud, $(\psi - \theta_2) = 0^\circ$, $\Delta\gamma = 0,1^\circ$,
 $\Delta\psi_\gamma^{\max} = 560^\circ$, mais si $V = 10$ noeuds, $\Delta\psi_\gamma^{\max} = 56^\circ$ et si $V = 50$ noeuds,
 $\Delta\psi_\gamma^{\max} = 11^\circ$.

Pour diminuer l'erreur $\Delta\psi_\gamma$ dans des limites convenables, le seul remède consiste à améliorer autant que possible la mesure de l'azimut. En fait, la mesure de l'azimut est plus précise que la mesure des angles d'élévations ($20^\circ \geq \alpha_2 \geq 0^\circ$), cette dernière étant altérée par des phénomènes de réflexion au sol.

D'une manière générale, on peut affirmer que

$$\Delta\gamma = 0,2^\circ \quad \text{pour} \quad 90^\circ \geq \gamma \geq 20^\circ$$

et

$$\Delta\gamma = 0,3^\circ \quad \text{pour} \quad 20^\circ \geq \gamma \geq 12^\circ.$$

* * * *

5. Conclusion

Le vecteur vent \vec{V} est défini par l'altitude h de son origine, sa vitesse V (module) et sa direction ψ (fig. 1 et 8).

5.1. Altitude h du vecteur vent

h est une fonction de la distance d et de l'angle d'élévation α ($h = f(d; \alpha)$). Tandis que l'erreur d'altitude Δh_d provoquée par une mesure imprécise de la distance reste inférieure à 100 mètres (100 m au zénith, éq. 11, fig. 6), l'erreur Δh_α résultant d'une mesure imprécise de l'angle d'élévation α est importante et l'est d'autant plus lorsque l'angle d'élévation α est petit (éq. 10, fig. 5). A l'aide d'une représentation graphique de l'altitude en fonction du temps (minute) sur un traceur de courbes XY l'opérateur peut corriger dans une certaine mesure les fluctuations d'altitude.

En général, calculer l'altitude h avec des angles d'élévations α inférieurs à 12° relève de l'utopie (distance de 150 km à l'altitude de 31 km, fig. 4), tant l'erreur devient importante.

5.2. Module V du vecteur vent

La vitesse du vent V n'est relativement que peu affectée par les erreurs:

$$\Delta \ell; \Delta \delta; \Delta \gamma .$$

L'erreur $\Delta \vec{V}$ est indépendante de la vitesse du vent V .

Dans le cas le plus défavorable les erreurs ΔV_ℓ , ΔV_δ , ΔV_γ s'ajoutent.

Examinée au niveau de 10 mbar, la somme des erreurs $\Delta V = \sum_i \Delta V_i$ ($i = \ell, \delta, \gamma$) fixe l'ordre de grandeur de l'erreur maximale.

Le tableau III résume les erreurs maximales ΔV_i et leur somme en fonction de l'argument $(\psi - \theta_2)$ (niveau de 10 mbar : 31055 m).

TABLEAU III

Erreurs maximales ΔV_i^{\max} (noeuds)

calculées pour l'altitude de 31055m (10 mbar)

$\psi - \theta_2$	α_2	Δl km	ΔV_l^{\max} (fig.9)	$\Delta \delta^0$	ΔV_δ^{\max} (fig.12)	$\Delta \gamma^0$	ΔV_γ^{\max} (fig.16)	$\Delta V^{\max} = \sum \Delta V_i$ $i = l, \delta, \gamma$
0°	$90^0 \geq \alpha_2 \geq 20^0$	0,08	2	0,4	7	0,2	0	9
	$20^0 \geq \alpha_2 \geq 12^0$		3	0,8	14	0,3	0	17
45°	$90^0 \geq \alpha_2 \geq 20^0$	0,08	2	0,4	5	0,2	7	14
	$20^0 \geq \alpha_2 \geq 12^0$		2	0,8	10	0,3	17	29
90°	$90^0 \geq \alpha_2 \geq 20^0$	0,08	0	0,4	0	0,2	18	18
	$20^0 \geq \alpha_2 \geq 12^0$		0	0,8	0	0,3	24	24

A l'aide du tracé de la vitesse du vent sur le traceur de courbes XY en fonction du temps (minute), les fluctuations apparaissent dès le passage de la tropopause et sont effectivement de l'ordre de grandeur indiqué dans le tableau II. L'opérateur peut corriger les fluctuations lors de l'établissement du message vent.

5.3. Azimut ψ du vecteur vent

L'erreur $\Delta\psi$ du vecteur vent \vec{V} est inversement proportionnelle à la vitesse. Donc plus la vitesse est élevée, moins les erreurs de mesure $\Delta\ell$, $\Delta\delta$, $\Delta\gamma$ auront d'effet sur le calcul de la direction ψ du vent. Afin de faciliter l'interprétation des figures 10, 13, 14, 17, 18, la vitesse V du vent a été choisie égale à 1 noeud.

Le tableau IV donne une idée des erreurs maxima d'angle $\Delta\psi_i$ pour un vent de 20 noeuds (niveau de 10 mbar: 31055m). Le tracé de la direction du vent en fonction du temps (minute) permet à l'opérateur de corriger dans une certaine mesure, les erreurs importantes qui se produisent quand les angles d'élévations α_2 sont petits.

TABLEAU IV

Erreurs maximales $\Delta\psi_i^{0max}$
calculées pour l'altitude de 31055m (10 mbar)
Vitesse du vent $V = 20$ noeuds

$\psi - \theta_2$ ($^\circ$)	α_2	$\Delta\ell$ km	$\Delta\psi_\ell^{0max}$ (fig.10)	$\Delta\delta^0$	$\Delta\psi_\delta^{0max}$ (fig.14)	$\Delta\gamma^0$	$\Delta\psi_\gamma^{0max}$ (fig.18)	$\Delta\psi^{0max} = \sum_i \psi_i$ $i = \ell, \delta, \gamma$
0	$90^\circ \geq \alpha_2 \geq 20^\circ$	0,08	0	0,4	0	0,2	27	27
	$20^\circ \geq \alpha_2 \geq 12^\circ$		0	0,8	0	0,3	66	66
45	$90^\circ \geq \alpha_2 \geq 20^\circ$	0,08	5	0,4	14	0,2	19	38
	$20^\circ \geq \alpha_2 \geq 12^\circ$		5	0,8	27	0,3	51	83
90	$90^\circ \geq \alpha_2 \geq 20^\circ$	0,08	7	0,4	20	0,2	0	27
	$20^\circ \geq \alpha_2 \geq 12^\circ$		7	0,8	38	0,3	0	45

6. Références

- 1) Tables Météorologiques Internationales OMM - No 188 TP.74 préparées par S. Letestu - Table 3.1-4.
- 2) Manuel de l'Atmosphère Type OACI élargie jusqu'à 32 kilomètres, DOC 7488/2, deuxième Edition 1964.
- 3) Influences des erreurs de température et de pression sur la détermination du géopotentiel entre deux surfaces à pression constante et sur l'altitude d'un corps spatial dans l'atmosphère (Radiosondes); Rapport de travail de l'Institut suisse de météorologie, No 65, novembre 1976 par Jean Rieker.

* * * *

Adresse de l'auteur:

Dr. Jean Rieker, Station aérologique, Les Invuарdes, 1530 Payerne

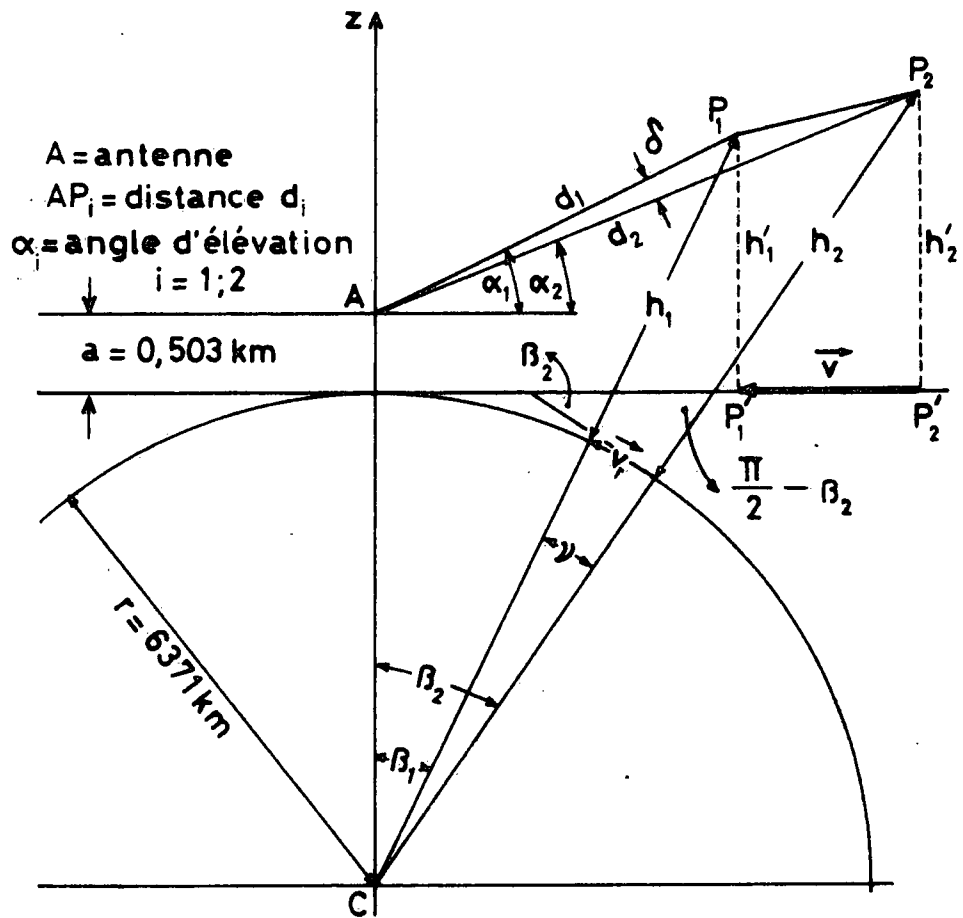
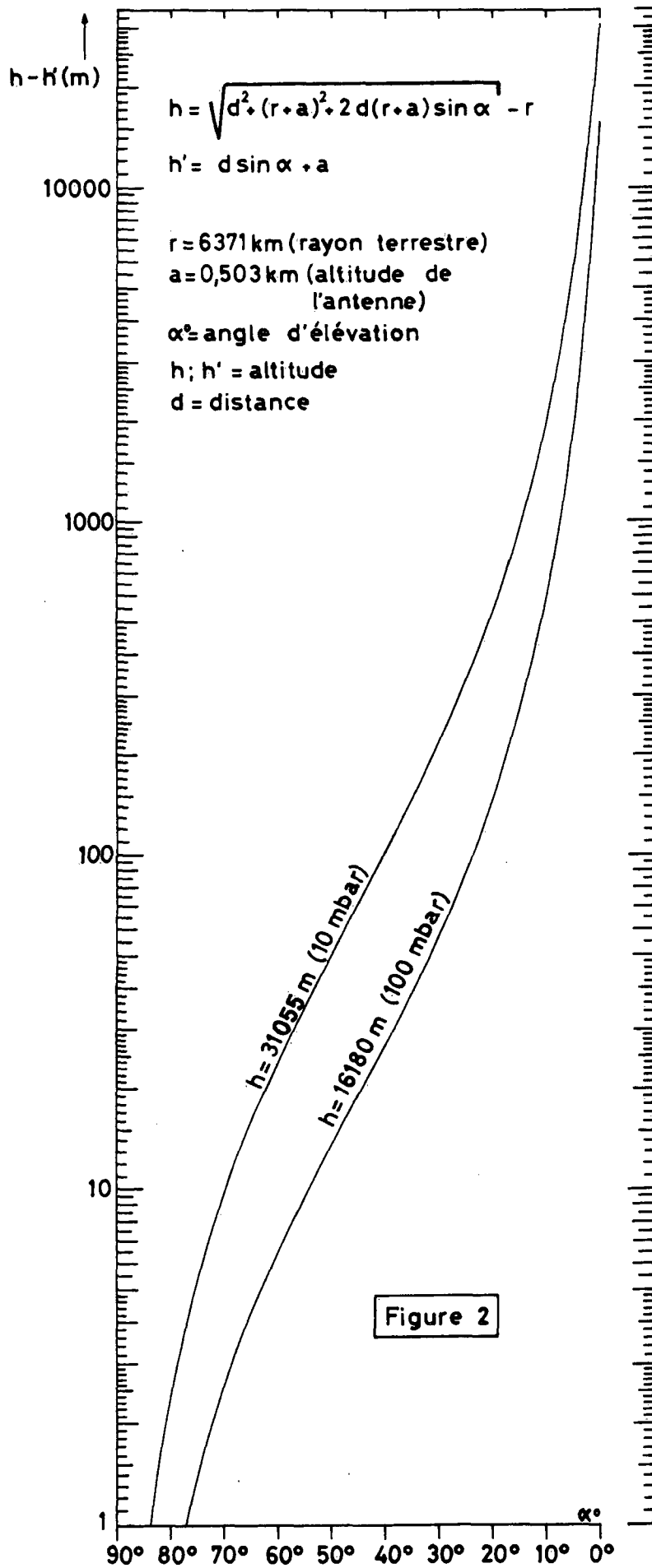


Figure 1



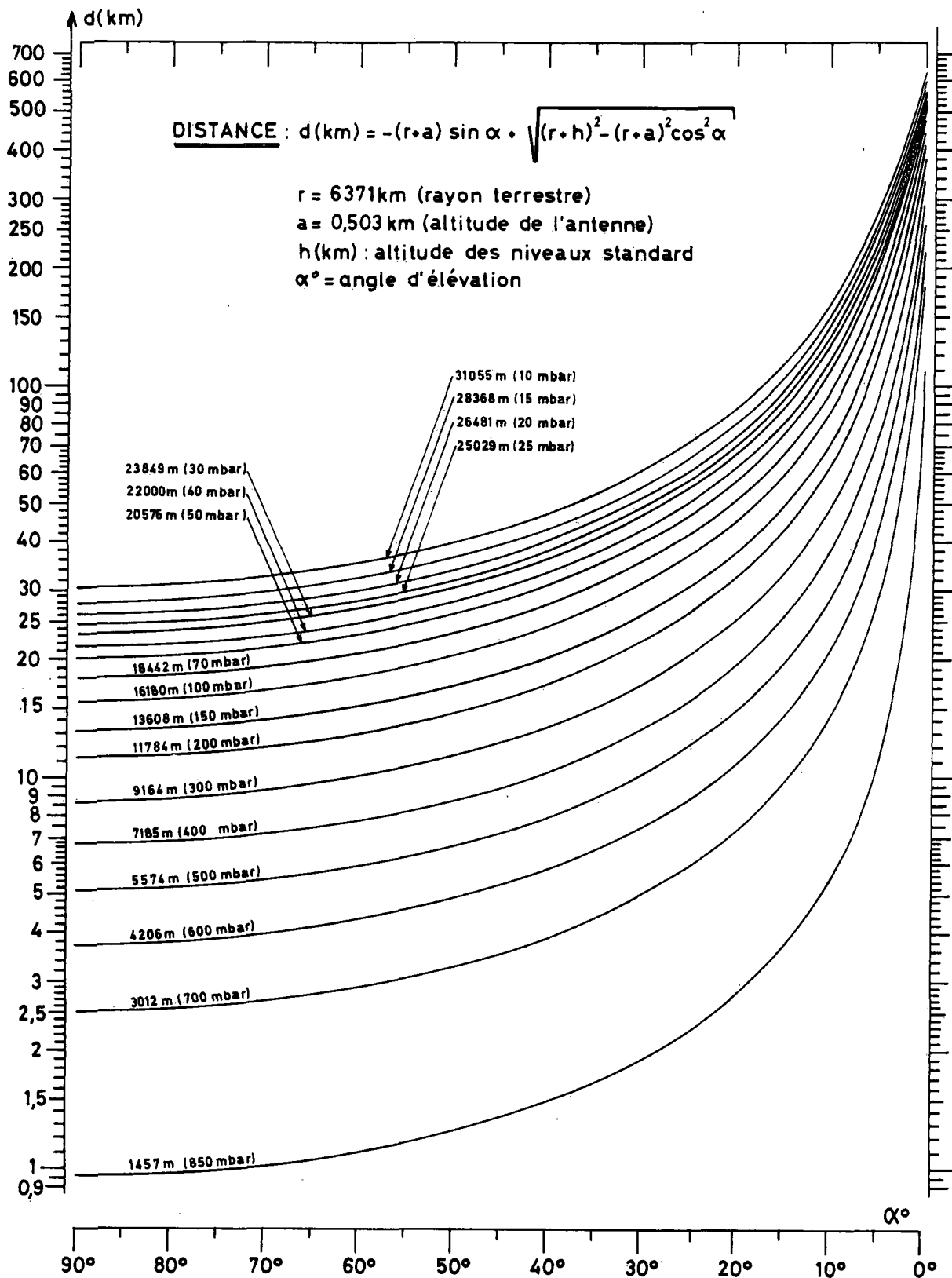


Figure 3

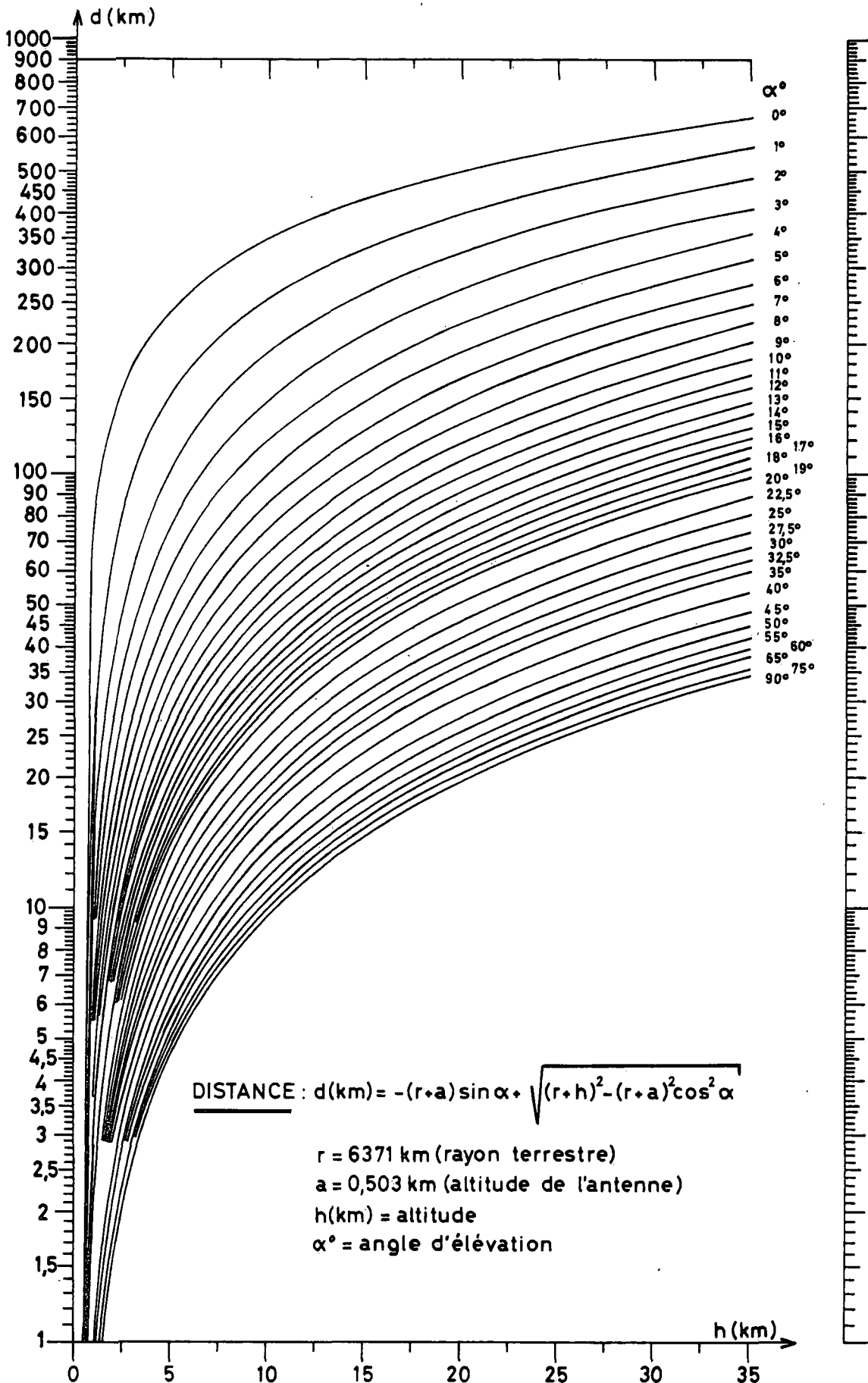


Figure 4

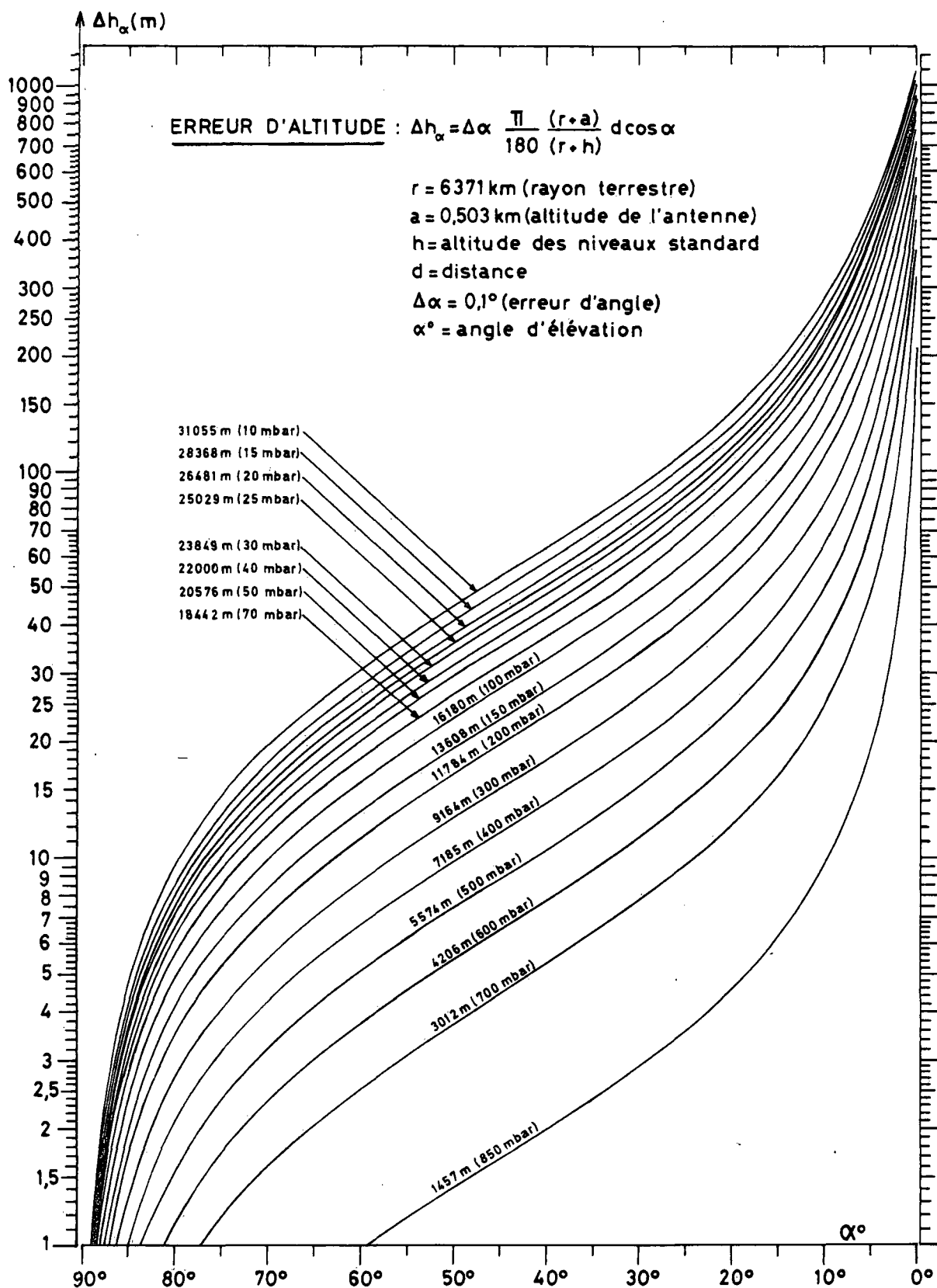


Figure 5

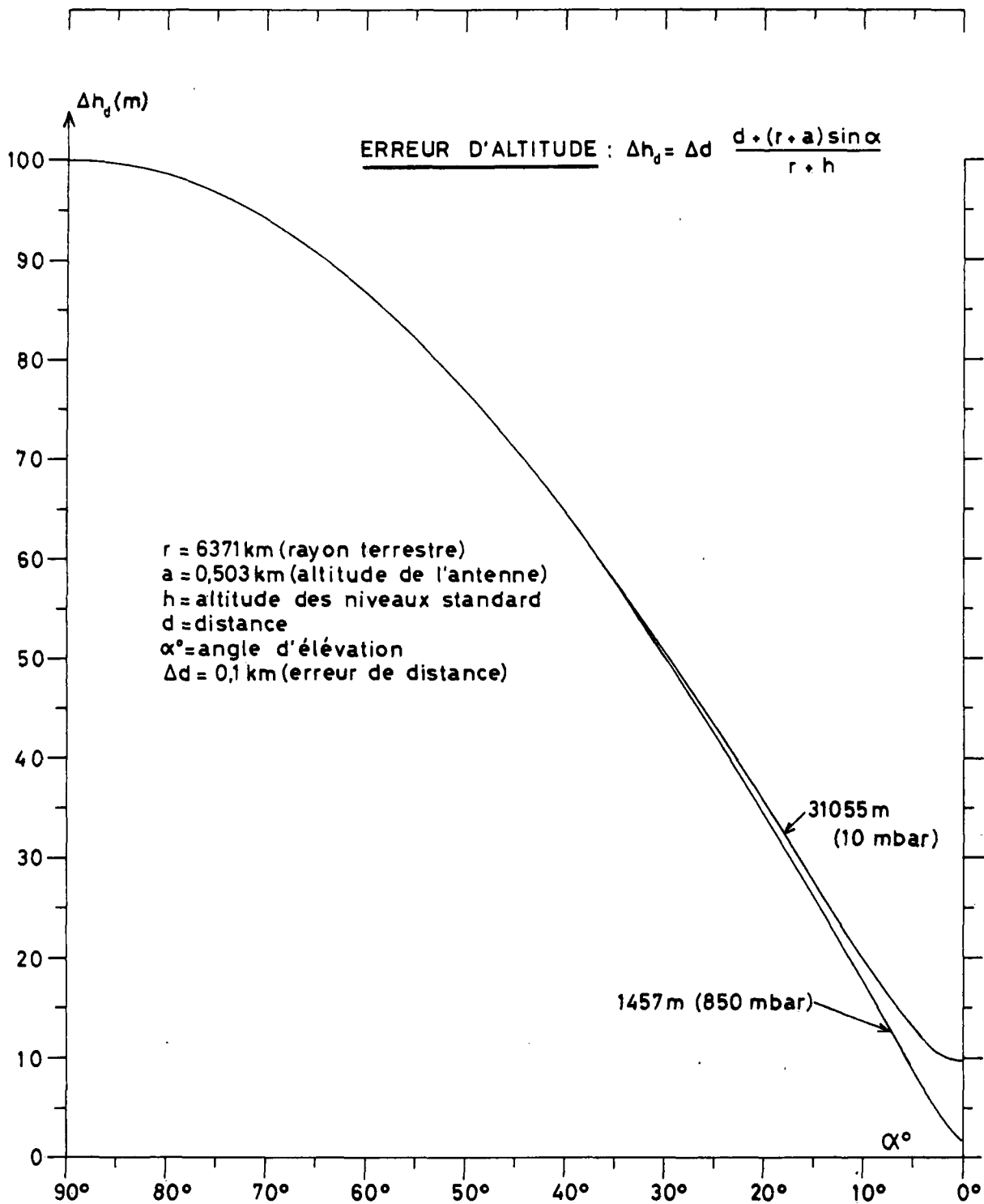


Figure 6

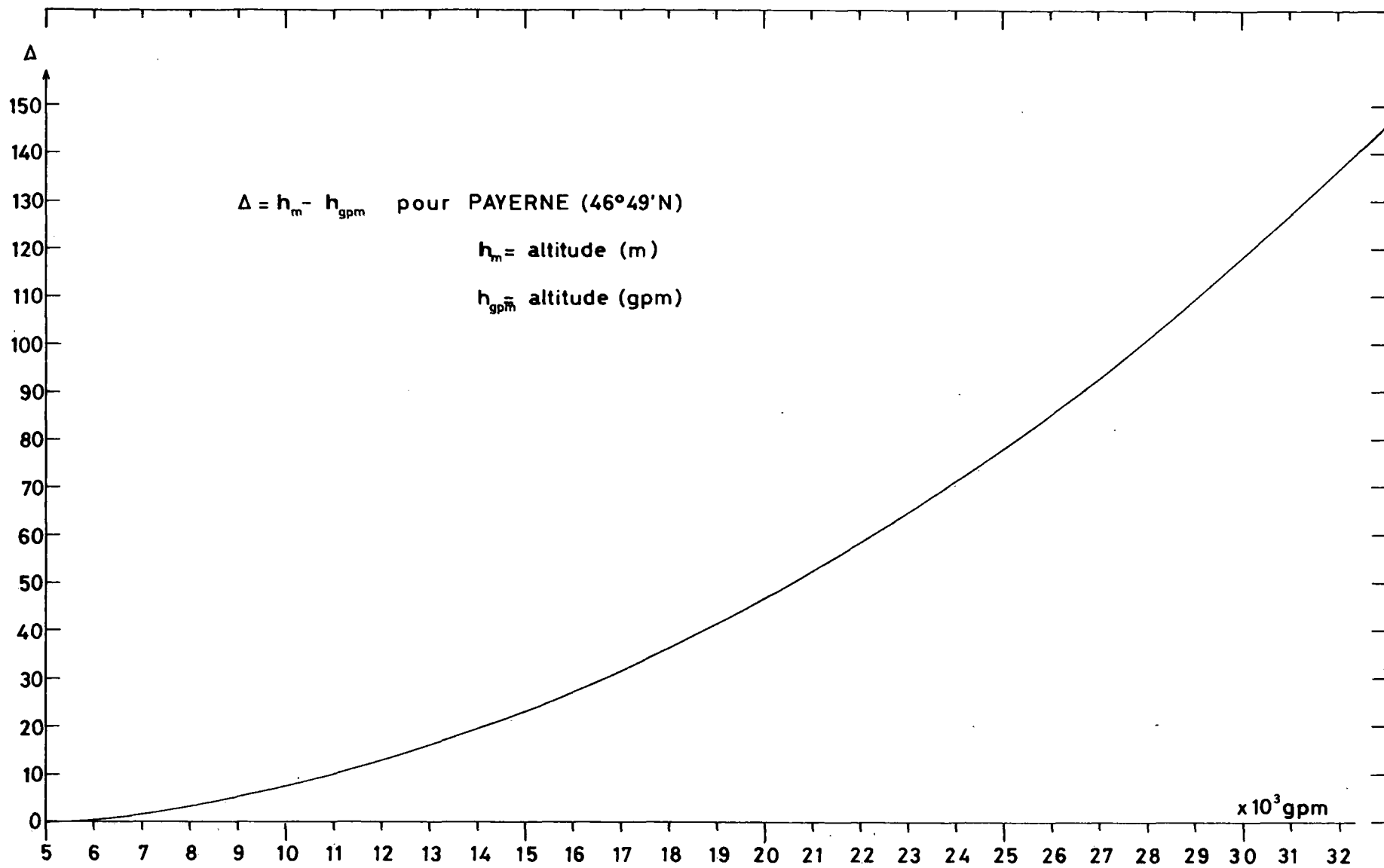


Figure 7

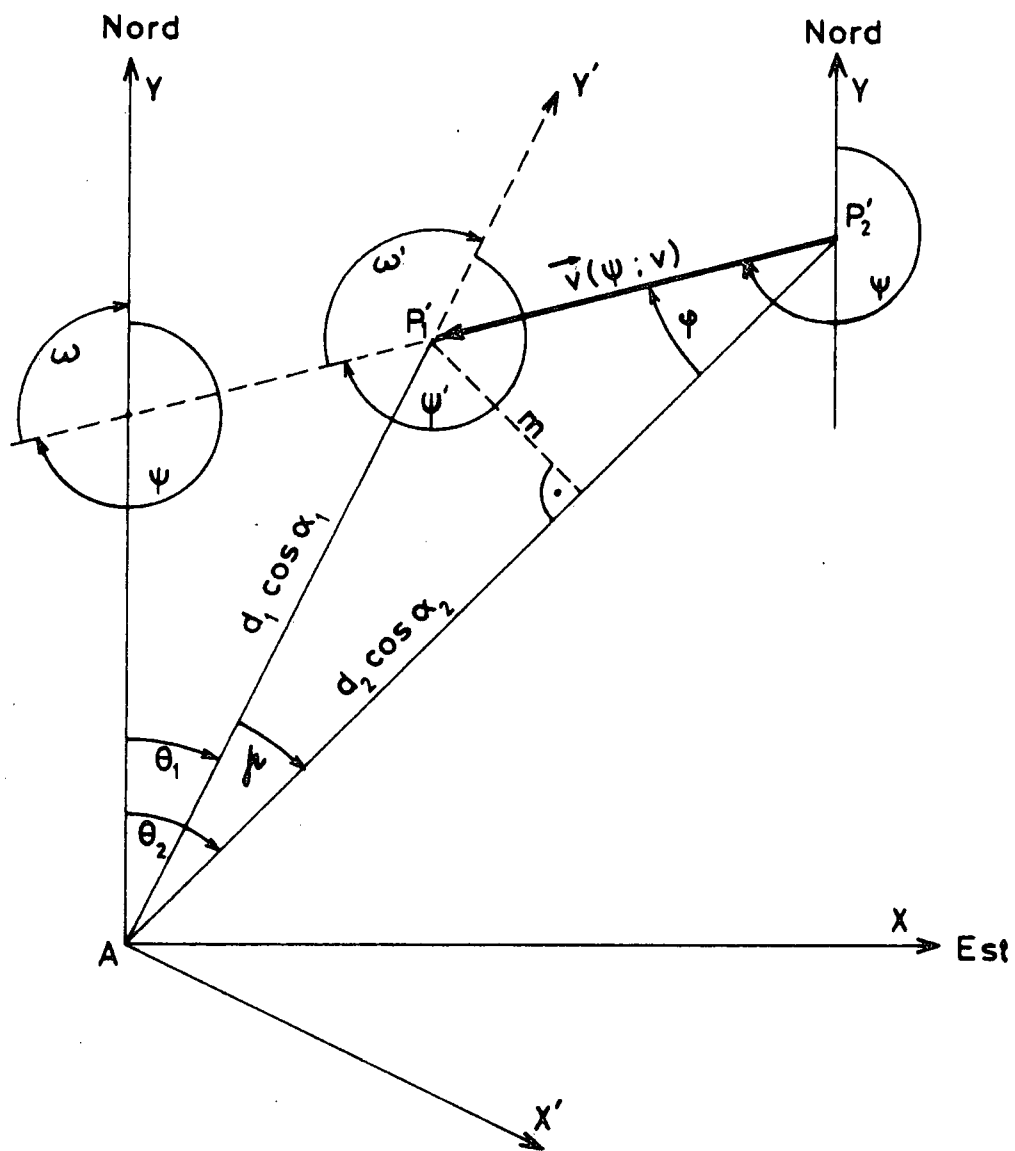


Figure 8

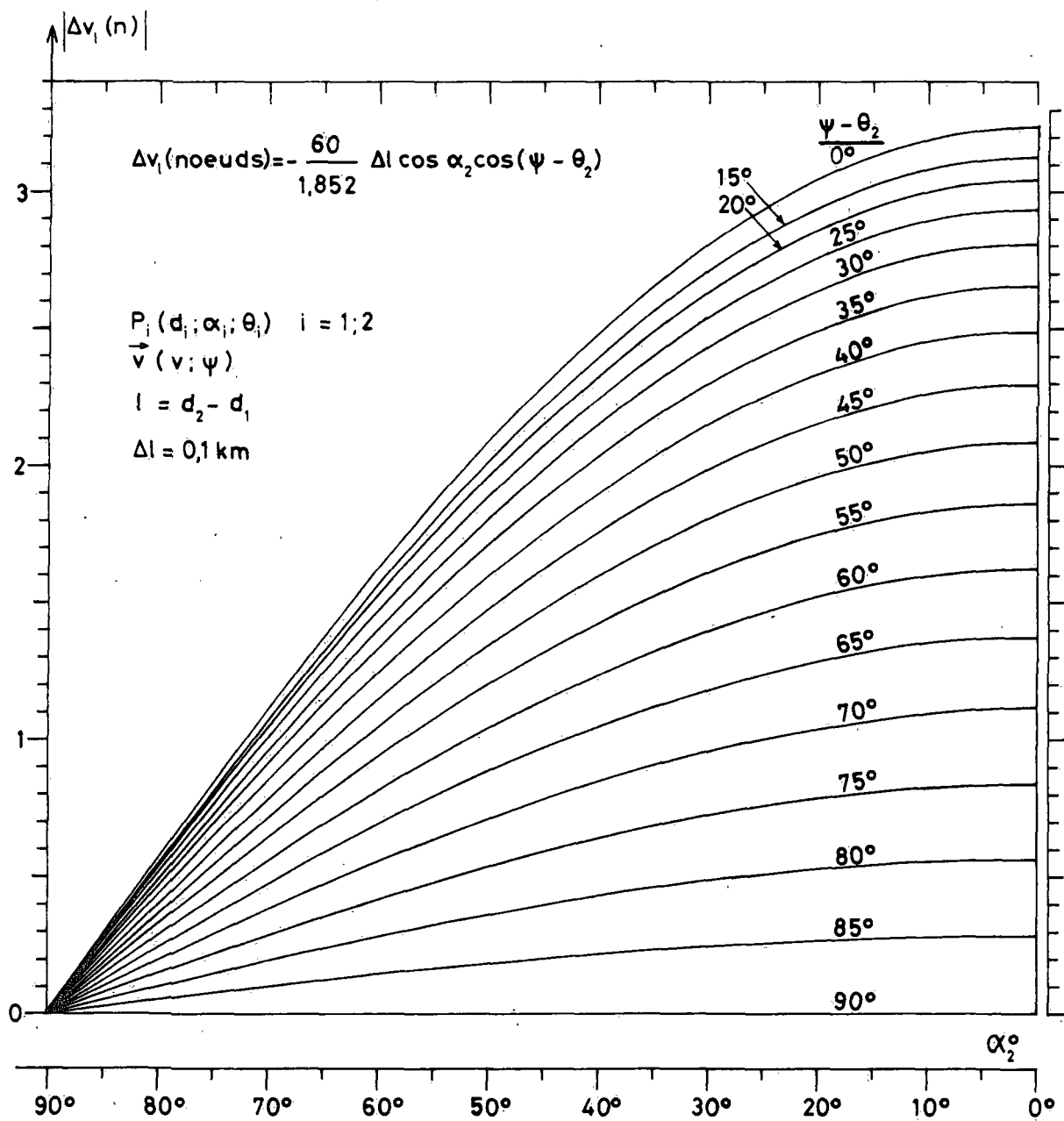


Figure 9

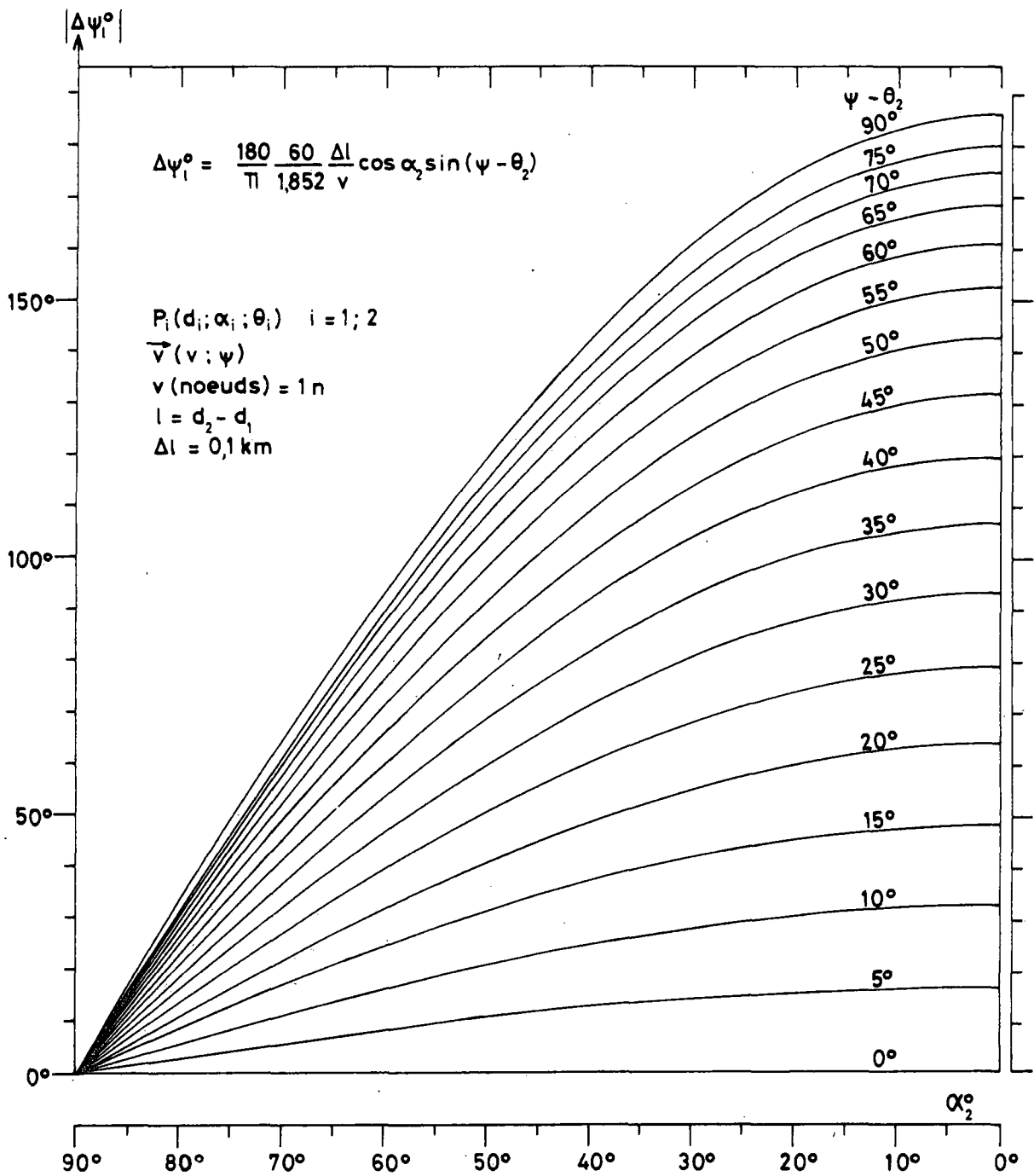


Figure 10

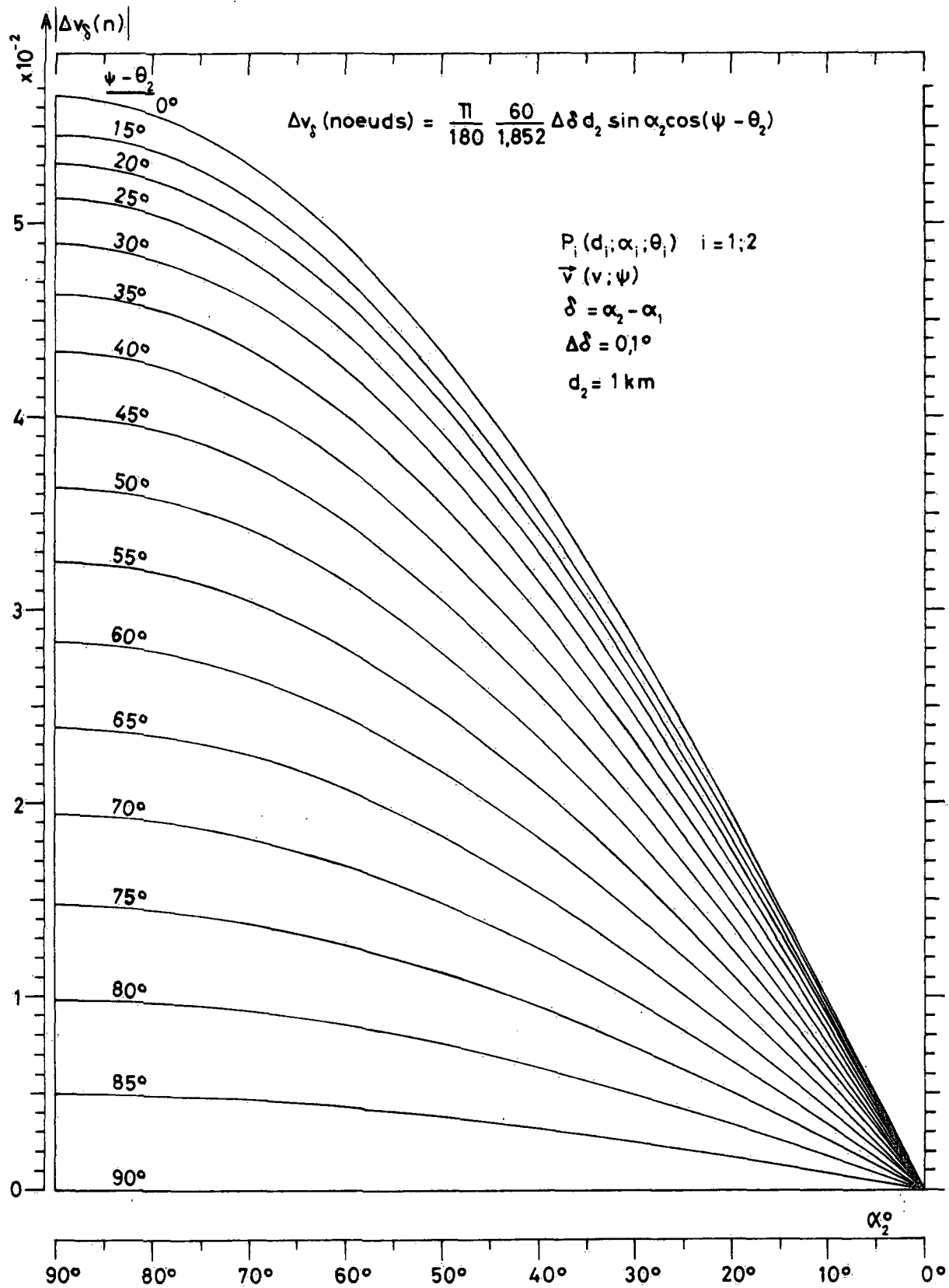


Figure 11

$$\Delta v_{\delta}^{\max}(\text{noeuds}) = \frac{\pi}{180} \frac{60}{1,852} \Delta \delta d_2 \sin \alpha_2 \cos(\psi - \theta_2)$$

$$P_i(d_i; \alpha_i; \theta_i) \quad i = 1; 2$$

$$\vec{v}(v; \psi)$$

$$\delta = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\Delta \delta = 0,1^{\circ}$$

$$d_2 = f(h)$$

$$h = 31,055 \text{ km (10 mbar)}$$

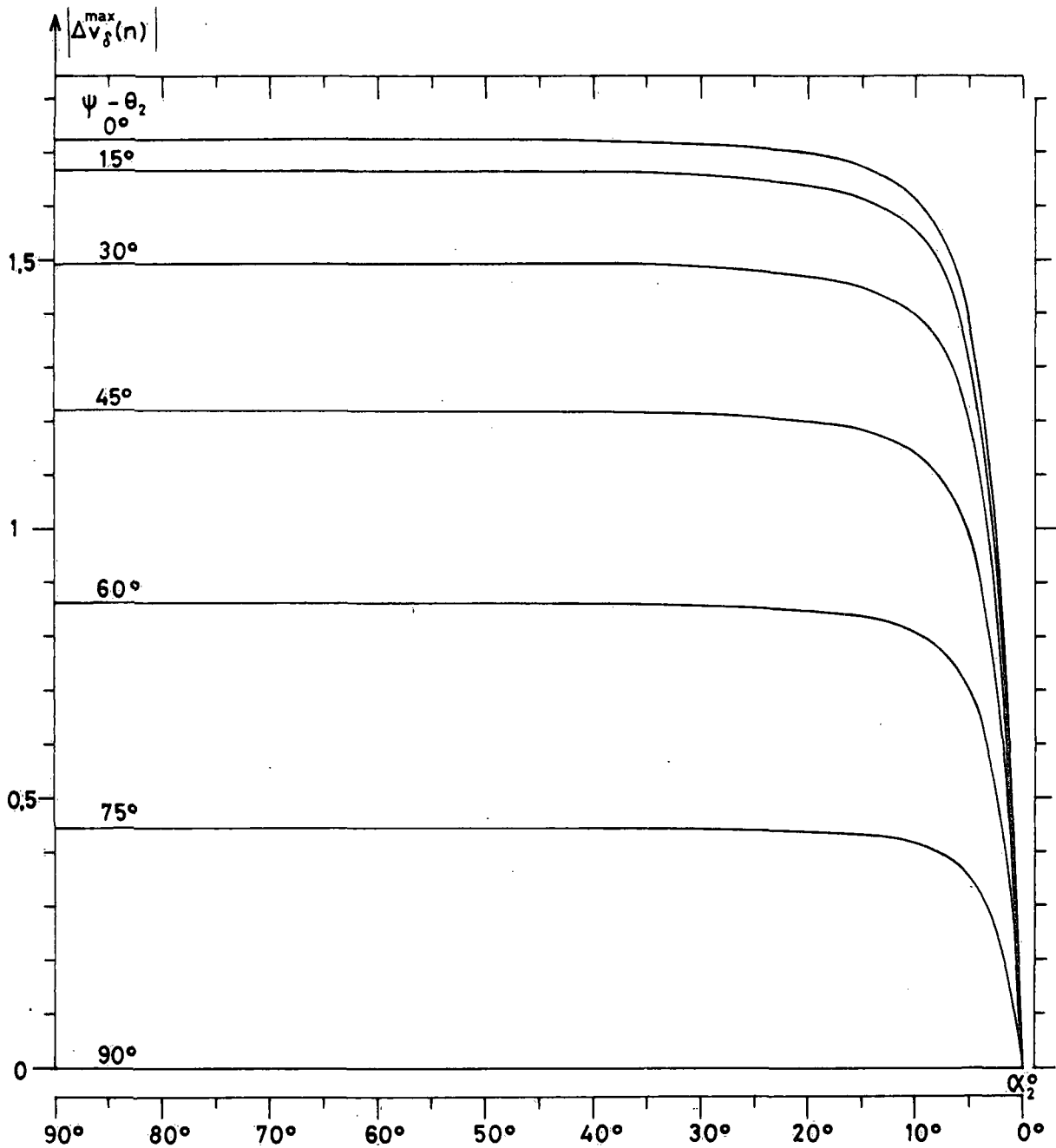


Figure 12

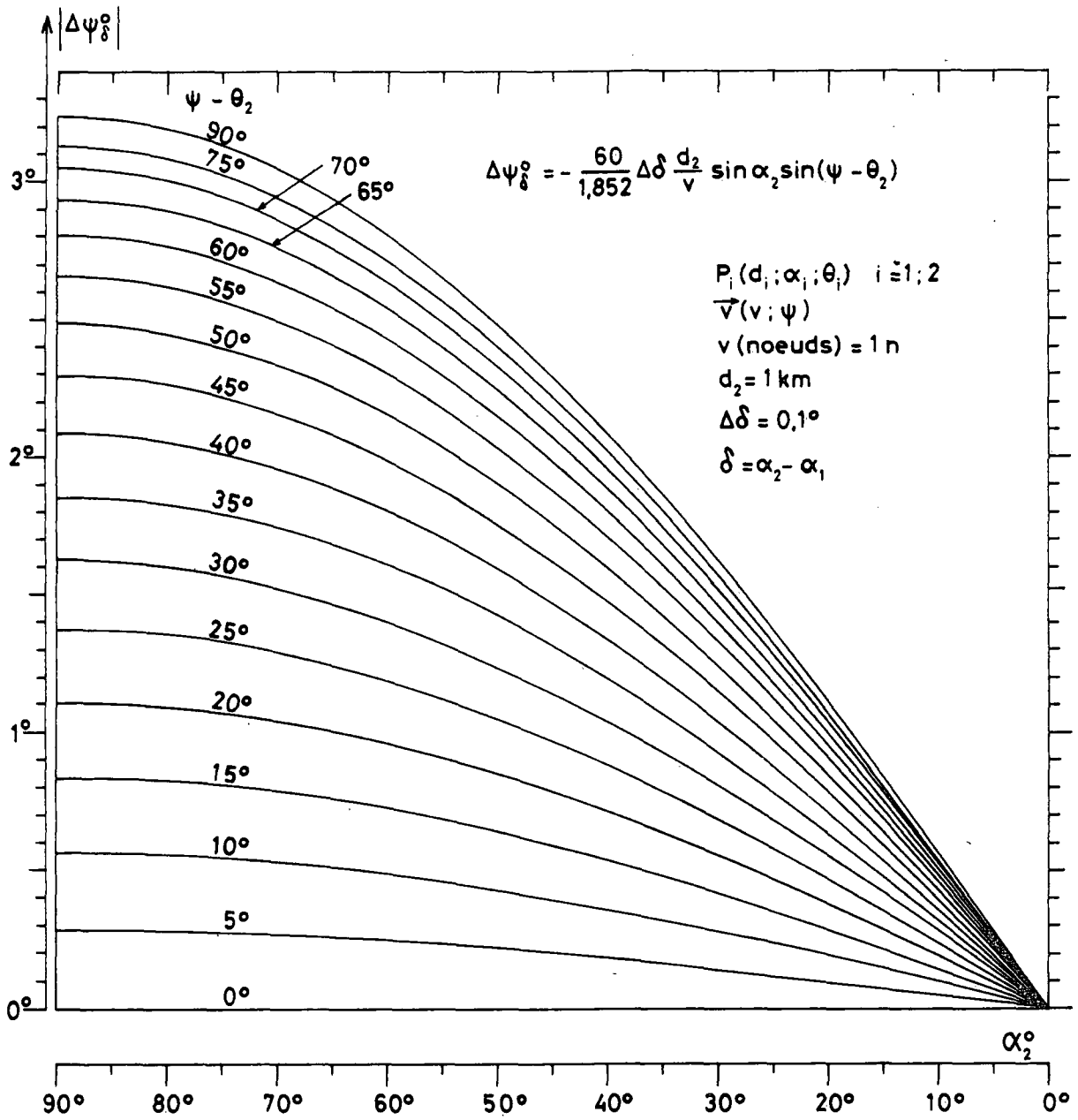


Figure 13

$$\Delta\psi_{\delta}^{\circ\max} = -\frac{60}{1,852} \Delta\delta \frac{d_2}{v} \sin\alpha_2 \sin(\psi - \theta_2)$$

$$P_i(d_i; \alpha_i; \theta_i) \quad i=1; 2$$

$$\nabla(v; \psi)$$

$$v(\text{noeuds}) = 1 \text{ n}$$

$$\delta = \alpha_2 - \alpha_1 \quad \Delta\delta = 0,1^\circ$$

$$d_2 = f(h) \quad h = 31,055 \text{ km (10 mbar)}$$

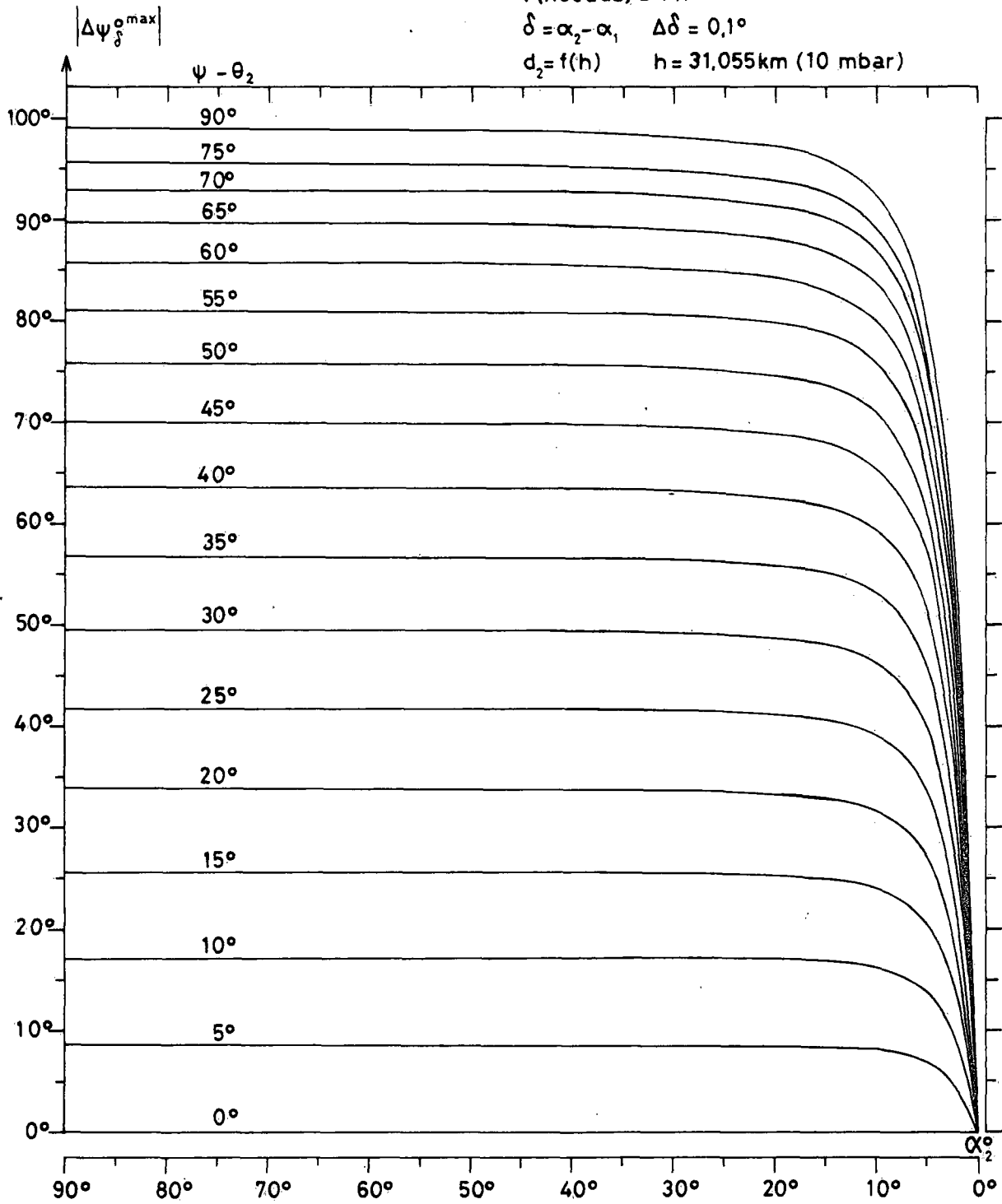


Figure 14

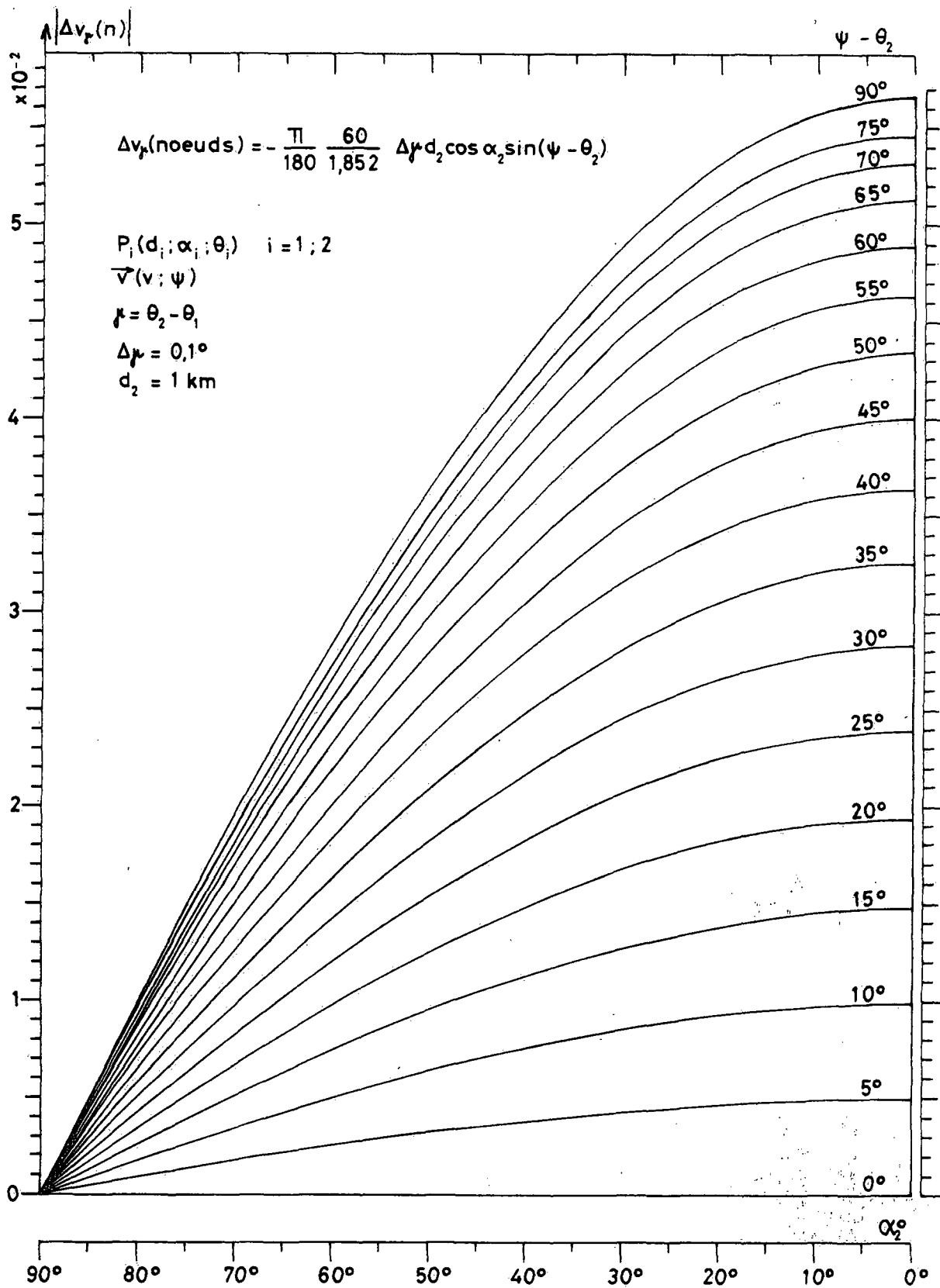


Figure 15

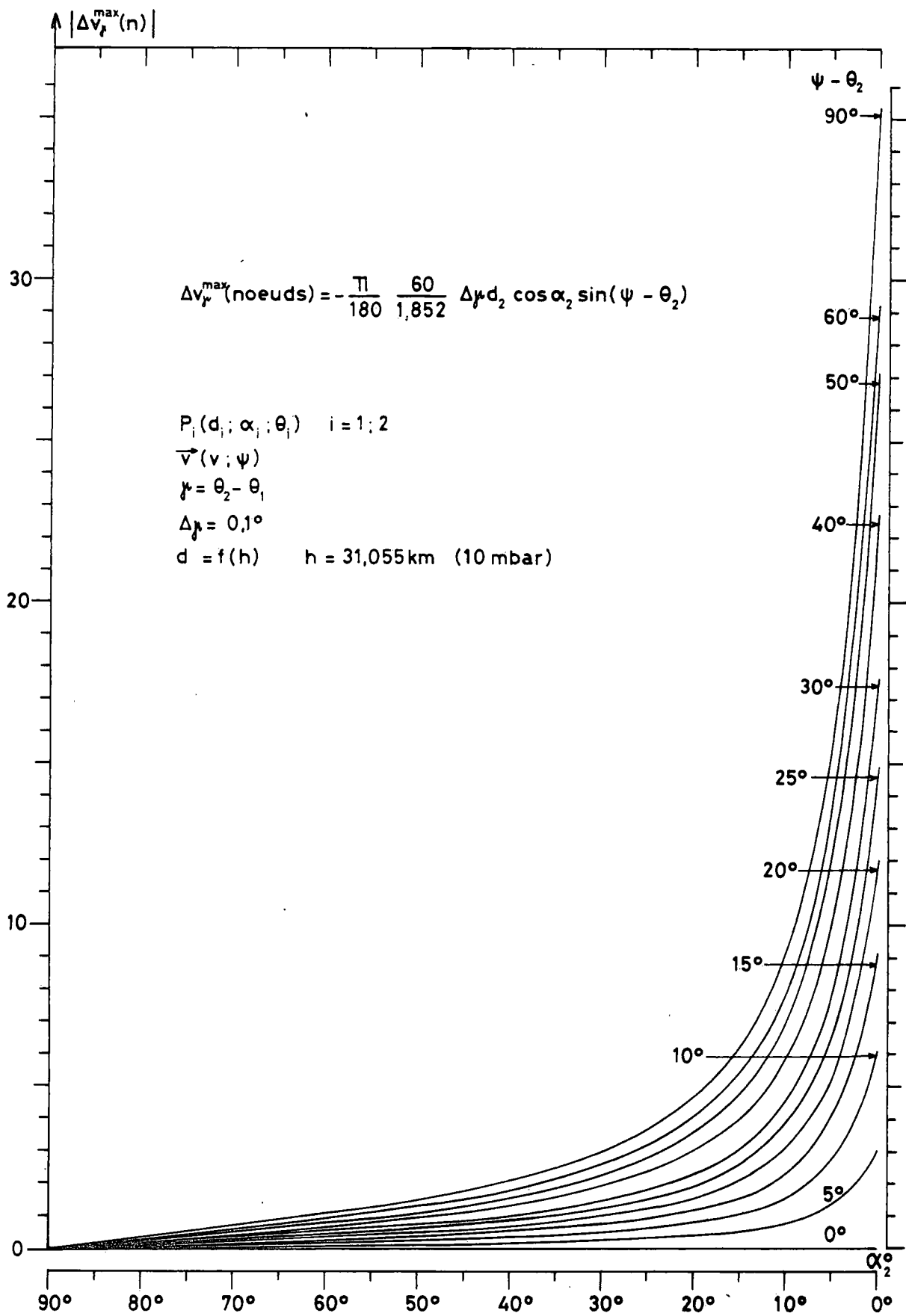


Figure 16

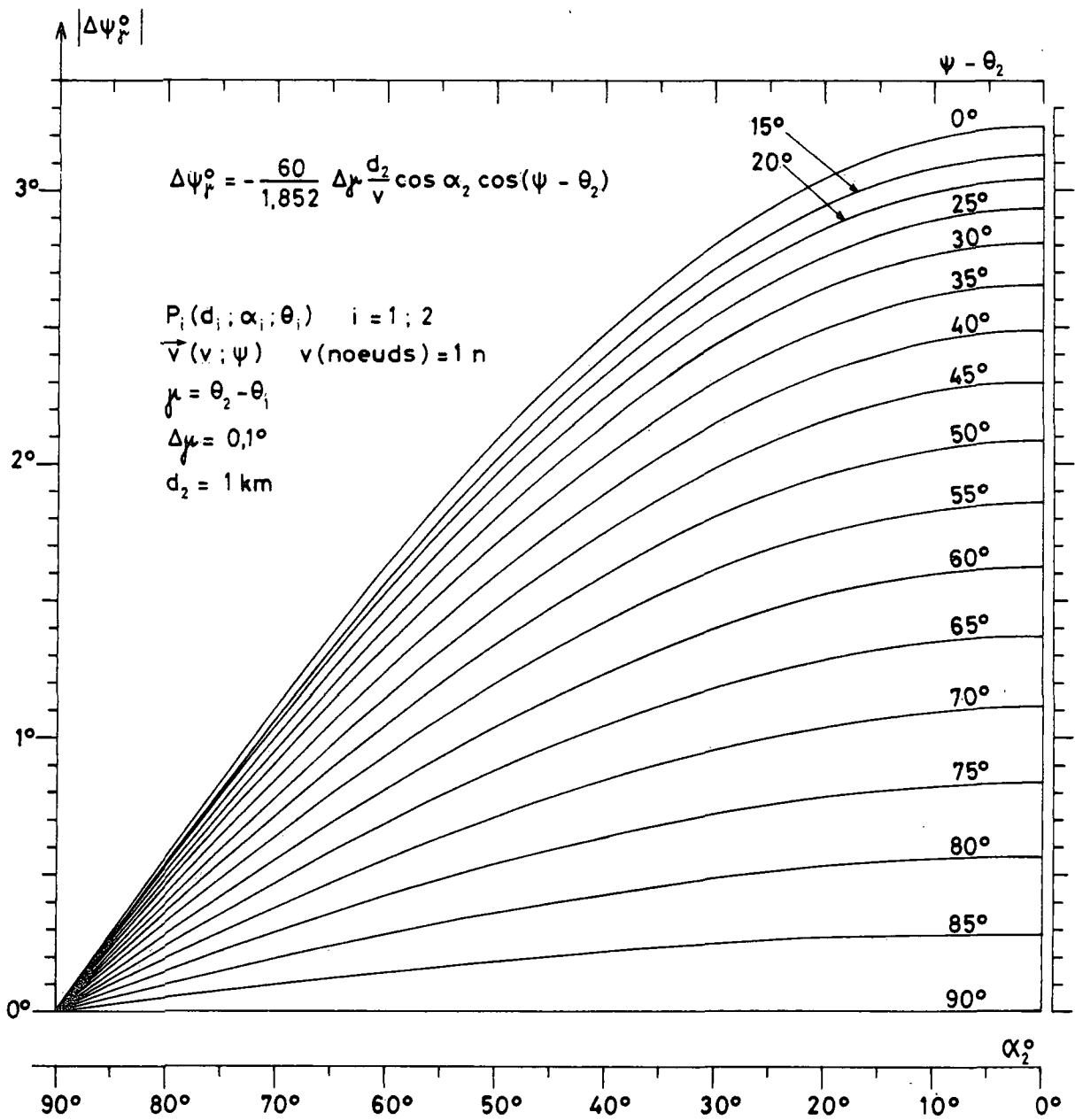


Figure 17

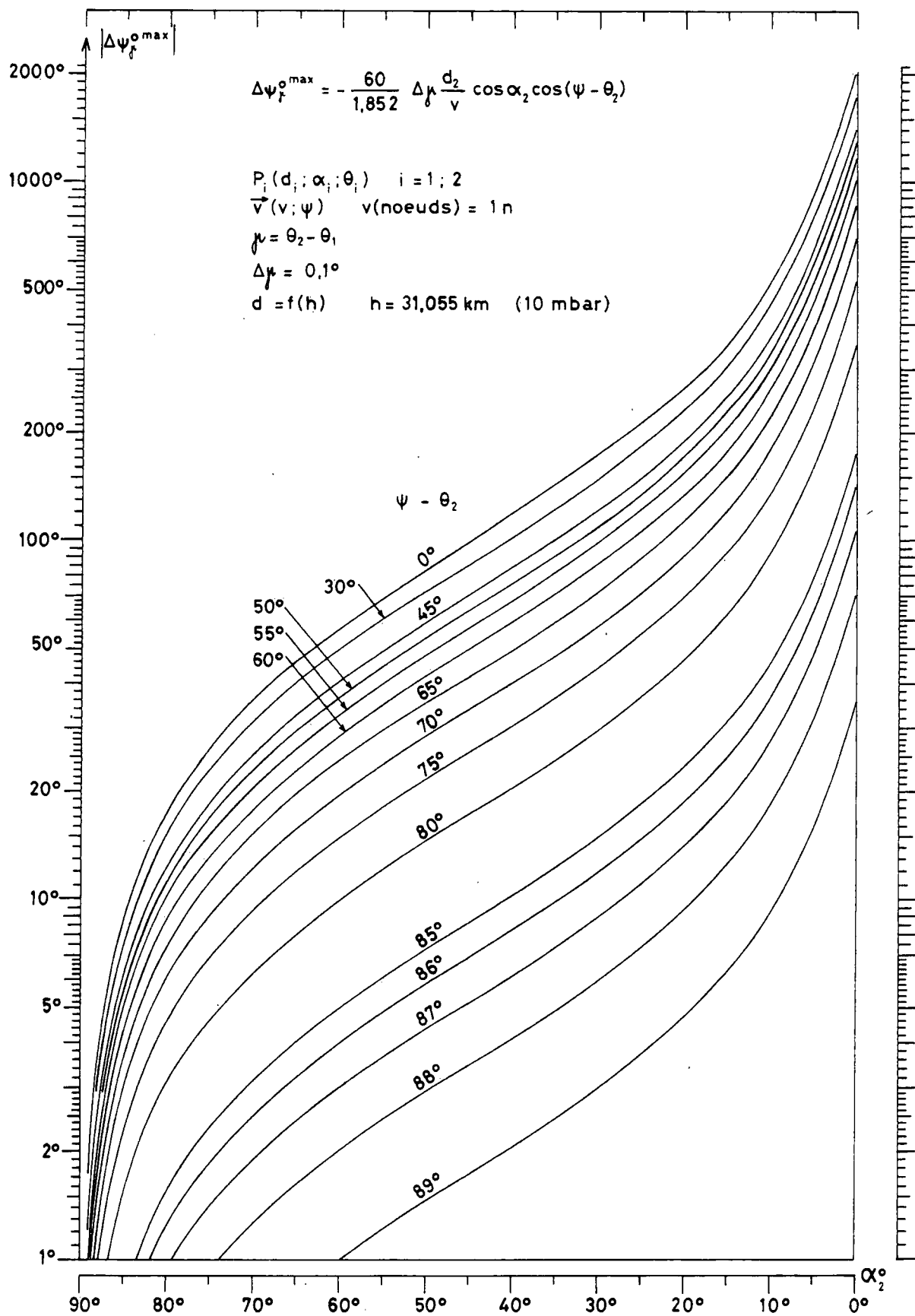


Figure 18

