



Ademe



**ADEME**  
**27, rue Louis Vicat**  
**75015 PARIS**

**Convention n° 1070019**  
**Affaire suivie : Y. BENDERITTER**

## **Morphologie des fractures du Mayet de Montagne**

---

**S. Gentier**  
**L. Malinsky**  
**C. Poinclou**

**Janvier 1993**  
**R 36632**

**BRGM**  
**SERVICES SOL ET SOUS-SOL**  
**Direction de l'Ingénierie géotechnique**  
**BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 2 - FRANCE - Tél : (33) 38.63.34.34**

## **RESUME**

Le rugosimètre de terrain construit au BRGM a été utilisé pour deux campagnes d'enregistrement de profils dans la carrière de granite du Mayet de Montagne. Trois plans de fracture appartenant à trois familles différentes ont été échantillonnés.

Après une mise en forme des données, l'accent a été mis sur l'analyse géostatistique descriptive des différentes surfaces. Cette étude montre que l'on peut classer les profils en fonction du type de variogramme. Deux grands groupes sont définis mettant en évidence l'importance du plan de référence d'acquisition. L'étude des tailles des structures conduit à différencier les trois plans de fracture uniquement par les grandes structures.

La mise en forme des données a montré que l'enregistrement de profils dans deux directions orthogonales est possible moyennant quelques manipulations des données ou modifications du bâti du rugosimètre.

## **SOMMAIRE**

	<b>Page</b>
<b>RESUME</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2. PRINCIPE DU RUGOSIMETRE - RAPPELS</b>	<b>5</b>
<b>3. MODIFICATIONS APPORTEES AU RUGOSIMETRE</b>	<b>7</b>
<b>4. ACQUISITION DES PROFILS</b>	<b>13</b>
<b>5. MISE EN FORME DES DONNEES</b>	<b>18</b>
<b>5.1. CREATION DE PROFILS GLOBAUX A PARTIR DU RECOUVREMENT DE DEUX PROFILS CONSECUTIFS</b>	<b>18</b>
5.1.1. Principe	18
5.1.2. Résultats obtenus	20
5.1.3. Conclusion	24
<b>5.2. CROISEMENT DES PROFILS VERTICAUX ET HORIZONTAUX</b>	<b>25</b>
5.2.1. Principe	25
5.2.2. Résultats obtenus	27
5.2.3. Création des fichiers (x, y, z) et des fichiers CALIMERO	32
<b>6. ANALYSE GEOSTATISTIQUE</b>	<b>34</b>
<b>6.1. RAPPELS</b>	<b>34</b>
6.1.1. Calcul de variogrammes	35
6.1.2. Propriétés du variogramme	

	<b>Page</b>
<b>6.2. APPLICATIONS AU PROFILS DU MAYET DE MONTAGNE</b>	<b>37</b>
<b>6.2.1. Description générale</b>	<b>37</b>
<b>6.2.2. Variogrammes caractéristiques</b>	<b>48</b>
<b>6.3. CONCLUSIONS DE L'ETUDE GEOSTATISTIQUE</b>	<b>63</b>
<b>7. CONCLUSION</b>	<b>68</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>Annexe A -</b>	
<b>Annexe B -</b>	
<b>Annexe C -</b>	

## 1. INTRODUCTION

L'étude de la morphologie des fractures du Mayet de Montagne a débuté en 1989 avec les travaux de Desroches J. (1990). A l'occasion de ces travaux, des échantillons ont été prélevés dans une des fractures de la carrière. A partir de ceux-ci, carottés en diamètre 150 mm, une caractérisation de la morphologie a été réalisée en laboratoire ainsi qu'une étude du comportement mécanique (sous contrainte normale et en cisaillement). La fracture testée lors de cette étude appartient à une famille de fractures orientées N 80°E.

En parallèle, l'étude d'un prototype de rugosimètre de terrain a été effectuée. Il s'agissait de transposer le principe du rugosimètre de laboratoire (Gentier S., 1986) destiné à étudier des surfaces de fracture de l'ordre de la centaine de décimètres carrés à des surfaces de l'ordre du mètre carré.

Cette étude a été conduite dans le cadre de fonds de recherche BRGM avec cofinancement AFME (Billaux D. *et al.*, 1990).

Les travaux réalisés en 1990 par le BRGM sur le site du Mayet de Montagne ont consisté dans le montage de la première expérience de comportement hydromécanique d'une fracture *in situ* en collaboration avec l'Institut de Physique du Globe de Paris (Colin et Ouvry, 1991).

Au cours de l'année 1991, dans le cadre d'un contrat ANDRA, le prototype de rugosimètre de terrain étudié en 1989 a été construit et testé (Gentier S. *et al.*, 1992) sur ce même site.

Les travaux présentés dans ce rapport et réalisés sur des fonds de recherche BRGM et cofinancement ADEME font suite aux tests préliminaires sur le site. Ils se décomposent selon les phases suivantes :

- acquisition de profils sur deux surfaces de fractures (juillet 1991),
- modifications du rugosimètre suite à la première campagne d'acquisition,
- acquisition de profils sur les trois surfaces de fractures (juillet 1992),
- modifications du rugosimètre suite à la seconde campagne d'acquisition,
- mise en forme des profils,
- analyse géostatistique des profils.

Après un rappel du principe du rugosimètre, chacune de ces phases sera détaillée en regroupant l'ensemble des modifications du rugosimètre et les deux phases d'acquisition.

## 2. PRINCIPE DU RUGOSIMETRE - RAPPELS -

Le principe de ce rugosimètre de terrain est le même que celui mis en oeuvre au laboratoire. Il s'agit d'un stilet fixé sur un chariot qui se déplace le long d'un profilé de 1,2 m de long. Le stilet est maintenu contre la surface de fracture et reproduit fidèlement la topographie de l'éponte quand on le déplace le long d'un profil. Compte-tenu des différentes inclinaisons que peuvent prendre les épontes à étudier, un système de rappel lui est adjoint pour le maintenir plaqué sur l'éponte. Le chariot est motorisé et son déplacement est enregistré en continu.

Pour pouvoir s'adapter à toutes les surfaces qui ne sont pas nécessairement rectangulaires, un système de règles de 1,3 m de long et espacées de 1 m est disposé sur les surfaces et constitue le plan de référence. L'ensemble du dispositif est présenté figure 1.

Cet appareil a été conçu modulable pour s'adapter à un maximum de types de surface rencontrés in situ et pour être facilement transportable (fig. 2).

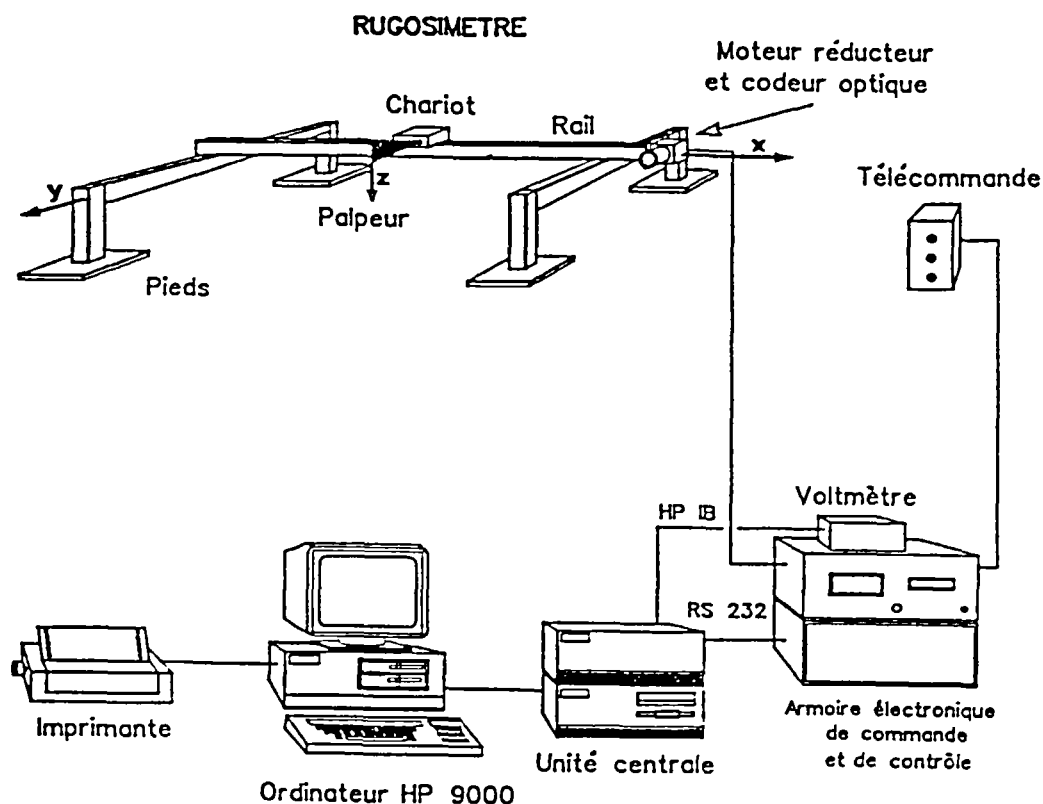
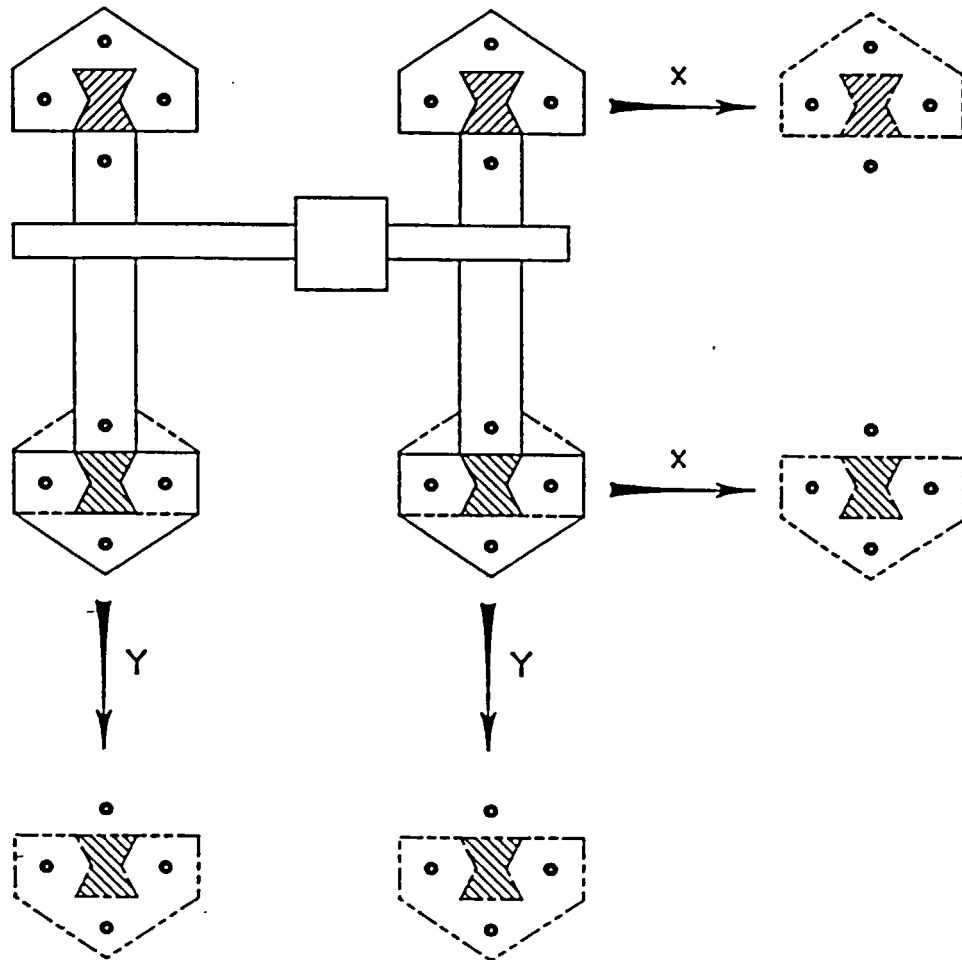


Figure 1 - Schéma de principe du rugosimètre de terrain (d'après Gentier *et al.*, 1992)



• : trous de fixation effectués avec le gabarit de perçage

Figure 2 - Translation du rugosimètre sur les stations adjacentes  
(d'après Gentier *et al.*, 1992)

### **3. MODIFICATIONS APPORTEES AU RUGOSIMETRE**

Suite à la première campagne d'acquisition de profils (juillet 1991) des modifications du prototype sont apparues nécessaires. A savoir :

- suppression des plaques en acier à la base du piétement,
- fixation par une seule vis centrée sur chaque pied,
- amélioration de la liaison mécanique stylet-capteur RVDT,
- conception d'un nouveau gabarit de perçage.

Le nouveau dessin du piétement du bâti du rugosimètre illustré figure 3 associe désormais légèreté, robustesse, encombrement limité et une mise en station simplifiée. Cette modification a entraîné une simplification du système de fixation. Les trois vis du prototype d'origine sont remplacées par une seule vis centrale.

Les deux modifications précédentes ont eu pour conséquence la conception et la réalisation d'un nouveau gabarit de perçage. Celui-ci a été réalisé en aluminium pour qu'il soit plus léger et donc plus maniable que le précédent. La figure 4 montre le nouveau gabarit de perçage en position sur une surface de fracture du Mayet de Montagne.

Ces trois modifications ont été testées lors de la campagne d'acquisition de juillet 1992 et ont apporté entière satisfaction dans la préparation d'une station quant à la légèreté et la rapidité de mise en place.

Enfin, la dernière modification concerne le système de couplage entre le stylet et le capteur RVDT. Les jeux mécaniques ont été éliminés en translation latérale grâce à un guidage par paliers constitué de bagues auto-lubrifiées, et en rotation au moyen d'un joint flexible monobloc (fig. 5).

Ce nouveau dispositif possède un système de rappel pour le maintien du stylet sur la surface, constitué d'un ressort travaillant en traction, dont on peut tarer à volonté la tension en fonction du matériau et de la position du rugosimètre.

Suite aux travaux réalisés en juillet 1992, d'autres modifications se sont avérées nécessaires.

La fragilité du stylet du prototype d'origine nous a conduit à étudier et à réaliser un nouveau stylet plus rigide usiné en aluminium FORTAL HR, mais de géométrie identique. En fait deux stylets parfaitement interchangeables ont été construits (fig. 6).

Afin de limiter la longueur de l'ensemble rail de translation-motorisation, le boîtier de raccordement situé à son extrémité a été supprimé. L'encombrement du dispositif doit être limité autant que possible. Désormais les connections électriques se font directement sur la poutre.



**Figure 3 - Nouveau dessin du piétement**



**Figure 4 - Nouveau gabarit de perçage en position**



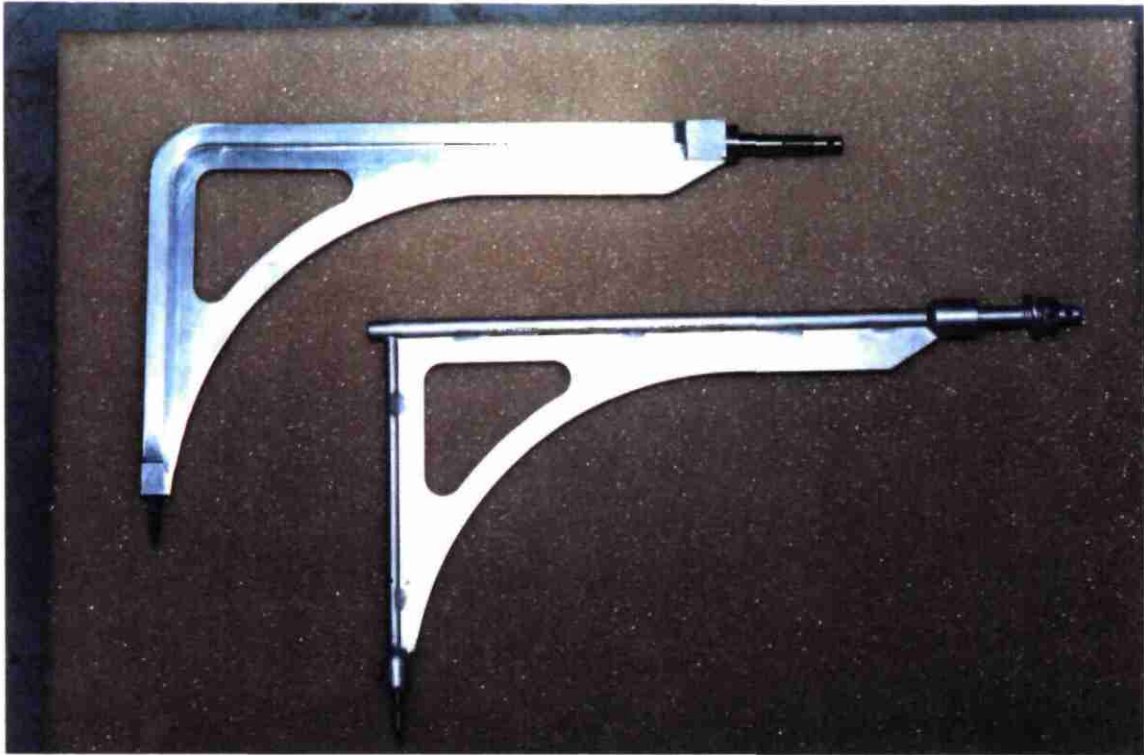
**Figure 5 - Nouveau dispositif de fixation du stylet sur le chariot**

Compte tenu de la difficulté à préparer deux stations consécutives, des pièces supplémentaires ont été réalisées pour obtenir deux stations voisines dans les deux directions sans démontage de la première station (fig. 7).

A l'heure actuelle le prototype dont nous disposons est tout à fait opérationnel et donne entière satisfaction. Seules quelques modifications surtout dans le protocole de montage peuvent encore être testées lors des prochaines utilisations.

Le chevillage reste une opération délicate de laquelle dépend en grande partie la qualité du plan moyen d'enregistrement des profils. Cette étape pourra être améliorée en scellant les tiges filetées à l'époxy.

La définition du plan d'enregistrement sur plusieurs stations adjacentes est toujours difficile. Une solution pourrait consister à définir le plan au moyen d'un laser tournant.



**Figure 6 - nouveaux stylets usinés**



**Figure 7 - Gabarit de perçage avec pièces supplémentaires pour extension à une station voisine**

## **4. ACQUISITION DES PROFILS**

La carrière de granite du Mayet de Montagne présente trois plans de fracture de plusieurs mètres carrés chacun. Ces trois plans appartiennent à trois familles de fractures d'orientations N 20°E 75°E, N 80°E 90° et N 150°E 85°E.

Compte tenu du dispositif utilisé comprenant un module élémentaire de l'ordre du mètre carré, les profils sont acquis par morceaux d'une longueur de 1,2 m. La translation du module de base permet l'acquisition du morceau de profil suivant de longueur 1,2 m et présentant un recouvrement de 0,1 m. Chaque mise en place du module de base constitue ce que l'on appellera une station.

Afin d'obtenir un enchaînement cohérent des profils, le plan de base doit être défini au préalable sur l'ensemble des stations d'une même surface de fracture.

Un récapitulatif des stations et des profils enregistrés est présenté figure 8.

- **Fracture N 20°E**

Au total 5 stations ont été enregistrées. Sur les stations 1, 2 et 3, six profils horizontaux ont été numérisés sur toute leur longueur. Sur les stations 4 et 5, onze profils horizontaux et dix sept profils verticaux ont été acquis.

- **Fracture N 80°E**

Sur la station 1, onze profils horizontaux et huit profils verticaux ont été enregistrés. Sur la station 2, douze profils horizontaux ont été enregistrés.

- **Fracture N 50°E**

Sur la station 1 et 2, onze profils horizontaux ont été enregistrés en continuité. Sur la station 2, huit profils verticaux ont été enregistrés.

Lors de la première campagne d'acquisition des profils (juillet 1991), deux modes d'acquisition des profils ont été testés (Bernasconi, 1991).

Le premier mode devait permettre une acquisition des profils avec un pas  $dx$  constant le long du profil. Cette option n'a pas été retenue en définitive en raison de la lenteur qu'entraîne la nécessité de calculer en permanence la position en  $x$  du stylet compte tenu de son mouvement en rotation.

Pour limiter le temps d'acquisition des profils, il a été décidé d'acquérir un maximum de données avec un pas de temps correspondant à l'exécution de la boucle du programme d'acquisition. En imposant une vitesse de déplacement bien choisie, on obtient une distribution gaussienne des pas d'acquisition  $dx$  proche des 0,5 mm voulus (fig. 9).

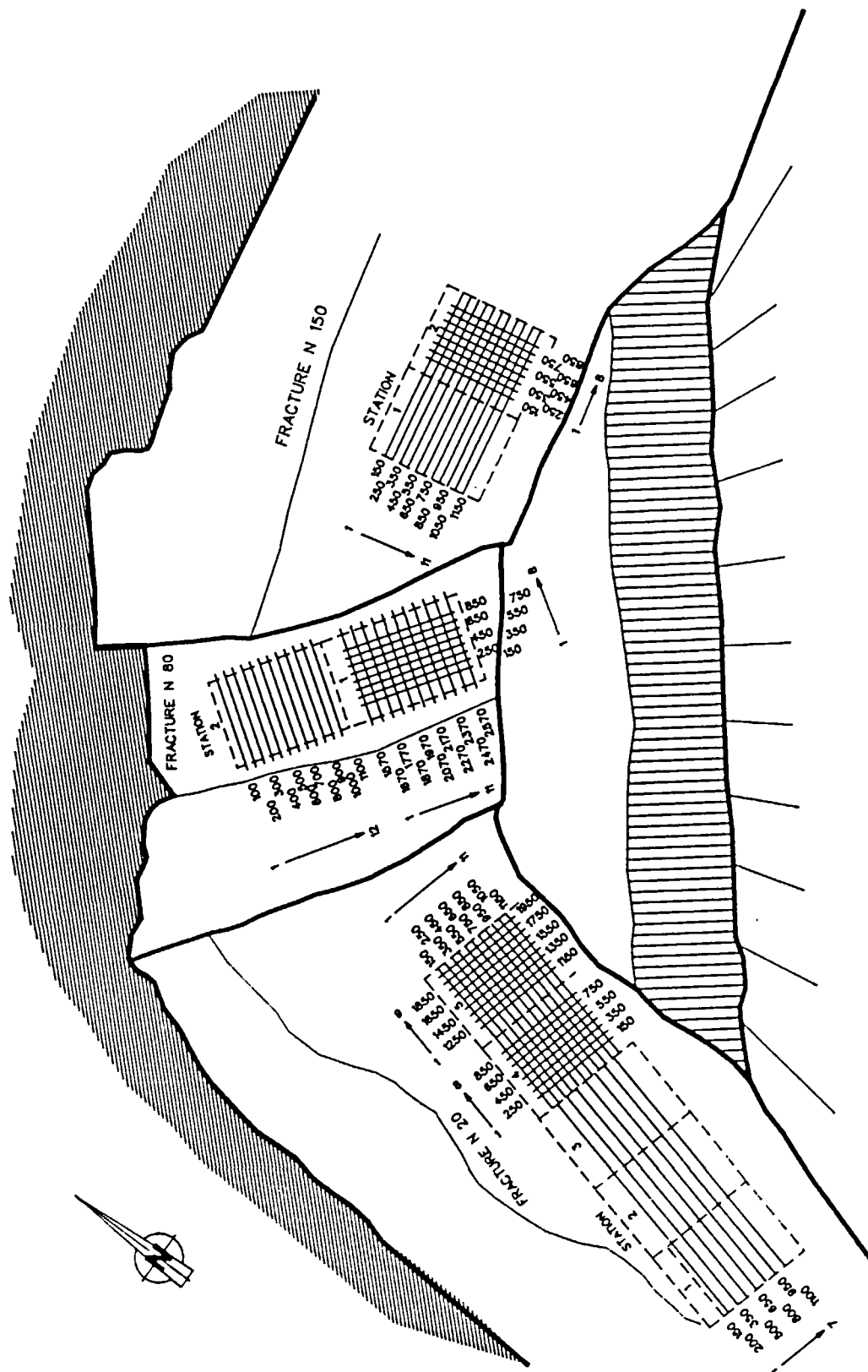
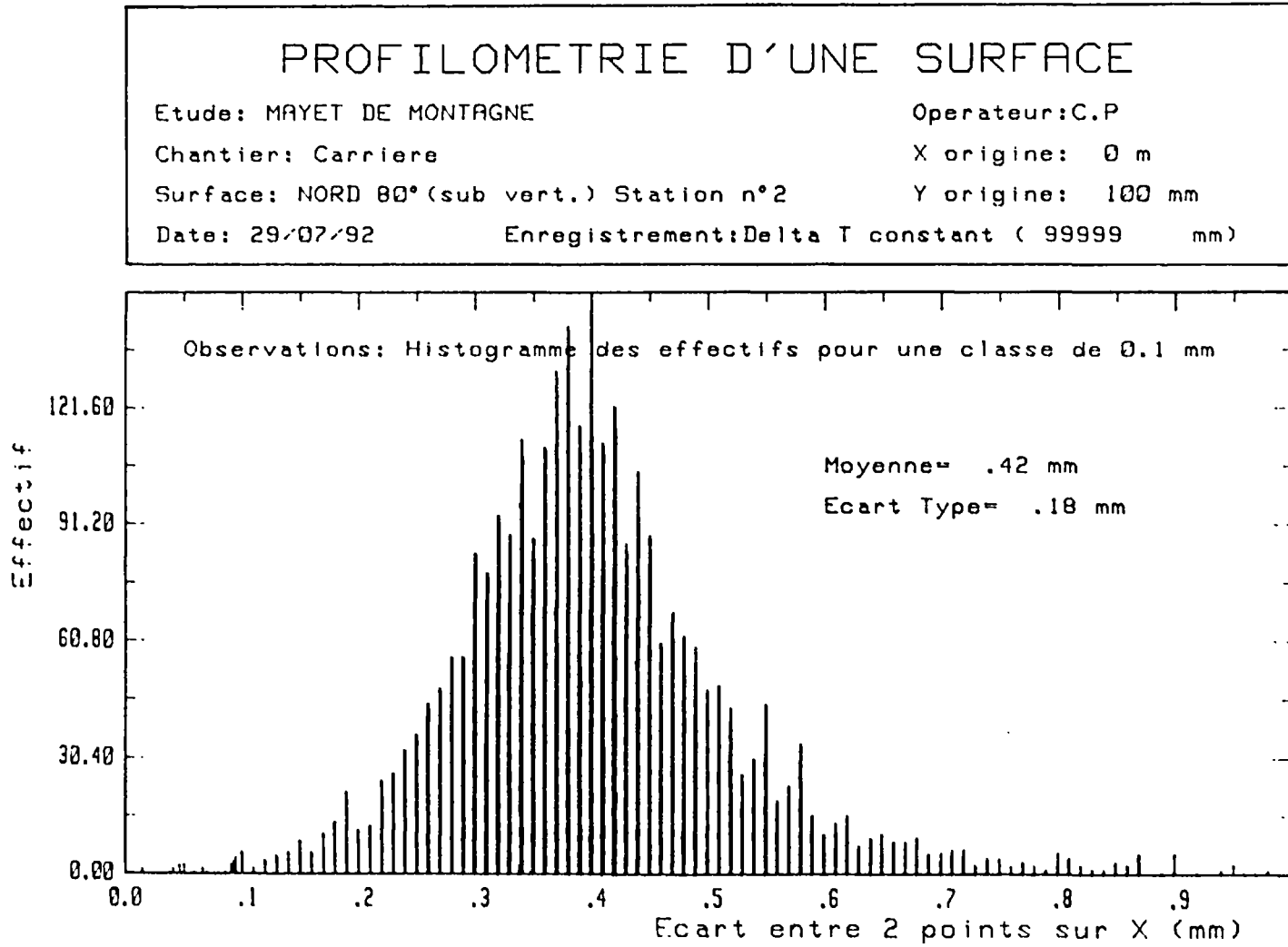


Figure 8 - Schéma de la carrière

Figure 9 - Distribution des dx lors de l'acquisition



A partir de ces données brutes, le profil est recalculé avec un  $dx$  constant égal à 0,5 mm par interpolation linéaire entre les points. Cette étape n'introduit pas de modifications significatives dans le profil (fig. 10).

Enfin, les données acquises sous format LIF sont transformées en format ASCII afin d'être traitées sur micro-ordinateur ou station de travail.

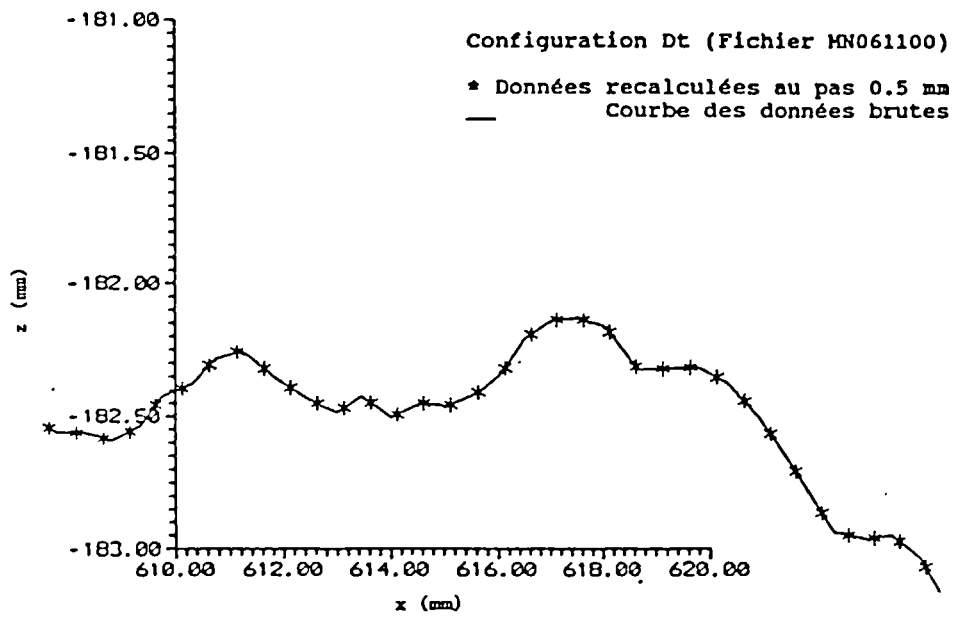


Figure 10 - Comparaison des enregistrements bruts (dt constant) avec ceux recalculés par interpolation (dx constant) (d'après Gentier *et al.*, 1992)

## **5. MISE EN FORME DES DONNEES**

Avant d'effectuer les traitements statistiques et géostatistiques qui doivent conduire à une reconstitution de la topographie des épontes, il est nécessaire de pratiquer différentes opérations qui font l'objet de ce chapitre à savoir :

- reconstitution de profils sur toute la longueur de la surface étudiée à partir de profils enregistrés sur chaque station,
- calage des profils les uns par rapport aux autres afin de définir un repère global pour toutes les directions d'enregistrement.

### **5.1 CREATION DE PROFILS GLOBAUX A PARTIR DU RECOUVREMENT DE DEUX PROFILS CONSECUTIFS**

#### **5.1.1. Principe**

Ce traitement comporte une translation en x et en z et éventuellement une correction de rotation entraînée par le changement de plan de référence lors de la translation du bâti.

La longueur de recouvrement de deux profils varie généralement entre 3 et 20 cm selon les cas. La première possibilité pour concaténer les profils est de réaliser une procédure automatique basée sur l'intercorrélation des deux profils, le second profil étant translaté d'une valeur connue a priori de l'ordre de 1 000 mm (largeur du cadre). L'analyse de la fonction d'intercorrélation à l'origine pourrait permettre d'affiner automatiquement la translation du deuxième profil. Une intercorrélation maximale à l'origine, puis décroissante indique que les deux fonctions sont en phase, alors qu'un décalage du maximum vers les valeurs positives montre un déphasage. La translation à appliquer correspond alors à l'abscisse de l'extremum. Ceci est une valeur absolue et un test sur le signe réel est nécessaire. Cependant l'application de cette méthode - qui fonctionne dans le cas de fonctions théoriques - se heurte à plusieurs problèmes dans le cas réel. Hormis le fait qu'une rotation éventuelle peut fausser le calcul et que la zone de recouvrement est limitée, il s'avère que la forme de la fonction de corrélation est assez dépendante de l'amplitude du relief et ne peut constituer un critère valable. En effet des profils se superposant bien visuellement, avec de fortes variations peuvent donner une forme inadéquate, alors qu'au contraire pour des profils assez mal superposés mais plats on obtient un maximum à l'origine, peu sensible aux variations de la translation a priori.

En conséquence, une méthode semi-automatique a été adoptée. Un programme Turbo Pascal (RACCORDX.PAS) permet de visualiser les différentes étapes à l'écran (fig. 11). Le seul paramètre à choisir est la valeur de la translation à appliquer ou la longueur du recouvrement.

## Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

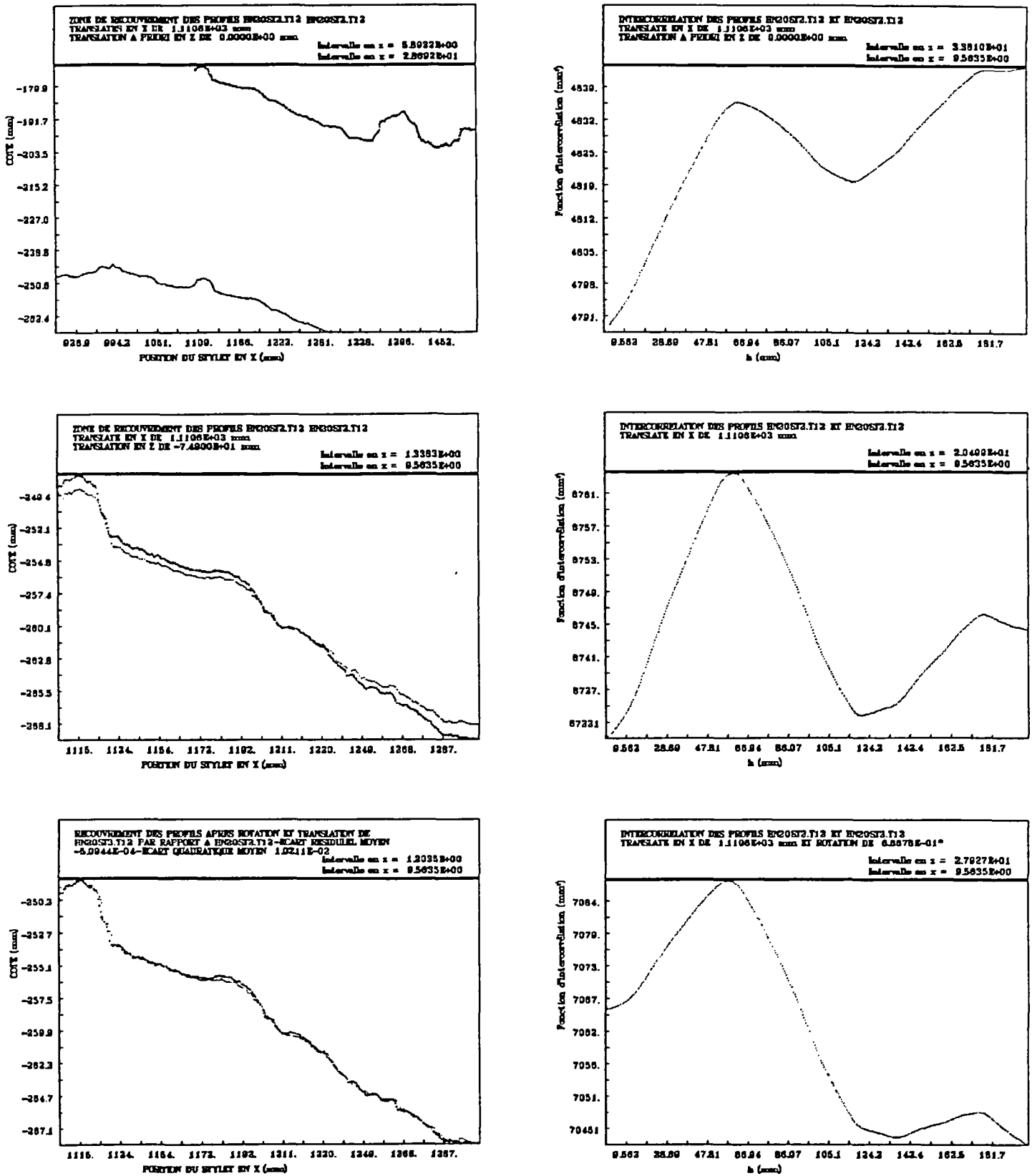


Figure 11 - Raccordement des profils - Fonction d'intercorrélation

Dans un premier temps, quand la valeur de la translation n'est pas connue, on choisit la longueur de recouvrement. Le programme est une boucle constituée d'une suite d'opérations dont chacune peut être évitée. On peut parcourir plusieurs fois cette boucle et créer le profil global avec la translation optimale. Dans la première partie, on peut visualiser le recouvrement à l'état brut, ou bien avec une translation en z à priori. Dans un deuxième temps on effectue une translation en z de la moyenne des écarts entre les cotes des deux profils. Un ajustement en x de la translation est effectuée pour obtenir une superposition parfaite des abscisses : cette correction est donc toujours inférieure au pas d'échantillonnage. On ajuste une droite, par moindres carrés, aux écarts résiduels entre les cotes des profils après la translation en z (fig. 12). Est ensuite effectuée la correction de rotation correspondant à la pente de la droite et dont l'origine est l'intersection de cette droite avec l'axe des x. L'angle de correction étant de l'ordre de 1°, la composante en x est négligée. On peut visualiser à nouveau le raccord, la moyenne et la variance des écarts étant indiquées. L'écart moyen n'est en général plus nul mais relativement faible. Il faut pour créer le nouveau fichier effectuer les corrections sur le deuxième profil, et éliminer les points en recouvrement : on peut choisir la proportion des points de l'un ou l'autre des profils que l'on va conserver. De plus l'angle correctif calculé ne traduit pas forcément une rotation dans le cas d'une dispersion importante des résidus : on peut alors choisir de ne pas appliquer la correction ou de changer sa valeur. Le coefficient de corrélation linéaire calculé sur les résidus après translation selon x et z peut aussi servir de base au choix de l'opération à effectuer.

Bien qu'elle ne soit pas utilisée, la fonction d'intercorrélation peut être visualisée après chaque transformation à titre indicatif.

### **5.1.2. Résultats obtenus**

#### **Plan N20°E**

Les profils correspondant aux stations 1 à 3 et 4-5 ont été créés séparément. Les profils acquis en 1991 (stations 1 à 3) et ceux acquis en 1992 (stations 4 et 5) ne correspondant pas, il n'a pas été possible de reconstruire un seul ensemble de données. L'examen du recouvrement ne présente aucune corrélation, et seuls trois profils correspondent à la même ordonnée.

La valeur de la translation en x est la même pour tous les profils d'une même station, à quelques millimètres près, alors que la longueur de recouvrement est variable (de 3 à 20 cm). Ceci montre que l'on mesure bien la position absolue du stylet par rapport au cadre. Cette translation est de l'ordre de 1 100 mm (tableaux 1 et 2 pour les stations 2-3 et 4-5).

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

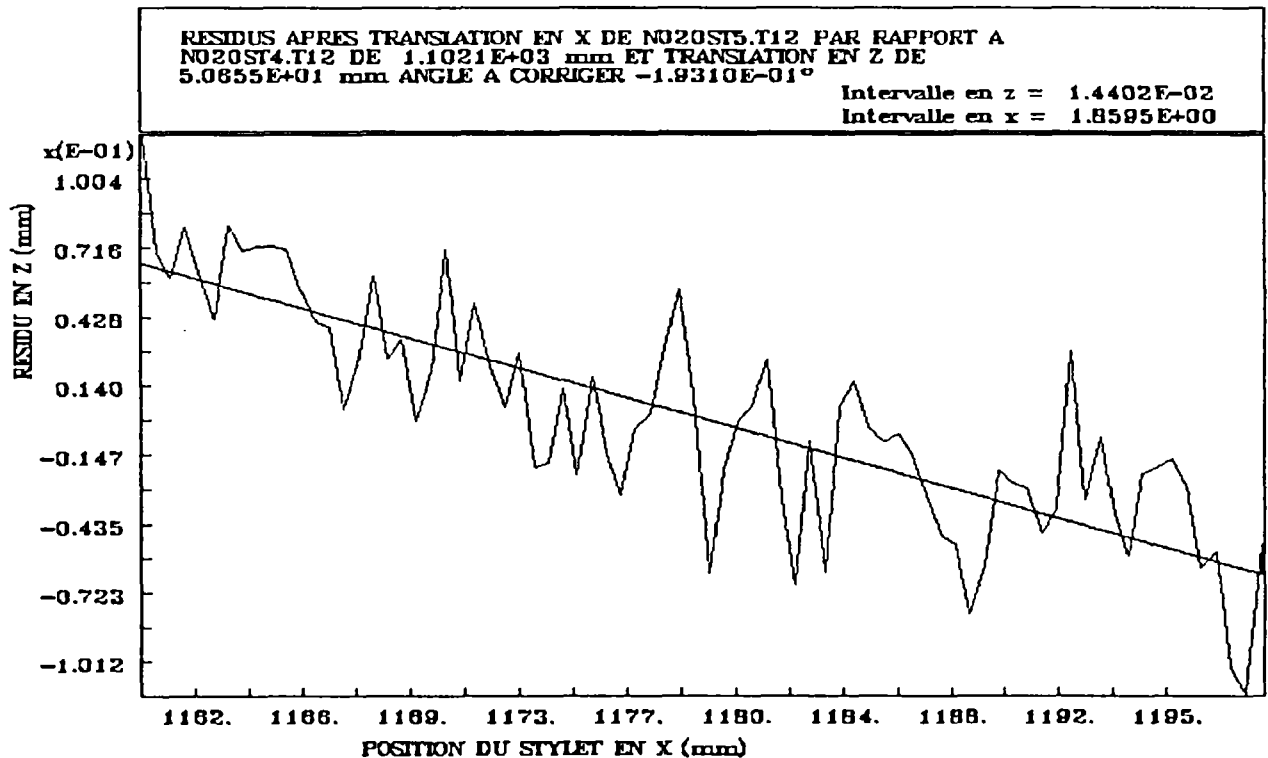
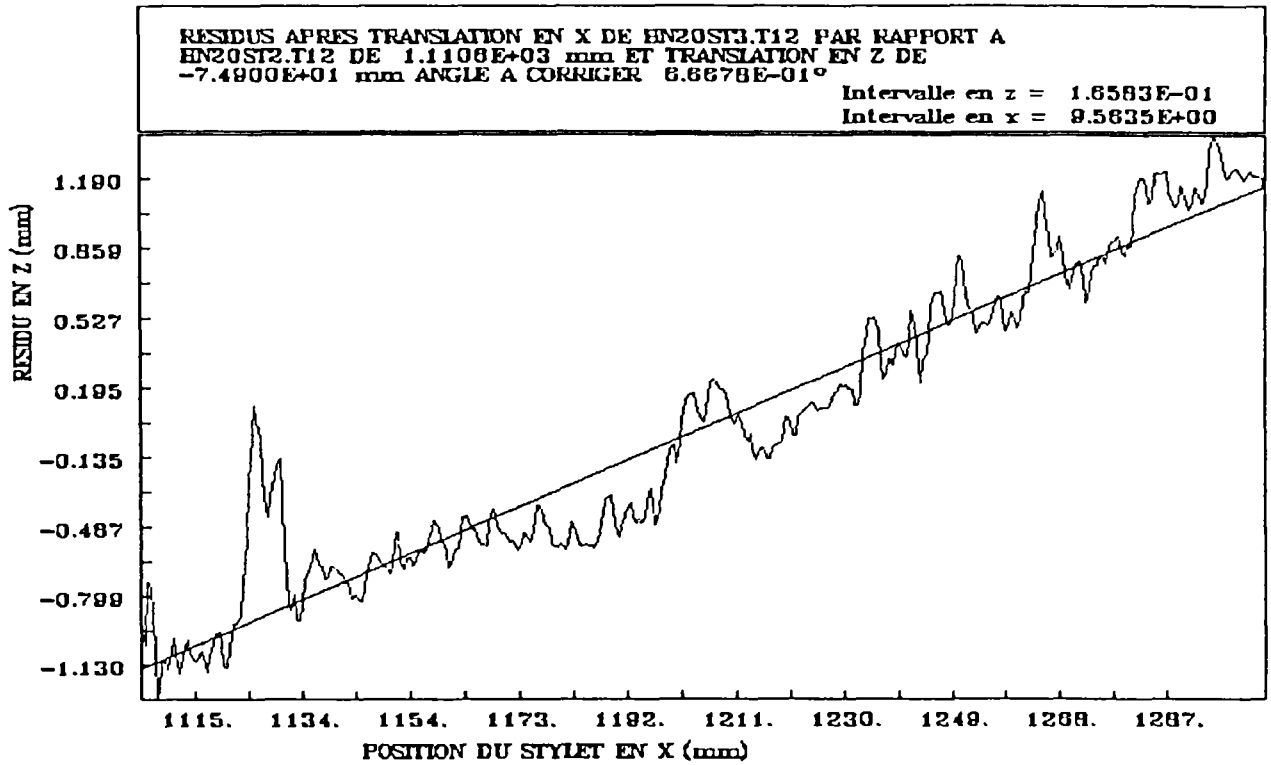


Figure 12 - Correction angulaire à partir des écarts résiduels après translation selon x et z du profil à raccorder. Profil 2 station 2-3 et 4-5, plan N 20°E

Profil	Translation en x (mm)	Recouvrement (mm)	Coeff. corrél. linéaire des résidus	Rotation (°)	Translation en z (mm)	Ecart quadratique moyen après rotation et translation
1	1110.6	202	0.86	0.86	- 73.6	2.6E-2
2	1110.6	198.5	0.96	0.66	- 74.9	1.0E-2
3	1110.6	169	0.90	0.33	- 76.5	7.4E-3
4	11110.8	162.5	0.27	0.09	- 77.0	1.5E-2
5	1109.5	154.5	0.21	0.04	- 76.4	8.8E-3
6	1108.9	151	0.62	0.14	- 76.7	7.8E-3
7	1107.6	148	0.60	0.27	- 77.4	1.5E-2

Tableau 1 - Raccord de la station 3 à la station 2 (plan N 20°E)

Profil	Translation en x (mm)	Recouvrement (mm)	Coeff. corrél. linéaire des résidus	Rotation (°)	Translation en z (mm)	Ecart quadratique moyen après rotation et translation
1	1102.5	40.5	0.49	- 0.42	50.5	1.7E-2
2	1102.1	39	0.81	- 0.19	50.7	3.0E-3
3	1101.2	37	0.57	- 0.52	51.4	1.6E-2
4	1101.3	34.5	0.55	- 0.37	51.3	1.2E-2
5	1099.8	42	0.27	- 0.23	52.6	1.9E-2
6	1099.8	41.5	0.37	- 0.39	51.7	2.2E-2
7	1099.6	43.5	0.52	1.14	52.5	4.8E-2
8	1100.4	41.5	0.17	- 0.13	53.0	1.9E-2
9	1101.8	41.5	0.73	- 1.35	52.3	2.9E-2
10	1100.0	34	0.91	- 0.42	52.7	4.0E-2
11	1100.1	37	0.81	- 1.07	52.7	1.7E-2

Tableau 2 - Raccord de la station 5 à la station 4 (plan N 20°E)

Ces corrections sont à appliquer au deuxième profil (3 ou 5).

Le coefficient de corrélation linéaire est calculé sur les résidus après translation, à partir de ceux-ci on déduit la correction de rotation à appliquer. Quand il est proche de 1, on peut estimer comme réaliste l'hypothèse de la rotation.

Profil	Translation en x (mm)	Recouvrement (mm)	Coeff. corrél. linéaire des résidus	Rotation (°)	Translation en z (mm)	Ecart quadratique moyen après rotation et translation
1	1110.9	201.5	0.93	0.70	- 88.0	1.1E-2
2	1111.4	200.0	0.96	0.84	- 88.2	1.4E-2
3	1112.0	171.5	0.88	0.26	- 87.5	0.6E-2
4	1112.1	172.0	0.84	0.22	- 88.7	0.6E-2
5	1111.6	176.0	0.92	0.52	- 89.0	1.0E-2
6	1109.8	174.0	0.87	0.81	- 52.5	2.1E-2
7	1099.8	148.0	0.96	0.89	- 47.5	1.2E-2
8	1107.5	135.0	0.88	0.48	- 50.0	1.1E-2
9	1109.5	121.0	0.91	0.31	- 50.5	0.5E-2
10	1108.7	121.0	0.78	0.26	- 50.5	0.8E-2
11	1107.0	115.0	0.91	0.30	- 49.5	0.5E-2

Tableau 3 - Raccord de la station 2 à la station 1 (plan N 150°E)

Ces corrections sont à appliquer au deuxième profil (3 ou 5).

Le coefficient de corrélation linéaire est calculé sur les résidus après translation, à partir de ceux-ci on déduit la correction de rotation à appliquer. Quand il est proche de 1, on peut estimer comme réaliste l'hypothèse de la rotation.

Le raccord des stations 1 et 2 ne traduit ni rotation, ni translation en z significative, au contraire des raccords des stations 2-3 et 4-5. Cependant, si les angles calculés restent dans chaque cas du même signe, les valeurs sont dispersées et ne traduisent pas la rotation globale d'un plan. Le coefficient de corrélation linéaire associé est un bon indice de la validité de l'angle calculé mais qui peut cependant être visuellement trompeur dans certains cas (profils 9 et 11 des stations 4 et 5). Dans le cas des raccords des stations 2-3 et 4-5, on constate bien une translation en z homogène des plans de référence (-76 mm pour la station 3 et +52 mm pour la station 5 en moyenne), mais ces valeurs ne correspondent pas très précisément avec les mesures de décalage estimées sur le terrain pour la station 5 (respectivement -84 mm et +143 mm).

D'une manière générale, les raccords sont meilleurs dans le cas des stations 2-3, qui présentent des structures plus marquées et une longueur de recouvrement de 3 à 4 fois plus grande que les stations 4-5.

### **Plan N150°E**

Les raccords sont de très bonne qualité, avec un coefficient de corrélation linéaire des résidus de l'ordre de 0.9. La longueur de recouvrement, comme pour les stations 2 et 3 du plan N 20° sont de l'ordre de 10 à 20 cm. On vérifie bien que le cadre a été translaté en z pour l'acquisition des 5 derniers profils. En effet, on trouve pour les 6 premiers une moyenne de -87 mm (décalage mesure -95 mm) et de -52 mm pour 5 autres (décalage mesure de -45 mm) (tableau 3).

### **Plan N80°E**

Dans ce cas, on ne possède pas de zone de recouvrement : on ne peut donc pas relier les repères des stations 1 et 2 avec précision. Ceci met en évidence une carence du système actuel : le cadre étant rectangulaire, il n'y a pas de recouvrement des profils verticaux de deux stations alignées verticalement. Cela serait matériellement possible, mais seulement à une des extrémités, le rail étant adapté au petit côté du cadre. La direction horizontale est ainsi privilégiée. Avec un cadre carré, il y aurait une symétrie parfaite des deux directions.

### **5.1.3. Conclusion**

Les trois cas traités montrent que l'on peut raccorder les profils avec une assez bonne précision. Les rotations mises en évidence, si elles sont souvent bien réelles, traduisent un léger gauchissement d'un profil à un autre, même si on obtient des valeurs du même ordre de grandeur et de même signe pour une station donnée. Les valeurs de translation mesurées sur le terrain correspondent, exceptées pour les stations 4 et 5, à celles obtenues par le calcul, avec un écart de 7 à 8 mm.

Le point à retenir est l'uniformité constatée dans la translation en x (1100 ou 1110 mm) alors que le recouvrement est très variable. Ceci montre que le chariot effectue toujours la même course et que l'on mesure bien la position absolue du stylet par rapport au cadre, alors que la topographie influe sur la longueur de recouvrement.

Pour finir, le plan N80°E met en évidence un problème de dissymétrie des deux directions en raison de la forme rectangulaire du cadre. Ceci provient du fait que le système n'a été conçu à l'origine que pour la direction parallèle au petit côté.

## 5.2. CROISEMENT DES PROFILS VERTICAUX ET HORIZONTAUX

### 5.2.1. Principe

Le plan de référence est théoriquement le même pour les deux directions d'enregistrement puisqu'on ne déplace pas le cadre. Cependant, on ne connaît pas la relation exacte entre les deux repères. En effet, pour chaque direction, on enregistre la position du stylet (abscisse) et on note la position du profil (ordonnée) dans le repère du cadre. On doit faire correspondre cette dernière à l'abscisse (position du stylet) dans la direction perpendiculaire, de manière à savoir où se font réellement les croisements. Notons  $(O_1, X_1, Y_1, Z_1)$  et  $(O_2, X_2, Y_2, Z_2)$  les repères dans les directions horizontale (1) et verticale (2). Comme précédemment, on ne peut procéder que par tâtonnements. Pour une étude donnée, on cherche les trois paramètres  $T_{x_1}$ ,  $T_{x_2}$  et  $T_z$  (fig. 13) tels que :

$$\begin{aligned}X_1 &= Y_2 + T_{x_1} \\Y_1 &= T_{x_2} - X_2 \\Z_1 &= Z_2 + T_z\end{aligned}$$

- La transformation n'est pas tout à fait une translation, puisque dans notre cas, les axes  $Y_1$  et  $X_2$  sont en sens contraire.
- Théoriquement il ne devrait pas y avoir de translation en  $z$ , puisque le cadre n'est pas déplacé quand on change de direction.
- La différence entre  $X_1$  et  $Y_2$  provient du fait que l'abscisse correspond à la position du stylet par rapport à sa position minimale, à l'extérieur du cadre, alors que l'ordonnée est graduée sur le cadre.

On résout le problème par itérations, en fixant plusieurs valeurs des trois paramètres et en retenant celles qui optimisent les croisements (programme RACCORDZ.PAS). Le paramètre le plus important est pour nous  $T_{x_2}$ , mais pourrait aussi bien être  $T_{x_1}$ . En effet, on choisit de visualiser les profils horizontaux (direction 1 :  $Z_1 = F(X_1)$  pour  $Y_1$  constant) puis de chercher et afficher toutes les valeurs  $Z_2 = F(X_2)$  telles que  $X_2 = T_{x_2} - Y_1$  correspondent aux croisements avec les profils verticaux en  $X_1 = Y_2 + T_{x_1}$ . Si la valeur de  $T_{x_2}$  utilisée -à supposer qu'elle existe- est la bonne, on pourra facilement en déduire  $T_{x_1}$  et  $T_z$  visuellement, puisque le profil est dans la direction 1. On ajuste  $T_{x_2}$  par essais successifs en balayant toute la gamme des valeurs possibles. On cale ainsi d'abord les grosses structures, puis on affine en calant avec les structures plus petites. On ajuste en même temps  $T_{x_1}$ . Pour chaque profil horizontal, on calcule la moyenne et l'écart type de  $(Z_1 - Z_2)$  sur les croisements. On peut ainsi évaluer la translation  $T_z$  à appliquer, et l'écart type doit être le plus faible possible pour justifier une translation.

Le programme traite une succession de profils horizontaux pour un même triplet de paramètres. Les valeurs des écarts sont rangées dans une matrice que l'on peut afficher et écrire dans un fichier pour des calculs ultérieurs de moyennes et de variances.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

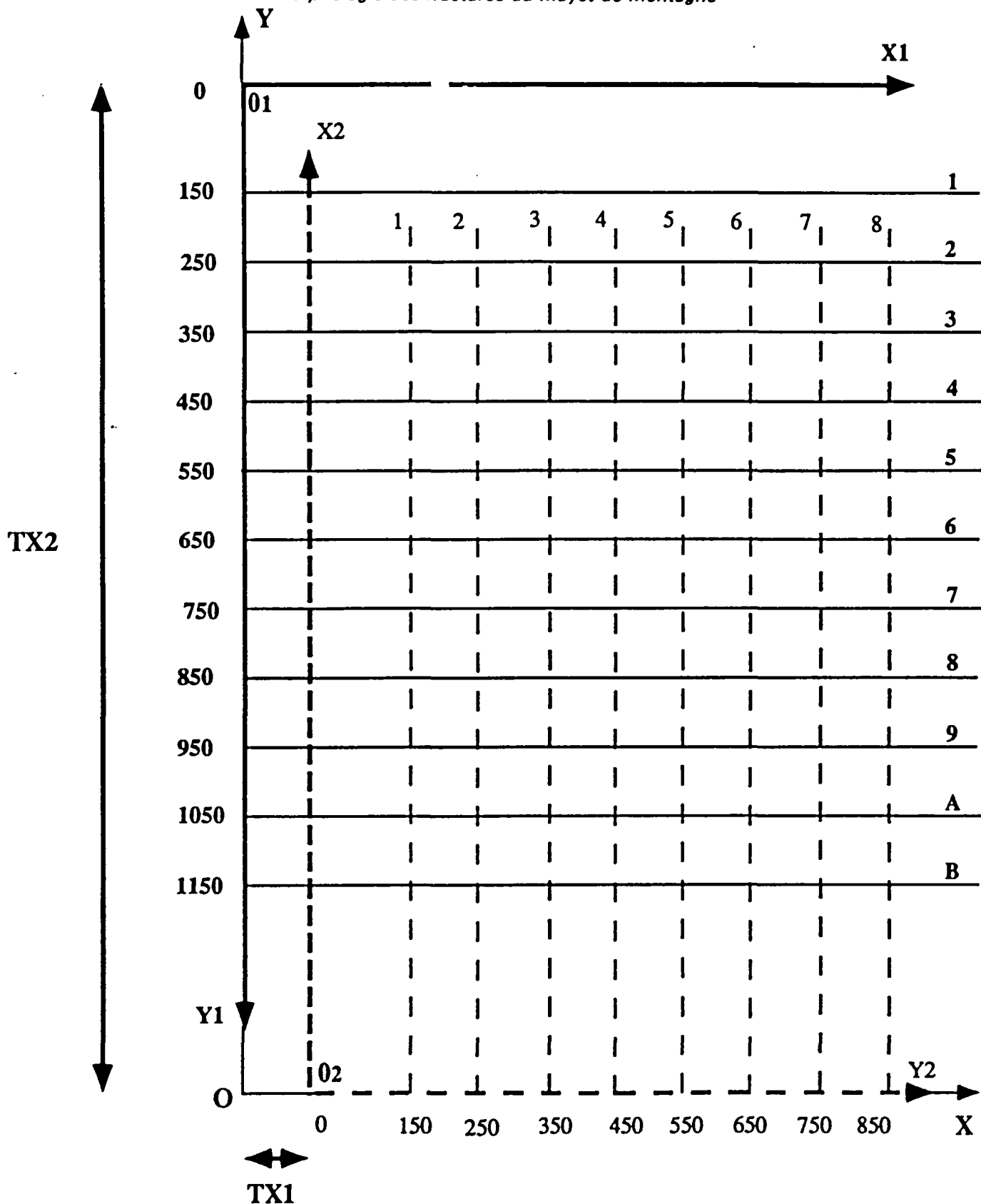


Figure 13 - Plan N20°E - Station 4 : Repères des profils horizontaux ( $O_1, X_1, Y_1$ ) et verticaux ( $O_2, X_2, Y_2$ ) et repère global ( $O, X, Y$ )

Ayant vérifié ce qu'un triplet ( $T_{x_1}$ ,  $T_{x_2}$ ,  $T_z$ ) donne, pour chaque station des croisements satisfaisants -ce que l'on peut apprécier visuellement et à l'aide de la moyenne et de l'écart type-, on peut créer une étude globale et ajuster  $T_z$  pour chaque profil. Les coordonnées sont ramenées dans un repère global (O, X, Y) tel que l'on conserve les abscisses dans les deux directions (fig. 13 et 14) :

$$X = X_1 \text{ et } Y = X_2 ,$$

ce qui permet de ne modifier dans les fichiers que  $Y_1$  et  $Y_2$  ( qui ne figurent qu'une fois en début de fichier).

Pour les profils verticaux :  $Y_2 \rightarrow Y_2 + T_{x_1}$

Pour les profils horizontaux :  $Y_1 \rightarrow T_{x_2} - Y_1$

Au lieu de faire la correction en z avec la valeur globale  $T_z$ , on définit celle-ci pour chaque profil à l'aide de la matrice des écarts ( $T_z$  étant déjà appliquée). Dans le cas des stations 4 et 5, l'observation de cette matrice montre qu'il est préférable de translater chaque profil vertical i :

$$Z_2 \rightarrow Z_2 + T_z - dT_z(i)$$

$dT_z(i)$  étant défini comme  $E[Z_2(i) - Z_1(i)]$ ,  $T_z$  ayant déjà été ajouté à  $Z_2$

Les valeurs d'ajustement  $dT_z(i)$  varient de 0.3 à 3 mm dans le cas de stations 4 et 5, sauf pour le premier profil vertical de la station 5 (18 mm). On crée alors un fichier contenant les coordonnées x,y,z de chaque point de l'étude:

$$\begin{aligned} Y_2, X_1 &\rightarrow X \\ X_2, Y_1 &\rightarrow Y \\ Z_1, Z_2 &\rightarrow Z \end{aligned}$$

### 5.2.2. Résultats obtenus

Quatre stations avec deux directions de profils ont été étudiées : les stations 4 et 5 du plan N 20°E, la station 1 du plan N 80°E et la station 2 pour le plan N 150°E.

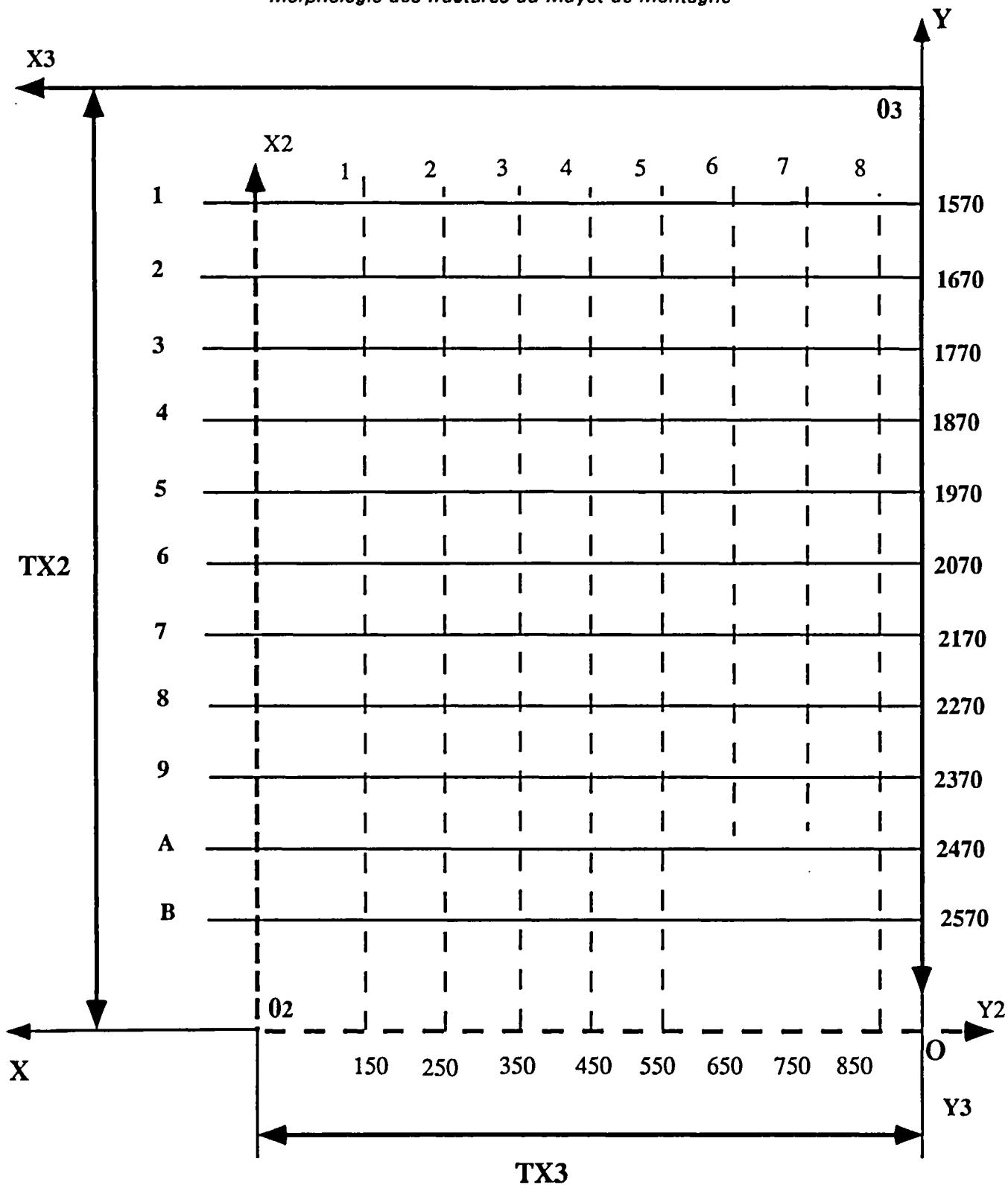


Figure 14 - Plan N80°E - Station 1 - Repères des profils horizontaux (O3, X3, Y3) et verticaux (O2, X2, Y2) et repère global (O, X, Y)

**Plan N20°E**

Sur ce plan, les croisements sont acceptables (fig. 15) pour un même triplet ( $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ ,  $T_z$ ). Cependant, on a  $X_{2max} < T_{x2} - Y_{1min}$ , ce qui signifie que les profils verticaux sont trop courts pour recouper le premier profil horizontal ( $Y_1 = 150$  mm). De plus, toujours pour ce plan, on constate que les croisements sont meilleurs pour la station 5 prise séparément que pour les profils composites 4-5, ce qui provient de la rotation appliquée à la station 5 avec RACCORDX.PAS. En toute rigueur, il faudrait corriger tous les profils verticaux de cette rotation, mais celle-ci n'est pas uniforme sur tous les profils de la station. L'écart est important pour les profils ayant subi une forte rotation ( $> 1^\circ$ ) qui sont souvent ceux pour lesquels le raccordement était le moins bon, et donc la rotation moins réaliste. Pour améliorer cela, on donne dans RACCORDX.PAS la possibilité de fixer la valeur de la rotation. Pour la station 4-5, on prend un angle nul mais on pourrait aussi prendre une valeur moyenne qui serait de l'ordre de  $0.3^\circ$ . Les valeurs de translation trouvées pour les croisements avec les profils composites sans rotation sont :

	STATION-4	STATION-5
$T_{x1}$	97	97.5
$T_{x2}$	1432	1416
$T_z$	20	50

D'autre part, il se trouve que les deux valeurs de  $T_{x2}$  optimales trouvées pour les stations 4 et 5 sont légèrement différentes :  $dT_{x2} = T_{x24} - T_{x25} = 16$  mm. Or la valeur de  $T_{x2}$  modifie celle de  $Y_1$ . On est alors obligé de modifier  $X_2$  pour les profils de la station 5,  $Y_1$  ayant déjà été changée :  $X_{25} \rightarrow X_{25} + dT_{x2}$ .

On remarque un décalage des repères verticaux et horizontaux de 20 mm pour la station 4. Ceci ne se présente pas pour la station 5, les 50 mm correspondent à la translation effectuée lors du raccord des stations 4 et 5 :

	STATION-5 (prise séparément)	
$T_{x1}$	-1000	( $Y = 1150 \rightarrow 2050$ )
$T_{x2}$	1416	
$T_z$	0	

**Plan N150°E**

Deux stations ont été effectuées sur cette fracture en surplomb, dans la direction horizontale en 1991 (11 profils espacés de 10 cm), puis dans la direction verticale, mais seulement pour la station 2 en 1992 (8 profils), un essai ayant été réalisé sur 3 profils en 1991. Le recalage d'une année sur l'autre ne permet pas d'obtenir des croisements corrects. On reconnaît cependant les structures : il semble y avoir seulement une rotation du plan de référence. Ceci est très visible sur la figure 16 (croisements des profils verticaux avec les profils horizontaux 2, 3 et 4) qui met en évidence une composante selon x (profils horizontaux) et selon y (profils verticaux) : on constate en effet que l'écart croît avec x et y.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

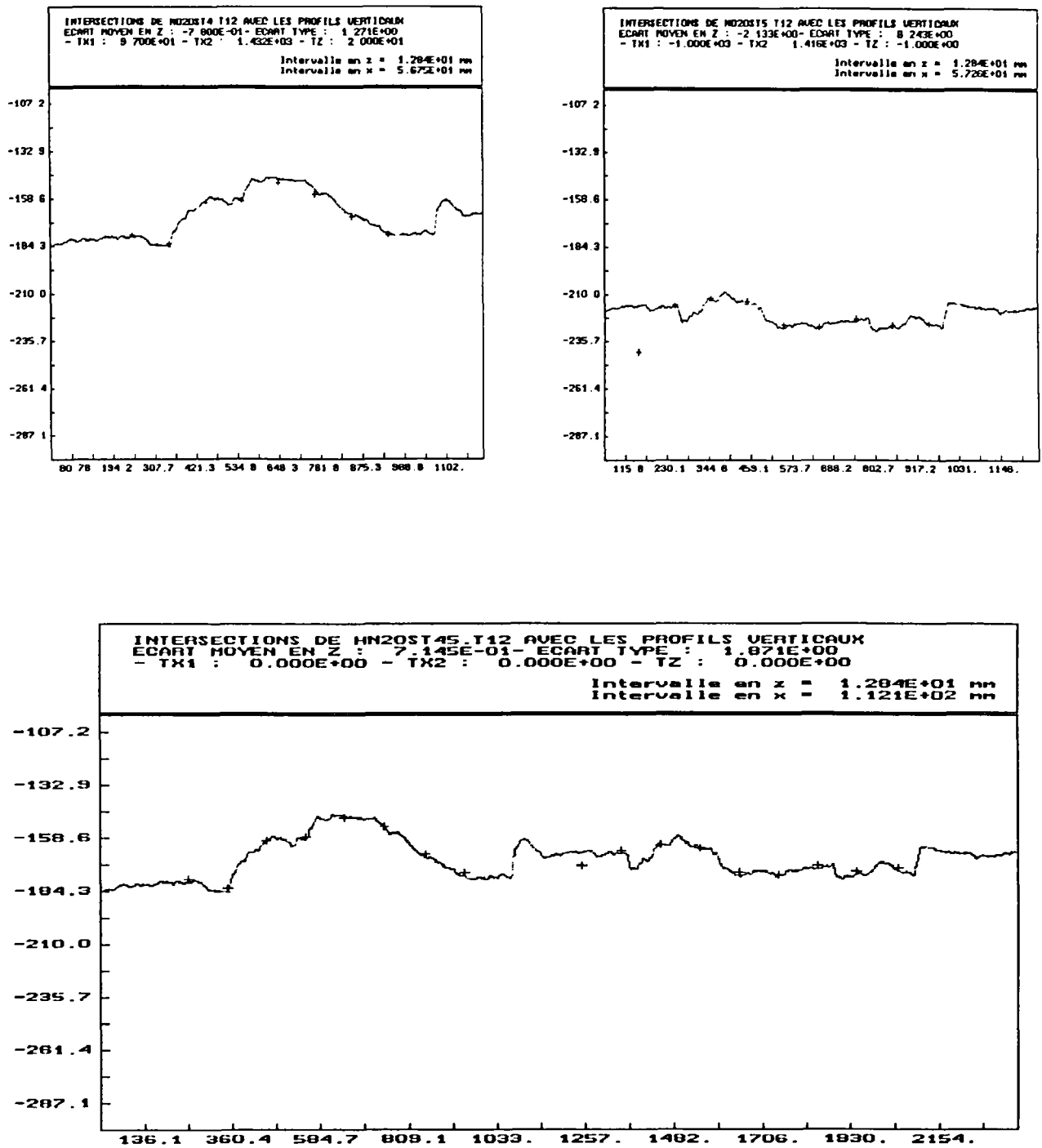


Figure 15 - Croisements des profils verticaux avec le profil horizontal n°2 pour les stations 4 et 5 puis le profil global (plan N 20°E)

### Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

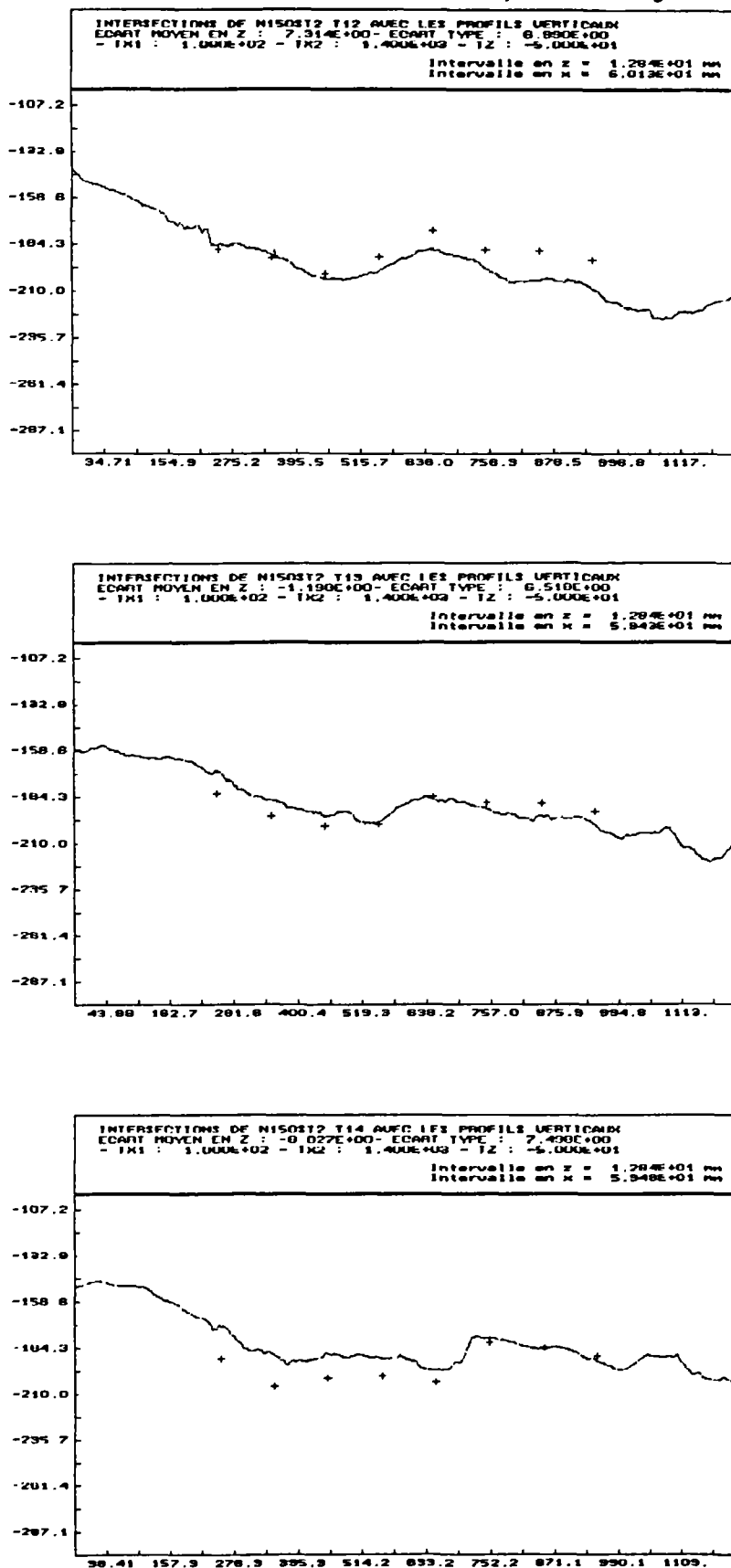


Figure 16 - Croisements des profils verticaux avec les profils horizontaux n° 2, 3 et 4 de la station 2 du plan N150°E. Mise en évidence d'une rotation du plan de référence

### Plan N80°E

Comme dans le cas précédent, seule la station 1 à été échantillonnée dans les deux directions. Cependant la configuration est légèrement différente de celle des plans N 20°E et N 150°E puisque l'acquisition s'est faite de droite à gauche (direction 3) pour les profils horizontaux. Ceci implique le même traitement dans les deux directions. On a maintenant (fig. 14) :

$$\begin{aligned}X_3 &= Tx_3 - Y_2 \\Y_3 &= Tx_2 - X_2 \\Z_3 &= Z_2 + Tz\end{aligned}$$

Cependant les profils verticaux n'ayant pas été réalisés à la suite des profils horizontaux, ceci pose le même problème de recalage que dans le cas précédent : le cadre ayant été déplacé, le plan de référence n'est plus exactement identique dans les deux directions, même si la position est repérée par les vis de fixation. La rotation semble cette fois être d'axe plutôt horizontal : les écarts en z augmentent pour les profils bas. Cependant, la relation entre les deux repères est cette fois plus complexe et incertaine et l'hypothèse d'une simple rotation ne paraît pas suffisante.

### 5.2.3. Création des fichiers (x,y,z) et des fichiers CALIMERO

Toutes les données des profils sont mises en forme dans deux buts :

1. traiter ces profils par le programme CALIMERO. Ce programme permet entre autres le calcul :
  - d'un certain nombre de paramètres de rugosité,
  - des résumés statistiques des différentes caractéristiques géométriques (hauteur, angularité, courbure,...),
  - des différents variogrammes (ordres 0 à 2).

Dans le cadre de cette étude seuls quelques paramètres de rugosité ont été calculés et sont présentés en annexes. L'accent a été mis sur la caractérisation géostatistique.

2. préparer les fichiers (x, y, z) pour l'étude du krigeage et de la simulation des épontes des fractures. Cette étude succèdera à l'étude de géostatistique descriptive qui est l'objet principal de ce rapport.

Ainsi, pour les stations 4 et 5 du plan N20°E, on a 17 profils verticaux (1 à H) d'environ 1.2 m et 11 profils horizontaux (1 à B) d'environ 2.40 m. Pour éviter d'avoir une trop forte concentration d'information le long des profils, on ne garde qu'un point sur 10 (tous les 5 mm). En effet, le pas d'échantillonnage le long des profils est de  $dx = 0.5$  mm, et l'écart entre profils de  $dy = 100$  mm (si on excepte le dernier profil vertical de la station 4 et le premier de la station 5 qui sont distants de 312 mm). Le rapport  $dy/dx$  est de 200, alors qu'il est conseillé de le limiter à 10 pour avoir une estimation correcte aux noeuds de la grille de krigeage. On se rapproche donc de cette valeur avec un rapport  $dy/dx = 20$  pour les stations

4 et 5. De plus, cela minimise l'importance des écarts résiduels aux croisements. Ce rapport est égal à 30 pour les stations 1 à 3 (7 profils d'environ 3.60m, espacés de  $\Delta y = 150$  mm).

Pour les plans N 150°E et N 80°E, seule une des deux stations de chaque étude comporte des profils verticaux. On crée donc deux fichiers pour avoir une densité de données homogène, le premier comportant l'ensemble des profils horizontaux et le second les profils dans les deux directions pour une seule station. Cependant, les stations 1 et 2 du plan N 80°E ne sont pas raccordées : on doit utiliser la valeur de translation en z relevée sur le terrain (cela entraîne une erreur de l'ordre d'1 cm). De plus les croisements entre profils verticaux et horizontaux ne sont pas bons (la dispersion des écarts est importante) en raison d'un déplacement du cadre.

## 6. ANALYSE GEOSTATISTIQUE

### 6.1 RAPPELS

#### 6.1.1. Calcul de variogrammes

Le variogramme, outil de base de la géostatistique, permet de décrire la structure spatiale de phénomènes naturels considérés comme des réalisations de fonctions aléatoires de l'espace. Le problème est que l'on ne dispose en général que d'une seule réalisation. On ne peut pas alors résoudre l'inférence statistique sans faire d'hypothèses initiales sur la nature de la variable régionalisée .

Dans notre cas, la fonction aléatoire  $Z(x)$  est l'ensemble des surfaces de fractures possibles, chacune d'entre elles acceptant le même variogramme. La variable régionalisée  $z(x)$  est la réalisation connue de  $Z(x)$ .

#### Hypothèse intrinsèque

L'hypothèse de stationnarité à l'ordre 2 de  $Z(x)$  est trop contraignante quand la variance de  $z(x)$  ne se stabilise pas alors que l'on agrandit le domaine. On suppose alors la stationnarité à l'ordre 2 des accroissements, leur espérance étant de plus nulle.

$$E \{ Z(x+h)-Z(x) \} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Var} \{ Z(x+h)-Z(x) \} = 2\gamma(h) \quad (2)$$

On a alors  $\gamma(h) = \frac{1}{2}E \{ (Z(x+h)-Z(x))^2 \}$  : variogramme (3)

#### Variogramme généralisé

Cependant l'hypothèse d'une espérance constante de la variable régionalisée dans le domaine est insuffisante dans le cas d'une dérive du phénomène. L'espérance des accroissements dépend alors de  $h$ , et traduit la partie prévisible ou régionale du phénomène. On met ainsi en évidence l'importance de l'échelle d'observation : cette dérive peut en effet faire partie d'une structure de plus grande longueur d'onde que l'on aurait discernée avec un domaine plus large. On cherche à filtrer cette dérive qui peut masquer les structures plus petites en assimilant l'espérance  $m(x)$  de  $z(x)$  à un polynôme d'ordre  $k$ . On peut alors calculer le variogramme généralisé d'ordre  $k$  correspondant :

$$\Gamma_k(h) = \frac{1}{2} \text{Var} \{ Z(x+h)-Z(x) \} = \frac{1}{2}E\{(Z(x+h)-Z(x))^2\} - \frac{1}{2}(m(x+h)-m(x))^2 \quad (4)$$

Par exemple, à l'ordre 1, on élimine une dérive linéaire et le variogramme généralisé est :

$$\Gamma_1(h) = \frac{1}{6} \text{Var} \{ Z(x+2h)-2Z(x+h)+Z(x) \} \quad (5)$$

et on a, par analogie avec le cas précédent

$$E \{ Z(x+2h)-2Z(x+h)+Z(x) \} = 0 \quad (6)$$

Pour  $k=0$ , on retrouve le cas précédent (3) qui correspond bien au filtrage d'une espérance constante de la fonction aléatoire.

On peut remarquer que le variogramme d'ordre 0 est toujours supérieur à un variogramme d'ordre  $k>0$  auquel on retire un terme positif lié à l'accroissement de la dérive (4).

### **6.1.2. Propriétés du variogramme**

Le variogramme qui est utilisé quantitativement dans l'interpolation du krigeage, est aussi un outil qui permet d'analyser séparément les profils. On s'intéresse particulièrement au comportement à l'origine et à l'infini.

La forme du variogramme à l'origine reflète la continuité du phénomène étudié :

- Une forme parabolique traduit une forte continuité ou bien l'existence d'une dérive,
- Une forme linéaire caractérise une variable continue mais non différentiable,
- Une discontinuité à l'origine (effet de pépite) traduit une discontinuité du phénomène, mais qui peut aussi s'expliquer par un effet d'échelle lié à l'échantillonnage (aliasing en traitement du signal), ou par un rapport signal/bruit important.  
Si le variogramme est constant, le phénomène est aléatoire et n'obéit à aucune structure spatiale

Le variogramme peut continuer à croître indéfiniment avec la distance, mais peut aussi se stabiliser autour d'une valeur appelée "portée" qui représente la zone d'influence d'une structure. Au delà de cette valeur il n'y a plus de corrélation, et le variogramme devrait rester constant et égal à la variance a priori du phénomène (qui est indépendante de la distance). Cependant il faut considérer l'exception d'une structure périodique pour laquelle le variogramme -lui aussi périodique- atteint son maximum pour la demi-période et s'annule pour la valeur de la période spatiale. Mais il arrive souvent que les structures s'emboîtent à différentes échelles, auquel cas on a plusieurs paliers successifs, la variance se cumulant à celle du palier précédent, si on considère les structures emboîtées comme indépendantes les unes des autres. Le palier peut être plus ou moins visible, la structure suivante pouvant localement jouer le rôle d'une dérive. Il peut arriver au contraire que le palier soit suivi d'un effet de trou (diminution du variogramme) qui correspond à une absence de structures pour des distances plus élevées. On retombe alors sur l'exemple de la structure périodique. Mais ceci peut avoir des raisons d'ordre statistique. Dans le variogramme expérimental, le nombre de points d'un profil est limité. Le nombre de points à prendre en compte pour une distance  $h$  diminue quand  $h$  augmente, ce qui introduit un biais, d'autant plus grand que  $h$  est grand (fig. 17).

On constate que tout dépend - dans les deux cas- de l'échelle d'observation, c'est à dire des distances minimales et maximale considérées entre deux points.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

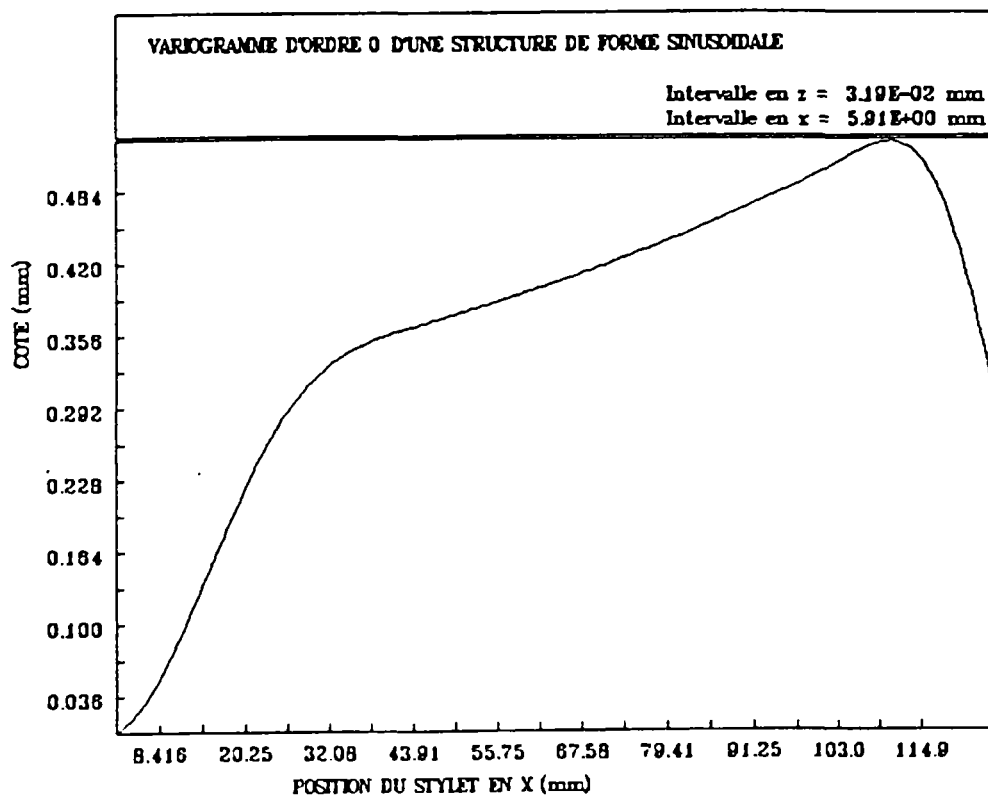
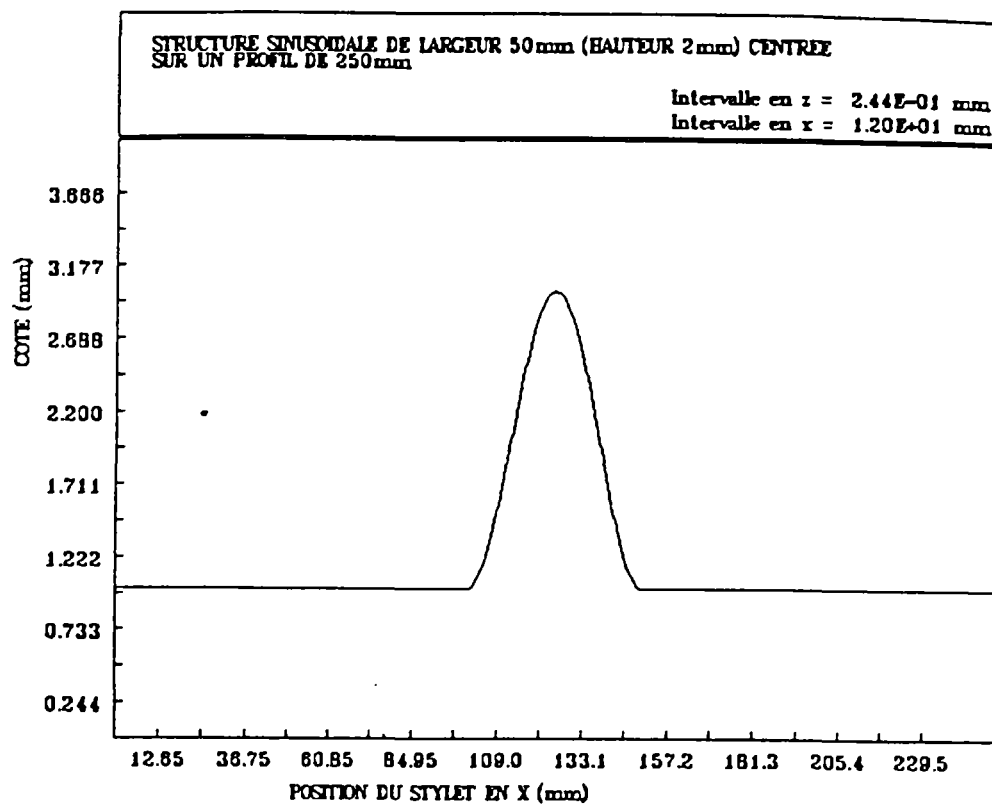


Figure 17 - Variogramme d'ordre 0 d'un profil théorique

## **6.2. APPLICATIONS AU PROFILS DU MAYET DE MONTAGNE**

Les variogrammes d'ordre 0 et 1 ont été calculés pour tous les profils (cf. annexes 1, 2, 3 et 4). Le calcul des variogrammes des profils globaux permet de voir s'il existe des structures plus importantes qui se traduiraient par une dérive sur les profils de base et par des paliers sur les profils plus longs.

De plus, les variogrammes moyens sont calculés pour avoir une idée de l'homogénéité et essayer d'ajuster éventuellement un modèle théorique. Ils sont intéressants car ils peuvent faire ressortir des caractéristiques communes si elles existent.

Le calcul d'histogrammes des portées est complémentaire, quand le nombre de structures est significatif. Il est effectué pour une direction dans un plan donné. On utilise la convention d'un intervalle fermé à gauche et ouvert à droite. Les histogrammes montrent la distribution des différentes portées mais ne rendent pas compte de leur importance relative. De plus, un critère subjectif intervient dans le choix des structures, certaines étant plus nettes que d'autres.

La plupart des calculs ont été effectués, pour une question de rapidité, sur station de travail.

Les variogrammes sont calculés pour une distance maximale de  $L/2$  à l'ordre 0 et  $L/4$  à l'ordre 1,  $L$  étant la longueur du profil.

On rappelle que les directions 1 et 3 sont horizontales (de droite à gauche et de gauche à droite), tandis que les directions 2 et 4 sont verticales.

### **6.2.1. Description générale**

#### **Plan N20°E**

##### *Etude des stations 1 à 3*

Les profils des stations 2 et 3 (prises ensemble ou séparément) du plan N20°E présentent une dérive importante sur les variogramme d'ordre 0, ce qui justifie le calcul à l'ordre 1. On peut de plus vérifier sur les profils que cette dérive est bien linéaire. Tandis que les variogrammes d'ordre 0 sont lissés et croissent de façon monotone jusqu'à des valeurs importantes (forme  $h^a$ , avec  $a > 1$ , fig. 18), les variogrammes d'ordre 1, présentent des structures mises en évidence par des paliers et sont souvent bornés (stationnarité) avec des valeurs plus faibles (suppression de la contribution de la dérive). Pour les stations 2 et 3 raccordées, on dénombre 11 structures pour 7 profils. A l'exception du profil n°1 qui n'est pas structuré, on observe le schéma suivant : une structure d'une portée de 220 à 260 mm (un pic le plus souvent suivi d'un effet de trou important), et - dans 4 cas- une structure intermédiaire dont le palier n'est pas très marqué (portée de 50 à 120 mm). Pour les deux stations prises séparément, on observe le même schéma, mais les structures intermédiaires sont plus marquées et on peut voire apparaître des structures emboîtées.

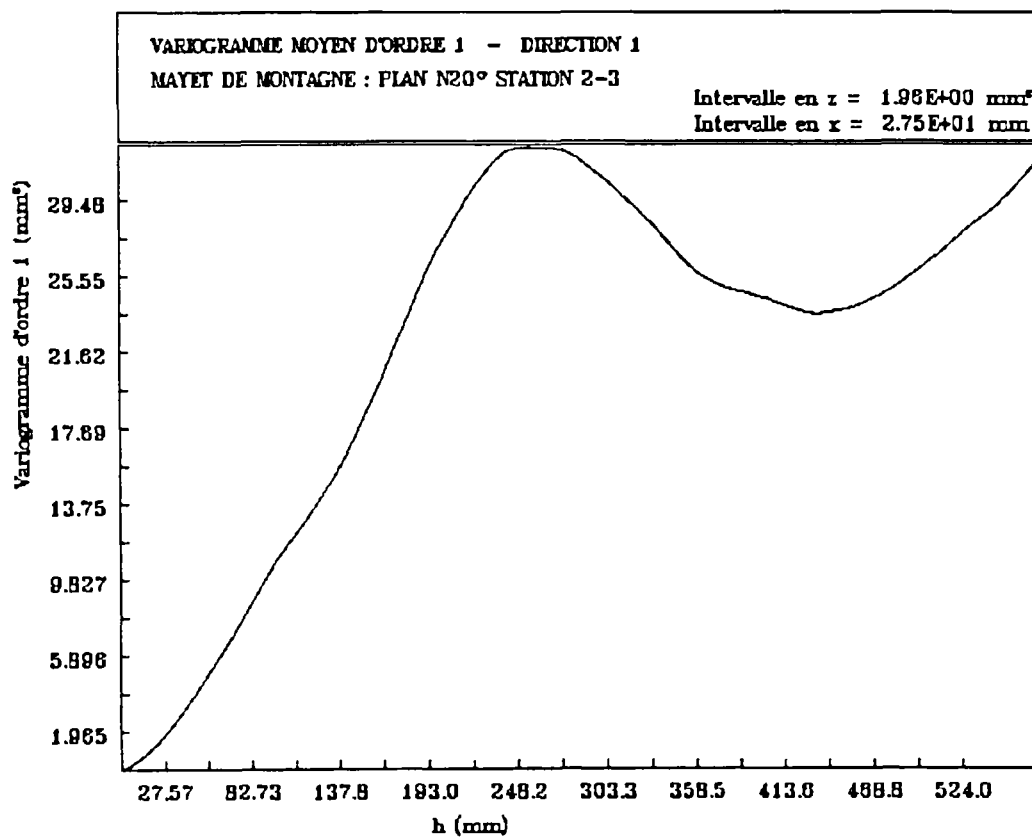
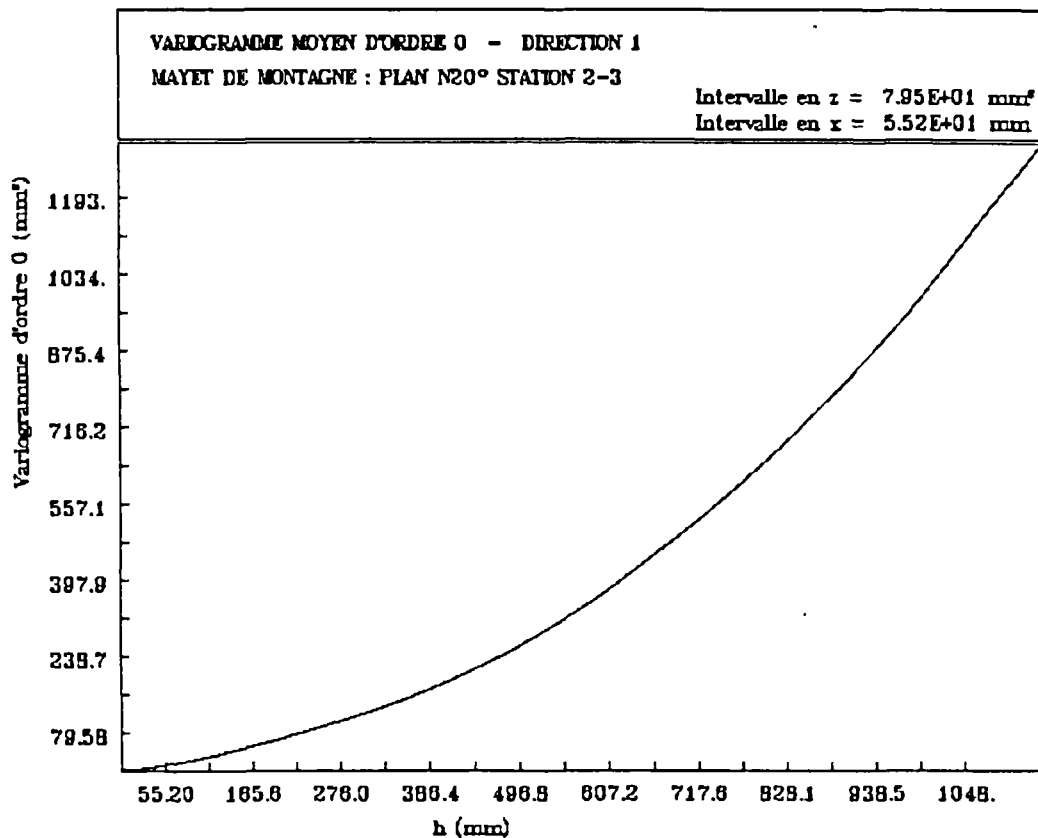


Figure 18 - Variogrammes moyens d'ordre 0 et 1 pour la station 2-3

Le variogramme moyen d'ordre 1 de la station 2-3 (fig. 18) montre un palier (portée 240 mm, variance de 32 mm<sup>2</sup>) suivi d'un effet de trou. Celui de la station 1-3 révèle lui aussi cette structure (55 mm<sup>2</sup>), mais continue de croître par la suite.

Ceci traduit l'existence sur tous les profils de la station 1 d'une structure correspondant au passage brutal à un plan de fracture parallèle. Pour la station 1 prise seule, on constate en effet que l'ordre 1 n'est pas approprié aux grandes distances et que les variogrammes d'ordre 0 sont par contre bornés. L'effet de cette structure se fait donc ressentir de façon croissante lorsqu'on passe des profils reconstitués à partir des stations 1 à 3, aux profils correspondant aux stations 1 et 2 et aux profils limités à la station 1.

#### *Etude des stations 4 et 5*

Au contraire, les variogrammes d'ordre 0 et 1 des profils horizontaux des stations 4 et 5 raccordées sont comparables en amplitude : les profils ne présentent pas de pente moyenne. Si on retrouve les mêmes structures, le variogramme d'ordre 1 révèle parfois des structures de faible portée masquées à l'ordre 0. Le variogramme moyen d'ordre 0 a plutôt une tendance exponentielle (linéarité à l'origine, et stabilisation pour  $h$  grand) mais montre au moins trois échelles de structures (de l'ordre de 300 mm, 600 mm, 900 mm). Ceci se retrouve sur l'histogramme des portées (fig. 19).

Par contre, une partie des profils verticaux présentent une dérive à l'échelle du profil, mais jamais aussi importante que pour les stations 2 et 3. Les variogrammes sont assez structurés et montrent souvent trois structures emboîtées. L'observation des variogrammes moyens montre que la dérive est globalement moins importante pour la station 4 pour laquelle le variogramme d'ordre 1 est assez proche du variogramme d'ordre 0, ce dernier ayant une tendance à s'aplatir (forme  $h^a$ , avec  $a < 1$ ) et montre un palier à 370 mm. Le variogramme d'ordre 0 de la station 5 est quasi-linéaire, mise à part une légère structure qui ressort à 430 mm. Son amplitude étant 2 à 3 fois plus grande que pour la station 4, le modèle à retenir pour l'ensemble dans la direction 2 serait de type linéaire (fig. 20). On dénombre 59 structures pour les 17 profils (fig. 21). Certains profils montrent une dérive linéaire globale (variogramme d'ordre 0 parabolique), le variogramme d'ordre 1 révélant des structures. On observe sur d'autres les mêmes structures à l'ordre 0 et 1, le variogramme d'ordre 1 pouvant filtrer une dérive locale, notamment pour les courtes distances. On note en effet sur l'histogramme des portées un groupe de structures d'une portée de 20 à 50 mm. Cet histogramme montre par ailleurs une assez grande dispersion des portées, une bonne partie étant cependant concentrée de 150 à 300 mm. On distingue enfin un dernier ensemble de structures, que l'on observe à l'ordre 0, d'une portée de 450 à 590 mm. Il faut noter qu'il existe un biais dans cet histogramme, les profils affectés d'une dérive ne pouvant révéler ces structures de grande portées à l'ordre 0. De plus, les structures apparaissant à l'ordre 0 comme à l'ordre 1 montrent parfois des portées légèrement différentes, ce qui peut créer une ambiguïté dans le dénombrement.

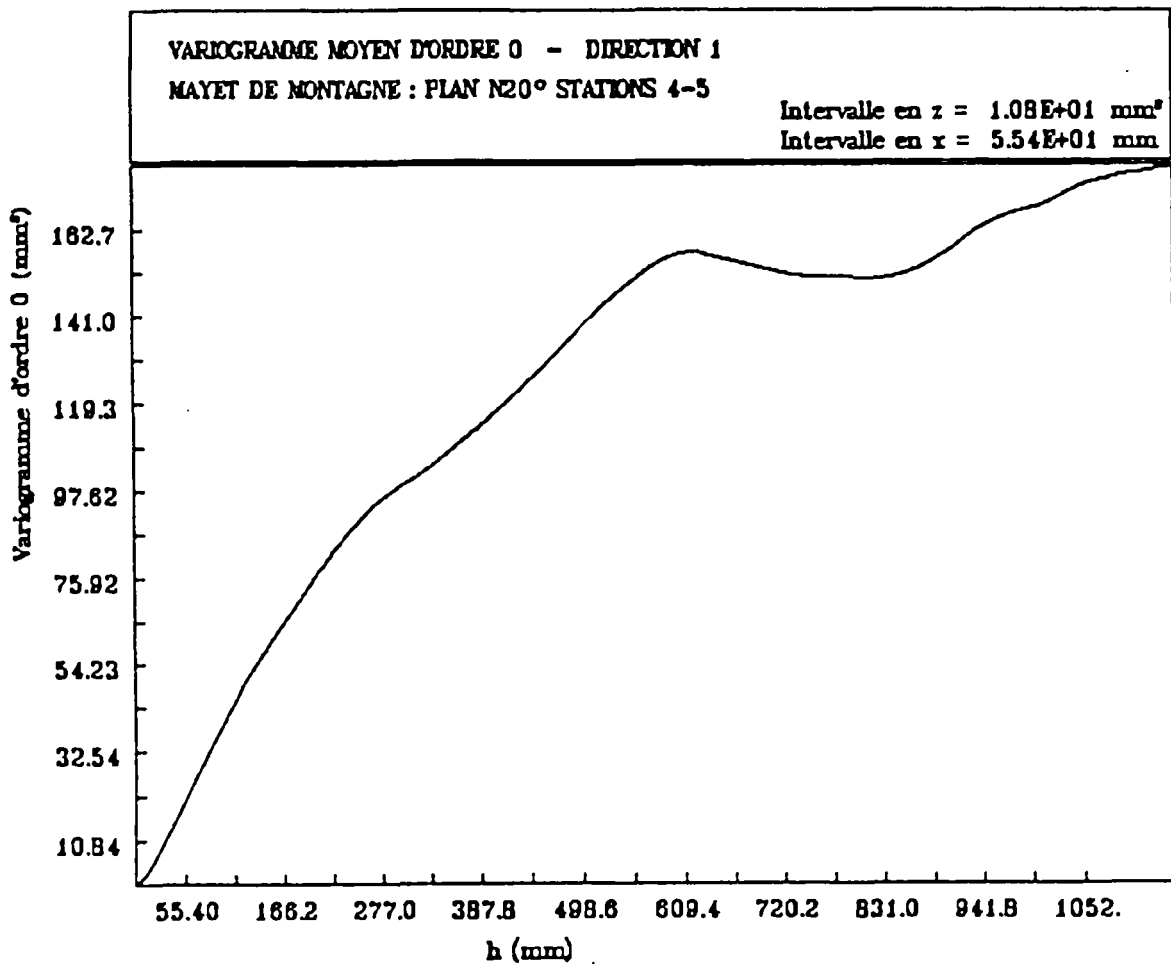
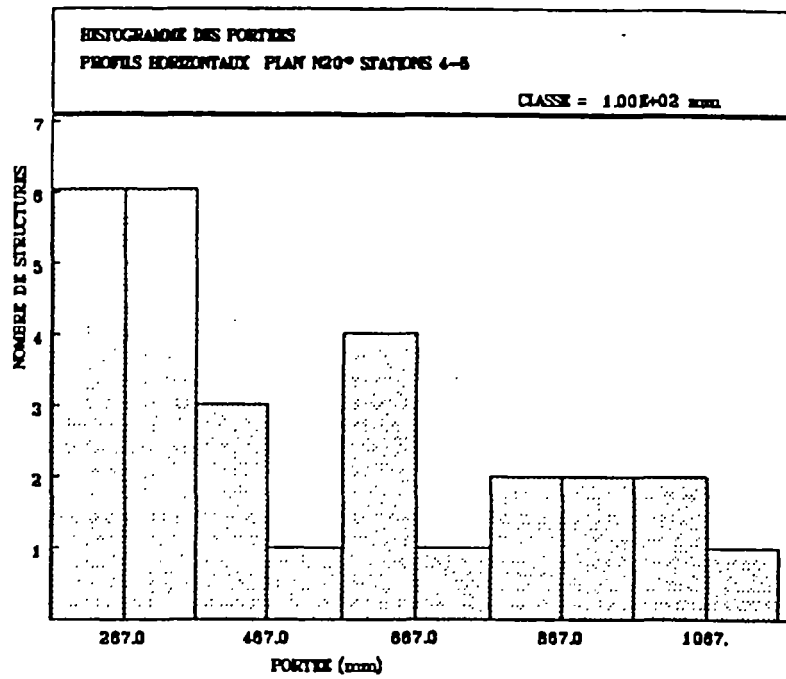


Figure 19 - Histogramme des portées et variogramme moyen d'ordre 0 pour la station 4-5 plan du N 20° E (profils horizontaux)

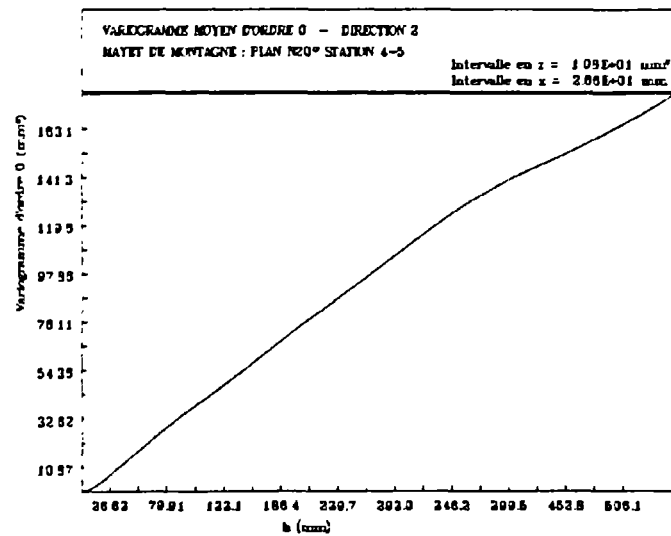
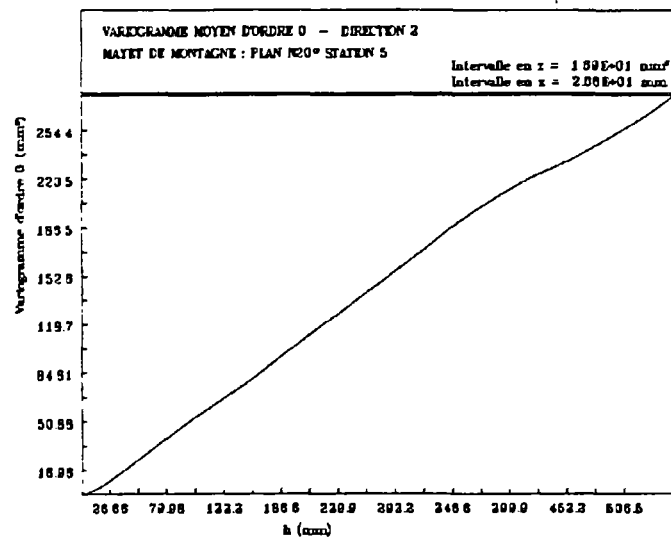
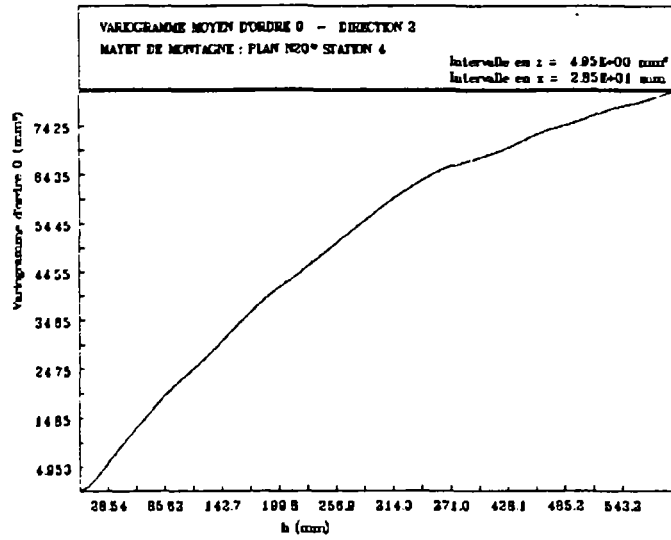


Figure 20 - Variogrammes moyens d'ordre 0 pour les stations 4, 5 et 4-5 du plan du N 20°E (profils verticaux)

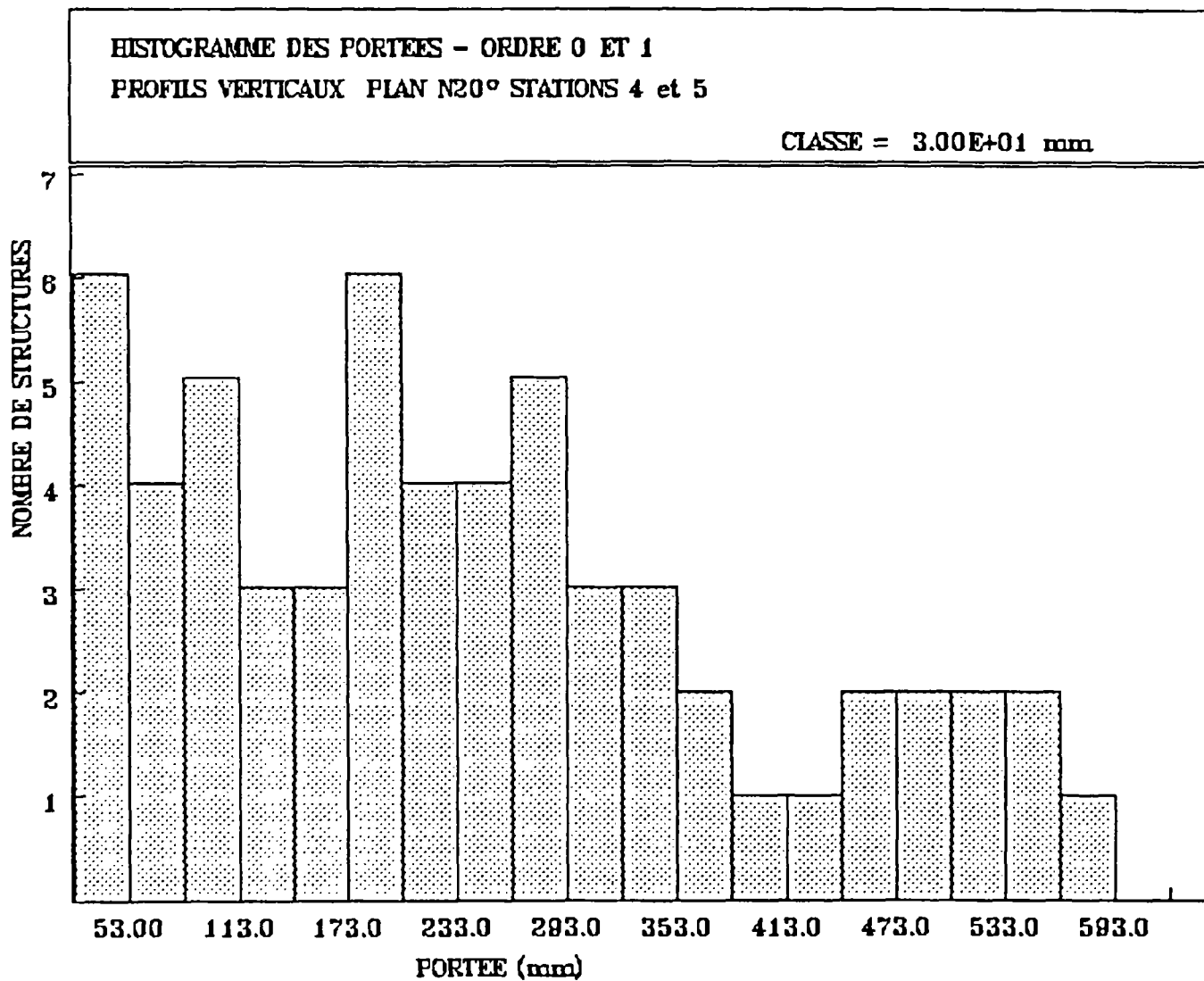


Figure 21 - Histogramme des portées pour la station 4-5 plan N 20° E (profils verticaux)

On constate une variabilité de ces profils et de leurs variogrammes, alors que l'on observe une corrélation (visuellement) des grandes structures d'un profil à l'autre dans la direction horizontale. De même pour les stations 1 à 3, l'allure générale des profils est conservée (accidents et dérive). On peut donc penser que ces profils verticaux traduisent l'évolution de grandes structures plutôt allongées verticalement.

En résumé, on peut retenir un modèle de type exponentiel dans la direction horizontale et un modèle de type linéaire dans la direction verticale (stations 4 et 5). On peut adopter le même modèle pour les distances inférieures à 280 mm.

### **Plan N 150°E**

#### *Profils horizontaux : stations 1-2 et 1 et 2*

Il faut signaler l'aspect totalement différent des profils horizontaux de cette fracture. On constate une uniformité de leur allure qui va se retrouver dans les celle des variogrammes. Une structure en escalier affecte l'ensemble des profils, avec une amplitude très importante (de l'ordre de 20 cm). Ceci masque toutes les autres structures éventuelles et entraîne des valeurs de l'ordre de 5000 mm<sup>2</sup> du variogramme (fig. 22). La dérive linéaire n'est pas adaptée, sauf peut être pour des faibles distances, ou pour les distances à la limite de celles du variogramme d'ordre 1. On remarque en effet une structure peu marquée de faible portée sur certains variogrammes (de 80 à 120 mm pour les profils 4 et 5, de 160 à 180 mm pour les profils 6 à 8 avec une variance de 40 à 80 mm<sup>2</sup>), ainsi qu'un changement de pente pour les grandes distances (de l'ordre de 530 mm de portée pour une variance de 1000 mm<sup>2</sup> pour les profils 3 et 4). Ces deux structures ne ressortent pas sur le variogramme d'ordre 1. On peut noter sur le variogramme d'ordre 1 du profil A une structure de 45 à 50 mm de portée et 15 mm<sup>2</sup> de variance, qui ne peut être vue qu'en agrandissant l'échelle, la variance maximale avoisinant les 1 000 mm<sup>2</sup>. De plus, une partie importante du dénivelé du à la structure globale a lieu au raccord entre les deux stations : il est intéressant de calculer les variogrammes pour les deux stations séparément.

Si on considère les deux stations séparément, on note qu'à l'ordre 1, les structures que l'on avait devinées précédemment apparaissent nettement sur la plupart des profils, mais ne ressortent pas sur les variogrammes moyens (fig. 23 et 24). Des structures emboîtées sont visibles pour les profils 5 (station 2) et A (station 1), mais la plupart des variogrammes ne sont pas stationnaires à l'ordre 1, à l'exception de ceux des profils 6 pour la station 2 (265 mm) et B pour la station 1 (215 mm).

A l'ordre 0, les variogrammes sont souvent stationnaires, comme le montre le variogramme moyen de la station 1 (portée 570 mm pour une variance de 1 230 mm).

#### *Profils verticaux*

Pour la direction 2 (station 2), le variogramme moyen d'ordre 0 (fig. 25), très représentatif de chacun des variogrammes, a une allure tout a fait gaussienne (palier à 550 mm). Un palier qui apparaît souvent à l'ordre 1, avec des portées variables (d'où sa disparition sur le variogramme moyen) et une variance faible montre que cet aspect gaussien du variogramme

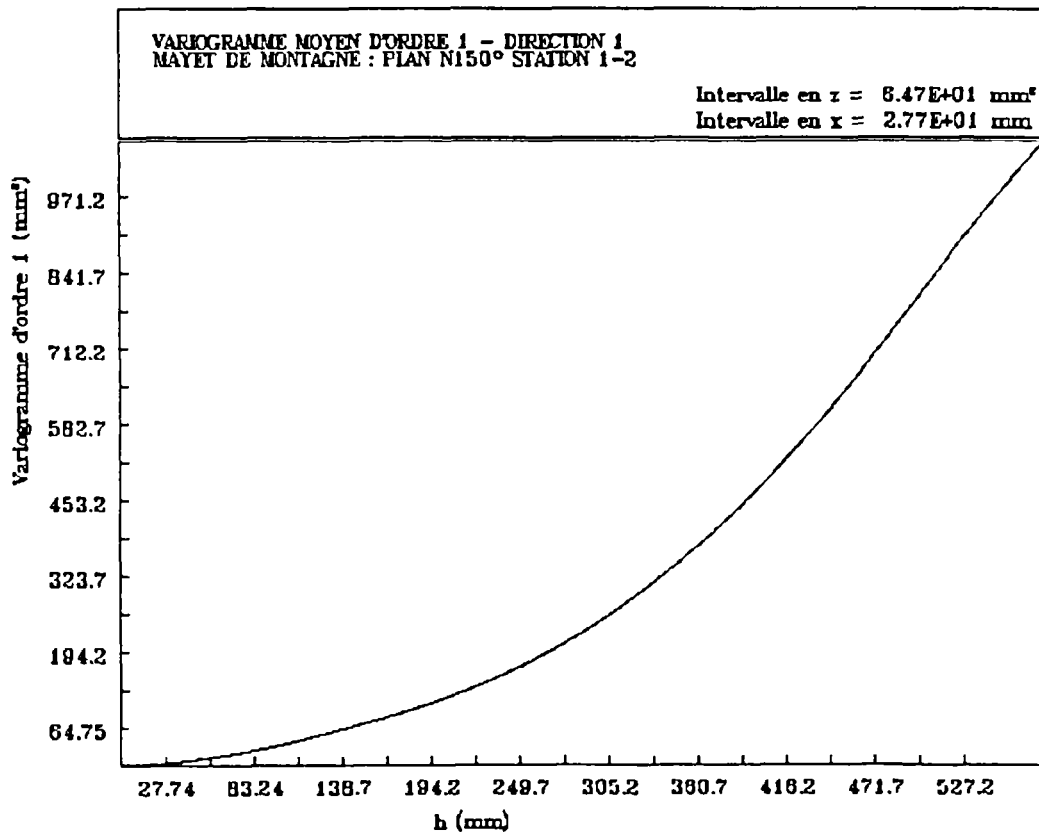
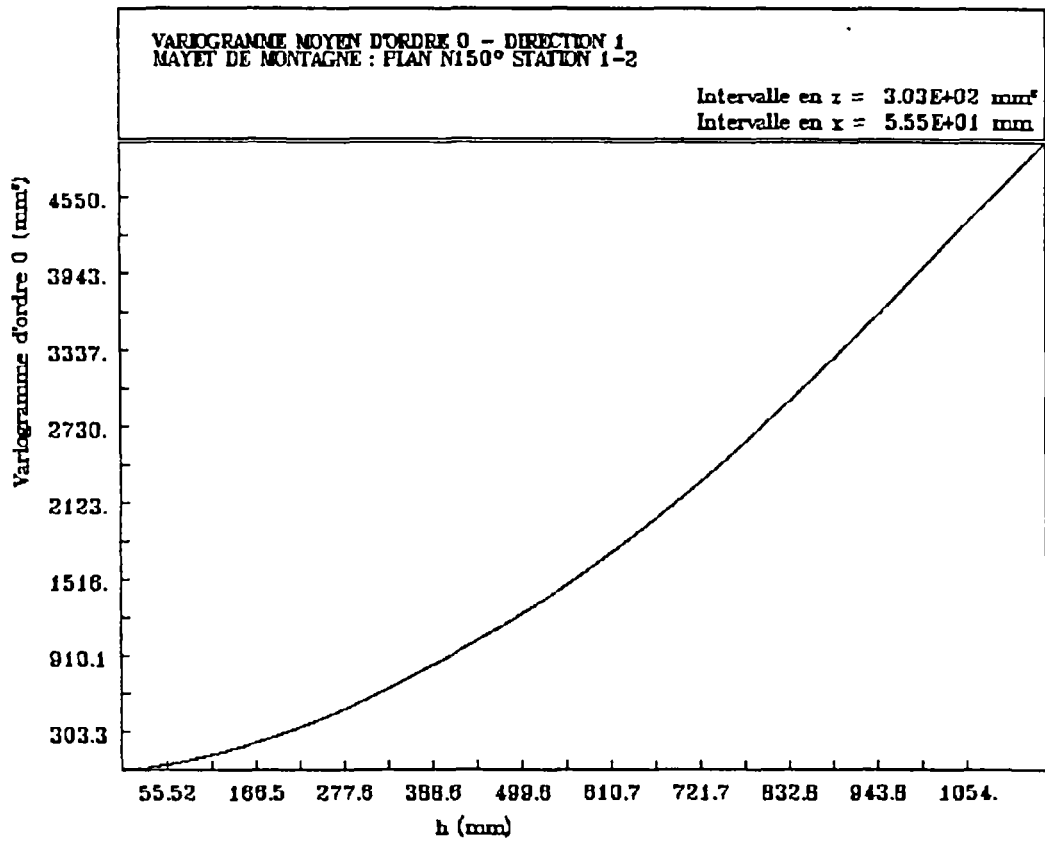


Figure 22 - Variogrammes moyens pour la station 1-2 du plan N 150°E  
(profils horizontaux)

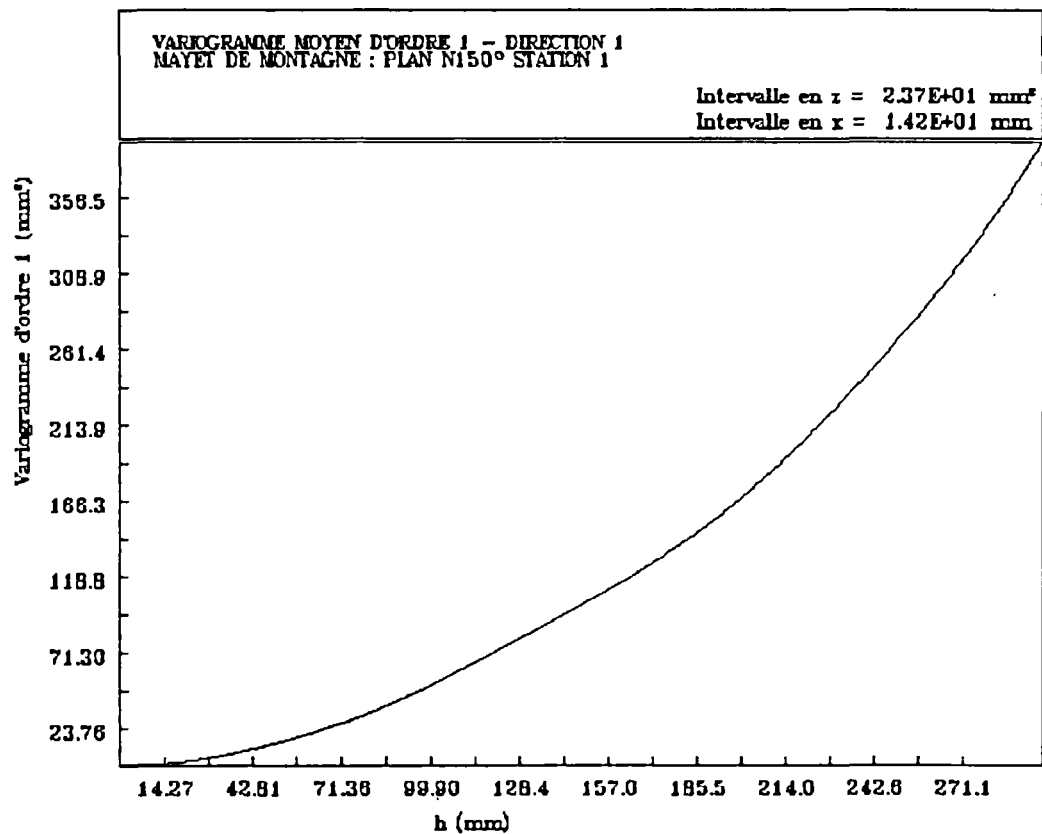
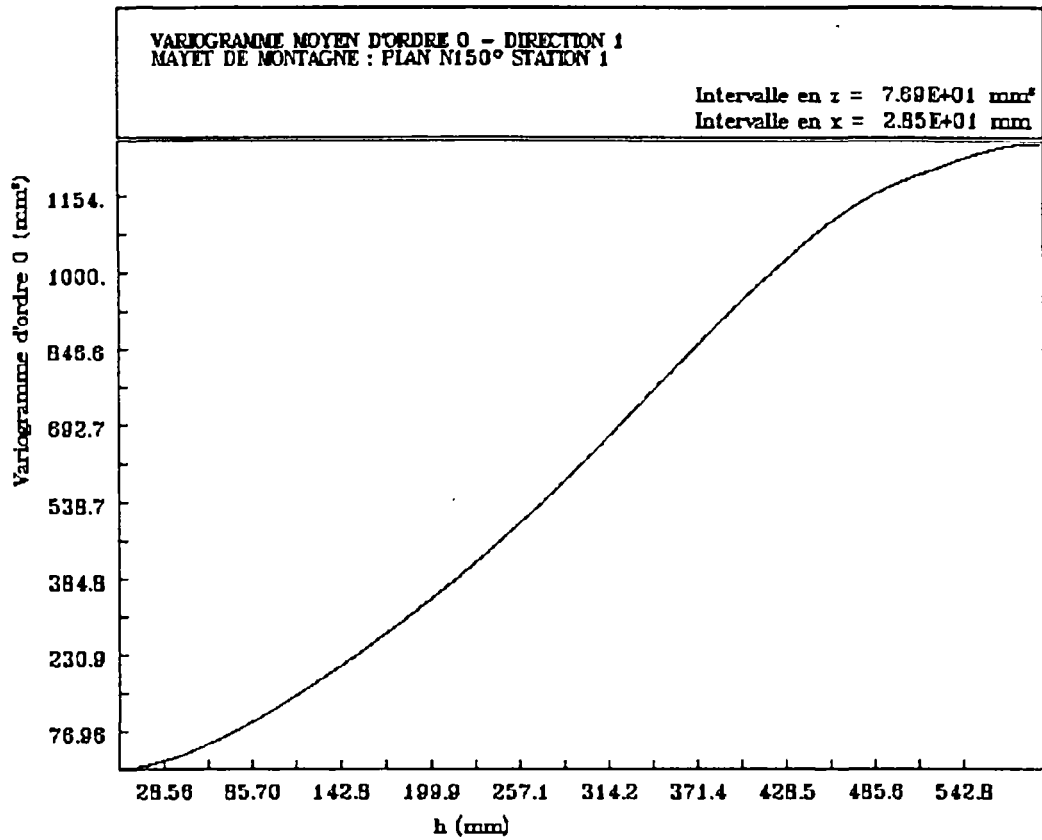


Figure 23 - Variogrammes moyens à l'ordre 0 et 1 de la station 1 du plan N 150°E (profils horizontaux)

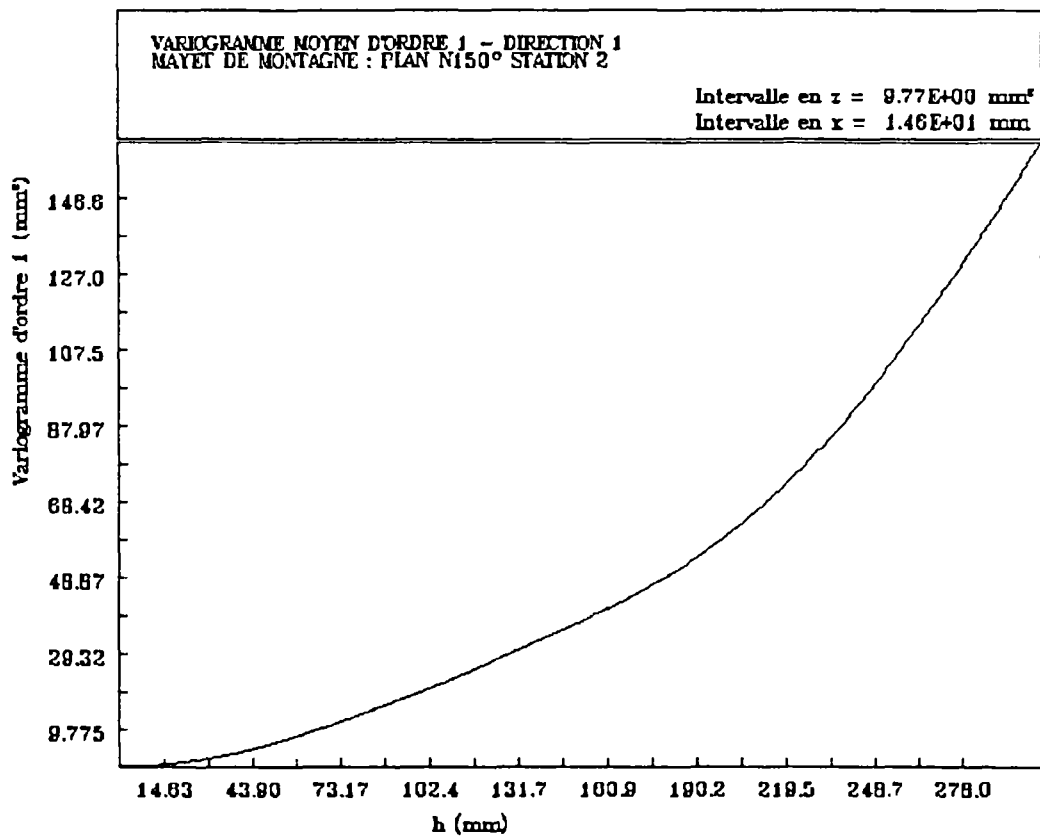
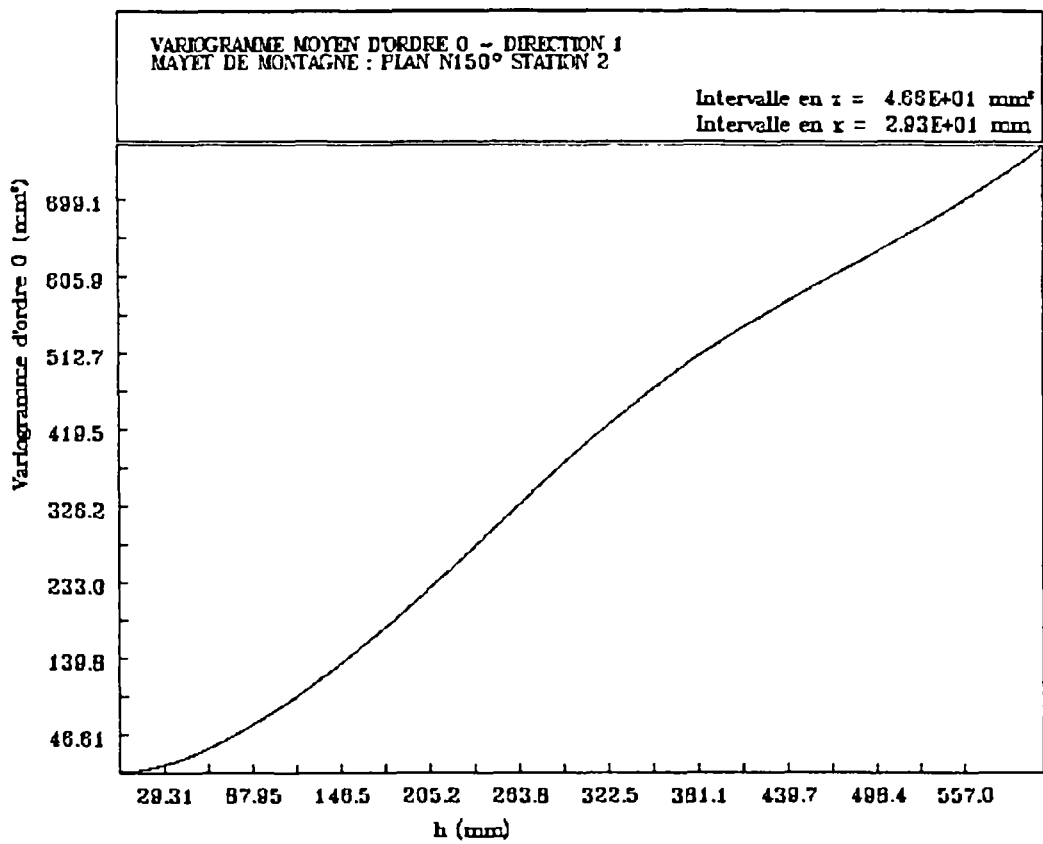


Figure 24 - Variogrammes moyens à l'ordre 0 et 1 de la station 2 du plan N 150°E (profils horizontaux)

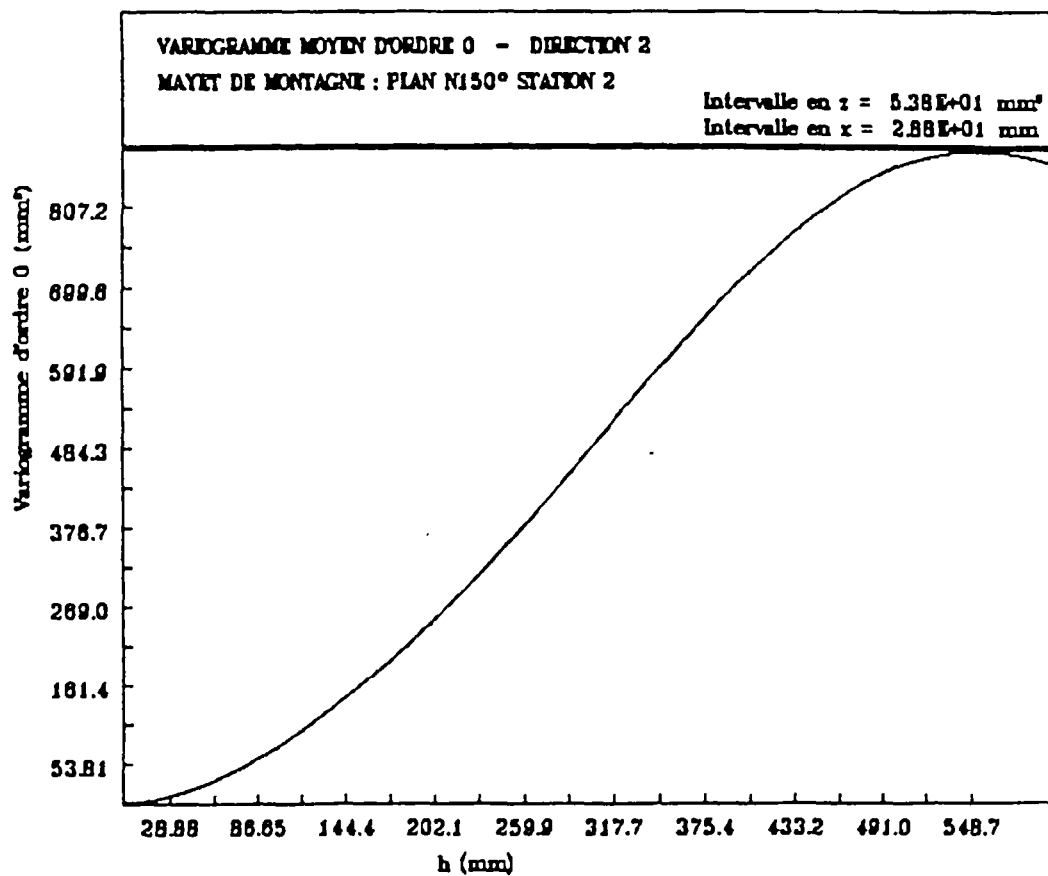


Figure 25 - Variogramme moyen d'ordre 0 pour la station 2 du plan du N 150°E (profils verticaux)

d'ordre 0 cache une dérive linéaire pour les faibles distances. On n'observe pas de structures emboîtées aux plus grandes distances. On a en fait -comme dans la direction horizontale- une structure qui se conserve sur les différents profils, mais dont la dimension n'est cette fois pas trop grande par rapport à la longueur des profils.

### **Plan N 80°E**

Dans la direction 2 (verticale) comme dans la direction 3 (horizontale), une dérive linéaire importante des profils, qui se manifeste par la forme parabolique du variogramme et la variance importante des variogrammes d'ordre 0, apparaît sur l'ensemble des profils. Cependant dans la direction 3, si des paliers se manifestent à l'ordre 1, aucune structure commune ne ressort sur les variogrammes moyens, ce qui peut s'expliquer par la dispersion des différentes portées. On observe pourtant nettement sur l'histogramme des portées des variogrammes horizontaux (stations 1 et 2, direction 3) 3 groupes de structures centrés sur 70, 160 et 250 mm (fig. 22). Il existe de plus une forte disparité des variances entre les stations 1 et 2 (direction 3) qui masque la plus grande homogénéité de ces variances pour la station 2 où un palier apparaît vers 190mm sur le variogramme moyen pour 13,5 mm<sup>2</sup> (modèle gaussien), alors que celui de la station 1 montre une inflexion pour une variance de l'ordre de 90 mm<sup>2</sup> (fig. 26). C'est dans la direction 3 (surtout pour la station 2) de ce plan que l'on observe à l'ordre 1 le plus grand nombre de structures emboîtées. On en compte en effet 52 pour 23 profils, dont 34 pour la seule station 2. Ceci s'explique par le fait que la dérive linéaire est une bonne approximation pour tous les profils, et que la taille de ces structures est assez faible devant la longueur de profil (1.20 m).

Dans la direction 2 (station 1), la dérive est dans l'ensemble plus importante (fig. 27). On observe peu de structures à l'ordre 1, souvent une seule par profil, ce qui peut être dû à la non linéarité de la dérive. On peut en dégager deux : la première, de 80 à 120 mm de portée a une variance de 8 à 40 mm<sup>2</sup>, et la deuxième a une portée d'environ 260 mm pour une variance de 60 à 100 mm<sup>2</sup> (cf § variogrammes caractéristiques). A l'ordre 0, on observe pour trois profils, une structure de 320 à 400 mm de portée avec une variance de 190 à 520mm<sup>2</sup>. Ces structures sont toutefois trop peu nombreuses pour faire l'objet d'un histogramme.

Même si l'on ne dispose pas de profils verticaux pour la station 2, on peut quand même, au vu des profils verticaux de la station 1 et des derniers profils horizontaux (forme moins linéaire de la dérive) établir une différence entre les stations.

### **6.2.2. Variogrammes caractéristiques**

Dans cette partie sont présentés quelques variogrammes représentatifs de chaque plan de fracture. Dans le cas de structures emboîtées, bien que les variances des différentes structures s'ajoutent pour donner la valeur calculée du variogramme, on choisit de ne parler que des valeurs brutes. Il y a en effet une ambiguïté quand une structure est atténuée par une structure plus grande.

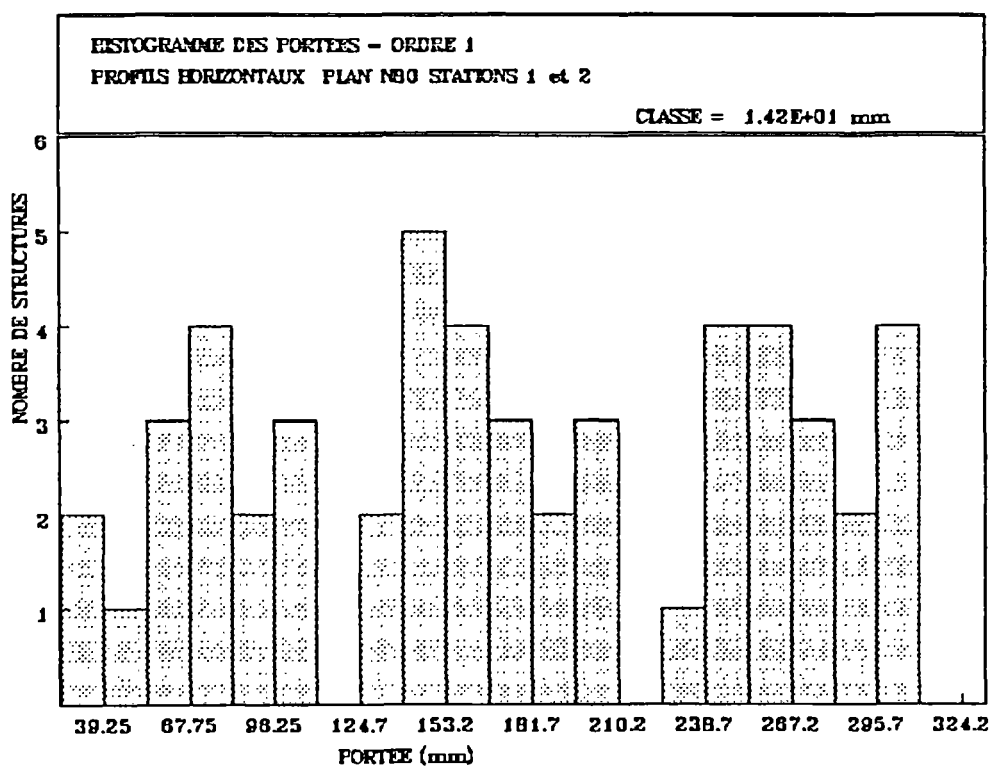
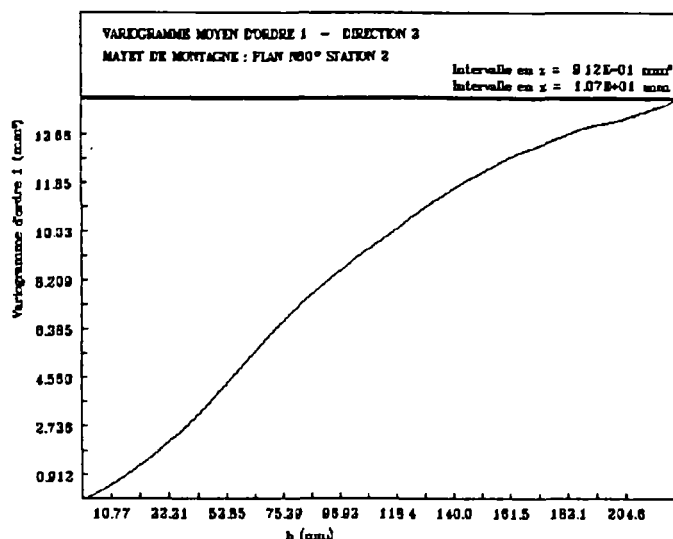
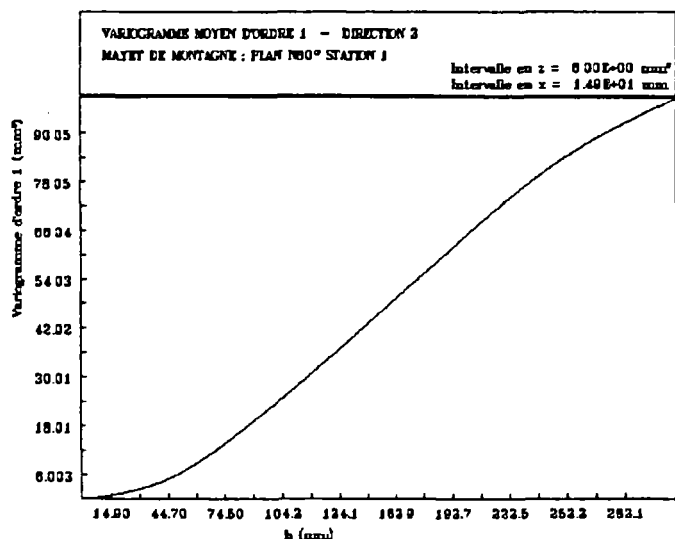


Figure 26 - Variogrammes moyens d'ordre 1 des stations 1 et 2  
 Histogramme des portées (plan N 80°E, profils horizontaux)

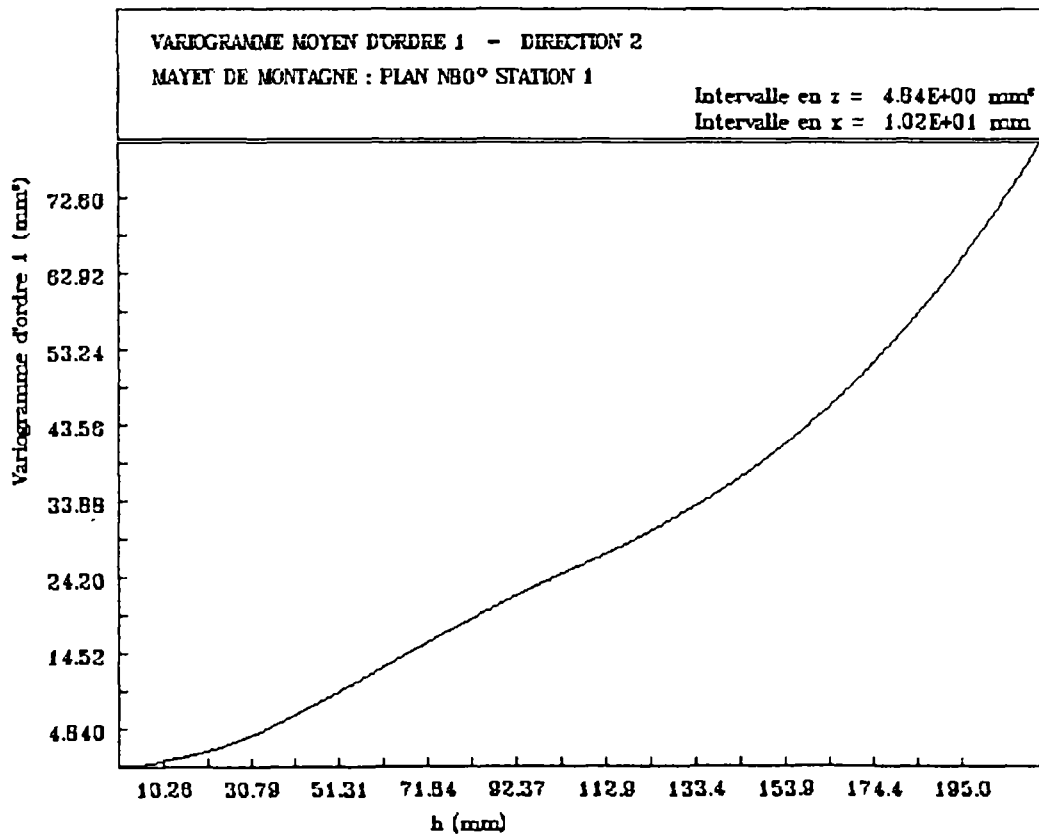
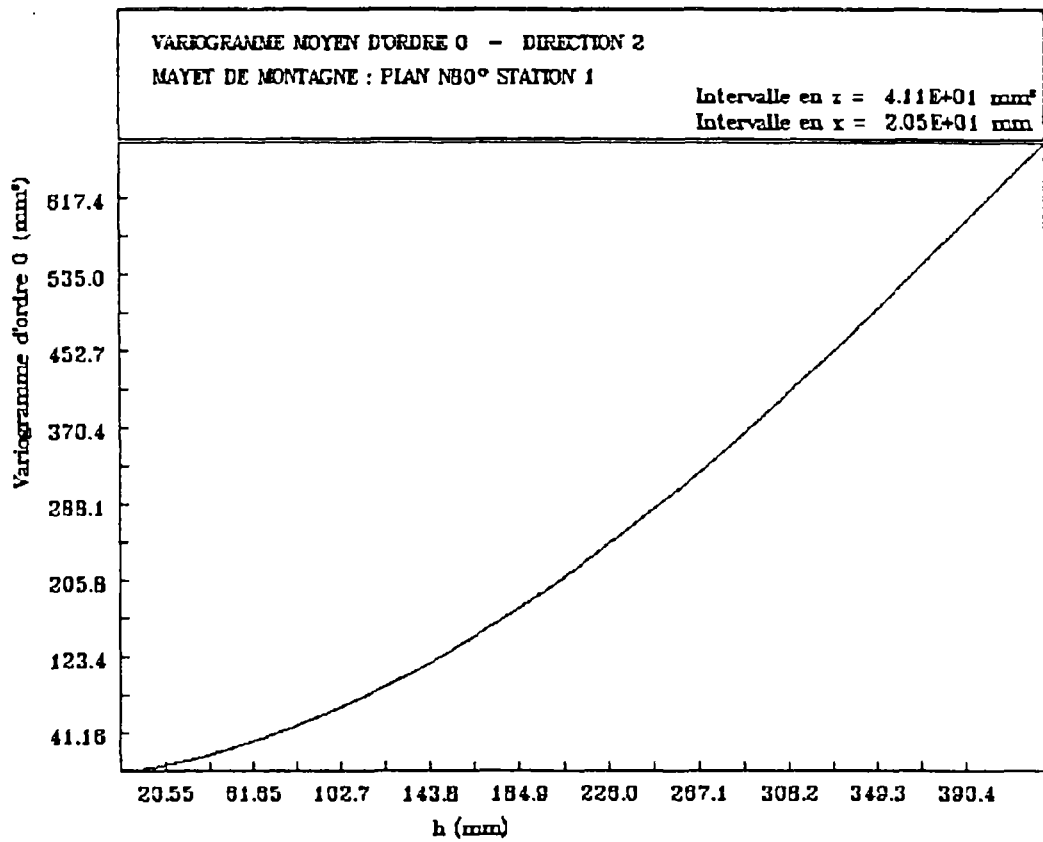


Figure 27 - Variogrammes moyens pour la station 1 du plan N 80°E (profils verticaux)

**Plan N 20°E**

*Profil n°5 stations 1-2-3, 1-2, 2-3, 1, 2, 3*

Pour mettre en évidence l'effet de la longueur des profils d'ordre 0 et 1, on compare les variogrammes d'ordre 0 et 1 pour une, deux ou trois stations. Le variogramme étant une moyenne quadratique d'écarts, celui d'un profil global est la moyenne des profils le constituant, du moins pour les distances inférieures au  $h$  maximum des profils élémentaires. On peut donc sur ces derniers éventuellement déceler des structures de faibles portées qui sont atténuées sur les profils globaux. Pour les plus grandes distances, on peut déceler des structures qui peuvent jouer le rôle d'une dérive sur les profils plus courts.

- **Station 1-3** (fig. 28) : le variogramme d'ordre 0 est parabolique du fait de la dérive importante du profil. Le filtrage de cette dérive par le variogramme d'ordre 1, parabolique à l'origine, met en évidence deux structures principales. La première d'une portée de 280 mm pour  $65 \text{ mm}^2$  est marquée par un palier suivi d'un effet de trou. La seconde montrant un palier bien net précédé d'un changement de pente a une portée de 635 mm pour  $105 \text{ mm}^2$ . On devine de plus une structure (110 mm de portée pour  $25 \text{ mm}^2$ ) qui n'atteint pas de palier en raison de la structure de portée 280 mm mais elle se retrouve plus nettement sur les stations 3 et 2-3. De plus, pour les valeurs maximales de  $h$ , on décèle un aplatissement du variogramme, mais que l'on ne peut interpréter.
- **Station 1-2** (fig. 29) : Le variogramme d'ordre 0, d'allure linéaire pour les faibles distances mais parabolique à l'origine, révèle cette fois une structure qui ne se caractérise pas par un palier, mais par une pente plus faible du variogramme de 590 à 690 mm et qui peut être attribuée au "saut" en début de profil (voir station 1 seule). Le variogramme d'ordre 1 révèle une structure, dont il est difficile de localiser précisément la portée. De forme parabolique à l'origine, une première rupture de pente apparaît à 210 mm, puis une deuxième autour de 315 mm où l'on pourrait placer la portée. Mais par la suite le variogramme croît plus fortement, ce qui peut encore une fois être attribué à la forme globale du profil qui rend l'ordre 1 inadapté aux grandes distances.
- **Station 2-3** (fig. 30) : Le variogramme d'ordre 0 présente une forme linéaire aux faibles distances et croît jusqu'à des valeurs plus importantes que celui de la station 1-2 en raison d'une plus grande dérive. On retrouve dans le variogramme d'ordre 1 parabolique à l'origine, les mêmes structures que pour la station 1-3, mais plus marquées. La première (110 mm de portée pour  $25 \text{ mm}^2$ ) n'atteint pas son palier en raison de la seconde, d'une portée de 250 mm pour  $50 \text{ mm}^2$ . Cette dernière est suivie d'un effet de trou beaucoup plus marqué que dans le cas de la station 1-3, ce que l'on peut expliquer ici par l'absence de la structure à 635 mm. Il s'ensuit que cette dernière est due à la contribution de la station 1.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

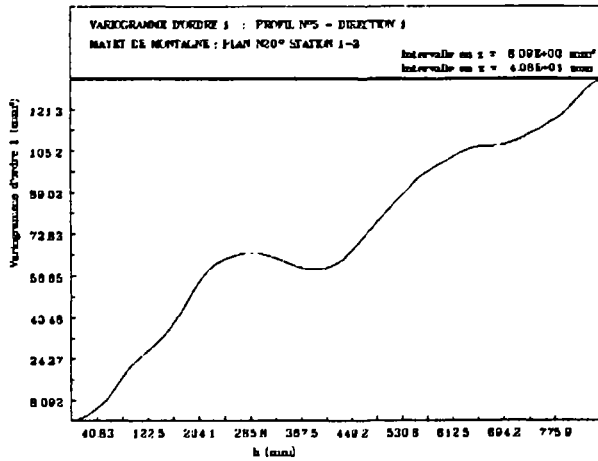
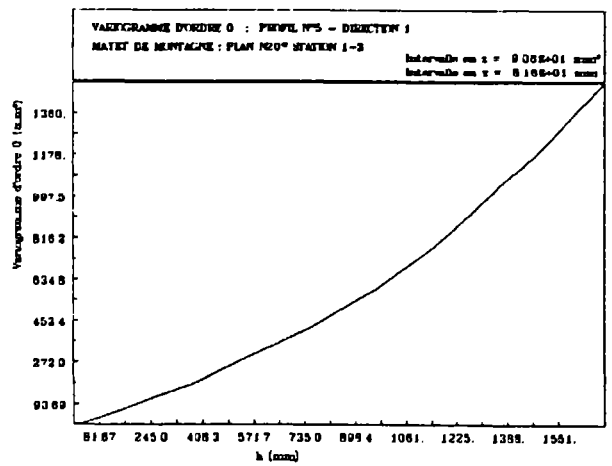
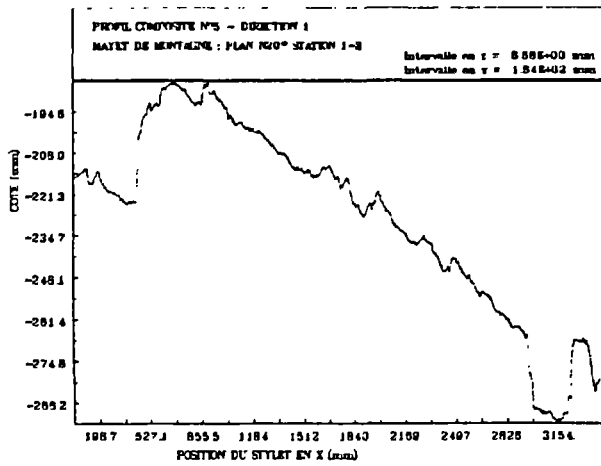


Figure 28

Profil n° 5 station 1-3 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

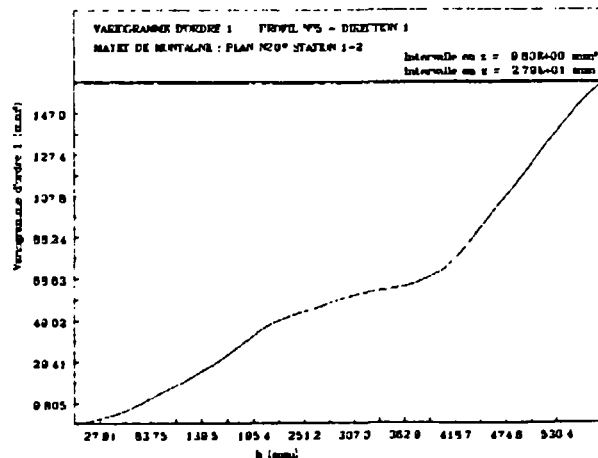
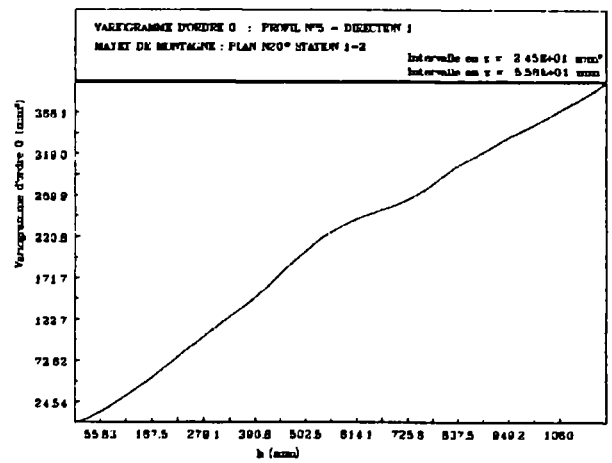
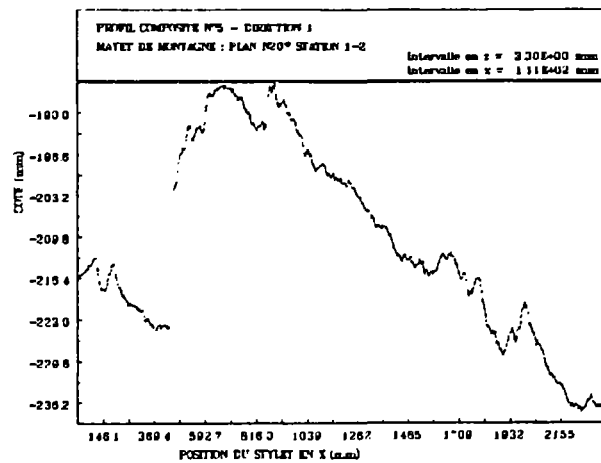


Figure 29

Profil n°5 station 1-2 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

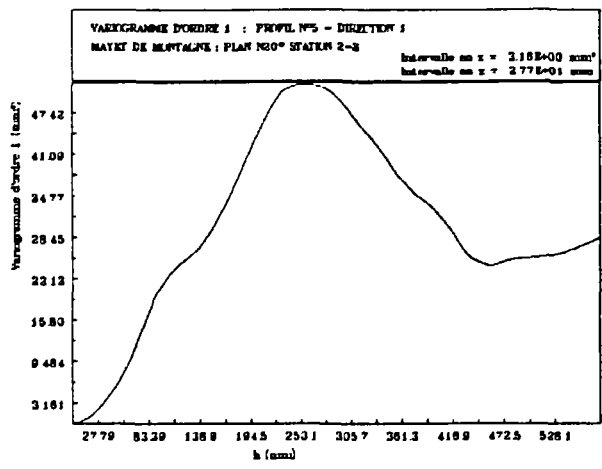
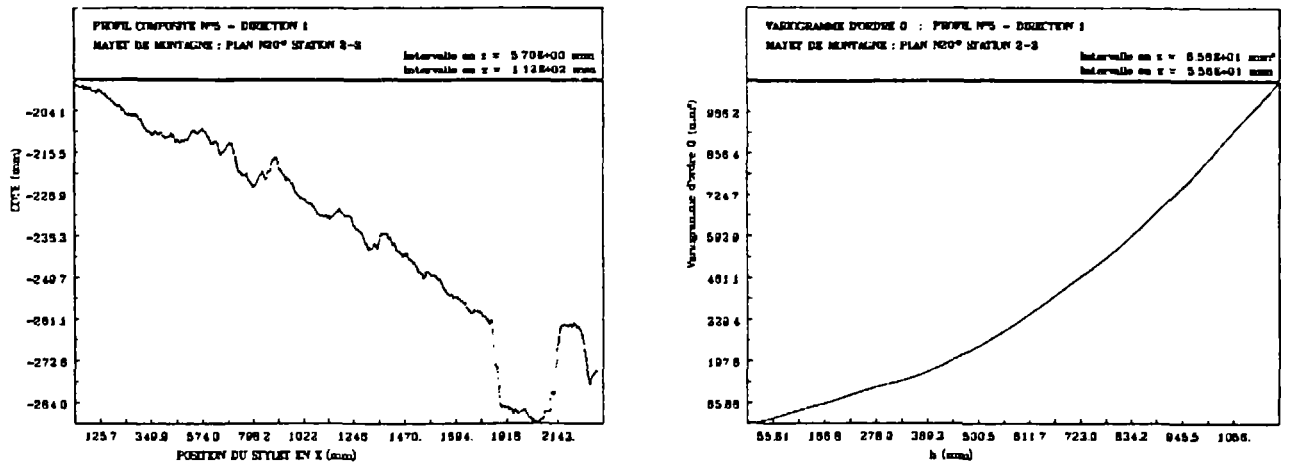


Figure 30

Profil n° 5 station 2-3 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

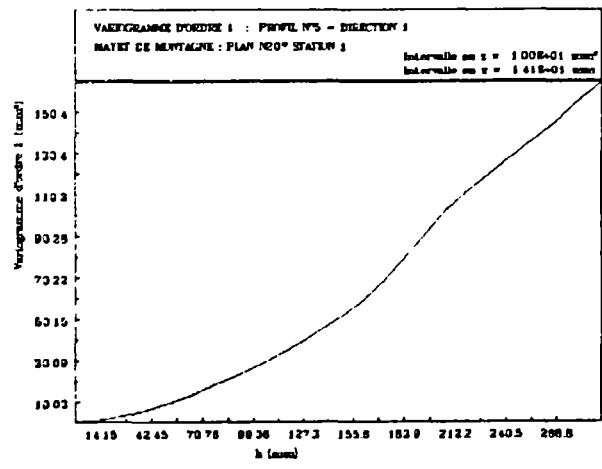
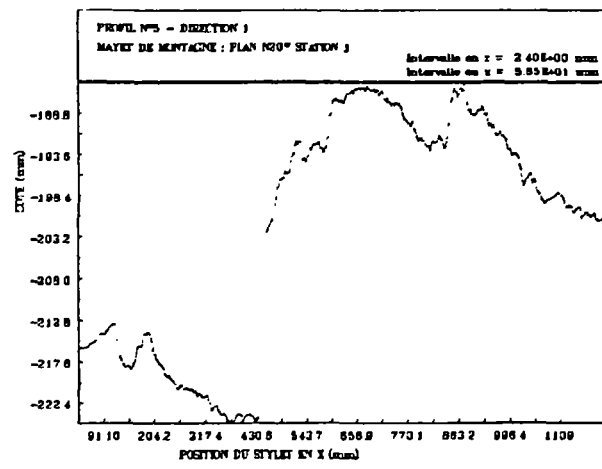


Figure 31

Profil n°5 station 1 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

- **Station 1 (fig. 31) :** Le variogramme d'ordre 0, d'allure plus gaussienne avec une portée de 595 mm ( $315 \text{ mm}^2$ ) confirme les remarques faites précédemment. On peut en effet assimiler ce palier aux structures mises en évidence sur le variogramme d'ordre 0 de la station 1-2 et celui d'ordre 1 de la station 1-3, et que l'on ne retrouve pas sur les stations 2 et 3.  
Le variogramme d'ordre 1 est quant à lui tout à fait parabolique dans un premier temps, puis devient linéaire pour une distance d'environ 210 mm.
- **Station 2 (fig. 32) :** Le variogramme d'ordre 0, plutôt linéaire à l'origine, traduit la dérive sur ce profil.  
Le variogramme d'ordre 1 présente deux structures. L'une, de variance de l'ordre de  $1,2 \text{ mm}^2$  et de portée de 35 à 40 mm faible, apparaissant plus nettement sur le profil n°4 par exemple, correspond aux petites "dents" visibles sur tout le profil. La seconde de 170 mm de portée pour  $10 \text{ mm}^2$ , suivie d'une chute du variogramme peut être attribuée aux bosses visibles au milieu du profil qui constituent les plus grandes structures quand on fait abstraction de la dérive linéaire globale. Ces structures, d'amplitude plus faible que celles de la station 3, vont être lissées dans les variogrammes de la station 2-3.
- **Station 3 (fig. 33) :** Le variogramme d'ordre 0 est analogue au précédent. Le variogramme d'ordre 1 présente deux structures, mais de portées différentes. La première a une portée de 105 à 110 mm pour environ  $40 \text{ mm}^2$ , tandis que la deuxième a une portée de 280 mm pour  $125 \text{ mm}^2$ . Les amplitudes plus importantes que pour la station 2, la pente globale étant la même, sont dues au créneau d'une hauteur de 25 mm visible en fin de profil. Ces structures sont analogues à celles de la station 2-3.

**Conclusion :** La présence de structures de grande amplitude sur certains profils a pour effet, quand on considère des profils globaux, de masquer des structures qui apparaissent par exemple sur la station 2.

#### *Profil n° 3 station 4-5*

Le profil ne présente pas de pente moyenne rendant superflu le filtrage d'une dérive linéaire par le variogramme d'ordre 1 (fig. 34). Les deux variogrammes indiquent en effet une structure avec une variance de l'ordre de  $115 \text{ mm}^2$ , palier très marqué et une portée de 240 mm à l'ordre 1 et 280 à l'ordre 0. Tandis que le variogramme d'ordre 0 est linéaire à l'origine, le variogramme d'ordre 1 montre une allure parabolique. Cependant le variogramme d'ordre 1 n'indique pas de structures de faible portée où les structures plus grandes peuvent être filtrées comme une dérive linéaire. Le variogramme d'ordre 0 indique un pic avec une portée de 590 mm pour  $185 \text{ mm}^2$ . Un deuxième pic apparaît à 1 090 mm pour  $140 \text{ mm}^2$ , mais il est difficile de l'interpréter comme une structure, car il est plus bas que le premier et ne semble correspondre à rien sur le profil.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

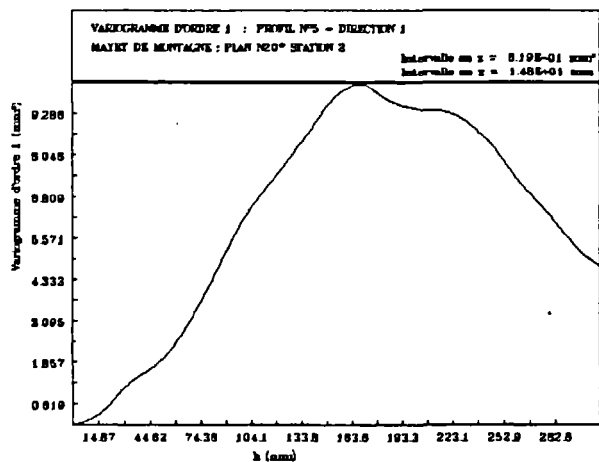
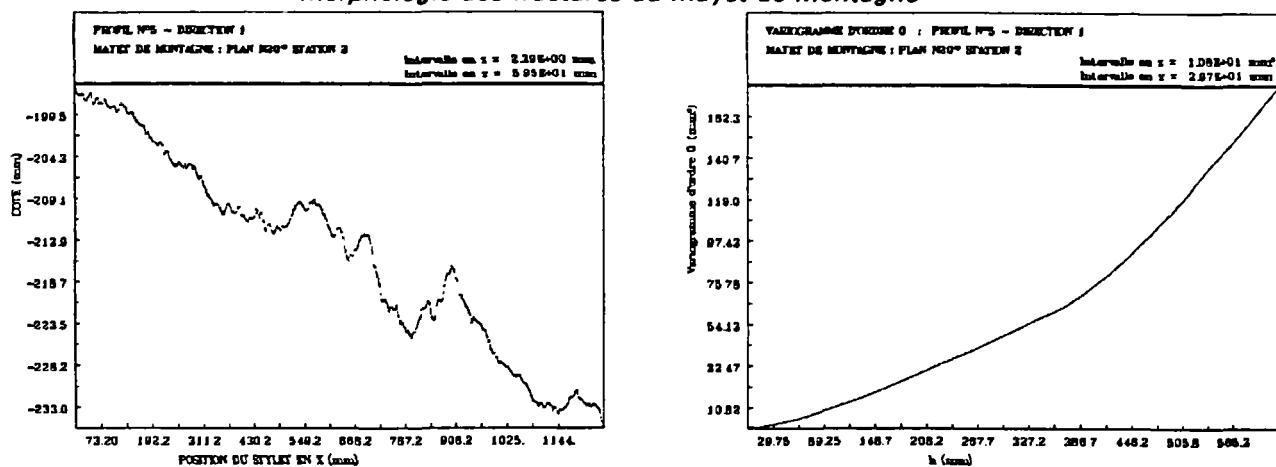


Figure 32

Profil n° 5 station 2 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

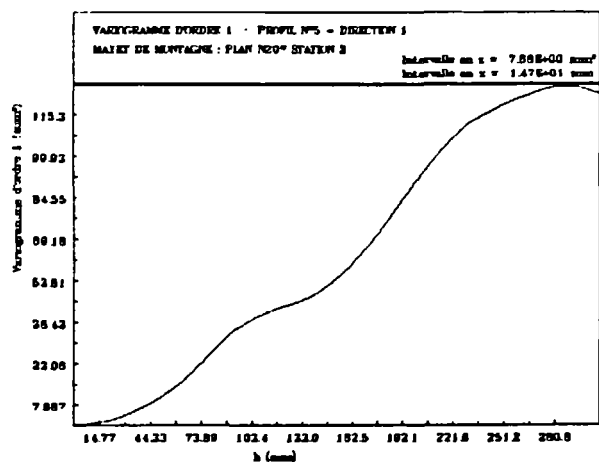
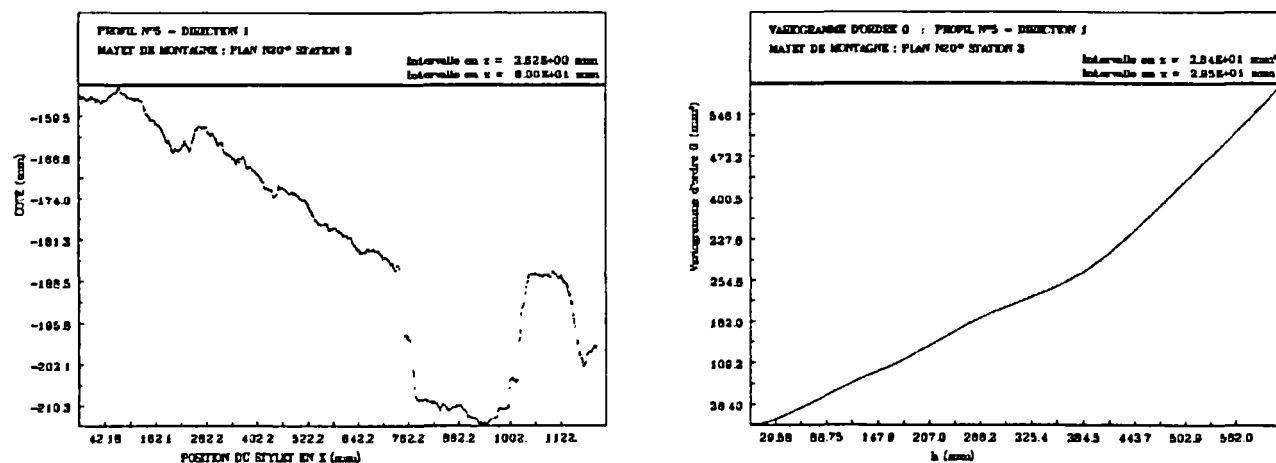


Figure 33

Profil n°5 station 3 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

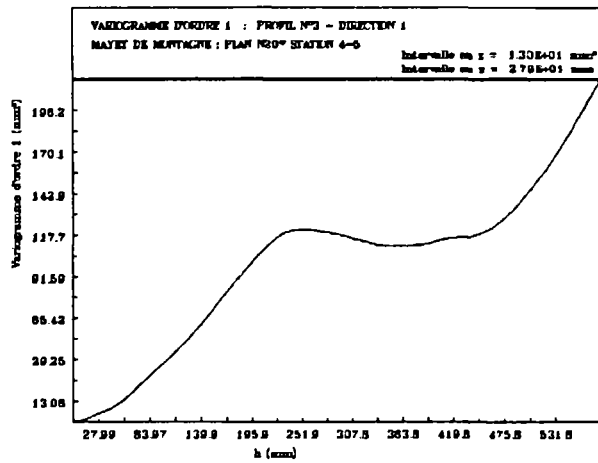
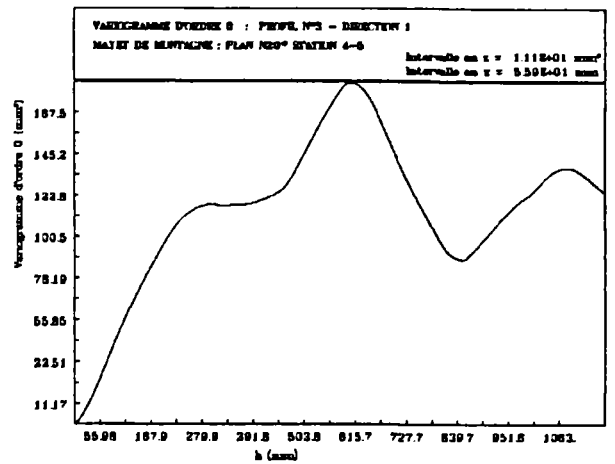
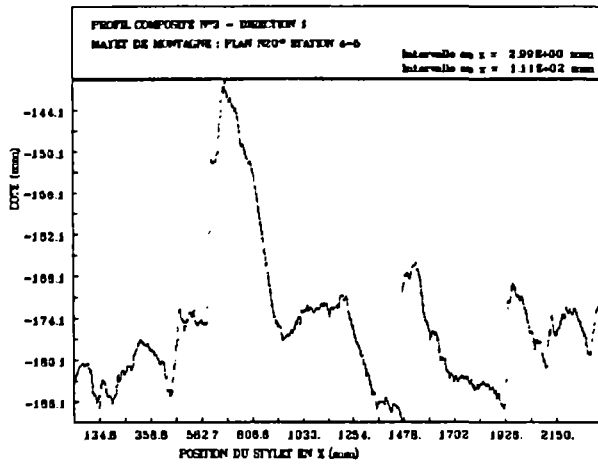


Figure 34

Profil n° 3 station 4-5 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

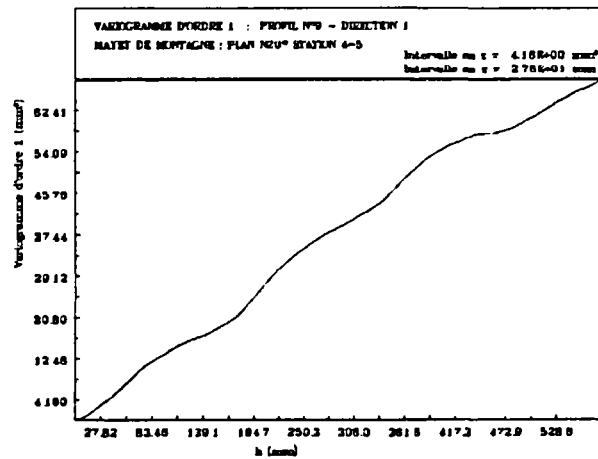
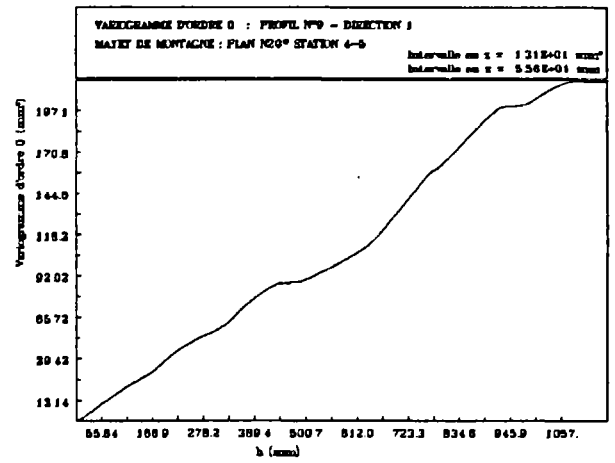
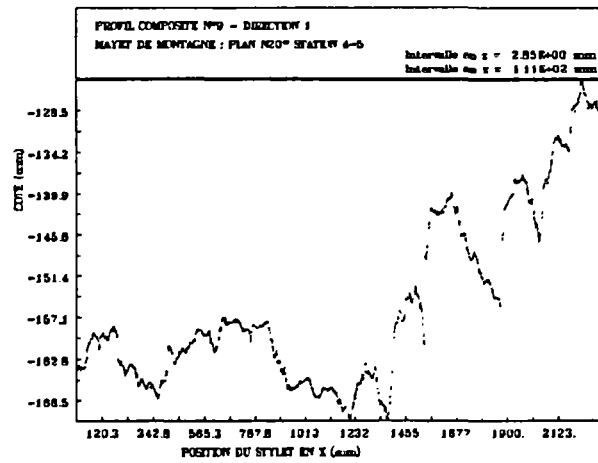


Figure 35

Profil n°9 station 4-5 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

*Profil n° 9 station 4-5*

On peut faire les mêmes remarques quant au comportement à l'origine et à la similarité pour les deux variogrammes -présentant tous les deux des structures emboîtées en escalier-, le variogramme d'ordre 1 ayant cette fois une valeur légèrement plus faible.

Le variogramme d'ordre 0 (fig. 35) montre tout d'abord deux structures faiblement marquées par une inflexion du variogramme. On peut estimer la portée de la première à environ 165 mm (25 mm<sup>2</sup>) et celle de la deuxième, un peu plus marquée, à 280 mm (55 mm<sup>2</sup>). On a ensuite un palier qui marque une structure de 445 mm de portée (90 mm<sup>2</sup>). La structure suivante de 775 mm de portée pour 160 mm<sup>2</sup> n'atteint pas tout à fait son palier. Viennent ensuite deux paliers assez rapprochés, à 920 mm (197 mm<sup>2</sup>) et 1 080 mm (217 mm<sup>2</sup>). On dénombre donc pas moins de 6 structures emboîtées sur ce profil, même si on peut émettre des réserves sur les deux dernières dont les portées sont proches de la moitié de la longueur de profil.

Le variogramme d'ordre 1 confirme la première structure qui est plus accentuée, ce qui peut expliquer que la troisième, que l'on retrouve avec une portée de 435 mm, ait une amplitude plus faible qu'à l'ordre 0 (60 mm<sup>2</sup>). En effet on a filtré une dérive que l'on observe dans la partie gauche, assez structurée, du profil. Ceci diminue la valeur du variogramme.

*Profil n°6 station 4 direction 2*

Ce profil, comme les deux précédents, ne montre pas de dérive globale (fig. 36). On a toujours un comportement linéaire à l'origine à l'ordre 0 et parabolique à l'ordre 1. On trouve sur les deux variogrammes une première structure avec la même portée de 105 mm et la même variance de 19 mm<sup>2</sup>. Ce palier est suivi d'un effet de trou, assez marqué à l'ordre 1 et très léger à l'ordre 0. Le variogramme d'ordre 1 montre à 295 mm -distance limite- un palier (41 mm<sup>2</sup>) qui confirme peut être une très légère inflexion à l'ordre 0. On observe ensuite deux structures sur le variogramme d'ordre 0. La première ne se manifeste pas par un palier net, mais on peut situer sa portée autour de 380 mm pour 42 mm<sup>2</sup>. La deuxième qui constitue à 56 mm<sup>2</sup> le maximum du variogramme a une portée de 500 mm.

*Profil n°2 station 5 direction 2*

Ce profil à l'opposé du précédent présente nettement une dérive linéaire générale (fig. 37). Cependant il existe des structures assez hautes devant la dérive pour apparaître à l'ordre 0 où l'on en observe trois. La première a une portée de 80 à 100 mm pour 40 mm<sup>2</sup>. La seconde a une portée de 293 mm pour 73 mm<sup>2</sup> et la troisième, suivie d'un effet de trou et d'une remontée du variogramme, une portée de 480 mm pour 105 mm<sup>2</sup>.

On observe aussi trois structures à l'ordre 1, dont deux sont communes avec l'ordre 0. La première, d'une portée de 70 mm pour 30 mm<sup>2</sup>, est suivie d'un léger effet de trou et peu être assimilée à la plus petite structure observée à l'ordre 0. La deuxième, révélée par le filtrage de l'ordre 1, est marquée nettement par un palier avec une portée de 200 mm pour 39 mm<sup>2</sup>. La dernière, correspondant à la structure intermédiaire observée à l'ordre 0, se manifeste par un pic à 280 mm pour 66 mm<sup>2</sup> qui constitue le maximum du variogramme.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

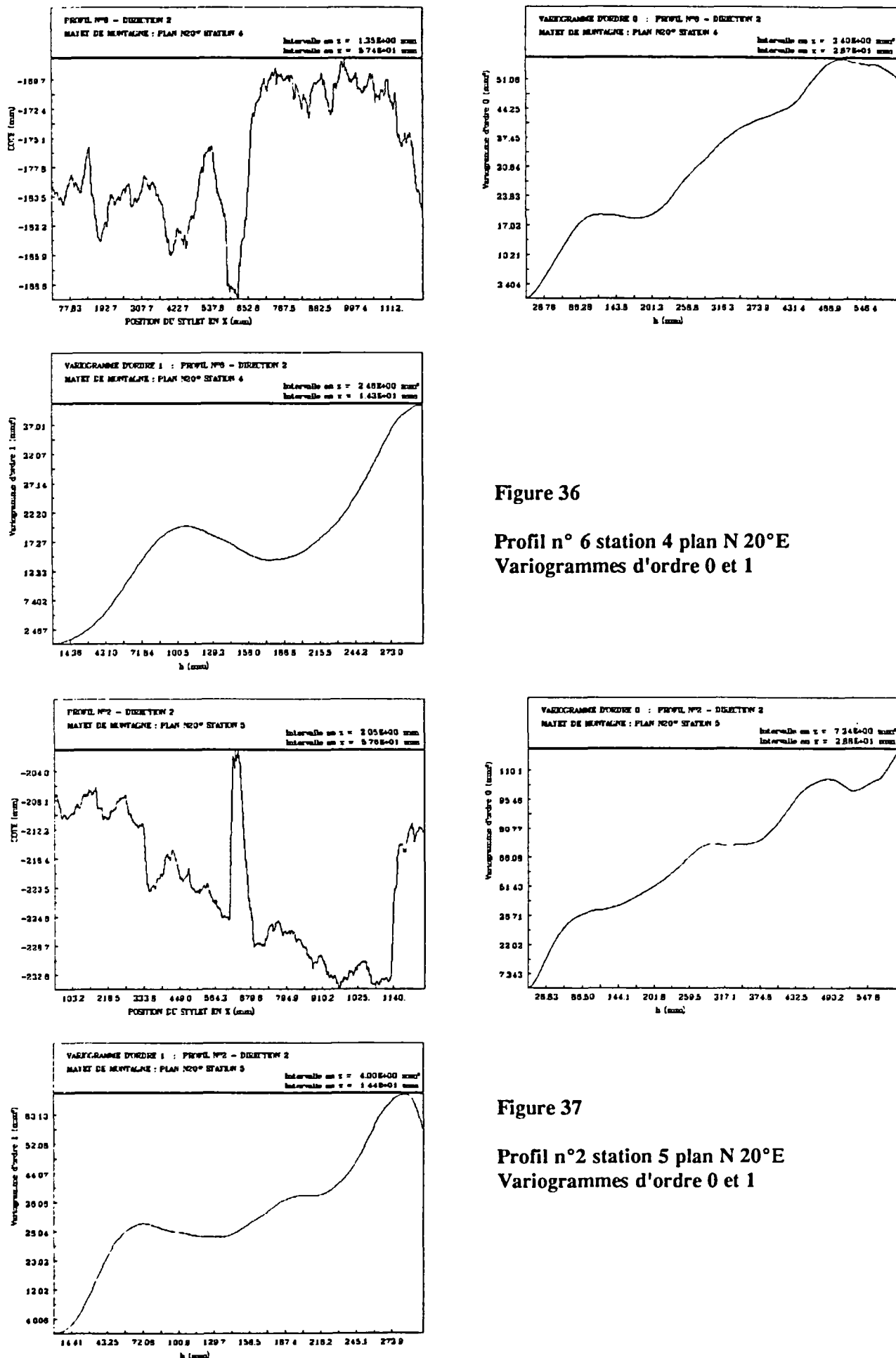


Figure 36

Profil n° 6 station 4 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

Figure 37

Profil n°2 station 5 plan N 20°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

**Conclusion :** Même quand il n'y a pas de dérive sur l'ensemble du profil, on constate à l'ordre 1 l'accentuation et quelque fois l'apparition de structures de faible portée. Les variogrammes d'ordre 0 sont dans ce cas plutôt linéaires à l'origine et paraboliques à l'ordre 1. Les profils des stations 4 et 5 sont beaucoup plus structurés que ceux des stations 1 à 3.

#### **Plan N 80°E**

##### *Profil n°2 station 2 direction 3*

Ce profil présente une dérive linéaire assez importante et régulière (fig. 38), ce qui se ressent sur le variogramme d'ordre 0 qui croît jusqu'à 570 mm<sup>2</sup>. Le variogramme d'ordre 1 est un bel exemple de structures emboîtées, en l'occurrence quatre, marquées par des paliers bien établis. Les portées sont de 70, 150, 195 et 255 mm pour respectivement 11, 18, 19 et 23 mm<sup>2</sup>.

##### *Profil n°1 station 1 direction 2*

On observe ici (fig. 39) un dénivelé de l'ordre de 10 cm. Cette dérive donne au variogramme d'ordre 0 de fortes valeurs, jusqu'à 1 700 mm<sup>2</sup>. Cependant, en raison de la forme particulière de ce profil, l'ordre 1 n'est pas adapté aux grandes distances. En effet après un palier très bien marqué à 90 mm pour 40 mm<sup>2</sup>, le variogramme continue de croître fortement

##### *Profil n°2 station 1 direction 2*

On peut faire les mêmes remarques quand à l'allure du profil et aux conséquences sur le variogramme d'ordre 0 (fig. 40). Cependant, on observe des différences à l'ordre 1 : on devine une structure autour de 80 mm et 7 mm<sup>2</sup> dont le palier n'est pas atteint, puis un palier très net d'une portée de 250 mm pour 60 mm<sup>2</sup>. D'une manière générale, les valeurs plus faibles du variogramme d'ordre 1 reflètent l'aspect plus émoussé de ce profil.

#### **Plan N 150°E**

##### *Profil n°4 station 1-2 direction 1*

Le variogramme d'ordre 0 est parabolique et croît jusqu'à des valeurs de l'ordre de 5 000 mm<sup>2</sup>, en raison du dénivelé de l'ordre de 160 mm sur les 2.40 m du profil (fig. 41).

Cependant le filtrage linéaire n'est pas suffisant, bien que l'on puisse déceler une structure de variance faible mais qui ne présente pas un palier bien net (portée de 110 à 130 mm). On observe une structure du même type sur la plupart des profils parallèles. Toutefois, un changement de pente autour de 530 mm, que l'on retrouve de façon plus ou moins nette sur certains profils peut, au vu des profils être attribué à une structure.

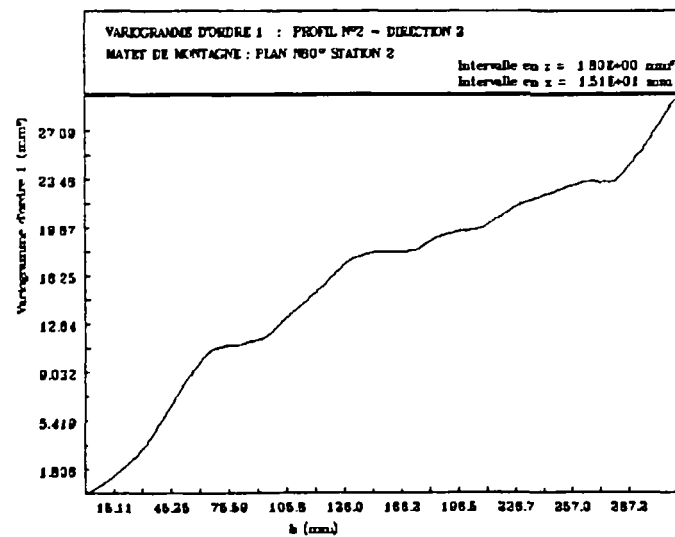
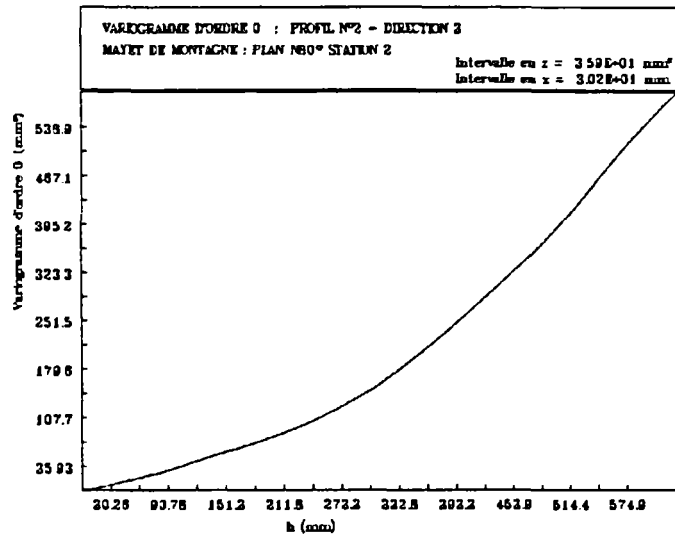
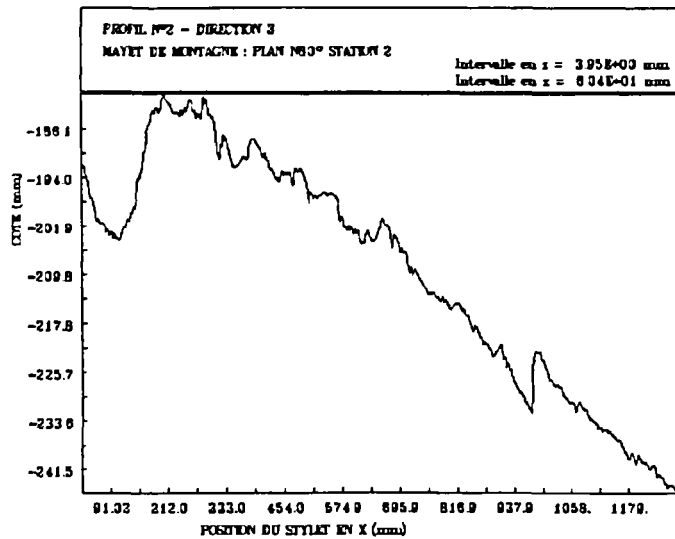


Figure 38 - Profil n°2, station 2 direction 3, plan N 80°E  
Variogrammes moyens d'ordre 0 et 1

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

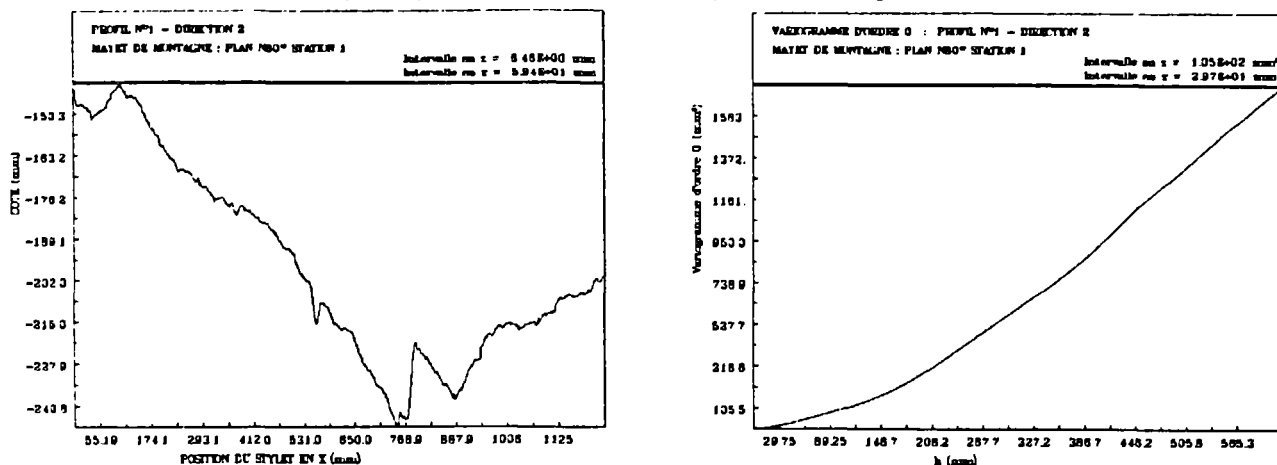


Figure 39

Profil n° 1 station 1 plan N 80°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1

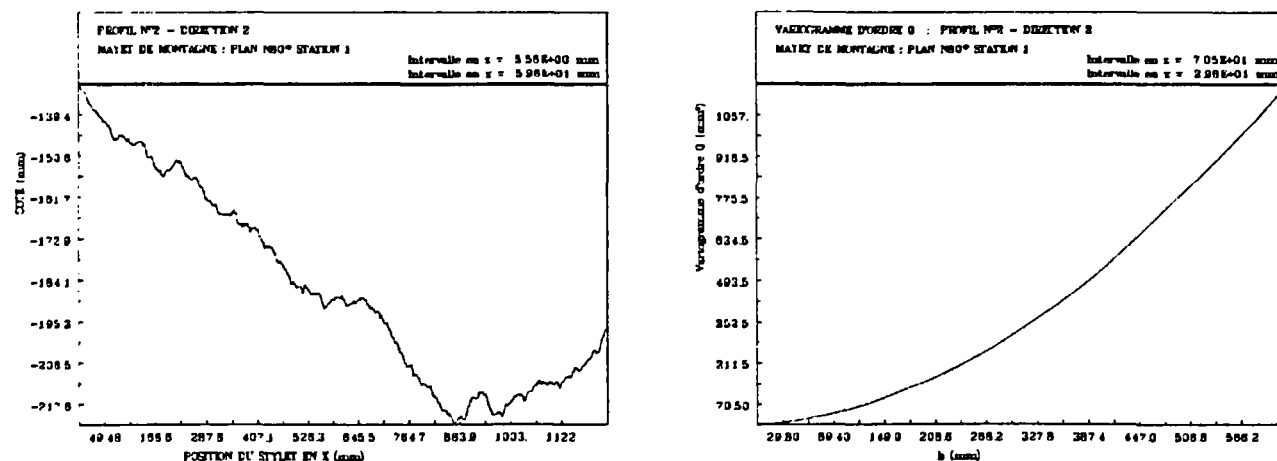
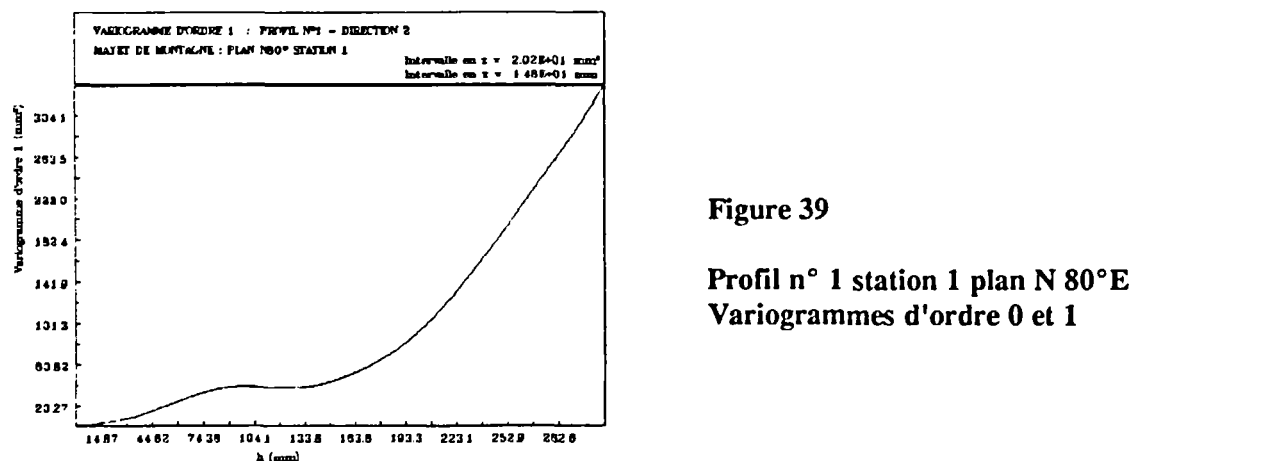
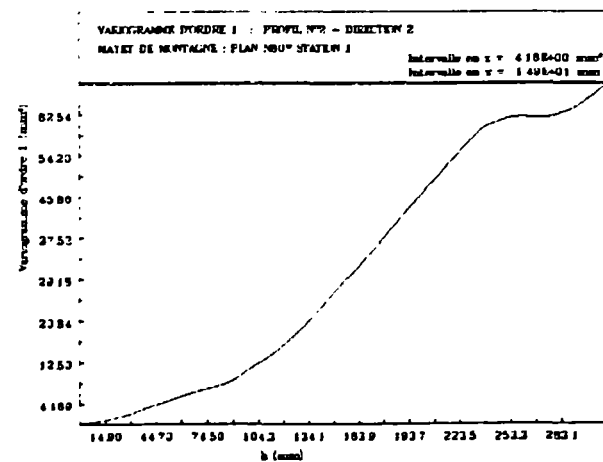


Figure 40

Profil n°2 station 1 plan N 80°E  
Variogrammes d'ordre 0 et 1



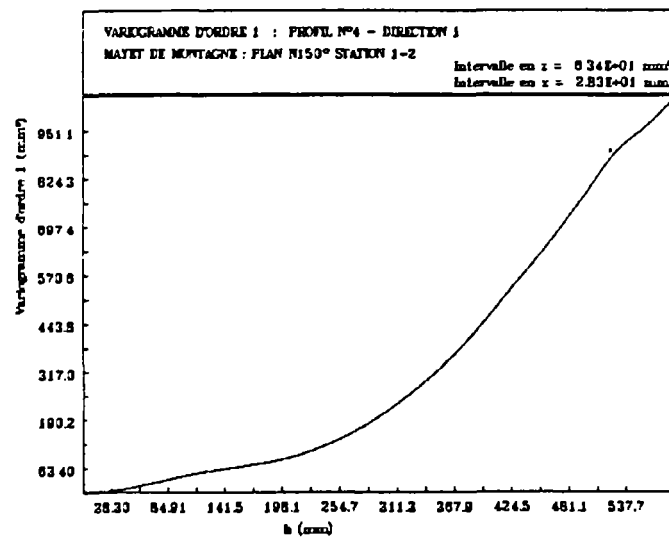
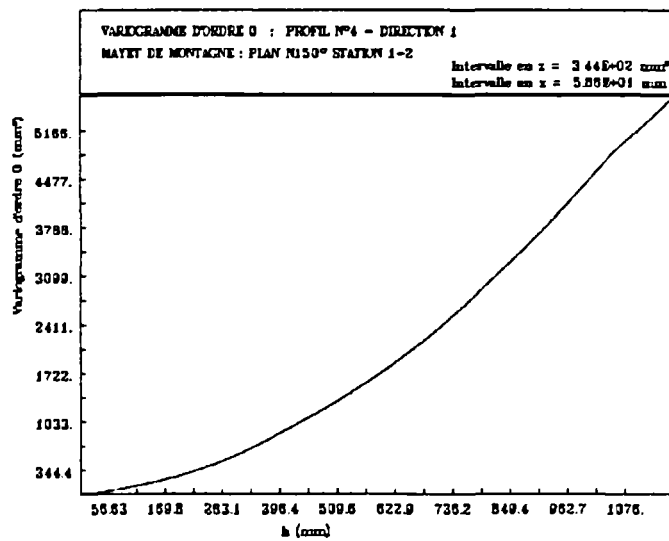
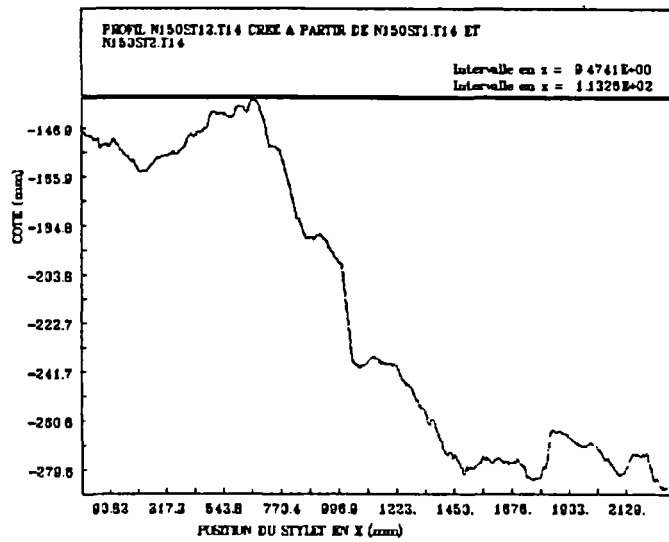


Figure 41 - Profil n°4, station 1-2 direction 1, plan N 150°E  
Variogrammes moyens d'ordre 0 et 1

**Profil n°2 station 2 direction 2**

Le variogramme d'ordre 0 est d'aspect gaussien, avec une portée de 550 mm pour une variance de 485 mm<sup>2</sup> (fig. 42).

Le variogramme d'ordre 1, parabolique à l'origine, révèle une structure très marquée pour une portée de 160 mm et une variance de 45 mm<sup>2</sup>. Il continue ensuite de croître, l'hypothèse de la dérive linéaire n'étant plus valable pour des distances supérieures.

**Profil n°4 station 2 direction 2**

Le variogramme d'ordre 0 est très similaire au précédent, avec une portée de 560 mm pour une variance de 950 mm<sup>2</sup>, et très proche du variogramme moyen (fig. 43).

Comme dans le cas précédent, on observe une structure très bien marquée par un palier à 75 mm pour 15 mm<sup>2</sup>. Celle-ci est due à la partie droite du profil, la partie gauche étant globalement linéaire -et donc filtrée- et assez lisse. Pour les plus grandes distances le variogramme atteint de fortes valeurs ce qui entraîne la même remarque que précédemment.

### **6.3 CONCLUSIONS DE L'ETUDE GEOSTATISTIQUE**

Le but de cette analyse variographique est de dégager les caractéristiques structurales des différents plans de fracture échantillonnés. Les informations obtenues lors de cette étude peuvent être considérées en fonction de deux critères :

- l'allure du variogramme,
- le plan de fracture.

On peut, d'après l'allure de leurs variogrammes séparer les profils en deux classes :

#### **Profils sans dérive globale (type 1.1), ou avec dérive linéaire générale (type 1.2)**

Cette catégorie comprend les profils dont la longueur suffit à décrire la structuration du plan de fracture à cette échelle d'étude. Les variogrammes sont donc stationnaires, à l'ordre 0 dans le premier cas, et à l'ordre 1 dans le second.

- Les profils horizontaux des stations 4 et 5 du plan N 20°E rentrent dans le cas des profils sans dérive globale. La plupart des informations est obtenue à partir des variogrammes d'ordre 0. Ils montrent une prédominance des structures de 160 mm à 360 mm (12 sur 28), mais on observe un groupe de 500 à 700 mm et de 800 à 1 000 mm. Peu de petites structures sont révélées à l'ordre 1.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne

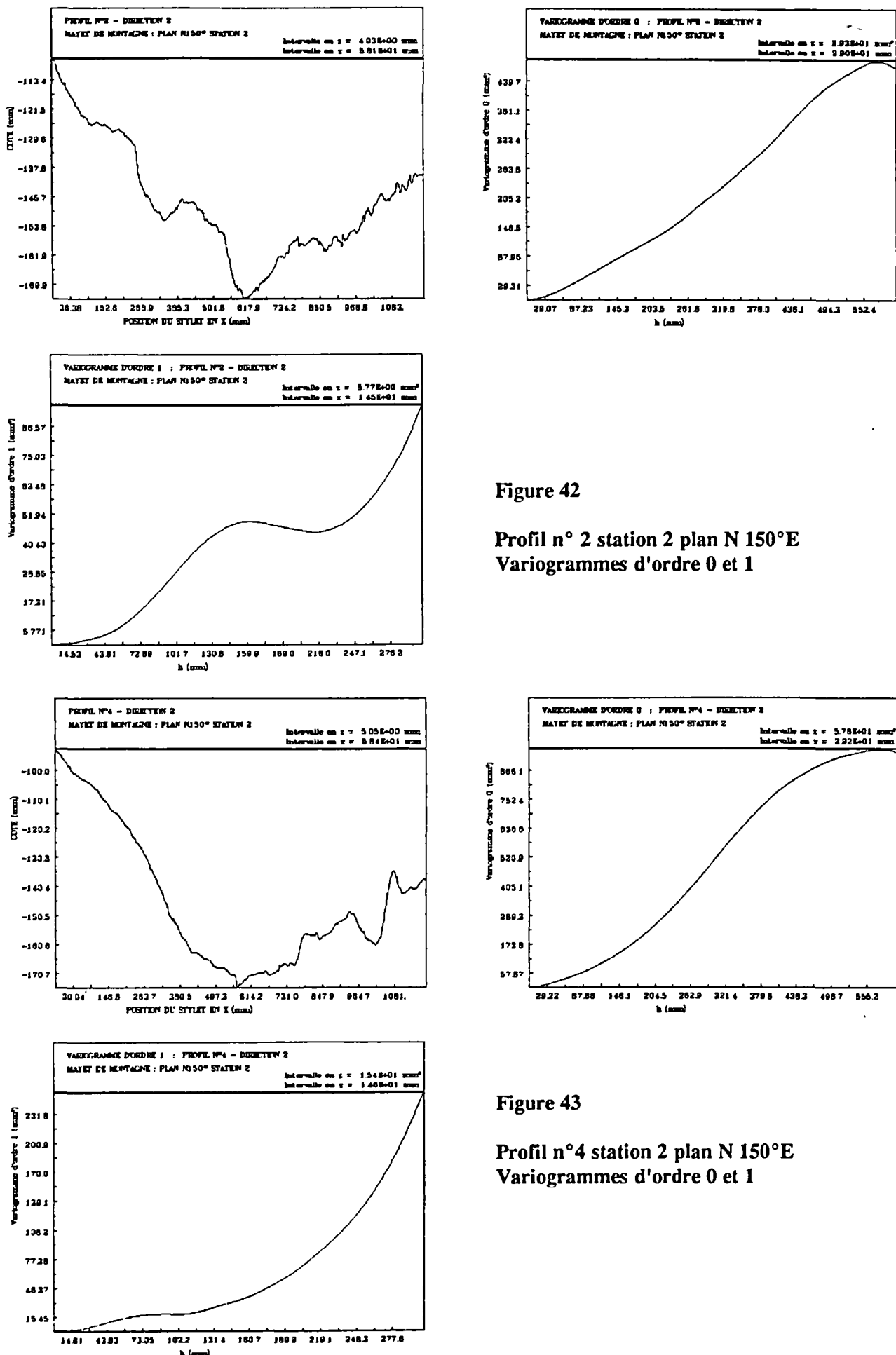


Figure 42

Profil n° 2 station 2 plan N 150°E  
 Variogrammes d'ordre 0 et 1

Figure 43

Profil n°4 station 2 plan N 150°E  
 Variogrammes d'ordre 0 et 1

- Les profils 2 et 3 du plan N20°E ainsi que la plupart des profils horizontaux du plan N80°E rentrent dans le cas des profils avec dérive linéaire générale. Dans ce cas, la plupart des informations sont obtenues à partir du variogramme d'ordre 1. Si on considère les profils élémentaires, les variogrammes du plan N80°E présentent beaucoup plus de structures emboîtées, et on peut en dégager trois groupes d'effectifs comparables ; de 25 à 110 mm, de 125 à 210 mm et enfin 240 à 310 mm, alors que l'on ne peut établir que deux groupes pour le plan N20°E : de 30 à 120 mm et de 200 à 300 mm.
- Les 17 profils verticaux des stations 4 et 5 sont plus hétérogènes. Quatre ou cinq correspondent au cas de la dérive linéaire globale. On pourrait presque ranger les autres dans une troisième catégorie pour laquelle les informations sont obtenues aussi bien à partir des variogrammes d'ordre 0 que des variogrammes d'ordre 1. On observe la plupart du temps une dérive locale filtrée à l'ordre 1, d'autres structures, non affectées par cette dérive, apparaissant à l'ordre 0 et à l'ordre 1. L'ensemble des variogrammes montrent, comme pour les profils horizontaux, une prédominance des structures de 160 à 360 mm (31 sur 59), mais aussi un groupe entre 20 et 120 mm qui n'apparaît pas (ou de façon peu marquée) dans la direction perpendiculaire. Un dernier groupe de structures - mises en évidence à l'ordre 0 en raison de leur portée plus grande- apparaît de 400 mm à 600 mm.

### **Profils avec dérive globale non linéaire**

Dans ce cas, la dérive peut être considérée comme un caractère morphologique relevant de l'échelle de la longueur du profil ou supérieure. On peut selon le cas observer ou non une structuration de grande portée à l'ordre 0. Cette dérive est plus ou moins filtrée localement aux courtes distances, l'approximation linéaire n'étant plus valable pour des distances supérieures. Cependant, l'ordre 2 n'est pas forcément valable pour filtrer cette dérive non linéaire en raison de la taille du support. Contrairement au cas précédent, la classification est plus subjective que précédemment car la caractérisation dépend de la longueur du profil ainsi que de sa position relativement aux grandes structures (cas du plan N150°E). On peut distinguer deux cas qui n'ont donc pas forcément valeur de critère morphologique.

- Profils avec variogrammes d'ordre 0 stationnaires (type 2.1)

La structuration mise en évidence à l'ordre 0 correspond à la forme générale du profil. On trouve dans cette catégorie les profils verticaux (station 2) du plan N150°E. Le variogramme moyen d'ordre 0, représentatif du variogramme de chacun des profils indique une portée de 550 mm pour 900 mm<sup>2</sup>. De même, le variogramme moyen des profils horizontaux du même plan pour la station 1 indique une portée de 570 mm pour 1 200 mm<sup>2</sup>.

Les profils de la station 1 du plan N20°E montre une "marche", plus ou moins visible, correspondant au passage brutal à un plan parallèle. Ceci à l'effet d'une dérive qui est filtrée aux petites distances par l'ordre 1, le variogramme d'ordre 0 ayant dans 4 cas sur 7 la même allure que précédemment (portée de 500 à 700 mm). Cette inhomogénéité se ressent sur l'allure du variogramme moyen qui s'infléchit néanmoins autour de 500 mm pour 500 mm<sup>2</sup>.

- Profils avec variogrammes d'ordre 0 non stationnaires (2.2)

On peut considérer ici que l'échelle structurale en question dépasse la longueur maximale prise en compte. On peut mettre dans cette catégorie la plupart des profils verticaux de la station 1 du plan N80°E, une structuration pouvant apparaître de 300 à 400 mm. C'est aussi le cas des profils horizontaux du plan N150°E constitués par les stations 1 et 2 raccordées. La structure que l'on avait mise en évidence pour la stations 1 n'apparaît plus du tout à l'ordre 0 et ne peut que se deviner sur certains profils à l'ordre 1.

- Variogrammes d'ordre 1

Dans ces deux cas, les variogrammes d'ordre 1 filtrent la dérive, localement linéaire aux petites distances, et ne sont pas stationnaires pour des distances supérieures, mais on ne voit apparaître que très peu de structures emboîtées aux faibles distances, le plus souvent une seule structure par profil et pas toujours avec un palier bien stabilisé. On peut attribuer cela à deux causes. D'une part on peut supposer simplement que la structuration est moindre à cette échelle et d'autre part on peut penser que la dérive linéaire devient rapidement inadaptée (le variogramme d'ordre 2 pourrait alors étudié) :

- Pour le plan N80°E (verticalement) on observe néanmoins des structures de 80 à 120mm, ainsi qu'autour de 260 mm.
- Pour le plan N150°E dans la direction horizontale, on observe pour les stations 1 et 2 raccordées des structures de 80 à 120 mm ainsi que de 160 à 180 mm. Cependant ces structures apparaissent plus nettement pour les deux stations prises séparément, deux ou trois structures emboîtées apparaissant sur deux profils. Perpendiculairement, les variogrammes d'ordre 1 révèlent une structuration entre 70 et 170 mm.
- Pour la station 1 du plan N20°E on observe des structures de 150mm à 380mm. Les deux derniers profils où la "marche" apparaît peu peuvent être comparés à ceux des profils verticaux des stations 4 et 5 (structuration à l'ordre 0 et filtrage d'une dérive locale).

### **Conclusion de la classification**

On peut voire que dans le cas des profils avec dérive globale non linéaire on est en présence d'une échelle structurale à la limite de la résolution du dispositif d'acquisition (du moins pour cette campagne), alors que dans le premier, toute l'échelle de structures semblait pouvoir être décrite. La différence n'est pas tant dans la taille des structures en terme de portée, mais en terme de variance. La dérive non linéaire de forte amplitude se manifeste par une forme particulière des profils correspondant à la composante régionale que l'on retrouve comme une constante d'un profil à l'autre (variation lente devant le pas d'échantillonnage des profils) et que l'on cherche par définition à filtrer en géostatistique. Si l'on s'intéresse aux structures de plus faible portées, il vaut mieux diminuer la longueur de profil étudié, la dérive linéaire ayant des chances d'être localement plus adaptée. D'autre part, la dérive linéaire que l'on observe à l'échelle de la station (ou plus pour le plan N20°E) peut être considérée comme instrumentale et pourrait donc être éliminée à l'acquisition, par le choix d'un plan de référence plus adapté.

Si on considère les plans de fracture séparément, les informations s'organisent comme présentées au tableau 4.

	N 20°E	N 80°E	N 150°E
<b>Profils horizontaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (1.1)</li> <li>- 160 à 360 mm</li> <li>- 500 à 700 mm</li> <li>- 800 à 1 000 mm</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (1.2)</li> <li>- 30 à 120 mm</li> <li>- 200 à 300 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (1.2)</li> <li>- 25 à 110 mm</li> <li>- 125 à 210 mm</li> <li>- 240 à 310 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (2.1)</li> <li>- 80 à 120 mm</li> <li>- 160 à 180 mm</li> <li>- 570 mm</li> </ul>
<b>Profils verticaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (1.1+1.2)</li> <li>- 20 à 120 mm</li> <li>- 160 à 360 mm</li> <li>- 400 à 600 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (2.2)</li> <li>- 80 à 120 mm</li> <li>- 300 à 400 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• variogrammes (2.1)</li> <li>- 70 à 170 mm</li> <li>- 550 mm</li> </ul>

Tableau 4 - Récapitulatif des trois plans de fracture

Il apparaît que :

- pour le plan N 20°E, le plan de référence choisi pour les stations 4 et 5 permet la mise en évidence directe des structures. Pour les stations 2-3, le plan de référence choisit induit la nécessité d'un filtrage linéaire. Quatre familles de structures sont mises en évidence dans la direction horizontale dont les deux plus petites se retrouvent dans la direction perpendiculaire.
- Pour le plan N 150°E, il apparaît qu'une famille de structures est du même ordre de grandeur que les profils. Ceci induit une dérive non linéaire et ne remet pas en cause le plan de référence d'acquisition. Seulement trois familles de structures sont mises en évidence sur ce plan.
- Pour le plan N 80°E, il apparaît que pour la direction horizontale, le plan de référence induit une dérive linéaire qui nécessite un filtrage pour obtenir les informations recherchées. Dans la direction perpendiculaire, on retrouve le cas du plan N 150°E : présence de structures du même ordre de grandeur que les profils. Trois familles de structures apparaissent également sur ce plan.

Les deux plus petites structures se retrouvent en ordre de grandeur sur les trois plans. C'est seulement pour les structures de taille supérieure à 300 mm que l'on observe des différences.

## **7. CONCLUSIONS**

Suite à ces travaux deux types de conclusion s'imposent.

Une première qui est d'ordre méthodologique. L'opération de contrôle et mise en forme des données montrent que la reconstitution de profils plurimétriques à partir d'enregistrements par station est possible et n'est pas entachée d'erreur importante. Les calculs faits pour le recollement des profils indiquent que la définition du plan de référence ne varie pas de plus d'un degré au changement de station.

Bien que non prévu initialement pour enregistrer des profils dans la direction perpendiculaire, les résultats obtenus ont montré la possibilité de cette opération sous certaines conditions. En l'état actuel, le bâti ne permet pas un recouvrement des profils enregistrés dans cette direction lorsqu'on le translate. Cette condition pourrait être remplie si le cadre du rugosimètre était carré. Pour limiter la manipulation des données, il faudrait définir un repère fixe (x, y) à partir du bâti pour les deux directions d'enregistrement.

Les essais réalisés ont également mis en évidence la nécessité d'enregistrer les deux directions sans manipulation du bâti entre l'étude des deux directions. Dans ce cas, les croisements des profils sont vérifiés avec une erreur de l'ordre de  $\pm 0,6$  mm.

Le deuxième type de conclusion est d'ordre scientifique. L'analyse géostatistique des différents profils enregistrés sur trois plans de fracture montre que les profils peuvent être classés en deux grands groupes. Il apparaît que pour les plans N 20°E et N 150°E les plans de référence choisis permettent d'obtenir les informations voulues. Sur le plan N 20°E, quatre familles de structures sont mises en évidence alors que trois familles sont mises en évidence sur le plan N 150°E. Sur cette dernière, l'existence d'une structure du même ordre de grandeur que les profils induit une dérive globale non linéaire.

Sur le plan N 80°E, dans la direction horizontale une moins bonne définition du plan de référence induit une dérive linéaire globale masquant les structures plus petites. Le filtrage nécessaire limite les possibilités de mettre en évidence les structures de tailles moyennes. Dans la direction perpendiculaire, on retombe sur le cas du plan N 150°E.

Les trois plans semblent se différencier par rapport aux tailles de structure au niveau des structures de grande taille.

Après cette étude essentiellement descriptive, les données acquises seront à la base de krigeage et de simulations afin de reconstituer la topographie des épontes. A partir de là, il sera possible de simuler les vides moyennant quelques hypothèses sur la similarité des deux épontes et leur degré d'emboîtement.

## **BIBLIOGRAPHIE**

**BERNASCONI P. (1991) - Mayet de Montagne : Essais en carrière. Rapport de stage de DESS de géophysique de surface et de subsurface. IPGP, 66 p.**

**BILLAUX D., DESROCHES J., GENTIER S., BERTRAND L. (1989) - Détermination des caractéristiques mécaniques d'une fracture naturelle dans le granite du Mayet de Montagne. Rapport BRGM R 30297 GEG 4S 89, 15 p.**

**DESROCHES J. (1990) - L'inclinométrie : une méthode de suivi des opérations hydrauliques dans un milieu naturellement fracturé ? - Thèse de l'Université de Paris 7, 250 p.**

**COLIN J.-C., OUVRY J.-F. (1991) - Etude in situ et au laboratoire du comportement hydromécanique de fractures dans le granite du Mayet de Montagne, en vue de modéliser la percolation forcée d'eau dans le massif fracturé. Rapport BRGM R 32 317, 15 p.**

**GENTIER S. (1986) - Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Etude expérimentale et théorique - Thèse de l'Université d'Orléans, 637 p.**

**GENTIER S., POINCLOU C. (1992) - Morphologie des fractures à l'échelle métrique: montage et tests d'un rugosimètre de terrain. Rapport ANDRA 620 RP BRG 92-031, 31 p.**

**ANNEXE A**  
**PROGRAMMES**

## **ANNEXE A - PROGRAMMES**

### **Programme de raccord en x des profils : RACCORDX.PAS**

Ce programme permet de raccorder deux profils consécutifs en visualisant à chaque étape le recouvrement, le profil composite n'étant créé à la fin que si celui-ci est jugé satisfaisant. La structure est indiquée sur l'organigramme. Les fichiers doivent avoir le format CALIMERO (cf notice). On doit disposer de deux études dont le nom ne change que par le numéro de station. Par exemple, on crée avec les profils N20ST1.T11 et N20ST2.T11 le profil N20ST12.T11.

Le seul paramètre à fixer est la valeur de la translation (ou du recouvrement) du profil 2 par rapport au 1, en début de programme.

Le programme comprend 3 étapes :

- 1- Visualisation de chaque profil
- 2- Visualisation d'ensemble ( 3x la longueur du recouvrement) en fixant ou non une translation en z.
- 3- Calcul des corrections de translation en z (ecart moyen) et d'angle (pente des résidus après translation) à appliquer au deuxième profil (visualisation sur la longueur du recouvrement).

La fonction d'intercorrélation peut être calculée à chaque fois. Elle est calculée pour une distance maximale qui est celle du recouvrement.

### **Programme de raccord en z des profils : RACCORDZ.PAS**

nh : nombres de profils horizontaux

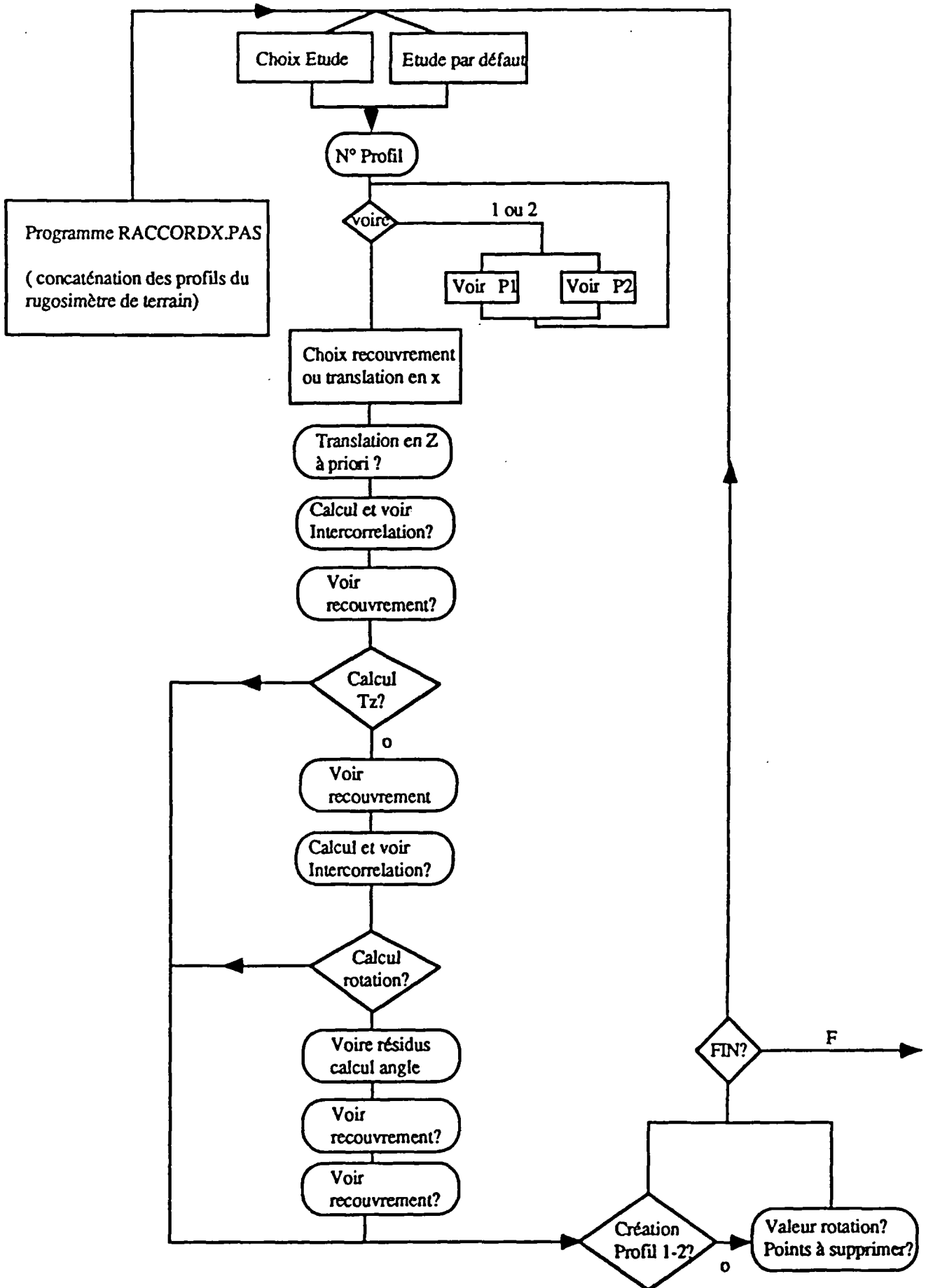
nv : nombres de profils verticaux

Ce programme permet de visualiser les croisements de plusieurs profils horizontaux successifs avec les nv profils verticaux correspondant, les paramètres Tx1, Tx2 et Tz reliant les deux repères étant fixés en début de programme. Les écarts aux croisements sont mémorisés dans une matrice (nh x nv), affichée en fin de programme et éventuellement écrite dans un fichier. Ce dernier pourra servir pour l'ajustement de la translation en z pour minimiser les écarts, et créer par la suite une étude dans le repère global.

**Suite de la procédure :**

- 1- Création d'une étude au format CALIMERO, dans le repère global à partir des valeurs  $Tx_1, Tx_2$  et  $Tz$  trouvées précédemment et du fichiers des écarts résiduels aux croisements. Dans le cas de la station 4-5, on ajuste la valeur globale de  $Tz$  en calculant pour chaque profil vertical  $i$  une valeur  $dTz(i)$  (programme ECMOY.PAS). Cependant le type d'ajustement à apporter peut varier selon les cas (exemple non traité du plan N150 où l'ajustement pourrait être une rotation du plan de référence). Les valeurs  $dTz(i=1, nv)$  sont ici rangées dans un fichier que lit le programme TRANS.PAS qui crée les fichiers dans le repère global.
- 2- Disposant de ces fichiers, il suffit de lire les valeurs  $(x, y, z)$  pour tous les profils afin de créer le fichier destiné au krigeage.

Morphologie des fractures du Mayet de Montagne



**ANNEXE B**

**LISTE DES FICHIERS DE DONNEES**

**ANNEXE B - LISTE DES FICHIERS DE DONNEES**

**N20S13 :** ● étude N20 station 1,2 et 3 profils non traités

→ profils HN20STi.T1j ( i=1,2,3 et j=1 à 7 )

● étude N20 station 1,2 et 3 profils traités

→ profils HN20STi.T1j ( i=12,23,13 et j=1 à 7 )

● Fichier format (x,y,z) (→ Kriegeage)

→ N20S13.XYZ ( dx = 5mm )

**N20S45 :** ● étude N20 station 4 et 5 profils non traités

→ profils N020STi.T1j ( i=4,5 et j = 1 à B)

→ profils N020ST4.T2j ( j=1 à 8 )

→ profils N020ST5.T2j ( j=1 à 9 )

● étude N20 station 4 et 5 profils traités ( rotation ? )

→ profils N020ST45.T1j ( j=1 à B )

**HN20S45 :** ● étude globale station 4 et 5 avec correction de rotation

→ hn20s45.t1\* ( 1 à B)

→ hn20s45.t2\* ( 1 à H)

**S45ROT0 :** ● Fichiers profils horizontaux sans rotation

→ N020ST45.T1\* ( 1 à B)

● étude globale station 4 et 5 sans rotation

→ hn20s45.t1\* ( 1 à B)

→ hn20s45.t2\* ( 1 à H)

● Fichier format (x,y,z) (→ Kriegeage)

→ N20S4510.XYZ ( dx = 5mm )

**VARION20** : ● variogrammes plan N20

**N150** : ● étude N20 station 4 et 5 profils non traités

→ profils N150ST1.T1\* ( 1 à B)

→ profils N150ST2.T1\* ( 1 à B)

→ profils N020ST2.T2\* ( 1 à 8 )

**VARGN150** : ● variogrammes plan N150

**N80** : ● étude N80 station 1 et 2 profils non traités

→ profils N80ST1.T1\* ( 1 à B)

→ profils N80ST1.T2\* ( 1 à 8)

→ profils N80ST2.T2\* ( 1 à C )

**VARION80** : ● variogrammes plan N80

*Morphologie des fractures du Mayet de Montagne*

Profils	Y	Variogrammes	
		<u>Par profil</u>	<u>Moyen</u>
<u>PLAN N20°</u>			
HN20ST12.T11	200	V0N20S12.T1* →	VM0S12.DAT
↓	↓		
7	1100	V1N20S12.T1* →	VM1S12.DAT
HN20ST23.T11	200	V0N20S23.T1* →	VM0S23.DAT
↓	↓		
7	1100	V1N20S23.T1* →	VM1S23.DAT
HN20ST13.T11	200	V0N20S13.T1* →	VM0S13.DAT
↓	↓		
7	1100	V1N20S13.T1* →	VM1S13.DAT
N020ST45.T11	150	V0N20S45.T1* →	VM0S45H.DAT
↓	↓		
B	1150	V1N20S45.T1* →	VM1S45H.DAT
N020ST4.T21	150	V0N20S4.T2* →	VM0S4V.DAT
↓	↓		
8	850	V1N20S4.T2* →	VM1S4V.DAT
VM0S45V.DAT			
N020ST5.T21	1150	V0N20S5.T2* →	VM0S5V.DAT
↓	↓		
9	1950	V1N20S5.T2* →	VM1S5V.DAT
VM1S45V.DAT			
<u>PLAN N150°</u>			
N150ST12.T11	100	V0N150.T1* →	VM0N150H.DAT
↓	↓		
B	1100	V1N150.T1* →	VM1N150H.DAT
N150ST2.T21	150	V0N150.T2* →	M0N150V.DAT
↓	↓		
8	850	V1N150.T2* →	VM1N150V.DAT

*Morphologie des fractures du Mayet de Montagne*

PLAN N80°

N080ST1.T31	1570	V0N80S1.T3*	→	VM0N80H1.DAT
↓	↓			
B	2570	V1N80S1.T3*	→	VM1N80H1.DAT
VM0N80H.DAT				
N080ST2.T31	100	V0N80S2.T3*	→	VM0N80H2.DAT
↓	↓			
VM1N80H.DAT				
C	1200	V1N80S2.T3*	→	VM1N80H2.DAT
N080ST1.T21	150	V0N80S1.T2*	→	VM0N80V1.DAT
↓	↓			
8	850	V1N80S1.T2*	→	VM1N80V1.DAT

**ANNEXE C**  
**VARIOGRAMMES MOYENS**

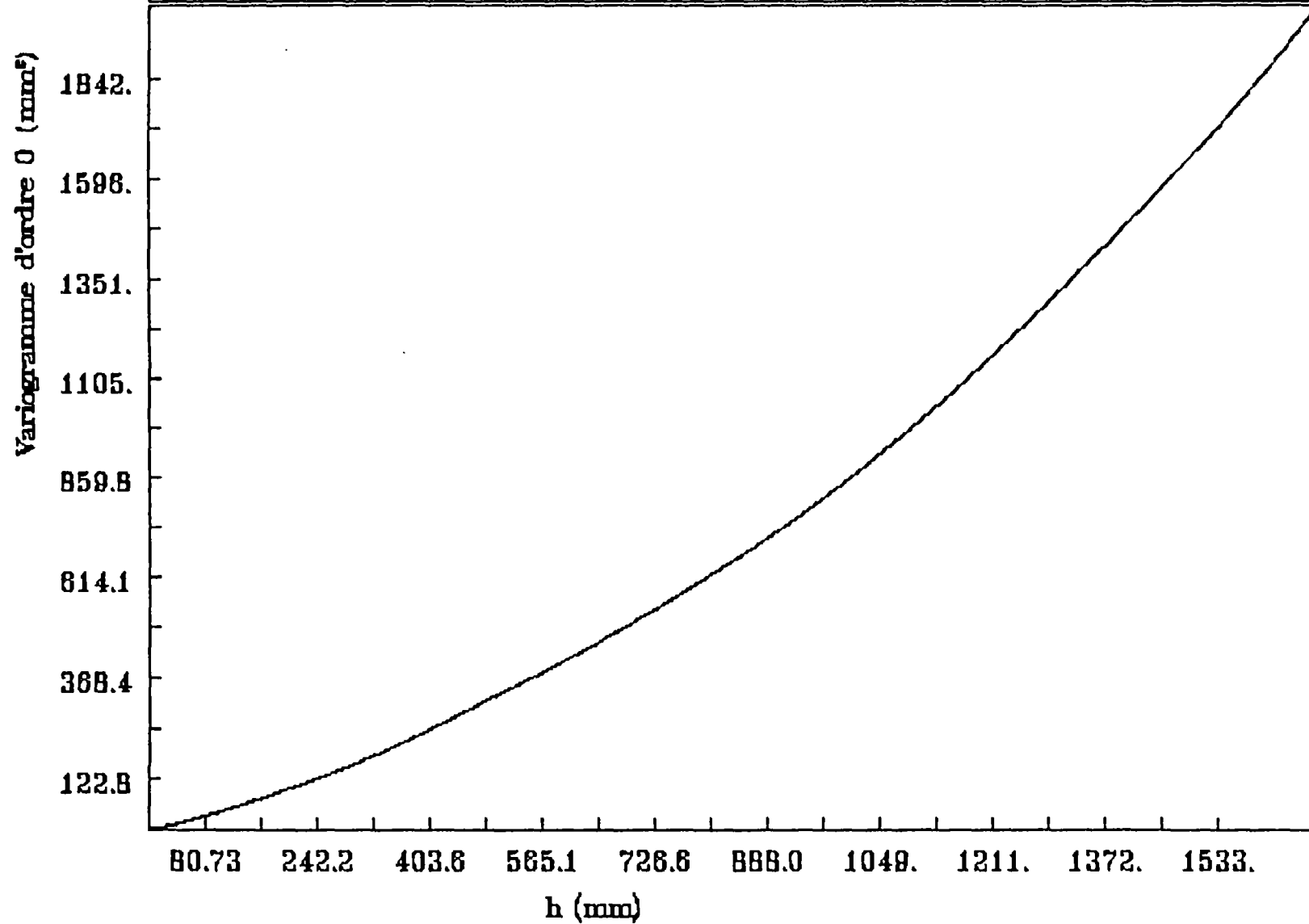
**VARIOGRAMMES MOYENS  
PLAN N 20°E**

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 1-2-3

Intervalle en z = 1.22E+02 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 8.07E+01 mm

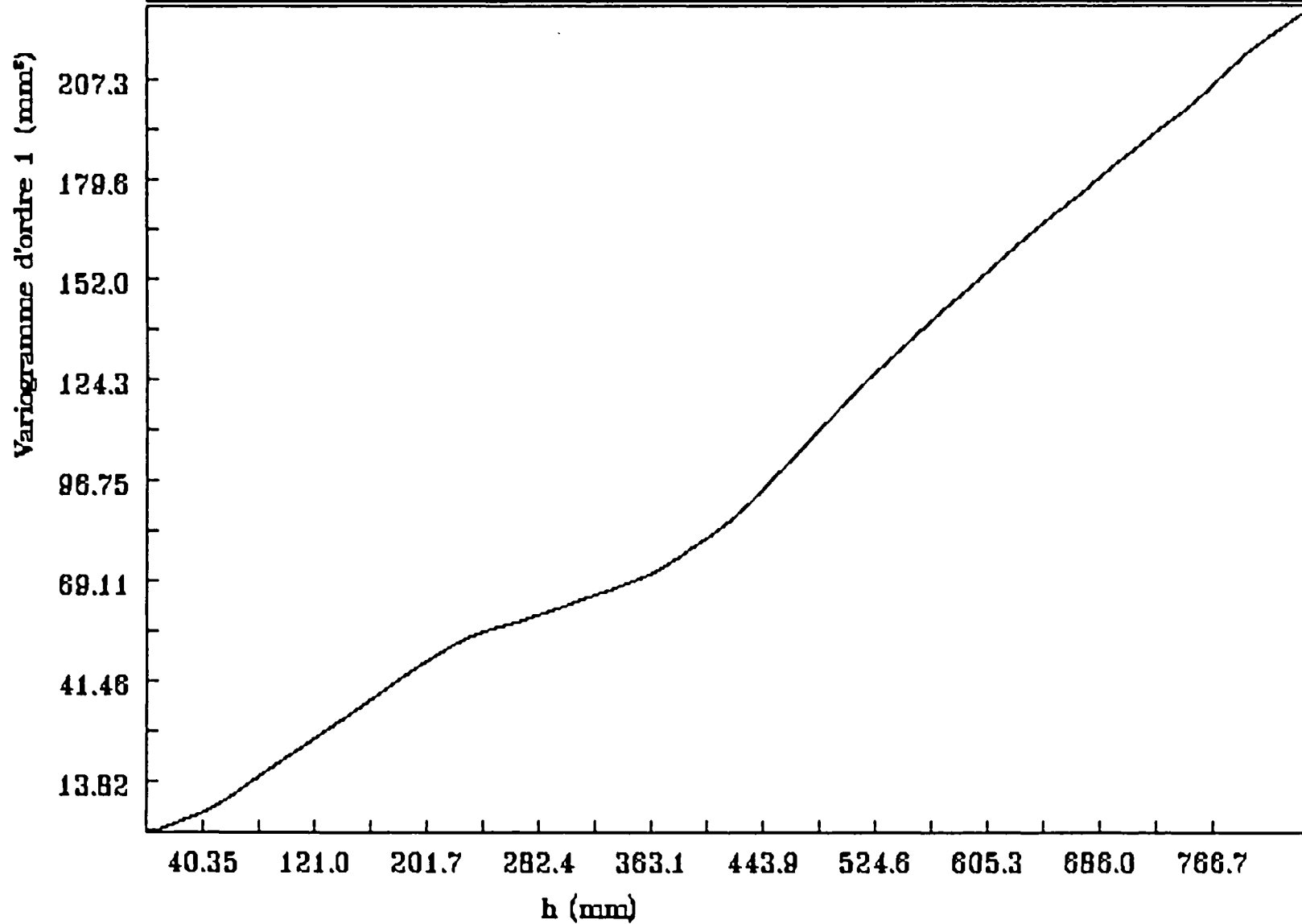


VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATION 1-3

Intervalle en z = 1.38E+01 mm<sup>f</sup>

Intervalle en x = 4.03E+01 mm



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 2-3

Intervalle en z = 7.95E+01 mm

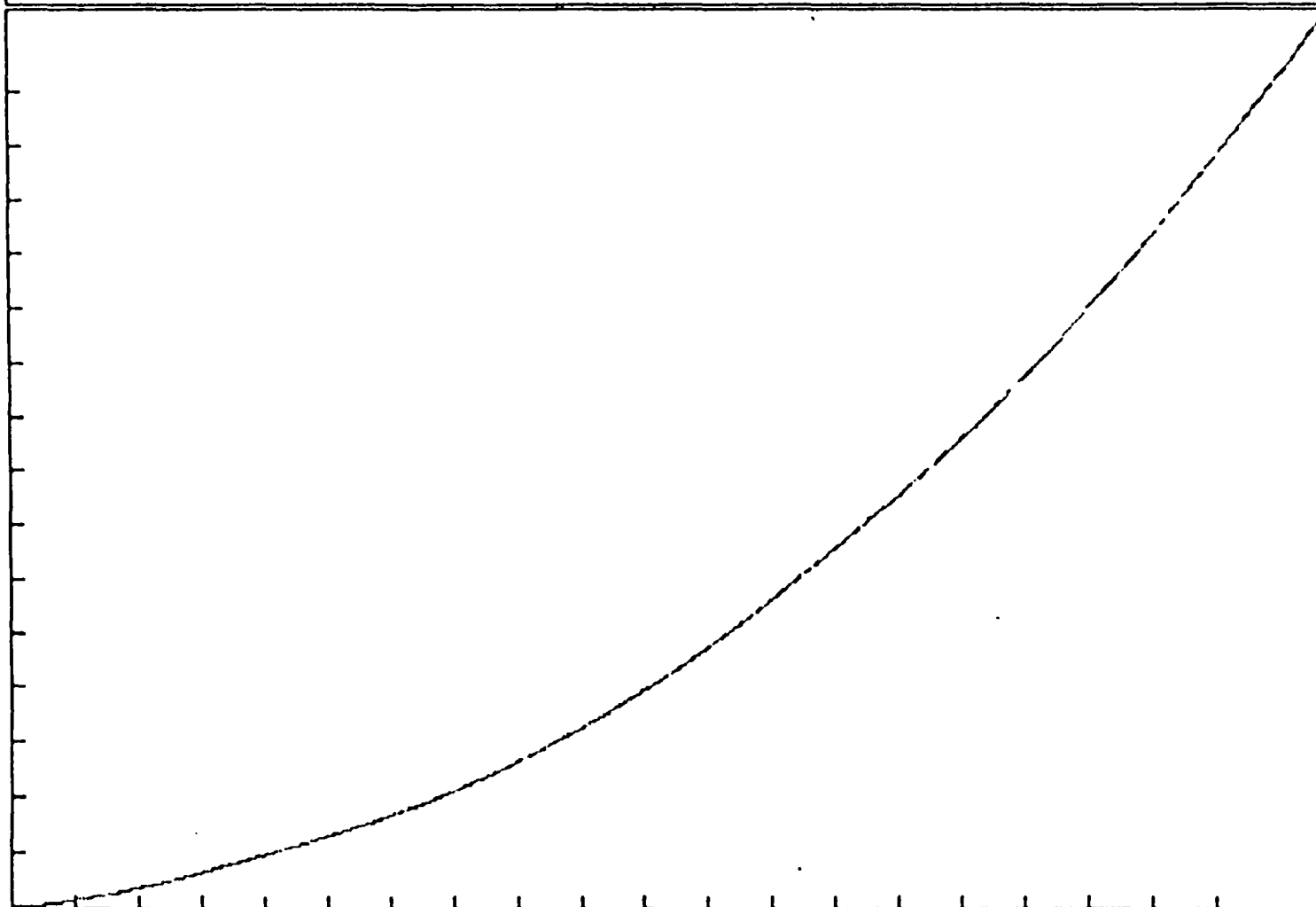
Intervalle en x = 5.52E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

1193.  
1034.  
875.4  
716.2  
557.1  
397.9  
238.7  
79.58

55.20 165.6 276.0 386.4 496.8 607.2 717.6 828.1 938.5 1048.

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 1

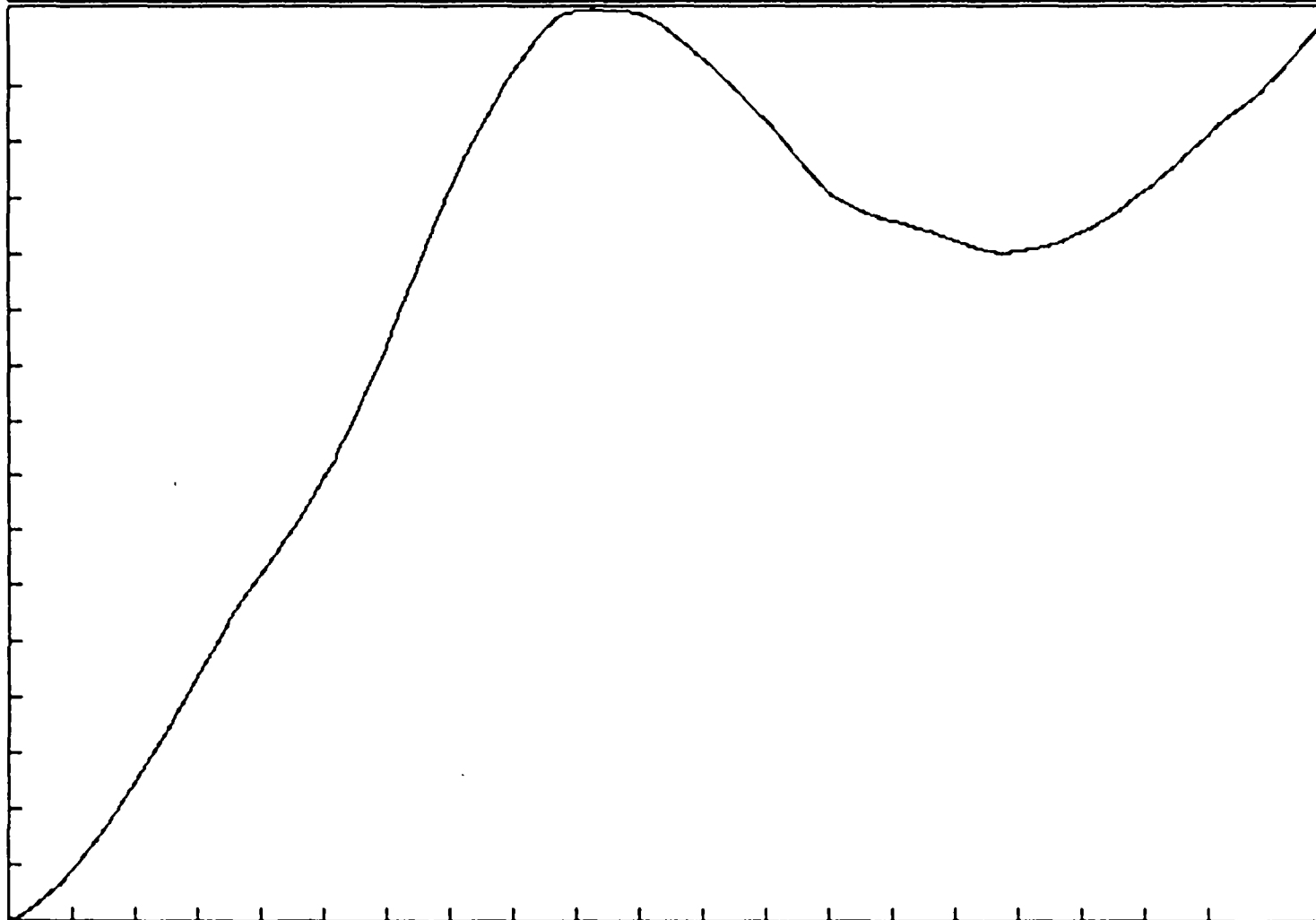
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATION 2-3

Intervalle en z = 1.96E+00 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.75E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

29.48  
25.55  
21.62  
17.69  
13.75  
9.827  
5.896  
1.965



27.57 82.73 137.8 193.0 248.2 303.3 358.5 413.6 468.8 524.0

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 1-2

Intervalle en z = 4.54E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 5.50E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

682.1

591.1

500.2

409.2

318.3

227.3

136.4

45.47

55.03

165.1

275.1

385.2

495.3

605.4

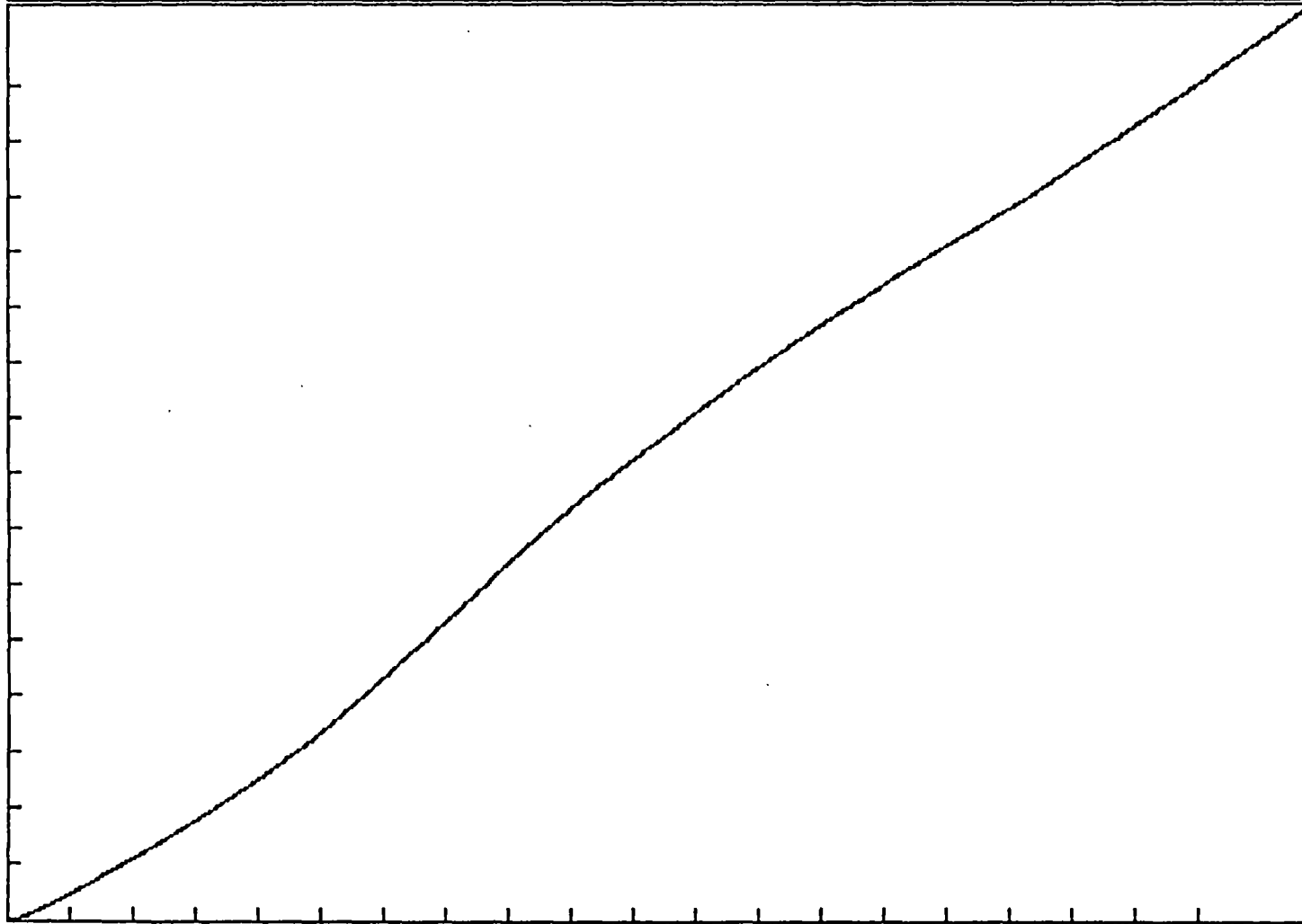
715.5

825.5

935.6

1045.

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATION 1-2

Intervalle en z = 1.46E+01 mm<sup>2</sup>

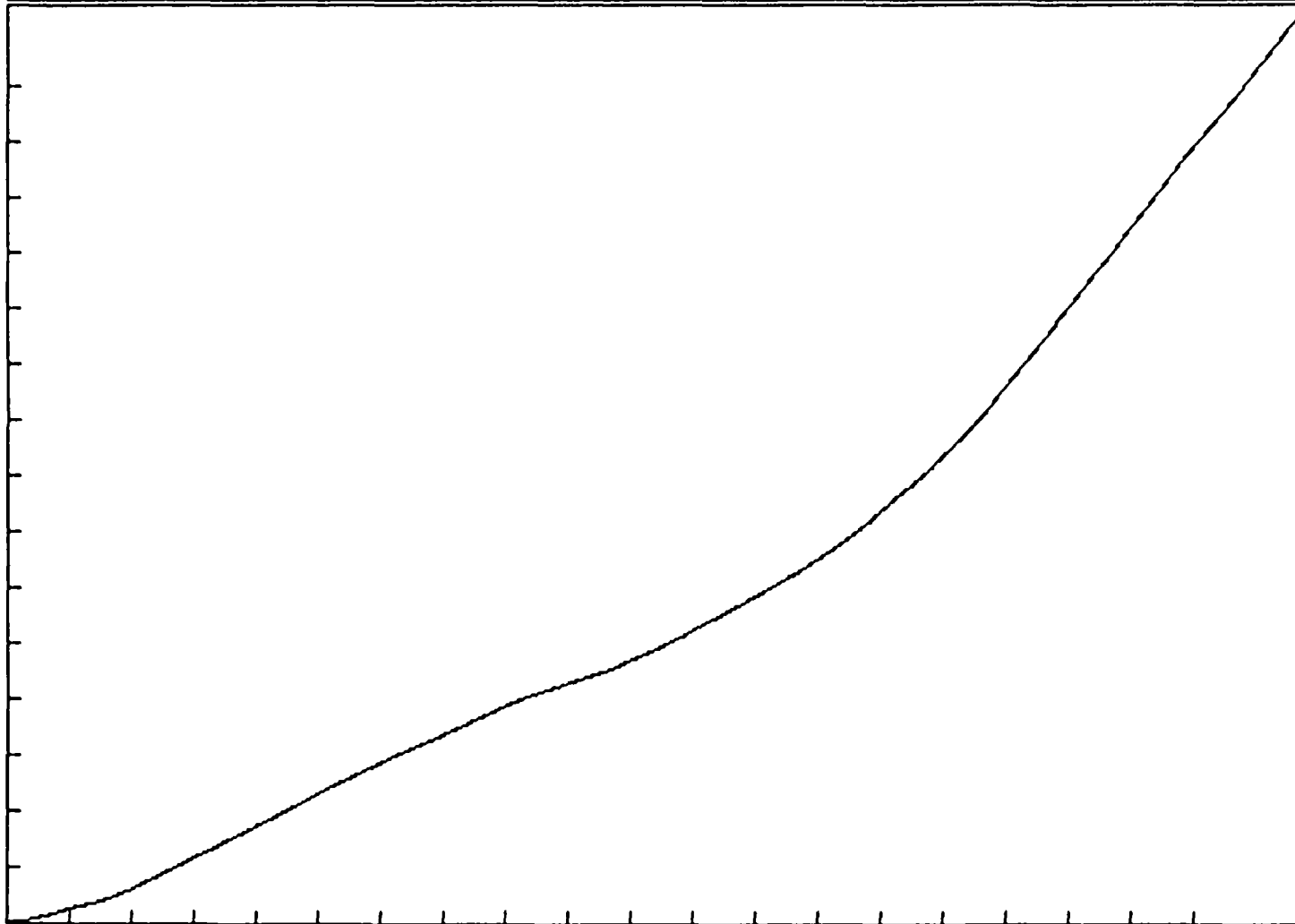
Intervalle en x = 2.75E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

219.6  
180.3  
161.0  
131.7  
102.5  
73.21  
43.93  
14.64

27.50 82.52 137.5 192.5 247.5 302.5 357.5 412.6 467.6 522.6

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 1

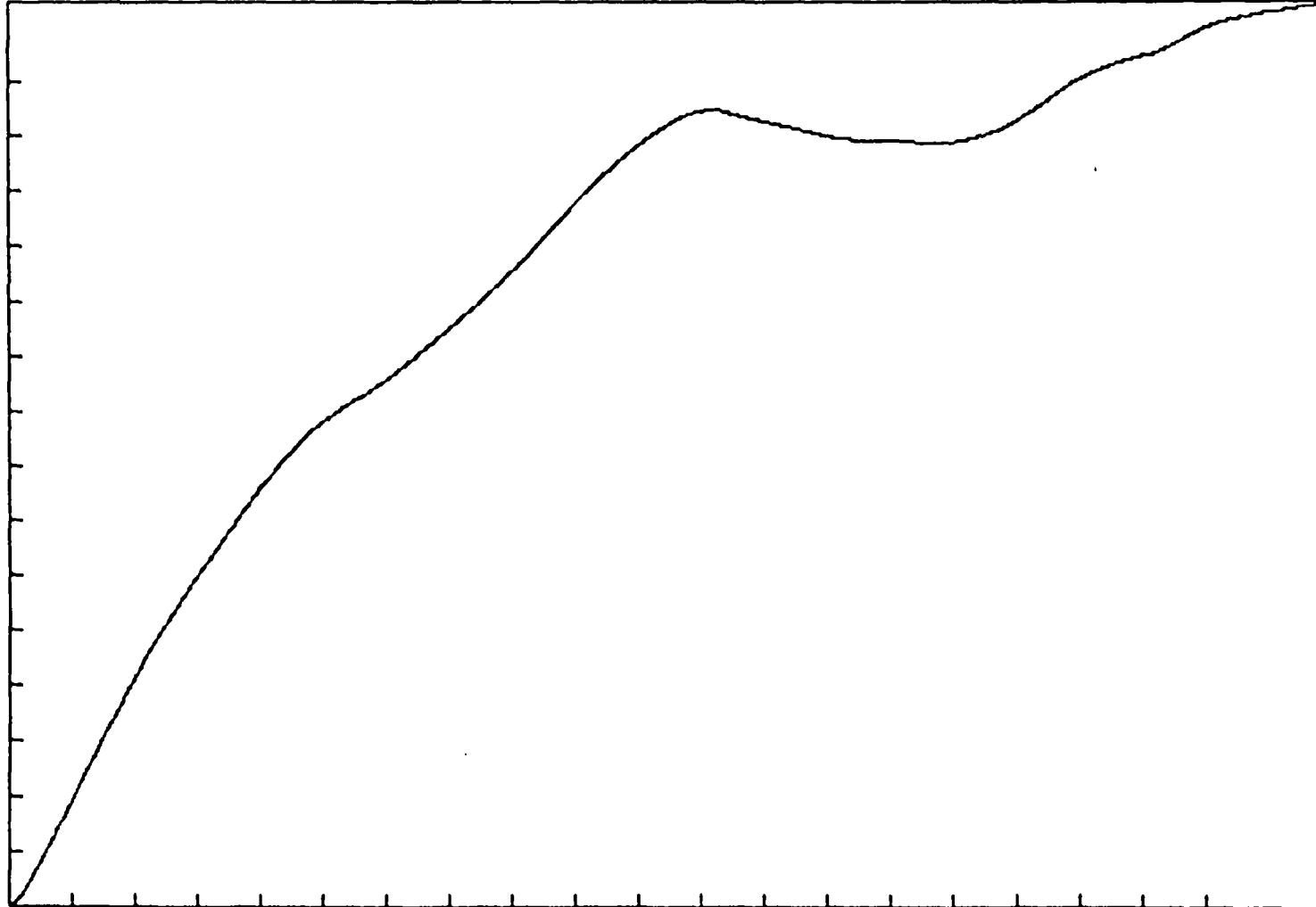
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 4-5

Intervalle en z = 1.08E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 5.54E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

162.7  
141.0  
119.3  
97.62  
75.92  
54.23  
32.54  
10.84



55.40 166.2 277.0 387.8 498.6 609.4 720.2 831.0 941.8 1052.

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 4-5

Intervalle en z = 2.83E+01 mm<sup>2</sup>

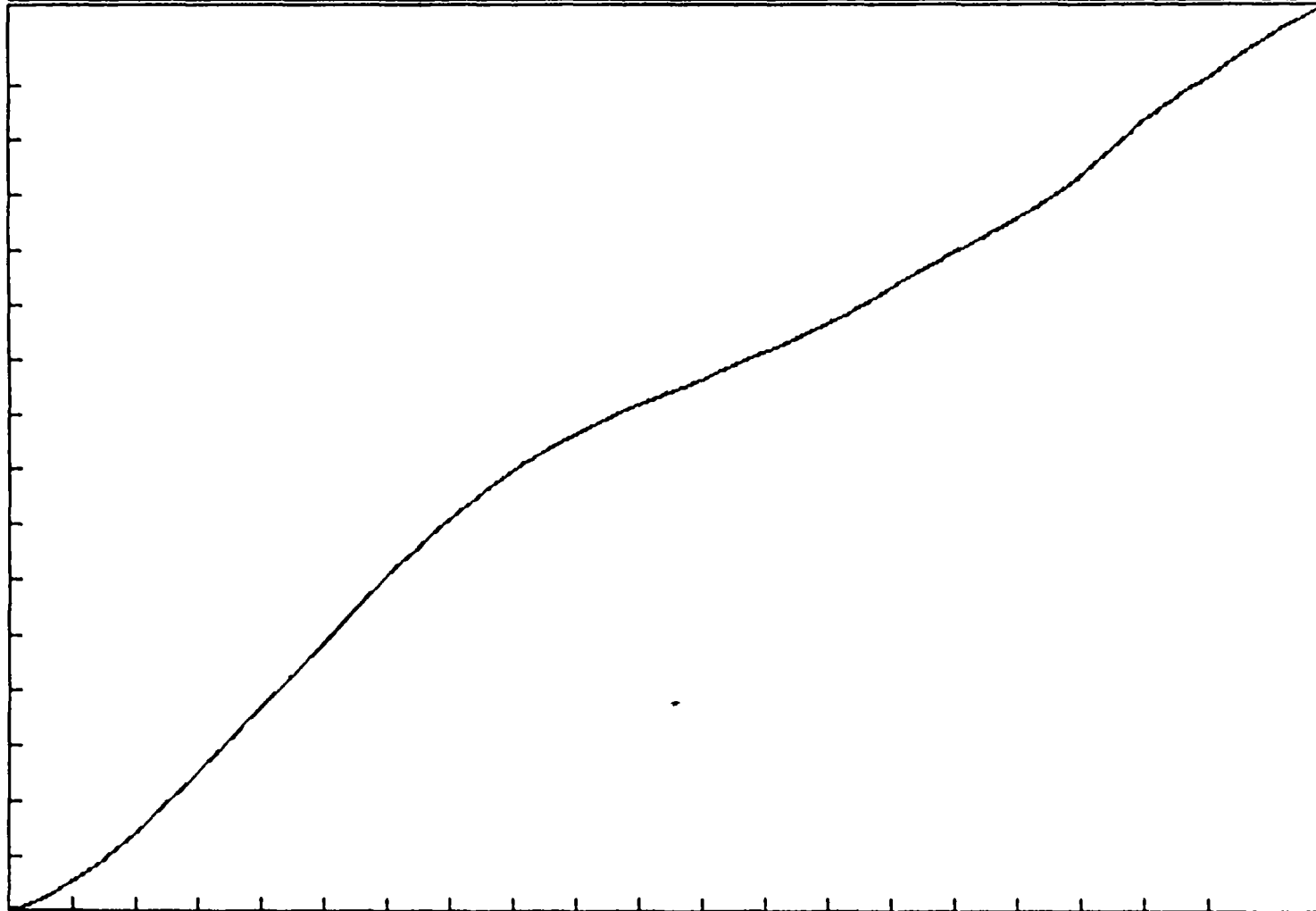
Intervalle en x = 2.76E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

425.8  
368.0  
312.2  
255.4  
198.7  
141.9  
85.16  
28.38

27.67 83.02 138.3 193.7 249.0 304.4 359.7 415.1 470.4 525.8

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 5

Intervalle en z = 1.69E+01 mm<sup>2</sup>

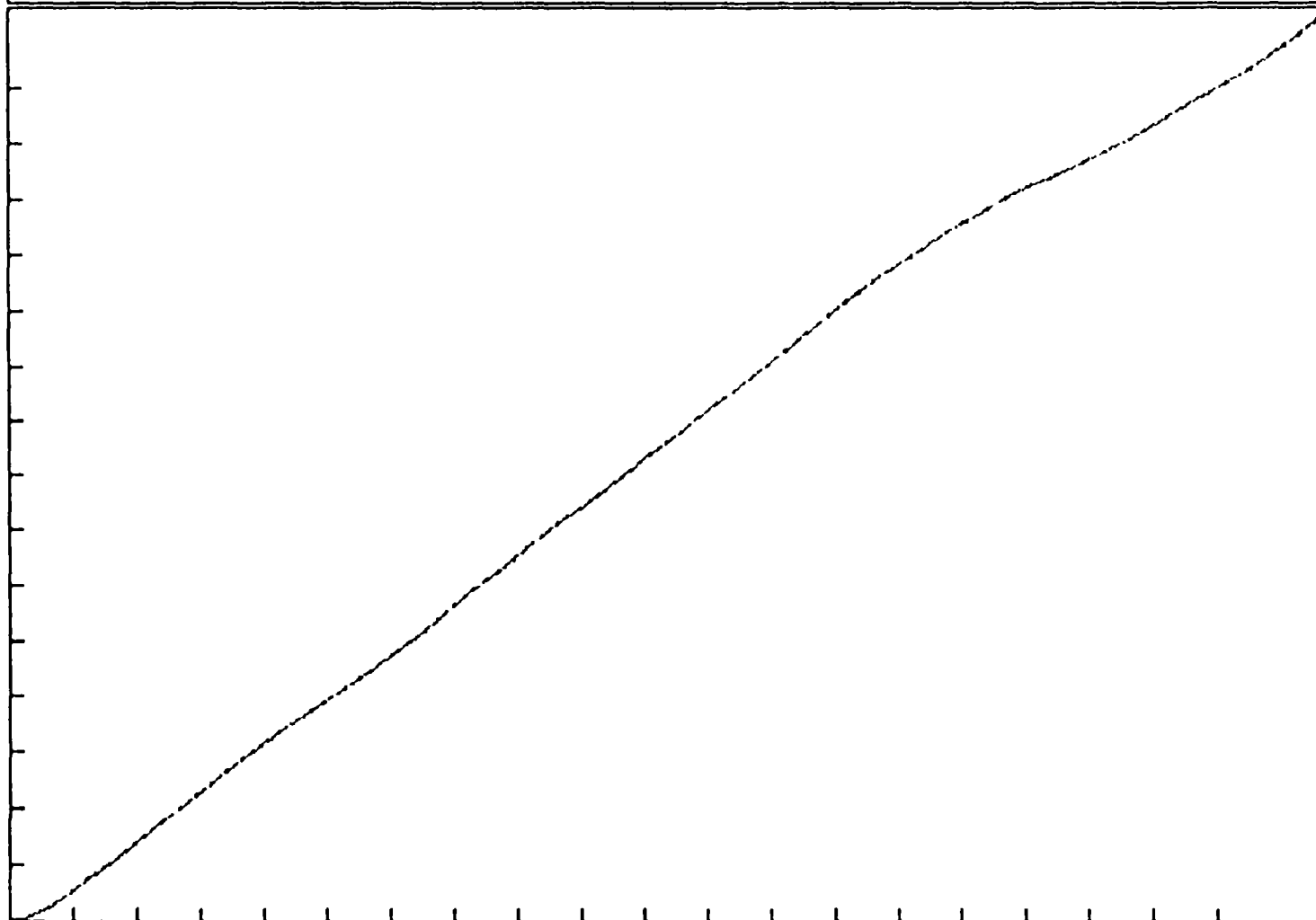
Intervalle en x = 2.66E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

254.4  
220.5  
186.5  
152.6  
118.7  
84.81  
50.88  
16.96

26.66 79.98 133.3 186.6 239.9 293.2 346.6 399.9 453.2 506.5

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATION 5

Intervalle en z = 1.70E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 1.33E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

255.6

221.5

187.4

153.4

119.3

85.22

51.13

17.04

13.30

39.92

66.53

93.14

119.7

146.3

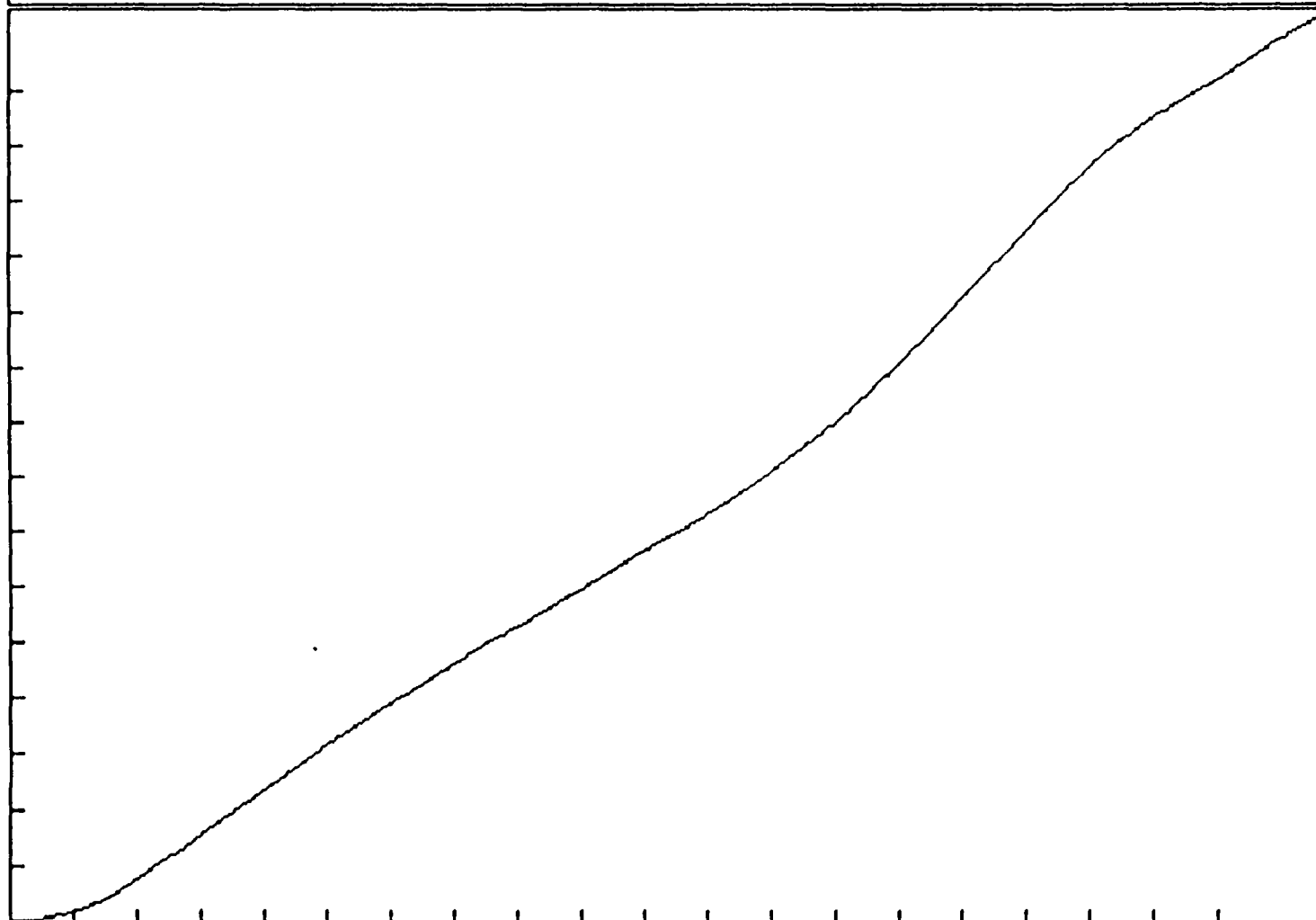
172.9

199.6

226.2

252.8

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATION 4

Intervalle en z = 4.95E+00 mm<sup>2</sup>

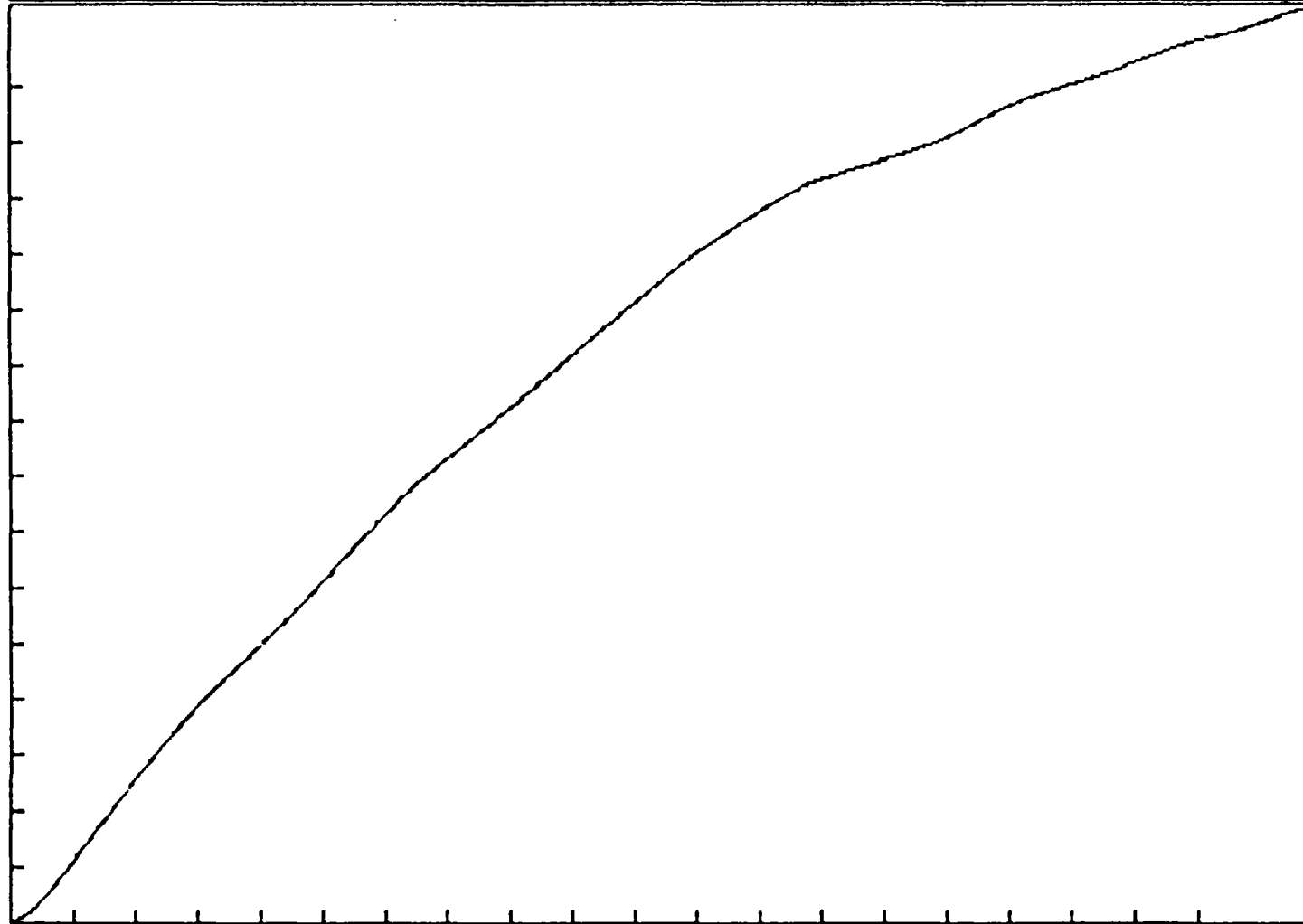
Intervalle en x = 2.85E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

74.25  
64.35  
54.45  
44.55  
34.65  
24.75  
14.85  
4.950

28.54 85.63 142.7 198.8 256.9 314.0 371.0 428.1 485.2 542.3

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATION 4

Intervalle en z = 9.37E+00 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 1.42E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

~~140.6~~

121.9

103.1

84.39

65.64

46.88

28.13

9.377

14.24

42.74

71.24

99.74

128.2

156.7

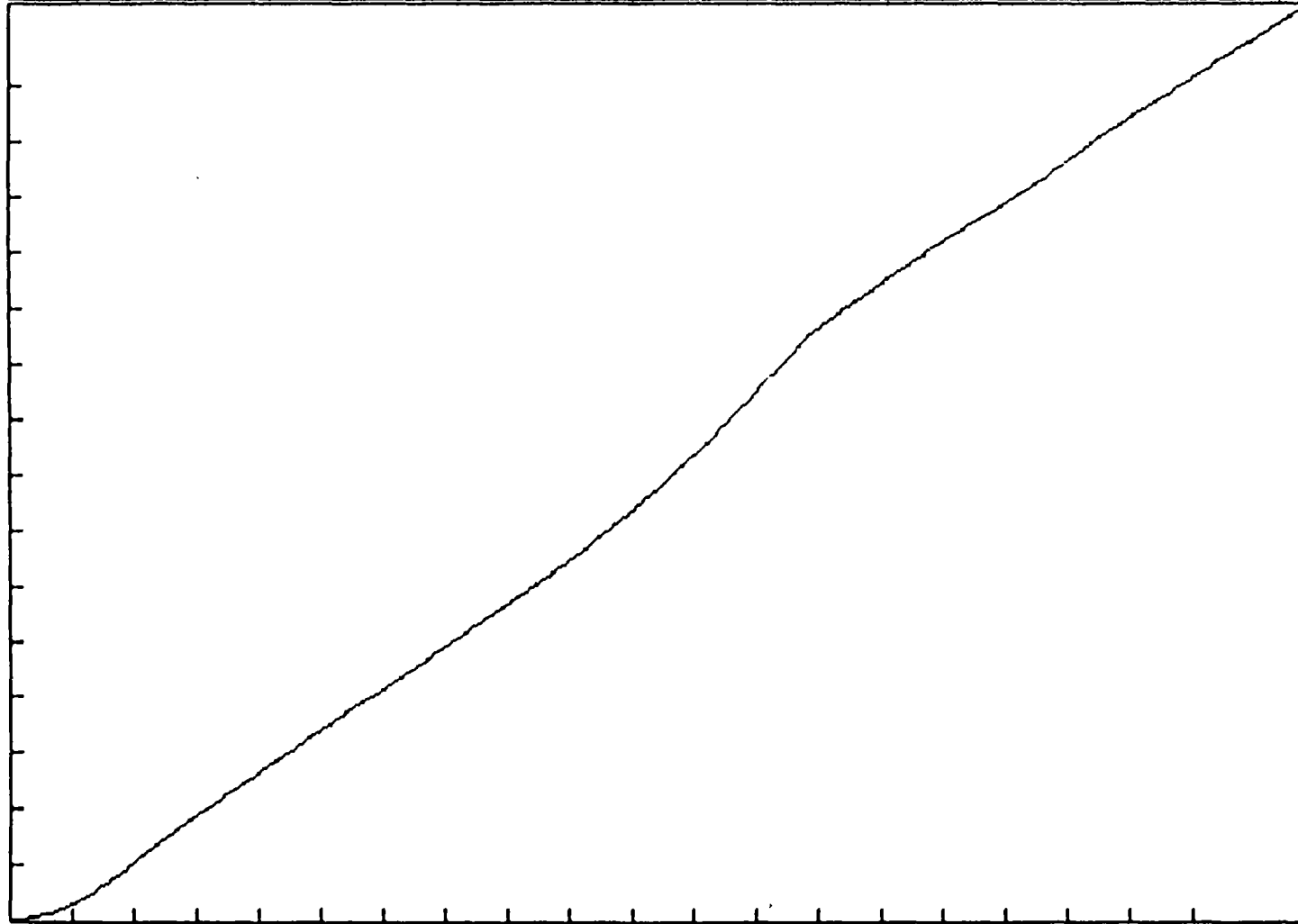
185.2

213.7

242.2

270.7

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 2

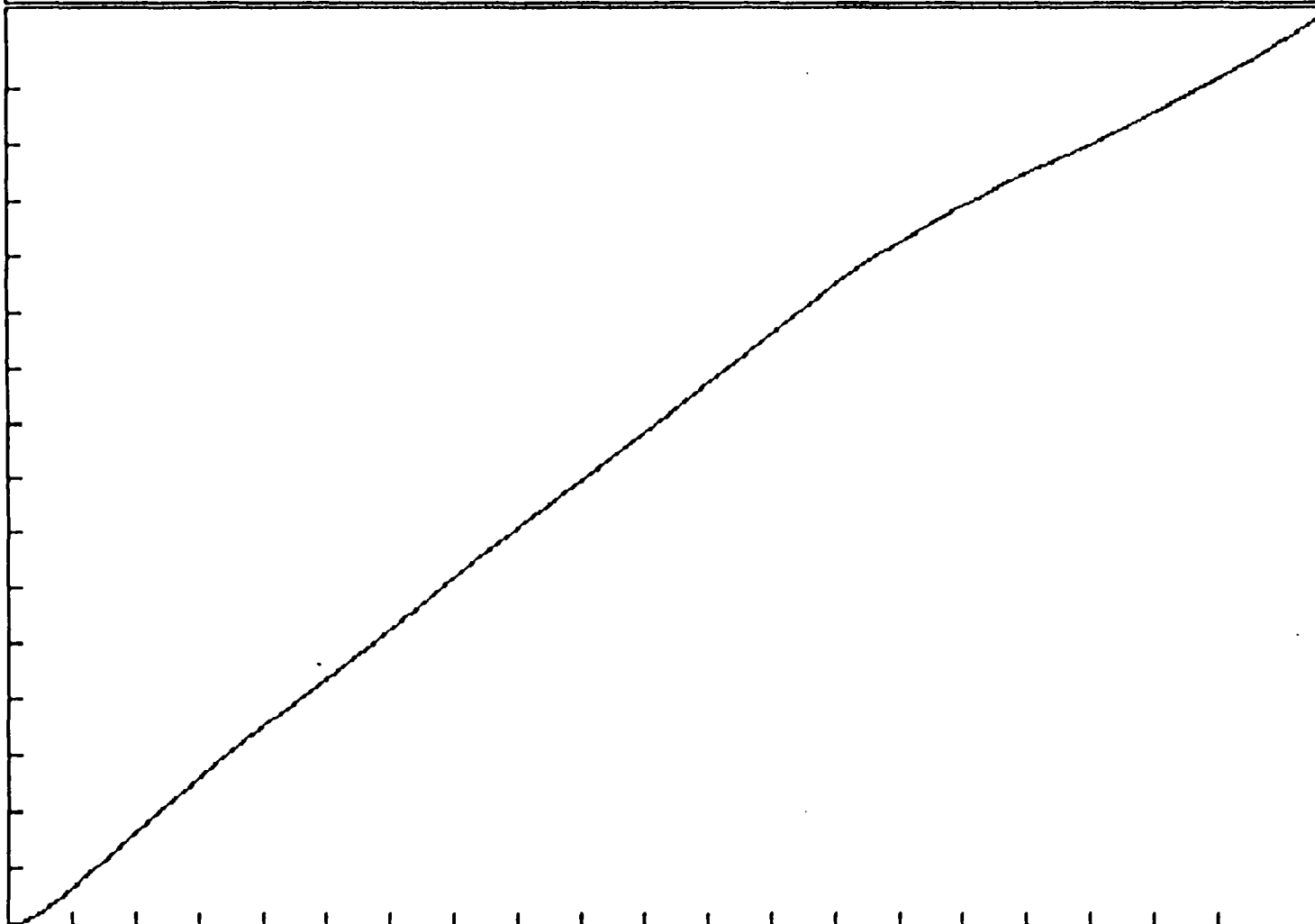
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 4+5

Intervalle en z = 1.08E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.66E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

163.1  
141.3  
119.6  
97.88  
76.11  
54.38  
32.62  
10.97



26.63 78.91 133.1 186.4 239.7 293.0 346.2 399.5 452.8 506.1

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N20° STATIONS 4+5

Intervalle en z = 1.28E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 1.32E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

~~193.7~~

187.8

142.0

116.2

90.39

84.58

38.74

12.91

13.28

39.84

66.41

92.97

119.5

146.1

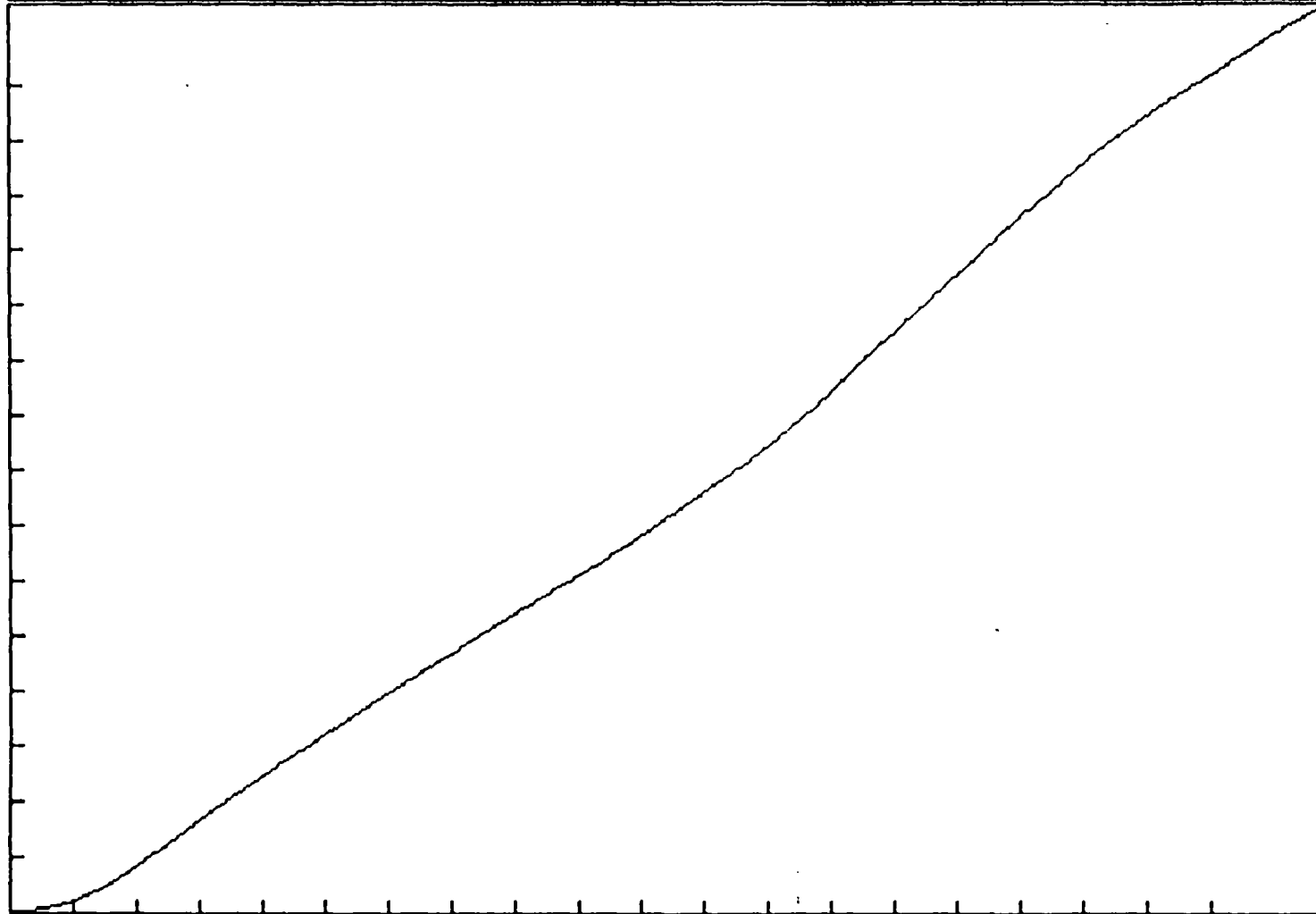
172.6

199.2

225.8

252.3

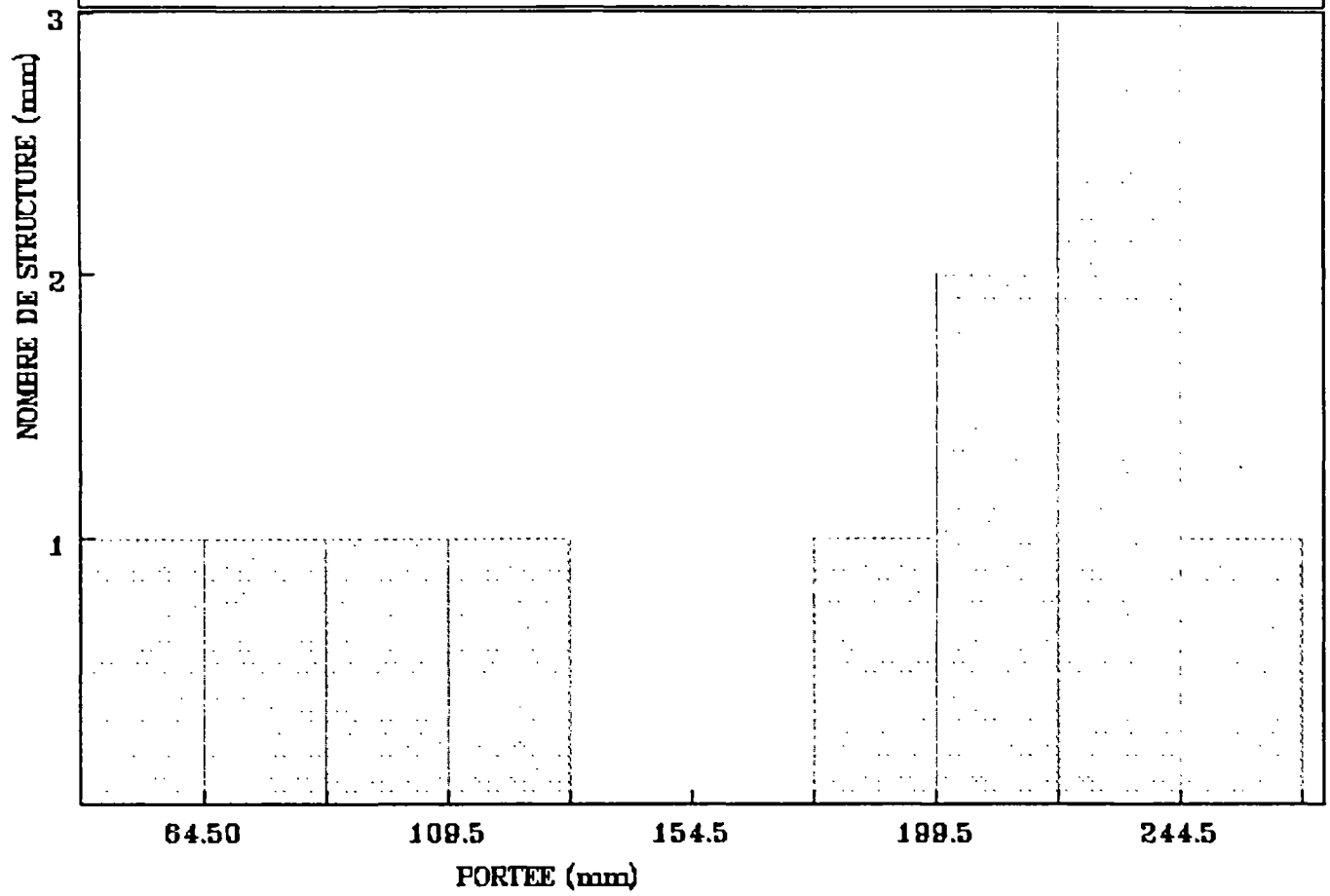
h (mm)



HISTOGRAMME DES PORTEES

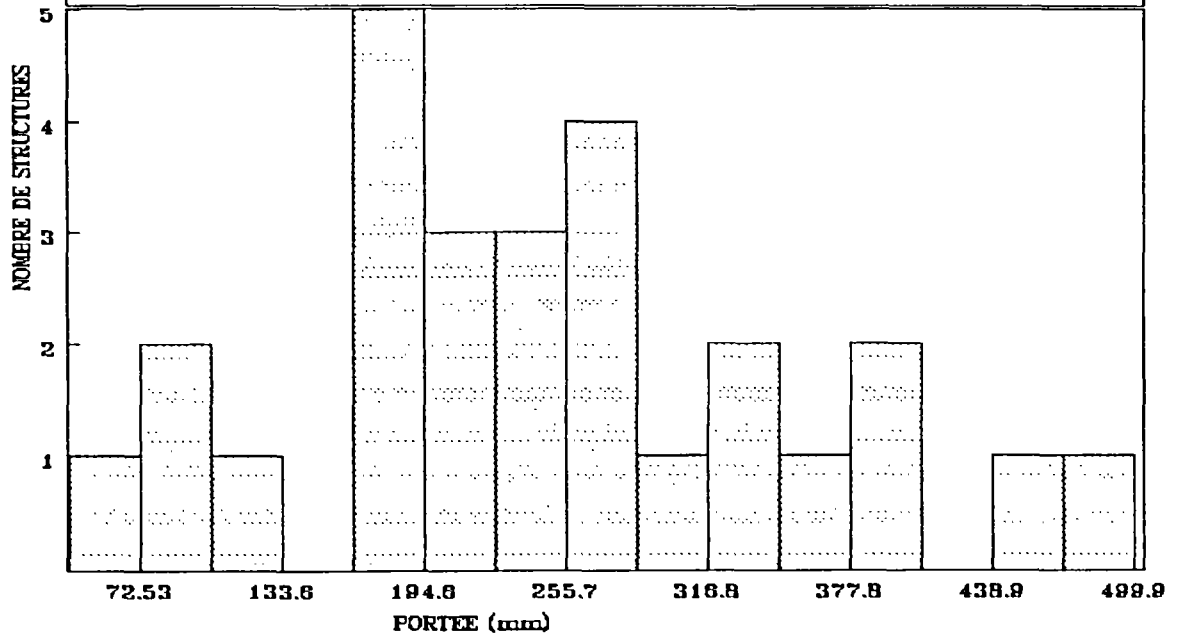
PROFILS HORIZONTAUX PLAN N20° STATIONS 2-3

CLASSE = 2.25E+01 mm



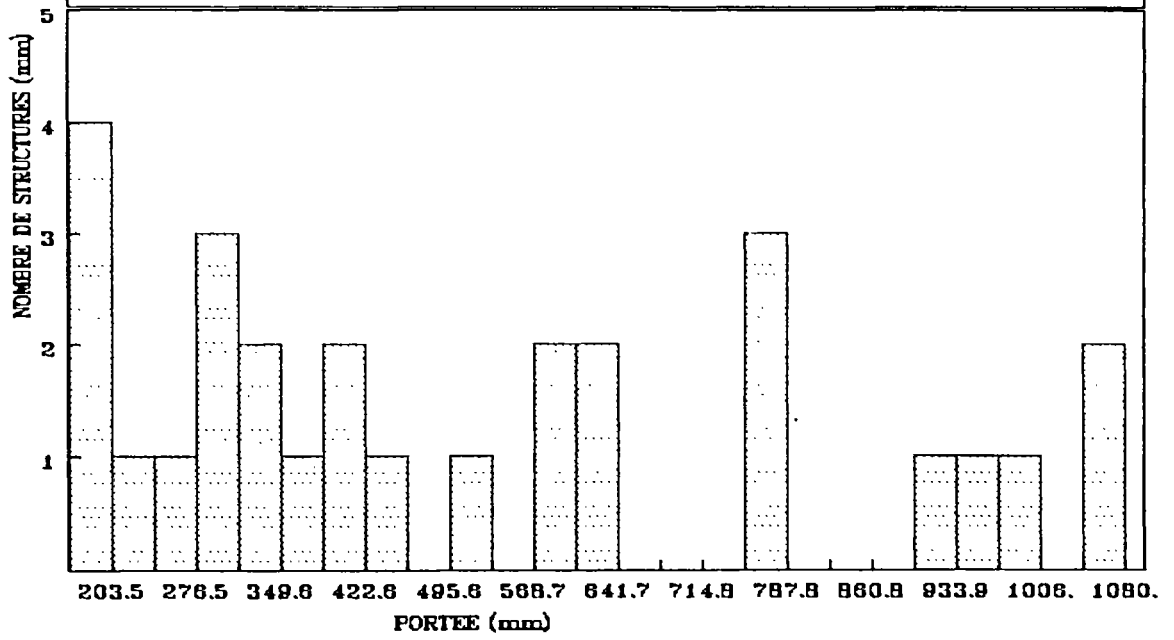
HISTOGRAMME DES PORTEES  
PROFILS HORIZONTAUX, PLAN N20°  
STATION 2-3 (ordre 1) ET STATIONS 4-5 (ordre 0 avec coupure)

CLASSE = 3.05E+01 mm



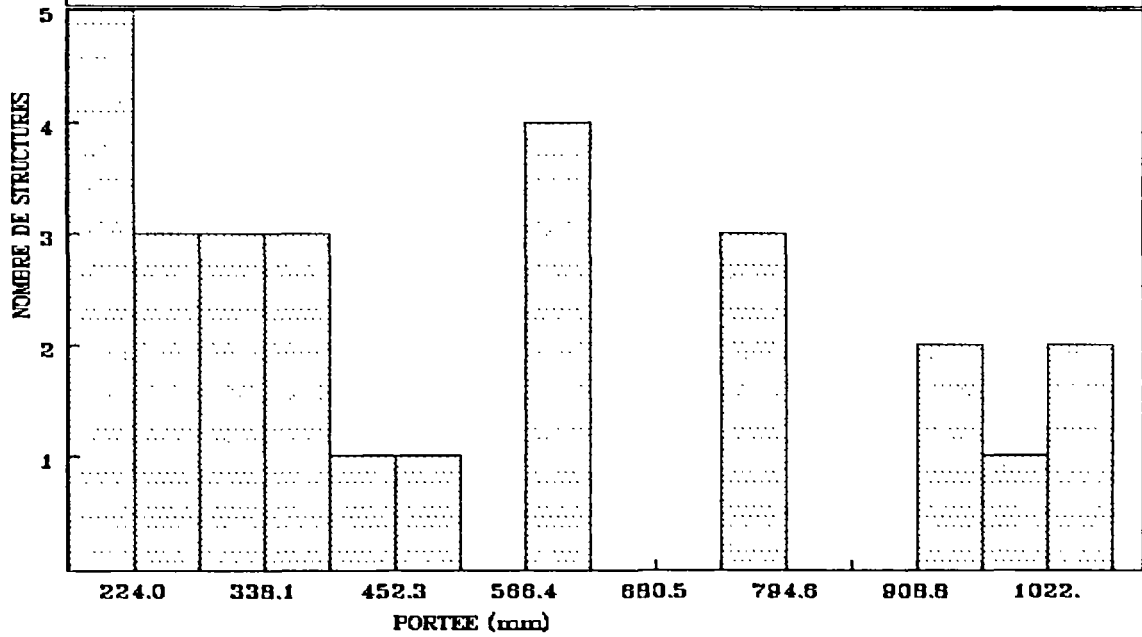
HISTOGRAMME DES PORTEES  
PROFILS HORIZONTAUX PLAN N20° STATIONS 4-5

CLASSE = 3.85E+01 mm



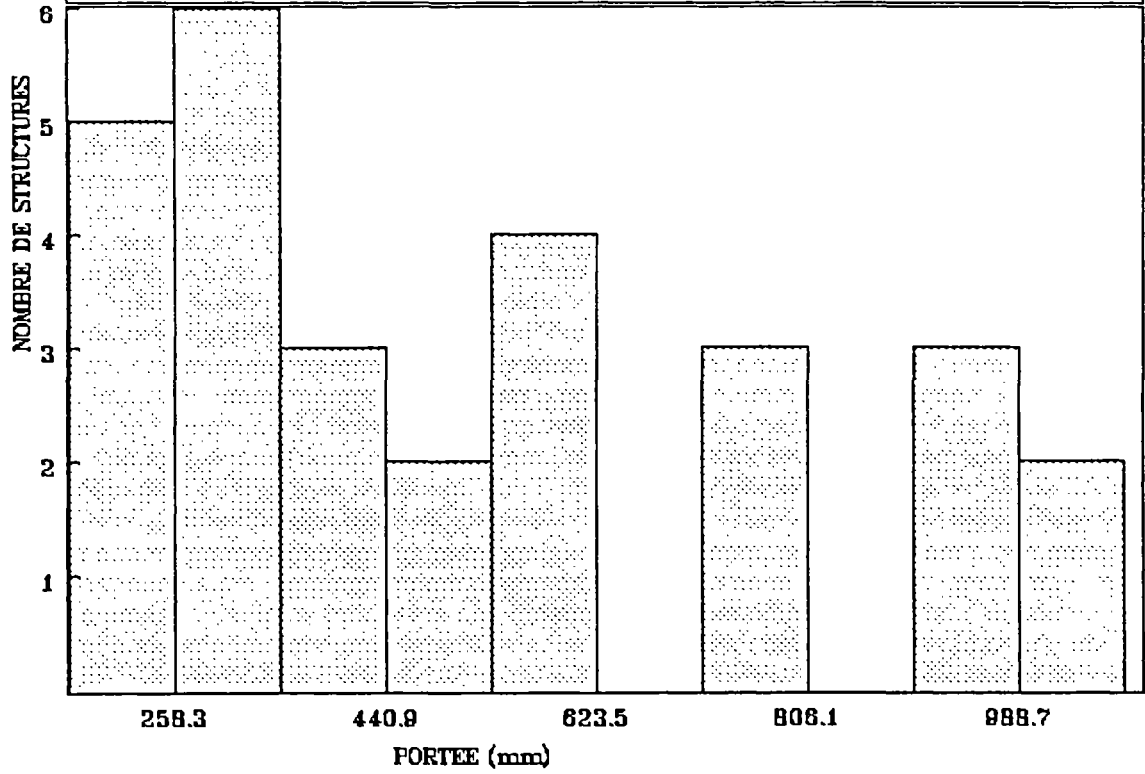
HISTOGRAMME DES PORTEES  
PROFILS HORIZONTAUX PLAN N20° STATIONS 4-5

CLASSE = 5.70E+01 mm



HISTOGRAMME DES PORTEES  
PROFILS HORIZONTAUX PLAN N20° STATIONS 4-5

CLASSE = 9.13E+01 mm



**VARIOGRAMMES MOYENS  
PLAN N 80°E**

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N80° STATION 1

Intervalle en z = 4.11E+01 mm<sup>2</sup>

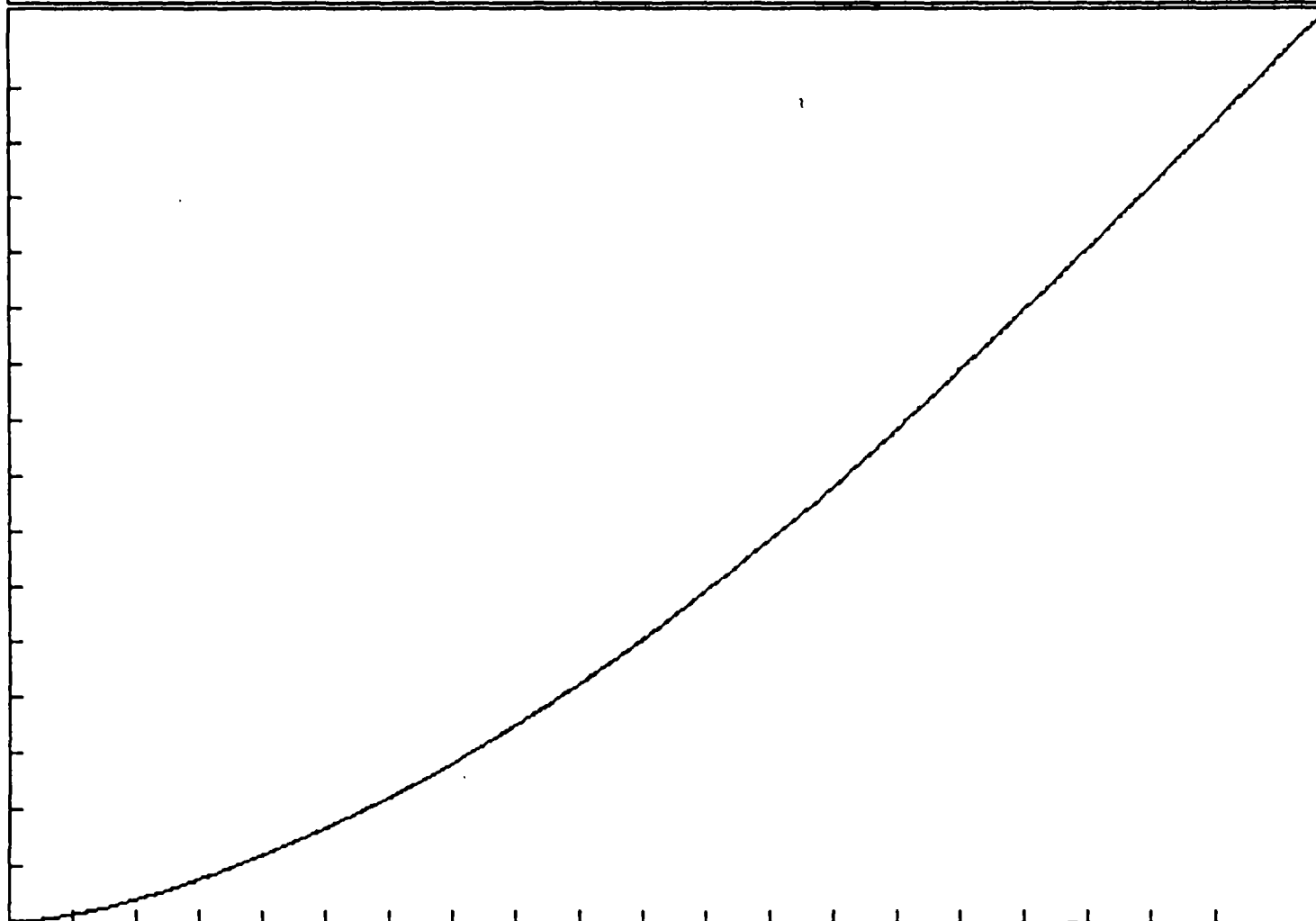
Intervalle en x = 2.05E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

617.4  
535.0  
452.7  
370.4  
288.1  
205.8  
123.4  
41.16

20.55 61.65 102.7 143.8 184.9 226.0 267.1 308.2 349.3 390.4

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N80° STATION 1

Intervalle en z = 4.84E+00 mm<sup>2</sup>

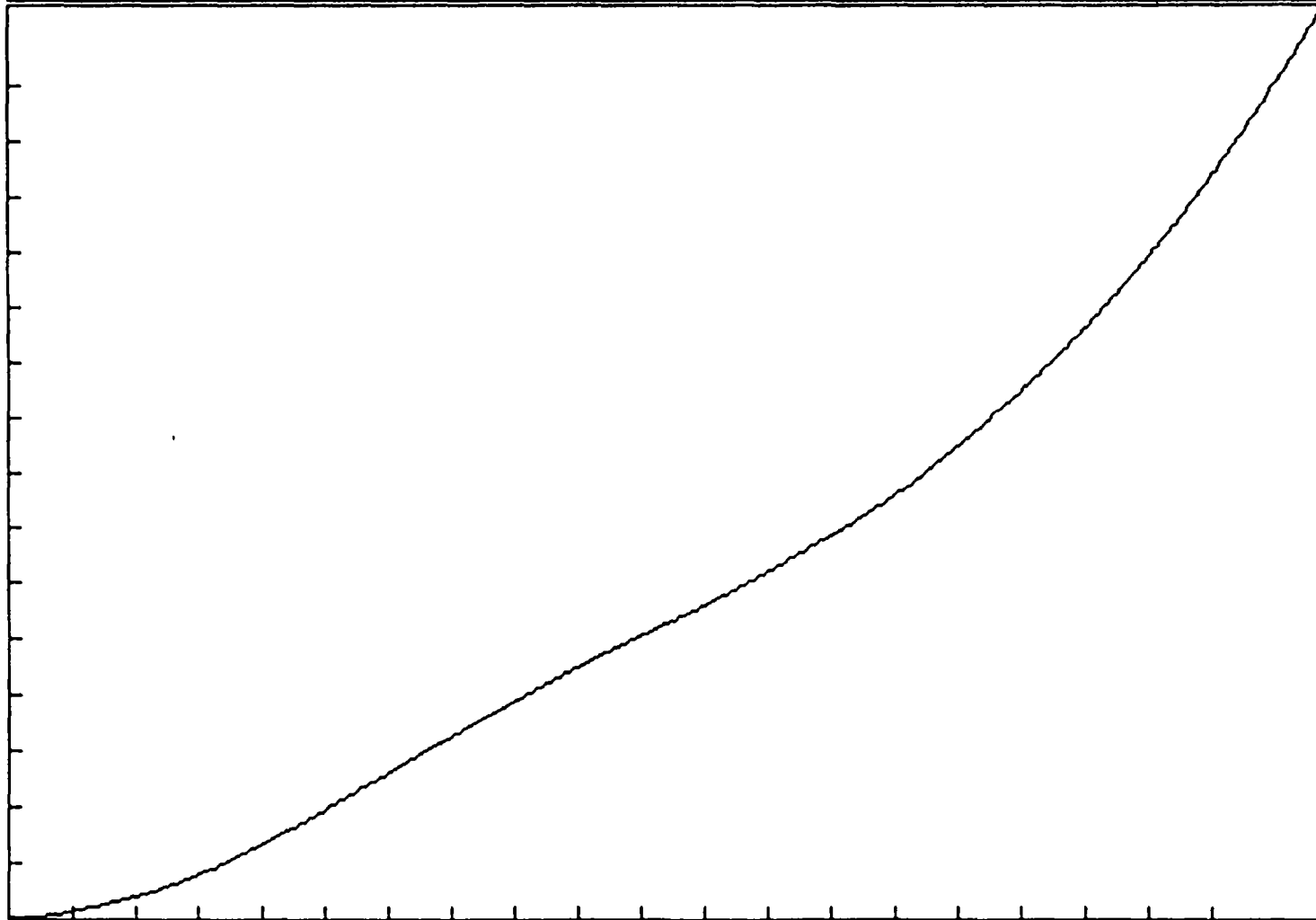
Intervalle en x = 1.02E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

72.60  
62.92  
53.24  
43.56  
33.88  
24.20  
14.52  
4.840

10.26 30.79 51.31 71.84 92.37 112.9 133.4 153.9 174.4 195.0

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 3

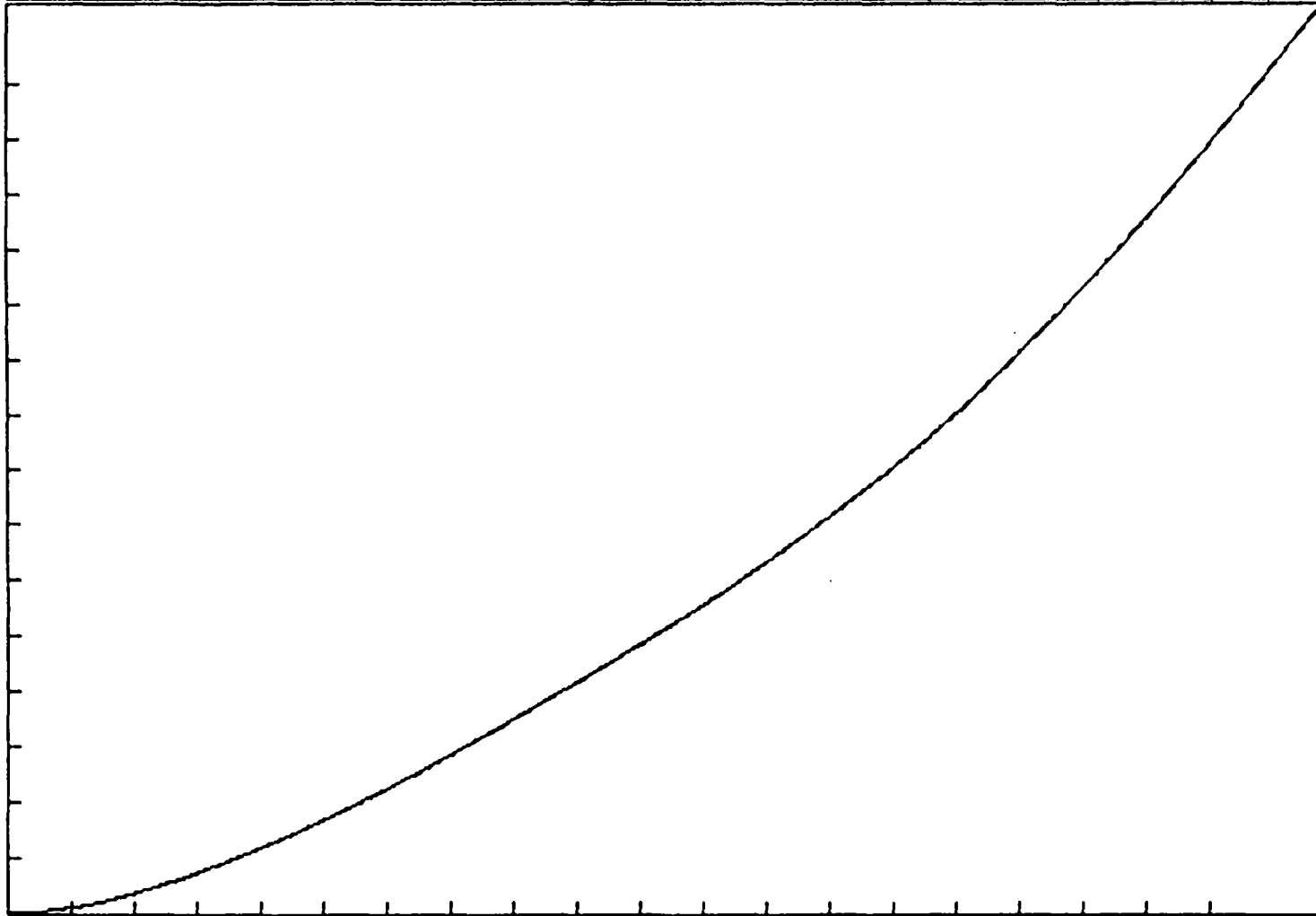
MAYET DE MONTAGNE : PLAN NB0° STATION 1

Intervalle en z = 9.17E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.98E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

1376.  
1192.  
1008.  
825.6  
642.1  
458.7  
275.2  
91.74



29.84 89.54 149.2 208.9 268.6 328.3 388.0 447.7 507.4 567.1

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 3

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N80° STATION 1

Intervalle en z = 8.00E+00 mm<sup>2</sup>

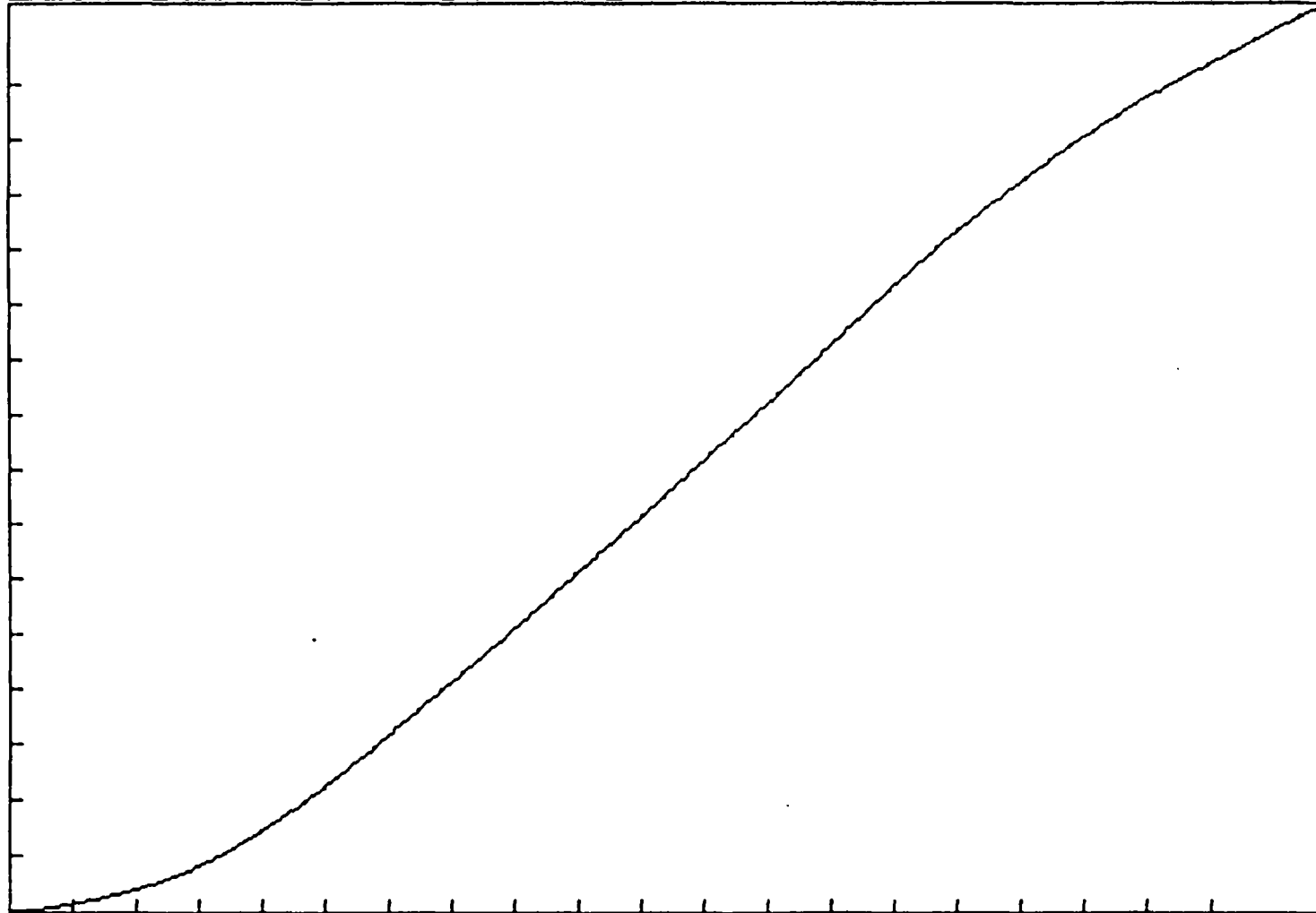
Intervalle en x = 1.49E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

90.05  
78.05  
66.04  
54.03  
42.02  
30.01  
18.01  
6.003

14.90 44.70 74.50 104.3 134.1 163.9 193.7 223.5 253.3 283.1

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 3

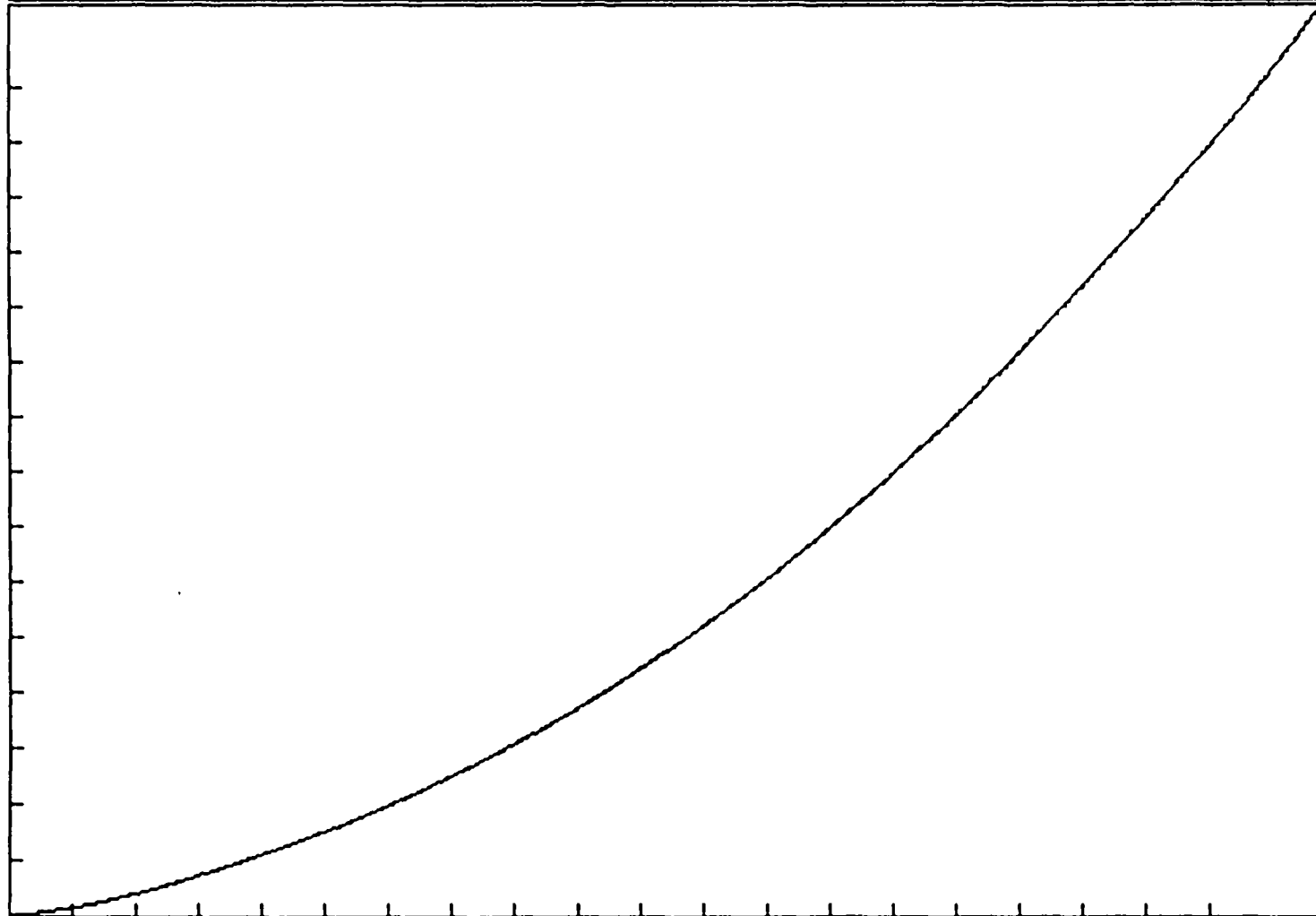
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N80° STATION 2

Intervalle en z = 1.90E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.15E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

285.8  
247.6  
209.5  
171.4  
133.3  
95.26  
57.16  
19.05



21.59 64.77 107.9 151.1 194.3 237.4 280.6 323.8 367.0 410.2

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 3

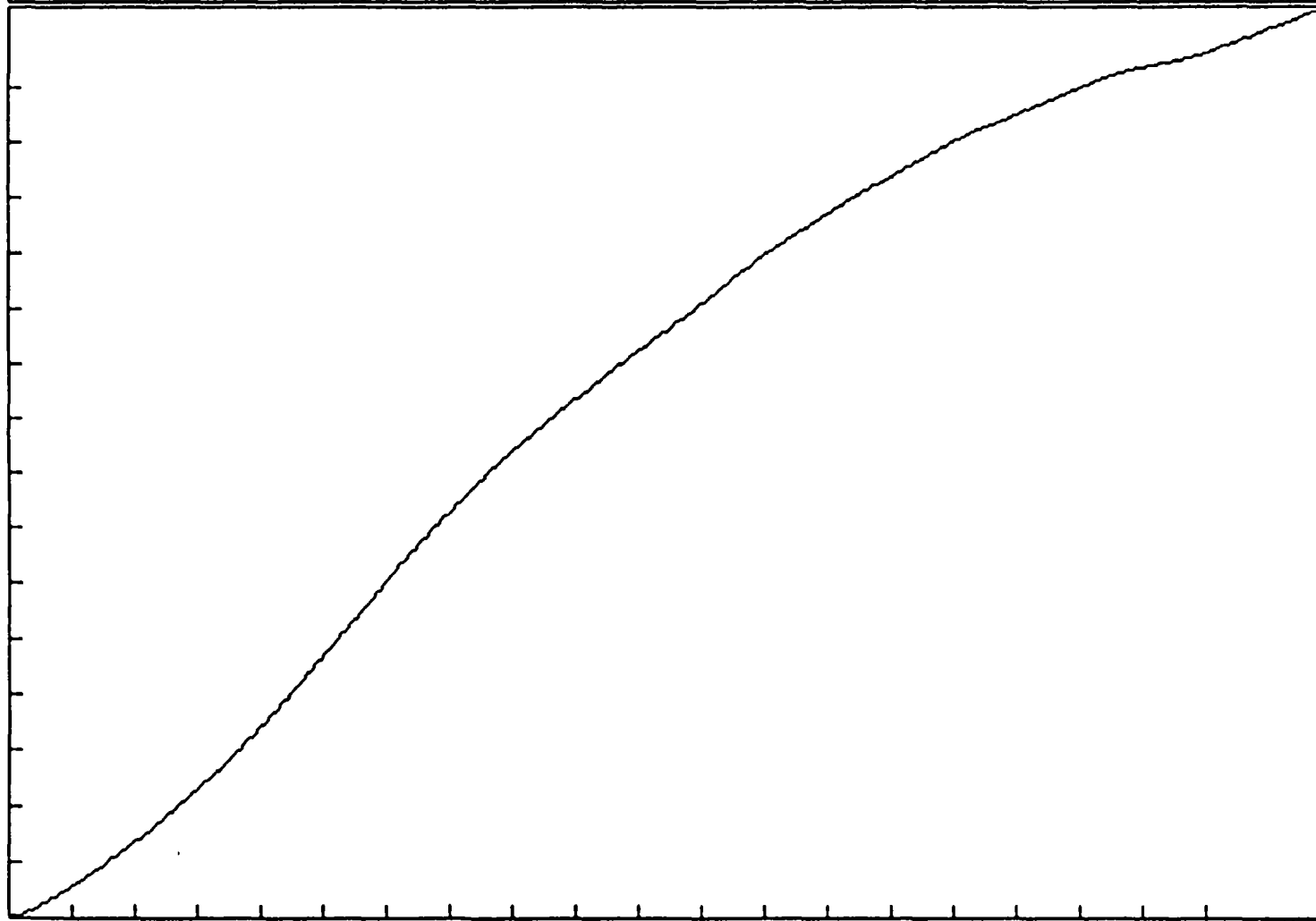
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N80° STATION 2

Intervalle en z = 9.12E-01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 1.07E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

13.68  
11.85  
10.03  
8.209  
6.385  
4.580  
2.736  
0.91 21



10.77 32.31 53.85 75.39 96.93 118.4 140.0 161.5 183.1 204.6

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 3

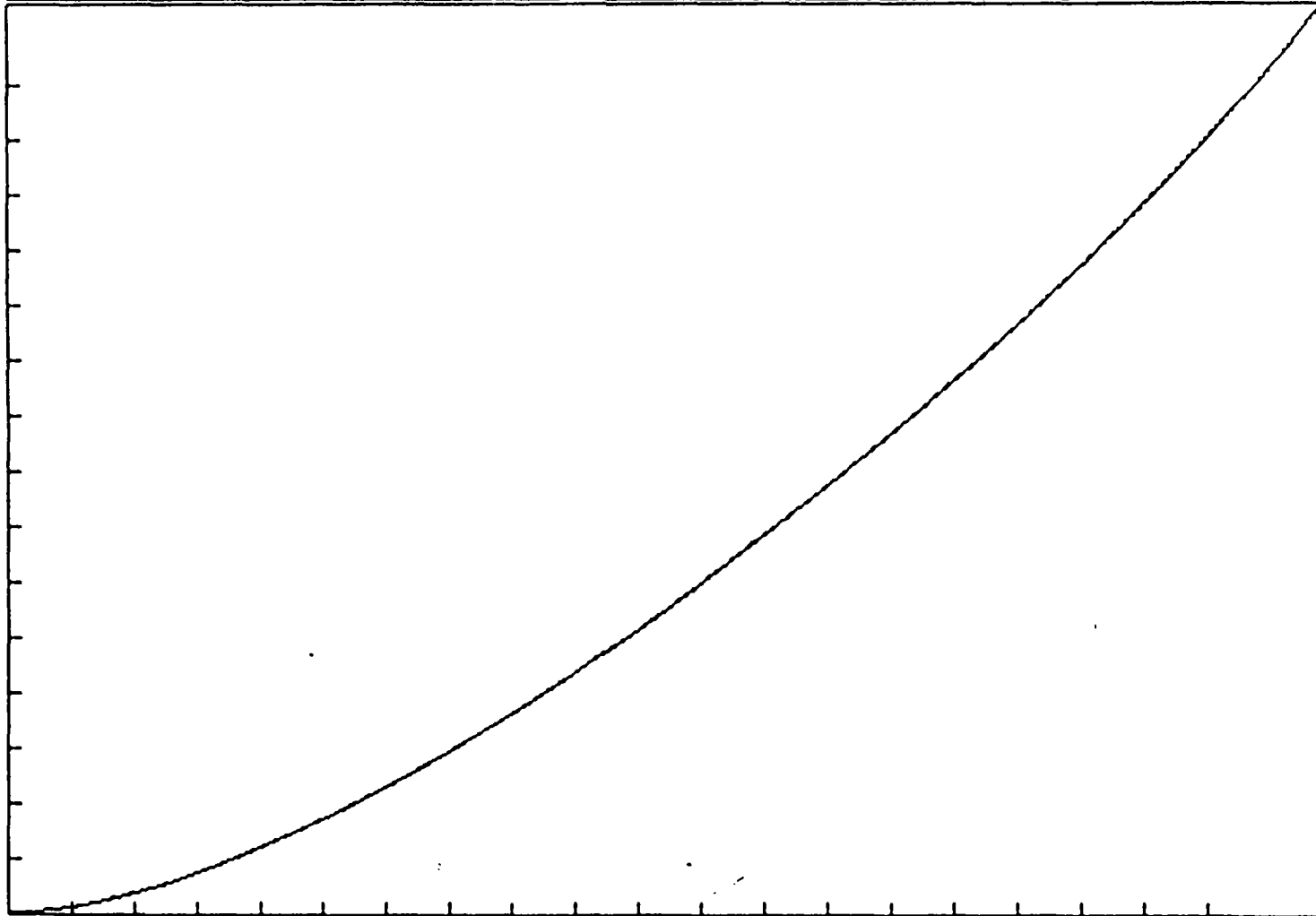
MAYET DE MONTAGNE : PLAN NB0° STATION 1-2

Intervalle en z = 3.47E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.15E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

521.1  
451.8  
382.1  
312.6  
243.2  
173.7  
104.2  
34.74



21.58 64.69 107.8 150.9 194.0 237.2 280.3 323.4 366.6 409.7

h (mm)

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 1

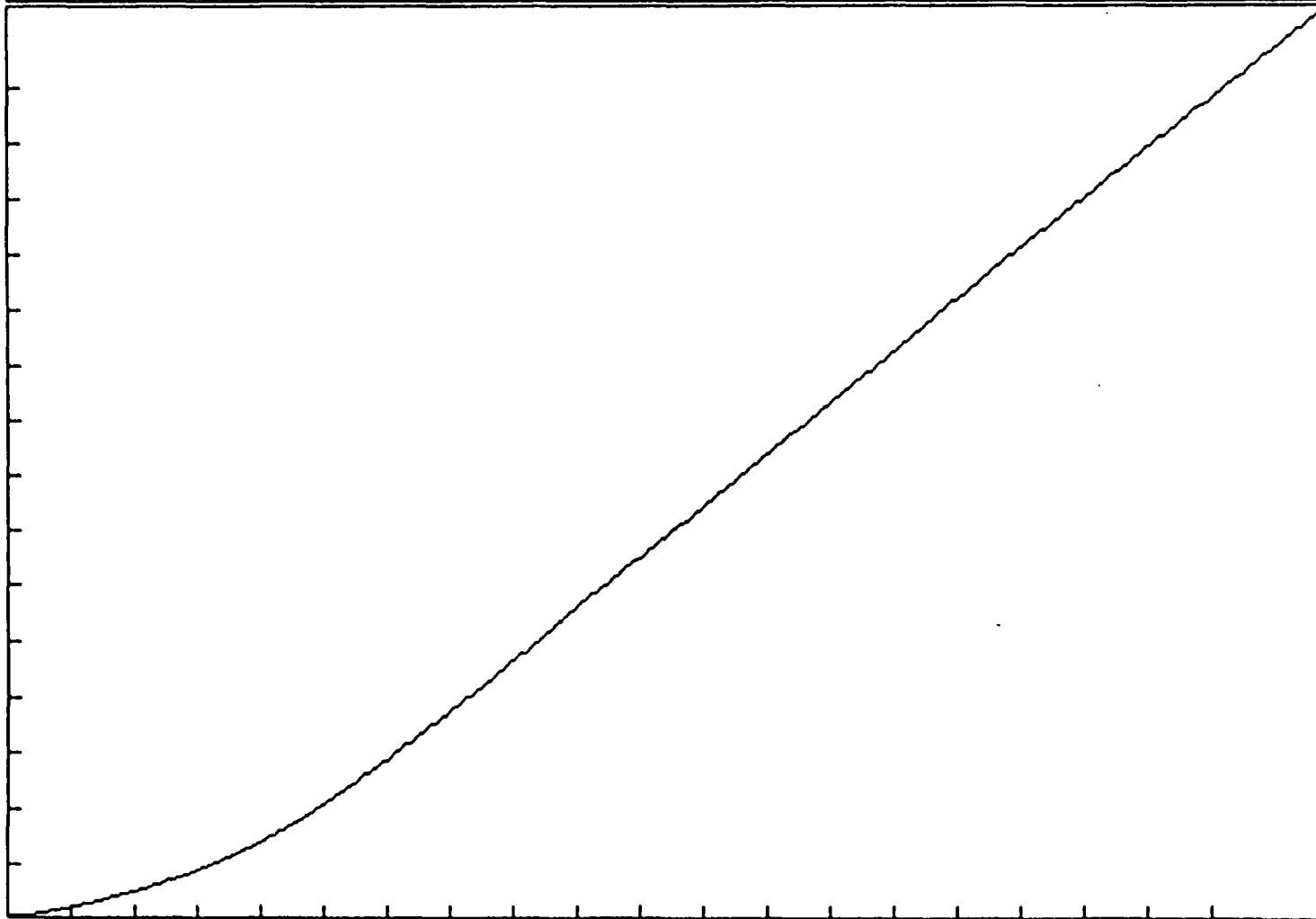
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N80° STATION 1-2

Intervalle en z = 2.70E+00 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 1.07E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

40.58  
35.17  
29.76  
24.35  
18.94  
13.52  
8.117  
2.705



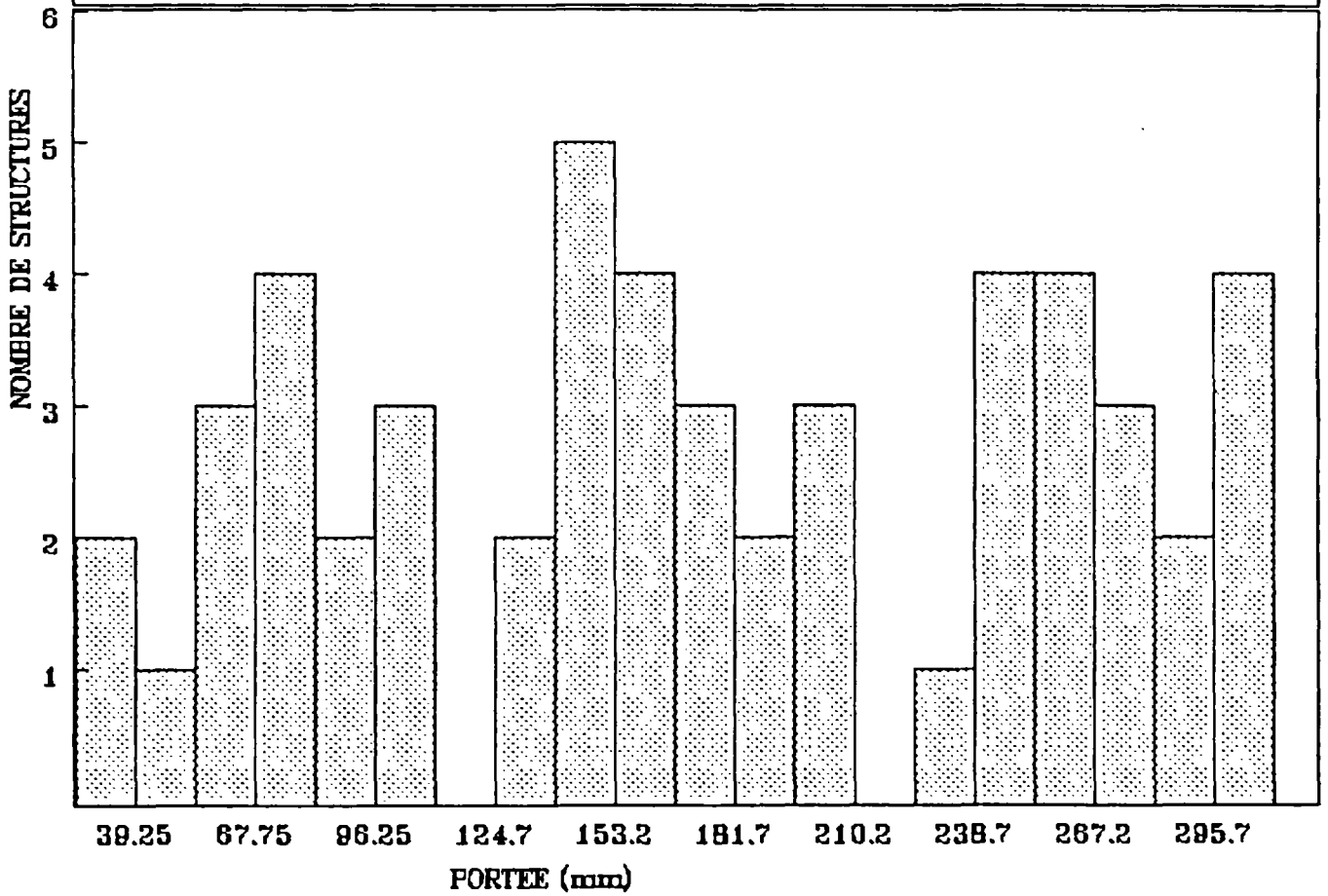
10.74 32.24 53.73 75.22 96.72 118.2 139.7 161.2 182.6 204.1

h (mm)

HISTOGRAMME DES PORTEES - ORDRE 1

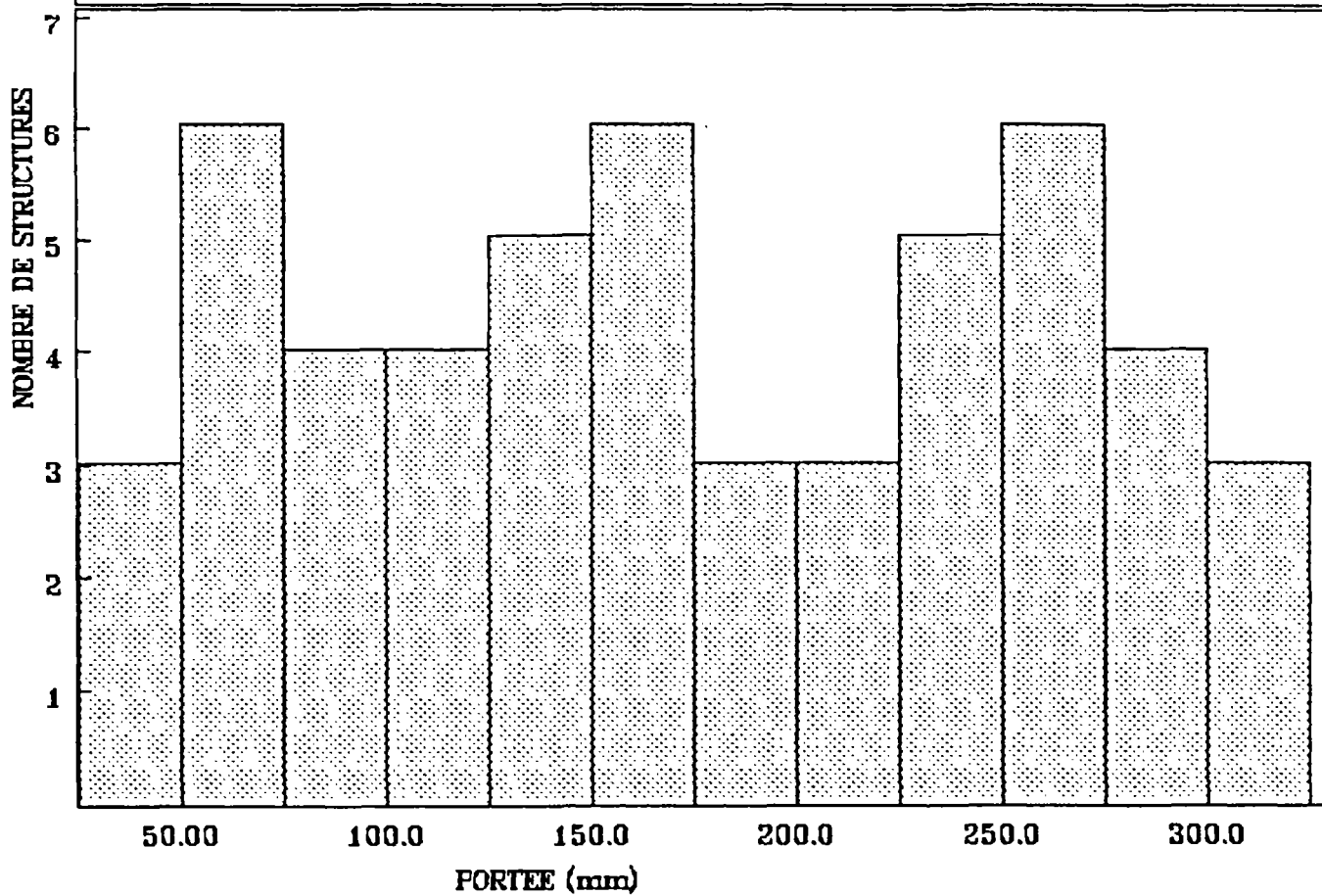
PROFILS HORIZONTAUX PLAN N80° STATIONS 1 et 2

CLASSE = 1.42E+01 mm



HISTOGRAMME DES PORTEES - ORDRE 1  
PROFILS HORIZONTAUX PLAN N80° STATIONS 1 et 2

CLASSE = 2.50E+01 mm



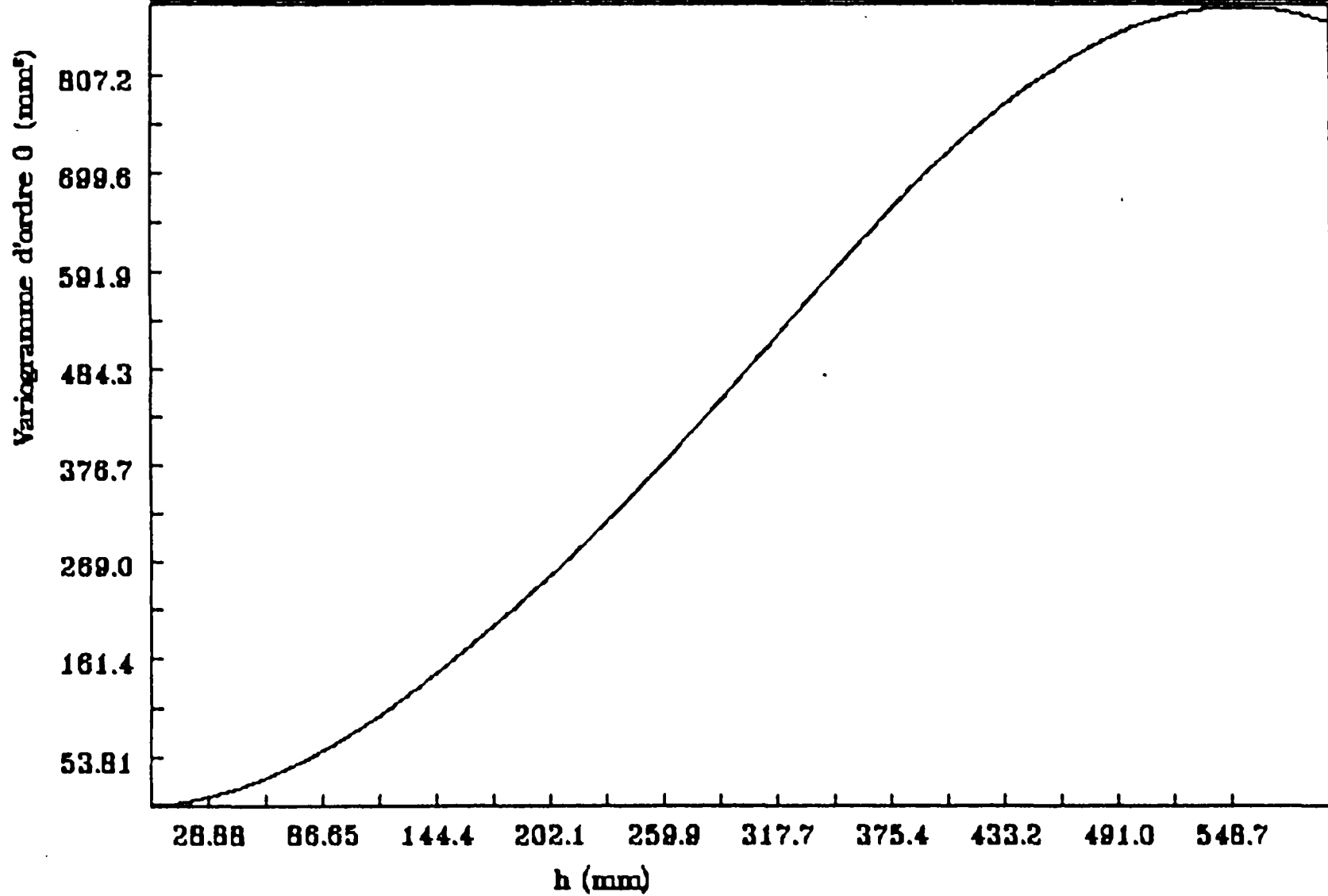
**VARIOGRAMMES MOYENS  
PLAN N 150°E**

VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N150° STATION 2

Intervalle en z = 5.38E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.88E+01 mm



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 2

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N150° STATION 2

Intervalle en z = 1.64E+01 mm<sup>2</sup>

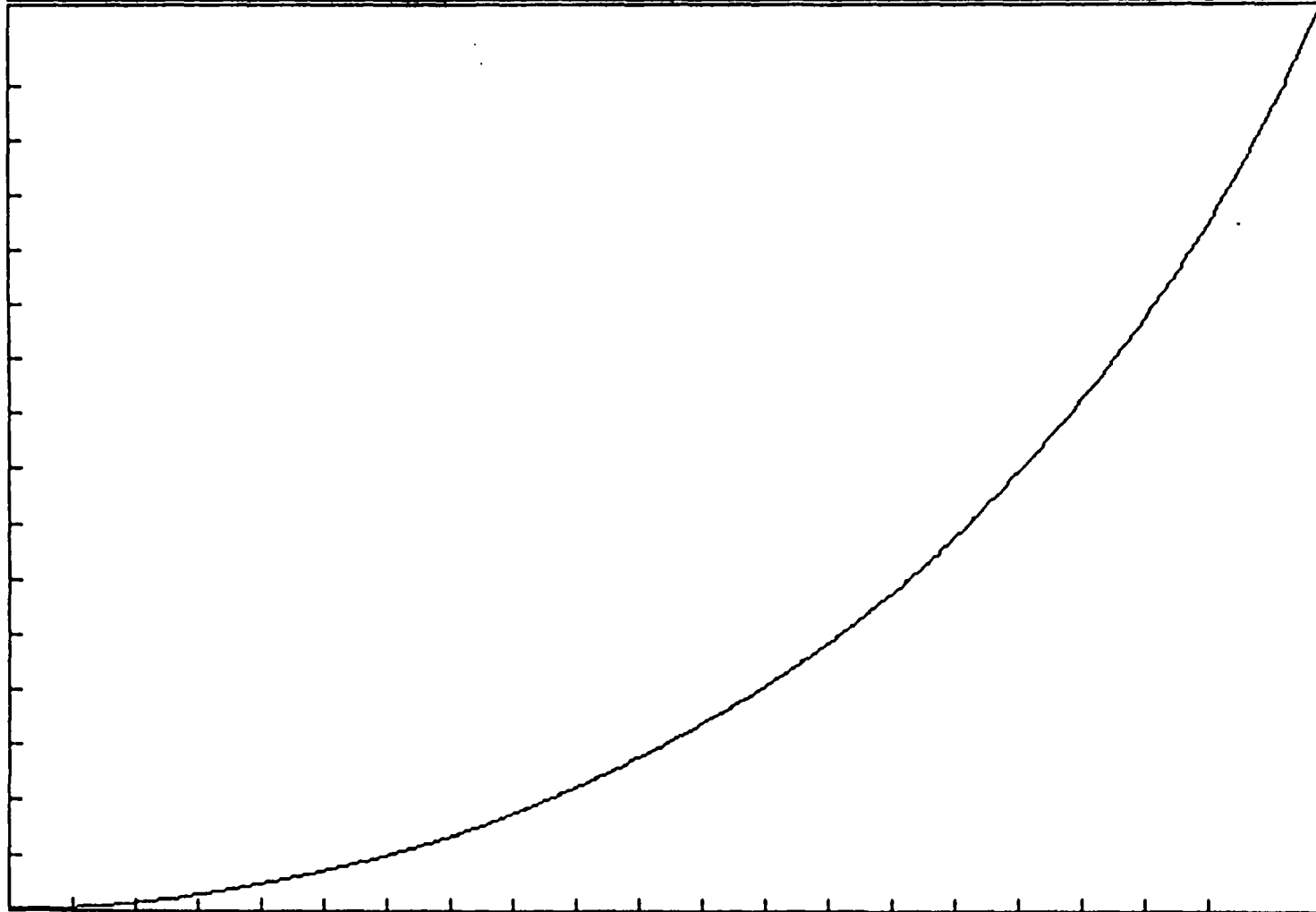
Intervalle en x = 1.44E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

247.4  
214.4  
181.4  
148.4  
115.4  
82.49  
49.49  
16.49

14.41 43.25 72.08 100.9 129.7 158.5 187.4 216.2 245.1 273.9

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 0 - DIRECTION 1

MAYET DE MONTAGNE : PLAN N150° STATIONS 1-2

Intervalle en z = 3.03E+02 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 5.55E+01 mm

Variogramme d'ordre 0 (mm<sup>2</sup>)

4550.

3943.

3337.

2730.

2123.

1516.

910.1

303.3

55.52

166.5

277.6

388.6

499.6

610.7

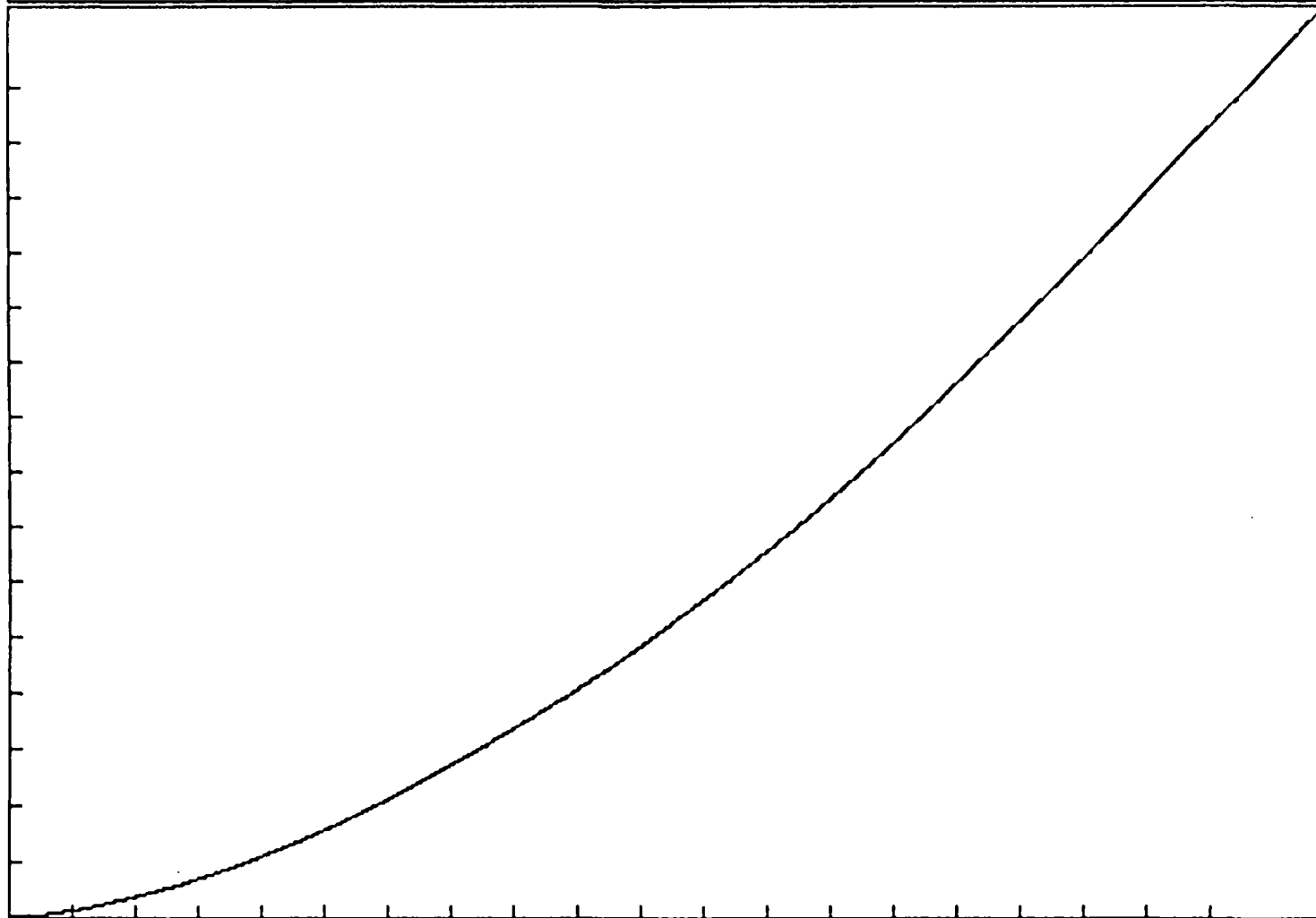
721.7

832.8

943.8

1054.

h (mm)



VARIOGRAMME MOYEN D'ORDRE 1 - DIRECTION 1

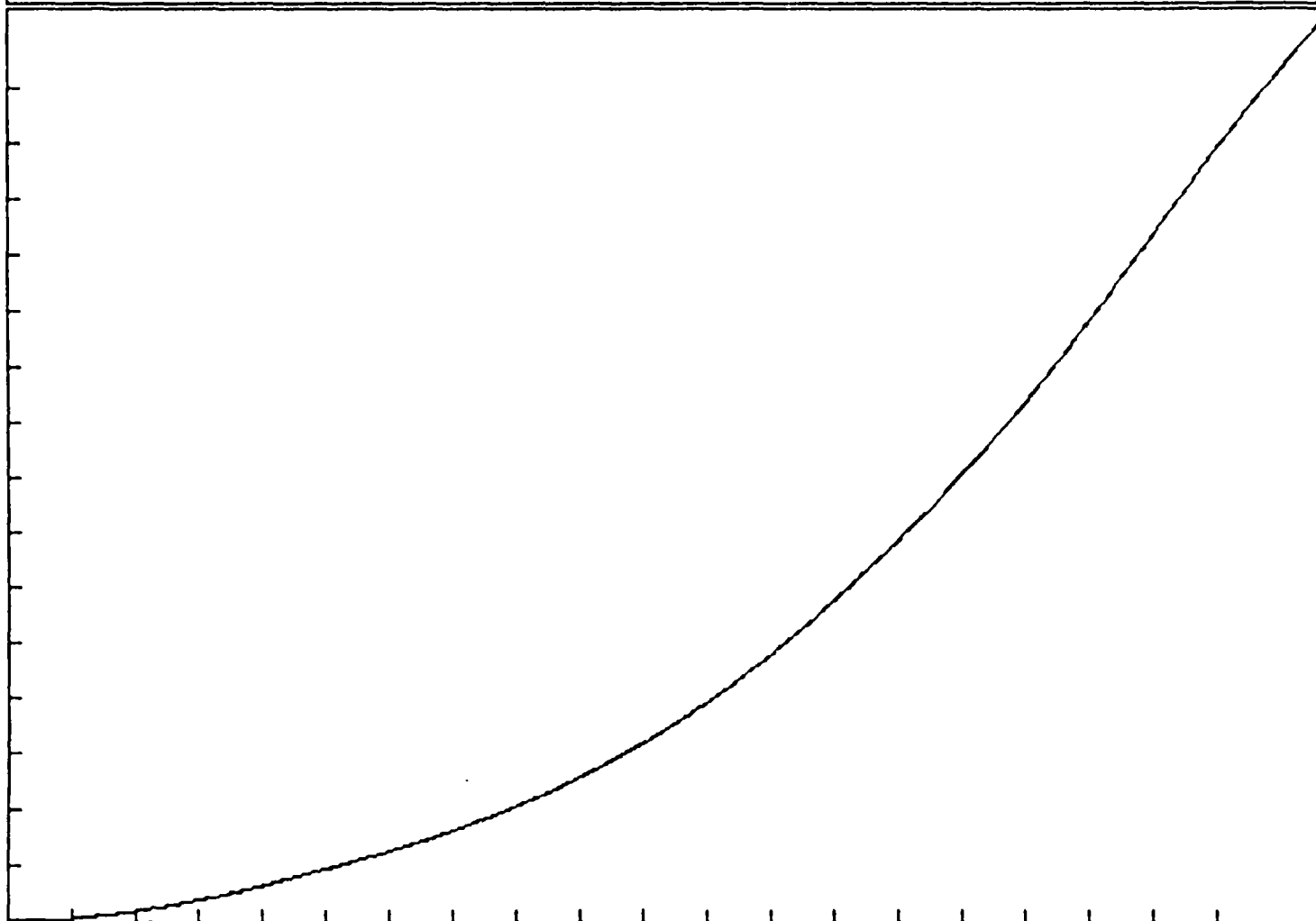
MAYET DE MONTAGNE : PLAN N150° STATIONS 1-2

Intervalle en z = 6.47E+01 mm<sup>2</sup>

Intervalle en x = 2.77E+01 mm

Variogramme d'ordre 1 (mm<sup>2</sup>)

871.2  
841.7  
712.2  
582.7  
453.2  
323.7  
194.2  
64.75



27.74 83.24 138.7 194.2 249.7 305.2 360.7 418.2 471.7 527.2

h (mm)