

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

Par
NANCY VERREAULT

ÉLABORATION D'UNE MÉTHODE DE CARACTÉRISATION DE LA
DILATANCE D'UNE FRACTURE RUGUEUSE EN FONCTION
DE SON DÉPLACEMENT EN CISAILLEMENT

FÉVRIER 2000



Mise en garde/Advice

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

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

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

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

RÉSUMÉ

Le comportement mécanique et hydraulique des massifs rocheux fracturés est grandement influencé par la dilatance produite lors du déplacement en cisaillement des fractures. La plupart des travaux de génie civil et minier impliquent le comportement mécanique de massifs rocheux recoupés de plusieurs réseaux de joints et il est primordial d'anticiper les variations de la dilatance lorsque ces milieux discontinus sont sollicités par différents types de forces externes.

Une méthode de caractérisation de la dilatance en fonction du déplacement en cisaillement, sous contrainte normale nulle, est proposée. La méthode est basée sur l'analyse de la distribution des angularités des aspérités sur les profils prélevés sur les surfaces d'une fracture à l'étude. L'adaptation de la méthode de Feckers-Rengers de caractérisation de la répartition statistique de l'angularité des faces latérales des différentes irrégularités en fonction de leur largeur a été utilisée comme procédure de base. Les distributions des angles extrêmes, en fonction de la longueur de base des aspérités, ont été calculées en utilisant le logiciel « CalculDilat », spécialement conçu pour cette méthode. Ce logiciel a permis de déterminer les courbes de dilatance en fonction du déplacement en cisaillement, sous contrainte normale nulle, pour une direction de cisaillement donnée.

Des essais expérimentaux de cisaillement, réalisés sur une réplique de la fracture à l'étude, avec mesure de la dilatance, ont été effectués afin de valider la méthode de calcul proposée. Les courbes de dilatance expérimentales et calculées ont été réalisées dans quatre directions différentes et, pour chacune des directions, dans les deux sens de cisaillement (dextre et senestre). Les résultats obtenus montrent que les courbes de dilatance calculées et expérimentales coïncident presque parfaitement lorsque le cisaillement est effectué selon une pente générale positive ou pratiquement nulle. Par contre, lorsque le cisaillement est effectué selon une pente générale négative, la courbe de dilatance calculée se situe au dessus de la courbe de dilatance expérimentale. La cause de cette surestimation de la dilatance est probablement attribuable au fait que la méthode ne tient pas compte de la possibilité qu'il y ait contractance lors du déplacement en cisaillement de la fracture.

Les différentes courbes de dilatance expérimentales obtenues dans les différentes directions étudiées ont permis de définir l'anisotropie selon la direction de cisaillement. Les courbes de dilatance calculées ont démontré le même phénomène ce qui permet de conclure que la méthode de calcul proposée tient compte de l'anisotropie directionnelle. Les mêmes

observations ont également été faites en ce qui concerne l'anisotropie selon le sens du cisaillement.

Les courbes de dilatance ont été tracées selon différentes conditions d'analyse. Les résultats ont démontré que la méthode n'est pas sensible au nombre de profils utilisés pour faire les calculs mais plutôt à quels profils sont utilisés. Ce sont les grandes structures qui contrôlent le comportement de la dilatance et ce sont donc les profils passant sur ces grandes structures qui sont importants. L'intervalle d'échantillonnage utilisé sur les profils est de 0,5 mm mais l'analyse des courbes de dilatance a démontré qu'un intervalle d'échantillonnage de 2 ou 3 mm permet de tracer des courbes de dilatance tout aussi précises.

En ce qui concerne le cisaillement selon une pente générale négative, la surestimation des courbes de dilatance calculées, engendrée par le fait que la méthode de calcul ne tient pas compte de la possibilité qu'il y ait de la contractance lors du déplacement en cisaillement peut être solutionnée en diminuant la valeur de l'angle de pente négative des profils aux angles maximaux ; alors, la dilatance calculée concorde nettement mieux avec les valeurs de dilatance expérimentales.

L'influence d'une contrainte normale non nulle a été étudiée sur une base préliminaire. L'application d'une contrainte normale a pu être simulée par l'élimination des aspérités à faible longueur de base dans la détermination des angles extrêmes. Toutefois, le manque de données expérimentales à contrainte normale non nulle laisse un doute dans l'application de cette technique. Ainsi la relation entre la longueur de base maximale des aspérités à négliger et l'application de la contrainte normale n'a pu être déterminée avec certitude.

ABSTRACT

The mechanical and hydraulic behavior of fractured rock masses is largely influenced by dilatancy resulting from joint shear displacement. Civil and mining engineering works in jointed rock masses depend on their mechanical behavior and it is essential to anticipate dilatancy variations when they are submitted to different types of external forces.

A method is proposed to characterize dilatancy as a function of shear displacement, under null normal stress. This method is based on the analysis of the angularity distribution on profiles recorded on fracture surfaces. The adaptation of the Fecker-Rengers method of characterization to the angularity statistical repartition of the lateral facets of the different irregularities as a function of their base length is used as a basic procedure. The distribution of the extreme angles, according to the base length of asperities, was calculated using «CalculDilat» software, specially developed for this method. This software allows the evaluation of the dilatancy curves as a function of shear displacement, under null normal stress, for different shear directions.

Experimental shear tests, applied on a replica of the studied fracture, in which dilatancy was measured, were performed to validate the proposed evaluation method. The experimental and calculated dilatancy curves were computed for four different directions and, for each direction, the two shear displacement (senestral and dextral) were tested. The results show that the computed and experimental dilatancy curves coincide almost perfectly when shear displacement occurred on a generally positive slope or almost horizontal plane. Conversely, when shear displacement occurred along a generally negative slope, the computed dilatancy curve is overestimated with respect to the experimental dilatancy curve. The cause of this overestimation of dilatancy can be attributed to the fact that the method does not take into account the possibility of contractancy during the shear displacement on the fracture.

The various experimental dilatancy curves obtained in the different directions permit to define a directional anisotropy in dilatancy behavior. The computed dilatancy curves show the same behavior indicating that the proposed evaluation method takes into account directional anisotropy. The same observations were also observed regarding the shear sense anisotropy.

The dilatancy curves were plotted for different analysis conditions. The results show that the method is only slightly sensitive to the number of profiles used for the calculation, but more sensitive to particular profiles. Since the larger structures control the dilatancy behavior, the profiles passing through the peak of these large structures are important. The sampling intervals used on the profiles are 0.5 mm but the analysis of the dilatancy curves showed that a sampling interval of 2 or 3 mm allowed dilatancy curves to be plotted precisely.

Regarding the shear displacement along an overall negative slope, the overestimation of the computed dilatancy curves, generated by the computing method does not account for the possibility of contractancy during shear displacement. So this problem can be solved by reducing the value of the computed extreme angles by the negative slope angles of the profile, then the computed dilatancy curves corresponds better to the experimental ones.

The influence of a normal stress is studied on a preliminary basis. The application of a normal stress can be simulated by eliminating the asperities with a low base length when computing the extreme angles. However, the lack of experimental data on the influence of normal stress does not allow a complete demonstration of the application of this technique. Therefore, the threshold value of base length below which the asperities are neglected and the magnitude of the applied normal stress cannot be determined with certainty.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde gratitude envers mon directeur de mémoire, Dr Guy Archambault, pour son encadrement, ses conseils et sa disponibilité. J'adresse également des remerciements à ma codirectrice de mémoire, Dr Joëlle Riss de l'Université de Bordeaux 1, pour son aide lors de la programmation et de l'analyse morphologique des surfaces irrégulières ainsi que lors de la correction du mémoire.

Je suis très reconnaissante du soutien financier accordé par mon directeur de mémoire et celui procuré par les bourses de la FUQAC et de l'OFQJ. Sans cette aide financière, ce projet n'aurait pas été possible.

Je tiens à remercier le Dr Sylvie Gentier du BRGM d'Orléans, pour ses conseils et ses suggestions en ce qui concerne la réalisation des essais expérimentaux. De plus, je souhaite remercier le Dr Alain Rouleau pour son aide lors des corrections du mémoire.

Je voudrais remercier M. Marcel Lapointe, pour son dévouement et sa grande disponibilité pour la partie expérimentale de ma recherche. Grâce à lui, les essais en laboratoire se sont très bien déroulés.

Un gros merci à Rock Flamand, Éric Lamontagne et Stéphane Poirier pour m'avoir conseillée au niveau de la réalisation des essais expérimentaux ainsi que pour m'avoir fourni plusieurs informations dont j'avais besoin.

Je voudrais également remercier tout le personnel de l'Unité d'Enseignement en Sciences de la Terre pour le support moral et technique. J'accorde une très grande importance aux bons moments passés avec mes confrères et consœurs de travail qui ont permis d'agrémenter ce projet de recherche.

À mes parents ainsi qu'à mes sœurs, je tiens à vous souligner combien vos encouragements et votre présence sont importants pour moi. Finalement, je tiens à témoigner toute mon affection à Éric pour son soutien moral et son appui.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT	iii
REMERCIEMENTS.....	v
TABLES DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES.....	xi
1.0 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique	1
1.2 Revue des travaux antérieurs	3
1.3 Objectifs et méthodologie de l'étude.....	15
2.0 MÉTHODE STATISTIQUE ANALOGIQUE DE CARACTÉRISATION DES ANGULARITÉS 2D DES ASPÉRITÉS À BASE CROISSANTE ET DE LA DILATANCE.....	18
2.1 La méthode Fecker-Rengers	18
2.2 Le concept analogique proposé par Barton (1971)	25
2.3 La méthode de calcul proposée : le logiciel.....	28
2.3.1 Logiciel de la méthode de calcul analogique à partir de profils.....	29
2.3.2 Le choix des paramètres (fracture, éponte, direction).....	29
2.3.3 Distributions des angularités 2D résultantes	34
2.3.4 Courbes de dilatance calculées à partir des valeurs extrêmes des distributions angulaires.....	40

3.0 EVALUATION DES COURBES DE DILATANCE À L'AIDE DE LA MÉTHODE STATISTIQUE ANALOGIQUE APPLIQUÉE À UN JOINT	43
3.1 La morphologie des surfaces du joint et sa caractérisation par prélèvement de profils.....	43
3.1.1 Caractéristiques de la fracture	43
3.1.2 Prélèvements des profils et traitement	44
Directions d'enregistrement des profils	44
Sens d'enregistrement des profils	47
Nombre de profils dans chaque direction.....	54
Localisation des profils	54
Traitement des profils	57
3.2 Conditions d'analyse des distributions angulaires et des courbes de dilatance résultantes	58
3.2.1 Dépendance selon l'orientation et le sens du cisaillement.....	58
Dépendance selon l'orientation du cisaillement.....	58
a) Distributions angulaires	58
b) Courbes de dilatance	65
Dépendance selon le sens du cisaillement.....	70
a) Distributions angulaires	70
b) Courbes de dilatance	72
3.2.2 Sensibilité sur le nombre de profils	74
3.2.3 Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage	83
3.2.4 Dimension de la fracture	87

3.2.5 Sensibilité sur la localisation du point de départ sur les profils	91
4.0 VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DES COURBES DE DILATANCE D'UNE FRACTURE EN CISAILLEMENT SOUS CONTRAINTE NORMALE NULLE.....	92
4.1 Caractéristiques des éprouvettes utilisées.....	92
4.2 Montage expérimental d'essai de cisaillement d'une fracture sous contrainte normale nulle.....	93
4.2.1 Montage pour essais de cisaillement sur une fracture	94
4.2.2 Système de mesure des déplacements.....	96
4.2.3 Acquisition des données.....	99
4.2.4 Protocole expérimental	102
4.3 Les courbes de dilatance expérimentales en fonction du sens et de l'orientation du cisaillement sur la fracture	104
5.0 ANALYSE DES COURBES DE DILATANCE CALCULÉES ET EXPÉRIMENTALES.....	107
5.1 Analyse comparative des courbes de dilatance calculées et expérimentales.....	107
5.2 Analyse de la dépendance directionnelle sur les courbes de dilatance expérimentales.....	114
5.3 Analyse de la dépendance selon le sens du cisaillement sur les courbes de dilatance expérimentales.....	115
5.4 Ajustement des courbes de dilatance calculées aux courbes expérimentales	116
5.5 Limites du logiciel et de la méthode de calcul.....	122
6.0 MODE D'INTÉGRATION ANALOGIQUE DE LA CONTRAINTE NORMALE À LA MÉTHODE DE CALCUL PROPOSÉE	126
6.1 Effets simulés analogiquement de la contrainte normale σ_n	126
6.2 Modifications du programme afin de tenir compte de l'application d'une contrainte normale non nulle lors du calcul des courbes de dilatance.....	127

6.2.1 Effets de la contrainte normale sur les distributions des angles extrêmes	128
6.2.2 Effets de la contrainte normale sur les courbes de dilatance	130
6.2.3 Ajustement des courbes de dilatance calculées sur des courbes de dilatance expérimentales à contrainte normale non nulle	133
7.0 CONCLUSIONS.....	142
RÉFÉRENCES	151
ANNEXE 1.....	156
ANNEXE 2.....	164

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Illustration du biais causé par l'évaluation des angles des aspérités sur des profils	6
Figure 1.2. Définition des termes "portée" et "palier" sur le graphique d'un variogramme.....	10
Figure 1.3. Exemple d'un variogramme présentant une dérive	10
Figure 1.4. Les 10 profils standards pour l'estimation du JRC.....	13
Figure 2.1. Méthode 3D pour l'enregistrement des discontinuités.....	19
Figure 2.2. Relation entre la géométrie des surfaces et la dilatance lors de déplacements en cisaillements	21
Figure 2.3. Courbes de dilatance obtenues à partir des distributions d'angles extrêmes.....	23
Figure 2.4. Enregistrement d'un profil à partir d'une surface irrégulière	30
Figure 2.5. Organigramme du programme CalculDilat	31
Figure 2.6a Calcul du premier angle $\alpha(n)_1$ sur le premier profil pour une longueur de base $n \cdot \Delta x$, où $n = 1$	36
Figure 2.6b Calcul de tous les angles $\alpha(n)_i$ sur le premier profil pour une longueur de base $n \cdot \Delta x$, où $n = 1$	37
Figure 2.6c Calcul de tous les angles $\alpha(n)_i$ sur le premier profil pour une longueur de base $n \cdot \Delta x$, où $n = 2$	38
Figure 3.1 Les deux surfaces inférieure et supérieure de la fracture à l'étude	45
Figure 3.2 Directions et sens d'enregistrement des profils sur la surface inférieure.....	46
Figure 3.3a Profils enregistrés dans la direction 0	48
Figure 3.3b Profils enregistrés dans la direction 1	49
Figure 3.3c Profils enregistrés dans la direction 4	50

Figure 3.3d Profils enregistrés dans la direction 5	51
Figure 3.4 Sens de calcul des angles maximaux et des angles minimaux.....	53
Figure 3.5 Localisation des profils enregistrés au rugosimètre sur l'éponte inférieure.....	56
Figure 3.6 Distributions angulaires obtenues pour les quatre directions à l'étude.....	60
Figure 3.7a Comparaison entre les quatre distributions angulaires de l'éponte inférieure.....	61
Figure 3.7b Comparaison entre les quatre distributions angulaires de l'éponte supérieure	61
Figure 3.8 Distributions angulaires et courbes de dilatance pour les quatre directions à l'étude	66
Figure 3.9a Comparaison entre les courbes de dilatance calculées à partir de l'éponte inférieure	67
Figure 3.9b Comparaison entre les courbes de dilatance calculées à partir de l'éponte supérieure	67
Figure 3.10 Comparaison entre les angles maximaux et les angles minimaux (en valeurs absolues) pour les quatre directions.....	71
Figure 3.11 Comparaison entre les courbes de dilatance obtenues dans le sens positif et négatif de la pente générale pour une même direction de cisaillement	73
Figure 3.12 Sensibilité sur le nombre de profils, les calculs ont été faits avec les huit profils de base sans tenir compte des profils supplémentaires	78
Figure 3.13 Sensibilité sur le nombre de profils, les calculs ont été faits en diminuant le nombre de profils centraux.....	79
Figure 3.14 Sensibilité sur le nombre de profils, les calculs ont été faits en n'utilisant qu'un profil sur deux.....	80
Figure 3.15 Sensibilité sur le nombre de profils, les calculs ont été faits en n'utilisant qu'un profil sur trois.	81
Figure 3.16 Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage sur l'éponte inférieure dans la direction 0. Les courbes de dilatance sont calculées avec un intervalle d'échantillonnage de 0,5, 1, 2, 3, 4 et 5 mm	85

Figure 3.17 Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage sur l'éponte supérieure dans la direction 5. Les courbes de dilatance sont calculées avec un intervalle d'échantillonnage de 0,5, 1, 2, 3, 4 et 5 mm	86
Figure 3.18 Comparaison entre les distributions angulaires obtenues pour les fractures de 90 et 120 mm de diamètre	89
Figure 3.19 Comparaison entre les courbes de dilatance obtenues pour les fractures de 90 et de 120 mm de diamètre	90
Figure 4.1. Banc de cisaillement conçu pour les essais expérimentaux.....	95
Figure 4.2. Déplacement de l'éponte inférieure et de l'éponte supérieure lors des essais de cisaillement.....	97
Figure 4.3. Courbes de dilatance calculées et expérimentales pour les quatre directions à l'étude	105
Figure 5.1. Cisaillement d'une fracture présentant une pente générale non nulle	110
Figure 5.2. Ajustement des courbes de dilatance calculées et expérimentales, direction 0	118
Figure 5.3. Ajustement des courbes de dilatance calculées et expérimentales, direction 4	119
Figure 5.4. Ajustement des courbes de dilatance calculées et expérimentales, direction 5	120
Figure 6.1. Effets de la contrainte normale sur les distributions angulaires.....	129
Figure 6.2. Effets de la contrainte normale sur les courbes de dilatance	131
Figure 6.3. Ajustement des courbes de dilatance calculées à contrainte normale nulle aux courbes de dilatance expérimentales sous contrainte normale non nulle.....	134
Figure 6.4. Graphique de la longueur de base des aspérités négligées en fonction de la contrainte normale appliquée	138

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. Problématique

La plupart des travaux civils, miniers ou de stockage souterrain impliquent le comportement mécanique des massifs rocheux fracturés (ouvertures souterraines, talus rocheux, boulonnage). Même les études sur l'enfouissement des déchets radioactifs (Canada, France, Etats-Unis) se sont orientées vers les boucliers précambriens caractérisés par une fracturation plus ou moins intense. Pour bien concevoir ces différents types d'ouvrage, il est primordial de comprendre et d'anticiper le comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés lorsqu'ils sont sollicités par différents types de forces externes.

L'analyse du comportement d'un massif rocheux fracturé, soumis à certaines contraintes, doit tenir compte à la fois, des lois de la mécanique régissant le comportement des fractures en cisaillement et en frottement et de la morphologie des surfaces de ces fractures qui contrôlent la dilatance lors du déplacement en cisaillement relatif entre les surfaces de la fracture. Malgré les nombreux travaux dans ce domaine, le lien entre le

comportement mécanique des fractures en cisaillement et la morphologie des surfaces des fractures n'est pas encore très bien établi. Il est très important, pour prédire le comportement mécanique des massifs rocheux fracturés, d'intégrer les paramètres caractéristiques de la morphologie des épontes des fractures dans un modèle contrainte-dilatance en cisaillement des discontinuités géologiques (fractures, joints, failles). La morphologie des surfaces des discontinuités contrôle le phénomène de dilatance, responsable de la variation de volume affectant la résistance au cisaillement sur celles-ci.

L'étude présentée dans ce mémoire s'est concentrée sur l'analyse du phénomène de la dilatance produite, sous contrainte normale nulle, lors de déplacements en cisaillement sur les surfaces irrégulières d'une fracture. La dilatance est la variation de volume, entre les épontes d'une fracture en cisaillement, provoquée par le chevauchement des aspérités et ondulations qui se traduit par un déplacement normal au plan moyen de la discontinuité (fracture, joint ou faille) au cours de son cisaillement. Pour le définir on utilise le gradient (ou taux) de dilatance (v) donné par le rapport entre l'incrément de déplacement normal (dv ou Δh_n) par rapport à l'incrément de déplacement tangentiel ou en cisaillement (du ou Δx) tel que $v = dv/du = \Delta h_n/\Delta x$. La variation de dilatance est directement influencée par l'angularité des aspérités et ondulations sur les surfaces en cisaillement et inversement proportionnelle à la grandeur de la contrainte normale appliquée sur la surface de la fracture. Si une relation peut être établie entre la dilatance sous contrainte normale nulle et un (ou des) paramètre(s) caractérisant la morphologie des

surfaces alors cette relation pourra permettre d'intégrer la morphologie des surfaces dans les modèles contrainte-dilatance en cisaillement des fractures.

1.2. Revue des travaux antérieurs

Deux problématiques concernent la description de la morphologie des surfaces irrégulières des discontinuités géologiques : la première est de fournir des informations et des paramètres caractérisant les textures de ces surfaces irrégulières pour des utilisations de classification texturale ou d'autres finalités similaires, tandis que la seconde est de définir des paramètres, en relation avec les précédents, utilisables pour caractériser la dilatance dans les modèles contrainte-dilatance en cisaillement des discontinuités qui constitue le principal objectif de cette étude.

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses méthodes d'analyse ont été élaborées afin de définir des paramètres morphologiques ayant pour objet de caractériser la géométrie, la taille et la répartition des irrégularités constituant les surfaces des fractures rocheuses. Par contre, la plupart de ces paramètres morphologiques répondent bien à la première problématique mais peu d'entre eux sont utilisables directement pour répondre à la problématique de la caractérisation de la dilatance lors du cisaillement sur ces fractures.

Parmi les principaux paramètres utilisés dans l'analyse morphologique des épontes rocheuses, les paramètres statistiques sont les plus nombreux et les plus variés. Ces paramètres sont divisés en deux catégories, soient: ceux qui décrivent les élévations sur les surfaces irrégulières, ce sont les paramètres d'amplitude et ceux qui caractérisent les pentes des facettes que présentent les différentes aspérités, ce sont les paramètres d'angularité. Le CLA et le RMS (AMSA 1955) font partie de la première catégorie. Le CLA correspond à la moyenne des hauteurs absolues tandis que le RMS calcule la déviation moyenne des hauteurs par rapport à un plan de référence.

Le Z_2 , le Z_3 et le Z_4 sont des paramètres qui se situent plutôt dans la deuxième catégorie. Le Z_2 sert à caractériser la pente moyenne des aspérités. Le Z_3 décrit le degré de courbure ou l'arrondissement des aspérités et le Z_4 mesure la différence de longueur entre les segments à pentes positives et ceux à pentes négatives. Ces trois paramètres découlent du RMS et ont été définis par Myers (1962).

Ces indices statistiques procurent des informations sur les élévations et les orientations des facettes mais ne les localisent pas sur les surfaces de la fracture. De plus, ces indices, pour être calculés, doivent répondre à certains critères : pas d'échantillonnage constant et assez petit pour tenir compte des petites structures, la moyenne des hauteurs est nulle, l'échantillonnage doit être suffisamment grand pour représenter la surface entière

(Reeves 1985). Il est fréquent que ces paramètres ne puissent être utilisés car l'échantillonnage ne répond pas à ces conditions.

Les paramètres statistiques peuvent être calculés en utilisant des données d'élévation prélevées directement sur les épontes. Ces données sont généralement prises le long de profils où des enregistrements de la topographie sont effectués à pas constants. Ces informations sont bidimensionnelles. Aussi, lorsque les pentes des facettes sont calculées à partir de ces données, les angles mesurés ne sont que des angles apparents et non les angles vrais caractérisant les aspérités des surfaces irrégulières des fractures. La figure 1.1 montre le biais causé par l'évaluation des angles des aspérités sur des profils par rapport à la surface.

Afin d'éliminer ce biais, Scriven et Williams (1965) ont mis au point une méthode de reconstitution d'angles 3D à partir des angles apparents calculés avec des données 2D. Cette méthode a été reprise par Riss et Gentier (Riss et Gentier 1989, Gentier et Riss 1990) qui à l'aide d'une loi théorique, basée sur une généralisation des lois de distributions sphériques classiques, ont obtenu la distribution des angularités 3D. Donc, en utilisant cette modélisation 3D, il est possible d'obtenir une distribution angulaire des aspérités en trois dimensions à partir d'une distribution angulaire évaluée sur des profils en deux dimensions mais cette distribution est plus complexe et ne donne aucune information sur la morphologie des structures et leur localisation sur les surfaces de la fracture.

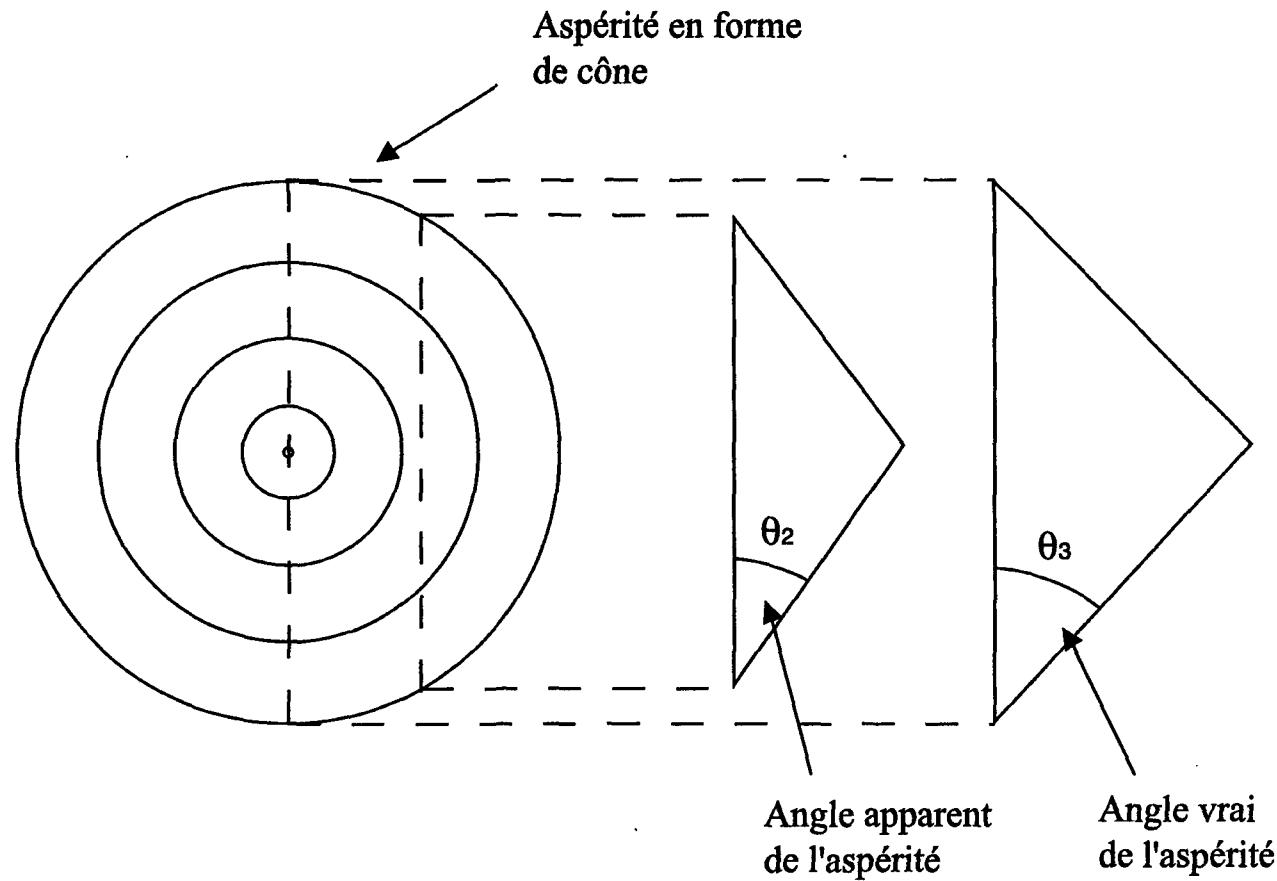


Figure 1.1 Illustration du biais causé par l'évaluation des angles des aspérités sur des profils (Figure tirée de Archambault et al. 1996).

Une autre approche possible pour caractériser la morphologie des surfaces irrégulières est de considérer les différentes hauteurs des aspérités sur un profil comme étant distribuées de façon aléatoire. Ceci implique que la rugosité est indépendante de sa position sur le profil et de l'orientation du profil. Donc la rugosité mesurée sur une petite région serait représentative de la surface entière.

La fonction d'autocorrelation ACF, documentée par Bendat et Piersol (1971), et par Tien et Elfatih (1978), découle de la fonction d'autocovariance ACVF. L'ACF est simplement l'ACVF normalisée par la variance du profil à l'étude. L'ACF décrit la dépendance générale de l'amplitude, à une certaine localisation, sur l'amplitude à une autre localisation, séparées par une distance d'éloignement. L'application principale de ce paramètre est de détecter l'existence d'une fonction périodique (par exemple une fonction sinusoïdale) qui serait méconnaissable en raison de l'apparence aléatoire du profil (Dight et Chiu 1981). Dans le cas où les données sont parfaitement aléatoires, la fonction tendra vers zéro pour une augmentation progressive de la distance d'éloignement (Krahn et Morgenstern 1979).

Un problème se pose avec ce paramètre lorsque le calcul est effectué non pas sur un profil mais sur une surface. L'ACF découle de l'ACVF et de la variance du profil, laquelle dépend du plan moyen. Les profils diffèrent les uns des autres et la variance calculée, pour

chacun des profils, n'est donc pas la même ce qui crée des singularités dans la fonction (Thomas 1982).

Pour remédier à ce problème, Sayles et Thomas (1977) ont élaboré un autre paramètre : la fonction de structure SF. Le paramètre SF est utilisé pour quantifier, sur les surfaces, les différentes textures. Il présente un avantage par rapport à l'ACF car il est indépendant du plan moyen (Sayles et Thomas 1977, Thomas 1982) et peut être calculé sur une petite portion du profil sans perdre sa signification statistique.

La géostatistique est une méthode de caractérisation basée sur l'analyse d'une variable régionalisée représentée par une fonction $z(x)$ définie sur tout le domaine d'étude. Le terme variable régionalisée a été choisi par Matheron (1970) pour caractériser une variable présentant un aspect à la fois aléatoire et à la fois structuré. En ce qui concerne la morphologie des surfaces de joints rugueux, la fonction $z(x)$, de la variable régionalisée en question, correspond à la topographie (élévations) sur les profils. Avec la méthode géostatistique, il est possible de quantifier les différentes structures que possèdent les surfaces irrégulières en se basant sur la distribution des hauteurs le long des profils.

L'instrument employé par la géostatistique est le variogramme. C'est en fait une fonction $\gamma(h)$ qui décrit la manière plus ou moins rapide dont se dissipe l'influence d'une élévation donnée en fonction de la distance des autres points du domaine. Lorsque les

valeurs du variogramme sont mises sur graphique, on peut en faire ressortir certaines caractéristiques (figure 1.2). Généralement, le graphe du variogramme passe par l'origine (les écarts sont nuls pour une distance $h = 0$) et croit de façon plus ou moins rapide. Cela indique, d'une manière statistique, le taux auquel diminue l'influence d'une élévation sur d'autres élévations situées de plus en plus loin. Le variogramme peut tendre à se stabiliser autour d'une zone appelée le "palier" qui représente la variance globale des élévations. La distance à laquelle ce palier est atteint se nomme la "portée", elle représente la distance de corrélation des valeurs. Au-delà de la portée, les corrélations sont nulles. Dans certains cas, il peut y avoir plusieurs paliers (et ainsi plusieurs portées) reflétant chacun la présence d'une structure à différentes distances ou structures gigognes.

Il est possible que, sur un profil, l'effet de grandes structures masque l'existence de structures de plus petites tailles. Dans ces circonstances, le variogramme sera caractérisé par la présence d'une dérive (figure 1.3). Pour remédier à ce phénomène, Chilès (1977) a développé le variogramme généralisé. La forme du variogramme généralisé est identique à celle du variogramme ordinaire (même comportement à l'origine, portées, paliers) mais avec un coefficient multiplicatif plus faible.

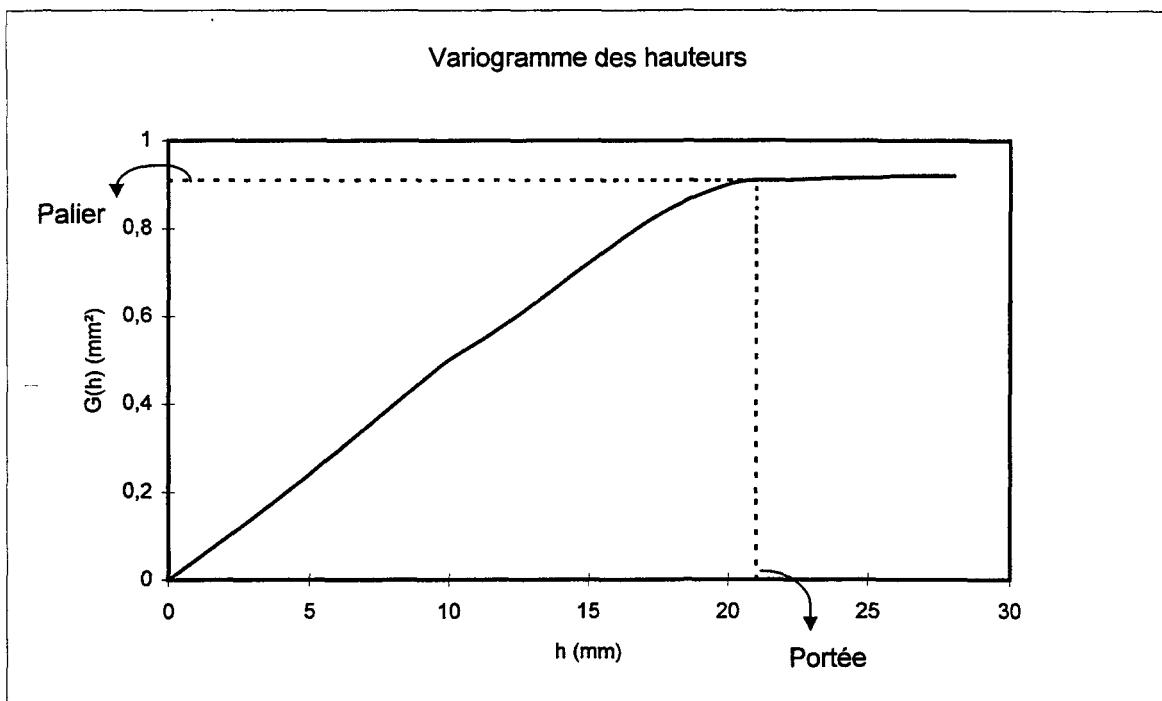


Figure 1.2. Définition des termes portée et palier sur le graphique d'un variogramme.

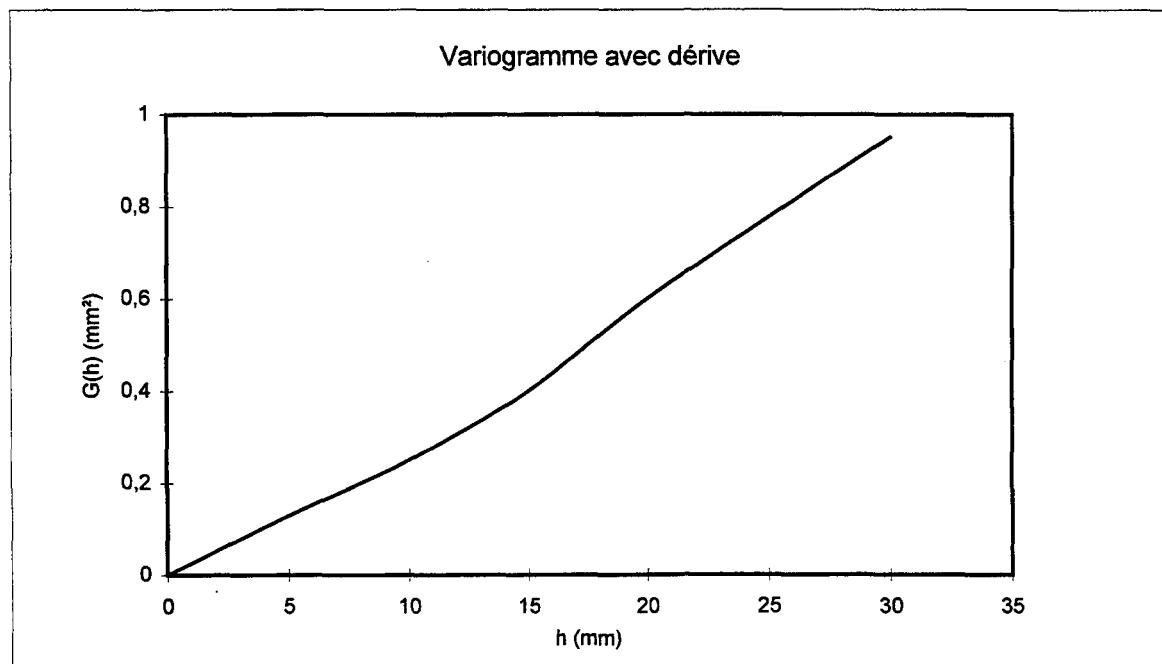


Figure 1.3. Exemple d'un variogramme présentant une dérive.

Le variogramme des dérivées permet de modéliser les caractéristiques géométriques des facettes des aspérités. Le principe est le même qu'un variogramme d'ordre zéro (variogramme des hauteurs). Par contre, dans ce cas-ci, la variable régionalisée n'est plus l'élévation sur les profils mais la pente entre deux élévations séparées par une distance h .

Les analyses de fractures irrégulières par la géostatistique montrent que certaines caractéristiques de la rugosité peuvent être identifiées en utilisant le variogramme (Roko et al. 1997). Plus la pente du variogramme est faible, plus la surface est lisse. Pour une pente donnée, plus le palier est élevé, plus la portée est grande et plus la variabilité spatiale est importante. Pourtant, même si la caractérisation des surfaces de fractures après cisaillement a été effectuée en utilisant les variogrammes (Roko et al. 1997), il est encore impossible de relier les paramètres du variogramme à la dilatance des fractures en cisaillement.

La dimension fractale (introduite par Mandelbrot 1977) peut fournir une mesure de la rugosité pour les profils qui sont considérés comme des objets fractals (sensiblement les mêmes à toutes les échelles d'observation) (Lee et al. 1990, Brown 1987, Turk et al. 1987).

L'analyse fractale ne peut être utilisée que dans le cas où les profils sont considérés comme des objets fractals. La dimension fractale, dans ces conditions, ne peut être calculée que sur certains profils fractals, s'il en existe. La dimension fractale ne donne comme

résultat qu'une valeur numérique et est insuffisante car elle procure très peu d'informations sur la rugosité des surfaces (Yang et Lo 1997).

Le JRC est le coefficient de rugosité d'un joint (*joint roughness coefficient*). Ce paramètre peut être estimé en comparant visuellement la rugosité d'un profil avec 10 profils standards (Barton and Choubey 1977). Une valeur du JRC sur une échelle entre 0 et 20 sera ainsi obtenue pour la surface rocheuse. Un profil lisse se verra accorder un JRC de zéro et plus le profil sera rugueux plus le JRC tendra vers la valeur 20 (figure 1.4).

L'estimation par comparaison visuelle du JRC introduit une subjectivité qui conduit à des estimations très différentes d'un observateur à l'autre. Pour remédier à ce problème, Tse et Cruden (1979) démontrent qu'il existe une certaine corrélation entre la valeur du JRC et les paramètres statistiques calculés à partir de la caractérisation numérique des profils. Ainsi, la valeur du JRC peut être estimée à partir de différents paramètres. Entre autres :

$$JRC = 32,2 + 32,47 \log Z_2 \quad (1.1)$$

$$JRC = 37,28 + 16,58 \log SF \quad (1.2)$$

Il est important de noter que ces relations sont valables pour des surfaces rugueuses sous contrainte normale faible (Tse et Cruden 1979). D'autres paramètres de rugosité, entre

Les dix profils standards

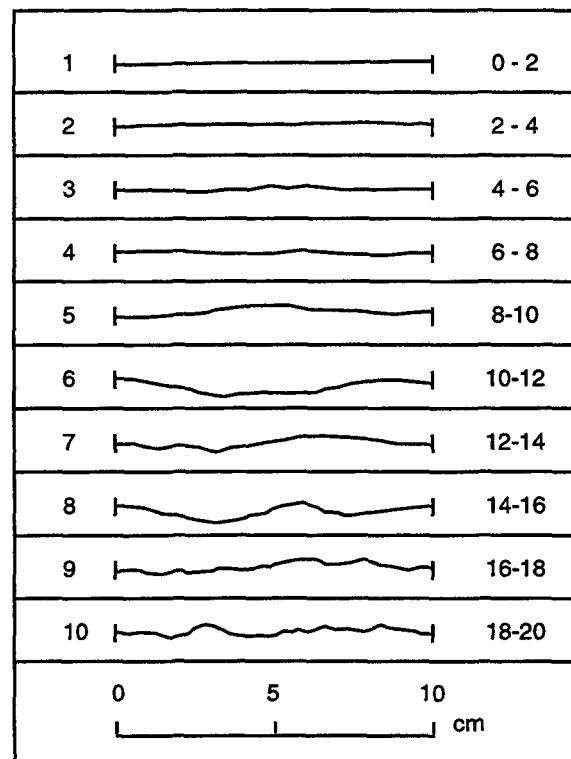


Figure 1.4 Le JRC de Barton est obtenu en comparant la rugosité du profil avec 10 profils standards. Pour un profil très rugueux la valeur du JRC est de 20 et pour un profil lisse le JRC est de 0.
(Tirée de Tse et Cruden, 1979)

autres les fractales (Venkatachalam 1985, Lee et al 1990), ont aussi fait l'objet de recherche, toujours dans le but d'établir une corrélation avec le JRC. Étant donné que c'est un paramètre simple servant à décrire les caractéristiques géométriques et mécaniques des surfaces rugueuses, le JRC est fréquemment utilisé pour prédire le comportement en cisaillement de joints à surfaces irrégulières.

En plus d'être un paramètre très subjectif, Bandis et al. (1981) ont décrit le JRC comme pouvant être fortement dépendant de l'échelle d'observation. De plus, ce coefficient n'est pas efficace pour prédire ni le comportement mécanique ni la dilatance d'une fracture irrégulière en cisaillement puisque deux profils différents peuvent obtenir la même valeur de JRC mais pourtant, peuvent présenter des comportements mécaniques très différents.

La corrélation du JRC avec certains paramètres morphologiques (Z_2 , SF) enlève le côté subjectif du JRC. Toutefois, étant donné que le Z_2 et le SF sont sensibles à l'intervalle d'échantillonnage, les corrélations obtenues (équations (1.1) et (1.2)) peuvent donner des résultats qui seront peu fiables (Yu et Vayssade 1991).

Il est important de noter que les fractures rocheuses ont un comportement mécanique différent selon le sens du déplacement (dextre ou senestre) en plus de démontrer de la dépendance selon la direction de cisaillement (Huang et Doong 1990, Jing et al. 1992). Donc, pour bien prédire le comportement mécanique d'une fracture irrégulière, les

paramètres morphologiques doivent tenir compte de ces deux types de dépendance. Pourtant, presque tous ces paramètres, à l'exception de certains qui traitent de la répartition des angles, donneront le même résultat peu importe le sens utilisé pour analyser le profil. Aussi, ces paramètres ne pourront tenir compte du fait que le comportement mécanique sera différent selon le sens de déplacement d'une surface par rapport à l'autre.

Enfin, même si tous ces paramètres, ensemble, peuvent donner une représentation de la rugosité des fractures, il n'existe pas de paramètre qui, à lui seul, est suffisant pour bien définir la morphologie des surfaces des fractures irrégulières (Riss et al. 1995). De plus, puisque ces paramètres ont été créés dans le but de donner des informations sur la rugosité des surfaces, peu d'entre eux sont directement utilisables dans la modélisation du comportement mécanique des fractures irrégulières. Le problème est qu'il y a très peu de relations connues entre la morphologie des surfaces irrégulières et le comportement mécanique des fractures lorsqu'elles sont soumises au cisaillement (Stephansson et Jing 1995).

1.3. Objectifs et Méthodologie de l'étude

Le but visé par ce projet est de proposer une méthode pour relier la morphologie des surfaces au comportement mécanique en cisaillement des fractures. Plus précisément,

l'étude a été faite sur la caractérisation de la dilatance d'une fracture rugueuse en cisaillement sous contrainte normale nulle.

Rengers (1970) et Fecker et Rengers (1971) ont effectué des travaux concernant la distribution des angles sur des surfaces de fractures rugueuses. Leurs résultats les ont conduits à proposer une méthode pour déterminer la dilatance, sous contrainte normale nulle, lors de déplacements en cisaillement, à partir de la distribution angulaire préalablement obtenue. Barton (1971) propose l'utilisation de profils pour caractériser les singularités sur les surfaces irrégulières des fractures en élaborant une méthode d'analyse statistique analogique des angles des pentes des aspérités de différentes longueurs de base.

Un modèle similaire à celui de Fecker et Rengers (1971) et basé sur la méthode développée par Barton (1971) a été repris dans cette étude pour obtenir des distributions angulaires à base croissante par calculs sur les profils. Ces distributions d'angles sont utilisées pour déterminer les courbes de dilatance, sous contrainte normale nulle ($\sigma_n = 0$), en fonction du déplacement en cisaillement sur une fracture.

Quatre directions de cisaillement, chacune dans les deux sens (dextre et senestre), ont été évaluées à l'aide de cette méthode afin de vérifier si la dilatance démontre une dépendance en fonction de la direction et du sens du cisaillement ou si cela n'influence pas le comportement mécanique. Différentes conditions d'analyse des courbes de dilatance

calculées ont été étudiées : sensibilité sur le nombre de profils, influence de l'intervalle d'échantillonnage, sensibilité sur la taille de la fracture, influence du point de départ des calculs.

Les courbes de dilatance obtenues à partir de cette méthode ont été vérifiées expérimentalement. Des essais de cisaillement, sous contrainte normale nulle ($\sigma_n = 0$), ont été effectués en laboratoire, sur une réplique de la fracture à l'étude. Les mêmes quatre directions et sens de cisaillement ont été utilisés. La comparaison entre les courbes de dilatance expérimentales et les courbes de dilatance calculées permet de vérifier la validité de la méthode de calcul proposée.

L'influence de la contrainte normale ($\sigma_n \neq 0$) sur le comportement de la dilatance des fractures a été évaluée sur une base préliminaire par simulation du cisaillement des aspérités à faibles longueurs de base. Une fois cisaillés, ces angles ne contrôlent plus la dilatance lors du déplacement des surfaces de la fracture ce qui entraîne l'abaissement de la courbe de dilatance. Des résultats expérimentaux, obtenus sous contrainte normale non nulle (dans le cadre d'une autre étude), ont été utilisés afin de déterminer une relation entre la longueur de base maximale des aspérités à négliger et la valeur de la contrainte normale.

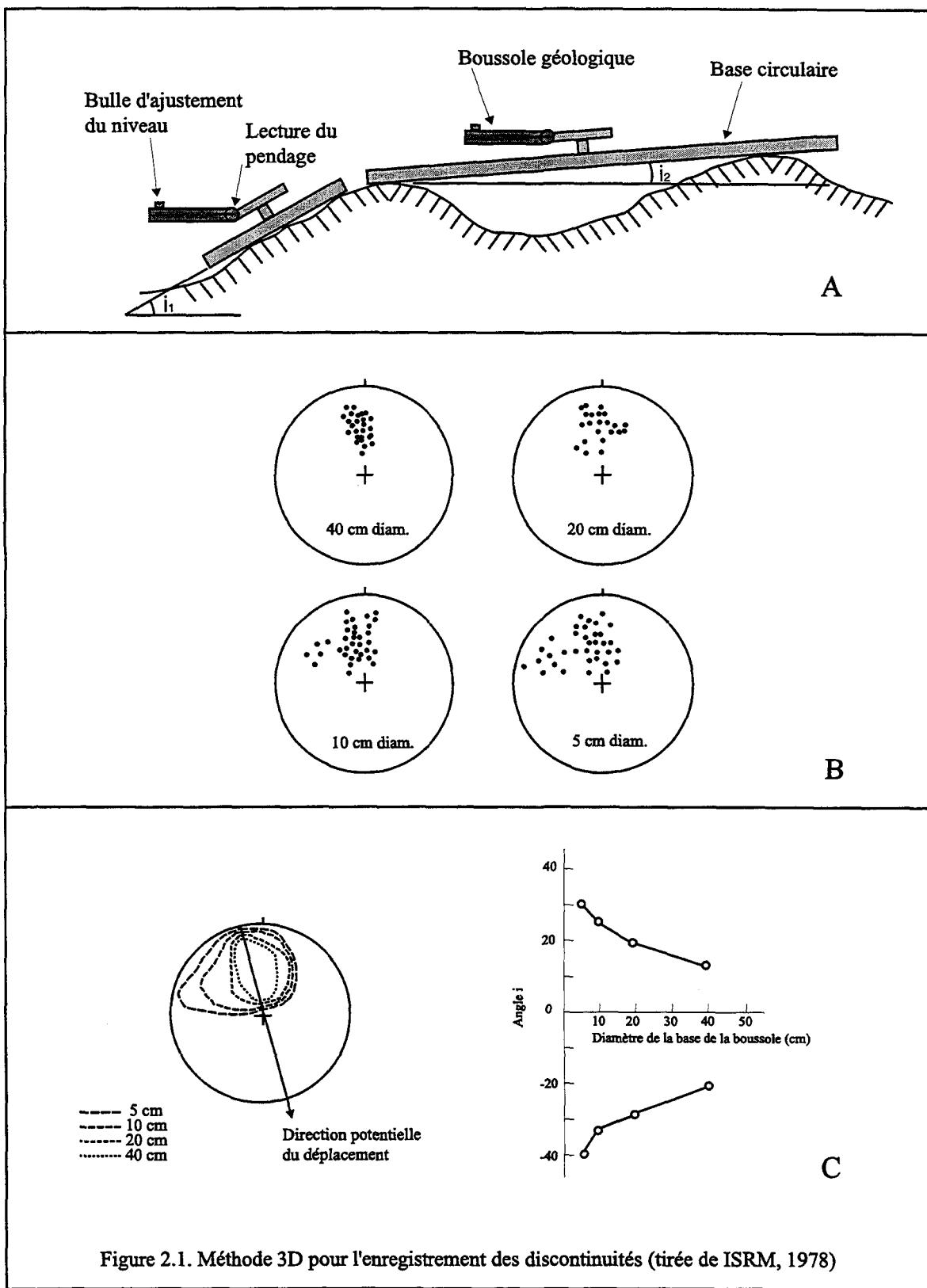
CHAPITRE 2

MÉTHODE STATISTIQUE ANALOGIQUE DE CARACTÉRISATION DES ANGULARITÉS 2D DES ASPÉRITÉS À BASE CROISSANTE ET DE LA DILATANCE

2.1. La méthode Fecker-Rengers

Au début des années 1970, les travaux sur la caractérisation des surfaces irrégulières des joints étaient principalement orientés sur la distribution des angularités, à différentes échelles sur les surfaces irrégulières des fractures (Rengers 1970). À la suite de ces travaux, Fecker et Rengers (1971) proposent l'utilisation d'une boussole géologique fixée à des bases circulaires de dimensions variables, pour mesurer les angles directement sur les surfaces de la fracture (figure 2.1a).

Pour appliquer cette technique, un nombre donné de mesures de directions et de pendages sur des aspérités doit être effectué à différents endroits sur la surface. L'opération est ensuite répétée aux mêmes points en faisant varier la dimension de la base de la boussole. Les mesures d'angle prises avec la base de plus petite taille donnent les angles les plus élevés tandis que les mesures effectuées avec les bases de dimensions plus grandes donnent des angles qui tendent de plus en plus vers zéro (figure 2.1a).



Lorsque les mesures des angles des aspérités sur la surface sont effectuées, toutes les valeurs de directions et de pendages, pour chaque longueur de base, sont reportées comme vecteurs ou pôles sur une projection stéréographique (figure 2.1b). Les lignes de contours représentant les angles maximaux sont tracées, pour chacune des longueurs de base, et sont reportées sur une même projection stéréographique (figure 2.1c). À partir de cette projection, il est possible de déterminer, pour chaque longueur de base de la boussole, un angle maximal (positif) et un angle minimal (négatif) pour une direction donnée. La figure 2.1c, illustre le type de distribution d'angles qui peut être obtenu en utilisant cette technique.

L'obtention de cette distribution angulaire 3D, sur les surfaces des fractures, a amené Fecker et Rengers (1971) à développer une méthode permettant de déterminer le taux de dilatance lors d'un déplacement en cisaillement de la fracture. Ce modèle est basé sur le fait que pour un certain déplacement en cisaillement $n \cdot L$ (figure 2.2), correspondant au diamètre de la base de la boussole, la valeur de la dilatance Δh_n peut être calculée avec la formule suivante :

$$\Delta h_n = n \cdot L \operatorname{tg} \alpha_n \quad (2.1)$$

où α_n est l'angle maximal entre le plan de référence « ref » et la sécante au profil pour une longueur de base $n \cdot L$ (figure 2.2).

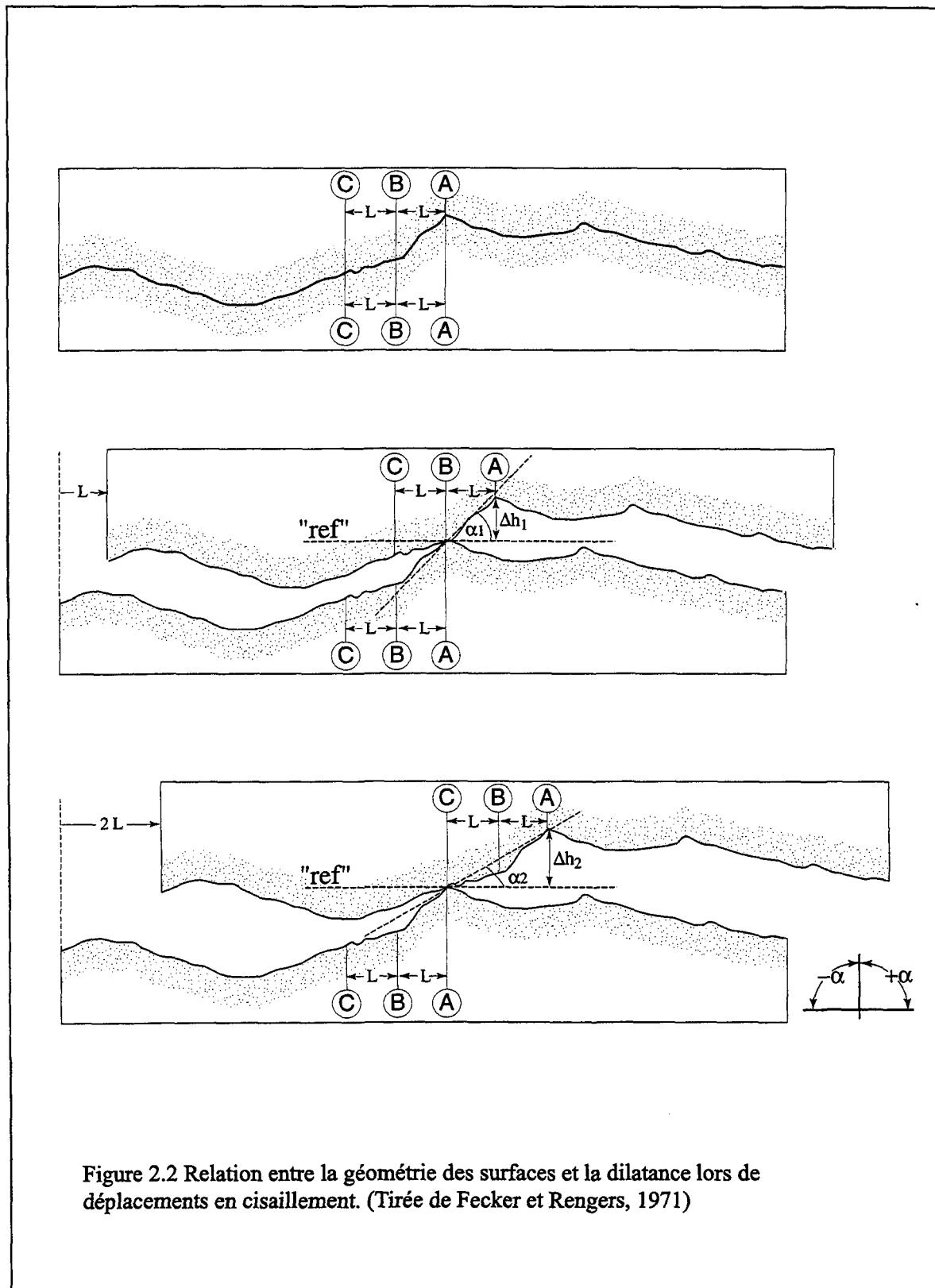


Figure 2.2 Relation entre la géométrie des surfaces et la dilatance lors de déplacements en cisaillement. (Tirée de Fecker et Rengers, 1971)

Ainsi, en utilisant une base de longueur $n \cdot L$ (correspondant à la valeur du déplacement en cisaillement) multipliée par la tangente de l'angle maximal α_n pour cette longueur de base, on obtient la valeur de la dilatance Δh_n . Lorsque la distribution des angles maximaux et minimaux, pour toutes les longueurs de base, sont déterminées (figure 2.3, traits pleins), il est possible de calculer et de tracer les courbes de dilatance correspondantes (figure 2.3, traits tiretés) en utilisant l'équation (2.1).

Sur la figure 2.3, les courbes qui se situent dans le quadrant négatif des ordonnées, correspondent à la situation où le déplacement en cisaillement est dans le sens inverse à celui utilisé pour les courbes dans le quadrant positif, i.e. que si les valeurs dans le quadrant positif indiquent le comportement de la dilatance en fonction d'un déplacement en cisaillement dextre alors, dans le quadrant négatif, les valeurs retrouvées dictent le comportement en dilatance en fonction d'un déplacement en cisaillement senestre, pour la même direction. Peu importe le sens de cisaillement (dextre ou senestre) ce sont toujours les angles extrêmes orientés dans ce sens de cisaillement qui contrôlent le comportement en dilatance de la fracture. Par exemple, dans une certaine direction, pour un cisaillement dextre, si ce sont les angles maximaux (positifs) qui dictent le comportement de la dilatance alors, dans le sens inverse (cisaillement senestre), ce sont les angles orientés en sens inverse, les angles minimaux (angles négatifs) qui contrôlent le comportement en dilatance. La courbe négative de dilatance représente alors la dilatance produite lors d'un déplacement en cisaillement inverse au sens de déplacement utilisé pour l'obtention de la courbe de dilatance du quadrant positif.

Distributions angulaires et courbes de dilatance

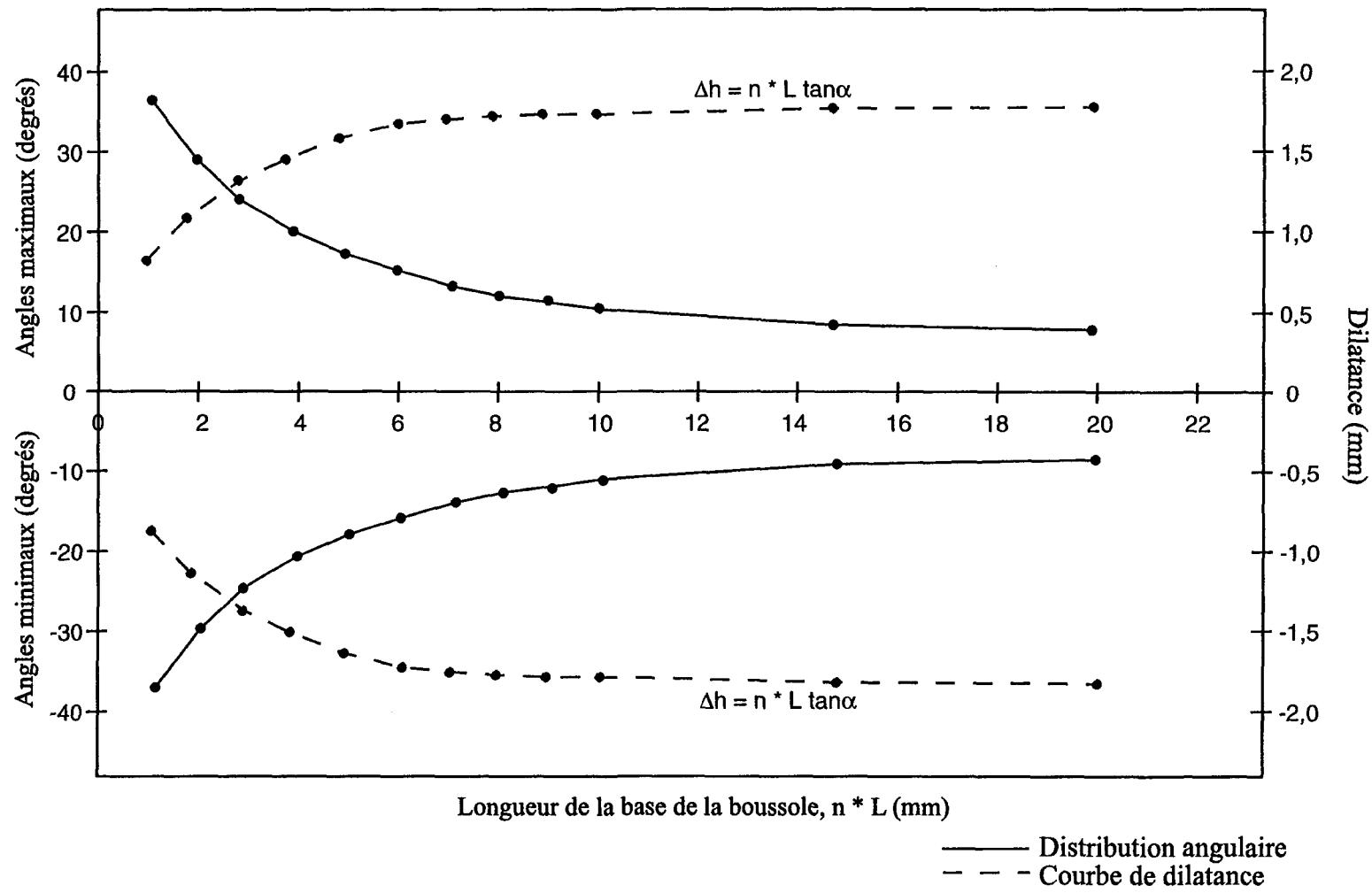


Figure 2.3 Courbes de dilatance obtenues à partir des distributions d'angles extrêmes (Fecker et Rengers, 1971)

Ainsi, en utilisant la distribution angulaire, préalablement obtenue avec la méthode de la boussole à base variable, et l'équation (2.1), il est possible de tracer les deux courbes de dilatance, illustrées à la figure 2.3, qui représentent la dilatance produite lors d'un déplacement en cisaillement dans le sens direct et dans le sens inverse de la mesure des angles sur les surfaces de la fracture.

La méthode que propose Fecker et Rengers (1971) pour obtenir la distribution des angles est une méthode 3D puisque les angles des facettes des aspérités sont mesurés directement sur les surfaces et non sur des profils. Les côtés des angles ont l'avantage de passer par le sommet des aspérités et donc d'être une représentation non biaisée des pendages des aspérités sur les surfaces de la fracture. Toutefois, même si cette méthode est non biaisée, les angles mesurés ne sont pas des angles vrais puisque la base de la boussole n'épouse pas la surface de l'aspérité (figure 2.1a).

Il est important de noter que cette méthode ne considère que le chevauchement des aspérités sur les surfaces lors du déplacement en cisaillement. Ceci implique que cette technique ne tient pas compte de la possibilité qu'il y ait cisaillement des aspérités lors du déplacement. Une telle situation représente le cas où la contrainte normale est nulle ou presque nulle.

L'allure générale des courbes de dilatance est similaire aux courbes de dilatance obtenues lors d'essais de cisaillement direct sur des joints irréguliers sous des contraintes

normales faibles, tandis que les courbes des distributions angulaires démontrent une allure schématique similaire au comportement de la dilatance en fonction de l'accroissement de la contrainte normale (σ_n) sur le joint si l'espacement ($n \cdot L$) de l'abscisse était remplacé par la contrainte normale (σ_n). Les mêmes observations ont été faites par Goodman (1976).

2.2. Le concept analogique proposé par Barton (1971)

Barton (1971) a effectué des essais de cisaillement sur des joints rocheux soumis à différentes contraintes normales. L'analyse des résultats expérimentaux a permis certaines observations :

- À contrainte normale faible, seulement les pointes des aspérités à angles très prononcés sont cisaillées. Ce qui indique que seules les aspérités possédant une base de faible dimension sont impliquées.
- À contrainte normale élevée, des aspérités à pente plus faibles, possédant des dimensions de base plus grandes, sont cisaillées.
- Plus la contrainte normale est élevée plus l'angle de dilatance diminue.

Ces observations ont permis à Barton (1971) de simuler la dilatance lors du cisaillement d'un joint rocheux en utilisant des valeurs d'angles de facettes correspondant à

différentes dimensions de bases des aspérités. Plus la dimension de base de ces aspérités est grande, plus l'angle de leurs facettes est faible, ceci correspondant à un cisaillement à contrainte normale élevée où les aspérités présentant des pentes plus faibles peuvent être cisaillées.

Barton (1971) disposait de l'enregistrement d'élévations sur des profils de joints. Les angles positifs (et négatifs) calculés entre deux élévations consécutives très rapprochées représentent des valeurs d'angles extrêmement élevées. Tandis que les angles positifs (et négatifs) mesurés entre deux coordonnées distantes de deux ou trois pas donnent des valeurs plus faibles.

Les calculs ont été effectués en utilisant les valeurs des élévations sur les profils. Toutes les inclinaisons formées par deux coordonnées successives ont été calculées. Ensuite, toutes les inclinaisons à pas croissant entre chaque énième (pour $n = 1$ à 10) coordonnées ont été calculées. En compilant sur graphique les inclinaisons obtenues en fonction de la distance entre les coordonnées, une distribution d'inclinaisons, semblable à celle de Fecker et Rengers (1971) a été tracée (figure 2.3, traits pleins).

La majorité des profils, utilisés pour les calculs des inclinaisons, sont composés de 65 valeurs ($N = 65$). Les inclinaisons (i) sont mesurées par la différence de hauteur entre deux élévations séparées par une distance qui varie entre 1 et 10 coordonnées. Le ratio n / N a été défini de la manière suivante :

$$n / N * 100\% = A. B. \% \quad (2.2)$$

Où A.B.% est la longueur de base de l'aspérité en %. L'écart type (S.D.) des inclinaisons (i), pour une longueur de base d'aspérité donnée, est le nombre pour lequel 67% des inclinaisons lui sont inférieures et 33% des inclinaisons lui sont supérieures. Par analogie au cisaillement, cela veut dire que 33% des inclinaisons sont plus élevées que le S. D. (i) et seront cisaillées tandis que 67% présentent des angles plus faibles et ne seront pas cisaillées.

Barton (1971) a tracé sur graphique la valeur de l'écart type S. D. (i) pour les différentes bases d'aspérités en % (A. B. %). Il a comparé la courbe obtenue avec celle de l'angle maximal de dilatance (d_n) pour différents rapports de contrainte normale/résistance en compression uniaxiale (σ_n/σ_c) obtenue expérimentalement. La comparaison montre que les deux courbes sont similaires. L'ordonnée A. B. % est exactement la moitié de l'ordonnée σ_n/σ_c , si cette dernière est convertie en pourcentage. L'échelle de l'abscisse d_n et celle de l'écart type S. D. (i) sont identiques. Barton en a conclu que les approximations suivantes pouvaient être faites :

$$\sigma_n/\sigma_c * 100 \% = 2 * A.B. \% \quad (2.3)$$

$$d_n = S. D. (i) \quad (2.4)$$

Les équations (2.3) et (2.4) montrent l'analogie statistique pour le comportement en cisaillement d'un joint, proposée par Barton (1971) : les écarts types des inclinaisons des aspérités de différentes longueurs de base sont analogues aux valeurs expérimentales d'angles maximaux de dilatance pour différentes contraintes normales.

2.3. La méthode de calcul proposée : le logiciel

La méthode de Fecker et Rengers (1971) a été reprise pour déterminer les courbes de dilatance d'une fracture irrégulière soumise au cisaillement à contrainte normale nulle. Toutefois, la technique que proposent Fecker et Rengers (1971) pour obtenir la distribution angulaire, à l'aide de la boussole à base variable, est laborieuse : il faut prendre de nombreuses mesures de directions et de pendages sur les surfaces de la fracture. Par la suite, il faut utiliser la projection stéréographique pour ramener toutes les données selon un plan de référence horizontal. Même si cette technique a l'avantage de donner des angles 3D et peut être appliquée sur de très grandes surfaces de discontinuités, elle demande toutefois beaucoup de temps de travail (ISRM 1978). Aussi, la distribution angulaire, des surfaces irrégulières, a été obtenue en adaptant la méthode utilisée par Barton (1971) sur un joint dont la morphologie des surfaces a déjà été bien caractérisée statistiquement et dont le comportement mécanique en cisaillement a fait l'objet de plusieurs études (Flamand et al. 1994, Archambault et al. 1995, 1996, 1997, Riss et al. 1995, 1996, 1997, Gentier et al. 1996).

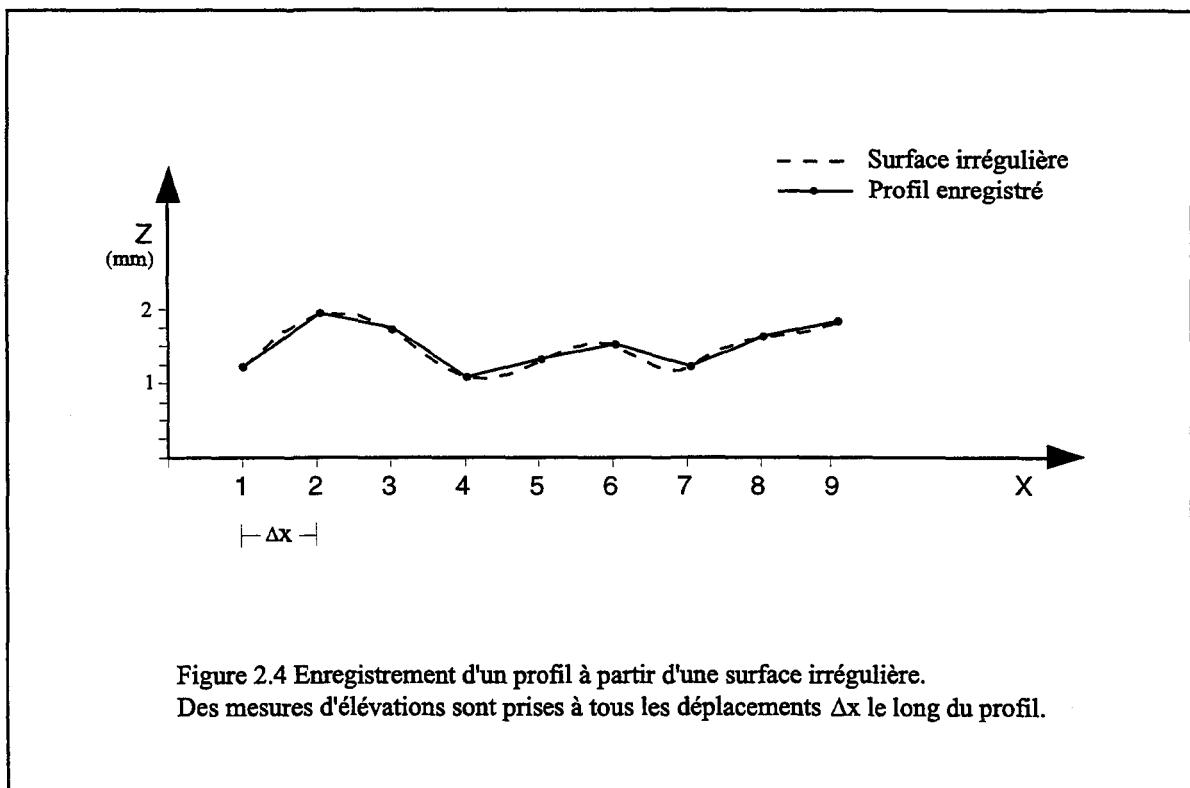
2.3.1. Logiciel de la méthode de calcul analogique à partir des profils

Les angles que forment les différentes aspérités sur les surfaces irrégulières ont été calculés à partir de profils qui ont été prélevés directement sur les surfaces d'une fracture par E. Lamontagne (Ph. D. en cours) et R. Flamand (Ph. D. en cours) (Flamand et al. 1994). L'information que procure l'enregistrement de ces profils est une valeur d'élévation Z de la surface à tous les déplacements Δx , constants, le long du profil. La figure 2.4 illustre l'enregistrement d'un profil provenant d'une fracture irrégulière. C'est à partir des valeurs d'élévation de la surface, obtenues par l'enregistrement de profils, que la distribution d'angles a été obtenue.

Pour ce faire, le programme « CalculDilat » a été développé en *Visual Basic* pour *Excel*. Les instructions du programme sont présentées à l'annexe 1. Les différentes étapes suivies lors de l'exécution du programme sont illustrées sur l'organigramme à la figure 2.5. Les instructions du programme se divisent en trois parties distinctes : le choix des paramètres, le calcul de la distribution angulaire et la détermination de la dilatance en relation avec le pas de déplacement en cisaillement choisi.

2.3.2. Le choix des paramètres (fracture, éponte, direction)

La première étape consiste à définir la fracture, la surface et la direction qui doit être étudiée. Ce choix est effectué par l'utilisateur au moyen d'une boîte de dialogue qui



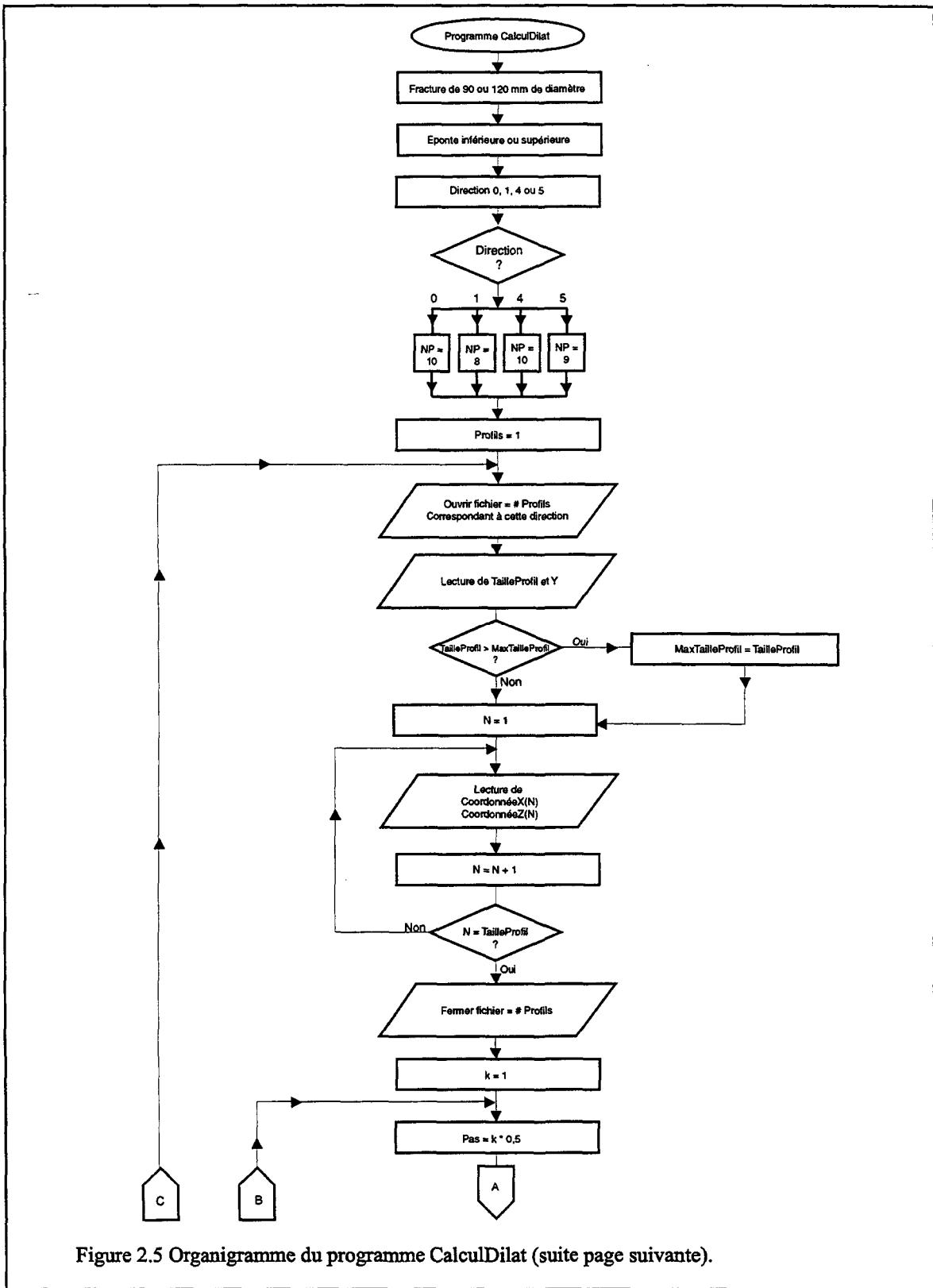


Figure 2.5 Organigramme du programme CalculDilat (suite page suivante).

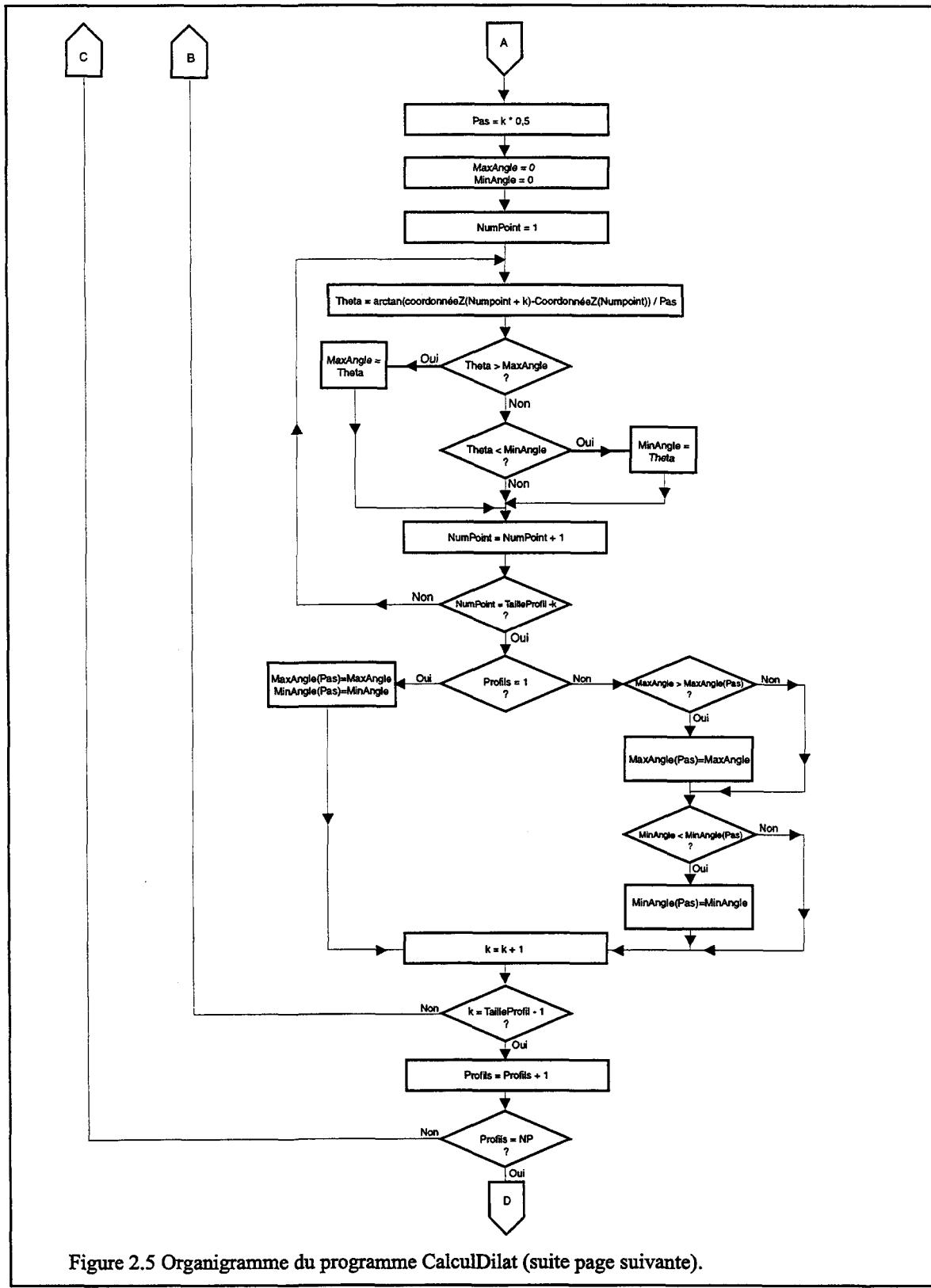


Figure 2.5 Organigramme du programme CalculDilat (suite page suivante).

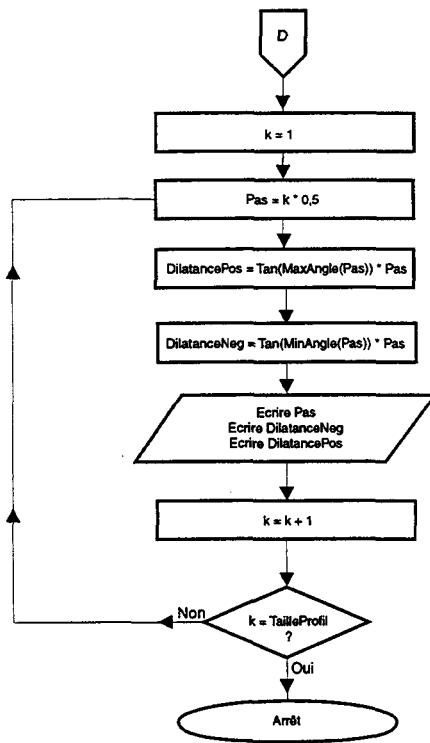


Figure 2.5 Organigramme du programme CalculDilat.

apparaît dès le début de l'exécution du programme. Il doit alors déterminer la fracture utilisée pour faire les calculs (exemple : la fracture de 90 ou de 120 mm de diamètre). Ensuite, si les profils ont été enregistrés sur les deux épontes, l'utilisateur doit indiquer laquelle de la surface inférieure ou de la surface supérieure de la fracture sera étudiée. Finalement, une direction de cisaillement doit être choisie. Dans le cas étudié, les profils ont été enregistrés dans quatre directions différentes et une de ces directions doit être choisie pour effectuer les calculs. Le nombre de profils varie en fonction de la direction à étudier. Aussi, les instructions du programme vont permettre de déterminer sur combien de profils les calculs seront exécutés en fonction de la direction choisie (organigramme figure 2.5).

Les fractures utilisées dans cette étude sont de forme circulaire mais le programme peut aussi utiliser toutes autres formes. De même, le programme peut facilement être modifié pour utiliser un nombre différent de directions d'étude ou de profils enregistrés.

2.3.3. Distribution des singularités 2D résultantes

La deuxième partie du programme, plus complexe et la plus importante, effectue le calcul de la distribution angulaire. Les données utilisées proviennent des profils correspondant aux choix faits lors de la première étape. La distribution angulaire est obtenue d'une façon similaire à celle de Fecker et Rengers (1971) et de Barton (1971) i. e. que les angles sont évalués pour des longueurs de base croissantes.

Les premières instructions du programme sont d'ouvrir le fichier qui correspond à l'enregistrement du premier profil, dans la direction désirée, sur la surface et la fracture choisies. Le fichier contient la valeur des élévations Z pour tous points X, échantillonnés à intervalle $\Delta X = 0,5$ mm, sur le profil situé à une distance Y du bord de la surface. Le programme lit ces données, les mémorise et referme le fichier. À partir de ces informations, la distribution des angles est calculée.

La différence de hauteur entre deux élévations, séparées par une distance $n \cdot \Delta x$, forme un angle positif ou négatif (la convention utilisée pour la mesure des angles est illustrée à la figure 2.6). Dans le cas étudié, la plus petite valeur de $n \cdot \Delta x$ utilisée est celle du pas d'échantillonnage $\Delta x = 0,5$ mm (où $n = 1$). Le programme est conçu pour calculer, dans un premier temps, l'angle $\alpha(n)_1$ (positif ou négatif) formé par la première élévation du profil et par l'élévation située à une distance $n \cdot \Delta x$, où $n = 1$, de la première élévation (figure 2.6a). Ensuite, l'angle $\alpha(n)_2$ (positif ou négatif), formé par la deuxième élévation du profil et par l'élévation située à une distance $n \cdot \Delta x$, où $n = 1$, de la deuxième élévation, est calculé (figure 2.6b). Si les deux angles $\alpha(n)_1$ et $\alpha(n)_2$ sont du même signe (positif ou négatif), ils sont comparés et seul l'angle maximal ou minimal est retenu. Tous les autres angles $\alpha(n)_3$, $\alpha(n)_4$, $\alpha(n)_i \dots$ (positifs et négatifs) (figure 2.6b) formés par deux élévations séparées par une longueur de base $n \cdot \Delta x$, où $n = 1$, sont ainsi calculés et comparés. Pour un profil où N élévations ont été enregistrées à tous les déplacement Δx le long du profil, $N - n$ angles sont mesurés. Lorsque tous les $N - n$ angles sont calculés et comparés, le programme n'a retenu

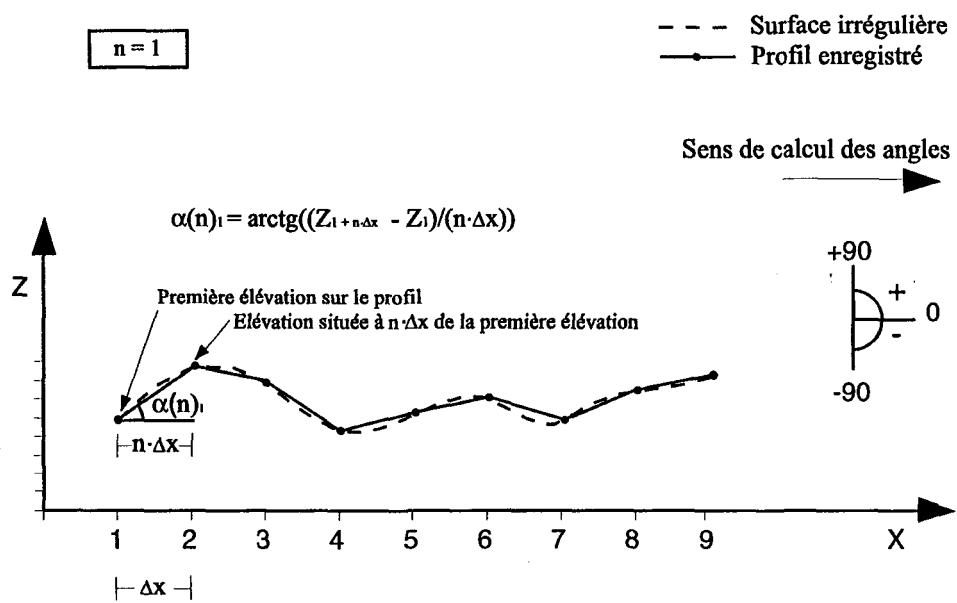


Figure 2.6a Calcul du premier angle $\alpha(n)_1$ sur le premier profil,
pour une longueur de base de $n\cdot\Delta x$, où $n = 1$

n = 1

— — — Surface irrégulière
— ● — Profil enregistré

Sens de calcul des angles

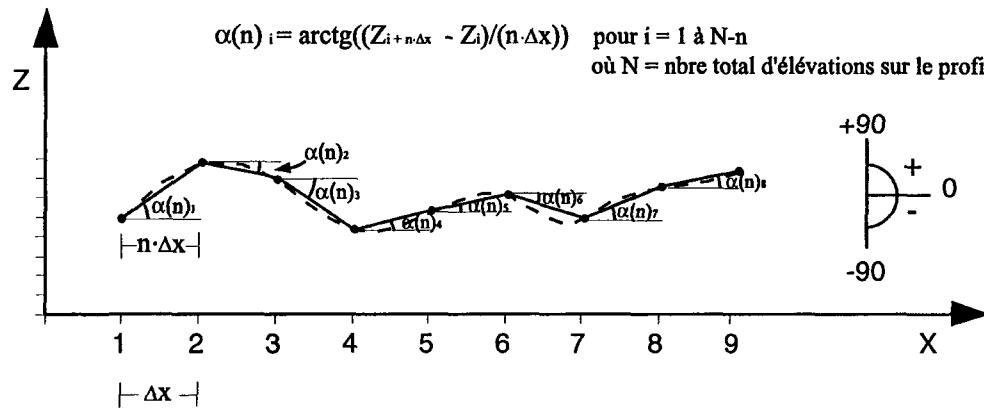


Figure 2.6b Calcul de tous les angles $\alpha(n)$ sur le premier profil,
pour une longueur de base de $n\cdot\Delta x$, où $n = 1$

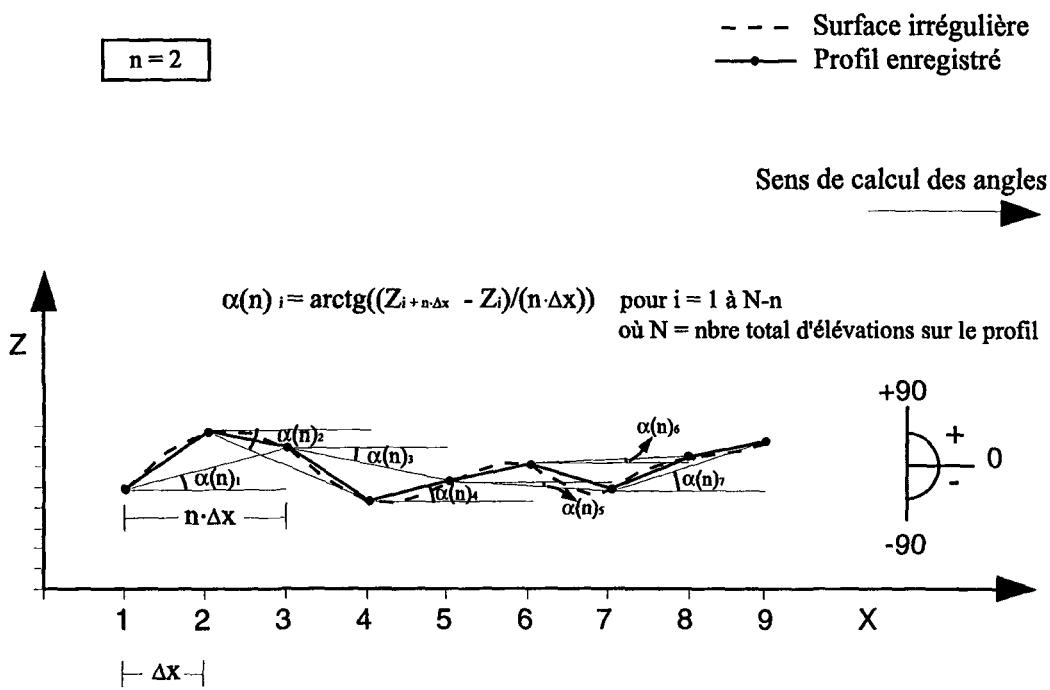


Figure 2.6c Calcul de tous les angles $\alpha(n)_i$ sur le premier profil, pour une longueur de base de $n\cdot\Delta x$, où $n = 2$.

que la valeur de l'angle maximal (positif) et la valeur de l'angle minimal (négatif) pour cette longueur de base $n \cdot \Delta x$, où $n = 1$.

Par la suite, la longueur de base $n \cdot \Delta x$ est augmentée. Pour ce faire, la valeur du coefficient n devient égale à $n + 1$. Les angles $\alpha(n)_1, \alpha(n)_2, \alpha(n)_i \dots$ (positifs ou négatifs) formés par deux élévations séparées par une distance $n \cdot \Delta x$, où $n = 2$ (figure 2.6c) sont calculés et comparés entre eux. Les $N - n$ angles sont ainsi compilés et seuls les angles maximal (positif) et minimal (négatif), pour cette longueur de segment $n \cdot \Delta x$, où $n = 2$, sont retenus. La valeur de coefficient n est augmentée et devient égale à $n + 1$ et tous les angles sur le profil sont de nouveau calculés et comparés. Ce calcul d'angles doit être effectué jusqu'à ce que la longueur de segment $n \cdot \Delta x$ soit égale à la longueur du profil ($n = N - 1$). Lorsque les calculs pour ce premier profil sont terminés, le programme a retenu, pour chaque longueur de segment $n \cdot \Delta x$ (pour $n = 1, 2, 3, \dots, N-1$) un angle positif et un angle négatif.

À nouveau ces instructions sont répétées en utilisant, cette fois-ci, les données du deuxième profil. Les angles sont recalculés, sur toute la longueur du profil, pour toutes les longueurs de base $n \cdot \Delta x$ et un angle minimal et maximal est retenu pour chaque longueur de base. Lorsque les calculs sur le deuxième profil sont complétés, une comparaison est faite entre les angles maximal et minimal obtenus pour une longueur de base $n \cdot \Delta x$ sur le premier profil avec ceux obtenus pour cette même longueur de base sur le deuxième profil. Le

programme ne retient que l'angle le plus élevé (angle positif) et le plus faible (angle négatif) entre les deux profils, pour chaque longueur de base $n \cdot \Delta x$. Tous les profils enregistrés dans la direction choisie sur la surface de la fracture sont ainsi lus, calculés et comparés. Finalement, tous ces calculs fournissent deux valeurs d'angles extrêmes : un angle maximal et un angle minimal, parmi tous les profils, pour chaque longueur de base $n \cdot \Delta x$. Lors de l'exécution du programme, ces données sont enregistrées dans un fichier qui contient tous les résultats.

En compilant sur graphique les valeurs d'angles maximal (positif) et minimal (négatif) évaluées pour chaque longueur de base $n \cdot \Delta x$, une distribution angulaire semblable à celle de Fecker et Rengers est obtenue (figure 2.3, traits pleins).

2.3.4. Courbes de dilatance calculées à partir des valeurs extrêmes des distributions angulaires

La troisième et dernière étape qu'effectue le programme est de calculer la valeur de la dilatance, sous contrainte normale nulle, en fonction du déplacement en cisaillement, correspondant à la valeur de $n \cdot \Delta x$. Pour ce faire, les valeurs des angles extrêmes (positifs et négatifs) de la distribution angulaire, obtenue précédemment, sont utilisées. Ces valeurs sont insérées dans l'équation (2.1) de Fecker et Rengers (1971) afin de déterminer le déplacement en dilatance pour un déplacement en cisaillement.

Pour chaque longueur de base $n \cdot \Delta x$, un angle positif et négatif est retenu. Aussi, deux valeurs de dilatance (une pour chaque sens de cisaillement) sera calculées pour chacune de ces longueurs de base $n \cdot \Delta x$. En compilant sur graphique la valeur de la dilatance en fonction de la longueur de base (qui correspond au déplacement en cisaillement), des courbes de dilatance similaires à celles obtenues par Fecker et Rengers (1971) sont tracées (figure 2.3, traits tiretés).

La courbe négative de dilatance représente la dilatance obtenue lorsque le cisaillement est dans le sens inverse à celui utilisé pour la mesure des angles, tel que discuté précédemment.

Cette méthode, pour déterminer la distribution des angles, utilise des données prélevées sur des profils. Ce sont des informations 2D. La distribution angulaire obtenue est alors une distribution bidimensionnelle. Les angles mesurés ne sont pas des angles vrais mais des angles apparents (figure 1.1). Pour diminuer le biais causé par le fait que la méthode proposée soit 2D, plusieurs profils sont utilisés dans chaque direction étudiée. Plus le nombre de profils prélevés dans une direction est grand, plus le biais devrait diminuer. Puisque, lors du calcul des angles, pour une longueur de base, seuls les angles extrêmes (positif et négatif) sont retenus, plus il y aura de profils, plus les angles extrêmes calculés seront représentatifs de ceux qui sont présents sur les deux surfaces de la fracture.

Ce point sera approfondi à la section 3.2 où la sensibilité des courbes de dilatance en fonction du nombre de profil est une des conditions d'analyse des distributions angulaires et des courbes de dilatance.

CHAPITRE 3

ÉVALUATION DES COURBES DE DILATANCE À L'AIDE DE LA MÉTHODE STATISTIQUE ANALOGIQUE APPLIQUÉE À UN JOINT

3.1. La morphologie des surfaces du joint et sa caractérisation par prélèvement de profils

Afin de vérifier la validité de la méthode décrite au chapitre précédent, des courbes de dilatance, à contrainte normale nulle, en fonction du déplacement en cisaillement, ont été calculées en utilisant le logiciel proposé et elles ont été comparées avec des courbes de dilatance obtenues expérimentalement. Pour tracer les courbes de dilatance calculées et expérimentales, une fracture individuelle a été utilisée. Sur cette fracture des enregistrements d'élévations, le long de profils, ont été effectués par Lamontagne (thèse de Ph. D. en cours). Ces informations morphologiques ont été prises dans le but de tracer les courbes de dilatance calculées. Pour obtenir les courbes de dilatance expérimentales, des essais de cisaillement, à contrainte normale nulle, ont été réalisés sur cette même fracture.

3.1.1. Caractéristiques de la fracture

La fracture étudiée est un joint naturel granitique qui provient du Granite de Guéret en France. La morphologie des surfaces de cette fracture a été étudiée en détails (Gentier 1986, Riss et Gentier 1989, 1990, Riss et al 1995). Les deux épontes de la fracture ont été

prélevées par forage. L'orientation du forage était perpendiculaire au plan moyen régional de la fracture. Les surfaces possèdent une section circulaire de 120 mm de diamètre (figure 3.1).

3.1.2. Prélèvements des profils et traitement

Pour caractériser la topographie des surfaces de la fracture, des enregistrements 2D des élévations ont été préalablement effectués par E. Lamontagne (Ph. D. en cours) et Flamand et al. (1994). Ces enregistrements ont été réalisés à l'aide d'un rugosimètre de laboratoire. Le rugosimètre est un appareil muni d'un stylet qui parcours la surface de la fracture et en mesure l'élévation par rapport à un niveau de référence. Les mesures des élévations Z ont été prises à différents points X le long de profils situés à une distance Y du bord de la surface.

Directions d'enregistrement des profils

Un point de repère a été placé sur les deux épontes de la fracture. Les profils, le long desquels les élévations sont mesurées, ont été orientés dans quatre directions différentes, soient les directions 0, 1, 4 et 5 orientées à -30° , 0° , 60° et 90° du point de repère, respectivement. La figure 3.2 montre l'orientation, sur la surface inférieure, des différentes directions prises pour l'enregistrement des profils.

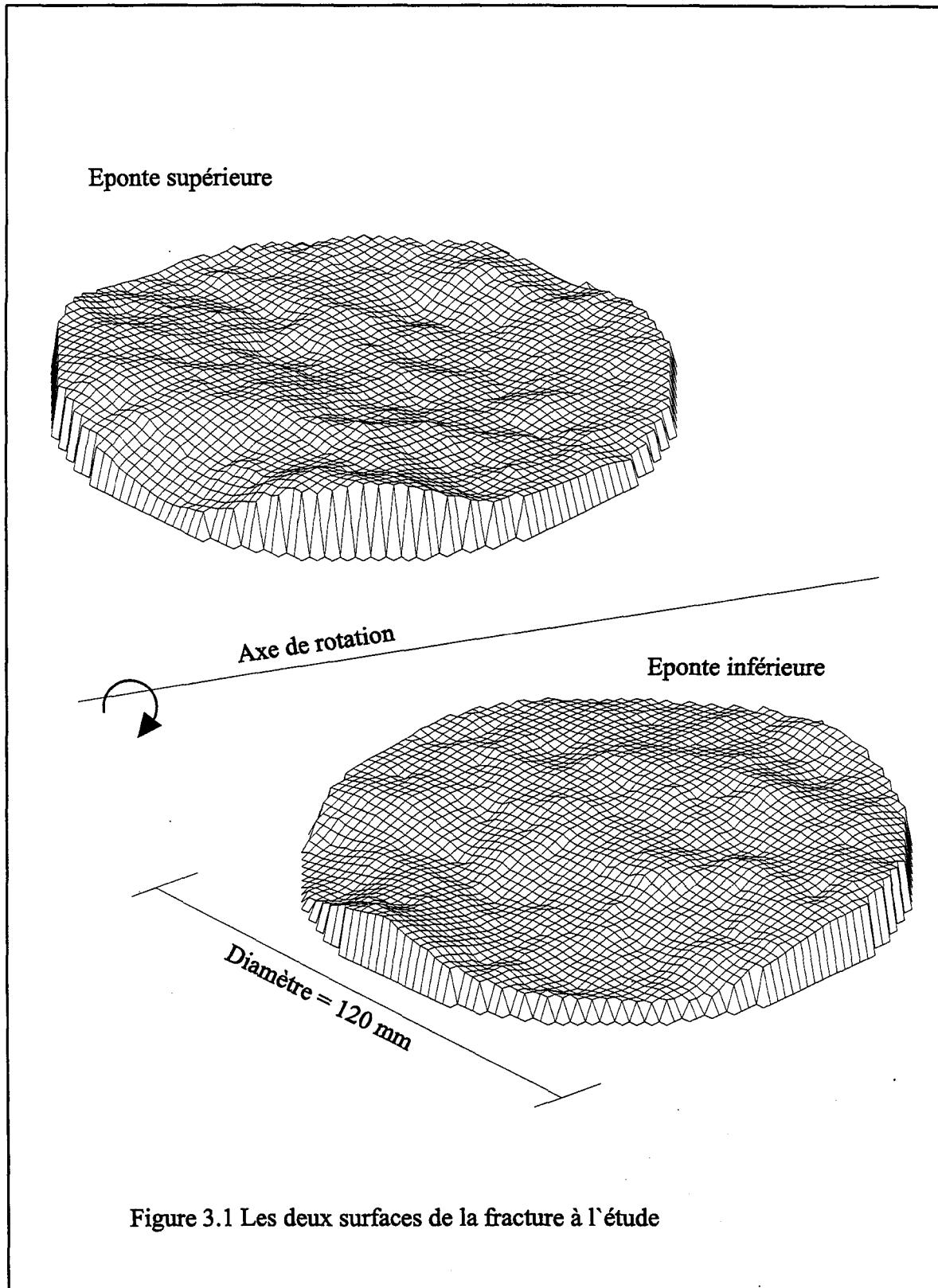
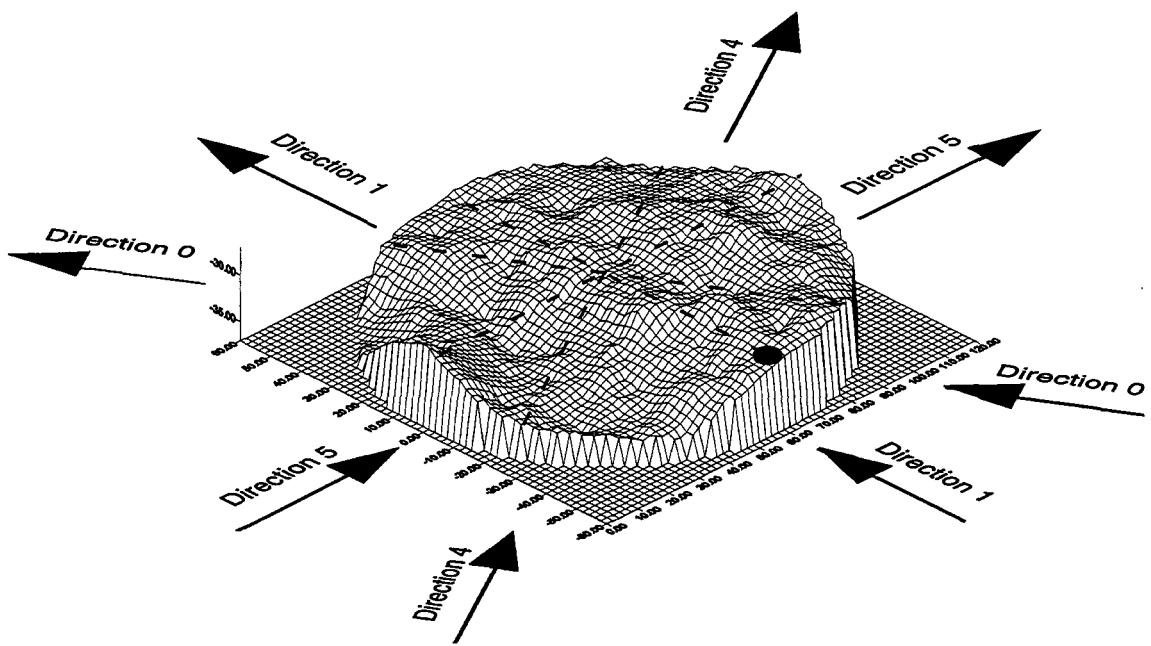


Figure 3.1 Les deux surfaces de la fracture à l'étude

Les quatre directions de cisaillement étudiées



● Point de repère sur la surface

Figure 3.2 Directions et sens d'enregistrement des profils sur la surface inférieure. Quatre directions ont été étudiées soient les directions 0, 1, 4 et 5 à -30, 0, 60 et 90 degrés du point de repère.

Le choix des directions d'enregistrement des profils n'a pas été fait de façon complètement aléatoire mais en fonction des structures présentes sur les surfaces de la fracture. Sur la figure 3.2, la morphologie de la surface inférieure est illustrée. L'échelle de l'axe vertical a été exagérée pour permettre de bien visualiser la topographie. La surface n'est pas horizontale mais présente une légère pente. La direction 5 est orientée perpendiculairement aux grandes structures (figure 3.2). La moyenne des pendages des facettes orientées à $\pm 5^\circ$ dans la direction 5 est de 11° (Verreault 1997). Dans cette direction les profils enregistrés sont inclinés (figure 3.3d). La direction 1 est à 90° de la direction 5, elle est à peu près parallèle aux grandes structures. Les profils dans cette direction 1 sont plus horizontaux (figure 3.3b). Les deux autres directions, soient les directions 0 et 4, sont à 60° et -30° , respectivement, de la direction 1 et présentent des profils plus ou moins inclinés (figures 3.3a et 3.3c)

Sens d'enregistrement des profils

Le sens d'enregistrement des profils au rugosimètre (de A vers B, figures 3.2, 3.3 et 3.4) a été déterminé par E. Lamontagne et R. Flamand en fonction de leurs essais expérimentaux. Dans certaines directions, les enregistrements ont été effectués dans le sens positif de la pente générale (directions 4 et 5, figures 3.2, 3.3c et 3.3d) tandis que dans d'autres directions, le prélèvement des profils a été réalisé dans le sens négatif de la pente générale (directions 0 et 1, figures 3.2, 3.3a et 3.3b).

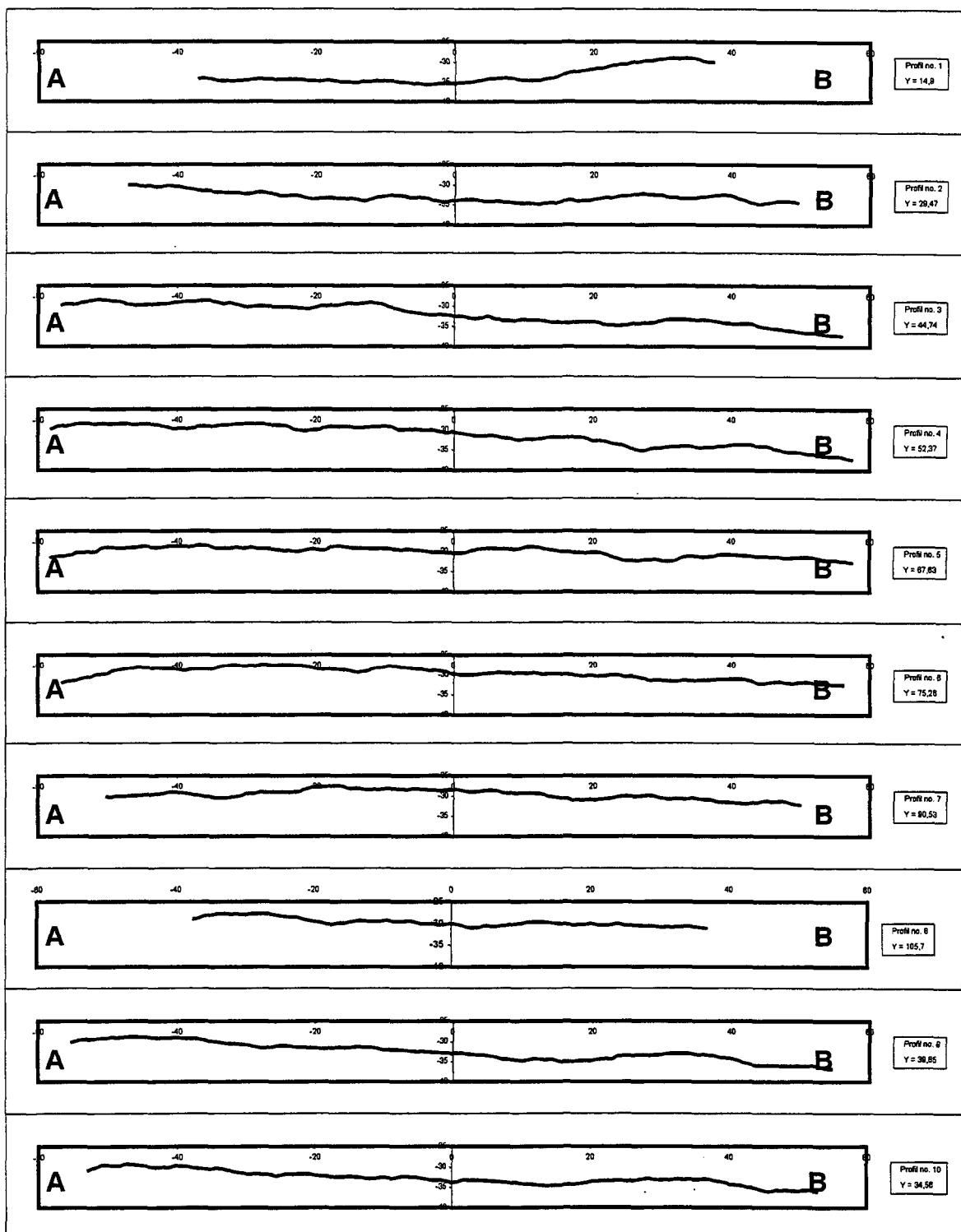


Figure 3.3a. Profils enregistrés dans la direction 0. Tous les profils ont été enregistrés de A vers B. (voir figure 3.4)

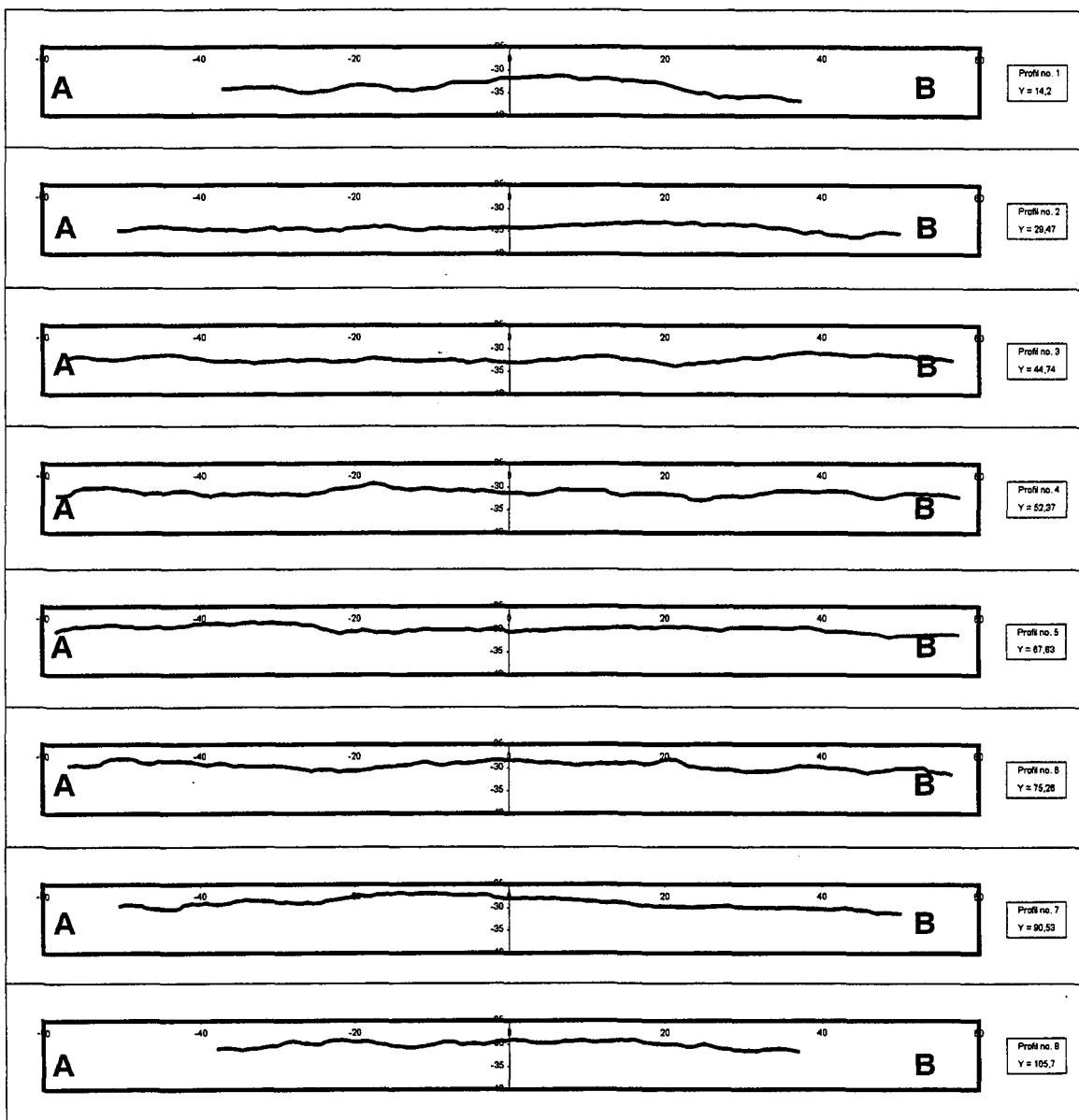


Figure 3.3b. Profils enregistrés dans la direction 1. Tous les profils ont été enregistrés de A vers B. (voir figure 3.4)

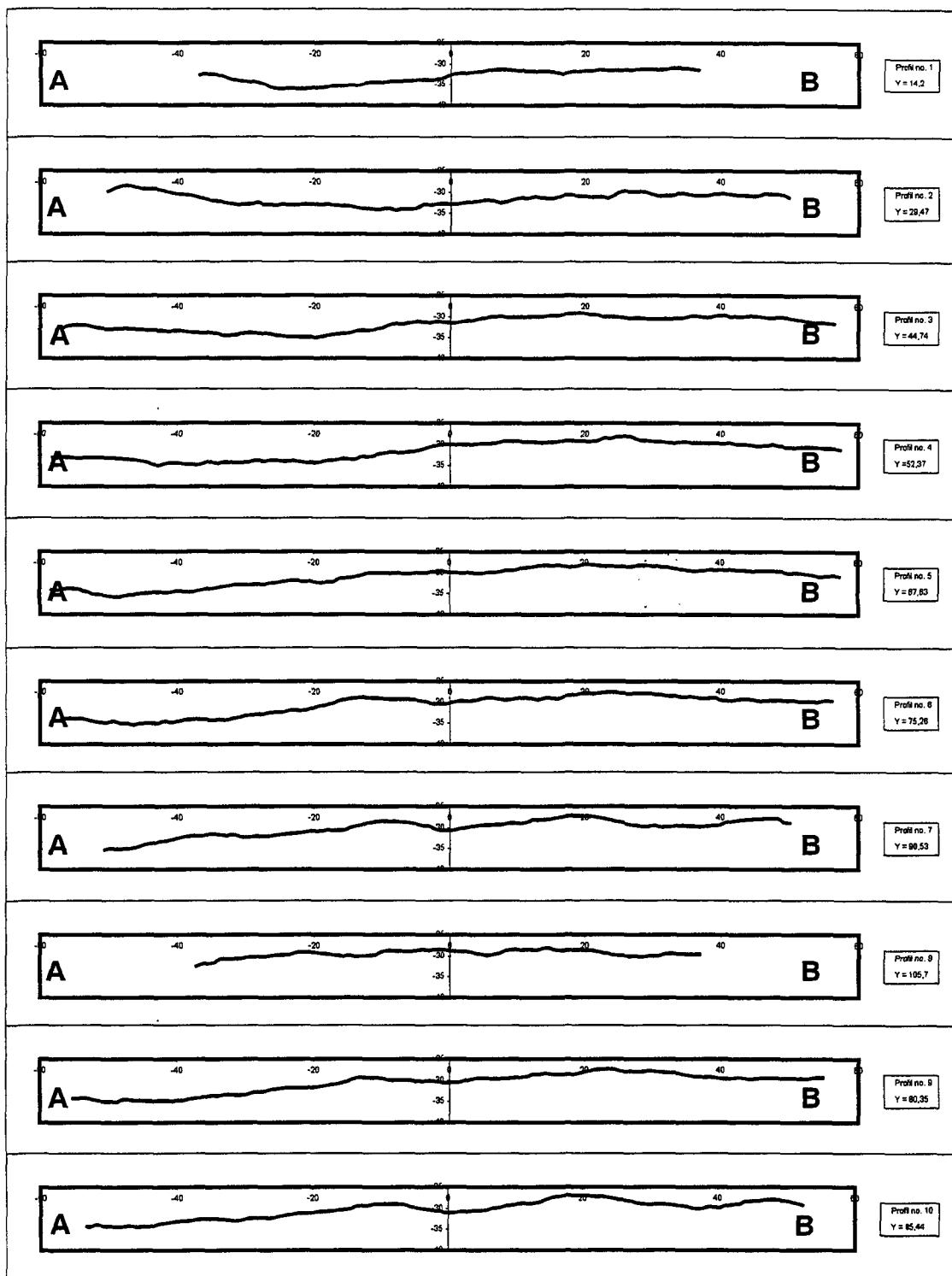
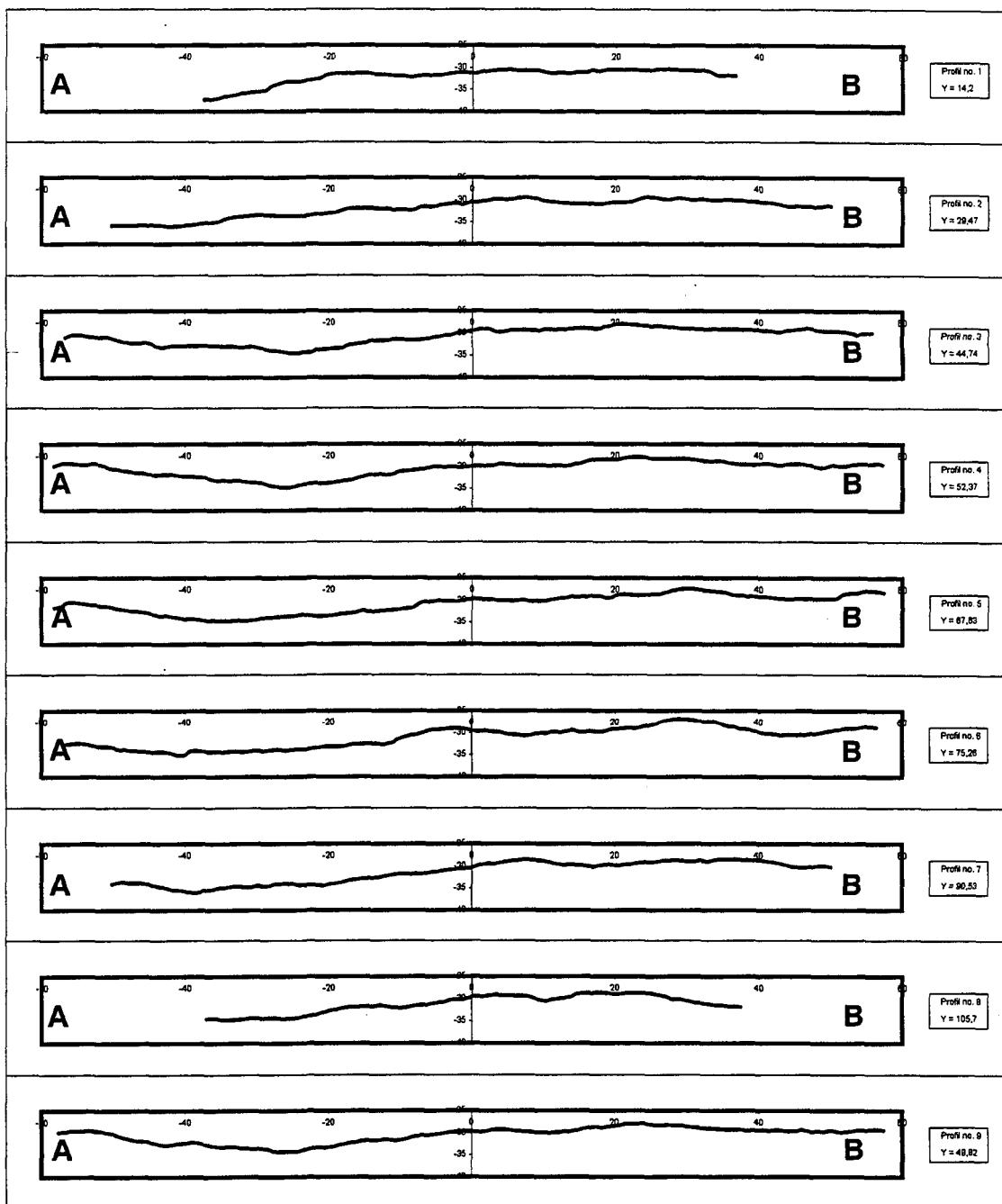


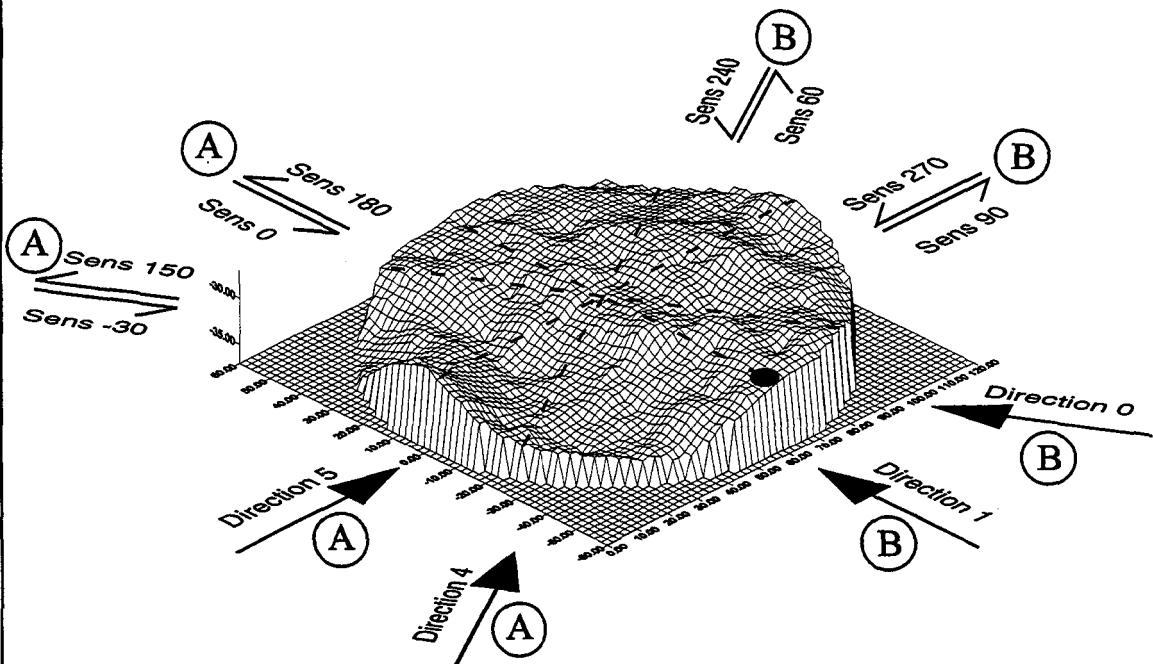
Figure 3.3c. Profils enregistrés dans la direction 4. Tous les profils ont été enregistrés de A vers B. (voir figure 3.4)



Avec la méthode proposée, dans chacune des directions, deux distributions d'angles sont calculées. La distribution des angles formés par les facettes à pente positive (angles maximaux) et la distribution des angles formés par les facettes à pente négative (angles minimaux). La figure 3.4 montre la convention utilisée pour la mesure des angles positifs et négatifs. Lorsque les calculs sont effectués de A vers B, les angles maximaux correspondent aux angles dont la pente est positive. Par contre, si les angles sont calculés dans le sens inverse, de B vers A, les angles maximaux correspondent aux angles négatifs de la figure 3.4. Donc la distribution des angles extrêmes (maximaux et minimaux) est dépendante du sens de calcul sur les profils.

Afin de mieux comparer et analyser les distributions d'angles obtenues, il faut définir, dans chacune des quatre directions, dans quels sens ont été calculés les distributions des angles maximaux et les distributions des angles minimaux. La figure 3.4 montre, pour les quatre directions à l'étude, le sens de mesure des angles positifs (sens -30° , 0° , 60° et 90°). Les facettes orientées en sens inverse (sens 150° , 180° , 240° et 270°) sont les facettes utilisées pour le calcul des angles négatifs. Il est important de noter que, dans chacune des directions, le sens de mesure des facettes positives coïncide avec le sens selon lequel la pente générale, dans cette direction, est positive. De même, les angles négatifs sont calculés dans le sens négatif de la pente générale de la direction à l'étude.

Sens de calcul des angles pour les quatre directions de cisaillement étudiées.



● Point de repère sur la surface

Figure 3.4 Sens de calculs des angles maximaux, de A vers B (sens -30, 0, 60 et 90) et des angles minimaux, de B vers A (sens 150, 180, 240 et 270), sur l'éponte inférieure, pour les quatre directions étudiées.

Nombre de profils dans chaque direction

Flamand (Ph. D. en cours), pour des raisons expérimentales, a diminué les surfaces de la fracture en enlevant 15 mm tout le tour de la surface réduisant le diamètre de la fracture de 120 mm à 90 mm. Dans chacune des quatre directions illustrées à la figure 3.2, 7 profils ont été enregistrés à l'exception de la direction 1 où seulement 6 profils ont été prélevés.

Les enregistrements de Lamontagne (Ph. D. en cours), réalisés sur les surfaces de 120 mm de diamètre, comptent au moins 8 profils dans chaque direction. Dans certaines directions un ou deux profils supplémentaires ont été enregistrés. Le tableau 3.1 résume le nombre de profils qui ont été enregistrés, dans chacune des directions, pour les deux diamètres de la fracture ($D = 90$ et 120 mm).

Localisation des profils

Pour une même direction, sur la fracture de 90 mm de diamètre, les cinq premiers profils enregistrés sont équidistants $\Delta Y = 15,27$ mm. Les deux derniers profils (ou le dernier, dans le cas de la direction 1) sont des profils supplémentaires et ont été localisés par R. Flamand selon les exigences de son travail.

	Fracture de 90 mm de diamètre		Fracture de 120 mm de diamètre	
	Éponte Inférieure	Éponte Supérieure	Éponte Inférieure	Éponte supérieure
Nombre de profils Direction 0, -30°	7	7	10	10
Nombre de profils Direction 1, 0°	6	6	8	8
Nombre de profils Direction 4, 60°	7	7	10	10
Nombre de profils Direction 5, 90°	7	7	9	9
Nombre total de Profils	27	27	37	37
Nombre total de Mesures d'élévation	4 096	4 041	7 563	7 556

Tableau 3.1. Nombre de profils enregistrés dans chacune des directions étudiées pour les deux diamètres de la fracture

Pour la fracture de 120 mm, les huit profils de base sont, indépendamment de la direction, toujours situés à la même distance respective par rapport au bord de la surface. Les profils supplémentaires ont été situés par E. Lamontagne aux endroits où la morphologie devait être décrite plus en détails (présence de structures plus importantes). La figure 3.5 illustre la localisation des profils, dans chacune des directions, pour la fracture de 120 mm. Que ce soit pour la fracture de 90 mm ou celle de 120 mm de diamètre, le nombre de profils et leur localisation sur l'éponte inférieure sont identiques à ceux retrouvés sur l'éponte supérieure.

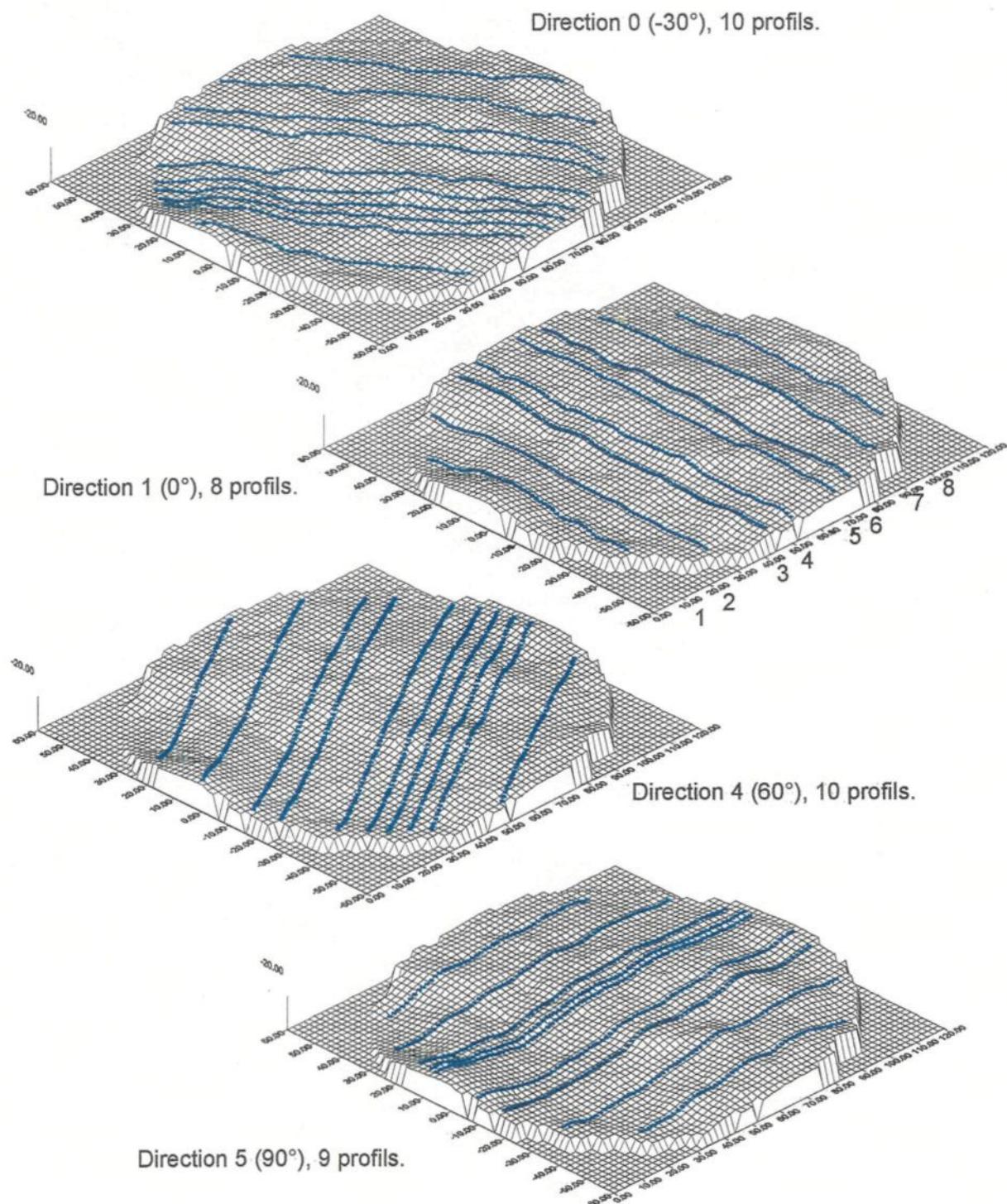


Figure 3.5. Localisation des profils enregistrés au rugosimètre sur l'éponte inférieure. Les mêmes enregistrements ont aussi été faits sur l'éponte supérieure. (Le diamètre de la fracture est de 120 mm)

Traitement des profils

Le stylet du rugosimètre, qui mesure les élévations sur la surface irrégulière, peut faire le parcours du profil seulement si un manipulateur fait tourner une petite manivelle afin qu'il se déplace. La vitesse de la manivelle peut varier d'un manipulateur à l'autre ou peut aussi varier pour un même manipulateur mais en fonction de bien d'autres facteurs (heure du jour, fatigue, etc.). Le nombre de mesures d'élévation et l'intervalle d'échantillonnage peuvent alors changer d'un enregistrement à l'autre. C'est pour cette raison qu'un traitement est effectué sur les enregistrements des élévations pour obtenir des profils à échantillonnage constant.

Le traitement du profil est réalisé par ordinateur, immédiatement après avoir fait l'acquisition des mesures d'élévation. Un programme est conçu pour ramener toutes les données d'élévation à un intervalle d'échantillonnage constant de $\Delta x = 0,5$ mm. Ce traitement est effectué car il est plus facile, par la suite, de manipuler des profils à pas constants plutôt que des profils échantillonnés à intervalles irréguliers.

L'enregistrement et le traitement des profils ont permis, pour la fracture de 90 mm de diamètre, de prendre 8 137 mesures d'élévation au total, sur les deux surfaces. Pour la fracture de 120 mm de diamètre, c'est plus de 7 500 données d'élévation qui ont été enregistrées sur chacune des épontes inférieure et supérieure pour un total de 15 119 mesures d'élévation (tableau 3.1).

3.2. Conditions d'analyse des distributions angulaires et des courbes de dilatance résultantes

Les distributions angulaires ont été recalculées plusieurs fois en changeant certains paramètres (par exemple la direction, le nombre de profils), afin de vérifier l'influence de ces paramètres sur les distributions des angles et sur les courbes de dilatance qui en résultent. Cette analyse a été faite principalement sur l'éponte de 120 mm de diamètre. Une des raisons pour laquelle l'intérêt est principalement porté sur la fracture de plus grande taille est que plus de profils y ont été enregistrés et ainsi plus de valeurs d'élévation et plus d'informations sont disponibles (tableau 3.1).

3.2.1. Dépendance selon l'orientation et le sens du cisaillement

Dépendance selon l'orientation du cisaillement

a) Distributions angulaires

Un des premiers facteurs étudiés, pouvant influencer le comportement de la dilatance, lors de déplacement en cisaillement, est la direction du cisaillement. Selon le modèle proposé, si la distribution des angles change en fonction de la direction d'enregistrement des profils cela implique que le comportement de la dilatance est différent selon la direction de cisaillement (dépendance directionnelle). Dans le but de vérifier s'il y

a effectivement dépendance directionnelle ou non, une distribution angulaire a été calculée dans chacune des quatre directions d'enregistrement des profils.

Pour une direction donnée, une distribution d'angles α (positifs et négatifs) est calculée, en augmentant la longueur de base $n \cdot \Delta x$, sur chacune des deux surfaces de la fracture de 120 mm de diamètre. Tous les profils, orientés dans cette direction, sont utilisés pour les calculs. Seuls les angles extrêmes $\alpha(n)_{\text{extr}}$, maximaux et minimaux, sont retenus car, selon la méthode proposée, ce sont eux qui contrôlent la dilatance, à contrainte normale nulle, lors de déplacement en cisaillement.

La figure 3.6 indique la valeur des angles extrêmes $\alpha(n)_{\text{extr}}$ (maximaux et minimaux), en fonction de la longueur de base $n \cdot \Delta x$, calculés pour l'éponte inférieure et pour l'éponte supérieure ($D = 120$ mm), pour chacune des quatre directions d'enregistrement des profils. Ces mêmes graphiques sont présentés à plus grande échelle à l'annexe 2 (graphiques A2.1 à A2.4), pour permettre de mieux analyser les détails.

La figure 3.7 regroupe les résultats obtenus pour les quatre directions et permet de bien comparer les différentes distributions d'angles maximaux et minimaux afin de visualiser la dépendance directionnelle. Les quatre distributions angulaires, de la surface inférieure, sont représentées sur la figure 3.7a et celles de la surface supérieure sur la figure 3.7b.

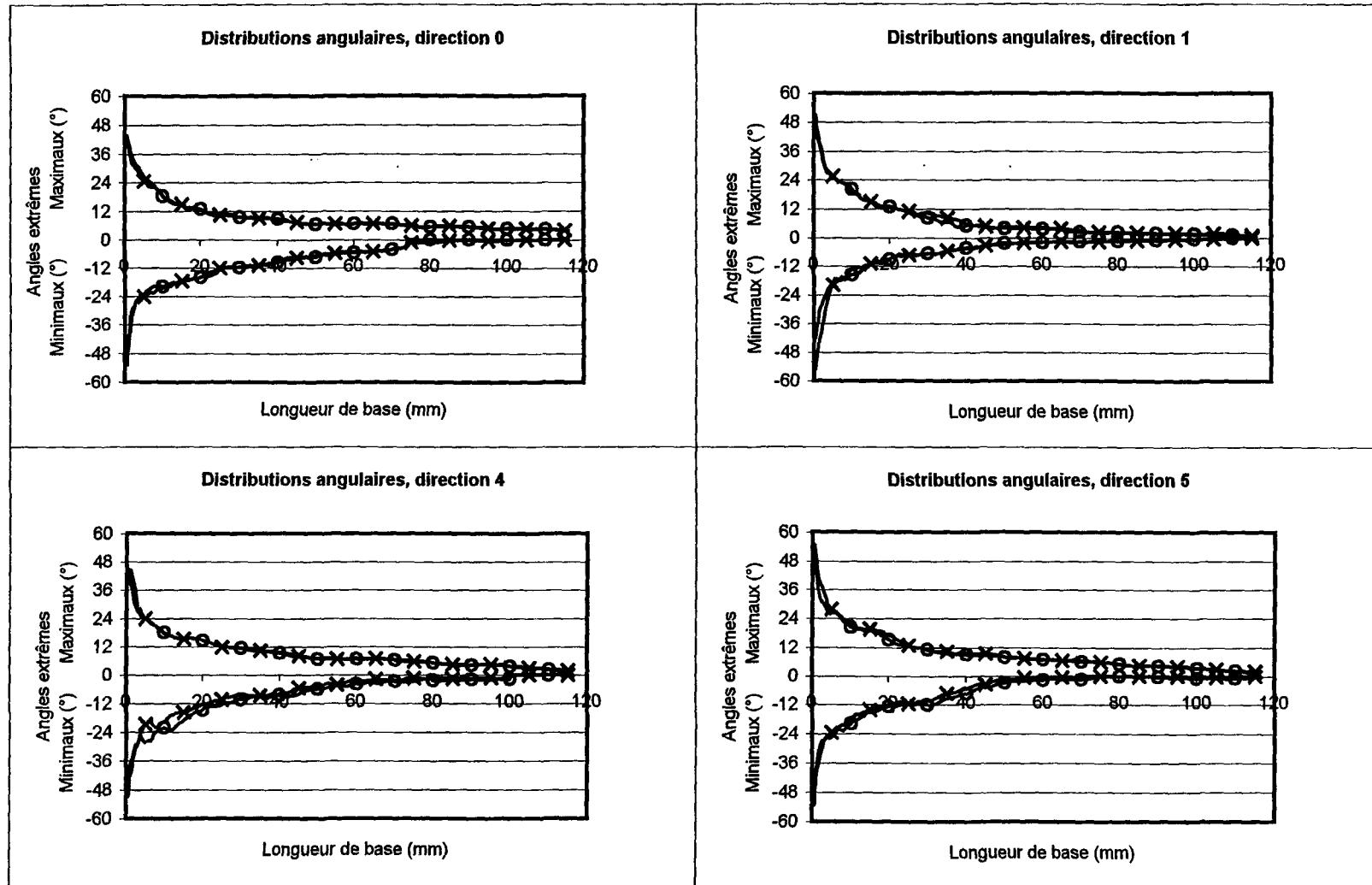


Figure 3.6. Distributions angulaires obtenues pour les quatre directions à l'étude. Les résultats des calculs sur l'éponte inférieure sont illustrés par des croix et ceux de l'éponte supérieure par des cercles.

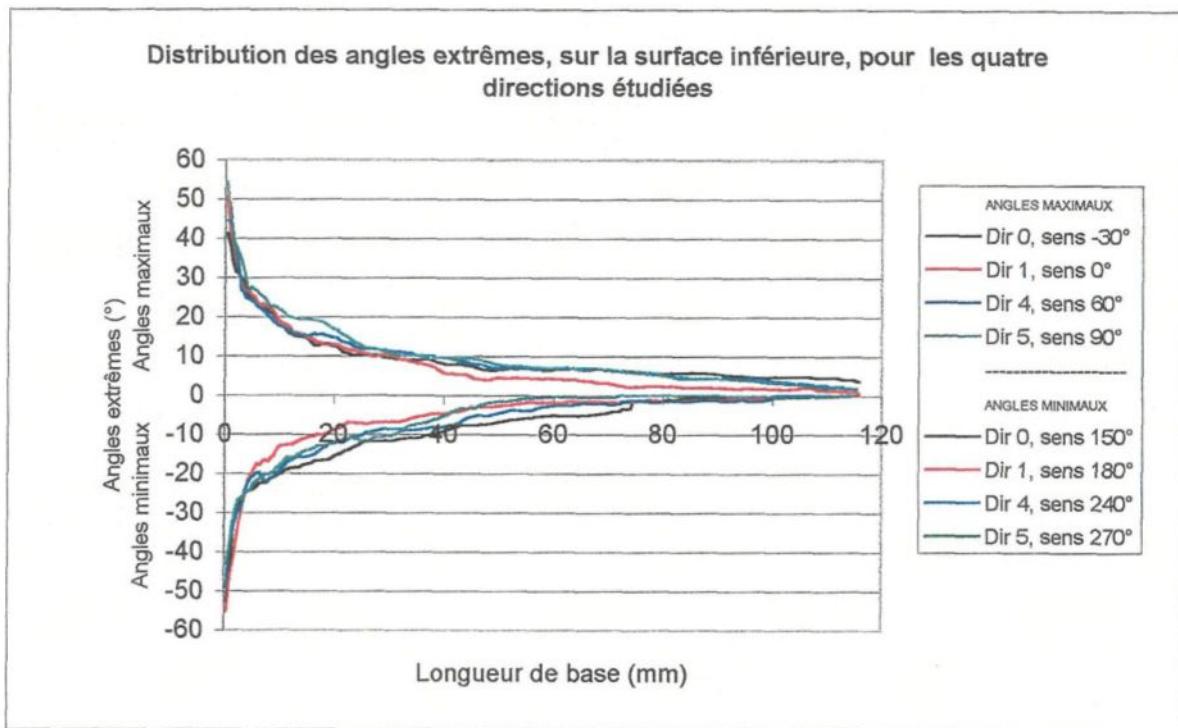


Figure 3.7a Comparaison entre les quatre distributions angulaires de l'éponte inférieure

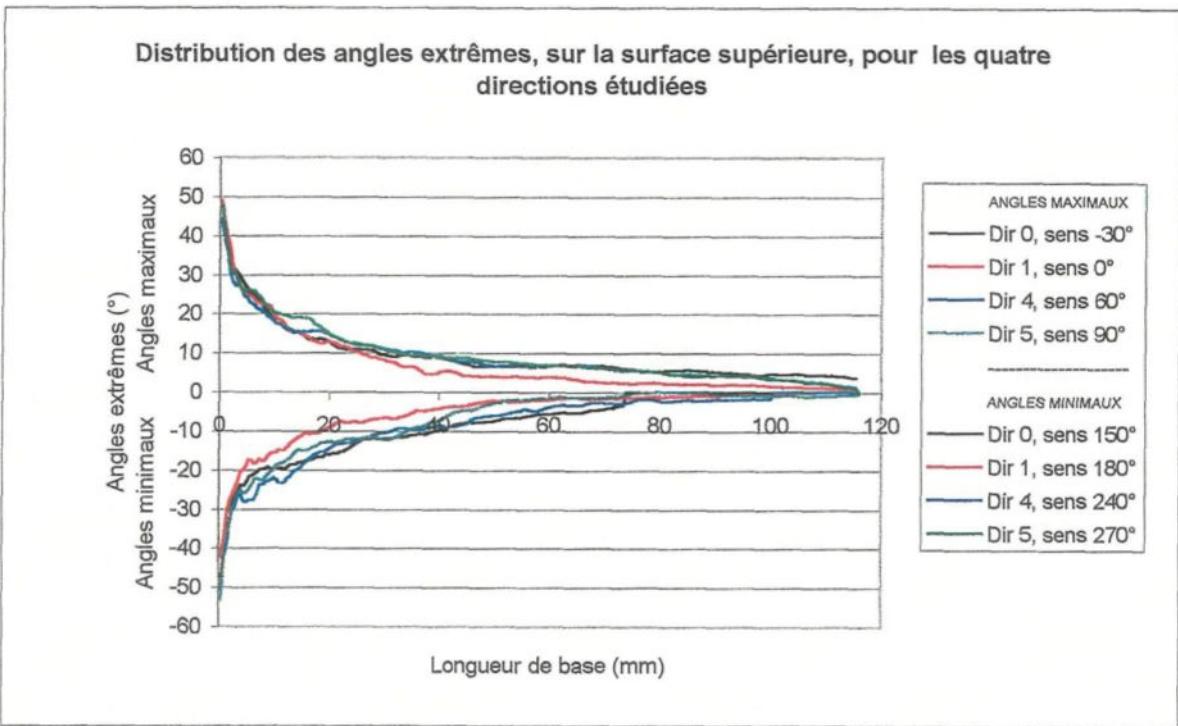


Figure 3.7b Comparaison entre les quatre distributions angulaires de l'éponte supérieure

L'analyse des résultats des distributions des angles extrêmes (figures 3.6 et A2.1 à A2.4) fait ressortir certains phénomènes. Tout d'abord, la distribution d'angles calculée avec les profils de la surface inférieure, dans une direction, montrent sensiblement les mêmes résultats que celle calculée avec les profils de la surface supérieure, dans la même direction. De plus, ces distributions angulaires, de façon générale, décroissent avec l'augmentation du pas de discréétisation. Ce qui veut dire que pour un pas de discréétisation petit, les angles mesurés sont élevés (jusqu'à 55°). Plus le pas de discréétisation devient grand, plus la valeur des angles tend à devenir asymptotique. Les mêmes observations avaient déjà été rapportées lors de travaux antérieurs, entre autre par Fecker et Rengers (1971), Barton (1971), Ohnishi et Yoshinaka (1992), Ohnishi et al. (1993) et Sfondrini et Sterlacchini (1996).

Les résultats des distributions des angles extrêmes en fonction du pas de discréétisation, (figures 3.6 et A2.1 à A2.4), montrent que, pour les quatre directions à l'étude, lorsque le pas de discréétisation est très petit la valeur des angles extrêmes positifs mesurés ressemble à la valeur des angles extrêmes négatifs. Par contre, avec l'augmentation du pas de discréétisation, les valeurs des angles extrêmes positifs mesurés sur les profils sont plus élevées comparativement à celles calculées pour les angles extrêmes négatifs. À la limite, lorsque le pas de discréétisation est presque aussi grand que la longueur du profil, les distributions angulaires montrent que les angles extrêmes négatifs sont nuls, c'est à dire qu'il n'y a plus d'angle négatif mesuré pour cette longueur de pas tandis qu'il y a toujours des angles extrêmes positifs qui sont mesurés. La raison qui

explique cette observation est que dans chacune des quatre directions d'étude, il y a des profils qui montrent une pente générale non nulle (figures 3.3a à 3.3d). Pour les quatre directions, les calculs des angles positifs et négatifs ont été effectués dans le sens de la pente générale positive des profils. Ainsi, pour les quatre directions, puisque la pente générale des profils est positive, il y a plus d'angles positifs calculés et leurs valeurs sont plus élevées que celles calculées pour les angles négatifs.

Les distributions angulaires ne décroissent pas toutes uniformément en fonction du pas de discréétisation. En général, les quatre directions étudiées montrent des distributions d'angles positifs et négatifs qui présentent de petites variations. Ces dernières sont probablement causées par des structures présentes sur les surfaces de la fracture. Ce sont ces structures qui font varier les distributions des angles. Par contre, aucun lien n'a pu être déterminé entre la morphologie des structures sur les profils et la localisation des variations sur les distributions angulaires. L'analyse des variogrammes (Verreault 1997), pouvant faire ressortir certaines structures n'a pas donné de meilleurs résultats. Ces variations sont probablement causées par le fait que les angles extrêmes sont mesurés sur les structures les plus importantes. Lorsque le pas de discréétisation devient plus grand que la structure, les angles mesurés diminuent. En augmentant la valeur du pas, ce sont les structures de plus grandes tailles qui contrôlent la valeur des angles extrêmes. Les variations des distributions angulaires sont peut être attribuées aux changements de structures ou de taille de structures lors de l'augmentation du pas de discréétisation.

En ce qui concerne la dépendance selon la direction de cisaillement, les figures 3.7 a et b montre qu'au départ, pour un pas de discrétisation très petit, les valeurs des quatre distributions angulaires sont assez semblables. Par la suite, avec l'augmentation du pas de discrétisation, la dépendance directionnelle est plus importante. La raison pour laquelle la dépendance est plus importante lorsque le pas est grand est que pour un petit pas, ce sont les petites facettes, très nombreuses, qui sont mesurées. Par contre, lorsque le pas de discrétisation est plus grand, ce sont des angles à grandes longueurs de base, moins nombreux, retrouvés sur les grandes structures, qui sont mesurés. Ceci démontre qu'il est possible de retrouver des petites structures dans toutes les directions. Par contre, dans certaines directions, des grandes structures peuvent être retrouvées et dans d'autres directions ces structures sont absentes. De plus, même si dans toutes les directions il y a des grandes structures, celles-ci peuvent avoir des morphologies différentes et contribuent au phénomène de dépendance directionnelle.

La direction 1 est la plus horizontale. La figure 3.7a et b montre qu'en général, les angles extrêmes retrouvés dans cette direction sont plus faibles que ceux mesurés dans les trois autres directions. Pour les directions 0, 4 et 5, les distributions angulaires sont plus similaires. Dans chacune de ces trois directions, les profils sont moins horizontaux.

b) Courbes de dilatance

Les courbes de dilatance ont été calculées à partir des distributions des angles extrêmes (présentées précédemment à la figure 3.6) et de l'équation (2.1) proposée par Fecker et Rengers (1971). Le tracé des courbes de dilatance a été réalisé pour chacune des quatre directions de cisaillement étudiées afin de pourvoir les comparer avec les courbes de dilatance expérimentales. La figure 3.8 présente les courbes de dilatance calculées à partir de la distribution des angles maximaux et minimaux mesurés sur chacune des deux épontes de la fracture, dans chacune des quatre directions de cisaillement. Ces résultats sont repris en annexe aux figures A2.1 à A2.4.

Pour permettre de bien analyser la dépendance des courbes de dilatance selon la direction, les résultats ont été regroupés sur un même graphique. La figure 3.9a montre les courbes de dilatance, pour les quatre directions de cisaillement, calculées à partir de l'éponte inférieure et la figure 3.9b présente les courbes de dilatance, pour les quatre directions à l'étude, calculées sur l'éponte supérieure.

Les courbes de dilatance calculées proviennent des distributions des angles extrêmes. Puisque les distributions d'angles sont sensiblement les mêmes sur l'éponte inférieure et supérieure alors il est normal d'observer que les courbes de dilatance pour la surface inférieure et la surface supérieure sont assez semblables (figures 3.8 et A2.1 à

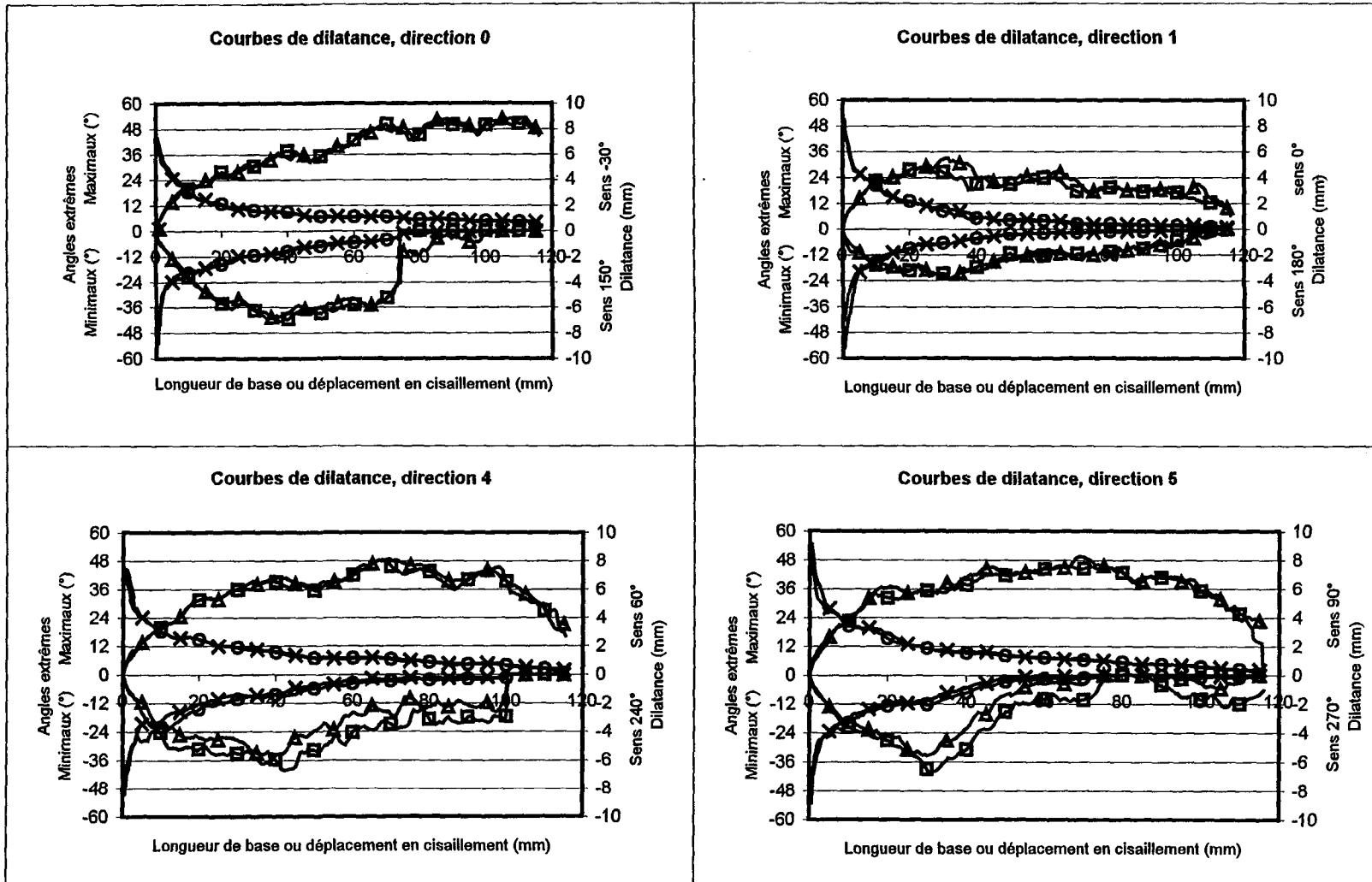


Figure 3.8. Distributions angulaires et courbes de dilatance pour les quatre directions à l'étude. Les angles extrêmes sont calculées à partir des profils provenant de la surface inférieure (croix) et de la surface supérieure (cercles). Les courbes de dilatance sont calculées à partir des valeurs des angles extrêmes pour l'épente inférieure (triangles) et pour l'épente supérieure (carrées).

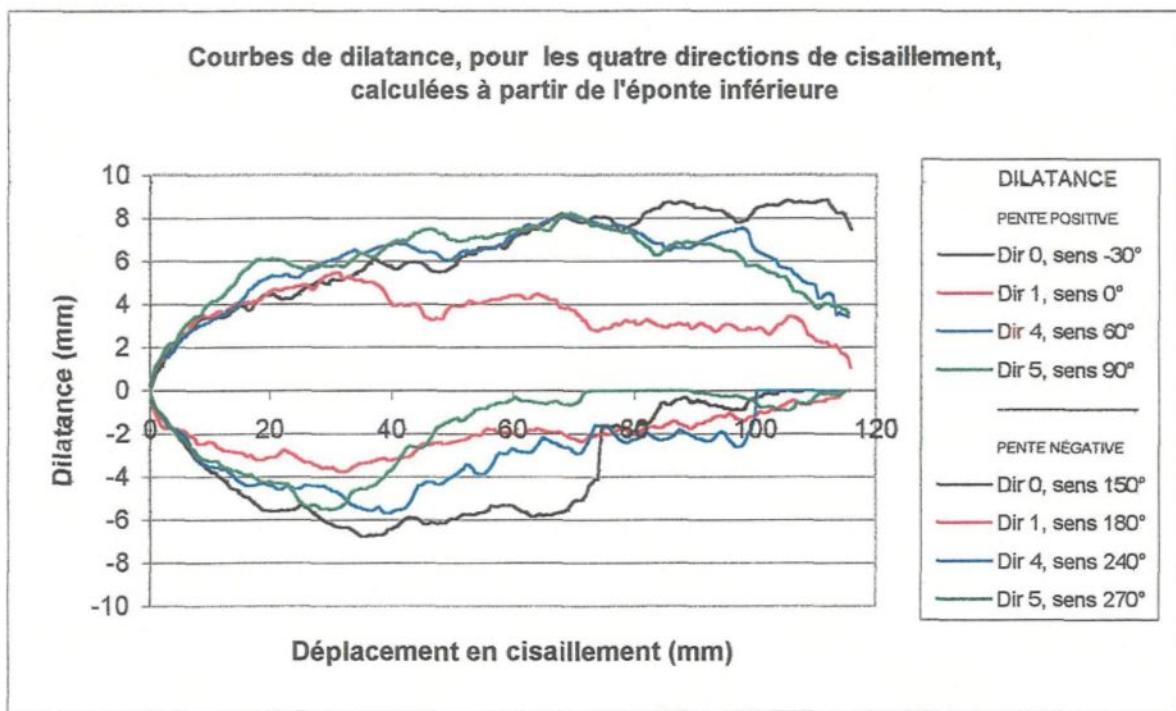


Figure 3.9a. Comparaison entre les courbes de dilatance calculées dans les quatre directions à l'étude, à partir de l'éponte inférieure.

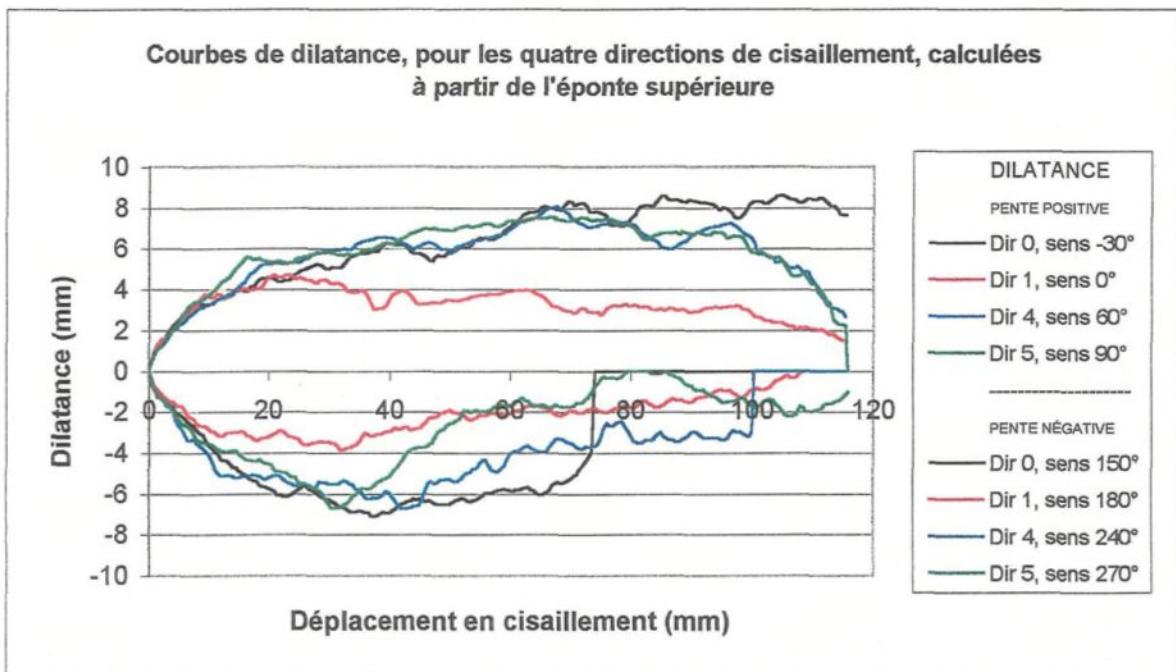


Figure 3.9b. Comparaison entre les courbes de dilatance calculées dans les quatre directions à l'étude, à partir de l'éponte supérieure.

A2.4). L'analyse des distributions angulaires a démontré que les petits pas de discréétisation donne les valeurs d'angles les plus élevées et que plus la valeur du pas de discréétisation augmente plus les valeurs des angles extrêmes diminuent. De la même manière, les courbes de dilatance calculées montrent pour un faible déplacement en cisaillement, que le taux de dilatance est élevé et que plus le déplacement en cisaillement devient grand, plus le taux de dilatance diminue. En général, il est possible d'observer qu'une grande partie de la dilatance est mobilisée dans les dix premiers millimètres de déplacement en cisaillement.

Les courbes de dilatance tracées pour les sens -30° , 60° et 90° , c'est à dire les sens où le cisaillement est effectué selon la pente générale positive montrent que la dilatance, de façon générale, augmente toujours avec le déplacement en cisaillement. Évidemment, ceci n'est pas toujours observé lorsque le cisaillement dépasse les 100 mm. Toutefois, étant donné que les surfaces circulaires de la fracture ne mesurent que 120 mm de diamètre, l'aire de contact entre les deux surfaces après 100 mm de déplacement en cisaillement est tellement petite que les résultats calculés sont peu fiables. Le fait que la dilatance croît sans cesse avec l'augmentation du pas de discréétisation était prévisible car la pente générale des profils dans ces sens est positive ce qui implique que des angles positifs sont retrouvés même pour des valeurs de pas de discréétisation très grandes.

Par contre, dans les sens inverses, sens 150° , 240° et 270° , où le cisaillement est effectué dans le sens de la pente générale négative et dans le cas 0° , 180° dont le plan moyen est plus horizontal, la dilatance n'augmente pas toujours avec la valeur du

déplacement en cisaillement. En effet, il y a de la dilatance lors des premiers millimètres de déplacement. Cette dilatance est calculée à partir des petites angularités orientées dans ce sens du cisaillement. Par la suite, lorsque le déplacement en cisaillement est plus important, le taux de dilatance diminue jusqu'à ce qu'il n'y ait plus du tout de dilatance entre les deux surfaces. La raison qui explique qu'il n'y a plus de dilatance entre les deux surfaces est que, étant donné la pente générale négative, il n'y a plus d'angles d'attaque positifs orientés dans le sens de cisaillement pour des grands pas de discréétisation, donc le taux de dilatance calculée est égal à zéro, mais la dilatance demeure positive.

L'analyse des distributions angulaires a démontré que les angles extrêmes ne décroissent pas uniformément avec l'augmentation du pas de discréétisation mais qu'il y avait des petites variations angulaires dans ces courbes. Comme la dilatance est calculée en multipliant la valeur de l'angle extrême par la longueur du pas de discréétisation (associée au déplacement en cisaillement), les petites variations retrouvées sur les distributions angulaires sont amplifiées sur les courbes de dilatance et ce d'autant plus que le déplacement en cisaillement est grand.

Ainsi, la dépendance directionnelle est plus évidente sur les courbes de dilatance (figure 3.8) que sur les distributions angulaires. Toutefois les observations restent les mêmes que pour les distributions des angles extrêmes : au départ, les quatre courbes sont assez semblables et avec l'augmentation du déplacement en cisaillement, la dilatance devient beaucoup plus différente. La figure 3.9 montre clairement que la dilatance dans la

direction 1, surtout dans le cas du cisaillement dans le sens de la pente positive (sens 0°), est faible comparativement aux trois autres directions.

Ces résultats indiquent donc que le cisaillement effectué dans différentes directions, sur les mêmes surfaces d'une fracture, provoque des comportements en dilatance différents. Aussi, il est très important de tenir compte de la direction de cisaillement pour l'évaluation de la dilatance.

Dépendance selon le sens du cisaillement

a) Distribution angulaires

En plus de la dépendance selon la direction du cisaillement, il est possible qu'il y ait aussi de la dépendance selon le sens du cisaillement impliquant que, pour une même direction de cisaillement, la dilatance est différente selon le sens du déplacement. Lorsque, pour une même direction, les angles maximaux ne sont pas les mêmes que les angles minimaux, alors une dépendance selon le sens du cisaillement est observée.

Une représentation graphique a été faite, pour permettre de bien visualiser les différences, pour une même direction, entre les angles maximaux et minimaux. La figure 3.10 montre la distribution des angles extrêmes, maximaux et minimaux en valeurs

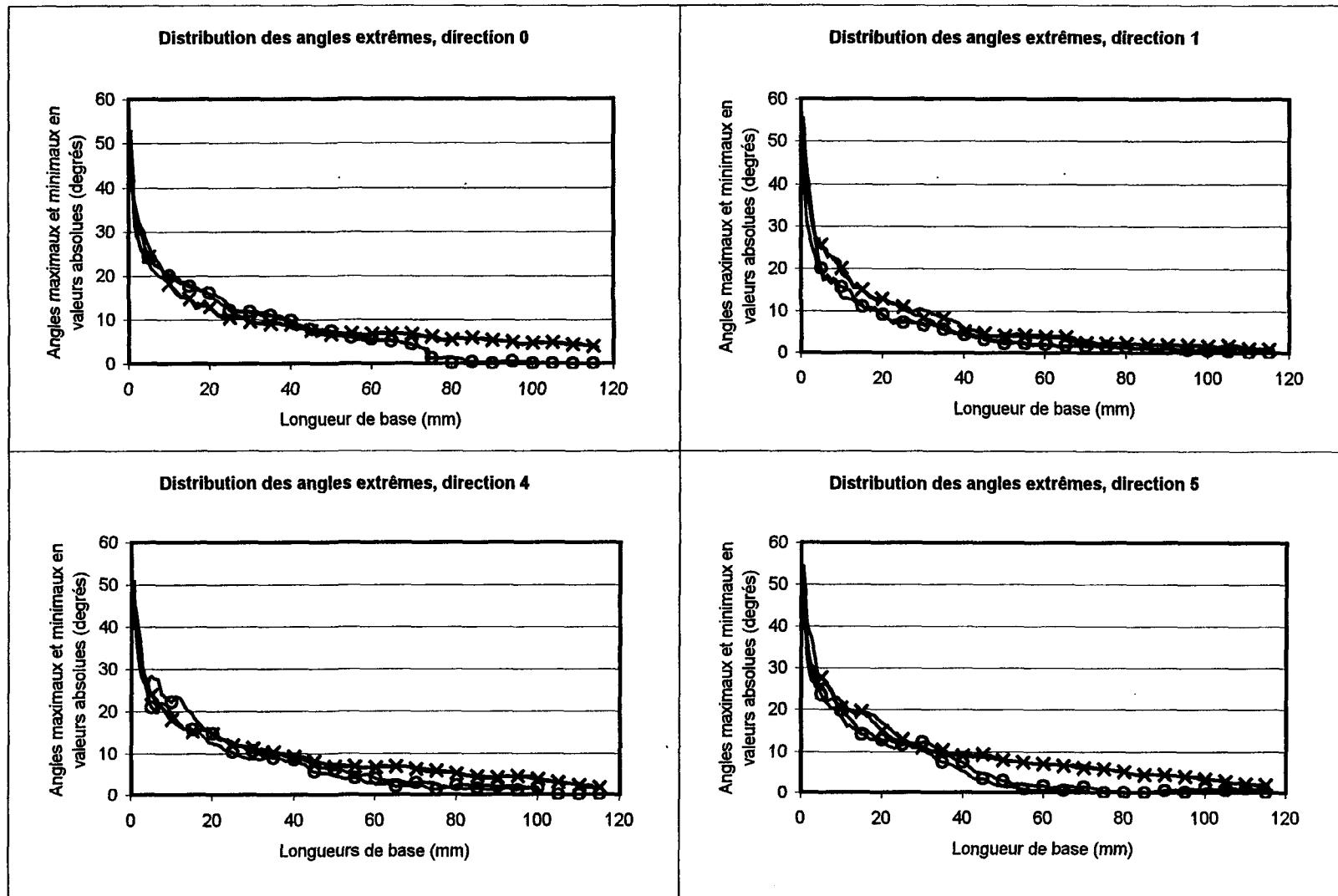


Figure 3.10 Comparaison entre les angles maximaux (croix) et les angles minimaux (cercles, en valeurs absolues) pour les quatre directions.

absolues, en fonction de la longueur de base $n \cdot \Delta x$, sur chacune des deux épontes, pour chaque direction d'enregistrement des profils.

L'examen de cette figure montre que les angles extrêmes minimaux et maximaux, pour une même direction, sont distribués avec des écarts sensibles. En général, la valeur des angles maximaux est plus élevée que celle des angles minimaux. Ceci est facilement explicable puisque les angles maximaux sont les angles orientés dans le sens de la pente générale tandis que les angles minimaux sont les angles orientés dans le sens inverse à la pente générale.

Pour un pas de discréétisation petit, les valeurs des angles extrêmes sont assez similaires. Par contre, la dépendance entre les angles maximaux et minimaux s'accroît de plus en plus avec l'augmentation du pas de discréétisation (figure 3.10).

b) Courbes de dilatance

La dépendance selon le sens du cisaillement a également été étudiée sur les courbes de dilatance. Les résultats obtenus dans un sens de cisaillement ont été comparés à ceux calculés en sens inverse. La figure 3.11 présente, pour chacune des directions étudiées, la courbe de dilatance obtenue pour un cisaillement dans un sens et celle obtenue pour un cisaillement dans le sens opposé.

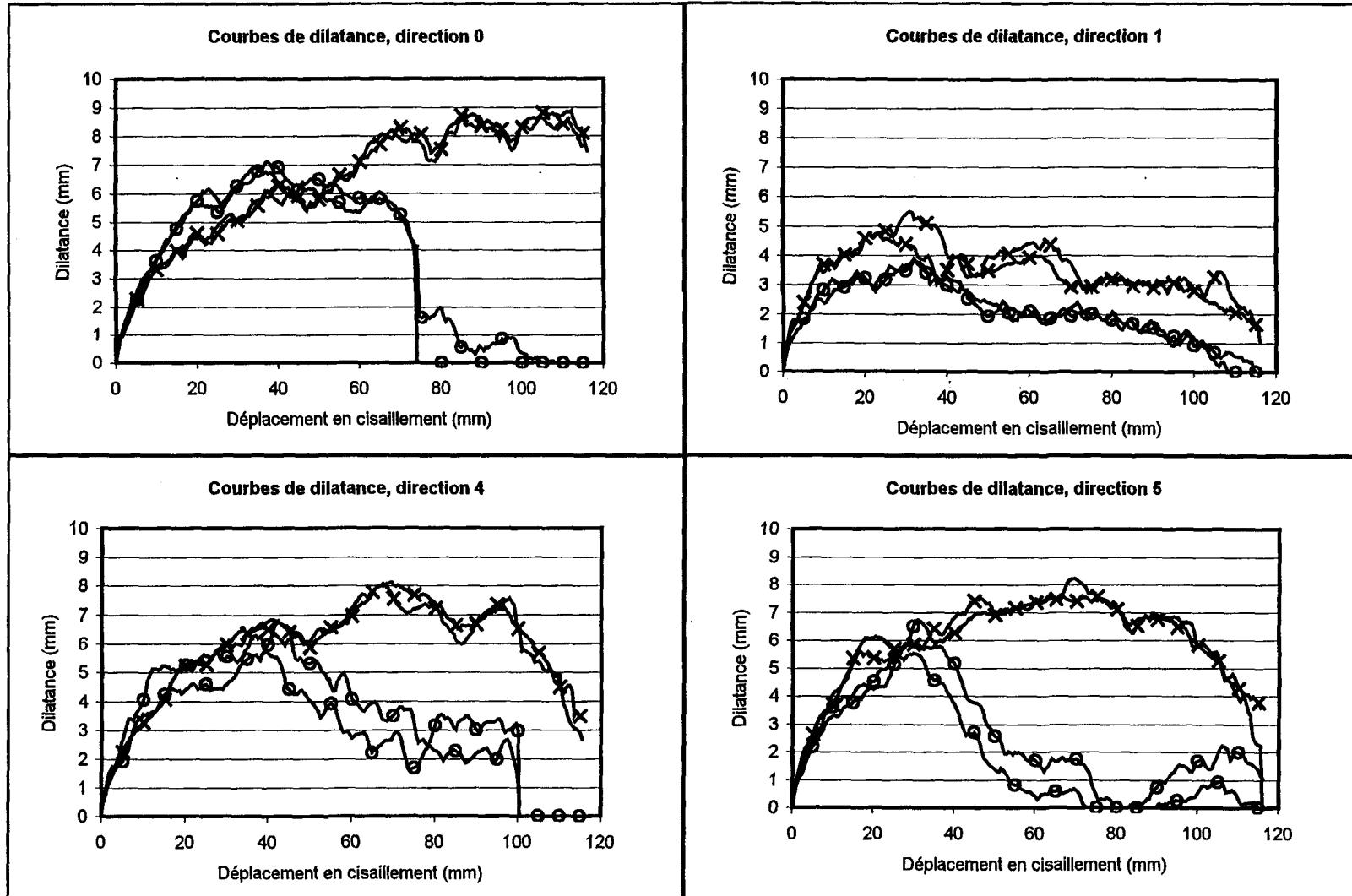


Figure 3.11 Comparaison entre les courbes de dilatance obtenues dans un sens de cisaillement où la pente générale des profils est positive (croix) avec les courbes de dilatance pour un cisaillement dans le sens inverse (cercles) pour chacune des directions à l'étude.

Dans les quatre directions à l'étude, il y a des profils qui présentent une pente non nulle. La dilatance calculée pour un cisaillement effectué selon la pente positive, sens -30° , 60° et 90° , est généralement plus élevée que celle calculée pour un cisaillement en sens inverse, c'est à dire selon la pente négative, sens 150° , 240° et 270° . Comme dans le cas des distributions angulaires, la dépendance selon le sens de cisaillement est négligeable avec un déplacement en cisaillement très petit, par contre, en augmentant la valeur du déplacement en cisaillement le comportement de la dilatance selon le sens de cisaillement devient plus différent.

Les deux figures 3.10 et 3.11 montrent bien que le phénomène de dépendance selon le sens de cisaillement est important. Le comportement de la fracture en dilatance, pour une direction donnée, peut être très différent selon le sens utilisé pour le cisaillement. Aussi, il est nécessaire de tenir compte du sens du cisaillement avant de déterminer le comportement en dilatance de la fracture.

3.2.2. Sensibilité sur le nombre de profils

Les distributions des angles extrêmes, maximaux et minimaux, en fonction de la longueur de base $n \cdot \Delta x$, sont calculées en utilisant les enregistrements des élévations de la surface le long de profils. À partir de ces distributions d'angles, la dilatance est déterminée en fonction du déplacement en cisaillement. Étant donné que les profils fournissent des informations en 2D, il faut utiliser plusieurs profils, dans la même direction, pour éliminer

le plus possible le biais causé par ces informations bidimensionnelles. Une question se pose alors : combien faut-il utiliser de profils, par direction, pour obtenir une précision suffisante de la distribution des angles extrêmes permettant de tracer des courbes de dilatance similaires à celles obtenues expérimentalement?

Pour tenter de répondre à cette question quelques instructions ont alors été ajoutées au programme « Calculdilat » afin qu'il permette à l'utilisateur de choisir le nombre de profils et quels profils devaient être utilisés pour le calcul des angles. L'étude de sensibilité sur le nombre de profil n'a été faite que sur les épontes de 120 mm de diamètre.

Les résultats étant sensiblement les mêmes pour l'éponte inférieure et pour l'éponte supérieure, seules les courbes de dilatance de l'éponte inférieure sont présentées. Pour les mêmes raisons les distributions angulaires ne seront pas présentées puisque les courbes de dilatance résultent directement des ces distributions d'angles et reflètent les mêmes informations. Sur tous les graphiques, où les calculs ont été faits en diminuant le nombre de profils, la courbe de dilatance calculée en utilisant tous les profils est tracée en bleu. Cette courbe permet d'établir une comparaison entre les résultats obtenus en utilisant tous les profils et les résultats en diminuant le nombre de profils.

La façon de procéder, pour calculer les distributions des angles extrêmes en diminuant le nombre de profils, a été la suivante :

- Dans chaque direction au moins huit profils de base ont été prélevés. Dans certaines directions, un ou deux profils supplémentaires ont été enregistrés (tableau 3.1, figure 3.5). Les distributions des angles extrêmes ont été recalculées, dans chaque direction (à l'exception de la direction 1 où aucun profil supplémentaire n'a été prélevé), en utilisant les huit profils de base, sans tenir compte des profils supplémentaires. Les courbes de dilatance qui résultent de ces distributions d'angles sont présentées sur la figure 3.12 (pour plus de détails, figures A2.5 à A2.8).

- Les huit profils de base ne sont pas équidistants (figure 3.5). Les quatre profils centraux (profils 3, 4, 5 et 6) sont plus rapprochés que ceux aux extrémités (profils 1, 2, 7 et 8). Les distributions des angles maximaux et minimaux ont été recalculées en diminuant le nombre de profils centraux :

- Calculs faits sans tenir compte des profils 3 et 5 (profils 1,2,4,6,7,8)
- Calculs faits sans tenir compte des profils 4 et 6 (profils 1,2,3,5,7,8)
- Calculs faits sans tenir compte des profils 4 et 5 (profils 1,2,3,6,7,8)

Les courbes de dilatance qui découlent de ces distributions angulaires sont présentées à la figure 3.13. (les figures A2.9 à A2.12 montrent plus de détails)

- Finalement les distributions des angles extrêmes ont été recalculées en n'utilisant qu'un profil sur deux et qu'un profil sur trois. Les courbes de dilatance résultantes sont

présentées aux figures 3.14 et 3.15 respectivement. Pour plus de détails se référer à l'annexe 2 sur les figures A2.13 à A2.20.

La figure 3.12 montre que le fait de ne pas tenir compte des profils supplémentaires n'affecte pas ou presque pas les courbes de dilatance obtenues. En effet, la courbe de dilatance calculée en n'utilisant que les huit profils de base et en négligeant les profils supplémentaires coïncide presque parfaitement avec la courbe de dilatance calculée en utilisant tous les profils.

De même, le fait de diminuer le nombre de profils centraux n'entraîne pas tellement de variations dans les courbes de dilatance calculées quelque soit la direction du cisaillement (figure 3.13).

C'est en n'utilisant qu'un profil sur deux (figure 3.14) ou qu'un profil sur trois (figure 3.15) que les courbes de dilatance calculées démontrent des écarts sensibles avec les courbes de dilatance provenant de tous les profils. Par contre, il est aussi possible d'observer que négliger un profil sur deux ou un profil sur trois peut aussi donner des résultats similaires à ceux utilisant tous les profils. En résumé, dans certains cas, le fait de négliger plusieurs profils peut avoir un impact très considérable et dans d'autres cas, cela affecte peu ou pas les courbes de dilatance calculées. En fait, tout dépend des profils négligés.

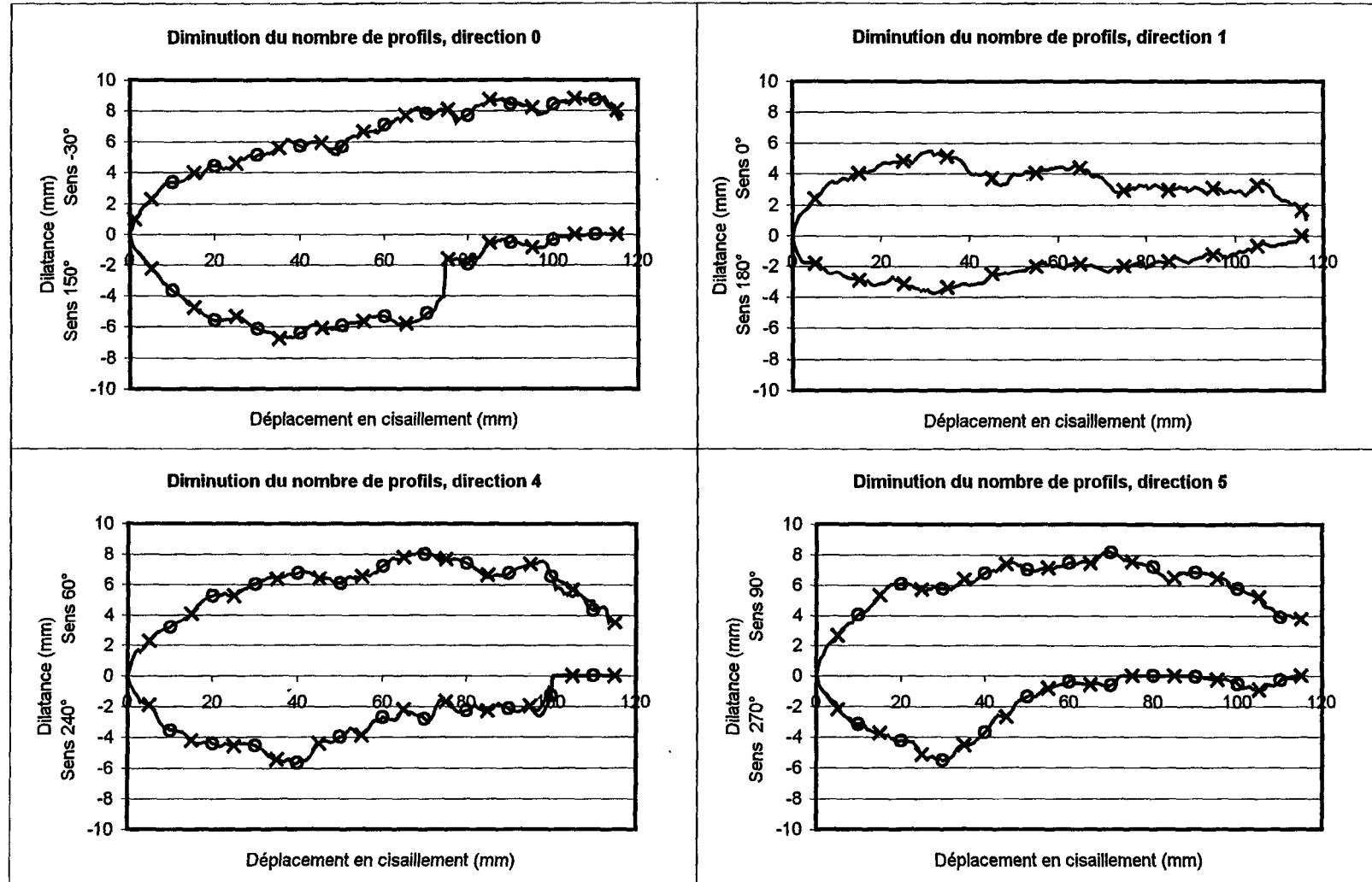


Figure 3.12 Sensibilité sur le nombre de profils. Les calculs sont faits avec les huit profils de base sans tenir compte des profils supplémentaires. Les courbes de dilatance identifiées par les croix sont celles calculées en utilisant tous les profils, les courbes identifiées par les cercles sont calculées en utilisant que les huit profils de base (profils 1,2,3,4,5,6,7,8).

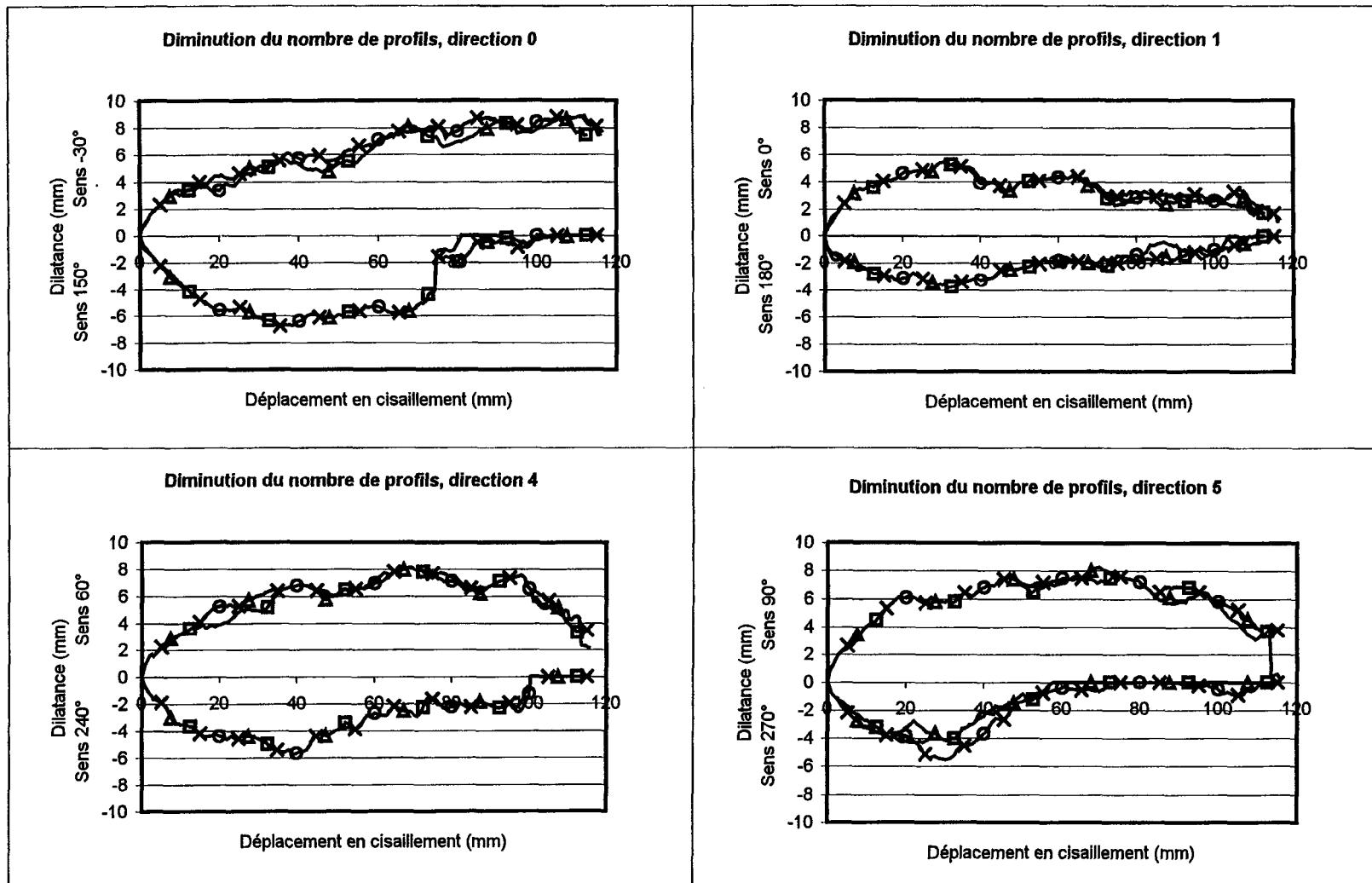


Figure 3.13 Sensibilité sur le nombre de profils. Les calculs sont faits en diminuant le nombre de profils centraux. Les courbes de dilatance sont tracées en utilisant tous les profils (croix), en négligeant les profils 3 et 5 (cercles), en négligeant les profils 4 et 6 (carrées) et en négligeant les profils 4 et 5 (triangles).

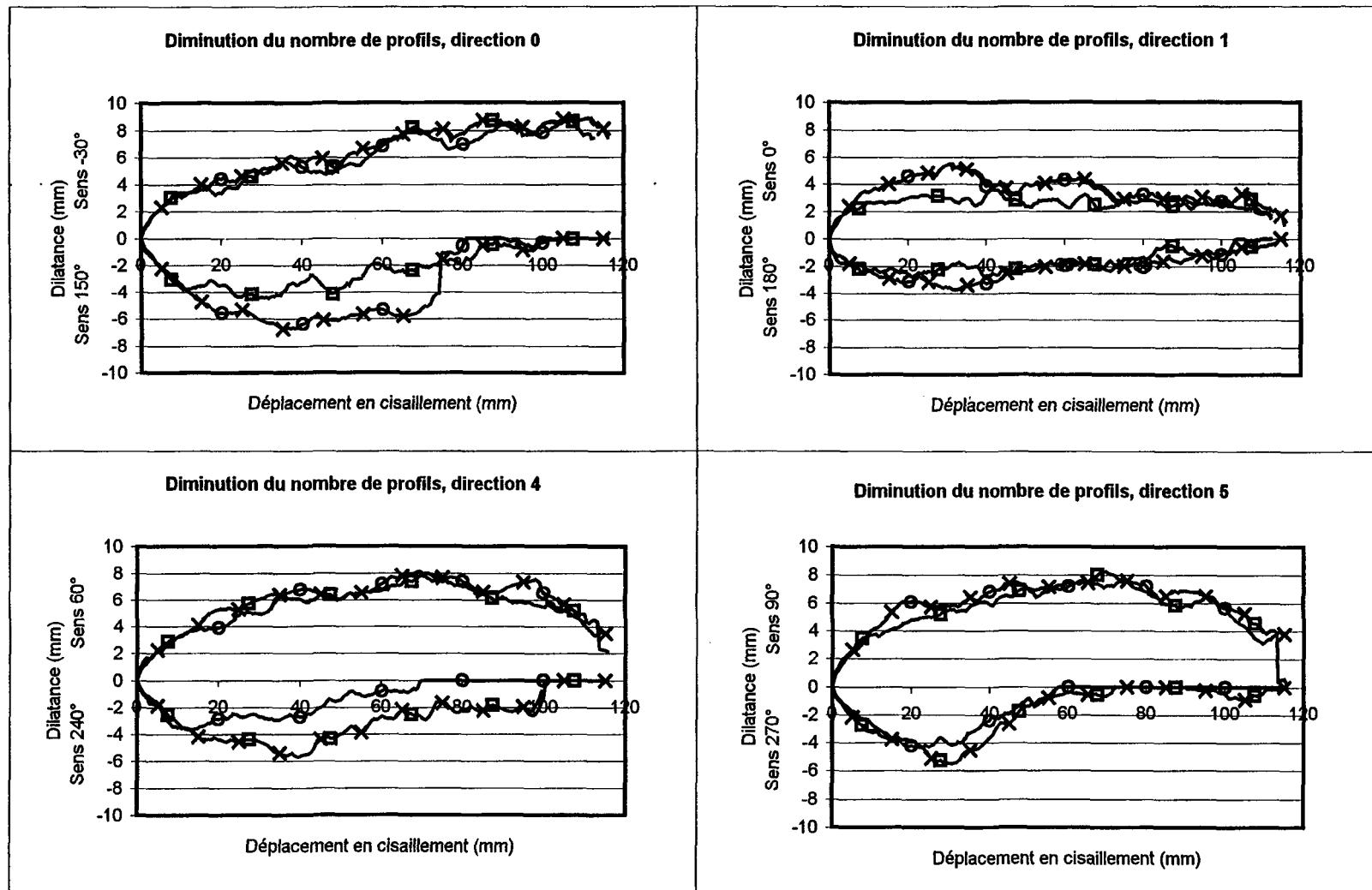


Figure 3.14 Sensibilité sur le nombre de profils. Les calculs sont faits en n'utilisant qu'un profil sur deux. Les courbes de dilatance sont tracées en utilisant tous les profils (croix), en n'utilisant que les profils 1, 3, 5, et 7 (cercles) et en n'utilisant que les profils 2, 4, 6 et 8 (carrées).

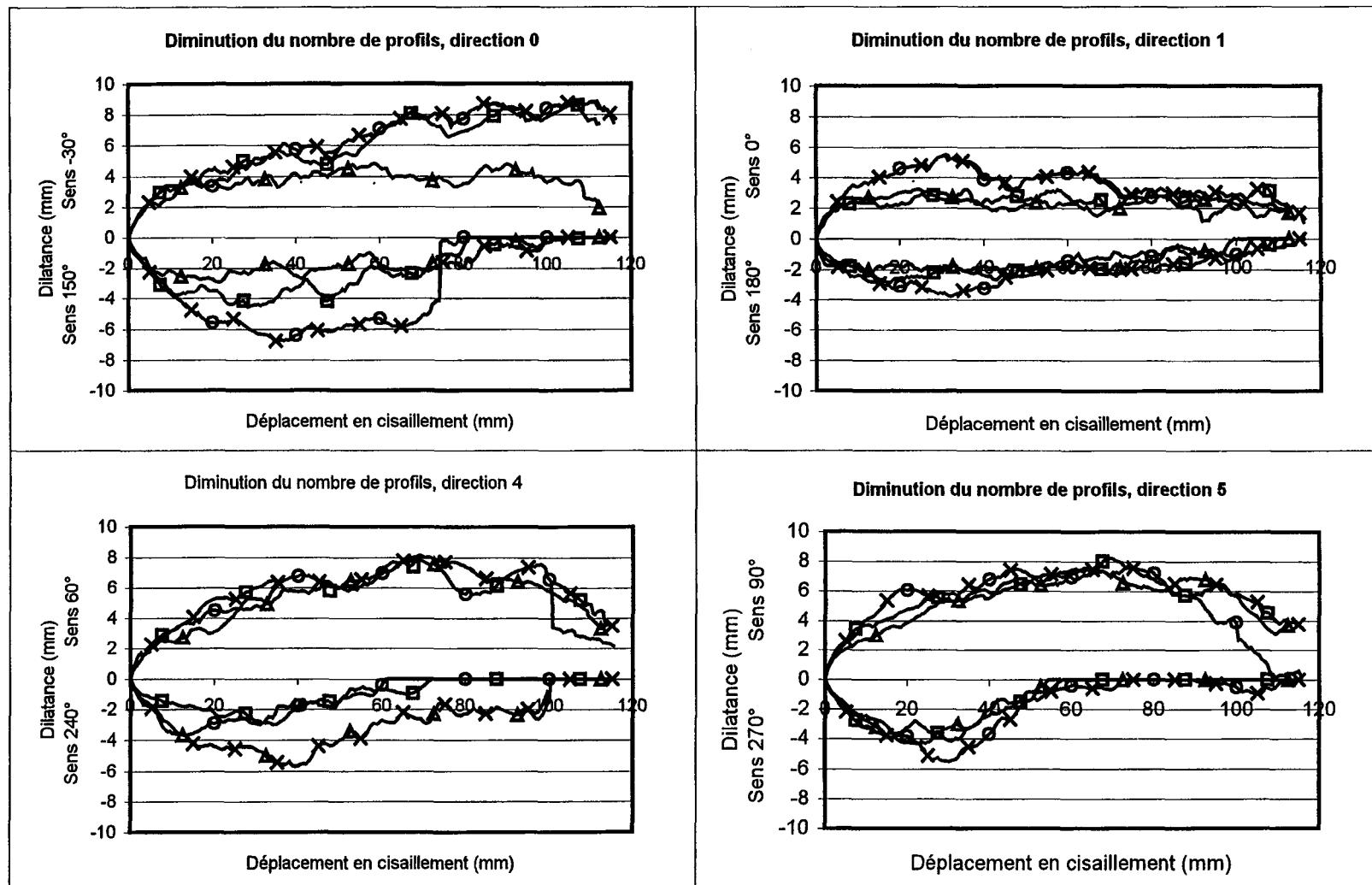


Figure 3.15 Sensibilité sur le nombre de profils. Les calculs sont faits en n'utilisant qu'un profil sur trois. Les courbes de dilatance sont tracées en utilisant tous les profils (croix), en n'utilisant que les profils 1, 4 et 7 (cercles), en n'utilisant que les profils 2, 5 et 8 (triangles) et que les profils 3 et 6 (carrées).

Le programme « CalculDilat », utilisé pour calculer la dilatance en fonction du déplacement en cisaillement, a été construit de manière à ce que chaque fois qu'un angle extrême est retenu, il indique les coordonnées x, y, z des deux points qui forment cet angle. L'analyse de ces coordonnées indique que, pour chaque sens de cisaillement, les angles extrêmes sont localisés sur deux ou trois profils en particulier. Dans certains cas les angles extrêmes proviennent presque exclusivement d'un seul profil. Donc le fait d'enlever ce profil peut provoquer de grandes variations dans le tracé de la courbe de dilatance. Les courbes de dilatance ne sont donc pas tellement sensibles au nombre de profils utilisés mais plutôt à certains profils utilisés pour le calcul des angles. À la limite, seulement deux profils pourraient être utilisés pour obtenir une courbe de dilatance qui serait sensiblement la même que celle obtenue avec tous les profils. Par contre, s'il est difficile de déterminer quel sera le bon profil, il vaut mieux les utiliser tous car les résultats sont ainsi plus fiables. De plus, une fois que les profils sont prélevés, il n'est pas tellement plus long de tous les considérés car les calculs sont effectués avec l'ordinateur ce qui permet d'utiliser beaucoup plus de données sans pour autant augmenter considérablement le temps de calcul. Par contre, si les profils ne sont pas enregistrés, il est préférable de localiser ces profils là où il y a présence de structure plutôt que de prélever des profils à espacement régulier sans se soucier de la morphologie des surfaces.

3.2.3. Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage

Les profils, sur lesquels les enregistrements des élévations ont été réalisés, ont tous été échantillonnés à intervalle constant, $\Delta x = 0,5$ mm. Cette distance entre les élévations est-elle adéquate? Si l'intervalle d'échantillonnage est trop grand, alors des petites structures présentes entre deux élévations consécutives ne seront pas enregistrées. Ces petites structures peuvent pourtant jouer un rôle essentiel dans le contrôle de la dilatance. Si l'intervalle d'échantillonnage est trop petit alors beaucoup trop de données sont utilisées sans raison, un intervalle plus grand donnerait le même résultat. Donc, quel est l'intervalle d'échantillonnage qui doit être utilisé pour obtenir des courbes de dilatance calculées qui correspondent aux courbes de dilatance expérimentales?

Pour répondre à cette question, quelques instructions ont été ajoutées au programme « *Calculdilat* ». Ainsi, des distributions angulaires ont pu être recalculées en changeant l'intervalle d'échantillonnage.

Les enregistrements des profils, où les mesures d'élévation sont prises à tous les 0,5 mm, sont les seuls utilisés dans cette étude. Aussi, il n'est pas possible de prendre un intervalle inférieur à 0,5 mm. Par contre, il est facile d'obtenir un intervalle d'échantillonnage plus grand, par exemple de 1 mm, 1,5 mm ou 2 mm en n'utilisant qu'une valeur sur deux, sur trois ou sur quatre.

Les distributions angulaires ont été recalculées en utilisant différents intervalles d'échantillonnages. La figure 3.16 montre les courbes de dilatance où les distributions angulaires ont été calculées en utilisant les profils ayant des intervalles d'échantillonnage de 1, 2, 3, 4 et 5 mm pour la direction 0 de l'éponte inférieure, tandis que le graphique 3.17 montre les mêmes calculs de courbes de dilatance mais pour l'éponte supérieure dans la direction 5.

Sur les deux figures les courbes de dilatance calculées avec un pas de discréétisation de $\Delta x = 0,5$ mm ont été tracée afin de permettre une comparaison avec les autres courbes calculées à pas plus grands.

La comparaison montre que la courbe de dilatance calculée avec un pas de $\Delta x = 1$ mm coïncide presque parfaitement avec celle calculée avec un pas de $\Delta x = 0,5$ mm. À l'exception du cisaillement selon la pente négative dans la direction 5, les courbes de dilatance calculées avec un pas de discréétisation de $\Delta x = 2$ et 3 mm concordent bien avec la courbe tracée pour un pas de $\Delta x = 0,5$ mm. Par contre, les courbes de dilatance calculées en utilisant des pas de $\Delta x = 4$ et 5 mm donnent des résultats inférieurs aux valeurs obtenues avec un pas de $\Delta x = 0,5$ mm. En résumé, les courbes de dilatance peuvent être calculées avec un pas de discréétisation de 1 mm sans changer les valeurs de dilatance obtenues. Un pas de discréétisation de 2 ou de 3 mm donne aussi de très bons résultats mais peut toutefois sous estimer la dilatance, il faut être plus prudent. Les résultats obtenus avec des pas de 4 et

Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage, éponte inférieure, direction 0

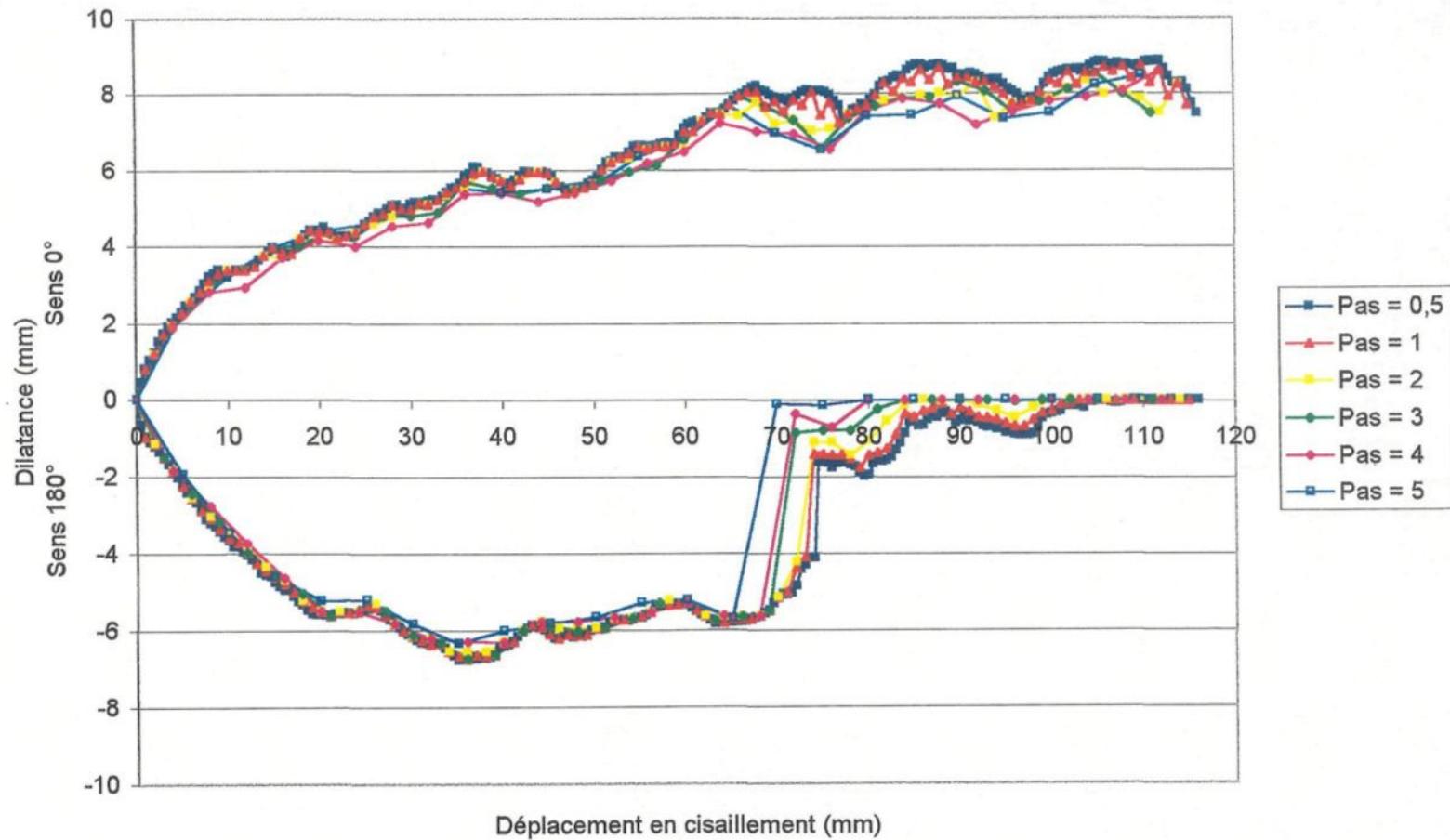


Figure 3.16. Sensibilité de l'intervalle d'échantillonnage sur l'éponte inférieure dans la direction 0. Les courbes de dilatance sont calculées avec un intervalle d'échantillonnage de 0,5, 1, 2, 3, 4 et 5 mm.

Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage, éponte supérieure, direction 5

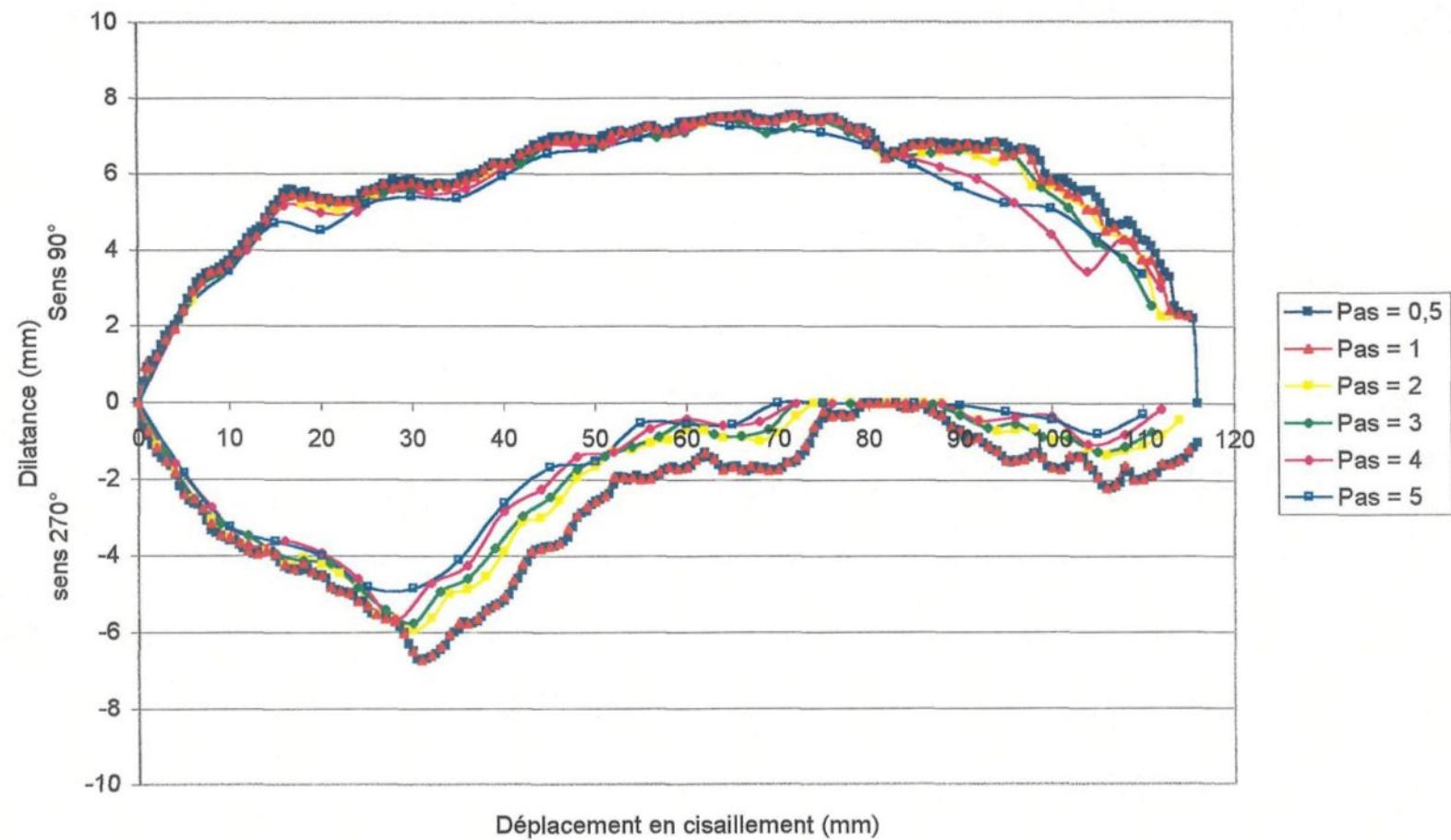


Figure 3.17. Sensibilité sur l'intervalle d'échantillonnage sur l'éponte supérieure dans la direction 5. Les courbes de dilatance sont calculées avec un intervalle d'échantillonnage de 0,5, 1, 2, 3, 4 et 5 mm.

de 5 mm entraîne des écarts plus appréciables mais se situent près des valeurs obtenues avec un pas de 0,5 mm.

Évidemment si les élévations sur les profils sont enregistrées à tous les 0,5 mm, il est préférable d'utiliser cette valeur comme pas de discréétisation puisque ce n'est pas tellement plus long en temps de calculs. Par contre, si les profils ne sont pas enregistrés et que prendre une valeur d'élévation à tous les 1 mm peut économiser du temps et de l'argent comparativement à une élévation tous les 0,5 mm, il est peut être préférable de prendre un intervalle de 1 mm puisque cette valeur semble donner d'aussi bons résultats que l'intervalle de 0,5 mm.

3.2.4. Dimension de la fracture

Les distributions des angles maximaux et minimaux ont également été calculées sur les surfaces de la fracture de 90 mm de diamètre. Cette fracture est exactement la même que celle de 120 mm de diamètre à l'exception qu'un anneau de 15 mm a été enlevé en périphérie pour ne conserver que le centre de la fracture. Les distributions des angles extrêmes, en fonction de la longueur de base $n \cdot \Delta x$, ont été calculées, sur ces petites surfaces, afin d'établir une comparaison avec les surfaces de 120 mm. Cette comparaison permet de vérifier si les angles sont répartis de façon uniforme sur les épontes ou bien si des structures, non présentes sur les surfaces de dimension moindre, entraîneront des distributions d'angles différentes.

La figure 3.18 montre les distributions des angles extrêmes, calculée dans chaque direction, pour l'éponte inférieure et pour l'éponte supérieure, sur la fracture de 90 mm et sur celle de 120 mm de diamètre. La figure 3.19 présente les courbes de dilatance qui résultent de ces distributions d'angles calculées pour la fracture de 90 mm et celle de 120 mm (Ces résultats sont repris en annexe aux figures A2.21 à A2.24).

La comparaison des distributions angulaires montre que dans certains cas, surtout pour les distributions d'angles maximaux, les valeurs des angles extrêmes obtenues pour les fractures de 90 et de 120 mm de diamètre, sont assez semblables. Par contre, dans d'autres cas, les angles extrêmes mesurés sur les surfaces de plus petites tailles ont des valeurs nettement inférieures à celles retrouvées pour les surfaces de 120 mm de diamètre. Les mêmes observations peuvent être faites en examinant les courbes de dilatance.

Ces résultats démontrent une dépendance sur la dimension de l'échantillon pour prédire le comportement en dilatance d'une fracture de plus grande dimension en cisaillement. En effet, des structures présentes en périphérie de la surface de 120 mm peuvent créer de la dilatance que la morphologie des épontes de 90 mm de diamètre ne démontrent pas. Dans ce cas, les courbes de dilatance obtenues à partir des surfaces de petites dimensions seront inférieures aux courbes de dilatance calculées pour la fracture de 120 mm.

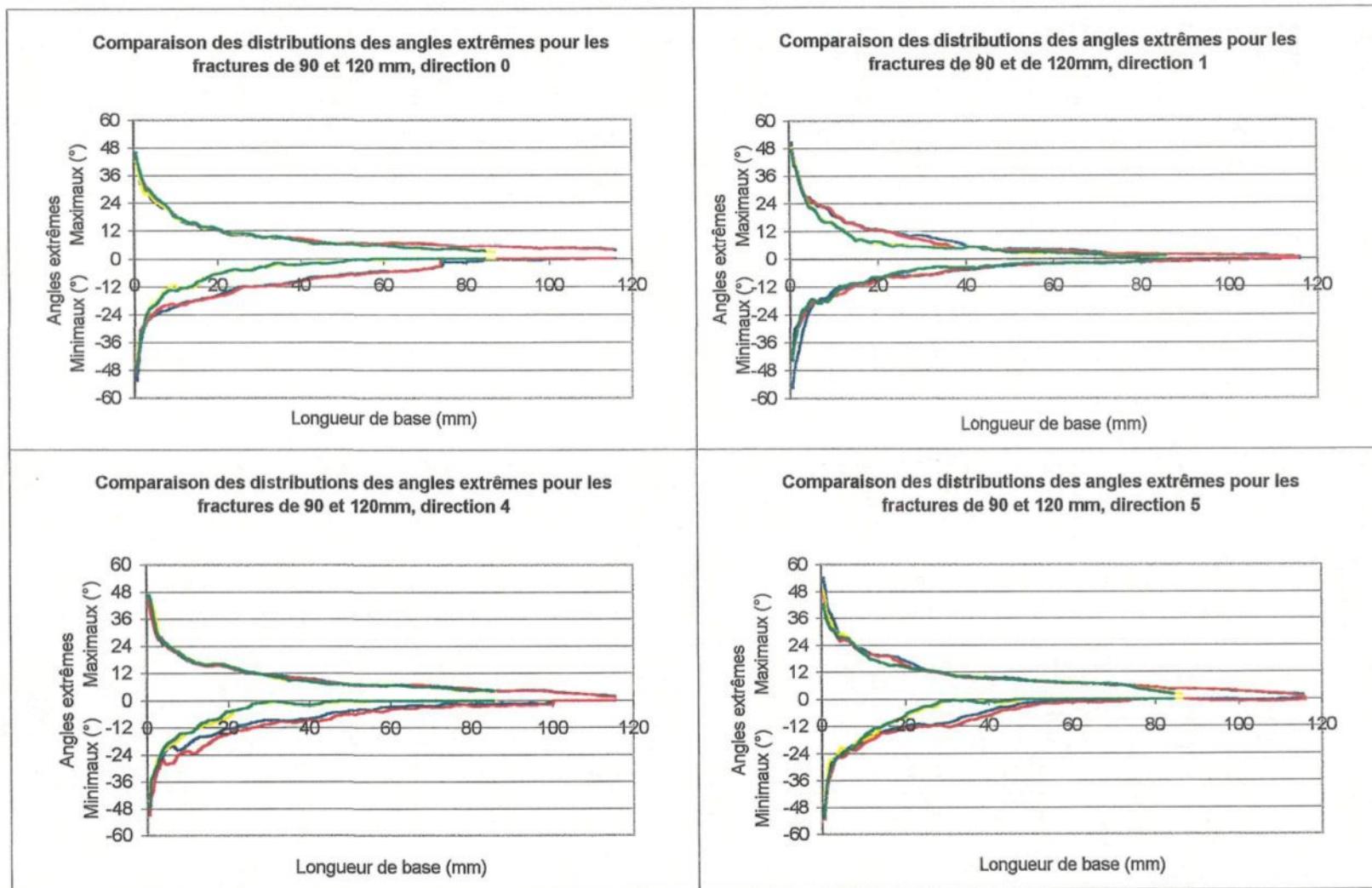


Figure 3.18. Comparaison des distributions angulaires obtenues pour les fractures de 90 et de 120 mm de diamètre. Les résultats pour la fracture de 90 mm ont été calculés sur la surface inférieure (en jaune) et sur la surface supérieure (en vert). De même, pour la fracture de 120 mm les calculs ont été faits sur la surface inférieure (en bleu) et sur la surface supérieure (en rouge).

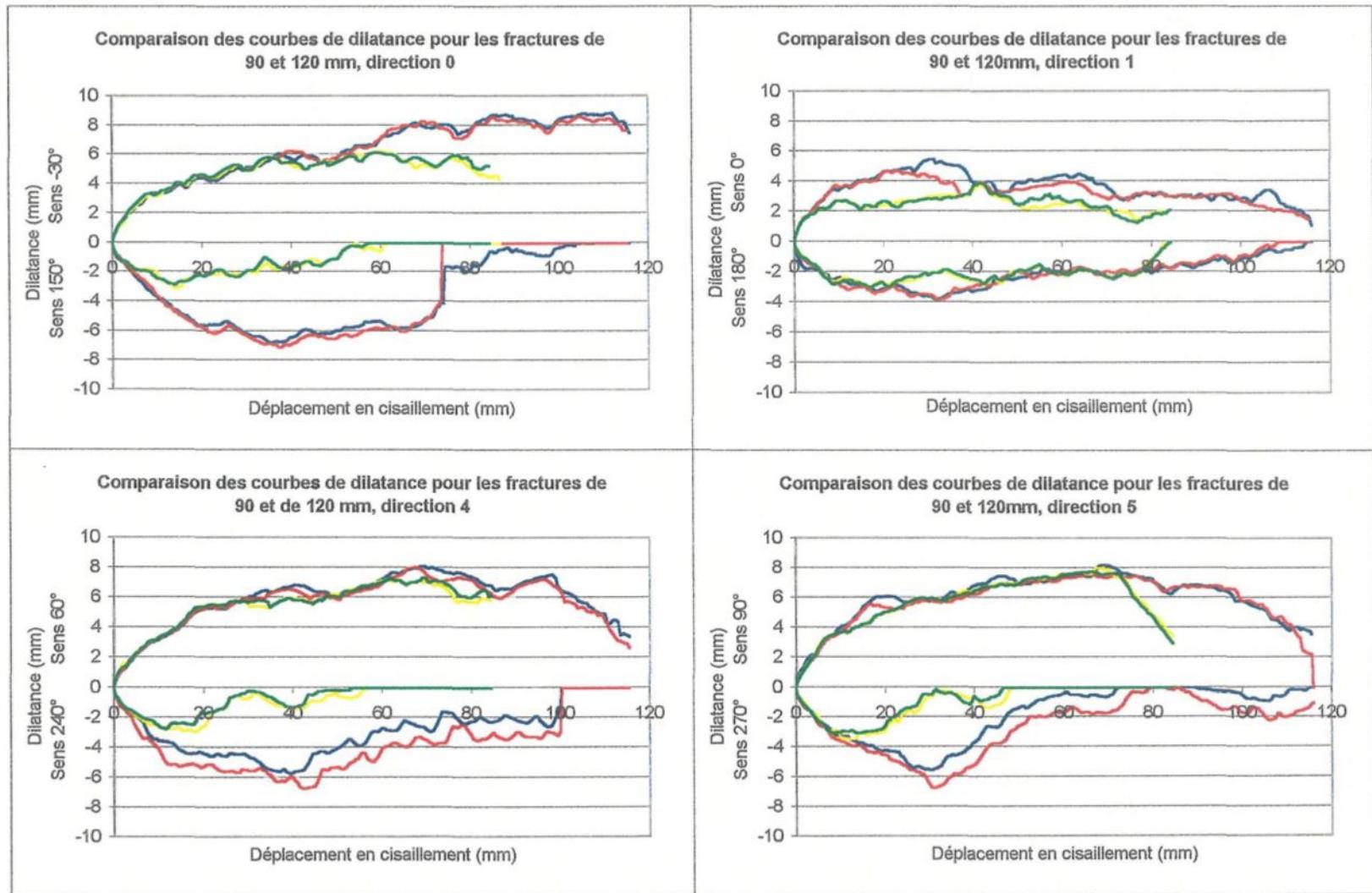


Figure 3.19. Comparaison des courbes de dilatance obtenues pour les fractures de 90 et 120 mm de diamètre. Les résultats pour la fracture de 90 mm ont été calculées sur la surface inférieure (en jaune) et sur la surface supérieure (en vert). De même, pour la fracture de 120 mm, les calculs ont été faits sur la surface inférieure (en bleu) et sur la surface supérieure (en rouge).

La raison qui explique pourquoi les distributions d'angles minimaux sont plus sensibles à la dimension des épontes, comparativement aux distributions d'angles maximaux, est plus difficile à évaluer. Il est possible qu'il y ait plus d'angularités orientées selon la pente négative en périphérie des surfaces de 120 mm. Cela ferait en sorte que les valeurs des angles extrêmes minimaux seraient plus élevées pour ces surfaces que pour la fracture de 90 mm de diamètre.

3.2.5. Sensibilité sur la localisation du point de départ sur les profils

Lors de la détermination de la distribution angulaire, le calcul des angles débute avec le premier point du premier profil. Si les calculs étaient refaits, en changeant le point de départ, la distribution angulaire obtenue serait-elle la même? En fait, la localisation du point de départ n'a pas d'influence sur la détermination de la distribution des angles extrêmes donc le résultat serait exactement le même.

La méthode proposée, pour obtenir la distribution angulaire, utilise tous les points de tous les profils pour déterminer les angles. Peu importe que le programme commence par le premier point ou par celui de centre puisque toute la longueur du profil est étudiée et tous les angles sont calculés.

CHAPITRE 4

VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DES COURBES DE DILATANCE D'UNE FRACTURE EN CISAILLEMENT SOUS CONTRAINTE NORMALE NULLE

Les chapitres précédents, ont permis de calculer les courbes de dilatance, à contrainte normale nulle, en utilisant le logiciel « CalculDilat », à partir des profils prélevés sur les surfaces d'une fracture. Afin de vérifier la validité de la méthode de détermination de ces courbes, des essais expérimentaux de cisaillement direct, à contrainte normale nulle, ont été effectués sur des répliques de cette fracture.

4.1 Caractéristiques des éprouvettes utilisées

Pour la réalisation des essais de cisaillement, les surfaces inférieure et supérieure de la fracture ont été reproduites par moulage. Les éprouvettes utilisées ont été moulées par E. Lamontagne (doctorat en cours). Tous les détails concernant la préparation des répliques sont décrits par Flamand et al. 1994, Archambault et al. 1995 et Flamand (doctorat en cours). Les répliques et les surfaces originales, sont circulaires et ont un diamètre de 120 mm.

Le mortier, utilisé pour le moulage des épontes, possède un comportement mécanique similaire à celui des roches granitiques. Des essais de compression uniaxiale, de

tension et des mesures de déformations sur les répliques des surfaces de la fracture ont permis de déterminer les propriétés mécaniques du mortier (Flamand et al. 1994, Archambault et al. 1995, Flamand (doctorat en cours)) :

$$\sigma_c = 82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = -6.6 \text{ MPa}$$

$$E = 32\,200 \text{ MPa}$$

$$\phi_b = 37^\circ$$

Quelques gouttes d'un colorant spécial ont été ajoutées dans la composition du mortier utilisé pour le moulage de l'éponte inférieure. Ainsi, les répliques de la surface inférieure sont donc de couleur rose, tandis que les répliques de la surface supérieure demeurent grises. Cette coloration est effectuée dans le but d'obtenir une meilleure observation des zones endommagées, sur les surfaces de la fracture, après les essais de cisaillement.

4.2 Montage expérimental d'essai de cisaillement d'une fracture sous contrainte normale nulle

Les essais expérimentaux ont été effectués à l'UQAC sur un banc de cisaillement spécialement conçu pour cette étude. Le montage a été réalisé de façon à reproduire, le plus fidèlement possible, un déplacement en cisaillement de l'éponte inférieure par rapport à l'éponte supérieure, à contrainte normale nulle.

4.2.1 Montage pour essais de cisaillement sur une fracture

Le banc de cisaillement utilisé pour les essais expérimentaux est illustré à la figure 4.1. Il est principalement constitué de deux plateaux, inférieur et supérieur, dans lesquels sont insérées les répliques inférieure et supérieure de la fracture. Le plateau inférieur est posé sur un système de roulement à billes linéaire qui lui permet un déplacement horizontal seulement (gauche à droite, droite à gauche). Le plateau supérieur ne peut se déplacer horizontalement, il est maintenu fixe dans ce sens. Par contre, un roulement à billes linéaire lui permet de se déplacer verticalement (bas en haut, haut en bas) (figure 4.1).

Les répliques des surfaces inférieure et supérieure ont chacune été préalablement collées dans un moule circulaire qui s'insère parfaitement dans la cavité de chacun des deux plateaux inférieur et supérieur. Les moules contenant les épontes, sont maintenus à l'intérieur des plateaux par des vis à ailettes.

Le plateau et le moule inférieur sont en acier tandis que le plateau supérieur ainsi que le moule supérieur sont conçus en aluminium de façon à ce qu'ils soient légers pour simuler une contrainte normale nulle ou presque nulle. La masse de l'éponte supérieure ainsi que celles du plateau et du moule supérieurs ont été pesées et donnent 4,59 kg. Si cette masse est répartie uniformément sur toute la surface alors la contrainte normale appliquée est de $\sigma_n = 3,98 \text{ kPa}$. Cette valeur est très faible, par contre, lors du cisaillement l'aire de contact est inférieure à l'aire de la surface de la fracture, aussi, la contrainte normale

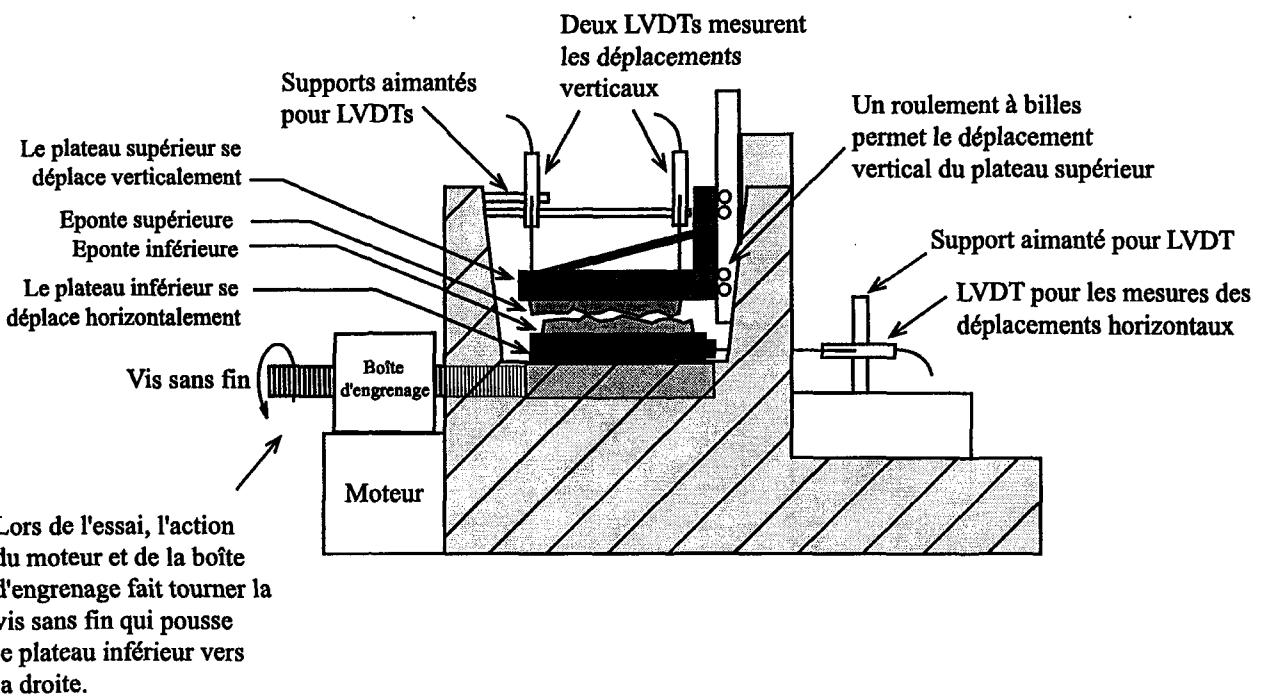


Figure 4.1 Banc de cisaillement conçu pour les essais expérimentaux.

appliquée est plus élevée. Toutefois cet ordre de grandeur de σ_n est tout de même suffisamment faible. Il est assez difficile de réaliser un montage plus léger mais tout aussi rigide afin de prévenir le basculement. En effet, le support supérieur doit être construit assez solidement pour éviter que l'éponte supérieure ne bascule lors du déplacement de l'éponte inférieure.

Avant le début de l'essai, les répliques inférieure et supérieure sont insérées dans leur plateau respectif. Les deux épontes de la fracture sont parfaitement enchevêtrées (figure 4.2a). Le déplacement s'effectue à l'aide d'un moteur qui actionne une vis sans fin entraînant le déplacement horizontal du plateau inférieur, contenant l'éponte inférieure, vers la droite (figures 4.1 et 4.2b). Le support supérieur, fixé horizontalement, retient l'éponte supérieure à sa position d'origine selon l'horizontal. Ce mécanisme provoque un déplacement en cisaillement (Δx) de l'éponte inférieure par rapport à l'éponte supérieure. Le mouvement qui se produit alors entre les deux épontes provoque un frottement et un chevauchement des aspérités sur les surfaces de la fracture. Ce chevauchement entraîne un déplacement vertical (Δh) en dilatance de l'éponte supérieure par rapport à l'éponte inférieure (figure 4.2b).

4.2.2 Système de mesure des déplacements

Les déplacements verticaux (Δh) de la surface supérieure et les déplacements horizontaux (Δx) de la surface inférieure sont mesurés en utilisant trois LVDTs (*Linear*

Au départ, les surfaces sont parfaitement enchevêtrées.

Le déplacement en cisaillement de l'éponte inférieure par rapport à l'éponte supérieure provoque le chevauchement des aspérités et la dilatance.

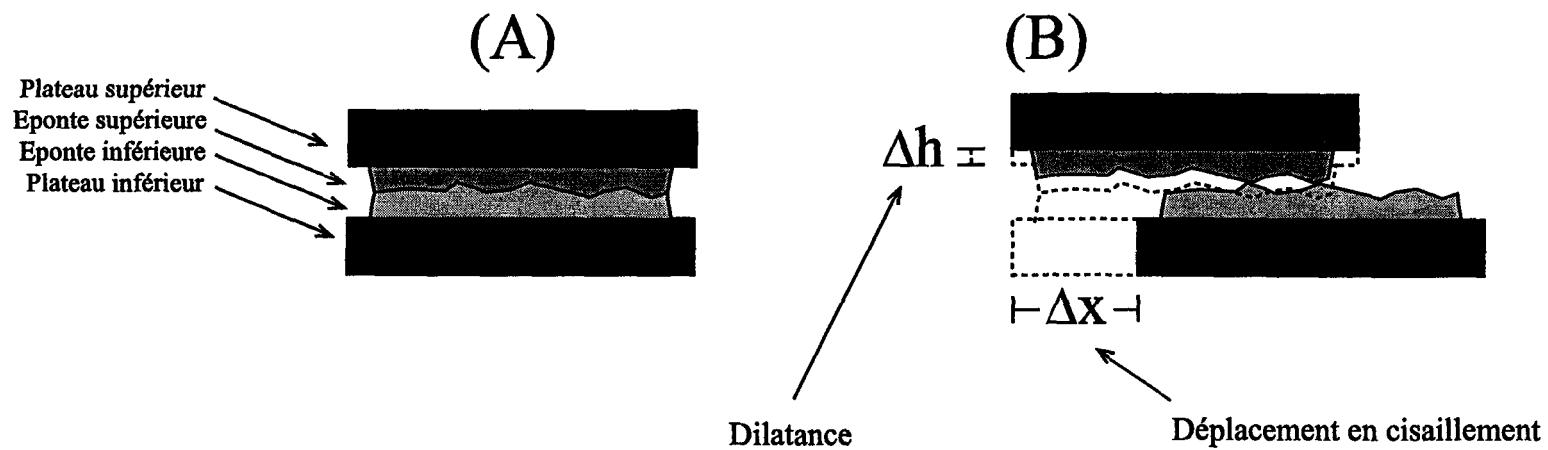


Figure 4.2 Déplacement de l'éponte inférieure et de l'éponte supérieure lors des essais de cisaillement. A) Au départ, les deux surfaces de la fracture sont parfaitement enchevêtrées. B) Le déplacement en cisaillement de l'éponte inférieure provoque, sur les surfaces, un frottement et un chevauchement des aspérités ce qui entraîne le déplacement en dilatance de l'éponte supérieure.

Variable Differential Transducer). Deux de ces instruments de mesure sont attachés sur la paroi fixe du banc de cisaillement à l'aide d'un support aimanté et leur tige repose sur le dessus du plateau supérieur dans lequel est encastrée l'éponte supérieure (figure 4.1). Ces deux LVDTs sont placés dans deux coins opposés du plateau supérieur et servent exclusivement aux mesures des déplacements verticaux (Δh).

Le troisième LVDT sert à mesurer les déplacements horizontaux (Δx) de l'éponte inférieure. L'instrument de mesure est maintenu en position par un support aimanté à une paroi fixe du banc de cisaillement. Le bout de la tige du LVDT est fileté pour permettre de la fixer à l'extrémité du plateau inférieur lequel contient l'éponte inférieure (figure 4.1). Lorsque le plateau inférieur se déplace avec la surface inférieure, la valeur du déplacement en cisaillement est mesurée par le déplacement de la tige du LVDT.

En ce qui concerne les déplacements verticaux (Δh), deux instruments de mesure sont utilisés au lieu d'un seul dans le but de vérifier s'il y a basculement de l'éponte supérieure lors des essais de cisaillement. En théorie, le support supérieur est conçu assez solidement et l'éponte supérieure y est encastrée pour ne permettre aucun basculement. La comparaison entre les résultats des deux LVDTs montre que les déplacements verticaux mesurés sont sensiblement les mêmes (± 0.05 mm) et qu'il n'y a effectivement pas de basculement de l'éponte supérieure. Lors de l'analyse des résultats, la valeur du déplacement vertical utilisée est celle obtenue par la moyenne des deux LVDTs.

Calibrage des LVDTs

Avant d'utiliser les LVDTs pour les mesures de déplacements, il est nécessaire de s'assurer de la linéarité de ces capteurs et de les calibrer afin de déterminer la correspondance en longueur, pour une réponse en voltage donnée par ces instruments de mesure. Pour ce faire, des cales de précisions sont utilisées. Ces cales ont une précision de ± 0.0001 mm. Lors du calibrage, le LVDT est maintenu au niveau par un support métallique au-dessus d'une surface bien horizontale. Une cale est déposée entre la tige du LVDT et la surface horizontale. Il suffit d'enregistrer, en utilisant le système d'acquisition de données, le voltage correspondant pour cette épaisseur de cale. Pour avoir une meilleure précision, ces mesures sont répétées en changeant l'épaisseur de la cale. Finalement, pour chacun des trois LVDTs, un déplacement de 1 mm procure la différence de voltage suivante :

LVDT 1 = 151,6 mVolt/mm

LVDT 2 = 70,5 mVolt/mm

LVDT 3 = 72,2 mVolt/mm

4.2.3 Acquisition des données

L'acquisition des données s'est fait au moyen d'un ordinateur 486 DX2-66 MHz. À l'intérieur, une carte d'acquisition AT-MIO-16X, fabriquée par la compagnie *National*

Instruments, a été incluse. Trois des seize canaux de cette carte ont été utilisés pour enregistrer les signaux des trois LVDTs mesurant les déplacements horizontaux (Δx) et verticaux (Δh) lors de l'essai.

Le contrôle de l'acquisition des données se fait à l'aide du logiciel LabVIEW, fabriqué par la compagnie *National Instruments*. Ce logiciel, contrairement à la plupart des autres applications servant à développer des programmes, n'utilise pas un langage basé sur le texte pour créer des lignes de codes mais utilise un langage de programmation graphique, le langage G, pour créer des programmes sous forme de diagrammes. Les programmes réalisés avec LabVIEW sont des instruments virtuels car leur apparence et leur opération imitent celles de vrais instruments.

Ce logiciel est composé d'une face avant et d'un diagramme. La face avant sert d'interface à l'utilisateur pour commander les entrées et observer les sorties du système d'instrumentation. La face avant peut contenir des interrupteurs, des boutons, des graphiques, et bien d'autre instruments de contrôle et d'indicateurs. LabVIEW fournit une grande variété de commandes servant à la construction de l'interface. Le diagramme est le code source des instruments virtuels. Le diagramme est construit en sélectionnant les icônes de fonction (fonctions arithmétiques, des instruments virtuels d'acquisition et d'analyse). Les icônes sont connectées avec des fils qui transmettent les données d'une icône vers la suivante.

Le programme réalisé pour cette étude utilise des sous programmes développés et fournis à l'intérieur du logiciel. Le programme, avec ses sous programmes, permet l'acquisition en continue des trois signaux électriques provenant des trois LVDTs. La visualisation en simultané, à l'écran, de l'acquisition des données permet d'avoir un meilleur suivi de ce qui se passe durant les essais.

Afin d'éliminer tous les bruits de fond, qui auraient pour effet de fausser les résultats, chaque valeur enregistrée durant l'essai correspond à une moyenne de plusieurs données lues en un certain temps. En effet, des instructions sont données, en utilisant le logiciel, afin que la valeur enregistrée corresponde à la moyenne de 1000 données lues à raison de 1000 lectures par seconde. Ce qui veut dire qu'à chaque seconde une valeur est enregistrée et cette valeur correspond à une moyenne de 1000 lectures.

L'enregistrement des données se fait dans un fichier sur le disque dur de l'ordinateur. Certaines icônes ont été ajoutées dans le diagramme afin que le programme transforme avant l'enregistrement, pour chacun des trois signaux, les valeurs obtenues en terme de voltage par les valeurs correspondantes en mm en utilisant les trois facteurs de conversion calculés lors du calibrage des trois LVDTs.

4.2.4 Protocole expérimental

Avant de procéder à un essai expérimental, il faut déterminer la direction du cisaillement. Les courbes de dilatance calculées, en utilisant le logiciel CalculDilat, ont été tracées pour les quatre directions d'enregistrement des profils, soient les directions 0, 1, 4 et 5 à -30° , 0° , 60° et 90° du point de repère. Aussi, les essais de cisaillement ont donc été effectués selon les mêmes directions. Dans chacune de ces quatre directions, le cisaillement a été réalisé dans les deux sens (dextre et sénestre).

Lorsque la direction et le sens de cisaillement sont déterminés, les deux répliques de la fracture doivent être insérées, dans leur plateau respectif, selon cette direction et ce sens. Sur le plateau inférieur, des entailles ont été faites pour marquer l'orientation des directions 0, 1, 4 et 5. La réplique de l'éponte inférieure est ajustée dans le plateau inférieur selon la direction choisie. Par exemple si le cisaillement se fait dans la direction 4, à 60° du point de repère, le pion qui se trouve sur la réplique inférieure est aligné, sur le plateau inférieur, avec l'entaille située à 60° du point de repère. Puis, l'éponte supérieure est ajustée sur l'éponte inférieure de manière à ce qu'elles soient parfaitement enchevêtrées. Par la suite, il faut descendre le plateau supérieur sur l'éponte supérieure afin que l'éponte supérieure soit encastrée à l'intérieur du plateau supérieur. Les vis à ailettes doivent être bien serrées pour maintenir les deux épontes bien en place.

Avant de mettre le moteur en marche, il faut s'assurer que tous les branchements sont bien faits. Il faut vérifier que les trois canaux de la carte d'acquisition de données reçoivent bien les signaux provenant des trois LVDTs lors de leurs déplacements. Une fois que tout est en place, les LVDTs sont mis à zéro et l'essai peut commencer. Le moteur est mis en marche. La vitesse du moteur peut être ajustée pour être plus ou moins rapide. Tous les essais ont été réalisés à la vitesse maximale ce qui donne un taux de déplacement d'environ deux millimètres par minute. Les valeurs des déplacements horizontaux (Δx) et verticaux (Δh) sont enregistrées tout au long de l'essai. Après 50 mm de déplacement en cisaillement de l'éponte inférieure par rapport à l'éponte supérieure, l'essai est arrêté. La durée de l'essai est d'un peu moins de 30 minutes.

Les quatre directions ont été cisaillées dans les deux sens. Une fois ces huit essais réalisés, une deuxième série d'essai a été effectuée. Les mêmes répliques de la fracture ont été utilisées pour la deuxième série et les huit essais ont été refaits, dans les mêmes directions et sens, ceci pour revérifier les résultats des essais. La comparaison entre les deux séries d'essais montre que les résultats obtenus sont semblables ce qui démontre que les résultats sont reproductibles. Tous les essais expérimentaux ont été effectués sur la même réplique de la fracture. L'examen visuel des surfaces après cisaillement montre qu'il y a certaines petites zones qui ont été endommagées en raison de la faible contrainte normale appliquée lors du cisaillement. Des petits copeaux roses ont été arrachés et collés sur l'éponte grise et vice versa. Par contre, ces dégradations sont très minimes et très peu

nombreuses. Les deux épontes, après les deux séries d'essais de cisaillement, sont demeurées pratiquement intactes.

4.3 Les courbes de dilatance expérimentales en fonction du sens et de l'orientation du cisaillement sur la fracture.

Chaque essai fourni les déplacements verticaux (déplacements en dilatance) en fonction des déplacements horizontaux (déplacements en cisaillement) dans une direction et un sens de cisaillement. Les courbes de dilatance sont obtenues directement en rapportant sur un graphique, pour chacun des essais effectués, les valeurs des déplacements en dilatance en fonction de la valeur des déplacements en cisaillement.

En tout huit courbes de dilatance ont été tracées : une courbe dans chacun des deux sens de cisaillement pour les quatre directions à l'étude. La figure 4.3 montre les courbes de dilatance expérimentales. Sur ce même graphique, les courbes de dilatance obtenues à partir de la méthode de calculs sur les profils avec le logiciel CalculDilat, ont également été tracées. Cette représentation graphique permet de comparer les courbes de dilatance obtenues par calculs avec les courbes de dilatance obtenues expérimentalement.

En ce qui concerne les courbes de dilatance expérimentales, la même convention est utilisée que dans le cas des courbes de dilatance calculées. C'est à dire que dans chaque direction, 0, 1, 4, et 5, correspond le sens de cisaillement selon la pente générale positive, sens -30° , 0° , 60° et 90° respectivement, et le sens de cisaillement selon la pente générale

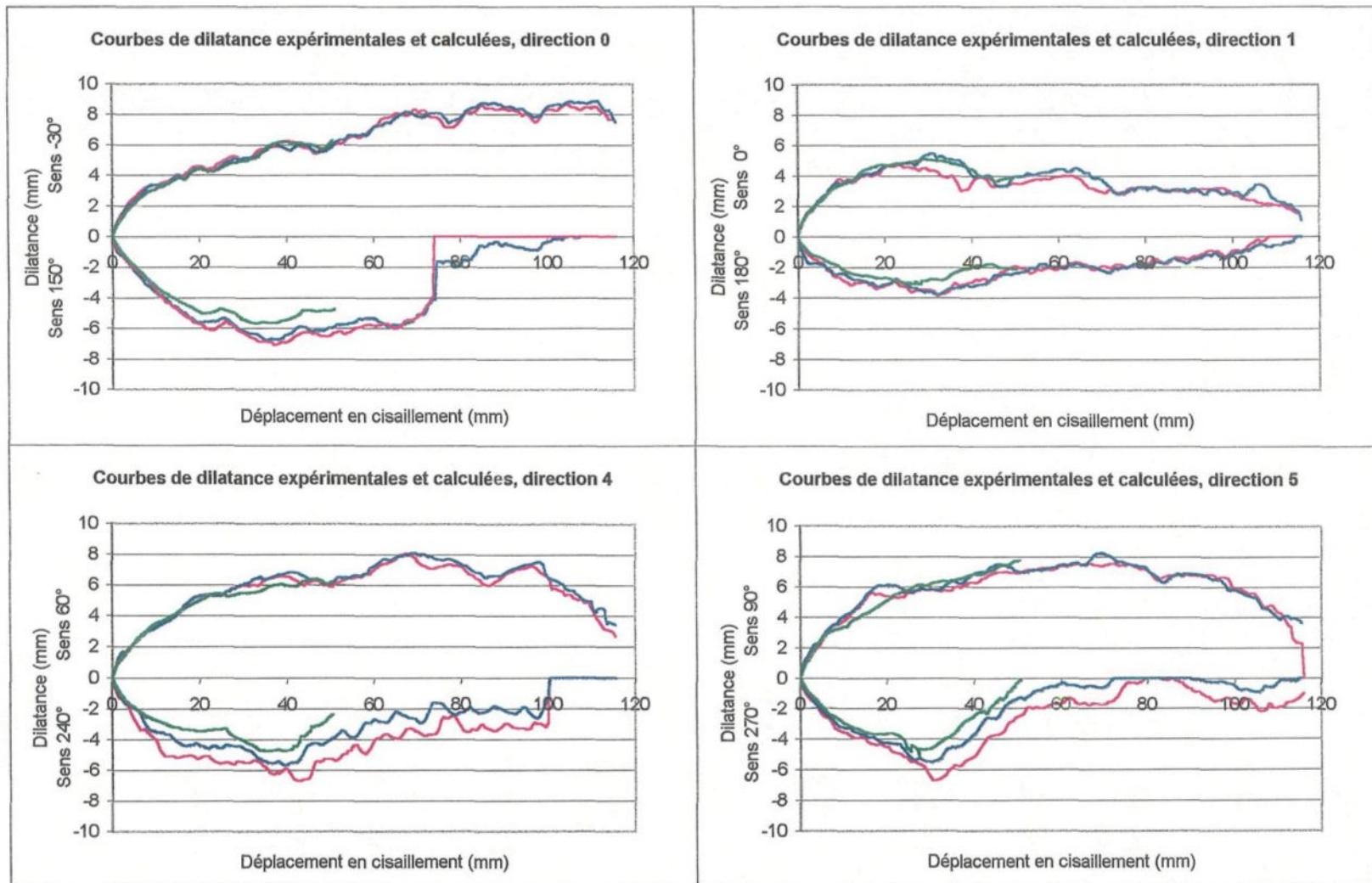


Figure 4.3. Courbes de dilatance expérimentales et calculées pour les quatre directions à l'étude. Les courbes de dilatance ont été calculées à partir de l'éponte inférieure (courbes bleues) et de l'éponte supérieure (courbes roses). Les courbes de dilatance expérimentales sont représentées en vert.

négative, sens 150° , 180° , 240° et 270° , respectivement. En fait, les mêmes sens de cisaillement ont été définis que lors du tracé des courbes de dilatance calculées et expérimentales.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES COURBES DE DILATANCE CALCULÉES ET EXPÉRIMENTALES

5.1 Analyse comparative des courbes de dilatance calculées et expérimentales

Les courbes de dilatance, calculées à partir de la méthode de calcul proposée ainsi que celles obtenues expérimentalement, ont été tracées pour chacune des quatre directions à l'étude et dans les deux sens. Les figures 4.3 et A2.29 à A2.32 regroupent tous les résultats obtenus. L'examen de ces courbes indique que les sens où le cisaillement est effectué selon une pente générale positive, sens -30° , 60° et 90° , montrent, en général, une concordance presque parfaite entre les courbes de dilatance calculées et expérimentales. Par contre, lorsque le sens de cisaillement est réalisé selon une pente moyenne négative, les valeurs calculées et expérimentales ne correspondent pas aussi bien; c'est le cas des directions 150° , 240° et 270° . Dans ces sens, la courbe expérimentale coïncide, au départ, avec les courbes calculées, pour un déplacement de moins de 10 mm. Par contre, à partir d'un déplacement en cisaillement de plus de 10 mm, la courbe expérimentale se situe en dessous des courbes de dilatance calculées. Dans la direction 1, tel que mentionné auparavant, les profils présentent une légère pente mais sont plus horizontaux que dans les trois autres directions. Dans ce cas, les courbes de dilatance expérimentales et calculées concordent bien pour un sens de cisaillement orienté selon la pente générale positive mais

coïncident aussi pour le sens de cisaillement orienté selon la pente générale négative des profils. Donc en général, les courbes de dilatance calculées avec la méthode proposée reflètent bien les résultats expérimentaux à l'exception des cas où le cisaillement est effectué selon une pente générale négative, direction 0, 4 et 5 dans les sens 150°, 240° et 270°, pour un déplacement en cisaillement supérieur à 10 mm.

La possibilité que les essais expérimentaux ne soient pas correctement effectués où que le banc d'essais ne représente pas bien les conditions réelles pour ces cas (contrainte normale presque nulle et pas de basculement de l'éponte supérieure) ne peut être invoquée car les courbes de dilatance calculées et expérimentales coïncident presque parfaitement dans la grande majorité des directions de cisaillement qui ont fait l'objet d'essai. Ceci permet de conclure que les essais expérimentaux ont été réalisés avec suffisamment de minutie et que le banc d'essai reproduit bien un cisaillement à contrainte normale nulle. Puisque les essais de cisaillement ont été effectués en même temps et suivant la même procédure pour les deux sens d'une même direction, il n'y a pas de raison de croire que les résultats obtenus pour les essais orientés selon la pente négative soient biaisés.

Une autre possibilité, pouvant expliquer la divergence des résultats calculés et expérimentaux, est que le pas d'échantillonnage sur les profils ainsi que le nombre de profils sont insuffisants pour permettre de bien faire ressortir toutes les structures sur les deux épontes de la fracture. C'est toutefois peu probable puisque si tel était le cas, les courbes expérimentales seraient situées au-dessus des courbes calculées et non en dessous :

des structures non enregistrées par le rugosimètre feraient en sorte que, lors du cisaillement il y aurait chevauchement sur des aspérités qui provoquerait de la dilatance alors que cela n'aurait pas été calculé avec le modèle de simulation proposé. De plus, si les données du rugosimètre étaient insuffisantes pour dicter le comportement de la dilatance, il y aurait divergence avec les courbes expérimentales dans toutes les directions.

Une raison envisagée pour expliquer le fait que le cisaillement effectué dans le sens de la pente générale négative ne coïncide pas avec les résultats escomptés est que le modèle de simulation proposé ne tient pas compte d'angle d'attaque négatif. En effet, lorsque la fracture dans une direction, présente une pente générale non nulle (figure 5.1a), cela affecte les valeurs de la dilatance obtenues. Si le cisaillement est effectué selon le sens positif de la pente (figure 5.1b), des singularités orientées selon le sens de cisaillement sont retrouvées pour des grandes longueurs de base. Ainsi il y aura chevauchement des aspérités et dilatance même pour des valeurs de déplacement en cisaillement très grandes. Par contre, si le cisaillement est effectué selon la pente générale négative du profil (figure 5.1c), il est probable qu'il y ait rapprochement des surfaces lors du cisaillement dans ce sens, impliquant que les angles des aspérités, pour des longueurs de base supérieures à une certaine valeur, soient négatifs. Ces angles négatifs seront alors classés par le programme avec les angles minimaux (ou maximaux pour le sens de cisaillement inverse). Puisque le modèle ne considère que les angles positifs dans le sens de cisaillement d'attaque, ceci entraîne une surestimation des angles maximaux. Au départ, pour un déplacement en cisaillement $\Delta x < 10$ mm on observe le chevauchement sur des petites aspérités ayant une

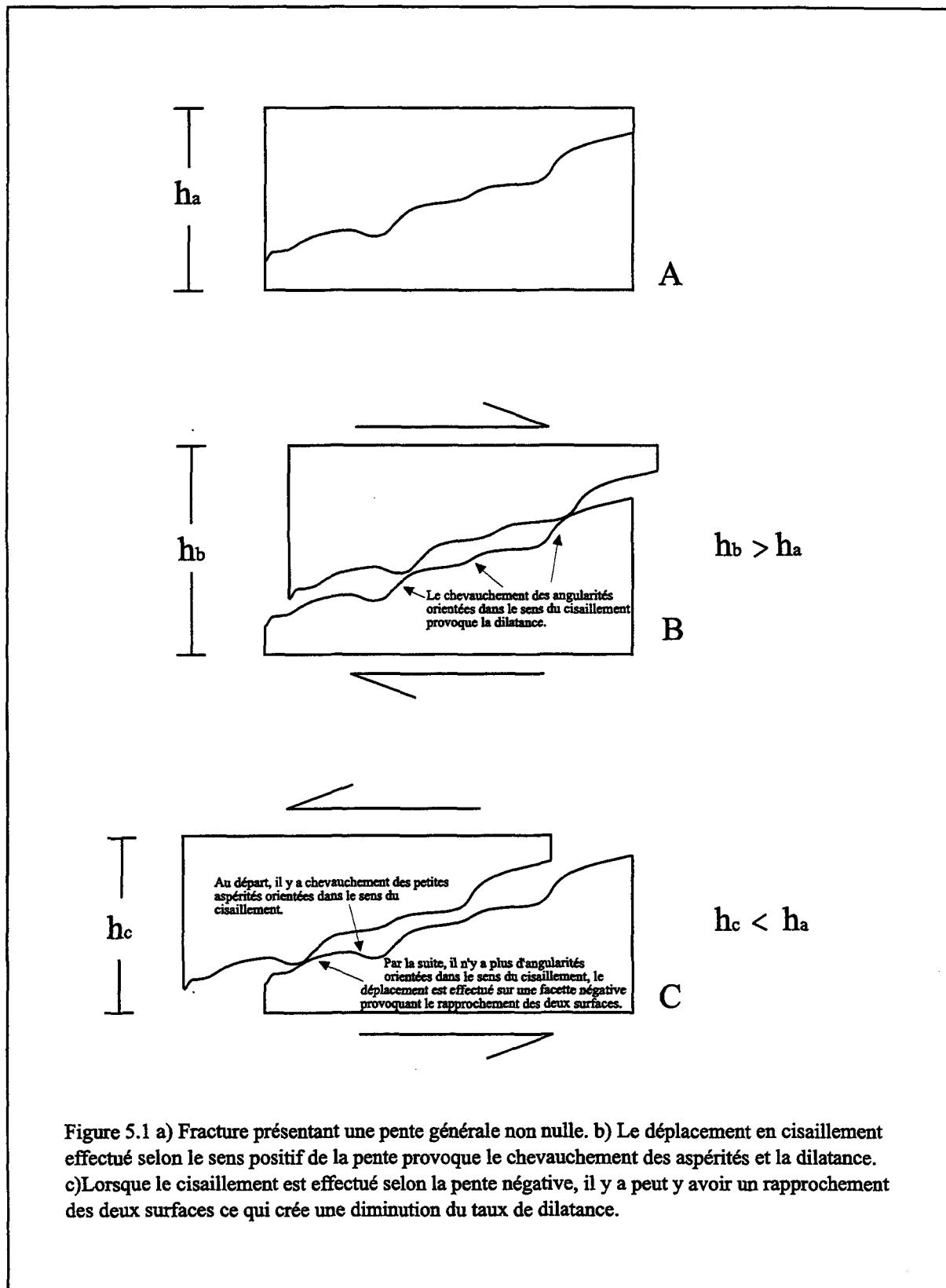


Figure 5.1 a) Fracture présentant une pente générale non nulle. b) Le déplacement en cisaillement effectué selon le sens positif de la pente provoque le chevauchement des asperités et la dilatance. c) Lorsque le cisaillement est effectué selon la pente négative, il y a peut y avoir un rapprochement des deux surfaces ce qui crée une diminution du taux de dilatance.

pente positive orientée selon le sens du cisaillement, ce qui crée de la dilatance (figure 5.1c). Par contre lorsque ces petites aspérités sont chevauchées et que les plus grandes aspérités sont toutes orientées suivant des angles négatifs, la surface supérieure peut descendre le long de ces aspérités à pente négative et ainsi se rapprocher de l'éponte inférieure, ce qui crée une diminution du taux de dilatance (figure 5.1c).

Puisque le programme ne tient compte que du chevauchement sur les aspérités orientées dans le sens de cisaillement et néglige la possibilité de rapprochement des surfaces le long d'aspérités dont la pente est inverse au cisaillement, il est probable que, dans un cas où la pente générale des profils est négative, les courbes de dilatance calculées soient surestimées. Cette surestimation de la dilatance se produit pour chacun des sens négatifs des trois directions 0, 4 et 5.

Malgré le fait que les valeurs de dilatance obtenues expérimentalement soient, dans les cas de cisaillement selon une pente générale négative, en dessous de ceux qui avaient été calculées avec le modèle de simulation proposé, la forme des courbes reflétant les structures des surfaces irrégulières est toutefois identique. En effet, bien que les courbes calculées et expérimentales ne concordent pas parfaitement, elles sont similaires puisqu'elles montrent sensiblement les mêmes variations en fonction du déplacement en cisaillement. Ces variations peuvent être causées par le fait que la dilatance est produite par le chevauchement d'une certaine structure orientée dans le sens du cisaillement. Lorsque la structure est entièrement surmontée, une autre structure, de plus grande dimension, prend le

relais. Ce sont ces changements de structures qui provoquent les petites variations dans les courbes de dilatance. Dans le cas où le cisaillement est effectué dans le sens de la pente négative des profils, les structures de grandes dimensions orientées dans le sens du cisaillement sont peu nombreuses. Alors entre chaque changement de structure, il y a une diminution du taux de dilatance, observable sur la courbe de dilatance expérimentale. Puisque le programme ne tient pas compte de cette diminution du taux de dilatance, le changement de structure provoque des variations sur les courbes de dilatance sans toutefois provoquer l'abaissement de la courbe de dilatance calculée. C'est ce qui pourrait expliquer que les courbes de dilatance expérimentales et calculées, pour les essais de cisaillement selon le sens de la pente générale négative des profils, présentent les mêmes variations dans leur forme mais diffèrent dans leurs valeurs de dilatance.

Le fait que les courbes de dilatance calculées et expérimentales soient semblables dans leur forme démontre que la méthode de calcul proposée utilise adéquatement les informations morphologiques (profils) dont elle dispose pour déterminer quelles singularités contrôlent la dilatance lors du déplacement en cisaillement. Cependant, le programme devrait tenir compte de la possibilité de rapprochement entre les surfaces de la fracture comme le démontrent les courbes de dilatance expérimentales dans certains sens de cisaillement orientés selon une pente générale négative pour un déplacement supérieur à 10 mm.

Dans les cas où le cisaillement est effectué selon la pente générale positive, les courbes de dilatance expérimentales montrent, dans certaines directions, de légers rapprochements des surfaces après certains déplacements en cisaillement qui dépendent probablement du changement de structure lors du chevauchement des aspérités, tel qu'expliqué précédemment. Le modèle de simulation proposé calcule des courbes de dilatance qui démontrent également ce rapprochement des surfaces de la fracture lors du déplacement en cisaillement. Dans le cas des courbes de dilatance calculées, c'est la réduction des angles extrêmes avec l'augmentation du pas de discréétisation qui provoque la diminution de la courbe de dilatance. En augmentant d'avantage le pas, de plus grandes structures seront mobilisées et les angles extrêmes recommencent à augmenter légèrement. C'est ce qui crée ces petits rapprochements des surfaces suivies de nouveau par une augmentation de la dilatance. Le sens de cisaillement à -30° , direction 0 (figure 4.3 et annexe), montre bien ces petites variations dans les courbes de dilatance à différentes valeurs de déplacement en cisaillement. Il est aussi possible d'observer sur ce même graphique que la courbe de dilatance calculée coïncide parfaitement avec la courbe expérimentale même lors de ces petits rapprochements.

Donc le modèle permet de tracer des courbes de dilatance calculées qui concordent avec les courbes expérimentales. Par contre, le programme devrait tenir compte de la possibilité d'un rapprochement des surfaces de la fracture, lors de cisaillement orienté selon une pente générale négative, ce qui provoque l'abaissement du taux de dilatance.

5.2 Analyse de la dépendance directionnelle des courbes de dilatance expérimentales

Les essais de cisaillement ont été effectués dans quatre directions différentes afin de déterminer s'il y a dépendance directionnelle dans le comportement de la dilatance. La figure 4.3 montre que les courbes de dilatance expérimentales présentent d'importantes variations selon la direction du cisaillement. Les courbes de dilatance calculées démontrent qu'il y a dépendance directionnelle, les courbes de dilatance expérimentales le confirment. La direction 1 est celle qui est la plus horizontale, la dilatance enregistrée, lors des essais de cisaillement, dans cette direction est plus faible que dans le cas des trois autres directions. Cette observation avait également été faite lors de l'analyse des courbes de dilatance calculées.

La figure 4.3 montre donc que les résultats expérimentaux sont très différents selon les quatre directions et les courbes de dilatance calculées concordent presque parfaitement avec eux selon la direction d'étude. Aussi, cette observation apporte un atout important au modèle de simulation proposé puisqu'il peut calculer adéquatement les courbes de dilatance dans les quatre directions de cisaillement étudiées, alors, il est certain que ce modèle peut calculer les courbes de dilatance dans n'importe quelle direction de cisaillement.

5.3 Analyse de la dépendance selon le sens de cisaillement des courbes de dilatance expérimentales

Pour chacune des quatre directions étudiées, la fracture a été cisaillée dans les deux sens (dextre et senestre). Ces essais ont été faits afin de vérifier si la dilatance dépend du sens de cisaillement. Les résultats à la figure 4.3 montrent que, pour une même direction, la dilatance mesurée dans un sens n'est pas la même que celle enregistrée dans le sens inverse. Dans les quatre directions étudiées, la dilatance est toujours plus grande dans le sens où le cisaillement est effectué selon une pente générale positive comparativement au sens inverse où le cisaillement est réalisé selon une pente générale négative. Ceci avait également été observé lors de l'analyse des courbes de dilatance calculées. Les courbes de dilatance expérimentales confirmant la dépendance de la dilatance selon le sens de cisaillement comme les distributions des angles extrêmes et les courbes de dilatance calculées le démontrent. Le modèle de simulation proposé tient compte du fait que, dans les quatre directions, le cisaillement engendre des courbes de dilatance différentes selon le sens du déplacement et ce modèle peut donc calculer, pour chacun des deux sens, des courbes de dilatance qui concordent presque parfaitement avec les courbes expérimentales. Ceci constitue donc un avantage très grand au modèle de simulation proposé puisqu'il peut tenir compte du sens de cisaillement de la fracture et ce dans toutes les directions de cisaillement voulues.

En résumé, en ce qui concerne la dépendance directionnelle, les courbes expérimentales de la figure 4.3 montrent que les essais expérimentaux donnent des valeurs

de dilatance différentes selon la direction et le sens de cisaillement. De plus, les courbes de dilatance calculées, tracées sur cette même figure, démontrent que la méthode de calcul reproduit la dépendance directionnelle et de sens puisque les courbes calculées pour chacun des sens dans chacune des directions sont semblables à celles obtenues lors des essais expérimentaux correspondants.

5.4 Ajustement des courbes de dilatance calculées aux courbes expérimentales

Dans les cas de cisaillement selon la pente générale positive, les courbes de dilatance calculées et expérimentales coïncident presque parfaitement et n'ont pas besoin d'ajustement. Par contre, lorsque le cisaillement est effectué selon une pente générale négative, sens 150° , 240° et 270° , la courbe expérimentale se situe en dessous des courbes calculées. Bien que les valeurs de dilatance calculées soient légèrement au-dessus de celles obtenues expérimentalement, ces courbes présentent sensiblement les mêmes variations en fonction du déplacement en cisaillement. L'examen de ces courbes permet aussi de constater que plus le déplacement en cisaillement augmente, plus la différence entre les résultats expérimentaux et calculés devient grande. Donc pour ajuster la courbe calculée à la courbe expérimentale il faut soustraire à la valeur de la dilatance calculée, une certaine valeur qui augmente avec le déplacement en cisaillement.

Tel que vu précédemment, la dilatance Δh_n est calculée avec l'équation (2.1) de Fecker et Rengers (1971):

$$\Delta h_n = n \cdot L \operatorname{tg} \alpha_n \quad (5.1)$$

Où $n \cdot L$ est la valeur du déplacement en cisaillement. Donc, puisque la tangente de l'angle extrême $\operatorname{tg} \alpha_n$ est multipliée par la valeur du déplacement en cisaillement alors une diminution constante de cet angle entraîne une diminution de la dilatance qui prend de l'importance avec le déplacement en cisaillement.

Ainsi tous les angles utilisés pour le calcul de la dilatance sont diminués d'une certaine valeur constante $\Delta\alpha$ pour permettre l'ajustement des courbes de dilatance calculées aux courbes de dilatance expérimentales. Les figures 5.2, 5.3 et 5.4 montrent les résultats obtenus pour un cisaillement effectué dans le sens de la pente négative pour les directions 0, 4 et 5, respectivement (sens 150° , 240° et 270°). Sur ces figures, la dilatance calculée à été ajustée en diminuant la valeur de l'angle extrême en utilisant l'équation suivante :

$$\Delta h_n = n \cdot L \operatorname{tg} (\alpha_n - \Delta\alpha) \quad (5.2)$$

La méthode de calcul proposée ne considère pas les angles orientées dans le sens inverse au cisaillement. Dans le cas de cisaillement selon une pente négative, la majorité des aspérités sont dans ce sens inverse, or le modèle ne calcule pas les angularités négatives, alors il ne tient pas compte de la pente négative des profils. Ainsi, l'ajustement effectué aux figures 5.2 à 5.4 a pour effet de prendre en considération ces pentes négatives dans les calculs de la dilatance.

Ajustement des courbes experimentales et calculées, direction 0

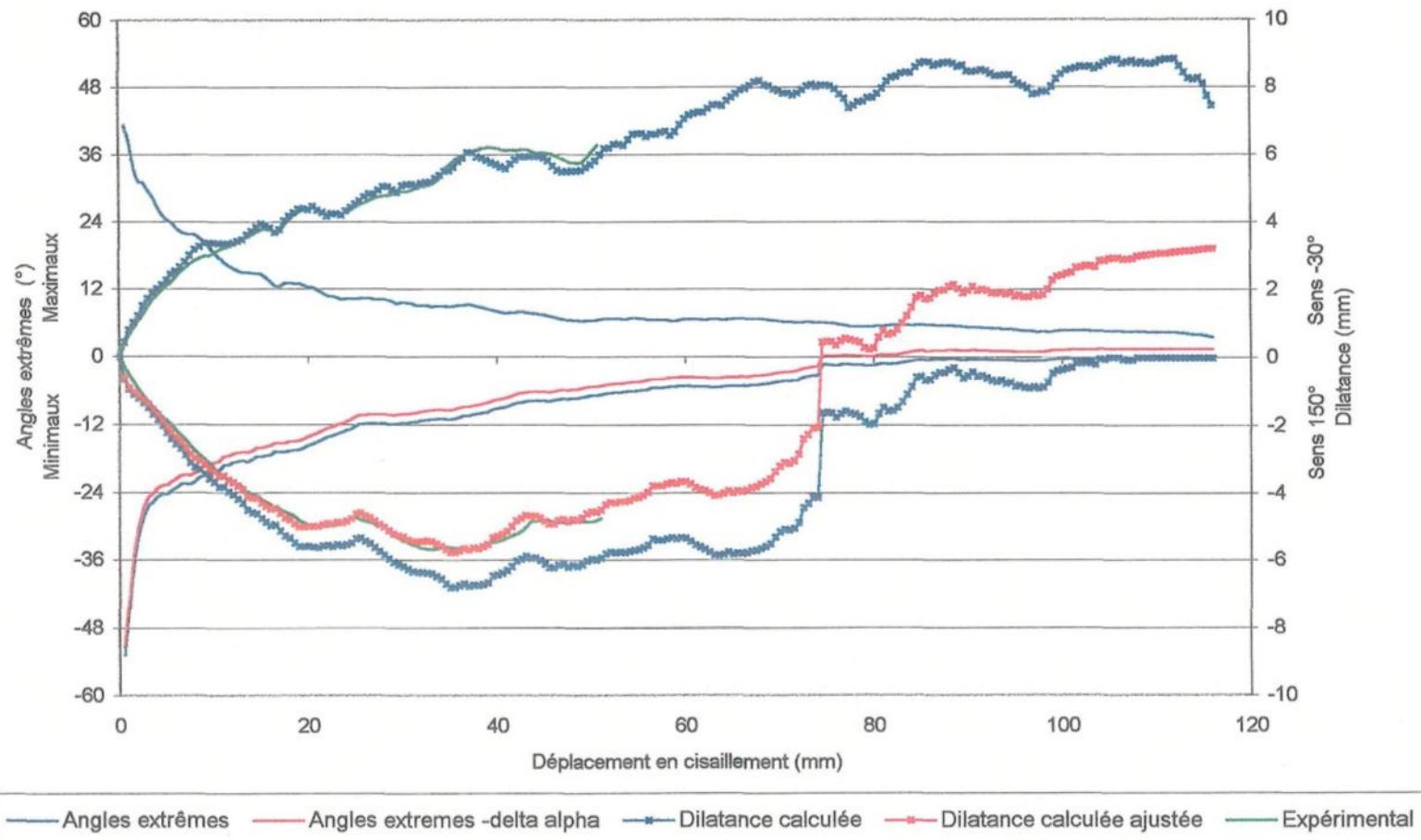


Figure 5.2. Ajustement des courbes de dilatance calculée et expérimentale, direction 0.

Ajustement des courbes expérimentales et calculées, direction 4

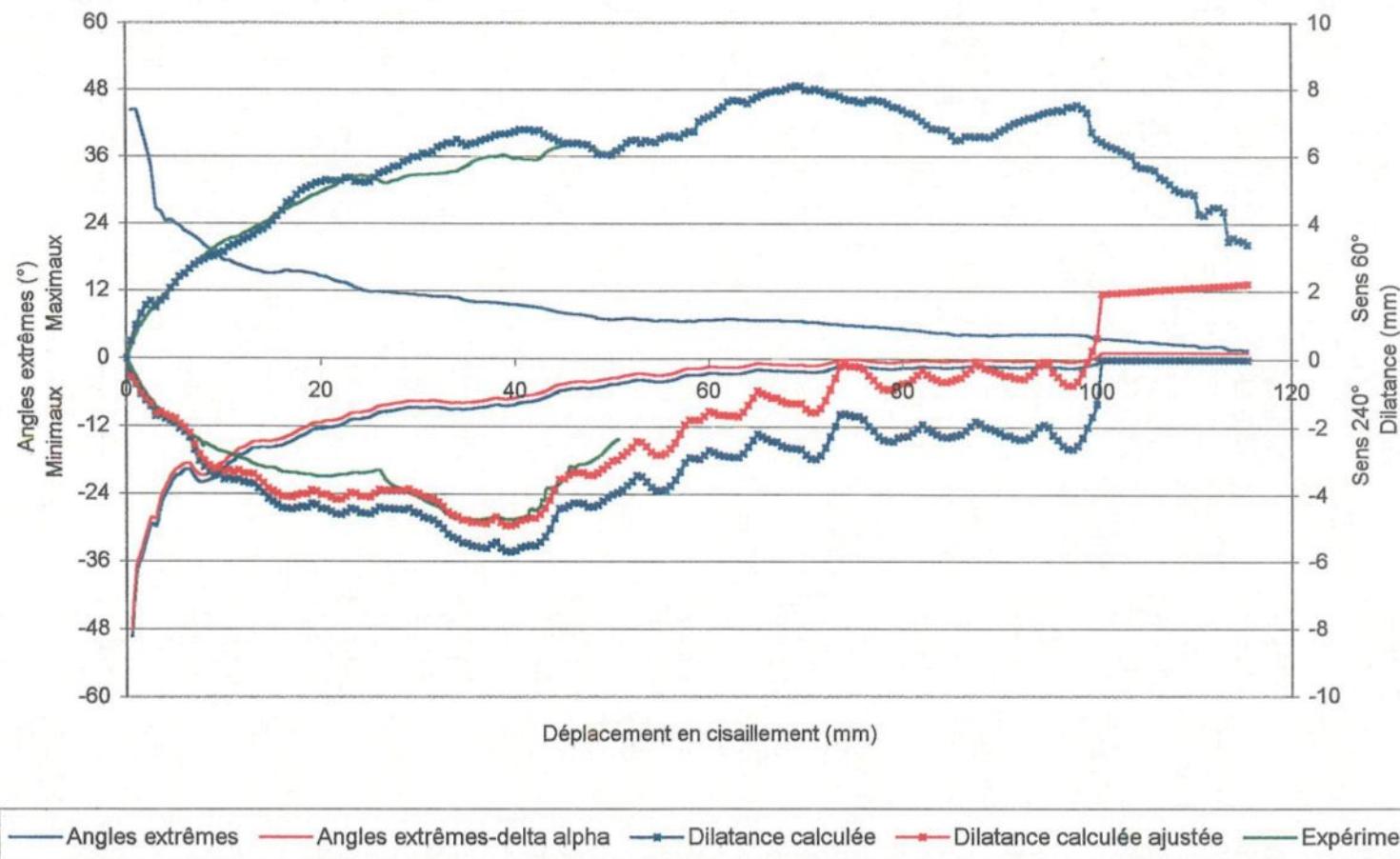


Figure 5.3. Ajustement des courbes de dilatance calculée et expérimentale, direction 4.

Ajustement des courbes expérimentales et calculées, direction 5

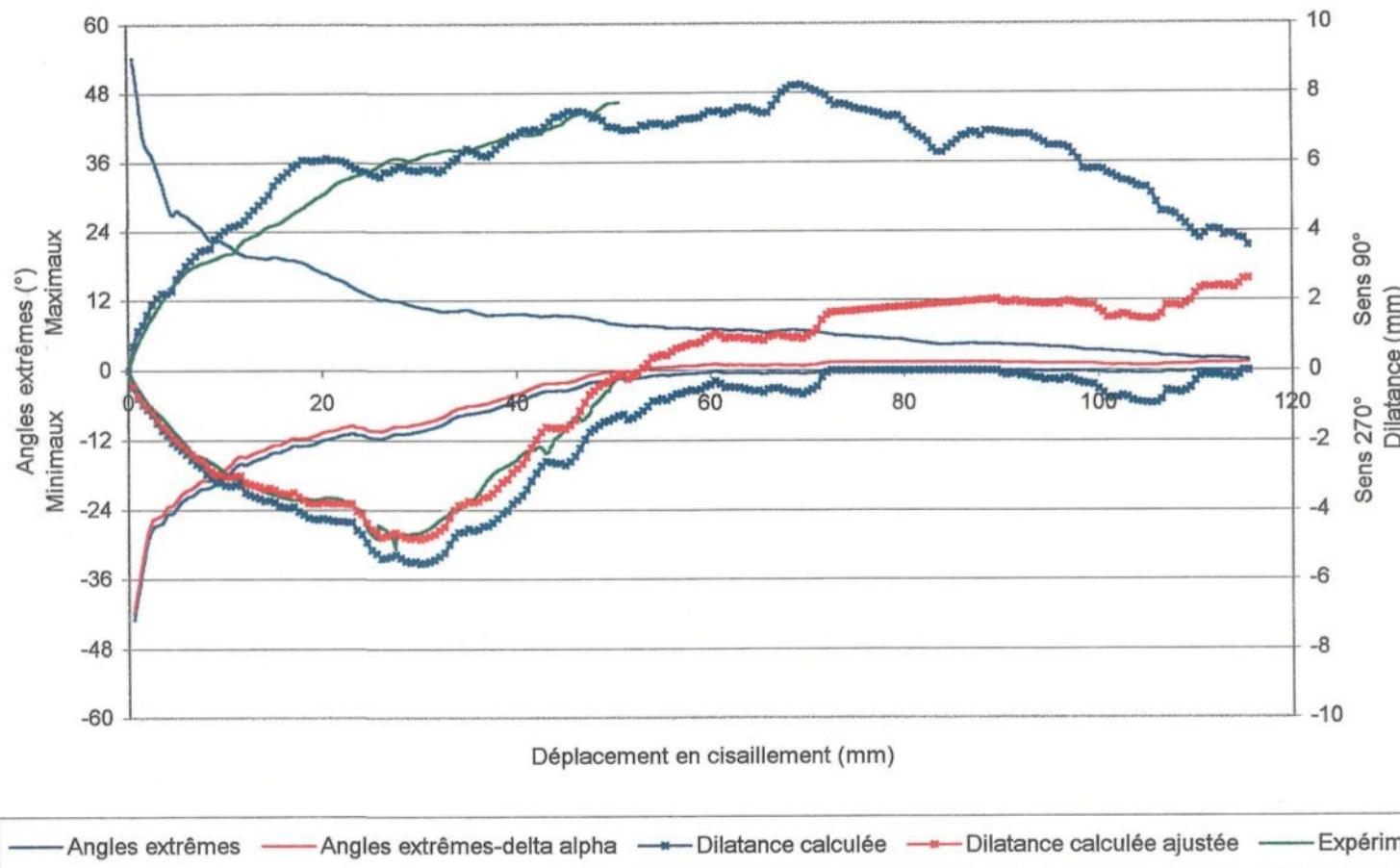


Figure 5.4. Ajustement des courbes de dilatance calculée et expérimentale, direction 5.

La dépendance entre les différentes directions implique que la valeur utilisée de $\Delta\alpha$ varie en fonction de l'orientation du cisaillement. Le tableau 5.1 indique la valeur de $\Delta\alpha$ utilisée pour permettre l'ajustement de la courbe de dilatance calculée à la courbe de dilatance expérimentale en fonction de la direction de cisaillement étudiée.

Direction	$\Delta\alpha$
0	1,6°
4	1,1°
5	1,3°

Tableau 5.1 Valeur de $\Delta\alpha$ utilisée pour permettre l'ajustement de la courbe calculée à la courbe expérimentale.

Les figures 5.2 et 5.4 montrent que la courbe calculée ajustée coïncide presque parfaitement avec la courbe expérimentale dans les directions 0 et 5, respectivement. Évidemment ces observations ne sont plus valables pour un déplacement en cisaillement au-delà de 55 mm puisque à ce stade, les angles extrêmes peuvent devenir nuls ou négatifs et, dans ce cas, la soustraction de $\Delta\alpha$ donne une valeur d'angle qui n'a pas de sens selon la méthode de calcul proposée. Dans le cas de la direction 4, figure 5.3, l'ajustement est presque parfait à l'exception d'une petite distinction entre les deux courbes pour un déplacement en cisaillement entre 10 et 30 mm.

Les valeurs de $\Delta\alpha$ utilisées pour l'ajustement varient en fonction de la pente générale de la direction de cisaillement. La relation entre le nombre $\Delta\alpha$ utilisé pour l'ajustement des courbes et la valeur de la pente générale dans la direction de cisaillement demande une étude plus poussée de la statistique des profils afin de pouvoir déterminer un lien entre les deux. Les objectifs de la présente étude étant largement dépassés, les figures 5.2 à 5.4 ont été présentées afin de donner une amorce pour solutionner le problème des courbes de dilatance calculées dans un sens de cisaillement selon une pente générale négative.

5.5 Limites du logiciel et de la méthode de calcul

Le logiciel peut utiliser des profils de longueurs différentes, ne contenant pas le même nombre d'élévations, ce qui permet d'étudier des fractures de toutes formes. Ainsi des profils plus longs et d'autres plus courts peuvent être enregistrés, en raison d'une surface à géométrie irrégulière, sans que cela affecte sensiblement le fonctionnement du programme et les résultats obtenus. Il est important pour les profils à longueurs variables de déterminer le nombre d'élévations mesurées sur chacun des profils. Dans cette étude, quatre directions de cisaillement sont considérées mais quelques instructions peuvent être ajoutées afin d'en étudier d'autres. Le logiciel a été programmé pour des profils échantillonnés à pas constants. Deux possibilités sont envisagées afin de traiter des profils à intervalle irrégulier : a) la première est de faire un traitement sur les profils avant d'utiliser le logiciel en effectuant des interpolations sur les élévations afin de les rapporter à intervalle régulier

et ensuite, les calculs peuvent être effectués avec le logiciel: b) la deuxième possibilité est d'adapter non pas les profils mais le programme en y ajoutant des instructions afin qu'il tienne compte des profils échantillonnés à pas irréguliers. En fait, le logiciel n'a pas vraiment de limite puisqu'il est possible de programmer presque toutes les conditions et le programme peut ainsi être adapté selon les cas étudiés. Par contre, la méthode de calcul possède certaines limites.

Les angularités des aspérités sur les surfaces des fractures sont tridimensionnelles. Un des problèmes soulevé avec l'utilisation de cette méthode de calcul est que les élévations prélevées à partir des profils sont des informations bidimensionnelles. L'angle mesuré entre deux élévations consécutives n'est donc qu'un angle apparent. Par contre, plus les profils sont nombreux et plus le biais causé par les enregistrements 2D diminue. Pourtant, l'analyse de la sensibilité des courbes de dilatance sur le nombre de profils a démontré que le nombre de profils ne doit pas être nécessairement grand afin de bien repérer les angles extrêmes, le plus important c'est que les profils soient situés aux bons endroits sur les surfaces, là où les structures sont les plus importantes. Ainsi, le fait que les profils fournissent des informations 2D n'affecte pas vraiment les résultats dans les cas où les profils sont localisés sur les grandes structures.

La méthode de calcul, telle que mentionné précédemment, ne tient pas compte de la possibilité qu'il y ait rapprochement des deux surfaces lors du déplacement en cisaillement de la fracture. Lorsque le cisaillement est orienté selon la pente générale positive des

profils, cela ne pose pas de problème puisque la possibilité d'avoir un rapprochement entre les surfaces est presque nulle. Par contre, si le cisaillement est effectué selon une pente générale négative il peut y avoir un tel rapprochement mais le modèle n'en tient pas compte. Aussi, dans ce cas, les courbes de dilatance calculées ne coïncident pas parfaitement avec les courbes de dilatance expérimentales.

Le modèle considère qu'au départ les surfaces sont parfaitement enchevêtrées. Pourtant, il est tout de même possible de calculer la dilatance pour un déplacement en cisaillement de deux surfaces décalées l'une par rapport à l'autre. Il faut pour cela connaître la valeur du déplacement en cisaillement déjà effectué entre les deux surfaces. Si cette valeur est connue, alors en utilisant la courbe de dilatance en fonction du déplacement en cisaillement la valeur de la dilatance peut être déterminée. De même, si le déplacement en cisaillement augmente, il sera possible de tracer la courbe de dilatance post décalage.

Si les surfaces sont dissemblables d'une éponte à l'autre d'une fracture, les principes de base de la méthode de calcul sont inapplicables. Les épontes de la fracture doivent être similaires afin que le modèle puisse calculer les courbes de dilatance.

Enfin, le modèle tient compte d'un cisaillement effectué sous des conditions de contrainte normale nulle. Les fractures naturelles situées en profondeur sont sous des conditions de contrainte normale modérée à élevée. Pour bien représenter la réalité, le modèle devrait permettre de calculer la valeur de la dilatance en fonction du déplacement

en cisaillement et en fonction de la contrainte normale appliquée sur la fracture. Les courbes de dilatance pourraient ainsi être tracées pour différentes valeurs de contrainte normale. Le chapitre suivant propose une méthode afin de tenir compte de l'application d'une contrainte normale lors de la détermination des courbes de dilatance en fonction du déplacement en cisaillement.

CHAPITRE 6

MODE D'INTÉGRATION DE LA CONTRAINTE NORMALE À LA MÉTHODE DE CALCUL PROPOSÉE

6.1 Effets de la contrainte normale σ_n simulée analogiquement

Plusieurs chercheurs ont effectué des travaux concernant les effets de la contrainte normale sur les fractures en cisaillement (Barton 1971, Kimura et Esaki, 1995, Roko et Daemen, 1995). De manière générale, une des conclusions de ces travaux est que l'application d'une contrainte normale a pour effet de diminuer le taux de dilatance lors du déplacement en cisaillement de la fracture. De même, les essais expérimentaux, effectués par E. Lamontagne (thèse en cours) et R. Flamand (thèse en cours), sur la fracture utilisée dans cette étude, ont également démontré que la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale (Flamand et al, 1994, Archambault et al, 1996).

La méthode de calcul proposée dans cette étude permet de tracer les courbes de dilatance de fractures en cisaillement sous des conditions de contrainte normale nulle en fonction du déplacement en cisaillement (ou largeur de base des aspérités). Dans le but de généraliser ce modèle à l'évaluation des courbes de dilatance pour le cisaillement de fractures sous contrainte normale non nulle, il est nécessaire de définir une méthode qui

aurait pour effet de réduire la dilatance en fonction de l'accroissement de la contrainte normale sur la fracture.

Pour ce faire, il faut trouver un lien entre l'augmentation de la contrainte normale appliquée et la diminution de la courbe de dilatance. Les recherches effectuées depuis bien des années, ont démontré que la raison pour laquelle la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale, est qu'il y a cisaillement de certaines aspérités sur les surfaces de la fracture. De plus, Barton (1971) montre que ce sont les petites aspérités, ayant une faible longueur de base, qui sont cisaillées en premier, même pour une contrainte normale peu élevée, car elles sont plus fragiles. Ceci entraîne que lors des calculs des distributions angulaires et des courbes de dilatance impliquant des conditions de contrainte normale non nulle, les pentes des petites aspérités doivent être négligées car, en étant cisaillées, elles ne contribuent plus à la dilatance de la fracture en cisaillement.

6.2 Modifications du programme afin de tenir compte de l'application d'une contrainte normale non nulle lors du calcul des courbes de dilatance.

Pour simuler les effets de la contrainte normale, les aspérités ayant une faible longueur de base, celles calculées pour un faible pas de discrétisation, ne sont pas considérées dans les calculs des distributions des angles extrêmes et des courbes de dilatance. Lorsque la contrainte normale devient de plus en plus élevée, ce sont les angles calculés pour des longueurs de base de plus en plus grandes qui sont éliminés. C'est donc en négligeant

certains angles extrêmes que la méthode de calcul proposée a été modifiée pour tenir compte de la contrainte normale.

6.2.1 Effets de la contrainte normale sur les distributions des angles extrêmes

Les distributions angulaires ont été recalculées pour illustrer les effets d'une contrainte normale non nulle. Sur la figure 6.1, les courbes bleues (éponte inférieure) et les courbes roses (éponte supérieure) montrent la distribution des angles extrêmes sous contrainte normale nulle (sans négliger aucun angle) pour chacune des quatre directions à l'étude. Sur la même figure, les courbes vertes (éponte inférieure) et les courbes jaunes (éponte supérieure) représentent les distributions des angles extrêmes, dans les directions 0, 1, 4 et 5, simulant l'application d'une contrainte normale. Dans ces derniers cas, les angles extrêmes, pour des pas de discrétisation inférieurs à 20 mm, ne sont pas calculés ($20\text{mm} < \Delta x < 120\text{mm}$). La valeur de l'angle extrême calculée pour un pas de 20,5 mm est reportée, sur le graphique, à la valeur du pas de discrétisation de 0,5 mm. Tous les autres angles mesurés pour des longueurs de base plus grandes (21, 21.5, 22 mm ... 120mm) sont ainsi reportés sur le graphique à un pas de discrétisation diminué de 20 mm (1, 1.5, 2 mm...100 mm). La raison pour laquelle une longueur de 20 mm a été choisie est que cette valeur permet de bien visualiser l'effet de la contrainte normale sur les distributions des angles extrêmes. Il aurait tout aussi bien été possible de prendre 10 mm ou 30 mm pour expliquer le phénomène.

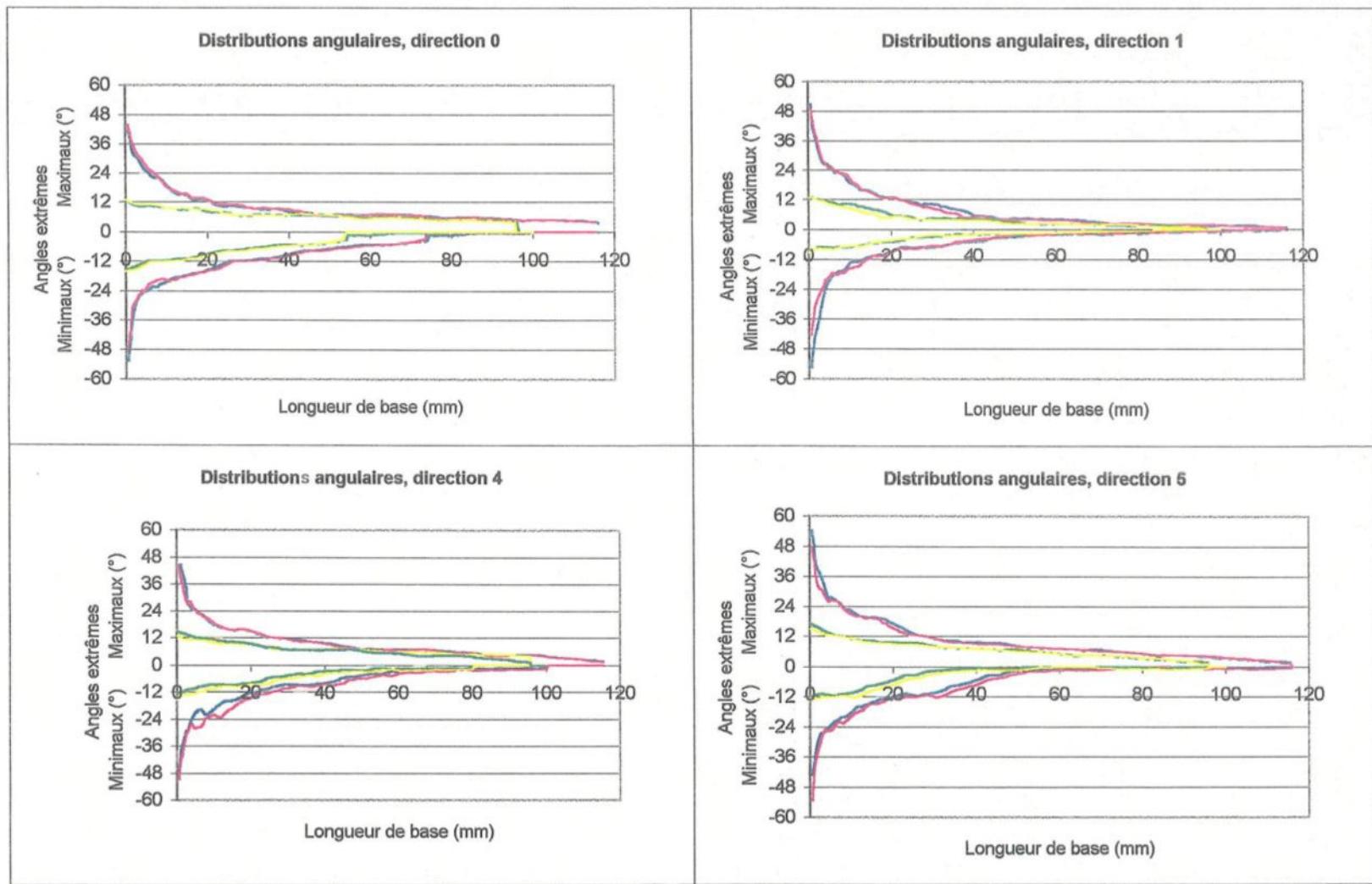


Figure 6.1. Distributions angulaires obtenues pour les quatre directions à l'étude. Les courbes en bleu (éponge inférieure) et en rose (éponge supérieure) représentent les distributions angulaires où tous les angles ont été utilisés pour les calculs. Les autres courbes vertes (éponge inférieure) et jaunes (éponge supérieure) sont celles où les angles présentant une longueur de base inférieure à 20 mm n'ont pas été considérés pour simuler les effets d'une contrainte normale non nulle.

Cet exemple, de simulation de l'application d'une contrainte normale, présenté à la figure 6.1 permet de visualiser qu'il y a un effet beaucoup plus important sur les pas de discréétisation faibles que pour les pas de discréétisation plus élevés. La figure montre qu'au départ, il y a une forte diminution des angles extrêmes calculés et que plus le pas de discréétisation augmente alors plus la différence entre les deux distributions d'angles s'atténue. Ce comportement de la distribution des angles extrêmes en fonction de l'application de la contrainte normale est bien représentatif de la réalité. En effet, les travaux de Barton (1971) indiquent que pour une contrainte normale peu élevée, ce sont les aspérités à faibles longueurs de base qui seront cisaillées tandis que les angularités à longueurs de base plus grandes demeureront presque intactes. C'est ce que démontre la figure 6.1 qui présente les effets de l'application d'une contrainte normale non nulle sur la distribution des angles extrêmes.

6.2.2 Effets de la contrainte normale sur les courbes de dilatance

Les courbes de dilatance ont été tracées à partir des distributions des angles extrêmes obtenues précédemment. Sur la figure 6.2, les courbes bleues et roses (éponte inférieure et supérieure, respectivement) indiquent les valeurs de la dilatance, en fonction du déplacement en cisaillement obtenu pour une contrainte normale nulle (aucun angle extrême négligé) dans chacune des quatre directions 0, 1, 4 et 5. Sur la même représentation graphique, les courbes vertes et jaunes (éponte inférieure et supérieure, respectivement)

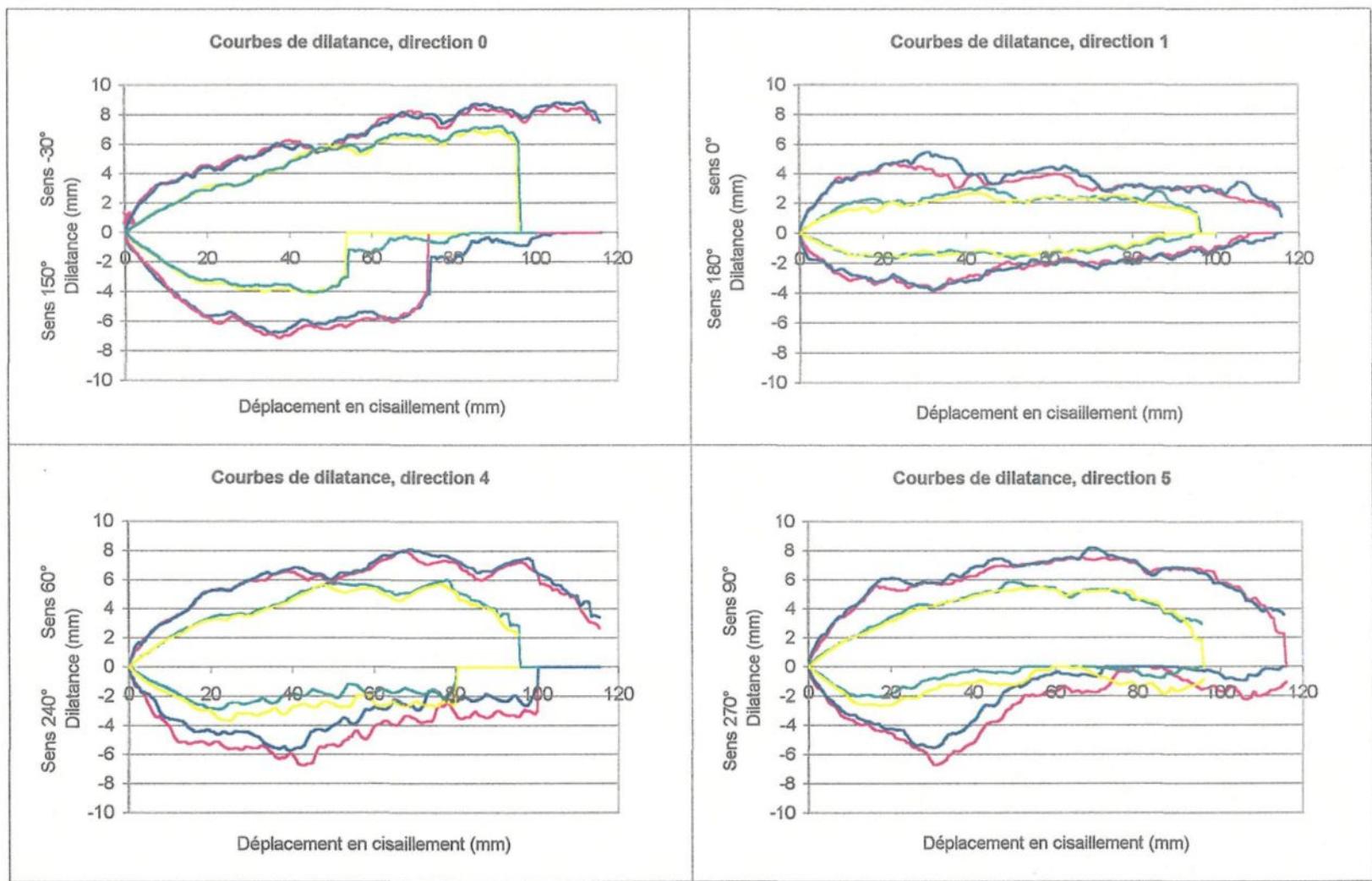


Figure 6.2. Courbes de dilatance obtenues pour les quatre directions à l'étude. Les courbes bleues (éponte inférieure) et roses (éponte supérieure) sont les courbes où la contrainte normale est nulle. Les courbes vertes (éponte inférieure) et jaunes (éponte supérieure) sont les courbes où une contrainte normale a été simulée en négligeant, lors du calcul des angles extrêmes, les angles ayant une longueur de base inférieure à 20 mm.

montrent les valeurs de la dilatance pour un déplacement en cisaillement sous contrainte normale non nulle, pour les quatre même directions.

La diminution de la courbe de dilatance sous contrainte normale non nulle comparativement à la courbe de dilatance sous contrainte normale nulle est plus régulière que dans le cas des distributions angulaires. En effet, pour les distributions d'angles extrêmes les deux courbes montraient une forte différence au départ qui diminuait en augmentant la valeur du pas de discréétisation. Dans le cas des courbes de dilatance, la différence entre les deux courbes varie beaucoup moins et augmente légèrement avec l'augmentation du déplacement en cisaillement.

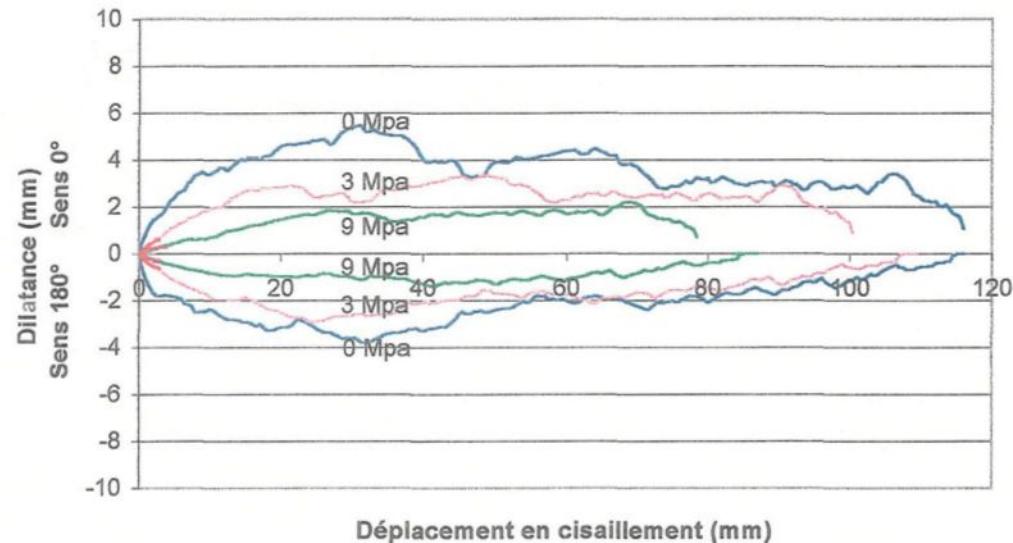
L'étude de la figure 6.2 montre bien que le fait de négliger certains angles à faibles longueurs de base entraîne l'abaissement de la courbe de dilatance simulant ainsi une courbe de dilatance à contrainte normale non nulle. Évidemment, il serait très intéressant de pouvoir déterminer pour une valeur donnée de contrainte normale quelle est la longueur de base maximale, Δx_{\max} , des aspérités à négliger lors du calcul des distributions angulaires et du tracé des courbes de dilatance.

6.2.3 Ajustement des courbes de dilatance calculées sur des courbes de dilatance expérimentales à contrainte normale non nulle.

Afin de pouvoir déterminer, pour une certaine valeur de contrainte normale, quelle est la longueur de base maximale Δx_{\max} des aspérités à négliger, des courbes de dilatance expérimentales obtenues sous contrainte normale non nulle ont été utilisées. Les essais de cisaillement de E. Lamontagne (thèse en cours) ont été effectués avec la même fracture que celle utilisée dans cette étude. Une partie de ces essais consistait à mesurer la dilatance en fonction du déplacement en cisaillement sous différentes valeurs de contraintes normales. Toutefois l'intérêt des études de E. Lamontagne était concentré sur les cinq premiers millimètres de déplacement en cisaillement. De plus, les essais ont été réalisés avec des surfaces saturées en eaux tandis que les essais de cisaillement réalisés dans cette étude ont été fait sur des surfaces sèches. Des essais expérimentaux impliquant un plus grand déplacement en cisaillement et effectués sur des surfaces sèches auraient été préférables mais, tout de même, ces résultats permettent de montrer le comportement, au départ, de la courbe de dilatance en fonction de l'application d'une contrainte normale. Les essais de E. Lamontagne ont été effectués dans seulement deux directions de cisaillement soient les directions 1 et 5, à 0° et 90° du point de repère. Dans ces deux directions le cisaillement a été réalisé dans les deux sens (dextre et senestre).

La figure 6.3 montre, pour les directions 1 et 5, les courbes de dilatance calculées pour une contrainte normale nulle (courbes bleues) ainsi que les courbes de dilatance

Simulation d'une contrainte normale, direction 1



Simulation d'une contrainte normale, direction 5

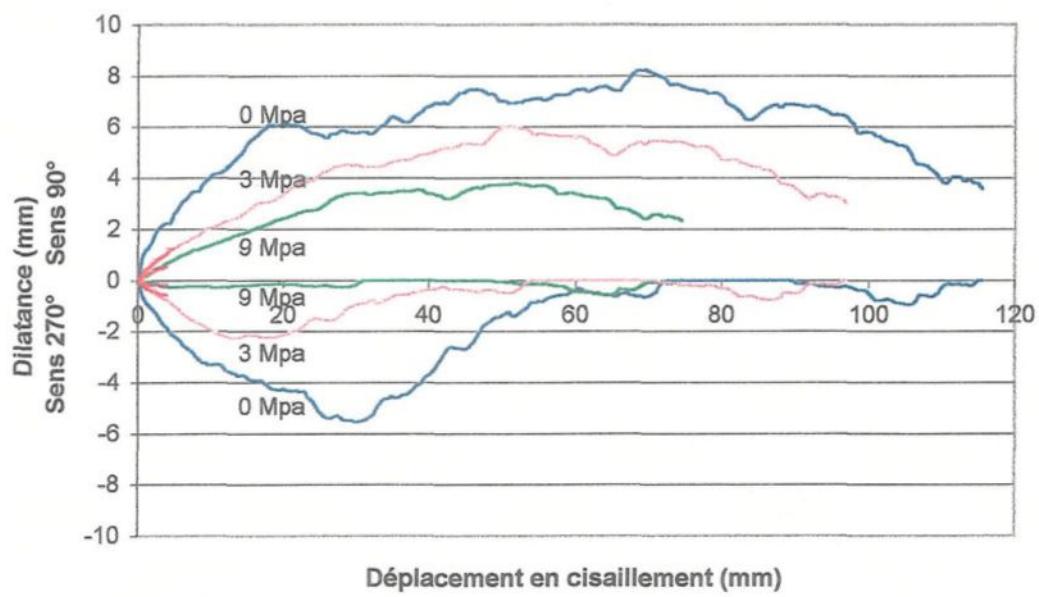


Figure 6.3 Ajustement des courbes de dilatance calculées, à contrainte normale nulle, aux courbes de dilatance expérimentales, sous contrainte normale non nulle, pour les directions 1 et 5. L'ajustement des courbes a été fait pour une contrainte normale de 3 MPa (courbes roses) et de 9 MPa (courbes vertes). Les courbes expérimentales sont en rouge.

expérimentales (courbes rouges) mesurées par E. Lamontagne pour des valeurs de contraintes normales de 3 et 9 MPa. Sur ces mêmes graphiques, les courbes de dilatance calculées avec la méthode proposée ont été ajustées (courbes roses et vertes) sur les courbes de dilatance expérimentales en négligeant, dans les calculs des distributions angulaires, les angles ayant une longueur de base inférieure à une certaine valeur Δx_{\max} . Le tableau 6.1 résume, pour chaque direction et chaque valeur de contrainte normale, la longueur de base maximale Δx_{\max} qui a été négligée, lors du calcul des angles extrêmes, pour permettre l'ajustement de la courbe de dilatance calculée sur la courbe de dilatance expérimentale.

	Direction 1		Direction 5	
	Sens 0°	Sens 180°	Sens 90°	Sens 270°
$\sigma_n = 3 \text{ MPa}$	16 mm	9 mm	18 mm	18 mm
$\sigma_n = 9 \text{ MPa}$	37 mm	31 mm	40 mm	40 mm

Tableau 6.1 Valeurs de la longueur de base maximale Δx_{\max} des angularités négligées lors du calcul des distributions des angles extrêmes pour l'ajustement des courbes de dilatance calculées aux courbes de dilatance expérimentales, sous contrainte normale non nulle.

Les courbes de dilatance expérimentales de R. Flamand (thèse en cours) ont également été utilisées toujours dans le but de déterminer une relation entre la longueur de base maximale Δx_{\max} des aspérités négligées et la valeur de la contrainte normale appliquée. Les essais de cisaillement de R. Flamand ont été réalisés sur les mêmes surfaces de fracture que

celles utilisées dans cette étude à l'exception d'un anneau de 15 mm qui a été enlevé en périphérie des surfaces donnant ainsi une fracture de 90 mm de diamètre (chapitre 3).

Contrairement aux résultats de E. Lamontagne, les essais de cisaillement de R. Flamand ont été effectués sur des surfaces sèches, ils se limitent à quelques millimètre de déplacement, certaines directions vont tout de même jusqu'à 10 mm. Les courbes de dilatance utilisées ont été mesurées dans trois directions de cisaillement différentes, soient les directions 0, 1 et 5, à -30° , 0° et 90° du point de repère. Dans ces trois directions le cisaillement a été réalisé dans un seul sens. Le niveau de contrainte normale varie de 1 MPa à 21 MPa.

Les courbes de dilatance, pour cette fracture de plus petite dimension, ont déjà été calculées, avec la méthode de calcul proposée et ont été présentées au chapitre 3 à la section 3.2.4. Ces courbes préalablement déterminées ont été utilisées pour en faire l'ajustement sur chacune des courbes de dilatance expérimentales fournies par R. Flamand en utilisant le même procédé que pour l'ajustement des courbes de dilatance expérimentales de E. Lamontagne, tel qu'illustré à la figure 6.3.

Le tableau 6.2 indique pour chaque direction et chaque valeur de contrainte normale la longueur de base maximale Δx_{\max} des angularités qui ont été négligées, lors du calcul des angles extrêmes, pour permettre l'ajustement de la courbe de dilatance calculée sur la courbe de dilatance expérimentale.

	Direction 0	Direction 1	Direction 5
1 MPa		6 mm	
7 MPa	19 mm	18 mm	22 mm
14 MPa		22 mm	
21 MPa		26 mm	

Tableau 6.2 Valeurs de la longueur de base maximale Δx_{\max} des angularités négligées lors du calcul des distributions des angles extrêmes pour l'ajustement des courbes de dilatance calculées aux courbes de dilatance expérimentales, sous contrainte normale non nulle.

Afin de déterminer si une relation existe entre la valeur de la longueur de base maximale Δx_{\max} négligée lors du calcul des angles extrêmes et la valeur de la contrainte normale appliquée, les données des ajustements des courbes de dilatance calculées aux courbes de dilatance expérimentales ont été regroupées à la figure 6.4. Sur cette figure, l'axe des ordonnées représente la valeur du diamètre de la fracture (90 mm ou 120 mm selon que les données proviennent de R. Flamand ou E. Lamontagne) divisée par la longueur de base maximale Δx_{\max} des angularités négligées. La valeur en abscisse est la contrainte normale σ_n divisée par la résistance en compression uniaxiale σ_c du matériel. La répartition des points ainsi obtenue est semblable à celle de Barton (1971) exprimant l'angle maximum de dilatance (d_n) pour différents rapports de contrainte normale/compression uniaxiale (σ_n/σ_c) qu'il a obtenus expérimentalement. La répartition des points à la figure 6.4 est également similaire aux distributions des angles extrêmes calculées à partir du logiciel CalculDilat pour chacune des directions de cisaillement étudiées. Cette répartition indique que plus la valeur de la contrainte normale augmente plus la longueur de

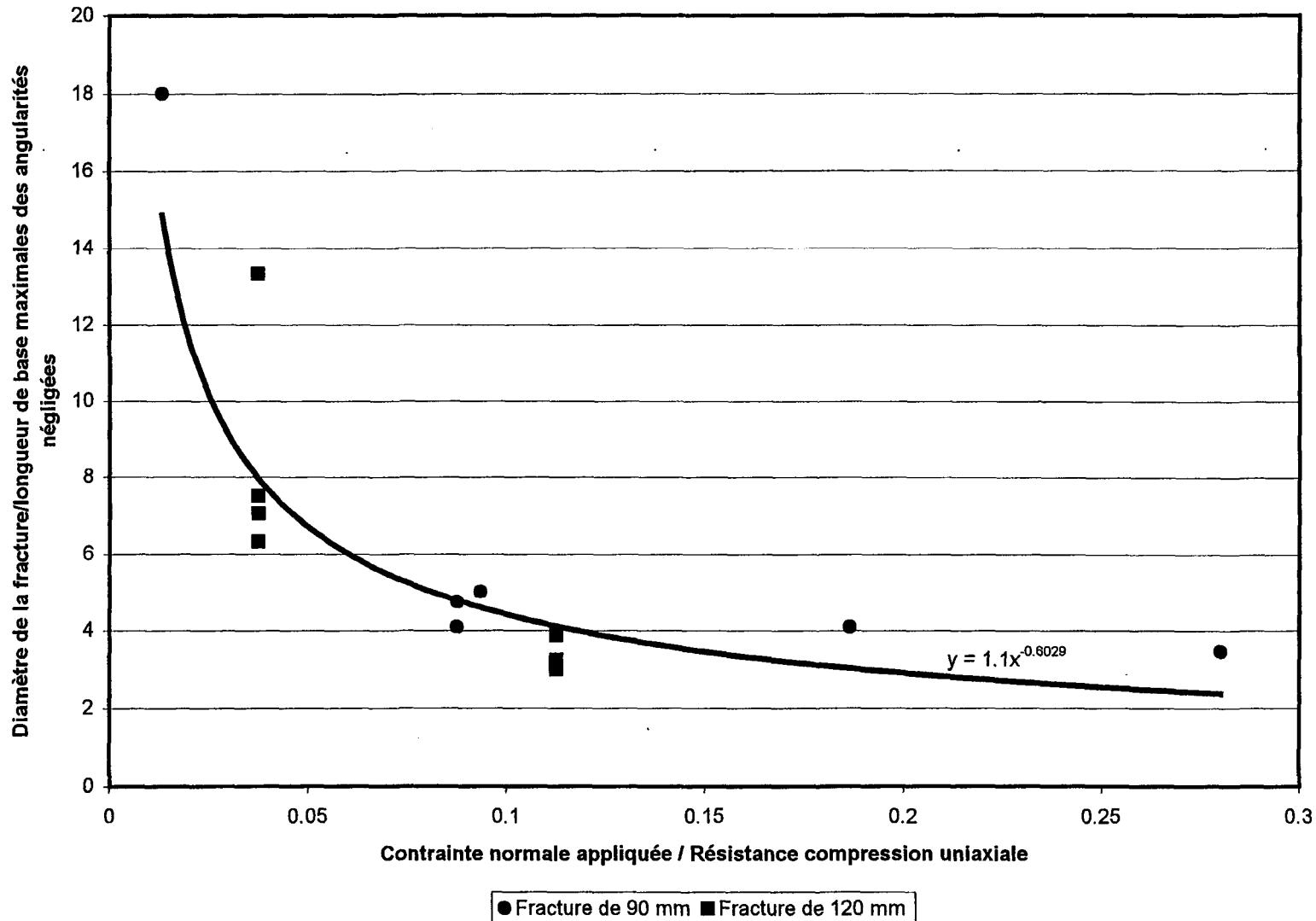


Figure 6.4. Graphique de la longueur de base des aspérités à négligées en fonction de la contrainte normale appliquée.

base maximale Δx_{\max} des angularités négligées augmente. Ceci veut dire que plus la contrainte normale est élevée, plus grandes seront les aspérités cisaillées donc plus grandes seront les aspérités à négliger lors du calcul des angles extrêmes.

Les points sur la figure 6.4 ont été reliés par différents types de courbes (exponentielle, de puissance ou polynomiale) et c'est la courbe de puissance qui relie le mieux les points sur le graphique. L'équation de la courbe définie par cette répartition de points est la suivante :

$$D / \Delta x_{\max} = 1,1 * (\sigma_n / \sigma_c)^{-0,6029} \quad (6.1)$$

Où D est la dimension de la fracture.

Cette relation permet de déterminer, pour une valeur de contrainte normale appliquée, la valeur de la longueur de base maximale Δx_{\max} des angularités à négliger. Évidemment, cette relation est obtenue avec un nombre restreint de données ce qui fait qu'elle ne peut être utilisée avec certitude. De plus, les ajustements des courbes calculées aux courbes expérimentales à contrainte normale non nulle ont été faits dans différentes directions et mises sur le même graphique. Comme l'ont prouvé les essais expérimentaux, la dilatance démontre une dépendance directionnelle ce qui fait que chaque direction devrait être traitée séparément et non sur le même graphe. Donc, la figure 6.4 n'est en fait

qu'une approche afin de déterminer un lien entre la longueur de base maximale des aspérités négligées et la valeur de la contrainte normale appliquée.

Pour obtenir cette relation avec plus de certitude, il faudrait étudier les données selon la direction de cisaillement et vérifier si la relation est la même ou s'il y a dépendance directionnelle pour cette relation. De plus il faudrait un nombre beaucoup plus important d'essais expérimentaux à contrainte normale non nulle et cisaillés sur une plus grande distance pour permettre d'effectuer de meilleurs ajustements et de récolter plus de données. Il serait aussi préférable que ces essais proviennent tous de la même fracture et ait été effectués sous les mêmes conditions et par le même manipulateur, ce qui n'est pas le cas pour les données de la figure 6.4. Si plus de données étaient disponibles, il pourrait aussi être intéressant de vérifier, pour une direction de cisaillement, si la relation entre la longueur de base maximale Δx_{max} des angularités à négliger et la contrainte normale peut être ajustée aux distributions angulaires obtenues dans cette direction. Peut être qu'une analogie entre cette relation et les distributions d'angles extrêmes pourrait être faite. Si tel était le cas, alors il ne suffirait que de disposer de la distribution angulaire des facettes des aspérités dans la direction de cisaillement étudiée (ce que le logiciel CalculDilat peut déterminer rapidement) pour connaître la longueur de base maximale Δx_{max} des angularités à négliger et permettre ainsi de calculer les courbes de dilatance en fonction du déplacement en cisaillement sous une contrainte normale donnée en utilisant la méthode de calcul proposée.

Comme mentionné précédemment, les ajustements des courbes de dilatance calculées aux courbes de dilatance expérimentales, sous contrainte normale non nulle, présentés aux figures 6.3 et 6.4, se voulaient être une approche préliminaire afin de déterminer une relation entre la longueur de base maximale Δx_{\max} des aspérités négligées et la valeur de la contrainte normale appliquée. Pour approfondir ces travaux il faudrait plus de données expérimentales ~~et puisque cela déborde les objectifs fixés dans cette étude, la relation entre la longueur de base maximale Δx_{\max} et la valeur de la contrainte normale ne pourra être approfondie d'avantage~~. Toutefois, si une telle relation pouvait être déterminée, alors la méthode de calcul proposée pourrait tenir compte de cette relation afin de calculer les courbes de dilatance en fonction du déplacement en cisaillement d'une fracture, dans toutes les directions et sens de cisaillement donnés, pour toutes valeurs de contrainte normale appliquée.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS

Dans cette étude, l'objectif général était de déterminer un lien entre la morphologie des fractures et leur comportement mécanique. Plus précisément, l'étude était basée sur le comportement en dilatance, d'une fracture à surfaces irrégulières, en fonction de son déplacement en cisaillement, sous contrainte normale nulle. Une méthode de calcul a été proposée, utilisant le logiciel « CalculDilat », afin de déterminer les courbes de dilatance selon différentes directions et sens de cisaillement et sous contrainte normale nulle, en se servant des données morphologiques de la fracture à l'étude. Quatre directions ont été étudiées, chacune dans les deux sens de cisaillement. Les courbes calculées ont été comparées avec des courbes de dilatance expérimentales obtenues à partir d'essais en laboratoire, effectués sur cette même fracture, selon les mêmes directions et sens de cisaillement et sous contrainte normale nulle.

La méthode de calcul proposée utilise, pour l'évaluation de la dilatance, les valeurs des angles extrêmes (maximaux et minimaux), pour différentes longueurs de base d'aspérité, calculés avec le logiciel « CalculDilat » à partir des informations morphologiques des profils enregistrés sur les surfaces irrégulières d'une fracture étudiée en détail. Les distributions angulaires ainsi obtenues démontrent que la valeur des angles

extrêmes est inversement proportionnelle à la longueur de base des aspérités utilisée. Plus la longueur de base des aspérités augmente et plus la valeur des angles extrêmes diminue. Les distributions angulaires montrent que les angles extrêmes mesurés sur la surface inférieure de la fracture sont semblables à ceux obtenus sur la surface supérieure. Une dépendance directionnelle est également observable, c'est à dire que les distributions d'angles diffèrent selon les quatre directions étudiées. De plus, pour une même direction, les angles maximaux obtenus sont différents des angles minimaux calculés en valeurs absolues ce qui crée de la dépendance selon le sens de cisaillement.

Les courbes de dilatance déterminées en utilisant le logiciel « CalculDilat » ont été calculées, dans les quatre directions de cisaillement étudiées, à partir des distributions d'angles extrêmes préalablement obtenues. Puisque les courbes de dilatance découlent des distributions angulaires, il est normal d'y observer les mêmes phénomènes, entre autre, la courbe de dilatance calculée pour l'éponte inférieure est semblable à celle calculée pour l'éponte supérieure. Également, une dépendance selon la direction et le sens du cisaillement est visible sur les courbes de dilatance. Enfin, le taux de dilatance est très élevé dans les premiers millimètres de déplacement et plus le déplacement en cisaillement augmente plus le taux de dilatance diminue. Une grande partie de la dilatance est donc mobilisée dans les dix premiers millimètres de déplacement en cisaillement. Cette diminution du taux de dilatance avec l'augmentation du déplacement en cisaillement s'explique par le fait que plus le déplacement en cisaillement augmente plus les surfaces sont désenchevêtrées.

Des analyses ont été faites afin de déterminer combien de profils devaient être enregistrés pour obtenir des résultats suffisamment précis. Les résultats démontrent que dans certains cas, le fait de négliger des profils peut affecter grandement les courbes de dilatance obtenues. Tandis que, dans d'autres cas, le même nombre de profils négligés n'affectera que très peu ou pas du tout les courbes de dilatance calculées. Donc en fait, ces analyses ont démontré que les courbes de dilatance ne sont pas nécessairement sensibles aux nombres de profils utilisés pour les calculs mais d'avantage à certains profils utilisés lors des calculs. Certains profils recoupent d'importantes structures et ce sont ces profils qui affectent les courbes de dilatance résultantes. Donc, le nombre de profils ne doit pas nécessairement être très grand, l'important c'est que les profils soient localisés sur les structures de contrôle.

Des analyses ont été effectuées afin de déterminer si l'intervalle d'échantillonnage, 0,5 mm, sur les profils est approprié. Il n'a pas été possible de prendre un intervalle inférieur à 0,5 mm, par contre, il a été facile de prendre un intervalle d'échantillonnage plus grand, par exemple de 1 mm, 1,5 mm ou 2 mm en n'utilisant qu'une valeur sur deux, sur trois ou sur quatre. La comparaison des courbes de dilatance ainsi obtenues avec celles calculées pour un intervalle d'échantillonnage de 0,5 mm a indiqué que les courbes de dilatance peuvent être déterminées avec un pas de discréétisation de 1 mm sans changer les valeurs de dilatance obtenues. Un pas de discréétisation de 2 ou de 3 mm donne aussi de très bons résultats mais peut toutefois sous estimer la dilatance, il faut être plus prudent. Les résultats obtenus avec des pas de 4 et de 5 mm entraînent des sous-estimations importantes.

Les distributions des angles maximaux et minimaux ont également été calculées sur des plus petites surfaces (90 mm de diamètre) de cette même fracture. Puisque les résultats obtenus étaient différents, ceci a permis de démontrer que n'utiliser qu'une portion de la surface de la fracture pour faire les calculs est inadéquat pour bien prédire le comportement en dilatance de la fracture entière. Des structures qui ne sont pas présentes sur ces portions plus petites peuvent affecter le comportement en dilatance de la fracture originale.

La vérification de la validité des courbes de dilatance, calculées en utilisant le logiciel « CalculDilat », a été réalisé à l'aide des courbes obtenues lors d'essais de cisaillement effectués sur une réplique de la fracture utilisée pour les enregistrements des profils. Le cisaillement a été effectué, sous contrainte normale nulle, dans les mêmes quatre directions d'études des courbes de dilatance calculées et dans les deux sens.

La comparaison entre les résultats calculés et les résultats expérimentaux a démontré que dans la majorité des cas étudiés, il y a une concordance presque parfaite entre les courbes de dilatance calculées et les courbes expérimentales. Par contre, dans les cas où le cisaillement est effectué selon une pente générale négative, direction 0, 4 et 5 dans les sens 150, 240 et 270°, pour un déplacement en cisaillement supérieur à 10 mm, la courbe de dilatance expérimentale est située en dessous de la courbe de dilatance calculée. Une raison envisagée pour expliquer le fait que le cisaillement effectué dans le sens de la pente générale négative ne coïncide pas avec les résultats escomptés est que le modèle de

simulation proposé ne tient pas compte de la possibilité du rapprochement des surfaces lors du déplacement en cisaillement.

Toutefois, même si les courbes calculées et expérimentales ne concordent pas parfaitement dans tous les cas, elles sont similaires puisqu'elles montrent sensiblement les mêmes variations en fonction du déplacement en cisaillement. Ces variations sont probablement causées par des changements de structures lors du chevauchement des aspérités. Cette similitude entre les courbes de dilatance expérimentales et calculées indique que le logiciel « CalculDilat » utilise adéquatement les informations morphologiques pour simuler le comportement en dilatance de la fracture étudiée. Les courbes expérimentales diffèrent d'une direction à l'autre et également selon le sens du cisaillement, démontrant que le comportement de la dilatance dépend de la direction et du sens de cisaillement étudié. Puisque, pour chaque direction et sens de cisaillement, les courbes calculées sont semblables aux courbes expérimentales, cela confirme que le modèle de simulation proposé permet de reproduire cette dépendance selon la direction et le sens du cisaillement.

Lorsque le cisaillement est effectué selon une pente générale négative, la courbe expérimentale se situe en dessous des courbes calculées. Un ajustement de ces courbes a été réalisé en diminuant tous les angles utilisés pour le calcul, d'un angle constant $\Delta\alpha$ pour permettre l'ajustement des courbes de dilatance calculées aux courbes de dilatance expérimentales. Cet ajustement a pour effet de prendre en considération les angles des pentes négatives des profils dans les calculs des angles extrêmes. La dépendance observée

entre les différentes directions implique que la valeur utilisée de $\Delta\alpha$ varie en fonction de l'orientation du cisaillement. La comparaison a démontré que les courbes calculées ajustées coïncident presque parfaitement avec les courbes expérimentales. Toutefois, les valeurs de l'angle $\Delta\alpha$ utilisées pour l'ajustement varient en fonction de la pente générale de la direction de cisaillement. La relation entre l'angle $\Delta\alpha$ utilisé pour l'ajustement et la valeur de la pente générale dans la direction de cisaillement n'a pu être déterminée faute d'informations complètes et de temps. Néanmoins, la comparaison a permis de démontrer qu'avec cet ajustement la courbe expérimentale concorde avec la courbe calculée. Donc ceci serait une bonne approche pour trouver une solution afin que les courbes de dilatance calculées selon une pente générale négative des profils coïncident avec les résultats expérimentaux.

Pour simuler les effets de la contrainte normale, les aspérités ayant une faible longueur de base (calculées avec un petit pas de discrétisation) n'ont pas été considérées dans les calculs des distributions des angles extrêmes et des courbes de dilatance. Plus la valeur de la contrainte normale à simuler augmente plus la longueur de base des singularités à négliger doit augmenter.

À partir des distributions angulaires simulant l'application d'une contrainte normale, les courbes de dilatance ont été tracées. La comparaison de ces courbes, avec celles calculées sous contrainte normale nulle, a démontré que le fait de négliger certains angles à

petites longueurs de base provoque bien une diminution de la dilatance simulant donc une courbe de dilatance à contrainte normale non nulle.

Afin de pouvoir déterminer, pour une certaine valeur de contrainte normale, quelle est la longueur de base maximale Δx_{\max} des aspérités à négliger, les courbes de dilatance calculées avec la méthode proposée ont été ajustées sur des courbes de dilatance obtenues expérimentalement sous différentes valeurs de contrainte normale. L'ajustement a été effectué en négligeant, dans les calculs des distributions angulaires, les angles ayant une longueur de base inférieure à une certaine valeur Δx_{\max} . Une relation permettant de déterminer, pour une valeur de contrainte normale appliquée, la valeur de la longueur de base maximale Δx_{\max} des angularités à négliger a été déterminée :

$$D / \Delta x_{\max} = 1,1 * (\sigma_n / \sigma_c)^{-0,6029}$$

Cette relation a été obtenue avec un nombre restreint de données ce qui fait qu'elle ne peut être utilisée avec certitude. Il faudrait disposer d'un nombre beaucoup plus important d'essais expérimentaux à contrainte normale non nulle, cisaillés sur une plus grande distance, dans différentes directions et sens de cisaillement afin d'effectuer de meilleurs ajustements et de dégager une méthode ou une relation plus précise pour évaluer l'effet de l'accroissement de la contrainte normale sur la réduction des angles extrêmes (maximaux et minimaux) des aspérités, se traduisant par un accroissement de la longueur

de base Δx_{\max} des aspérités impliquées. Ces travaux pour intégrer la contrainte normale à la méthode de calcul proposée, sont préliminaire et demandent d'être approfondie par la réalisation d'un programme d'essais de cisaillement direct sur des répliques de la fracture sous les conditions mentionnées plus haut. Toutefois, si une telle relation pouvait être déterminée, alors la méthode de calcul proposée pourrait tenir compte de cette relation afin de calculer les courbes de dilatance en fonction du déplacement en cisaillement d'une fracture, dans toutes les directions de cisaillement voulues pour toutes valeurs de contrainte normale appliquée.

Puisque la taille de la fracture influence son comportement en dilatance, si des travaux devaient être poursuivis pour approfondir cette étude, des surfaces de plus grandes dimensions seraient préférables. Il serait intéressant de déterminer, pour les sens de cisaillement effectués selon une pente générale négative, une méthode ou une relation permettant de corriger les angles extrêmes pour permettre de tracer des courbes de dilatance calculées concordant parfaitement avec les courbes expérimentales. Également, il serait nécessaire d'établir une relation générale entre la longueur de base des aspérités cisaillées et la valeur de la contrainte normale.

L'étude présentée ici à permis de démontrer que la méthode de calcul proposée est efficace. Un programme d'essais supplémentaires impliquant de grands déplacements en cisaillement sous différentes contraintes normales dans différentes directions de cisaillement, permettrait d'établir ou d'adapter une relation généralisée entre les angles de

pente des aspérités et l'accroissement de contrainte normale, relation pouvant être intégrée au logiciel proposé. Ceci permettrait de déterminer le comportement en dilatance de toutes sortes de fractures, dans toutes les directions et sens de cisaillement voulues, pour toutes valeurs de déplacements en cisaillement et sous l'influence de toutes valeurs de contraintes normales et ce, en ne disposant que de quelques profils prélevés sur les surfaces de la fracture et du logiciel « CalculDilat ».

RÉFÉRENCES

- AMSA (Am. Standards Assoc.) 1955. Surface Roughness, Waviness and Lay. ASA B46.1
- Archambault, G., Gentier, S., Riss, J. & Flamand, R. 1997. The Evolution of Void Spaces (Permeability) in Relation with Rock Joint Shear Behavior. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 34(3-4), paper no : 14.
- Archambault, G., Flamand, R., Gentier, S., Riss, J. & Sirieix, C. 1996. Joint shear behavior revised on the basis of morphology 3D modelling and shear displacement. Proceeding of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium. (Aubertin, Hassani & Mitri, eds) Balkema, pp. 1223-1230.
- Archambault, G., Gentier, S., Riss, J., Flamand, R. & Sirieix, C. 1996. Rock joint shear mechanical behavior with 3D surfaces morphology and degradation during shear displacement. Proc. Eurock 96 Symposium (G. Barla, ed.) Balkema pp :247-254.
- Archambault, G., Gentier, S., Riss, J., Flamand, R., Sirieix, C. 1995. A re-evaluation of irregular joint shear behavior on the basis of 3D modelling of their morphology: Joint mechanical shear behavior and modelling. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith (ed), Balkema, pp. 163-168.
- Bandis, S. C., Lumsden, A. C. & Barton, N. R. 1981. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 18 : 1-21.
- Barton, N. R. 1971. A Relationship between joint roughness and joint shear strength. Symposium Soc. Internat. Mécanique des Roches, Nancy. P 1- 8.
- Barton, N. & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics. 10(1-2) : 1-65.
- Bendat, J. S. & Piersol, A. G. 1971. Random Data Analysis and Measurement Procedures. Wiley Interscience, Toronto.

- Brown, S. R. 1987. A note on the description of surface roughness using fractal dimension. *Geophysical Research Letters*. 14(11) : 1095-1098.
- Cox, B. L. & Wang, J. S. Y. 1993. Fractal Surfaces : Measurement and Applications in the Earth Sciences. *Fractals*, 1(1) : 87-115.
- Chiles, J. P. 1977. Géostatistique des phénomènes non stationnaires. Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I.
- Dight, P. M. & Chiu, H. K. 1981. Prediction of Shear Behavior of Joints Using Profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*. 18 : 369-386.
- Fecker, E. & Rengers, N. 1971. Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass. *Proc. Symp. on Rock Fracture*, Nancy: paper 1-18.
- Flamand, R., Archambault, G., Gentier, S., Riss, J. & Rouleau, A. 1994. An experimental study of the shear behavior of irregular joints based on angularities and progressive degradation of the surfaces. *Proc. 47th Canadian Geotechnical Conference of the C. G. S.*, Halifax, Nova Scotia, pp. 253-262.
- Gentier, S., Petitjean, C., Riss, J. & Archambault, G. 1996. Hydromechanical behavior of a natural joint under shearing. *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium*. (Aubertin, Hassani & Mitri, eds) Balkema, pp. 1201-1208.
- Gentier, S. & Riss J. 1990. Quantitative description and modelling of joints morphology. *Rock Joints*, Barton & Stephansson (eds), Balkema, pp. 375-382.
- Gentier, S. 1986. Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France. 637p.
- Goodman, R. E. 1976. *Methods of Geological Engineering*. West Publishing Co. 473p.
- Huang, T. H. & Doong, Y. S. 1990. Anisotropic shear strength of rock joints. *Proc. of the Int. Symp. on Rock Joints*, Loen. pp 211-218.
- ISRM, 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts* 15(6) : 319-368.

- Jing, L., Nordlund, E. & Stephansson O. 1992. An Experimental Study on the Anisotropy and Stress-Dependency of the Strength and Deformability of Rock Joints. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 29 : 535-542.
- Kimura, T. & Esaki, T. 1995. A new model for the shear strength of rock joints with irregular surfaces. Mechanics of Jointed and Faulted Rock. pp. 133-138.
- Krahn, J. & Morgenstern, N. R. 1979. The Ultimate Frictional Resistance of Rock Discontinuities. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 16 : 127-133.
- Lee, Y. -H., Carr, J. R., Barr, D. J. & Haas, C. J. 1990. The Fractal Dimension as a Measure of the Roughness of Rock Discontinuity Profiles. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 27(6) : 453-464.
- Mandelbrot, B. B. 1977. Fractals-Form, Chance and Dimension. Freeman, San Francisco. pp.1-94
- Matheron, G. 1970. La théorie des variables régionalisées et ses applications. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. 212 p.
- Myers, N. O. 1962. Characterization of surface roughness. Wear. 5 : 182-189.
- Ohnishi, Y., Herda, H. & Yoshinaka, R. 1993. Shear strength scale effect and the geometry of single and repeated rock joints. Scale Effects in Rock Masses. Balkema, Rotterdam. pp 167-173.
- Ohnishi, Y & Yoshinaka, R. 1992. Laboratory Investigation of Scale Effect in Mechanical Behavior of Rock Joint. Proc. Fractured and Jointed Rock Masses, ISRM (Myer, Cook, Goodman & Tang, eds) Balkema, pp. 484-489.
- Rengers, N. 1970. Influence of Surface Roughness on the Friction Properties of Rock Planes. Proceedings of the Second Congress of the International Society of Rock Mechanics, Belgrade, Vol, 1, pp. 229-234.
- Reeves, M. J. 1985. Rock Surface Roughness and Frictional Strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 22(6) : 429-442.
- Riss, J., Gentier, S., Archambault, G. & Flamand, R. 1997. Sheared Rock Joints : Dependence of Damage Zones on Morphological Anisotropy. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 34(3-4), paper no : 258.

- Riss, J., Gentier, S., Sirieix, C., Archambault, G. & Flamand, R. 1996. Degradation characterization of sheared joint wall surface morphology. Proceedings of the 2nd Norh American Rock Mechanics Symposium (Aubertin, Hassani & Mitri, eds) Balkema, pp. 1343-1349.
- Riss, J., Gentier, S., Archambault, G., Flamand, R. & Sirieix, C. 1995. Irregular joint shear behavior on the basis of 3D modelling of their morphology : Morphology description and 3D modelling. MJFR Ed. Rossmanith, Balkema, Rotterdam. pp. 163-167.
- Riss, J. & Gentier, S. 1990. Angularity of a natural rock fracture. Mechanics of Jointed and Faulted Rock (MJFRI) Rossmanith ed., Balkema, pp 399-406.
- Riss, J. & Gentier, S. 1989. Linear and areal roughness of non planar rock surfaces of fractures. *Acta Stereologica*. 8 : 677-682.
- Roko, R. O. & Daemen, J. J. K. 1995. The shearing mechanism during translation. Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Rossmanith, Balkema, Rotterdam. pp. 507-514.
- Roko, R. O., Daemen, J. J. K. & Myers, D. E. 1997. Variogram Characterization of Joint Surface Morphology and Asperity Deformation During Shearing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 34(1) : 71-84.
- Sayles, R. S. & Thomas, T. R. 1977. The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: A pratical alternative to correlation. *Wear*. 42 : 263-276.
- Scriven, R. A. & Williams H. D. 1965. The derivation of angular distribution of planes by sectioning methods. *Trans. of the metallurgical Soc. of Aime*. 233 : 1593-1602.
- Sfondrini, G. & Sterlacchini, S. 1996. Influence of joint roughness on discontinuity shear strength. *Proc. Eurock 96* (Barla ed.), Balkema, Rotterdam. pp 135-142.
- Stephanson, O. & Jing L. 1995. Testing and modeling of rock joints. MJFR (Rossmanith ed.), Balkema, Rotterdam. pp. 37-47.
- Swan, G. & Zongqi, S. 1985. Prediction of Shear Behaviour of Joints Using Profiles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 18 : 183-212.
- Thomas, T. R. 1982. Rough Surfaces. Longman. 261p.

- Tien, H. W. & Elfatih, M. A. 1978. Statistical Representation of Joint Roughness. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 15 : 259-262.
- Tse, R. & Cruden, D. M. 1979. Estimating Joint Roughness Coefficients. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 16 : 303-307.
- Turk, N., Greig, M. J., Dearman, W. R. & Amin, F. F. 1987. Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension. Proc. 28th U. S. Rock Mech. Symp. pp. 1223-1236.
- Venkatachalam, G. 1985. Modeling of rock joints. Proc. of Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Bjorkliden, pp. 453-459.
- Verreault, N. 1997. Analyse morphologique d'une fracture. Rapport de Stage Coopération franco-qubécoise. 17 p.
- Yang, Z. Y. & Lo, S. C. 1997. An Index for Describing the Anisotropy of Joint Surfaces. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 34(1) : 1031-1044.
- Yu, X. & Vayssade, B. 1991. Joint Profiles and their Roughness Parameters. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts. 28 : 333-336.

ANNEXE 1

CODE DU PROGRAMME “CALCULDILAT”

Le programme “CalculDilat”, utilisé pour les calculs des distributions d’angles extrêmes et des courbes de dilatance, a été écrit en *Visual Basic pour Excel*. Les lignes de code qui dictent les instructions à suivre lors de l’exécution du programme sont les suivantes:

```
Option Explicit
Const NombrePointsMax = 250
Const NombremaxFichiers = 10
Const NombreProfilsMax = 10
Const CoefContNorm = 1 '(1)Affecte un plus grand pas à un dep en cis pour simul Cont Norm
Const IntervEchantil = 0.5 '(0.5)Dist en mm d'échantillonnage IntervEchan/Multiple = 0.5
Const Multiple = 1 '(1)une valeur sur multiple de l'échantillonnage
Const DeltaX = 0.5 '(0.5)DeltaX ne peut pas etre plus petit que IntervEchantil
'(*-----
Sub Arret()
Dim StyleBoiteDialogue As Integer, Reponse As Integer
    StyleBoiteDialogue = vbCritical
    Reponse = MsgBox("Arrêt", StyleBoiteDialogue, "Arrêt")
    Stop
End Sub
'(*-----
Sub Choix_Eric_Rock()
Dim NombreDeProfils As String
Dim Prénom_Choisi As String, Eponte As String, Direction As String
Dim NomFichieràTraiter As String, Racine As String, PremierTousProfils As Integer
Dim Coord(1 To NombremaxFichiers, 1 To NombrePointsMax, 1 To 2) As Double
Dim CoordDep(1 To NombremaxFichiers, 1 To NombrePointsMax, 1 To 2) As Double
Dim TailleProfil As Integer, u_Dir As Integer
Dim X As Double, Z As Double, TousProfils As Variant
Dim DistribAngul(1 To NombrePointsMax, 1 To 3) As Double
Dim Commen As String, u_Date As Integer, Y As Double, N As Integer
Dim Pas As Double, k As Double, Teta As Double, MaxAngle As Double
```

```

Dim MinAngle As Double, NumPoint As Integer
Dim DilatancePos As Double, DilatanceNeg As Double
Dim NombreFichiers As Integer, u_B As String
Dim TetaMaxDeg As Double, TetaMinDeg As Double
Dim MaxTailleProfil As Integer
Dim Z1Pos As Double, Z2Pos As Double, Z1Neg As Double, Z2Neg As Double
Dim X1Pos As Double, X2Pos As Double, X1Neg As Double, X2Neg As Double
Dim YPos As Double, YNeg As Double
Dim CoordMax(1 To NombrePointsMax, 1 To 5)
Dim CoordMin(1 To NombrePointsMax, 1 To 5)
Dim Nu As Integer
Dim NuméroDesProfils(1 To 10)
Dim i As Integer
Dim Num As String
Dim PasEcrit As Double
Dim Ligne As Double

```

```

' Demander informations avec la Boîte Dial. concernant les profils à étudier.
Sheets("ChoixEricRock").Show
Prénom_Choisi = Sheets("Choix").Range("A5").Value
Direction = Sheets("Choix").Range("B7").Value
Eponte = Sheets("Choix").Range("A14").Value
NombreDeProfils = Sheets("Choix").Range("C14").Value

```

```

If NombreDeProfils = "Tous" Then
Else
  If NombreDeProfils < 5 Then
    Sheets("ChoixDesProfils1").Show
  Else
    Sheets("ChoixDesProfils2").Show
  End If
  For i = 1 To NombreProfilsMax
    Num = i + 1
    If i > NombreDeProfils Then
      NuméroDesProfils(i) = "Faux"
    Else
      NuméroDesProfils(i) = Sheets("Choix").Range("E" + Num).Value
    End If
    Sheets("Choix").Range("F" + Num).Value = NuméroDesProfils(i)
  Next i
End If

```

```

' Noms et localisation des fichiers à traiter selon le cas Eric ou Rock
If Prénom_Choisi = "Eric" Then
  'On traite les fichiers d'Eric
  NomFichieràTraiter = "E_icr" + Eponte + "14.l" + Direction
  Racine = "c:\mes documents\rugosimètre\Eric\""
Else
  ' On traite les fichiers de Rock
  NomFichieràTraiter = "R_ckO" + Eponte + "0.L" + Direction
  Racine = "c:\mes documents\rugosimètre\Rock\""

```

End If

*****Ouverture du fichier*****
' Nombre de fichiers à considérer en tenant compte de la direction choisie

```
If Prénom_Choisi = "Eric" Then      'Cas d'Eric
  NombreFichiers = 10
  If Direction = "1" Then      'Direction 1 et 5 seulement 8 et 9 profils
    NombreFichiers = 8
  End If
  If Direction = "5" Then
    NombreFichiers = 9
  End If
Else                      'Cas de Rock
  NombreFichiers = 7
  If Direction = "1" Then      'Pour Rock Direction 1, seulement 6 profils
    NombreFichiers = 6
  End If
End If
```

```
For PremierTousProfils = 1 To NombreFichiers
  TousProfils = PremierTousProfils
  If NombreDeProfils = "Tous" Then
  Else
    TousProfils = NuméroDesProfils(PremierTousProfils)
  End If
  If TousProfils = "Faux" Then
  Else
    If TousProfils < 10 Then
      u_B = Chr(TousProfils + 48)  'Les profils 1 à 9
    Else
      u_B = "a"                  'Le profil a
    End If
```

*****Lecture et mémorisation des données des fichiers*****

```
Close #1
Open Racine + NomFichieràTraiter + u_B For Input Access Read As #1
Input #1, TailleProfil
If PremierTousProfils = 1 Then
  MaxTailleProfil = TailleProfil
Else
  If TailleProfil > MaxTailleProfil Then
    MaxTailleProfil = TailleProfil
  End If
End If
Input #1, u_Dir
Input #1, Commen
Input #1, u_Date
Input #1, Y
For N = 1 To TailleProfil
  Input #1, X, Z
```

```

CoordDep(PremierTousProfils, N, 1) = X
CoordDep(PremierTousProfils, N, 2) = Z
Next N
Close #1

'Ne prendre qu'une valeur sur x valeurs
For Nu = 1 * Multiple To TailleProfil Step Multiple
    N = Nu / Multiple
    Coord(PremierTousProfils, N, 1) = CoordDep(PremierTousProfils, Nu, 1)
    Coord(PremierTousProfils, N, 2) = CoordDep(PremierTousProfils, Nu, 2)
Next Nu

'-----Ouverture d'un classeur qui contiendra les résultats-----
If PremierTousProfils = 1 Then
    Workbooks.Add
    Sheets("Feuil1").Select
    Sheets("Feuil1").Name = "Résultats"

    ' Légende des colonnes sur la feuille contenant les résultats
    Range("A5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Pas"
    Range("B5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Angle Max"
    Range("C5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Angle Min"
    Range("F5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "X1 Pos"
    Range("G5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "X2 Pos"
    Range("H5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Y Pos"
    Range("I5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Z1 Pos"
    Range("J5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Z2 Pos"
    Range("K5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "X1 Neg"
    Range("L5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "X2 Neg"
    Range("M5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Y Neg"
    Range("N5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Z1 Neg"
    Range("O5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Z2 Neg"
    Range("D5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "DilatPos"
    Range("E5").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "DilatNeg"
    Range("C1").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Fichiers"
    Range("C2").Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = Prénom_Choisi
Range("D1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Direction"
Range("D2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = Direction
Range("E1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "Eponte"
Range("E2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = Eponte
Sheets("Feuil2").Select
Sheets("Feuil2").Name = "Infos"
Range("A1").Value = "Nombre de profils utilisés pour les calculs = " + NombreDeProfils
Range("A3").Value = "Liste des profils :"
End If

```

```

'Identification du profil
Sheets("Infos").Select
Cells(3 + PremierTousProfils, 1).Value = TousProfils
Sheets("Résultats").Select

```

```

' Calculs de tous les angles sur tous les profils et on ne conserve que
' la valeur de l'angle maximal et minimal pour chaque pas ainsi que les
' coordonnées (X1, Y,Z1) et (X2, Y, Z2) de ces angles max ou min.

```

```

For k = CoefContNorm To TailleProfil / Multiple * IntervEchantil / DeltaX - 1 Step CoefContNorm
  Pas = k * DeltaX
  PasEcrit = k / CoefContNorm * DeltaX
  Ligne = k / CoefContNorm
  Cells(6 + Ligne, 1).Value = PasEcrit
  MinAngle = 0
  MaxAngle = 0
  X1Pos = 0
  X2Pos = 0
  X1Neg = 0
  X2Neg = 0
  Z1Pos = 0
  Z2Pos = 0
  Z1Neg = 0
  Z2Neg = 0
  YPos = 0
  YNeg = 0
  Teta = (Atn((Coord(PremierTousProfils, 1 + Pas / IntervEchantil, 2) - _
                Coord(PremierTousProfils, 1, 2)) / (k * DeltaX)))
  If Teta > 0 Then
    MaxAngle = Teta
    Z1Pos = Coord(PremierTousProfils, 1, 2)
    Z2Pos = Coord(PremierTousProfils, Pas / IntervEchantil + 1, 2)
    X1Pos = Coord(PremierTousProfils, 1, 1)
    X2Pos = Coord(PremierTousProfils, Pas / IntervEchantil + 1, 1)
    YPos = Y
  Else

```

```

MinAngle = Teta
Z1Neg = Coord(PremierTousProfils, 1, 2)
Z2Neg = Coord(PremierTousProfils, Pas / IntervEchantil + 1, 2)
X1Neg = Coord(PremierTousProfils, 1, 1)
X2Neg = Coord(PremierTousProfils, Pas / IntervEchantil + 1, 1)
YNeg = Y
End If

For NumPoint = 2 To TailleProfil / Multiple - Pas / IntervEchantil - 1
  Teta = (Atn((Coord(PremierTousProfils, NumPoint + Pas / IntervEchantil, 2) - -
    Coord(PremierTousProfils, NumPoint, 2)) / (k * DeltaX)))
  If Teta > MaxAngle Then
    MaxAngle = Teta
    Z1Pos = Coord(PremierTousProfils, NumPoint, 2)
    Z2Pos = Coord(PremierTousProfils, NumPoint + Pas / IntervEchantil, 2)
    X1Pos = Coord(PremierTousProfils, NumPoint, 1)
    X2Pos = Coord(PremierTousProfils, NumPoint + Pas / IntervEchantil, 1)
    YPos = Y
  End If
  If Teta < MinAngle Then
    MinAngle = Teta
    Z1Neg = Coord(PremierTousProfils, NumPoint, 2)
    Z2Neg = Coord(PremierTousProfils, NumPoint + Pas / IntervEchantil, 2)
    X1Neg = Coord(PremierTousProfils, NumPoint, 1)
    X2Neg = Coord(PremierTousProfils, NumPoint + Pas / IntervEchantil, 1)
    YNeg = Y
  End If
  Next NumPoint
  If PremierTousProfils = 1 Then
    DistribAngul(k, 1) = Pas
    DistribAngul(k, 2) = MaxAngle
    DistribAngul(k, 3) = MinAngle
    CoordMax(k, 1) = X1Pos
    CoordMax(k, 2) = X2Pos
    CoordMax(k, 3) = YPos
    CoordMax(k, 4) = Z1Pos
    CoordMax(k, 5) = Z2Pos
    CoordMin(k, 1) = X1Neg
    CoordMin(k, 2) = X2Neg
    CoordMin(k, 3) = YNeg
    CoordMin(k, 4) = Z1Neg
    CoordMin(k, 5) = Z2Neg
  End If
  ' Pour les autres profils, on compare les valeurs actuelles avec celles
  ' obtenues pour le premier profil et on retient les valeurs maximales.
  Else
    If MaxAngle > DistribAngul(k, 2) Then
      DistribAngul(k, 2) = MaxAngle
      CoordMax(k, 1) = X1Pos
      CoordMax(k, 2) = X2Pos
      CoordMax(k, 3) = YPos
      CoordMax(k, 4) = Z1Pos

```

```

        CoordMax(k, 5) = Z2Pos
    End If
    If MinAngle < DistribAngul(k, 3) Then
        DistribAngul(k, 3) = MinAngle
        CoordMin(k, 1) = X1Neg
        CoordMin(k, 2) = X2Neg
        CoordMin(k, 3) = YNeg
        CoordMin(k, 4) = Z1Neg
        CoordMin(k, 5) = Z2Neg
    End If
    End If
'Conversion des angles en degrés
Dim AngDegMin As Double
Dim AngDegMax As Double
AngDegMin = DistribAngul(k, 3) * 360 / 2 / 3.14159
AngDegMax = DistribAngul(k, 2) * 360 / 2 / 3.14159
If Prénom_Choisi = "Eric" Then
    If Eponte = "b" Then
        AngDegMin = -AngDegMin
        AngDegMax = -AngDegMax
    End If
    If Direction < "3" Then
        AngDegMin = -AngDegMin
        AngDegMax = -AngDegMax
    End If
End If
*****
*****Affichage des données*****
Cells(6, 1).Value = 0
Cells(6 + Ligne, 3).Select
'Cells(6 + k, 2).Value = DistribAngul(k, 2)
'Cells(6 + k, 3).Value = DistribAngul(k, 3)
Cells(6 + Ligne, 2).Value = AngDegMax
Cells(6 + Ligne, 3).Value = AngDegMin
Cells(6 + Ligne, 6) = CoordMax(k, 1)
Cells(6 + Ligne, 7) = CoordMax(k, 2)
Cells(6 + Ligne, 8) = CoordMax(k, 3)
Cells(6 + Ligne, 9) = CoordMax(k, 4)
Cells(6 + Ligne, 10) = CoordMax(k, 5)
Cells(6 + Ligne, 11) = CoordMin(k, 1)
Cells(6 + Ligne, 12) = CoordMin(k, 2)
Cells(6 + Ligne, 13) = CoordMin(k, 3)
Cells(6 + Ligne, 14) = CoordMin(k, 4)
Cells(6 + Ligne, 15) = CoordMin(k, 5)
Next k
End If
Next PremierTousProfils
Cells(5, 1).Select
**** A partir de la distribution des angles on calcul la dilatance*****
For k = CoefContNorm To MaxTailleProfil - 1 Step CoefContNorm

```

```

***Inversion des données pour l'éponte supérieure
If Prénom_Choisi = "Eric" Then
If Eponte = "b" Then
  DistribAngul(k, 2) = -DistribAngul(k, 2)
  DistribAngul(k, 3) = -DistribAngul(k, 3)
End If
If Direction < "3" Then
  DistribAngul(k, 2) = -DistribAngul(k, 2)
  DistribAngul(k, 3) = -DistribAngul(k, 3)
End If
End If
*****
' Calcul de la dilatance pour un cisaillement dans le sens _
' d'enregistrement des profils au rugosimètre (angles maximums).

DilatancePos = Tan(DistribAngul(k, 2)) * k / CoefContNorm * DeltaX

' Calcul de la dilatance pour un cisaillement inverse au sens _
' d'enregistrement des profils (angles minimums).

DilatanceNeg = Tan(DistribAngul(k, 3)) * k / CoefContNorm * DeltaX

' If Eponte = "b" Then
'   DilatancePos = -DilatancePos
'   DilatanceNeg = -DilatanceNeg
' End If
Cells(6, 4).Value = 0
Cells(6, 5).Value = 0
Cells(6 + k / CoefContNorm, 4).Value = DilatancePos
Cells(6 + k / CoefContNorm, 5).Value = DilatanceNeg
Next k
End Sub

```

ANNEXE 2

GRAPHIQUES

Afin de faciliter la comparaison, les résultats ont été présentés, pour les quatre directions de cisaillement, sur les mêmes figures. Les graphiques sont repris dans cette annexe à une échelle agrandie pour permettre une meilleure observation des détails.

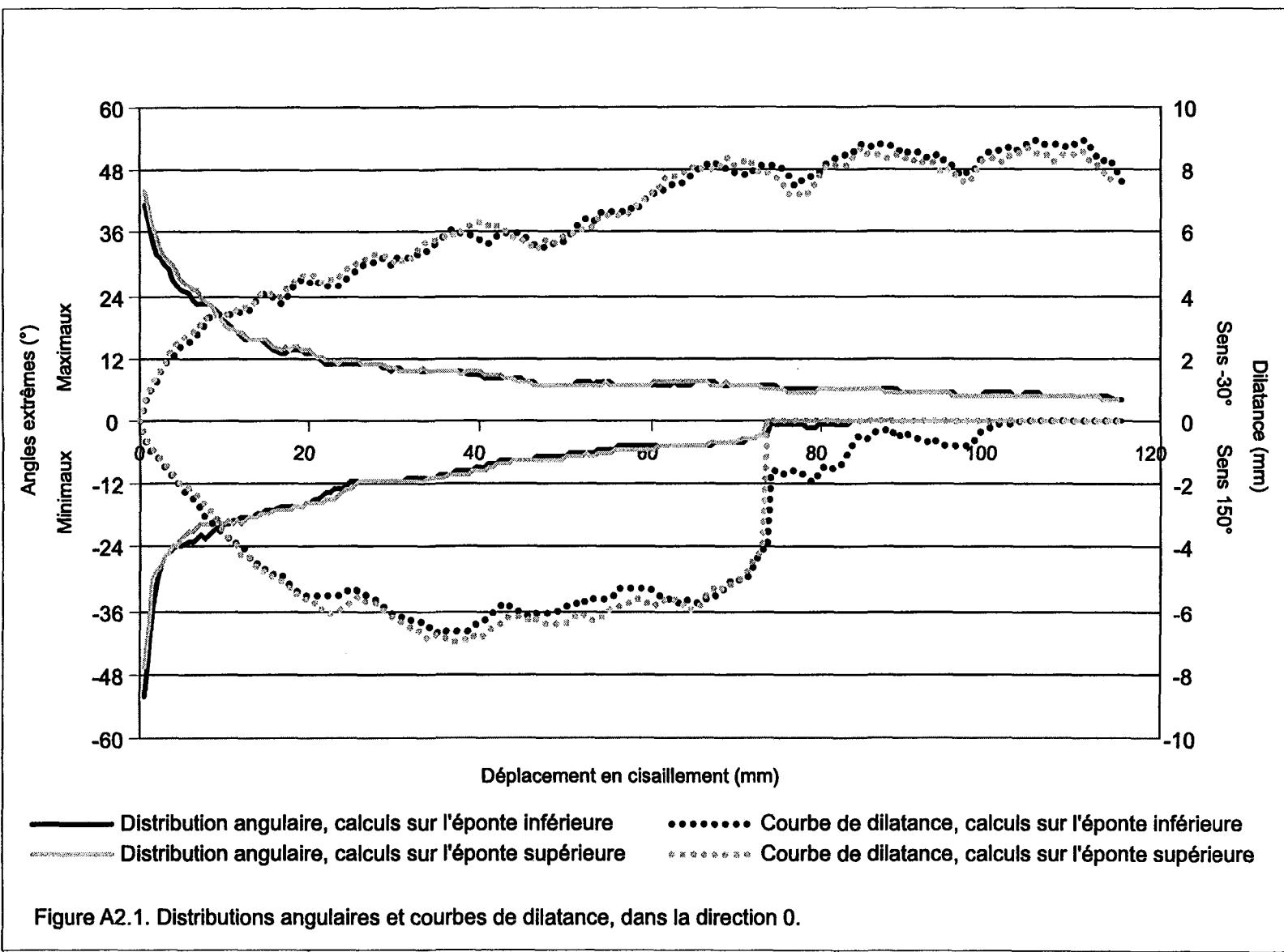
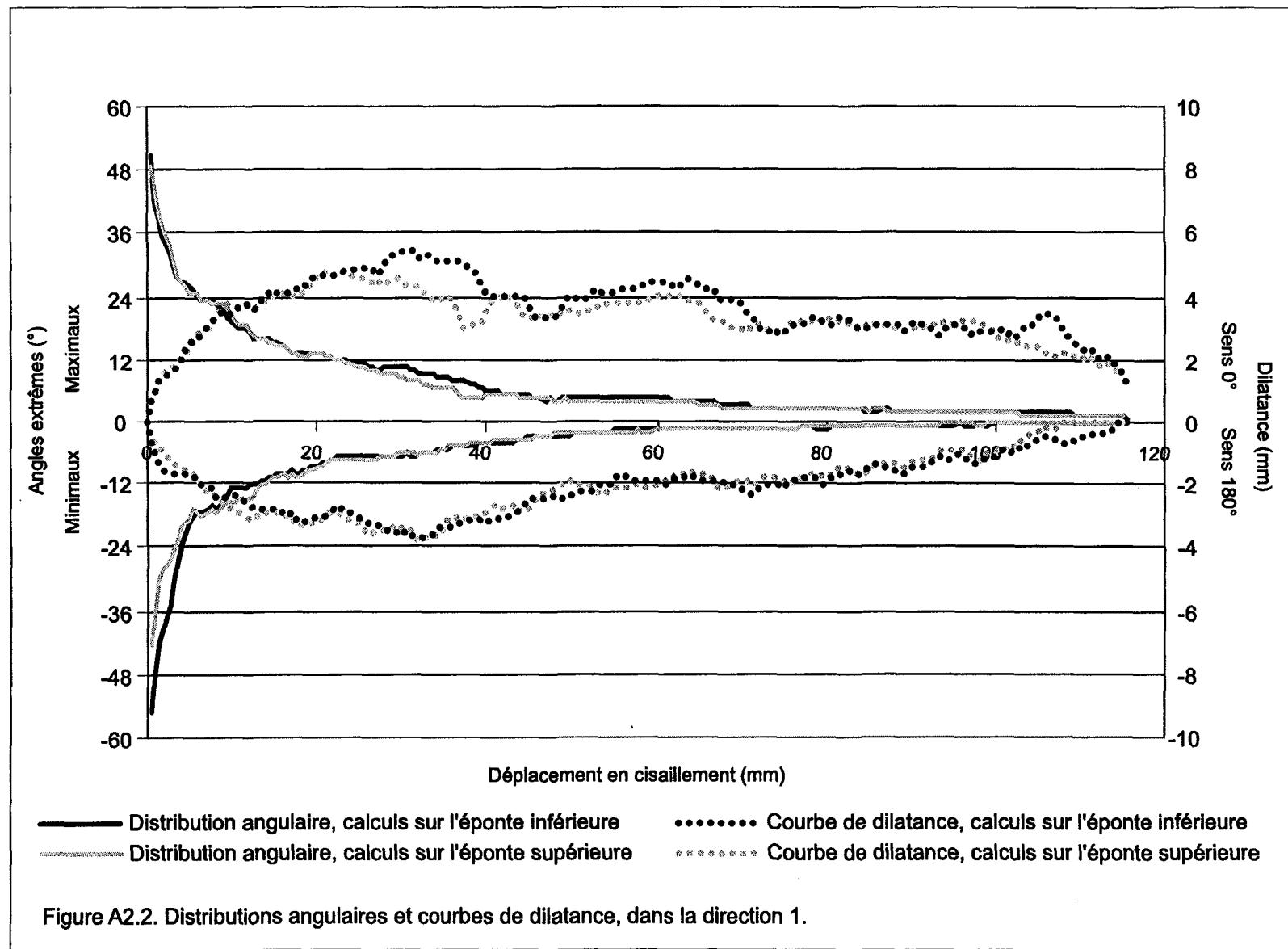
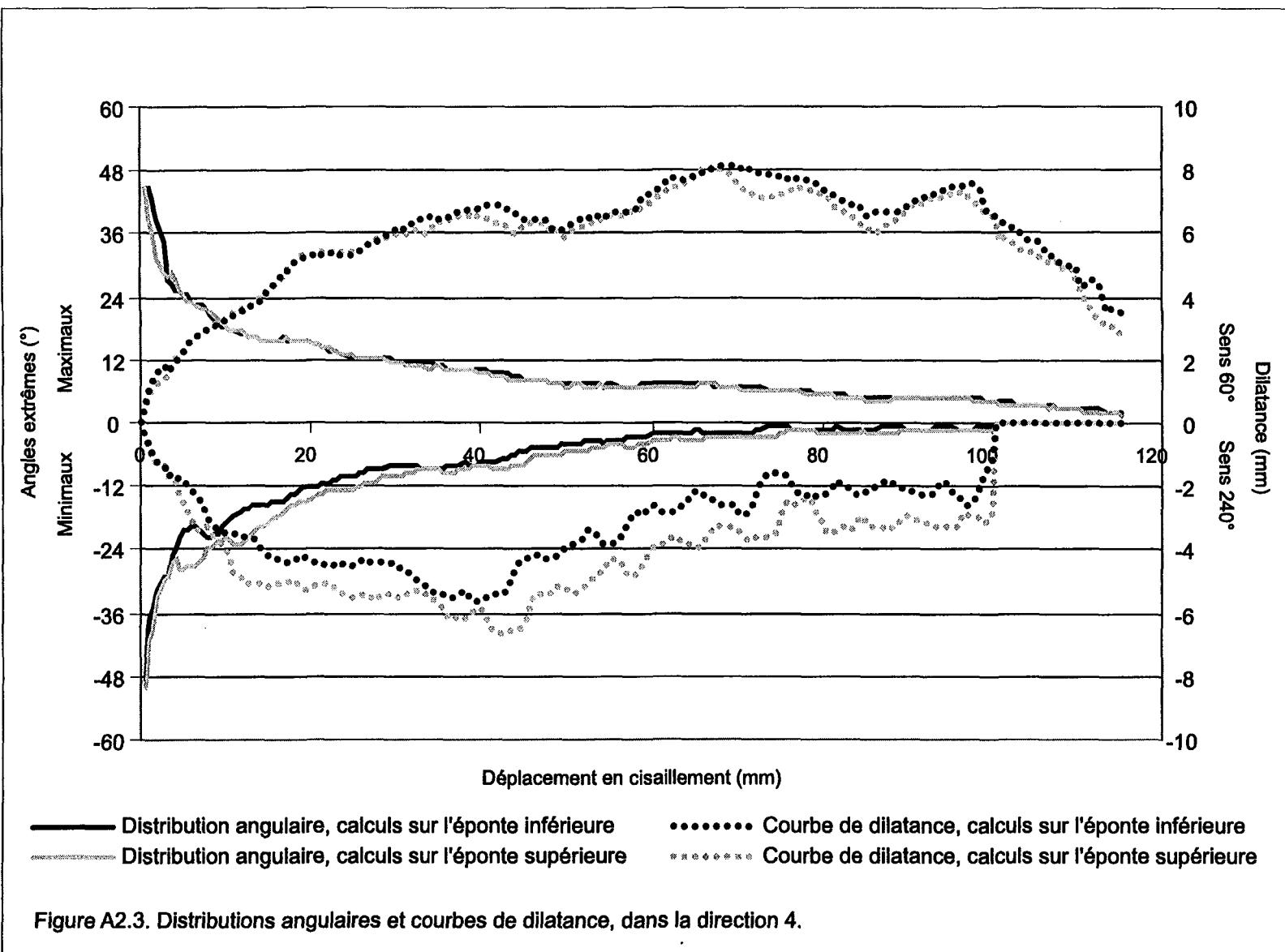
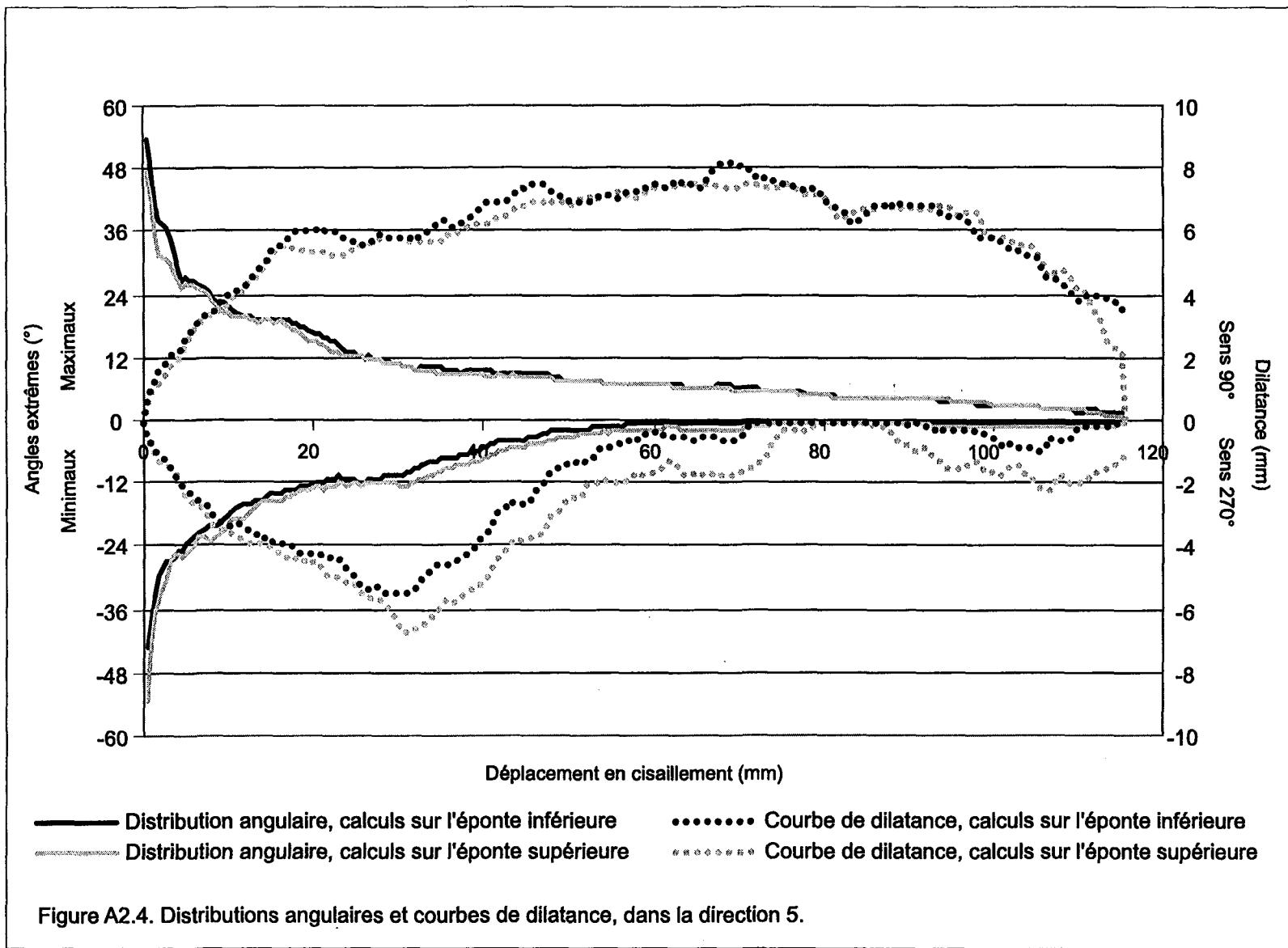


Figure A2.1. Distributions angulaires et courbes de dilatance, dans la direction 0.







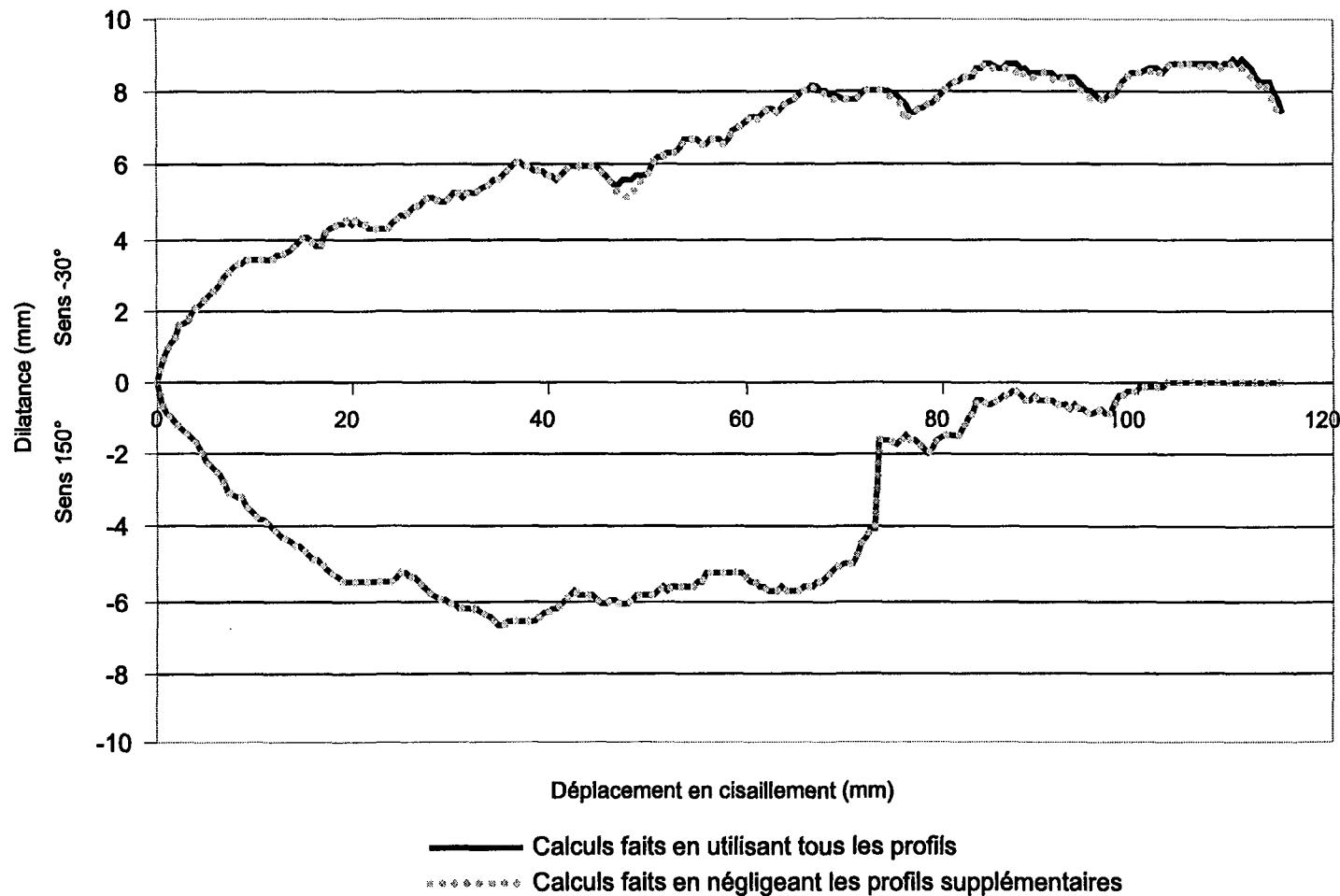


Figure A2.5. Sensibilité sur le nombre de profils dans la direction 0, les profils supplémentaires ont été négligés lors du calcul des angles extrêmes.

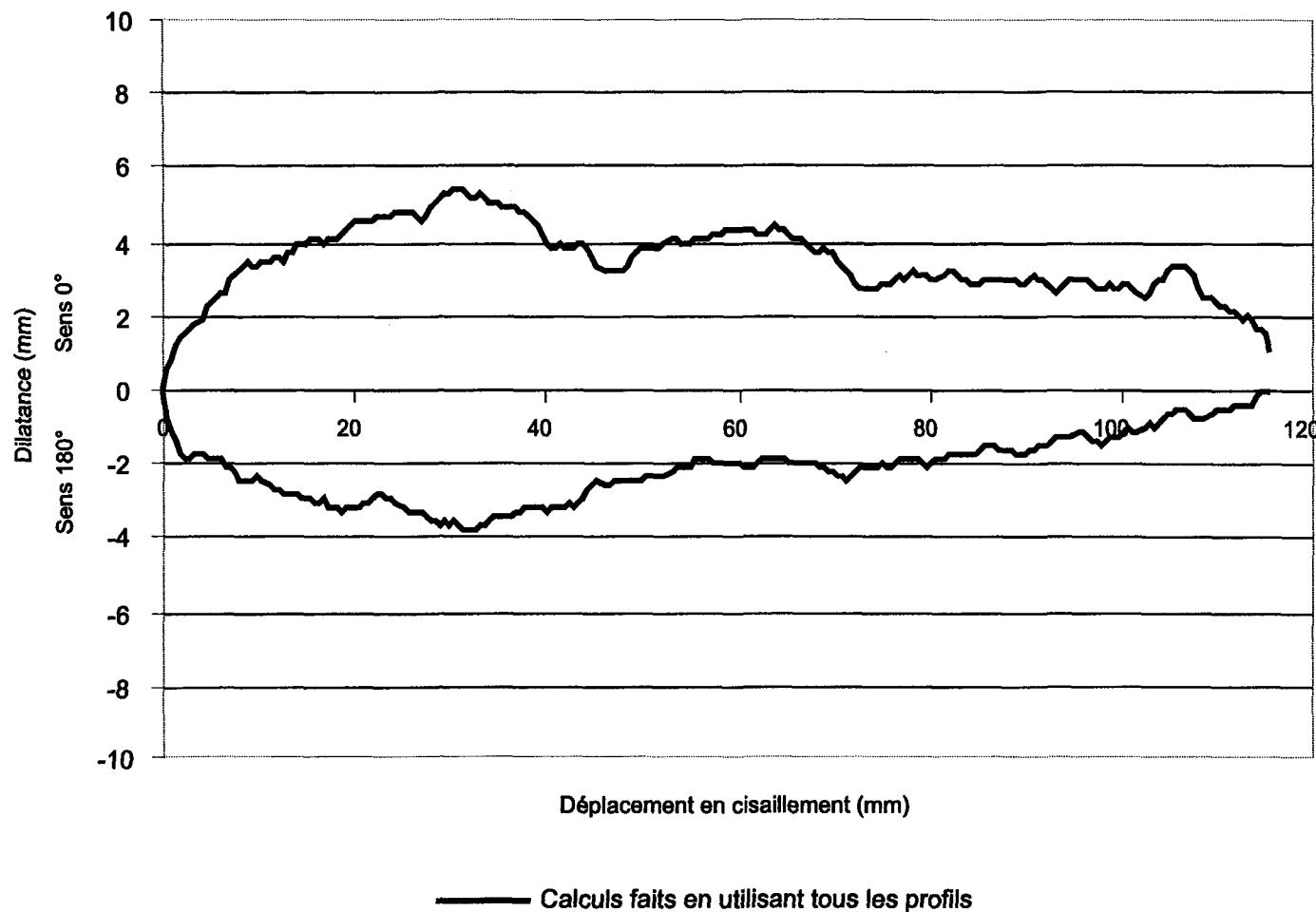


Figure A2.6. Sensibilité sur le nombre de profils, dans la direction 1, aucun profil supplémentaire n'a été prélevé.

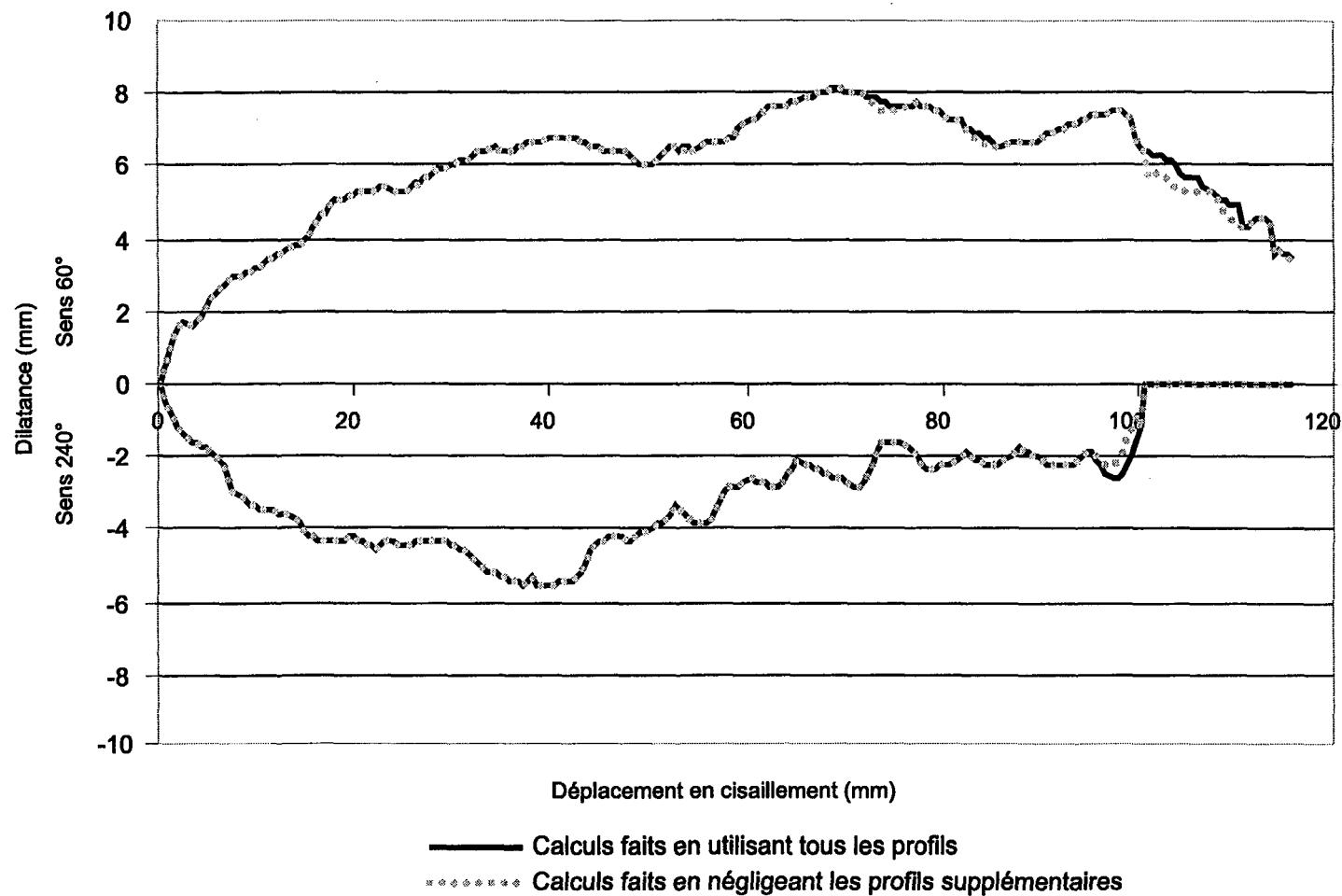
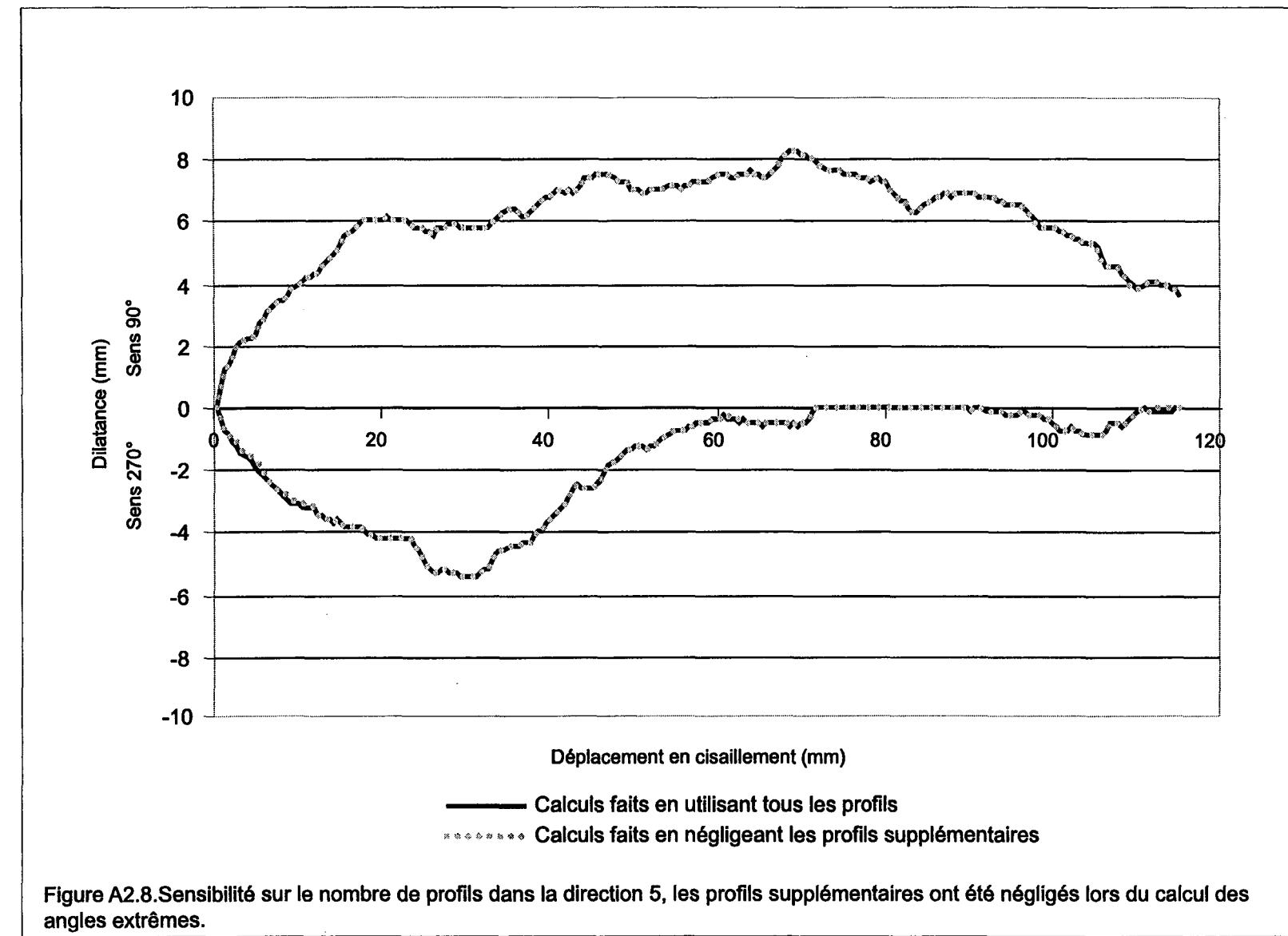


Figure A2.7. Sensibilité sur le nombre de profils dans la direction 4, les profils supplémentaires ont été négligés lors du calcul des angles extrêmes.



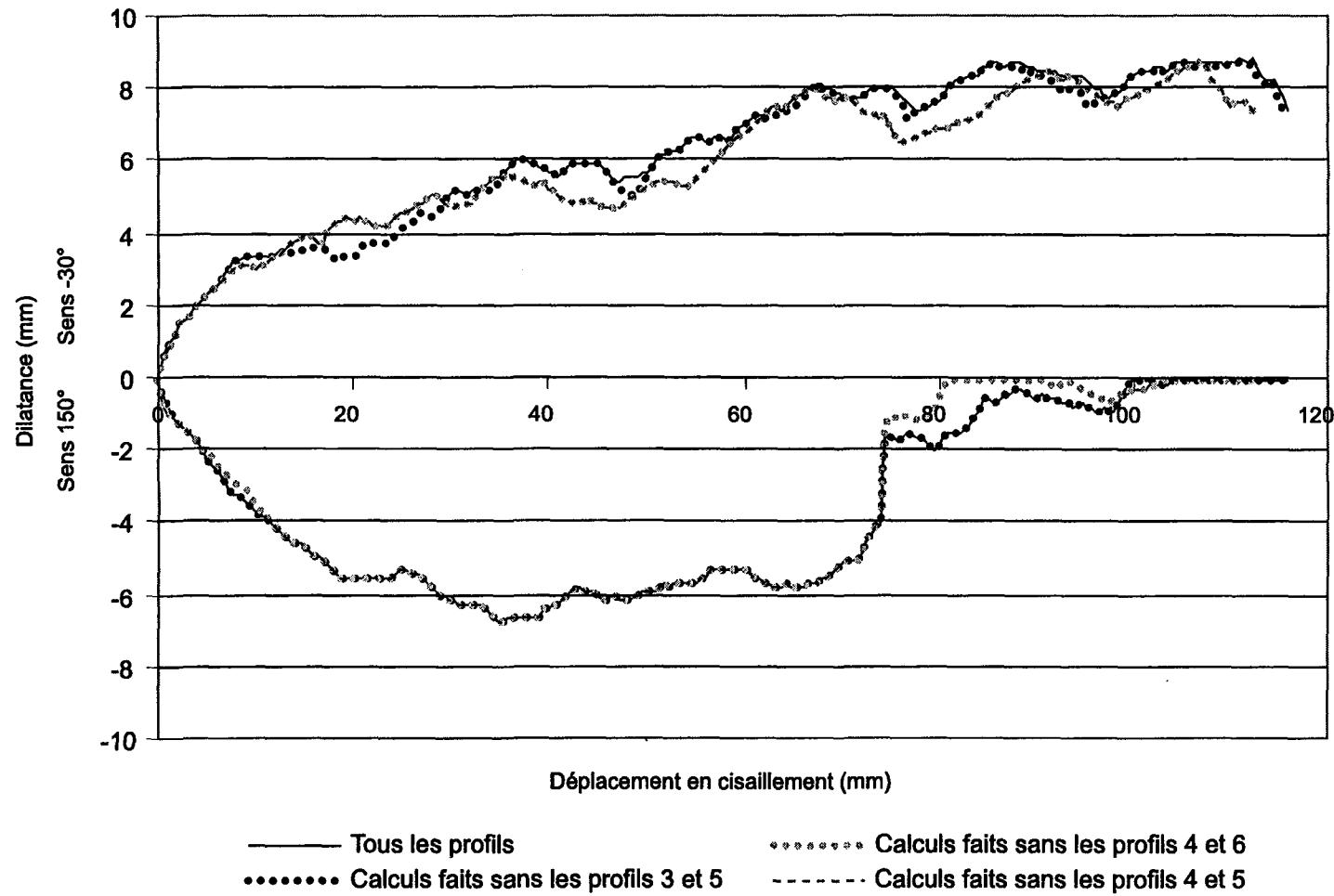


Figure A2.9. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 0, certains profils centraux ont été négligés lors du calcul des angles extrêmes

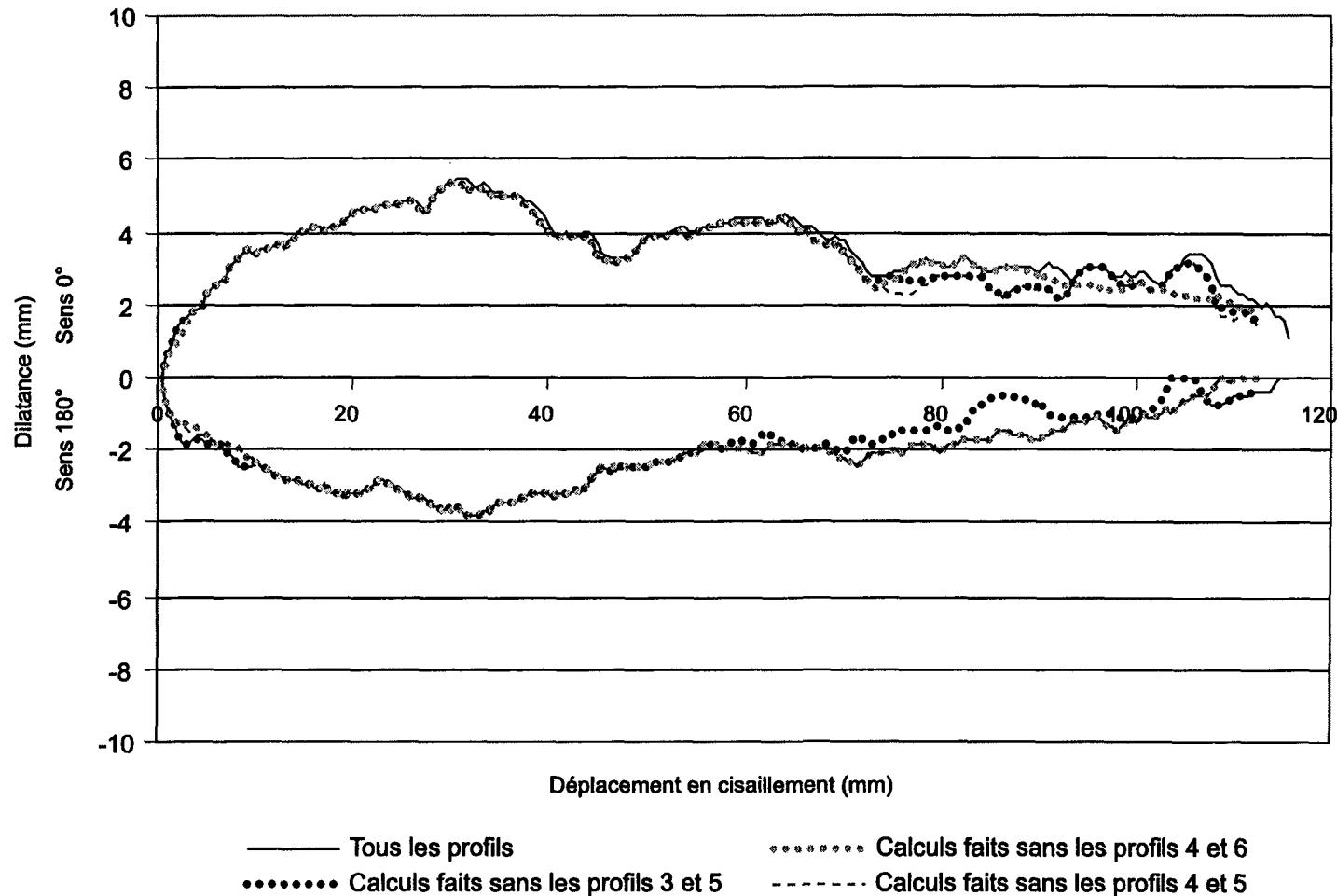
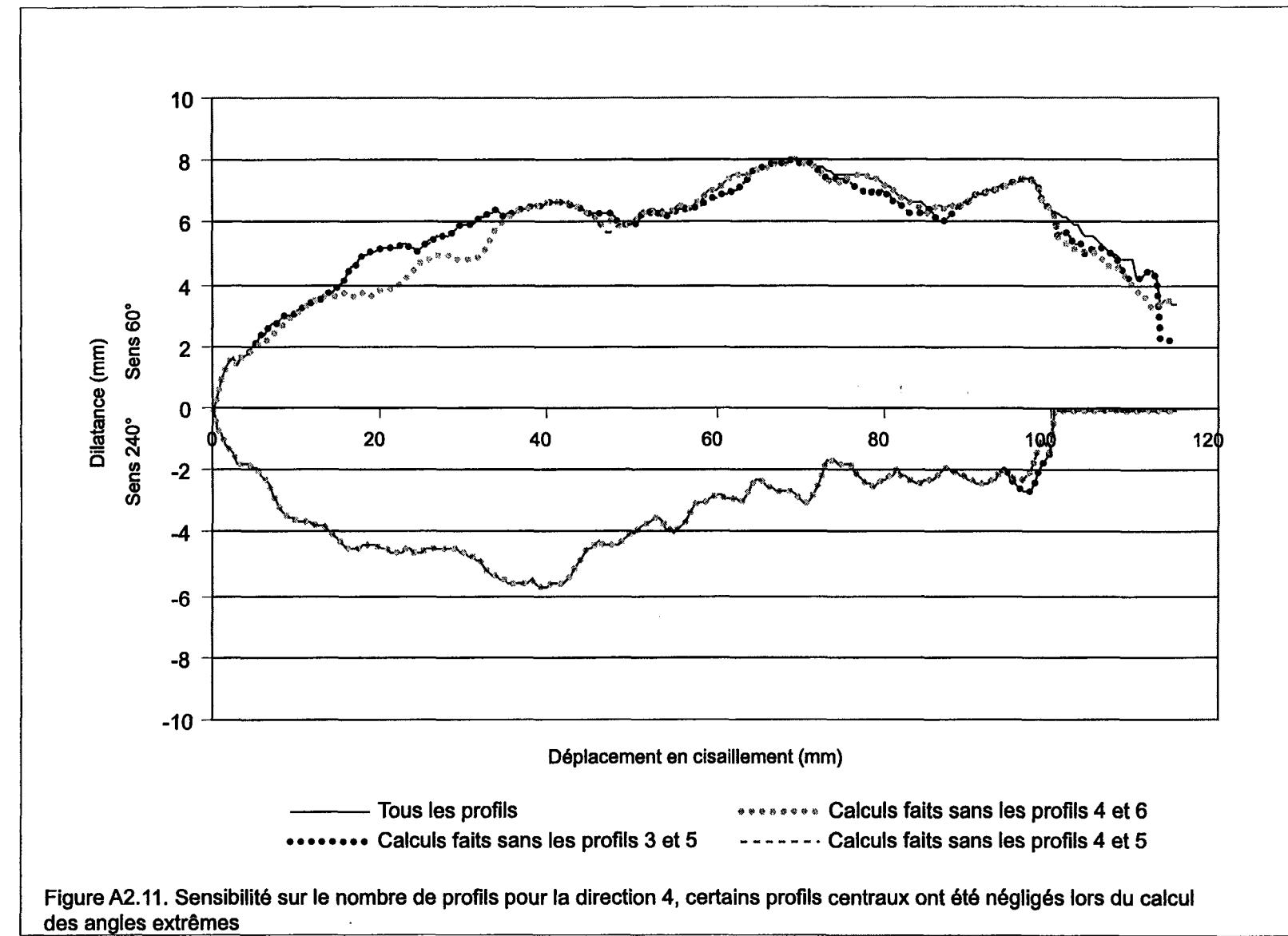
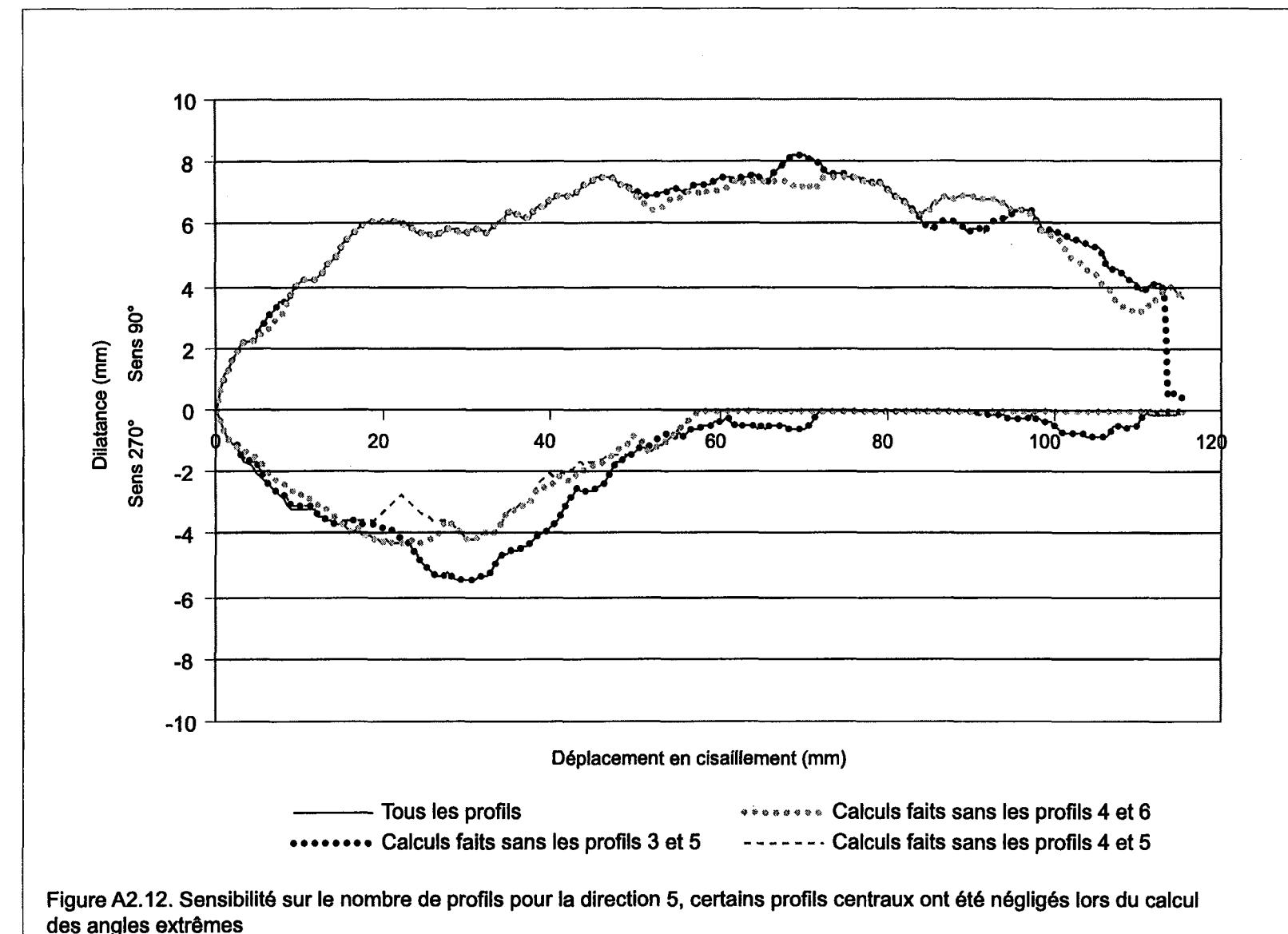


Figure A2.10. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 1, certains profils centraux ont été négligés lors du calcul des angles extrêmes





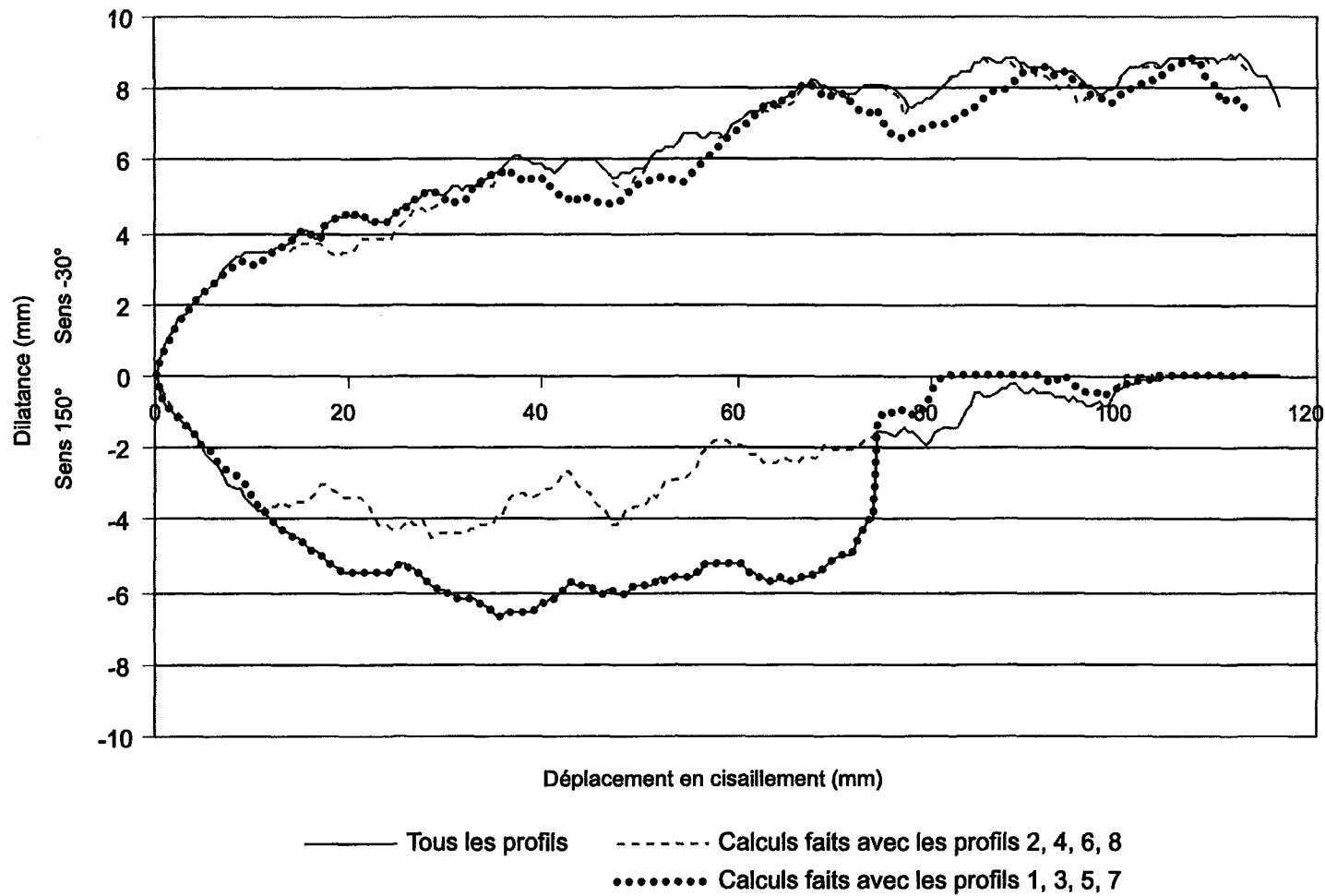


Figure A2.13. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 0, un profil sur deux a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes

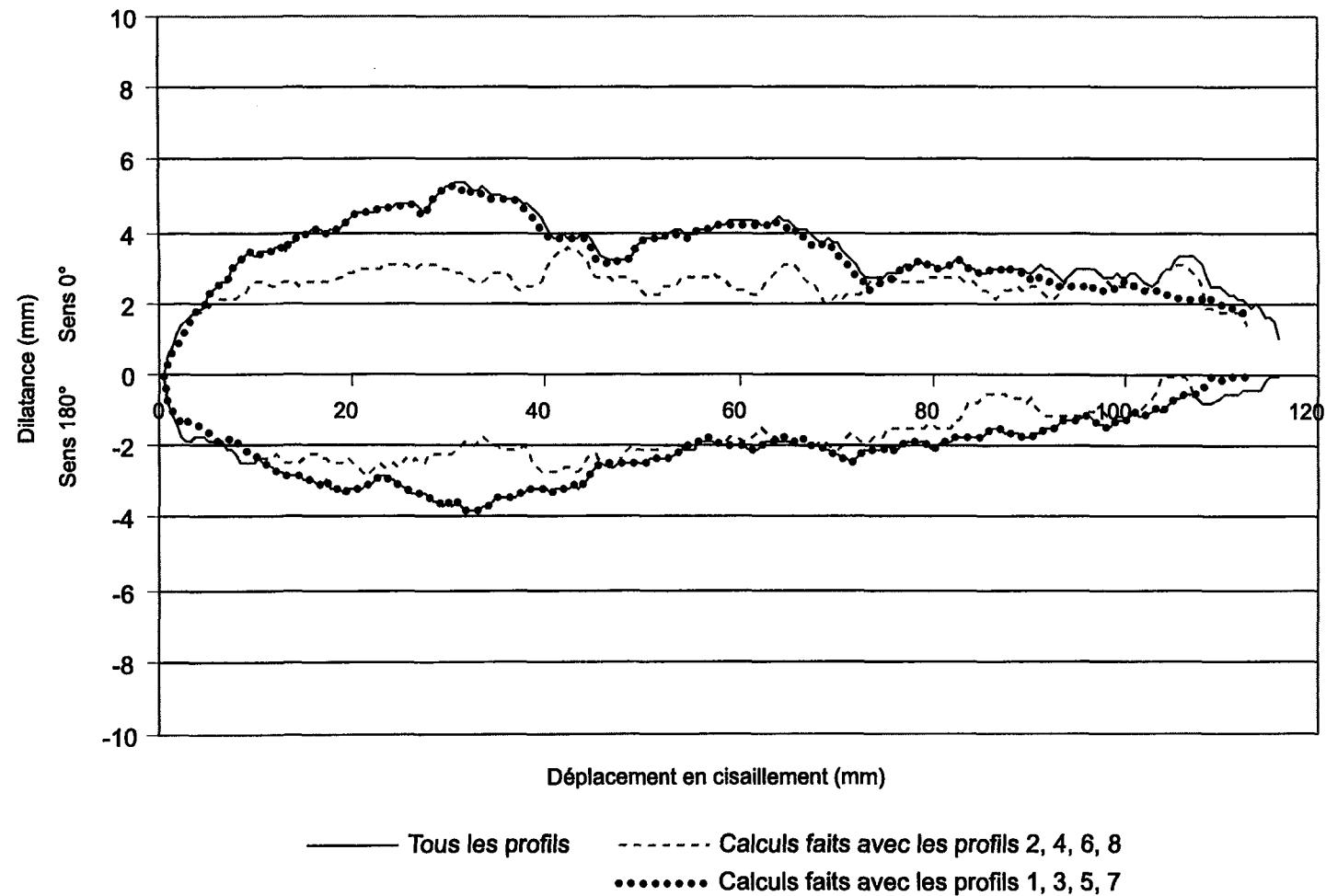


Figure A2.14. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 1, un profil sur deux a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes

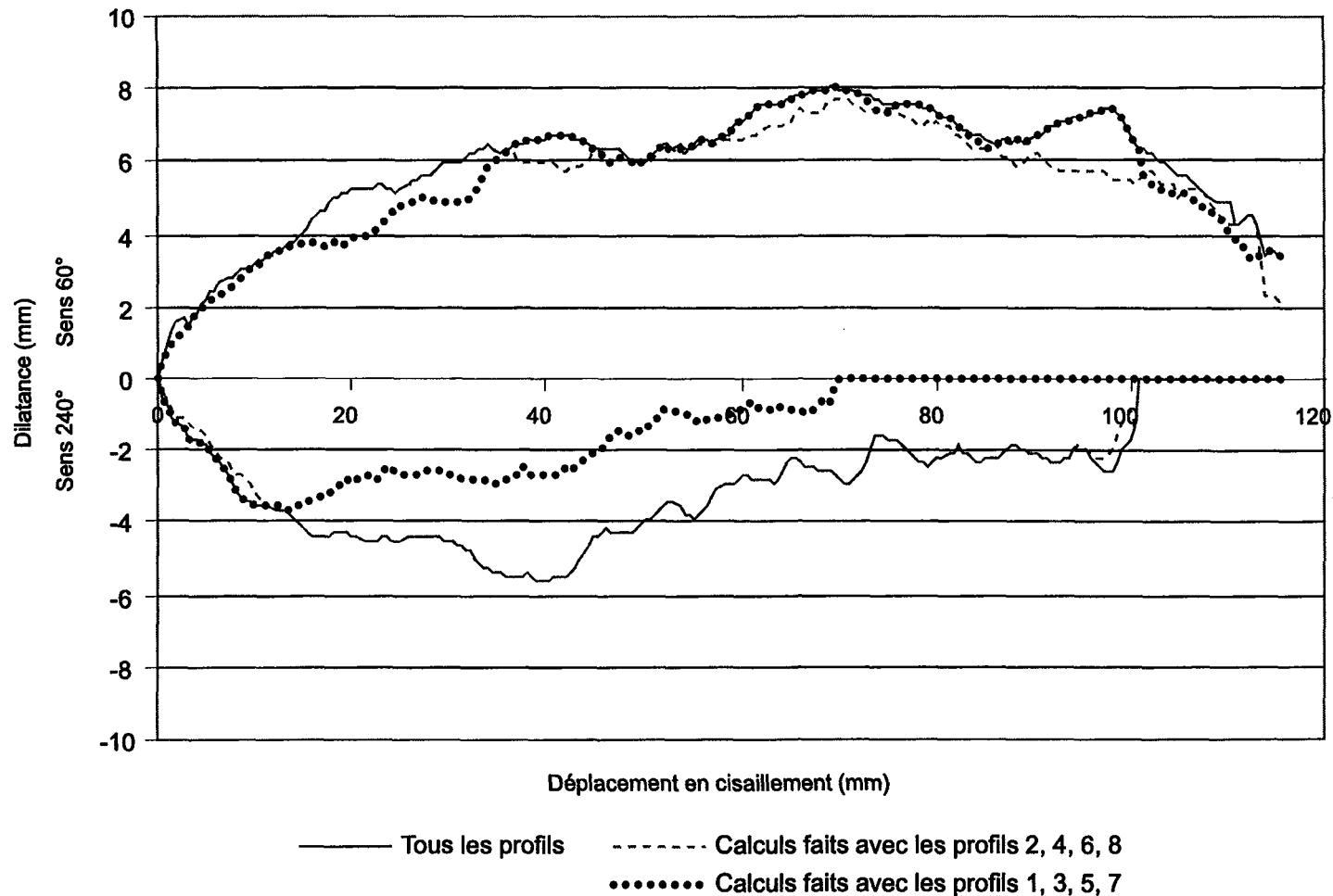


Figure A2.15. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 4, un profil sur deux a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes

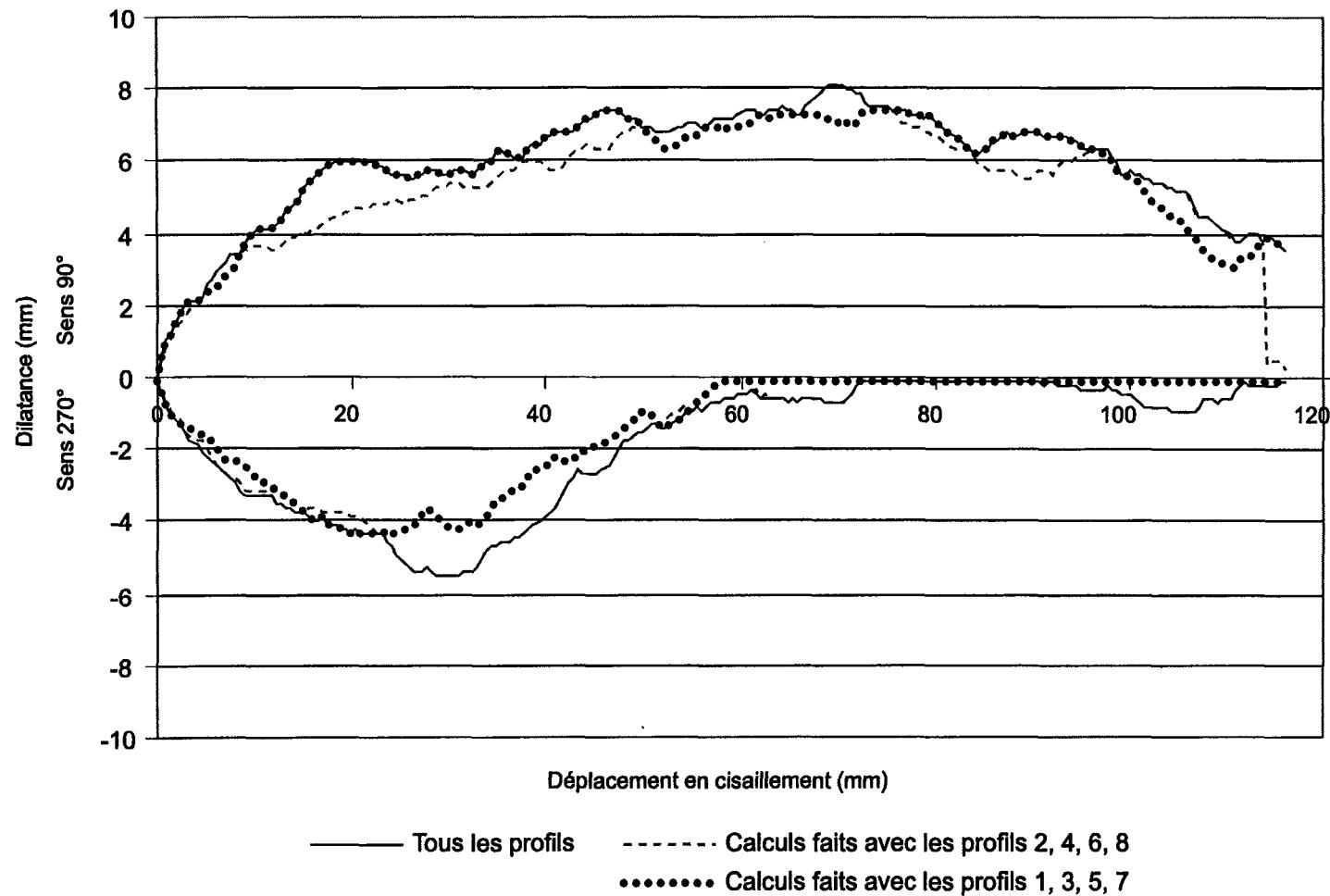


Figure A2.16. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 5, un profil sur deux a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes

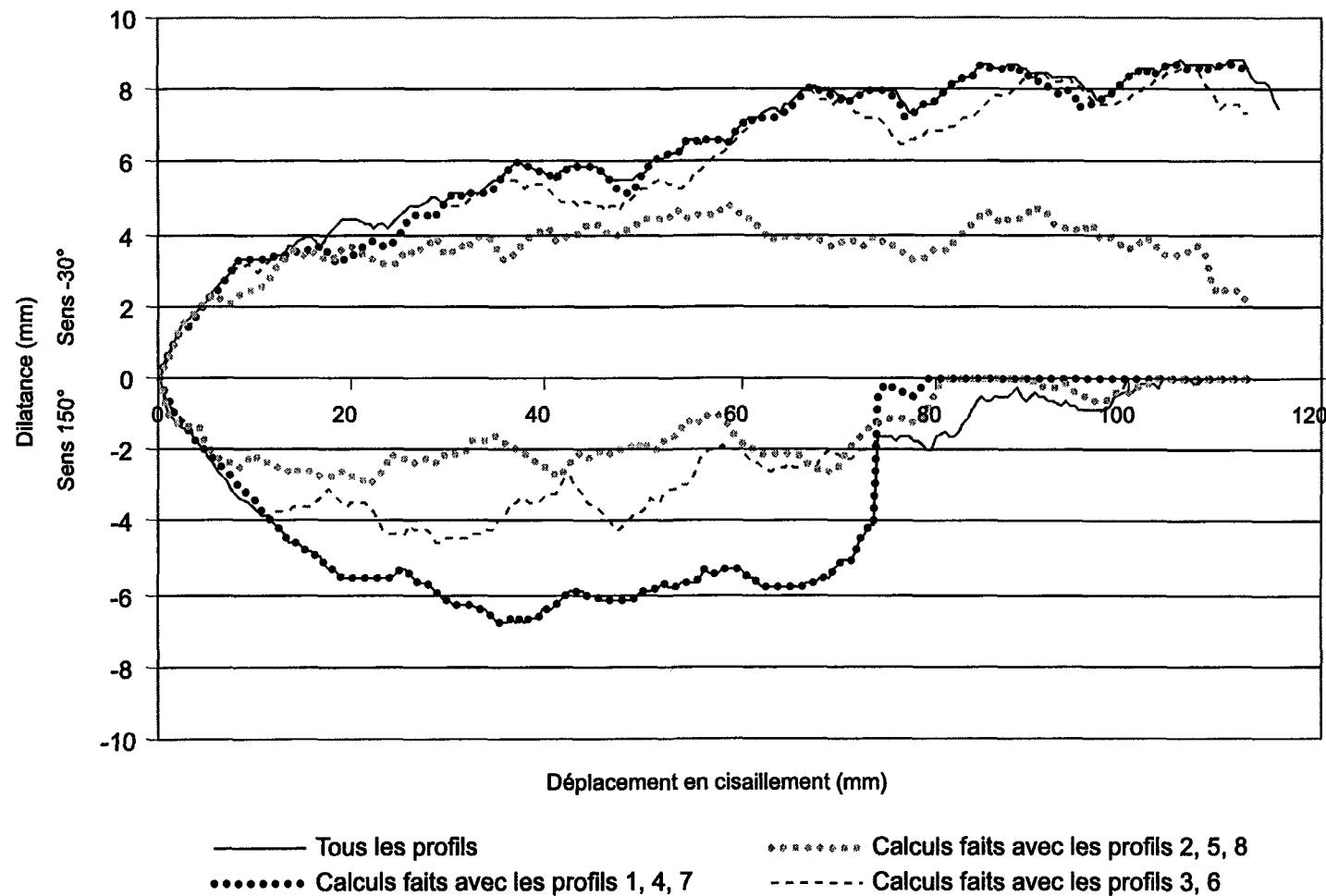


Figure A2.17. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 0, un profil sur trois a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes

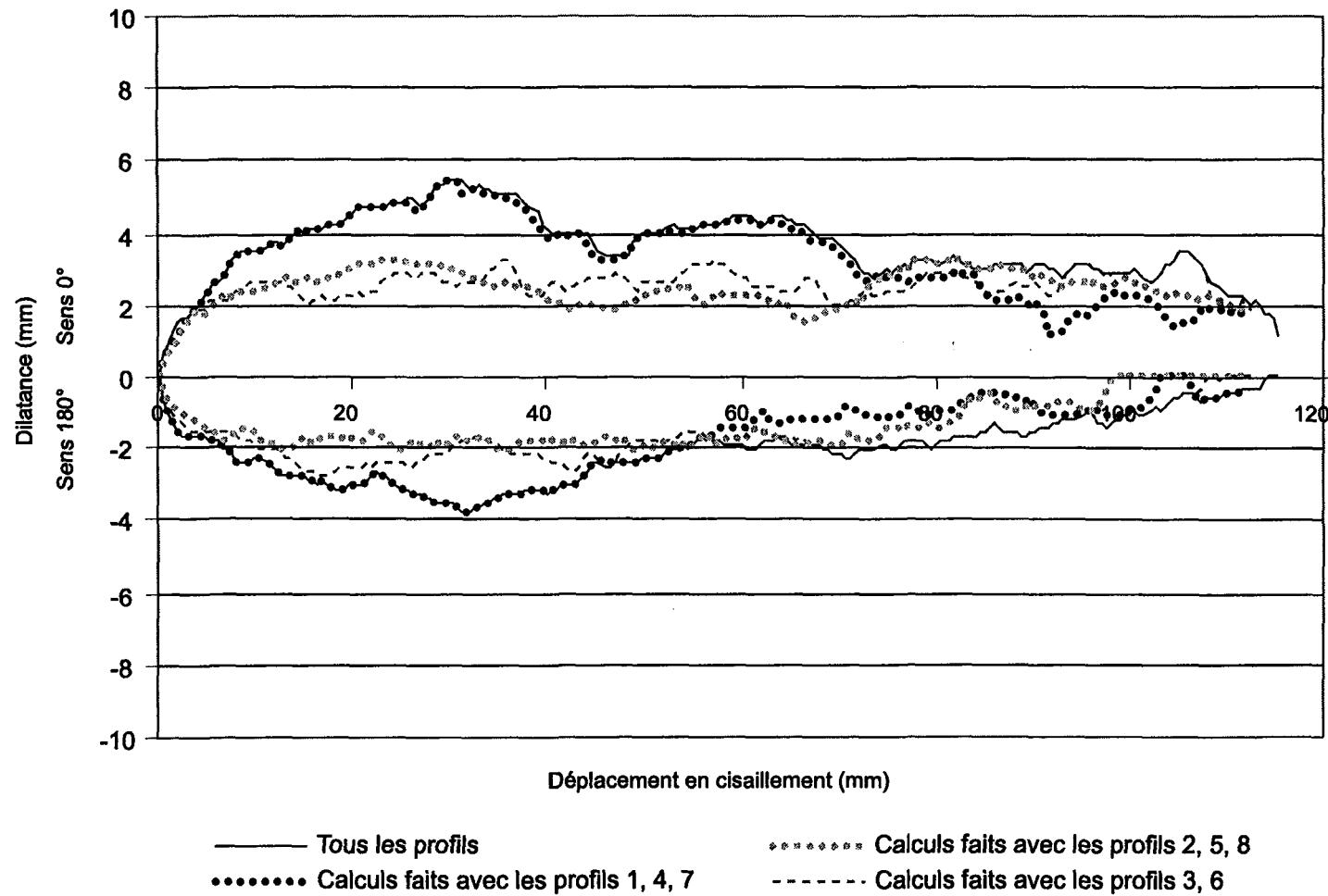
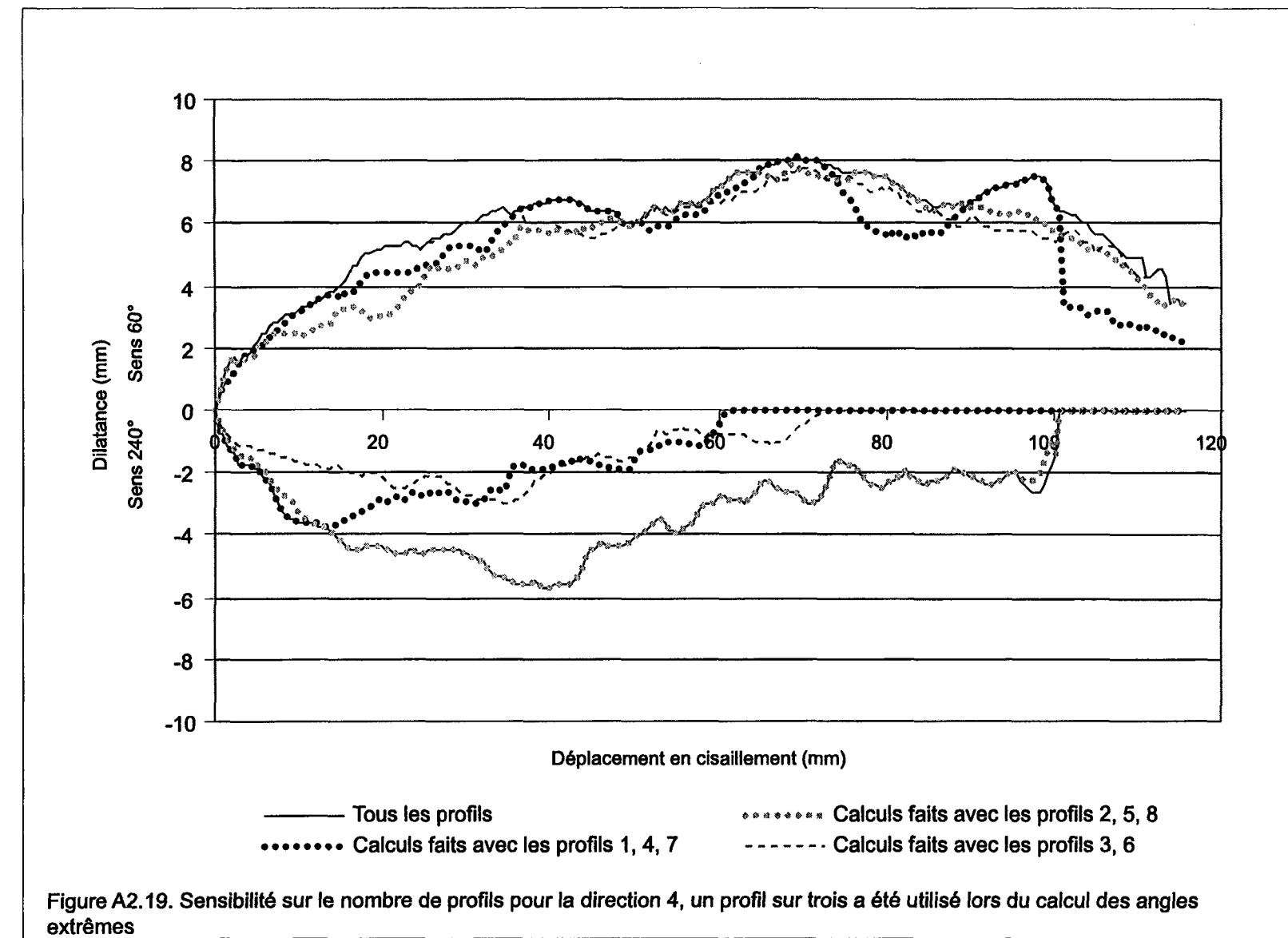


Figure A2.18. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 1, un profil sur trois a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes



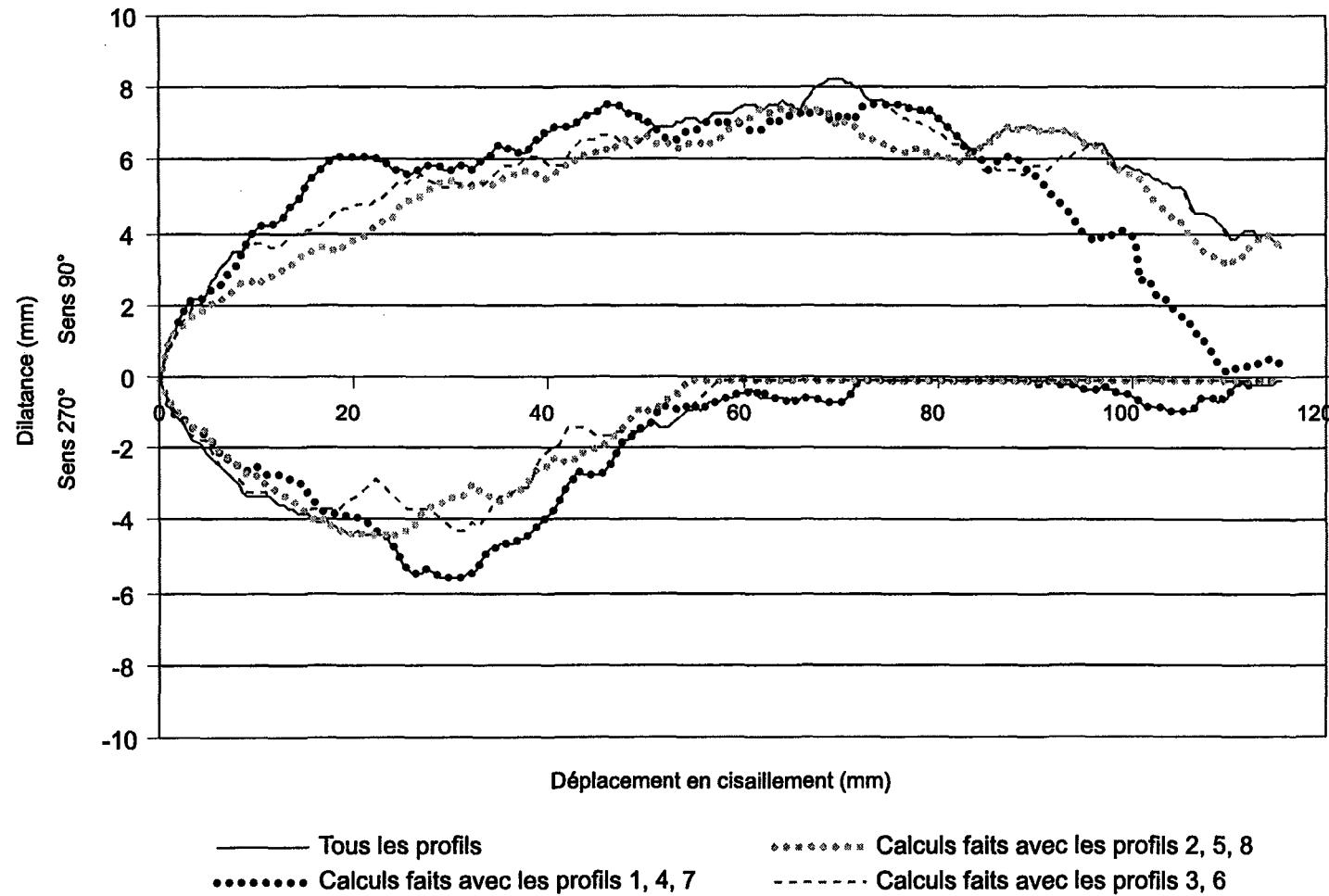


Figure A2.20. Sensibilité sur le nombre de profils pour la direction 5, un profil sur trois a été utilisé lors du calcul des angles extrêmes

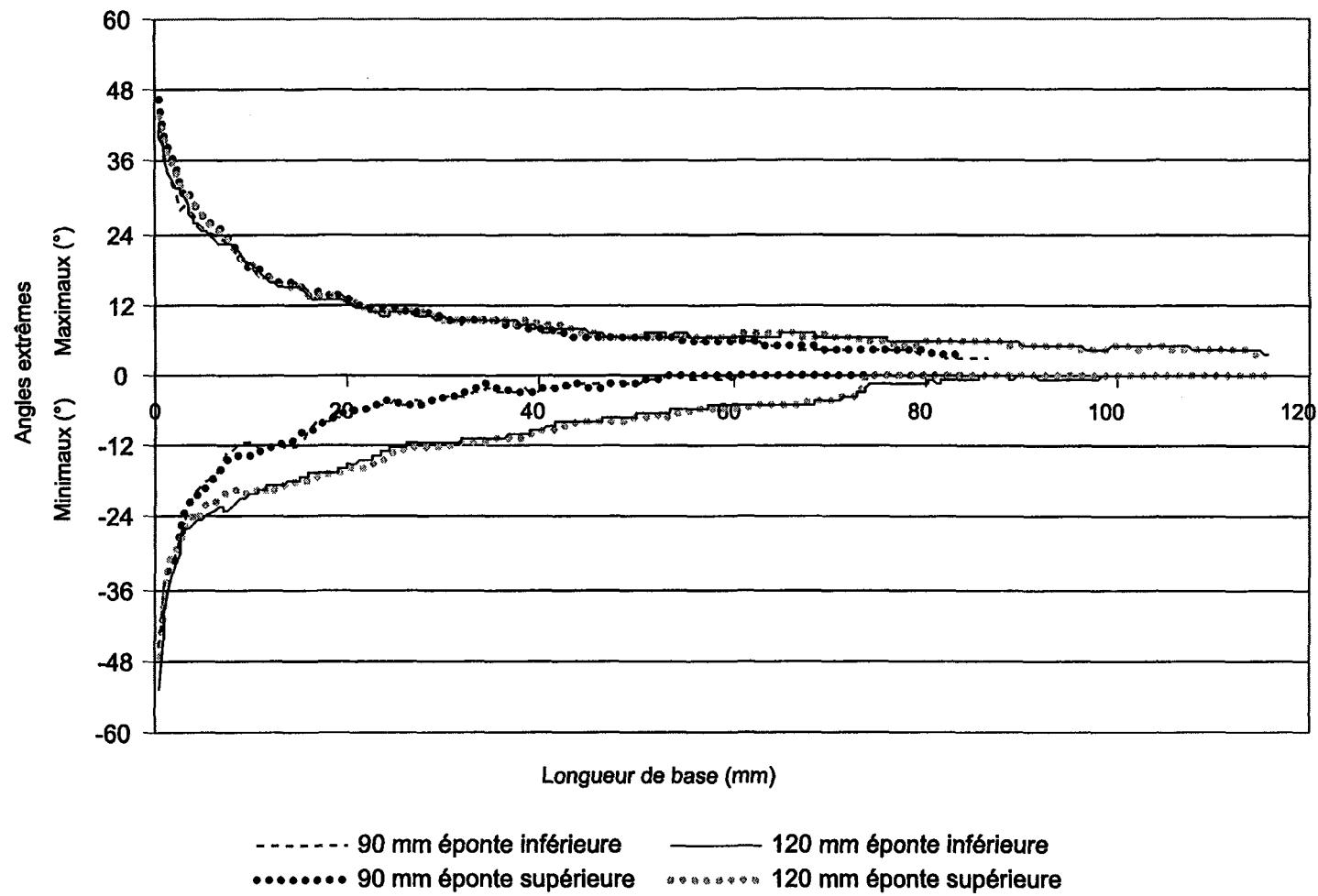


Figure A2.21 Comparaison entre les distributions d'angles extrêmes pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 0.

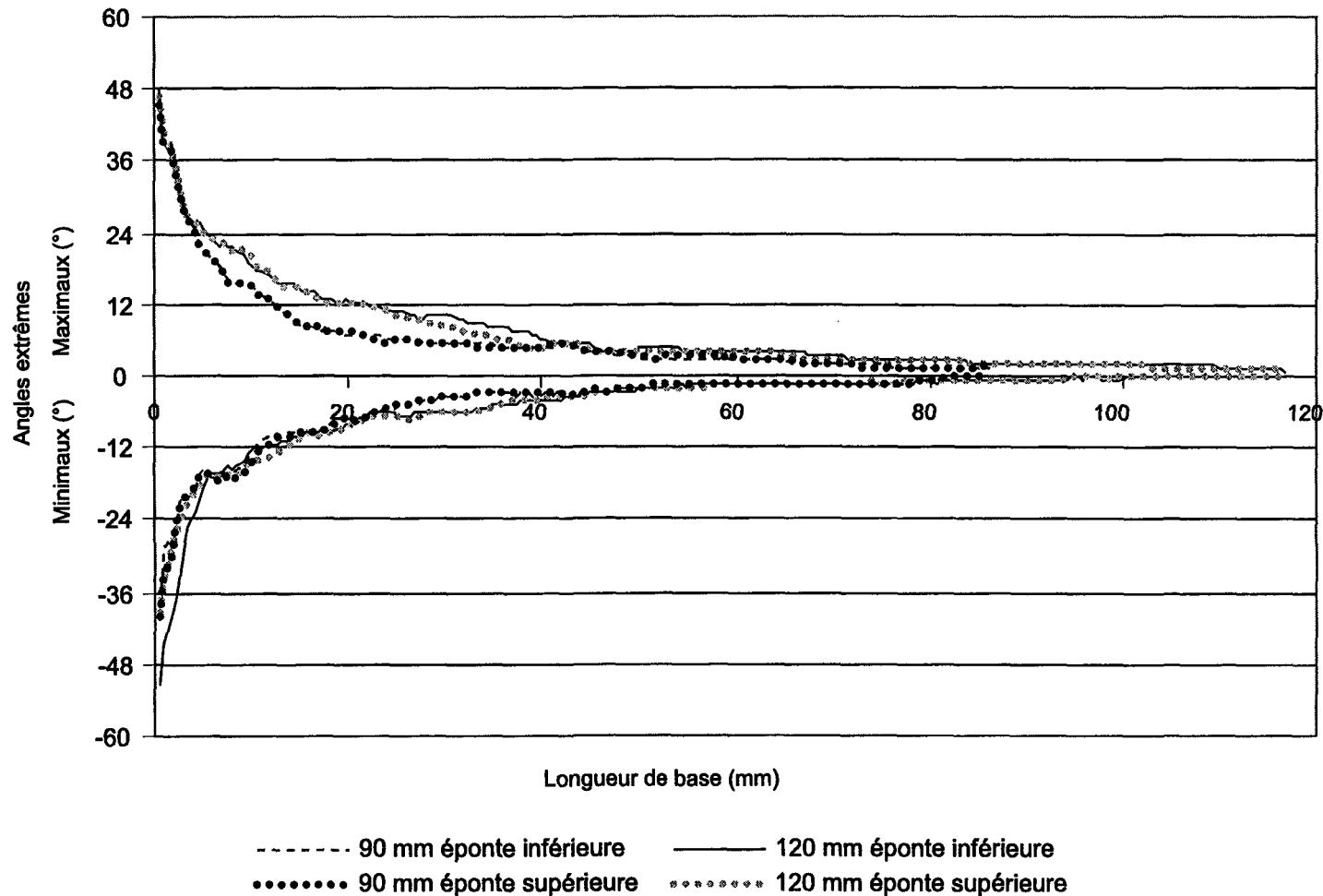


Figure A2.22 Comparaison entre les distributions d'angles extrêmes pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 1.

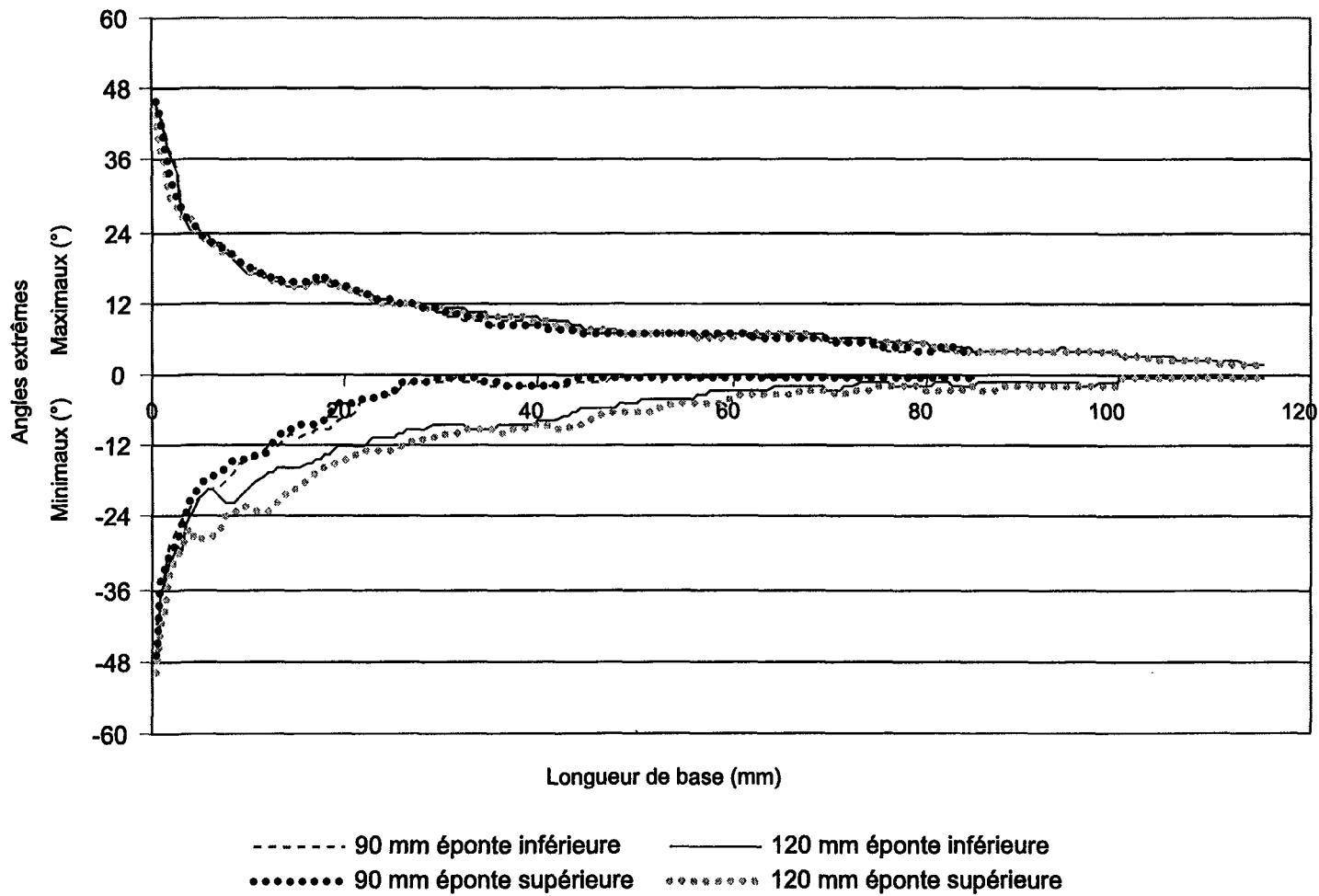


Figure A2.23. Comparaison entre les distributions d'angles extrêmes pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 4.

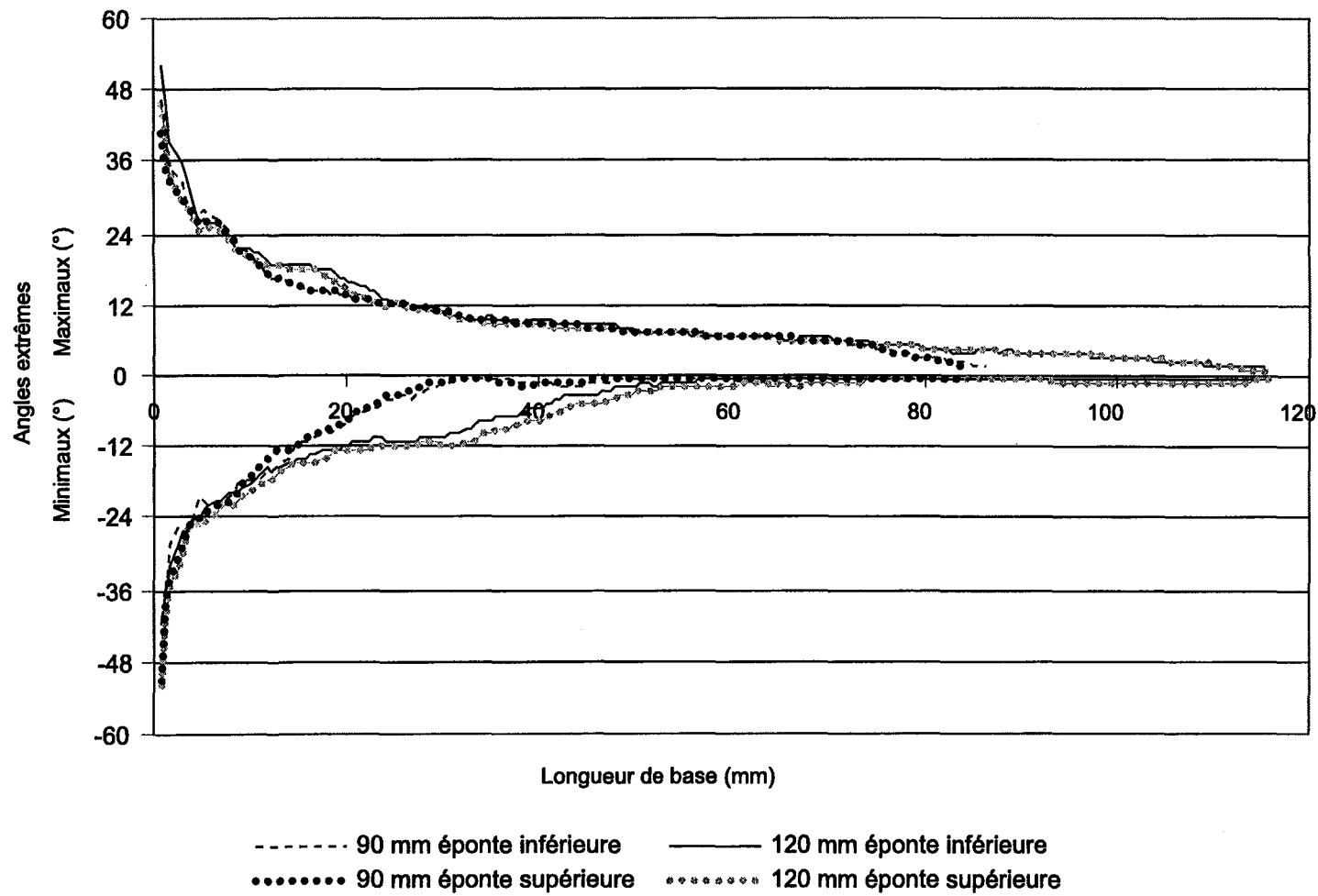


Figure A2.24. Comparaison entre les distributions d'angles extrêmes pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 5.

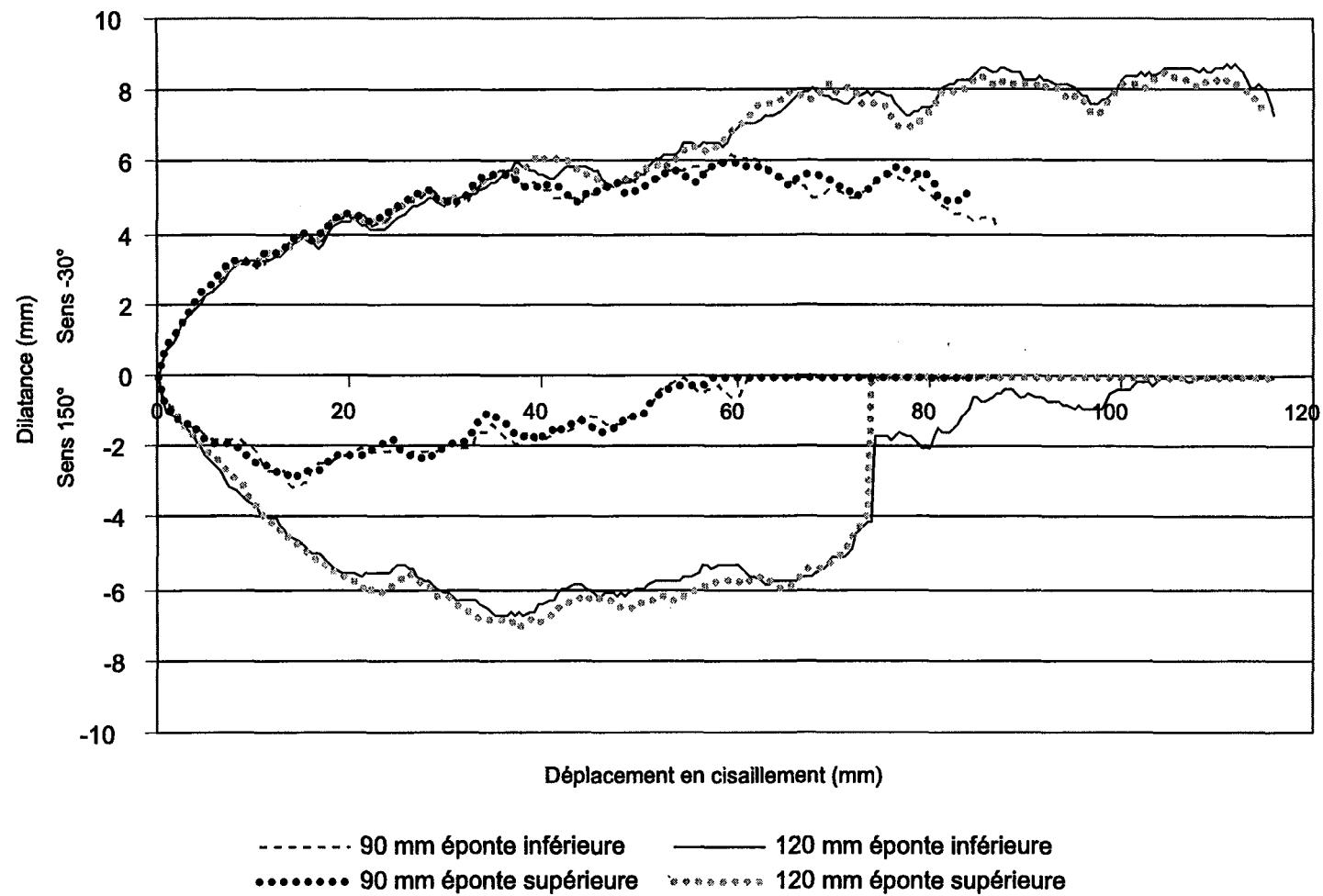


Figure A2.25. Comparaison entre les courbes de dilatance pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 0.

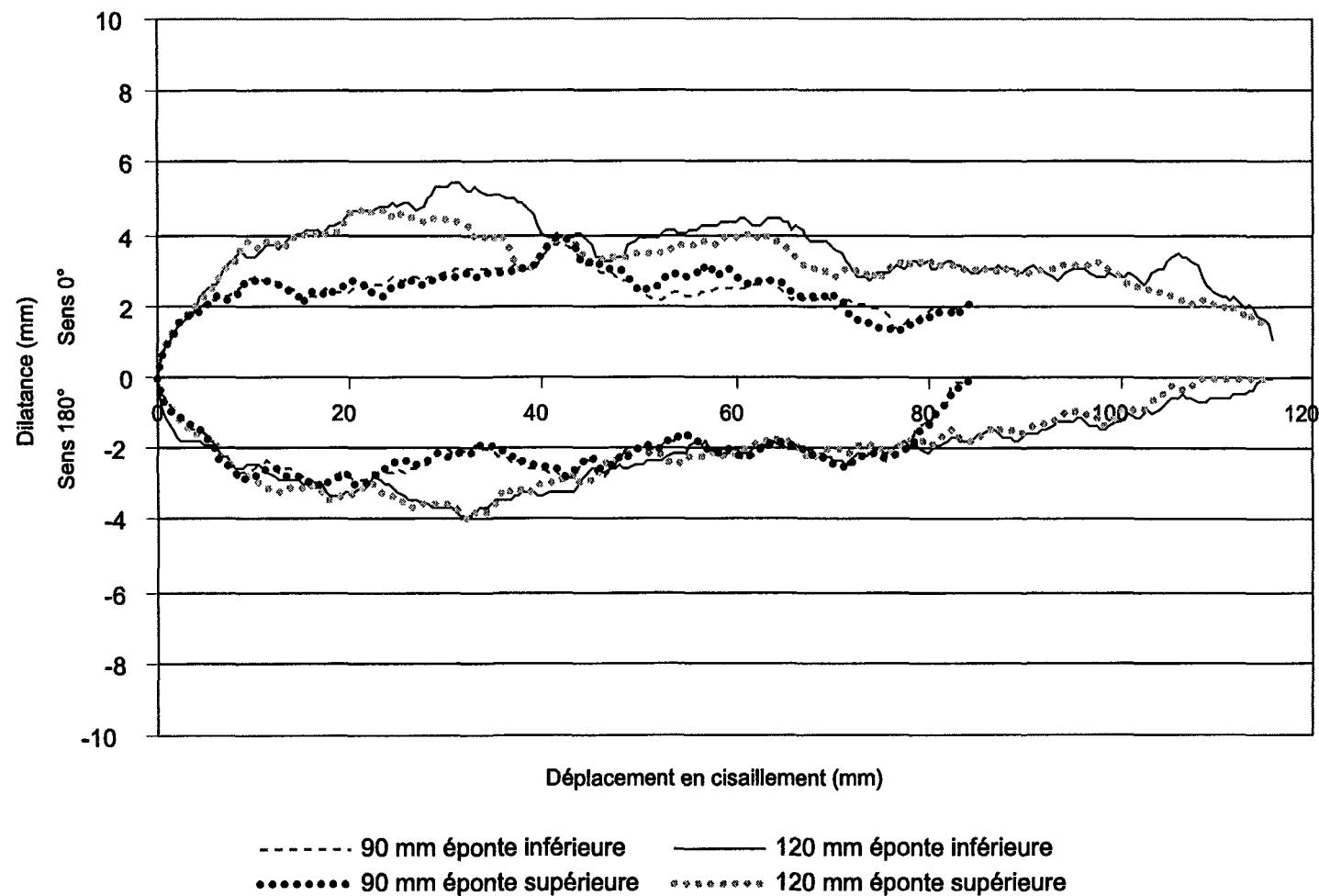


Figure A2.26. Comparaison entre les courbes de dilatance pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 1.

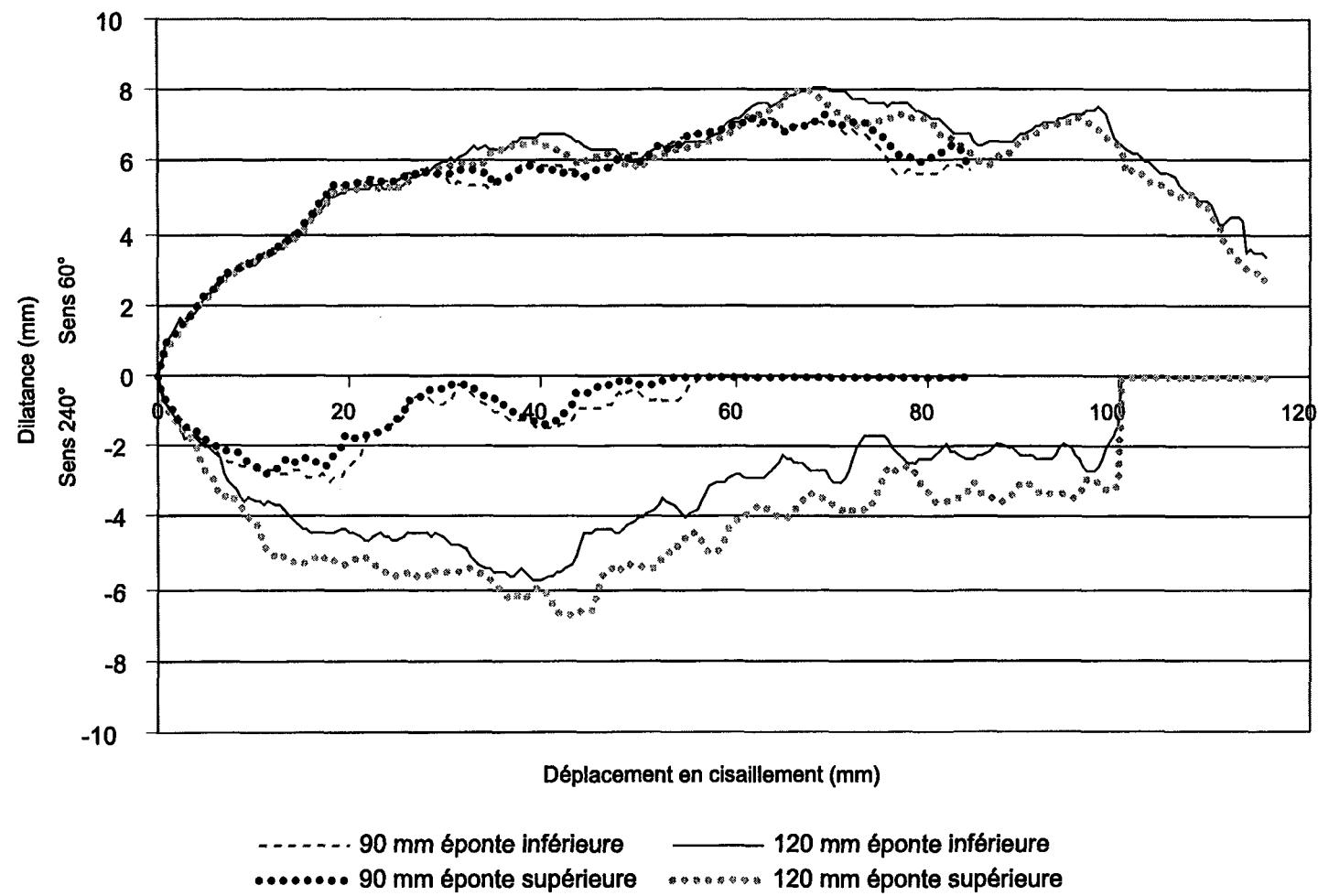


Figure A2.27. Comparaison entre les courbes de dilatance pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 4.

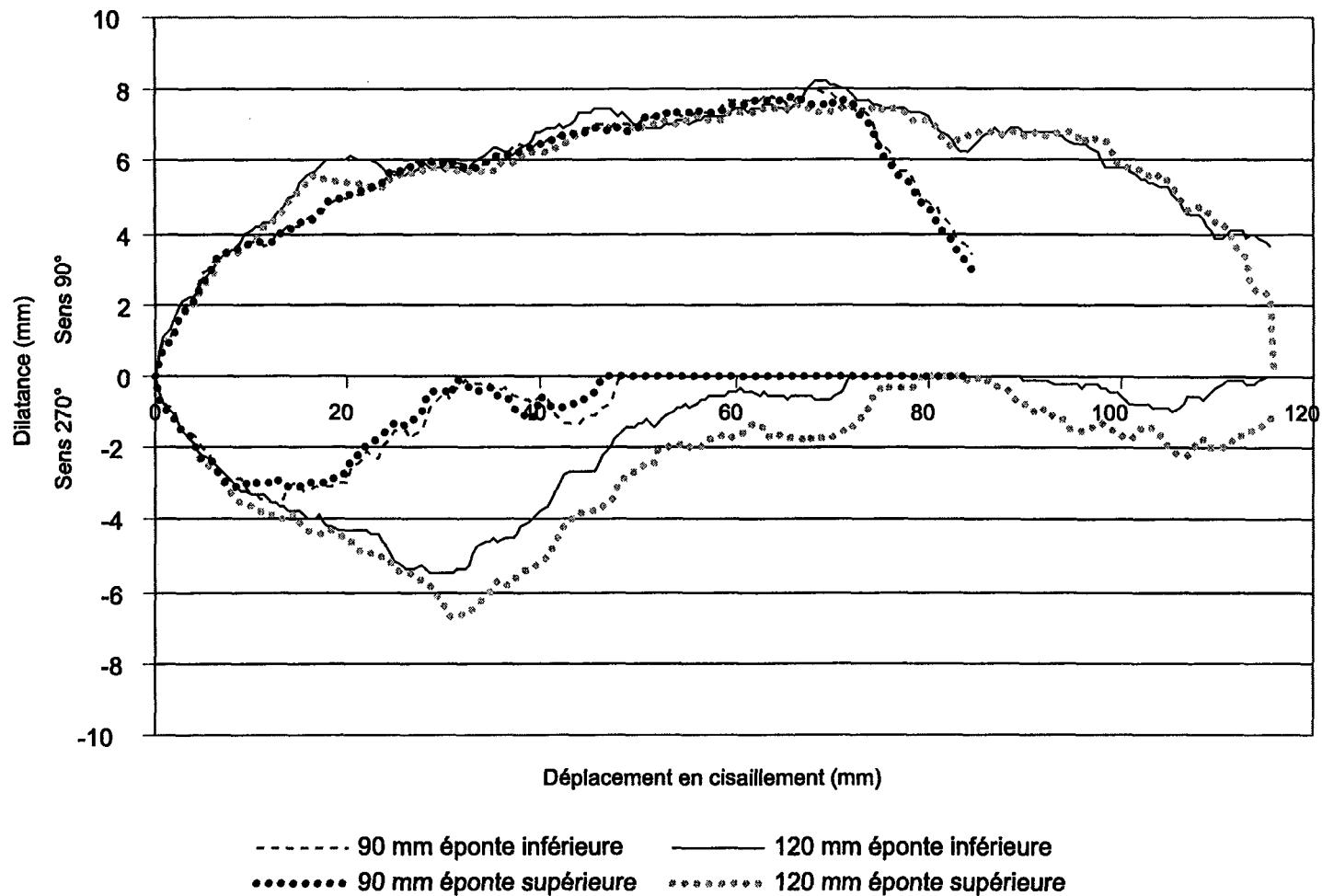


Figure A2.28. Comparaison entre les courbes de dilatance pour les fractures de 90 et 120 mm, pour la direction 5.

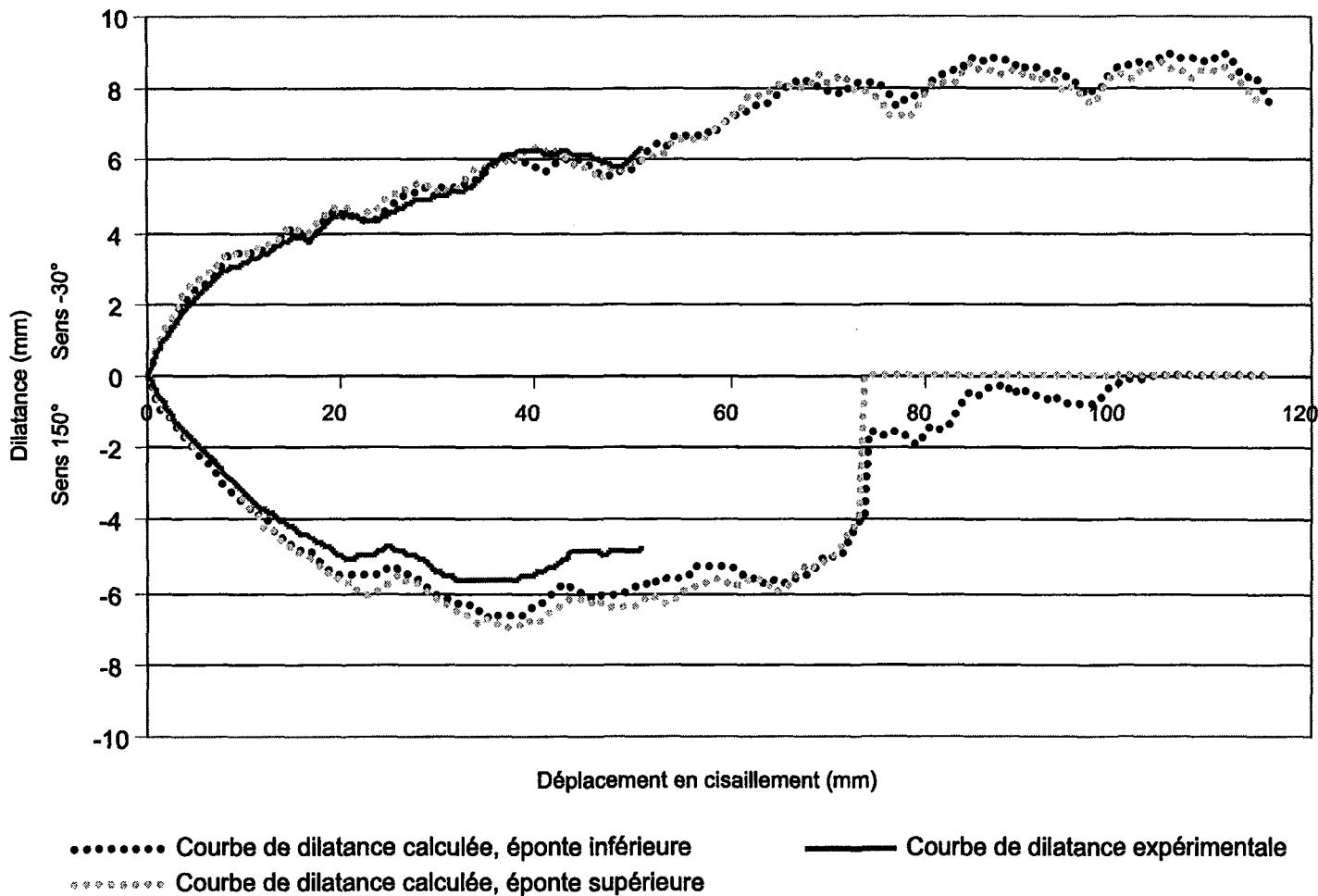


Figure A2.29. Courbes de dilatance calculées et expérimentales, dans la direction 0.

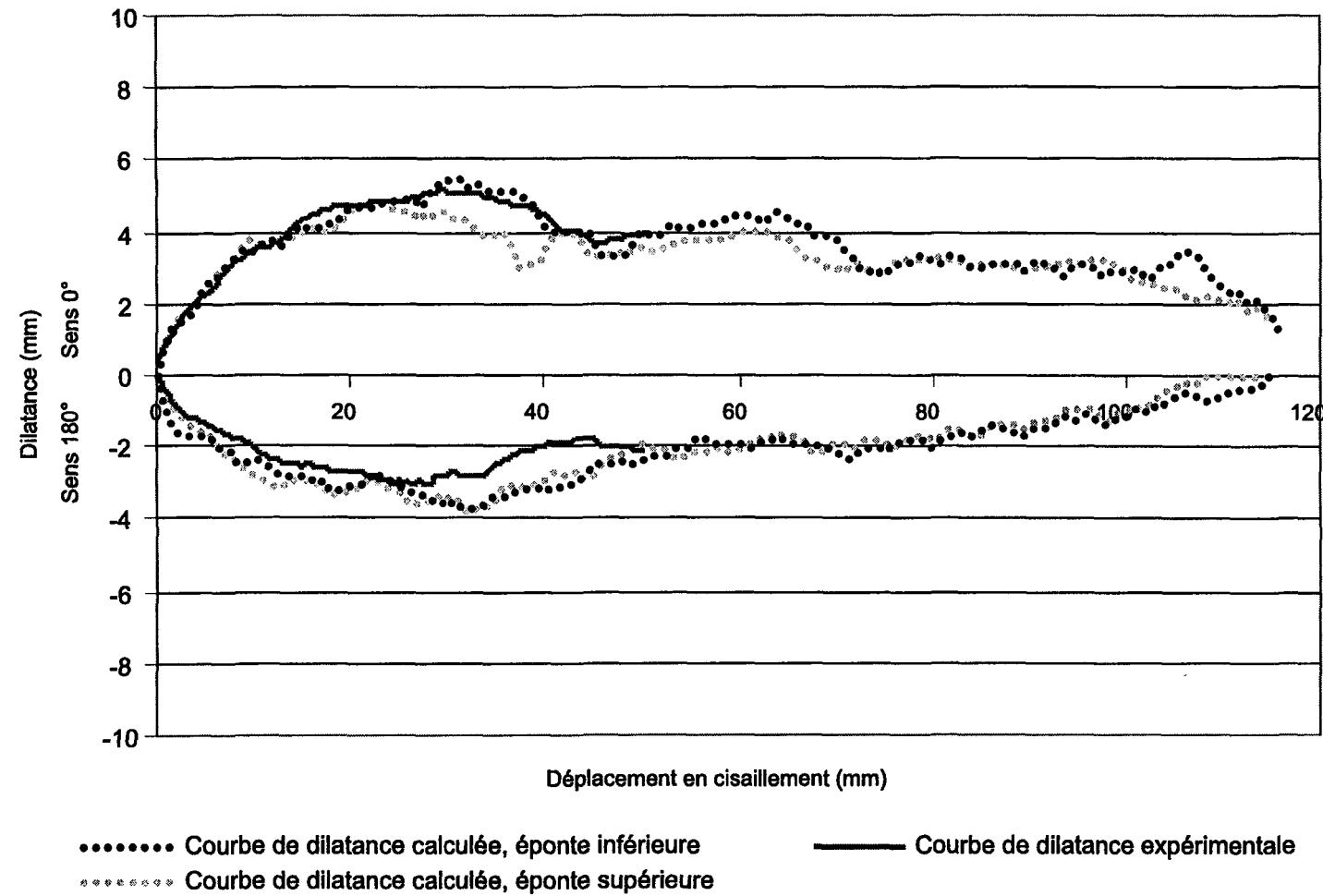


Figure A2.30. Courbes de dilatance calculées et expérimentales, dans la direction 1.

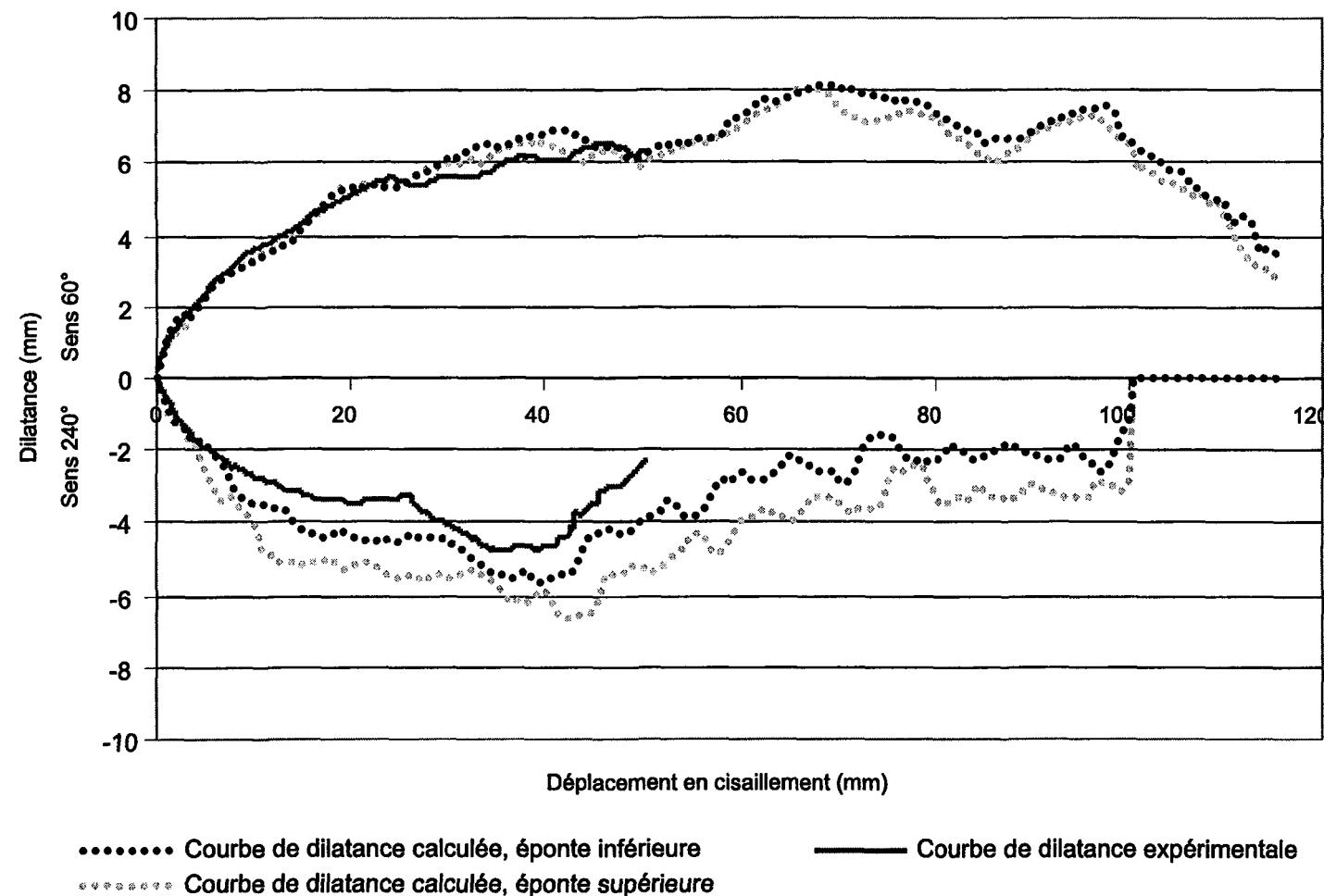


Figure A2.31. Courbes de dilatance calculées et expérimentales, dans la direction 4.

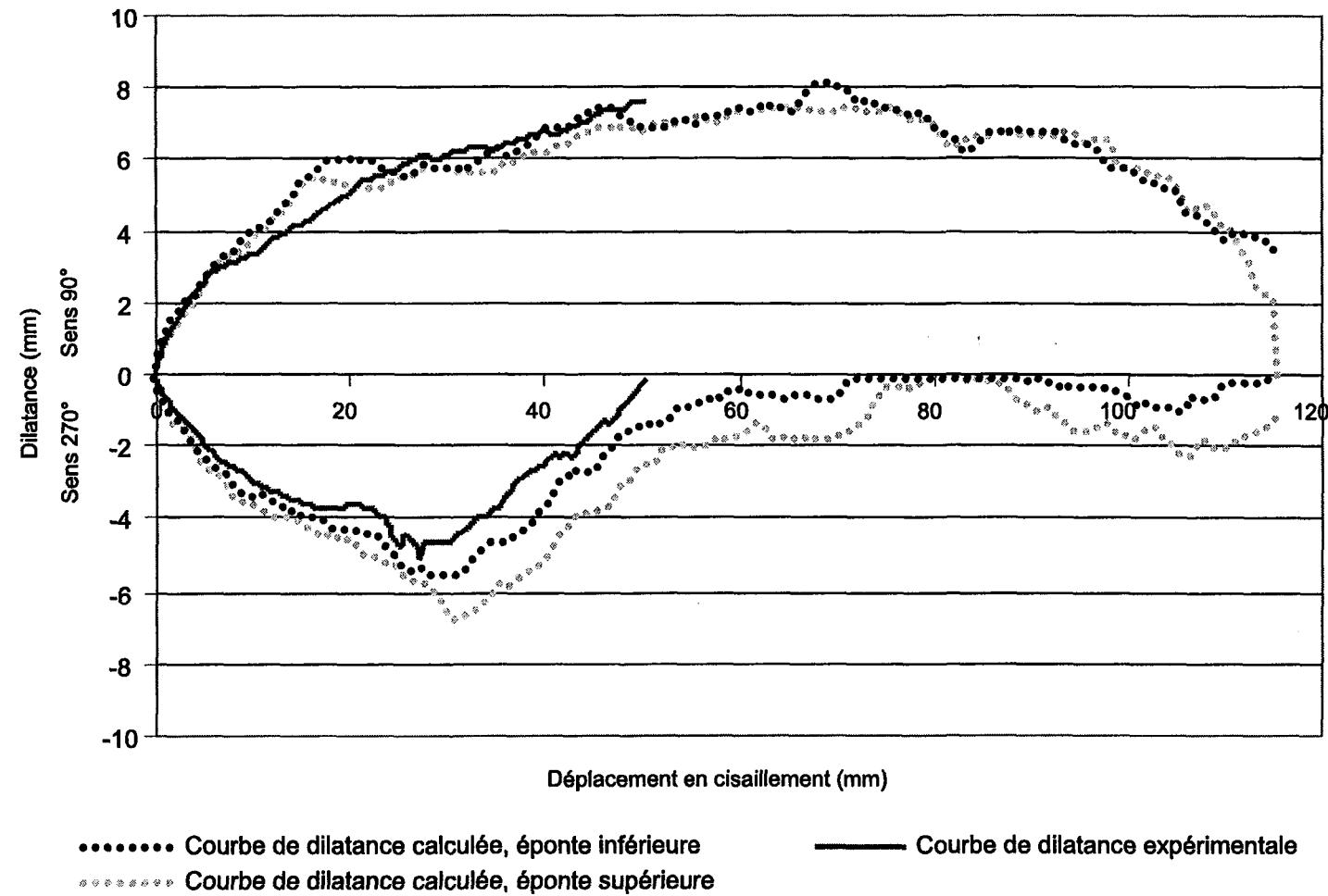


Figure A2.32. Courbes de dilatance calculées et expérimentales, dans la direction 5.