



*Caractériser les possibilités de la  
stéréophotographie pour le suivi de  
différents indices de rugosité sous l'action  
des pluies*

**Maître du stage :**  
**M.Ruy Stephane**  
**M.Mizaei Mohammadreza**

Ziarati Baher Tooba: M1 TSA  
Juin 2007

## **Résumé**

La rugosité du sol est un paramètre important en hydrologie car elle influence l'infiltration et la rétention superficielle. Nous avons étudié les potentialités d'un capteur stéréo-photographique pour obtenir cette rugosité. Dans un premier temps, nous avons déterminé la précision des paramètres intrinsèques des deux appareils photographiques de ce capteur et nous avons déterminé les conditions d'un calibrage optimal. Les paramètres ne sont pas corrélés et l'algorithme d'étalonnage converge quelles que soient les conditions de prises de vue (ouverture, distance, nombre de photos). Les erreurs de positionnement sur les points de la mire sont de l'ordre de 0.15 pixels. Lorsque le nombre de photos de mire est supérieur à 20, les paramètres sont plus définis de façon unique, les incertitudes associées et les erreurs sont minimales pour une ouverture de F8 et une distance appareil photo-mire de 3m. Puis, nous avons utilisé ce capteur stéréo-photographique sur le terrain pour suivre l'évolution de la rugosité sous l'effet des pluies successives. Nous avons comparés différents indices de rugosité obtenus par stéréo-photographie et par une méthode de référence (rugosimètre laser). Qualitativement, les mini modèles numériques de terrain obtenus par stéréo sont cohérents avec les observations visuelles. Seuls les indices Random Roughness et Tortuosity. Pour des raisons de manque de temps, la comparaison laser-stéréo est encore en cours.

## **Abstract**

The roughness of the soil is an important parameter in hydrology because it influences the infiltration and surface detention. We studied the potentialities of a stereophony-photographic capture to obtain this roughness. Initially, we determined the precision of the intrinsic parameters of the two cameras of this capture and we determined the conditions of an optimal calibration. The parameters are not correlated and the algorithm of calibration converges whatever is the conditions of catches of sight (opening, distance, a number of photographs). The errors of positioning on the points of the test card are about 0.15 pixels. When the number of photographs of test card is higher than 20, the parameters are more defined in a single way, associated with uncertainties and the errors are minimal for an opening of F8 and a distance apparatus photo-test card of 3m. Then, we used this stereo-photographic capture on the ground to follow the evolution of roughness under the effect of the successive rains. We compared various indices of roughness obtained by stereophotography with a reference method (laser roughness-meter). Qualitatively, mini the digital models of ground obtained not stereo are coherent with the visual observations. The indices Random Roughness, Tortuosity and comparison laser-stereophony are in still in progress because the lack of time.

# Table des matières

## Introduction

1. Introduction
2. Importance de La rugosité (microrelief)
3. Objectif et démarche générale

## Calibration

1. Introduction
2. La théorie : Géométrie et calibration des caméras
  - 2.1. Le modèle géométrique d'une caméra
  - 2.2. La projection perspective
  - 2.3. Transformation caméra/image
  - 2.4. Les paramètres intrinsèques
  - 2.5. Les paramètres extrinsèques
  - 2.6. La distorsion .
  - 2.7. Principe de la procédure de calibrage de la caméra.
3. Matériel et Méthode .
  - 3.1. L'instrument nécessaire pour photographier.
  - 3.2. Programme de la Calibration.
  - 3.3. Prises de vues:
  - 3.4. Calibration et traitement des Image .
  - 3.5. Les logiciels utilisés .
4. Résultats.
  - 4.1. Calibrages de référence.
  - 4.2. Influence du sous-échantillonnage .
    - 4.2.1. Corrélation entre paramètres.
    - 4.2.2. Variabilité de l'estimation des paramètres.
  - 4.3. Influence des réglages optiques.
    - 4.3.1. Influence de la distance.
    - 4.3.2. Influence de l'ouverture du diaphragme.

## Conclusion partielle

## Caractériser les indices de rugosité avec stéréophotographie.

1. Introduction .
  - 1.1. Contexte general
  - 1.2. Problématique scientifique.
    - 1.2.1. Mesure de la rugosité du sol
    - 1.2.2. Caractérisation de la rugosité : les indices de rugosité
  - 1.3. Objectifs du travail
2. Matériel et Méthode
  - 2.1. Travail du sol
  - 2.2. Arrosage ou simulation de pluie
  - 2.3. Mesure de la rugosité
    - 2.3.1. Laser
    - 2.3.2. Stéréo-photographie
    - 2.3.3. Comparaison laser-stéréo
3. Résultats
  - 3.1. Etalonnage du rugosimètre laser
  - 3.2. Mesure des profils par rugosimétrie laser (état initial et final)
  - 3.3. Obtention des MNT par stéréo-photographie

### **3.4. Les indices de rugosité**

## **4. Conclusions**

**Caractériser les possibilités de la  
stéréophotographie pour le suivi de  
différents indices de rugosité sous  
l'action des pluies**

## **Introduction**

### **1. Introduction:**

Le ruissellement et l'érosion (hydrique et éolienne) du sol (vent et eau) sont des menaces environnementales dans le monde et également en Iran. Pour diminuer leurs effets négatifs, il est important d'identifier le procédé de création d'écoulement et sa distribution spatiale. Lorsque le ruissellement, processus est influencé principalement par les caractéristiques de surface du sol, dont la rugosité extérieure de sol. La rugosité est un paramètre important pour comprendre les mécanismes de l'érosion de sol par l'eau et le vent.

Généralement à faible échelle, le cheminement des eaux de surface est effectué par la microtopographie de la surface du sol. De nombreux processus extérieurs reliés à l'érosion, tels que le stockage de l'eau dans les dépressions, le détachement de cisaillement par les gouttes de pluie ou par le vent, et le transport de sédiments sont des grandeurs caractéristiques qui sont évaluées au millimètre près. Ainsi il est important de caractériser finement la rugosité du sol afin de comprendre les processus de ruissellement et d'érosion.

### **2. Importance de La rugosité (microrelief) :**

A petite échelle la microtopographie est synonyme de rugosité : elle est utilisée pour décrire des profils microgéométrique, perturbations ou des irrégularités dans la surface du sol à une échelle qui est généralement trop petite pour être prise en compte par une carte topographique). L'eau qui tombe à la surface du sol commence à humidifier la partie supérieure du sol (quelques centimètres). Le profil hydrique change. Cette augmentation de la teneur en eau en surface ne détermine pas automatiquement un transfert en profondeur: l'eau peut rester retenue dans le sol par les forces de capillarité. Lorsque la capacité de rétention du sol en eau est dépassée, l'eau descend sous l'effet combiné de la gravité et du gradient d'humidité **humidifie** les couches inférieures. Si l'humidification du sol continue, l'eau finalement atteint la nappe par infiltration: ce phénomène est très lent et peut demander plusieurs mois. Si la pluie est forte, le sol ne peut pas absorber toute l'eau tombée, la partie supérieure du sol devient saturée mais le transfert vers la profondeur n'est pas assez rapide. Après, les petites dépressions créées par la microtopographie commencent à se remplir. Lors de pluie suffisamment importantes, ces dépressions sont comblées et le surplus prend part au ruissellement de surface : une pellicule d'eau s'accumule en surface et s'écoule selon la pente. L'eau qui s'écoule arrache des particules puis se rassemble en chenaux de plus en plus importants (cours d'eau). Lorsque la surface du sol est imperméable (roche imperméable, route ou zone urbaine bitumée), le ruissellement apparaît sitôt que les dépressions du sol ont été remplies.

De l'autre point de vue le ruissellement superficiel peut entraîner les particules du sol : c'est l'érosion qui est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants et qui se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt. Du fait de son impact économique, l'érosion des sols a été bien étudiée pour les sols de culture qui restent à nu une partie de l'année (au moins pendant le travail de la terre au cours des labours).

Le ruissellement agit sur le sol par des actions de détachement et de transport ce qui peut faire évoluer la surface du sol et réduire la rugosité. . D'une manière globale, il est admis que la vitesse de l'eau est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement superficiel. Et réduire la vitesse de ruissellement revient à pratiquer des techniques anti-érosives. Il s'agira par

exemple des techniques améliorant l'infiltration, ou des techniques pour augmenter la **rugosité** de la surface du sol.

Dans l'érosion l'éolienne les sols à la surface **non rugueuse** offrent très peu de résistance au vent. Toutefois, avec le temps, les rugosités peuvent se combler et s'aplanir par abrasion. Ceci résulte en une surface lisse, plus susceptible au vent. Ici aussi la **rugosité** de surface joue un rôle très important.

Selon ce que est écrit au-dessus l'importance de la connaissance de la rugosité de surface du sol dans les décisions de gestion de sol et dans la description des processus d'écoulement est clair. Par exemple elle est un paramètre important pour modéliser l'érosion et l'écoulement à la surface. Si on connaît la répartition spatiale de l'eau stockée à la surface de sol à cause de la rugosité et son évolution au cours de temps, on peut distinguer les conditions aux limites que l'on utilise dans les modèles hydrologique. La rugosité du sol affecte divers processus hydrologiques et d'érosion par exemple elle affecte le stockage de l'eau dans les dépressions de la surface et peut indirectement influencer sa capacité d'infiltration. Plusieurs études expérimentales ont montré un effet de la rugosité sur la vitesse d'infiltration. La vitesse de l'écoulement de surface est commandée par la résistance hydraulique de la surface de sol par exemple le coefficient de Manning (Hydrologie pratique,...) La rugosité de la surface du sol influence surtout la pluie d'imbibition mais cette influence diminue lorsque la pente du sol augmente car le volume stocké dans les flaques diminue sur les pentes fortes.

Une large gamme de techniques de mesures a été appliquée pour mesurer la rugosité. Elle peut être classifiée dans deux groupes principaux : méthodes à contacts et sans contact. Dans les méthodes avec contacts, les dispositifs de mesures ont un contact direct avec la surface du sol. Les dispositifs les plus utilisés sont les techniques de contact (telles que le rugosimètre à aiguilles[1], la méthode de la chaîne[2, 3]), ce qui sont moins cher et plus faciles à utiliser. Récemment les techniques sans contact telles que le laser [4-7] et la photogrammétrie [8-10] ont été développées. Le scanner laser a une résolution et une précision impotants(10 micron). La technique de photogrammétrie a beaucoup évoluée récemment. Mais il n'y a pas beaucoup d'articles la concernant. Cependant plusieurs expériences dans le laboratoire montre que la méthode photogrammétrie donne approximativement des données justes (MNT) pour la caractérisation la surface du sol. Taconet et Ciarletti [10] ont noté que la stéréophotogrammétrie fournit des MNT qui permettent des études précises des propriétés géométriques des sols qui peuvent certainement être utile pour des études hydrauliques et d'érosion.

La microtopographie de la surface du sol peut être caractérisée par différents indices. Les profils d'altitude permettent le calcul les indices de la rugosité de la surface. Généralement ces indices sont 2D. On peut citer l'indice de la rugosité aléatoire [11], et la tortuosité [12]. Govers et al [13] et Kamporst et al [14] ont fait une bonne revue sur la rugosité de la surface du sol.

Actuellement, trop peu d'information expérimentale est disponible pour prévoir en détail les effets de la rugosité de sol sur la génération d'écoulement. Cependant, l'évidence disponible suggère que les effets de rugosité de sol sur la génération d'écoulement soient autant dus à son effet sur la capacité d'infiltration et à son effet sur le stockage de dépression.

D'autre part comme différents paramètres de sol, la rugosité a une forte hétérogénéité. A cause de l'hétérogénéité spatiale aux petites échelle, Kamphorst [15]et Linsely et al (1947) proposent trois stades de remplissage des dépressions :

1. Tout excès d'eau sert à remplir les dépressions et il n'y a pas de ruissellement.

2. Certaines dépressions débordent, tandis que d'autres continuent de se remplir.  
 3. La détention superficielle maximale est atteinte et toute la surface contribue au ruissellement  
 On peut donc observer un phénomène de ruissellement à certains endroits avant d'arriver au maximum de détention superficielle. La figure 1 (extraite de Hairsine et al [16]) peut bien expliquer ce phénomène.

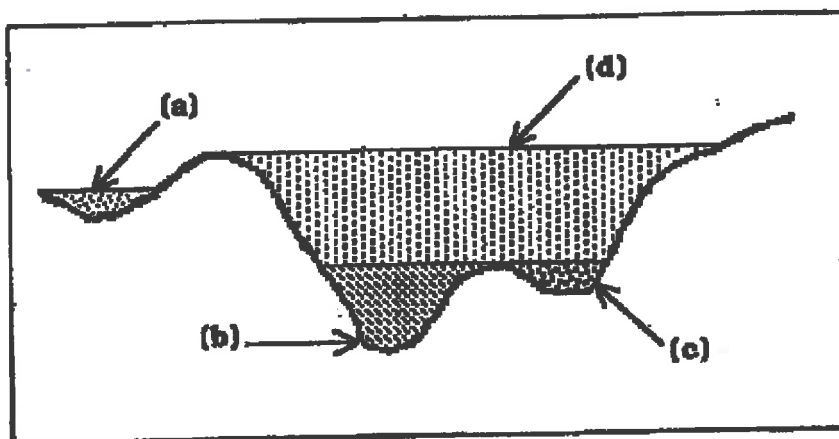


Figure 1 : Illustration la manière selon laquelle différentes dépressions peuvent se remplir et leur contribution dans le ruissellement : a) avant le remplissage des autres réservoirs, peut déborder et participer au ruissellement c) après débordement peut aider à remplir (b) mais elle ne sera pas la cause du ruissellement pendant que (d) se déborde. Selon [16].

### 3. Objectif et démarche générale:

Notre travail inclut deux parties : dans un premiers temps, nous nous sommes intéressés au processus de calibrage un appareil photo.

En effet, la phase de calibrage est la première étape dans le processus photogrammétrie de reconstitution du microrelief du sol. Nous avons tenté de préciser l'incertitude sur les paramètres et de définir un procédé de calibrage et de prises de vues optimal.

Dans un deuxième temps, nous avons utilisé le dispositif photogramétrique pour mesurer l'évolution de la rugosité du sol sous l'action des pluies. Plus précisément, le but de cette étude est d'analyser l'adéquation d'un système stéréophotogrammétrie pour obtenir l'estimation précise de la rugosité aléatoire à l'aide des paramètres statistiques et pour détecter les changements de la rugosité de la surface du sol suite aux précipitations. Le travail présenté dans ce rapport est basé sur un ensemble des modèles numériques du terrain (MNT) des sols nus agricoles réels obtenus par stéréophotogrammétrie.

Comme je l'ai déjà indiqué à l'introduction mon travail se compose de deux parties. Les deux parties de ce travail consistent les deux chapitres suivants. Ils sont organisés classiquement en introduction, matériel et méthode, les résultats et la discussion, une conclusion.



# Chapitre 2

## Calibration

### 1) Introduction

Nous utilisons le terme de stéréo-photographie pour désigner un dispositif de prises de vues et de reconstitution du micro-relief du sol (obtention d'un modèle numérique de terrain MNT) qui utilise le principe de la photogrammétrie mais des appareils de prises de vue numériques grand public et non de qualité photogrammétrique.

Connaissant les paramètres de prises de vues, nous sommes capables de reconstruire le MNT du sol (à partir de deux photos de la même placette mais vue de position légèrement différents), par triangulation. Des paramètres sont généralement estimés à partir de prise de vue de points aux coordonnées connus (les « Ground Control Points » de la photogrammétrie, une mire de référence dans notre cas) et d'un algorithme d'ajustement non linéaire. Ces paramètres résultent donc d'un ajustement : il est primordial de connaître leur unicité/variabilité ; leur stabilité avec les différents réglages optiques de l'appareil photo (ou caméra) et leur influence sur la qualité de la reconstruction du MNT. C'est l'objectif de cette partie.

La calibration d'une caméra à capteur CCD consiste à déterminer les paramètres de la projection d'un objet 3D dans le plan du capteur CCD. Des mises en correspondance entre la géométrie 3D et les pixels de l'image correspondant à la projection de cette structure géométrique permet de résoudre les paramètres de projection caméra. Plusieurs méthodes sont investiguées (appariement de points, projection inverse de droites, contraintes épipolaires) pour déterminer la calibration la plus robuste possible et imposant le moins de contraintes possibles au moment du tournage. Les méthodes envisagées sont très dépendantes d'une part de l'application visée et d'autre part des résultats de détection, appariement, poursuite, qui constituent les premières étapes possibles d'extraction de l'information contenue dans les images.

Pour le calibrage on a deux types de paramètres :

- Des paramètres intrinsèques : ce sont les paramètres, qui décrivent la projection de l'objet sur le plan du capteur CCD.
- Des paramètres extrinsèques : ce sont les paramètres, qui décrivent la position et l'orientation de la caméra.

Pour expliquer la théorie et le principe de la photogrammétrie j'ai utilisé : de livre de vision par ordinateur (Mezin, Gerad, 1988) S'intitule : chapitre 5. Donc pour ce qui veut plus d'information peut s'adresser à ce livre.

Dans ce travail, on ne s'intéresse que *aux paramètres intrinsèques*.

Dans cette partie nous allons brièvement décrire le modèle géométrique associé au processus de saisie d'image à l'aide d'une caméra. Ce modèle est caractérisé par un certain nombre de paramètres que nous allons estimer par étalonnage (ou calibration, ou calibrage). Les

paramètres d'une caméra ou paramètres intrinsèques seront estimés en même temps que les paramètres extrinsèques. Nous allons étudier en détail un modèle projectif de caméra.

Il est utile de signaler que lorsqu'on calibre une caméra, on s'intéresse à la modélisation de l'ensemble de la caméra et du convertisseur analogique/digital. Si on change de convertisseur, ou de caméra, il faut alors recalibrer l'ensemble.

Ensuite nous allons décrire un capteur comportant deux caméras (capteur stéréoscopique) et nous allons préciser quelques propriétés de ce capteur qui nous permettront de faciliter la tâche de mise en correspondance. Un capteur composé de deux caméras est un capteur tri-dimensionnel puisqu'il nous permet, par triangulation passive de calculer la distance d'un objet au capteur.

## 2. La théorie : Géométrie et calibration des caméras

### 2.1 Le modèle géométrique d'une caméra

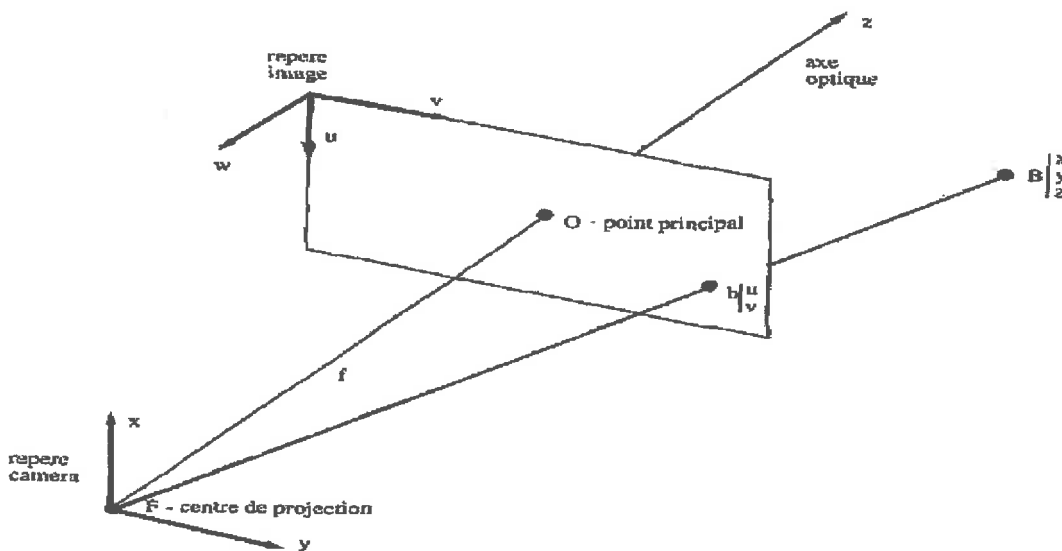
Nous allons caractériser le modèle d'une caméra à l'aide de deux transformations:

1. une projection qui transforme un point de l'espace (3D) en un point image (2D) et
2. une transformation d'un repère métrique lié à la caméra à un repère lié à l'image.

### 2.2 La projection perspective

Soit un point  $O$  dans le plan image (le capteur CCD) appelé point principal et soit une droite perpendiculaire au plan image passant par  $O$ , l'axe optique (voir figure.1). Soit un point  $F$  placé sur l'axe optique à une distance  $f$  du plan image.

Le point  $F$  est le centre de projection et  $f$  est la distance focale. On peut placer le centre de projection devant ou derrière le plan image, dans ce qui suit nous allons le placer derrière comme sur la figure



*Le modèle géométrique d'une caméra.*

figure.1 Le modèle géométrique d'une camera

Un point B se projette dans le plan image le long d'une droite passant par B et F. Choisissons un système de coordonnées attaché à la caméra : le plan  $x-y$  de ce repère est parallèle au plan image et l'axe des  $z$  est confondu avec l'axe optique. L'origine de ce repère se trouve en F. Soient  $x, y$  et  $z$  les coordonnées du point B dans le repère qu'on vient de décrire. Dans ce même repère, les coordonnées de la projection  $b$  de B dans le plan image sont :

$$\begin{aligned}x' &= fx/z \\y' &= fy/z \\z' &= f\end{aligned}$$

On peut écrire cette transformation sous forme matricielle et homogène (La matrice de projection perspective, qui se nomme P) :

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{pmatrix}$$

Les coordonnées homogènes de B sont  $(x, y, z, 1)$  et celles de  $b$  (sa projection) sont :

$$\begin{pmatrix} sx' \\ sy' \\ sz' \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Les coordonnées cartésiennes de  $b$  sont  $sx'/s, sy'/s$  et  $sz'/s$ .

### 2.3 Transformation caméra/image

Les points image sont mesurés en pixels dans un repère bi-dimensionnel  $u-v$  associé à l'image (voir figure.1). Afin de pouvoir écrire la matrice de transformation du repère image nous devons introduire les paramètres suivants :  $u_0, v_0, w_0$  sont les coordonnées de F, dans le repère image (mesurées en pixels),  $k_u$  est le facteur d'échelle vertical (pixels/mm) et  $k_v$  est le facteur d'échelle horizontal. Le point  $b$  de coordonnées  $(x' \ y' \ z' = f)$  dans le repère caméra (mm) a pour coordonnées  $(u \ v \ w = 0)$  dans le repère image (pixels). Les coordonnées sont liées par la relation :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_u & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{pmatrix}$$

C'est le vecteur  $(u_0 \ v_0 \ w_0)$  transformation affine représentant un changement d'échelle,  $(k_u, k_v)$  rotation et une translation. La composante  $w$  étant toujours nulle, on peut ignorer la troisième ligne et écrire cette transformation sous la forme d'une matrice  $K 3 \times 4$  :

$$K = \begin{pmatrix} -k_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}$$

Cette transformation représente une application linéaire de l'espace projectif vers le plan projectif.

#### 2.4 Les paramètres intrinsèques

En multipliant les matrices  $K$  et  $P$  (projection perspective suivie d'une transformation affine) nous pouvons écrire les équations du modèle géométrique de la caméra, soit la relation entre les coordonnées caméra  $(x \ y \ z)$  du point  $B$  et les coordonnées image  $(u \ v)$  du point  $b$  :

$$\begin{cases} u = -k_u f \frac{x}{z} + u_0 \\ v = k_v f \frac{y}{z} + v_0 \end{cases}$$

En effet, le produit  $KP$  est

$$\begin{pmatrix} -k_u & 0 & u_0/f & 0 \\ 0 & k_v & v_0/f & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{pmatrix}$$

En multipliant tous les coefficients de la matrice par  $f$  (ce qui ne change multiplicatif près) on obtient :

$$I_c = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

qui est une application linéaire de l'espace projectif vers le plan projectif exprimant la transformation perspective :

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = \mathbf{I}_c \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ s \end{pmatrix}$$

Ce modèle comporte 4 paramètres :  $\alpha_u = -k_u f$ ,  $\alpha_v = k_v f$ ,  $u_0$  et  $v_0$  qui tous s'expriment en pixels. Ce sont ces paramètres qui vont être estimés par calibrage. Notons que la distance focale ne peut être calculée explicitement. En introduisant des coordonnées caméra sans dimension telles que :

$$x_c = x/z$$

$$y_c = y/z$$

$$z_c = 1$$

On peut maintenant écrire la relation entre les coordonnées image et les coordonnées caméra :

$$\begin{cases} u = \alpha_u x_c + u_0 \text{ avec } \alpha_u < 0 \\ v = \alpha_v y_c + v_0 \end{cases}$$

On peut maintenant décomposer la matrice  $\mathbf{I}_c$  en une transformation affine caméra-image et une transformation projective :

$$\mathbf{I}_c = \begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

## 2.5 Les paramètres extrinsèques

Afin de déterminer les paramètres du modèle de la caméra, nous allons placer devant la caméra une mire (un objet étalon) : un ensemble de points dont les coordonnées sont parfaitement connues dans un repère de la mire qui est différent du repère caméra. Chaque point de la mire se projette dans l'image et on mesure ses coordonnées dans le repère image. La transformation mire/image se décompose donc en une transformation mire/caméra suivie d'une projection et suivie enfin d'une transformation caméra/image. La transformation mire/caméra se compose d'une rotation et d'une translation :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$$

La transformation rigide (rotation et translation) peut s'écrire sous la forme d'une transformation homogène :

$$A = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix}$$

Cette matrice représente une transformation rigide (3 rotations et 3 translations): ce sont les paramètres extrinsèques. La matrice inverse est donnée par l'expression suivante :

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} R^t & -R^t t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

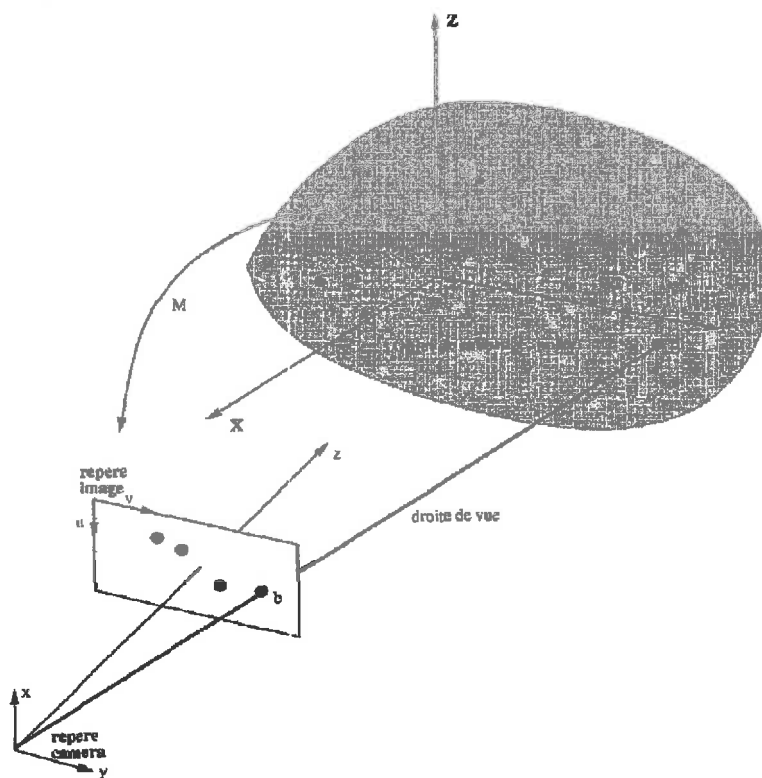


Figure 2. Le principe de calibrage d'une caméra. Un point B dont les coordonnées sont exprimées dans le repère mire se projette en b dont les coordonnées sont exprimées dans le repère image.

## 2.6 La distorsion

La distorsion est une transformation qui peut être modélisée dans le seul plan image, l'information 3D est inutile. Dans le modèle de projection perspective précédent, l'image d'un point est obtenue en intersectant le plan image avec la droite passant par ce point et par le centre de projection. En réalité la lumière ne voyage pas toujours le long d'une droite et la projection sur le plan image est légèrement différente de la position théorique (voir figure.4).

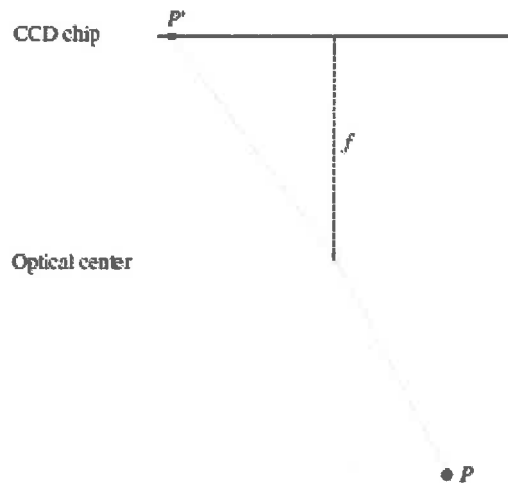


Figure.3 : différence entre la position théorique et la position réelle

Pour la plupart des objectifs, la déformation peut être suffisamment bien rapprochée par une déformation radiale qui est donnée par :

$$\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4\kappa(u^2 + v^2)}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

$(u, v)$  = position théorique (sans déformation),

$(\tilde{u}, \tilde{v})$  = position réelle (avec déformation)

Le paramètre  $\kappa$  modélise l'importance des déformations radiales. Si  $\kappa$  est négatif, la déformation est dite en barillet, alors que si  $\kappa$  est positif elle dite en coussinet. Ce modèle pour les déformations d'objectif a le grand avantage que la correction de distorsion peut être calculée analytiquement par

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{1 + \kappa(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)} \begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{pmatrix}$$

$\kappa > 0 \Rightarrow u < \tilde{u}, v < \tilde{v}$ .

$\kappa < 0 \Rightarrow u > \tilde{u}, v > \tilde{v}$

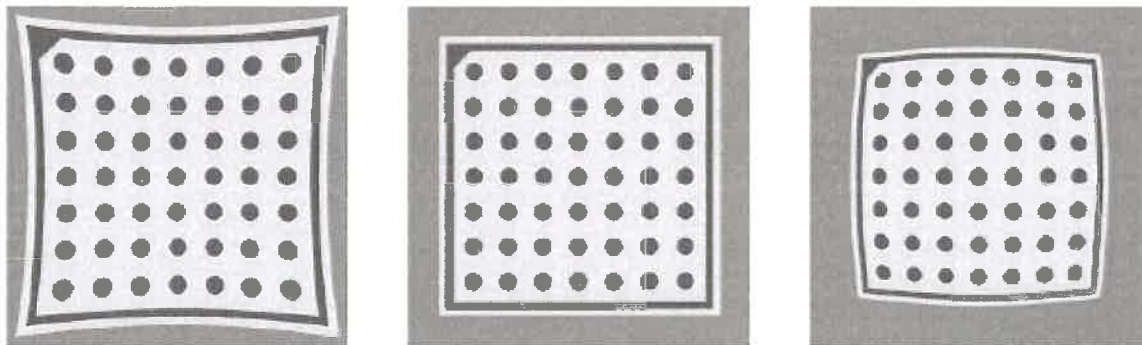


Figure 4. Déformation en coussinet pour  $k > 0$  (gauche), image non déformée  $k = 0$ , déformation en barillet  $k < 0$  (droit).

**• Principe de la procédure de calibrage de la caméra.**

- a) On prend tout d'abord une photo d'une mire, c'est-à-dire d'un ensemble de N points de coordonnées  $(x_i, y_i, z_i)_{i=1, \dots, N}$  connus.
- b) On retrouve ces points sur l'image : on obtient N points de coordonnées  $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)_{i=1, \dots, N}$ .
- c) On se donne des valeurs initiales (itor=0) pour des paramètres intrinsèques et extrinsèques ( $f^{itor} =; u_0^{itor} =; v_0^{itor} =; \dots$ ).

d) 1. Calcul de la matrice  $A^{itor}, I_c^{itor}$  ←

2. Pour  $i=1 \dots N$   
 Calcul de  $(\hat{u}_i, \hat{v}_i)$  avec  $A^{itor}, I_c^{itor}$   
 Calcul de  $(\hat{\hat{u}}_i, \hat{\hat{v}}_i)$  à partir de :

$$\begin{pmatrix} \hat{\hat{u}}_i \\ \hat{\hat{v}}_i \end{pmatrix} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - 4k^{itor}(\hat{u}_i^2 + \hat{v}_i^2)}} \begin{pmatrix} \hat{u}_i \\ \hat{v}_i \end{pmatrix}$$

3. calcul d'un critère d'écart entre les N  $(\hat{\hat{u}}_i, \hat{\hat{v}}_i)$  et les N  $(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i)$  :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( (\tilde{u}_i - \hat{\hat{u}}_i)^2 + (\tilde{v}_i - \hat{\hat{v}}_i)^2 \right)}$$

4. Est RMSE=0 ? → oui → On a trouvé les paramètres  
 ↓  
 Non → (itor < itor+1 ; on change les valeurs de  $f, \dots$ )

**3. Matériel et Méthode :**

**3.1 L'instrument nécessaire pour photographier:**

On a utilisé deux caméras Nikon D100, et un trépied pour chacune des caméras et enfin la mire de calibration. La focale de nos appareils était constante (objectif Nikon 100, focale théorique de 35mm).

**3.2 Programme de la Calibration**

Ce programme a été développé dans un logiciel spécialisé pour l'image processus « Halcon » avec la licence de L'Inra d'Avignon.

Le code était déjà écrit et j'ai surtout utilisé le code existant. A cause du manque de temps et de place je n'entre pas dans les détails.

**3.3 Prises de vues:**

Pour obtenir les données en 3D par la méthode de stéréophotographie, on doit d'abord calibrer chacun des appareils photo.

Nous voulons d'une part caractériser la stabilité des paramètres intrinsèques en fonction des réglages optiques de la caméra, d'autre part vérifier l'unicité de ces paramètres en fonction de



la stratégie d'étalonnage. En effet, lors d'une procédure de calibrage, nous ne prenons pas toujours le même nombre de photographies de la mire, ni les mêmes positions.

Les réglages optiques étudiés ont été :

- 1- **Distance** notée **D** entre les caméras et l'objet (la mire). On a choisi trois distances : 1.5, 3, et 4.5 mètres. Ceci modifie la mise au point et donc potentiellement la focale  $f$ ;
- 2- **Ouverture** notée **F** ou diaphragme de l'appareil photo. Trois ouvertures ont été sélectionnées : F4, F8 et F16.

Donc on a 9 réglages différents (3 distances x 3 ouvertures) pour chaque appareil.

Les photos ont été prises par chacune des caméras, la lettre **L** (respectivement **R**) désigne la caméra gauche (respectivement droite).

Pendant la calibration, il faut prendre plusieurs photos de la mire dans des positions différentes. La règle générale empirique est que les paramètres intrinsèques seront d'autant mieux définis que le nombre de photos sera élevé et que ces photos correspondront à des positions de mire très différentes (à perpendiculaire à l'axe optique ou inclinée, centrée ou sur les bords, ...). Avec chaque appareil, on a pris 30 photos d'une mire d'étalonnage fournie par le concepteur du logiciel Halcon. La précision est donnée pour 100  $\mu\text{m}$ .

Afin de mieux comprendre :

- combien de photos sont nécessaires pour faire une calibration optimale ?,
- et répondre à cette question : Est-ce que une fois que l'on a calibré les appareils pour une distance et une ouverture donnée, on peut utiliser ces paramètres dans d'autres conditions de prise de vue ?

nous avons également décidé de réaliser des calibrages avec des sous-échantillonnages (nombre de photos inférieur à 30) pour chaque réglage.

Comme je l'ai déjà indiqué, la base de données initiale pour chaque appareil photo et chaque réglage est de 30 photos. Les sous échantillons sont pris à partir de cette base.

L'échantillonnage a été fait aléatoirement et en trois groupes (avec 5, 10 ou 20 photos prises parmi 30) et nous avons réalisé 50 tirages pour chaque groupe. Pour cela un petit programme a été écrit sous **R** pour présenter dans le logiciel Halcon les indices des photos constituant les sous-échantillons. Ainsi, on définit une troisième variable à étudier :

- 3- **Nombre** des photos utilisé pour faire la calibration. Nous avons trois différents effectifs : 5, 10 et 20 photos prises parmi 30, et nous avons 50 tirages différents pour chaque effectif répétitions.

En résumé, pour chaque appareil nous avons 9 **réglages optiques** différents (3 Distance \* 3 Ouverture). Pour chaque réglage, nous avons 3 sous-échantillonnages de taille différente (5, 10 et 20 photos). Pour chaque sous-échantillonnage, nous avons 50 tirages aléatoires et donc 50 résultats de calibrage. Au total, cela fait  $9*3*50=1350$  calibrages par appareil.

Les résultats ont été codifiés avec les abréviations suivantes :

- D15F4\_L5 : correspond à la Distance de 1.5 m, à l'ouverture F4, à l'appareil photo gauche et à un sous échantillon de 5 photos ;
- D15F4\_R5 correspond à la Distance de 1.5 m, à l'ouverture F4, à l'appareil photo droit et à un sous échantillon de 5 photos ;

### 3.4 Calibration et traitement des Image

Nous avons choisi d'enregistrer les images sans compression au format RAW natif de Nikon (extension .nef). Le logiciel Halcon ne lit pas ce format. Nous avons donc d'abord changé le format et le nom des fichiers de photos sous Photoshop CS3 de .NEF à .TIF. Puis on a fait la calibration pour tous les états différents

A chaque calibration on a obtenu 8 paramètres de l'appareil dont les 6 premiers sont les paramètres intrinsèques suivants :

Focale: la distance focale la lentille [mètre]

Kappa: La coefficient de la distorsion radial [ $1/(\text{mètre}*\text{mètre})$ ]

Sx : Largeur de la cellule en CCD-chip [mètre]

Sy : Hauteur de la cellule en CCD-chip [mètre]. Ce paramètre n'est pas ajusté par le logiciel Halcon ;

Cx: X-coordonner du centre d'image [pixel]

Cy: Y-coordonner du centre d'image [pixel]

ImageWidth: Largeur d'images [pixel]

ImageHeight: Hauteur d'images [pixel]

Deux paramètres ont été omis pendant l'analyse des données parce qu'ils étaient toujours constants : la largeur *ImageWidth* (3008 pixels) et la hauteur *ImageHeight* (2000 pixels) de l'image.

Chaque fois que la calibration est faite, Halcon calcule une erreur selon les axes Y (ligne) et X (colonne) de l'image. Ces erreurs sont calculées comme la différence entre les coordonnées des points calculés par le logiciel et les vrais coordonnées des points de la mire extraits sur l'image.

Donc on a deux variables qui traduisent la qualité du calibrage et la précision possible :

Ex : l'erreur de positionnement selon l'axe X [pixel]

Ey : l'erreur de positionnement selon l'axe Y [pixel].

### 3.5 Les logiciels utilisés

Les logiciels utilisés ont été :

**Photoshop CS3** pour la conversion des images

(<http://www.adobe.com/fr/products/photoshop>) ;

**R** pour les tirages des sous-échantillons (<http://www.r-project.org/>) ;

**Halcon** pour le calibrage

(<http://www.mvtec.com/halcon/download/documentation/framegrabber-7.1/nt-x86-dfg-lc.html>) ;

**Excel** pour la mise en forme des résultats et certaines visualisations,

**SPSS** (<http://www.spss.com/fr/>) pour le traitement statistique des résultats.

## 4. Résultats :

Avant de commencer à comparer les résultats je définis quelques expressions que je vais utiliser ultérieurement :

- **la précision** d'une calibration est sa qualité à donner des résultats qui sont, individuellement, proche de la valeur vraie. Une calibration précise est à la fois « fidèle » et « juste » ;
- **la fidélité** (ang. repeatability) est l'aptitude à donner des indications très voisines lors d'applications répétées du même paramètre dans les mêmes conditions. Ceci veut dire que les erreurs aléatoires sont faibles. Par 'conditions de mesure' on entend par exemple Camera, Focale, Distance, Ouverture, Tirage, conditions d'utilisation et temps. La fidélité se caractérise comme une dispersion : plus l'écart-type d'estimation d'un paramètre est petit, plus ce paramètre est fidèle ;
- **la justesse** (ang. accuracy) est l'aptitude à donner des indications proche de la vérité. Nous avons supposé que les paramètres « vrais » obtenus pour un réglage optique donné sont ceux obtenus en utilisant l'ensemble des 30 photos : nous qualifierons ce calibrage de « référence ».

Les résultats sont présentés en trois parties :

1. présentation et analyse des calibrages dits « de référence »,
2. présentation et analyse de l'effet des sous-échantillonnages des photos pour le calibrage. Dans ce cas, nous utiliserons un seul appareil photo et un seul réglage optique (couple Distance-Ouverture) ;
3. présentation et analyse de l'évolution des paramètres en fonction des réglages optiques et du sous-échantillonnage. Dans ce cas, nous utiliserons un seul appareil photo.

#### 4.1 Calibrages de référence

Table2-1.

	Focale (m)	Kappa (1/m <sup>2</sup> )	Sx (m)	Sy (m)	Cx (Pixel)	Cy (Pixel)	Ex (Pixel)	Ey (Pixel)
<b>Gauche</b>	<b>L'appareil Gauche</b>							
D15F4	0,0365	-63,5	7,8E-06	7,8E-06	1 520,62	1 032,71	0,247	0,247
D15F8	0,0366	-56,8	7,8E-06	7,8E-06	1 523,97	987,97	0,262	0,262
D15F16	0,0365	-59,5	7,8E-06	7,8E-06	1 504,31	1 013,04	0,273	0,273
D3F4	0,0365	-59,7	7,8E-06	7,8E-06	1 503,13	1 023,89	0,091	0,091
D3F8	0,0365	-56,1	7,8E-06	7,8E-06	1 531,54	980,35	0,102	0,102
D3F16	0,0363	-59,2	7,8E-06	7,8E-06	1 512,61	1 067,01	0,101	0,101
D45F4	0,0363	-68,8	7,8E-06	7,8E-06	1 524,87	1 040,72	0,060	0,060
D45F8	0,0361	-61,9	7,8E-06	7,8E-06	1 537,80	1 041,40	0,072	0,072
D45F16	0,0364	-55,9	7,8E-06	7,8E-06	1 537,54	1 032,25	0,080	0,080
<b>Droite</b>	<b>L'appareil Droite</b>							
D15F4	0,0365	-63,7	7,8E-06	7,8E-06	1 514,42	1 034,60	0,259	0,259
D15F8	0,0366	-61,8	7,8E-06	7,8E-06	1 512,08	990,97	0,254	0,254
D15F16	0,0362	-61,2	7,8E-06	7,8E-06	1 504,60	1 006,66	0,262	0,262
D3F4	0,0365	-58,7	7,8E-06	7,8E-06	1 512,20	1 029,52	0,088	0,088
D3F8	0,0366	-58,0	7,8E-06	7,8E-06	1 519,66	984,18	0,102	0,102
D3F16	0,0365	-62,3	7,8E-06	7,8E-06	1 513,63	1 021,37	0,103	0,103
D45F4	0,0365	-67,1	7,8E-06	7,8E-06	1 528,48	1 029,96	0,060	0,060
D45F8	0,0362	-61,2	7,8E-06	7,8E-06	1 536,76	1 046,78	0,074	0,074

D45F16	0,0364	-55,9	7,8E-06	7,8E-06	1 537,54	1 032,25	0,080	0,080
--------	--------	-------	---------	---------	----------	----------	-------	-------

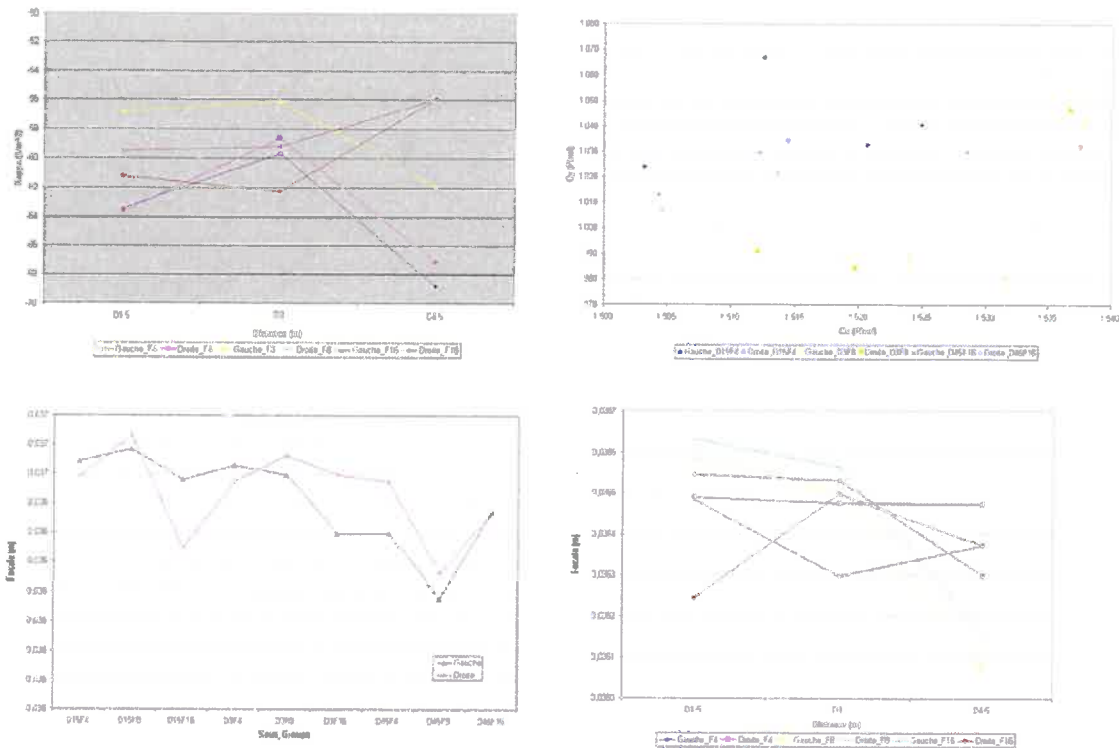


Figure 5.

On a calculé les paramètres des appareils photo avec 30 photos (voir table 2-1 et figure 5). Les paramètres calculés seront les références pour estimer l'état optimal.

## 4.2 Influence du sous-échantillonnage

### 4.2.1 Corrélation entre paramètres

Pour illustrer les corrélations éventuelles entre paramètres, nous présentons un « scatter plot » sous forme matricielle (les graphes de cette matrice n'ont aucune échelle) de l'ensemble des relations entre paramètres, pris 2 à 2. Ceci correspond à l'analyse des 50 sous échantillonnages de 5 photos (plus l'échantillonnage complet) pour les conditions D15F4\_L5 (voir figure 6.). Ce graphe a également été tracé pour 3 autres conditions de prises de vue : les matrices des graphes dispersées 3 autres réglages ont été mis dans l'annexe 1.

Matrice des Paramètres Intrinseque; l'échantillon:D1.5F4\_L5

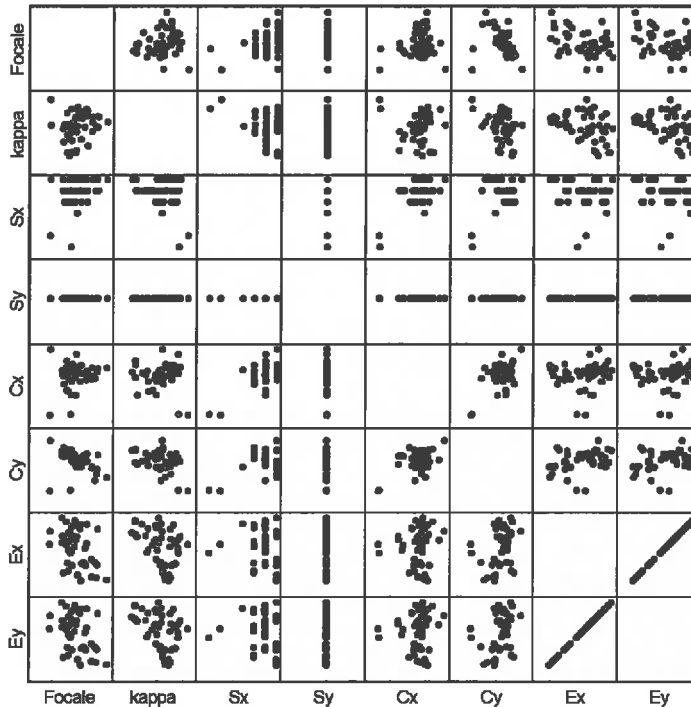


Figure 6.

Ce graphe montre que:

- le paramètre  $S_y$  n'est jamais estimé, ce que confirme le manuel de référence de Halcon ;
- en règle générale, il n'existe pas de corrélations entre paramètres : les graphes sont très dispersés, seule les paramètres de distorsion « *kappa* » et la distance focale « *Focale* » semblent présenter une très légère corrélation ;
- inversement, il existe une corrélation quasi parfaite entre les variables  $E_x$  et  $E_y$  (voir figure 6.): les erreurs selon X et Y sont égales. On peut donc poser  $E_x = E_y$  et définir une erreur totale par  $E_{tot}^2 = E_x^2 + E_y^2$ . Ceci montre également qu'il n'y a pas d'anisotropie dans le processus d'acquisition de l'image ;
- les paramètres ne sont pas uniques : le processus de calibrage converge dans tous les cas vers des paramètres permettant une « bonne » estimation des paramètres (« bonne » au sens de faible erreur  $E_x$  et  $E_y$  : les erreurs sont de l'ordre de grandeur de 0.2 pixel au maximum), mais ces paramètres ne sont pas toujours les mêmes. Ceci montre que, pour le réglage (Distance = 1.5m, Ouverture = F4), le nombre de 5 photos n'est pas suffisant ;
- malgré une apparente dispersion, certains paramètres sont bien définis et semblent uniques. Il s'agit des paramètres physiques du capteur ( $E_x$  : le paramètre de taille  $S_x$  des pixels CCD, voir tableau 2-2). Ceci a été confirmé pour les autres réglages optiques.

Table 2-2: Descriptive Statistiques

	Sx_D15F4_L5 (meter)
N	51
Rang	.00000006000
Minimum	.00000776000
Maximum	.00000782000
Moyenne	.0000078094018
Ecart -type	.00000001190127

L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y

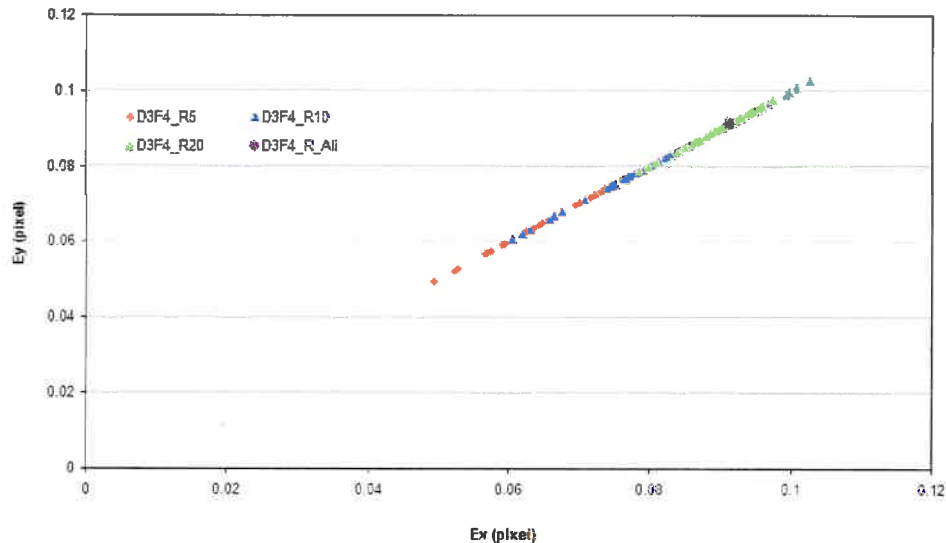


Figure 7.

#### 4.2.2 Variabilité de l'estimation des paramètres

Nous avons étudié l'influence du sous-échantillonnage sur l'estimation des paramètres pour un réglage optique (Distance, Ouverture) donné. Cette étude a été faite pour différents paramètres et les résultats sont présentés sous forme graphique et sous forme de tableaux. Pour chaque réglage, on a 50 répétitions pour choisir différentes photos entre les 30 photos qui constituent la base de données, et nous avons un calibrage de référence obtenu avec 30 photos. Pour indiquer cela à la fin du nom de groupe le mot « ALL » a été ajouté. Les paramètres suivants ont été étudiés :

1. Ex et Ey pour 3 réglages optiques ;
  2. la position (Cx, Cy) du point principal, qui est la projection sur le plan image du centre de projection ;
  3. la relation entre la focale et l'estimation du centre de l'image.
- On n'a pas considéré les paramètres Sx et Sy à cause de leur invariabilité.

Au total, 54 courbes ont été obtenues. Je présente dans ce rapport seulement les résultats d'un seul réglage optique pour la camera droite. Les autres résultats sont situés en annexe 2.

**+ Erreur moyenne Ex et Ey.**

L'erreur moyenne est l'erreur de positionnement des points de la mire (la mire comporte 49 points) sur l'image. Cette erreur s'exprime en pixels. On l'appelle moyenne parce que pour la calculer dans chaque calibration, nous utilisons de nombreux points : pour chaque photo, nous avons 49 points. Ainsi, pour un sous-échantillonnage de 5 photos (respec. 10 et 20), l'erreur moyenne est calculée sur 245 points (respec. 490 et 980 points).

Dans la graphie (voir Figure 7.) et le tableau 2-3. les résultats D3F4\_R sont présentés. En premier lieu, on confirme que  $Ex=Ey$ . La valeur d'erreur qu'on a calculée est bien dépendante du nombre des échantillons. Par exemple quand la distance entre l'appareil et la mire d'étalonnage est 3m et l'ouverture est F4, pour l'appareil droit, on a calculé une erreur quasiment  $9.13E-02$  en utilisant l'ensemble des photos. La série rouge, qui présente l'erreur calculée pour le sous-échantillonnage de 5 photos, est très dispersé ( $\sigma = 0.012$  pix), mais en augmentant le tirage, la fidélité augmente et les résultats sont plus concentrés ( $\sigma = 0.004$ ). La série verte (sous échantillonnage de 20 photos) montre les résultats les plus fidèles.

Nous cherchons une calibration la plus précise possible (faible erreur Ex ou Ey) mais également la plus juste possible (faible dispersion). Le sous-échantillonnage de 56 photos montre en moyenne la plus basse erreur, mais on ne peut pas dire que si on a une petite erreur, le résultat est précis. Pour vérifier la justesse du calibrage, il faut s'intéresser également aux autres paramètres. Par exemple quand l'erreur est 0.070054 pixels dans deux directions (x, y), on a une estimation du point principal (Cx, Cy) qui apparemment n'est pas proche des vrais valeurs : on obtient  $Cx=1447.795$  [pix] et  $Cy=1092.655$  [pix] alors que les valeurs obtenues avec le calibrage de référence sont  $Cx=1500.214$  [pix] et  $Cy=1057.051$  [pix].

*Table 2-3: Descriptive Statistics*

	Ex_D3F4_R5	Ey_D3F4_R5	Ey_D3F4_R10	Ex_D3F4_R10	Ex_D3F4_R20	Ey_D3F4_R20
Mean	.075175	.075175	.081156	.081156	.090465	.090465
Std. Deviation	.0120795	.0120795	.0092203	.0092203	.0045653	.0045653
Range	.0452	.0452	.0420	.0420	.0212	.0212
Minimum	.0494	.0494	.0606	.0606	.0785	.0785
Maximum	.0946	.0946	.1026	.1026	.0998	.0998

**+ position du point principal (Cx, Cy).**

En théorie, le point principal devrait se situer au centre du capteur CCD, soit aux positions théoriques (1504,1000) [pixel]. Les résultats de calibrage sont portés sur la figure (8.) et le tableau 2-4.

L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la position du centre optique

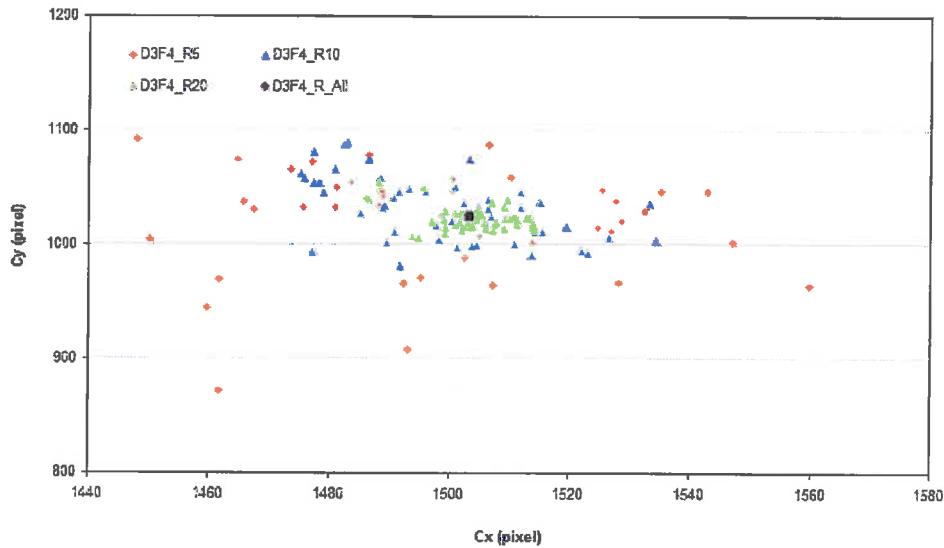


Figure 8.

Tableau 2-4 : inverser les colonnes R5 et R10

	Cx D3F4 R10	Cy D3F4 R10	Cx D3F4 R5	Cy D3F4 R5	Cx D3F4 R20	Cy D3F4 R20
Mean	1499.3899	1030.1921	1498.7937	1022.9010	1504.4017	1022.3373
Std. Deviation	15.38133	27.13538	25.95471	46.52630	6.33406	9.61228
Variance	236.585	736.329	673.647	2164.697	40.120	92.396
Range	59.23	107.89	111.87	277.07	27.68	49.12
Minimum	1475.07	980.39	1447.80	870.73	1486.24	1005.01
Maximum	1534.30	1088.28	1559.66	1147.80	1513.93	1054.12

L'effet du nombre des photos utilisées pour la calibration sur la position du centre optique est particulièrement clair. Les nombres de 5 et de 10 photos sont notoirement insuffisants pour définir de façon précise la position du point principal. Lorsque l'on utilise 20 photos, le résultat est moins dispersé et l'écart-type (calculé sur les 50 tirages) est de 6.3 [pixel] pour Cx et de 9.6 [pixel] pour Cy.

On remarque également que la position en X est mieux définie que la position en Y car les écart-types selon X sont systématiquement plus faibles que selon Y. Cette position en X est également plus proche de la position théorique (1504.4 au lieu de 1504 [pixel]) que la position selon Y (1022.3 au lieu de 1000 [pixel]). Cette relative incertitude en Y peut être due soit à des défauts optiques/mécaniques de l'optique, soit à un décentrage du capteur CCD par rapport à l'axe optique de l'objectif utilisé, soit à un mauvais calibrage. En effet, la taille Sy des pixels CCD n'est pas estimée et cela pourrait avoir un effet sur l'estimation de Cy.

Nous pensons qu'il faudrait réaliser une nouvelle série de calibrage en supposant que les pixels CCD sont carrés, en fixant leur taille par  $S_y=S_x$  et en excluant ces paramètres du processus de calibrage.



**+ relation entre la distance focale Focale et la position du point principal (Cx, Cy).**

Nous avons tracé sur la figure 9. les estimations de ces paramètres pour les 50 tirages. Les ordonnées sont classées par ordre croissant de la focale estimée.

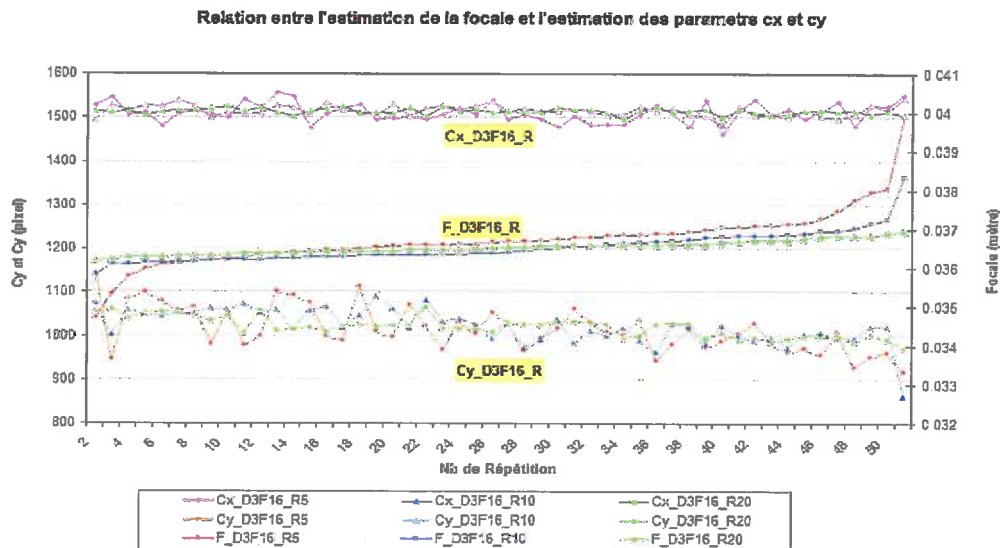


Figure 9.

Tableau 2-5 :

**Statistics**

	F_D3F4_R5	F_D3F4_R10	F_D3F4_R20
Mean	.036496431	.036455351	.036574417
Std. Deviation	.0004739792	.0002475617	.0001096564
Range	.0021451	.0010364	.0005266
Minimum	.0356187	.0359222	.0362669
Maximum	.0377638	.0369586	.0367934

On remarque :

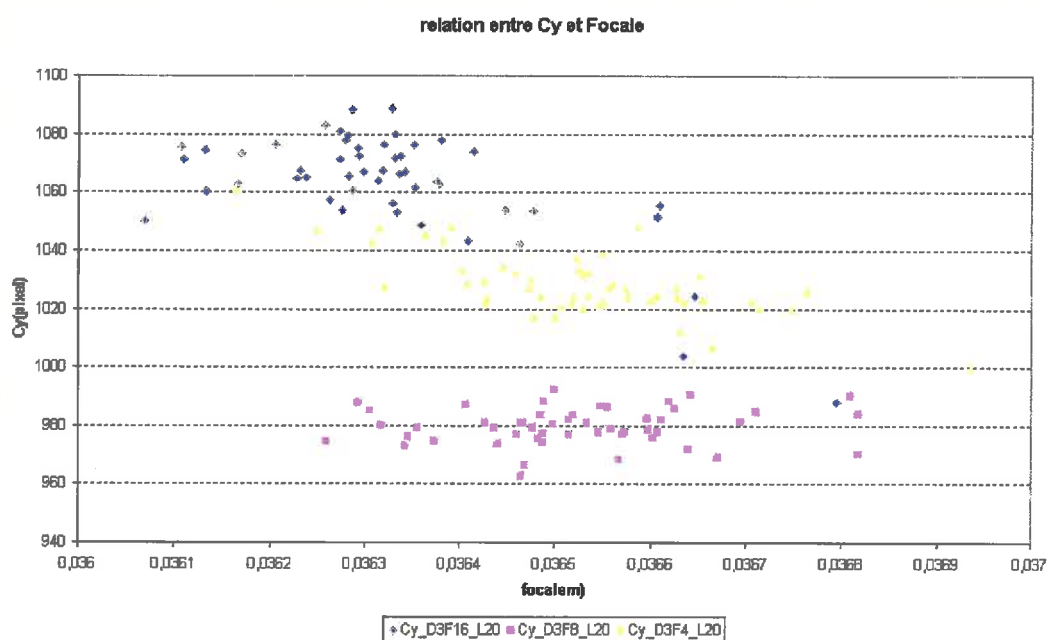
- que le paramètre Cx est relativement constant, ce qui confirme l'analyse précédente ;
- qu'il semble exister une légère corrélation entre Cy et la focale. à vérifier en traçant une graphe  $Cy=f(\text{focale})$  pour la série vert \* 3 ouverture (voir figure 10.)

Concernant l'estimation de la focale, on observe que :

- en moyenne, la focale est relativement stable : Focale ~ 36.5 mm avec un écart-type toujours inférieur à 0.5 mm ;
- la focale est d'autant mieux définie que le nombre de photos augmente : l'écart-type passe de 0.5 mm pour le sous-échantillonnage de 5 photos à 0.1 mm pour le sous-échantillonnage de 20 photos ;

- pour les sous-échantillonnages de 5 et 10 photos, l'algorithme de calibrage peut converger vers des focales « aberrantes » (35 mm ou 40 mm) ;
- la focale théorique donnée par le constructeur de l'objectif est de 35 mm, ce qui ne correspond pas à nos résultats.

Ceci est confirmé pour les autres réglages optiques (voir annexe 2).



*Figure 10.*

### 4.3 Influence des réglages optiques

Les résultats sont présentés sous forme de « boxplots » : l'abscisse représente le réglage optique, le sous-échantillonnage et l'appareil (gauche ou droit), l'ordonnée représente les indices de distribution des paramètres.

#### 4.3.1 Influence de la distance

+ influence de la distance sur l'erreur (voir figure 11).

L'erreur diminue avec la distance : l'ordre de grandeur de  $E_x$  est de 0.2 [pix] pour une distance de  $D = 1.5$  m, elle est de 0.1 [pix] pour  $D = 3$  m et de 0.07 [pix] pour  $D = 4.5$  m.

Il faut traduire ces erreurs de positionnement exprimées en pixel en erreur de positionnement  $E_{réel}$  des points sur la mire réelle (position métrique). Dans ce cas, d'après le modèle de projection utilisé et en ne considérant que l'erreur  $E_x$  [pix], on peut montrer que :

$$E_{réel} = S_x \cdot E_x \cdot \frac{D}{f}$$

où  $D$  est la distance (m),  $f$  la focale (m),  $S_x$  et  $E_x$  sont définis dans le rapport. L'erreur réelle  $E_{réel}$  est donc proportionnelle à la distance entre l'appareil photo et la mire. Dans ce cas, on observe que la distance n'a pas d'effet sur l'incertitude réelle qui reste constante et de l'ordre de :

$$E_{réel} = 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot \frac{3}{36 \cdot 10^{-3}} = 65 \cdot 10^{-6}$$

soit 65  $\mu\text{m}$ . Ceci concorde avec les données constructeur (100  $\mu\text{m}$ ).



#### **+ influence de la distance sur la focale (voir figure 12.).**

La distance peut avoir une influence sur la détermination de la focale, du fait que lorsque la distance change, le dispositif d'autofocus de l'appareil fait bouger l'objectif et peut potentiellement faire changer très légèrement la distance focale. Les résultats sont portés sur les figures 12(abc).

Ne semble pas avoir d'effet.

Lorsque la distance augmente, la variabilité de l'estimation de la focale diminue même lorsque le nombre de photos est faible (sous-échantillonnage de 5 photos).

On peut observer des calibrages aberrants (les symboles sur les graphes), qui correspondent à des tirages donnés pour lesquels on connaît les photos retenues dans le processus de calibrage. Il serait intéressant d'analyser les photos retenues dans ces tirages car elles semblent ne pas fournir une information suffisante dans le processus de calibrage. Par manque de temps, cela n'a pas été fait.

La distance ne semble pas influencer l'estimation des autres paramètres.

#### ***4.3.2 Influence de l'ouverture du diaphragme***

L'ouverture peut jouer sur l'adéquation du modèle de caméra utilisé, et donc sur l'ensemble des paramètres. Lorsque la valeur de F augmente, cela signifie que l'on ferme le diaphragme : on diminue la vitesse de prise de vue et on augmente la profondeur de champ.

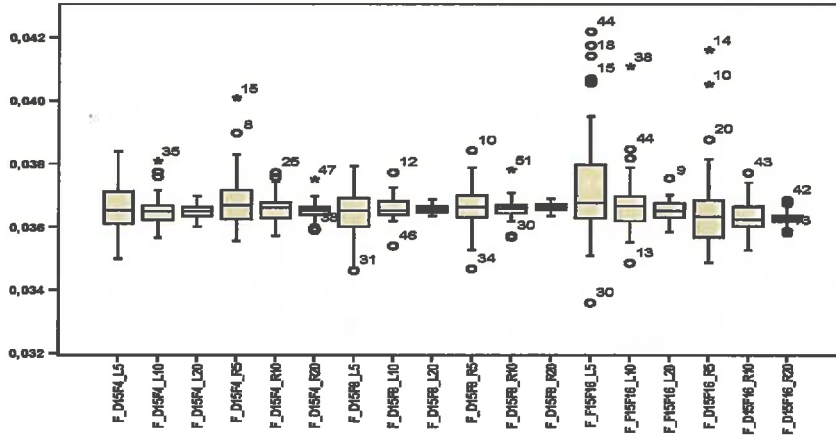
#### **+ influence de l'ouverture sur l'erreur (voir figure 11.).**

Sur la figure 11. on n'analyse que les sous-échantillonnages de 20 photos. On observe que de façon systématique, l'erreur est inférieure pour F4 que pour F8 et F16, que ce soit pour l'appareil R ou L. Qualitativement, la différence entre F8 et F16 semble peu significative, alors qu'elle semble plus significative entre F4 et F8. Cependant cette différence reste minime (largement inférieure à 0.1 [pix] pour  $D \geq 3$  m).

#### **+ influence de l'ouverture sur la focale (voir figure 12.).**

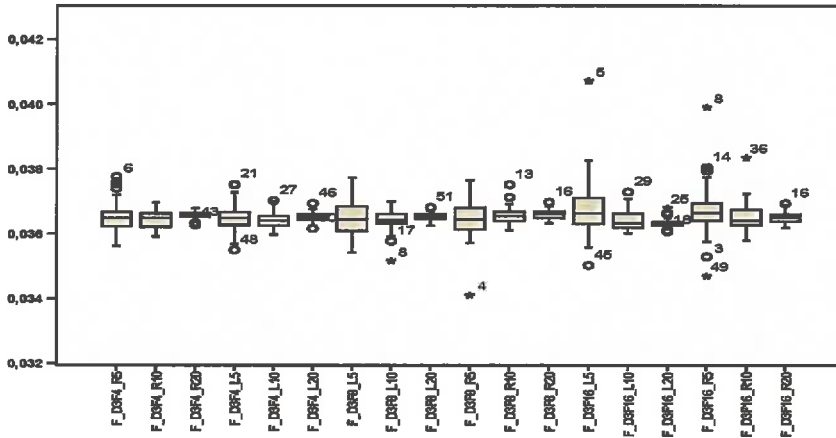
on ne note pas d'influence notable sur l'estimation de la focale. L'ouverture semble avoir une légère influence sur la dispersion : pour la distance de 1.5 m, l'écart-type est minimal pour F8. pour les distances supérieurs, l'écart-type est comparable quelque soit l'ouverture.

Comparer l'effet de changement de l'Ouverture et du nombre des photos utilisées sur variable Focale en Distance de 1.5 metre



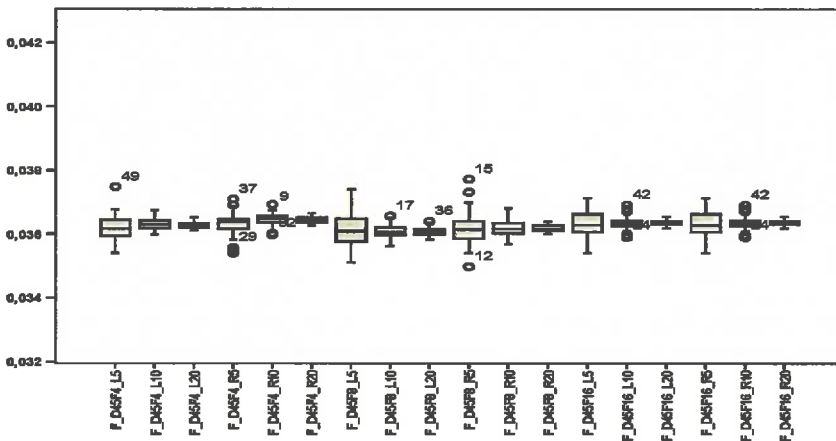
(a)

Comparer l'effet de changement de l'Ouverture et du nombre des photos utilisées sur variable Focale en Distance de 3 metre



(b)

Comparer l'effet de changement de l'Ouverture et du nombre des photos utilisées sur variable Focale en Distance de 4.5 metre



(c)

Figure 12.

## Conclusion partielle

Pendant le calibrage on prend 30 photos avec des ouvertures différentes de diaphragme et des distances différentes entre l'appareil photo et la mire.

Les ouvertures différentes sont : F4, F8, F16 et les distances entre l'appareil photo et la mire : 1.5, 3, 4.5 mètres. Avec de différents tirages appliqués dans le calibrage (5, 10,20). le size d'échantillonnage est 50 pour chaque tirage.

### Conclusion partielle :

- il faut au moins 20 photos,
- $C_y$  moins bien déterminé que  $C_x$ ,
- $S_x$  à peu près constant,  $S_y$  non estimé donc toujours constant.
- les paramètres sont peu corrélés sauf peut être  $C_y$  et focale,
- la focale est  $>$  à la focale constructeur de 35 mm ;
- influence peu marquée de l'ouverture et de la distance, mais tout de même : il semble qu'il faille une distance d'environ 3 m et une ouverture aux alentours de F8 pour avoir un ajustement le meilleur possible
- erreurs très faibles ( $< 100\mu\text{m}$  pour le positionnement réel des points de la mire.)

### Les limites :

- il faudrait refaire des calibrages en fixant maintenant  $S_x$  et  $S_y$ ;
- on n'a pas étudié l'influence de l'incertitude des paramètres sur la reconstruction 3D.

## **Chapitre 3**

# **Caractériser les possibilités de la stéréophotographie pour le suivi de différents indices de rugosité sous l'action des pluies.**

## **Introduction :**

### **1.1 Contexte general**

Le ruissellement et l'érosion (hydrique et éolienne) du sol (vent et eau) sont des menaces environnementales dans le monde et également en Iran. Pour diminuer leurs effets négatifs, il est important d'identifier le procédé de création d'écoulement et sa distribution spatiale. Lorsque le ruissellement, processus est influencé principalement par les caractéristiques de surface du sol, dont la rugosité extérieure de sol. La rugosité est un paramètre important pour comprendre les mécanismes de l'érosion de sol par l'eau et le vent.

Généralement à faible échelle, le cheminement des eaux de surface est effectué par la microtopographie de la surface du sol. De nombreux processus extérieurs reliés à l'érosion, tels que le stockage de l'eau dans les dépressions, le détachement de cisaillement par les gouttes de pluie ou par le vent, et le transport de sédiments sont des grandeurs caractéristiques qui sont évaluées au millimètre près. Ainsi il est important de caractériser finement la rugosité du sol afin de comprendre les processus de ruissellement et d'érosion.

Une large gamme de techniques de mesures a été appliquée pour mesurer la rugosité. Elle peut être classifiée dans deux groupes principaux : méthodes à contacts et sans contact. Dans les méthodes avec contacts, les dispositifs de mesures ont un contact direct avec la surface du sol. Les dispositifs les plus utilisés sont les techniques de contact (telles que le rugosimètre à aiguilles[1], la méthode de la chaîne[2, 3]), ce qui sont moins cher et plus faciles à utiliser. Récemment les techniques sans contact telles que le laser [4-7] et la photogrammétrie [8-10] ont été développées. Le scanner laser a une résolution et une précision importants (10 micron). La technique de photogrammétrie a beaucoup évolué récemment. Mais il n'y a pas beaucoup d'articles la concernant. Cependant plusieurs expériences dans le laboratoire montre que la méthode photogrammétrie donne approximativement des données justes (MNT) pour la caractérisation la surface du sol. Taconet et Ciarletti [10] ont noté que la stéréophotogrammétrie fournit des MNT qui permettent des études précises des propriétés géométriques des sols qui peuvent certainement être utile pour des études hydrauliques et d'érosion.

La microtopographie de la surface du sol peut être caractérisée par différents indices. Les profils d'altitude permettent le calcul les indices de la rugosité de la surface. Généralement ces indices sont 2D. On peut citer l'indice de la rugosité aléatoire [11], et la tortuosité [12]. Govers et al [13] et Kamporst et al [14] ont fait une bonne revue sur la rugosité de la surface du sol.



Dans ce chapitre, je présente les premiers résultats de mon travail, ce qui traite la caractérisation quantitative de la rugosité et de la tortuosité aléatoires en faible échelle sur les sols nus agricoles qui commande plusieurs des processus hydrauliques et d'érosion sur la grande échelle. Nous avons utilisé le dispositif photogrammétrique pour mesurer l'évolution de la rugosité du sol sous l'action des pluies. Plus précisément, le but de cette étude est d'analyser l'adéquation d'un système stéréophotogrammétrie pour obtenir l'estimation précise de la rugosité aléatoire à l'aide des paramètres statistiques et pour détecter les changements de la rugosité de la surface du sol suite aux précipitations. Le travail présenté dans ce rapport est basé sur un ensemble des modèles numériques du terrain (MNT) des sols nus agricoles réels obtenus par stéréophotogrammétrie.

Avant de poursuivre, je précise quelques termes qui seront largement utilisés par la suite :

**Le ruissellement** ; Il désigne en hydrologie le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'infiltration

**Rugosité** : profil microgéométrique d'une surface, le sol dans notre cas.

**MNT** ; Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (ordinateur).

## 1.2 Problématique scientifique

### 1.2.1 Mesure de la rugosité du sol

La rugosité de sol est une mesure des variations d'altitude de la surface du sol. Au cours des années dernières une vaste gamme de techniques (certaines robustes et rustiques, d'autres plus complexes) a été utilisée pour mesurer des élévations superficielles.

#### + Le profilomètre à chaîne

Une méthode simple et bon marché pour mesurer la rugosité extérieure, est la méthode à chaînes de Saleh. Cette méthode est basée sur une mesure de tortuosité. Pour une chaîne de longueur totale donnée  $L_1$  étendue le long d'un segment rectiligne à la surface du sol, la longueur apparente  $L_2$  (la projection horizontale de cette chaîne) sera d'autant plus petite que la rugosité sera importante. La tortuosité se définit comme le rapport  $L_1/L_2$ .

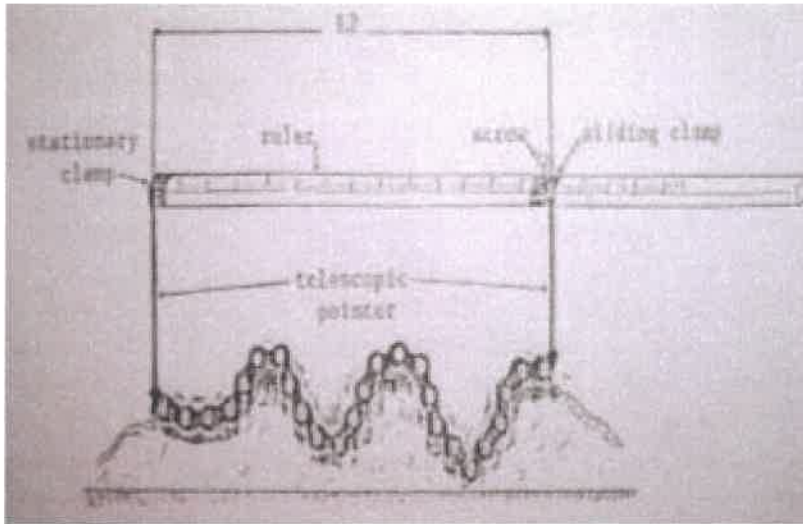


Figure 1. Les composants de la méthode à chaînes : a) chaîne de rouleau, règle d'étrier b) avec l'indicateur télescopique en tant que démontrer la méthode à chaînes [3]

La précision de cette méthode est limitée par la rigidité de la chaîne. De plus c'est une méthode avec contact (risque de détérioration de la surface du sol). Enfin c'est une méthode intégratrice : la mesure de tortuosité ne permet pas de connaître le profil de rugosité.

#### **+ le rugosimètre ou profilomètre à aiguilles**

Depuis les années 50 les rugosimètres à aiguilles sont utilisés pour mesurer la rugosité de surface du sol. Leur principe est simple : les aiguilles sont descendues et leur altitude est déterminée par lecture directe ou à l'aide d'une photographie qui peut être analysée à l'aide d'un logiciel.

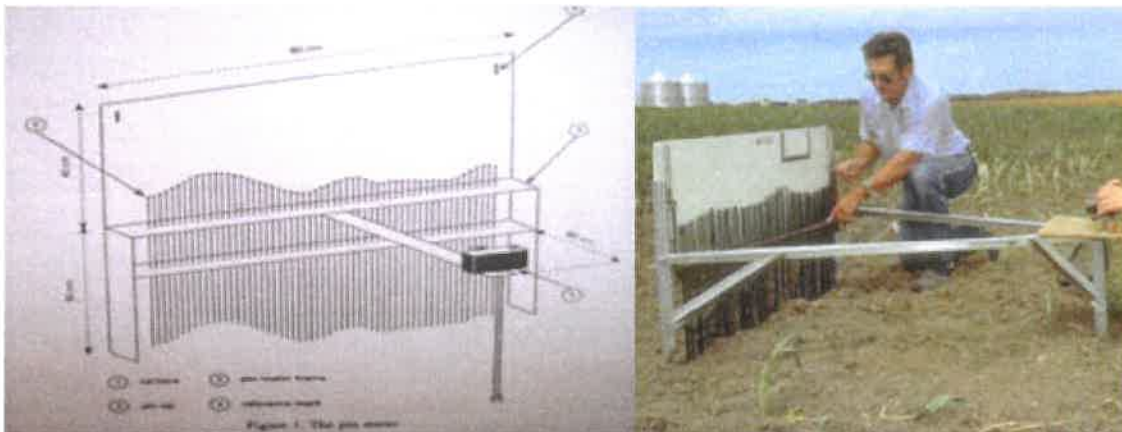


Figure 2: Mesures des profils de hauteurs de la surface du sol avec un rugosimètre à aiguilles (photo à gauche [1])

Ceci donne des informations 2D (le long d'un segment). La précision est limitée par la densité d'aiguilles et par la lecture du profil. De plus, c'est un dispositif à contact qui peut perturber la surface du sol.

#### + les rugosimètres laser

Dès la fin des années 80, les rugosimètres à laser sont apparus, ils permettent de faire les mesures plus vite souvent avec une grande précision et surtout sans contact avec le terrain étudié.



Figure 3. deux laser mètres ; à gauche pour une maquette au labo [17] en trois dimensions et à droite sur une seul transect

Les données peuvent être des profils de rugosité (poutre laser : données 2D) ou de véritables MNT (nappe laser ou laser se déplaçant selon 2 axes : données 3D).

#### + utilisation de la stéréo-photographie (ou photogrammétrie).

Une autre méthode de non contact pour mesurer la rugosité de surface du sol est la stéréophotogrammétrie. Cette méthode n'est pas encore utilisée pour des mesures à haute résolution mais le développement des appareils numériques bon marché laisse prévoir un fort développement de cette méthode. La disponibilité très récente d'algorithmes de stéréocorrélation sur le marché permet une utilisation plus facile.

Cette méthode fournit de véritables MNT de la surface du sol.

C'est cette méthode que nous allons utiliser.

#### **1.2.2 Caractérisation de la rugosité : les indices de rugosité**

La rugosité n'est pas toujours utilisée en tant que tel. Les modèles hydrologiques, par exemple, ne prennent pas en compte des profils de rugosité (ni des mini-MNT de la surface du sol) car ces profils microgéométriques qui représentent des perturbations ou des irrégularités dans la surface de sol sont généralement acquis à une échelle qui est trop fine pour être spatialisée dans une carte topographique conventionnelle. Ainsi, ces modèles utilisent des indices de rugosité basés sur l'acquisition préalable de profils de rugosité ou de mini-MNT.

Nous avons choisi dans la littérature cinq indices de rugosité :

- la rugosité aléatoire (Random Roughness RR) ;
- la tortuosité (T) ;
- la différence d'altitude limite (LD) ;
- la pente limite (LS) ;
- la dépression moyenne amont (mean upslope depression MUD) ;

+ La rugosité aléatoire RR

La rugosité aléatoire (Allmaras et autres., 1966) est calculée comme l'écart-type des lectures de taille après que les lectures de taille aient été corrigées de leur tendance à grande échelle (pente, travail du sol de type labour). La rugosité aléatoire décrit la partie aléatoire de rugosité, ou celle des agrégats aléatoirement distribués.

$$RR = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 \right)^{1/2} \geq 0$$

$Z_i$  = hauteur sur un transect en position  $i$

$n$  = nombre de points de mesure le long du profil

La rugosité aléatoire décrit seulement la gamme dans le composant vertical de la rugosité, la distribution de taille, mais n'explique pas la composante spatiale (corrélation).

+ La tortuosité T

Pour la première fois Boiffin (1984) a employé la tortuosité T. Cet indice de rugosité est le rapport entre la longueur développée d'un profil de sol ( $L_1$  : longueur réelle) et la longueur projetée horizontalement du même profil de sol ( $L_0$  : longueur apparente) :

$$T = \frac{L_1}{L_0} \geq 1.$$

La tortuosité est souvent mesurée par la méthode à chaînes (Saleh, 1993) mais peut être estimée à partir d'un rugosimètre à aiguilles ou d'un rugosimètre laser.

+ la différence d'altitude limite LD et la pente limite LS

Ces indices ont été développés pour tenir compte de l'aspect spatial de la rugosité. Si on note  $\Delta Z_h = |Z_x - Z_{x+h}|$  la moyenne des différences absolues d'altitude entre 2 points distants de  $h$ , alors Linden et Van Doren (1986) ont montré que l'on pouvait ajuster une fonction de type

$\Delta Z_h = 1 / \left( a + \frac{b}{h} \right)$  aux données expérimentales, avec  $a=1/LD$  et  $b=1/LS$ . On montre alors que :

$$\Delta Z_h \xrightarrow{h \rightarrow \infty} 1/a = LD$$
$$\left( \Delta Z_h / h \right) \xrightarrow{h \rightarrow 0} 1/b = LS$$

D'où le nom de ces indices : LS est la pente locale instantanée moyenne de la surface du sol,

LD est la moyenne de la valeur absolue de la différence d'altitude entre 2 points

« suffisamment » loin l'un de l'autre.

Le LD est lié à RR (Linden and Van Doren, 1986). En effet, le RR correspond à la racine carrée du plateau du variogramme calculé à partir des altitudes de la surface du sol (Isaaks et Srivastava, 1989). LS n'est pas la pente de la surface, mais il est la pente du variogramme à l'origine. En même temps que LD il détermine la forme du variogramme. Linden et Van Doren

supposent qu'il est de forme hyperbolique. LS et RR sont indépendants (Linden et Van Doren, 1986). Bertuzzi et al. (1990b) ont déclaré que LS et T sont dépendants à courte distance. Les différents indices sont donnés dans le tableau 3-1.

Table 3-1

$T_B$	$T_B = L_1/L_0 \dagger$	Boiffin (1984)
$T_P$	$T_P = (L_1 - L_0)/L_0 = T_B - 1$	Planchon et al. (1998)
$T_B$ in 3D	$T_B = TSA / TMA$ TSA = total surface area; TMA = total map area	Helming et al. (1992, 1993)
$T_S, T_A$	$T_S = T_A = 100 (L_1 - L_0)/L_1 = 100 (1 - 1/T_B)$ $LD = 1/a; LS = 1/b$	Auerswald (1992); Morgat et al. (1998); Saleh (1993)
LD and LS	a, b = regression parameters in $1/\Delta Z_h = a + b(1/h)$ : $\Delta Z_h$ = first-order variance; h = lag	Linden and Van Doren (1986)

+ la dépression moyenne amont MUD

La dépression upslope moyenne (MUD) a été le premier index développé pour prévoir la détention maximum superficiel (Maximal Depresionnal Storage MDS, Hansen et al. 1999). En effet d'un point de vue hydrologique, la variable d'intérêt n'est pas la rugosité du sol mais la capacité du sol à stocker de l'eau à sa surface avant le déclenchement généralisé du ruissellement de surface.

La façon de calculée l'indice MUD est donnée de façon synthétique dans le tableau 3-2.

Table 3-2

	$MUD = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta Z / (n-1)$		
MUD	$\Delta Z = Z_0 - Z_i$ for $Z_i < Z_0$ ; $Z_i$ = height reading on sub segment; $Z_0$ = reference point on sub segment; m = number of sub segments per transect; n = number of height readings per sub segment	$\Delta Z = 0$ for $Z_i \geq Z_0$	Hansen et al. (1999)

Sur un segment, un sous segment est choisi. Le point le plus aval est le point de référence d'altitude  $Z_0$ . On calcule la moyenne des différences d'altitude entre le point de référence et les points amont le long du sous-segment. Le sous-segment est alors déplacé d'un point en amont et la procédure est répétée. L'indice MUD MUD est la valeur moyenne sur tous les sous-segments des moyennes précédentes. Hansen et al. (1999) ne donnent aucune directive pour décider de la longueur de sous-segment mais ils ont conclu qu'une longueur de 30 centimètres est la meilleure pour leurs données expérimentales.

MUD dépend de la rugosité et de la pente moyenne. Ainsi, un modèle pour prévoir MDS aura besoin seulement MUD comme entrée, et pas d'une combinaison d'un index de rugosité et d'une pente.

### 1.3 Objectifs du travail

\_ On veut étudier dans un premier temps la sensibilité des indices à la méthode de mesure (rugosimètre laser 2D ou stéréophotographie 3D).

\_ Dans un second temps on va voir la sensibilité des indices pour décrire l'évolution de la rugosité sous l'action des pluies.

## 2. Matériel et Méthode :

### 2.1 Travail du sol:

Les essais ont été réalisés sur le domaine INRA. Le champ est cultivé en blé. La culture a été broyée et laissée à la surface du sol. Le sol a été tout d'abord travaillé à la charrue à soc jusqu'à environ 30 cm de profondeur. Ensuite, le sol a été repris par un travail superficiel grâce au passage d'une herse rotative suivie d'un tassement du sol avec un cultipacker. Ceci nous a permis d'obtenir un état de surface relativement homogène et lisse, représentatif d'un lit de semences pour céréales.

Nous avons ensuite délimité une surface de 1m x 1m que nous avons suivi. Nous avons enfoncé aux quatre coins de cette placette des tiges métalliques jusqu'à 50 cm de profondeur. Sur ces tiges, nous avons fixé un cadre métallique carré contenant des points de repère positionnés précisément. Ceci afin de nous permettre de :

- repositionner nos photos d'une date à l'autre ;
- d'essayer de déterminer l'effet de tassement du sol sous l'action des pluies de l'effet de dégradation de l'état de surface.

### 2.2 Arrosage ou simulation de pluie

Pour des raisons pratiques, nous avons apporté de l'eau en utilisant des buses d'arrosage pour des systèmes d'irrigation destinés particuliers. Nous avons utilisé 4 buses RainBird à secteur variable VAN8 positionnées aux 4 coins d'un carré de 1.80 m de côté et arrosant en ¼ de cercle. Ces buses étaient fixées sur un tuyau en PEHD et étaient alimentées par un groupe surpresseur utilisant une pompe de type JETLY MONO102. Un régulateur de pression et un filtre 200 µm étaient positionnés sur le circuit. La pression était régulée à 1.7 bars.

L'homogénéité du dispositif a été testée préalablement à l'installation dans les mêmes configurations.

Lors des expérimentations, la quantité d'eau apportée par arrosage était contrôlée par 8 petits pluviomètres situés au ras du sol juste à l'extérieur de la placette. Connaissant la répartition spatiale de l'arrosage grâce à l'étalonnage préalable du dispositif d'apport d'eau, nous avons pu établir la relation entre la quantité d'eau moyenne mesurée par les pluviomètres à l'extérieur de la placette et la quantité d'eau effectivement apportée sur la placette :

$$y = 0.8254x^2 - 27.645x + 250.59$$

$$R^2 = 0.9583$$

Nous avons imposés 3 pluies d'intensité moyenne sur la placette de 80, 100 et 100 mm h<sup>-1</sup>. De plus, deux pluies naturelles ont eu lieu entre les arrosages. La chronologie des apports d'eau, naturels ou provoqués, ainsi que les séquences de mesures sont données sur la figure 4.

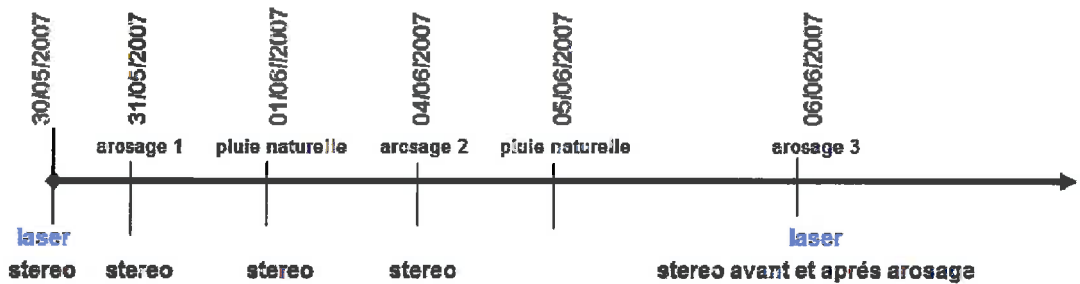


Figure 4. La chronologie des apports d'eau, naturels ou provoqués

## 2.3 Mesure de la rugosité

### 2.3.1 Laser

Le rugosimètre laser de l'INRA (Bertuzzi et al, 1988) a été utilisé pour acquérir des profils de rugosité. Du fait de la lourdeur expérimentale et de la difficulté de positionner très précisément le laser, nous avons acquis des profils de rugosité espacés de 10 cm, des repères sur le cadre métallique positionné à la surface de la placette permettant de positionner le laser à + ou - 1 mm. Nous avons réalisés 11 transects avant le début des arrosages (ce qui définit l'état initial, 2 passages sur chaque transect) et 11 transects après la fin des arrosages (ce qui définit l'état final).

Le laser se déplace sur une poutre rigide (voir figure 6) et les mesures sont enregistrées tous les mm. La résolution verticale est sub-millimétrique, mais la précision est dépendante de l'étalonnage. De façon empirique, on peut définir une précision verticale d'environ 0.5 à 1 mm.

Le rugosimètre a été fabriqué à l'Inra d'Avignon il y a une vingtaine d'années, en collaboration avec le LCPC. Il est équipé de deux lentilles avec les différents focales : 50 et 100 m. Ces lentilles sont adaptées à des distance sol-laser et à des étendues de mesure différentes. Pour une faible (respec. forte) rugosité, il faut placer le laser « proche » du sol (respec. éloigné du sol) et utiliser la lentille 50 mm (respec. 100 mm).

Le pilotage du laser se fait grâce à deux logiciels développés sous LabView, un logiciel pour l'étalonnage et un logiciel pour les mesures (voir figure 5).

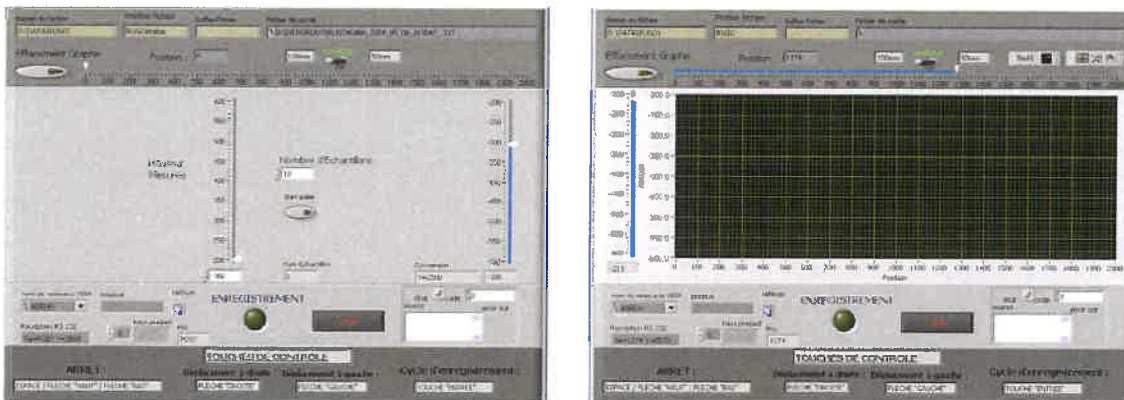


Figure 5 : interface utilisateur des logiciels utilisés pour l'étalonnage du rugosimètre laser (à Gauche) et pour le pilotage sur le terrain (à Droite).

Pour étalonnage le laser on utilise un laser simple une fois avec la lentille de 50 mm et une fois avec la lentille de 100mm. Nous plaçons une cible à des distances différentes du laser (voir figure 6) . Pour chaque distance, nous effectuons 40 mesures (estimation de la dispersion et du bruit expérimental). Nous avons utilisé comme cible un agrégat de sol. En effet, des essais préliminaires ont montré que le rugosimètre pouvait donner des données aberrantes en fonction de la texture de la cible (métal, PVC, scotch, bois, ...) et de sa couleur. Nous avons donc décidé d'utiliser une cible proche de notre objet d'étude, à savoir deux agrégats de sol collés sur un support et dont l'un était humecté (« couleur sombre ») alors que l'autre était sec (« couleur claire »). La distance laser-cible était mesurée avec un réglet gradué au 1/2 mm. La gamme de mesure pour la lentille 50 mm (respec. 100 mm) s'étend entre H=180 mm et H=380 mm (respec. H=340 mm et H=640 mm) où H est la distance laser-sol (voir figure8).

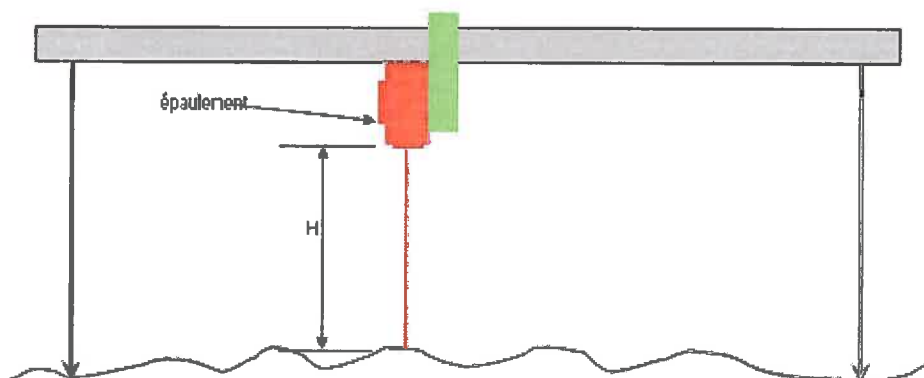


Figure 6 : schéma de principe pour l'étalonnage du laser. La distance H est mesurée avec un réglet métallique gradué au 1/2 mm. La gamme de mesure est fonction de la lentille.

### 2.3.2 Stéréo-photographie

En stéréo-photographie, le MNT est reconstitué par triangulation à partir des couples de points homologues identifiés sur deux photos (numériques dans notre cas) de la même vue prises par 2 caméras dirigées verticalement vers le sol mais légèrement écartées l'une de l'autre sur un même plan horizontal.



Un support permettant la mise en place des appareils photos et leur stabilité a été réalisé à l'INRA (voir figure7.). Ce support est relativement insensible au vent, il permet un réglage en hauteur (en fonction de la focale des objectifs photographiques choisis) et également le réglage de l'écartement des appareils photos. Enfin, on peut basculer le mât principal en position arrière pour éviter des effets d'interception/redistribution des pluies naturelles.



*figure7. Le support de la mise en place des appareils photos et leur stabilité, qui a été réalisé à l'INRA*

Le chapitre précédent a permis de définir des conditions d'étalonnage des caméras optimales. Nous avons utilisé ces résultats pour définir notre stratégie de calibrage du dispositif stéréo-photographique : utilisation de 30 photos, ouverture proche de F8, distance d'environ 3m.

Nous avons pris des photos entre chaque arrosage et entre chaque pluie naturelle, soit en tout 5 instants de mesure (voir figure 4 avec la chronologie des mesures). Ceci nous a permis de reconstituer 5 MNT.

### **2.3.3 Comparaison laser-stéréo**

Nous avons comparé les données acquises avec le rugosimètre laser et avec la méthode stéréo-photographique selon 2 axes :

- d'une part, nous avons comparés les profils de rugosité obtenus sur les transects mesurés avec le rugosimètre laser pour les états initiaux et finaux. La difficulté est que les MNT obtenus par stéréo ne sont pas sur une grille régulière, alors que les points de mesure laser sont espacés de 1 mm. De plus, le positionnement du laser est à  $\pm 1$  mm, et il est difficile d'extraire du MNT obtenu par stéréo le segment exact mesuré par le laser. Cette comparaison est donc plus qualitative que quantitative. Par manque de temps, cela n'a pas pu être réalisé ;
- d'autre part nous avons calculé les différents indices de rugosité avec les 2 méthodes et nous les avons comparés.

### 3. Résultats

#### 3.1 – Etalonnage du rugosimètre laser

Les courbes obtenues pour l'étalonnage sont données figure 8.

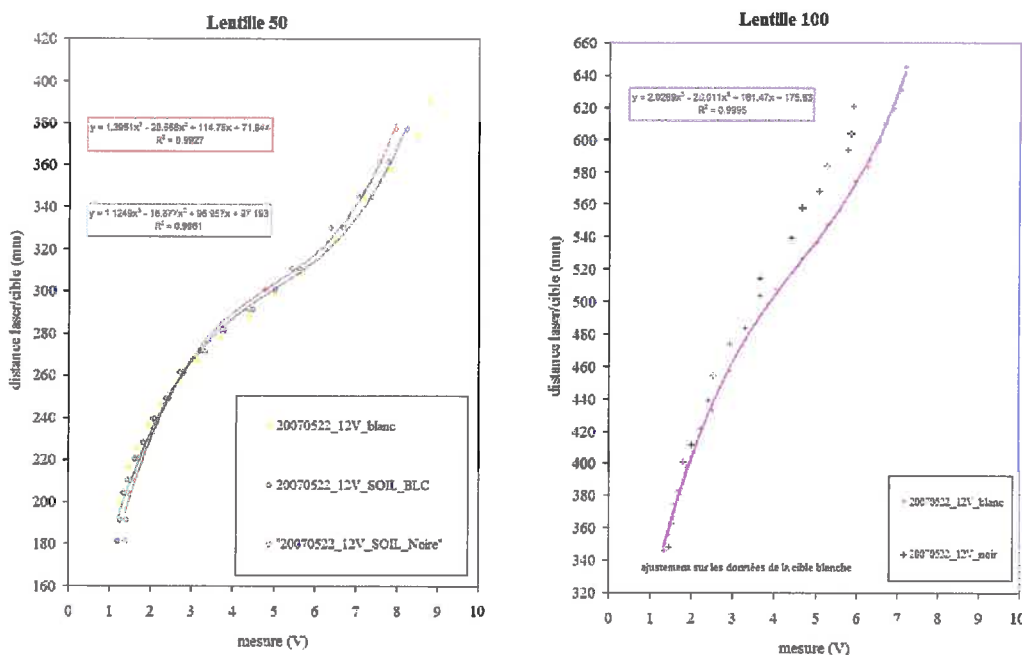


Figure 8.

L'écart-type obtenu pour la surface sombre (« noire » sur la figure) est légèrement supérieur à celui de la surface claire (« blanche »). C'est lié à la proportion bruit/signal, qui est plus élevée lorsque la surface est sombre. D'ailleurs, dans une certaine gamme de luminosité ce capteur compense automatiquement cet effet, en ajustant l'intensité de la lumière émise en fonction de la clarté de la surface. Pour changer de gamme on peut faire un réglage manuel. D'après mes informations, ce rugosimètre laser est le seul à intégrer cette fonctionnalité.

Après l'étalonnage on a remarqué que la couleur a une influence claire sur les hauteurs mesurées. Ceci n'était pas le cas lors des étalonnages précédents, ce qui traduirait peut être un vieillissement de l'électronique de ce rugosimètre laser. L'appareil laser à défocalisation, fondé sur des mesures de variation d'intensité, était sensible à la couleur, ce qui induisait une erreur

systematique. Le capteur à front d'ondes (rugosimètre laser 3D utilisé en laboratoire par E. Kamporsth (INRA de Laon, figure 3.), fondé sur un principe strictement géométrique, n'est en théorie pas sensible à la couleur, car la courbure du front d'ondes est indépendante de celle-ci.

Sur le terrain, il est impossible de choisir entre un étalonnage sur surfaces claires et celui sur surfaces sombres. De plus, selon l'état d'humidité et les conditions atmosphériques, la surface du sol peut être claire, sombre, ou hétérogène. Nous avons choisi l'étalonnage suivant pour traiter les données de rugosimétrie laser :

$$y = 2.0269x^3 - 28.011x^2 + 161.47x + 175.83$$

$$R^2 = 0.995$$

### 3.2 Mesure des profils par rugosimétrie laser (état initial et final)

Dans la figure 9 l'état initial en rouge et l'état final en bleu pour un profil a été montré. Le changement est évident. Les petites dépressions ont disparues et les sommets sont dégradés. Éventuellement due à l'érosion, certaines dépressions sont remplies par l'effet de sédimentation.

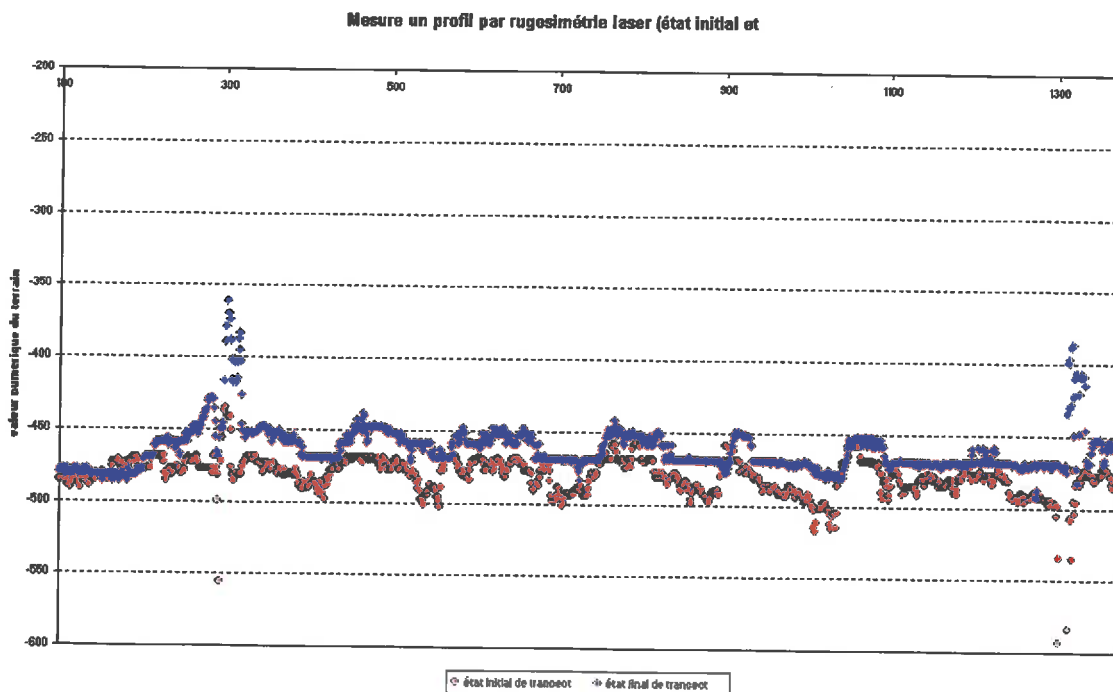


Figure9. Mesure un profil par rugosimétrie laser (état initial et final)

### 3.3 Obtention des MNT par stéréo-photographie



Figure 10. État initial de la surface du sol (droit), MNT obtenu par stéréo-photographie (gauche).



Figure 11. État final de la surface du sol (droit), MNT obtenu par stéréo-photographie (gauche).

Avant et après chaque pluie les MNTs de la surface du sol ont été obtenus par la méthode stéréo-photographique. Il est bien évidant (voir figures 10 et 11), les arrosages et les pluies ont un effet très important sur la surface du sol. On peut voir la déformation de la surface du sol sous l'effet de l'arrosage. A cause de l'érosion les croûtes sédimentaires ont été apparues dans les dépressions. Dan figure 9, l'état initial a été présenté. Le MNT obtenu à la première vue a une bonne correspondance avec l'image de la surface du sol. Pour l'état final il est difficile à déterminer la qualité du MNT. Pour connaître la qualité du MNT il faut les comparer avec la méthode de référence c'est-à-dire la rugosimètre laser. Les profils obtenue par laser doivent être comparer avec la même profile dans les MNT de stéréo.

**Mais à cause du manque de temps je ne suis pas arrivée à le faire.**

### **3.4 Les indices de rugosité**

Les indices utilisés sont : indice de la rugosité aléatoire (RR) et tortuosité (T) ont été choisis.

La façon de calculer de ces indices a été expliquée dans la partie 1.2.2 du chapitre 3.

J'ai programmé sur HALCON à trouver ces indices sur les profils de MNT en deux sens X et Y.

### **4. Conclusions :**

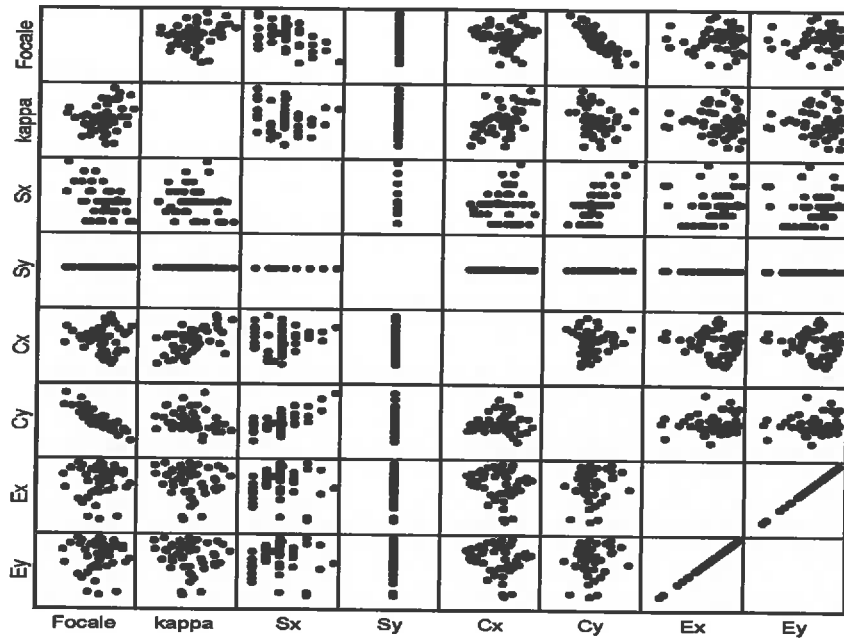
Par manque de temps, on n'est pas arrivé à obtenir les indices. De toute façon si j'ai fini l'analyse des différents indices de la rugosité je les présenterai dans ma présentation le jour de soutenance.

## Bibliographies:

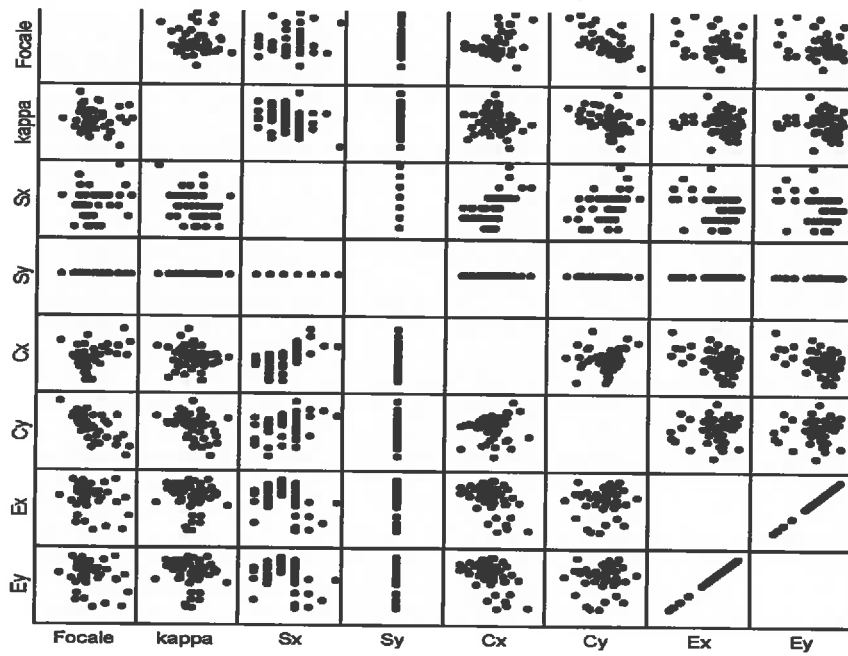
1. Cremers, N.H.D.T., et al., *Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modeling*. Hydrol. Process. 1996 , . 10 p. 1035–1047.
2. Saleh, A., *Soil Roughness Measurement - Chain Method*. Journal of Soil and Water Conservation, 1993. **48**(6): p. 527-529.
3. Saleh, A., *Measuring and predicting ridge-orientation effect on soil surface roughness*. Soil Sci. Soc. Am, 1994. **58**: p. 1228-1230.
4. Huang, C. and B. J.M., *Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography*. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992. **56**: p. 14-21.
5. Huang, C., et al., *A noncontact laser system for measuring soil surface topography*. Soil Sci. Soc. Am, 1988. **52**: p. 350-355.
6. Darboux, F. and C. Huang, *An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography*. Soil Science Society of America Journal, 2003. **67**(1): p. 92-99.
7. Bertuzzi, P. and S. P. *Measuring effects of tillage implements on soil surface geometry with a laser reliefmeter*. in *Proc. 11th Int. Soil and Tillage Res. Organization*. 1988. Edinburgh.
8. Clegg, Z., P.J. Farres, and J.W. Poesen, *Soil surface drip point features: an integrated approach using analytical photogrammetry and soil micromorphology*. Catena, 1999. **35**(2-4): p. 303-316.
9. Kirby, R.P., *Measurement of surface roughness in desert terrain by close range photogrammetry*. Photogrammetric record, 1991. **13**: p. 855-875.
10. Taconet, O. and V. Ciarletti, *Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry*. Soil and Tillage Research, 2007. **93**(1): p. 64-76.
11. Allmaras, R.R., et al., *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influence by tillage*. USDA Conservation Research Report, 1966. 7(1-14).
12. BOIFFIN, J. and P. F., *Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré: II - Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles*. Agronomie, 1988( 8 n° 9): p. 745-756.
13. Govers, G., I. Takken, and K. Helming, *Soil roughness and overland flow*. Agronomie, 2000. **20**(2): p. 131-146.
14. Kamphorst, E.C., et al., *Predicting depression storage from soil surface roughness*. Soil Science Society of America Journal, 2000. **64**(5): p. 1749-1758.
15. Kamphorst, E.C., *Mesures et méthodes d'estimation de la capacité de stockage d'eau dans le micro-relief créé par les opérations de travail du sol*. mai, 2000, 'Institut National Agronomique Paris-Grignon. p. 158.
16. Hairsine, P.B., M. C.J., and R. C.W., *Recent developments regarding the influence of soil surface characteristics on overland flow and erosion*. Aust. J. Soil Res. , 1992. **30**: p. 249-64.
17. Kamphorst, E.C. and Y. Duval, *Validation of a numerical method to quantify depression storage by direct measurements on moulded surfaces*. CATENA, 2001. **43**(1): p. 1-14.
18. Mezin, Gerad, *vision par ordinateur*, 1988.

# Annexe 1

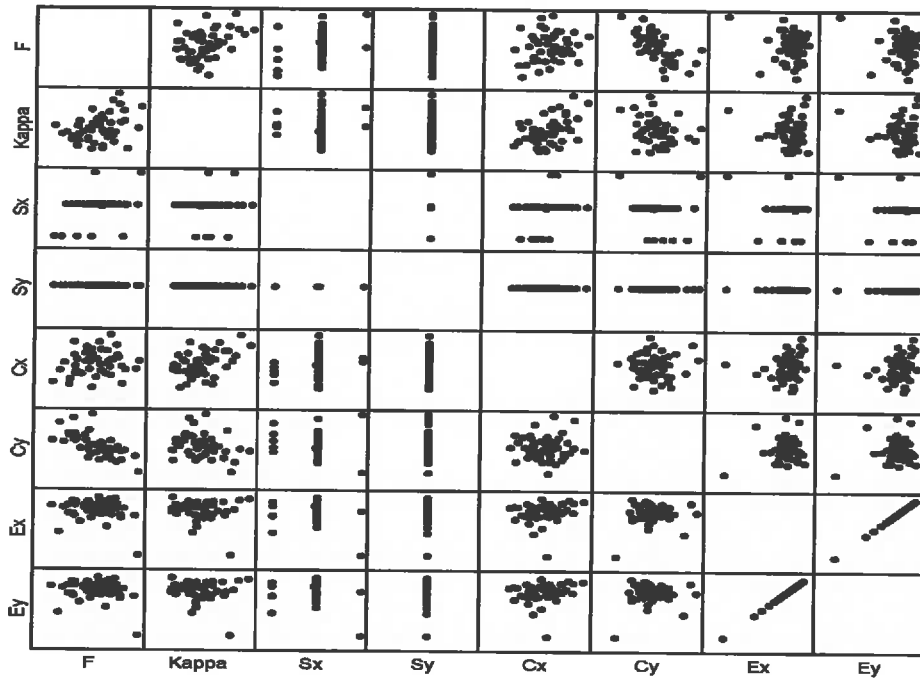
Matrice des Paramètres Intrinseque; l'échantillon:D1.5F8\_L5



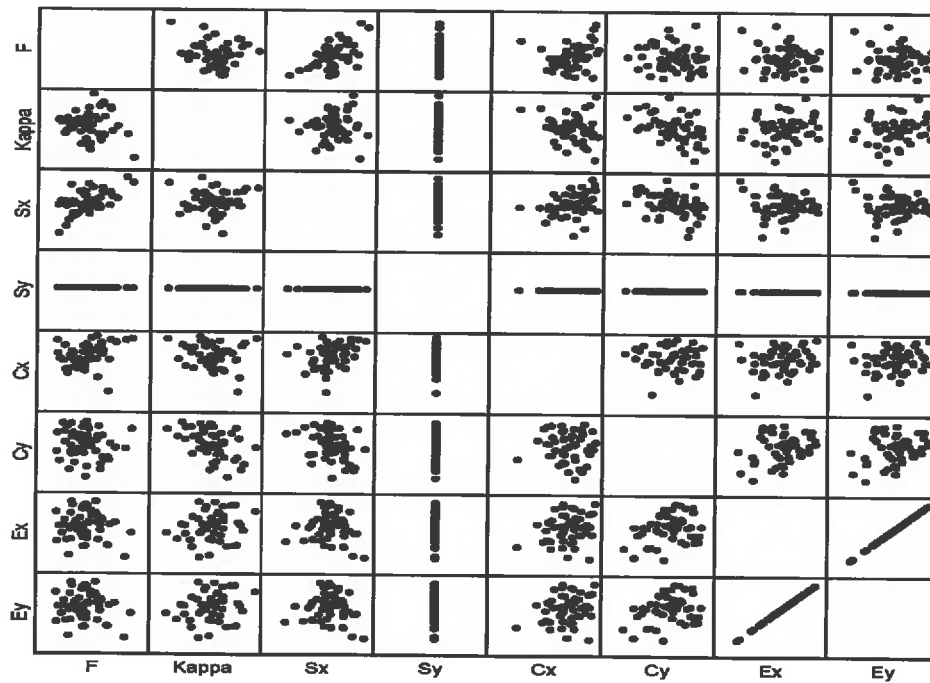
Matrice des Paramètres Intrinseque; l'échantillon:D1.5F16\_L5



Matrice des Paramètres Intrinseque; l'échantillon:D15F4\_L20



Matrice des Paramètres Intrinseque; l'échantillon:D45F4\_L20

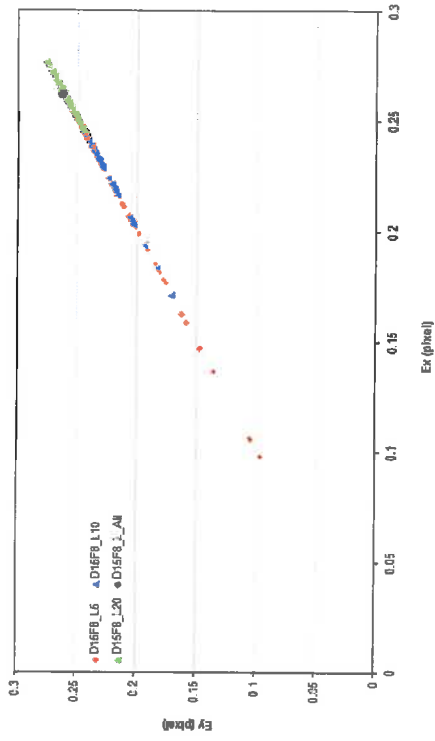




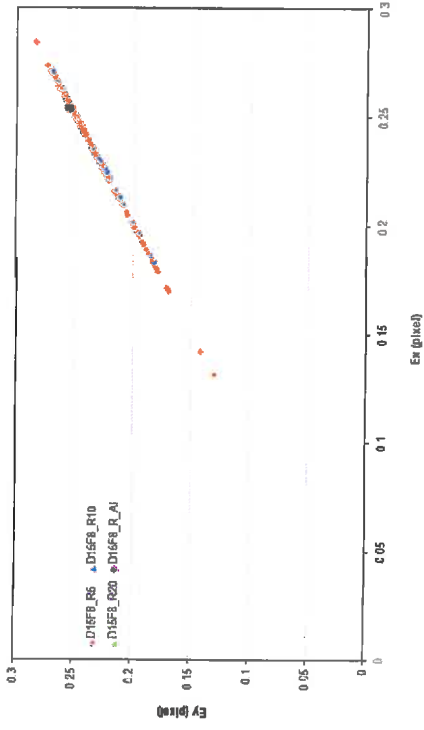
## Annexe 2

### 1. Les Erreurs :

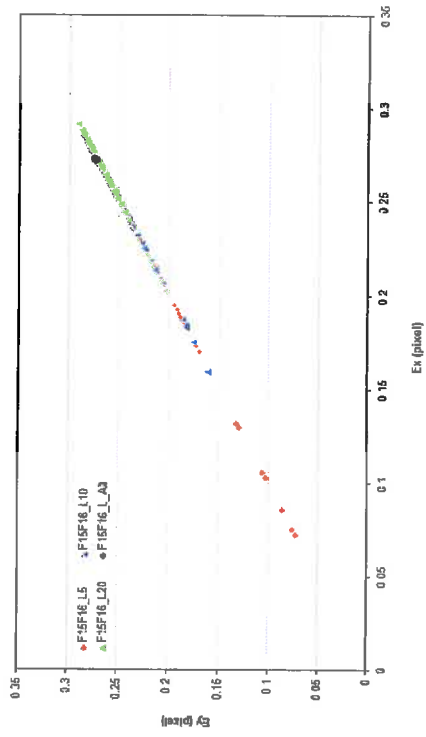
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



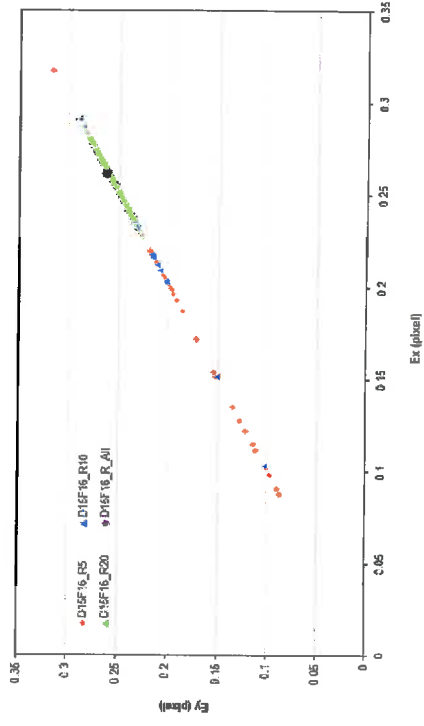
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y

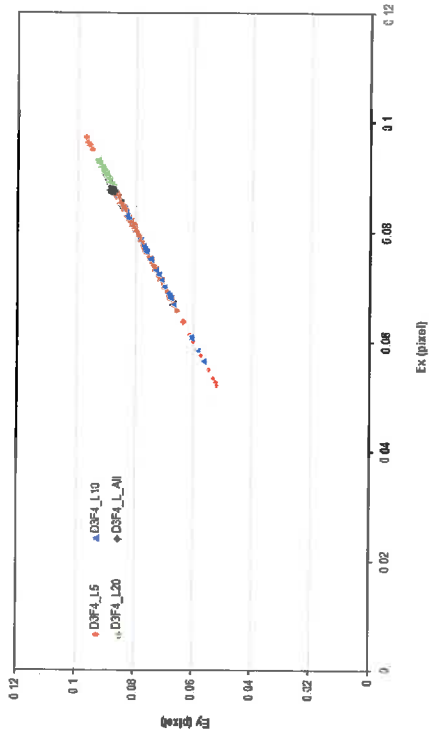


L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y

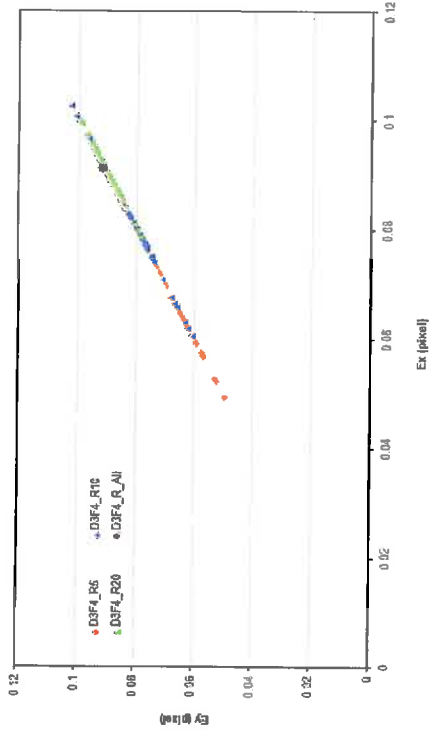


# D3F16

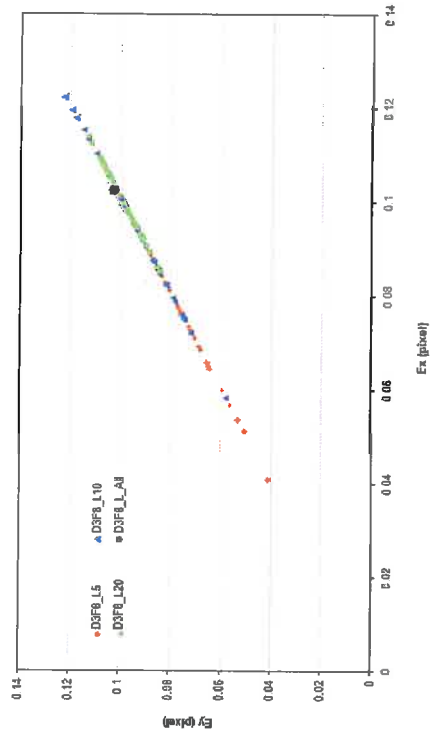
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



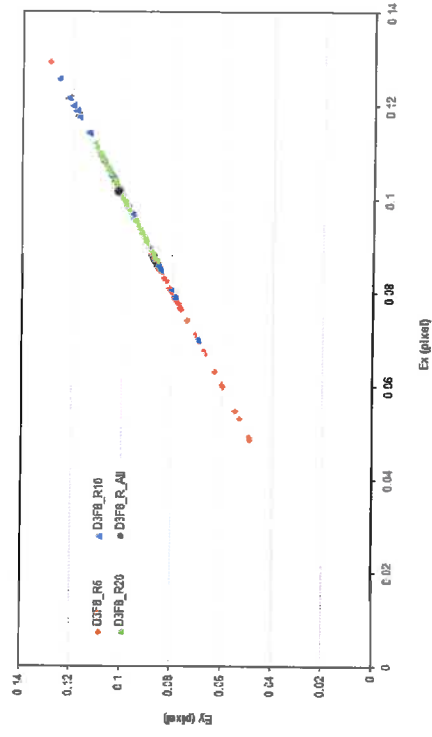
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



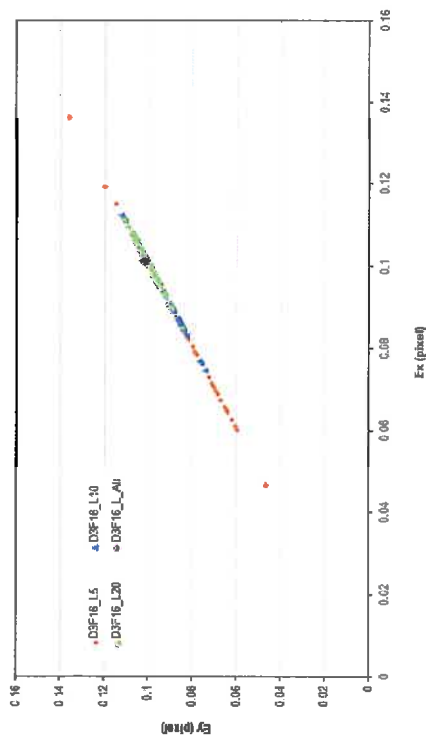
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



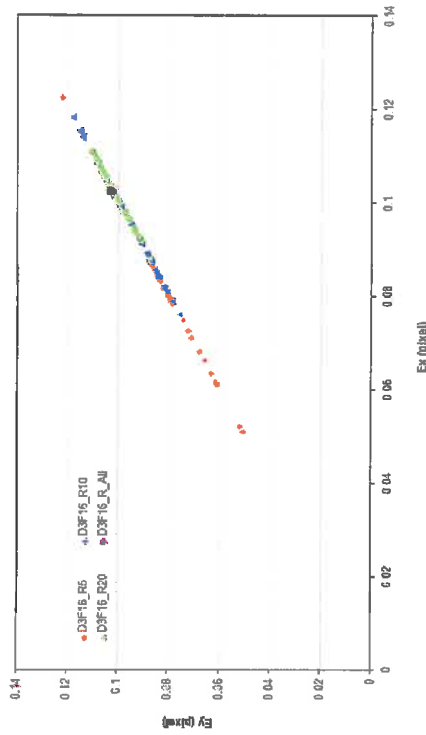
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axe X et Y

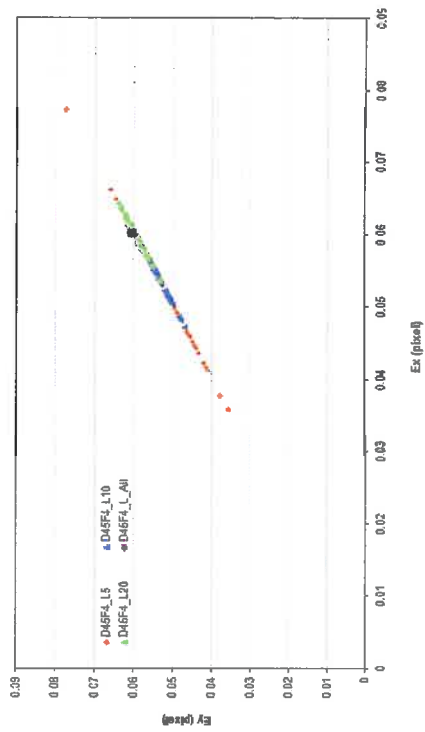


L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axe X et Y

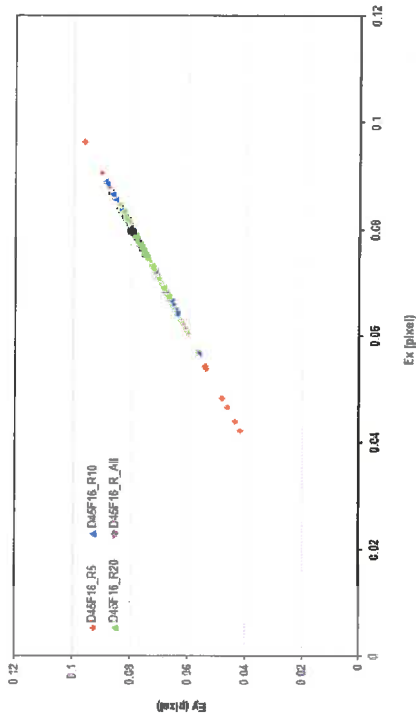


### D45

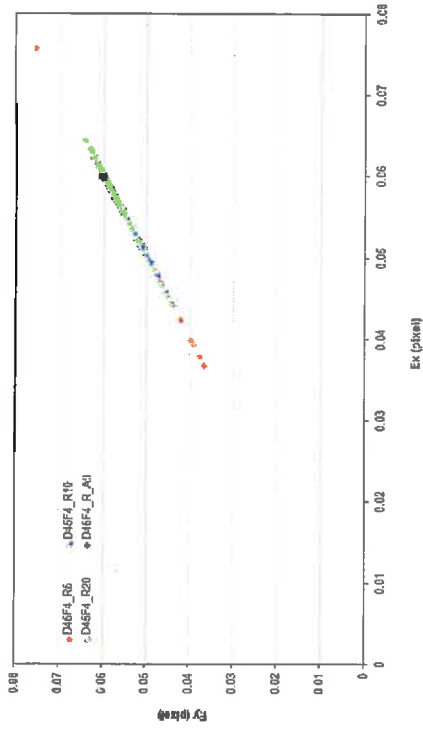
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axe X et Y



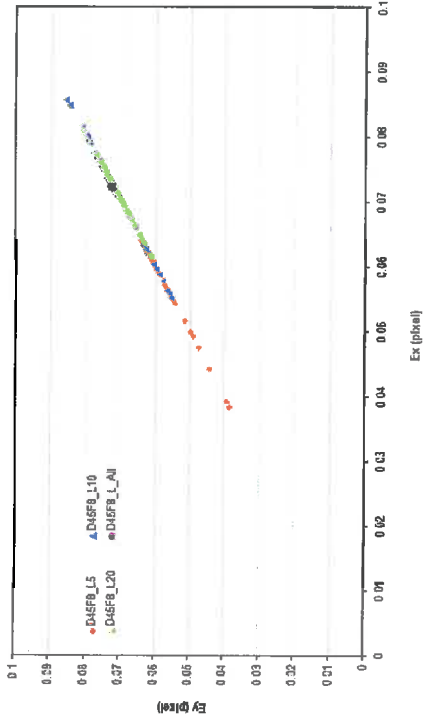
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axe X et Y



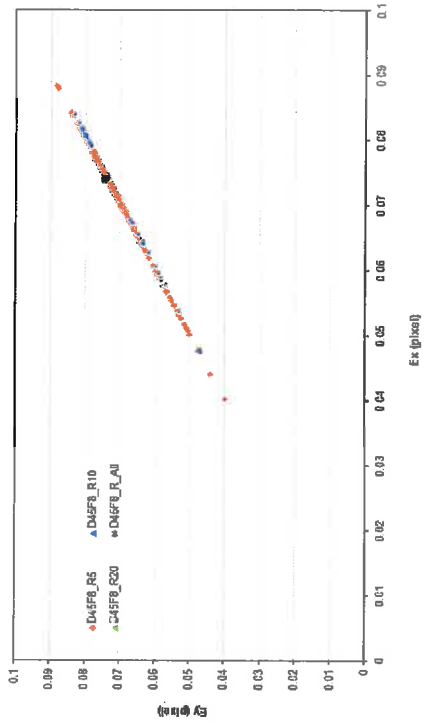
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



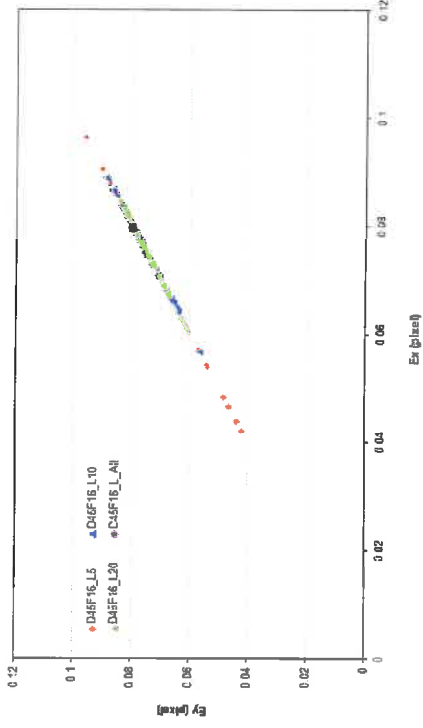
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y



L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y

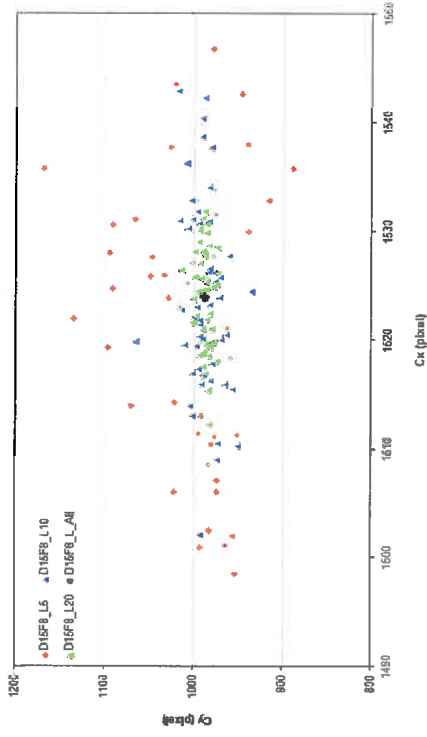


L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation moyenne dans l'axes X et Y

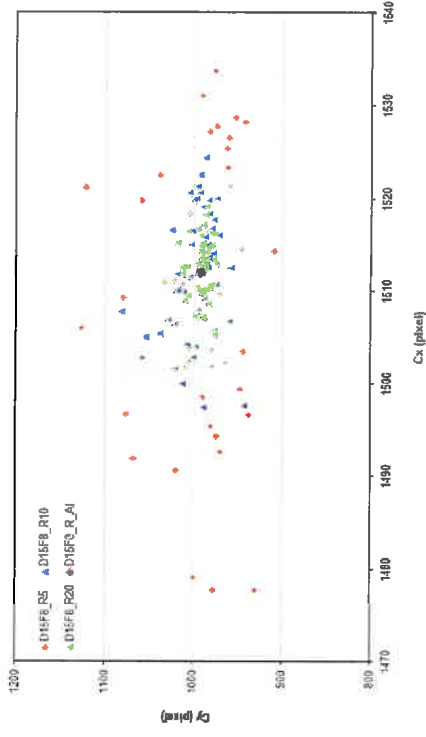


## 2. Centre d'image

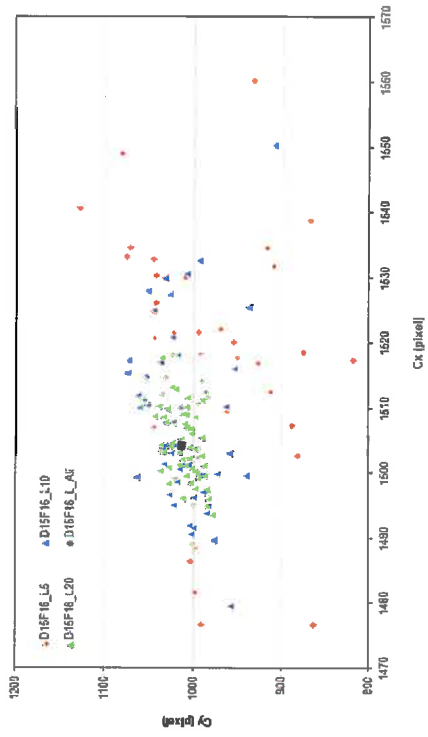
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur les Déviations dans l'axe X et Y



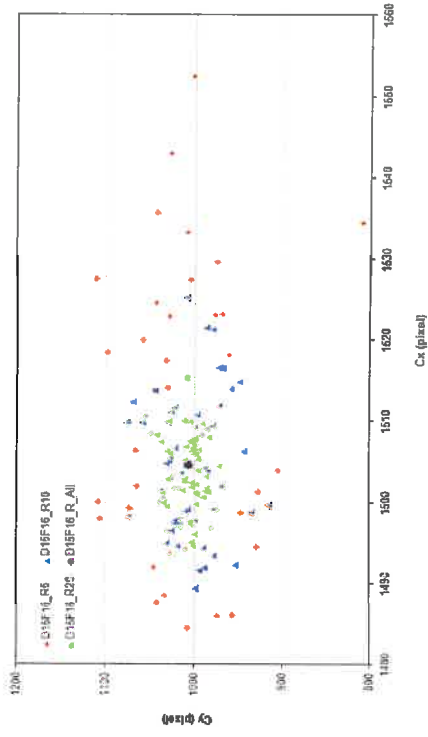
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur les Déviations dans l'axe X et Y



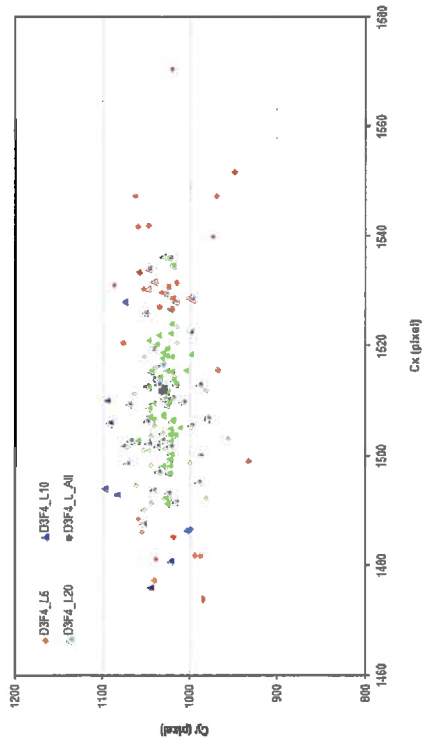
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur les Déviations dans l'axe X et Y



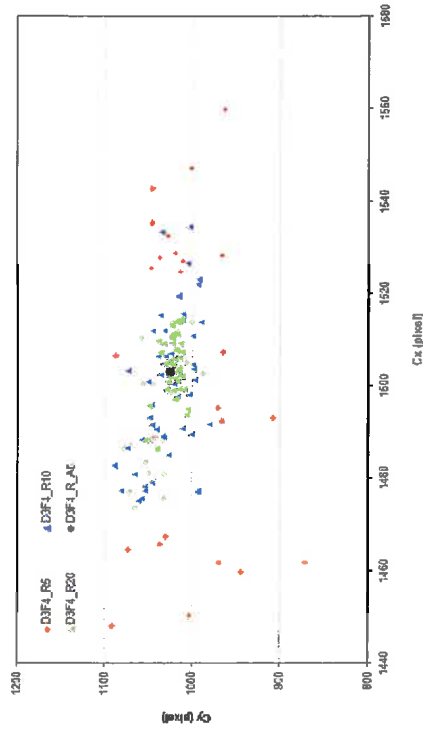
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur les Déviations dans l'axe X et Y



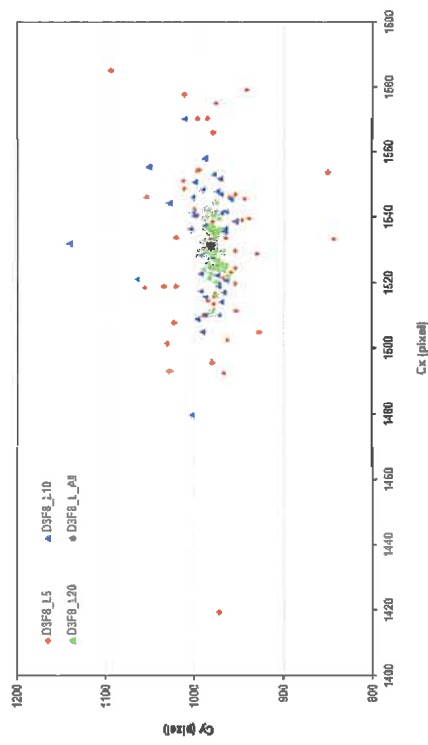
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



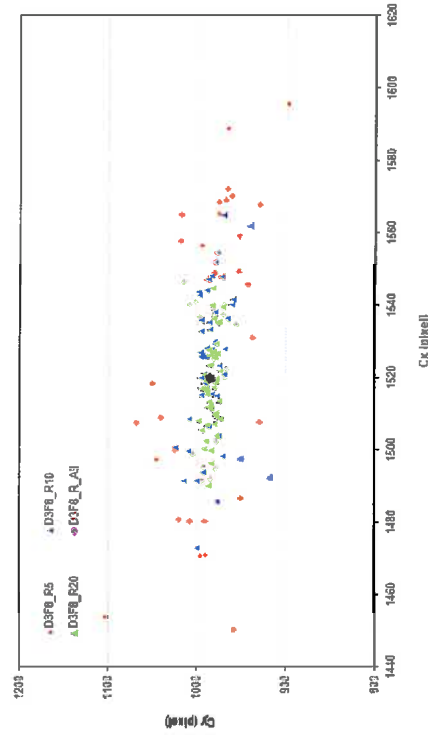
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la position du centre optique



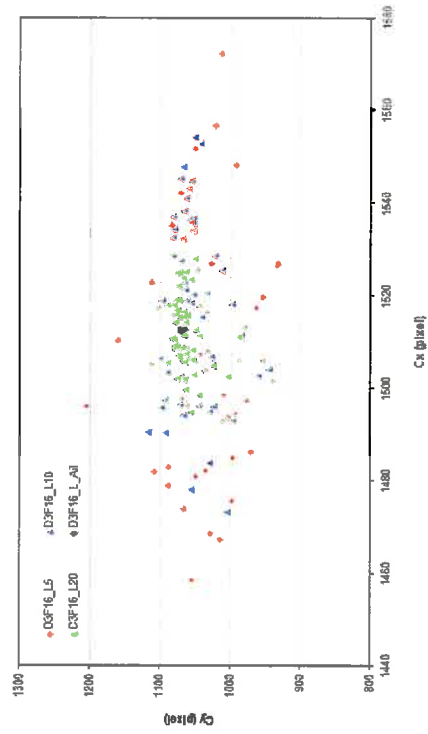
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



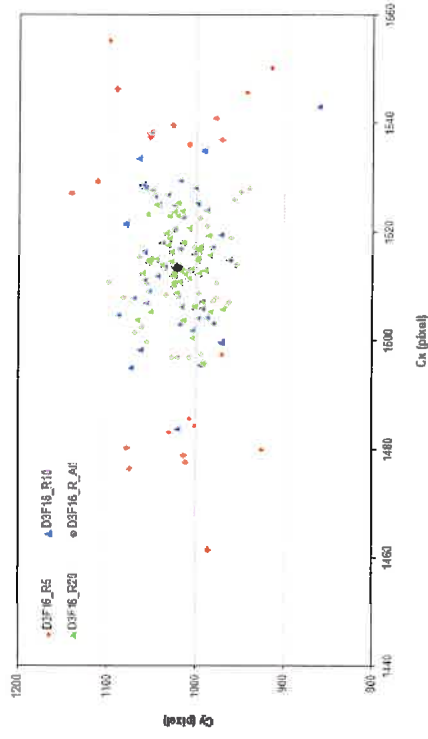
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



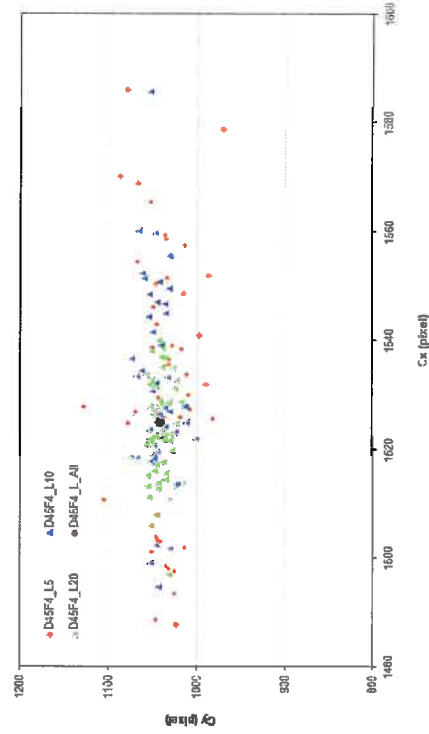
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



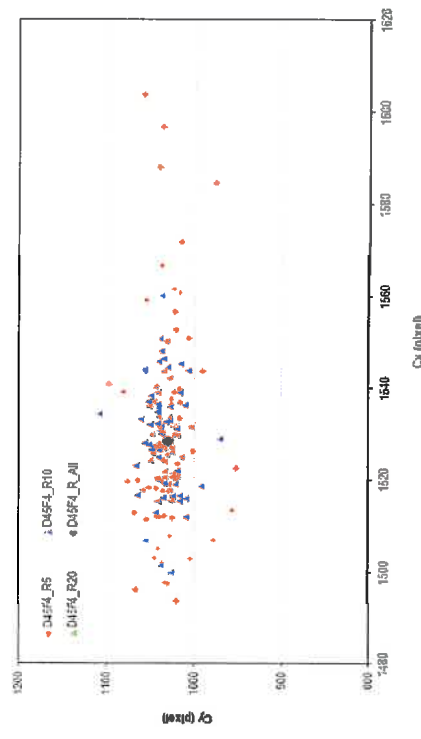
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



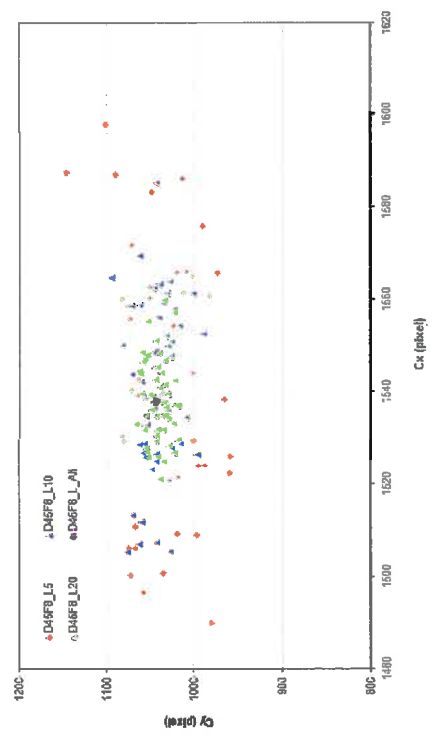
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



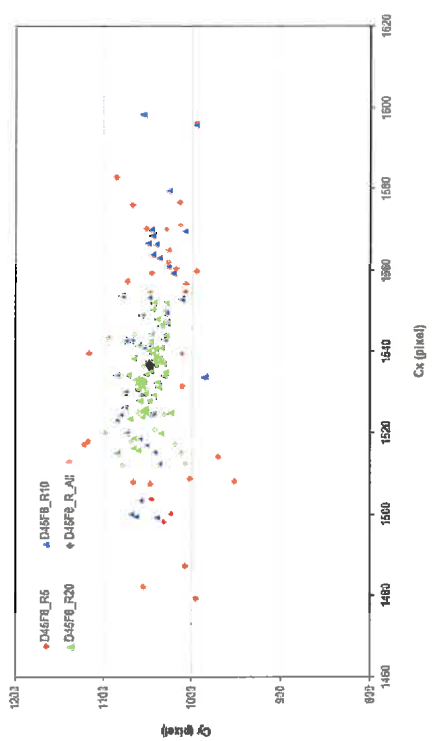
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviations dans l'axe X et Y



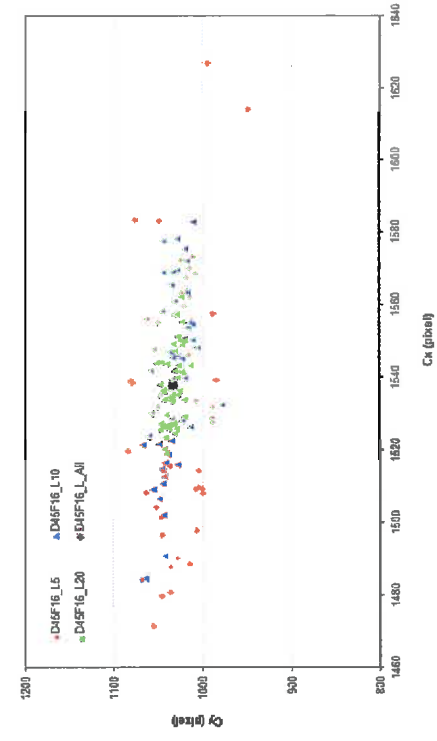
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation dans l'axe X et Y



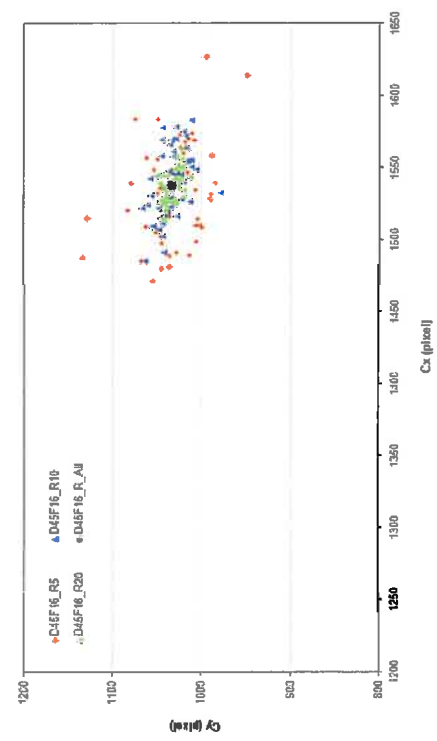
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation dans l'axe X et Y



L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation dans l'axe X et Y



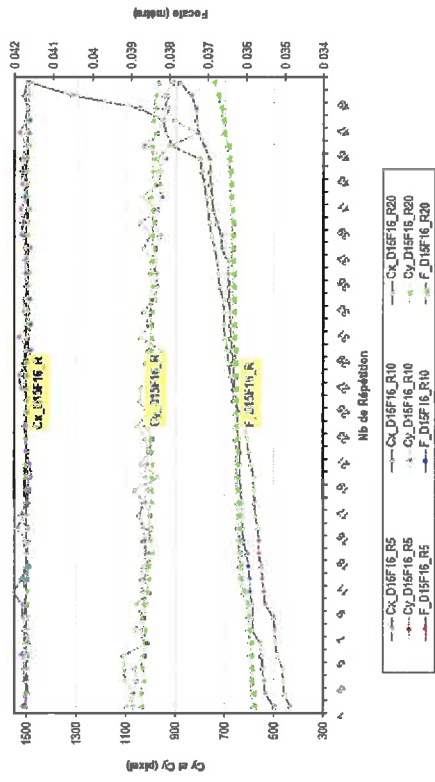
L'effet du nombre des photos utilisées pour la Calibration sur la Déviation dans l'axe X et Y



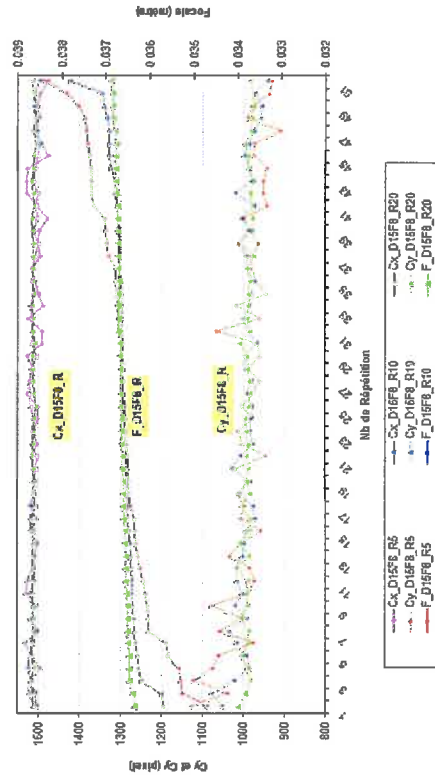


### 3. Relation entre focale et $C_x, C_y$

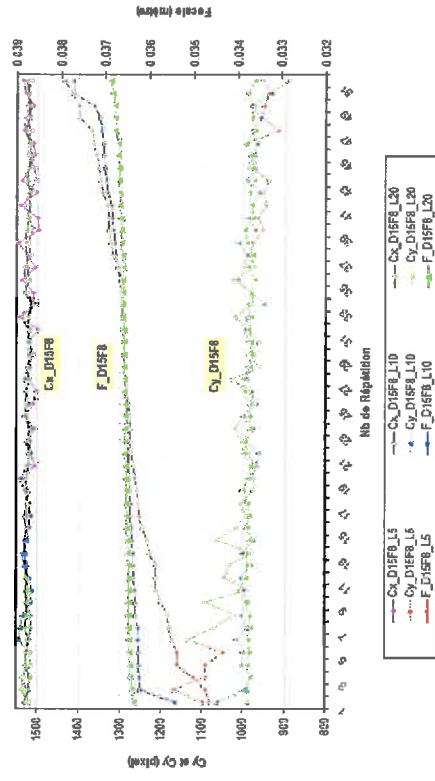
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres  $C_x$  et  $C_y$



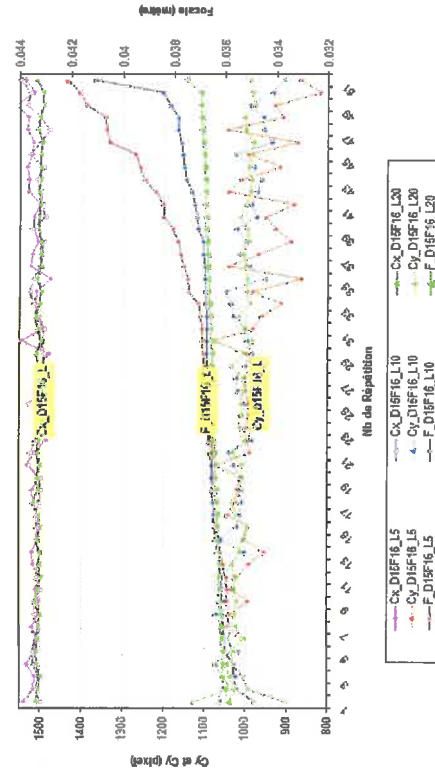
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres  $C_x$  et  $C_y$



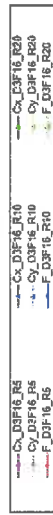
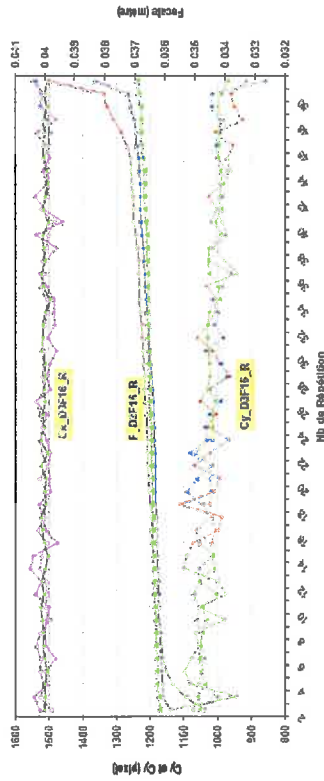
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres  $C_x$  et  $C_y$



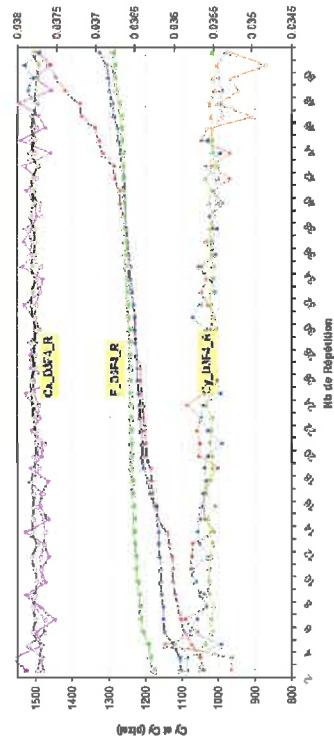
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres  $C_x$  et  $C_y$



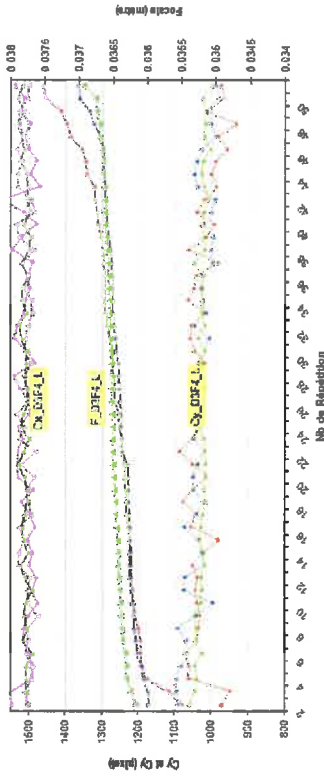
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



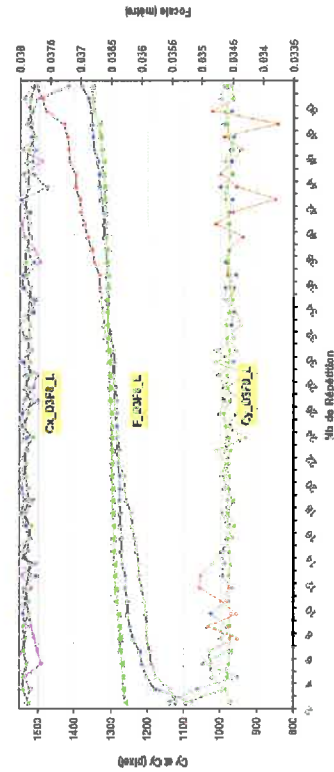
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



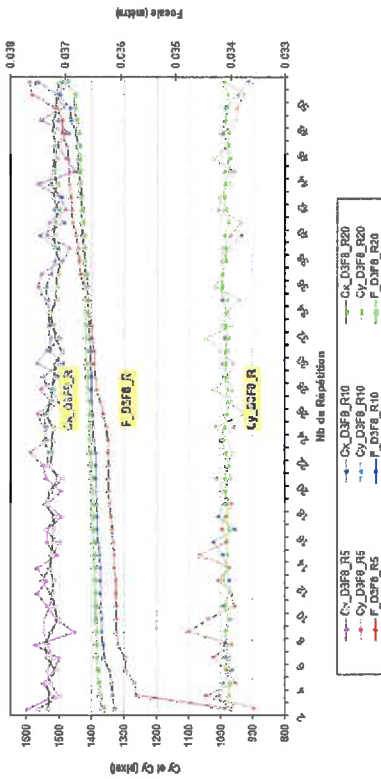
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy

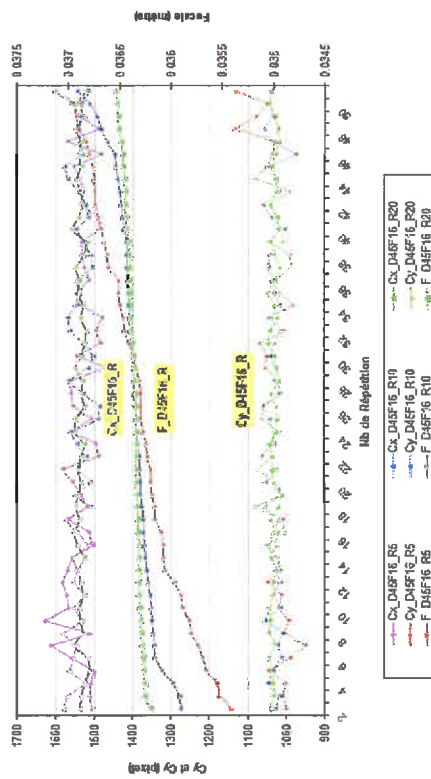


Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy

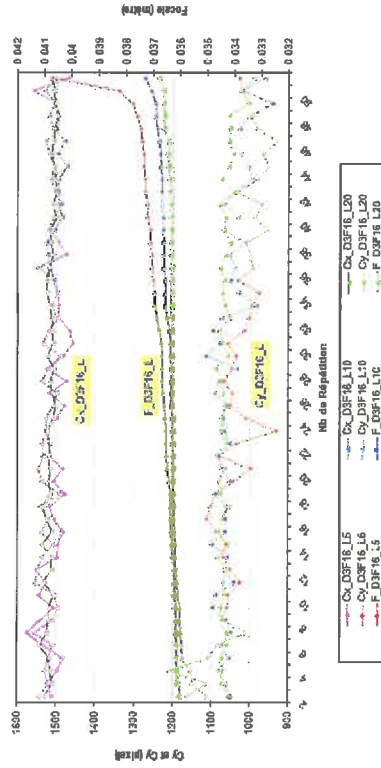


D45

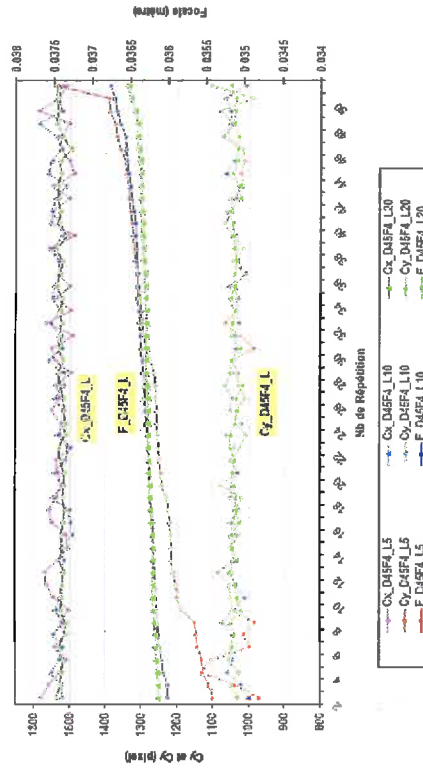
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



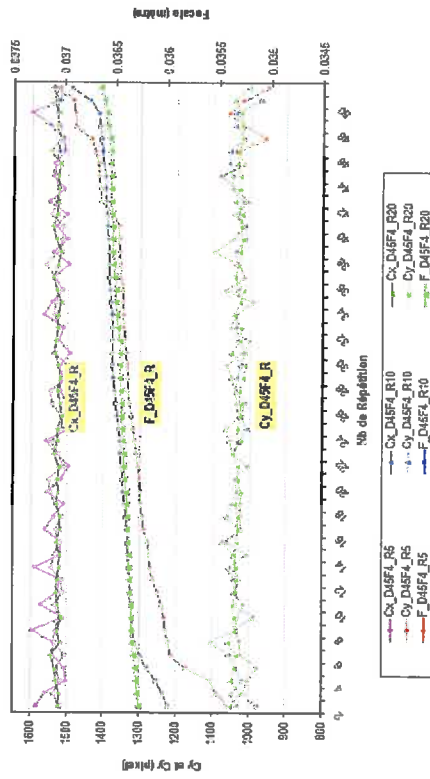
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



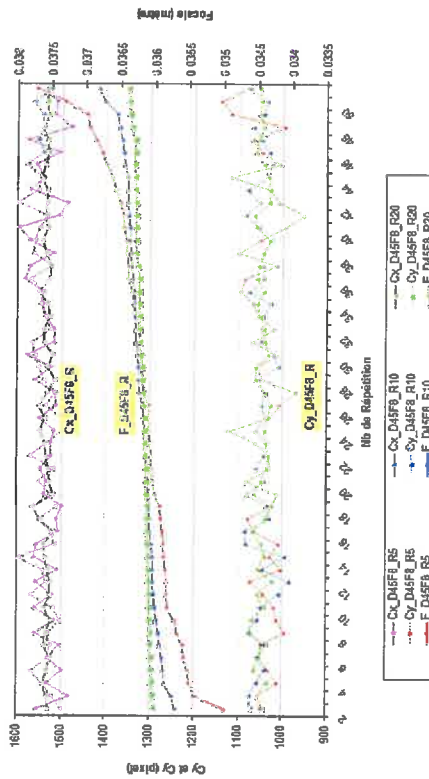
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



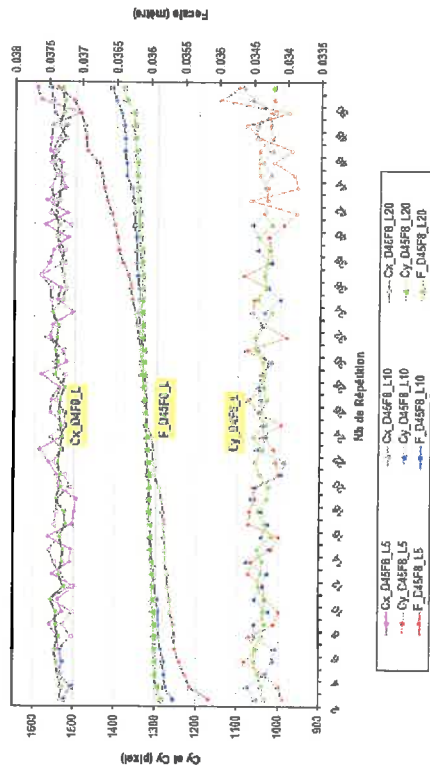
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



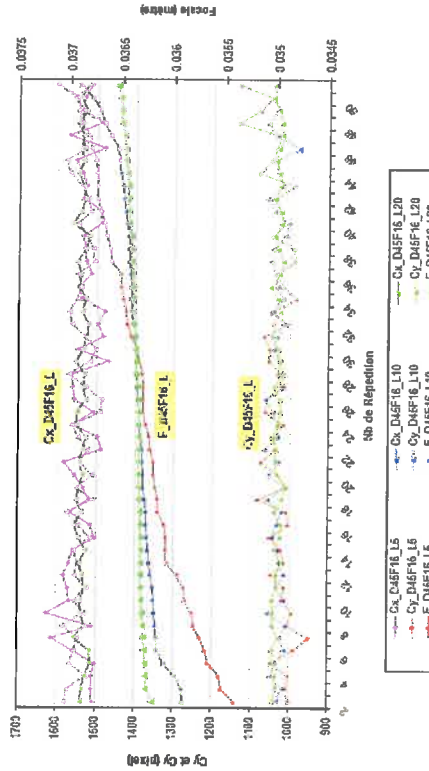
Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



Relation entre l'estimation de la focale et l'estimation des paramètres cx et cy



## Résumé

La rugosité du sol est un paramètre important en hydrologie car elle influence l'infiltration et la détention superficielle. Nous avons étudié les potentialités d'un capteur stéréo-photographique pour obtenir cette rugosité. Dans un premier temps, nous avons déterminé la précision des paramètres intrinsèques des deux appareils photographiques de ce capteur et nous avons déterminé les conditions d'un calibrage optimal. Les paramètres ne sont pas corrélés et l'algorithme d'étalonnage converge quelles que soit les conditions de prises de vue (ouverture, distance, nombre de photos). Les erreurs de positionnement sur les points de la mire sont de l'ordre de 0.15 pixels. Lorsque le nombre de photos de mire est supérieur à 20, les paramètres sont plus définis de façon unique, les incertitudes associées et les erreurs sont minimales pour une ouverture de F8 et une distance appareil photo-mire de 3m. Puis, nous avons utilisé ce capteur stéréo-photographique sur le terrain pour suivre l'évolution de la rugosité sous l'effet des pluies successives. Nous avons comparés différents indices de rugosité obtenus par stéréo-photographie et par une méthode de référence (rugosimètre laser). Qualitativement, les mini modèles numériques de terrain obtenus par stéréo sont cohérents avec les observations visuelles. Seuls les indices Random Roughness et Tortuosity Pour des raisons de manque de temps, la comparaison laser-stéréo en est encore en cours.

## Abstract

The roughness of the soil is an important parameter in hydrology because it influences the infiltration and surface detention. We studied the potentialities of a stereophony-photographic capture to obtain this roughness. Initially, we determined the precision of the intrinsic parameters of the two cameras of this capture and we determined the conditions of an optimal calibration. The parameters are not correlated and the algorithm of calibration converges whatever is the conditions of catches of sight (opening, distance, a number of photographs). The errors of positioning on the points of the test card are about 0.15 pixels. When the number of photographs of test card is higher than 20, the parameters are more defined in a single way, associated with uncertainties and the errors are minimal for an opening of F8 and a distance apparatus photo-test card of 3m. Then, we used this stereo-photographic capture on the ground to follow the evolution of roughness under the effect of the successive rains. We compared various indices of roughness obtained by stereophotography with a reference method (laser roughness-meter). Qualitatively, mini the digital models of ground obtained not stereo are coherent with the visual observations. The indices Random Roughness, Tortuosity and comparison laser-stereophony are in still in progress because the lack of time.