



Mesure de caractéristiques du couvert végétal par imagerie optique : analyse des performances d'estimation du logiciel CAN-EYE-stratégie d'échantillonnage spatial

Edouard Buchoud

► To cite this version:

Edouard Buchoud. Mesure de caractéristiques du couvert végétal par imagerie optique : analyse des performances d'estimation du logiciel CAN-EYE-stratégie d'échantillonnage spatial. [Stage] Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV), Avignon, FRA.; Ecole Nationale Supérieure de l'Energie, l'Eau et l'Environnement (ENSE3), Saint Martin d'Hères cedex, FRA. 2010, 26 p. hal-02813777

HAL Id: hal-02813777

<https://hal.inrae.fr/hal-02813777v1>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Edouard Buchoud
2ème année ENSE3
Spécialité : SICOM

Mesure de caractéristiques du couvert végétal par imagerie optique :

Analyse des performances d'estimation du logiciel CAN-EYE-stratégie d'échantillonnage spatial



Encadrants : Marie Weiss, ingénieur Institut National sur la Recherche Agricole (INRA) en Avignon
marie.weiss@paca.inra.fr
Benoit de Solan, ingénieur ARVALIS-Institut du végétal
benoit.desolan@avignon.inra.fr

Lieu : Inra, Laboratoire EMMAH, à Avignon.

Durée : 10 semaines

Remerciements :

A l'issue de ce stage, je voudrais exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Je voudrais remercier, en particulier, Marie Weiss et Benoit de Solan, mes tuteurs, qui m'ont beaucoup apporté et qui m'ont permis de découvrir le monde de la recherche publique. Je voudrais remercier de la même façon Frédéric Baret qui m'a permis de voir les problèmes toujours de différentes manières, et l'équipe de stagiaires et de thésards présents lors de ce stage et qui m'ont accueilli dans leur groupe.

Table des matières

Remerciements

I.	Objectif et cahier des charges	3
II.	Présentation du logiciel et des maquettes.....	5
1.	Présentation des variables agronomiques	5
2.	Maquettes virtuelles et traitement d'images	6
a)	Génération des maquettes réalistes	6
b)	Génération des photos.....	7
3.	Le logiciel Can-Eye	8
a)	Fonctionnement de Can-Eye (Annexe II).....	8
b)	Cohérences fractions de trou calculées avec monogap et estimées avec Pov-Ray + Can-EYE8	
III.	Détermination d'un échantillonnage spatiale optimale	10
1.	Effet de l'échantillonnage sur la détermination de la fraction de trou.....	10
a)	Echantillonnage régulier.....	10
b)	Echantillonnage aléatoire.....	11
2.	Tirage au sort à partir de l'échantillonnage aléatoire	12
3.	Modélisation de la fraction de trou pour un rang de maïs.	13
4.	Tirage au sort des positions du transect	15
5.	Pondération de la fraction de trou pour des positions fixes.....	16
6.	Vérification des résultats.....	19
Annexe I : Estimation des fractions de trou sur les maquettes tri-dimensionnelles de couvert végétal à partir d'images hémisphériques simulées par PovRay et traitées avec CAN-EYE.....		22
Annexe II : Fonctionnement de Can-Eye		23
Table des illustrations:		24
Références		

Problématique :

Le logiciel Can-Eye, développé par Marie Weiss et Frédéric Baret, permet d'estimer des caractéristiques du couvert végétal à partir de photographies hémisphériques acquises dans celui-ci. Ce logiciel permet, en effet, d'estimer de manière non destructive l'indice foliaire (demie surface de feuille ramenée à un mètre carré de sol horizontal), la fraction de couverture au sol (pourcentage de végétation vue sur le sol dans une direction donnée) et la fraction de rayonnement photo synthétiquement actif absorbé par la végétation (fAPAR). Ceci permet de suivre l'évolution des cultures suivant différents stades de développement et de réaliser ainsi un suivi temporel de l'état de la végétation.

Can-Eye est développé depuis 2003 au sein de l'unité EMMAH et comprend aujourd'hui environ 400 utilisateurs dans la communauté scientifique internationale. Il a déjà été montré que le logiciel présente de bonnes performances par comparaison à des mesures acquises avec d'autres instruments, ou bien des mesures destructives (Demarez et al, 2008, Verger et al, 2009). Cependant, beaucoup d'interrogations subsistent sur la manière optimale d'acquérir les images (stratégie d'échantillonnage, hauteur de prise de vue) et l'influence des erreurs de mesures (horizontalité de l'appareil par exemple) sur les performances de l'estimation.

L'objectif de cette étude est donc de tester le logiciel afin de connaître les incertitudes des résultats de ces différentes variables selon certains paramètres qui sont liés au capteur, à l'échantillonnage et enfin au traitement. Toutefois, l'évaluation de ces incertitudes nécessite de connaître les valeurs vraies des variables que l'on souhaite retrouver grâce au logiciel, valeurs qui sont parfois difficiles à évaluer lors de campagnes d'expérimentations. C'est pourquoi, afin de maîtriser totalement ces paramètres, j'ai travaillé avec des maquettes virtuelles 3D de différentes cultures qui me permettaient de savoir réellement quelles étaient les véritables valeurs souhaitées. Mon travail fut, de réaliser la génération des maquettes 3D de culture, de simuler les photos hémisphériques correspondantes telles qu'elles seraient acquises lors d'une expérimentation, puis de les traiter avec CAN-EYE, mais aussi de faire les différents tests qui nous permettaient de connaître la sensibilité du logiciel par rapport aux paramètres.

I. Objectif et cahier des charges

1. Organisation de l'Inra et objectif

L'INRA est une institution française de recherche dans le domaine agricole. Le centre d'Avignon effectue également des recherches dans le domaine forestier et hydrologique. Les recherches de l'unité mixte de recherches EMMAH (<http://www.umar-emmah.fr>) portent sur l'analyse de l'impact des changements globaux sur la ressource hydrique, la production agricole et leur interaction à l'échelle du territoire. Les travaux s'appuient sur l'utilisation de données de télédétection, l'observation intensive de sites instrumentés, de mesures en laboratoire et de développements méthodologiques pour mieux comprendre et modéliser le fonctionnement des écosystèmes méditerranéens.

Dans ce contexte, Marie Weiss, Frédéric Baret, et beaucoup d'autres contributeurs ont développé le logiciel *Can-Eye* (<https://www4.paca.inra.fr/can-eye>) qui permet de déterminer l'indice foliaire d'une culture d'une manière non destructive. Mon tuteur, Benoit de Solan, est, quant à lui, ingénieur d'étude chez ARVALIS – Institut du végétal en collaboration avec l'Inra. Ce dernier développe des modèles de culture agricoles selon différents paramètres biologiques. Il réalise des maquettes virtuelles en trois dimensions de cultures à différents stades de développement. Il s'intéresse également fortement à la mesure d'indice foliaire et de caractéristiques de la végétation par proxy-détection.

Mon rôle en tant que stagiaire était de préciser la sensibilité et les incertitudes liées à la mesure d'indice foliaire par photographie hémisphérique et ainsi permettre aux utilisateurs de se

mettre dans des conditions de prise de vue optimales. Pour l'instant, l'utilisateur acquiert des images en échantillonnant le champ en transect (Figure 12). La prise de vue est effectuée soit au ras du sol (appareil pointant vers le ciel), soit au-dessus de la végétation à une hauteur variable selon les utilisateurs et les cultures (appareil pointant vers le sol), en fonction de la hauteur de la culture. Grâce à ce stage, la détermination d'une stratégie d'échantillonnage spatial optimale sera possible pour ce type de mesure, ainsi que la hauteur de prise de vue et les incertitudes associées.

Dans ce but, il a fallu mettre en relation les données fournies par la maquette virtuelle avec les données de Can-Eye. Grâce aux maquettes et à CAN-EYE, l'objectif était de se placer dans les conditions réelles de prise de vue afin de constater la sensibilité d'estimation de la fraction de trou et du LAI par rapport à celles-ci. Ces conditions sont :

- une hauteur de prise de vue variable
- l'horizontalité du capteur
- Le stade de développement du couvert végétal (indice foliaires variables)
- la stratégie d'échantillonnage spatial à l'intérieur des parcelles.

L'utilisation de maquettes réalistes permet de connaître les valeurs exactes des variables agronomiques et de pouvoir la comparer aux résultats du logiciel.

Mon outil de travail était essentiellement Matlab mais j'ai pu découvrir aussi le logiciel POV-ray qui permet de générer des photos numériques à partir de maquettes 3D. Les codes étaient déjà existants mais il a fallu les modifier et les adapter à ma problématique, en particulier pour générer un grand nombre d'images efficacement. La compréhension du code de CAN-EYE afin d'utiliser juste une partie utile était nécessaire afin de traiter les images avec le moins d'intermédiaires possibles.

2. Cahier des charges

Mes tuteurs m'ont demandé d'effectuer plusieurs tests du logiciel notamment sur les paramètres du capteur et l'échantillonnage du champ. Voici leurs cahiers des charges en début de stage :

I. Effet du capteur :

a) Prise de vue :

Test avec des hauteurs de prise de vue de 0, 15 prise d'en dessous du couvert, et de 30 à 100cm au dessus de la canopée.

b) Résolution de l'appareil :

Il fallait tester la résolution du capteur utilisé. Au laboratoire, trois appareils étaient utilisés : -Coolpix : 2048*1536

-Nikon : 2072*1704

-Panasonic : 3072*2304

c) Horizontalité du capteur :

Test de l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontalité du sol. En effet, le capteur n'est pas souvent horizontal lors de la prise de vue

Inclinaison capteur : 0°, 1°, 3°

II. Effet échantillonnage : partie la plus importante

a) Protocole ARVALIS

b) Génération au hasard de l'échantillonnage

c) Application d'un masque d'angle variable selon l'angle de visée et de la hauteur

III. Traitement :

- a) Définir le cercle de pixel dans l'image qui est vraiment nécessaire pour définir le LAI correctement
- b) Résolution angulaire

Calendrier :

3 semaines : génération du code capable de simuler les résultats de CAN-EYE sur les maquettes tri-dimensionnelles (génération des maquettes, utilisation de Povray, traitement par CAN-EYE) (31/05 18/06)

2 semaines : Effet du capteur (14/06 28/06)

2 semaines : Effet de l'échantillonnage (28/06 12/07)

2 semaines : Effet traitement (12/07 02/08)

1 semaine : Fin projet, rédaction du rapport de stage.

II. Présentation du logiciel et des maquettes

Le schéma général d'estimation de la fraction de trou d'une maquette tri-dimensionnelle à partir de photographies hémisphériques est présenté en Annexe I. Nous présentons ici les différents outils utilisés pour les générer.

1. Présentation des variables agronomiques

Le logiciel permet de calculer plusieurs variables agronomiques dont l'indice foliaire qui joue un rôle très important puisqu'il est fortement impliqué dans les transferts de masse et d'énergie entre l'atmosphère et la plante. L'indice foliaire, dit *LAI* pour *Leaf Area Index*, est la demi-surface totale de feuille rapportée à 1m^2 de sol horizontal. Il varie dans une échelle de 0 à 10, selon le type de végétation et son stade de développement. Pour une culture, le LAI ne dépasse pas 8.

Il existe plusieurs manières de déterminer cette variable agronomique : la méthode destructive, où l'on ramasse les feuilles prélevées sur 1m^2 , puis on mesure leur surface cumulée. Toutefois, cette méthode implique la destruction des plants. C'est pour cela que les chercheurs se sont penchés, à partir des années 70, sur une méthode non-destructive : l'utilisation d'images hémisphériques. Le logiciel permet de traiter ces images hémisphériques acquises avec un fish-eye afin de trouver le LAI ainsi que d'autres variables agronomiques.

Les images hémisphériques permettent de mesurer la variation angulaire de fraction de trou $Po(\theta v, \varphi v)$ à l'intérieur de la végétation. Le LAI est ensuite estimé grâce à la loi de Poisson basée en particulier sur l'hypothèse d'une distribution aléatoire des feuilles à l'intérieur du couvert.

$$\text{Equation 1: } Po(\theta v, \varphi v) = e^{-\lambda G(\theta v, \varphi v) \cdot LAI / \cos(\theta v)}$$

La fraction de trou dépend des directions zénithales, θv , et azimutales, φv , ainsi que du LAI. $G(\theta v, \varphi v)$ est la fonction de projection des feuilles dans la direction $(\theta v, \varphi v)$. Elle est comprise entre 0 et 1, en effet si le champ est composé à 100% de trous (LAI=0) alors la fraction de trou vaudra 1. En général, on considère une distribution des feuilles aléatoire en azimut, ce qui permet d'intégrer facilement la fraction de trou sur la direction azimutale. L'angle le plus intéressant afin de trouver un

LAI correct est $\theta_v = 57,5^\circ$ car la fraction de trou est alors indépendante de l'angle d'inclinaison moyen des feuilles, $G(\theta_v, \varphi_v)$ vaut alors 0.5 (Weiss et al, 2004). L'angle de visée de 0° est appelé *nadir*.

Le logiciel CAN-EYE, permet, une fois les images hémisphériques acquises, de classer les images (en végétation/non végétation ou trou), de convertir les images binaires résultantes en fraction de trou, puis d'inverser l'équation 1 pour obtenir le LAI et l'angle d'inclinaison des feuilles. Dans la suite de cette étude, la fraction de trou expérimentale estimée par Can-Eye sera comparée à une valeur de référence de la fraction de trou des maquettes tri-dimensionnelles, calculée grâce à au programme monogap.exe développé par l'Inra de Grignon dont le fonctionnement sera explicité dans la suite.

2. Maquettes virtuelles et traitement d'images

a) Génération des maquettes réalistes

Le modèle d'architecture du couvert végétal utilisé est Adel-Wheat, où l'ensemble du couvert est décrit par des triangles en trois dimensions. Une maquette virtuelle est constituée de triangles définis dans un fichier de type .can . C'est un fichier texte, on peut donc le modifier aisément. Ce fichier est constitué des coordonnées de chaque sommet des triangles constituant une partie d'une feuille ou d'une tige. En effet, on distingue les feuilles et les tiges ainsi que les différents pieds présents dans la scène.

Voici comment est constitué un fichier :

C1	c2	c3	c4	c5 ...	c13
p	1	100015004002	3	83.26 5.58 11.39 84.75 4.38 11.39 83.70 2.99 9.64	
p	1	100015004002	3	84.46 6.85 12.96 85.74 5.82 12.96 84.75 4.38 11.39	

Les différents champs sont :

- c1, type de géométrie, ici p : polygone
- c2, le nombre de parcelles présentes dans la scène
- c3, est un code permettant de localiser un polygone

Propriété optique	N° de la plante	N° du triangle sur la plante	Axe
1...	000015...	004...	002
- c4, nombre de sommet dans le polygone, ici 3 car ce sont des triangles
- c5 jusqu'à c13, coordonnées en centimètres x, y et z des différents sommets du triangle.

A partir du .can, j'ai créé un programme générant :

- des fichiers .dat qui permettent d'identifier les différents pieds et les tiges
- des fichiers .8 qui définit les limites des parcelles champs (en cm).
-

Par exemple, pour le même champ de maïs on aura un .dat suivant :

Plant LeafElement Metamer StemElement Axe

15	1	4	0	1
----	---	---	---	---

Le LeafElement vaut 1 si le triangle est une feuille, 0 sinon. De même, StemElement vaut 1 si le triangle fait partie du pied, 0 sinon. L'axe définit l'axe parmi la plante qui contient le triangle. Une plante peut avoir plusieurs axes, c'est-à-dire plusieurs tiges. Metamer correspond au numéro de

l'étage de la plante. Un métamère est constitué d'une tige, d'une gaine (non représentée ici) et d'une feuille. La plante est ainsi constituée d'un empilement de métamères (classiquement : 10-12 pour le blé, 15 – 18 pour le maïs)

Le programme Monogap (Figure 1) prend en entrée trois fichiers qui lui permettent alors de calculer la fraction de trou : les fichiers .can et .8 définis ci-dessus et le fichier sky.sky qui permet de générer les angles de vue (angle zénithaux et azimutaux) pour lesquels on veut calculer la fraction monodirectionnelle. Le programme permet alors de modéliser un champ répliqué, nécessaire pour la simulation des images hémisphériques (§b,p 7) et ainsi de calculer les fractions de trou bidirectionnelles et monodirectionnelles de référence.

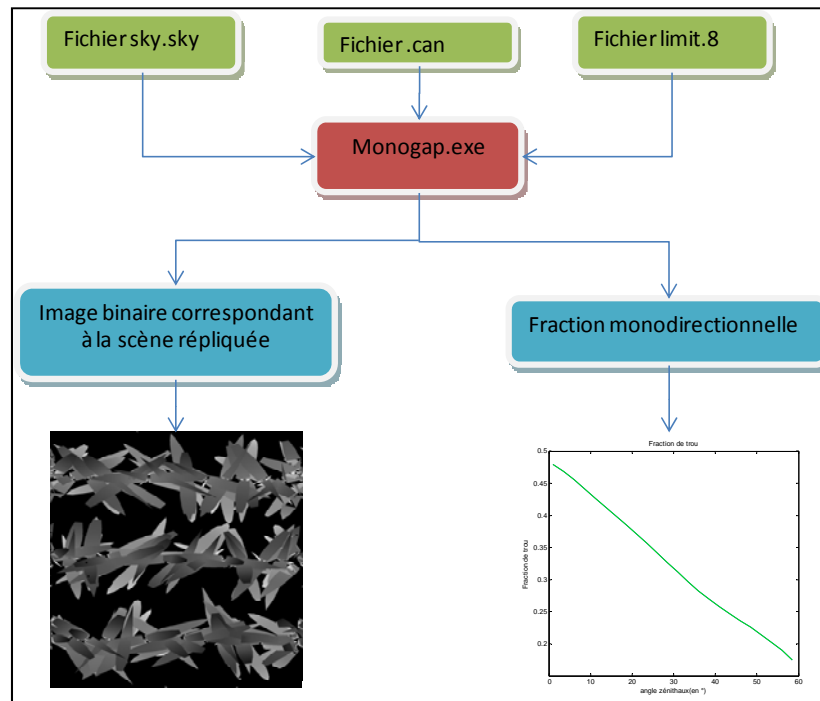


Figure 1. Utilisation de Monogap pour le calcul de la fraction de trou de référence des maquettes tri-dimensionnelles.

b) Génération des photos

Afin de générer les photographies des maquettes 3D, il a été choisi un logiciel capable de créer des images à partir de description de scène. *POV-ray* (**P**ersistence of **V**ision **R**aytracer) est un freeware (<http://www.povray.org>) développé par l'équipe *POV* et qui est capable de faire cela. Il ne dispose pas d'une interface graphique (de [modeleur 3D](#)) intégré comme la plupart des logiciels de synthèse actuels, mais utilise des scripts de description de scène, dans lesquels tous les objets, les lumières, etc. doivent être décrits. Il permet de générer des photos à partir de données numériques mais avec beaucoup d'options sur la lumière émise et différents effets afin de rendre assez réaliste une maquette virtuelle.

Pour les photos, une lumière diffuse, qui ne fait pas d'ombre sur le sol, permet une classification de la végétation plus précise. On peut voir que le sol est gris (Figure 5), sa couleur a été fixée comme ceci afin d'éviter des problèmes de classification de pixel au moment de la binarisation. De plus, on peut simuler un objectif hémisphérique, mais ce qui implique un grand angle de vue. Il a donc fallu répliquer la scène plusieurs fois afin d'éviter des artefacts lors de l'interprétation des résultats. En effet, si on voit sur l'image générée la limite de la scène, il y aura plus de trous. On peut régler grâce à l'amélioration du code déjà existant, tous les paramètres souhaités comme la hauteur de prise de vue, la résolution, l'inclinaison de l'appareil photo par rapport au sol, la position du capteur dans le champ... Les photographies sont générées en quelques minutes en fonction de la taille de la maquette et ensuite binarisées pour être stockées dans un dossier et traitées par CAN-

EYE. Toutefois, la génération d'images est assez longue et il faut avoir un ordinateur performant afin de réussir à les stocker.

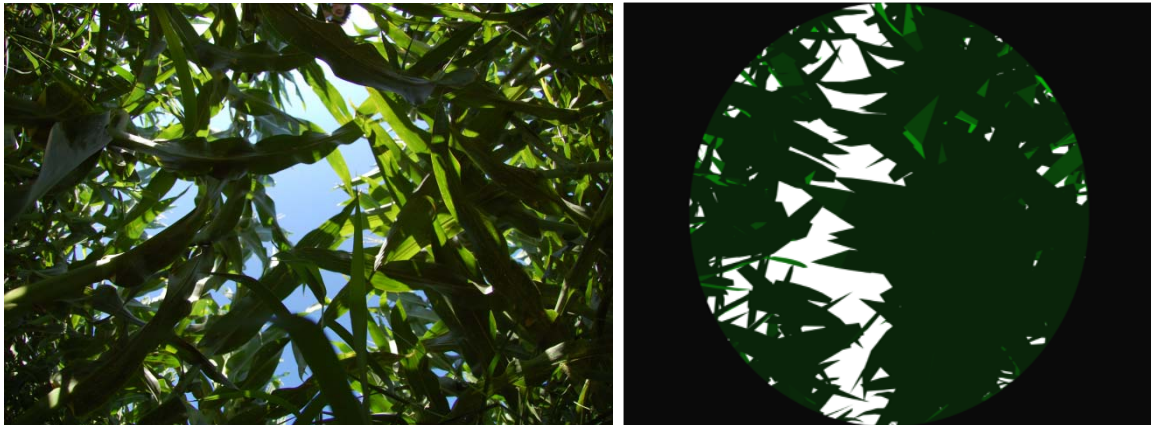


Figure 2 : Comparaison images champ simulé et images hémisphériques expérimentales.

3. Le logiciel Can-Eye

a) Fonctionnement de Can-Eye (Annexe II)

Can-eye (<https://www4.paca.inra.fr/can-eye>) est un logiciel développé par l'Inra d'Avignon (Weiss, 2008). Par esprit de concision, les fonctions utilisées dans ce logiciel lors du stage ne seront pas décrites. Il permet de traiter plusieurs images simultanément, de faire la moyenne de la fraction de trou correspondante et de déterminer ainsi les variables agronomiques d'intérêt. Il traite au préalable les photographies de types 'fish-eye' prises sur le terrain. On passe d'abord par une phase de classification de pixels afin de distinguer la végétation au reste, puis au traitement des images.

Toutefois, une fonction permet de traiter des images préalablement binarisées ce qui permet de réaliser les tests sur les maquettes. Une maîtrise du code de Can-Eye était nécessaire afin de pouvoir exploiter cette fonction sans passer par des intermédiaires longs et inutiles. Grâce à la définition des paramètres du capteur utilisé, le logiciel calcule des secteurs dans l'image selon des angles zénithaux et azimutaux. On peut voir qu'il fait alors la moyenne sur chaque secteur et détermine la fraction de trou (Po) bidirectionnelle. La fraction de trou monodirectionnelle pour chaque angle zénithal est alors la moyenne des Po bidirectionnelles pour les tous angles azimutaux correspondant. La fraction de trou monodirectionnelle ne dépend alors que de l'angle de visée zénithal. A partir de ceci, on peut trouver le LAI en inversant l'équation 1. Cependant, sur une photographie, comme on ne distingue pas les feuilles des tiges, les agronomes parlent alors de PAI (Plant Area Index) et non de LAI. Le PAI est le LAI auquel on ajoute la demie-surface des autres organes de la plante (tige, épi).

b) Cohérences entre les fractions de trou calculées avec monogap et estimées avec Pov-Ray + Can-EYE

La Figure 3 présente une photo hémisphérique simulée par Pov-Ray d'un milieu turbide réalisé à partir d'une maquette 3D: les feuilles sont disposées de manière aléatoire dans l'espace (on observe une « soupe » de feuilles). Ce type de couvert végétal remplit les conditions de la loi de Poisson (équation 1). Ces images vont donc permettre de comparer la fraction de trou de référence calculée grâce à monogap et celle estimée par Can-Eye afin de valider la chaîne de traitement.

Cela m'a permis de déceler un problème de classification de pixel lors de la binarisation des images (code matlab). En effet, les couleurs associées aux images par PovRay lorsque les photographies étaient prises du dessous ou du dessus n'était pas les mêmes (Figure 3). Ceci menait à

des incohérences entre les résultats trouvés avec CAN-EYE et la loi de Poisson. J'ai donc modifié les modalités de seuillage.

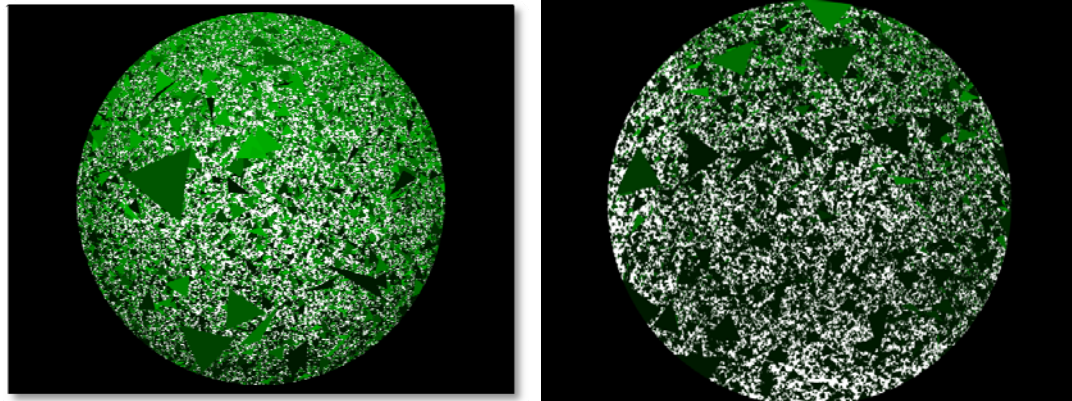


Figure 3. Image d'un milieu turbide simulé, acquise avec un objectif hémisphérique à deux hauteurs de prise de vue (à droite : 0 cm, visée par en-dessous, à gauche : 100 cm, visée par au-dessus)

On peut voir que pour des angles zénithaux faibles donc proches du nadir, les fractions de trou calculées par Can-Eye pour les deux hauteurs sont assez différentes (Figure 4). En effet, même si théoriquement on devrait avoir les mêmes fractions de trou, la surface observée par l'objectif n'est pas la même (rayon du disque observé = $h \cdot \tan(\alpha/2)$ où h est la hauteur de prise de vue, et α l'angle de visée de l'objectif = 60°). Cela est d'autant plus vrai que l'on s'approche du nadir. On devient donc sensible à la variabilité spatiale à l'intérieur de la parcelle. On peut voir par ailleurs que cette variabilité n'apparaît plus pour des angles supérieurs à 30° . Pour éliminer cet artefact, il est nécessaire d'acquérir plusieurs images de la parcelle et de travailler sur la fraction de trou moyenne. Il est alors nécessaire d'établir un protocole d'échantillonnage pratique afin d'estimer au mieux la fraction de trou. Par exemple, pour un milieu turbide, avec un échantillonnage aléatoire dans la parcelle, on distingue que la notion de hauteur de prise de vue n'a alors pas lieu d'être (Figure 4 courbe vert foncé et rouge pointillée). La fraction de trou estimé par Can-Eye est alors exactement la même pour deux hauteurs. Il y a cependant un problème au nadir, car on voit bien que l'estimation de monogap est supérieure aux autres.

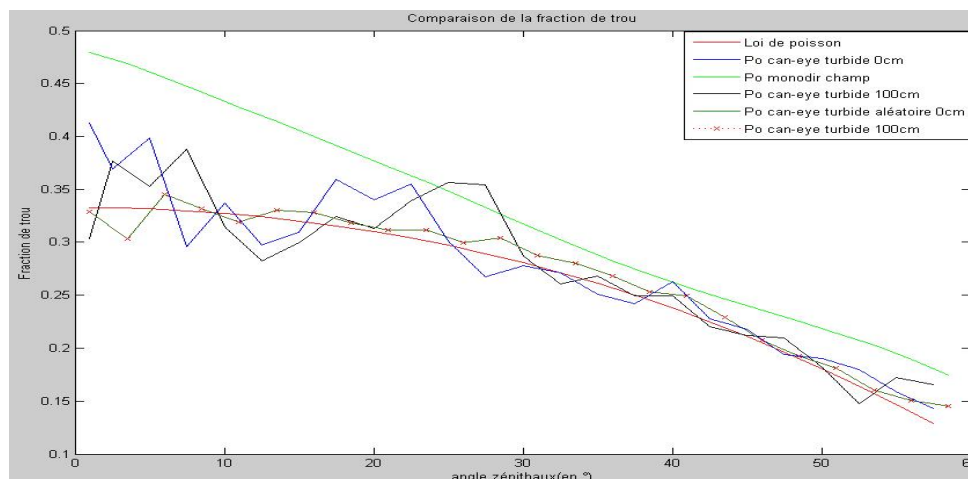


Figure 4. à gauche : Fraction de trou monodirectionnelle estimée par CAN-EYE pour différentes hauteurs de prise de vue (bleu et noir), et un échantillonnage aléatoire (vert foncé et tiret rouge) valeur estimée par monogap sur la maquette tri-dimensionnelle (vert) et valeur théorique de la loi de Poisson (rouge).

III. Détermination d'un échantillonnage spatial optimal

1. Effet de l'échantillonnage sur la détermination de la fraction de trou

Après avoir vérifié la cohérence des résultats, je suis passé au traitement de donnée des champs de maïs. Pour avoir à traiter ces données par Can-Eye, il a fallu suivre les mêmes étapes que précédemment mais en respectant un échantillonnage du champ complet. Un effet des différents types d'échantillonnage était alors observable sur les résultats.

Les maquettes tri-dimensionnelles représentent un champ de maïs composé de 3 rangs, où se situent les tiges, avec des inters rangs de 80 centimètres, soit une taille de $2.5 \times 1.7 \text{ m}^2$. Le champ est répliqué quatre fois. Trois maquettes de LAI différents (2.2, 1.2, 0.17) ont été exploitées dans ce travail, la Figure 5 présente des exemples d'images acquises sur une parcelle de LAI= 2.2.

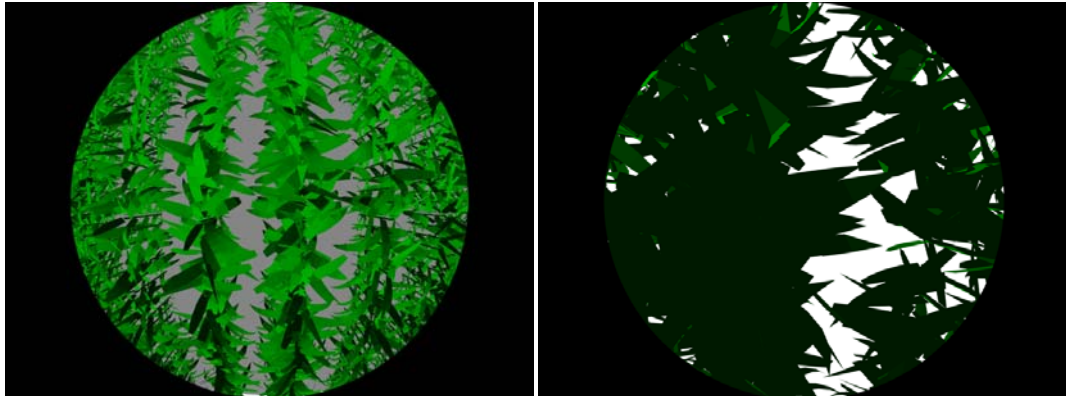


Figure 5. Exemple d'images hémisphériques simulées par Pov-Ray sur un champ de maïs de LAI=2.2 à une hauteur de 100cm (appareil photo dirigé vers le sol) à gauche et 0cm (appareil photo dirigé vers le ciel) à droite.

a) Echantillonnage régulier

Nous avons fixé le nombre de photographies maximum à 60 afin d'avoir un échantillonnage correct de la parcelle. Dans un échantillonnage régulier (Figure 6), la position du capteur est la même dans chaque inter rang. Le champ est découpé en 60 cases (10 en longueur * 6 en largeur) afin de couvrir son intégralité. La première photo est prise sur le rang, puis l'inter rang est divisé en deux afin de définir deux autres positions.

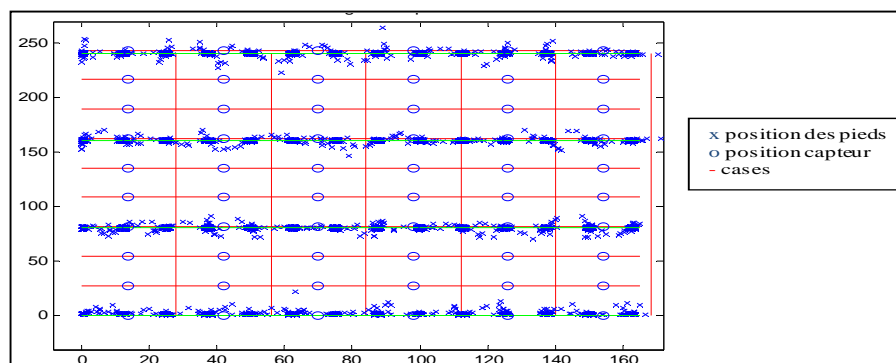


Figure 6. Echantillonnage spatial réalisé sur les maquettes de maïs

Après traitement des soixante photos grâce à Can-Eye, l'effet de rang est remarquable lors du calcul de la moyenne des images. En effet, comme les images sont toutes placées de la même façon dans l'inter rang, on voit plus de trous dans le centre de l'image (nadir) que pour des angles supérieurs (Figure 7). Cet échantillonnage conduit par conséquent à des valeurs de fraction de trou monodirectionnelle trop éloignées du modèle de Poisson (hypothèse de distribution aléatoire des

feuilles non vérifiée). L'inversion de cette équation conduit par conséquent à des estimations de LAI trop élevées. Par exemple, pour un champ de maïs avec un LAI de 2.2, Can-Eye estimait un LAI de 4.5, ce qui fait une erreur relative de 108%.

Le problème réside donc dans l'échantillonnage qui ne nous permet pas d'être dans des conditions favorables pour déterminer la fraction de trou et de se rapprocher des conditions de la loi de Poisson. Ce schéma d'échantillonnage favorise l'effet de rang et n'est pas adapté pour estimer correctement les variables agronomiques d'intérêt.

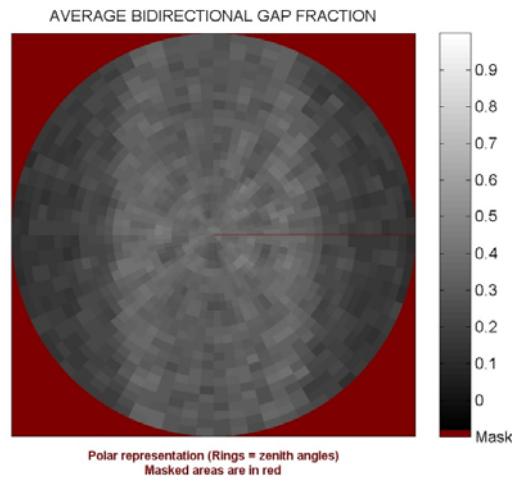


Figure 7. Fraction de trou bidirectionnelle de la moyenne des images (prise de vue 100 cm au dessus du champ) pour un échantillonnage régulier.

b) Echantillonnage aléatoire

Nous avons alors réfléchi sur le problème d'échantillonnage en changeant celui-ci pour un échantillonnage aléatoire à l'intérieur de la parcelle (Figure 8). Toutefois, là encore, il fallait couvrir l'intégralité du champ, c'est pourquoi il fallait tirer au sort, aléatoirement dans les cases prédéfinies, les positions du capteur. Ceci afin de réduire un effet de rang trop important.

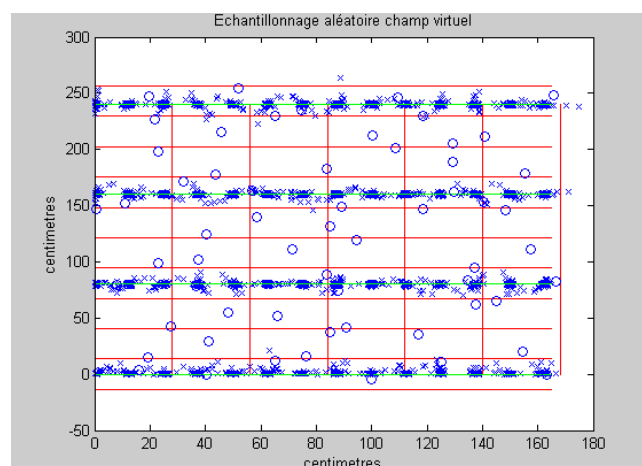


Figure 8. Schéma d'échantillonnage aléatoire

Comme on peut le constater dans la Figure 9, cela permet de réduire l'effet de rang, mais ne permet pas de l'éliminer complètement. A ce moment du stage, mes tuteurs ont alors décidé de changer de cap et ainsi, au lieu de me pencher sur différents problèmes liés au capteur et au traitement, il fallait au préalable trouver le meilleur échantillonnage possible. C'est pourquoi une comparaison entre un tirage aléatoire des photos déjà prises lors d'un échantillonnage aléatoire et un échantillonnage en transect (classiquement utilisé pour ce type de mesures) était alors nécessaire afin de déterminer un échantillonnage convenable. Dans la suite, les résultats seront donnés pour un

champ de maïs caractérisé par un LAI de 2.2, et une surface de $2.5 \times 1.7 \text{ m}^2$, trois rangs espacés de 80 cm.

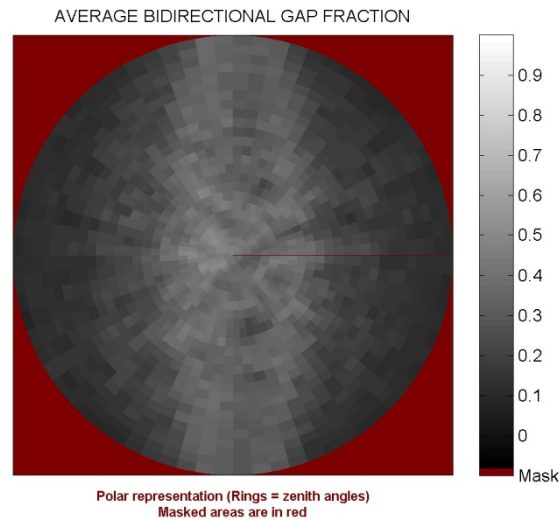


Figure 9. Fraction de trou bidirectionnelle de la moyenne des images (prise de vue 100 cm au dessus du champ) pour un échantillonnage aléatoire.

2. Tirage au sort à partir de l'échantillonnage aléatoire

Lors de la saisie expérimentale des images dans des parcelles de maïs, la question d'un échantillonnage complètement aléatoire s'est posée, ce qui aurait pour effet de faire disparaître l'effet de rang. Un tirage au sort a été effectué dans l'échantillonnage aléatoire de la parcelle en 60 images. Pour chaque hauteur de prise de vue, 4, 8, 12, 20, 32, et 40 images ont été tirées au sort parmi les 60 images, sachant qu'une même image pouvait être tirée plusieurs fois. L'influence du nombre d'images lors de l'échantillonnage pourra alors être discutée (Figure 10).

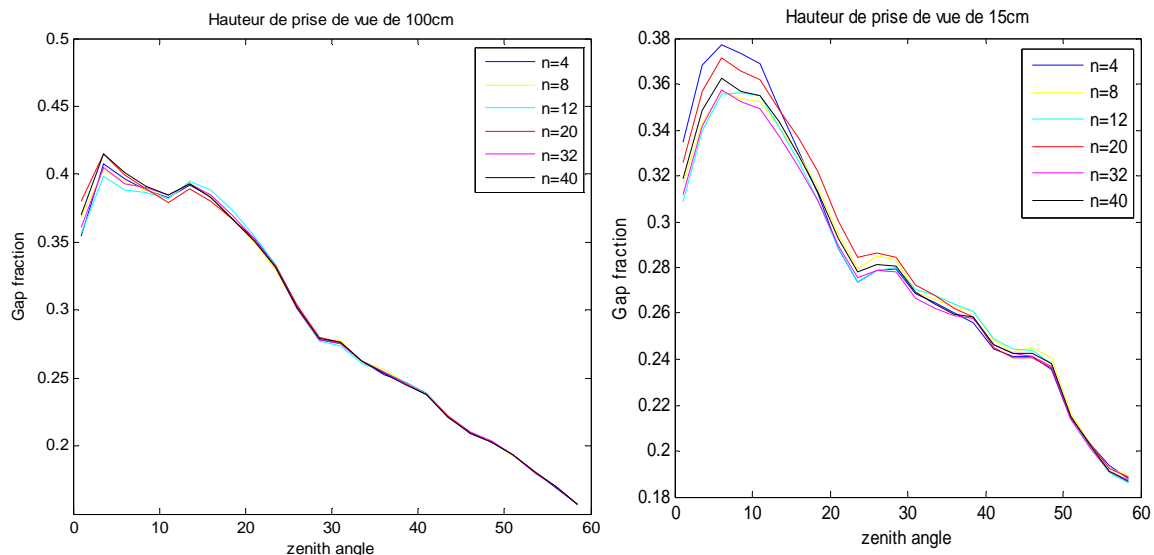


Figure 10 : Influence du nombre d'images et de la hauteur de prise de vue (à droite : 100m, visée par au-dessus, à gauche : 15 cm, visée par en-dessous) sur la fraction de trou

Selon la hauteur de prise de vue, par exemple 15 cm au dessus du sol avec l'objectif pointé vers le haut ou 100 cm au dessus du couvert végétal, on peut voir que le nombre d'images prises a peu d'influence sur la fraction de trou excepté dans le voisinage du nadir. Une variabilité plus importante, particulièrement au nadir, est observée lorsque l'appareil photo se trouve à l'intérieur

du couvert. Cela est dû à la possible présence ou non d'une feuille qui couvre une grosse partie de l'objectif (ce qui n'est pas le cas, lorsqu'on acquiert la photo à 1m au-dessus du couvert).

Quelque soit le nombre d'images prises aléatoirement dans le champ, il est donc possible d'obtenir une fraction de trou similaire. Afin de synthétiser les résultats et donc de comparer l'influence de la hauteur de prise de vue, la moyenne de la fraction de trou est calculée sur le nombre d'images prises. La Figure 11 permet de constater que la prise d'image au ras du sol (appareil pointant vers le haut $h=0\text{cm}$, courbe bleue) permet d'obtenir la fraction de trou au nadir la plus proche de la fraction de trou de référence Monogap. On constate aussi qu'à partir d'un angle zénithal de 30° , la fraction de trou est moins dépendante de la hauteur de prise de vue puisque les erreurs entre les hauteurs tendent à s'annuler. Cependant, le problème de cet échantillonnage est qu'il est très difficile sur le terrain de faire des échantillons aléatoires à cause de la géographie du champ de maïs.

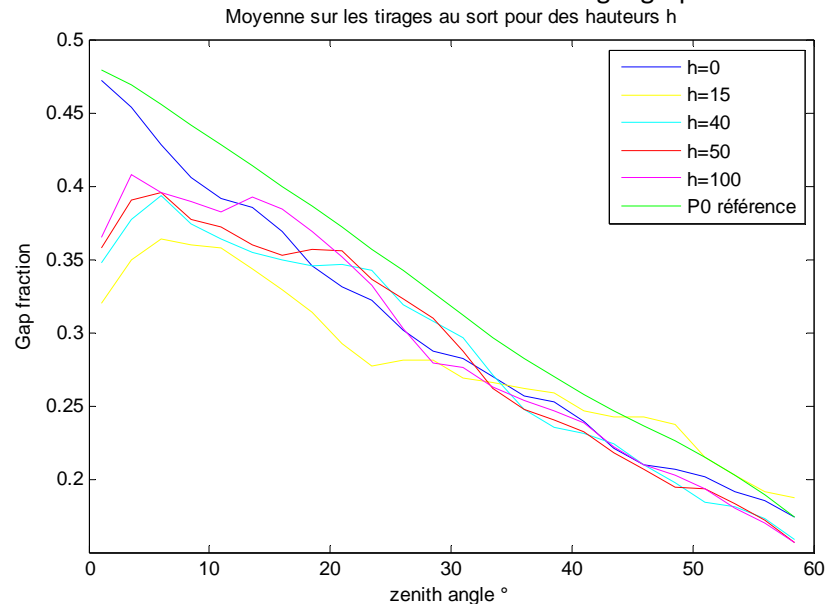


Figure 11 : Influence de la hauteur de prise de vue sur la fraction de trou pour un échantillonnage aléatoire.

3. Modélisation de la fraction de trou pour un rang de maïs.

Sur le terrain, l'échantillonnage de la parcelle se fait grâce à des transects parmi les rangs de maïs (Figure 12 : Position du capteur lors d'un transect à travers un rang de maïs (ici transect de 5 positions).).

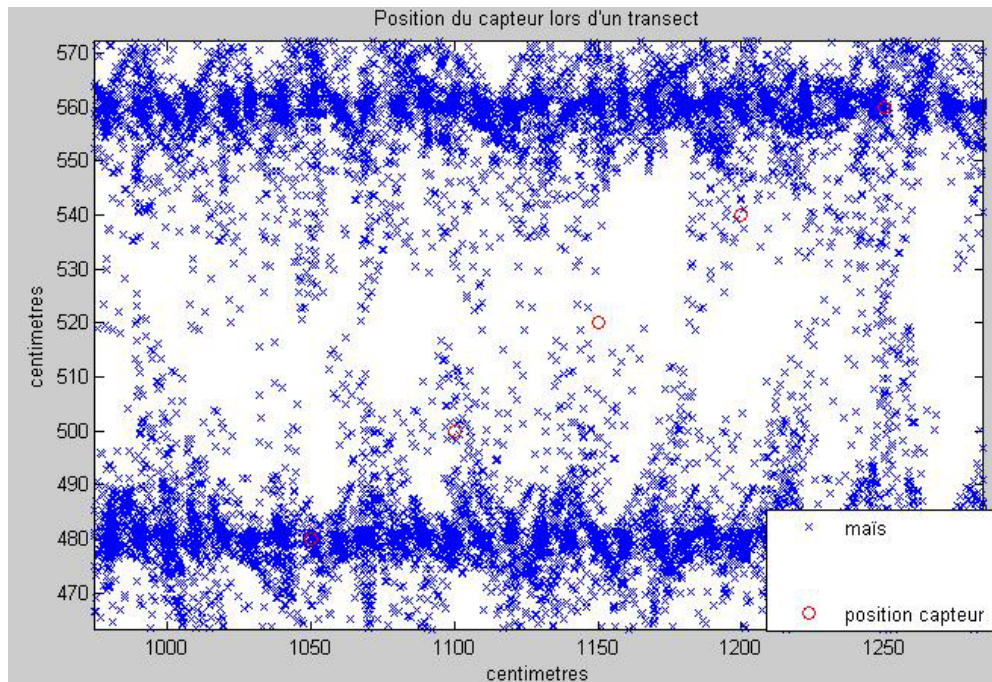


Figure 12 : Position du capteur lors d'un transect à travers un rang de maïs (ici transect de 5 positions). Les croix représentent les centres des triangles modélisant les plants de maïs

Dans la mesure où la génération d'images hémisphériques est coûteuse en temps, il ne nous était pas possible de simuler un grand nombre d'images pour un grand nombre de positions dans la maquette. De ce fait, afin de déterminer les positions optimales dans l'inter rang pour les prises de vue lors de l'échantillonnage, nous avons ajusté un modèle permettant d'estimer la fraction de trou mesurée par CAN-EYE pour un angle donné en fonction de la distance du capteur au rang.

Le modèle a été ajusté à partir des 60 images traitées précédemment : pour chacune des 60 positions, nous avons tracé la fraction de trou en fonction de la distance de chaque image par rapport au rang et de l'angle zénithal (Figure 13). Une fois le modèle ajusté, il nous sera possible de déterminer quelle position de prise de vue permet de trouver une fraction de trou en accord avec la fraction de référence en utilisant une technique de minimisation de l'erreur entre les deux fractions de trou.

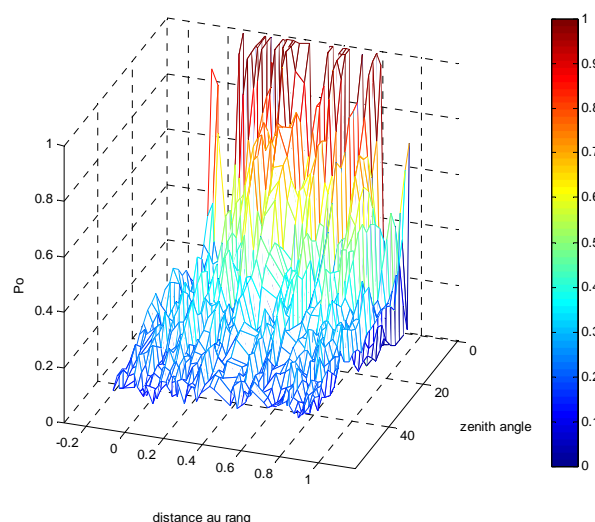


Figure 13 : Evolution de la fraction de trou en fonction de la distance au rang de l'image et de l'angle de visée pour un champ de maïs de LAI=2.2.

Pour chaque angle zénithal, le modèle que nous avons décidé d'ajuster est un polynôme de degré 2 qui semble le mieux adapté à la forme de la fraction de trou observée (Figure 13). De plus, théoriquement, le maximum de la fraction de trou dans un inter rang doit se trouver au milieu, puisque c'est l'endroit où il y a le moins de feuilles. Nous avons donc fait l'hypothèse simplificatrice d'une symétrie dans le rang qui permet d'exprimer un des coefficients du polynôme en fonction d'un autre.

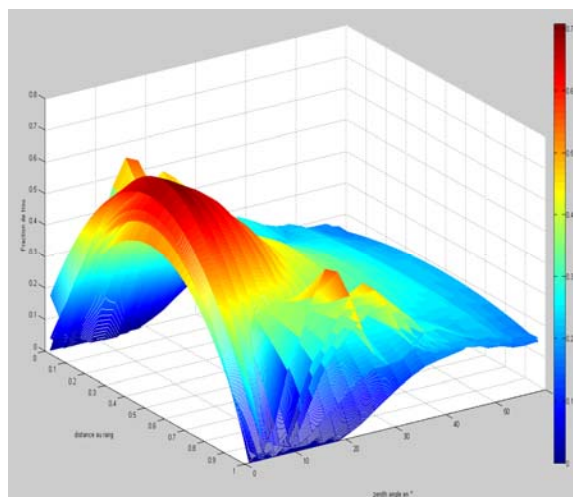
Pour chaque hauteur de prise de vue et chaque angle de visée, nous avons utilisé la fonction *fminsearch* de Matlab pour minimiser l'écart entre les valeurs de fraction de trou de référence (Can-EYE sur les 60 images) et le modèle. Les valeurs initiales des coefficients du polynôme de degrés 2 étaient déterminées par la fonction *polyfit* de Matlab (ajustement d'un polynôme sans la condition de maximum au milieu du rang).

La a.

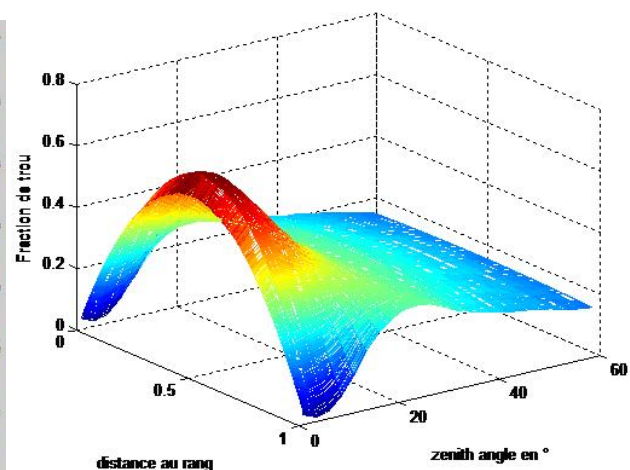
b.

Figure 14.a présente l'évolution de la fraction de trou modélisée pour différentes hauteurs de prise de vue en fonction de l'angle zénithal et la distance au rang. On remarque des artéfacts pour des angles entre 15° et 30°, près des rangs, qui apparaissent lors de la modélisation. Le calcul d'optimisation associe un polynôme qui amène une fraction de trou plus grande sur les rangs, ce qui est contradictoire avec la théorie. La conséquence est visible sur la moyenne sur les hauteurs des différentes modélisations (Figure 14 b). Ceci est probablement dû au fait que le nombre de 60 photos n'est peut-être pas assez grand (fraction de trou mal représentée pour certaines distances au rang), et que l'on observe ici des effets dus à la variabilité spatiale des plants de maïs, effets visibles pour des angles zénithaux faibles.

Par un souci de temps, nous n'avons pas pu augmenter le nombre d'images simulées sur la parcelle et ce problème reste à résoudre. Les résultats de cette étude devront donc tenir compte de cette erreur. Toutefois, la moyenne des coefficients de polynômes permet d'effectuer un tirage au sort des positions de notre échantillonnage. La moyenne sur les différentes hauteurs nous permettra de trouver des résultats indépendants du facteur de la hauteur de prise de vue.



a.



b.

Figure 14 : a. Evolution de la fraction de trou selon la distance de prise de vue par rapport au rang, l'angle zénithal et la hauteur de prise de vue (superposition des nappes). b. Moyenne de la fraction de trou sur les hauteurs.

Pour interpréter et utiliser cette modélisation, deux options sont alors possibles. La première consiste à prendre des positions aléatoirement dans le rang et comparer les résultats. La deuxième consiste à prendre des positions fixes et effectuer une moyenne pondérée de chacune des positions pour approcher la valeur réelle de la fraction de trou.

4. Tirage au sort des positions du transect

La première option consiste alors à tirer au sort 4 positions dans l'inter rang qui formeront le transect. L'inter rang est divisé en dix secteurs égaux. On tire ensuite aléatoirement 4 secteurs parmi les 10, puis une position dans chacun des 4 secteurs sélectionnés. Un tirage au sort successif de 1000 transects a permis de comparer les résultats et ainsi d'essayer de dégager des caractéristiques permettant d'établir les conditions d'un transect optimal.

Nous avons donc comparé la valeur moyenne de la fraction de trou des quatre positions et la valeur de la fraction de référence pour un angle zénithal donné. L'erreur entre les deux est fonction de la distance moyenne entre les points et de la distance moyenne des points par rapport au rang (Figure 15). En effet, si on dépasse une distance moyenne de 30 cm entre les positions on s'aperçoit que le modèle sous-estime la fraction de trou de référence. De plus, si on est au dessus de 55cm et en dessous de 25 cm pour une distance moyenne des points au rang, le modèle sous-estime la fraction de trou (l'appareil photo voit plus de feuilles puisqu'il est situé près des rangs). Ceci est d'autant plus vrai pour des angles de visée proche du nadir.

Par contre, le modèle est correct pour un angle de visée supérieur à 30° puisque l'erreur, quelle que soit la combinaison de positions, est faible. Particulièrement, pour un angle de 57.5°, la position des images lors de l'échantillonnage en transect n'influe presque pas sur la valeur de la fraction de trou estimée. Comme on peut le constater sur la Figure 15, l'erreur absolue entre les deux est faible. Cela nous permet de conclure sur la dépendance de la fraction de trou observée à l'échantillonnage pour des angles zénithaux faibles. Il semble donc nécessaire de ne pas tenir compte de ces angles pour estimer le LAI à partir de la fraction de trou, ce qui confirme la théorie de Miller-Lang (1986). Toutefois, on ne peut pas encore conclure sur la combinaison de positions optimales à prendre afin d'effectuer un transect.

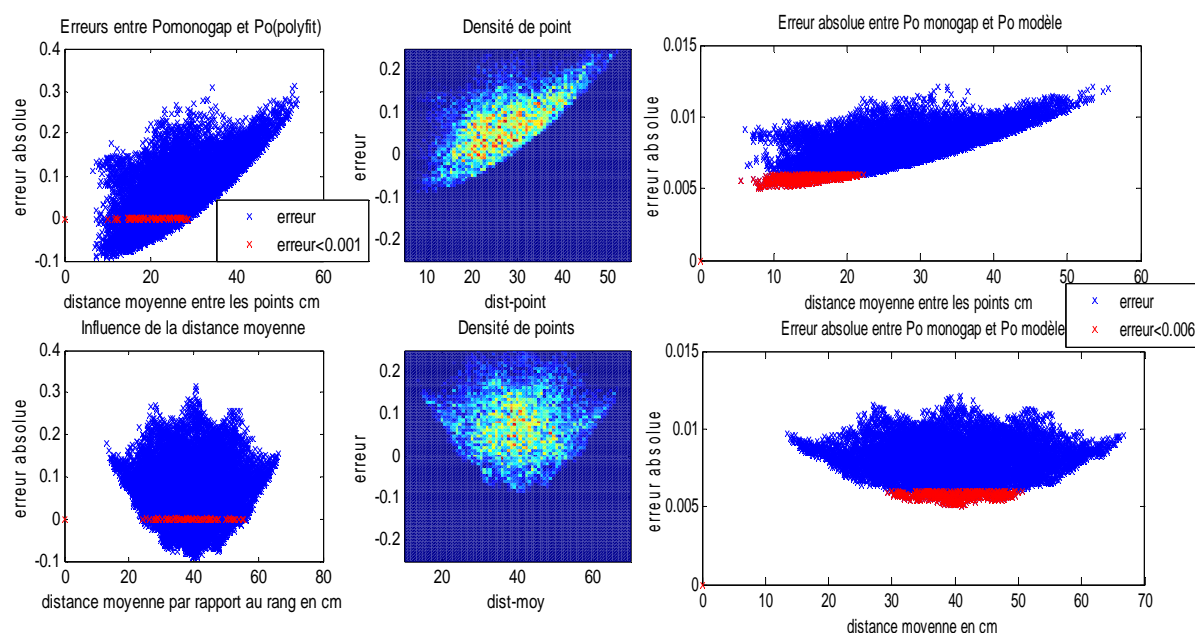


Figure 15 : Influence de la distance entre les points et par rapport au rang sur l'erreur entre la fraction de trou modélisée et de référence pour un angle de visée de 1° (considéré comme le nadir) et de 57.5°.

5. Pondération de la fraction de trou pour des positions fixes.

Comme il est difficile expérimentalement de faire un échantillonnage aléatoire, une autre solution est de fixer des positions dans le transect puis d'appliquer une pondération sur les mesures afin de se rapprocher de la fraction de trou de référence. Comme on peut le constater (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), l'évolution de la fraction à travers l'inter rang de maïs dépend de la

valeur du LAI qui est associé au champ. Plus le LAI est faible, plus la fraction de trou sera proche de 1 au voisinage du centre du rang puisque les plants de maïs sont plus jeunes, il y a donc plus de trous.

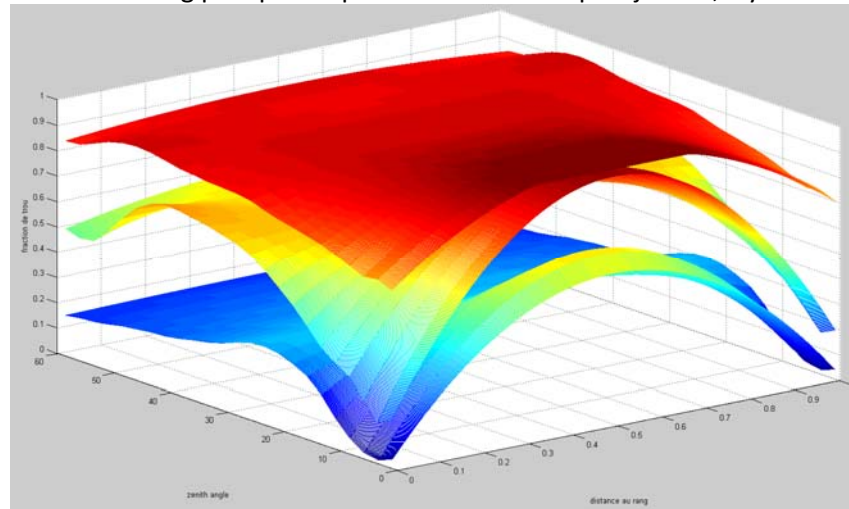


Figure 16 : Fraction de trou modélisée pour un champ de maïs dans différents stades de développement : LAI=0.17, LAI=1.2 et LAI=2.2.

Afin de faciliter l'acquisition des clichés sur le terrain, les positions choisies devaient être précises et simples à trouver. Nous nous sommes également appuyés sur ce qui se fait traditionnellement lors des expérimentations pour ce type de mesures : 5 acquisitions réparties sur le rang (0, 25%, 50%, 75% et 100% de la valeur de l'inter rang). En supposant la symétrie de l'inter rang (qui est vérifiée sur notre modèle de fraction de trou), on peut alors considérer que les positions (25% et 75%) et (0% et 100%) sont équivalentes et sont donc associées aux mêmes valeurs de pondération. La pondération consiste à appliquer un poids sur les valeurs de la fraction de trou modélisée de chaque position afin que l'erreur entre la moyenne de ces valeurs pondérées et la fraction de trou de référence soit minimale..

Voici l'algorithme me permettant de pondérer les fractions de trou :

$$\text{Equation 2 : } \text{moy_fr} = w(1) * \text{fr}(1) + w(2) * \text{fr}(2) + w(3) * \text{fr}(3) + w(4) * \text{fr}(4) + (1 - w(1) - w(2) - w(3) - w(4)) * \text{fr}(5) .$$

Le vecteur w est le vecteur des pondérations et le vecteur fr est le vecteur de la fraction de trou modélisée correspondant aux positions choisies dans l'inter rang. Ainsi, on trouve une moyenne pondérée (moy_fr) de la fraction de trou qui est comparée à la valeur de référence obtenue avec Monogap. On cherche alors à minimiser l'écart entre ces deux valeurs grâce à la fonction *fminsearch*, pour déterminer les valeurs de pondération.

A terme, grâce à cette pondération, on pourrait trouver la fraction de trou d'une parcelle et donc son LAI, en n'acquérant seulement que quelques photographies dans le champ.

En effectuant la pondération sur tous les angles et différents LAI précédents, il est possible de déterminer une pondération satisfaisante, ne dépendant ni de l'angle zénithal, ni du LAI (Figure 17 : Valeur de la pondération en fonction de l'angle et de la position dans le rang pour les différents LAI vu précédemment (nappe superposée)). Une telle pondération offre une facilité d'utilisation évidente : cela permet de corriger les valeurs de fraction de trou obtenues avec Can-Eye par un échantillonnage en transect sans avoir besoin de connaître la valeur du LAI de la parcelle.

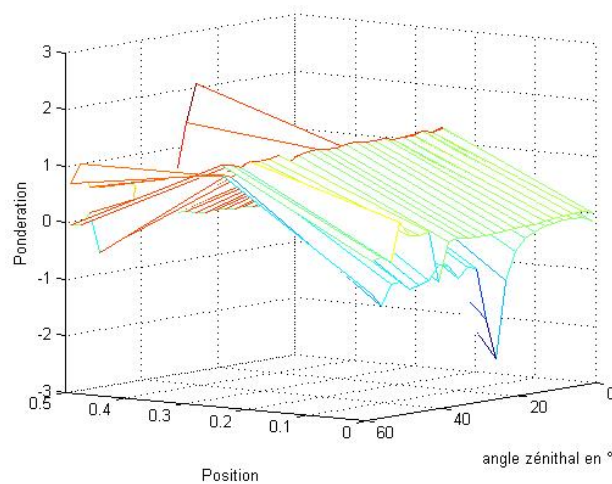


Figure 17 : Valeur de la pondération en fonction de l'angle et de la position dans le rang pour les différents LAI vu précédemment (nappe superposée).

La figure 18 nous montre l'optimisation effectuée pour chaque maquette séparément afin de trouver la meilleure pondération sur les 3 positions du transect pour tous les angles. On peut voir qu'il y a un problème pour le champ de LAI=1.2 (Figure 17), l'algorithme d'optimisation n'arrive pas à trouver une solution correcte pour la pondération. En effet, les artéfacts de la modélisation pour la maquette de LAI=1.2 (Figure 18) sont trop importants comparés aux autres pour une plage d'angle zénithaux entre 20° et 40°.

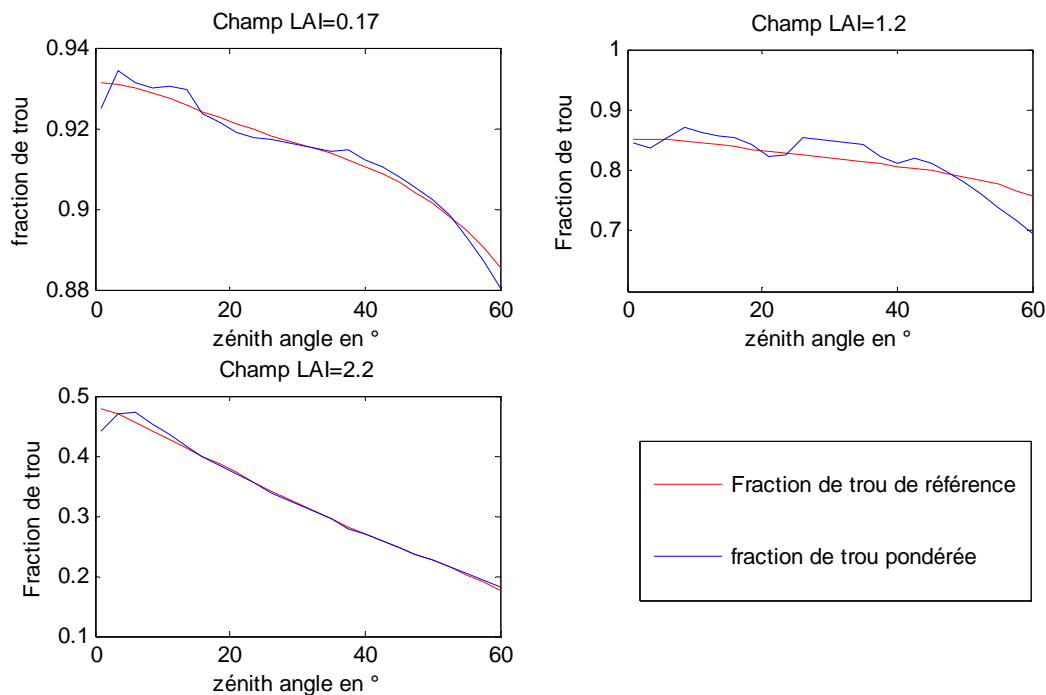


Figure 18 : Optimisation de la pondération des positions pour 5 positions dans l'inter rang pour différents LAI.

L'algorithme d'optimisation a donc été appliqué aux deux champs avec un LAI de 0.17 et 2.2, afin de trouver une pondération optimale unique, ne dépendant ni du LAI, ni de l'angle zénithal (Figure 19).

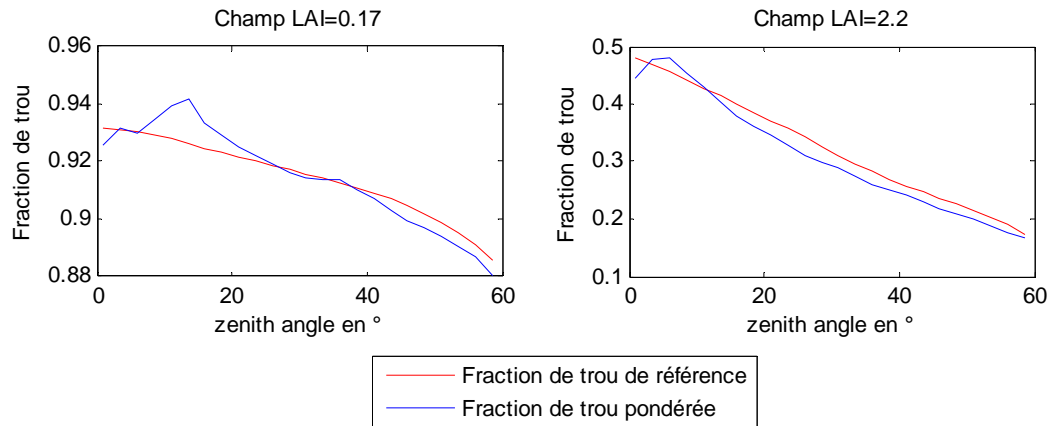
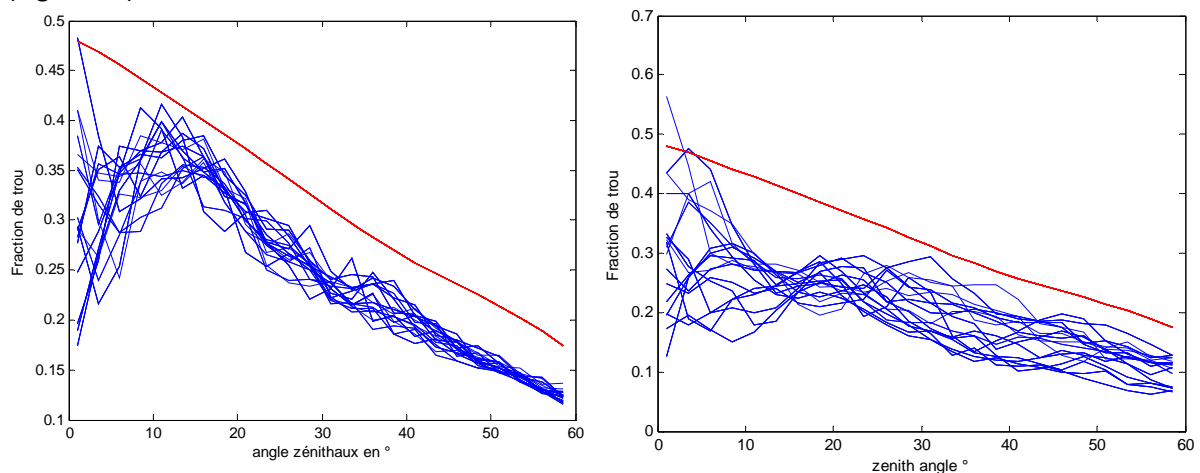


Figure 19 : Optimisation de la pondération.

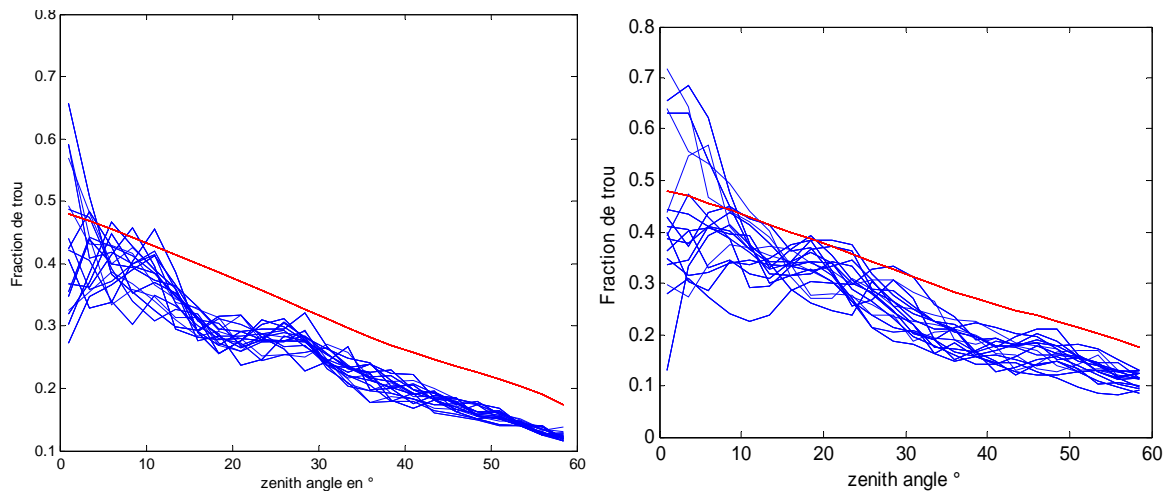
Cette pondération permet d'appliquer un poids à chaque position du transect d'un champ de maïs quelconque, et dont on ne connaîtrait pas le LAI. On se rend compte que l'erreur est assez faible entre la fraction de trou pondérée et la fraction de trou de référence.

6. Validation des résultats

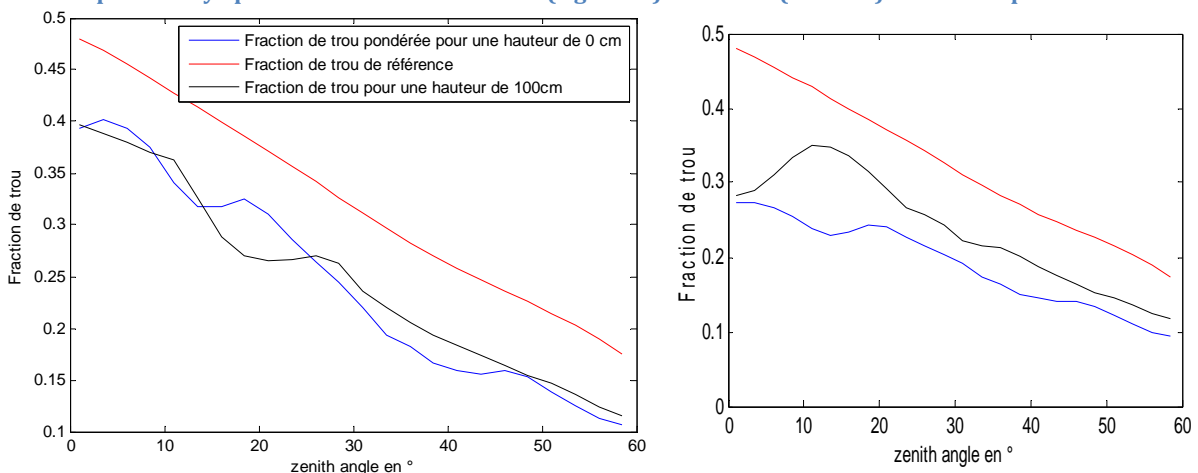
Afin de valider ces résultats, la génération d'images selon un échantillonnage en transect comportant 5 positions dans l'inter rang de maïs était nécessaire. Etant donnée la taille du champ initiale, et afin de respecter les conditions réelles, il a fallu agrandir la maquette initiale afin de séparer d'une distance suffisante les images. En effet, les images sont espacées d'un mètre, la maquette est générée en disposant les pieds déjà existant aléatoirement dans la maquette agrandie. 36 transects de 5 positions dans la maquette sont générés. La fraction de trou monodirectionnelle trouvée par Can-Eye pour chaque image du transect puis pondérée selon sa position dans le rang (Figure 20).



a. Evolution de P_o non pondérée en fonction de l'angle zénithal de visée pour 36 transects simulés et traités par Can-Eye pour une hauteur de 100cm (à gauche) et de 0 cm (à droite) et un champ de LAI=2.2.



b. Evolution de P_o pondérée en fonction de l'angle zénithal de visée pour 36 transects simulés et traités par Can-Eye pour une hauteur de 100cm (à gauche) et de 0 cm (à droite) et un champ de LAI=2.2



c. Evolution de P_o moyenne pondérée en fonction de l'angle zénithal de visée (à gauche) et de P_o moyenne non pondérée (à droite) pour une hauteur de 100cm (en noir) et de 0 cm (en bleu) et un champ de LAI=2.2

Figure 20 : Effet de la configuration du capteur et de la pondération sur la relation $P_o = f(\text{angle zénithal})$.

Les figures 20 a. et b. nous montrent que l'échantillonnage en transect est satisfaisant puisque malgré un décalage, la fraction de trou, pour des angles zénithaux dépassant les 15°, est proche de la valeur de référence. Cela corrobore le calcul de la fraction de trou selon la méthode de Miller-Lang (1986) qui ne prend en compte pour le calcul de la fraction de trou que des valeurs d'angles dépassant les 20°.

La variabilité spatiale cause une dispersion des valeurs de la fraction de trou pour les photos par-dessous, avec une hauteur du capteur de 0 cm au-dessus du sol plus importante que pour une prise de vue par-dessus, avec une hauteur de 100 cm au-dessus des plants. Dans la première configuration, le capteur est dans le champ, donc plus susceptible d'être recouvert partiellement par une feuille, cela peut se régler en traitant plusieurs transects à la fois et non 5 images seulement.

La pondération a été effectuée sur les cinq positions du transect pour des angles entre 22,5° et 60°. Cela permet de trouver une pondération plus juste puisqu'elle ne dépend pas des angles proches du nadir, pour lesquels la valeur de P_o est la plus bruitée. En comparant les figures 20 c, on

se rend bien compte que la pondération permet de corriger la fraction de trou pour des valeurs proche du nadir. Il reste toutefois un décalage entre la fraction de trou pondérée et la fraction de trou de référence qu'il faudrait réussir à corriger.

Toutefois, pour l'expérimentateur, la réalisation d'un transect avec des positions fixes est plus facile à réaliser qu'un échantillonnage aléatoire. Une démarche pour l'échantillonnage et l'estimation du LAI pourrait être :

- deux, voire trois transects composés de 5 images parmi des rangs différents afin d'intégrer la variabilité spatiale de la zone de mesure
- pondération des positions afin d'établir une relation moyenne $P_o = f(\theta)$ non biaisée
- Estimation du couple (LAI, ALA) par Can Eye, en minimisant l'écart entre valeurs simulées par l'équation 1(chapitre II.1) et valeurs de $P_o = f(\theta)$ calculées à partir des photos

Conclusion :

Malgré des objectifs remaniés au vue des verrous levés au fil du stage, l'établissement d'un protocole d'échantillonnage a été possible et l'influence de quelques paramètres du capteur tels que la hauteur de prise de vue et le nombre de photos prises sur la parcelle a pu être testée. Cependant, la durée ne m'a pas permis d'aller au bout de certains problèmes que j'aurais bien voulu résoudre comme l'optimisation plus fine de la pondération, l'élimination des artefacts lors de la modélisation de la fraction de trou en fonction de la distance au rang.

Toutefois, cela m'a permis de vérifier quelques points théoriques, comme l'évolution de la fraction de trou à travers l'inter rang, qui ont permis d'établir un protocole. De plus, ma mission était très enrichissante et intéressante puisque j'ai découvert le monde agronomique en particulier, en participant une journée à une expérimentation. Au vue de la durée du stage, l'acquisition des bases pour le calcul de la fraction de trou et du LAI devait être rapide afin de réussir à interpréter les résultats obtenus, et exploiter le code déjà existant en vue de son amélioration. Les résultats obtenus ont remis en cause le protocole d'échantillonnage existant et ont permis de soulever beaucoup d'interrogations.

Les perspectives pour la suite de ce stage sont de déterminer l'influence de certains paramètres du capteur lors de l'acquisition. Toutefois, avant cela, il est nécessaire d'améliorer la modélisation de l'évolution de la fraction de trou dans l'inter rang, et ainsi essayer de mieux comprendre et d'éliminer les artefacts qui ont une influence sur la valeur de pondération. Il se pourrait alors que l'algorithme d'optimisation nous permette d'obtenir une pondération plus efficace que celle trouvée.

Annexe I : Estimation des fractions de trou sur les maquettes tri-dimensionnelles de couvert végétal à partir d'images hémisphériques simulées par PovRay et traitées avec CAN-EYE.

Annexe II : Fonctionnement de Can-Eye

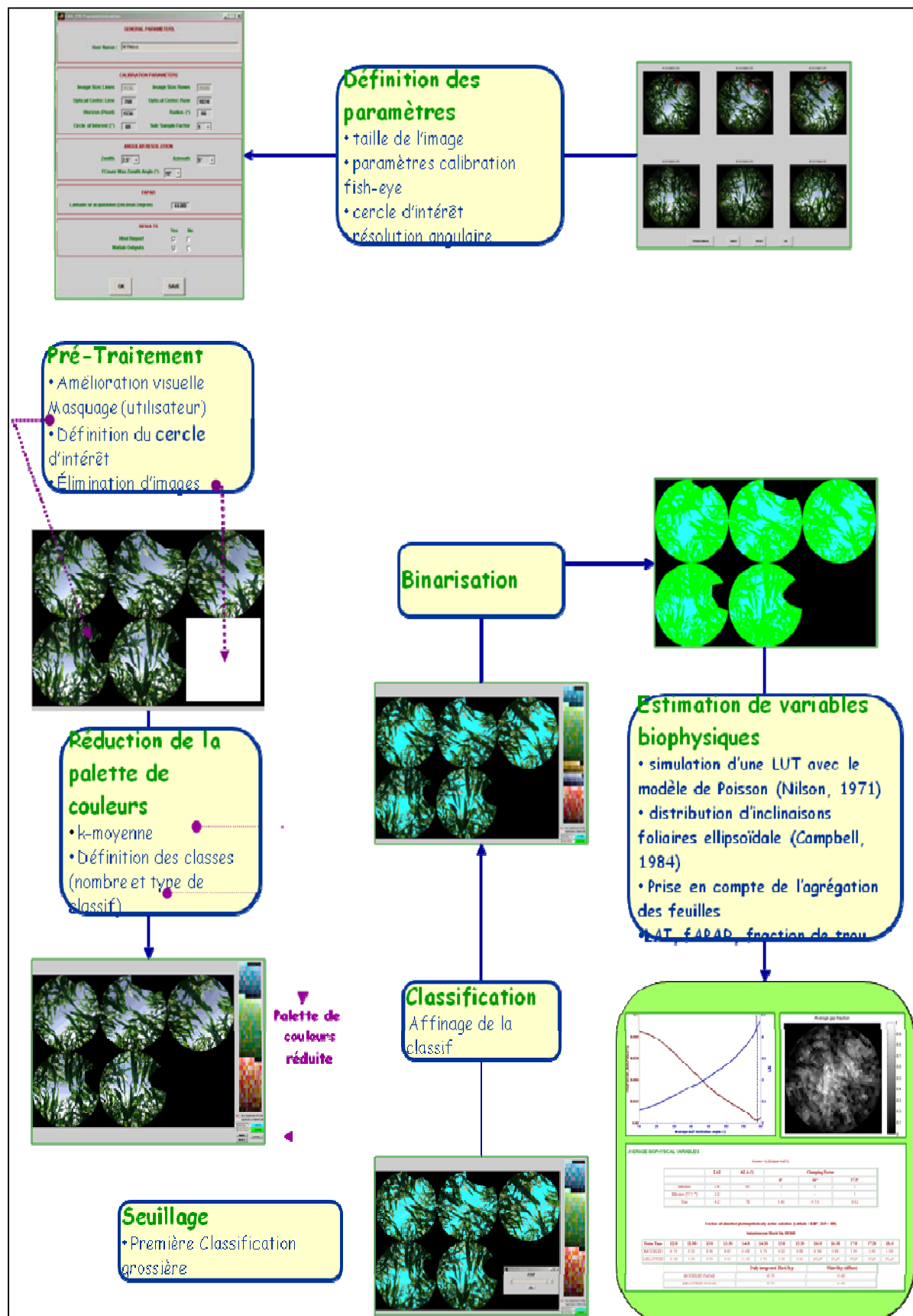


Table des illustrations:

Figure 1. Utilisation de Monogap pour le calcul de la fraction de trou de référence des maquettes tri-dimensionnelles.	7
Figure 2 : Comparaison images champ simulé et images hémisphériques expérimentales.....	8
Figure 3. Image d'un milieu turbide simulé, acquise avec un objectif hémisphérique à deux hauteurs de prise de vue (à droite : 0 cm, visée par en-dessous, à gauche : 100 cm, visée par au-dessus).....	9
Figure 4. Fraction de trou monodirectionnelle estimée par CAN-EYE pour différentes hauteurs de prise de vue (bleu et noir), et un échantillonnage aléatoire (vert foncé et tiret rouge) valeur estimée par monogap sur la maquette tri-dimensionnelle (vert) et valeur théorique de la loi de Poisson (rouge).....	9
Figure 5. Exemple d'images hémisphériques simulées par Pov-Ray sur un champ de maïs de LAI=2.2 à une hauteur de 100cm (appareil photo dirigé vers le sol) à gauche et 0cm (appareil photo dirigé vers le ciel) à droite.....	10
Figure 6. Echantillonnage spatial réalisé sur les maquettes de maïs.....	10
Figure 7. Fraction de trou bidirectionnelle de la moyenne des images (prise de vue 100 cm au dessus du champ) pour un échantillonnage régulier.	11
Figure 8. Schéma d'échantillonnage aléatoire	11
Figure 9. Fraction de trou bidirectionnelle de la moyenne des images (prise de vue 100 cm au dessus du champ) pour un échantillonnage aléatoire.	12
Figure 10 : Influence du nombre d'images et de la hauteur sur la fraction de trou.....	12
Figure 11 : Influence de la hauteur de prise de vue sur la fraction de trou pour un échantillonnage aléatoire.	13
Figure 12 : Position du capteur lors d'un transect à travers un rang de maïs.	14
Figure 13 : Evolution de la fraction de trou en fonction de la distance au rang de l'image et de l'angle de visée pour un champ de maïs de LAI=2.2.....	14
Figure 14 : a. Evolution de la fraction de trou selon la distance de prise de vue par rapport au rang, l'angle zénithal et la hauteur de prise de vue (superposition des nappes). b. Moyenne de la fraction de trou sur les hauteurs.	15
Figure 15 : Influence de la distance entre les points et par rapport au rang sur l'erreur entre la fraction de trou modélisée et de référence pour un angle de visée de 1° (considéré comme le nadir) et de 57.5°.	16
Figure 16 : Fraction de trou modélisée pour un champ de maïs dans différents stades de développement : LAI=0.17, LAI=1.2 et LAI=2.2.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 17 : Valeur de la pondération en fonction de l'angle et de la position dans le rang pour les différents LAI vu précédemment.	18
Figure 18 : Optimisation de la pondération des positions pour 5 positions dans l'inter rang pour différents LAI.	18
Figure 19 : Optimisation de la pondération.	19
Figure 20 : Effet de la pondération sur les positions pour un échantillonnage en transect.	20

Références:

Estimation of leaf area and clumping indexes of crops with hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 644-655. Demarez, V., Duthoit, S., Baret, F., Weiss, M., & Dedieu, G. (2008).

Accuracy assessment of fraction of vegetation cover and leaf area index estimates from pragmatic methods in a cropland area. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 2685-2704. Verger, A., Martinez, B., Camacho-de Coca, F., & Garcia-Haro, F.J. (2009).

CAN-EYE : un logiciel de traitement d'image pour l'estimation de l'indice foliaire. In, *Le cahier des techniques de l'INRA. Numéro spécial. Pratiques et outils de mesure des rayonnements naturels dans les domaines visible, solaire et infrarouge* (pp. 159-166). Weiss, M., Baret, F., de Solan, B., Demarez, V., & Bertrand, N. (2008).

Methods for in situ leaf area index measurement, part II: from gap fraction to leaf area index: retrieval methods and sampling strategies. *Agric. For. Meteorol.*, 121, 17-53. Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., & Jonckheere, I. (2004).

Kinetics of leaf extension in maize: Parameterization for two tropically adapted cultivars planted on two dates at Gatton(2007) C.J. Birch, B. Andrieu , C. Fournier , C. Kroesen.

Sensitivity of gap fraction to maize architectural characteristics based on 4D model simulations. Raul Lopez-Lozano, Frédéric Baret, Michael Chelle, Nadia Rochdi, Marisa Espana(2007)

Lang, A.R.G. (1986). Leaf area and average leaf angle from direct transmission of sunlight. *Aust. J. Bot.*, 34, 349-355