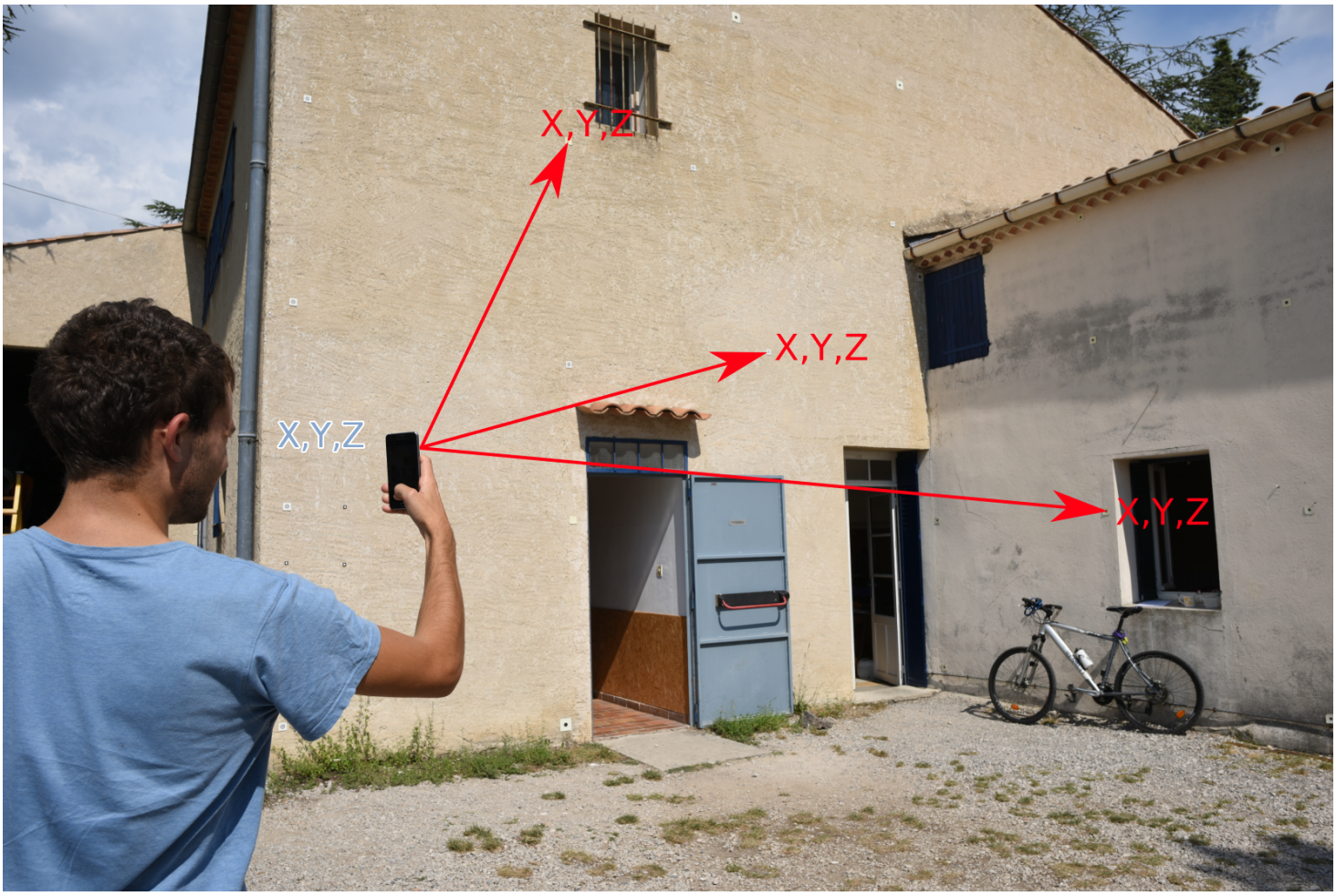
Étude Préalable pour une Application de Positionnement par Photogrammétrie



Étude Préalable pour une Application de Positionnement par Photogrammétrie

1 Introduction 3
1. Mise en contexte 3
2. Reformulation du sujet 3
2 Calibration 3
1. Calibration et distorsion: définition 3
2. Pertinence de la calibration 4
3. Plusieurs moyens d'implémenter la calibration 5
1. Calcul de la calibration localement ou sur serveur distant 5
2. Calibration générique à partir d'une base de données 6
3 Distance d'un plan passant par un segment et parallèle à deux photos parallèles dont on connaît l'interdistance (et qui sont supposées être corrigées de la distorsion) 6
1. Principe applicatif (que fait l'utilisateur), et géométrique (formule) 6
2. Implémentation informatique (comment nous avons automatisé le calcul pour les tests) 7
3. Mesure d'incertitude 7
3.1.1 Formule analytique 7
3.1.2 Confrontation de la formule à des expérimentations terrain (protocole expérimental, résultat précision) 9
3.2 Idées à implémenter dans l'application smartphone 11
4 Mesures sur le plan par homographie 12
1. Principe général 12
2. Implémentation informatique pour les tests 13
3. Mesure expérimentale des incertitudes 13
4. Idées à implémenter dans l'application smartphone 14
5 Détermination d'un point inconnu à partir de 3 clichés pris depuis des points connus, en voyant un quatrième point connu 15
1. Principe applicatif (que fait l'utilisateur), et géométrique 15
2. Implémentation informatique 16
3. Mesure d'incertitude de façon expérimentale (protocole, résultat précision) 16
4. Idées à implémenter dans l'application smartphone 16
6 Relèvement P3P: Positioning per Three Point 16
1. Principe géométrique du P3P 16
2. Implémentation informatique 20
3. Mesure d'incertitude de façon expérimentale 20
4. Idée à implémenter dans l'application smartphone 20
7 Idées générales pour le développement de l'application smartphone 20
8 Conclusion 21
1. Récapitulatif des différentes méthodes photogrammétrique 21
2. Pertinence d'une application de positionnement par photogrammétrie par rapport à du GPS 21
9 Expérience personnelle 21
1. Répartition du travail 21
2. Retour d'expérience 22
3. Remerciements 22

1 Introduction

1. Mise en contexte

Lors de nos usages quotidiens (déplacements, GPS, bricolage…) nous pouvons utiliser des mesures de relèvement pour nous positionner, et d'intersection afin de positionner et mesurer des objets (longueur d'un mur, hauteur d'un arbre…). Il n'est pas toujours nécessaire d'avoir une extrême précision, mais il est souvent utile de connaître, en plus de l'estimation de la mesure, l'estimation de sa fiabilité.

Avec la mise en route de la constellation Galileo, et le développement de nouveaux GNSS plus performants (Récepteur GNSS avec support double-fréquence), la précision du positionnement par smartphone s'affine de plus en plus. Pour les mesures d'intersection, des appareils tels que les tachéomètres ou lidar permettent d'obtenir avec haute précision la position des points que l'on veut mesurer.

Une autre façon de réaliser ces mesures est de faire appel à la photogrammétrie (mesure sur des photographies). Cette technique est moins précise mais plus simple à mettre en œuvre et moins coûteuse.

2. Reformulation du sujet

Le projet vise à préparer les fonctionnalités géométriques d'une application pour smartphone permettant d'effectuer à la fois des relèvements et des intersections à partir des photos prises par la caméra du téléphone.

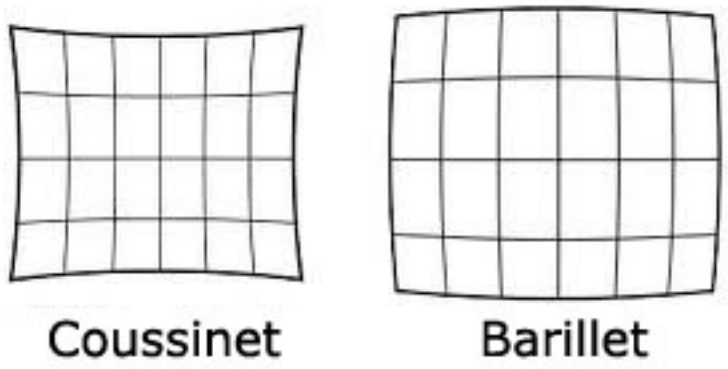
Les objectifs du projet sont les suivants :

- définir des méthodes géométriques de **relèvement** et **d'intersection**
- déterminer la précision des méthodes grâce à des protocoles de tests à concevoir
- préparer un cahier des charges pour le développement futur de l'application

2 Calibration

1. Calibration et distorsion: définition

La calibration (ou étalonnage) est une étape primordiale et préalable à toute mesure photogrammétrique. Elle a pour principal intérêt de déterminer la distorsion d'une image, et donc d'établir les paramètres de sa correction.
La distorsion est la déformation d'une image par rapport à son modèle théorique parfait, du fait des imperfections du système optique. Pour les capteurs censés réaliser une perspective conique, il existe deux principaux types de distorsion qui se distinguent par la forme de leur déformation: si l'image est déformée de telle sorte que les coins sont attirés vers l'intérieur, alors la distorsion est dite en barillet. Tandis que si les coins sont poussés vers l'extérieur, la distorsion est appelée distorsion en coussinet.



Deux types de distorsion

Nous avons souhaité déterminer si l'appareil photo d'un smartphone subit une distorsion non-négligeable afin de savoir s'il était nécessaire de mettre en place une méthode d'étalonnage pour l'utilisateur.

2. Pertinence de la calibration

Nous avons déterminé la distorsion de plusieurs smartphones de même modèle. Il s'est avéré que sur un capteur de 3456x4608 pixels, la distorsion maximale, se situant au coin supérieur gauche de l'image, serait de 128 pixels. Ce qui signifie qu'il y a un écart de 128 pixels entre le point de l'image distordue et ce même point dans l'image corrigée de la distorsion.
On a considéré la distorsion maximale dans ce coin car nous avons moyenné les coordonnés du PPS sur quatre étalonnage, et il s'avère que le PPS moyen se situe dans la partie inférieure droite. Ainsi le point le plus éloigné du PPS est bel et bien le point de coordonnée (0,0).
Le schéma ci-dessous présente les quatre calibrations effectuées sur des téléphones Hisense C30 Rock. Ils sont tous de même modèle, et nous supposons, en conséquence, qu'ils devraient tous posséder le même système optique. Nous avons nommé les calibrations en fonction d'un chiffre *n* et d'un indice *i* : n_i
Le premier chiffre est lié au numéro de l'appareil calibré, et le chiffre en indice correspond à la i-ème calibration.

	xPPS	yPPS		
	1752.2979	2365.7983		
	1741.2482	2354.1583		
	1659.9446	2282.5747		
	1693.8123	2283.2702		
Moyenne	1711.8258	2321.4504		
Distance du PPS au point (0,0)	2884.3508			
Numéro de l'appareil	HISENSE 3_1	HISENSE 3_2	HISENSE 5_1	HISENSE 5_2
Distance par rapport au PPS = 2880	117.1145	114.49775	152.28211	128.46579
Moyenne de l'écart en pixel	128.09004			

Distorsion maximale moyenne entre 4 calibrations du smartphone Hisense C30 Rock

Cette valeur de distorsion n'est pas négligeable, surtout au vu des incertitudes qu'un tel écart induirait sur nos futures mesures. Les incertitudes dues à la distorsion du cliché pour les différentes fonctionnalités de l'application seront présentées plus en détail dans la suite du rapport.
Nous devons donc prendre en compte la calibration dans l'application afin de corriger les images de la distorsion. Pour y parvenir, nous avons envisagé différents cas de figure d'implantation de la calibration par la future application smartphone de positionnement par photogrammétrie.

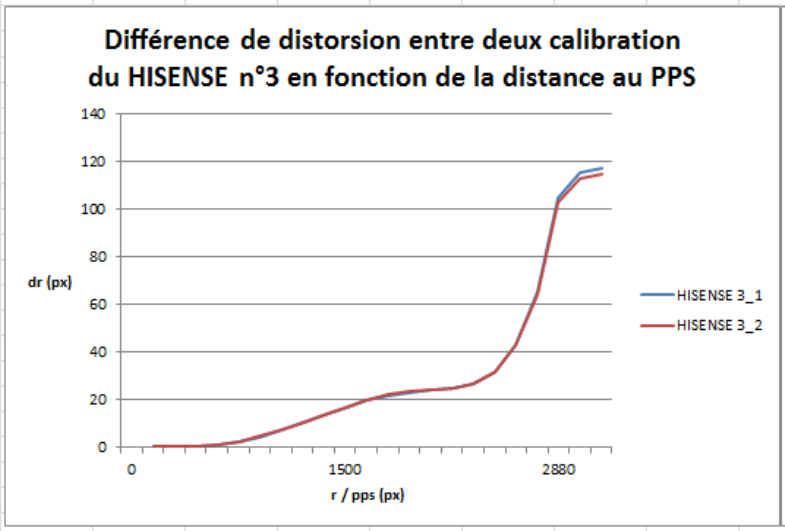
3. Plusieurs moyens d'implémenter la calibration

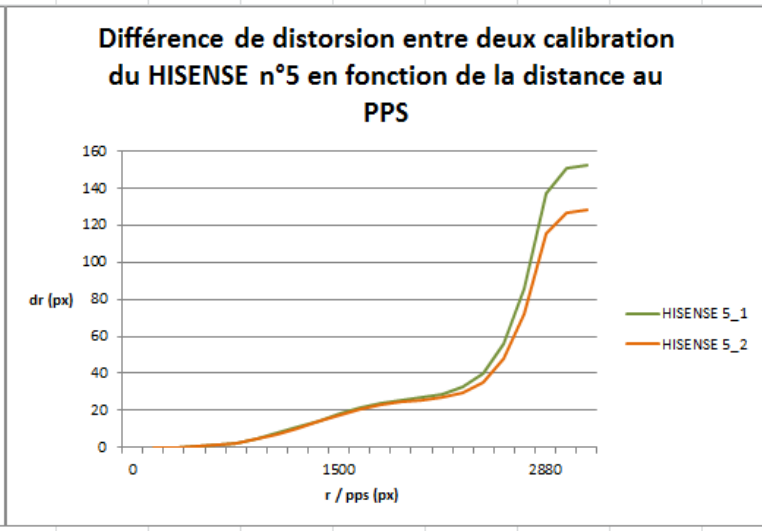
Deux moyens sont envisageables pour mettre en place l'étalonnage de l'appareil au sein de l'application pour smartphone.

1. Calcul de la calibration localement ou sur serveur distant

Une première solution pour corriger l'appareil photo de la distorsion est de calculer sa calibration. Il est possible de déterminer la calibration d'un appareil à partir de plusieurs clichés. Notre utilisateur prendra donc des clichés selon un procédé que l'on pourra imaginer simple et compréhensible.
Le calcul de la calibration pourra, quant à lui, être effectué localement sur l'appareil de l'utilisateur mais cela nécessiterait beaucoup de ressource informatique. Pour des raisons d'économie de batterie et d'éventuelles surchauffes de téléphone, il est préférable d'adopter une autre stratégie. Cela consisterait à envoyer les photos à un serveur via le réseau internet dont la tâche serait de calculer la calibration correspondante et de renvoyer un fichier de calibration à l'utilisateur.
Plusieurs étalonnages d'un même appareil ont été réalisés d'affilée pour vérifier si le calcul de calibration ne nous donnait pas des résultats très différents.
Toutes nos calibrations ont été calculées grâce à MicMac. Le fichier de calibration fourni par MicMac nous renseigne sur la longueur de la focale, les coordonnées du PPS et du PPA (Point Principal d'Autocollimation), ainsi que les coefficients du polynôme de distorsion.

Différence de distorsion entre calibration de même appareil en fonction de la distance du PPS





Bien que le nombre de calibrations présenté soit faible, de nombreux autres étalonnages ont été réalisés tout au long de nos acquisitions avec des smartphones qui sont supposés avoir une focale unique. Pourtant, nos différentes calibrations nous ont donné parfois des valeurs de focale différentes. Nos calibrations semblent donc très instables.
L'expérience nous montre néanmoins que l'on peut faire des calibrations très similaires en prenant des précautions particulières (cas des calibrations du Hisense 3).
Il apparaît donc qu'un étalonnage générique ne peut s'appliquer car la calibration semble spécifique à la prise de vue ou paraît trop variable pour qu'un modèle corrige correctement la distorsion.
Cependant, s'il est compliqué d'implémenter un calcul de calibration au sein de l'application ou de mettre en place un serveur de calcul, les développeurs peuvent toujours proposer un étalonnage générique en fonction du modèle du capteur optique.

2. Calibration générique à partir d'une base de données

La deuxième méthode pour proposer une calibration à l'utilisateur est d'utiliser une base de données disposant d'une calibration générique en fonction de l'optique utilisée. Cette base de données pourra être présente localement ou sur serveur, mais devra impérativement être mise à jour.
Des bases de données recensant les spécificités de nombreux appareil existent déjà. (Par exemple, Lensfun.net propose une base de données des caractéristiques des lentilles d'appareil photo).

3 Distance d'un plan passant par un segment et parallèle à deux photos parallèles dont on connaît l'interdistance (et qui sont supposées être corrigées de la distorsion)

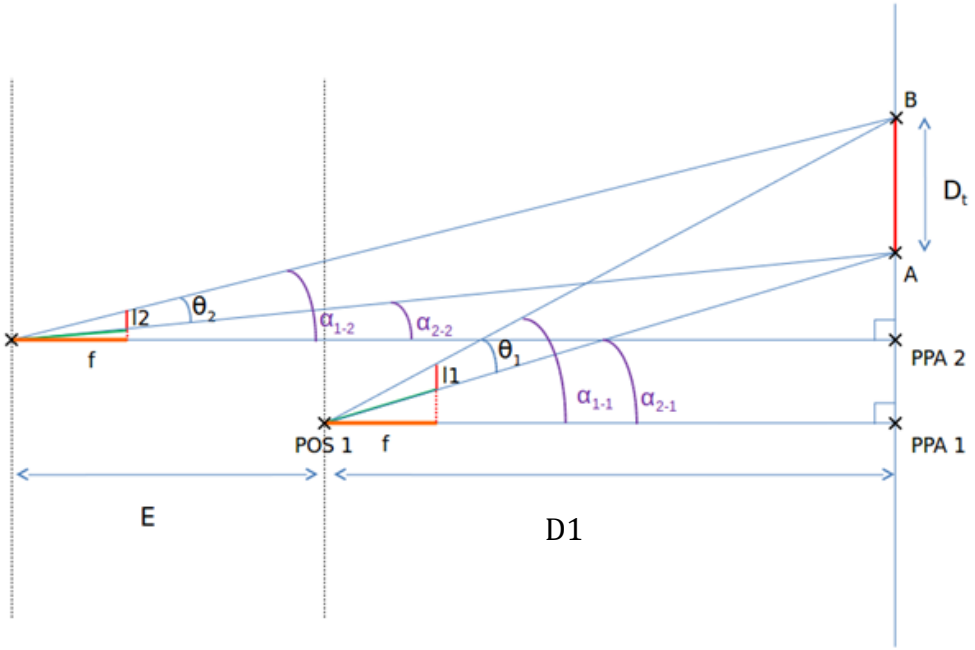
1. Principe applicatif (que fait l'utilisateur), et géométrique (formule)

On souhaite pouvoir obtenir la distance à un plan. Pour cela on place l'appareil photo parallèlement à ce plan et on photographie deux détails terrain A et B contenus dans ce plan. On note Dt la longueur du segment terrain AB.
On prend une première photo à une distance D1, on calcule la distance sur le capteur en pixels de l'image du segment AB. Puis on se déplace d'une certaine distance en restant parallèle au plan; une fois le déplacement effectué on prend une nouvelle photo à une distance D2 du mur sans changer la focale de l'appareil, et on y calcule la nouvelle distance en pixels qui sépare les images de A et B.

On estime que l'on est capable de pointer très précisément ces deux points dans les deux images. Si note l1 et l2 les longueurs (en pixels) des images du segment AB dans les deux photos, on obtient alors par application directe du théorème de Thalès:

$$D1 = \frac{D2 - D1}{\frac{l1}{l2} - 1} \quad (1) \qquad Avec\ D2 = D1 + E$$

(Démonstration en annexe : Dem 1)



Notons qu'il n'est pas nécessaire pour cette fonctionnalité de connaître la focale de l'appareil. Cependant si la focale est connue, on peut en plus calculer des longueurs sur le plan à partir de l'image. La formule pour un détail AB de longueur l sur la photo 1 sera alors :

$$AB = \frac{l.D1}{f}$$

2. Implémentation informatique (comment nous avons automatisé le calcul pour les tests)

Pour calculer les distances à partir des pointés nous avons créé une routine Excel calculant la distance entre la première image et le plan, et aussi les incertitudes en fonction des formules présentées dans la partie suivante.

3. Mesure d'incertitude

3.1.1 Formule analytique

Bien entendu, dans la réalité de l'utilisation de l'application par l'utilisateur, de nombreuses sources d'erreur et d'imprécision vont entrer en ligne de compte. Primo, la distance (algébrique) E=D2-D1 entre les deux images sera entachée d'une imprécision dE qu'il faudra estimer (voir plus loin). Secundo, il est improbable que l'utilisateur parvienne à viser au pixel près le même détail terrain dans les deux images. Il en résulte une incertitude sur les longueurs l1 et l2 que l'on mesure dans l'image, qui est aggravée par l'erreur sur la non-coplanarité entre le plan visé et le capteur de l'appareil photo qui se répercute également sur les mesures de l1 et l2.
En appliquant la formule de propagation des variables à l'équation (1), on trouve, après simplifications:

$$dD^2 = \left(\frac{l_2}{l_1 - l_2}\right)^2 dE^2 + E^2 \left[\left(\frac{l_2 dl_1}{(l_1 - l_2)^2}\right)^2 + \left(\frac{l_1 dl_2}{(l_1 - l_2)^2}\right)^2\right] \quad (2)$$

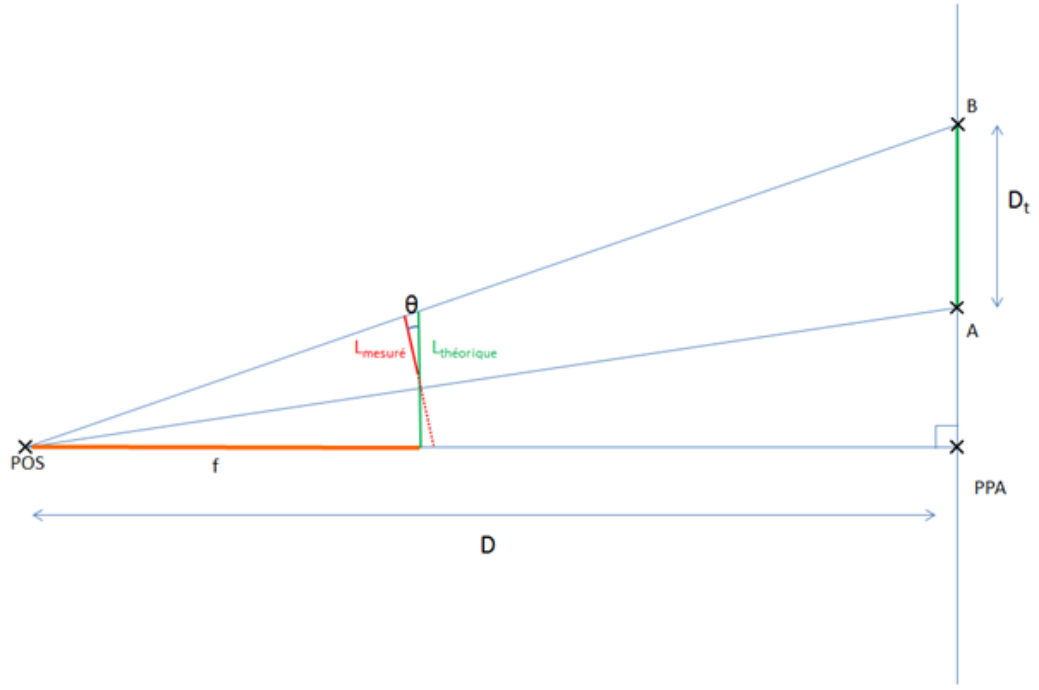
On décompose ensuite les imprécisions sur les lectures l1 et l2 de la façon suivante :

$$dl = dl_{pointé} + dl_{rotation}$$

Où $dl_{pointé}$ est l'incertitude due aux erreurs de pointé sur les détails et $dl_{rotation}$ celle liée au petit écart angulaire entre le plan visé et celui du capteur , l'utilisateur pouvant très difficilement maintenir voir même positionner son téléphone dans un plan strictement parallèle à la surface visée. On montre (cf annexe Dem 2) que la formule reste valable même en cas de non parallélisme à condition de corriger les lectures sur le capteur selon la formule suivante :

$$dl_{rotation} = l_{mesuré} - l_{corrigé} = l_{mesuré}(1 - f(\theta)) \quad (3)$$

Où $f(\theta) = \frac{l_{theorique}}{l_{mesures}} = \sqrt{1 - \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)^2}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}}$ avec $\frac{\alpha}{2} = \arctan\left(\frac{l}{f}\right)$ où l est la longueur du détail lu sur le capteur en mm, f la focale utilisée et θ l'angle entre la surface visée et le plan du capteur de l'appareil photo. (Démonstration 2 en annexe)



Si l'on considère que chaque pointé est entaché d'une erreur dp (en pixels) sur la valeur horizontale et sur la valeur verticale, l'incertitude liée au pointé sur une mesure de distance l sur le capteur vaut :

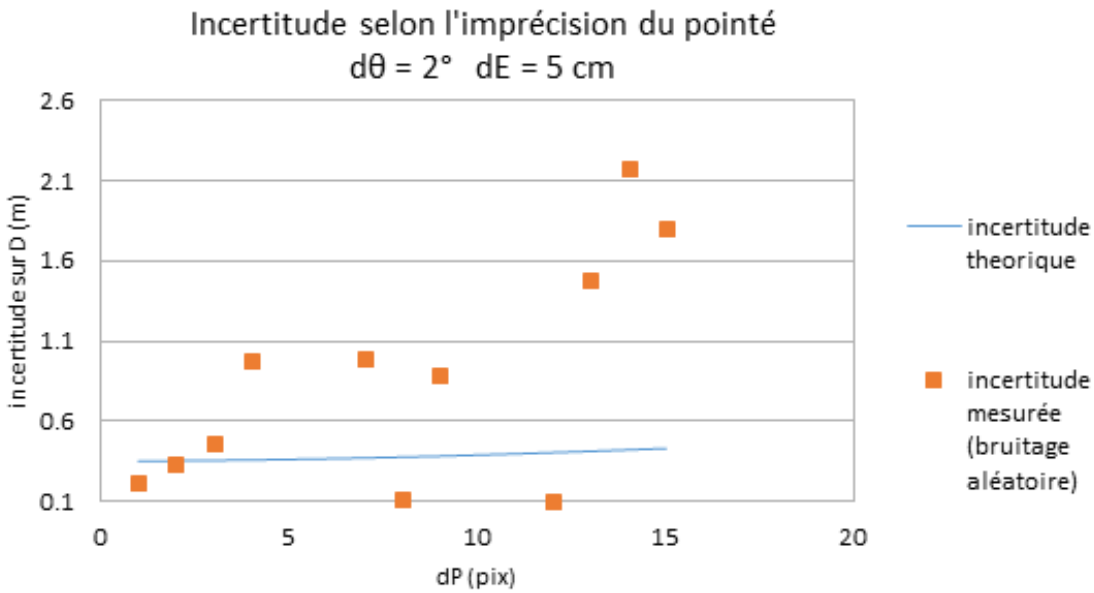
$$dl_{pointe} = l * dp * \sqrt{\frac{1}{x_1^2} + \frac{1}{x_2^2} + \frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2}}$$

3.1.2 Confrontation de la formule à des expérimentations terrain (protocole expérimental, résultat précision)

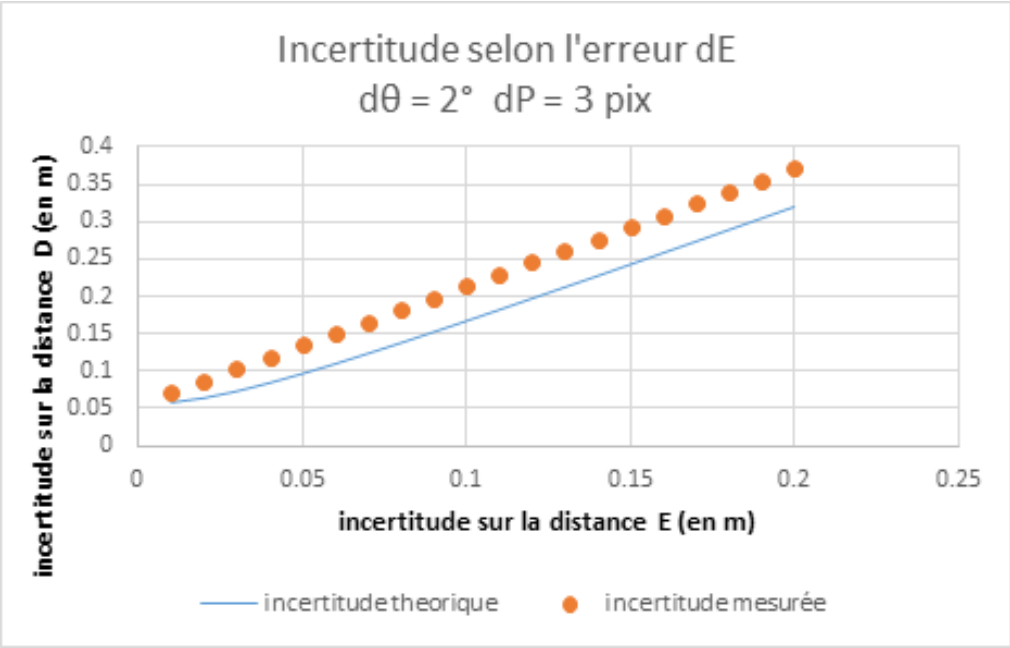
3.1.2.1 À courte distance

Pour ce premier test, on s'est placé à 3m du tableau en se reculant de 2 m entre les deux photos, et nous avons trouvé une distance de 3,19 m en appliquant la formule. Afin de chercher à déterminer les paramètres cruciaux dans l'incertitude de ce résultat, nous avons fixé les valeurs d'incertitude sur deux paramètres et fait varier l'incertitude sur le troisième afin d'avoir une idée de l'impact de celle-ci sur la précision de la distance finale.

Voici l'évolution de l'incertitude en fixant à 5 cm l'incertitude sur la distance entre les deux photos et à 2 degrés le défaut de parallélisme entre le tableau et le capteur de l'appareil photo. Nous y avons superposé les résidus que nous obtenons en faussant volontairement nos pointés (avec une amplitude d'écart allant jusqu'à 5 pixels).

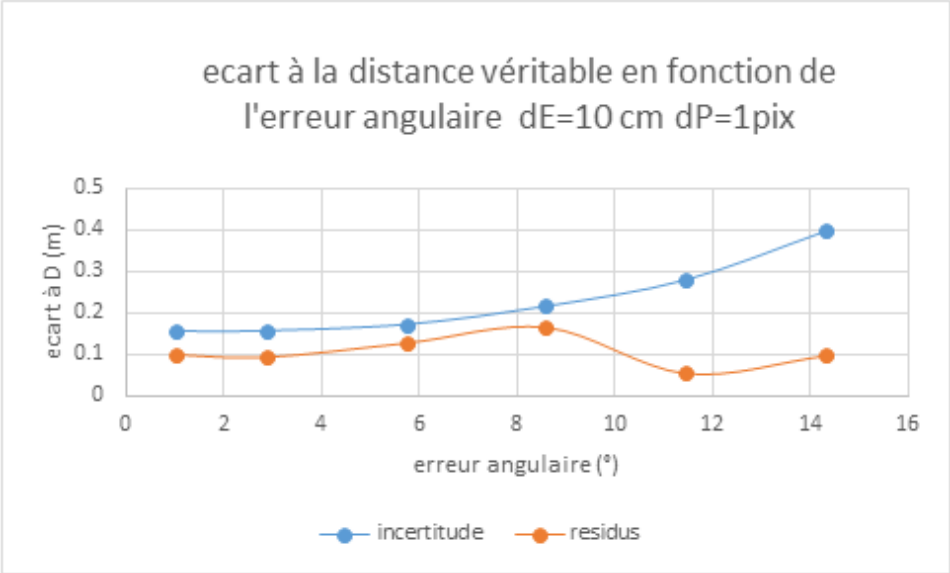


On remarque que même si l'incertitude théorique varie assez lentement avec l'erreur de pointé, dans la pratique, quand le rapport des longueurs est proche de 1, elle engendre un comportement très chaotique de l'incertitude dD. Aussi on en déduit qu'il est primordial de pouvoir pointer très précisément dans les deux images, ce qui implique notamment de corriger en amont la distorsion sauf si l'utilisateur parvient à faire en sorte que les deux extrémités du segment visé se trouvent dans les mêmes zones du capteur entre les deux photos.
Si on fixe les valeurs des imprécisions angulaires et de pointé à 2° et à 3 pixels respectivement, et que l'on fait varier dE dans la formule d'incertitudes (2), on obtient le graphique suivant :



On remarque que l'incertitude mesurée (obtenue en modifiant directement E dans la formule (1)) suit approximativement la courbe de l'incertitude théorique. Il semblerait donc que l'on puisse lui faire confiance. L'incertitude augmentant linéairement avec l'erreur sur la distance entre les deux prises de vues, il serait intéressant de pouvoir estimer précisément celle-ci, peut-être au moyen de l'accéléromètre du smartphone.

Afin d'évaluer l'impact de l'imprécision angulaire sur l'incertitude de la mesure, nous avons répété le protocole mis en place pour démontrer la formule liant l'erreur angulaire et l'erreur de lecture sur le capteur de l'appareil. Cependant cette fois nous avons déterminé pour chaque mesure d'angle non plus la longueur d'un segment sur le capteur mais la distance au mur. Pour ce faire, nous avons tracé un autre cercle à 5 m que nous avons également gradué pour conserver les angles. Pour chaque mesure nous avons mesuré le résidu qui est l'écart entre la distance donnée par la formule et la distance véritable (3m) ainsi que l'incertitude associée à la distance annoncée.



On remarque que pour de petites variations angulaires (<6°), l'impact du parallélisme est négligeable sur l'imprécision. De plus, plus l'utilisateur est proche de la surface visée, plus il lui est facile de placer son téléphone parallèle à la surface visée. On a d'ailleurs pu mesurer qu'à cette distance, l'erreur angulaire à 3m n'excède pas 1°. Il apparait donc que pour de faibles distances, le réglage du parallélisme ne soit pas un problème majeur.

3.1.2.2 À longue distance

Nous avons ensuite effectué des mesures sur le site des Mourres en utilisant les points référencés qui s'y trouvent. Nous avons cherché à mesurer la distance entre le point 1013 et un segment au sol se trouvant à quelques mètres devant le point 1003. Pour ce faire, nous avons pris deux photos à deux mètres d'écart. Nous avons trouvé une distance de 112m (les deux points sont éloignés de 123m en ligne droite). L'incertitude estimée par la formule est de 31m.
Comme dans le cas du tableau nous avons calculé les variations d'incertitude en fonction des différents paramètres et nous les avons comparées avec les résidus obtenus en bruitant les paramètres (cf Classeur Calc distance_2_plans.ods).

On remarque que les conclusions que nous avions tirées à faible distance restent valables à 100m. Cependant il est à noter qu'au départ nous avions sélectionné un segment très petit de l'image (une vingtaine de pixels) et obtenu un résidu de 30 m et une incertitude de plusieurs centaines de mètres. Cela nous a motivés pour reprendre une mesure en sélectionnant un plus grand segment, et ce sans modifier la distance E entre les deux prises de vue.
La question que l'on s'est alors posée était la suivante : si on avait gardé la première longueur, de combien aurait-il fallu se reculer pour obtenir un « meilleur résultat », c'est-à-dire un résultat entaché d'une incertitude moindre ? En utilisant la formule des incertitudes que nous avions trouvée, nous avons tenté de déterminer la distance idéale de recul pour chaque valeur de D et de de l1. Cependant les résultats que nous avons obtenus par le calcul étaient aberrants, en conséquence de quoi nous ne les exposerons pas dans ce document.
Enfin nous avons tenté de faire des mesures de distances de plusieurs centaines de mètres (en visant un nuage dans le ciel). Cependant, faute de pouvoir synchroniser des acquisitions présentant un dénivelé suffisant, nos résultats n'avaient pas le bon ordre de grandeur et les incertitudes associées étaient supérieures aux distances mesurées.

3.2 Idées à implémenter dans l'application smartphone

Les fonctionnalités que nous proposons d'ajouter à la fonction principale ont toutes pour but de réduire l'incertitude inhérente aux mesures et aux approximations mentionnées ci-dessus.

La première suggestion consiste en l'utilisation de l'accéléromètre du téléphone pour calculer la distance parcourue entre les deux photos. Cette méthode permettrait de réduire l'incertitude, mais ne fonctionne que si on se déplace perpendiculairement au plan mesuré, ou dans une direction connue par rapport à la perpendiculaire. La précision de l'accéléromètre est cependant elle-même à déterminer.

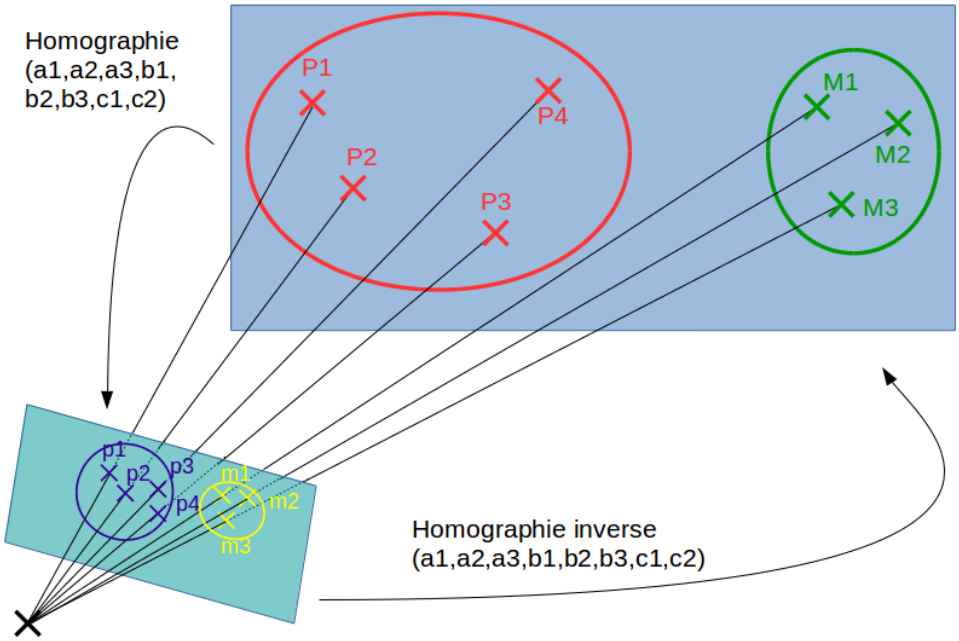
La seconde suggestion porte sur une détection automatique de cibles conçues au préalable (et imprimables par exemple, puis fixable) qui permettrait de réduire l'imprécision du pointé. L'utilisateur n'aurait alors qu'à choisir les cibles sur les photos (et cela pourrait être automatisé), et l'application choisira le pixel correspondant au centre de la cible sur l'image. Cette suggestion est applicable à l'ensemble des grandes fonctionnalités de l'application. Un premier script python de détection par couleur a déjà été écrit, mais ce script doit encore être complété et amélioré afin de détecter les blocs de pixels formant une cible.

Enfin les deux dernières propositions permettent de réduire l'incertitude due à l'erreur de parallélisme (bien que celle-ci est généralement très faible).
La première proposition suppose que le parallélisme avec l'axe orthogonal au plan est quasiment parfait. Alors, grâce à une cible représentant une base du plan (un axe vertical et un horizontal de même longueur), on peut reprendre la formule de la Dem 2 (cf. annexe) pour calculer l'écart angulaire puis pour corriger les longueurs calculées.
La seconde suggestion s'appuie sur le fait que si on vise un détail et qu'on tourne l'appareil horizontalement ou verticalement, la taille du détail sur l'image varie, mais présente un extremum si l'angle d'écart au parallélisme est 0.
On peut ainsi déterminer la position de parallélisme parfait.

4 Mesures sur le plan par homographie

1. Principe général

Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur de faire des mesures terrain sur un plan à partir d'une photo de celui-ci sur laquelle on voit un certain nombre de points connus.
Pour cela il faut pouvoir déterminer la fonction de passage du repère terrain au repère image. Il s'agit d'une homographie 2D dépendant donc de 8 paramètres. Pour déterminer ces paramètres, il faut donc un système à 8 équations indépendantes, soit 4 points d'appuis car chaque point donne 2 équations (points en 2D).



L'homographie s'exprime ainsi :

$$\begin{cases} x = \dfrac{a_1 X + a_2 Y + a_3}{c_1 X + c_2 Y + 1} \\ y = \dfrac{b_1 X + b_2 Y + b_3}{c_1 X + c_2 Y + 1} \end{cases}$$

Avec la formule des moindres carrés, on peut trouver les paramètres avec 4 points d'appuis ou plus pour plus de précision (cf. Dem 5 en annexe).
Ensuite, en résolvant le système (avec X et Y les inconnues), on peut retrouver les coordonnées de n'importe quel point sur le terrain à partir de ses coordonnées image (cf. Dem 6 en annexe).
En posant :

$$\lambda_1 = c_1 x - a_1,\ \mu_1 = c_2 x - a_2,\ \omega_1 = c_3 - x \quad \text{et} \quad \lambda_2 = c_1 y - b_1,\ \mu_2 = c_2 y - b_2,\ \omega_2 = b_3 - y$$

On obtient (dans le cas général où il n'y a pas de division par 0) :

$$\begin{cases} X = \dfrac{\omega_1 - \dfrac{\mu_1}{\mu_2}\omega_2}{\lambda_1 - \dfrac{\mu_1}{\mu_2}\lambda_2} \\ Y = \dfrac{\omega_1 - \lambda_1 X}{\mu_1} \end{cases}$$

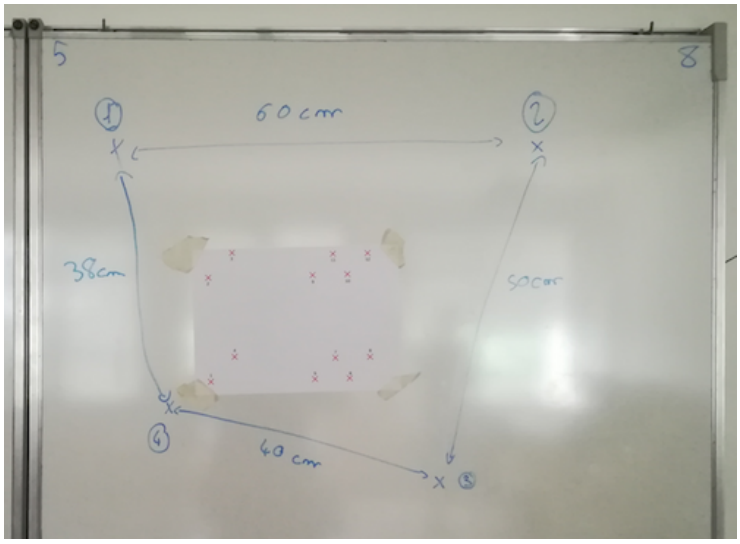
2. Implémentation informatique pour les tests

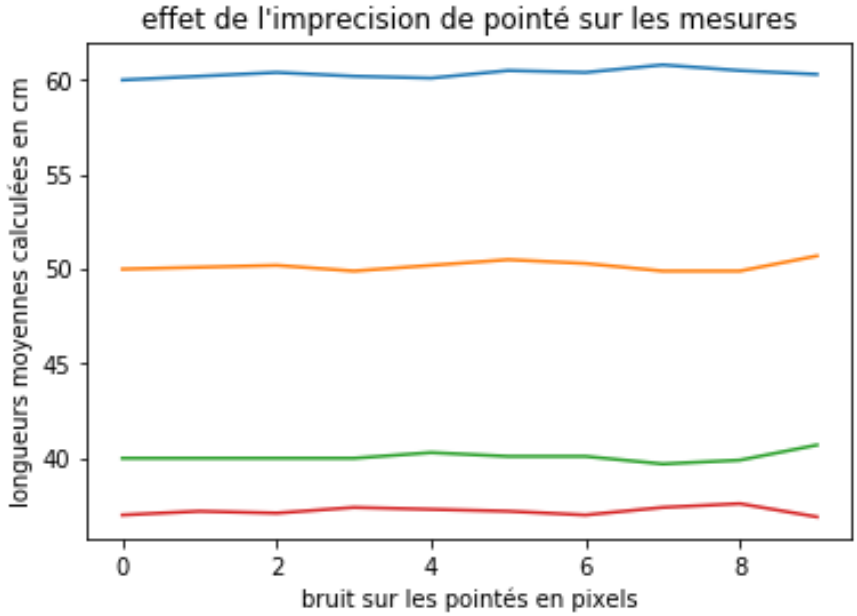
Pour calculer les homographies, nous avons écrit un script python lisant dans un document texte les coordonnées terrain et image des points d'appui, et dans un autre les coordonnées image des points à mesurer. Ce programme utilise les moindres carrés (non itératifs car l'équation implémentée est bien linéaire), puis calcule avec les paramètres les coordonnées des points à mesurer, avant d'écrire les distances entre les points dans un fichier texte.

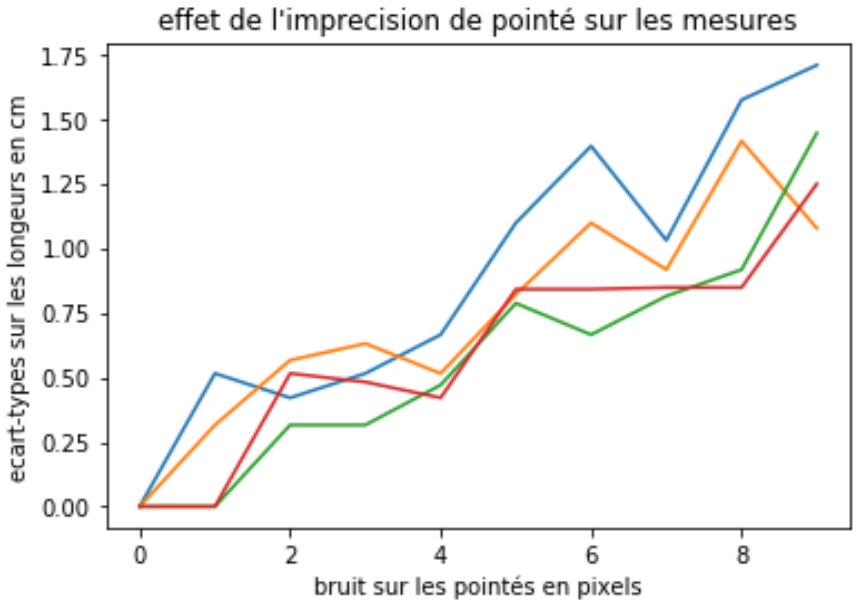
Par la suite nous avons créé un nouveau script fonctionnant de la même manière mis à part qu'il bruite les coordonnées images des points d'appuis et/ou des points de mesure aléatoirement. Ce script nous a permis de déterminer un modèle expérimental des incertitudes.

3. Mesure expérimentale des incertitudes

Nous avons appliqué un bruit aléatoire uniquement sur les coordonnées image des points d'appui et des mesures afin de pouvoir mesurer l'impact sur la précision finale de l'incertitude sur le pointé (moyenne = 0, amplitude variable allant jusqu'à 10 pixels). Pour ce faire, nous avons utilisé le plan du tableau et nous avons appliqué notre méthode pour calculer des longueurs que nous avons également mesurées à la règle afin d'avoir des résidus. Nous avons exécuté un script de notre invention et nous avons récupéré les moyennes et les écarts-types (en cm) des mesures bruitées pour chaque valeur de bruitage (en pixels):







Ainsi l'imprécision de pointé entraîne une hausse linéaire de l'incertitude qui reste toutefois modérée (moins de 2 cm).

En outre, nous avons pu mesurer que cette méthode donne en moyenne un résidus de 1 cm sur les distance, pour des photos prises à une distance de l'ordre 3m-5m, et ce pour des longueurs au tableau variant de 30 cm à 60 cm.

4. Idées à implémenter dans l'application smartphone

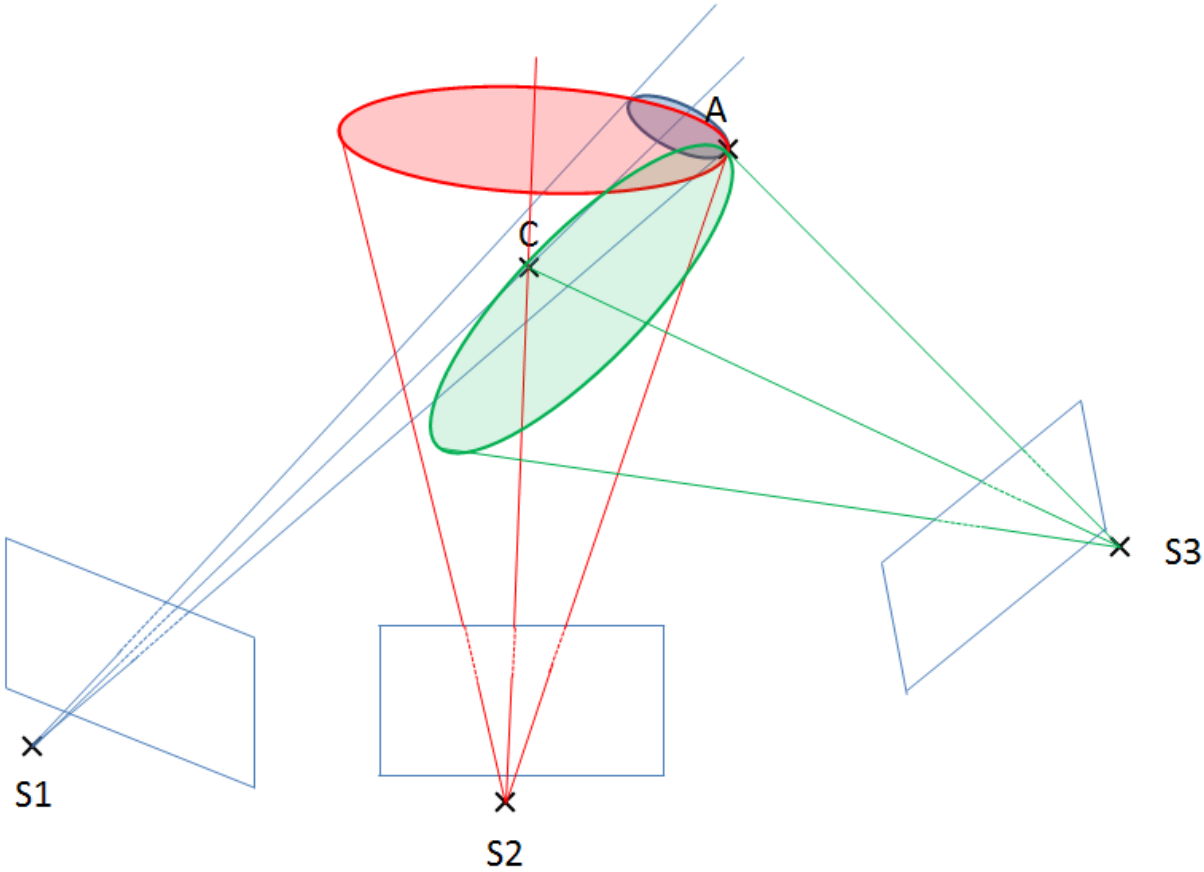
Comme pour les autres fonctionnalités déjà proposées, la suggestion de créer des cibles imprimables et fixables est applicable ici. La contrainte sur les cibles ici est qu'elles doivent être connues dans un référentiel local terrain. Pour cela, nous proposons l'utilisation d'un ensemble de cibles imprimables sur une même feuille, et dont les positions relatives serait déjà connues (un exemple de cible est fourni en annexe).

5 Détermination d'un point inconnu à partir de 3 clichés pris depuis des points connus, en voyant un quatrième point connu

1. Principe applicatif (que fait l'utilisateur), et géométrique

L'utilisateur connaît les coordonnées d'un détail du monde et souhaite obtenir celles d'un autre détail qu'il aperçoit. Il prend alors trois photos sur lesquelles apparaissent ces deux détails, de manière à les voir sous différents angles. A partir des coordonnés en pixels sur le capteur des détails du monde et de celles du PPA, l'application peut aisément déterminer les distances angulaires θ depuis les sommets de prise de vue entre les deux détails pour chacun des trois clichées.

L'utilisateur renseigne les coordonnées de prise de vue et celles du point connu. Pour chaque photo cela définit l'axe d'un cône de demi-angle θ et de sommet le sommet de prise de vue. Le point inconnu se trouve alors à l'intersection des trois cônes ainsi définis.



On peut alors écrire les conditions d'intersection de ces trois cônes (cf annexe).On obtient alors un système 6x6 que nous proposons de résoudre par linéarisation. Cela implique la donnée de valeurs initiales, qui devront être estimées correctement.

2. Implémentation informatique

Nous avons ensuite écrit un script afin de calculer les coordonnées obtenues par cette méthode qui itère le calcul matriciel linéarisé (disponible en annexe) jusqu'à ce qu'il converge. Il prend en entrée les coordonnées terrain des sommets de prise de vue et du point connu, toutes les coordonnées image ainsi que celles du PPA.

3. Mesure d'incertitude de façon expérimentale (protocole, résultat précision)

Nous avons effectué des mesures sur le site des Mourres afin de pouvoir utiliser le réseau de points matériels implantés sur le site. Nous avons pris les photos à l'aplomb de ces points et avons visée deux sommets de perches positionnées sur d'autres points afin de d'avoir un contrôle sur les coordonnées du point inconnu. Nous avons exécuté notre code afin d'avoir une idée de la précision qu'il était possible d'atteindre. Cependant les résultats que nous avons obtenus sont totalement aberrants (résidus de l'ordre de 60 m), ce qui laisse supposer que notre modélisation du problème est défaillante ou bien que le script que nous avons écrit présente des erreurs.

4. Idées à implémenter dans l'application smartphone

Étant donné qu'il est difficile de connaître très précisément les coordonnées des 3 sommets de prise de vue, on pourra envisager d'utiliser le P3P pour déterminer les coordonnées d'un des sommets de prise de vue si l'utilisateur arrive à voir les points connus.

6 Relèvement P3P: Positioning per Three Point

1. Principe géométrique du P3P

Le principe géométrique du relèvement par la méthode P3P repose sur la triangulation dans l'espace, qui consiste à déterminer la position d'un point de vue en mesurant les distances angulaires depuis ce point entre des points de référence dont la position est connue. Nous l'avons appliquée de manière à pouvoir se positionner à l'aide d'une unique photographie comprenant trois points de position connue.
Un utilisateur n'a donc qu'à photographier trois points de position connue (dans un repère relatif ou absolu) sur un même cliché pour se positionner.

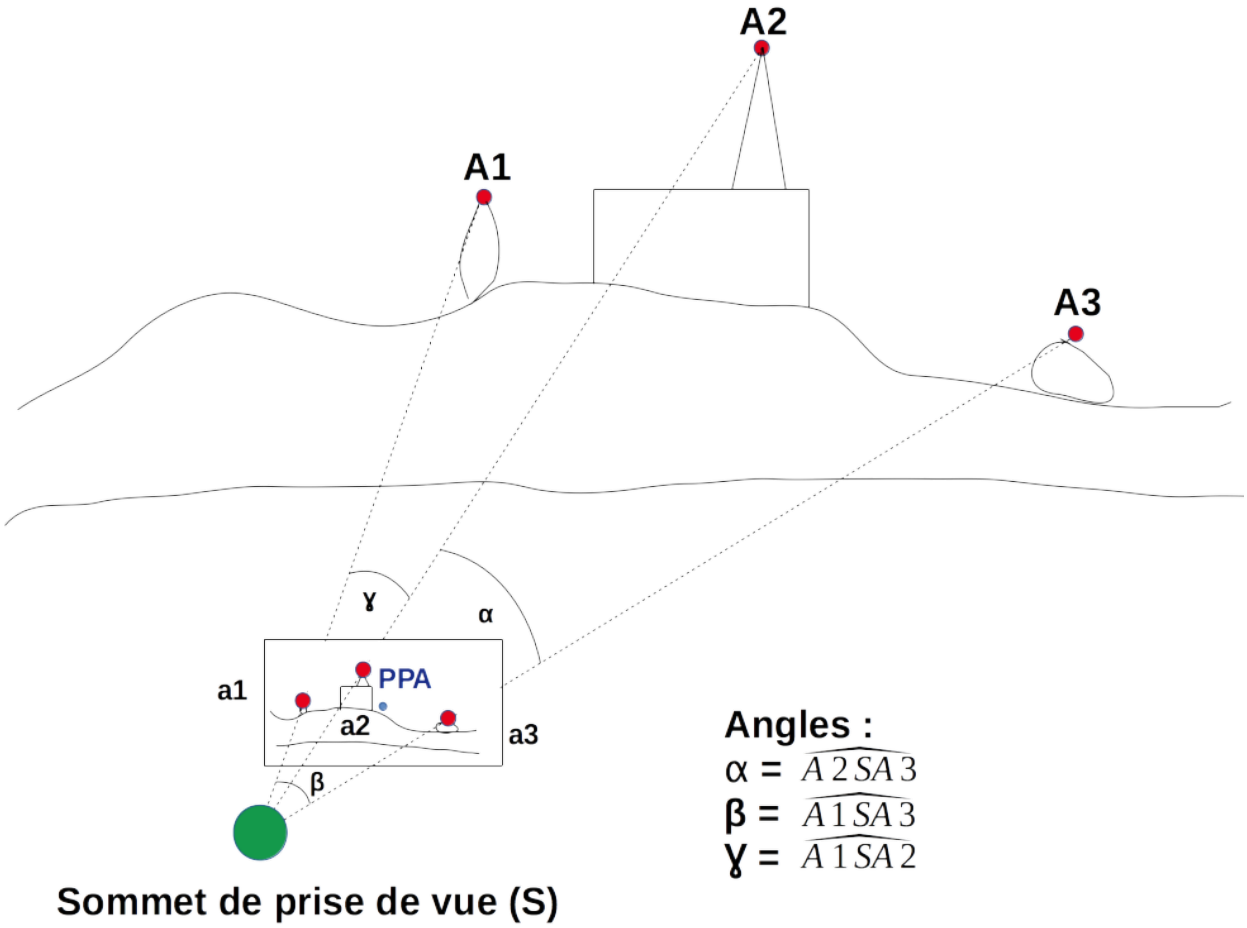


Schéma d'un sommet de prise de vue visant trois points connus dans le cadre de la méthode P3P

Il y a néanmoins plusieurs paramètres à entrer par l'utilisateur: les coordonnées 3D des trois points dans un repère terrain et les coordonnées (ligne, colonne) dans le repère image (ce qui nécessitera un pointé de ces points).
De plus, la calibration de l'appareil fournira les coordonnées image du Point Principal d'Autocollimation (PPA) ainsi que la focale. Nous connaissons également la taille des photosites du capteur CCD en sachant la taille du capteur en pixel et en millimètre.
Toutes ces variables serviront à calculer les coordonnées du sommet de prise de vue.
La méthode de résolution consiste à intersecter trois sphères. Cependant le problème géométrique initial est une intersection de 3 tores. Pour passer du problème d'intersection de tores à un problème d'intersection de sphères, il faut passer du jeu des trois distances angulaires (α,β,γ) à un jeu de 3 distances euclidiennes particulières.
Il faut cependant déjà obtenir ces distances angulaires dans le monde. Pour ce faire, on va les mesurer dans le boîtier de l'appareil photo. Celui-ci étant supposé calibré, les distances angulaires dans le monde et celles dans le boîtier de l'appareil photo sont égales, les rayons lumineux se propageant en lignes droites et passant par le sommet de prise de vue S. On construit donc le tétraèdre ayant pour sommets le sommet de prise de vue, le PPA, et deux points dans le repère image.

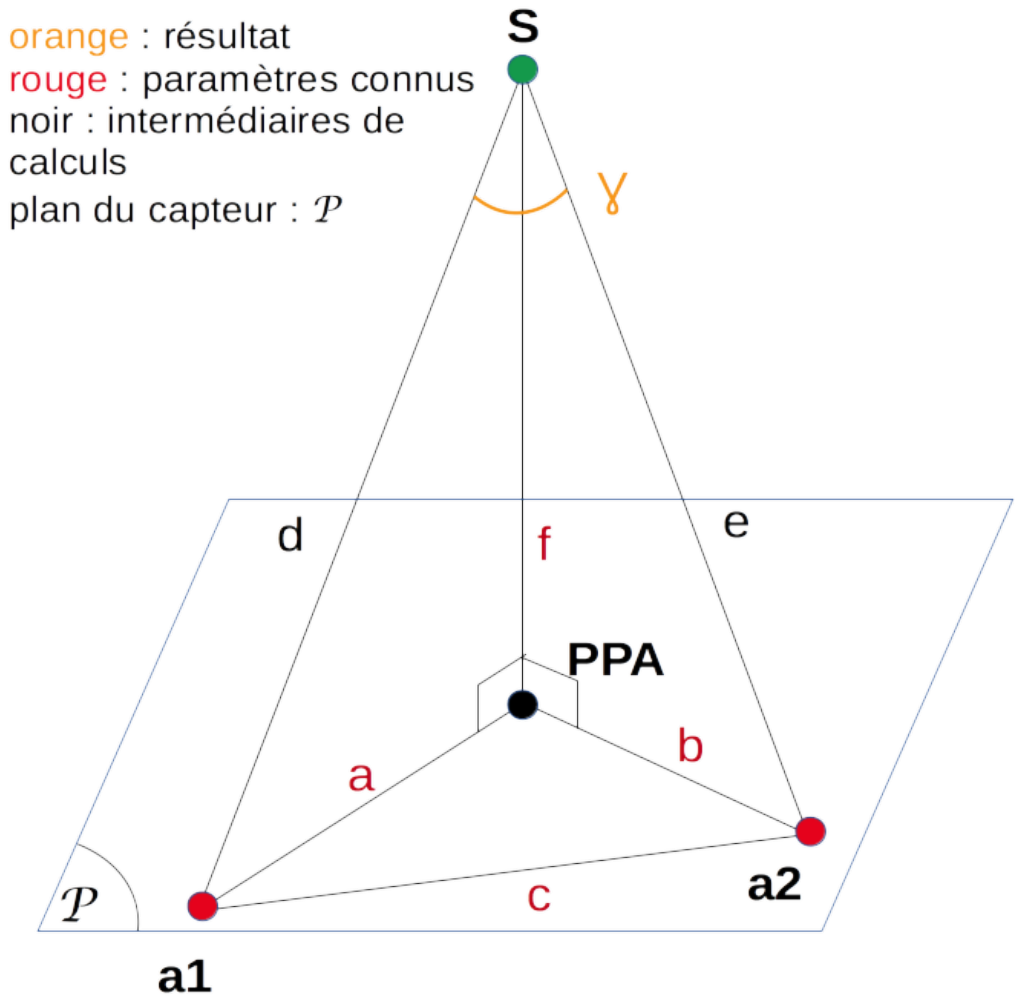
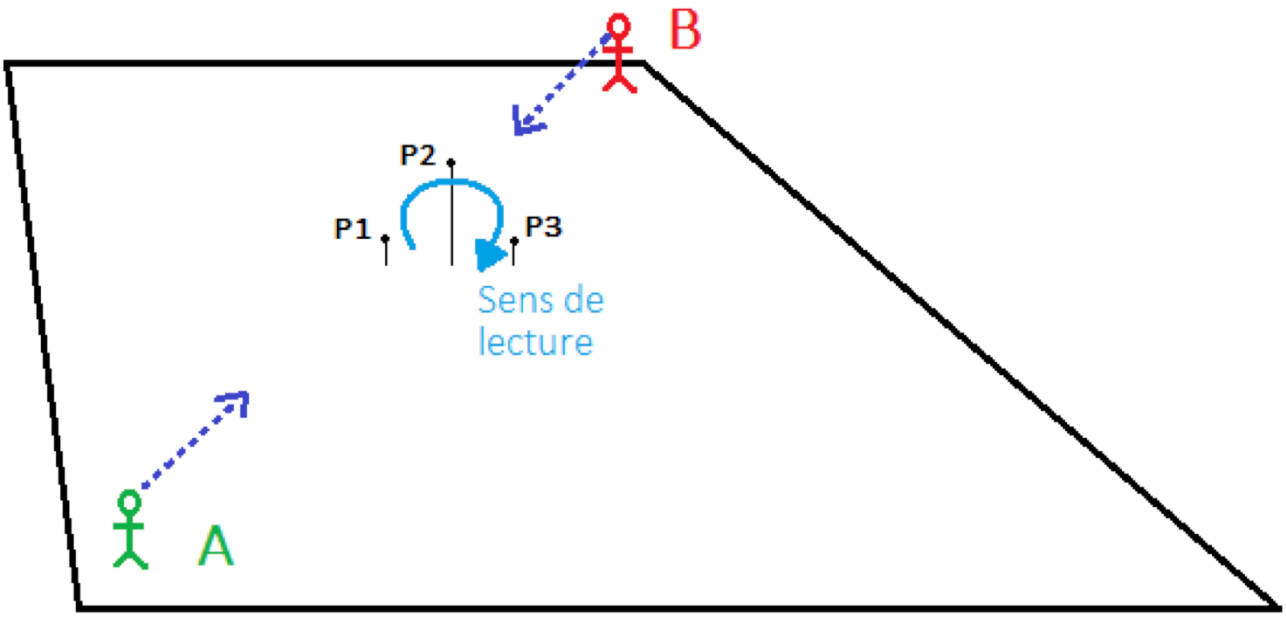


Schéma du tétraèdre ayant pour sommets le sommet de prise de vue, le PPA, et deux points dans le repère image

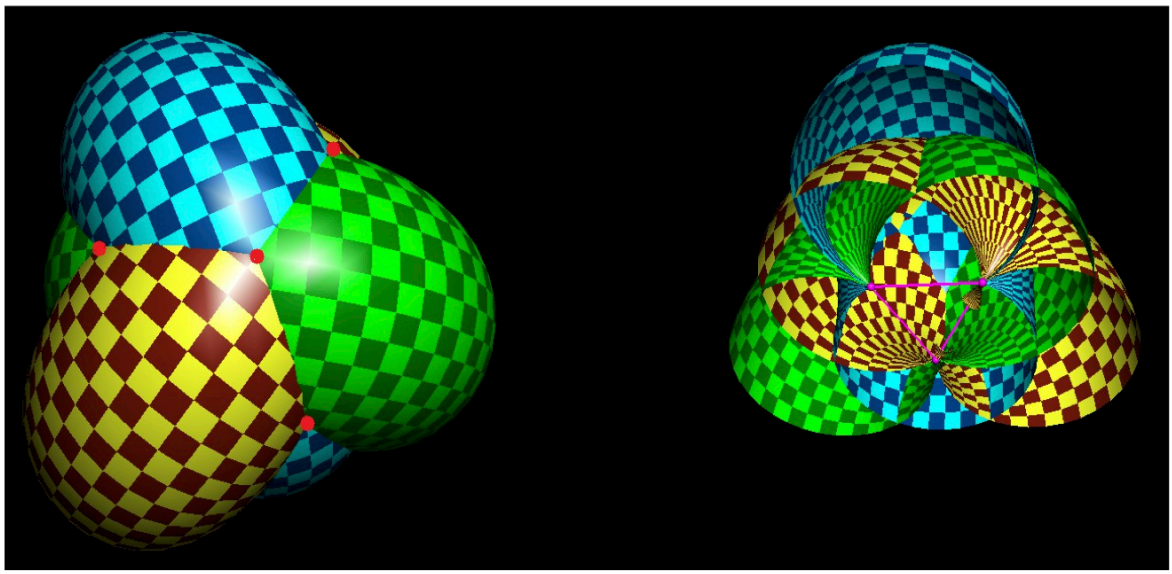
Les distances angulaires sont déterminées à partir des mesures de distances dans le boîtier de l'appareil photo à l'aide de la formule suivante (cf. démonstration n°8):

$$\gamma = \operatorname{acos}\left(\frac{(\frac{a}{f})^2 + (\frac{b}{f})^2 - (\frac{c}{f})^2 + 2}{2\times\sqrt{1+(\frac{a}{f})^2}\times\sqrt{1+(\frac{b}{f})^2}}\right)$$

Le passage du jeu observé des distances angulaires au jeu des distances métriques intermédiaires nécessaires à la résolution du problème demande de résoudre un polynôme de degré 4, ce qui donne au maximum quatre solutions. Chaque solution correspond aux trois distances entre le sommet de prise possible de vue et les trois points connus. À partir de chacun des quatre (au maximum) jeux de ces trois distances, le fichier Excel en déduit une position. Les quatre positions peuvent être d'un côté ou de l'autre du plan défini par les trois points connus, car le sens des distances n'est pas renseigné. La résolution du polynôme nous donne, au maximum, quatre positions par demi-espace, ce qui signifie qu'il existe au maximum quatre sommets de prise de vue dans lesquels on peut observer les trois points de position connue avec une orientation trigonométrique directe. Idem, il existe au maximum quatre sommets de prise de vue dans lesquels on peut observer les trois points avec une orientation trigonométrique indirect (ou horaire). C'est pourquoi, l'utilisateur devra renseigner le sens de rotation dans lequel il observe les trois points pour lever l'ambiguïté du demi-espace.



Ici A voit les points dans le sens horaire, B les voit dans le sens trigonométrique



Intersection de 3 tores vus de dessus et de dessous générant 4 solutions

L'application pour smartphone devra également résoudre l'ambiguïté des quatres positions possibles. Pour y arriver, une solution envisagée est que l'utilisateur renseigne dans quelle disposition il observe les trois points de position connue (exemple: point n°1 au dessus des deux autres).

Nous avons de plus réussi à déterminer la direction de visée de l'appareil photo et la position dans les coordonnées terrain du PPA. (cf. démonstration n°9)

2. Implémentation informatique

Le calcul de relèvement a été possible grâce à une résolution de polynôme de degré 4 et à la résolution de la croisée des sphères à l'aide d'un fichier Excel fourni par M.Hangouët.
Nous y avons ajouté l'intégration de la calibration de l'appareil photo et le calcul des trois angles α, β, et γ (cf 4.1) et sélectionné la bonne solution. Nous avons aussi codé des macros sur Excel afin d'automatiser certaines opérations laborieuses.

3. Mesure d'incertitude de façon expérimentale

Nous avons établi un protocole de test pour qualifier la précision de notre méthode de positionnement.
Nous sommes allés sur le chantier des Mourres qui dispose d'une polygonale, c'est à dire un ensemble de points dont les coordonnées sont connues. Nous avons utilisé cette dernière afin de déterminer la distance qui sépare la position calculée à l'aide de l'approche photogrammétrique et celle où nous avons pris le cliché (cette position est connue car nous nous sommes placés au-dessus d'un point connu de la polygonale et avons mesuré la hauteur du capteur au-dessus du repère au sol).
Nous avons donc pris des clichés de trois points connus au niveau d'un repère de position connu.
Nous avons obtenu une distance, séparant le sommet de prise de vue et le point théorique où nous devrions être, de l'ordre du mètre.
En faisant varier, sur Excel, la valeur du pointé de pixel, nous avons pu obtenir une estimation de l'incertitude de pointé. Dans le cas des photos prises au site des Mourres (distance entre le sommet de prise de vue et les points ~ 100m), lorsque l'on s'écarte de 10 pixels, la position varie d'environ 1 m. Pour les mesures faites au centre (d ~ 5 à 10 m) on obtient un écart maximal de 14cm.

4. Idée à implémenter dans l'application smartphone

L'application smartphone pourrait être couplée à d'autres applications telles que "Géodésie de poche" disposant de données géographiques. Le but de ce couplage serait de proposer à l'utilisateur des points de coordonnés connus préexistants pour lui épargner la peine de rentrer à la main des coordonnées.

7 Idées générales pour le développement de l'application smartphone

La calibration a un rôle important dans tous nos processus, autant pour connaître la position du PPA que pour corriger la distorsion. Comme nous l'avons déjà dit précédemment, on ne peut pas calculer cette distorsion directement dans l'application pour des raisons de ressources. Il va donc être nécessaire de faire appel à une base de données des calibrations selon le modèle d'appareil, ou à un service de calcul de calibration sur serveur.

Pour repérer des points connus en coordonnées dans des fonctionnalités telles que P3P, des bases de données de points connus doivent être utilisées. Pour des résultats précis, on pourra utiliser les données de "Géodésie de poche" pour repérer précisément des bornes géodésiques. L'intérêt d'utiliser des bornes géodésiques est qu'elles sont accessibles depuis la plupart des endroits en France.

Pour présenter les résultats de positionnement dans un repère absolu, l'utilisation de cartes permettra de rendre l'information de positionnement plus parlante pour l'utilisateur.
Enfin, lors du pointage, il faudra intégrer un zoom sur image pour pouvoir pointer le plus précisément possible les détails.

8 Conclusion

1. Récapitulatif des différentes méthodes photogrammétrique

Les méthodes mises en œuvre ont deux buts : se positionner, ou faire des mesures terrain (de position, de position relative, de longueur, d'aire).
Dans le but de se positionner, la première technique que nous avons testée est la méthode de mesure de distance avec 2 photos, qui permet à l'utilisateur de calculer sa distance à un plan. La seconde technique est celle du P3P, qui renvoie les coordonnées de l'utilisateur dans un repère terrain pouvant être absolu ou relatif.

Dans l'objectif de faire des mesures, la première fonctionnalité utilisée est celle du calcul de l'homographie. Elle permet de connaître les coordonnées de n'importe quel point d'un plan dans un repère local. Il est possible, à partir de ces coordonnées, de calculer des distances et des aires. La seconde manière d'effectuer des mesures terrain est le calcul de coordonnées d'un point à l'aide de 3 photos. Cette méthode est plus lourde à mettre en œuvre que celle de l'homographie, mais permet de calculer les coordonnées de n'importe quel point dans l'espace dans un référentiel choisi.

2. Pertinence d'une application de positionnement par photogrammétrie par rapport à du GPS

Nous avons pu constater que la précision de nos mesures avec les différentes fonctionnalités étaient au mieux centimétriques, mais pouvaient aussi être de l'ordre du mètre, voire de la dizaine de mètres pour les grandes distances. Ainsi l'application se démarque du GPS par son manque de précision, même si dans certains cas elle est meilleure qu'un GPS bas de gamme de smartphone.

Les atouts de ces techniques photogrammétriques par rapport au GPS sont leurs coûts modestes, leurs facilités de mise en œuvre, et le fait qu'elles ne dépendent pas de la réception satellite, ce qui implique qu'elles peuvent être utilisées en toutes circonstances.
Elles se démarquent donc dans des zones couvertes (mais suffisamment dégagées pour la photographie). L'application peut en outre être améliorée, car il reste encore certaines fonctionnalités potentielles que nous n'avons pas eu le temps de traiter, comme le calcul d'aire avec l'homographie, ou le calcul d'un volume sur quelques photos.

9 Expérience personnelle

1. Répartition du travail

Les premiers jours nous avons travaillé tous les quatre sur le problème de la distance à un plan. Cependant, afin de pouvoir étudier simultanément plusieurs fonctionnalités de l'application, nous avons rapidement séparé le groupe en deux. Ainsi, Lucas et Wandrille se sont focalisés sur les problèmes du P3P et de la direction de visée tandis que Florent et Guillaume ont terminé l'étude de la distance à un plan, puis ont abordé les problématiques de l'homographie et de l'intersection par 3 photos.

Nous nous réunissions régulièrement entre nous et parfois avec M. Hangouët afin de communiquer sur l'état d'avancement de chacune des tâches parallèles. En outre Lucas a

tenu un journal de bord de l'avancement du projet. Enfin nous avons tous coécrit le présent rapport.

2. Retour d'expérience

Ce projet fut très bénéfique pour chacun d'entre nous, et ce à plusieurs titres. Tout d'abord, ce fut une opportunité de nous exercer au travail de groupe, avec toutes les contraintes de coordination que cela impose. Ensuite, la liberté qui nous a été accordée pour mener nos travaux nous a conduits à mettre en place plusieurs protocoles expérimentaux de notre invention, et à devoir traiter les données ainsi obtenues en évaluant nous-même leur pertinence. Enfin, ce projet fut l'occasion de mettre en pratique des connaissances théoriques acquises cette année et d'explorer le champ des possibles de la photogrammétrie, ce qui pourrait nous être utile dans la suite de nos études.

3. Remerciements

Nous souhaitons bien évidemment remercier M.Hangouët pour ses précieux conseils ainsi que pour son implication dans notre projet.