

# Acquisition d'images pour la photogrammétrie par drone ou ULM

Comme annoncé dans le chapitre 4, l'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel d'une méthode de restitution du relief immergé de la rivière à partir d'images acquises par des capteurs non-métriques embarqués sur des plates-formes légères. On utilise indifféremment dans tout le chapitre le vocabulaire *plate-forme* ou *vecteur* pour désigner le drone ou l'ULM, c'est à dire l'appareil sur lequel est embarqué le capteur. Ce chapitre est en effet centré sur l'étude d'une acquisition d'images pour une mission photogrammétrique avec de tels vecteurs.

On détaillera dans une première section les contraintes spécifiques liées à notre application. Ce sont en effet ces contraintes qui ont déterminé d'une part les choix des technologies utilisées (plate-forme et capteur), et d'autre part le protocole terrain. Enfin on exposera de manière résumée les caractéristiques, en terme de potentiels et limitations, d'acquisitions réalisées dans ces conditions.

## 6.1 Paramètres imposés et variables à optimiser

### 6.1.1 Cahier des charges pour l'acquisition des images

Comme on l'a vu dans l'introduction à cette partie, la méthode de mesure du relief immergé par stéréophotogrammétrie à travers l'eau a des *conditions d'application*

a priori *très restrictives* et spécifiques. Entre la constatation sur le terrain de bonnes conditions expérimentales - turbidité, météo - et la prise de vue, *le temps de réaction doit être court*. On met donc en oeuvre un protocole expérimental adapté, prenant en compte en plus de ces contraintes le *critère du coût*, à comparer avec celui d'un relevé terrain (figure A en annexe).

L'*utilisation de drones*, ou encore d'ULM, semble donc adaptée [Zafirir et al., 1993, Asseline et al., 1999, Ambrosia et al., 2003, Chaponnière, 2004, Sugiura et al., 2005, Hardin et Jackson, 2005, Labbé et al., 2007, Lejot et al., 2007]. Ces solutions technologiques ont une conséquence sur le choix des instruments embarqués. Ces derniers doivent être peu encombrants, légers, et relativement bon marché (risque lié à l'embarquement sur une plate-forme légère) [Tomlins, 1983, Labbé et al., 2007]. On fixe ainsi un certain nombre de paramètres de l'acquisition comme le domaine des altitudes et des vitesses de vol, ou les caractéristiques de l'équipement embarqué (poids, performance).

On optimisera cependant les variables de l'acquisition à l'intérieur des domaines proposés par les plates-formes et les capteurs disponibles. On vise ainsi à constituer un jeu de données exploitable en stéréo.

### 6.1.2 Utilisation de plates-formes légères et de capteurs non-métriques

Nous avons testé différents protocoles, mettant en jeu des plates-formes légères (drone, ULM). Un premier test a été réalisé avec le drone paramoteur Pixy (figure 6.1), disponible à la Maison de la Télédétection de Montpellier. Le test a montré que ce type de plate-forme permettait l'acquisition de couples stéréoscopiques [Arrighi, 2004], mais d'une manière ponctuelle et sporadique, du fait principalement de sa sensibilité au vent et aux turbulences.

En revanche l'utilisation de drones permet beaucoup de souplesse dans la logistique d'acquisition. De plus, avec des solutions technologiques différentes, notamment des vecteurs plus stables (avions, hélicoptères), équipés de systèmes d'aide au pilotage ou même de pilotes automatiques, leur potentiel est extrêmement prometteur.

A la suite de cette expérience, il a été décidé d'embarquer à bord d'un ULM des capteurs utilisables sur un drone. On peut ainsi mettre en place la méthode qui pourra



FIG. 6.1 - Le drone *Pixy* en phase de décollage court au bord de la *Durance*

être appliquée ensuite avec des drones - en cours de développement - pour lesquels la stabilité et le contrôle du vol sont meilleurs qu'avec le *Pixy*. L'engin utilisé est un *Ballerit HM-1000* (figure 6.2). Cet aéronef, qui peut être remorqué sur son train principal, avec une voilure repliable au gabarit routier, est plus connu sous nom de "Pou du ciel" [Mignet, 2001]. Cet appareil est disponible en biplace et permet donc à un pilote



FIG. 6.2 - Un *Ballerit HM 1000* (Photo *Peter Vercreijjsse*)

d'emmener un photographe. Ce dernier manipule le capteur à l'aide d'une plate-forme tenue à la main (figure 6.3(b)). La charge utile du modèle biplace est de 200 kilos. La vitesse minimale de sustentation par vent calme avec carénage est de 55 km/h avec un moteur 582 Rotax de 64 chevaux [Mignet, 2001]. La vitesse de vol minimale opération-

nelle acceptée par les pilotes est en générale un peu supérieure.

Le capteur utilisé est un Sony DSC-F828 (figure 6.3(a)). Cet appareil numérique petit format permet d'acquérir des images utiles de 3264 par 2448 pixels. Il dispose d'un objectif dont la focale peut varier entre 28 et 80 millimètres (focales équivalentes). Il pèse moins d'un kilo (955 grammes avec accessoires) [Sony, 2003]. Ce type d'appareil peut donc aussi bien être embarqué sur le drone Pixy, dont la charge utile est comprise entre 500 grammes et 3.3 kilos selon la voile [Asseline et al., 1999], ou encore à bord du drone avion de l'Avion Jaune (figure 6.4), dont la charge utile est de 2 kilos [Labbé et al., 2007].



(a) Capteur [Sony, 2003]



(b) Mise en oeuvre. Extrait de [Labbé et al., 2007]

FIG. 6.3 - Matériel et protocole pour l'acquisition ULM



FIG. 6.4 - Drone conçu par l'Avion Jaune, en test sur la Durance

Les choix de plate-forme et de capteur ont fixé plusieurs paramètres pour l'acquisition des images. Il reste néanmoins un certain nombre de variables à optimiser de manière à former un jeu de données exploitable en stéréo pour une application thématique en hydrobiologie ou en hydraulique (table 6.1). Ces variables seront à optimiser

| Paramètres            | valeur imposée | à optimiser | plage imposée            |
|-----------------------|----------------|-------------|--------------------------|
| couverture stéréo     | 100%           | -           | -                        |
| recouvrement          | 60%            | -           | -                        |
| taille de la matrice  | 3264x2448      | -           | -                        |
| $B/Z$                 | -              | oui         | -                        |
| résolution au sol     | -              | oui         | -                        |
| focale $c$            | -              | oui         | 28 à 80 mm               |
| vitesse               | -              | oui         | > 70 km/h                |
| temps d'obturation    | -              | oui         | >1/2000 <sup>eme</sup> s |
| altitude moyenne $Z$  | -              | oui         | -                        |
| temps entre deux vues | -              | oui         | > 4 s                    |

TAB. 6.1 - *Caractéristiques de l'acquisition*

suivant les contraintes détaillées dans la section 6.2.1.

## 6.2 Protocole d'acquisition des images

Afin d'acquérir un jeu de données exploitable en stéréo, il faut élaborer un protocole d'acquisition spécifique : (i) du terrain ; (ii) des technologies utilisées. On expose donc dans une première section les contraintes spécifiques de notre expérimentation. On détaillera ensuite les choix effectués, puis le travail sur le terrain faisant partie du protocole. Enfin on donnera quelques informations sur la mise en oeuvre pratique de l'acquisition.

### 6.2.1 Contraintes

Pour la formation d'un jeu de données exploitable en stéréo les points suivants doivent être examinés : exposition correcte de l'ensemble de l'image (partie émergée et immergée), limitation de l'effet de filé, couverture stéréo à 100% de la partie immergée, couverture des berges permettant le positionnement sur le terrain et la présence dans l'image de points de contrôle au sol (mires), optimisation de la précision de la mesure

en  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  (résolution au sol et  $B/Z$ ).

L'exposition correcte est assurée d'une part en utilisant un filtre polarisant, dont le but est de limiter au maximum les réflexions spéculaires [Mount, 2005], et d'autre part en sous-exposant globalement l'image, de manière à ne pas saturer les zones émergées. Ces dernières ont en effet une radiométrie très forte (cailloux clairs, fort éclairage) et les mires doivent pouvoir y être repérées.

Le filé réel perceptible se calcule à partir de l'équation suivante [Krauss et Waldhäusl, 1998] :

$$\text{filé} = \frac{1}{2} v t_{\text{obt}} \cdot \frac{c}{Z} \quad (6.1)$$

où  $v$  est la vitesse de la plateforme et  $t_{\text{obt}}$  le temps d'obturation.

À vitesse de vol  $v$  et temps d'obturation  $t_{\text{obt}}$  fixés, le filé est inversement proportionnel au facteur d'échelle  $Z/c$ . Cela correspond au fait qu'en pratique, les prises de vue à très haute résolution spatiale doivent être réalisées à partir de plates-formes lentes. L'utilisation du Sony DSC-F828 à bord de l'ULM impose une limite inférieure à la résolution des images.

La couverture stéréo à 100% de la zone immergée est assurée en fixant le recouvrement des images à 60%. On obtient en conséquence - figure 6.5 - une relation de proportionnalité inverse entre  $B/Z$  et focale  $c$  qui peut se calculer par la formule :

$$\frac{B}{Z} = \frac{(1 - R_p) \cdot L_{\text{matrice}}}{c}, \text{ avec } R_p = \frac{R}{B + R} \quad (6.2)$$

où  $R$  est le recouvrement longitudinal,  $B$  la base des prises de vue,  $L_{\text{matrice}}$  la longueur de la matrice en pixels et  $c$  la longueur focale (ou distance principale) en pixels. En pratique, le recouvrement longitudinal est commandé par l'intervalle de temps minimum permis par l'appareil photo entre deux prises de vues, la vitesse de la plateforme - constante - étant connue. Ce temps dépend du mode de prise de vue de l'appareil (RAW (brut), TIFF non compressé, JPEG). Le format brut conserve les données telles qu'enregistrées sur la matrice CCD et nécessite un long temps de transfert (plus d'une dizaine de secondes en pleine résolution) ; l'acquisition au format non compressé est elle aussi plus lente que l'acquisition en mode prise de vue normale [Sony, 2003]. Le mode de prise de vue normale effectue une compression des images.

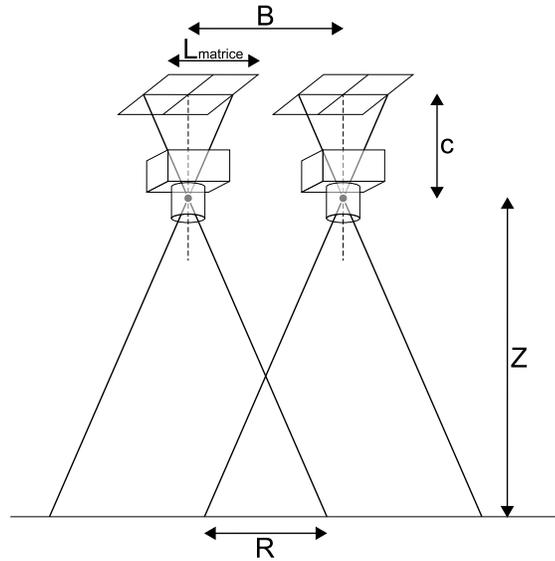


FIG. 6.5 - Notations utilisées dans l'équation 6.2. Cette équation met en évidence la relation de proportionnalité inverse entre le rapport  $B/Z$  et la distance focale  $c$  pour un recouvrement donné.

La couverture des berges et la résolution au sol sont liées par la formule suivante, qui correspond au calcul de l'emprise latérale des images :

$$\text{emprise latérale} = l_{matrice} \cdot \frac{Z}{c} \quad (6.3)$$

où  $l_{matrice}$  est la largeur de la matrice en pixels et  $\frac{Z}{c}$  le facteur d'échelle ou taille d'un pixel au sol (la focale  $c$  est donnée en pixels). Une couverture des berges donnée impose une borne inférieure à la résolution au sol. En pratique, du fait de la sinuosité de la rivière et de la plate-forme, on utilisera une marge de sécurité sur l'emprise latérale de manière à s'assurer de la présence de mires sur les deux berges.

La précision de la mesure en  $Z$  est liée à la résolution au sol, au rapport  $B/Z$  et au facteur d'échelle  $Z/c$  (cf. équation 5.4). Pour un capteur de longueur de matrice  $L_{matrice}$  et un taux de recouvrement  $R_p$  fixés, on a, d'après l'équation 6.2 :

$$\sigma_z = \frac{Z}{(1 - R_p) \cdot L_{matrice}} \sigma_{p_\xi}, \text{ avec } R_p = \frac{R}{B + R} \quad (6.4)$$

La précision de la mesure en  $z$  est donc indépendante de la focale  $c$ , mais directement proportionnelle à l'altitude  $Z$  et à la précision du pointé  $\sigma_{p_\xi}$ . Pour un capteur et un recouvrement donnés, la précision est maximale pour une altitude minimale.

## 6.2.2 Choix effectués - réglage du capteur, plan de vol

La première variable à optimiser est l'altitude  $Z$ , de manière à obtenir la meilleure précision de mesure en  $z$  (équation 6.4). Cette altitude  $Z$  doit donc être minimale. D'autre part, afin d'assurer la couverture de berges, on fixe l'emprise latérale à un peu plus de 180 mètres. Afin d'obtenir cette valeur avec une altitude  $Z$  minimale, il faut aussi choisir la focale  $c$  la plus petite disponible (équation 6.3).

Pour le Sony DSC-F828, la plus petite focale est un équivalent 28 mm. En conséquence, l'altitude  $Z$  doit être supérieure ou égale 200 mètres. Le pixel au sol correspondant à cette altitude est d'environ 0.08 mètres. La focale à 28 mm détermine de plus les angles maximaux en sortie d'objectif (45 ° environ), ainsi que le  $B/Z$  maximal (0.48, selon l'équation 6.2).

Finalement, afin de limiter au maximum les effets de filé dans les limites possibles avec le Ballerit HM-1000, on fixe la vitesse de vol à 70 km/h. À cette vitesse, à l'altitude et avec la focale choisies, l'intervalle de temps entre deux prises de vues permettant d'assurer le recouvrement de 60% est de 5 secondes environ. L'appareil est réglé en mode JPEG afin de pouvoir effectuer des prises de vues selon cet intervalle de temps. Cela correspond à une base de 100 mètres environ.

A la vitesse de 70 km/h, avec un temps d'obturation  $1/1000^{\text{eme}}$  de seconde, la focale de 28 mm et une altitude de 200 mètres, le filé résultant est inférieur au  $1/8^{\text{eme}}$  de pixel.

## 6.2.3 Travail sur le terrain associé

Le travail sur le terrain associé à l'acquisition des images à partir d'ULM ou de drone, vise essentiellement à fournir une référence spatiale pour les images. On positionne donc des mires sur le terrain. Ces mires doivent être *contrastées par rapport au terrain*, de manière à être facilement repérées dans les images. L'idéal pour la plupart des terrains est l'utilisation de blanc sur fond noir. Sur le terrain particulier d'une rivière à galets, les ombres des galets étant très sombres (proches du noir) et les galets très clairs (proches du blanc), il peut être indiqué d'utiliser d'autres couleurs, comme le rouge. Des mires temporaires peuvent de plus être créées en utilisant les galets présents sur le terrain et de la peinture. Cette technique présente l'avantage de mobiliser peu de matériel et donc de pouvoir disposer d'un grand nombre de mires. Un tel matériel est de plus mobilisable de manière réaliste dans des conditions terrain parfois difficiles

(traversée de la rivière, franchissement de chablis, de falaises...)

Les mires doivent avoir une taille suffisante pour pouvoir être détectées et caractérisées (positionnement du centre) dans les images. Elle doivent donc couvrir un minimum de 5 pixels, soit dans notre cas plus de 40 centimètres. Pour faciliter le positionnement du centre, on peut donner une forme spécifique comportant des symétries axiales ou centrale (croix, carré).

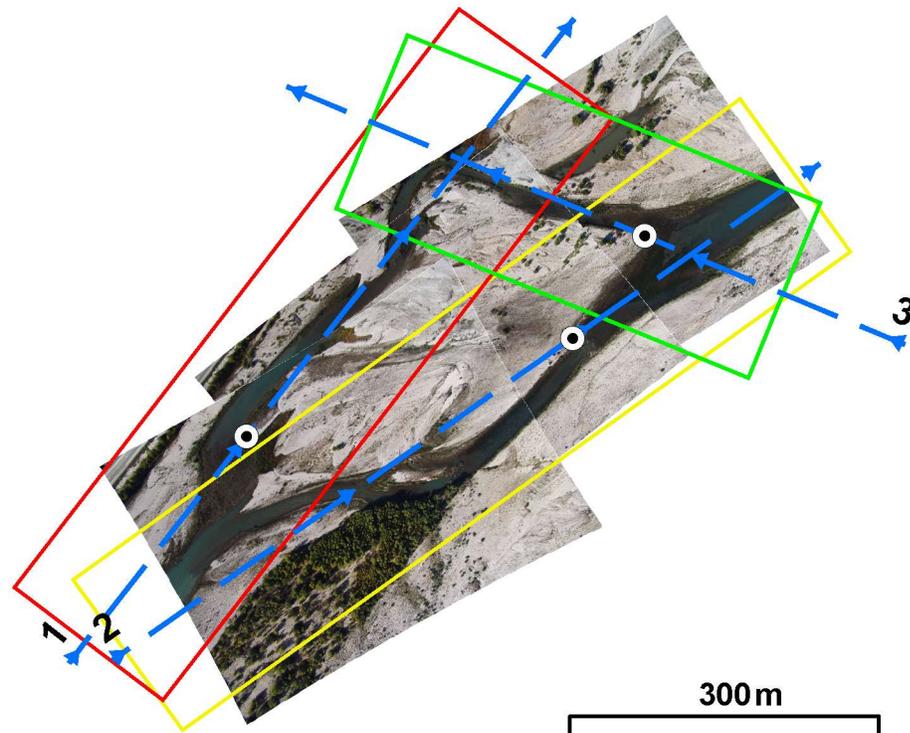
#### 6.2.4 Mise en oeuvre opérationnelle du plan de vol

De manière à effectuer une acquisition suivant les paramètres choisis, un plan de vol a été fourni au photographe et au pilote. Celui-ci est illustré sur la figure 6.6 ; les axes de vols sont déterminés par des points remarquables au sol ainsi que des caps compas. L'altitude, la vitesse de vol approximatives sont déterminées et données en consigne au pilote. L'intervalle de temps séparant 2 prises de vues consécutives est donné au photographe.

Ces contraintes doivent permettre d'obtenir des clichés avec un recouvrement le plus proche possible des 60% nominaux, une couverture des berges, ainsi qu'une échelle homogène d'une photographie à l'autre (altitude, visée verticale). De plus, l'appareil étant fixé sur une plate-forme manipulable à la main à l'extérieur de l'aéronef (figure 6.3(b)) l'ajustement en temps réel de l'orientation de l'appareil (visée verticale) ainsi que du filtre polarisant est possible pour chaque axe de vol.

### 6.3 Limites et potentiels d'une acquisition d'images suivant ce mode opératoire

Ce mode d'acquisition, spécifique car adapté au cahier des charges de la mesure du relief immergé de rivière par stéréophotogrammétrie, est caractérisé par ses limites et ses potentiels, décrits dans les sections suivantes.



| axe | longitude | latitude | cap compas |
|-----|-----------|----------|------------|
| 1   | 5.932 °   | 44.006 ° | 47         |
| 2   | 5.930 °   | 44.005 ° | 38         |
| 3   | 5.937 °   | 44.008 ° | -67        |

FIG. 6.6 - Préparation du plan de vol. Points noir et blanc : points remarquables au sol. Flèches pointillées : axes de vol. Rectangles : emprises totales au sol prévues pour les trois axes de vol. Les unités des valeurs de la table sont des degrés

### 6.3.1 Limites

#### Absence de mesure et de contrôle de la position de l'appareil

Le montage utilisé ne comporte pas de plate-forme inertielle ni de GPS couplé à l'appareil. La géométrie de prise de vue est donc entièrement déterminée à partir des informations images. L'initialisation de ce calcul passe donc par une intervention de l'opérateur.

De plus, en l'absence de contrôle de la position et de l'attitude de l'appareil le respect du plan de vol et la bonne couverture stéréo de la zone d'intérêt dépend beaucoup de l'expérience et de la bonne coordination du pilote et du photographe.

#### Vitesse de la plate-forme

Un ULM possède une vitesse minimale relative en dessous de laquelle se produit le décrochage. Le Ballerit HM 1000 a une vitesse de sustentation minimale de 55km/h [Mignet, 2001]. Pour des raisons de sécurité évidentes, le pilote ajoute une certaine marge à cette vitesse en vol. La vitesse de l'ULM reste donc supérieure à 70km/h environ ( $\approx 20m.s^{-1}$ ).

Or la vitesse a une importance sur plusieurs paramètres de l'acquisition. D'une part elle joue sur les intervalles temporels entre deux déclenchements. Elle est donc un paramètre d'autant plus limitant qu'elle est élevée pour un capteur donné. De plus, la prise de vue doit être effectuée à une altitude minimale afin d'avoir accès à des résolutions spatiales les plus fines possibles et à la meilleure précision de stéréorestitution. Or le filé est d'autant plus important que la vitesse de la plateforme est grande et que l'altitude est basse. Là encore la mise en oeuvre d'une plateforme lente, telle que certains drones, permettrait de respecter plus facilement les contraintes de l'acquisition.

#### Capteur petit format

Comme on l'a vu au travers des équations 6.2 et 6.4, le  $B/Z$  maximal est borné à 0.5 pour le capteur utilisé. En revanche, l'utilisation d'un capteur plus grand format peut permettre la prise de vue, à résolution et recouvrement constants, avec un  $B/Z$  plus grand, conduisant à une meilleure précision stéréoscopique.

## 6.3.2 Potentiels

### Coût

Si l'on dispose d'un photographe expérimenté, l'acquisition du capteur étant très peu onéreuse (quelques centaines d'euros pour un bon appareil numérique), les coûts relatifs à chaque acquisition sont limités à la prestation de service du pilote (quelques centaines d'euros pour une matinée), et à l'achat des consommables, principalement pour la disposition des mires sur le terrain. On est donc dans un tout autre ordre de grandeur par rapport à un relevé de topographie par tachéomètre (cf. figure A en annexe).

### Accès à la très haute résolution spatiale

L'un des premiers avantages de telles méthodes d'acquisition est l'accès à la très haute résolution spatiale avec des capteurs bon marché. En effet, l'utilisation d'ULM, et plus encore de drones, du fait de leur plus faible vitesse en vol, permet le survol à très basse altitude des zones d'intérêt, et ce, même si le voisinage immédiat est très accidenté (vallées encaissées ou rideaux d'arbres, par exemple). Cela permet d'accéder, par télédétection, à des échelles de travail plus locales, notamment l'échelle des micro-habitats pour l'étude de la rivière.

### Flexibilité des acquisitions

De plus, et là encore cela est d'autant plus vrai avec l'utilisation de drones, l'acquisition d'images avec de telles technologies est très flexible. En dessous de 150 mètres d'altitude, ces derniers sont en effet soumis à la réglementation des modèles réduits. Exemple concret : l'élaboration et la communication d'un plan de vol aux autorités aériennes civiles n'est pas nécessaire. Il est donc possible de préparer une mission en avance, puis de décider et d'effectuer une acquisition en quelques heures.

# Chapitre 7

## Que voit-on en stéréo à travers l'eau ?

L'objectif de ce chapitre est le suivant : déterminer l'influence de la traversée de l'interface air/eau (ou miroir) sur la mesure par stéréophotogrammétrie, voire sur la possibilité même de cette mesure en rivière.

L'idée de la mesure du relief par photogrammétrie à travers l'eau n'est pas nouvelle [Tewinkel, 1963, Rinner, 1969, *non exhaustif*] et l'expression "photogrammétrie à deux milieux" apparaît dès 1948 [Zaar, 1948, Rinner, 1948]. Cependant cette littérature spécialisée est adaptée aux applications en milieu marin et donne une vision partielle du problème pour les autres applications. On ne prétend pas bien sûr apporter ici une meilleure réponse sur ce vaste sujet, mais plutôt une approche complémentaire permettant de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent dans le cas de la stéréorestitution du relief immergé de la rivière. À cette fin, on s'appuiera sur une modélisation des phénomènes physiques concernés.

Pour cela, on s'attache tout d'abord dans ce chapitre à exposer le cadre théorique des modèles développés, notamment, l'utilisation des lois de l'optique géométrique et la définition et justification de la *notion de point apparent*. Ensuite, à partir de l'étude qualitative d'un cas réel, ainsi que de la résolution analytique d'un cas simplifié, on décrit l'approche choisie, notamment les méthodes de modélisation et les approximations utilisées. On détermine ainsi l'effet de la réfraction par une interface localement plane sur la mesure stéréophotogrammétrique. La validité de cette approximation "surface localement plane" est discutée. Finalement, on évalue la faisabilité de la correction de la réfraction et la qualité potentielle de la mesure obtenue.

## 7.1 Cadre théorique

La restitution du relief par stéréophotogrammétrie repose sur des considérations géométriques selon lesquelles les objets et leur points image sont reliés par des rayons lumineux (voir section 5.1). On étudie dans ce chapitre l'influence de la réfraction sur la géométrie même du problème de la stéréorestitution (validité des modèles utilisés en photogrammétrie, notamment la géométrie perspective - voir section 5.1.1). On se place donc toujours dans le cadre de l'optique géométrique, faisant appel à la notion de rayon lumineux. On n'abordera pas ici les phénomènes de diffusion (par les particules en suspension par exemple), qui font sortir le problème du cadre d'application de l'optique géométrique et donc de celui de la photogrammétrie.

On parle habituellement en photogrammétrie de la réfraction due à la traversée de l'atmosphère. Il peut en effet être nécessaire de prendre en compte ce phénomène pour des prises de vue à haute altitude mais celui-ci peut être négligeable pour des prises de vue à basse altitude<sup>1</sup> [Krauss et Waldhäusl, 1998]. Dans l'ensemble du document, on réservera l'emploi du terme "réfraction" pour la réfraction à l'interface entre air et eau.

On étudie tout d'abord le phénomène de réfraction, puis le lien avec les équations de la photogrammétrie. On discute ensuite de la faisabilité de la stéréorestitution à travers l'eau. Celle-ci passe par la définition et la justification de la notion de point apparent.

### 7.1.1 Réfraction de la lumière à l'interface entre deux milieux

La propagation de la lumière suit le Principe de Fermat, selon lequel le trajet des rayons lumineux correspond à un chemin optique minimal<sup>2</sup> [Fermat, 1896]. Le chemin optique se définit comme la distance qu'aurait parcouru, pendant la même durée, le rayon lumineux s'il se propageait dans le vide. Il est donc dépendant de la vitesse de la lumière dans le milieu. On utilise la notion d'indice de réfraction relatif du milieu, qui est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré.

---

<sup>1</sup>pour une prise de vue à 200m d'altitude, le déplacement en bord de champ dû à la réfraction atmosphérique est estimé à 0.037 pixels.

<sup>2</sup>plus exactement, extrémal

A la traversée d'un dioptre - surface séparant deux milieux d'indice de réfraction différents, le trajet correspondant au chemin optique minimal n'est pas la ligne droite : la lumière est déviée, il y a réfraction. Ce phénomène est décrit par la loi de Snell-Descartes :

$$\begin{cases} \text{le rayon incident et le rayon réfracté sont coplanaires} \\ n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r) \end{cases} \quad (7.1)$$

avec  $n_1$ , l'indice de réfraction du milieu 1 ;  
 $i$ , l'angle entre la normale à l'interface et le rayon incident ;  
 $n_2$ , l'indice de réfraction du milieu 2 ;  
 $r$ , l'angle entre la normale à l'interface et le rayon réfracté ;

Cette équation est valable quelle que soit la forme de l'interface entre les deux milieux. On l'appliquera en particulier au dioptre plan (section 7.3), ainsi qu'à un modèle sinusoïdal de la surface de l'eau (section 7.5.1). Il faut noter qu'elle est valable pour des milieux homogènes, et que l'indice de réfraction de l'eau peut varier selon différents paramètres. Il convient donc de vérifier que l'indice de réfraction de l'eau varie peu selon les conditions du milieu.

D'après [Jerlov, 1976, p.2], cité par [Fryer, 1983b] et [Westaway et al., 2001], la valeur de l'indice de réfraction de l'eau varie de moins de 0.53% pour des températures comprises entre 0 et 30 degrés Celsius et des salinités comprises entre 0 et 40 000 parties par million. Par ailleurs, pour l'eau pure, avec des longueurs d'onde variant entre 400 et 800 nanomètres - domaine du visible - et des températures comprises entre 19 et 24 degrés Celsius, la valeur de l'indice varie de moins de 0.56% [Daimon et Masumura, 2007]. Rapporté à la mesure de profondeur, l'ensemble de ces variations possibles correspond à une erreur inférieure à 0.75% pour des rayons ayant une incidence maximale de 45 degrés. Il est ainsi possible d'utiliser une valeur constante de l'indice ; le plus souvent on utilise 1.34 en milieu marin [Fryer, 1983b] ; on utilisera 1.33 pour l'eau douce.

### 7.1.2 Réfraction et effet stéréoscopique - notion de point apparent

Dans la littérature concernant l'utilisation de photogrammétrie à travers l'eau, de nombreux problèmes, concentrés autour des applications en milieu marin côtier et de

leur spécificités sont abordés. Les points d'intérêt sont : l'influence des vagues de grande longueur d'onde - et de leur propagation - sur la mesure [Fryer, 1985a, Fryer, 1985b, Okamoto, 1982]; le calcul et la correction des profondeurs pour une position moyenne de la surface de la mer [Fryer, 1983a, Fryer, 1983b, Fryer, 1984, Karara, 1989, Buchroithner, 1991]; le développement de méthodes spécifiques pour le calcul de l'orientation externe à partir de points immergés [Karara, 1989, Tan, 1989, Shan, 1994].

Du fait, le plus souvent, des conditions expérimentales correspondant à ces applications en milieu marin (profondeur négligeable devant l'altitude de prise de vue, vagues de faible amplitude devant leur longueur d'onde), la faisabilité même de la stéréorestitution n'est que rarement discutée. L'effet de la réfraction dans le plan horizontal (déplacements apparents horizontaux, variation de l'effet de la réfraction selon la position du point dans la zone stéréo) n'est que peu évoqué [Tewinkel, 1963]. Il convient, pour une application en rivière, d'étudier ces aspects et de vérifier le potentiel de la mise en oeuvre d'une méthode de stéréorestitution dans ce milieu spécifique.

On définit les rayons apparents - ou virtuels - comme les rayons rectilignes qui se superposent aux rayons lumineux réels *dans leur partie aérienne*.

On appellera ainsi *position apparente* la position du point vue par le système des deux capteurs et restituée sans prendre en compte l'effet de la réfraction. On parlera de *déplacement apparent* pour désigner la différence entre position apparente et position réelle.

Lorsque l'on effectue la stéréorestitution de points immergés, ce sont sur les rayons apparents que l'on s'appuie. Or, si les rayons réels s'intersectent par nature (ils proviennent du même objet !), ce n'est pas le cas en général pour les rayons apparents (cf. figure 7.1). Ceci n'est relaté que par une partie de références [Tewinkel, 1963, Rinner, 1969, Fryer, 1983b, Fryer, 1985a], les trois dernières se concentrant sur la distance entre les points d'intersection de chaque rayon avec la droite verticale passant par le point du fond considéré<sup>3</sup>.

La divergence des rayons apparents dans le cas général est probablement passée sous silence dans la plupart des autres références du fait de l'utilisation de stéréorestituteurs analogiques et/ou analytiques aux dates auxquelles ont été écrits ces travaux. L'opérateur qui restitue la position d'un point immergé détermine en effet naturelle-

---

<sup>3</sup>cette intersection n'existe d'ailleurs rigoureusement que pour le cas d'une surface plane horizontale, pour laquelle toutes les normales sont verticales

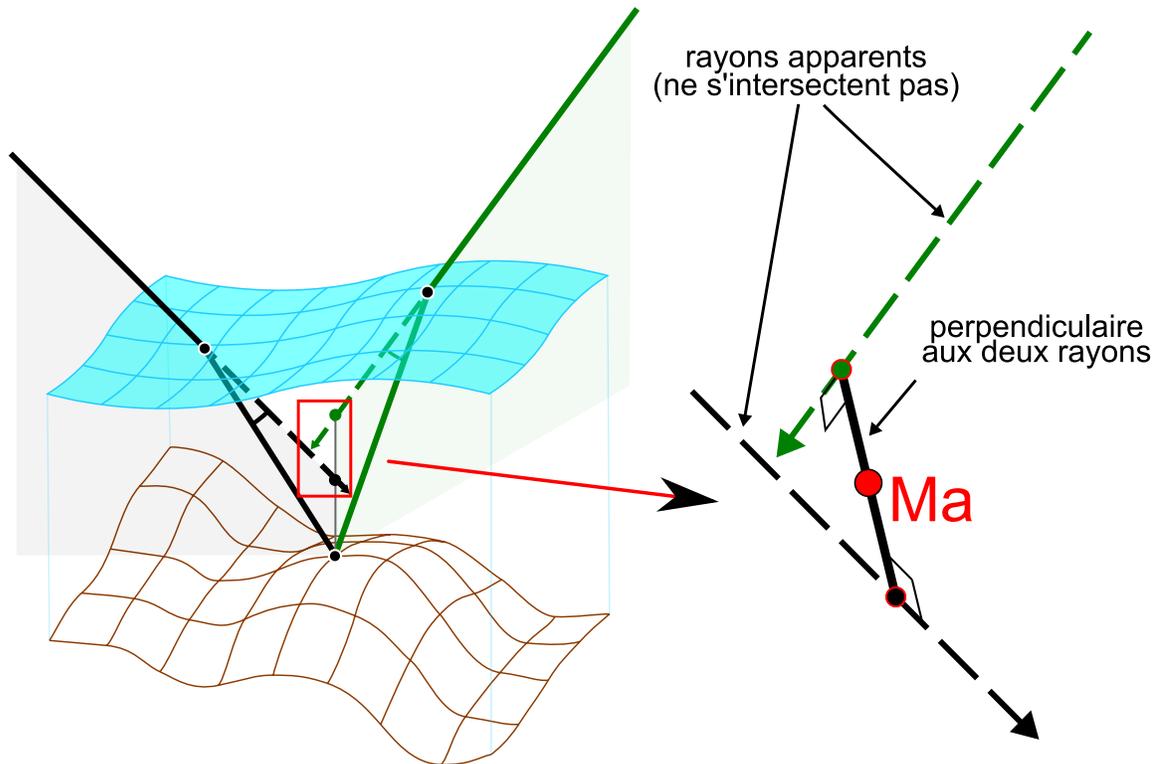


FIG. 7.1 - Mise en évidence de la divergence des rayons apparents dans le cas général. Définition du *point apparent*  $Ma$  comme le point le plus proche des deux rayons apparents, c'est à dire le milieu du segment porté par la droite perpendiculaire aux rayons apparents.

ment la position d'un "point de moindre confusion" [Tewinkel, 1963, Fryer, 1985a]. En vision humaine ou animale, le relief peut être perçu malgré l'effet de la réfraction : les yeux effectuent des petits mouvements correctifs permettant d'obtenir une convergence binoculaire et ainsi la perception du relief [Horvath et al., 2003, Barta et Horvath, 2003].

Les rayons apparents ne s'intersectant pas dans le cas général - et n'étant pas parallèles - ils ne sont en particulier pas coplanaires. La condition "classique" de coplanarité n'est donc pas satisfaite pour les rayons apparents, qui sont les rayons déterminés par la position du capteur et des points homologues dans les images.

Il existe un cas particulier pour lequel les rayons apparents possède une intersection dans l'hypothèse d'une interface plane horizontale. Celui-ci se produit pour les points situés dans deux régions particulières de l'espace : (i) le plan vertical situé à égale distance des deux centres de projection [Fryer, 1985a]; (ii) le plan vertical contenant les deux centres de projection. Ces deux plans sont perpendiculaires.

En dehors de ces deux plans, la stéréorestitution des rayons virtuels nécessite donc une approximation. L'approximation qui a été choisie pour les modélisations présentées dans la suite s'inspire du mécanisme de la fusion stéréoscopique en vision binoculaire [Horvath et al., 2003] : on définit le "point apparent" comme le point le plus proche des deux rayons virtuels. Il s'agit du milieu du segment porté par la droite perpendiculaire aux deux rayons virtuels (cf. figure 7.1 partie droite).

### 7.1.3 Existence du "point apparent" - validité de l'approximation utilisée pour la stéréorestitution à travers l'eau

Comme on l'a vu dans le paragraphe précédent, il n'y a pas à proprement parler de "point apparent", qui serait l'intersection des rayons lumineux tels que vus par un individu ou par deux capteurs.

Pour la stéréorestitution - détermination de la position  $(X, Y, Z)$  des points du terrain à partir de la position de ces points dans deux images - il convient de se poser la question de la validité de l'approximation proposée au paragraphe précédent. L'erreur commise en effectuant une telle approximation peut être déterminée de la manière suivante.

Étant donnés la position d'un point terrain, les paramètres de prise de vue en stéréo, et la position de l'interface air/eau (miroir) :

1. on détermine la position du point apparent tel que défini ci-dessus (figure 7.1) ;
2. on utilise les droites passant par le point apparent et les capteurs comme *estimations* des rayons apparents ;
3. on effectue le calcul de la réfraction de ces rayons ;
4. on détermine l'intersection de ces rayons réfractés : on obtient ainsi une estimation de la position du point réel ;
5. finalement, on calcule la différence entre la position réelle du point terrain et sa position estimée.

Plusieurs simulations ont été effectuées, pour différentes conditions de prise de vue stéréo - altitudes,  $B/Z$  - et rivières théoriques idéales de profondeurs constantes. Les angles incidents maximaux simulés (45 degrés) sont ceux de prises de vue verticales effectuées avec le capteur décrit à la section 6.1.2 avec la focale équivalente de 28 millimètres. On a ensuite divisé les écarts calculés par la profondeur.

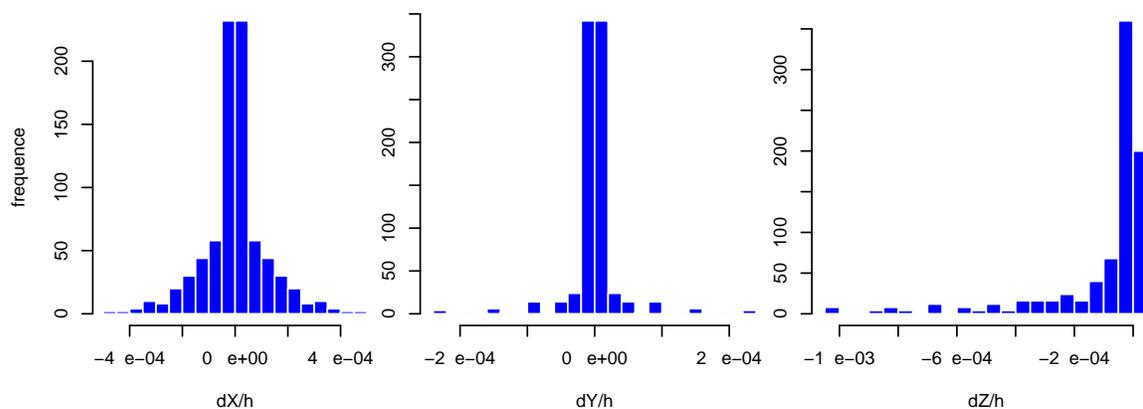


FIG. 7.2 - *Distribution des erreurs relatives sur la position  $(X, Y, Z)$  des points immergés due à l'approximation "point apparent". Les erreurs absolues ont été divisées par la profondeur. Ces données sont le résultat de simulations effectuées pour différents paramètres de prise de vue et différentes profondeurs.*

*Les erreurs dues à l'hypothèse "point apparent" sont inférieures au millième de la hauteur d'eau (voir figure 7.2).*

L'hypothèse de l'existence du point apparent semble donc justifiée. On utilisera l'approximation correspondante dans les paragraphes suivants.

### 7.1.4 Équations de la photogrammétrie à deux milieux

Les équations de la photogrammétrie sont basées sur un modèle de formation des images selon une géométrie *perspective* (voir section 5.1.1). Elles sont valables pour des rayons lumineux rectilignes. Or, dans le cas de la photogrammétrie à deux milieux, du fait de la réfraction, les rayons lumineux réels sont des lignes brisées.

Afin de pouvoir mettre en oeuvre les équations classiques, on s'appuie sur la notion de *rayon apparent*, défini comme le rayon rectiligne qui se superpose au rayon lumineux réel dans sa partie aérienne<sup>4</sup>. La section précédente a permis de valider l'existence du point apparent et de conclure que ce point apparent  $M_a$  se situe approximativement sur ce rayon (cf. figure 7.3).

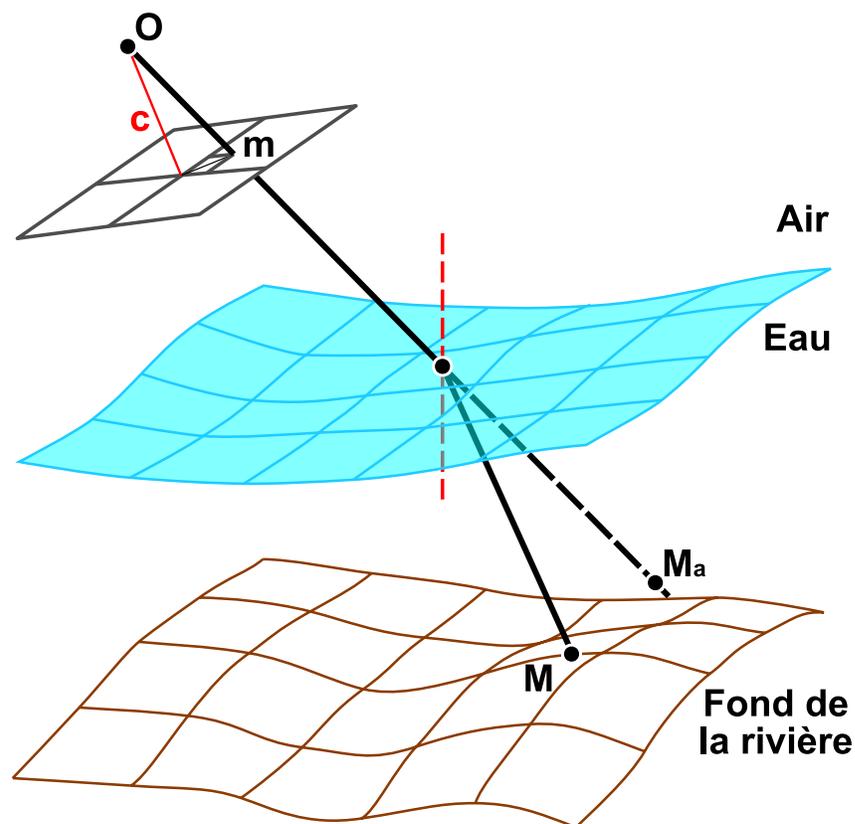


FIG. 7.3 - Photogrammétrie à deux milieux - Notations

On établit la relation entre coordonnées images et coordonnées terrain d'un point *apparent* selon la condition de colinéarité appliquée aux rayons apparents [Krauss et

<sup>4</sup>dit autrement, il s'agit du rayon virtuel du dioptré air/eau

Waldhäusl, 1998, Kasser et Egels, 2001] :

$$\begin{cases} X_a = X_0 + (Z_a - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y_a = Y_0 + (Z_a - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{cases} \quad (7.2)$$

En résumé, les équations classiques de la photogrammétrie ne sont plus valables pour les points réels mais restent valables pour les points apparents tels que définis dans la section 7.1.2. On peut donc utiliser les méthodes classiques de la photogrammétrie, notamment la stéréorestitution, pour calculer la position *apparente* des points immergés. Il faudra ensuite corriger l'effet de la réfraction pour estimer leur position réelle.

## 7.2 Études préliminaires - présentation de l'approche

Dans cette partie, on détermine les caractéristiques de l'effet de la réfraction sur la mesure du relief immergé par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. Ceci permet de déterminer l'approche à utiliser pour modéliser cette réfraction.

On évalue dans un premier temps le déplacement apparent des points immergés dans un cas simplifié (surface plane, 2D) permettant une résolution analytique. On dégage de cette analyse les grandes caractéristiques de l'effet de la réfraction "au premier ordre". On observe ensuite les autres effets de la réfraction, notamment ceux dus à une forte rugosité relative de la surface (occlusion de certains points immergés, déformation des objets, images multiples).

On rappelle que l'on parle de *position apparente* pour désigner la position du point vue par le système des deux capteurs et restituée sans prendre en compte l'effet de la réfraction.

On parle de *déplacement apparent* pour désigner la différence entre position apparente et position réelle.

Les *rayons apparents* sont les rayons virtuels du dioptre air/eau, soit les rayons rectilignes qui se superposent aux rayons lumineux réels dans leur partie aérienne.

### 7.2.1 Résolution d'un cas simplifié

Comme on l'a vu dans la section 7.1.2, le cas du plan vertical contenant les deux centres de projections est particulier : il y a intersection rigoureuse des rayons apparents. On peut de plus calculer cette intersection de manière analytique en exprimant les relations trigonométriques dans les quatre triangles rectangles de la figure 7.4 (voir le détail des calculs en annexe C.2). Avec les notations présentées sur la figure 7.4, on a donc :

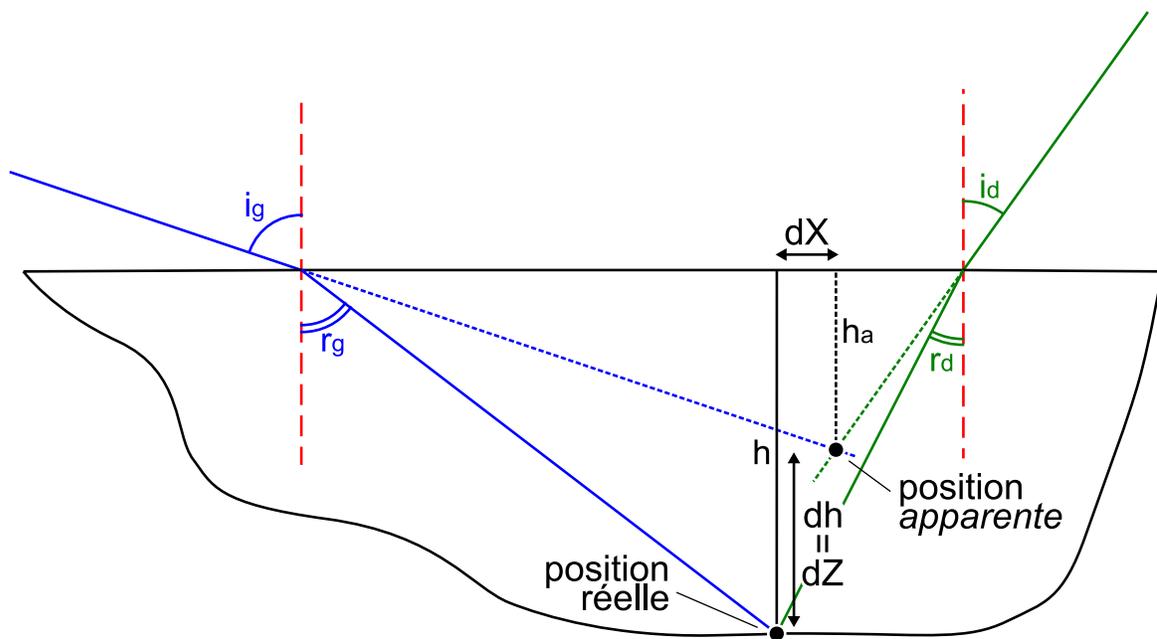


FIG. 7.4 - Calcul de l'influence de la réfraction dans le cas d'un plan vertical

$$\frac{h}{h_a} = \frac{\tan(i_g) + \tan(i_d)}{\tan(r_g) + \tan(r_d)} \quad (7.3)$$

ou encore

$$dZ = dh = h \left( \frac{\tan(r_g) + \tan(r_d)}{\tan(i_g) + \tan(i_d)} - 1 \right) \quad (7.4)$$

Ce résultat (équation 7.4) permet de vérifier l'hypothèse empirique selon laquelle les déplacements apparents dus à la réfraction sont dépendants des angles incidents et proportionnels à l'épaisseur de la lame d'eau traversée. Pour une position dans l'espace donnée (angles d'incidence fixés), le déplacement vertical est proportionnel à la profondeur  $h$ . Pour une rivière dont la profondeur  $h$  serait constante, l'effet de la réfraction varie en fonction des angles d'incidence, c'est à dire en fonction de la position du point dans la zone stéréo.

Il est de plus possible de calculer les déplacements horizontaux avec les mêmes notations :

$$\frac{dx}{h} = \tan(r_g) - \frac{h_a}{h} \tan(i_g) \quad (7.5)$$

### Application numérique et représentation graphique

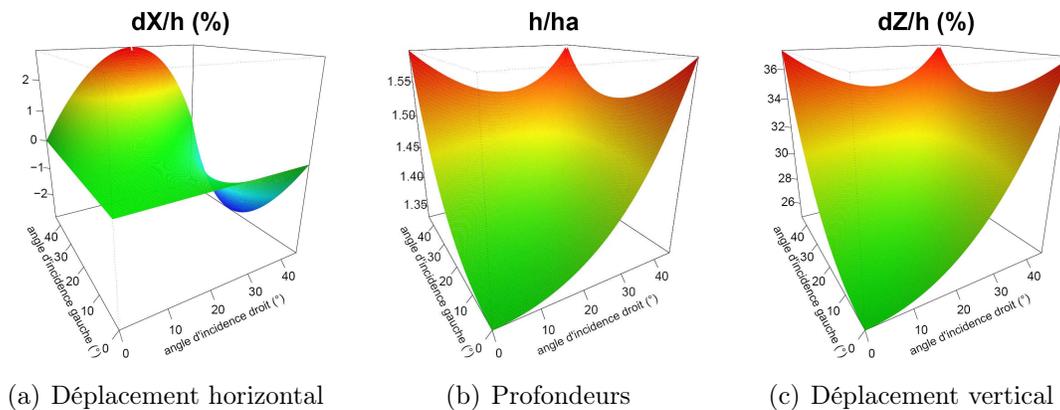


FIG. 7.5 - Déplacements du point apparent en fonction des angles incidents gauche et droit. Ces figures sont reprises en pleine largeur page 245

Pour des angles incidents compris entre 0 et 45 degrés, les valeurs des déplacements apparents horizontaux varient entre -2.9% et +2.9% de la profondeur (valeurs extrêmes de la fonction représentée sur la figure 7.5(a)).

Pour la même plage de variation angulaire, le rapport  $h/h_a$  varie entre 1.33 et 1.59 (figure 7.5(b)). Exprimé en déplacements relatifs, cela correspond à un déplacement vertical apparent variant entre +24.8% et +37.2% de la profondeur (figure 7.5(c)).

Si l'on effectue le rapport entre déplacements apparents horizontaux et verticaux, on constate que les déplacements apparents horizontaux représentent moins de 8% des déplacements verticaux. On peut donc dire que les déplacements dus à la réfraction se situent principalement suivant la verticale.

Les résultats obtenus lors de cette étude préliminaire permettent de formuler les hypothèses suivantes pour le cas général : (i) les hauteurs apparentes sont obtenues en divisant les hauteurs réelles par un facteur correctif variable selon les angles d'incidence gauche et droit ; (ii) la valeur minimale de ce facteur correctif correspond à l'indice relatif de réfraction de l'eau ; (iii) les déplacements horizontaux sont très inférieurs aux déplacements verticaux.

On vérifiera ces hypothèses par les simulations présentées dans les sections suivantes. Selon ces hypothèses, il est possible d'effectuer un étude adimensionnelle de l'effet de la réfraction. Cela permet d'utiliser un modèle de rivière simplifié (altitude du fond et profondeur constantes). Les paramètres d'intérêt seront :

- les déplacements apparents  $dX/h$  et  $dY/h$ , à comparer à la valeur 0 ;
- le rapport  $h/h_a$  à comparer à la valeur 1.33, indice de réfraction de l'eau.

## 7.2.2 Cas réel : images doubles, occlusions

Le cas réel - surface non plane - requiert une modélisation plus complexe. En effet, pour une interface quelconque, il n'y a pas de solution analytique. De plus, avec une surface ondulée, plusieurs cas de figure peuvent se produire. Selon les paramètres de cette surface, et les positions relatives du capteur, de la surface, et de l'objet immergé, il est possible, (i) qu'il n'y ait aucun rayon lumineux de chemin optique minimal reliant l'objet au capteur ; (ii) que plusieurs chemins optiques minimaux existent [Fryer, 1984] ; (iii) ou encore qu'il n'existe qu'un unique rayon.

Pour exemple, on propose une illustration remarquablement pédagogique figure 7.6. Il s'agit d'une image en vue oblique, à incidence rasante, d'une nageuse<sup>5</sup> et du carrelage d'une piscine à travers l'eau. Ce cas présente une large gamme d'angles d'incidence, jusqu'à de très fortes valeurs au dernier plan, ainsi qu'un rapport hauteur d'eau sur hauteur de prise de vue très grand, ce qui permet d'exagérer les déformations dues à la surface relativement plane.

On voit que les déformations dépendent de la configuration locale de la surface ainsi que de l'angle de vue. On constate ainsi que l'identification des croisements des lignes est possible au premier plan (angles d'incidence relativement faibles) et de plus en plus difficile avec l'augmentation des angles d'incidence vers l'arrière plan. On observe de plus que les objets dont la taille est grosse relativement aux vagues restent identifiables. On peut donc imaginer que l'utilisation de résolutions spatiales grossières peut agir comme un lissage et donc diminuer l'influence des vagues. On remarque finalement le phénomène de dédoublement de l'image d'un point à travers le dioptre non plan : le sommet de la tête de la nageuse possède deux images.

---

<sup>5</sup>il s'agit plus exactement d'une hockeuseuse - se référer à <http://www.hockeysub.com> ou <http://hockeysub.ffesm.fr> pour des renseignements sur la pratique de ce sport en France



FIG. 7.6 - *Déformations induites par un dioptre non plan pour des incidences fortes (relativement à la rugosité de surface de l'eau). Photo Bruno Roux*

Cette dernière observation expérimentale prouve que le problème de la modélisation de la réfraction à la traversée d'une surface non plane fait partie de la famille des problèmes mal posés (l'existence et l'unicité de la solution ne sont pas garanties). Par ailleurs, l'étude du cas 2D permet de simplifier les simulations tout en modélisant la réalité de manière satisfaisante. Par exemple, une simulation 2D suffit à mettre en évidence les phénomènes de dédoublement d'image (voir figure 7.7).

On effectuera donc les modélisations pour le cas d'une surface localement non plane dans ce cas simplificateur.

### 7.2.3 Approche choisie : méthode inverse

Les problèmes posés par la restitution du relief immergé à partir de stéréorestituteur analogiques ou analytiques ont conduit dans la littérature à mettre en place des méthodes de correction des *profondeurs* apparentes [Rinner, 1969]. La méthode reprise par la majorité des publications consiste donc à appliquer un facteur correctif variable aux profondeurs apparentes restituées. La valeur de ce facteur dépend de la distance horizontale entre le centre optique et le point d'intersection du rayon avec la surface. On calcule donc deux profondeurs corrigées - à partir des deux rayons - dont on fait la

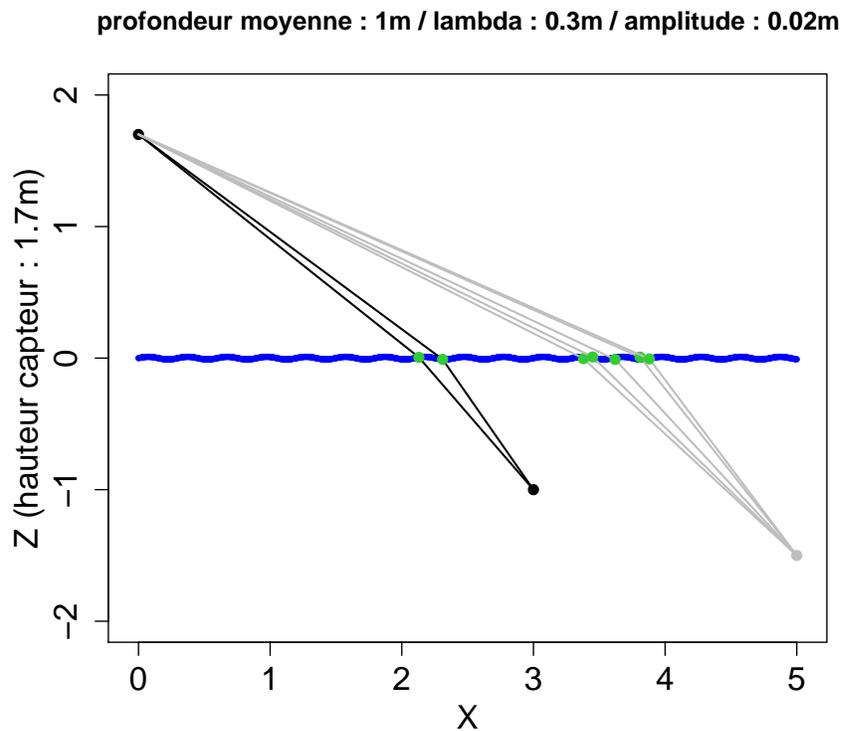


FIG. 7.7 - Surface non plane - mise en évidence de la possibilité d'images multiples. Les paramètres utilisés ont été choisis de manière à modéliser de manière grossière les conditions expérimentales de la figure 7.6. La simulation a été effectuée pour un point correspondant au sommet de la tête de la nageuse (en noir) ainsi que pour un point correspondant à un joint de carrelage situé en arrière-plan (en gris).

moyenne [Fryer, 1983b].

Ces méthodes de correction des profondeurs apparentes présentent plusieurs caractéristiques. D'une part, elles sont adaptées au milieu marin, pour lequel on n'a pas d'effet de pente pour la position moyenne de la surface de l'eau. D'autre part, la géométrie réelle de l'intersection des rayons en 3D est sous-exploitée. L'étude des erreurs commises sur l'estimation des profondeurs a mis en lumière une distribution des erreurs bimodale [Okamoto, 1982, Fryer, 1984, Fryer, 1985a]. Celle-ci, d'autant plus forte que l'on s'éloigne du centre du stéréomodèle, est imputée à la présence des vagues [Fryer, 1984].

La modélisation que nous proposons s'appuie sur la considération de l'intersection approchée des rayons apparents en 3D, utilisant la notion de point apparent introduite plus haut. En ce sens notre travail est beaucoup plus proche des travaux réalisés en biologie physique [Horvath et al., 2003, Barta et Horvath, 2003]. Les modélisations effectuées permettront (i) d'une part de déterminer les caractéristiques 3D de l'effet de réfraction en évaluant l'importance des déplacements apparents horizontaux, ainsi que celle des déplacements verticaux ; (ii) d'autre part de corriger l'effet de la réfraction en calculant l'intersection des rayons refractés à partir de la position apparente restituée et de la position de l'interface.

Dans le cas d'une surface localement plane, on est assuré de l'existence et de l'unicité des trajets des rayons lumineux entre l'objet et les capteurs (cf. calculs en annexe D.3). On se situe donc tout d'abord dans ce cadre, de manière à mettre en oeuvre une méthode inverse (figure 7.8) :

1. on suppose le terrain, les caractéristiques de la surface de l'eau et la géométrie de prise de vue connus.
2. on détermine le trajet d'un rayon lumineux entre l'objet et le capteur selon la loi de Snell-Descartes (cf. équation 7.1)
3. on calcule les positions des points d'intersection de ces rayons avec la surface
4. on détermine les coordonnées images de ces points
5. on calcule finalement la position du point apparent, par stéréorestitution classique.

L'étape "critique" de cette approche est le calcul de la position du point d'intersection avec l'interface. En effet c'est par ce moyen que l'on peut déterminer le trajet

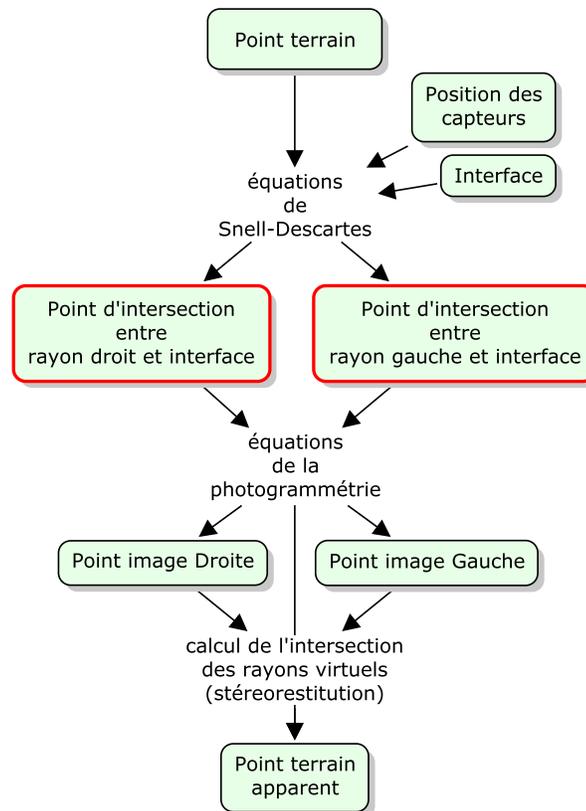


FIG. 7.8 - Méthode inverse pour l'étude de l'influence de la réfraction sur la restitution des points immergés : on part de la connaissance de la position des points terrain, des capteurs et de l'interface pour calculer la position apparente d'un point. Les étapes entourées *en gras* sont détaillées dans la suite

du rayon lumineux réel. Dans le cas d'une surface localement plane, on est assuré de l'existence et de l'unicité de la solution (annexe D.3). On peut donc effectuer des simulations en 3D pour l'ensemble de la zone stéréo. En revanche, ce cas correspond à une approximation de la réalité.

De manière à évaluer l'effet de cette approximation, on effectuera des simulations pour le cas d'une surface non plane localement dans la section 7.5. On étudiera l'effet de la présence de vagues ou encore l'effet d'une erreur sur la position moyenne de l'interface.

## 7.3 Stéréo à travers une surface localement plane

Comme on l'a vu dans la section précédente, la méthode la plus couramment retenue pour la correction de l'effet de réfraction est l'application d'un facteur correctif aux profondeurs. La valeur de ce facteur correctif est au minimum égale à l'indice de correction de réfraction [Fryer, 1983b].

Dans le cas de nos modélisations, ayant pour objectif une application sur des eaux douces, nous avons choisi la valeur de 1.33. Cette valeur pourra être comparée aux valeurs déterminées pour les déplacements apparents verticaux.

De plus, la méthode proposée dans la section précédente (modélisation en 3D) permet d'évaluer les déplacements apparents horizontaux et ainsi de les comparer aux déplacements apparents verticaux.

### 7.3.1 Modélisation en 3D de l'effet de la réfraction pour le cas d'une surface plane

Pour des positions données d'un point immergé, d'une interface plane, et du centre de projection d'un capteur, il existe un et un seul rayon lumineux "brisé" pour lequel le chemin optique est minimal (cf. calculs en annexe D.3). On effectue le calcul du trajet du rayon lumineux pour différentes conditions de terrain et de prise de vue stéréo. On évalue ainsi l'influence relative de la réfraction en stéréo selon différents paramètres.

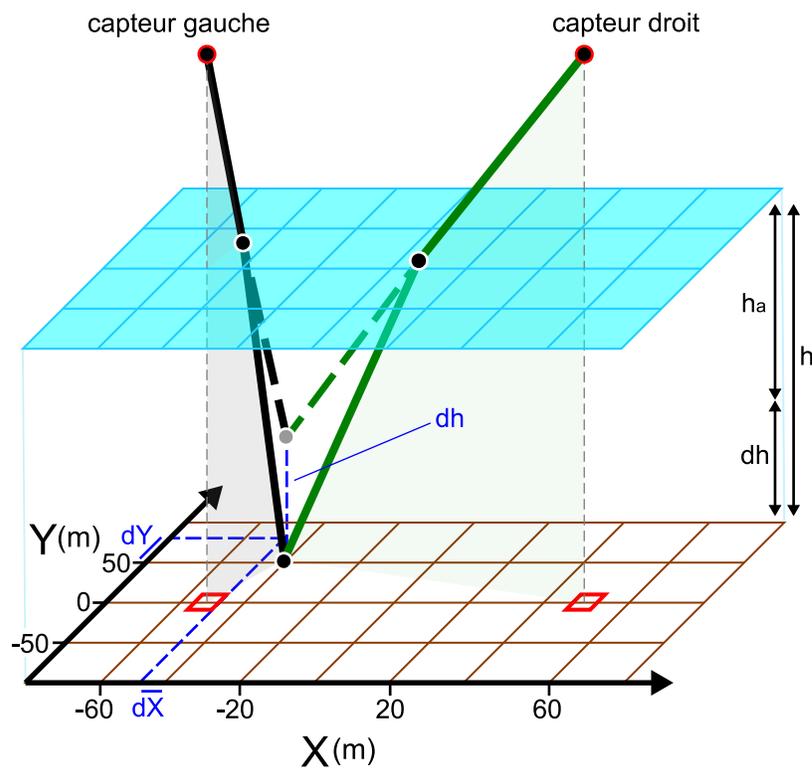


FIG. 7.9 - Notations et modèle de la rivière utilisés pour les simulations réalisées dans cette section. La base stéréoscopique est suivant l'axe des  $X$ . Les carrés représentent la projection au sol de la position des capteurs

D'après la section 7.2.1, il est possible d'effectuer une étude adimensionnelle des déplacements apparents. En particulier, on étudie les variations de ce rapport en utilisant un modèle de rivière simplifié : lame d'eau d'épaisseur constante et fond d'altitude constante (figure 7.9). On examinera les valeurs des rapports  $dX/h$ ,  $dY/h$  et  $h/h_a$  en fonction de différents paramètres, notamment la position  $(X, Y)$  dans la zone stéréo et la configuration de la prise de vue. On détermine ainsi la répartition spatiale des effets de la réfraction en planimétrie et en altimétrie pour différentes configurations stéréoscopiques.

Les simulations ont été effectuées de la manière suivante : on part d'une grille régulière  $(X, Y)$  de points terrains, d'une position de l'interface, et des positions de 2 capteurs ; leur projection dans le plan  $(X, Y)$  est représentée par des carrés dans la figure 7.9. On calcule la distance entre position réelle et position apparente du point (déplacement apparent). Ceci permet de caractériser la répartition spatiale de ces déplacements apparents selon la position du point immergé dans le plan  $(X, Y)$ . On évaluera enfin les valeurs de ces déplacements apparents en fonction des paramètres de prise de vue.

## 7.3.2 Résultats

### 7.3.2.a Caractéristiques spatiales de l'effet de la réfraction en stéréo

On se place dans le cas normal, c'est-à-dire le cas de prises de vue verticales. Le centre du stéréomodèle est en  $(0, 0)$ . L'axe de vol est confondu avec l'axe des  $X$ . La parallaxe et la base stéréoscopique sont donc suivant l'axe des  $X$ , et il y a symétrie de la prise de vue par rapport aux deux axes des  $X$  et des  $Y$ . On constate la même symétrie sur les figures de réfraction (figure 7.10).

Comme précisé plus haut, les déplacements apparents dûs à la réfraction sont exprimés en pourcentage de la hauteur d'eau pour les déplacements horizontaux ; les déplacements apparents verticaux sont évalués par le rapport  $h/h_a$ , dont la valeur est à comparer à 1.33, indice de réfraction relatif de l'eau.

On retrouve le résultat de la section 7.2.1 : la réfraction induit principalement des déplacements apparents suivant l'axe vertical. Les déplacements apparents horizontaux

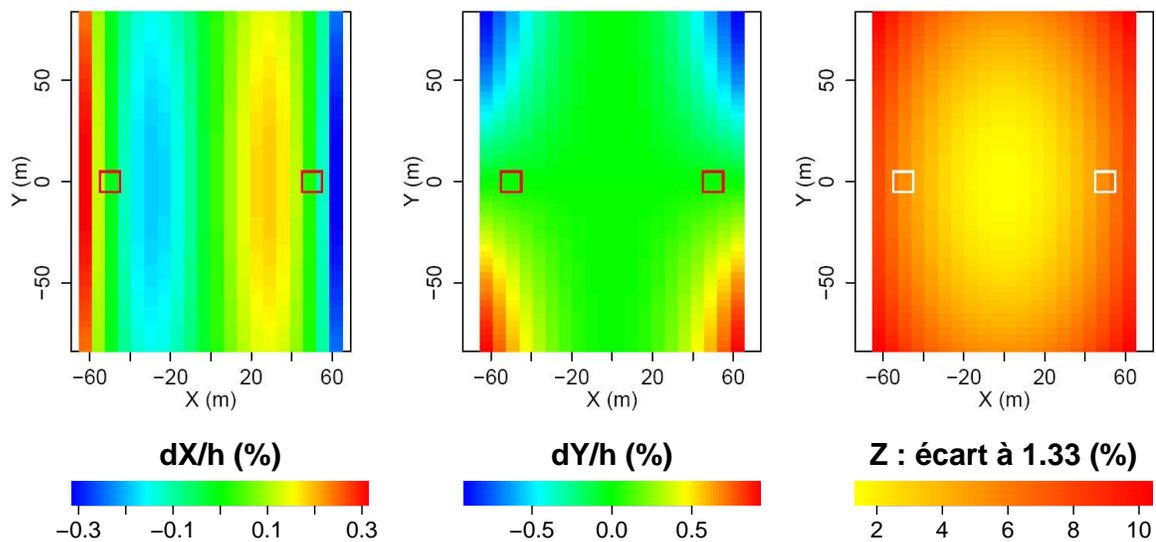


FIG. 7.10 - Déplacement apparent relatifs  $dX/h$ ,  $dY/h$  et verticaux en  $Z$  selon les coordonnées terrain  $(X, Y)$ , en mètres, du point immergé. Les valeurs numériques correspondent à des pourcentages de la hauteur d'eau pour les déplacements horizontaux. Pour les déplacements verticaux, on compare la valeur du quotient  $h/h_a$  à 1.33. Les carrés représentent la projection de la position des capteurs, situés à une altitude de 200 mètres. Cette figure présente les résultats pour un cas normal, avec un  $B/Z$  de 0.5 et  $h/Z$  de 0.005 (soit une profondeur de 1m pour des images aériennes prises à 200m)

sont en effet inférieurs à 2% de la hauteur d'eau alors que la profondeur apparente correspond à la profondeur réelle divisée par plus de 1.33.

On constate de plus que le déplacement apparent en  $Z$  est d'autant plus éloigné de la valeur 1.33 que l'on s'éloigne du centre du stéréomodèle (jusqu'à plus de 10%, donc 10% d'erreur sur la profondeur). Un modèle de réfraction utilisant un coefficient correctif multiplicateur constant pour toute la zone stéréo est donc d'autant plus faux que l'on s'éloigne de ce centre.

Cette première simulation a permis de déterminer les caractéristiques spatiales de l'effet de la réfraction. On a de plus montré que l'influence de la réfraction était très supérieure suivant l'axe vertical par rapport à l'influence de la réfraction dans le plan horizontal. On cherche par la suite à vérifier cette constatation pour différents paramètres de prise de vue. Les caractéristiques spatiales des déplacements apparents ayant été déterminée, on concentre la suite de notre étude sur l'amplitude (min et max) de ces déplacements.

### 7.3.2.b Influence de la focale

Pour un recouvrement et une zone étudiée fixés, on évalue l'influence de la distance focale sur la réfraction. Intuitivement, pour une même zone couverte au sol, une plus courte focale correspondra à des angles d'incidence plus grands et donc un effet de réfraction plus important.

On vérifie (figure 7.11) que pour des longues focales, les déplacements en  $X$  et en  $Y$  deviennent très faibles (moins de 0.1% de la profondeur) et que les déplacements suivant  $Z$  varient moins (moins de 2% d'écart à la valeur 1.33). Dans ce cas, une correction de la réfraction approchée, utilisant un facteur correctif  $h/h_a$  constant, peut devenir acceptable. Si ce cas permet une prise en compte de l'effet de la réfraction plus simple, il est cependant moins favorable pour la précision de l'estimation des altitudes par stéréo car il correspond à des  $B/Z$  plus faibles.

### 7.3.2.c Influence du $B/Z$

Le rapport  $B/Z$  ou rapport base sur éloignement, est un paramètre caractérisant pour partie la précision de la stéréorestitution. cette précision est d'autant meilleure que le  $B/Z$  est grand (points de vue différents).

Pour étudier l'influence de ce rapport  $B/Z$ , on se place à altitude constante, sur un plan d'eau de profondeur constante, avec une configuration capteur fixée. On fait donc varier la base stéréoscopique et ainsi le  $B/Z$ . Dans ce cas les angles d'incidence maximaux de la zone stéréo sont constants, et seules les combinaisons (angle incident droit ; angle incident gauche) varient en fonction du  $B/Z$ . Les résultats des simulations effectuées sur l'ensemble de la zone stéréo pour 3 configurations ( $B/Z$ ) sont présentés sur la figure 7.12.

On constate que pour des  $B/Z$  croissants, on s'écarte de plus en plus du coefficient 1.33. En revanche, la variabilité de ce coefficient semble diminuer. Cela est probablement dû à la diminution de la surface de la zone stéréo et donc la diminution de la variabilité des combinaisons (angle incident gauche ; angle incident droit). Il serait donc envisageable, pour des  $B/Z$  très grands, d'utiliser un coefficient correctif constant ; cela pose en revanche des problèmes de mise en oeuvre opérationnelle, notamment au niveau de la couverture stéréo. La prise de vue à travers l'eau avec de grands  $B/Z$  peut aussi poser des problèmes de visibilité du fond selon la rugosité de surface (voir section 7.5.2.a).

### 7.3.2.d Influence du $h/Z$

Le rapport  $h/Z$  représente l'épaisseur relative de la lame d'eau par rapport à la hauteur de vol. Il est très fort pour des prises de vue à basse altitude (depuis un pont par exemple) ; il est très faible pour des prises de vue à haute altitude - moins de un pour-cent pour les prises de vues effectuées sur la Durance (section 9.3.1).

En pratique, ce facteur joue sur l'angle d'incidence réel sous lequel est vu un point immergé à cause de l'effet de la réfraction. Si l'on se donne une position du capteur et d'un point, et que l'on fait varier la position de l'interface entre ces deux points, on obtient différentes valeurs de  $h/Z$ , comme représenté par les graphiques de gauche et de droite de la figure 7.13. Un point est vu à une incidence plus forte lorsque le rapport

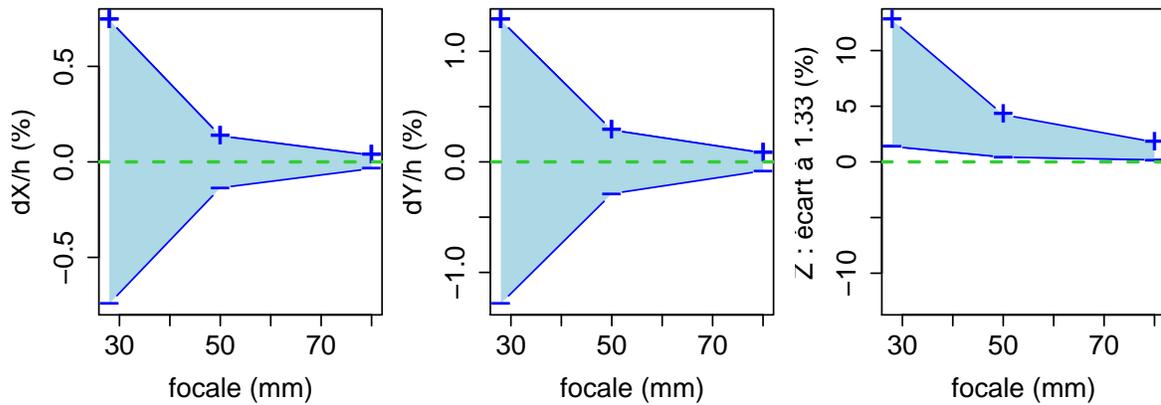


FIG. 7.11 - Réfraction - influence de la focale  $c$ . Enveloppes des déplacements apparents horizontaux relatifs (à gauche et au milieu). Enveloppe de l'écart par rapport au coefficient 1.33 pour les déplacements apparents verticaux (à droite). Toutes les valeurs sont des pourcentages

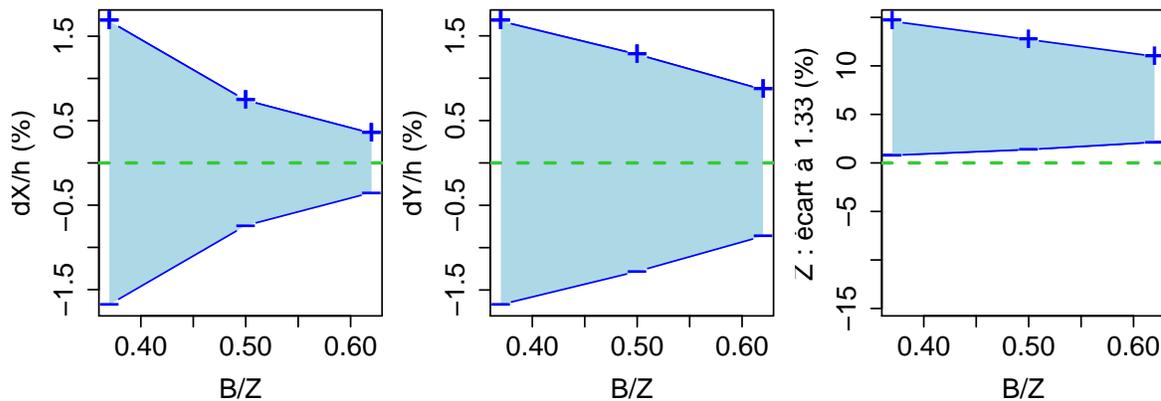


FIG. 7.12 - Réfraction - influence du  $B/Z$ . Enveloppes des déplacements apparents horizontaux relatifs (à gauche et au milieu). Enveloppe de l'écart par rapport au coefficient 1.33 pour les déplacements apparents verticaux (à droite). Toutes les valeurs sont des pourcentages

$h/Z$  est fort (à droite).

Pour se donner une idée de l'importance de ce phénomène, on a donc simulé l'effet de la réfraction pour différentes positions de l'interface, les positions du capteur et d'un point étant données. Les simulations ont été effectuées pour le cas où l'angle d'incidence en l'absence d'eau est de  $45^\circ$ . Cet angle est du même ordre de grandeur que l'angle maximal des rayons en bord de champ (section 6.2.2) pour des prises de vue en conditions normales (angles par rapport à la verticale inférieurs à  $5^\circ$ ).

On peut donc quantifier cet effet "loupe", c'est à dire la diminution du champ de vue de la zone immergée en fonction du  $h/Z$ . En effet pour des valeurs élevées de ce rapport, l'emprise au sol des images en zone immergée est moins forte que l'emprise théorique en l'absence d'eau. Cela a une influence sur le recouvrement des images dans les zones immergées. Avec les conditions de prise de vue déterminées ( $Z=200\text{m}$ ) sur le site d'application ( $h \approx 1 \text{ m}$ ), cet effet est négligeable.

### 7.3.3 Bilan

On a montré que, dans le cas 3D surface plane, il était possible de déterminer la géométrie des rayons, réels et apparents. Les simulations effectuées ont montré que :

1. l'effet de la réfraction est dépendant de la position dans le stéréomodèle, notamment de la combinaison des angles d'incidence gauche et droit,
2. l'effet de la réfraction est d'autant plus fort que l'on s'éloigne du centre du stéréomodèle (effet de l'incidence),
3. les déplacements apparents en  $Z$  sont très supérieurs aux déplacements apparents en  $X$  et  $Y$ , et ce, quelles que soient les conditions de prise de vue.

On peut ainsi calculer un coefficient de correction de l'effet de la réfraction en tout point de la zone stéréo. *Dans le cas d'une prise de vue sur une rivière dont la surface peut être considérée comme localement plane l'effet de la réfraction pourra être corrigé, à condition de connaître la position de la surface ainsi que les paramètres d'orientation externe.*