

Influence d'une erreur sur la position moyenne de la surface

Selon les résultats présentés plus haut, on peut, pour un couple donné, effectuer un calcul de la correction de la réfraction en chaque point à condition de connaître la position de l'interface au dessus de chaque point. Dans la littérature [Fryer, 1983b, Westaway et al., 2001] la méthode de correction de la réfraction est basée sur l'application d'un coefficient correcteur aux profondeurs. L'inconvénient d'une telle approche est le découplage des parties émergées et immergées des rayons. Or le calcul de la profondeur n'est possible qu'une fois la position de l'interface estimée [Westaway et al., 2001].

Une approche 3D telle que celle proposée dans la section précédente permet de conserver le lien entre partie émergée et partie immergée des rayons lumineux. Ce lien est matérialisé par l'interface air/eau. La qualité de l'estimation de la position de cet interface a une relation directe avec la qualité des profondeurs (ou de la topographie) estimées. Cependant l'étude de l'effet d'une erreur d'estimation de la position de l'interface sur la mesure du relief immergé n'apparaît pas dans la littérature. Il convient donc d'examiner ce point. Le cas 2D, représenté sur la figure 7.14, permet de se donner une bonne idée du problème.

Plusieurs modélisations ont été effectuées. On a choisi d'utiliser des paramètres représentatifs d'une mission terrain réellement effectuée sur la Durance, c'est à dire une altitude de vol de 200 mètres environ pour une résolution au sol inférieure à 0.1 mètre, avec un appareil au grand angle (28mm). La figure 7.15 montre l'influence d'une méconnaissance de la position de l'interface de 0.05, 0.10 ou 0.15 mètres, en positif et en négatif.

On constate qu'avec ces conditions de prise de vue (notamment un rapport de hauteur d'eau sur hauteur de prise de vue très faible), la conséquence de la méconnaissance de la position de l'interface est un biais et une dispersion de la mesure (ne dépendant pas de la profondeur du point). On retrouve donc, avec des modèles géométriques, des résultats comparables à ceux obtenus par le biais de modèles statistiques [Brown et Majumdar, 1992, Luchinin, 1996]. Il est donc primordial de connaître l'altitude de l'interface de la manière la plus précise et la moins biaisée possible.

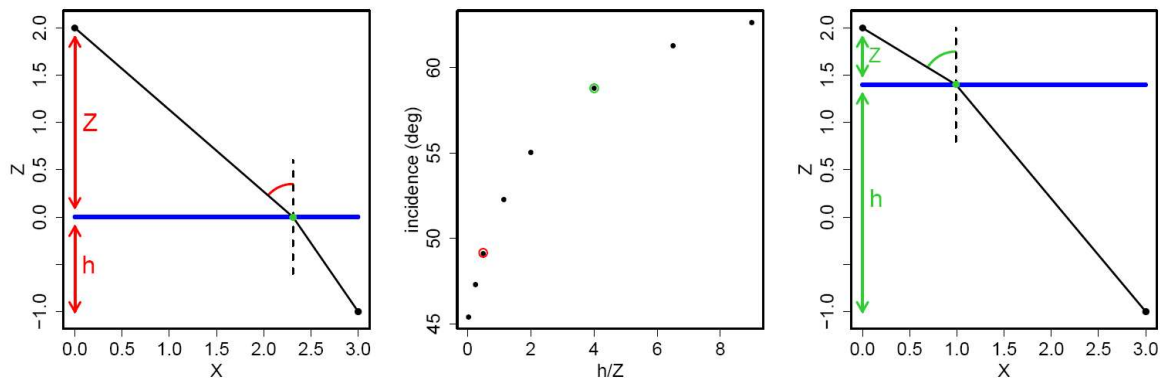


FIG. 7.13 - Réfraction - influence du rapport h/Z . À gauche : prise de vue avec $h/Z = 0.5$. Au milieu : angle d'incidence en fonction de h/Z . Les points correspondant aux cas illustrés sont entourés. À droite : prise de vue avec $h/Z = 4$

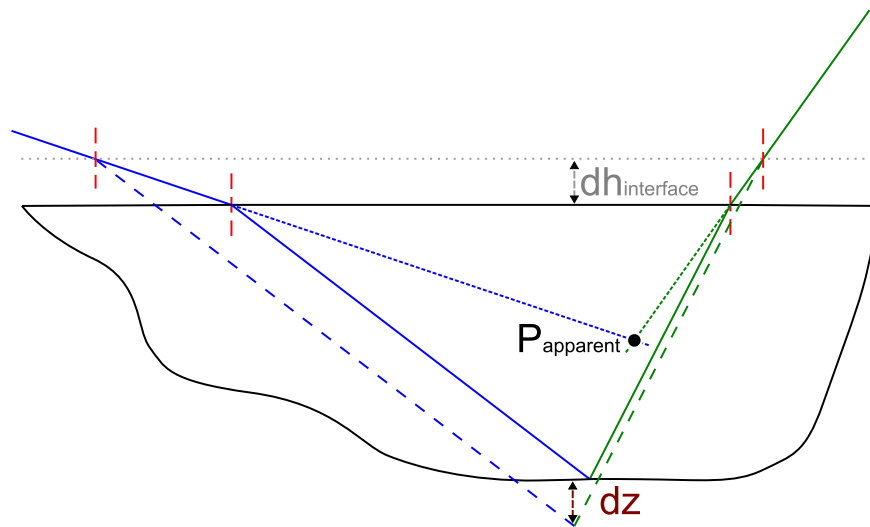


FIG. 7.14 - Réfraction - influence d'une méconnaissance de l'interface

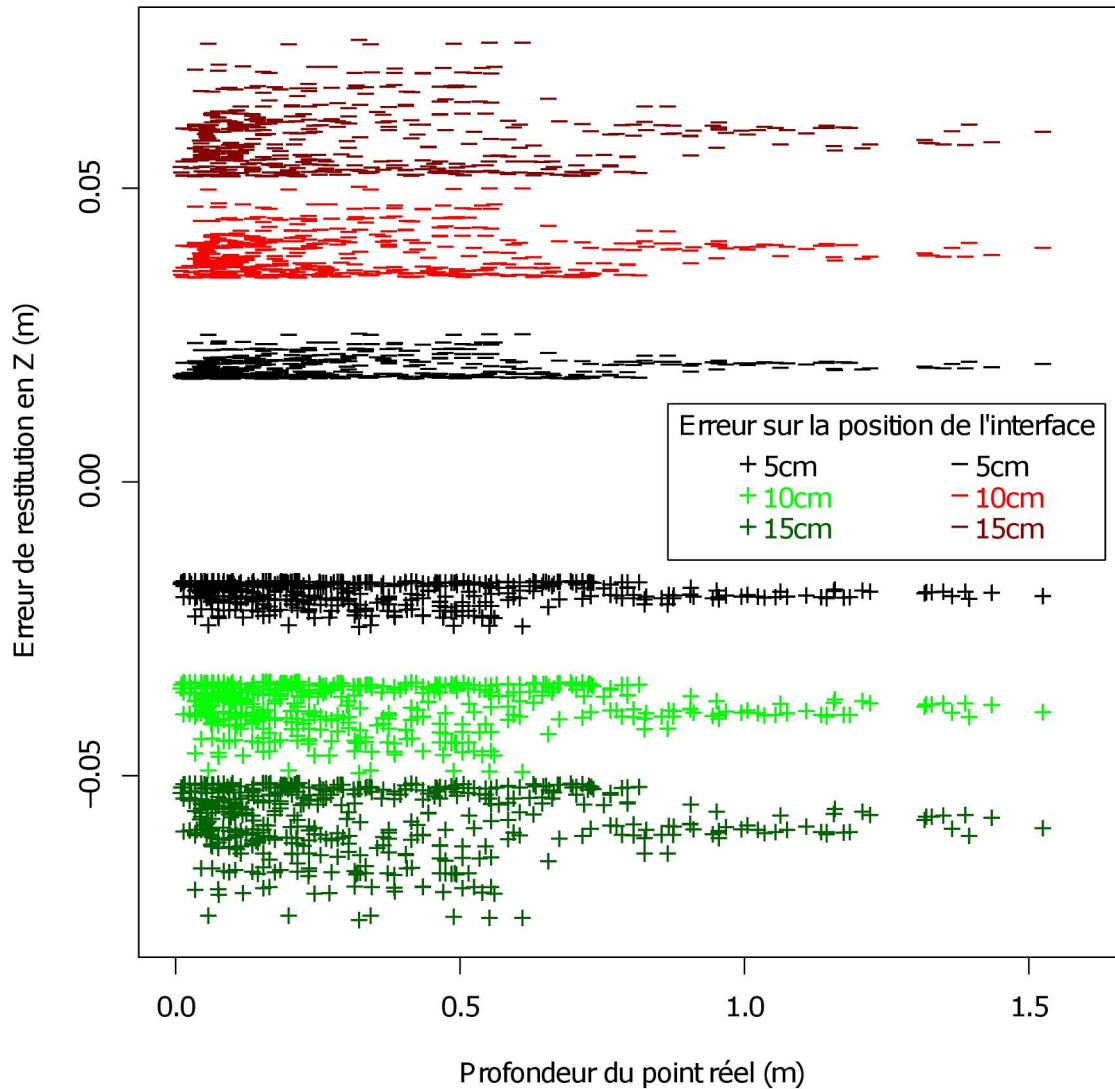


FIG. 7.15 - Influence d'une méconnaissance de l'interface, effet de la profondeur. Cette figure présente une simulation effectuée avec les paramètres d'un cas terrain réel : un couple de photos pris sur la Durance. La hauteur de vol est 220m, le B/Z vaut 0.48, les angles maximaux de l'objectif équivalent à un 28mm sont de 45° environ, et le pixel au sol mesure 9cm environ

7.5 Influence des vagues

Les simulations des sections précédentes sont basées sur l'hypothèse d'une approximation locale de la surface par un plan. On prend donc en compte l'effet de la position moyenne de la surface, en considérant la normale locale à la surface comme verticale. La qualité de cette approximation dépend directement des paramètres caractérisant la surface réelle et l'influence des vagues ou de la rugosité de surface, doit être examinée.

Une référence propose une solution au problème des vagues en milieu côtier en évaluant l'intérêt de l'utilisation d'une plaque de plexiglas afin d'aplanir la surface de l'eau [Fryer, 1983a, Fryer, 1983b]. Dans la littérature, les travaux de [Okamoto, 1982], dont les résultats sont repris par [Fryer, 1984, Fryer, 1985a], ont visé à quantifier l'erreur due aux vagues en milieu marin, en modélisant des vagues de grande longueur d'onde ainsi que leur propagation. Dans ces travaux, une partie des erreurs est à attribuer à l'orientation externe, réalisée à partir de points immergés.

De plus, les paramètres simulés permettent difficilement une transposition aux problématiques rencontrées pour des acquisitions en rivière (longueurs d'onde des vagues (houle) représentatives du milieu marin - comprises entre 25 et 92 mètres, profondeurs pouvant atteindre 20 mètres, altitude de vol supérieure à 500 mètres).

Ensuite, du fait probablement de la plage de variation de paramètres pour ces travaux (longues vagues, altitudes fortes), l'importance relative de la rugosité de surface en fonction des paramètres de prise de vue n'est pas discutée.

Enfin, comme on l'a dit plus haut, probablement à nouveau en raison des conditions expérimentales, la faisabilité même de la mesure est très peu abordée.

On effectue donc dans cette section des modélisations permettant d'évaluer l'influence de l'approximation "surface localement plane" dans le cas d'une acquisition réalisée sur une rivière (paramètres des vagues, paramètres de prise de vue). On utilisera pour cela de nouvelles simulations, présentées dans la section 7.5.1. Les résultats de ces simulations figurent dans la section 7.5.2.

7.5.1 Influence de la rugosité de surface - modélisation en 2D

Comme spécifié plus haut, le cas d'une surface non localement plane ne permet pas de résolution analytique dans le cas général. On prend donc des hypothèses simplificatrices permettant de modéliser ces phénomènes. Ces hypothèses et l'approche de modélisation sont décrites ci-dessous.

On cherche à évaluer l'influence des différents paramètres physiques caractérisant la surface d'un cours d'eau. On s'intéresse principalement aux paramètres pour lesquels on peut - sur le terrain - au minimum évaluer un ordre de grandeur, voire mesurer une valeur. Ces paramètres peuvent être utilisés pour définir des mésohabitats. Ceux-ci sont caractérisés selon une méthode combinant les typologies de [Borsányi et al., 2004] et [Malavoi et Souchon, 2002] à partir des valeurs de hauteur, vitesse, pente et rugosité de surface (vagues). Les figures 7.16 et 7.17 décrivent les critères utilisés pour l'identification de ces mésohabitats.

Sur le terrain, dans les zones de forte pente, on constate l'impossibilité de distinguer les objets à travers la surface. On se limitera donc les variables d'études à la hauteur moyenne de la lame d'eau (la profondeur h) et la rugosité de surface, caractérisée par l'amplitude moyenne A et la longueur d'onde moyenne λ de ces vaguelettes.

Ces paramètres décrivent une surface de type "tôle ondulée", dont la modélisation peut être effectuée en 2D dans le plan vertical (X, Z) (figure 7.18). La projection de la surface dans ce plan permet en effet de décrire l'influence de ces paramètres tout en s'affranchissant de la résolution de la condition de coplanarité des rayons incidents et réfractés. On supprime de ce fait une variable et une équation. Les vagues sont modélisées par des sinusoides. La projection de la surface dans le plan vertical a pour équation :

$$z = h + \frac{A}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (x - x_0) \right) \quad (7.6)$$

avec λ la longueur d'onde, A l'amplitude, h la hauteur moyenne et x_0 la phase (figure 7.18).

De plus, il a été décidé de se limiter aux rayons pour lesquels il n'y a qu'une traversée de l'interface entre le point objet et le capteur. Les traversées multiples de l'interface ne sont pas calculées. On évaluera tout de même leur fréquence d'occurrence en fonction

Surface de l'eau	Pente	Vitesse	Profondeur	Code
Lisse ondulée h < 5cm	> 0.4% forte	> 30 cm/s	> 60 cm	A
		< 30 cm/s		
	< 0.4% faible	> 30 cm/s	> 60 cm	B1
			< 60 cm	B2
		< 30 cm/s	> 60 cm	C
			< 60 cm	D
présence de vagues h > 5cm	> 0.4% forte	> 30 cm/s	> 60 cm	E
		< 30 cm/s	< 60 cm	F
	< 0.4% faible	> 30 cm/s	> 60 cm	G1
			< 60 cm	G2
		< 30 cm/s	> 60 cm	
			< 60 cm	H

FIG. 7.16 - Grille des critères physiques utilisés pour l'identification des mésohabitats et leur codification (extrait de [Le Coarer et al., 2005]).

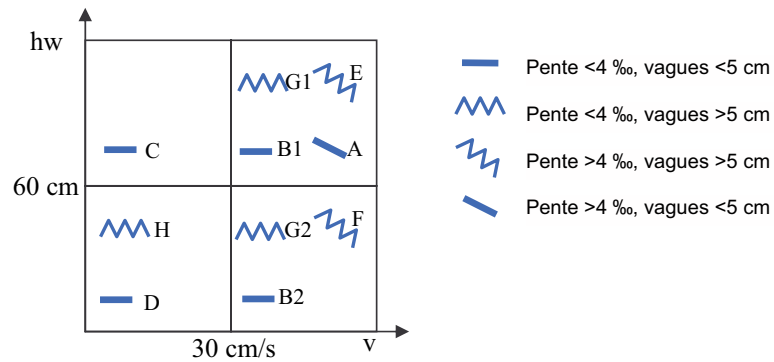


FIG. 7.17 - Représentation schématisée de la codification des mésohabitats dans le plan vitesse/profondeur (extrait de [Le Coarer et al., 2005]).

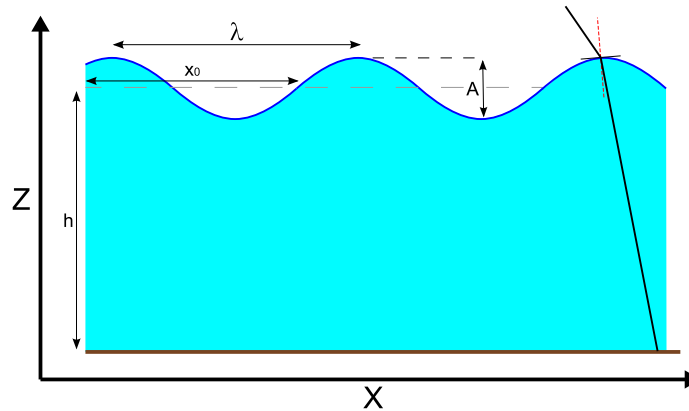


FIG. 7.18 - Paramètres physiques caractérisant la surface sinusoïdale

des paramètres de la surface et de prise de vue.

Pour évaluer l'influence de la réfraction à travers une surface sinusoïdale, l'approche est similaire à celle utilisée dans la section précédente (voir figure 7.8) : on s'appuie sur la notion de point apparent. Il faut donc encore une fois déterminer le point de passage du rayon lumineux à travers l'interface. Ce point vérifie les deux propriétés suivantes : (i) il appartient à la surface ; (ii) en ce point, le rapport des sinus des angles entre les rayons et la normale à l'interface est égal au rapport des coefficients de réfraction (équation de Snell-Descartes, voir 7.1). La mise en équation de ces contraintes dans le cas d'une surface sinusoïdale est détaillée dans l'annexe D.4.

Il faut noter que l'ensemble des solutions vérifiant les deux hypothèses énoncées ci-dessus n'est pas rigoureusement identique à l'ensemble réel des solutions. En effet, pour des prises de vue rasantes, plusieurs phénomènes peuvent se produire, notamment (i) du point de vue du capteur, le sommet d'une vague peut "cacher" une partie de la surface ; (ii) un rayon lumineux peut subir plusieurs réfractions dans son trajet de l'objet au capteur.

Le cas de chemins optiques minimaux entre l'objet et le capteur présentant des traversées et/ou réflexions multiples est écarté. En d'autres termes, on effectue le calcul pour les rayons qui sont formés de 2 segments. On n'effectue pas le calcul des rayons composés de 3 segments ou plus. Pour cela, on élimine les zones de la surface non visibles directement depuis le capteur (occlusion) ainsi que les solutions trouvées pour lesquelles une partie rectiligne d'un rayon lumineux traverse plusieurs milieux (traversées multiples).

7.5.2 Influence de la rugosité de surface - résultats de simulations

Il est possible, selon la configuration de la surface et selon la configuration de prise de vue, qu'un objet situé sous cette surface soit *invisible* depuis le capteur. Pour étudier la faisabilité de la mesure de la profondeur de rivière par stéréophotogrammétrie dans le cas général, *il faut dans un premier temps déterminer dans quels cas les points du fond de la rivière sont visibles*. On effectue donc des simulations en faisant varier les paramètres de prise de vue et de la surface. L'objectif est de déterminer un critère permettant de prévoir la visibilité du fond selon les conditions expérimentales.

Dans un deuxième temps, on évaluera quantitativement les déplacements apparents dus à une surface sinusoïdale. L'intérêt majeur de telles modélisations est de *déterminer l'erreur commise lorsque l'on effectue les corrections de la réfraction avec une hypothèse de surface localement plane*.

7.5.2.a Visibilité du fond de la rivière à travers une surface sinusoïdale

Les modélisations effectuées sont les suivantes : pour une position de capteur donnée, on détermine le trajet du ou des rayons lumineux de chemins optiques minimaux entre l'objet et le capteur. Les paramètres variables sont les suivants : position du point, altitude moyenne de l'interface, amplitude des vagues, longueur d'onde des vagues, phase des vagues. Les solutions recherchées concernent : l'existence ainsi que, le cas échéant, le trajet du rayon lumineux joignant l'objet au capteur. Les calculs effectués pour ces modélisations sont détaillés dans l'annexe [D.4](#).

De manière à évaluer l'influence de ces différents paramètres de façon synthétique, on introduit l'indice suivant :

$$\text{indice de rugosité relative de surface} = \frac{\pi A}{\lambda} \cdot \frac{|X_{\text{capteur}} - X_{\text{point}}|}{Z_{\text{capteur}} - Z_{\text{eau}}} \quad (7.7)$$

Cet indice a une valeur nulle pour un surface plane ($A = 0$ et/ou $\lambda = \infty$). Il a des valeurs très grandes :

- pour des vagues de forte amplitude ;
- pour des vagues de faible longueur d'onde ;
- lorsque le capteur est très proche de l'eau ;

– lorsque le capteur est très éloigné de la verticale de l'objet (incidences rasantes). De plus, d'après la section 7.3.2.d, pour les prises de vues aériennes sur une rivière peu profonde (h/Z faible), l'expression de l'indice peut se simplifier en :

$$\text{indice de rugosité relative de surface} = \frac{\pi A \tan(i)}{\lambda} \quad (7.8)$$

avec i l'angle d'incidence du rayon lumineux.

La figure 7.19 montre les résultats des modélisations effectuées : on représente le nombre de rayons lumineux (ou réfractions) possibles en fonction des valeurs de l'indice de rugosité relative de surface.

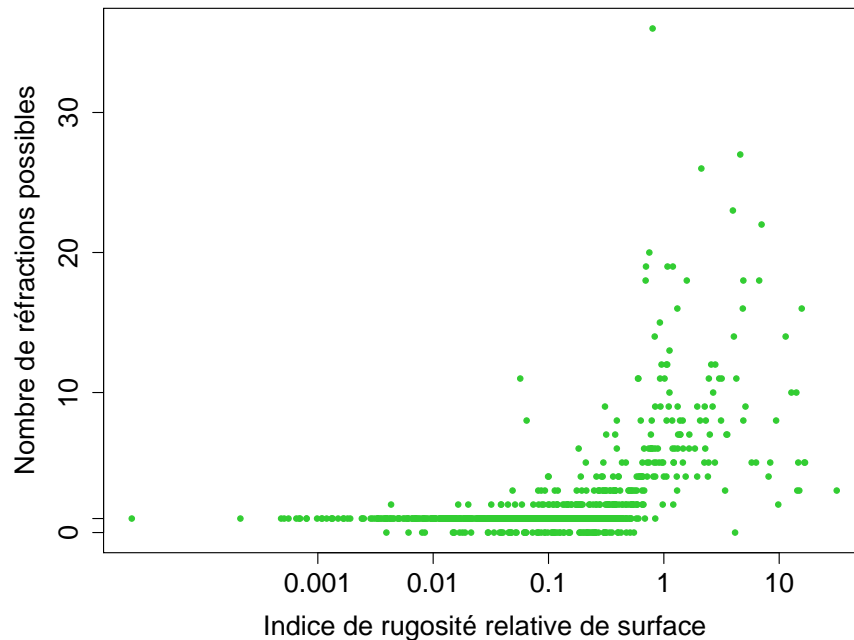


FIG. 7.19 - *Surface non plane - nombre de trajets lumineux possibles entre un objet et le capteur.*

Le nuage de points présente une asymptote vers une solution unique pour les indices très faibles, ce qui correspond au cas des surfaces quasi-planes et permet de retrouver le cas d'existence et d'unicité de la solution pour les surfaces horizontales (voir section 7.3.1 et annexe D.3). Ensuite, pour des valeurs de l'indice proches de 1, deux cas sont possibles : (i) pas de solution ; (ii) plusieurs solutions, avec une valeur moyenne et une dispersion du nombre de solutions qui augmente avec la valeur de l'indice. Enfin, le nombre de simulations conduisant à de fortes valeurs de l'indice n'est pas suffisant pour tirer une conclusion significative.

7.5.2.b Influence des vaguelettes sur la mesure

On l'a vu dans la section précédente, pour des valeurs trop fortes de l'indice de rugosité relative, un même point peut avoir plusieurs images. La formation de l'image d'un objet - composé d'un ensemble cohérent de points - semble donc extrêmement difficile pour de telles valeurs de l'indice. La mesure de la position d'un objet en stéréo passant par l'identification d'un même objet dans deux images, on se placera pour la section courante dans le cas de valeurs de l'indice assez faibles (inférieures à 1).

Les phénomènes étudiés sont les deux suivants :

Tout d'abord, la présence des vagues ou vaguelettes peut empêcher l'identification de points homologues d'une image à l'autre si la déformation des objets est trop forte. Cet aspect est étudié dans un premier paragraphe.

Ensuite, dans le cas où l'on peut identifier des points homologues, les vagues auront une influence sur la mesure elle-même. En effet, si l'on effectue la correction de la réfraction en prenant l'hypothèse d'une surface plane, on introduit une erreur qui dépend de la configuration locale de la surface. On cherche donc dans le deuxième paragraphe à caractériser cette erreur.

Faisabilité - Déformation des objets : De manière à obtenir une quantification de la déformation des objets, 600 modélisations ont été effectuées, avec des paramètres correspondant à ceux que l'on peut rencontrer lors de l'acquisition d'images sur une rivière type Durance. Les hauteurs d'eau sont inférieures à 1 mètre, la hauteur de prise de vue est de 200 mètres environ, les angles d'incidence maximaux inférieurs à 40 degrés, pour des vagues d'amplitude maximale de 10 centimètres et de longueur d'onde minimale de 1 mètre⁶.

Pour chaque jeu de paramètres (prise de vue, caractéristiques des vagues, épaisseur de la lame d'eau), on a effectué 50 simulations en faisant varier la phase x_0 de la vague. Les résultats de ces modélisations sont synthétisés sur la figure D.3 en annexe et sur la figure 7.20.

⁶Pour des raisons de stabilité numérique et de temps de calcul, le cas de valeurs très fortes de l'indice (petites longueurs d'onde, grande amplitude, relativement à la position de prise de vue) a été traité avec des valeurs de la longueur d'onde supérieures à 1 mètre. On a ainsi exploité les propriétés adimensionnelles de l'indice en ajustant les valeurs des paramètres de prise de vue et de l'amplitude moyenne pour obtenir les valeurs souhaitées de l'indice

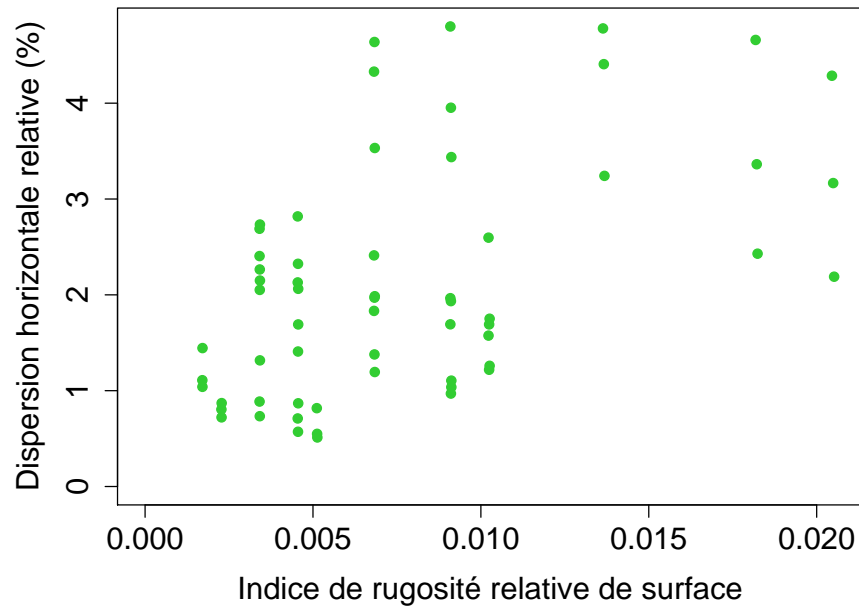


FIG. 7.20 - Déformations planes dues aux vagues, en pourcentage de la hauteur d'eau. On représente la dispersion horizontale de la mesure en fonction de la rugosité relative de surface (équation 7.7). Cette dispersion est exprimée en pourcentage de la hauteur d'eau

On constate (figure D.3, en annexe) qu'il n'y a probablement aucune relation linéaire entre valeur du déplacement et valeur de l'indice (probabilité que les deux variables soient linéairement indépendantes : 0.31). La valeur moyenne du déplacement horizontal pour toutes les simulations effectuées est négligeable (3.10^{-4} mètres). En d'autres termes, la présence de vagues n'introduit pas de biais planimétrique sur les positions. En revanche (figure 7.20), la dispersion planimétrique est d'autant plus importante que l'indice de rugosité est grand ($R^2 = 0.25$, p-value : 2.37×10^{-5}).

En pratique cette dispersion se traduit par une déformation des objets immergés. Cette déformation est proportionnelle à la profondeur et dépend de la rugosité relative de surface. Si cette déformation est supérieure à la taille de l'objet, l'identification de ce dernier devient impossible. Si cette déformation est légèrement inférieure à la taille de l'objet, ce dernier est identifiable, mais sa forme est modifiée.

On a donc montré que pour des vagues de moins de 10 centimètres d'amplitude, de longueur d'onde supérieure à 1 mètre, et pour des angles incidents maximaux de 40 degrés, la déformation (X, Y) des objets est inférieure à 5% de la profondeur (figure 7.20). Pour ce type de vagues, sur la Durance (profondeurs le plus souvent inférieures à 1 mètre), les déformations seront donc inférieures à 5 centimètres. Cette valeur est inférieure à la taille du pixel (section 6.2.2).

Erreur sur l'altitude et dispersion de la mesure due aux vagues : A partir des mêmes simulations que celles présentées dans le paragraphe précédent, on détermine le biais dû à l'approximation "surface localement plane", en fonction de la rugosité relative de la surface (voir figure D.4 en annexe). On constate là encore l'absence probable de relation linéaire entre biais de mesure et rugosité relative de surface (probabilité : 0.96).

En revanche, la dispersion relative de la mesure due à l'approximation "surface localement plane" est fortement corrélée à la rugosité relative de surface ($R^2 = 0.43$, p-value : 5.22×10^{-9}). La figure 7.21 montre le résultat des simulations. Celle ci représente la dispersion relative de la mesure (écart-type de l'erreur divisé par l'épaisseur de la lame d'eau) en fonction des valeurs de l'indice de rugosité relative de surface.

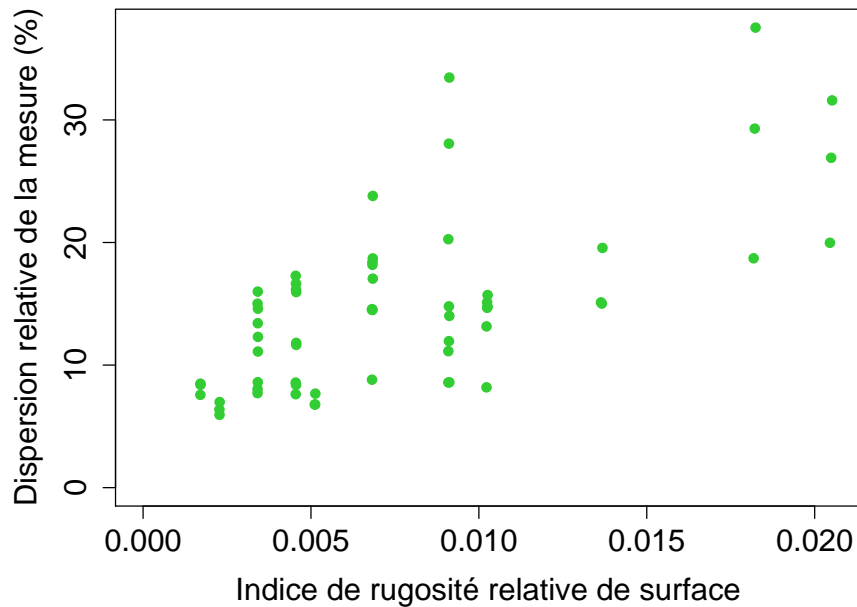


FIG. 7.21 - Influence des vagues sur le Z restitué. On représente l'écart-type de l'erreur sur la mesure en Z causée par l'approximation surface plane. Cet écart-type est exprimé en pourcentage de la profondeur. On étudie ses variations en fonction de la rugosité relative de l'interface (equation 7.7)

7.6 Discussion et conclusions

7.6.1 Effet de la réfraction en stéréo

Ce chapitre a permis de montrer que, si les rayons apparents n'ont pas d'intersection en théorie, il est tout de même possible - pour une rugosité relative de surface faible - d'effectuer une stéréorestitution basée sur la position apparente des points.

La réfraction induit des déplacements apparents des points restitués qui ont surtout lieu en altimétrie dans le cas de prises de vue verticales. Les déplacements en planimétrie sont très inférieurs et seront donc négligés dans le cas général. L'effet de la réfraction est proportionnel à la profondeur. Pour une profondeur donnée, il dépend de la position du point dans la zone stéréo, c'est à dire de la combinaison des angles incidents gauche et droit.

7.6.2 Prise en compte de cet effet - approximations possibles - bruit de mesure intrinsèque résultant

Il est possible de corriger l'effet de la réfraction. En effet, si l'on considère la surface comme localement plane, il est possible de calculer le rapport h/h_a en tout point de la zone stéréo (section 7.3.1). On peut ainsi corriger les positions apparentes des points restitués.

De manière à pouvoir calculer le coefficient correcteur en chaque point, il faut qu'il y ait un et un seul rayon lumineux joignant l'objet au capteur. Ce cas correspond aux surfaces peu rugueuses relativement aux conditions de prises de vue. On a donc introduit un indice de rugosité relative de surface (équation 7.7) qui possède une expression simplifiée dans le cas où l'altitude est grande devant la profondeur (équation 7.8). La stéréorestitution à travers l'eau et la correction de l'effet de réfraction est possible pour des valeurs faibles de cet indice.

La présence de vaguelettes apporte cependant un bruit sur la mesure de la position des points immergés (section 7.5.2.b). Cette dispersion provient de l'approximation de l'interface par une surface localement plane ; cette approximation est nécessaire pour que l'effet de la réfraction soit modélisé puis corrigé. Les positions des points immergés corrigées de la réfraction comporteront donc un bruit de mesure intrinsèque.

7.6.3 Influence des vagues - faisabilité de la mesure

Tout d'abord, dans certaines conditions (section 7.5.2.a), les points immergés peuvent être invisibles à travers l'interface. Pour évaluer cet effet, on a introduit un indice de rugosité relative de surface (équations 7.7 et 7.8). Pour les valeurs de cet indice très inférieures à 1, l'interface se comporte comme une interface plane, c'est à dire que l'on est assuré de l'existence (et de l'unicité) d'un rayon lumineux issu d'un point immergé atteignant le capteur. En d'autres termes, à chaque point immergé correspond un point dans l'image. En revanche, pour des valeurs de l'indice proches de 1 ou supérieures à 1, il peut y avoir une multiplicité ou une absence de rayons lumineux joignant un point immergé au capteur. L'image de certains points immergés ne peut pas, dans ce cas, être définie avec les équations de la photogrammétrie présentées dans la section 7.1.4.

D'autre part, il est possible que les objets soient déformés au point de ne plus être identifiables. Dans ce cas l'appariement de points homologues nécessaire à la stéréores-titution peut échouer. Afin d'évaluer les conditions de réalisation de ce phénomène, il est possible de se fonder sur les résultats obtenus au niveau ponctuel (rayon par rayon, voir section 7.5.2.b) pour en tirer des conclusions au niveau des objets.

En première approximation on peut considérer que la déformation est proportion-nelle à la rugosité relative de surface et à la profondeur. En notant d la déformation et o la taille caractéristique des objets immergés, il faut, pour qu'un objet reste identi-fiable à travers une surface non plane, que le rapport d/o soit le plus petit possible. En considérant, d'après les résultats de la section 7.5.2.b, que la déformation est propor-tionnelle à l'indice de rugosité relative de profondeur et à la profondeur, il faut donc que la quantité $\frac{h}{o} \cdot \frac{A \tan(i)}{\lambda}$ soit la plus petite possible.

Il existe un rapport entre taille de l'objet/profondeur/rugosité relative de surface/taille du pixel tel qu'un objet puisse être pointé dans l'image et donc utilisé comme point ho-mologue pour la restitution du relief immergé. En d'autres termes, il faut que les objets ou leur texture aient une taille caractéristique suffisamment grande relativement à la profondeur de l'eau et à la rugosité relative de surface, selon l'échantillonnage spatial des images.

Dans le cas où ces critères sont respectés, comme on l'a montré dans la section 7.5.2.b, l'influence des vagues se traduit par une dispersion de la mesure.

7.6.4 Importance de l'altitude de l'interface

Par ailleurs, une erreur de la connaissance de la position moyenne de la surface se traduit en un biais et une dispersion de la mesure (section 7.4). S'il n'est pas possible avec les techniques utilisées d'estimer l'ensemble des paramètres physiques caractérisant la surface (position et normale en tout point), on peut cependant en estimer une position moyenne. Cette estimation doit donc être la plus précise et la moins biaisée possible afin de limiter le biais et la dispersion sur les mesures corrigées de la réfraction.

Le développement d'une technique d'estimation de la position de l'interface pour la correction de la réfraction et l'estimation de la position réelle des points immergés est présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 8

Détermination de la position de l'interface air/eau pour la correction de la réfraction - Intégration de contraintes hydrauliques

Les chapitres précédents ont mis en évidence les principaux points d'intérêt de la chaîne méthodologique d'acquisition d'information relative au relief par stéréophotogrammétrie à travers l'eau. On a ainsi vu comment *la mesure de la géométrie 3D du terrain immergé est soumise à la bonne connaissance de la géométrie de l'interface*, et ce - au même titre que la connaissance de la géométrie d'acquisition - afin d'établir le lien entre mesures images et mesures terrain.

Par l'utilisation de moyens "légers" (plateforme, capteurs), on se place dans un cas où la configuration de prise de vue est plus difficile à maîtriser a priori. En revanche, *la géométrie des objets observés est soumise à des lois physiques connues a priori*. Notre choix est de tirer parti de la connaissance a priori de ces lois. Celles-ci imposent en effet des contraintes sur la géométrie que l'on cherche à mesurer. On se concentre en particulier sur la détermination de la position de l'interface air/eau, indispensable pour la correction de la réfraction sans biais.

On passe donc par un algorithme de mise en cohérence hydraulique, qui repose sur des propriétés spécifiques du jeu de mesures que l'on cherche à mettre en cohérence. Ces hypothèses, ainsi que l'objectif de l'algorithme, sont exposées dans une première section. Ensuite, on introduit un certain nombre de concepts, notations et jeux de données

supplémentaires utilisés par l'algorithme. Après ces sections préliminaires, le principe et la mise en place de l'algorithme sont présentés. On détaille ensuite l'implémentation de l'algorithme; finalement, on présente la correction de l'estimation brute du relief immergé puis le post-traitement du relief corrigé de l'effet de réfraction.

8.1 Cadre et objectif de l'algorithme

Les altitudes "brutes" des points de bordure de lit mouillé sont déterminées par stéréorestitution. Ces altitudes sont donc issues des images. La détection de ligne de bordure de lit mouillé peut être effectuée de plusieurs manières. Selon les caractéristiques radiométriques des images et la densité de couverture végétale de la bordure de lit mouillé, on utilisera des filtres de détection de contour [Westaway et al., 2001] ou l'on s'appuiera sur une photo-interprétation des images.

Quelle que soit la manière d'obtenir ces données, celles-ci présentent des mesures aberrantes (fausse corrélation, mauvaise détection de contour, restitution locale de sommets de végétation ou de points d'un pont) et une dispersion intrinsèque (précision de la stéréorestitution, voir section 5.4).

8.1.1 Hypothèses de travail

En considérant l'écoulement permanent et sans frottement d'un liquide incompressible, on peut appliquer le théorème de Bernoulli selon lequel la somme des énergies potentielle, de pression et cinétique d'un liquide est constante [Bernoulli, 1738] :

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (8.1)$$

avec z , l'altitude du liquide

P , la pression à laquelle est soumise le liquide

ρ , la masse volumique du liquide

g , l'accélération de la pesanteur

V , la vitesse du liquide

Cette constante C s'appelle la charge hydraulique et s'exprime en mètres. Dans le cas d'une rivière, où l'approximation *sans frottement* n'est plus valable, on a, avec s

l'abscisse curviligne :

$$\frac{\partial z}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{P}{\rho g} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \leq 0 \quad (8.2)$$

Dans le cas de la ligne de rive d'une rivière, le liquide n'est soumis qu'à la pression atmosphérique constante. La masse volumique et l'accélération de la pesanteur sont aussi des constantes. En conséquence, le terme correspondant à la dérivée de l'énergie de pression est nul. De plus, en considérant la vitesse comme constante, le terme correspondant à l'énergie cinétique s'annule lui aussi et l'équation se simplifie finalement en :

$$\frac{\partial z}{\partial s} \leq 0 \quad (8.3)$$

Cette approximation (vitesse très faible ou considérée comme constante) peut être prise avec une très bonne validité pour les plats et les mouilles, définis par des vitesses faibles (voir figure 9.5 section 9.2). Cette approximation induira les erreurs les plus fortes sur les zones de radiers. Finalement, *on choisit d'imposer une décroissance de l'altitude des points de bordure de lit mouillé de l'amont vers l'aval*¹.

On prend ensuite des hypothèses sur les altitudes des points de bordure de lit mouillé mesurées en effectuant la stéréorestitution des lignes de rive à partir des couples stéréoscopiques : (i) la majorité des altitudes mesurées correspond à l'altitude de la ligne de rive réelle ; (ii) l'amplitude de l'erreur commise au niveau des mesures aberrantes est supérieure à l'imprécision de la mesure.

8.1.2 Objectif de l'algorithme

L'algorithme repose sur la résolution d'un système sous contraintes.

Connaissant la précision *a priori* de l'altitude des points de rive (section 5.4), on a, pour chacun de ces points, un intervalle dans lequel la mesure réelle peut se trouver. L'algorithme vise à déterminer à partir de cette suite d'intervalles une nouvelle suite d'intervalles de largeur plus faible et hydrauliquement globalement cohérente.

En imposant une contrainte de décroissance des altitudes de l'amont vers l'aval, on régularise les lignes de rives mesurées et on améliore la précision de l'estimation des

¹il est possible de revenir au cas général en considérant la décroissance de l'énergie hydraulique totale de l'amont vers l'aval

altitudes (voir démonstration ci-dessous). On peut de plus détecter et éliminer les intervalles correspondant à des points aberrants.

On obtiendra finalement un ensemble d'altitudes des points de bordure de lit mouillé estimées avec une meilleure précision en Z et correspondant à une ligne de rive régulière, hydrauliquement cohérente.

8.2 Concepts et notations

Il est nécessaire d'ordonner les ensembles d'altitudes. C'est une convention d'ordre de l'amont vers l'aval qui est choisie pour ce document.

On utilise ci-dessous la notation mathématique des suites ordonnées de nombres réels sous la forme $(u_i)_{i \in [1;n]}$. Ces suites sont indicées par un entier i qui est croissant de l'amont ($i = 1$) vers l'aval ($i = n$).

On note $(z_i)_{i \in [1;n]}$ la suite décroissante des valeurs réelles des altitudes des points de la ligne de bordure de lit mouillé ordonnées de l'amont vers l'aval.

Les altitudes restituées à partir des couples stéréoscopiques sont des estimations de ces valeurs. On note donc $(\hat{z}_i)_{i \in [1;n]}$ la suite des altitudes mesurées par télédétection, ou mesures image, ordonnées de l'amont vers l'aval elles aussi.

L'écart-type de l'erreur de la mesure d'altitude est noté σ_z . Il est considéré comme constant pour un ensemble de couples stéréo ayant été acquis avec des paramètres de prise de vue semblables.

8.2.1 Minorants et majorants locaux

De manière à prendre en compte l'imprécision de la mesure \hat{z}_i , on introduit deux jeux de données supplémentaires : un jeu de minorants, et un jeu de majorants. On prend l'hypothèse que les erreurs ont une distribution gaussienne. On utilise l'intervalle de confiance à 99.7% ($\pm 3\sigma$).

On définit ainsi la suite des majorants $(M_i)_{i \in [1;n]}$ aux mesures réelles z_i par $M_i = \hat{z}_i + 3\sigma_z$ et la suite des minorants $(m_i)_{i \in [1;n]}$ par $m_i = \hat{z}_i - 3\sigma_z$.

L'intervalle $[m_i; M_i]$ est l'ensemble des mesures possibles.

On peut trouver une représentation des minorants et majorants locaux sur la figure 8.1. Les minorants locaux y sont représentés par des signes "-". Les majorants locaux sont représentés par des signes "+".

8.2.2 Cohérence, compatibilité, et conflits hydrauliques

On se situe en un point donné de la bordure de lit mouillé. On étudie les relations entre la mesure \hat{z}_i (mesure amont) et la mesure \hat{z}_{i+1} (mesure aval). On rappelle que, par convention, on utilise des indices i croissants de l'amont vers l'aval. Selon la terminologie utilisée par [Raclot, 2003], trois cas de figures peuvent apparaître lors de l'examen de ces deux mesures d'un point de vue hydraulique (figure 8.1) :

1. cohérence hydraulique
2. compatibilité hydraulique
3. conflit hydraulique

Sous forme mathématique, ces cas s'écrivent de la manière suivante :

$$\hat{z}_i \geq \hat{z}_{i+1} \quad (8.4)$$

$$\hat{z}_i < \hat{z}_{i+1} \text{ et } m_i \leq M_{i+1} \text{ et } m_{i+1} \leq M_i \quad (8.5)$$

$$M_i < m_{i+1} \quad (8.6)$$

Ces propositions mathématiques peuvent être transcrites en français par les expressions suivantes : il y a *cohérence hydraulique* en un point donné si la mesure amont est supérieure à la mesure aval (équation 8.4) ; il y a *compatibilité hydraulique* en un point donné s'il existe un chemin décroissant entre l'ensemble des mesures possibles amont et l'ensemble des mesures possibles aval (équation 8.5) ; il y a *conflit hydraulique* en un point donné si toutes les altitudes de l'ensemble des mesures possibles amont sont inférieures à toutes les altitudes de l'ensemble des mesures possibles aval. Cette dernière proposition est équivalente à la suivante : "le majorant amont est inférieur au minorant aval" (équation 8.6).

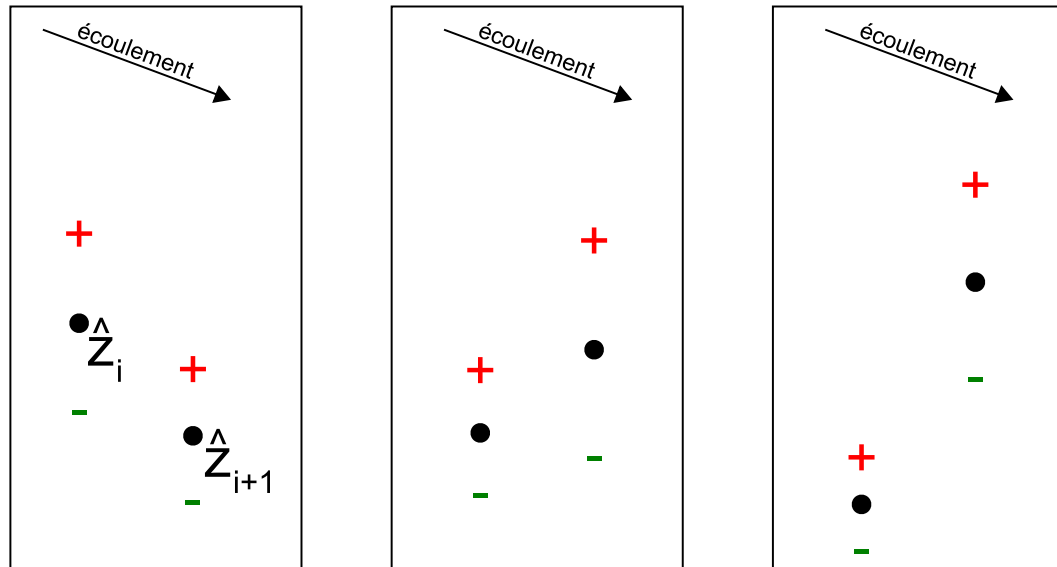


FIG. 8.1 - Illustration des cas de : cohérence hydraulique (à gauche) ; compatibilité hydraulique (au milieu) ; conflit hydraulique (à droite). Les "+" représentent les majorants locaux, les "-" les minorants locaux.

Cohérence locale et globale : Selon cette nomenclature, les altitudes estimées des points de rive sont globalement hydrauliquement compatibles si, en chaque point, on n'a pas de conflit hydraulique. Or, pour un jeu de données vérifiant les hypothèses présentées dans la section 8.1.1, il ne peut y avoir de conflit hydraulique qu'en cas de mesures aberrantes.

Par ailleurs, s'il est possible de détecter localement un conflit, la comparaison locale de deux mesures ne suffit pas à déterminer celle des deux qui est correcte. Il est donc nécessaire d'introduire un nouvel ensemble de points rendant compte de la compatibilité hydraulique globale.

8.2.3 Enveloppes MIN et MAX : minorants et majorants globaux

On introduit deux jeux de données supplémentaires de minorants et majorants *globaux*. On parlera d'enveloppes MIN et MAX des points mesurés. Ce sont ces enveloppes qui, par construction, intègrent les contraintes de décroissance des altitudes de l'amont vers l'aval (ou croissance de l'aval vers l'amont). L'enveloppe MAX est constituée en

chaque point du *plus grand réel* satisfaisant aux contraintes suivantes :

$$\text{les majorants globaux sont décroissants de l'amont vers l'aval} \quad (8.7)$$

$$\text{les majorants globaux sont inférieurs ou égaux aux majorants locaux} \quad (8.8)$$

L'enveloppe MIN est constituée en chaque point du *plus petit réel* satisfaisant aux contraintes suivantes :

$$\text{les minorants globaux sont croissants de l'aval vers l'amont} \quad (8.9)$$

$$\text{les minorants globaux sont supérieurs ou égaux aux minorants locaux} \quad (8.10)$$

Les notations utilisées sont les suivantes : $(MAX_i)_{i \in [1;n]}$ pour la suite des majorants globaux et $(MIN_i)_{i \in [1;n]}$ pour la suite des minorants globaux.

On peut trouver une représentation des enveloppes MIN et MAX sur la figure 8.2.

8.3 Principe et mise en place de l'algorithme - Démonstrations

Le principe de l'algorithme est donc de mettre en place un calcul d'enveloppes MIN et MAX des altitudes des points de rive par l'imposition de contraintes de décroissance des altitudes de l'amont vers l'aval. La contrainte de sortie de l'algorithme est la suivante : l'enveloppe MIN doit être située sous l'enveloppe MAX en tout point.

8.3.1 Calcul des enveloppes MIN et MAX - régularisation des lignes de rives

Le calcul des enveloppes MIN et MAX est effectué selon les propositions formulées au paragraphe 8.2.3. Ainsi, pour l'enveloppe MAX, de manière à satisfaire les contraintes (8.7) et (8.8), la valeur maximum en chaque point est la valeur de l'enveloppe MAX au point situé immédiatement à l'amont (le point MAX_{i-1}) et la valeur minimum est la valeur du majorant local M_i . La suite décroissante $(MAX_i)_{i \in [1;n]}$ est donc définie de la manière suivante :

$$\begin{cases} MAX_1 = M_1 \\ MAX_i = \text{Min}(M_i, MAX_{i-1}) \quad \text{pour } i \in]1;n] \end{cases} \quad (8.11)$$

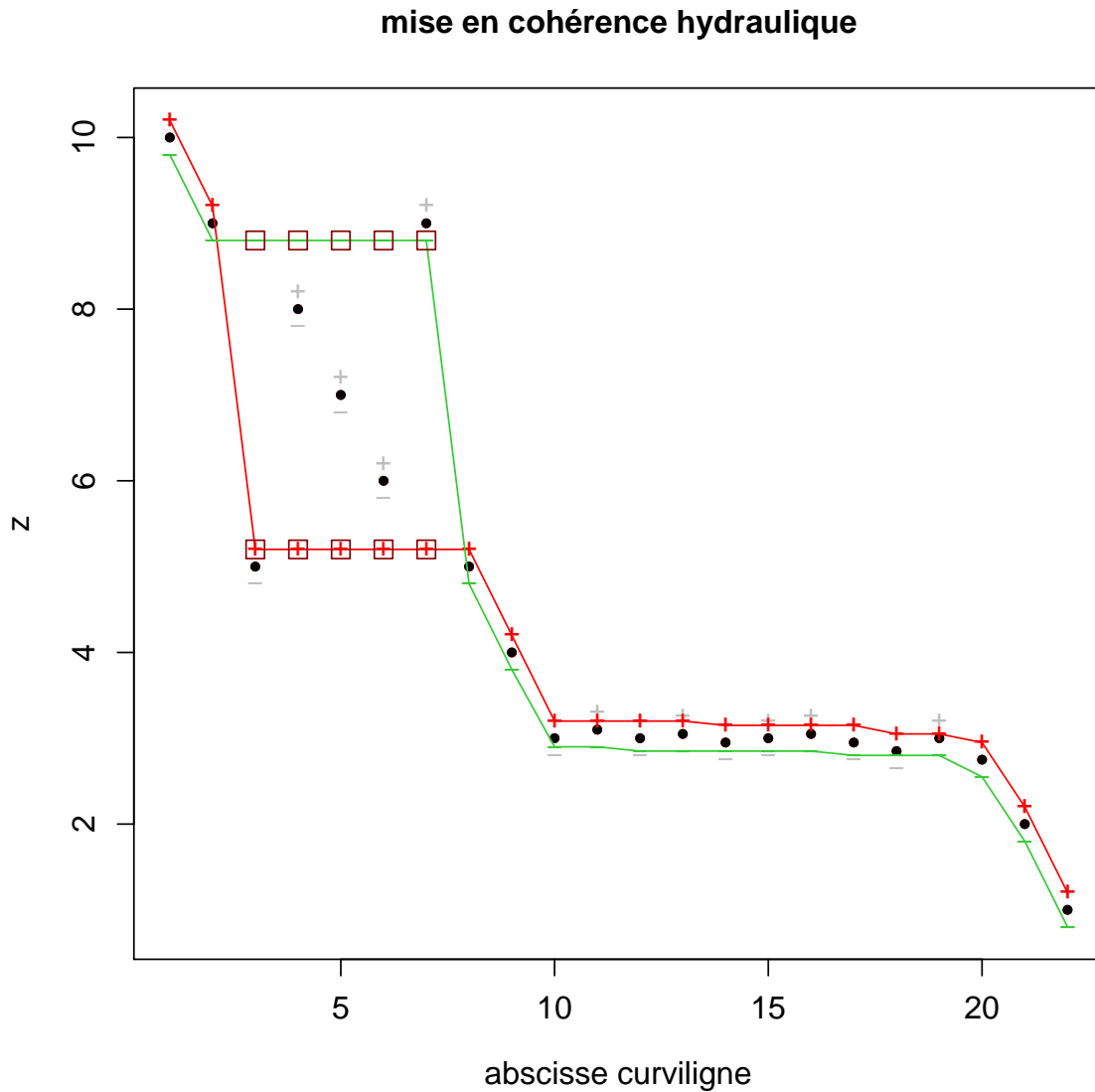


FIG. 8.2 - Représentation d'une étape de mise en cohérence hydraulique. Les minorants et majorants locaux sont représentés par des signes "+" et "-" en gris. L'enveloppe MAX est en rouge et l'enveloppe MIN en vert. Le conflit de plus grande amplitude est repéré par des carrés entourant les mesures concernées.

De la même manière, on définit l'enveloppe MIN par la suite décroissante $(MIN_i)_{i \in [1;n]}$ qui respecte les contraintes (8.9) et (8.10) :

$$\begin{cases} MIN_n = m_n \\ MIN_i = Max(m_i, MIN_{i+1}) \quad \text{pour } i \in [1;n[\end{cases} \quad (8.12)$$

Par construction même, les enveloppes MIN et MAX correspondent chacune à un ensemble de mesures régularisées (décroissance amont-aval).

8.3.2 Propriétés des enveloppes MIN et MAX : amélioration de la précision - détection des conflits

Supposons que la contrainte suivante : "l'enveloppe MAX est supérieure à l'enveloppe MIN en tout point" soit satisfaite (c'est le cas pour un ensemble d'altitudes ne présentant pas de conflit hydraulique). On a, pour tout $i \in [1;n[$:

$$MIN_i \leq MAX_i$$

D'autre part, d'après 8.11 et 8.12, on a pour tout $i \in [1;n[$:

$$\begin{cases} MIN_i \geq m_i \\ MAX_i \leq M_i \end{cases}$$

D'où finalement, pour tout $i \in [1;n[$:

$$[MIN_i; MAX_i] \subset [m_i; M_i], \text{ soit } (MAX_i - MIN_i) \leq (M_i - m_i) \quad (8.13)$$

Le calcul de l'enveloppe MAX d'un ensemble d'altitudes hydrauliquement compatible permet donc de réduire en chaque point l'intervalle correspondant à l'ensemble des mesures possibles, c'est à dire d'améliorer la précision de l'estimation de l'altitude en tout point (figure 8.2).

Par ailleurs, supposons que l'on a un conflit hydraulique entre la mesure \hat{z}_i et la mesure \hat{z}_{i+1} . On a donc, par définition d'après (8.6) :

$$M_i < m_{i+1}$$

Or, d'après (8.11) et (8.12) :

$$MAX_i \leq M_i \text{ et } m_{i+1} \leq MIN_{i+1} \text{ et } MIN_{i+1} \leq MIN_i$$

D'où finalement :

$$MAX_i < MIN_i$$

Les conflits sont donc situés au niveau d'un croisement des enveloppes MIN et MAX. On choisit de résoudre en priorité les conflits les plus forts, c'est à dire les conflits pour lesquels la quantité ($MIN_i - MAX_i$) est la plus grande. Si le conflit concerne toute une série de mesures (ce qui se traduit par des paliers d'enveloppes MIN et MAX en conflit, voir figure 8.2), on détermine si le point le plus amont du palier et/ou le point le plus aval du palier provoquent des conflits hydrauliques locaux à l'extérieur du palier. On élimine le ou les points concernés le cas échéant. Si aucun des points ne provoque de conflit hydraulique local à l'extérieur du palier, on élimine les deux points extrêmes du palier.

8.4 Implémentation et résultat de l'algorithme

L'implémentation de l'algorithme est itérative.

On initialise l'algorithme en effectuant le calcul des enveloppes MIN et MAX de l'ensemble des données (section 8.3.1). On effectue la comparaison entre MIN_i et MAX_i en tout point. En cas de conflit hydraulique ($MIN_i > MAX_i$), on entre dans la boucle suivante :

1. on détermine le ou les points où l'amplitude de conflit est maximale ;
2. si c'est un point isolé, on l'élimine - s'il s'agit de paliers, on élimine la ou les extrémités du ou des paliers présentant un conflit local ;
3. on calcule les enveloppes MIN et MAX du nouvel ensemble d'altitudes (section 8.3.1) ;
4. s'il subsiste des conflits (points où $MIN_i > MAX_i$), on repart en début de boucle (étape 1).

A la sortie de la boucle, on a des enveloppes MIN et MAX telles que toute suite décroissante incluse dans les intervalles successifs $[MIN_i; MAX_i]$ est solution. On peut par exemple choisir la suite décroissante

$$\left(\frac{MIN_i + MAX_i}{2} \right)_{i \in [1; n']}, \quad n' \leq n \quad (8.14)$$

Résultat de l'algorithme : La solution déterminée obéit aux contraintes imposées en 8.1.1 et 8.2.3. De plus, comme démontré dans la section 8.3.2, les intervalles de

confiance des mesures sont réduits (équation 8.13). On obtient ainsi une *estimation plus précise et régularisée des altitudes de la ligne de rive*, comme on peut le constater sur l'exemple de la figure 8.2. De plus l'algorithme permet de détecter les conflits hydrauliques et ainsi de supprimer les points aberrants.

8.5 Correction de l'effet de la réfraction et régularisation spatiale

Comme on l'a vu dans le chapitre 7, la réfraction a une influence selon deux composantes : elle introduit un biais si l'on fait une erreur sur la position de l'interface. Si l'on fait une erreur sur la rugosité locale, en prenant par exemple l'hypothèse simplificatrice d'une surface localement plane, on introduit une dispersion sur la mesure, telle que décrite dans le paragraphe 7.5.2.b. Pour s'assurer de l'*exactitude* de la mesure, on doit donc avant tout s'assurer de l'*exactitude* de la *position* de l'interface.

La mise en cohérence hydraulique des bordures de lit mouillé permet justement d'accéder à une mesure de la géométrie de l'interface plus précise et moins biaisée, grâce à l'intégration de contraintes hydrauliques dans l'estimation des altitudes de lignes de rives.

La connaissance de la géométrie de l'interface permettra ensuite de calculer la position réelle du point à partir de sa position apparente (réfractée).

8.5.1 Estimation de la position de la surface de l'eau

On applique l'algorithme de mise en cohérence hydraulique à toutes les bordures de lit mouillé. Ceci peut se faire, selon les cas de figure et les données disponibles, soit rive par rive, soit globalement sur le jeu de mesures entier. Il faut disposer en entrée des mesures ordonnées de l'amont vers l'aval.

Une solution consiste à se baser sur les altitudes restituées des bordures de lit mouillé, en travaillant rive par rive. On effectue la mise en cohérence hydraulique de chaque rive indépendamment. On obtient donc un jeu de mesures hydrauliquement cohérentes par lignes de rive. On calcule ensuite la position de la surface en tout point par interpolation linéaire des altitudes entre les rives. On obtient une estimation de

l'altitude de l'interface au dessus de chaque point apparent, nécessaire à la correction de la réfraction utilisant l'approximation de surface localement plane.

8.5.2 Estimation de la position réelle du point : correction de la réfraction et filtrage spatial

Pour chaque couple, on a estimé les paramètres de la géométrie de prise de vue. On a en chaque point de la rivière une estimation de la position de la surface. On a mesuré la position du point apparent (par stéréorestitution). Il est donc possible de calculer le point d'intersection des rayons perspectifs gauche et droit avec la surface de l'eau. On calcule ensuite le trajet des rayons réfractés et finalement l'intersection des rayons lumineux réfractés.

Le calcul de cette intersection est effectué suivant la même succession d'étapes que celles détaillées dans la section 7.1.3. Ce calcul permet d'obtenir une estimation brute, point à point, de la position corrigée de l'effet de réfraction.

Or, comme on l'a vu dans la section 7.5.2.b, l'influence des vagues se traduit par une dispersion intrinsèque de la mesure de la position "apparente" des points immergés. Si la correction de l'effet de réfraction permet d'obtenir une estimation de la position réelle des points immergés avec un biais plus faible, la dispersion de la mesure subsiste².

Par ailleurs, la mesure spatiale issue de la mise en correspondance d'image donne une vision quasi continue de la surface du lit de la rivière. La densité de la mesure de l'altitude obtenue par la méthode proposée peut être localement très forte et doit pouvoir facilement dépasser la dizaine de points par mètre carré pour un pixel au sol d'un dizaine de centimètres. D'autre part, les altitudes des points immergés, ainsi que la source de la dispersion de la mesure - la rugosité de la surface - présentent de la corrélation spatiale [Bailly et al., 2006]. Il est donc utile, de même que pour l'estimation des altitudes des rives, de mettre en place un filtrage spatial du nuage de points afin de réduire le bruit de mesure.

L'utilisation en première approche d'un filtre médian, doit permettre de diminuer la dispersion de la mesure tout en réduisant l'influence des mesures aberrantes résiduelles. Le choix des paramètres du filtre (rayon, nombre de points) est à optimiser en fonction

²elle est même amplifiée du fait de la géométrie de la réfraction : au premier ordre, les profondeurs et donc la dispersion sur l'estimation de ces profondeurs sont multipliées par un facteur de 1.33

de la densité du nuage de points obtenus après stéréorestitution, la résolution spatiale et la dispersion recherchées pour la mesure filtrée.

Ce processus permet, au détriment de la résolution spatiale, de réduire la dispersion de la mesure et d'obtenir une représentation du fond de la rivière cohérente avec la réalité.

Bilan de la deuxième partie

Les résultats obtenus au cours de cette partie ont mis en lumière les points suivants :

- nécessité de maîtriser la géométrie de prise de vue (points 1 et 2 de la figure 8.3)
- stéréo possible à travers l'eau pour des surfaces peu "rugueuses" mais nécessité d'une approche 3D (point 3)
- les vagues apportent une dispersion sans biais...
- ... si la position de l'interface air/eau est elle-même estimée sans biais
- la position de l'interface sera estimée avec un algorithme de mise en cohérence hydraulique

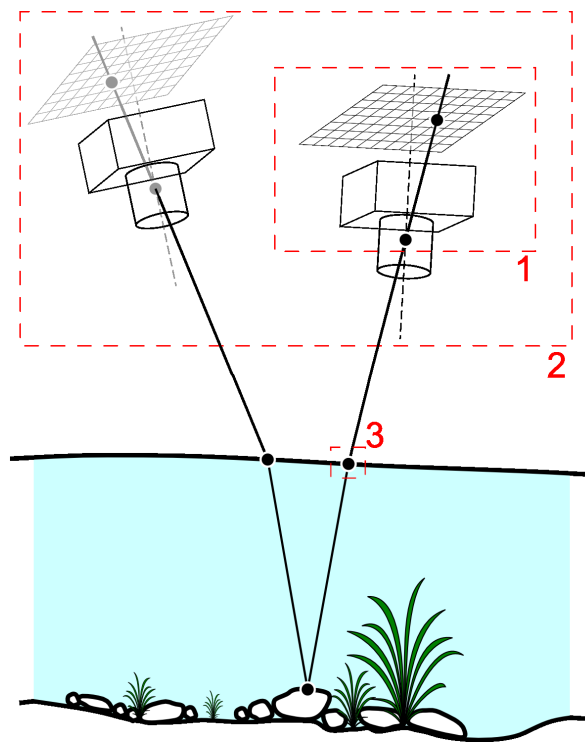


FIG. 8.3 - Paramètres à estimer pour mesurer le relief par stéréophotogrammétrie à travers l'eau : 1 - géométrie du capteur ; 2 - géométrie d'acquisition des images ; 3 - position de l'interface.

La maîtrise de la géométrie de la prise de vue comprend deux éléments : maîtrise de la géométrie interne et maîtrise de la géométrie externe. Pour la géométrie interne, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage de l'appareil utilisé, selon la méthode présentée dans la section 5.2.1. Pour la géométrie externe, il faut en premier lieu s'approcher au mieux des conditions normales lors de l'acquisition. Pour cela, nous avons proposé un protocole spécifique d'acquisition photogrammétrique pour l'estimation du relief immergé de rivière dans le chapitre 6. Il faut de plus mettre en oeuvre les méthodes permettant de déduire les paramètres de la prise de vue à partir de positions de mires et des informations contenues dans les images (sections 5.2.2 et 5.2.3).

La prise en compte des effets dûs à la traversée de l'interface air/eau par les rayons lumineux a été étudiée dans le chapitre 7. On a ainsi montré que l'altitude des points immergés pouvait être estimée sans biais avec une méthode de correction de la réfraction sous la condition que la position de l'interface soit elle-même estimée sans biais.

On a en conséquence proposé une méthode d'estimation de la position de l'interface à partir des informations contenues dans les images (chapitre 8) avec intégration de contraintes physiques. Les altitudes "brutes" estimées par stéréorestitution sont en effet corrigées par mise en cohérence hydraulique.

Les résultats des expérimentations et des études théoriques présentés dans cette partie permettent de proposer une méthode d'acquisition et de traitement d'images pour l'estimation du relief immergé de rivière. Cette méthode est synthétisée par la figure 8.4. Cette méthode a été appliquée en conditions opérationnelles. La partie suivante présente les résultats obtenus et les discute.

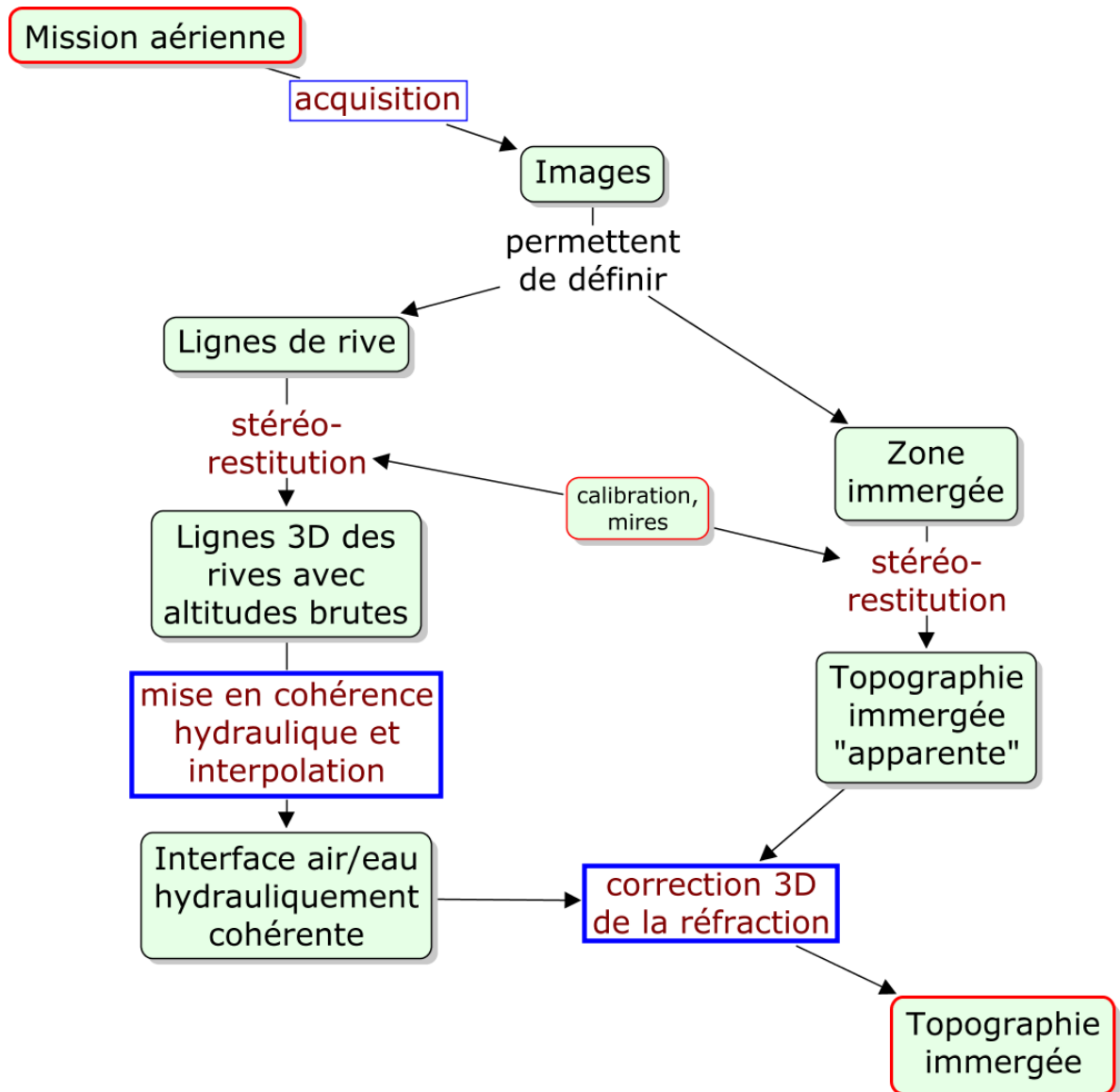


FIG. 8.4 - Diagramme synthétique de la méthode développée