

La mesure du relief immergé de rivière : résultats et validation de la méthode

Ce chapitre présente les résultats détaillés de l'application de la méthode décrite dans la partie précédente. On a ainsi effectué l'estimation du relief immergé sur deux sites : le Gardon d'Anduze, pour lequel les conditions de prises de vues sont maîtrisées (plateforme fixe, turbidité négligeable, interface air/eau assimilable à un plan) ; ainsi que la Durance, permettant de tester la mise en oeuvre de la méthode dans des conditions opérationnelles. Le site test principal est la station D0 sur la Durance.

Tout d'abord, on présente les résultats de l'expérimentation réalisée sur le Gardon d'Anduze. L'objectif de ce test est de démontrer le potentiel de la méthode dans les conditions d'application "idéales". On présente ensuite les résultats obtenus sur la Durance [[Feurer et al., 2008](#)].

Pour la partie concernant l'application de la méthode en conditions opérationnelles sur la Durance, les premiers résultats portent sur l'acquisition d'images par moyens légers à des fins d'exploitation en photogrammétrie. On évaluera la possibilité de mise en oeuvre d'un plan de vol avec de telles technologies et surtout la qualité du respect d'un cahier des charges tel que celui décrit dans la section 6.1.1. L'acquisition doit en effet permettre de constituer un jeu de données exploitable *en stéréo*, couvrant l'intégralité de la zone d'intérêt. On détermine ainsi le jeu de données test pour l'application de la méthode complète, soit le chenal gauche de D0.

On évalue ensuite la qualité du calcul de la géométrie d'acquisition en vol. En l'absence de données de validation pour les paramètres d'orientation, on effectuera une évaluation relative de la qualité de leur estimation en comparant les différents résultats obtenus par des méthodes et des calculs indépendants.

Une autre section détaille les résultats de la stéréorestitution réalisée sur le bras gauche de D0 selon les deux méthodes de corrélation mises en oeuvre, automatique et automatique supervisée. En effet, de la qualité de la mise en correspondance dépend directement la densité de mesure ainsi que la qualité de la restitution altimétrique. On discutera aussi de l'influence de la turbidité et de la présence des vagues dans cette étape.

La cinquième section présente les résultats du calcul de la position de l'interface air/eau (miroir) du bras gauche de D0, mettant en jeu une mise en cohérence hydraulique des altitudes de la ligne de berge. On détaillera le gain en précision sur la mesure de l'altitude du miroir et la diminution du biais dus aux mesures aberrantes.

On présente enfin le résultat de l'estimation de l'altitude des points immergés intégrant les résultats des étapes précédentes. La validation des résultats obtenus sur ce jeu de données test (chenal gauche de D0) est réalisée par comparaison avec des données de terrain indépendantes.

Résultats obtenus avec des images acquises en conditions maîtrisées et en vue rapprochée

L'objectif principal du test effectué sur le Gardon est d'acquérir un jeu de données image en conditions de terrain "idéales" du point de vue de la turbidité et de la simplicité de la géométrie du miroir. De plus, l'acquisition réalisée depuis un pont permet de s'assurer de la stabilité de la géométrie de prise de vue (facteur d'échelle, angle par rapport à la verticale) et d'un recouvrement en stéréo complet. On peut ainsi obtenir une idée du potentiel et de la faisabilité d'une mesure du relief immergé de rivière par stéréo à travers l'eau. On présente de plus (figure 10.1) un résultat obtenu avec le logiciel MicMac [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006], logiciel de mise en correspondance d'images avec lequel des tests ont été effectués en fin de thèse.

Le test a été réalisé avec un couple dont le B/Z moyen est de 0.19, avec un pixel au

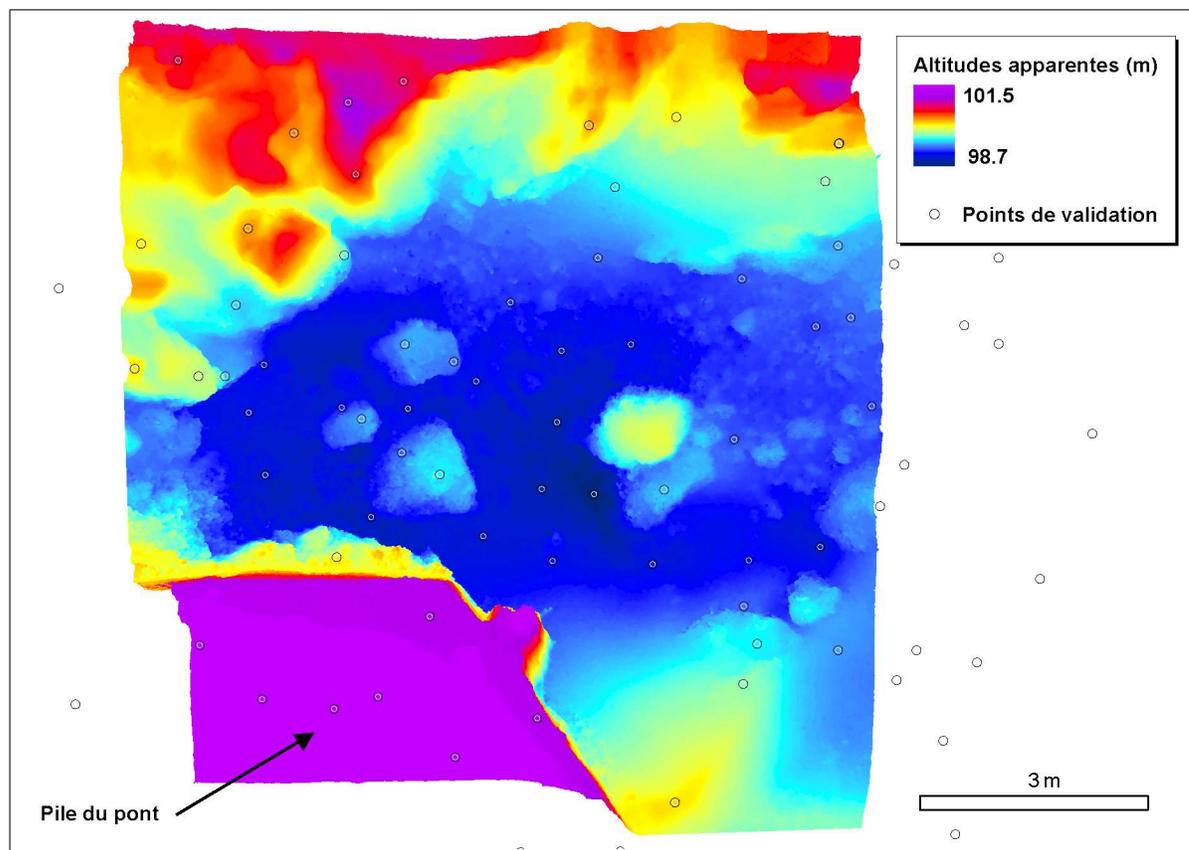


FIG. 10.1 - Carte des altitudes apparentes estimées avec le logiciel MicMac. Les points correspondent aux positions des mesures de validation. La zone en violet correspond à une pile du pont

sol moyen de 3.8 millimètres. La précision théorique maximale de la restitution altimétrique avec une hypothèse de précision de corrélation au quart de pixel est donc de 4.9 millimètres. On dispose dans la zone couverte par ce couple de 18 points de validation situés hors de l'eau et de 39 points sous l'eau. La position de ces points a été relevée au tachéomètre avec un porte-prisme muni d'une pointe ; la précision et l'exactitude de ces mesures par rapport à la surface réelle est de l'ordre du centimètre.

La comparaison avec les 18 points de terrain de validation donne un biais moyen de -0.9 centimètres pour les points émergés. La dispersion de l'écart entre mesure de terrain et mesure image (précision de la mesure altimétrique) est de 1.4 centimètres sur ces points émergés. Au vu de la précision théorique de restitution altimétrique, on peut supposer qu'une part de cette dispersion correspond à la dispersion de la mesure de terrain elle-même.

Pour les points immergés, on a mis en oeuvre une méthode de correction de la réfraction avec un modèle de surface plane. La validation de l'estimation de l'altitude des points immergés est effectuée par comparaison avec les mesures de terrain.

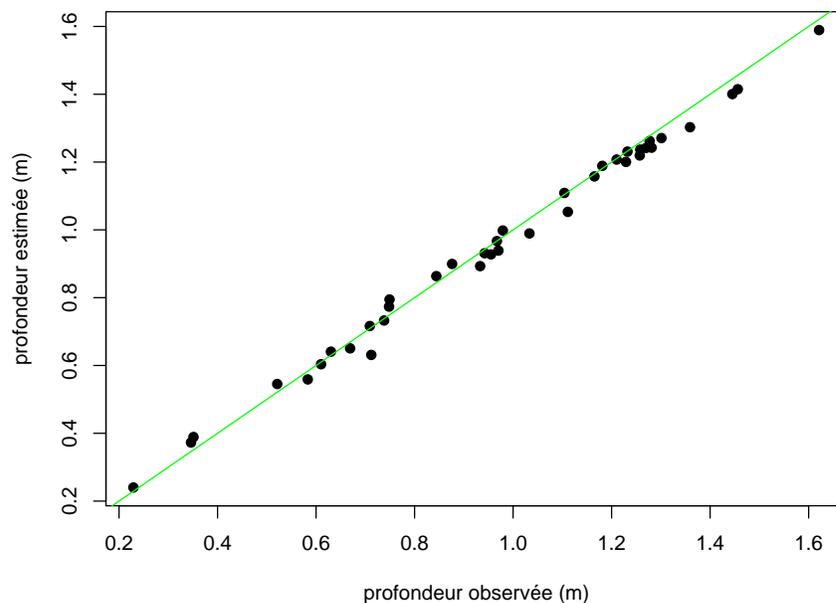


FIG. 10.2 - *Comparaison entre profondeurs estimées et profondeurs terrain*

La comparaison avec les 39 points de terrain de validation donne un biais moyen de 1.2 centimètres pour les points immergés corrigés de la réfraction. La dispersion de

points	erreur		nombre
	moyenne	écart-type	
émergés	-0.009m	0.014m	18
immergés	0.012m	0.029m	39

TAB. 10.1 - *Qualité de la restitution de l'altitude des points sur le Gardon*

l'écart entre mesure de terrain et mesure image (précision de la mesure altimétrique) est de 2.9 centimètres sur ces points immergés (figure 10.2). On constate d'une part une sur-estimation de l'altitude des points immergés et d'autre part une augmentation de la dispersion de l'écart. Cette dispersion est très probablement due à la traversée de l'interface air/eau, ce qui est cohérent avec les résultats de modélisation. Ces résultats (section 7.5) indiquent en effet que la mesure de l'altitude des points immergés par stéréorestitution à travers l'eau selon la méthode proposée contient une dispersion intrinsèque due à l'approximation réalisée (interface air/eau localement horizontale); cette dispersion doit être réduite, par exemple par filtrage spatial (section 8.5.2).

En conclusion de ce test, nous avons montré que la mesure de la topographie immergée de rivière est possible en conditions maîtrisées pour des vues rapprochées. En effet, avec des clichés dont le facteur d'échelle est important (pixels au sol très fins) des bandes d'images dont la géométrie est homogène, et des conditions expérimentales "idéales" (turbidité, surface de l'eau), la qualité de la mesure (biais de 1.2 centimètres, dispersion de 2.9 centimètres) est très supérieure à la qualité requise en entrée de certaines modèles thématiques, notamment les modèles habitats-poisson s'appuyant sur le calcul d'hydrosignatures de la rivière selon - entre autres - des classes de profondeur de 20 centimètres.

10.2 Acquisition des images pour l'application de la méthode en conditions opérationnelles sur la Durance

Cette section constitue un retour d'expérience et évalue la qualité du jeu de données acquis selon le protocole développé en 6.2. La comparaison des jeux de données acquis en 2004 et en 2005 selon des protocoles différents permet en effet l'évaluation de l'apport constitué par l'utilisation de ce protocole. De plus, les critères du choix de la bande d'images utilisée pour l'application de la méthode sont détaillés point à point dans les

sections suivantes.

10.2.1 Conditions expérimentales et mise en oeuvre opérationnelle

La campagne de terrain a eu lieu en mai-juin 2005. Un vol d'acquisition était prévu sur l'ensemble des stations à la suite de ces campagnes terrain. Des orages précoces, ainsi que des mauvaises conditions météorologiques en juillet ont conduit à des multiples reports de l'acquisition [Murphy, 1949]. Finalement, du fait de la forte probabilité de survenue de crues morphogènes à l'automne, il a été décidé que l'acquisition ne pouvait être retardée au delà de fin septembre. Le débit de la rivière n'ayant pas dépassé le seuil de mobilisation, il est raisonnable de considérer que la topographie du lit n'a pas bougé de manière significative.

Ces conditions expérimentales ont permis de tester de manière opérationnelle la flexibilité de la méthode et de vérifier concrètement la réactivité rendue possible par l'utilisation de moyens légers, notamment la décision et la réalisation d'acquisitions dès la constatation de conditions favorables. La décision et la finalisation du plan de vol ont eut lieu le 28 septembre 2005, et le vol a pu avoir lieu le lendemain 29 septembre.

La turbidité résiduelle constatée le jour de l'acquisition sur ces deux stations se caractérise par le fait que le fond est difficilement visible dans les zones supérieures à un mètre (figure 10.3). De plus, la rivière, déjà colmatée par des dépôts de limons antérieurs (voir données issues mesures de mai/juin 2005, présentées dans la section 9.3.3), a encore reçu le dépôt des matières mises en suspension après les orages. En conséquence, du fait des conditions expérimentales (turbidité, fond colmaté par endroits), la méthode n'est applicable que sur une partie de la zone d'étude.

10.2.2 Résolution au sol des images - B/Z - précision théorique en Z

Le tableau 10.2 présente la résolutions au sol moyenne des 6 images et le B/Z moyen des 5 couples acquis sur D0 en 2005. La connaissance de la résolution au sol (facteur d'échelle) ainsi que des rapports base sur éloignement B/Z permet de calculer la

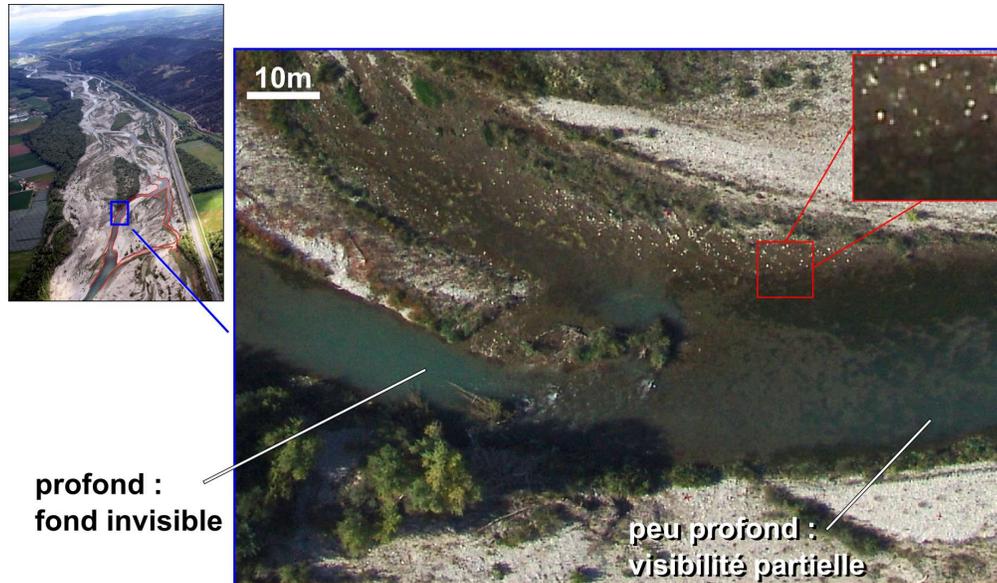


FIG. 10.3 - Extrait d'une image du jeu de données présentant des conditions de visibilité du fond variées sur le chenal gauche de D0. On peut comparer les zones relativement homogènes où le fond de la rivière est colmaté (partie centrale de l'image) avec les zones où la présence de végétation immergée procure de la texture (partie droite de l'image)

Valeurs moyennes sur l'axe 2 de D0		
pixel sol	B/Z	précision en Z
0.08 m	0.47	0.04 m

TAB. 10.2 - Résolution au sol, B/Z , et précision altimétrique théorique (valeurs moyennes)

précision altimétrique théorique de la stéréorestitution (voir équation dans la section 5.4, avec l'hypothèse d'une précision d'appariement dans les images au quart de pixel).

La précision altimétrique *théorique maximale* de la stéréorestitution pour cette mission est de l'ordre de 4 centimètres. Cette valeur théorique - valable dans le cas de prises de vues verticales pour lesquelles il n'y a pas d'incertitude sur la focale ni sur les paramètres d'orientation - de la précision ne prend en effet en compte ni la dispersion de la mesure due à la rugosité du miroir ni la dispersion de la mesure due à l'appariement des points.

10.3 Calcul de la géométrie de prise de vue

On présente dans cette section les résultats de l'estimation des paramètres d'orientation interne et externe. On ne dispose pour aucun de ces paramètres de données de validation indépendantes. On effectuera cependant pour les paramètres d'orientation externe une comparaison relative des résultats obtenus par différents calculs ou différentes méthodes.

10.3.1 Étalonnage de l'appareil (orientation interne)

On cherche à estimer la position du point principal, la focale, ainsi que la distorsion - par un modèle radial. Quatre couples stéréoscopiques ont été acquis sur le polygone de l'ENSG à Marne-La-Vallée le 4 février 2005. Ce polygone est constitué de 46 mires, situées dans 3 plans verticaux, dont la position est connue avec une très bonne précision et exactitude (voir détails dans la section 5.2.1 et dans l'annexe E). Les quatre stéréomodèles formés à partir de ces couples ont fourni un total de 330 points de mesure monoscopique.

La première étape d'ajustement des paramètres d'orientation interne sans modèle de distorsion conduit à une erreur quadratique moyenne ou RMSE (Root Mean Square Error) de 5 pixels (figure E.2 en annexe). La seconde étape vise à ajuster le modèle de distorsion radiale en fonction des résidus. L'écart quadratique moyen des modèles stéréoscopiques une fois le modèle de distorsion radiale pris en compte est réduit à 0.23 pixels (figure E.3 en annexe). Le résultat global de l'étalonnage est résumé dans le tableau 10.3. On représente la distorsion, qui atteint près de 100 pixels en bord de

champ, sur la figure 10.4.

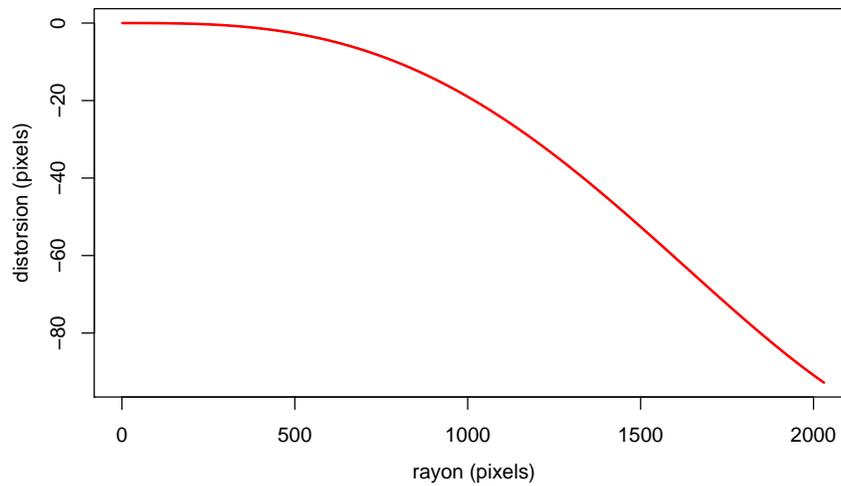


FIG. 10.4 - *Résultat d'étalonnage : distorsion radiale de l'objectif*

Nombre de mesures	330
RMSE avant	5 pixels
RMSE après	0.23 pixel
point principal	(1616.2 ; 1205.9)
focale (pixels)	2729.0
centre de symétrie	(1616.7 ; 1226.6)
$r^3/r^5/r^7$ (voir p.75)	$-2.2 \cdot 10^{-8}/3.1 \cdot 10^{-15}/-1.1 \cdot 10^{-22}$

TAB. 10.3 - *Résultats de l'étalonnage*

Il semble d'après la forme des résidus (figure E.3 en annexe) qu'il subsiste des erreurs systématiques après correction. Le modèle utilisé ne prend en effet compte que les distorsions radiales. Il n'inclut pas d'autres types de distorsion, comme les distorsions tangentielles [Brown, 1966]. Le modèle radial permet cependant de corriger la majeure partie de la distorsion. On gagne en effet plusieurs ordres de grandeur, en diminuant l'écart quadratique moyen d'un facteur 20.

On s'intéresse ensuite aux résultats de l'orientation externe sur la bande couvrant le bras gauche de D0. Celle-ci a été réalisée avec deux logiciels utilisant des méthodes différentes. Pour chacun de ces logiciels, Leica et Poivilliers E, on a utilisé les données d'étalonnage obtenues ci-dessus (tableau 10.3).

10.3.2 Orientation externe réalisée avec le Poivilliers E

Pour un couple donné, il est possible de calculer la différence entre les coordonnées des points de contrôle mesurées sur le terrain et ces mêmes coordonnées *compensées* - c'est à dire calculées à partir des coordonnées images par le modèle ajusté. La distribution statistique de ces écarts est représentée par les boîtes à moustache à gauche de la figure 10.5(a). Les écarts types (notés σ_{dX} , σ_{dY} , σ_{dZ}) et les valeurs moyennes (notées dX_{moy} , dY_{moy} , dZ_{moy}) des écarts pour chaque couple figurent dans le tableau 10.5(b).

L'erreur moyenne commise sur les coordonnées des points de contrôle par les modèles ajustés (moyenne des résidus) est toujours inférieure au quinzième de pixel. À l'exception des résidus en altimétrie pour le couple 9192, les écarts types des résidus sont inférieurs au pixel en X , en Y et en Z .

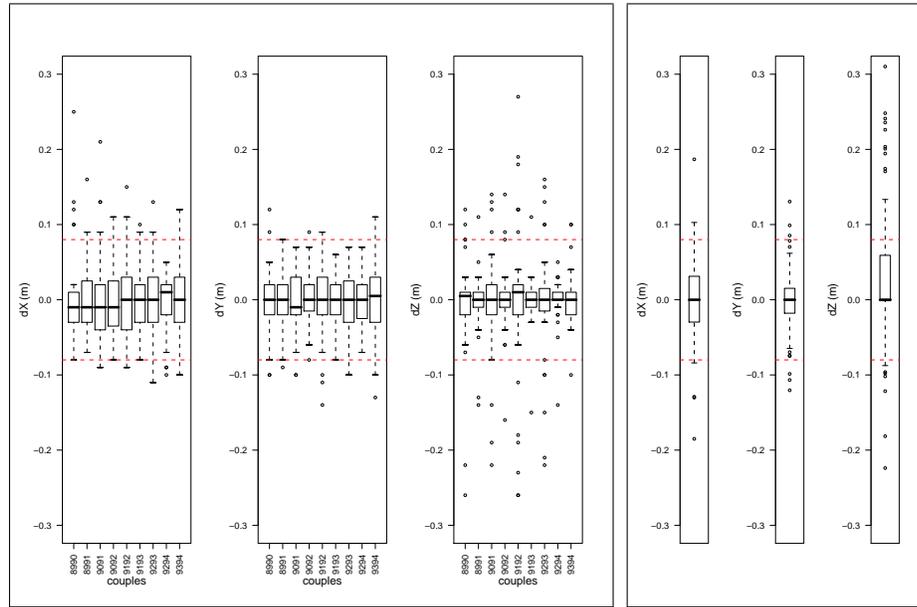
10.3.3 Résultats de la compensation par faisceaux avec autocalibration

Le calcul des paramètres d'orientation externe du bloc a été réalisé avec le logiciel LPS de Leica. Le nombre de points de contrôle au sol étant relativement élevé (35 mires par image environ - tableau 9.4), il a été possible d'utiliser des modèles avec un grand nombre de paramètres. Les paramètres d'orientation interne (longueur focale, position du point principal, distorsion radiale) ont été renseignés en s'appuyant sur les résultats d'étalonnage et selon la méthode présentée en annexe (E.2).

Les quatre modèles avec paramètres additionnels implémentés par Leica ont été testés. Il s'agit de modèles adaptés selon Bauer, Jacobsen, Ebner, et Brown, qui possèdent respectivement 3, 4, 12, et 14 paramètres [Leica, 2003, p. 347-348]. La qualité d'ajustement du bloc est donnée par la RMSE en unités image. Les valeurs de RSME pour chaque modèle sont rassemblées dans le tableau 10.4.

Modèle	sans	Bauer(3)	Jacobsen(4)	Ebner(12)	Brown(14)
RMSE (pixels)	0.92	0.68	0.67	0.75	0.53

TAB. 10.4 - RMSE de la compensation en bloc par faisceaux pour les différents modèles à paramètres additionnels utilisés



(a) Distribution statistique des résidus sur les points de contrôle au sol. La distribution est représentée pour chaque couple pour l'estimation réalisée par Poivilliers E (à gauche) et pour le bloc global pour Leica (à droite) - les **pointillés** sont placés à ± 1 pixel

couple	n	valeurs moyennes et écarts types en mètres					
		dX_{moy}	σ_{dX}	dY_{moy}	σ_{dY}	dZ_{moy}	σ_{dZ}
8990	34	0.0035	0.066	-0.0053	0.046	-0.0050	0.073
8991	48	0.0004	0.042	-0.0044	0.034	-0.0023	0.037
9091	41	0.0027	0.062	-0.0010	0.041	-0.0027	0.068
9092	52	-0.0021	0.044	0.0008	0.032	-0.0006	0.039
9192	45	0.0009	0.050	0.0020	0.047	-0.0036	0.104
9193	51	-0.0014	0.034	0.0008	0.030	0.0002	0.030
9293	39	0.0028	0.048	0.0003	0.044	-0.0031	0.079
9294	43	-0.0028	0.038	-0.0014	0.032	-0.0014	0.027
9394	30	0.0000	0.047	-0.0030	0.052	0.0013	0.040
ensemble	383	0.0005	0.048	-0.0013	0.039	-0.0019	0.059

(b) Poivilliers E : nombre de points utilisés pour le calcul, médianes et écarts-types des résidus en X, Y et Z

n	valeurs moyennes et écarts types en mètres					
	dX_{moy}	σ_{dX}	dY_{moy}	σ_{dY}	dZ_{moy}	σ_{dZ}
227	-0.0004	0.057	-0.0009	0.045	0.0260	0.111

(c) Leica : nombre de points utilisés pour le calcul, médianes et écarts-types des résidus en X, Y et Z

FIG. 10.5 - Résidus sur les points de contrôle au sol (différence entre coordonnées terrain réelles et compensées)

On constate que dans notre cas, le modèle d’Ebner, bien qu’ayant un grand nombre de paramètres, améliore moins la RMSE que les modèles de Bauer ou de Jacobsen à 3 et 4 paramètres. Ceci peut correspondre au fait que ce modèle physique utilisé ne correspond pas à la caméra utilisée. On utilisera donc le modèle avec paramètres additionnels de Brown, qui diminue de moitié l’écart quadratique moyen du modèle du bloc.

On évalue la qualité interne de cette compensation par bloc avec autocalibration en examinant les résidus du modèle sur les points de contrôle au sol. La distribution statistique des résidus sur X , Y et Z obtenus avec le modèle de Brown est représentée sur la figure 10.5(a). On peut observer que le modèle physique à 14 paramètres de D.C. Brown a permis de réduire très fortement les erreurs systématiques (moyenne des résidus). On a de plus fait figurer les biais résiduels ainsi que les écarts types des erreurs sur ces trois paramètres dans le tableau (c) de la même figure.

10.3.4 Comparaison relative des résultats : stabilité des calculs

La validation absolue des paramètres estimés est impossible par manque de valeurs observées au moment du vol. On peut cependant s’essayer à une comparaison relative des résultats obtenus par les différents calculs des deux logiciels Leica et Poivilliers E. Ceci peut donner une idée (i) des qualités relatives des modèles des deux logiciels ; (ii) de la stabilité de ces modèles.

On compare tout d’abord les écarts-types σ_{dX} , σ_{dY} et σ_{dZ} des résidus sur les points de contrôle au sol¹ des modèles ajustés par Leica et Poivilliers E. Les valeurs figurent dans les tableaux de la figure 10.5. On constate que si les écarts-types des résidus des modèles sont comparables en planimétrie, ils sont significativement² différents en altimétrie, en faveur du modèle utilisé par Poivilliers E.

Une autre comparaison qualitative peut être réalisée en examinant les valeurs estimées des paramètres ayant un sens physique, comme la position des centres optiques des caméras.

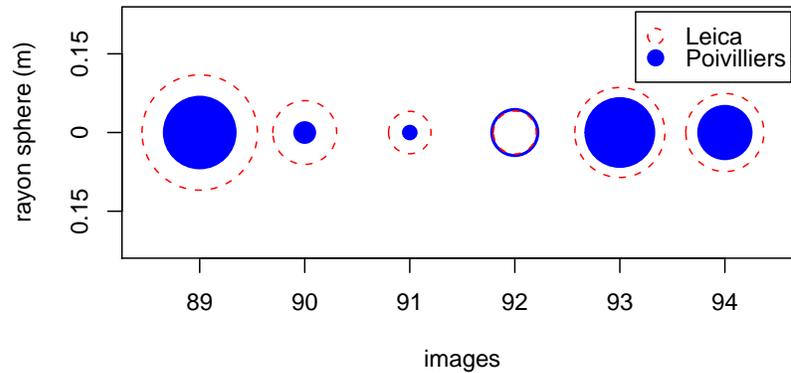
On dispose en effet pour chaque image et chaque logiciel de plusieurs estimations de

¹différence entre position réelle et position modélisée des points de contrôle

²p-value du test de Fisher d’égalité des variances : 1.301e-15

la position du centre optique. Pour Leica, on a plusieurs estimations obtenues avec des modèles distincts, utilisant des paramètres additionnels différents. Pour le Poivilliers E, chaque image participant à plusieurs couples, on a là aussi plusieurs estimations de la position des centres optiques.

On calcule pour chaque image et pour chaque logiciel le rayon de la sphère contenant l'ensemble des positions estimées. Ces résultats sont représentés sur la figure 10.6(a).



(a) Rayons des sphères contenant les différentes estimations des positions des centres optiques par Poivilliers E et Leica

image	n° 89	n° 90	n° 91	n° 92	n° 93	n° 94	\bar{x}
Leica	0.11	0.06	0.04	0.04	0.09	0.07	0.07
Poivilliers	0.07	0.02	0.01	0.05	0.07	0.05	0.04

(b) Valeurs numériques

FIG. 10.6 - Comparaison de la stabilité des estimations des positions des centres optiques par les deux logiciels

Les modèles utilisés par le Poivilliers E sont en moyenne légèrement plus stables, même si la différence est peu significative³.

³p-value du test de Student d'égalité des moyennes : 0.1223

10.4 Restitution de la position "apparente" des points immergés

La stéréorestitution a été effectuée avec deux logiciels, encore une fois LPS de Leica et Poivilliers E.

Pour la corrélation automatique réalisée par LPS, au vu du faible relief (rivière à faible pente, profondeur maximum sur la section de 1.56 mètres) et de la configuration du terrain, c'est une stratégie de corrélation pour milieu ouvert et terrain plat qui a été choisie. La fenêtre de corrélation est un carré de 13 pixels de côté et la recherche de points homologues est effectuée dans une fenêtre de 21 pixels par 3 pixels⁴, avec un seuil de corrélation à 0.60 [Leica, 2003]. Le résultat de la restitution est un nuage de points non filtrés.

Avec Poivilliers E, la corrélation a été calculée dans une fenêtre de même taille (13 par 13 pixels), avec un seuil de corrélation minimal de 0.60. Lors de la stéréorestitution, le ballonnet est positionné à proximité de la surface plastique (impression formée par effet stéréoscopique), afin de s'assurer que la fenêtre de recherche (déterminée par un nombre de pas altimétriques) contienne cette surface.

10.4.1 Nombre de points - densité de mesure

Les deux méthodes utilisées ont permis d'obtenir chacune plus de 20 000 points de mesure du relief immergé apparent, ce qui fait une densité moyenne de 1 point par mètre carré (tableau 10.5).

Méthode	points (nombre)	densité (pts/m ²)	
		moyenne	max.
automatique (Leica)	20 930	0.9	28.8
supervisée (Poivilliers)	21 710	1	28.6

TAB. 10.5 - *Nombre de points et densité moyenne pour les deux méthodes de corrélation utilisées*

⁴s'il s'agit de géométrie épipolaire, cela correspond à 3 pixels de parallaxe transverse et 21 pixels de parallaxe horizontale

Cependant le nombre de points et la densité de mesure obtenus par les deux méthodes ne sont pas directement comparables en tout point de l'espace, car dans le cas de la corrélation supervisée par vision stéréoscopique, le nombre de points dépend de l'effort de l'opérateur (en terme de temps passé). Il faut donc effectuer une comparaison relative des densités en examinant leur répartition spatiale (figure 10.7).

En premier lieu, on constate une forte variabilité spatiale de la densité : il existe des zones de très forte densité ainsi que des zones pour lesquelles aucune des deux méthodes utilisées n'a fourni de points de mesure. Ces dernières sont des zones pour lesquelles la profondeur et/ou la rugosité relative des vagues sont importantes. En effet, pour les zones de profondeur supérieure à un mètre, dans les conditions de turbidité du jour de l'acquisition, le fond n'est plus visible. Pour les zones au niveau desquelles la rugosité relative de surface est importante, la mesure n'est pas possible pour les raisons résumées dans la section 7.6.3.

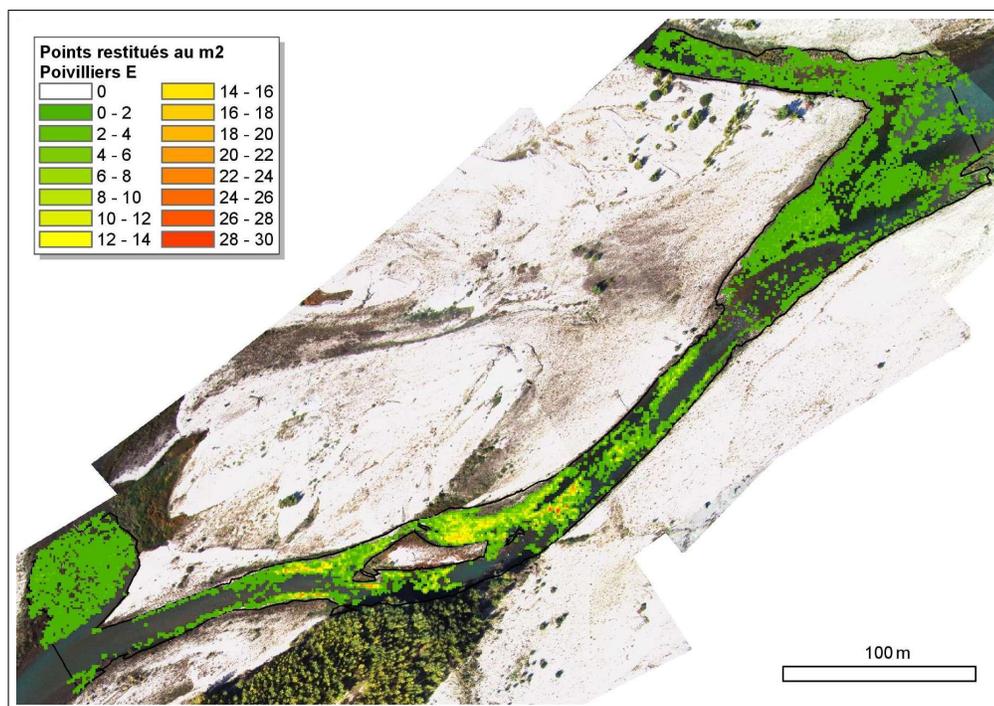
Ensuite, on constate une forte densité de points en bordure de rive, et de manière générale dans les zones peu profondes (zone à l'amont de l'île au centre de la carte), ainsi que dans les zones comportant des massifs algaux.

Il y a enfin des zones pour lesquelles la corrélation automatique a échoué mais où la stéréorestitution supervisée a permis d'obtenir des mesures. La densité de mesure dans ces zones est fortement dépendante de la méthode de corrélation. Les succès de corrélation dans ces zones pour la méthode avec supervision de l'opérateur peut s'expliquer par le fait que le ballonnet est positionné par l'opérateur près d'un maximum local de corrélation. Dans le cas d'une corrélation automatique effectuée sur une zone peu texturée, on ne dispose pas de cette initialisation et la recherche du maximum local peut échouer si les variations du coefficient de corrélation sont trop faibles.

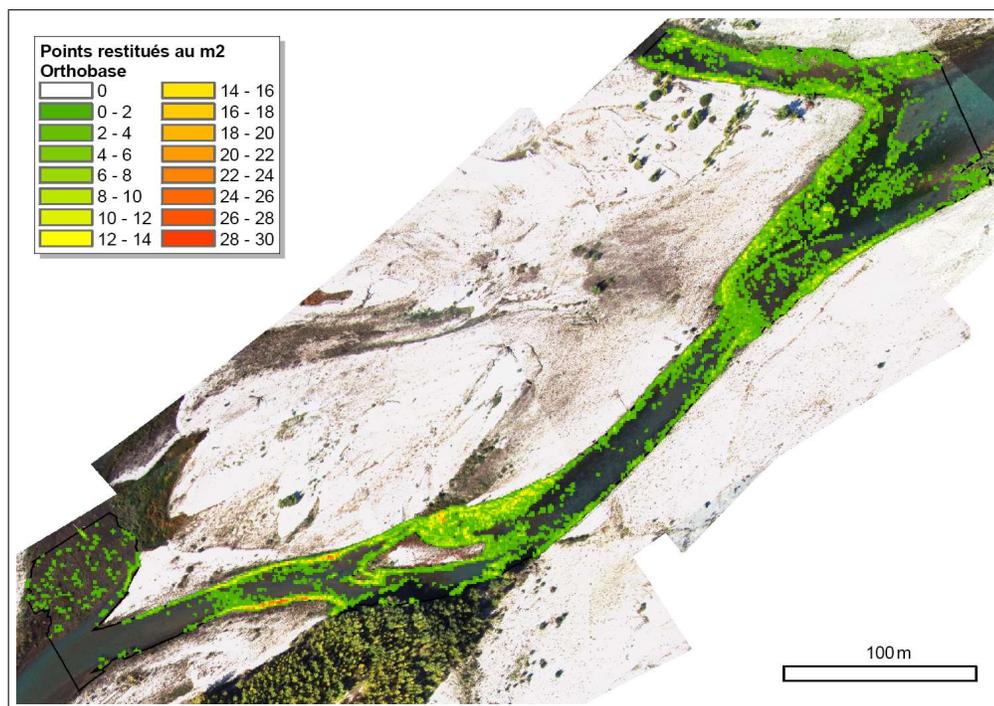
10.4.2 Faisabilité - échantillonnage spatial

On part de l'hypothèse simplificatrice⁵ selon laquelle la faisabilité de la mesure par stéréorestitution à travers l'eau dépend essentiellement des paramètres physiques de la rivière (turbidité, et donc profondeur - vagues). On détermine donc des classes (hauteur ; vitesse) en se basant sur les données de terrain. On calcule ensuite dans cet espace (hauteur ; vitesse) la distribution des points (i) mesurés sur le terrain ; (ii) restitués avec Poivilliers E et (iii) restitués avec Leica.

⁵L'absence de contrastes locaux peut en effet conduire à un échec de la stéréorestitution



(a)



(b)

FIG. 10.7 - Densité de points de mesure au mètre carré : (a) avec Poivilliers E ; (b) avec Orthobase ;

L'étude de ces distributions (figure 10.8) permet de mettre en valeur l'échantillonnage spatial des mesures en fonction des paramètres physiques de la rivière. En d'autres termes, on analyse la faisabilité de la mesure en fonction de ces zones à contexte physique variable.

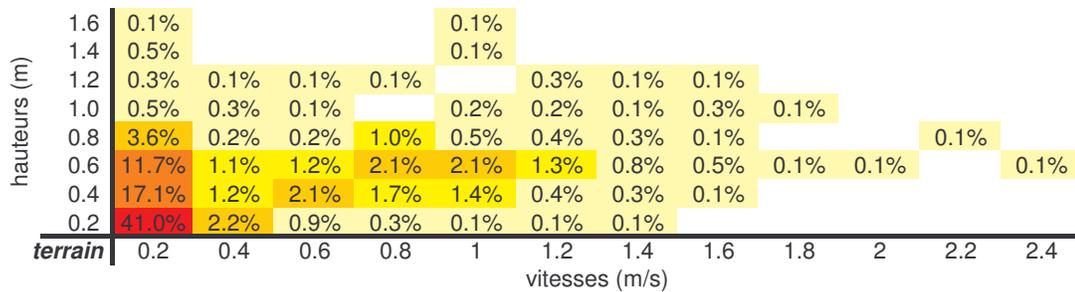
On retrouve d'une part les limites physiques de la méthode, avec un quasi-absence de points restitués pour les profondeurs supérieures à 1 mètre et les vitesses supérieures à 1.60 mètres par seconde. D'autre part, on constate que la plupart (plus de 80%) des points restitués par corrélation automatique sont situés dans les zones de très faible profondeur et vitesse (profondeur inférieure à 20 centimètres et vitesse inférieure à 20 centimètres par seconde). Ce chiffre est à comparer avec la distribution réelle : cette classe regroupe seulement 41% des points.

La connaissance de la distribution des points restitués selon ces paramètres physiques permet une lecture nouvelle des chiffres de densité moyenne présentés dans le tableau 10.5. Si les *valeurs moyennes* des densités de points obtenus par les deux méthodes sont semblables, ce n'est pas le cas de leur échantillonnage spatial. Dans le domaine de faisabilité de la stéréorestitution, la densité de points obtenus par corrélation automatique est très forte pour les faibles vitesses et profondeurs et décroît rapidement pour les plus fortes valeurs de ces deux paramètres. Dans le domaine de faisabilité de la stéréorestitution toujours, la corrélation supervisée semble fournir un échantillonnage spatial plus homogène et le chiffre moyen de 1 point par mètre carré semble représentatif.

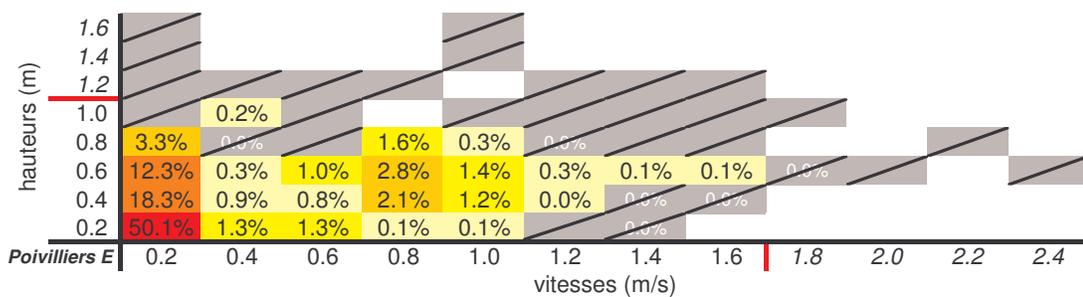
10.5 Calcul de la position de l'interface air/eau par mise en cohérence hydraulique des altitudes de ligne de rive

Le calcul de la position de l'interface air/eau (miroir) est effectué en 3 étapes : (i) restitution "brute" des altitudes des lignes de rives ; (ii) amélioration de la précision de cette mesure et élimination des mesures aberrantes par mise en cohérence intégrant des contraintes hydrauliques ; (iii) interpolation des altitudes entre les lignes de rive.

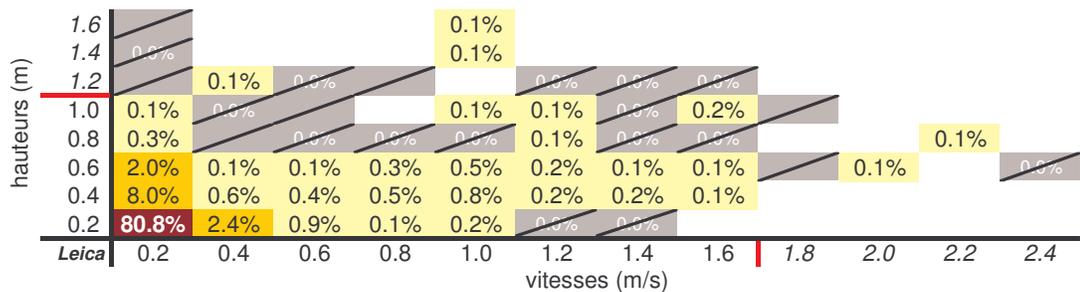
La mesure des altitudes des lignes de rive issue de la première étape est très bruitée. En effet, en plus de l'imprécision intrinsèque à la stéréorestitution (dispersion de l'ordre de 4 centimètres), une imprécision supplémentaire provient de la difficulté d'identifica-



(a) Observations de terrain



(b) Points restitués avec Poivilliers E



(c) Points restitués avec Leica

FIG. 10.8 - Distribution des points restitués dans le plan (hauteur ; vitesse) (a) Distribution des points terrain de la section de la rivière couverte par la zone stéréo. (b) distribution des points restitués par Poivilliers E. (c) distribution des points restitués par Leica LPS/Orthobase. Cases barrées : classes qui sont représentées dans la rivière dans la zone stéréo mais pour lesquelles il y a moins de 0.1% de points restitués

tion de la ligne de rive. De plus, la possibilité de mesures aberrantes n'est pas exclue dans les zones à faible contraste.

Afin d'améliorer la précision de la mesure des altitudes de bordure de lit mouillé, on utilise l'algorithme présenté dans la section 8.3 qui intègre des contraintes hydrauliques. La mise en cohérence hydraulique - correspondant à une nouvelle estimation des altitudes des points de rives telles que leur succession amont-aval soit en conformité avec les lois de l'hydraulique - a été effectuée pour les points restitués sur les rives (chenal gauche de D0). Ce chenal comporte une petite île (dont on voit l'extrémité amont sur la figure 10.3). On a aussi effectué un calcul de mise en cohérence hydraulique pour les points situés sur les rives de cette île. On calcule finalement l'altitude du miroir en tout point par interpolation linéaire des altitudes de lignes de rives mises en cohérence (figure 10.9).

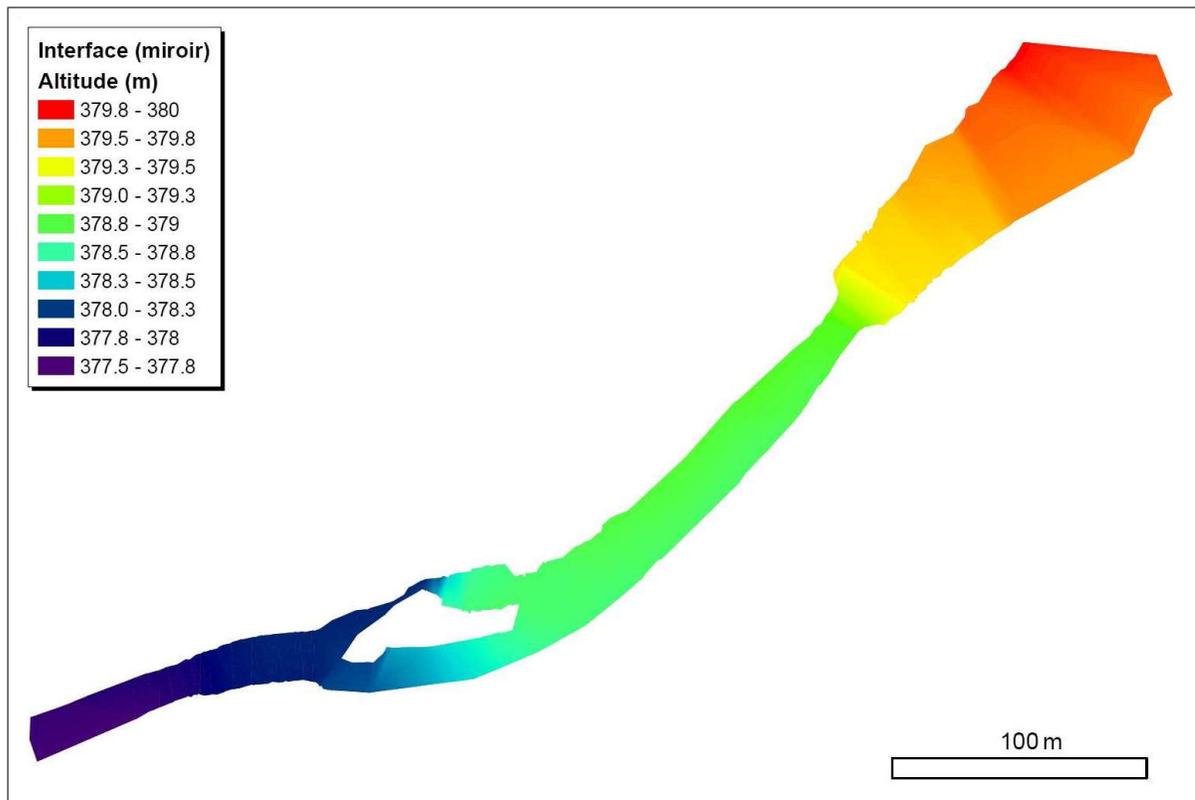


FIG. 10.9 - Résultat de l'estimation des altitudes de l'interface air/eau (miroir) sur l'axe 2 de D0 en 2005 (bras gauche)

La précision théorique de la stéréorestitution étant de 4 centimètres sur ce bras (section 10.2.2), les majorants et minorants locaux sont situés à plus ou moins 12 centimètres de la mesure image brute (intervalle de confiance à 99% de la mesure). La

mise en cohérence a permis d'améliorer la précision de la mesure en Z en réduisant la largeur de cet intervalle (tableau 10.6).

rive	nombre de points		demi-largeur (m)	
	total	"points faux"	avant	après
droite	330	37 (11.2%)	0.12	0.03
gauche	293	53 (18.1%)	0.12	0.04
droite de l'île	61	4 (6.6%)	0.12	0.04
gauche de l'île	64	21 (32%)	0.12	0.06

TAB. 10.6 - Résultats de la mise en cohérence

L'intervalle est diminué d'un facteur 2, voire d'un facteur 4 dans le cas des rives gauches et droite du chenal qui comportent un grand nombre de points de mesure.

La précision de la mesure obtenue après mise en cohérence hydraulique est très variable (figures 10.10 et 10.11).

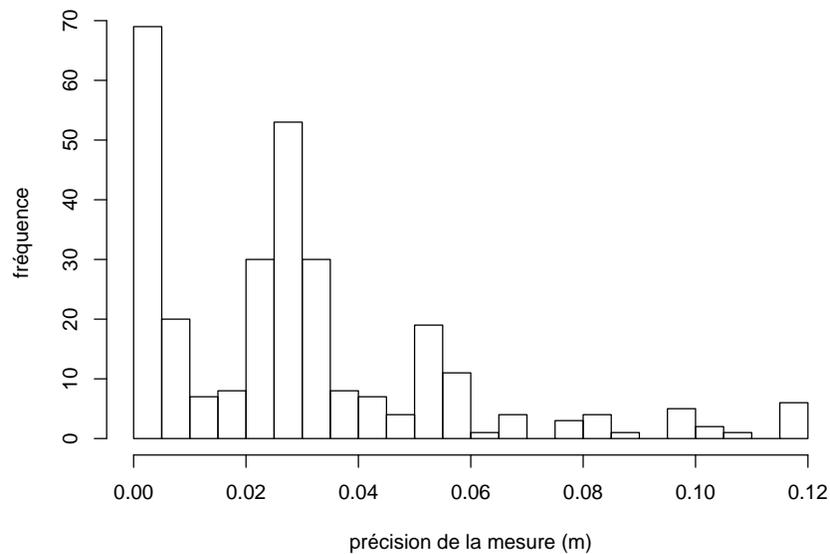


FIG. 10.10 - Distribution des précisions de la mesure de l'altitude des points de rive après mise en cohérence hydraulique

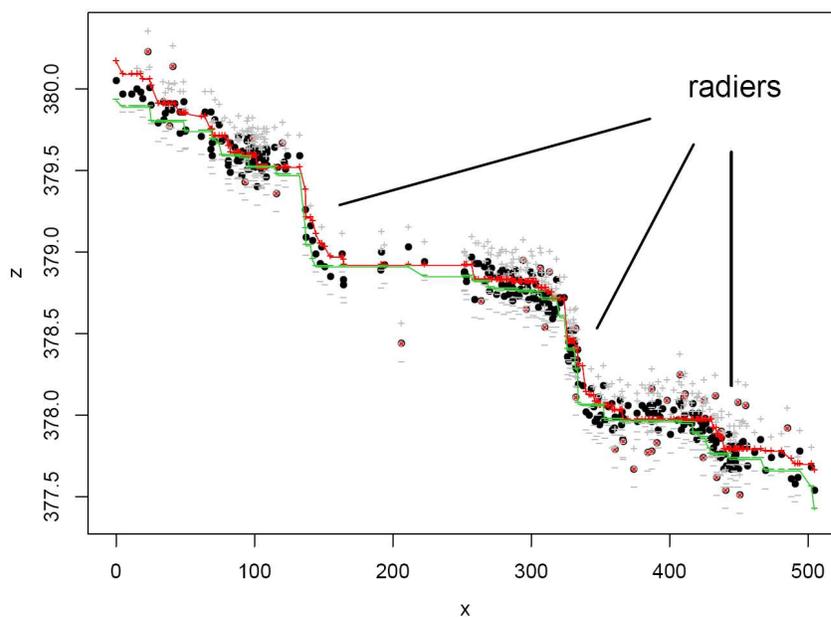


FIG. 10.11 - Mise en cohérence des altitudes restituées de la ligne de rive droite. Les enveloppes *MIN* et *MAX* sont en traits continus. Les symboles "+" et "-" représentent les majorants et minorants locaux. Les points de mesure identifiés comme faux sont barrés par une croix ×

D'une part, par construction, l'algorithme possède un effet de bord : les extrémités amont et aval sont soumises à des contraintes moins fortes (contraintes d'un seul côté). L'estimation de l'altitude du miroir pour ces zones sera donc moins bonne.

D'autre part, l'amélioration de la précision est d'autant meilleure que la pente est faible et que la densité de points de mesure est forte. Par exemple, les zones pour lesquelles la densité de mesures est localement relativement forte présentent un écart plus faible entre enveloppe MIN et MAX relativement aux zones voisines de pente comparable (points situés autour de l'abscisse 100 sur la figure 10.11). Pour ces zones, la précision de l'estimation de l'altitude du miroir est meilleure.

10.6 Correction de la réfraction - première estimation de la position réelle des points immergés

Les étapes précédentes de l'application de la méthode ont permis d'estimer une position "apparente" des points immergés dans le chenal gauche de D0 (axe 2 - 2005) ainsi que la position du miroir (altitudes en tout point) de ce chenal.

On utilise la modélisation de l'effet de réfraction telle qu'effectuée dans la section 7.3.1 afin d'obtenir une première estimation de la position réelle des points immergés. Avec ce modèle, la donnée de l'altitude du miroir en tout point obtenue dans la section précédente est suffisante pour effectuer la correction des positions "apparentes" des points immergés. On peut alors après cette étape effectuer une comparaison des altitudes estimées des points immergés avec les altitudes interpolées des points terrain (tableau 10.7 et figure 10.12).

	moyenne	médiane	écart-type
Erreur (m)	0.013	0.051	0.225

TAB. 10.7 - *Caractéristiques de la distribution de l'erreur d'estimation de la topographie immergée*

L'analyse de l'erreur sur les altitudes estimées permet de déterminer les caractéristiques de la mesure image brute obtenue après correction de la réfraction.

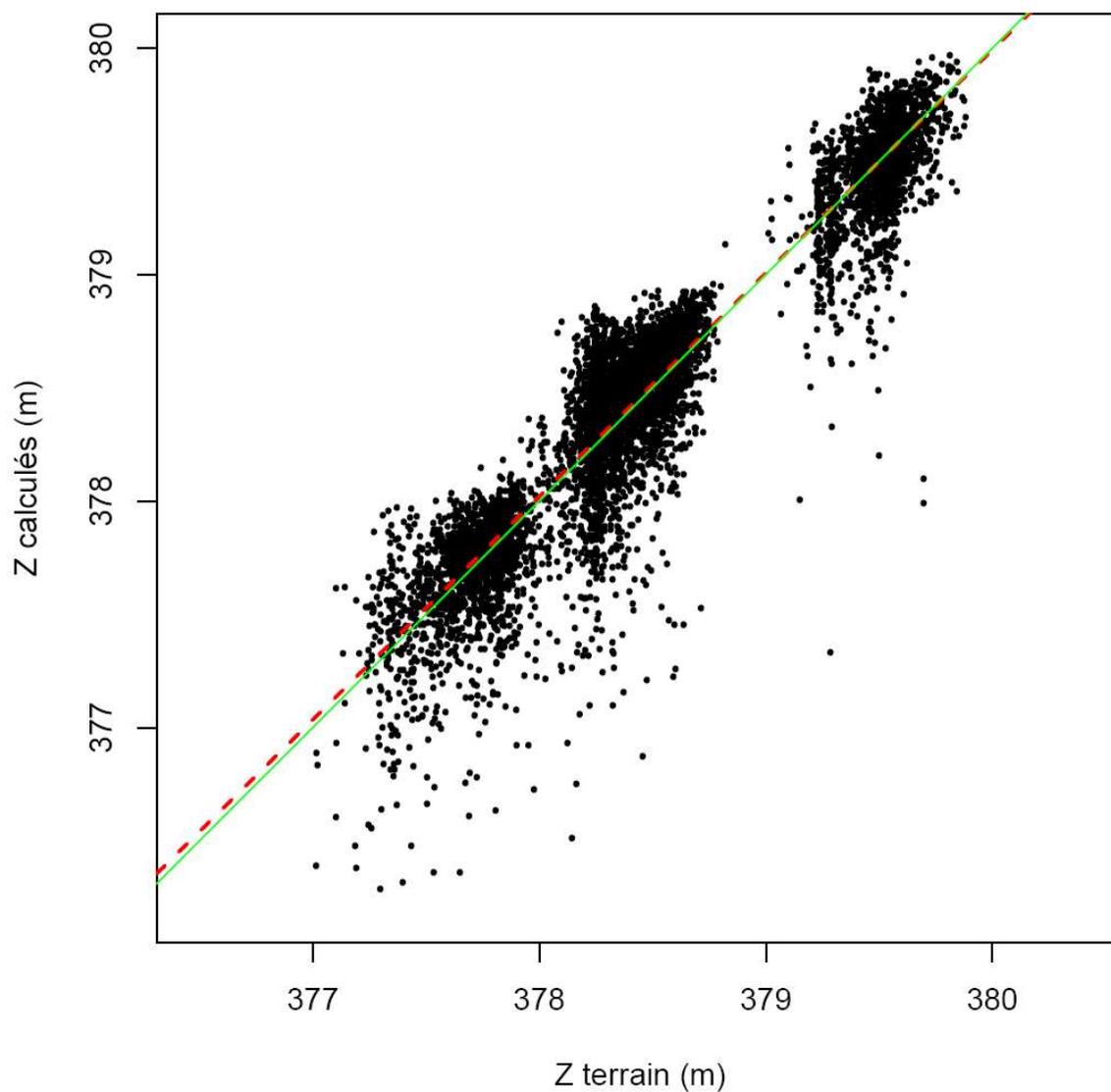


FIG. 10.12 - Altitudes "brutes" estimées et corrigées de l'effet de la réfraction en fonction des altitudes des points immergés observées sur le terrain. La bissectrice est représentée en *traits pleins*, la tendance linéaire du nuage de points par la droite en *traits pontillés*

D'une part, il y a une très bonne cohérence entre les altitudes estimées et les altitudes observées ($R^2 = 0.89$, p-value inférieure à 2.2×10^{-16}). L'estimation des altitudes des points du fond de la rivière présente un biais très faible (surestimation de l'altitude de 1.3 centimètres). En revanche la différence entre moyenne de l'erreur et médiane de l'erreur montre que la distribution de l'erreur n'est pas symétrique. La sur-estimation des altitudes des points immergés est donc probablement plus forte que cette valeur moyenne.

D'autre part, la dispersion moyenne de la mesure brute (écart-type de l'erreur) est de 22.5 centimètres. La restitution du relief et la correction des positions estimées par l'application sur le chenal gauche de D0 de la méthode proposée a permis d'obtenir une mesure spatialisée fiable de l'altitude des points immergés. Il subsiste cependant un bruit de mesure inhérent à la perturbation due à la présence de vaguelettes à l'interface. Ces perturbations ne sont pas prises en compte lors de la correction de la réfraction avec un modèle surface plane.

10.7 Régularisation de la surface immergée estimée et validation des résultats

La densité de la mesure de l'altitude obtenue par la méthode proposée peut être localement très forte, jusqu'à près d'une trentaine de points par mètre carré (section 10.4.1). Il est donc possible de mettre en oeuvre un filtrage spatial médian tel que proposé dans la section 8.5.2.

Dans notre cas, c'est un rayon du même ordre de grandeur que la distance moyenne latérale entre deux points terrain qui a été choisi afin de rendre la mesure "image" comparable à la mesure de terrain. On a de plus tenu compte de la densité maximum obtenue (un peu moins de 30 points par mètre carré), et de l'objectif pour la dispersion de la mesure (une dizaine de centimètres). On a ainsi effectué le filtrage dans un rayon minimum de 3.5 mètres autour du point à filtrer et sur un nombre minimal de 50 points afin de répondre à l'objectif de dispersion.

Les valeurs de l'altitude du fond ainsi estimées et filtrées présentent une bonne cohérence globale avec le jeu de données terrain (figure 10.13).

On a représenté en plus du nuage de points sa tendance (graphique quantile-quantile).

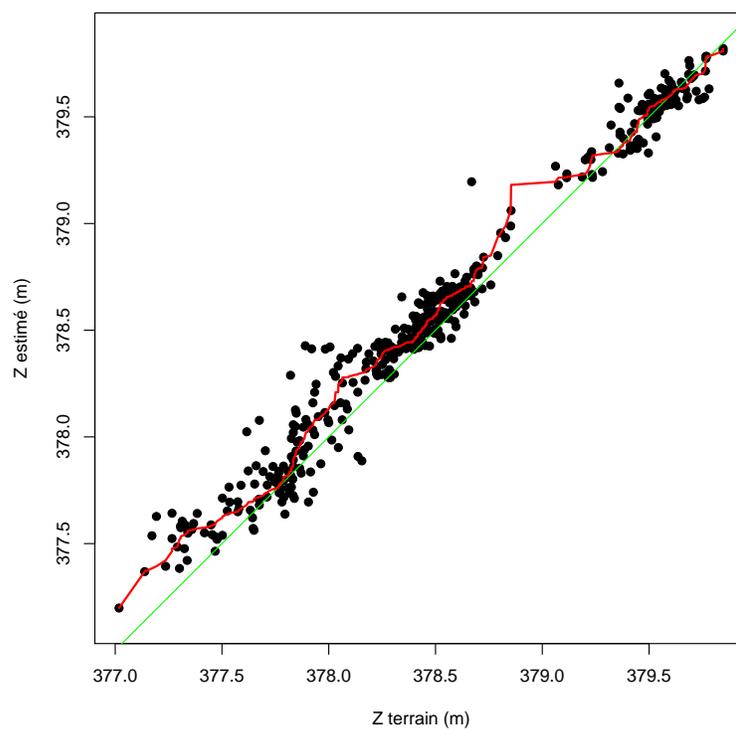


FIG. 10.13 - Comparaison entre altitudes terrain des points immergés et altitudes estimées après filtrage spatial. La *courbe quantile-quantile* ainsi que la *bissectrice* ont été superposées au nuage de points

On met ainsi en évidence la sur-estimation des altitudes. La moyenne de l'erreur pour les estimations filtrées est de 4.3 centimètres, avec une dispersion de 10.5 centimètres.

On présente finalement une carte des profondeurs réalisée à partir du nuage de points filtrés et interpolée (figure 10.14).

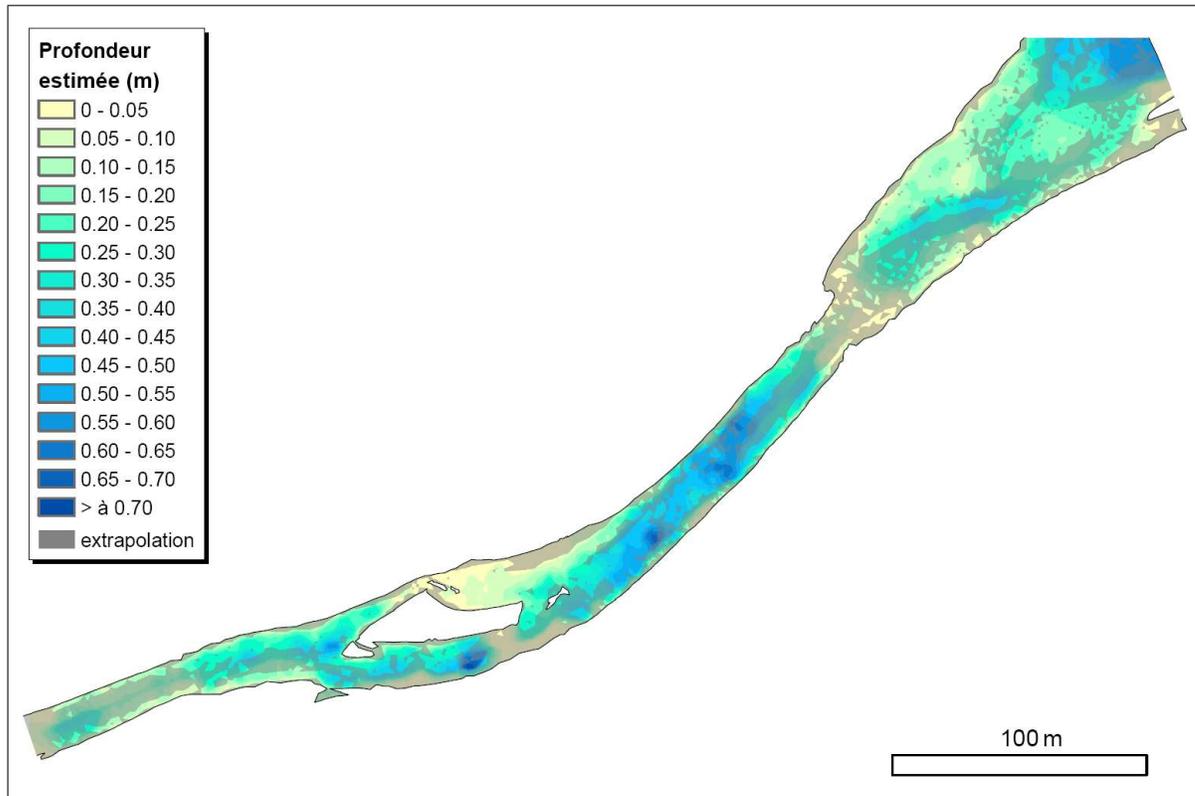


FIG. 10.14 - Carte des profondeurs estimées par la méthode puis interpolées. Les zones grisées sont les zones pour lesquelles on n'a pas de mesure image. Leur surface représente environ 48% de la zone d'intérêt

Il est possible d'estimer les profondeurs "terrain" en effectuant la différence entre l'altitude de la surface estimée dans la méthode et l'altitude des points observée sur le terrain. Les erreurs sur les profondeurs ont donc la même amplitude que les erreurs sur les altitudes et présentent la même dispersion (10.5 centimètres). Cette dispersion permet de répondre à l'objectif, notamment à des fins de modélisation des habitats de poissons. On peut en effet établir l'hydrosignature de la rivière avec des classes de 20 centimètres de largeur ayant un intervalle de confiance correct⁶. On représente sur la

⁶à 68% en considérant la distribution de l'erreur comme normale!

figure 10.15 la comparaison des mesures terrain et des mesures de profondeur interpolées et extrapolées (pour les zones où l'on n'a pas obtenu de mesures image).

On observe en effet un bon accord global de la carte des profondeurs avec la réalité du terrain, notamment le radier en barreau dans la partie amont, la zone de profondeur moyenne en milieu de chenal et la zone de très faible profondeur à droite de la petite île. Les zones de forte profondeur ou comportant des vagues ne sont pas cartographiées et sont donc extrapolées. Il semble de plus possible de détecter les signatures d'éléments particuliers du fond de la rivière, comme la signature probable d'un massif algal épais au milieu de la partie amont du radier en barreau. La carte des erreurs et la discussion correspondante figurent dans la section 11.1.

10.8 Conclusion

Réalisée en conditions opérationnelles sur la Durance, l'application de la méthode de stéréorestitution à travers l'eau avec intégration de contraintes hydrauliques a permis d'obtenir les résultats suivants :

Tout d'abord, la mise en place d'un protocole d'acquisition (plan de vol + terrain) adapté aux moyens technologiques légers a permis de se rapprocher des conditions habituellement rencontrées pour des missions photogrammétriques opérationnelles classiques.

La couverture globale de la zone d'intérêt en stéréo est passée de moins de 70% à environ 95% ; l'homogénéité des missions - mesurée par la dispersion des paramètres de prise de vue - a été significativement améliorée, permettant ainsi d'obtenir des bandes d'images pour lesquelles les variations du facteur d'échelle sont inférieures à 5% et les angles à la verticale inférieurs à 5° (deux dernières missions). On s'est de plus adapté aux contraintes spécifiques du milieu "rivière" : la présence d'eau sur une surface importante de l'image et donc de "zones interdites" pour les mires.

Ensuite, plusieurs méthodes "classiques" de la photogrammétrie ont été mises en place afin de déterminer la géométrie d'acquisition. On a notamment effectué l'éta-lonnage du capteur "grand public" utilisé, ce qui a permis de réduire d'un facteur 20 l'erreur d'ajustement des modèles de calcul de la géométrie de prise de vue. La géométrie externe a été calculée avec des résidus sur les points de contrôle au sol inférieurs au pixel.

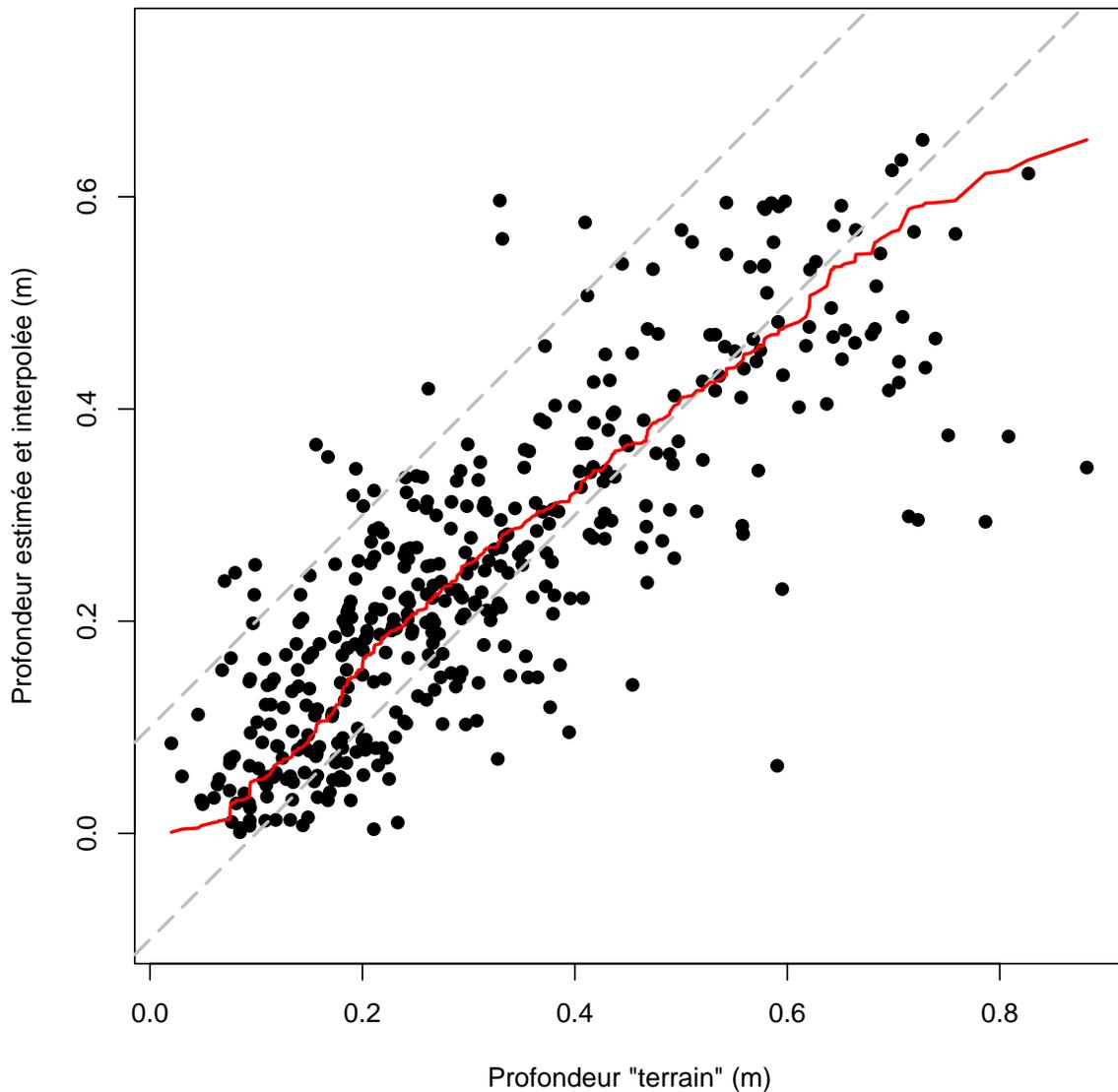


FIG. 10.15 - Comparaison entre profondeurs "terrain" et profondeurs estimées et interpolées. La *courbe quantile-quantile* superposée a été calculée à partir des valeurs situées dans la zone où l'on dispose de mesures image. Les droites en traits pointillés sont positionnées à plus et moins 10 centimètres de la bissectrice

La stéréorestitution, réalisée selon deux techniques implémentées par deux logiciels différents, a montré d'une part la faisabilité de la mesure par stéréophotogrammétrie à travers l'eau - dans les zones où le fond de la rivière est visible, les densités de mesure obtenues varient entre 1 et 30 points par mètre carré pour un pixel au sol d'environ 8 centimètres - et d'autre part les limites de certains algorithmes de corrélation automatique. Ces derniers présentent en effet un fort taux d'échec : moins de 25 000 points ont été corrélés dans une zone comprenant plus de 150 millions de pixels (près d'1.5 hectare couverts par des pixels de moins de 10 centimètres).

Enfin, une mise en cohérence hydraulique des altitudes des lignes de rives restituées a été effectuée, permettant ainsi d'améliorer la précision altimétrique de la position de l'interface air/eau (miroir) d'un facteur 2 à 4. On a de plus lors de ce traitement éliminé les mesures aberrantes (correspondant à la restitution de végétation rivulaire où à des fausses corrélations) et ainsi diminué les sources de biais sur la mesure.

Une fois estimés les paramètres d'acquisition et la position de la surface, on a pu obtenir une valeur de la topographie immergée d'après les mesures "apparentes" en corrigeant couple par couple l'effet de la réfraction. La comparaison des altitudes de points immergés estimés avec les données de validation "terrain" a montré que le biais de mesure est de l'ordre de quelques centimètres, avec une dispersion de l'ordre de la vingtaine de centimètres.

On a finalement utilisé un filtrage spatial afin d'obtenir un modèle numérique de la partie immergée de la rivière exploitable à des fins thématiques (modèles hydrauliques et/ou hydroécologiques). La dispersion de la mesure, d'une dizaine de centimètres, rend en effet envisageable l'utilisation des données de topographie immergée pour la détermination de classes de profondeur d'une vingtaine de centimètres de large. Il s'agit de l'ordre de grandeur de la largeur des classes utilisées pour le calcul d'hydrosignature et les modèles habitat/poisson.