

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**CARTOGRAPHIE DU SUBSTRAT DE L'HABITAT DU SAUMON
ATLANTIQUE PAR ANALYSE D'IMAGERIE AEROPORTEE
HAUTE-RESOLUTION**

Par

Gaetano Cecere

Mémoire ou thèse présentée pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de la terre

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Erwan Gloaguen
INRS-ETE

Examineur externe

Patrice Carbonneau
Department of Geography
Durham University

Directeur de recherche

Normand Bergeron
INRS-ETE

Codirecteur de recherche

André St-Hilaire
INRS-ETE

«Istruitevi, perché avremo bisogno di tutta la
nostra intelligenza.

Agitatevi, perché avremo bisogno di tutto il
nostro entusiasmo.

Organizzatevi, perché avremo bisogno di tutta
la nostra forza».

(Antonio Gramsci)

REMERCIEMENTS

Je souhaite en premier lieu remercier ma femme, Michela, avec laquelle on a choisi de vivre cette expérience et qui m'a toujours soutenu et motivé tout au long de ma maîtrise. Je souhaite aussi remercier grandement mon directeur de recherche Normand Bergeron et mon codirecteur André St-Hilaire qui m'ont guidé toujours dans mon projet et m'ont donné des conseils précieux.

Merci à Steve, Mathieu, Danielle, Rosemarie, Pierre-Marc, Elsa, Carole-Anne, Joannie et Sebastien qui m'ont donné toute l'aide et le soutien dont j'ai eu besoin et André Boivin le maître de la logistique.

Un grand merci à toutes les étudiantes et tous les étudiants de l'INRS – Eau Terre Environnement et du Canadian Rivers Institute avec lesquels j'ai eu la chance d'être en contact. Cette expérience se base surtout sur le partage de connaissances et valeurs et pour moi l'opportunité de pouvoir échanger avec des personnes qui viennent de partout au monde a été très importante. *Mamnoon Shiva, Thank you Obinna, Gracias Felipe* et Edward, Merci Jonas.

Grazie à toute la communauté italienne de l'INRS qui a été ma famille lorsqu'on est loin de notre Pays : Carlotta, Silvia, Enrica, Pier Paolo, Nicolò, Claudio Paniconi.

Merci au Canada et au Québec, terres d'accueil.

RÉSUMÉ

La taille des grains du lit d'un cours d'eau joue un rôle prépondérant sur son utilisation possible pour l'habitat des salmonidés. Récemment, de nouvelles méthodes d'analyses ont été développées pour la cartographie de la taille du substrat à partir d'images aériennes haute résolution. Le présent projet a pour objectif d'utiliser la méthode développée par Carbonneau *et al.* (2004) afin de cartographier l'habitat du saumon atlantique sur un tronçon de la branche Nord-est de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay) sur laquelle se déroule un programme de translocation de saumons reproducteurs.

À l'été 2014, des images aériennes de la rivière ayant une résolution au sol de 2.4 à 3.3 cm ont été acquises, en période d'étiage, à l'aide du système d'imagerie héliportée développé par Dugdale *et al.* (2013) et doté d'une caméra optique haute résolution. Tout juste avant le survol, des photographies au sol géoréférencées du substrat ont été obtenues sur les parties exondées et submergées du lit de 4 tronçons représentatifs de la rivière afin de servir de calibration à la méthode d'estimation du substrat à partir des images aériennes. Ces photographies ont été analysées à l'aide du logiciel libre *BASEGRAIN* afin de mesurer la distribution en taille des particules sur chacune des images et en calculer le D_{16} , le D_{50} et le D_{84} . Les images aériennes ont ensuite été analysées afin de calculer l'entropie de la brillance des pixels à l'intérieur de fenêtres d'analyse de différentes tailles (63 x 63 cm à 123 x 123 cm) centrées sur chacun des points de calibration au sol de la granulométrie. L'analyse statistique de la relation entre les valeurs d'entropies et la granulométrie du substrat exondé démontre l'existence d'une relation significative négative qui pourra être utilisée afin d'estimer la taille du substrat sur la partie submergée du lit de l'ensemble des images aériennes.

Mots clés : Rivière, habitat du saumon, télédétection, substrat, entropie.

ABSTRACT

Substrate grain size distribution in a stream plays a major role in its potential habitat use by salmon. Recently, new methods of analysis have been developed for the mapping of the size of the substrate from high-resolution aerial images. The purpose of this project is to use the method developed by Carbonneau et al. (2004) to map the Atlantic salmon spawning habitat on a reach of the northeast branch of the Sainte-Marguerite River (Saguenay) where a conservation translocation program of adult salmon is ongoing.

In the summer of 2014, aerial images of the river with a ground resolution of 2.4 to 3.3 cm were acquired, during low-flow periods, using the helicopter imaging system developed by Dugdale et al. (2013) with a high-resolution optical camera. Just prior to the flight, georeferenced ground photos of the substrate were obtained from the exposed and submerged portions of the bed of 4 representative sections of the river to calibrate the grain-size estimation method from the aerial images. These photographs were analyzed using a free software called BASEGRAIN to measure the particle size distribution on each images and to calculate the D_{16} , D_{50} , and D_{84} . Aerial images were then analyzed to calculate the entropy of pixel brightness within windows of different sizes (63 x 63 cm to 123 x 123 cm) centered on each of the ground calibration points. The statistical analysis of the relationship between the entropy values and the particle size of the exposed substrate demonstrates the existence of a significant negative relationship that can be used to estimate substrate sizes on both the dry and wet portions of the bed of all aerial images.

Keywords : river, salmon habitat, remote sensing, substrate, entropy

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION.....	15
1.1 Objectifs	20
1.2 Structure.....	20
2 LE SAUMON ATLANTIQUE ET LE SUBSTRAT : LIEU DE REPRODUCTION, REFUGE ET ALIMENTATION	21
2.1 La taille du substrat de rivière : méthodes de mesure traditionnelles	23
2.2 Comment la télédétection a changé la mesure de la taille des particules fluviales	24
2.2.1 Photosieveing	25
2.2.2 Analyse de texture des images	27
2.2.3 Nouvelles méthodes	33
3 MÉTHODOLOGIE.....	37
3.1 Site d'étude : rivière Sainte-Marguerite Nord-est	37
3.2 Acquisition des images aéroportées.....	41
3.3 Sites des points de calibration sur le terrain.....	46
3.4 Acquisition des photos des points de calibration.....	49
3.5 Analyse d'image aéroportée	53
3.6 Entropie.....	59
3.7 Analyse photo de calibration.....	62
3.7.1 Logiciel BASEGRAIN.....	62
3.7.2 Distribution de la granulométrie	64
3.7.3 Indices (D_{16} , D_{50} , D_{84}) évalués par BASEGRAIN.....	65
3.7.4 Analyse de correspondance entre l'entropie et la granulométrie.....	65
3.7.5 Analyse statistique	67
3.8 Comparaison des erreurs et limites dans les travaux précédents	67
4 RÉSULTATS.....	69
4.1 Résultats obtenus par BASEGRAIN.....	70
4.1.1 Substrat exondé	70
4.1.2 Substrat submergé.....	71

4.2 Relation entre l'entropie et la granulométrie.....	72
4.2.1 Substrat exondé	72
4.2.2 Substrat exondé : les résultats principaux.....	79
4.2.3 Substrat submergé.....	85
4.2.4 Substrat submergé : les résultats principaux.....	91
5 DISCUSSION	93
5.2 Comparaison avec les travaux antérieurs	95
5.3 Application sur toute la rivière.....	96
5.4 Limites de la méthodologie	97
6 CONCLUSIONS.....	99
6.1 Contribution de la recherche et applications	99
Références	103
ANNEXE 1.....	109
ANNEXE 2 : ESTIMATION DES INTERSTICES	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Résumé du système d'acquisition d'images.....	45
Tableau 2 - Caractéristiques des quatre sites de la rivière utilisés pour les images de calibration	48
Tableau 3 - Valeurs minimales et maximales des percentiles (50 et 84) de la distribution granulométrique exondée dans les quatre sites de calibration obtenues par BASEGRAIN.....	70
Tableau 4 - Valeurs minimales et maximales des percentiles (50 et 84) de la distribution granulométrique submergée dans les quatre sites de calibration.....	71
Tableau 5 (a, b) - Informations concernant les images de calibration analysées dans les quatre sites de calibration (granulométrie exondée).....	73
Tableau 6 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie pour l'ensemble des données dans les quatre sites de calibration.....	74
Tableau 7 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration <i>Trinité</i>	75
Tableau 8 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration <i>Crag pool</i>	76
Tableau 9 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration <i>Hill station</i>	77
Tableau 10 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration <i>Savane</i>	78
Tableau 11 - Valeurs des percentiles D50 et D84 pour les sites Crag pool et Savane.....	81
Tableau 12 (a, b) - Informations concernant les images de calibration analysées dans les quatre sites de calibration (granulométrie submergée).....	85
Tableau 13 - Valeurs de coefficient de détermination (R^2)- site de calibration <i>Crag pool</i>	88
Tableau 14 - Valeurs de coefficient de détermination (R^2)- site de calibration <i>Hill station</i>	89
Tableau 15 - Valeurs de coefficient de détermination (R^2)- site de calibration <i>Savane</i>	90
Tableau 16 - Résumé des études précédentes (modifié de Tremblay 2010).....	96
Tableau 17 – Estimation des interstices – site Savane.....	113
Tableau 18 - Estimation des interstices – site Trinité.....	114
Tableau 19 - Estimation des interstices – site Crag pool.....	115
Tableau 20 - Estimation des interstices – site Hill Station.....	116

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – La présence du saumon atlantique. (http://www.nasfworldwide.com).....	15
Figure 2 - Répartition naturelle du saumon atlantique sauvage dans l'Est du Canada. (http://www.registrellep-sararegistry.gc.ca).....	16
Figure 3 - Graphique de l'abondance avant la pêche (PFA) pour le saumon nord-américain 2SW (2 sea winter) montrant le nombre total nécessaire pour atteindre le seuil de conservation minimale dans les rivières nord-américaines, en vert (ASF-ICES).	17
Figure 4 - Cycle de vie du saumon atlantique (WWF-Suisse)	18
Figure 5 - Vue de profil d'un nid type et illustration de l'écoulement de l'eau dans le gravier et au-dessus des œufs enfouis (Department of Fish and Wildlife - USA, 1997).	22
Figure 6 - Un exemple de Semi-variogramme théorique (cours Géostatistiques – INRS).....	30
Figure 7 - Profil en long de la taille médiane des particules sur un tronçon de 80 km (de l'aval vers l'amont) de la branche Principale de la rivière Sainte-Marguerite, Saguenay, Canada. Les colonnes d'erreurs (1-8) ont été créées par la réflexion sur la surface de l'eau. (Carbonneau <i>et al.</i> , 2005).....	31
Figure 8 - Images enregistrées à l'aide d'un drone de la section <i>Trinité</i> sur la rivière Sainte Marguerite (branche Nord-est) (Images fournies par Le Laboratoire de télédétection environnementale par drone – TED, INRS)	35
Figure 9 – Carte de la branche Nord-est de la rivière Sainte-Marguerite, Saguenay, Québec. ...	38
Figure 10 — Bassin versant de la rivière Sainte Marguerite Saguenay, Québec.....	39
Figure 11 – Hydrogramme annuel de la rivière Sainte Marguerite Nord-est (CEHQ).....	39
Figure 12 — Trois images de la rivière Sainte Marguerite Nord-est.....	40
Figure 13 - L'hélicoptère Robinson44 utilisé pour le survol de la rivière Sainte Marguerite Nord-est (Cirsa – 25 août 2014)	41
Figure 14 - Le parcours du survol de la rivière Sainte Marguerite Nord-est du 25 août 2014.	42
Figure 15 - Une image du pod utilisé pour l'installation du système d'imagerie	43
Figure 16 - Une image frontale du pod : les caméras et la tête robotisée	44
Figure 17 - L'R44 en vol lors du survol (Station Cirsa)	45
Figure 18 - La localisation des quatre sites de la rivière utilisés pour les images de calibration	46
Figure 19 - Localisation des points de contrôle positionnés sur le terrain	47
Figure 20 - Un schéma de la structure rectangulaire utilisé pour la prise des images de calibration	49
Figure 21 - Pose de la structure rectangulaire lors de la prise d'une image de la composante submergée	50
Figure 22 - Pose de la structure rectangulaire lors de la prise d'une image de la composante sèche.....	50
Figure 23 - Estimation visuelle des percentiles sur la composante sèche.....	51
Figure 24 - Compte et évaluation des interstices avec la méthode de Finstad (2007)	52
Figure 25 - Système d'acquisition des coordonnées spatiales avec une station RTK (Trimble Dual 5800).....	52
Figure 26 - Exemple de retour de l'hélicoptère (<i>boucle</i>) sur une section lors du survol	53

Figure 27 - Localisation des quatre sites de calibration et mosaïques des images aériennes correspondantes.....	54
Figure 28 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Savane, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain.....	55
Figure 29 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Crag Pool, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain.....	56
Figure 30 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Hill Station, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain.....	57
Figure 31 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Trinité, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain	58
Figure 32 - Matrice de Co-occurrence par niveaux de gris (MCNG)	60
Figure 33 - Exemple du calcul du rayon dans une matrice de niveaux de gris.....	61
Figure 34 - Représentation des axes a, b et c (http://www.dep.wv.gov)	63
Figure 35 - (a) Image enregistrée sur le terrain ; (b) axes a et b évalués par BASEGRAIN	63
Figure 36 - (a) Détection incorrecte de l'axe b ; (b) post traitement sur la même image	64
Figure 37 - Exemples de correspondances entre deux typologies de granulométrie et les valeurs d'entropie.....	65
Figure 38 - Meilleurs résultats de la station <i>Trinité</i> pour la relation Entropie —.....	79
Figure 39 - Meilleurs résultats de la station Crag pool pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 9; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 9.....	80
Figure 40 - Meilleurs résultats de la station Savane pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3.....	80
Figure 41 - Meilleur résultat de la station Hill station pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 1; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 1	81
Figure 42 - Meilleurs résultats de l'ensemble des 4 stations pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 7.....	82
Figure 43 – Exemples de la diminution de a valeur de R ² avec l'élargissement de la fenêtre d'interrogation : a) Crag pool; b) Trinité; c) Hill station; d) 4 stations	83
Figure 44 - Les graphiques <i>boxplot</i> relatives aux données des quatre stations : a)d50 - fenêtre 41x41 (offset 3); b) d84 – fenêtre 41x41 (offset 7).....	84
Figure 45 - Présence d'ombrage et de tourbillon. Site : Crag pool (gauche) – Hill Station (droite)	86
Figure 46 - Exposition excessive à l'ensoleillement. Site : Crag pool.....	87
Figure 47 - Présence de biofilm. Site : Trinité.....	87
Figure 48 - Meilleurs résultats de Hill Station pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 31x31 pixels, offset de 3; b) d50 : fenêtre de 31x31 pixels, offset de 7.....	91
Figure 49 - Meilleurs résultats de Hill Station pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 5; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 5.....	91
Figure 50 - Meilleurs résultats de la station Savane pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 21x21 pixels, offset de 3; b) d50 : fenêtre de 21x21 pixels, offset de 7	92
Figure 51 - Exemples de la diminution de la valeur de R ² avec l'élargissement de la fenêtre d'interrogation : a) Hill station (offset 3); b) Hill station (offset 5).....	92
Figure 52 - Exemple de bouée Hydroball (CIDCO)	100

Figure 53 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN - Savane.....	109
Figure 54 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN – Savane.....	109
Figure 55 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN – Trinité	110
Figure 56 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN – Trinité	110
Figure 57 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN — Crag pool	111
Figure 58 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN — Crag pool	111
Figure 59 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN — Hill station	112
Figure 60 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN — Hill station	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AMO	<i>Oscillation atlantique multidécennale</i>
CEHQ	<i>Centre d'expertise hydrique du Québec</i>
CIRSA	<i>Centre interuniversitaire de recherche sur le saumon atlantique</i>
D ₁₆	<i>16^e percentile de la distribution granulométrique</i>
D ₅₀	<i>50^e percentile de la distribution granulométrique</i>
D ₈₄	<i>84^e percentile de la distribution granulométrique</i>
GIS	<i>Geographic information system</i>
GPS	<i>Global positioning system</i>
MCNG	<i>Matrice de cooccurrence des niveaux de gris</i>
MNE	<i>Modèle numérique d'élévation</i>
MP	<i>Megapixel</i>
PVC	<i>Polychlorure de vinyle</i>
RGB	<i>Red-Green-Blue</i>
RVB	<i>Rouge-Vert-Bleu</i>
RTK	<i>Real time kinematic</i>
SD	<i>Standard deviation</i>
Sfm	<i>Structure from motion</i>
SST	<i>Sea surface temperature</i>
TIN	<i>Triangulated irregular network</i>
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanning</i>

1 INTRODUCTION

Le saumon atlantique (*Salmo salar*) est l'une des espèces aquatiques les plus étudiées par les scientifiques. Après la dernière période glaciaire, différentes populations se sont retrouvées isolées en Europe et en Amérique du Nord, en particulier sur la côte atlantique, au Canada et aux États-Unis (Berg, 1985) (Figure 1).



Figure 1 – La présence du saumon atlantique. (<http://www.nasfworldwide.com>)

La plupart des populations de saumon atlantique sont diadromes (du grec ancien διάδρομος, *diádromos*) (Klemetsen *et al.*, 2003), qui signifie que pour atteindre les différentes étapes qui composent leur cycle de vie, ils doivent effectuer une migration entre l'eau douce des rivières et l'eau salée du milieu marin (McDowall, 1988). Une espèce diadrome est en fait dite anadrome (du grec ancien ἀναδρομος, *anadromos*), quand elle effectue une partie de son cycle de vie en eau salée mais qu'elle migre en eau douce pour se reproduire.

Lors de leur séjour en mer, les stocks de saumon provenant de l'Amérique du Nord se retrouvent dans les eaux du Labrador et du Groenland (L. Hansen *et al.*, 1998), tandis que les stocks européens sont concentrés dans les mers de Norvège, Féroés et Baltique (Jacobsen - Hansen, 2003).

Dans l'est du Canada, cette espèce est considérée comme une ressource importante pour le sport et les loisirs, ainsi que comme un indicateur d'un environnement sain (ASF, 2011) (Figure 2). La pratique de la pêche au saumon (au Canada, il y a 550 rivières à saumon et 119 sont au Québec) a connu une évolution importante au cours des dernières décennies.



Figure 2 - Répartition naturelle du saumon atlantique sauvage dans l'Est du Canada.
(<http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca>)

Depuis les années 1970, les populations sauvages de *Salmo salar* (saumon atlantique) ont décliné de 60 % (Fridriksdottir, 2013) (Figure 3) et, présentement, 85 % des populations sont définies comme étant vulnérables, en danger ou critiques. Il y a des facteurs directs et indirects à la base de ce déclin du saumon atlantique. Comme facteurs directs, nous pouvons citer la surpêche dans l'océan, les estuaires et les rivières ainsi que le changement de salinité, de l'oxygène (AMO) et de la température de la surface de la mer (SST). De façon indirecte, il y a les facteurs qui affectent la chaîne alimentaire du saumon (Fridriksdottir, 2013).

Pre-fishery Abundance - North America

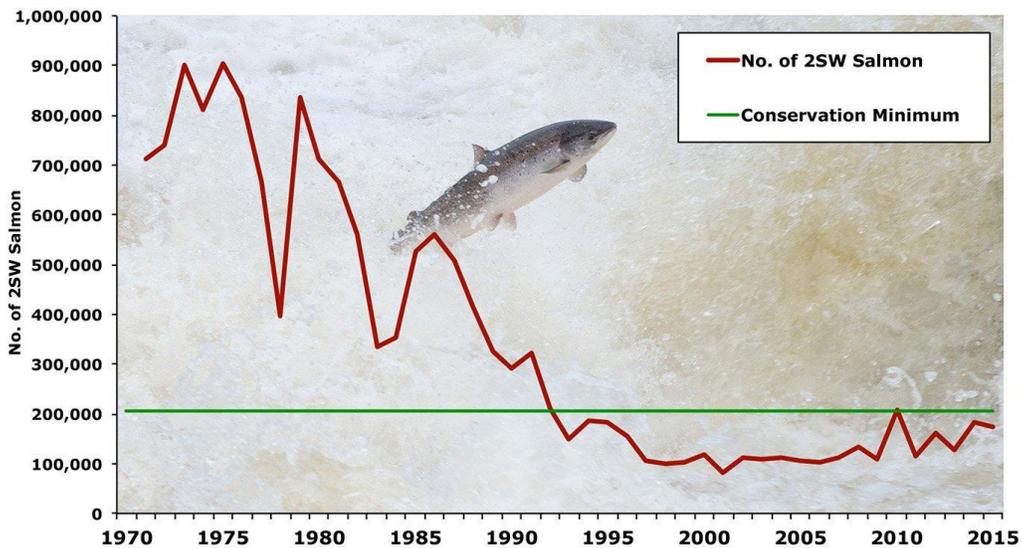


Figure 3 - Graphique de l'abondance avant la pêche (PFA) pour le saumon nord-américain 2SW (2 sea winter) montrant le nombre total nécessaire pour atteindre le seuil de conservation minimale dans les rivières nord-américaines, en vert (ASF-ICES).

Cependant, la vulnérabilité de l'espèce est aussi associée à la dégradation de la quantité et de la qualité de l'habitat des rivières. La fragmentation de l'habitat liée à la construction de grands barrages hydroélectriques ou à d'autres obstacles au mouvement du saumon est souvent citée comme une des causes majeures du déclin. La dégradation des habitats est souvent associée aux apports locaux en polluants industriels et agricoles, aux pluies acides, aux microbes pathogènes, et à la sédimentation fine (ICES, 2013).

Compte tenu des composantes multifactorielles qui ont conduit au déclin des populations de saumon atlantique, l'intervention directe à grande échelle, dans la partie du cycle de vie vécue dans la mer, semble assez compliquée et difficile à mettre en œuvre pour des raisons techniques évidentes. Toutefois, une intervention en rivière semble plus envisageable.

L'habitat du saumon atlantique en eau douce varie grandement en fonction des besoins spécifiques à chaque stade de vie (Figure 4): la reproduction, l'alimentation, l'utilisation de refuges par les juvéniles; des fosses profondes pour les adultes en montaison et en période post fraie (Armstrong *et al.*, 2003, Bardonnnet *et al.*, 2000, Gibson *et al.*, 1993).

La connectivité des habitats, ainsi que leur qualité et quantité devient une prérogative importante pour assurer le maintien des populations de l'espèce.

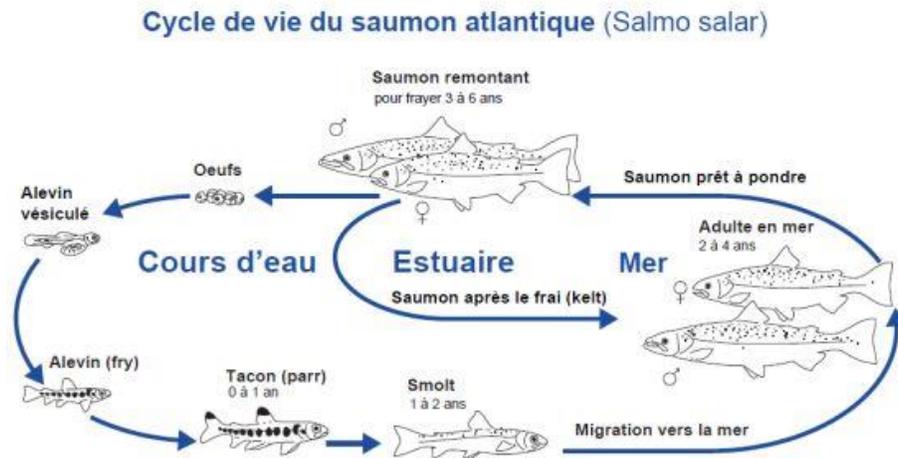


Figure 4 - Cycle de vie du saumon atlantique (WWF-Suisse)

Au Québec, les institutions responsables sont alors intervenues avec une série de réglementations sur la pêche commerciale (Le rachat des permis de pêches commerciales au saumon atlantique s'est échelonné de 1972 à 2000, MFFP (2016)) et l'introduction de limitations pour la pêche sportive. Au Québec, par exemple, pour la protection de l'espèce, ces règles ont mis en place un plan de gestion durable des rivières à saumon ayant pour objectif une utilisation optimale de la ressource et une augmentation des avantages économiques associés à la pêche.

Le dernier plan de gestion du saumon 2016-2026 (MFFP, 2016) vise à assurer la conservation à long terme des populations de saumon atlantique par l'adoption de modes de gestion fixés en fonction de caractéristiques spécifiques à chaque rivière (Plan de gestion du saumon atlantique 2016-2026 (MFFP, 2016). Après une période, de deux à six ans, passée en mer, les adultes viennent se reproduire très majoritairement dans la rivière d'origine (Buck *et al.*, 1984) et donc à chaque rivière peut être associée une population spécifique de saumons (Fleming *et al.*, 1996, Klemetsen *et al.*, 2003).

Le calcul du potentiel de production d'une rivière s'effectue à l'aide d'un modèle d'habitat utilisant les caractéristiques de la vitesse du courant, de la profondeur d'eau, et de la taille du substrat sur l'ensemble de la rivière. Parmi les principaux paramètres abiotiques descriptif des habitats aquatiques (Bangen *et al.*, 2014), la taille du substrat est souvent considérée comme un des facteurs les plus importants (Maddock, 1999).

En particulier, la taille du substrat est critique à la reproduction du saumon (Armstrong *et al.*, 2003) ; au refuge des saumons juvéniles contre les forts courants (Cunjak, 1988, Heggenes, 1990, Rimmer *et al.*, 1984) et à leur protection contre les prédateurs (Gibson *et al.*, 1993). Le substrat détermine également les zones d'alimentation car il abrite les invertébrés aquatiques dont se nourrissent les saumons juvéniles (Danie, 1984, Rader, 1997). La taille du substrat revêt une importance cruciale pour le saumon, mais sa caractérisation sur le terrain quand est laborieuse et coûteuse : les activités sont souvent concentrées seulement dans certains secteurs en raison de la dépense de temps, d'énergie et des coûts. L'utilisation de la télédétection dans les études des écosystèmes fluviaux a donné lieu à un certain nombre d'approches moins coûteuses et réparties sur une plus grande échelle spatiale (Woodget, 2015).

Dans le milieu des années 2000, Carbonneau (Carbonneau *et al.*, 2005, 2004), a développé une approche de télédétection fluviale en utilisant une approche statistique qui utilise les mesures de semivariance locales. Avec une approche qui utilise la texture de l'image appliquée à l'imagerie aérienne RVB haute résolution, les études plus importantes ont été effectuées par Carbonneau *et al.* (2004) et Verdú *et al.* (2005) .

Par exemple, dans l'étude de Carbonneau *et al.* (2004) a été analysé la relation entre les semivariances d'images locales et la taille médiane des grains (Dugdale *et al.*, 2010) et sur la base des résultats, une cartographie de la taille des grains à partir des images aériennes (résolution de 30 m) a été ainsi réalisée. Toutefois, bien que les méthodes soient améliorées par l'utilisation d'appareils pour l'enregistrement des images, la problématique de la calibration, par exemple des indices de texture comme l'entropie, demeure toujours un objectif important. Sur la base de ces approches, Black *et al.* (2014) ensuite a investigué la granulométrie fluviale avec taille inférieure au pixel à partir des images hyperspatiales. Pourtant, les approches par analyse statistiques de premier et deuxième ordre de la texture ont donné des bons résultats pour l'estimation des percentiles de granulométrie de surface, ouvrant de nouvelles perspectives pour l'investigation future (Black *et al.*, 2014, Marchetti, 2017). Les approches statistiques ont été appliquées à souvent sur l'imagerie RVB (RGB) en raison du coût faible et de la faible résolution de l'imagerie multispectrale et hyperspectrale par rapport à la photographie aérienne RVB. Dans les dernières années, les innovations apportées par l'utilisation des drones, par exemple, permettent d'élargir encore la taille des études et la qualité des images (Woodget *et al.*, 2017b).

1.1 Objectifs

Le principal objectif de cette étude est de tester la répliquabilité de la méthode d'estimation développée par Carbonneau (Carbonneau *et al.*, 2005, Carbonneau *et al.*, 2004) pour l'estimation de la taille du substrat de la branche Nord-est de la rivière Sainte-Marguerite, à partir de l'analyse de la texture locale d'image aéroportée haute-résolution.

Plus spécifiquement, le mémoire a comme objectifs de :

- Tester l'utilisation des statistiques de deuxième ordre comme l'entropie en tant que mesure de texture locale des images ;
- Analyser et vérifier la calibration de l'entropie à travers l'utilisation de BASEGRAIN, un logiciel de reconnaissance semi-automatique d'objets;
- Analyser l'effet de la taille de la fenêtre d'interrogation et du rayon de calcul de la valeur d'entropie de la matrice de cooccurrence de niveaux de gris (MCNG) sur la qualité de la relation entropie/substrat ;
- Comparer la qualité de la relation entropie/substrat pour les parties exondées et submergées du lit de la rivière.

1.2 Structure

Ce travail de recherche est réparti essentiellement en six parties principales.

Il y a d'abord une introduction (1) et revue de la littérature (2) axée sur l'importance de la taille des particules sur la composante de l'habitat du saumon et les diverses méthodes que l'on utilise à cet égard, surtout par l'utilisation de la télédétection.

Un corps central, qui décrit la méthode (3) utilisée pour l'étude et les différentes étapes qui ont conduit à l'obtention des résultats (4).

Les résultats sont alors présentés avec un approfondissement et une comparaison avec les travaux précédents, en concluant par une discussion (5) sur les contributions pour la recherche et les applications (6) qui peuvent résulter de ce travail.

2 LE SAUMON ATLANTIQUE ET LE SUBSTRAT : LIEU DE REPRODUCTION, REFUGE ET ALIMENTATION

Les principales variables d'habitat physique d'une rivière qui déterminent sont utilisation par le saumon atlantique sont la profondeur de l'eau, la vitesse de l'eau et le substrat (Heggenes, 1990). Parmi ces variables, la composition du substrat et l'écoulement sont interreliés.

En fait, la distribution des différents types de substrat à l'intérieur d'une rivière est généralement déterminée par les composantes de la vitesse en vigueur. Lorsque le courant se révèle avoir une plus grande vitesse, le substrat est plus grossier ou plus compact, tandis que des substrats moins grossiers sont associés à de faibles vitesses. (Johnston, 2011). Par contre, parfois on retrouve le substrat grossier en aval et le patron inverse d'affinement est le résultat de l'héritage glaciaire (rivières du Bouclier Canadien). Bien souvent, on peut voir du substrat grossier dans une section faible vitesse d'une rivière si le substrat n'est pas déposé par la rivière et si la rivière n'arrive pas à le déplacer.

De ce raisonnement, dans une séquence typique de seuil et fosse, le substrat le plus grossier sera dans la partie la plus rapide de l'écoulement dans la partie supérieure du seuil, et le substrat caractérisé par une grande quantité de matière fine sera dans la partie profonde d'une fosse.

Les seuils où l'on retrouve des galets (taille des particules de substrat prédominant de 16 – 64 mm de diamètre) pourraient être considérés comme un premier habitat primordial pour le saumon de moins de 7 cm de longueur.

Les eaux profondes ou lentes, avec un substrat de sable ou de limon, ne sont pas l'idéal pour les salmonidés juvéniles. Comme les alevins grandissent, leur préférence pour des parties plus profondes et plus rapides des seuils augmente ; lorsqu'ils atteignent 8 – 9 cm de longueur, la plupart choisissent des zones avec une présence de taille de substrat de 64 mm (galets et blocs) avec des profondeurs supérieures à 300 mm (Baglinière *et al.*, 1986, Symons *et al.*, 1978, Wańkowski *et al.*, 1979).

Le refuge fourni par la taille de substrat dans un cours d'eau est important pour le saumon juvénile parce que cela entrave la vision entre les tacons avoisinants et réduit l'agressivité territoriale (Heggenes *et al.*, 1999, Mills *et al.*, 1989). Les substrats

grossiers fournissent également un abri contre les vitesses d'écoulement fortes, favorisant ainsi l'économie des réserves énergétiques (Cunjak *et al.*, 1998).

Le saumon fraie dans des nids excavés dans une séquence typique de seuil et fosse, dans des zones de gravier non compacté et perméable (Figure 5), souvent dans des seuils ou à la tête ou à la queue d'une fosse (Moir *et al.*, 2009). Le choix du site de fraie est caractérisé par nombreux facteurs : la taille du gravier, l'écoulement dans les interstices, la quantité et la qualité de l'eau. Pour ces raisons des endroits si favorables pour le frai du saumon se retrouvent seulement dans 3 % ou moins d'une rivière (Mills *et al.*, 1989).

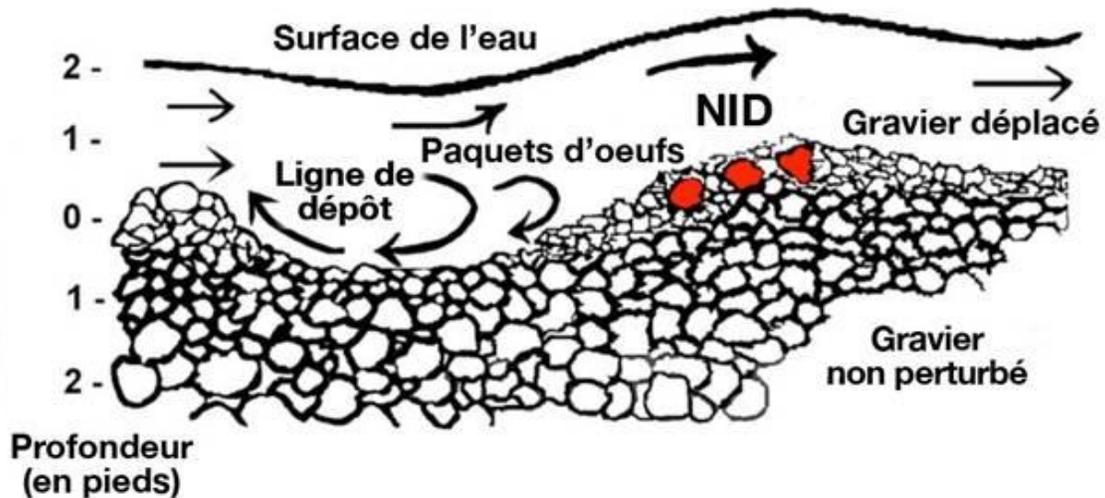


Figure 5 - Vue de profil d'un nid type et illustration de l'écoulement de l'eau dans le gravier et au-dessus des œufs enfouis (Department of Fish and Wildlife - USA, 1997).

Les premières couches du substrat fluvial (souvent le trente premier centimètres) sont critiques et sont les plus sensibles aux changements de caractère physique; en effet, la composition et la taille moyenne des grains des graviers utilisés par le saumon pour la fraie varient sensiblement, mais se composent généralement d'un mélange de galets (granulométrie 22 – 256 mm), de galets (2 – 22 mm) et de matériaux plus fins (< 2 mm) (Hendry, 1997).

Toutefois, il demeure essentiel qu'il y ait un écoulement suffisant de l'eau à travers le gravier, afin que puissent réussir l'incubation des œufs et l'émergence subséquente des alevins.

La présence de sédiments fins au niveau du nid peut affecter la survie des œufs en réduisant l'écoulement intragravier qui alimente les œufs en oxygène (Chapman, 1988, Greig *et al.*, 2007, Greig *et al.*, 2005b, Sear, 2008) ou qui cause l'occlusion physique des pores sur la surface de l'œuf (Greig *et al.*, 2005a).

Des études ont montré des bons taux de survie dans les graviers ayant une teneur en sable (< 2 mm) jusqu'à 15 % (Greig *et al.*, 2007, Peterson, 1978, Roche, 1994), bien que les sédiments très fins d'argile (0,063 mm) nuisent fortement à la survie des embryons en bloquant le flux d'eau oxygénée vers l'embryon. Les critères les plus rigoureux donnent un niveau inférieur à 10 % pour les particules inférieures à 0,83 mm pour permettre l'émergence de 50 % d'alevins.

2.1 La taille du substrat de rivière : méthodes de mesure traditionnelles

La cartographie et la quantification de la granulométrie fluviale est une importante clé dans l'étude de la géomorphologie fluviale (Maddock, 1999). Dans une rivière, on peut retrouver des tronçons avec des caractéristiques très différentes les unes des autres en raison de la structure de l'écoulement, de la forme du lit et du transport des sédiments (Leeder, 1983).

Dans les rivières à lit de gravier, le processus de tri hydraulique cause un affinement général de la taille du substrat de l'amont vers l'aval, interrompu parfois par un apport en sédiments grossiers qui peut provenir d'un tributaire (Rice *et al.*, 1998), de dépôts glaciaires (Davey *et al.*, 2007) ou d'un canyon (Kim, 2009) : les liens sédimentaires (Rice *et al.*, 1998, Tremblay, 2010).

Cette variabilité spatiale des sédiments fluviaux sur une variété d'échelles différentes demande un effort considérable sur le terrain pour caractériser les distributions des particules (Church, 1987). Les méthodes traditionnelles pour collecter et analyser les distributions granulométriques des sédiments fluviaux sont essentiellement : l'échantillonnage volumétrique et l'échantillonnage de surface.

Dans un échantillonnage volumétrique, un volume prédéterminé de substrat est prélevé du lit de la rivière, par exemple avec une pelle.

Wolman (1954) a présenté une méthode qui échantillonne les particules présentes à la surface du lit d'une rivière selon une grille d'échantillonnage. Une grille est établie au-dessus du tronçon d'intérêt de la rivière et au-dessous de chaque intersection les particules sont prélevées (typiquement à la main et à l'aveugle) et mesurées (Church, 1987). Wolman a suggéré l'analyse d'au moins cent particules comme une taille d'échantillon adéquate. Fripp *et al.* (1993) et Rice *et al.* (1998) ont trouvé qu'une taille d'échantillon de quatre cents particules serait préférable (Black *et al.*, 2014).

Une fois qu'un échantillon a été récolté, les particules de l'échantillon sont placées dans des classes de tailles basées sur des diamètres de tamis de particules (échelle de Wentworth (1922)). Les résultats sont souvent présentés sous la forme d'une courbe de distribution des granulométries cumulatives. La courbe est réalisée à partir d'un graphique semi-log, avec les tailles de tamis correspondant à l'axe x et le pourcentage cumulatif plus fin sur l'axe des y.

Ces méthodes d'échantillonnages manuelles demandent beaucoup de travail et de temps sur le terrain, et sont soumises à un biais d'échantillonnage de l'opérateur (Bunte *et al.*, 2001, Graham *et al.*, 2010, Westoby *et al.*, 2016). Dans la méthode de Wolman, par exemple, la matière plus fine est souvent mal estimée (D.J. Milan, 1996, Woodget, 2015). De plus, la collecte de données de ce type n'est jamais spatialement continue (à l'échelle des parcelles) et seulement parfois référencée spatialement.

2.2 Comment la télédétection a changé la mesure de la taille des particules fluviales

La quantification de la distribution granulométrique des dépôts sédimentaires a toujours été une question fondamentale pour les études hydrauliques dans les rivières graveleuses, où les caractéristiques de la taille des grains de surface sont au centre de l'estimation du débit, de la résistance à l'écoulement et du transport de sédiments. Toutefois les limitations (temps et coût) reliées à l'obtention d'informations ont fait que la

recherche s'est tournée vers des méthodes qui pouvaient être employées pour augmenter la facilité et la vitesse d'obtention des informations.

Les approches photographiques (Adams, 1979) ont offert une alternative, car les images peuvent être acquises rapidement afin de réduire la quantité de temps qui doit être dépensé sur le terrain. Toutefois, ils ont encore besoin de temps dans le laboratoire afin d'extraire les informations nécessaires.

Butler (2001) a démontré le potentiel d'une approche photographique utilisant des méthodes automatisées pour extraire les informations de granulométrie de l'imagerie numérique, numérisées à partir de pellicules photographiques ou acquises à l'aide d'appareils photo numériques.

Les résultats de cette recherche ont suggéré qu'il est possible d'identifier et de quantifier les bords des grains individuels tels qu'ils apparaissent sur des images numériques non rectifiées (photographies numérisées), à condition qu'il soit de la bonne échelle en ce qui concerne la taille des grains qui sont d'intérêt.

Par conséquent, les scientifiques et les études suivantes ont pu s'appuyer sur des techniques plus objectives capables de fournir des mesures rapides, continues et précises de la taille des grains.

L'approche par *photosieving* (qui utilise des images à haute résolution) a premièrement été utilisée pour mesurer la taille des grains de surface ainsi que des méthodologies de traitement d'images (Buscombe, 2008, Butler, 2001, Graham *et al.*, 2005, Ibbeken *et al.*, 1986, Rubin, 2004, Schmocker *et al.*, 2013, Vázquez-Tarrío *et al.*, 2017).

2.2.1 Photosieving

L'approche de *photosieving* utilise des images haute-résolution acquises à 1 – 2 m au-dessus du niveau du sol à partir de photos. Des photographies de petites zones (par exemple 1 m²) sont prises près du sol sur des bancs exondés sec, ou des zones submergées peu profondes. Ainsi, l'imagerie résultante est analysée soit manuellement, soit à l'aide de techniques de traitement d'image spécialisées afin de mesurer la taille du substrat.

La qualité des résultats obtenus à l'aide de cette méthode dépend des conditions lumineuses ainsi que de la couleur et de la texture des sédiments, et elle est limitée par la taille des pixels et la nécessité de l'étalonnage sur le terrain.

Au cours des dernières décennies, les travaux dans ce domaine ont analysé la relation entre la mesure manuelle des grains à partir de photographies sur papier et les distributions granulométriques obtenues à partir de techniques d'échantillonnage traditionnelles. Adams (1979) a trouvé une surestimation de la taille moyenne des grains et des distributions de granulométriques estimées à partir de l'imagerie, tandis que Ibbeken *et al.* (1986) ont trouvé que 49,8 % des échantillons étaient sous-estimés par une approche manuelle de la *photosieving*.

Les développements récents dans le domaine du *photosieving* (Butler, 2001, Detert *et al.*, 2012) ont permis la mise au point de méthodes automatisées de délimitation des grains, mais les résultats indiquaient une sous-estimation systématique des percentiles de granulométrie.

Cependant, ces méthodes étaient encore limitées par la nécessité de données d'étalonnage étendues et spécifiques au site. Récemment, une nouvelle a été développée : il s'agit d'une méthode automatisée, basée sur la physique pour calculer la longueur des éléments de texture de lit à l'aide d'un sonar par échogrammes. Il utilise l'analyse spectrale basée sur la transformation ondelettes de courtes séquences d'échogrammes (modèles alternant des échos forts et faibles). Ce n'est pas une mesure directe de la taille du grain. Il s'agit plutôt d'une représentation statistique qui s'intègre sur de nombreux attributs de la texture du lit, dont la taille des grains est la plus importante (Buscombe, 2008, Buscombe, 2013, Buscombe *et al.*, 2010). Les résultats indiquent que la technique permet d'estimer les diamètres des grains sans étalonnage mais avec une erreur quadratique moyenne des estimations de 16 %, et des erreurs individuelles de -100 % à + 60 %.

Même si ces méthodes d'analyses d'image sont rapides et objectives, elles sont cependant mieux adaptées à l'échelle des parcelles et ne peuvent être appliquées sur de longs segments de cours d'eau.

2.2.2 Analyse de texture des images

La nécessité d'obtenir des informations sur la taille des grains en utilisant l'imagerie numérique a conduit de plus en plus les chercheurs à étudier une nouvelle approche : l'analyse des caractéristiques de texture de l'imagerie numérique Carbonneau *et al.* (2004); Carbonneau *et al.* (2005); Verdú *et al.* (2005); Dugdale *et al.* (2010); et Tamminga *et al.* (2015) ont utilisé avec succès l'analyse de la texture d'images aériennes à haute résolution pour la détermination de la taille des grains sur de grandes surfaces.

Une région d'une image peut être représentée par ses caractéristiques externes telles que les contours (longueur, orientation, nombre de concavités, etc.), ou par ses caractéristiques internes telles que les pixels appartenant à la région. Une représentation interne, à des fins de calcul, est nécessaire lorsque les principales caractéristiques de la région sont la couleur et la texture.

La texture est une propriété d'une région (par rapport à la distribution spatiale des niveaux de gris) locale d'une zone autour du pixel : en fait, la texture d'un point est indéfinie. Par exemple, Russ (1992) définit la texture de l'image comme un descripteur de la variation de luminosité locale de pixel en pixel dans une région d'une image. Une région d'une image a une texture constante si un ensemble de statistiques locales ou d'autres propriétés sont constantes ou varient lentement.

L'analyse de la texture a radicalement modifiée l'approche de la télédétection. Les principales approches pour la description de la texture sont l'approche statistique, structurelle et spectrale :

- Statistique : la texture est caractérisée par la description du niveau de lissage (*smoothness*), de la grossièreté (*coarseness*) ou de la régularité (*regularity*) d'une image ; il s'agit d'une mesure quantitative de l'organisation des pixels de l'image, estimée par le calcul de paramètres statistiques. C'est la méthode la plus utilisée pour la généralisation de ses résultats et la simplicité du calcul.
- Structurelle : elle est basé sur la reconnaissance des modèles dans la texture de l'image, identifiée, par exemple, par la récurrence de certaines structures

géométriques répétitives. Il s'agit de circonscrire les textures primitives (*texe/s*), qui, combinées, donnent lieu au modèle complexe qui constitue l'image.

- Spectrale : Les méthodes spectrales sont basées sur l'analyse spectrale de Fourier de l'image et sont utilisées pour détecter la périodicité présente dans l'image. La périodicité se produit dans le spectre comme des pics à haute teneur en énergie

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études et analyses ont porté sur l'examen de l'approche statistique comme la plus sensible dans l'évaluation de la taille du substrat. Les techniques statistiques sont basées sur la description de l'organisation spatiale des niveaux de gris de l'image. Sur la base de la distribution du niveau de gris, il est possible de calculer plusieurs types de caractéristiques statistiques simples.

Ainsi, les méthodes statistiques peuvent être classées de premier ordre, de deuxième ordre et d'ordre supérieur.

Fondamentalement, les statistiques de premier ordre estiment les propriétés des valeurs de pixels individuels telles que la moyenne et la variance, sans tenir compte de l'interaction spatiale entre les pixels d'une image; les statistiques d'ordre deux et supérieur, estiment plutôt les propriétés de deux ou plusieurs valeurs de pixel se produisant à des emplacements spécifiques l'une par rapport à l'autre. Les interactions spatiales entre niveaux de gris d'une image, leur orientation, leur périodicité ou leur complexité sont liées à des statistiques de deuxième ordre et plus.

Tel que mentionné précédemment, les techniques d'analyses des textures statistiques décrivent principalement la texture des régions dans une image à l'aide des statistiques d'ordre supérieur de niveaux de gris : valeur moyenne, moments, matrice de cooccurrence, matrice d'autocorrélation.

Les mesures de textures ont des inconvénients puisque les moments statistiques n'ont pas d'informations sur la position réciproque des pixels. Il est donc nécessaire de considérer non seulement la distribution de l'intensité, mais aussi les positions des pixels ayant un niveau de gris similaire. Par conséquent, il existe des descripteurs qui sont appliqués à la matrice de cooccurrence de niveaux de gris (MCNG).

Les descripteurs de Haralick (1973) appliqués à la matrice de cooccurrence sont :

- La *probabilité maximale* qui fournit une indication des paires de valeurs les plus fréquentes dans la région.
- *Moment du second ordre* : il s'agit d'une mesure du contraste ou de la variation locale de l'intensité.
- Le *moment de la différence inverse* est une autre mesure de l'homogénéité de la texture inversement au contraste.
- *Uniformité* cette mesure est maximale lorsque toutes les paires de niveaux de gris sont de probabilité égale.
- *Entropie* : L'entropie mesure le désordre d'une image et elle atteint sa plus grande valeur quand tous les éléments de la matrice qui correspond à l'image sont égaux. Par exemple, quand une image n'a pas une texture uniforme, l'entropie n'est pas très élevée et l'image est sombre ; en revanche, si l'image a une texture uniforme, c'est-à-dire qu'elle a tous les pixels avec la même valeur que la tonalité grise, l'entropie est maximale et l'image est blanche. Généralement dans les images est considéré comme un décalage entre les paires, horizontales et verticales: Δx et Δy . La déviation (*offset*) définit ce que l'on peut appeler l'opérateur de position, car elle décrit une position relative. Clairement les deux valeurs identifient une distance et une orientation.

Une fois l'indice de texture établi, il est possible d'établir une relation (une régression linéaire simple ou multiple) avec la distribution de la taille, par exemple, par la collecte des données d'étalonnage prises sur le terrain. Dans les différentes techniques traditionnelles d'échantillonnage et d'analyse de la distribution de la taille présente sur une section d'une rivière, le paramètre considéré comme le plus significatif est le diamètre médian D_{50} (en mm), c'est-à-dire le diamètre pour lequel 50 % de l'échantillon en poids est plus fin.

Cependant, il est utile d'analyser aussi le percentile D_{16} et D_{84} (en mm) et l'hétérogénéité de la taille indiquée par l'écart-type de SD (en mm). En fait, le D_{84} est supérieure à la valeur moyenne d'une valeur égale à la taille de l'écart-type (bien que, dans la pratique, elle soit arrondie à D_{84}); ainsi, le $D_{15,9}$ est plus petit que la valeur moyenne d'une quantité égale à l'écart-type et dans la pratique est arrondie à D_{16} . (ASCE, 2006).

Une option d'analyse supplémentaire, l'analyse de la variographie (voir de la structure), est l'un des concepts de base de l'approche géostatistique. Une application correcte de ces méthodes ainsi qu'une interprétation précise des résultats permettent de

comprendre la structure réelle de la variabilité du système et de réaliser toutes sortes d'analyses spatiales, visant à simuler sa performance.

L'analyse de la distribution granulométrique est sans aucun doute liée à la composante géographique/spatiale. Dans de nombreuses études, il existe une certaine tendance à utiliser des interpolations géostatistique pondérées basées sur l'autocorrélation, qui s'appliquent dans les cas où la distribution et la densité des points sont irrégulières.

Le poids donné aux valeurs dépend de leur position dans l'espace et du degré d'autocorrélation spatiale dans la distribution : pour cela nous utilisons un semi-variogramme. Le variogramme est un graphique qui montre le degré de dépendance spatiale des données en illustrant la variance des valeurs observées dans des groupes de paires de points à des distances fixes. Le graphique du semi-variogramme (Figure 6) montre trois paramètres fondamentaux : la *portée*, la distance maximale à l'intérieur de laquelle les pixels sont corrélés ; le *seuil*, la valeur maximale de la variance ; l'effet *pépite*, une partie non explicable de la variance, qui est attribuable aux erreurs de mesure, aux erreurs instrumentales et à la variabilité spatiale présente à des distances inférieures au taux d'échantillonnage minimal. Par cette analyse, la semi-variance pour une distance donnée entre les pixels ou la valeur du palier du semi-variogramme peuvent être utilisées comme indice (Tremblay, 2010).

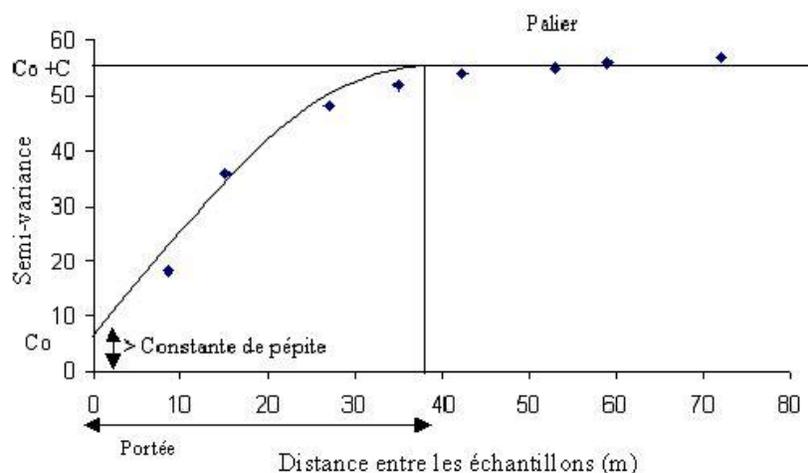


Figure 6 - Un exemple de Semi-variogramme théorique (cours Géostatistiques – INRS)

Dans le passé récent, certaines études ont cherché à extraire des informations pratiques sur la distribution de la taille des particules dans la région fluviale par l'analyse de la texture. Par exemple, Chandler (2004) a utilisé une combinaison de méthodes simples

de mesure de texture et de classification des images pour démontrer une détection adéquate des caractéristiques des sables de surface. Pour le développement de cette étude, ils ont utilisé des images RVB et ils ont trouvé une précision de leurs classifications de 49 %. (Black *et al.*, 2014, Chandler, 2004)

Carbonneau *et al.* (2004) ont effectué une étude sur un tronçon de 80 km de la rivière Sainte-Marguerite au Québec (Canada), utilisant les mesures de la texture de l'image (contraste) et de la semi-variance bidimensionnelle pour estimer la taille des grains (Figure 7).

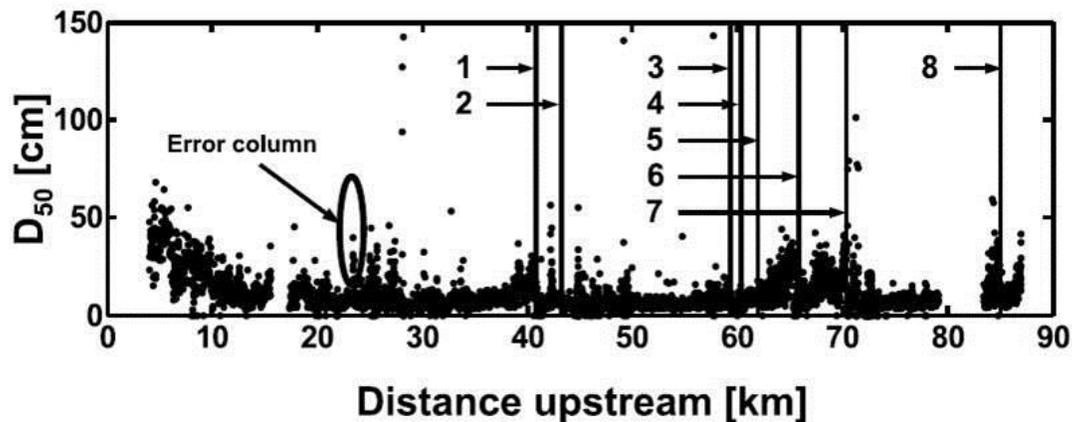


Figure 7 - Profil en long de la taille médiane des particules sur un tronçon de 80 km (de l'aval vers l'amont) de la branche Principale de la rivière Sainte-Marguerite, Saguenay, Canada. Les colonnes d'erreurs (1-8) ont été créées par la réflexion sur la surface de l'eau. (Carbonneau *et al.*, 2005)

Pour ce faire, ils ont utilisé des images aériennes avec des résolutions de 3 cm et 10 cm, tandis que les mesures de calibrations (de taille des grains sur le terrain) correspondantes ont été collectées manuellement, sur des surfaces où le substrat devait être relativement homogène. Sur les images au sol des bancs de graviers exondés, l'axe b a été obtenu à l'aide de la méthode de *photosieving*.

À partir de 20 images aériennes, l'axe b des images du terrain a été tracé sur les propriétés d'images calculées (semi-variance et texture) afin d'établir une relation avec la taille du substrat. Sur chaque image aérienne, la semi-variance et les mesures de textures ont été calculées à l'intérieur de fenêtres d'interrogations locales, avec une gamme de tailles de fenêtre de 5x5 à 50x50 pixels. Pour obtenir des résultats fiables, la fenêtre d'échantillonnage utilisée pour calculer les mesures de texture et de semi-variance devait être suffisamment grande (Carbonneau *et al.*, 2004, Woodget, 2015).

Une validation du modèle utilisant des données de terrain indépendantes ont démontré une relation forte entre la taille des grains observée et prédite (R^2 de 0,96 pour le D_{50}) (Black *et al.*, 2014, Carbonneau *et al.*, 2004). En particulier, l'information obtenue par l'analyse de la semi-variance (palier du semi-variogramme) à partir de l'imagerie 3 cm a été jugée plus sensible aux variations granulométriques que la texture.

En se fondant sur les résultats encourageants de ces travaux, Carbonneau *et al.* (2005) a testé son approche pour analyser les parties submergées peu profondes de la rivière Sainte Marguerite (Canada). Le cadre et la mise en place de cette étude étaient les mêmes que celles utilisées pour la partie sèche : imagerie, semi-variance et mesures de texture, fenêtre d'échantillonnage et données d'étalonnage.

Cependant, la qualité des résultats entre les données de granulométrie observée et prédite pour les zones submergées comparativement à celles provenant de zones sèches et exondées se dégrade, mais avec une nouvelle relation de calibration, la méthode confirme sa validité. Cette faiblesse dans la relation pourrait être causée par diverses sources. En particulier, les effets propres de l'eau (profondeur, éblouissements ou reflets du soleil sur la surface), les effets du substrat (taille, couleur et imbrication) ou la présence de matière organique.

Une autre étude qui se concentre sur un long tronçon de rivière a ensuite été développée par Verdú *et al.* (2005). En fait, cette étude décrit une analyse de la texture d'image utilisée afin d'estimer la taille des grains le long d'un tronçon de 12 km de la rivière Isabena, dans la région des Pyrénées en Espagne en utilisant deux ensembles d'images avec une résolution au sol de 6 cm et 3 mm. L'échantillonnage sur le terrain a été effectué à l'aide d'une méthode de transect Wolman (1954) sur les 68 bancs de gravier considérés.

Pour l'analyse de texture et pour estimer chaque valeur de la distribution granulométrique, ils ont considéré des variables de texture d'image (variance, homogénéité, contraste et entropie) utilisant une matrice de cooccurrence de niveau de gris (MCNG) et la semi-variance.

Les valeurs de corrélation les plus élevées ont été obtenues pour les valeurs médianes de granulométrie (D_{50}), avec une fenêtre d'interrogation de 33x33 pixels. Les valeurs de D_{50} et D_{84} ont été estimées et utilisées pour cartographier le lit de la rivière, même si avec des erreurs d'estimation de 26 % et 32 %, respectivement. La méthodologie peut

être utilisée pour la partie sèche et pour la partie submergée, mais seulement si la profondeur d'eau est très faible. Même si l'erreur obtenue n'est pas négligeable, l'approche présente un grand potentiel d'application, parce qu'établit une autre étape importante concernant la relation entre la résolution spatiale des images et la taille moyenne des grains des sédiments du lit d'une rivière.

Ces importants progrès (Carbonneau *et al.*, 2005, Carbonneau *et al.*, 2004, Verdú *et al.*, 2005) représentent un passage crucial dans l'utilisation des techniques de télédétection pour la cartographie automatisée de la taille des grains sur des longs tronçons de rivière. Il est utile de rappeler, toutefois, que de nombreux paramètres peuvent influencer le résultat à travers les différentes étapes d'analyses de textures des images: la méthode d'acquisition des images, l'échantillonnage sur le terrain ou le choix de l'indice de texture utilisé pour accomplir l'analyse.

Dans le but de surmonter ces limitations, une nouvelle méthode appelée « *photosieving* aérien » a ensuite été présentée par Dugdale *et al.* (2010). Pour développer cette étude, un ensemble d'images aériennes avec une résolution de 3 cm a été recueilli sur un tronçon d'essai de 1 km sur la rivière Marshaw Wyre dans le Lancashire, en Angleterre. La nouveauté de cette approche est l'utilisation de l'imagerie aérienne et la façon dont ils sont utilisés dans le processus d'analyse. En fait, les images sont utilisées pour mesurer manuellement la taille des grains médians pour certains sites échantillonnés de gravier exposé ; ces mesures sont ensuite utilisées pour l'étalonnage des informations de texture d'image. Ainsi, les données de taille de grain collectées sur le terrain, une partie très laborieuse et coûteuse du processus, ne sont utilisées qu'à des fins de comparaison. Même si certaines des limitations causées par la résolution des d'images, l'imbrication des grains et leurs tailles ont causé un biais dans les résultats (surestimation des dimensions médianes de granulométrie), cette approche de travail et de *photosieving* aérien donne une autre importante option afin d'analyser la texture des images pour de longs tronçons des rivières.

2.2.3 Nouvelles méthodes

Une approche alternative est basée sur l'utilisation du scanner laser terrestre (TLS). Plusieurs études récentes démontrent que des nuages de points tridimensionnels dérivés du TLS peuvent être utilisés pour déduire la taille des grains (Entwistle *et al.*,

2009, Hodge *et al.*, 2009a, Hodge *et al.*, 2009b, Hohenthal *et al.*, 2011, David J. Milan *et al.*, 2012, Smart *et al.*, 2004). Sur cette base, Heritage *et al.* (2009) et Brasington *et al.* (2012) ont utilisé la rugosité des grains obtenue à partir de nuages de points TLS pour récupérer les données de taille des grains dans les rivières à lit de gravier. Toutefois, les études utilisant le TLS sont onéreuses pour les applications à grande échelle. (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2017)

Au cours des dernières années, les chercheurs ont commencé à considérer une approche nouvelle et alternative pour la télédétection des rivières. De plus en plus, ils considèrent la collecte des images en utilisant des équipements non traditionnels tels que des ballons ou des drones (Tamminga *et al.*, 2015, Watts *et al.*, 2012).

L'augmentation de l'utilisation des images prises par un drone, par exemple, dans les études d'écohydraulique est corrélée avec les limitations qui sont souvent associées aux méthodes de cartographie conventionnelles. Ainsi, l'utilisation de l'imagerie à haute résolution de ces véhicules aériens dans des projets de recherche et de gestion de l'habitat fluvial peut offrir une précision de l'ordre du centimètre. Ils viennent dotés d'une variété de types de capteurs tels que RGB, multispectrale, GPS qui peuvent fournir des données de haute précision.

En fait, on considère généralement un véhicule sans pilote (avec un système d'ailes fixes ou tournantes) comme une plate-forme drones (poids < 7 kg) montée avec une série de capteurs, combinée avec une station de contrôle au sol d'où le véhicule est ainsi conduit (Petrie, 2013, Watts *et al.*, 2012). Parmi les avantages de ces drones, nous trouvons leur capacité à voler à basse altitude pour une collecte des images à très haute résolution (résolution d'image typique inférieure à 10 cm et parfois moins de 1 cm) et le faible coût par vol (Hervouet *et al.*, 2011, Laliberte *et al.*, 2011, Niethammer *et al.*, 2012, Turner *et al.*, 2012)

Toutefois, la petite taille et le poids des drones signifient qu'ils sont fortement affectés par les conditions météorologiques défavorables qui compromettent la collecte des images de haute qualité en augmentant l'instabilité de plate-forme ; le vol à portée de vue est également signalé comme un facteur limitant. De plus, les restrictions réglementaires à l'utilisation de ces véhicules dans certains pays et sous certaines conditions constituent un obstacle majeur à la progression de la télédétection environnementale (Woodget, 2015).

L'introduction de véhicules comme les drones (Figure 8), développés premièrement pour des projets militaires et commerciaux, a donné une contribution très importante dans les progrès de l'analyse d'image et dans la production des images entièrement orthorectifiées et pour les modèles numériques d'élévation (MNE). En particulier, la technique de la « *Structure from Motion* » (SfM) fournit essentiellement une méthode automatisée de couplage d'images pour générer la géométrie relative 3D d'une scène à partir d'une série d'images 2D qui se chevauchent, qui peuvent ensuite être géoréférencées pour cartographier les coordonnées.



Figure 8 - Images enregistrées à l'aide d'un drone de la section *Trinité* sur la rivière Sainte Marguerite (branche Nord-est) (Images fournies par Le Laboratoire de télédétection environnementale par drone – TED, INRS)

Lowe (2004) a mis au point une méthode appelée « *Scale - Invariant Feature Transform* », capable de reconnaître des points conjugués dans des images chevauchantes (en utilisant des modèles de luminosité d'image et de gradients de couleur), indépendamment des changements d'échelle d'image, d'angle de vue ou

d'orientation, de points de contrôle au sol ou de résolution d'image constante (Fonstad *et al.*, 2013, Turner *et al.*, 2012).

La SfM construit d'abord un nuage de points, avec la couleur d'origine, formant une sorte de modèle spatial de l'image « solide » des objets contenus dans les images (Harwin *et al.*, 2012, Neitzel *et al.*, 2011). Dans l'étape suivante, la SfM parvient à « épaisir » le nuage de points initial et parvient également à « couvrir » les points avec un réseau triangulaire pour former une surface solide. Sur cette surface avec des triangles, appelé TIN, ou « *Triangulated Irregular Network* », la SfM réussit ainsi à superposer une texture photographique, extraite des photos de départ, créant ainsi un vrai modèle tridimensionnel d'objets.

Le nombre minimal de photos que la SfM peut automatiquement analyser est de 3. Il faut considérer la SfM comme une sorte d'extension du modèle stéréoscopique, mais contrairement à elle, il n'est pas nécessaire de connaître la position réciproque des points de vue ni des restrictions spéciales nécessaires, comme dans la stéréophotographie (Harwin *et al.*, 2012, Turner *et al.*, 2012, Verhoeven, 2012, Westoby *et al.*, 2012). À la suite de l'ensemble du processus, le nuage de points est généré dans un système de coordonnées « image-espace » arbitraire, et doit être géoréférencé à un système de coordonnées absolues pour être utile pour des études géomorphologiques quantitatives telles qu'un modèle numérique d'élévation ou une orthophoto (Fonstad *et al.*, 2013, Westoby *et al.*, 2012, Woodget, 2015).

En ce qui concerne les études de quantification de la granulométrie, très peu d'études publiées ont appliqué les drones et la SfM (Carbonneau *et al.*, 2017, Woodget *et al.*, 2017b). Par exemple, Tamminga *et al.* (2015) ont acquis à partir d'un drone sur un tronçon de 1 km de l'Elbow River au Canada, de l'imagerie avec une résolution de 5 cm, ensuite traitée pour créer une orthophotographie du tronçon. Les données d'étalonnage de la taille des grains ont été acquises à l'aide de la méthode de *photosieving*, l'axe b mesuré par un code d'analyse d'image sur Matlab. La relation qui résulte entre la texture de l'image et la taille du grain donne une forte corrélation empirique ($R^2 = 0,82$), qui est ensuite utilisée pour estimer la taille des grains sur toute la zone d'intérêt. (Woodget *et al.*, 2016)

Plus récemment, Woodget *et al.* (2017a) ont obtenu de bons résultats ($R^2 = 0,7712$), pour la distribution granulométrique en utilisant des données topographiques de la rugosité des nuages de points dans une étude fluviale en Angleterre.

3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les principales étapes méthodologiques qui ont conduit à l'estimation de la distribution granulométrique de la rivière Sainte-Marguerite par analyse d'images aériennes haute résolution.

Le site de l'étude et le système aéroporté utilisé pour la collecte des images aériennes et leur sélection pour l'analyse sont ensuite présentés, le protocole utilisé pour collecter les données de calibration sur le terrain est décrit.

Enfin, est présenté l'analyse de correspondance entre l'index de texture choisi et la distribution de taille : c'est-à-dire l'entropie et le logiciel pour la reconnaissance semi-automatique des objets qui a été utilisé BASEGRAIN (Detert *et al.*, 2012, Detert *et al.*, 2013).

3.1 Site d'étude : rivière Sainte-Marguerite Nord-est

Le bassin versant de la rivière Sainte-Marguerite draine un territoire de 2115 km² entre les régions naturelles du fjord du Saguenay, au sud, et celle des monts Valin, au nord, dans la province canadienne du Québec.

La rivière Sainte-Marguerite est divisée en deux sous-bassins versant de superficies approximativement égales, celui de la branche Nord-est (Figure 9), sur laquelle porte cette étude, et celui de la branche Principale.

La rivière Sainte-Marguerite Nord-Est qui a une longueur d'environ 105 km prend sa source (ainsi que la Sainte Marguerite Principale) dans une région lacustre dans les Monts Valin (lac de la Hauteur, lac Roche, lac Canard, lac de la Squaw et le lac des Trois-Passes). Ensuite, elle coule vers l'Est dans une vallée, d'abord entre la limite sud du Parc national des Monts-Valin et la Zec (zone d'exploitation contrôlée) Chauvin ; puis vers le Sud-est dans la vallée entre la Zec Nordique et la Zec Chauvin. Puis, la rivière s'oriente vers le sud et passe à l'ouest de la montagne des Bœufs (381 m), située à 10,5 km au nord du village de Sacré-Cœur.

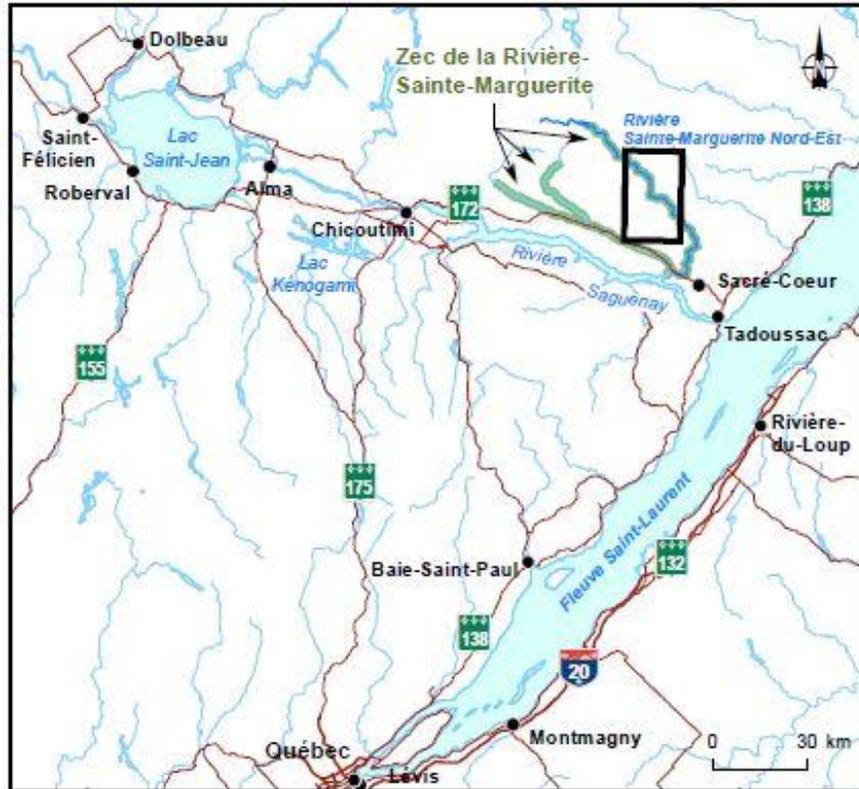


Figure 9 – Carte de la branche Nord-est de la rivière Sainte-Marguerite, Saguenay, Québec.

Finalement, la rivière bifurque vers l'ouest pour un dernier segment de 7 km jusqu'à son embouchure. La rivière Sainte-Marguerite principale reçoit les eaux de la Nord-est 2,4 km avant de se jeter dans la baie Sainte-Marguerite, dans le fjord du Saguenay (Figure 10).

La Nord-est qui draine une superficie de 1100 km², compte plusieurs tributaires et chutes importantes comme la chute Blanche, du Seize et du Dix-huit.

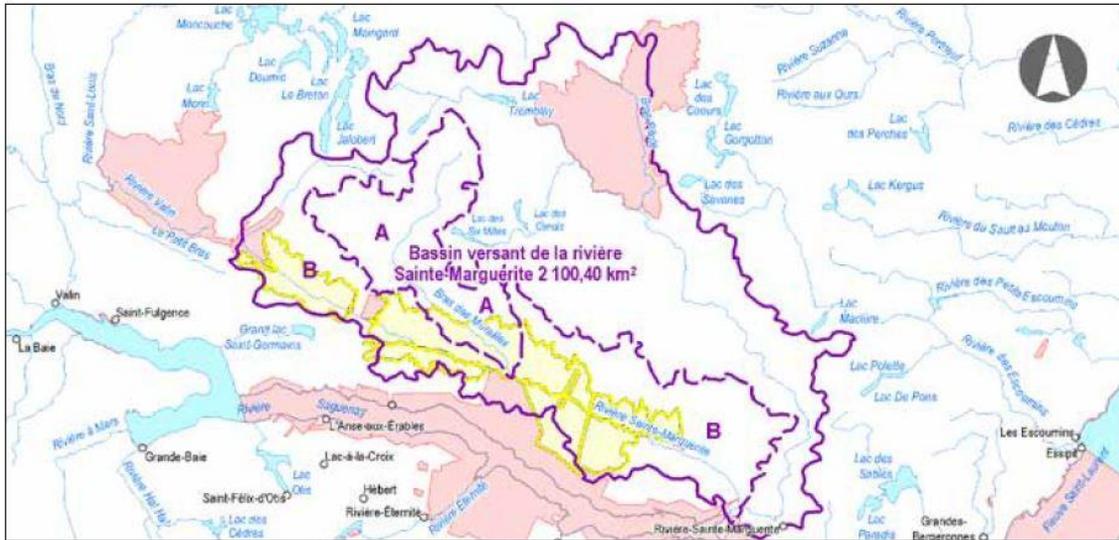


Figure 10 — Bassin versant de la rivière Sainte Marguerite Saguenay, Québec.

(<http://www.bape.gouv.qc.ca>)

Le débit moyen annuel (mesuré par une station de jaugeage à 1,7 km avant de se jeter dans la principale) est de 30,6 m³/s (Centre d'expertise hydrique du Québec - CEHQ) (Figure 11).

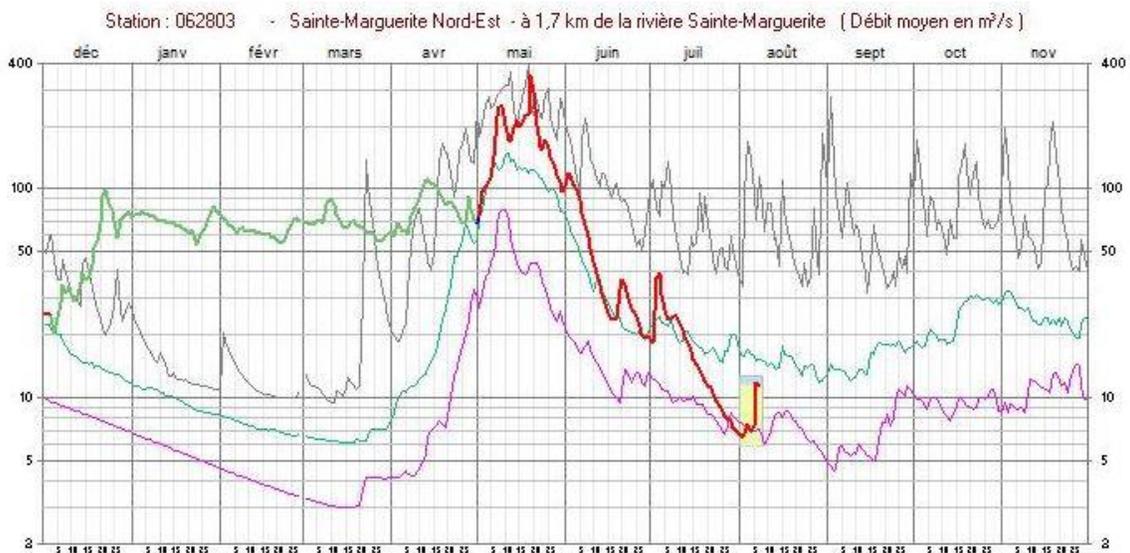


Figure 11 – Hydrogramme annuel de la rivière Sainte Marguerite Nord-est (CEHQ)

Cette région géologique du Bouclier canadien se compose de gneiss granitique et de roches migmatites du Précambrien. Dans son parcours, les versants escarpés sont très fréquents et d'importants dépôts fluvioglaciaires, sources des sédiments grossiers, occupent le fond de la vallée (Davey *et al.*, 2007).

La végétation est largement dominée par les bouleaux et on retrouve également des érablières, des sapinières et épinettes (Figure 12).

Parmi les activités de pleins airs pratiqués dans la région et en particulier sur cette rivière, la pêche au saumon et à l'omble de fontaine anadrome, ainsi que l'exploitation forestière sont réputées depuis plusieurs générations.



Figure 12 — Trois images de la rivière Sainte Marguerite Nord-est

3.2 Acquisition des images aéroportées

Pour l'acquisition des images à haute résolution, le choix est tombé sur l'utilisation d'un hélicoptère Robinson R44 (Figure 13).



Figure 13 - L'hélicoptère Robinson44 utilisé pour le survol de la rivière Sainte Marguerite Nord-est (Cirsa – 25 août 2014)

Ce choix a été fait après avoir analysé les avantages possibles de l'utilisation d'un hélicoptère par rapport à un avion. En particulier, une plateforme héliportée est capable d'une longue couverture spatiale, compte tenu de la nature sinueuse des rivières ; le coût des images prises par des avions est plus raisonnable qu'avec un hélicoptère, mais en raison de leur trajectoire de vol rectiligne, ils prennent plus de temps qu'un hélicoptère pour couvrir un même tronçon de rivière.

Lors d'un programme de survol pour une acquisition d'images en hélicoptère, il y a des conditions dont il faut tenir compte au niveau de la météo et des horaires. Par exemple, la luminosité doit être bonne, mais sans une couverture nuageuse importante pour éviter l'effet *miroir* dans l'eau de la rivière, et cela suggère le choix d'une journée ensoleillée.

En plus, pour maximiser l'analyse de la surface de granulométrie exondée, il faut considérer un niveau de débit plutôt bas, proche du débit minimal de la rivière. À la date du survol (25 août 2014) le débit de la rivière était de 10,6 mc/s (mesuré à la jauge —

CEHQ) étant le débit moyen annuel de 30,6 mc/s (données 1998-2013 — CEHQ), et la moyenne mensuel (mois d'août — données 1998-2013 — CEHQ) de 20,1 mc/s.

Finalement, dans le cas du survol de la rivière Sainte Marguerite Nord-est, en raison d'autres projets de recherche en cours, l'imagerie optique a été acquise en combinaison avec l'acquisition d'imagerie thermique; cela vise la période de réchauffement maximale de l'eau. Cette condition, ainsi que les autres déjà mentionnées, a fait en sorte que le survol a débuté à 12 h 30 du 25 août 2014, à partir de la station de recherche du Cirsa (Centre Interuniversitaire de recherche sur le Saumon Atlantique) située près de la confluence entre la Sainte Marguerite Principale et la branche Nord-est.

Le survol a permis l'acquisition de 2666 images en total sur une longueur de 65 km de rivière (Figure 14).



Figure 14 - Le parcours du survol de la rivière Sainte Marguerite Nord-est du 25 août 2014.

Pour le vol on a utilisé un hélicoptère Robinson R44 doté d'un helipod pour l'installation des caméras fixé sur le pied de l'hélicoptère. Ce pod de bagages Simplex Helipod II est équipé d'un trou de 35 x 35 cm à sa base afin de dégager le champ de vision des caméras (Figure 15).



Figure 15 - Une image du pod utilisé pour l'installation du système d'imagerie

Deux caméras, un appareil photo numérique type Canon EOS 550D et une caméra thermique FLIRS C660, ont été montées sur un système *pan-tilt* (une tête robotisée elle-même installée à l'intérieur de l'hélipod) à travers lequel un opérateur dans la cabine de l'hélicoptère pouvait contrôler la direction des caméras par l'utilisation d'un joystick et d'un petit écran (connectés à un ordinateur) permettant d'ajuster le mouvement des caméras, surtout dans les passages sur les méandres.

Toutefois, afin d'éviter les problèmes causés par la réflexion avec des angles d'observation élevés, le mouvement du système *pan-tilt* est limité à moins de 5°.

La camera Canon EOS 550D enregistre les images dans les trois bandes du visible RGB (rouge, vert et bleu) avec une résolution d'image de 5184x3456 pixels (17 MP) et une longueur focale de 50 mm (Figure 16).



Figure 16 - Une image frontale du pod : les caméras et la tête robotisée

Les coordonnées spatiales ont été enregistrées avec une antenne GPS (Garmin GPS76C Sx, avec une précision de 3-5 m) fixée sur le dessus du pod (Tableau 1).

D'autres paramètres comme la vitesse et de l'altitude au sol de l'hélicoptère ont ainsi été enregistrés à travers une fonction Matlab et le logiciel ArcGis, pour une correcte acquisition des images.

L'altitude et la vitesse de vol ont été choisies sur la base des normes de vol et des conditions à respecter pour les images : la couverture complète de la largeur de la rivière et le chevauchement pour des images successives (georeferencement), afin de recouvrir l'ensemble de la rivière et obtenir aussi des points de repérage lors du traitement des images.

Pour respecter ces conditions, l'altitude a été de 300m (ce qui donne une taille d'image au sol de 140x100m et une résolution au sol des pixels qui varie entre 24-33 mm) avec une vitesse au sol moyenne de 70 km h⁻¹ (chevauchement moyen de 60 %). Avec cette vitesse il a été possible d'enregistrer environ 17 images par minute (Figure 17).

Tableau 1 - Résumé du système d'acquisition d'images

Composants du système	Equipment	Caractéristiques
Caméra optique	Canon EOS 550D	5184x3456 px (17,9 MP)
Caméra thermique	FLIR SC660	640x480 px (± 1 °C)
Tête système pan-tilt	Directed Perception PTU-D48	Arc angulaire maximum de 5°
Système GPS	Garmin GPS76 CSx	Précision ± 2 m



Figure 17 - L'R44 en vol lors du survol (Station Cirsa)

3.3 Sites des points de calibration sur le terrain

Parallèlement à la mise en œuvre des procédures logistiques de préparation au survol, on s'est déplacé vers le choix des sites, le long de la rivière Sainte Marguerite Nord-est, pour la collecte et l'étude des données de calibration. En fait, l'obtention de ces données devient une étape cruciale dans l'utilisation d'un modèle pour l'estimation de la taille des particules à travers l'utilisation d'un indice de texture.

Sur la base d'inspections et d'évaluations visuelles sur un long tronçon de la rivière, il a été possible de choisir, en particulier, quatre sites : *Trinité*, *Hill Station*, *Crag Pool* et *Savane* (Figure 18).



Figure 18 - La localisation des quatre sites de la rivière utilisés pour les images de calibration

Le choix est retombé sur ces sites, des bars fluviaux (bars) présents le long des 50 derniers kilomètres, en évaluant pour ceux-ci : l'accessibilité (des moyens pour le transport de l'équipement), la sécurité dans les opérations de collecte de données (pour les opérateurs) et l'amplitude de la surface de la taille des particules exondées.

Avant le passage en hélicoptère, des points de contrôle ont été positionnés sur le terrain afin d'assurer une meilleure précision dans la procédure subséquente de géoréférencement des images aériennes concernant les sites de calibration.

Des carrés en matière plastique (50 x 50 cm) de couleur rouge ont été fixés au sol afin de ne pas se laisser entraîner par le courant (Figure 19).



Figure 19 - Localisation des points de contrôle positionnés sur le terrain

Comme il a déjà été précédemment indiqué, le survol pour la collecte d'images aériennes a ainsi été prévu sur la base du débit minimal enregistré dans la rivière ; de la même manière, le niveau d'eau bas a permis de maximiser la surface de la taille des particules exondées (sèche, non submergée) pour la collecte des données sur le terrain.

Dans la Tableau 2 sont montrées des caractéristiques pour les sites choisis pour la collecte de données étaient donc (à partir de la confluence avec la Sainte Marguerite Principale) :

Tableau 2 - Caractéristiques des quatre sites de la rivière utilisés pour les images de calibration

Site	Surface disponible exondé (pour les données de calibration)	Distance de la confluence (avec la Principale)
Trinité	7950 m ²	4.5 km
Hill station	6100 m ²	27.5 km
Crag Pool	4900 m ²	37.5 km
Savane	7650 m ²	42.5 km

3.4 Acquisition des photos des points de calibration

Lors des opérations de collecte de données sur le terrain, 240 photos ont été prises (60 photos/site, dont 30 photos pour le substrat exposé et 30 pour le substrat submergé). Un protocole pour l'acquisition de ces images a été exécuté en plusieurs étapes :

- Réalisation d'une structure de forme rectangulaire en matière plastique blanche (PVC). La réalisation de cet outil permet de reconstruire, à l'aide de 4 tiges, un espace (*cadre*) de 60x40cm (surface de 0,24 m²). Le cadre permet une prise de photo orthogonale et de conserver l'échelle des images constante (Figure 20).

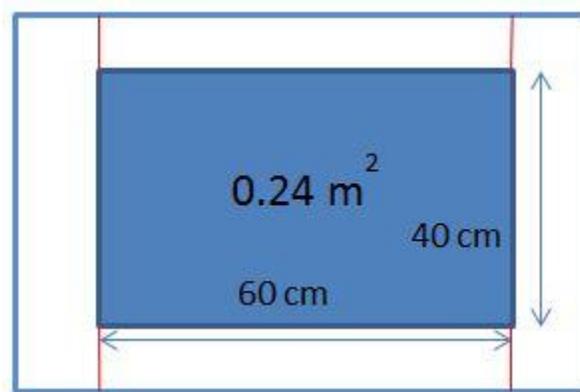


Figure 20 - Un schéma de la structure rectangulaire utilisé pour la prise des images de calibration

- Choix du site spécifique : une fois sur le terrain, et à chacune des stations de calibration, on a essayé de couvrir toute la gamme de la taille des particules disponibles. Pour chaque image, une surface a été sélectionnée qui incluait une distribution locale représentative de la taille des particules environnantes. Cette exigence est liée à l'analyse subséquente de la texture de l'image et la possibilité d'agrandir la fenêtre d'interrogation.
- Pose de la structure rectangulaire : la zone d'enregistrement de l'image a ensuite été délimitée par la pose sur le sol du cadre en PVC. Pour éviter les biais dans l'analyse des images, tout matériau de nature organique (plantes, branches, exosquelettes de mollusques fluviaux) qui pourrait engendrer des valeurs erronées a été supprimé (Figures 21 et 22).



Figure 21 - Pose de la structure rectangulaire lors de la prise d'une image de la composante submergée



Figure 22 - Pose de la structure rectangulaire lors de la prise d'une image de la composante sèche

- Photo : la prise des images a été réalisée en gardant toujours la même distance mesurée avec une règle entre la camera et le sol et en évitant la présence d'ombre générée par les opérateurs.
- Estimation visuelle de D_{16} , D_{50} et D_{84} : une fois l'image enregistrée, deux opérateurs ont procédé à une estimation visuelle du D_{16} , D_{50} et D_{84} . Les deux

opérateurs ont défini séparément, pour chaque site, leurs estimations de percentiles (Figure 23).



Figure 23 - Estimation visuelle des percentiles sur la composante sèche

Une dernière étape du protocole consistait à mesurer les espaces (interstices) dans chaque zone sélectionnée. Les particules et, en particulier les sédiments grossiers, en raison de leur positionnement aléatoire forment des espaces ; ces espaces peuvent servir, par exemple, pour les saumons juvéniles comme abris possibles pour se cacher de la vue des prédateurs. En particulier, une cavité en forme de Y peut être comptée comme trois refuges différents (Finstad *et al.*, 2007).

Pour chaque surface sélectionnée, la présence des abris potentiels (refuges) pour les saumons juvéniles a été évaluée. Ces espaces (d'au moins 3 cm de profondeur) ont été mesurés avec des petits tubes flexibles en PVC avec des diamètres de 6, 9, 12, 17 et 21 mm. Ces dimensions simulent la taille du corps du poisson pour différentes étapes de son cycle de vie juvénile (Figure 24).



Figure 24 - Compte et évaluation des interstices avec la méthode de Finstad (2007)

Les coordonnées spatiales du centre de toutes les parcelles mesurées ont été enregistrées à l'aide d'une station totale RTK (Trimble Dual 5800 – GNSS Station) dont la précision est de l'ordre du millimètre (Trimble, 2003) (Figure 25).



Figure 25 - Système d'acquisition des coordonnées spatiales avec une station RTK (Trimble Dual 5800)

3.5 Analyse d'image aéroportée

2666 images ont été enregistrées lors d'un survol de la rivière. Cependant, une partie d'entre elles (300 images) a été jugé inaptes pour l'analyse lors du post-traitement.

Le triage a été nécessaire en raison de deux facteurs principaux. En effet, en raison de la morphologie (méandres étroits ou largeur du canal), pour certaines sections de la rivière il était nécessaire de faire un ou des passages supplémentaires. Les images, prises automatiquement par le système d'acquisition dans le temps mort qui a été utilisé pour le retour sur la même section de rivière, ont ainsi été écartées de l'analyse (figure 26).

Un autre ensemble d'images a été écarté, en raison d'un problème technique (panne au système électrique) qui s'est produit dans l'hélicoptère après quelques minutes du début des opérations.

Pour les tronçons fluviaux affectés par les « boucles » du survol, on a considéré comme impropres pour le traitement subséquent, les images affectées par les reflets du soleil, celles avec les plus grandes surfaces à l'ombre et celles prises alors qu'il y avait trop de turbulence.



Figure 26 - Exemple de retour de l'hélicoptère (*boucle*) sur une section lors du survol

Pour chacun des quatre sites, 44 images au total ont été choisies, couvrant complètement les tronçons à l'étude : Trinité (9 images), Hill Station (10 images), Crag Pool (7 images) et Savane (18 images).

les images ont été géoréférencées dans ArcGIS afin de reconstruire une mosaïque (Figure 27) pour chacun des tronçons étudiés (Figures 28-31). Ensuite, on a effectué le positionnement de tous les points de calibration pris dans les zones exondées et submergées (station RTK).

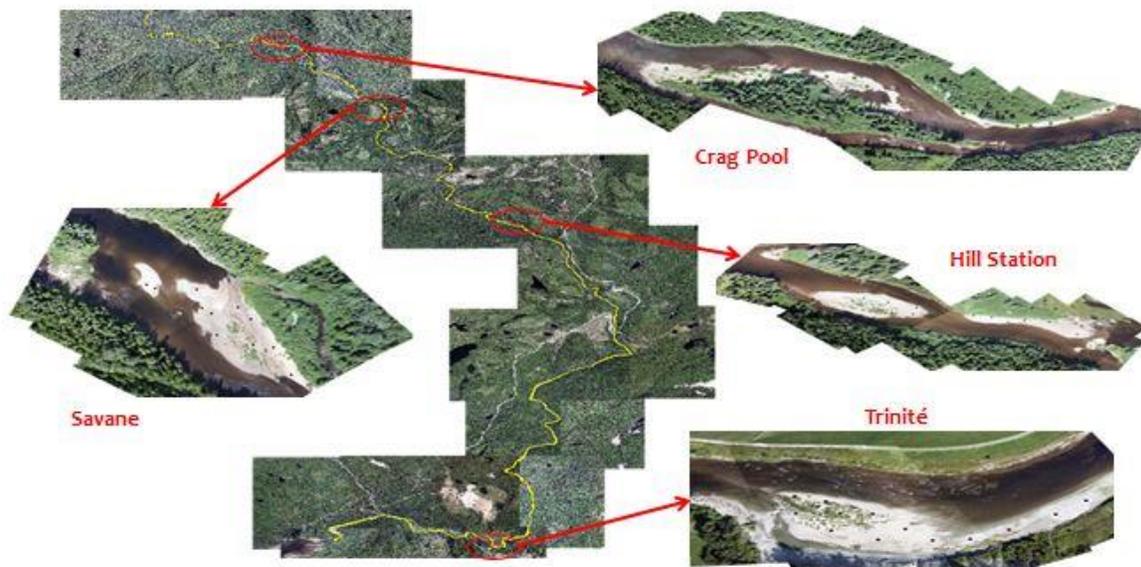


Figure 27 - Localisation des quatre sites de calibration et mosaïques des images aériennes correspondantes

À partir de la distribution des points enregistrés et photographiés, on a essayé de couvrir les surfaces des sites de calibration, dans toute leur extension et en essayant d'affecter toute la gamme de la distribution des particules présentes.

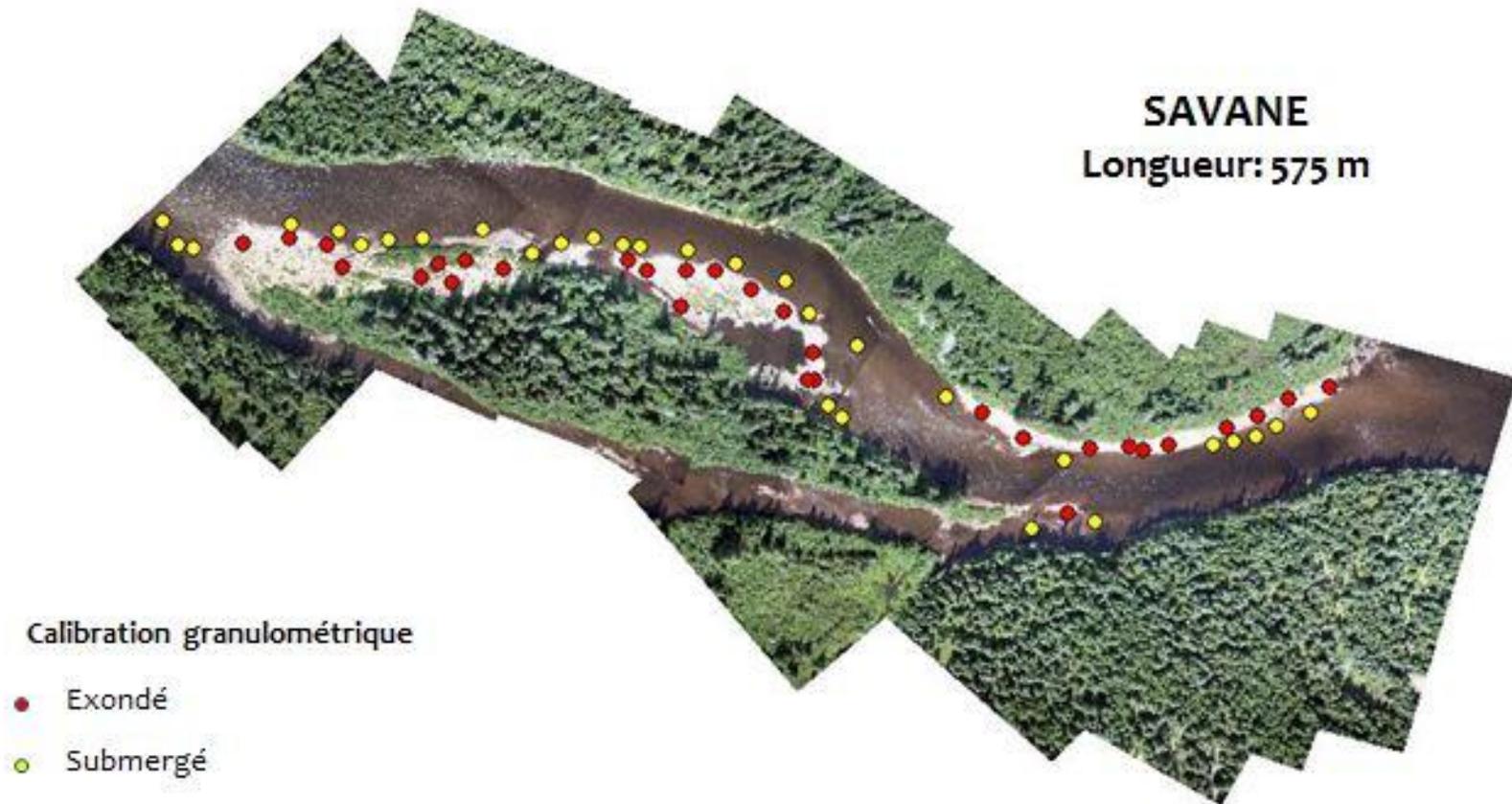


Figure 28 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Savane, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain

CRAG POOL
Longueur: 200 m

- Calibration granulométrique
- Exondé
 - Submergé

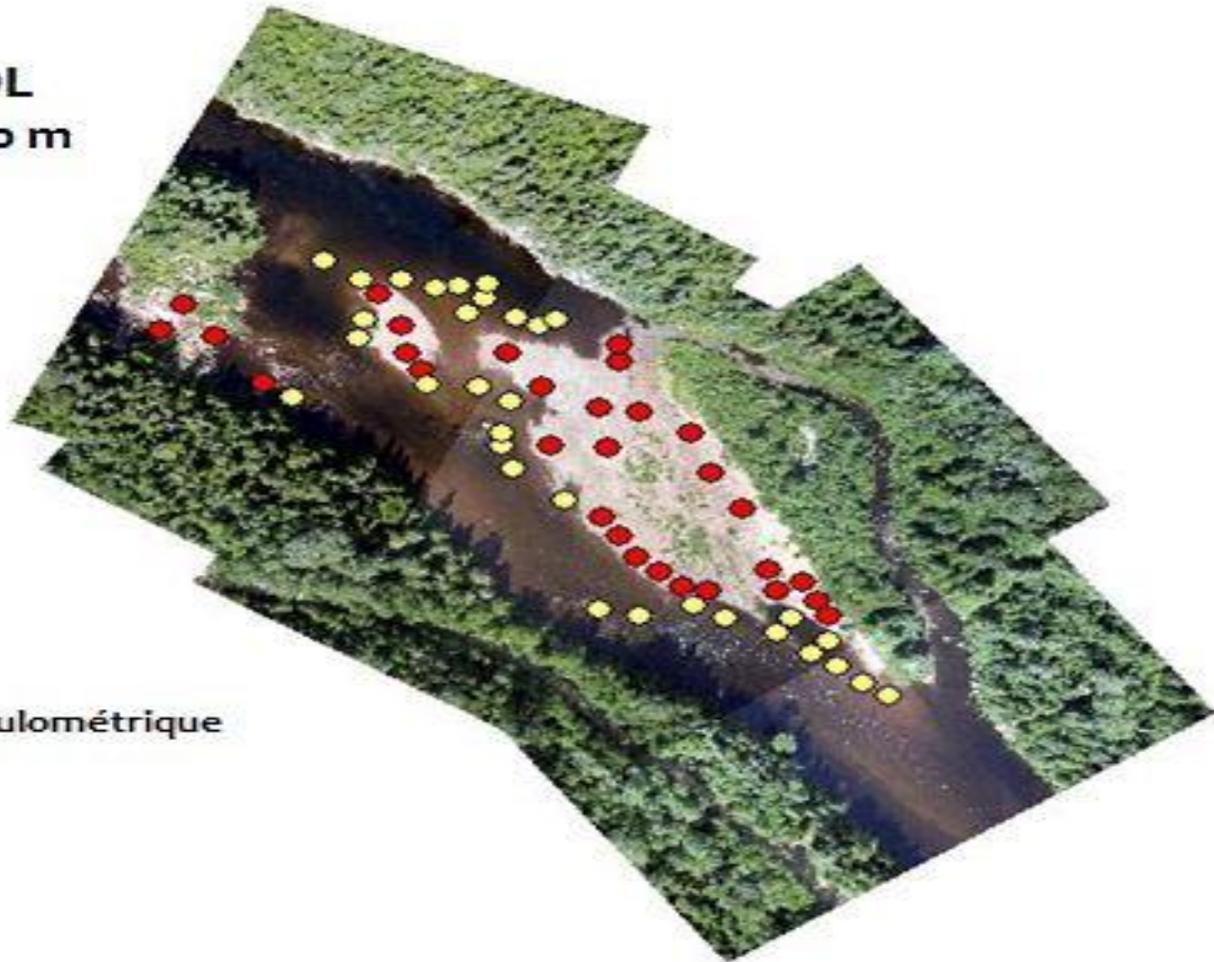


Figure 29 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Crag Pool, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain

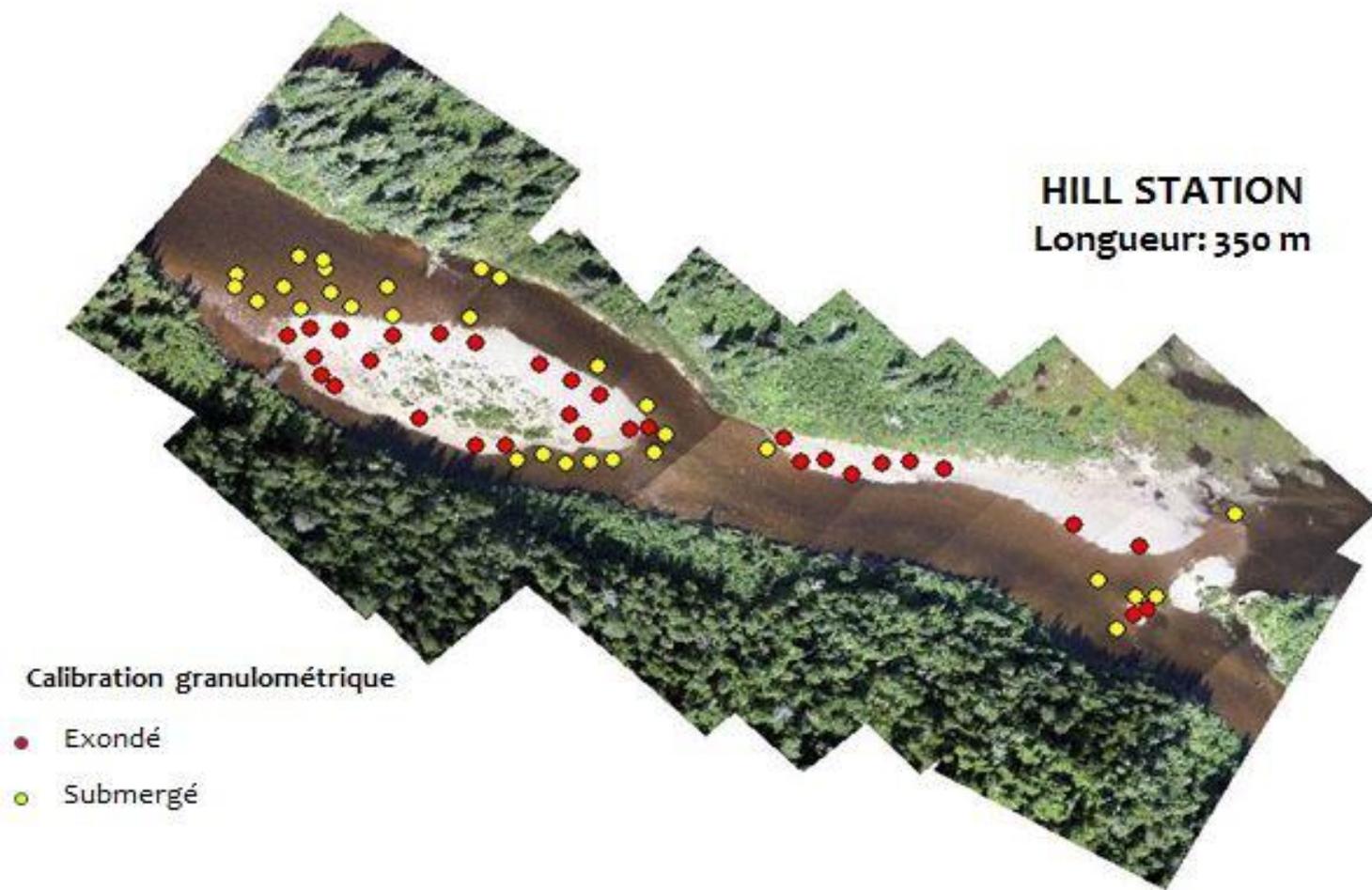


Figure 30 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Hill Station, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain

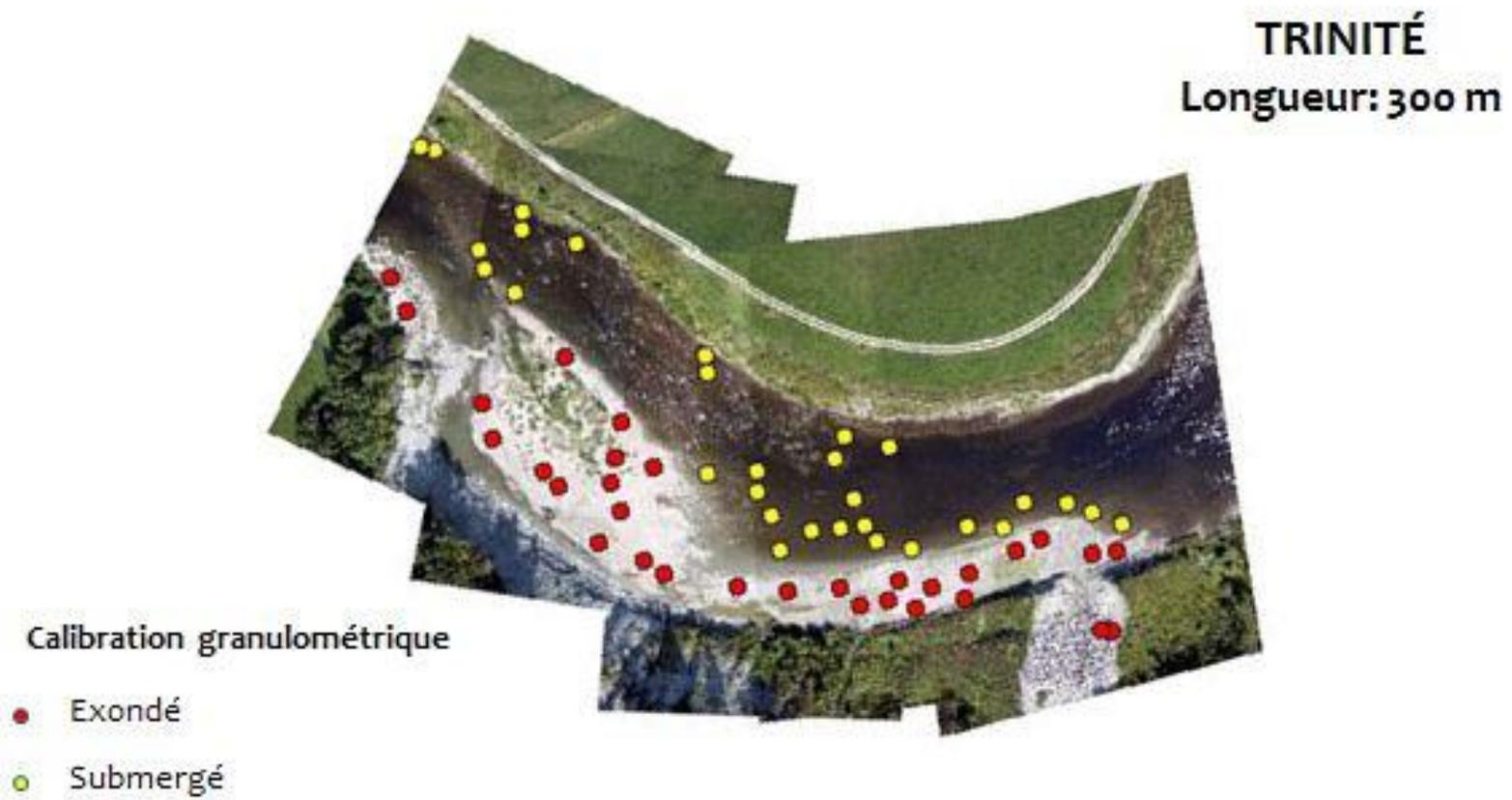


Figure 31 - Mosaïque des images aériennes correspondantes au site Trinité, avec la localisation des points échantillonnés sur le terrain

3.6 Entropie

Afin de trouver un lien, entre l'image de la texture et la taille des particules, l'entropie a été utilisée comme indice de variabilité de la texture (Haralick, 1973).

L'entropie est un indice statistique de deuxième ordre utilisé comme indicateur du désordre. Dans la théorie de l'information, le concept d'entropie est lié au caractère aléatoire d'un événement ou d'un signal. Donc, si un signal a une entropie élevée (caractère aléatoire élevé) le contenu en d'information est élevé et vice versa (Mikkelsen *et al.*, 2007). En ce sens, l'entropie est l'inverse de l'énergie et caractérise l'aspect irrégulier de l'image.

L'entropie de Shannon *et al.* (1949) (1) est quantifiée à partir de la Matrice de Co-occurrence des niveaux de gris (MCNG). Afin de construire cette matrice, on peut convertir l'image RGB en tons de gris. En effet, les indices de texture se calculent sur des images monochromes et pour ça il faut donc retenir seulement de la luminosité et ainsi éliminer la teinte et la saturation.

$$H = -\sum_k p_k \log_2(p_k) \quad (1)$$

où K est le nombre de niveaux de gris et p_k est la probabilité associée au niveau de gris k.

Souvent, dans les études basées sur la représentation statistique des niveaux de gris des images monochromes, les descripteurs (de la matrice de cooccurrence par niveaux de gris) comme l'entropie sont comparés aux approches de caractérisation de la texture par variogramme (Maillard, 2003). Le choix d'approches varie surtout en fonction du contexte et de la résolution spatiale des données.

Par exemple, l'entropie donne des bonnes performances en raison de la capacité d'adaptation de la méthode à la taille du motif de texture en ajustant les dimensions de la fenêtre d'analyse (Maillard, 2003, Pasher *et al.*, 2011). En plus, les descripteurs comme l'entropie donnent des meilleures valeurs lorsque les textures sont visuellement différenciables, tandis que les variogrammes qui mesurent la redondance de variation d'amplitude pour une distance donnée, sont souvent plus efficaces pour analyser des textures très similaires (Maillard, 2003).

La représentation de l'image en niveaux de gris, en plus d'être nécessaire pour le processus d'analyse d'image, apporte plusieurs avantages. La couleur augmente la

complexité du modèle et ainsi les formes potentielles de « bruit » dans le traitement d'image. Un autre avantage dans l'utilisation d'images monochromes est la vitesse de calcul, particulièrement dans les processus de traitement d'image en série. La fonction *rgb2gray* de Matlab convertit une image RGB (trois-bandes) en ton de gris : pour l'analyse des images aériennes on a choisi d'utiliser 64 niveaux de gris.

La matrice de cooccurrence des niveaux de gris (MCNG) est un indice de similarité des pixels (Figure 32). Elle mesure la fréquence à laquelle les combinaisons de niveau de gris entre voisins ont été répertoriées et peut être construite en utilisant la fonction *graycomatrix* de Matlab.

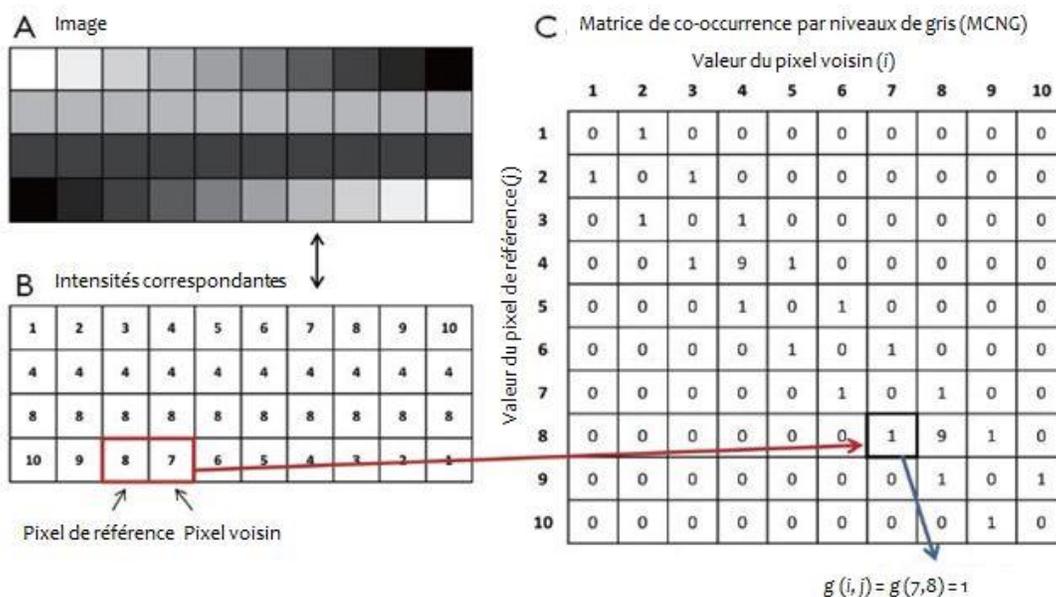


Figure 32 - Matrice de Co-occurrence par niveaux de gris (MCNG)

Pour une image contenant L pixels, la matrice de co-occurrence aura L lignes et L colonnes. De manière plus générale, chaque élément (i, j) de la matrice correspond au nombre de fois où un pixel de teinte de gris i est situé à l'intérieur d'un rayon (ou pas) r et à la distance d'un angle θ d'un pixel de teinte de gris j .

Pour l'élaboration des images, on a défini les paramètres nécessaires pour la construction de la matrice (la taille de la fenêtre d'interrogation, le rayon et l'angle) selon les étapes suivantes :

- Pour la localisation de chaque point d'étalonnage sur les images aériennes correspondantes, les coordonnées spatiales (latitude et longitude mesurées avec le système RTK) ont été transformées en coordonnées d'image (x, y) ;
- Les images aériennes ont été regroupées (mosaïque) pour reconstruire les quatre sites d'étude, mais les images ont été prises et analysées séparément;
- Centrer une fenêtre de pixels sur chaque image : à partir de chaque point d'étalonnage identifié sur les images aériennes, une fenêtre d'interrogation a ensuite été appliquée et ainsi utilisée pour le calcul de l'entropie (avec la fonction *entropy* de Matlab). Le point de calibration est le centre de cette fenêtre.
- Calculer l'entropie dans la fenêtre d'analyse : pour chaque fenêtre d'interrogation, une matrice de cooccurrence par niveaux de gris (MCNG) a été créée. L'entropie a ensuite été calculée à partir de cette matrice
- Faire varier la taille de la fenêtre : pour chaque point de calibration, la taille de la fenêtre d'interrogation a été variée : en fait, les dimensions (en pixels) utilisées pour l'analyse de l'indice de texture ont été 20x20, 30x30 et 40x40 ;
- Faire varier la valeur de l'*offset*, i.e. le rayon d'analyse des pixels : L'analyse a été faite pour des rayons de 1, 3, 5, 7 et 9 pixels qui correspondent à des distances de 3, 9, 15, 21 et 27 cm (Figure 33);
- Analyser la relation établie entre l'entropie et les D_{50} , D_{84} : La relation entre les valeurs d'entropie calculées et les valeurs des cinquantièmes (D_{50}) et quatre-vingt-quatrième (D_{84}) percentiles de la distribution granulométrique par rapport à chaque point;



Figure 33 - Exemple du calcul du rayon dans une matrice de niveaux de gris

3.7 Analyse photo de calibration

3.7.1 Logiciel BASEGRAIN

L'analyse granulométrique des sédiments fluviaux a été effectuée à l'aide de BASEGRAIN, un logiciel de reconnaissance semi-automatique d'objets, basé sur MATLAB® (Detert *et al.*, 2012, Detert *et al.*, 2013). Le logiciel se sert d'un algorithme de détection d'objet en cinq différentes étapes et sépare les interstices des zones de grains.

Plusieurs études qui ont utilisé le *photosieving*, se sont servies soit de fonctions statistiques pour analyser la texture de l'image, soit d'autres fonctions telles que l'*edge-detection*, de seuils de niveaux de gris et d'algorithmes de segmentation d'image afin d'identifier et en suite mesurer les axes a et b des particules (Detert *et al.*, 2013).

Premièrement, BASEGRAIN nécessite que l'image analysée soit prise de façon orthogonale avec une indication connue pour l'échelle (d'où, la réalisation du rectangle pour la prise des images de calibration). Ensuite il emploie une procédure en plusieurs étapes incluant l'évaluation des particules et la construction d'une courbe de distribution de taille *quasi-grain*.

Les étapes d'analyse dans BASEGRAIN sont basées sur le seuil de niveaux de gris, le filtrage de *bottom-hat* (une opération qui aide à mettre en évidence les points noirs dans des images données. Pour extraire de petites régions sombres d'une image La transformation Bottom-hat inverse efficacement les régions haute fréquence). les méthodes d'*edge-detection* (La détection des contours est une technique de traitement d'image permettant de trouver les limites des objets dans les images. Il fonctionne en détectant les discontinuités de luminosité) pour identifier les interstices de grain et la séparation des bassins versants (« *watershed* »¹, *terminologie utilisée dans le logiciel BASEGRAIN*) pour identifier les grains individuels.

¹ Une image numérique en nuances de gris peut être considérée comme un relief, où le niveau de gris d'un pixel indique son élévation dans le relief. Une ligne fermée constituée de pixels ayant la même valeur grise peut être considérée comme un bassin versant (*watershed*). Le nom dérive du fait que le bassin versant correspond à un minimum du gradient pour lequel il est possible de comparer la descente du gradient à une goutte d'eau qui coule le long du relief jusqu'à atteindre le bassin versant (Detert, (2013) - User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN)

La dernière étape est reliée aux calculs géométriques des particules. Pour ce faire, le logiciel définit les axes a et b (Figures 34-35) des grains individuels, ce qui permet d'établir le rapport des axes a/b (Detert *et al.*, 2012).

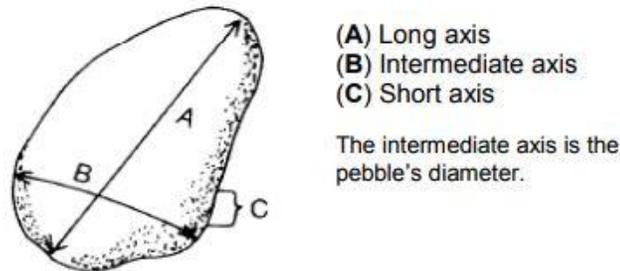


Figure 34 - Représentation des axes a , b et c (<http://www.dep.wv.gov>)

La valeur minimale des particules qu'on peut analyser par le logiciel est donnée par la résolution de l'image (30mm), alors que c'est une tâche de l'opérateur d'identifier et de quantifier la composante la plus fine (et donc non détectable par le logiciel) dans la distribution des tailles des particules (Detert *et al.*, 2013).

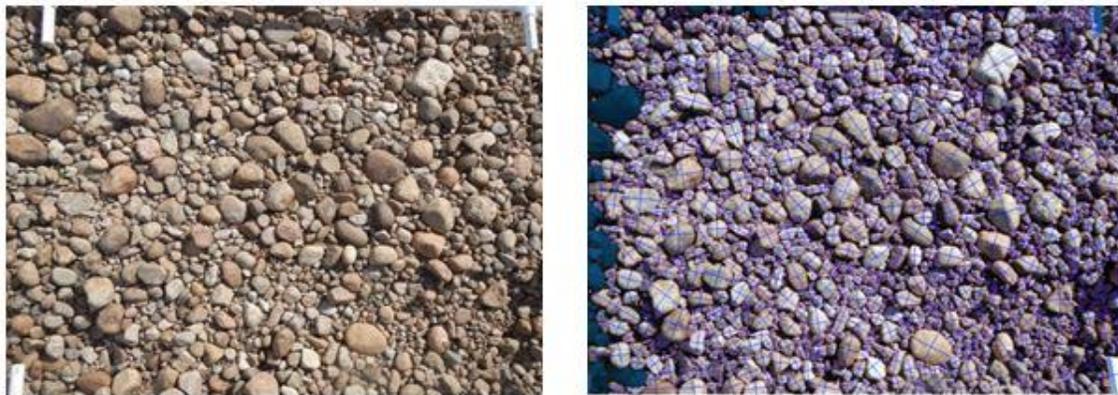


Figure 35 - (a) Image enregistrée sur le terrain ; (b) axes a et b évalués par BASEGRAIN

Le post-traitement manuel (Figure 36) est utilisé pour fractionner ou éliminer les axes b des grains classifiés de façon incorrecte (parfois, les particules plus grossières sont sursegmentées) ou enlever les particules qui sont analysées partiellement.

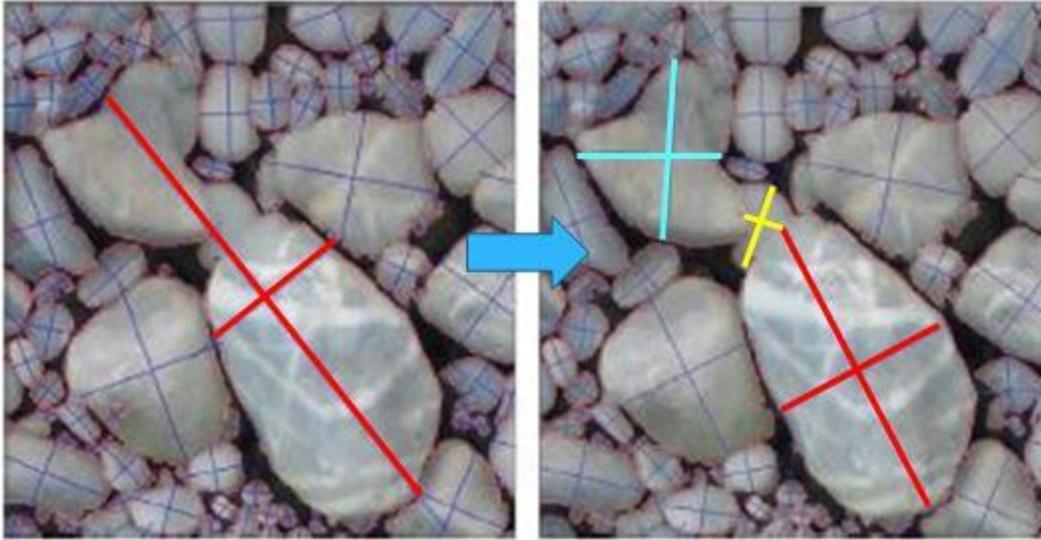


Figure 36 - (a) Détection incorrecte de l'axe b ; (b) post traitement sur la même image

3.7.2 Distribution de la granulométrie

Afin de tracer la courbe de distribution de la taille des particules, la surface de chaque particule détectée est remplacée par une ellipse de même taille. Les ellipses sont adaptées aux zones d'objet en utilisant des moments de seconde centrale normalisés de zones d'objet déterminés. Leurs axes mineurs, c'est-à-dire les axes b , sont considérés comme des proxies de diamètres de grains caractéristiques. Les grains limitrophes qui ne sont pas entièrement inclus dans le cadre analysé sont occultés afin d'éviter une analyse statistique trompeuse des diamètres caractéristiques (Detert *et al.*, 2013).

La procédure *line-sampling*, à travers une grille, est utilisée pour transférer les statistiques des axes b dans une distribution *quasi-grain* exprimée en fraction massique (analyse de laboratoire typique). Cependant, la distribution de la taille des particules de la couche au-dessous de la surface est approximée par une estimation empirique du pourcentage de grains plus fins non détectés.

3.7.3 Indices (D_{16} , D_{50} , D_{84}) évalués par BASEGRAIN

À partir de la distribution de taille des particules, le logiciel montre les données des percentiles les plus utilisées pour une analyse de granulométrie comme le D_{16} , le D_{30} , le D_{50} (diamètre médian), le D_{84} et le D_{90} .

3.7.4 Analyse de correspondance entre l'entropie et la granulométrie

Une image hétérogène se traduira par une valeur d'entropie inférieure, tandis qu'une région homogène se traduira par une valeur d'entropie plus élevée. L'entropie donne alors des valeurs élevées si dans l'image on retrouve probablement les mêmes couples de pixels, par exemple dans le cas d'une granulométrie fine (sable). Au contraire, dans le cas de particules plus grossières les valeurs d'entropie sont faibles (Figure 37).



Figure 37 - Exemples de correspondances entre deux typologies de granulométrie et les valeurs d'entropie

L'analyse de la régression entre l'entropie et les percentiles (D_{50} et D_{84}) de la distribution granulométrique des images relatives à la composante exondée a été réalisée en considérant uniquement la bande rouge des images RGB (RVB) optiques disponibles.

En effet, un appareil photo numérique enregistre des images dans la composition des couleurs naturelles, c'est-à-dire celle plus proche à la vision naturelle humaine. Pour ce faire les trois bandes dans le visible du système RGB (rouge-bleu-vert) sont utilisées.

Toutefois, pour le calcul des indices de texture, il faut transformer une image de manière à obtenir une seule bande à partir d'une image en trois bandes (Tremblay, 2010).

Selon la loi de Beer-Lambert, une perte exponentielle de l'intensité de la lumière se produit en fonction de la longueur d'onde du spectre de couleur (Schettini *et al.*, 2010). Dans les eaux claires, la lumière visible est absorbée aux longueurs d'onde les plus longues (Schettini *et al.*, 2010). La bande rouge, avec la plus grande quantité d'énergie et celle qui s'atténue le plus rapidement, est réduite à un tiers de son intensité après 1 mètre et perdue après une distance de 4 – 5 mètres sous l'eau (Schettini *et al.*, 2010). Par rapport à d'autres longueurs d'onde, le bleu et le violet sont absorbés en dernier. Pour cette raison, par exemple, les eaux océaniques nous apparaissent colorées de bleu. Le phénomène d'absorption des couleurs affecte les images leur donnant des couleurs et des contrastes faibles. Pour retrouver ces informations, le traitement de l'image devient une étape cruciale. (Ghani *et al.*, 2014).

3.7.5 Analyse statistique

La relation entre l'entropie et la valeur du substrat a été effectuée par régression linéaire simple. Dans le cas d'une régression linéaire simple, le R^2 (coefficient de détermination de Pearson) exprime le pourcentage de la variance expliquée par le modèle de régression (Lachapelle, 1986). Un R^2 élevé est donc signe d'une meilleure calibration. Un estimé des erreurs est aussi présentée. Une approche à travers la méthode 'Leave-one-out cross-validation' a été effectuée pour les 102 données de l'ensemble des quatre sites.

3.8 Comparaison des erreurs et limites dans les travaux précédents

Concernant les études qui se sont déjà intéressé à l'analyse de la taille des particules de la composante submergée et exondée du lit d'une rivière et précisément à travers un indice de texture, on peut sûrement se référer aux travaux de (Carbonneau *et al.*, 2005, Carbonneau *et al.*, 2004), Verdú *et al.* (2005), Dugdale *et al.* (2010) et Tremblay (2010) . Les limites des études ainsi comme les erreurs sont toujours importantes pour s'orienter et analyser une étude d'une façon plus objective.

Par exemple, Carbonneau *et al.* (2004) indique que pour les tailles de particules inférieures à la résolution de pixels de l'image, les patrons de texture sont perdus parce que les zones de variation de l'ombrage de la lumière et de l'obscurité dans l'empreinte de pixels sont moyennés.

En suite, Carbonneau *et al.* (2005) afin de mieux explorer ces erreurs associées à la cartographie aéroporté de la taille des grains a conduit une analyse de type Monte-Carlo. La précision variait généralement de -0.009ψ to 0.04ψ avec des précisions variant de $\pm 0.30\psi$ to $\pm 0.47\psi$. La raison de cette perte de précision (surestimation) s'explique dans les zones de haute réflectance (barres de gravier), où les corps de couleur claire (clastes) illuminent faussement les pixels adjacents couvrant les zones d'ombre prolongeant ainsi leur périmètre.

Verdú *et al.* (2005) s'est retrouvé dans une problématique tres similaire. Pourtant, la taille minimale des particules visibles qui est définie par la résolution de l'image demeure une limitation de cette methode. Cependant, la progression rapide de la technologie d'imagerie signifie que cette limitation va graduellement reculer.

Dans son étude et à travers l'analyse statistique Dugdale *et al.* (2010) a démontré que la méthode de phototamisage sur le terrain et la méthode de phototamisage aérien ont produit des équations d'étalonnage avec des pentes identiques, mais avec un biais systématique de 0.53ψ . Cette erreur va être évidemment en plus des erreurs déjà présentes dans les autres approches de cartographie aéroportée de la taille des grains.

Tremblay (2010) trouve une erreur-type de 23,55 mm, alors que dans les travaux de Carbonneau *et al.* (2004) et Verdú *et al.* (2005) les erreurs type étaient de 13,9 mm et 15,6 mm respectivement. Plus récemment, l'approche SfM permet une plus grande souplesse sur l'acquisition de données, et elle peut également fournir des mesures de taille de grain à des échelles plus fines que l'analyse de texture d'image, qui est limitée par la taille de pixel de l'imagerie aérienne disponible et les autres effets déjà mentionnés de fausse illumination pour les pixels adjacents aux corps plus clairs (Dugdale *et al.*, 2010). Cependant, cette approche a aussi une limite concernant les surfaces exposées de barre de gravier. Une solution possible est la combinaison de la méthode basée sur la SfM avec l'échantillonnage Wolman conventionnel des zones submergées. À ce sujet, l'étude de Woodget (2015) montre qu'une correction de réfraction pourrait être appliquée sur les zones submergées sur les nuages de point de SfM, et de cette façon, on peut obtenir des informations sur la bathymétrie des canaux dans les zones d'eau peu profonde et claire (au dessous de 0.5 m) avec une précision centimétrique vertical comparable aux zones de barre sèche (Vázquez-Tarrío *et al.*, 2017).

4 RÉSULTATS

Ce chapitre présente d'abord les résultats obtenus par le biais du programme BASEGRAIN pour la reconstruction de la distribution granulométrique dans chaque image d'étalonnage prise au sol.

Par la suite, les résultats obtenus sont montrés à partir de la corrélation entre les valeurs de la taille du substrat et de l'indice de texture choisi : l'entropie.

La section suivante couvre les résultats les plus importants obtenus et les problèmes rencontrés pendant l'analyse et le post-traitement.

La partie finale contient une discussion qui englobe plusieurs sujets : la relation avec les expériences passées de la recherche sur la problématique, la contribution de cette étude à la recherche et les applications futures possibles.

4.1 Résultats obtenus par BASEGRAIN

4.1.1 Substrat exondé

Pour la partie exondée, il est possible de noter qu'il y a une bonne variabilité des valeurs de granulométrie. C'est le résultat du choix de couvrir autant que possible la diversité de la taille présente sur les sites, à travers les points d'étalonnage sur le terrain.

En fait, comme on peut constater dans le tableau 3, les valeurs pour le diamètre médian varient d'un minimum de 11 millimètres à un maximum de 72 millimètres, tandis que les valeurs de D₈₄ sont entre 14 et 92 millimètres. En analysant plus précisément les valeurs de données du programme BASEGRAIN, on remarque que les sites de *Savane* et *Crag pool* (distance entre les sites de 5,5 km) présentent une distribution de la taille des particules très similaire à la fois en ce qui concerne le D₅₀ et le D₈₄.

En ce qui concerne le site Trinité, c'est le site où on retrouve les particules se présentent avec les dimensions plus grandes, si comparées avec les autres sites, et la valeur maximale du D₈₄ atteint 92 mm.

Le site Hill Station est celui qui est caractérisé par une prépondérance de matériaux fins distribués sur toute la surface prise en considération.

Tableau 3 - Valeurs minimales et maximales des percentiles (50 et 84) de la distribution granulométrique exondée dans les quatre sites de calibration obtenues par BASEGRAIN

	D₅₀ (mm)	D₈₄ (mm)
Trinité	(18 - 72)	(28 - 92)
Savane	(17 - 47)	(29 - 79)
Crag Pool	(14 - 48)	(28 - 80)
Hill Station	(11-34)	(15-59)

4.1.2 Substrat submergé

Pour l'analyse de la composante submergée, le traitement des images a aussi été effectué à l'aide du logiciel BASEGRAIN et certains problèmes ont été détectés.

Le logiciel utilise un algorithme qui parvient à segmenter assez bien l'image, en particulier pour les particules de petite taille. Par contre, les particules plus grossières sont sursegmentées. Parfois, si on regarde d'une façon plus détaillée l'image, on s'aperçoit que les zones avec erreurs de sursegmentation sont celles où un biofilm s'est développé à la surface des sédiments. Ce traitement des images enregistrées présente donc des limitations qui peuvent être contournées avec un traitement préliminaire des images. Afin d'améliorer le résultat de la segmentation, on est passé de l'image brute (RGB) à l'image désaturée (mode « niveau de gris »). Avec cette procédure, la segmentation est un peu meilleure que sur l'image brute et la phase de post-traitement moins longue (Tableau 4).

Tableau 4 - Valeurs minimales et maximales des percentiles (50 et 84) de la distribution granulométrique submergée dans les quatre sites de calibration

	D₅₀ (mm)	D₈₄ (mm)
Trinité	(16 - 33)	(24 - 56)
Savane	(10 - 34)	(28 - 66)
Crag Pool	(3 - 39)	(12 - 68)
Hill station	(3 - 21)	(6 - 44)

4.2 Relation entre l'entropie et la granulométrie

4.2.1 Substrat exondé

Le tableau 5 résume, d'une manière schématique, le processus d'acquisition sur le terrain et la sélection subséquente des images utilisées pour corrélérer avec les valeurs d'entropie.

Les images enregistrées sur le terrain, mais subséquemment considérées comme inutilisables sont celles qui sont liées à des zones où la composante la plus fine (sable) de la distribution granulométrique est présente d'une manière quasi exclusive ou les zones où il y a présence de grands blocs. La taille de ces particules ne convient pas à l'analyse par le logiciel BASEGRAIN. De toute évidence, l'absence d'analyse par le biais du programme rend également impossible de suivre l'analyse subséquente de la corrélation avec l'entropie évaluée sur les images aériennes correspondantes. L'acquisition sur le terrain de ces images est toutefois utile pour compléter, documenter et ainsi fournir l'éventail complet de la taille des particules présentes sur les sites.

Il y a d'autres images de points d'étalonnage qui n'ont pas été utilisées parce que les images aériennes correspondantes présentent des singularités : présence d'ombres, déformations dues au géoréférencement, présence d'obstacles empêchant une bonne évaluation.

Tableau 5 (a, b) - Informations concernant les images de calibration analysées dans les quatre sites de calibration (granulométrie exondée)

Site	Nb. Images	Nb. Images écartées — (sable, blocs)	Nb. Images écartées — analyse	Nb. Images valides
<i>Savane</i>	30	2	1	27
<i>Trinité</i>	31	4	-	27
<i>Crag pool</i>	30	6	1	23
<i>Hill station</i>	31	6	-	25
Totale	122	18	2	102

Nr. Images écartées — (sable, blocs)	14.8 %
Nr. Images écartées — analyse	1.6 %
Nr. Images valides	83,6 %
Total	100 %

L'entropie a été évaluée pour chaque image et la moyenne (Entropie moyenne E_m) a ensuite été calculée (tableaux 6-10).

Par exemple, le point d'étalonnage SV4 (référéncé sur le site de Savane, partie exondée) est présent dans trois images aériennes successives (759.jpg, 760.jpg et 761.jpg). Pour chacune de ces images, les valeurs d'entropie respectives de -4,3, -4,212 et -4,316 ont été évaluées, dont la valeur moyenne de -4,276 a été ainsi obtenue. L'ensemble des valeurs, moyennées par rapport au percentile (D_{50} , D_{84}) des distributions de taille de chaque site, contribue à la formation de la valeur de régression exprimée dans les tableaux suivants.

Tableau 6 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie pour l'ensemble des données dans les quatre sites de calibration

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (11 – 72 mm)	d84 (14 – 92 mm)
21x21	1	0,56	0,60
	3	0,57	0,61
	5	0,56	0,60
	7	0,56	0,61
	9	0,56	0,60
31x31	1	0,58	0,61
	3	0,58	0,62
	5	0,58	0,62
	7	0,57	0,61
	9	0,58	0,62
41x41	1	0,57	0,61
	3	0,59	0,62
	5	0,58	0,62
	7	0,59	0,62
	9	0,58	0,62

Tableau 7 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration *Trinité*

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (18 – 72 mm)	d84 (28 – 92 mm)
21x21	1	0,46	0,67
	3	0,48	0,69
	5	0,45	0,68
	7	0,45	0,67
	9	0,45	0,67
31x31	1	0,47	0,69
	3	0,48	0,70
	5	0,47	0,69
	7	0,46	0,70
	9	0,46	0,70
41x41	1	0,45	0,67
	3	0,48	0,70
	5	0,46	0,70
	7	0,46	0,70
	9	0,46	0,69

Tableau 8 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration *Crag pool*

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (14 – 48 mm)	d84 (28 – 80 mm)
21x21	1	0,61	0,70
	3	0,60	0,70
	5	0,60	0,69
	7	0,62	0,71
	9	0,61	0,71
31x31	1	0,69	0,74
	3	0,69	0,73
	5	0,69	0,74
	7	0,69	0,74
	9	0,69	0,74
41x41	1	0,70	0,74
	3	0,71	0,74
	5	0,71	0,75
	7	0,72	0,75
	9	0,72	0,76

Tableau 9 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration *Hill station*

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (11 – 33 mm)	d84 (14 – 58 mm)
21x21	1	0,74	0,64
	3	0,72	0,61
	5	0,72	0,61
	7	0,71	0,60
	9	0,71	0,59
31x31	1	0,79	0,67
	3	0,76	0,63
	5	0,75	0,62
	7	0,76	0,63
	9	0,76	0,63
41x41	1	0,82	0,69
	3	0,79	0,64
	5	0,79	0,64
	7	0,79	0,65
	9	0,79	0,65

Tableau 10 - Coefficient de détermination (R^2) de la relation entre le diamètre des particules et de l'entropie - site de calibration Savane

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (17 – 47 mm)	d84 (28 – 79 mm)
21x21	1	0,81	0,81
	3	0,82	0,81
	5	0,81	0,80
	7	0,81	0,81
	9	0,83	0,83
31x31	1	0,86	0,85
	3	0,87	0,86
	5	0,86	0,85
	7	0,83	0,83
	9	0,86	0,85
41x41	1	0,88	0,87
	3	0,88	0,88
	5	0,87	0,88
	7	0,87	0,87
	9	0,87	0,87

Les meilleures valeurs de corrélation sont celles résultant de l'analyse effectuée à travers la fenêtre d'interrogation principale (41x41 pixels).

Une explication possible peut être donnée par la présence de plus grandes particules qui donnent une plus grande contribution à la texture.

Les résultats des analyses ont été rapportés sur des graphiques avec l'entropie en abscisse (valeurs moyennes sur l'ensemble des images où les points de calibrations sont présents) et les D50 en ordonnée (valeur médiane).

La relation établie est d'un type négatif et pour cette régression et la valeur du coefficient de détermination (R^2) est présentée, avec l'amplitude de la fenêtre d'interrogation et la taille du pas (offset).

4.2.2 Substrat exondé : les résultats principaux

Pour le site de *Trinité* (Figure 38), nous trouvons un bon coefficient de détermination entre l'entropie et le D_{84} ($R^2=0,70$), tandis que pour le D_{50} le meilleur résultat est 0,47. Ce site a une large gamme de granulométries, avec des valeurs maximales de diamètre de 72 mm (D_{50}) et 92 mm (D_{84}).

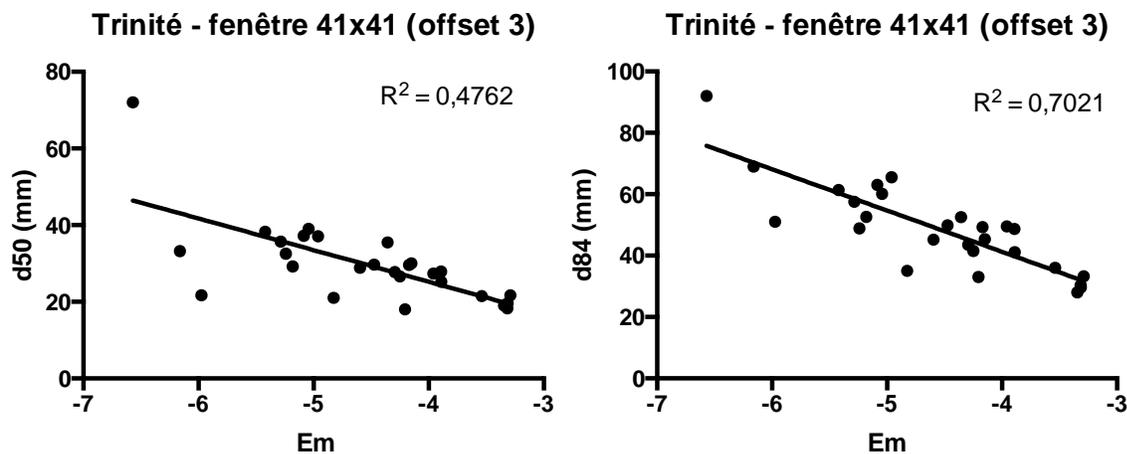


Figure 38 - Meilleurs résultats de la station *Trinité* pour la relation Entropie —

a) d_{50} : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3; b) d_{84} : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3

Le site de *Savane*, ainsi que le site *Crag pool* (Figures 39-40), donne les meilleurs résultats dans l'analyse. Les valeurs R^2 pour la relation entre l'entropie et le D_{50} ou le D_{84} sont très rapprochées (Tableau 15)

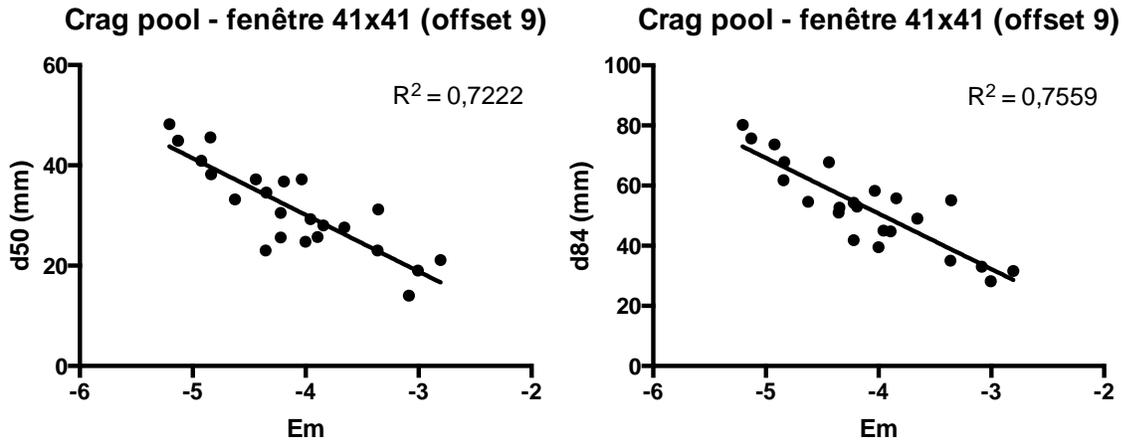


Figure 39 - Meilleurs résultats de la station Crag pool pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 9; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 9

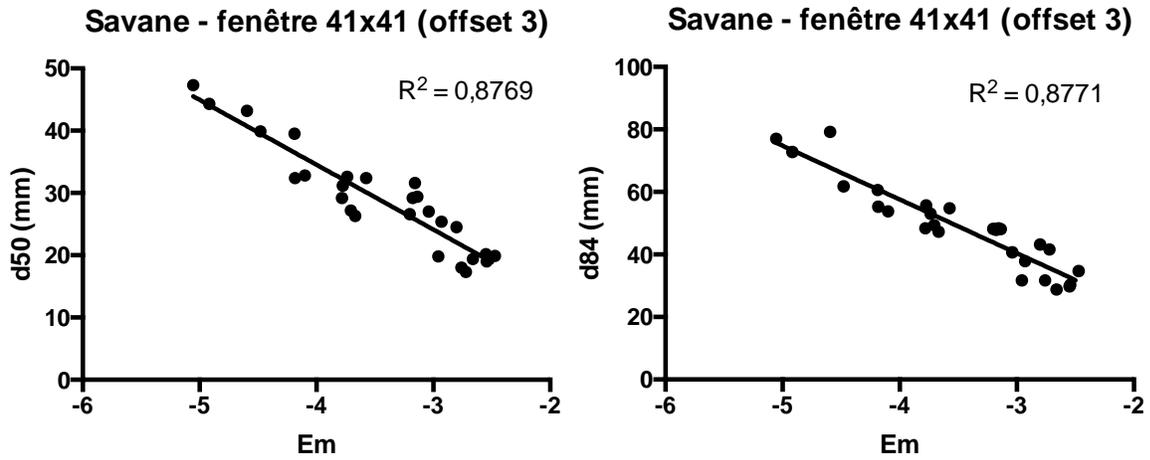


Figure 40 - Meilleurs résultats de la station Savane pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3

Tableau 11 - Valeurs des percentiles D50 et D84 pour les sites Crag pool et Savane

Site	D ₅₀ (mm)			D ₈₄ (mm)		
	Min	Max	Δ (mm)	Min	Max	Δ (mm)
Crag pool	14	48	34	28	80	52
Savane	17	47	30	28	79	51

Les deux sites ont des gammes similaires pour le 50eme et le 84eme percentile de la distribution granulométrique des images des points de calibration. Ces valeurs sont le résultat d'images aériennes de bonne qualité. La netteté des images est donnée par la combinaison de la hauteur et vitesse de vol, l'ensoleillement, la position de la camera et le temps d'exposition et aussi l'absence d'ombrage ou débris.

Pour *Hill Station*, les meilleures valeurs de coefficient de détermination sont visibles pour l'analyse liée à D₅₀, alors qu'elles perdent de la qualité pour le D84. Une explication possible réside dans le fait que la taille des particules est très homogène et les particules plus grandes ne fournissent pas une contribution décisive à la texture (Figure 41).

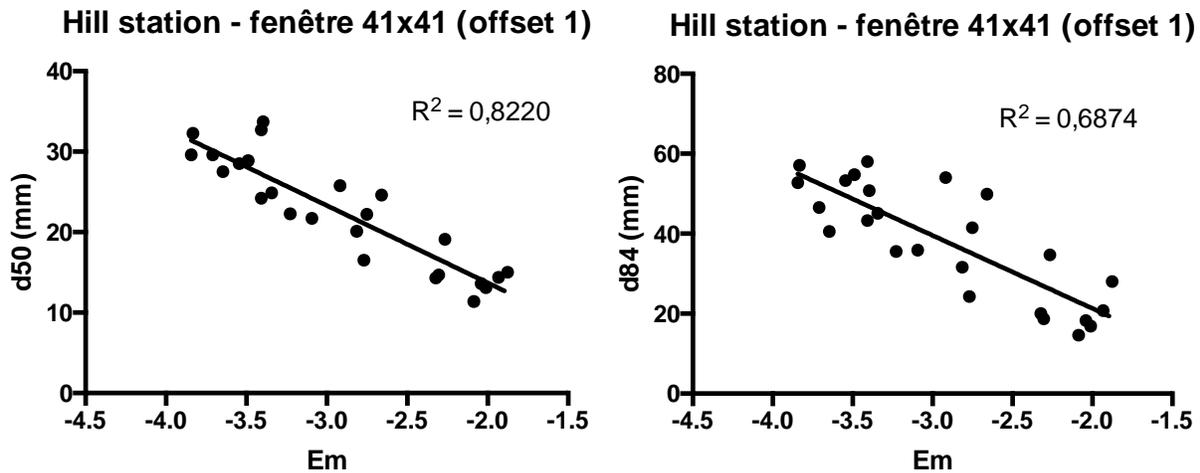


Figure 41 - Meilleur résultat de la station Hill station pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 1; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 1

Comme on pouvait s'y attendre, les graphiques correspondant à toutes les valeurs (Figure 42), ont un R^2 inférieur aux meilleures valeurs exprimées individuellement pour certains sites. L'augmentation du nombre de données augmente la variance et conséquemment, l'erreur stochastique augmente et la valeur de R^2 diminue. Même si la valeur de R^2 est plus grande pour le D84, on voit que le nuage des points, voir la variabilité des points autour de la ligne de régression, est plus grande pour le D84 aussi. Pourtant on pourrait aussi envisager un changement dans la métrique, comme par exemple d'autres fenêtres d'interrogation plus grandes, pour mieux évaluer le D84. On remarque aussi comment des particules (avec les axes b majeurs) surtout dans le site Trinité, le plus proche de la confluence, aient une grande influence sur la valeur de corrélation (points avec les valeurs mineures d'entropie).

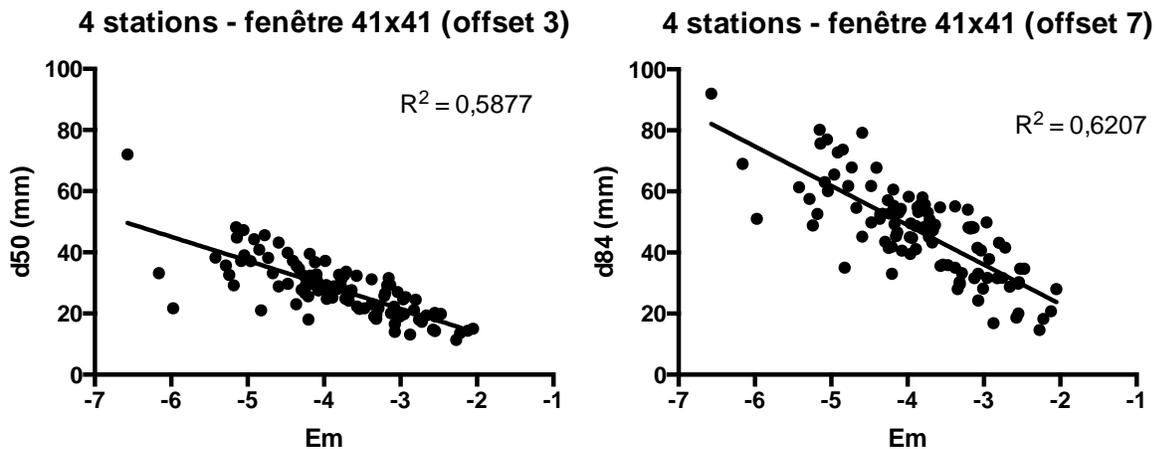


Figure 42 - Meilleurs résultats de l'ensemble des 4 stations pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 3; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 7

L'analyse a été fait sur d'autres fenêtré, plus grandes, jusqu'à 101x101 pixels (303x303 cm) afin de retrouver que les valeurs de R^2 soient plus bas avec l'élargissement des fenêtrés d'interrogation. Dans la figure 43 des exemples sont reportés qui démontrent comment la valeur de R^2 diminue.

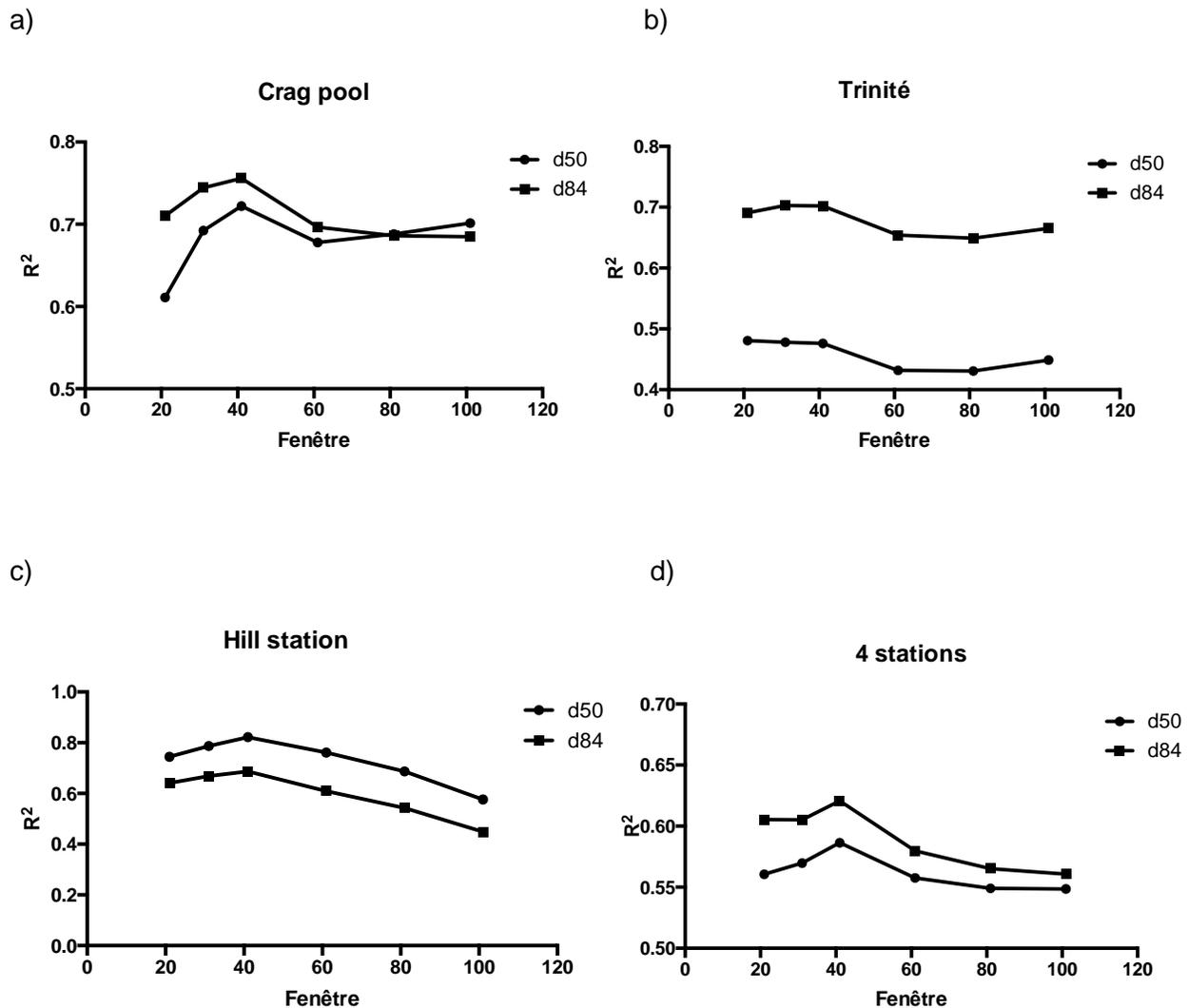


Figure 43 – Exemples de la diminution de a valeur de R2 avec l'élargissement de la fenêtre d'interrogation : a) Crag pool; b) Trinité; c) Hill station; d) 4 stations

Afin de présenter un estimé des erreurs autre que les R^2 , une approche de la méthode 'Leave-one-out cross-validation' a été effectuée sur l'ensemble des 102 données des quatre stations. Pour le développement de la méthode il s'agit donc de retirer le premier point de la régression, de faire la régression avec les 101 points qui restent, et ensuite de faire la prédiction du point retenu. On refait ensuite la même chose mais en retenant le deuxième point, et ainsi de suite jusqu'à ce que les 102 points ont été retenus et prédits. Il est ensuite possible d'évaluer la

différence entre les valeurs prédites et observées ainsi que de regarder l'histogramme (avec statistiques de base) de ces erreurs (Figure 44).

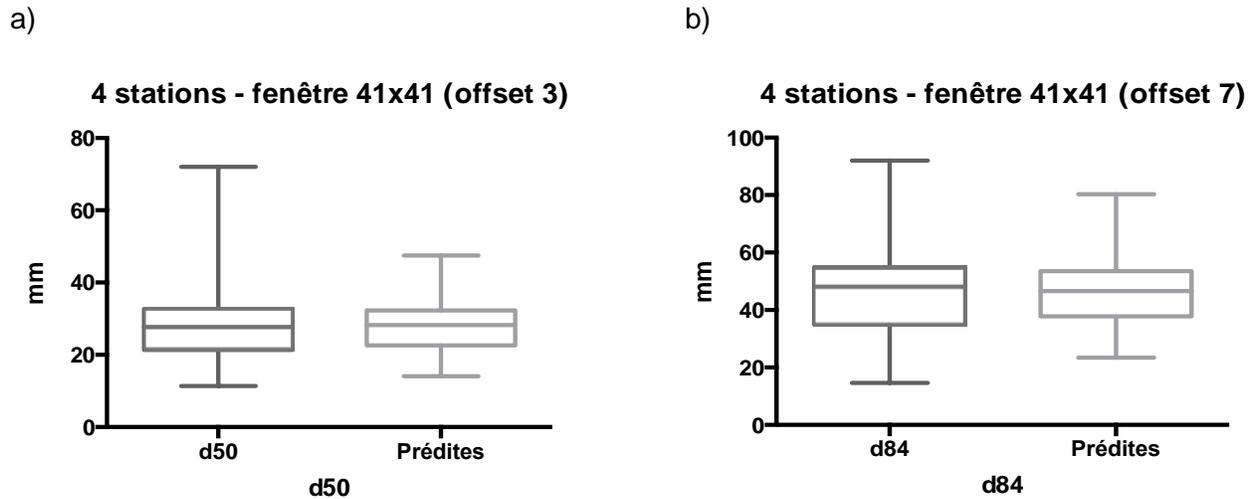


Figure 44 - Les graphiques *boxplot* relatives aux données des quatre stations : a) d50 - fenêtre 41x41 (offset 3); b) d84 – fenêtre 41x41 (offset 7)

Concernant l'analyse statistique descriptive des données, les résultats obtenus à travers l'utilisation de la méthode *Leave-one-out-cross-validation* ont montré que la précision moyenne des valeurs prédites est (différence entre les valeurs prédites et les valeurs observées) du 4% pour le d50 et du 5% pour le d84. En particulier, pour le d50 on retrouve une valeur de moyenne pour les observées de 28.1 ± 9.3 mm et de 28.1 ± 7.1 pour les prédites. Pour le d84 on retrouve une valeur de moyenne pour les observées de 46.9 ± 14.9 mm et de 46.9 ± 11.8 mm pour les prédites. Les erreurs-type de la moyenne demeurent 0.92 mm pour le d50 et 1.48 mm pour le d84.

4.2.3 Substrat submergé

Le tableau 12 (a et b) résume d'une manière schématique le processus d'acquisition sur le terrain et la sélection subséquente des images utilisées pour corrélérer avec les valeurs de l'entropie dans les zones submergées. Les images enregistrées sur le terrain (mais ensuite considérées comme inadéquates, comme pour la composante sèche), sont celles qui sont liées à des zones où la composante la plus fine (sable) de la distribution de taille est présente d'une manière quasi exclusive où il y a la présence de grands blocs. De plus, certains points d'étalonnage n'ont pas été utilisés parce que les images aériennes correspondantes présentent des singularités (par exemple le reflet du soleil ou des nuages sur la surface de l'eau).

Tableau 12 (a, b) - Informations concernant les images de calibration analysées dans les quatre sites de calibration (granulométrie submergée).

Site	Nr. Images	Nr. Images écartées		Nr. Images
		Terrain (sable, blocs)	Analyse	Valides
<i>Savane</i>	31	5	4	22
<i>Trinité</i>	30	6	-	24
<i>Crag pool</i>	30	4	1	24
<i>Hill station</i>	30	4	1	25
Totale	121	20	6	95

Nr. Images écartées — terrain (sable, blocs)	16,5 %
Nr. Images écartées — analyse	5 %
Nr. Images valides	78,5 %
Total	100 %

Toutefois, bien que cette option ait été prise en compte pour améliorer les résultats de l'analyse de régression, certains sites et, en particulier, certaines images n'ont pas donné de résultats satisfaisants.

Le survol de l'hélicoptère, tel que mentionné ci-dessus, offre des avantages et rend possible une série d'opérations qui nécessiteraient autrement plus de temps, si elles sont faites par l'utilisation d'un avion. Le choix de la période d'étiage et un créneau horaire précis peuvent créer des avantages supplémentaires dans l'analyse subséquente des images, mais certains facteurs peuvent difficilement être optimisés. Parmi ces facteurs, on compte, par exemple, la présence de zones de cours d'eau ombragée, de végétation flottante (troncs ou branches mortes), de tourbillons créés par des obstacles à l'écoulement du courant, de la mousse sur la surface ou des ondulations données par la présence de vent (Figures 45-47).

L'apparition de telles situations dans les zones où il y a des points de calibration empêche de procéder à l'analyse. Parmi les sites analysés, *Trinité* est celui qui a vu la plus grande fréquence de ces facteurs limitatifs, produisant ainsi des résultats inadéquats. Alors que nous pensions initialement qu'un ensoleillement important était nécessaire pour de bonnes prises de vues, il s'avère qu'une forte luminosité est plutôt une contrainte quand elle est couplée à la turbidité de l'eau.

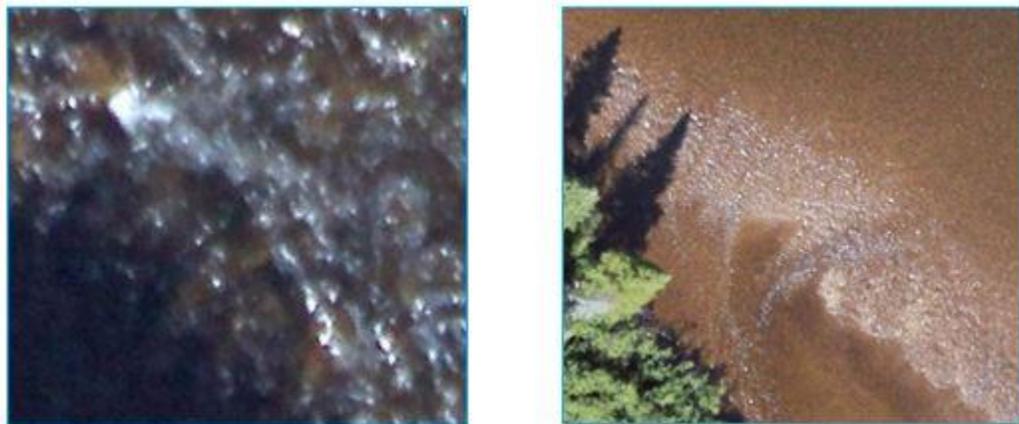


Figure 45 - Présence d'ombrage et de tourbillon. Site : Crag pool (gauche) – Hill Station (droite)



Figure 46 - Exposition excessive à l'ensoleillement. Site : Crag pool



Figure 47 - Présence de biofilm. Site : Trinité

Tableau 13 - Valeurs de coefficient de détermination (R^2)- site de calibration *Crag pool*

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (5 – 35 mm)	d84 (11 – 63 mm)
21x21	1	0,29	0,22
	3	0,32	0,24
	5	0,34	0,24
	7	0,32	0,25
	9	0,30	0,22
31x31	1	0,35	0,27
	3	0,38	0,31
	5	0,40	0,33
	7	0,39	0,32
	9	0,37	0,30
41x41	1	0,36	0,27
	3	0,39	0,31
	5	0,42	0,34
	7	0,43	0,36
	9	0,43	0,36

Tableau 14 - Valeurs de coefficient de détermination (R^2)- site de calibration *Hill station*

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (5 – 20 mm)	d84 (9 – 47 mm)
21x21	1	0,62	0,36
	3	0,60	0,37
	5	0,58	0,33
	7	0,60	0,36
	9	0,60	0,38
31x31	1	0,74	0,45
	3	0,77	0,47
	5	0,75	0,44
	7	0,75	0,44
	9	0,69	0,37
41x41	1	0,70	0,43
	3	0,75	0,49
	5	0,76	0,50
	7	0,75	0,49
	9	0,70	0,42

Tableau 15 - Valeurs de coefficient de détermination (R^2)- site de calibration *Savane*

Fenêtre	Offset	Entropie (Axe B; intervalle - mm)	
		d50 (10 – 36 mm)	d84 (26 – 65 mm)
21x21	1	0,52	0,38
	3	0,54	0,39
	5	0,52	0,38
	7	0,53	0,37
	9	0,50	0,37
31x31	1	0,38	0,31
	3	0,42	0,35
	5	0,43	0,35
	7	0,43	0,35
	9	0,44	0,35
41x41	1	0,26	0,23
	3	0,29	0,26
	5	0,30	0,28
	7	0,29	0,28
	9	0,30	0,28

En concernant l'évaluation des valeurs d'entropie pour les images du substrat dans la portion submergée pour le site *Trinité*, plusieurs essais ont été réalisés afin de trouver une relation significative entre la taille du substrat et l'indice d'entropie, mais malheureusement aucune des tentatives n'a permis d'obtenir une relation significative, due la faible visibilité et la présence de nombreux tourbillons dans le cours d'eau.

4.2.4 Substrat submergé : les résultats principaux

Pour les données de la partie submergée analysée, le site Hill Station on a pu compter sur des images de bonne qualité. L'absence des tourbillons et de biofilm, contribue à rendre l'image claire. Les limites du modèle font en sorte que la qualité des résultats n'est pas la même que sur la partie exondée sur le même site. Il faut souligner que les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque la fenêtre d'interrogation est analysée avec un offset de 3, 5 ou 7 (Figures 48-49).

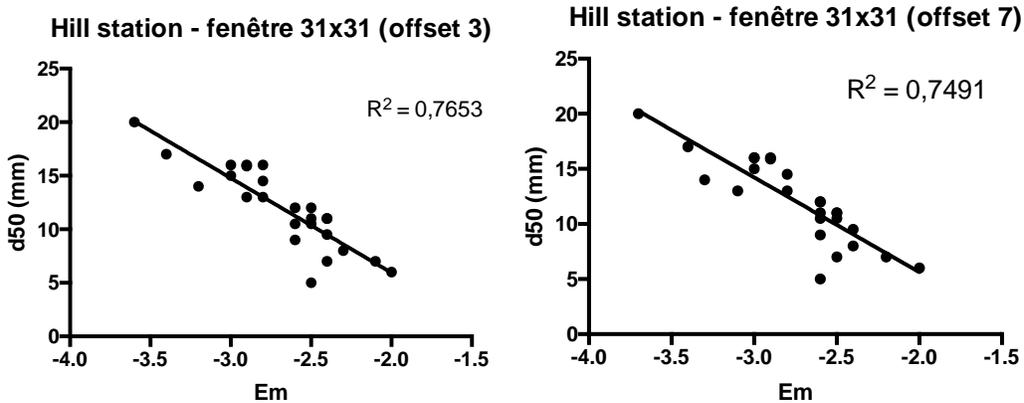


Figure 48 - Meilleurs résultats de Hill Station pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 31x31 pixels, offset de 3; b) d50 : fenêtre de 31x31 pixels, offset de 7

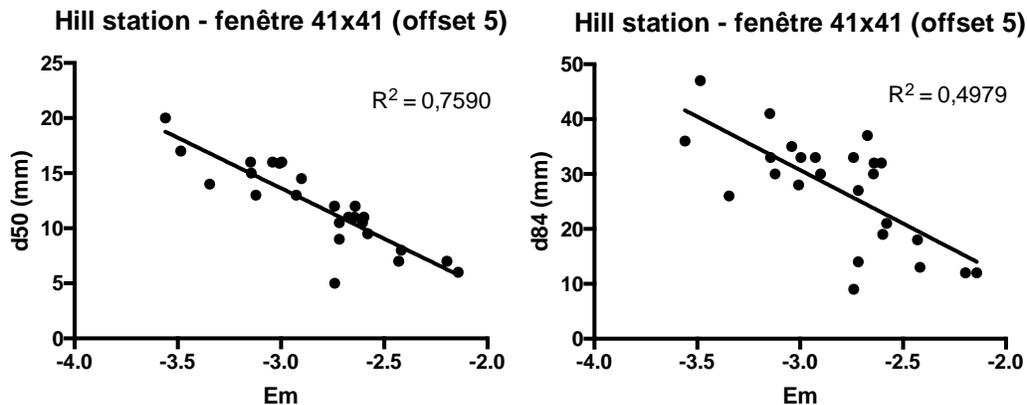


Figure 49 - Meilleurs résultats de Hill Station pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 5; b) d84 : fenêtre de 41x41 pixels, offset de 5

Pour le site *Savane*, par contre, les résultats sont affectés par le reflet du soleil sur la surface de l'eau. Cette condition, empêche une bonne évaluation, même par le biais de la bande rouge. Les meilleurs résultats sont associés à une largeur de la fenêtre d'interrogation de 21x21 pixels, c'est-à-dire la fenêtre minimale (Figure 50).

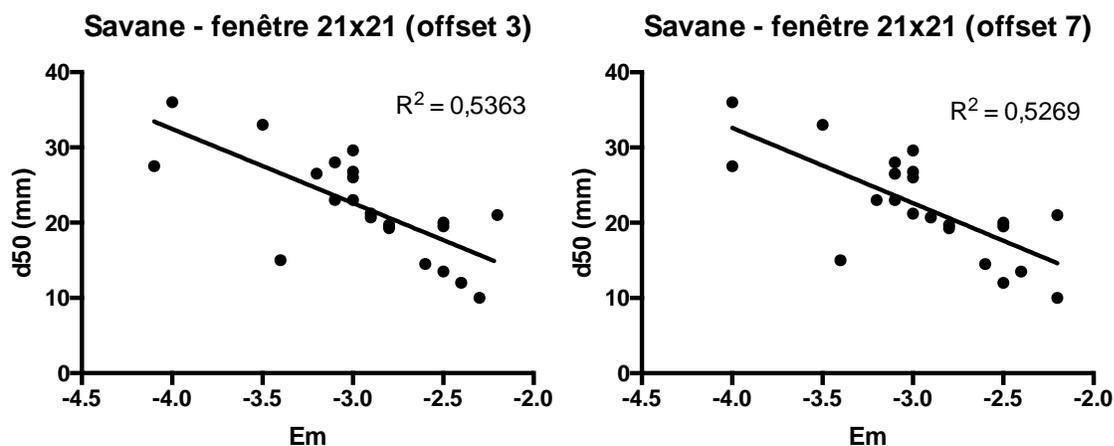


Figure 50 - Meilleurs résultats de la station Savane pour la relation Entropie — a) d50 : fenêtre de 21x21 pixels, offset de 3; b) d50 : fenêtre de 21x21 pixels, offset de 7

Comme pour la composante submergée, même pour la partie exondée une analyse a été fait sur d'autres fenêtré, plus grandes, jusqu'à 101x101 pixels (303x303 cm) afin de retrouver que les valeurs de R^2 soient plus bas avec l'élargissement des fenêtrés d'interrogation. Dans la figure 51 des exemples sont reportés qui démontrent comment la valeur de R^2 diminue.

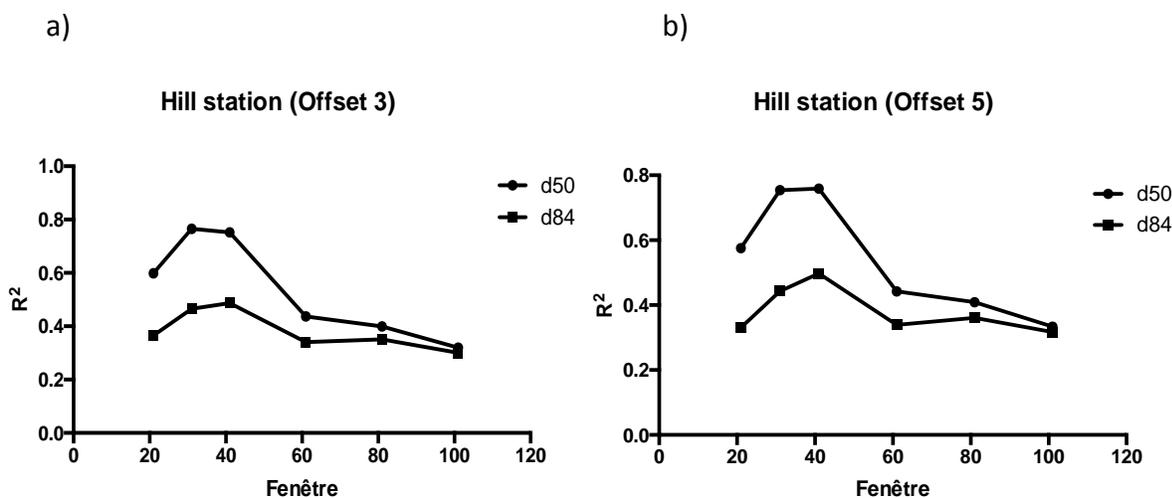


Figure 51 - Exemples de la diminution de la valeur de R^2 avec l'élargissement de la fenêtré d'interrogation : a) Hill station (offset 3); b) Hill station (offset 5)

5 DISCUSSION

Cette étude porte sur l'analyse des sédiments fluviaux à travers l'utilisation de la télédétection. Plusieurs études, et en particulier au cours des dernières décennies avec l'introduction et l'utilisation de nouvelles technologies, ont testé des approches différentes pour obtenir des résultats qui pourraient améliorer les processus d'analyse à l'échelle de l'habitat ou à l'échelle du paysage lotique, ou *riverscape* (Fausch *et al.*, 2002). La présente étude innove grâce à l'utilisation du logiciel BASEGRAIN, un logiciel de reconnaissance automatique d'objets, en permettant de valider le potentiel de l'approche sur la partie exondée du substrat. De plus, le potentiel de l'approche pour les zones submergées a aussi été démontré par les résultats significatifs pour certains sites. L'utilisation de BASEGRAIN a permis de réduire le temps d'analyse des images prises sur le terrain, offrant des résultats fiables pour la comparaison subséquente avec les valeurs de l'entropie évaluée sur les images aériennes. Pour tester la justesse de l'analyse effectuée avec le logiciel, d'autres analyses manuelles de l'axe *b* des particules ou par le biais de plates-formes SIG ont été effectuées et la concordance avec les valeurs estimées par BASEGRAIN a été constatée avec des pourcentages dépassant 90%.

En ce qui concerne la partie submergée de la granulométrie, les images prises sur le terrain et analysées avec le logiciel ont dû être traitées d'une manière différente: les problèmes de réflexion de la lumière du soleil, les vagues et les tourbillons produits par le courant et la présence des biofilms ont souvent causé des erreurs dans l'analyse. L'équipement utilisé pour les opérations sur le terrain n'a pas permis d'étudier les portions d'habitat où la profondeur de l'eau est supérieure à 1 m, mais cette carence a été compensée par l'exploitation de la continuité dans la taille de distribution présente sur le fond, à des profondeurs plus accessibles, ce qui peut permettre l'extrapolation des résultats. L'analyse de l'entropie sur les images aériennes a donné des résultats significatifs. Les sites de calibration choisis pour l'analyse des images aériennes ont des caractéristiques morphologiques différentes entre eux, au niveau de la distribution de la taille, de la longueur et de la position le long le cours d'eau.

Ces différences étaient à la base de l'étude et de l'exécution des analyses. Pour les analyses effectuées sur la partie exondée de la taille des particules, les meilleurs résultats ont été obtenus pour le site de *Savane* (une fenêtre d'interrogation d'amplitude de 41x41 pixels, avec un offset de 3) pour les D_{50} ($R^2 = 0,8769$; $p < 0,0001$) et D_{84} ($R^2 = 0,8771$; $p < 0,0001$); d'autres résultats significatifs ont été obtenus pour la site *Hill Station* (une fenêtre de de 41x41 pixels,

offset de 1) pour les D_{50} ($R^2 = 0,822$; $p < 0,0001$) et D_{84} ($R^2 = 0,6874$; $p < 0,0001$). L'utilisation des offset peut fournir des informations supplémentaires sur les patrons de texture présents dans les images analysées. Les résultats qui sortent de l'utilisation des petits offset offrent une indication sur un manque de variation de la taille des particules pour ces sites.

Si nous examinons l'analyse totale, c'est-à-dire en rassemblant les valeurs des quatre sites de calibration choisis, les résultats les plus significatifs sont encore une fois pour une fenêtre d'interrogation de 41x41 pixels, avec un offset de 3 ($D_{50} - R^2 = 0,5877$; $p < 0,0001$) et 7 ($D_{84} - R^2 = 0,6207$; $p < 0,0001$).

L'analyse des résultats montre que pour les sites où les valeurs de corrélation sont plus fortes, ces valeurs sont celles résultant de l'analyse effectuée à travers la fenêtre d'interrogation principale (41x41 pixels). Une explication possible peut être donnée par le fait qu'une plus grande fenêtre peut permettre l'inclusion de plus grosses roches qui donnent une plus grande contribution à la texture, surtout dans le cas du d_{84} . Les résultats obtenus pour la composante immergée du substrat ne sont pas du même ordre que pour la partie exondée. Les effets de la réflexion de la lumière du soleil sur la surface de l'eau, la présence de matériaux et débris en suspension, la présence de biofilm sur le fond, les tourbillons causés par le courant sont tous des facteurs ayant affectés la performance de la méthode en zone immergée. Le site *Hill Station* a donné des résultats significatifs pour le D_{50} , à la fois avec une fenêtre de 41x41 pixels (offset 5 – $R^2 = 0,759$; $p < 0,0001$), et pour une fenêtre de 31x31 pixels (offset 3 – $R^2 = 0,7653$; offset 7 – $R^2 = 0,7491$; $p < 0,0001$). En ce qui concerne l'analyse de l'entropie par rapport au D_{84} , le résultat le plus important est donné par l'utilisation d'une fenêtre de 41x41 pixels (offset 5 – $R^2 = 0,4979$; $p < 0,0001$). Dans ce cas, l'utilisation de plus grand offset est nécessaire pour redécouvrir la texture, c'est-à-dire les particules qui ne sont pas semblables les unes aux autres, en raison des facteurs déjà cités qui influent sur l'analyse des images de la partie submergée, même en travaillant uniquement sur la bande rouge.

5.2 Comparaison avec les travaux antérieurs

Dans le cadre de projets qui se rapportent à l'analyse de la taille des particules à travers un indice de texture (en particulier sur la composante sèche du substrat), il est clair que les références les plus immédiates dans la littérature sont les études de (Carbonneau *et al.*, 2005, Carbonneau *et al.*, 2004), Verdú *et al.* (2005) et Tremblay (2010) (tableau 16).

Carbonneau *et al.* (2004) ont utilisé un indice de texture différent (contraste) et le palier du semi-variogramme comme indicateur statistique. Dans cette étude sur la rivière Sainte Marguerite principale, de très bons résultats ont été obtenus, compte tenu de la technologie de l'époque. En plus, il faut souligner que l'indice de texture choisi (contraste) diffère de celui utilisé pour l'analyse dans la présente étude sur la Sainte Marguerite nord-est. En fait, les meilleures valeurs de régression sont obtenues pour une fenêtre d'interrogation de 20x20 pixels ($R^2 = 0,7$) et pour l'une des 33x33 pixels ($R^2 = 0,7$). Les bons résultats obtenus sur la composante sèche sont certainement causés par plusieurs facteurs, notamment la résolution des images au sol, l'altitude de vol (et de la prise d'images), mais aussi les couleurs données par les origines géologiques des particules. Puisque le bassin hydrographique du présent projet est le même que celui d'où provient l'étude de Carbonneau *et al.* (2004), il est possible d'inférer que la formation (couleur, taille) des particules affecte la qualité des Carbonneau *et al.* (2005), ont utilisé le palier du semi-variogramme et le D_{50} . Toutefois, comme dans la présente étude, les réflexions solaires sur la surface de l'eau ont généré un problème d'estimation de la taille des particules submergées.

Verdú *et al.* (2005), par contre, ont utilisé un système d'acquisition d'images différent (par exemple, les images de 3 mm, prises à partir d'un ballon). De plus, la résolution au sol des images (3 mm et 60 mm) et les indices utilisés étaient différents. L'étude de Verdú *et al.* (2005) est présentée comme avant-gardiste (pour l'époque) en ce qui concerne l'utilisation de la technologie. En fait, l'utilisation d'images prises par un ballon fournit de très bons résultats, comparables à ceux obtenus par Carbonneau *et al.* (2004) précédemment, malgré les différentes méthodes d'acquisition. Bien que les images aient une résolution au sol plus élevée (60 mm), l'utilisation d'indice comme la semi-variance et le contraste peut fournir des résultats remarquables ($R^2 = 0,78$, avec D_{50} — $R^2 = 0,79$ avec D_{60}) (fenêtre de 7 x 7 pixels), semi-variance (distances = 1, 2, 8 et 10 pixels).

Le travail de Tremblay (2010) est celui qui est le plus comparable à la présente étude. Il y a des similitudes dans le choix de l'indice de texture (entropie), dans la résolution du sol (30 mm), tandis que les images aériennes ont été prises par l'utilisation d'un avion. Cependant Tremblay (2010) a tronqué les données au-dessus de 30 mm. Ensuite, deux modèles de régression différents ont été élaborés : pour les données totales, une valeur de R^2 de 0,61 a été obtenue, tandis que pour les autres données ($D_{50} > 30$ mm) $R^2 = 0,5$.

Toutefois, pour la partie du substrat submergé, l'analyse de Tremblay (2010) n'a pas généré de résultats qui pourraient être considérés. Entre autres, l'auteure que les images floues, les fortes variations d'altitude et les reflets sur la surface de l'eau ont affecté la qualité des résultats.

Tableau 16 - Résumé des études précédentes (modifié de Tremblay 2010)

Comparaison des méthodes	Carbonneau (2004)	Verdù (2005)	Tremblay (2010)	Cette étude
Indices choisis	Palier du variogramme Contraste (2° ordre)	Semi-variance Contraste (2° ordre) Variance (2° ordre)	Entropie (2° ordre)	Entropie (2° ordre)
Résolution au sol des images	30 et 100 mm	60 mm	30 mm	24 - 33 mm
Meilleur R^2	0,8	0,78	0,5	0.69 (0,88)

5.3 Application sur toute la rivière

L'intérêt de la méthode demeure, sûrement, dans son applicabilité à des échelles plus grandes, par exemple la rivière sur toute sa longueur.

La morphologie de la Sainte Marguerite nord-est présente des zones où la rivière coule entre des parois rocheuses creusées et des zones où la canopée obstrue entièrement la vue de la

rivière, de sorte que l'extension de l'analyse ne serait possible que là où il y a la présence de barres fluviales.

De cette façon, il serait possible de décrire la distribution des tailles de substrat pour définir une cartographie de la taille des particules.

La méthode pourrait ainsi être améliorée pour l'analyse des deux composantes du substrat : exondée et submergée. Cette étape demeure importante parce que on puisse en suite utiliser les informations pour la mise en place de campagnes de terrain ciblés, par exemple, pour l'identification des segmentations géomorphologiques comme les 'liens ou panaches sédimentaires' qui fournissent un modèle très utile pour comprendre l'organisation de l'habitat du saumon (Davey *et al.*, 2007).

5.4 Limites de la méthodologie

Bien que la méthodologie adoptée pour cette étude, c'est-à-dire d'obtenir des informations sur l'habitat physique du saumon à partir d'images aériennes haute résolution de la rivière, puisse s'ouvrir à des scénarios plus larges, en particulier en raison des nouvelles technologies et des nouveaux outils qui sont capables de se perfectionner en peu de temps (drones, utilisation des méthodes de type « *Structure from Motion* », etc.), il y a des limites et des sources d'erreur liées à la procédure qu'il faut souligner.

Par exemple, en ce qui concerne l'analyse des images et la construction de la MCNG, la texture dépend quasi exclusivement de la résolution de l'image, de sorte que si la taille du pixel est supérieure à la taille d'une particule (galet, roche), on ne sera pas capable de la voir, ou seulement à cause de sa luminance très différente de celle des pixels voisins (Caloz *et al.*, 2001). Toutefois, parmi les méthodes qui utilisent une propriété d'image (comme l'entropie) pour faire une corrélation entre le D50 (ou le 84) et la texture, Black *et al.* (2014) ont trouvé qu'il est possible de détecter la présence de grains plus petits qu'un pixel. Dans cette étude, avec une résolution au sol d'environ 30 mm, l'indice de texture est limité à la taille minimale

Une autre source d'erreur se présente dans le choix de la fenêtre d'interrogation pour le calcul de l'entropie. En effet, la taille du substrat doit être nettement inférieure à celle de la fenêtre

d'auscultation. Ainsi si une particule couvre une bonne partie de la région sélectionnée par la fenêtre d'interrogation, il y aura un problème dans l'analyse de la texture.

Le choix de dégrader une image RGB dans 64 tons de gris, bien qu'il soit fait pour des raisons d'efficacité de calcul, pourrait avoir une influence sur le résultat. Choisir de dégrader, par exemple, en 16 niveaux de gris, donne une plus grande stabilité aux calculs, tandis que choisir 128 niveaux de gris augmente la quantité d'information présente.

Il y a également un certain nombre de limites qui sont associées aux différentes étapes avant l'analyse de la texture d'images. Il y a, par exemple, quelques images qui montrent un degré d'exposition à la lumière du soleil plus fort que d'autres et ceci peut avoir fait en sorte que quelques particules apparaissent plus lumineuses que d'autres. Dans la partie submergée analysée, la présence de biofilms ou de sédiments d'autres types (végétation, bois mort) peut avoir influencé la luminosité ou la taille des particules.

L'acquisition des images de la partie submergée, presque exclusivement à proximité des berges, réduit la possibilité d'enquêter sur la partie du cours d'eau profonde et donc sur certaines parties de l'habitat.

6 CONCLUSIONS

6.1 Contribution de la recherche et applications

Utiliser la relation pour cartographier le substrat exondé sur l'ensemble de la rivière - Ce travail confirme, le potentiel de l'étude et de l'analyse de la partie exondée de la taille des particules le long d'un cours d'eau. Dans ce sens et dans une perspective future, une amélioration supplémentaire de la qualité des résultats est attendue. En fait, la qualité des résultats pourrait être améliorée grâce à l'augmentation de l'utilisation des nouvelles technologies et des méthodes d'analyse les plus récentes. L'utilisation croissante de drones, par exemple, sans doute améliore l'un des aspects les plus problématiques de la méthodologie, liée à l'acquisition et à l'amélioration de la qualité des images. L'utilisation du logiciel BASEGRAIN nous donne une contribution importante concernant le temps et les énergies dédiées avec les méthodes traditionnelles à l'élaboration des données, en particulier pour les images de calibration. Sur les images exondées l'utilisation a été très fluide, mais pour les images submergées des difficultés ont été retrouvées : la présence de reflets sur les images ou de biofilms sur les particules a rendu le travail d'analyse plus laborieux. On envisage l'extension de l'utilisation du logiciel d'une manière plus continue (même dans les zones inaccessibles lors de la levée des données) pour améliorer la précision dans l'analyse de la distribution de la granulométrie, par exemple avec l'utilisation des dispositifs pour l'enregistrement en continu des images submergées.

Les études et les projets futurs devraient concentrer leur attention principalement sur la composante submergée de la taille des particules, afin de surmonter les limites imposées par l'acquisition d'images et leur interprétation. Ce passage devient, en fait, crucial pour comprendre la dynamique des habitats fluviaux. La caractérisation des différents habitats, leur connectivité et leur utilisation au cours des différentes étapes du cycle de vie des espèces de poisson, comme le saumon atlantique, deviennent ainsi l'un des outils les plus importants et les plus efficaces pour la gestion des cours d'eau et écosystèmes fluviaux en général.

Utilisation des données de granulométrie pour intégrer une simulation hydraulique - Les données de taille des particules peuvent être utilisées pour les simulations hydrauliques à

effectuer avec le logiciel HEC-RAS. Il s'agit d'un logiciel (conçu par le *Hydrologic Engineering Center* des *US Army Corps of Engineers*) intégré pour l'analyse et la simulation hydraulique des écoulements à surface libre. HEC-RAS permet de simuler les écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments, l'érosion et de faciliter la conception de certains types d'ouvrages hydrauliques. Une des données d'entrée les plus sensibles pour une simulation hydraulique est en fait le coefficient de rugosité de Manning.

La possibilité de pouvoir inclure des données avec un degré de précision aussi élevé pourrait garantir des améliorations considérables des résultats obtenus par une simulation hydraulique pour un tronçon ou pour la totalité du cours d'eau avec une définition plus précise, par exemple, du n de Manning. Sur la rivière Ste-Marguerite, de nombreux paramètres morphologiques ont été recueillis, comme la géométrie de plusieurs sections. Pour la pente, un paramètre qui est toujours difficile à estimer, une étude est en cours à travers un instrument de bathymétrie (conçu par la compagnie Multi-Électronique) qui s'appelle Hydroball (Rondeau, 2014).

Il s'agit d'un sonar monofaisceau autonome, en forme de bouée, doté d'un GPS et d'un gyrocompas (fréquence d'acquisition de données de 1 Hz, un sonar opérant à 235 kHz et une plage d'opération de 0,5 m à 100 m.) (Figure 52). Un des buts du projet est obtenir des informations sur la rugosité du lit des milieux riverains.



Figure 52 - Exemple de bouée Hydroball (CIDCO)

L'intégration des valeurs de taille des particules, à ce niveau de détail, peut devenir un atout important pour les études et analyses subséquentes. Voici quelques exemples :

Intégration de la cartographie du substrat dans le projet de colonisation « *Conservation Translocation Program* » en cours sur la Sainte Marguerite Nord-est. - Le substrat demeure une variable d'habitat très importante pour comprendre les dynamiques concernant la présence et la croissance des saumons juvéniles. Plus en détail, dans le développement d'un projet connexe (Danielle Frechette, étudiante au doctorat en Sciences de l'eau INRS-ETE), la connaissance de la taille de la distribution des particules sur le cours d'eau et l'opportunité de la réalisation d'une cartographie pourraient apporter des avantages supplémentaires en matière d'intégration des informations. Dans le cadre du « Programme de mise en valeur des habitats du saumon atlantique de la Côte-Nord », l'initiative de translocation de conservation a été amorcée en 2014 sur la rivière Sainte Marguerite Nord-est. Une partie des saumons qui remontent cet affluent en 2014, 2015 et 2016 ont été capturés dans la passe migratoire située au km 7, et ensuite transportés par camion, et libérés en amont de deux chutes qui agissent comme un obstacle naturel au passage du poisson et à la connectivité entre les habitats. On s'attendait à ce que la densité d'alevinage diminue en raison de la diminution de la densité des adultes qui fraient, entraînant des taux de croissance élevés et une survie accrue due à des réductions des effets dépendant de la densité sur la croissance et la survie. Cependant, l'emplacement et la disponibilité de l'habitat de fraie affecteront la densité de l'alevinage : si les frayères sont regroupées, la densité juvénile peut encore être élevée, même si le nombre d'adultes diminue.

Perspective de gestion : utilisation de la méthode pour la caractérisation de l'habitat - La méthode pourrait être prise en considération, par exemple, pour approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle de la dynamique sédimentaire dans une rivière et ainsi aider les principaux gestionnaires dans la mise en place de mesures de gestion reliées à la qualité des habitats aquatiques et les impacts morphologiques des différents ouvrages. Une opération comme le relevé et la cartographie des sites de fraie serait facilitée par les outils présentés dans ce mémoire.

À la suite de travaux en berge ou près des cours d'eau, de l'érosion des berges ou de la pollution, les caractéristiques granulométriques des frayères peuvent se détériorer et s'altérer. Alors, un nombre insuffisant de frayères peut devenir un facteur limitant dans la reproduction

des espèces qui sont présentes dans la rivière. Il serait possible de réaliser une analyse granulométrique sur les sites potentiellement impactés afin d'évaluer l'état des frayères.

S'il s'avère qu'il y a effectivement eu altération du substrat, l'aménagement ou la restauration d'une frayère devient alors une étape cruciale pour l'amélioration des conditions de reproduction. Les frayères peuvent être créées ou améliorées par l'ajout de substrat d'une granulométrie adéquate et par une modification des conditions hydrauliques du cours d'eau.

Cette étude a approché l'habitat fluvial d'une espèce très importante, pour différentes raisons, comme le saumon atlantique. Dans le cycle de vie du saumon, l'habitat de fraie et la taille des particules composant le substrat revêtent une grande importance. Approfondir et intégrer la connaissance des rivières graveleuses et leurs dynamiques sédimentaires nous aide à bâtir des outils, comme une cartographie du substrat à l'aide d'images aériennes, qui soient capables de fournir des solutions pour la conservation des populations de saumon atlantique et de leur habitat en rivière.

Références

- Adams J (1979) Gravel size analysis from photographs. *Journal of the Hydraulics Division* 105(HY10):1247-1255.
- Armstrong JD, Kemp PS, Kennedy GJA, Ladle M & Milner NJ (2003) Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research* 62(2):143-170.
- ASCE (2006) ASCE Manual of Practice 110 — Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice. *World Environmental and Water Resource Congress 2006*, doi:10.1061/40856(200)94.
- ASF GPF (2011) Economic Value of Wild Atlantic Salmon. (Atlantic Salmon Federation).
- Baglinière JL & Champigneulle A (1986) Population estimates of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*, as indices of smolt production in the R. Scorff, Brittany. *Journal of Fish Biology* 29(4):467-482.
- Bangen SG, Wheaton JM, Bouwes N, Bouwes B & Jordan C (2014) A methodological intercomparison of topographic survey techniques for characterizing wadeable streams and rivers. *Geomorphology* 206(Supplement C):343-361.
- Bardonnet A & Baglinière J-L (2000) Freshwater habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(2):497-506.
- Berg OK (1985) The formation of non-anadromous populations of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in Europe. *Journal of Fish Biology* 27(6):805-815.
- Black M, Carbonneau P, Church M & Warburton J (2014) Mapping sub-pixel fluvial grain sizes with hyperspatial imagery. *Sedimentology* 61(3):691-711.
- Brasington J, Vericat D & Rychkov I (2012) Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. *Water Resources Research* 48(11):n/a-n/a.
- Buck RJG & Hay DW (1984) The relation between stock size and progeny of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in a Scottish stream. *Journal of Fish Biology* 24(1):1-11.
- Bunte K & Abt SR (2001) *Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. 428 S. p
- Buscombe D (2008) Estimation of grain-size distributions and associated parameters from digital images of sediment. *Sedimentary Geology* 210(1):1-10.
- Buscombe D (2013) Transferable wavelet method for grain-size distribution from images of sediment surfaces and thin sections, and other natural granular patterns. *Sedimentology* 60(7):1709-1732.
- Buscombe D, Rubin DM & Warrick JA (2010) A universal approximation of grain size from images of noncohesive sediment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 115(F2):n/a-n/a.
- Butler JB, Lane, S.N, Chandler, J.H. (2001) Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing. *Journal of Hydraulic Research* 39(4):519-529.
- Caloz R & Collet C (2001) *Traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec, Sainte-Foy (Québec). 386 p. p
- Carbonneau PE, Bergeron N & Lane SN (2005) Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research* 41(11):n/a-n/a.
- Carbonneau PE, Lane SN & Bergeron NE (2004) Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery. *Water Resources Research* 40(7):n/a-n/a.

- Carbonneau, Bizzi S & Marchetti G (2017) Robotic photosieving from low-cost multirotor sUAS: A proof-of-concept. *Earth Surface Processes and Landforms* 10.1002/esp.4298:n/a-n/a.
- Chandler JH, Rice, S., Church, M. (2004) Colour aerial photography for riverbed classification. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34(The International Archives of the Photogrammetry).
- Chapman DW (1988) Critical Review of Variables Used to Define Effects of Fines in Redds of Large Salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* 117(1):1-21.
- Church MA, McLean, D.G., & Wolcott, J.F. (1987) River bed gravels: sampling and analysis. *Sediment transport in gravel-bed rivers* (C.R. Thorne, J.C. Bathurst, & R.D. Hey (Eds.)):pp. 43–79.
- Cunjak RA (1988) Behaviour and Microhabitat of Young Atlantic Salmon (*Salmo salar*) during Winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45(12):2156-2160.
- Cunjak RA & Therrien J (1998) Inter-stage survival of wild juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Fisheries Management and Ecology* 5(3):209-223.
- Danie DS, J.G. Trial and J.G. Stanley (1984) Species profiles: life histories and environmental requirements of coastal fish and invertebrates (North Atlantic) Atlantic salmon. Édit Service USFaW), p 19 pp.
- Davey C & Lapointe M (2007) Sedimentary links and the spatial organization of Atlantic salmon (*Salmo salar*) spawning habitat in a Canadian Shield river. *Geomorphology* 83(1):82-96.
- Detert M & Weitbrecht V (2012) Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains - A free stand-alone tool. *River Flow 2012*, CRC Press. p 595-600.
- Detert M & Weitbrecht V (2013) User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. *Advances in science and research*:1789-1795.
- Dugdale, Carbonneau PE & Campbell D (2010) Aerial photosieving of exposed gravel bars for the rapid calibration of airborne grain size maps. *Earth Surface Processes and Landforms* 35(6):627-639.
- Entwistle N & Fuller I (2009) *Terrestrial Laser Scanning to Derive Surface Grain Size Facies Character of Gravel Bars*. 102-114 p
- Fausch KD, Torgersen CE, Baxter CV & Li HW (2002) Landscapes to Riverscapes: Bridging the Gap between Research and Conservation of Stream Fishes A Continuous View of the River is Needed to Understand How Processes Interacting among Scales Set the Context for Stream Fishes and Their Habitat. *BioScience* 52(6):483-498.
- Finstad AG, Einum S, Forseth T & Ugedal O (2007) Shelter availability affects behaviour, size-dependent and mean growth of juvenile Atlantic salmon. *Freshwater Biology* 52(9):1710-1718.
- Fleming IA, Jonsson B, Gross MR & Lamberg A (1996) An Experimental Study of the Reproductive Behaviour and Success of Farmed and Wild Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *Journal of Applied Ecology* 33(4):893-905.
- Fonstad MA, Dietrich JT, Courville BC, Jensen JL & Carbonneau PE (2013) Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(4):421-430.
- Fridriksdottir R (2013) Is there any hope for the wild atlantic salmon?).
- Fripp JB & Diplas P (1993) Surface Sampling in Gravel Streams. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(4):473-490.
- Ghani AS & Mat Isa NA (2014) Underwater image quality enhancement through composition of dual-intensity images and Rayleigh-stretching. *Springerplus* 3:757.
- Gibson RJ & Cutting RE (1993) *Production of juvenile Atlantic salmon, Salmo salar, in natural waters*. National Research Council Canada, Ottawa. Online-Ressource p

- Graham DJ, Reid I & Rice SP (2005) Automated Sizing of Coarse-Grained Sediments: Image-Processing Procedures. *Mathematical Geology* 37(1):1-28.
- Graham DJ, Rollet A-J, Piégay H & Rice SP (2010) Maximizing the accuracy of image-based surface sediment sampling techniques. *Water Resources Research* 46(2):n/a-n/a.
- Greig SM, Sear DA & Carling PA (2005a) The impact of fine sediment accumulation on the survival of incubating salmon progeny: implications for sediment management. *The Science of the total environment* 344(1-3):241-258.
- Greig SM, Sear DA & Carling PA (2007) A review of factors influencing the availability of dissolved oxygen to incubating salmonid embryos. *Hydrological Processes* 21(3):323-334.
- Greig SM, Sear DA, Smallman D & Carling PA (2005b) Impact of clay particles on the cutaneous exchange of oxygen across the chorion of Atlantic salmon eggs. *Journal of Fish Biology* 66(6):1681-1691.
- Hansen J- (2003) Origin and migration of wild and escaped farmed Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in oceanic areas north of the Faroe Islands. *ICES Journal of Marine Science* 60:110–119.
- Hansen L & T. Q (1998) The marine phase of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) life cycle, with comparisons to Pacific salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(S1):104-118.
- Haralick RM, Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973) Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* SMC-3(3):610-621.
- Harwin S & Lucieer A (2012) Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing* 4(6):1573.
- Heggenes J (1990) Habitat utilization and preferences in juvenile atlantic salmon (*salmo salar*) in streams. *Regulated Rivers: Research & Management* 5(4):341-354.
- Heggenes J, Baglinière JL & Cunjak RA (1999) Spatial niche variability for young Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) in heterogeneous streams. *Ecology of Freshwater Fish* 8(1):1-21.
- Hendry C-HD (1997) *Restoration of riverine salmon habitats.*
- Heritage GL & Milan DJ (2009) Terrestrial Laser Scanning of grain roughness in a gravel-bed river. *Geomorphology* 113(1):4-11.
- Hervouet A, Dunford R, Piégay H, Belletti B & Trémélo M-L (2011) Analysis of Post-flood Recruitment Patterns in Braided-Channel Rivers at Multiple Scales Based on an Image Series Collected by Unmanned Aerial Vehicles, Ultra-light Aerial Vehicles, and Satellites. *GIScience & Remote Sensing* 48(1):50-73.
- Hodge R, Brasington J & Richards K (2009a) Analysing laser-scanned digital terrain models of gravel bed surfaces linking morphology to sediment transport processes and hydraulics, *Sedimentology* Volume 56, Issue 7. in *Sedimentology*, p 2024-2043.
- Hodge R, Brasington J & Richards K (2009b) In situ characterization of grain-scale fluvial morphology using Terrestrial Laser Scanning *Earth Surface Processes and Landforms* Volume 34, Issue 7. in *Earth Surface Processes and Landforms*, p 954-968.
- Hohenthal J, Alho P, Hyyppä J & Hyyppä H (2011) Laser scanning applications in fluvial studies. *Progress in Physical Geography* 35(6):782-809.
- Ibbeken H & Schleyer R (1986) Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* 11(1):59-77.
- ICES (2013) Report of the Working Group on North Atlantic Salmon (WGNAS). (International Council for the Exploration of the Sea), p 380.

- Johnston P (2011) *Utilisation des transpondeurs passifs dans l'étude du comportement spatial et de la dynamique énergétique des saumons atlantique juvéniles (Salmo salar) le long de tronçons sédimentaires* PhD (Université du Québec).(Consulté le 2011)
- Kim M (2009) *The control of sedimentary link on the spatial distribution of atlantic salmon (salmo salar) juveniles and spawning activity along rivers in the Gaspé peninsula, Canada.* (McGill University).
- Klemetsen A, Amundsen PA, Dempson JB, Jonsson B, Jonsson N, O'Connell MF & Mortensen E (2003) Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish* 12(1):1-59.
- Lachapelle C (1986) *Utilisation abusive des méthodes de régression et de corrélation: exemple d'applications en sciences de l'eau.* (Université du Québec).
- Laliberte AS, Goforth MA, Steele CM & Rango A (2011) Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments. *Remote Sensing* 3(11):2529.
- Leeder MR (1983) On the dynamics of sediment suspension by residual Reynolds stresses—confirmation of Bagnold's theory. *Sedimentology* 30(4):485-491.
- Lowe DG (2004) Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60(2):91-110.
- Maddock I (1999) The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater Biology* 41(2):373-391.
- Maillard P (2003) Comparing Texture Analysis Methods through Classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69(4):357-367.
- Marchetti (2017) *Overall grain size mapping from sentinel 2 images.* (Politecnico di Milano).
- McDowall RM (1988) *Diadromy in fish migrations between freshwater and marine environments.* Croom Helm, London <etc.>. IX, 308 S. p
- MFFP (2016) Plan de gestion du saumon atlantique 2016-2026. Édité Ministère Des Forêts DLFEDP, Direction Générale De L'expertise Sur La Faune Et Ses Habitats, Direction De La Faune Aquatique, Québec), p 40 p.
- Mikkelsen TS, Ku M, Jaffe DB, Issac B, Lieberman E, Giannoukos G, Alvarez P, Brockman W, Kim TK, Koche RP, Lee W, Mendenhall E, O'Donovan A, Presser A, Russ C, Xie X, Meissner A, Wernig M, Jaenisch R, Nusbaum C, Lander ES & Bernstein BE (2007) Genome-wide maps of chromatin state in pluripotent and lineage-committed cells. *Nature* 448(7153):553-560.
- Milan DJ (1996) The application of freeze-coring for siltation assessment in a recently regulated stream. in *Hydrologie dans les pays celtiques*, Édité Paris IRennes, France).
- Milan DJ & Heritage GL (2012) LiDAR and ADCP Use in Gravel-Bed Rivers: Advances Since GBR6. *Gravel-Bed Rivers*, John Wiley & Sons, Ltd, 10.1002/9781119952497.ch22. p 286-302.
- Mills DH & Mills D (1989) *Ecology and management of Atlantic salmon.* Chapman and Hall, London etc. XIII, 351 S. p
- Moir HJM, Gibbins CNGN, Buffington JMBM, Webb JHWH, Soulsby C & Brewer MJB (2009) A new method to identify the fluvial regimes used by spawning salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66(9):1404-1408.
- Neitzel F & Klonowski J (2011) *Mobile 3D Mapping with a Low-cost UAV System.* 1-6 p
- Niethammer U, James MR, Rothmund S, Travelletti J & Joswig M (2012) UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology* 128(Supplement C):2-11.
- Pasher J & King DJK (2011) Development of a forest structural complexity index based on multispectral airborne remote sensing and topographic data This article is one of a selection of papers from

- Extending Forest Inventory and Monitoring over Space and Time. *Canadian Journal of Forest Research* 41(1):44-58.
- Peterson (1978) Physical characteristics of Atlantic salmon spawning gravel in some New Brunswick streams. *Fisheries & Marine Service Technical Report* 785:1-28.
- Petrie G (2013) Commercial operation of lightweight UAVs for aerial imaging and mapping. *GEOInformatics* 16(1):28-39.
- Rader RB (1997) A functional classification of the drift: traits that influence invertebrate availability to salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54(6):1211-1234.
- Rice S & Church M (1998) Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(4):345-363.
- Rimmer DM, Paim U & Saunders RL (1984) Changes in the Selection of Microhabitat by Juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*) at the Summer–Autumn Transition in a Small River. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 41(3):469-475.
- Roche P (1994) Habitat Availability and Carrying Capacity in the French Part of the Rhine for Atlantic Salmon (*Salmo Salar* L.). *Water Science and Technology* 29(3):257-265.
- Rondeau M (2014) HydroBall a fully-autonomous buoy for bathymetric data collection. in *Oceanology International 2014* London).
- Rubin DM (2004) A simple autocorrelation algorithm for determining grain size from digital images of sediment. *Journal of Sedimentary Research* 74(1):160-165.
- Russ J (1992) *The Image Processing Handbook*.
- Schettini R & Corchs S (2010) Underwater Image Processing: State of the Art of Restoration and Image Enhancement Methods. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2010(1):746052.
- Schmocker L & Weitbrecht V (2013) Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(7):683-695.
- Sear DA (2008) *Salmonid spawning habitat in rivers physical controls, biological responses, and approaches to remediation proceedings of the symposium "Physical Factors Affecting Salmon Spawning and Egg Survival to Emergence: Integrating Science and Remediation Management", held in Quebec City, Quebec, Canada, August 13-14, 2003*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. 376 S. p
- Shannon & Weaver W (1949) *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, Ill. VI, 117 p. p
- Smart G, Aberle J, Duncan M & Walsh J (2004) Measurement and analysis of alluvial bed roughness / Mesure et analyse de la rugosité de lit d'alluvion. *Journal of Hydraulic Research* 42(3):227-237.
- Symons PEK & Heland M (1978) Stream Habitats and Behavioral Interactions of Underyearling and Yearling Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 35(2):175-183.
- Tamminga A, Hugenholtz C, Eaton B & Lapointe M (2015) Hyperspatial Remote Sensing of Channel Reach Morphology and Hydraulic Fish Habitat Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A First Assessment in the Context of River Research and Management. *River Research and Applications* 31(3):379-391.
- Tremblay V (2010) *Estimation de la taille du substrat et de la profondeur d'une rivière à partir d'images aériennes couleurs à haute résolution*. (Université du Québec).
- Trimble (2003) *5700/5800 GPS Receiver User Guide.*, <https://www.unavco.org/projects/project-support/polar/support/5700manual.pdf>

- Turner D, Lucieer A & Watson C (2012) An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing* 4(5):1392.
- Vázquez-Tarrío D, Borgniet L, Liébault F & Recking A (2017) Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology* 285(Supplement C):94-105.
- Verdú JM, Batalla RJ & Martínez-Casasnovas JA (2005) High-resolution grain-size characterisation of gravel bars using imagery analysis and geo-statistics. *Geomorphology* 72(1):73-93.
- Verhoeven G (2012) Getting computer vision airborne—using Structure from Motion for accurate orthophoto production. RSPSoc Archaeology Special Interest Group Meeting Spring 2012:4-6.
- Wańkowski JWJ & Thorpe JE (1979) Spatial distribution and feeding in atlantic salmon, *Salmo salar* L. juveniles. *Journal of Fish Biology* 14(3):239-247.
- Watts AC, Ambrosia VG & Hinkley EA (2012) Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing* 4(6):1671.
- Wentworth CK (1922) <<The>> *geology and coal resources of Russell County, Virginia*. University of Virginia, Charlottesville. 179 S. p
- Westoby, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ & Reynolds JM (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179(Supplement C):300-314.
- Westoby, Dunning S, Woodward J, Hein A, Marrero S, Winter K & Sugden D (2016) Interannual surface evolution of an Antarctic blue-ice moraine using multi-temporal DEMs. *Earth Surface Dynamics* 4(2):515-529.
- Wolman MG (1954) A method of sampling coarse river-bed material. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 35(6):951-956.
- Woodget (2015) *Quantifying Physical River Habitat Parametres Using Hyperspatial Resolution UAS Imagery and SfM-photogrammetry*. . (University of Worcester).
- Woodget, Austrums R, Maddock IP & Habit E (2017a) Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 4(4):e1222-n/a.
- Woodget, Fyffe & Carbonneau (2017b) From manned to unmanned aircraft: Adapting airborne particle size mapping methodologies to the characteristics of sUAS and SfM. *Earth Surface Processes and Landforms* 10.1002/esp.4285:n/a-n/a.
- Woodget, Visser F, Maddock IP & Carbonneau PE (2016) The Accuracy and Reliability of Traditional Surface Flow Type Mapping: Is it Time for a New Method of Characterizing Physical River Habitat? *River Research and Applications* 32(9):1902-1914.

ANNEXE 1

Estimation visuelle du D_{50} et D_{84} par deux observateurs (en ordre chronologique d'estimation et de prise des données de calibration sur le terrain)

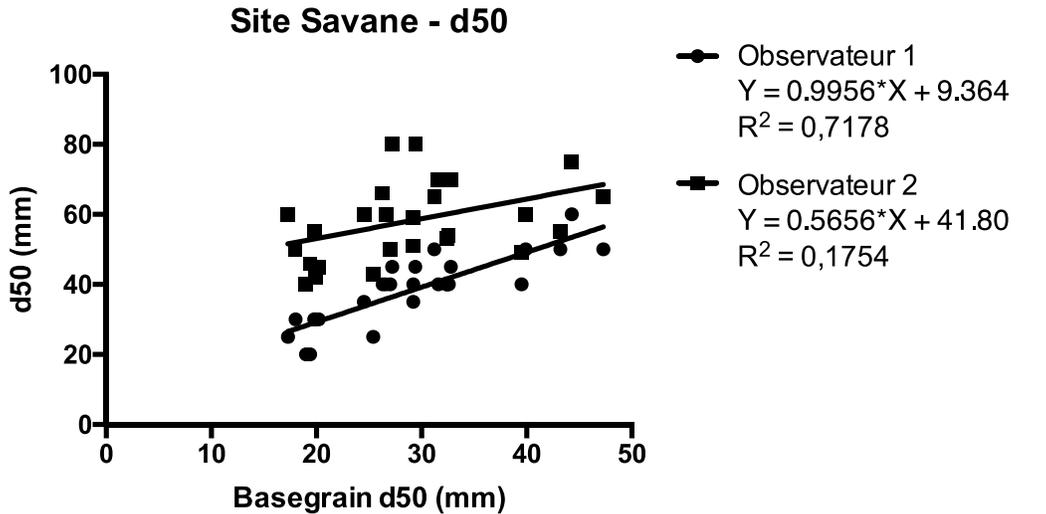


Figure 53 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN - Savane

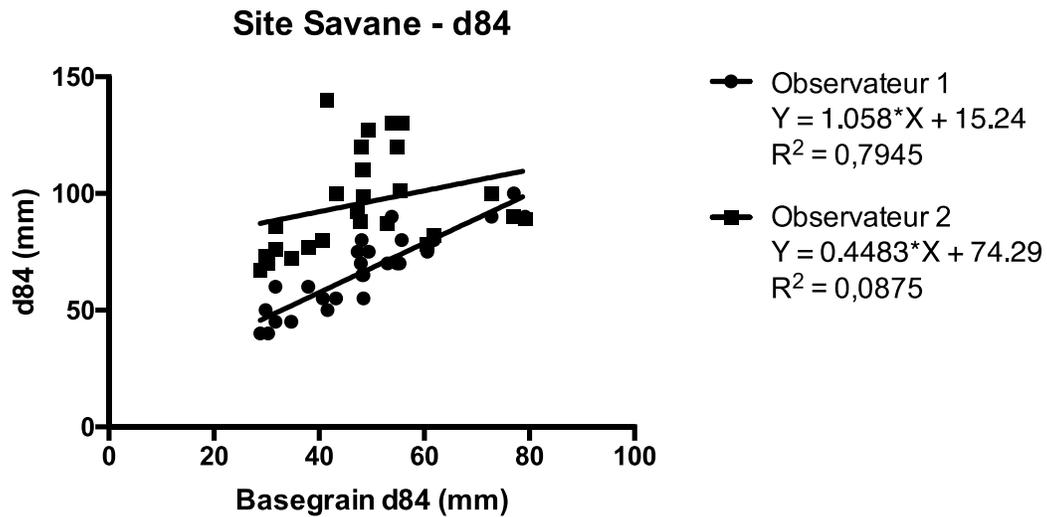


Figure 54 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN - Savane

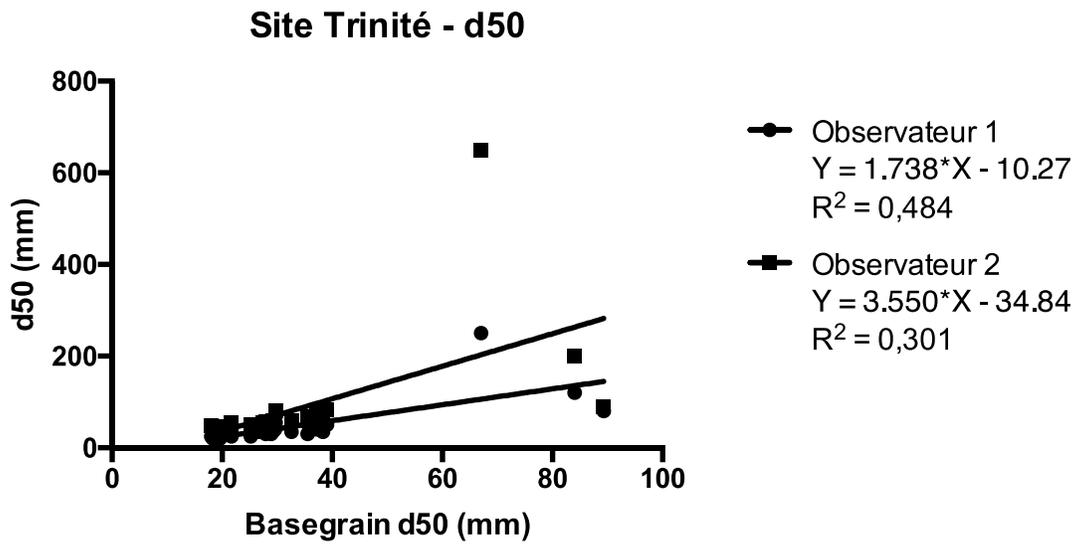


Figure 55 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN – Trinité

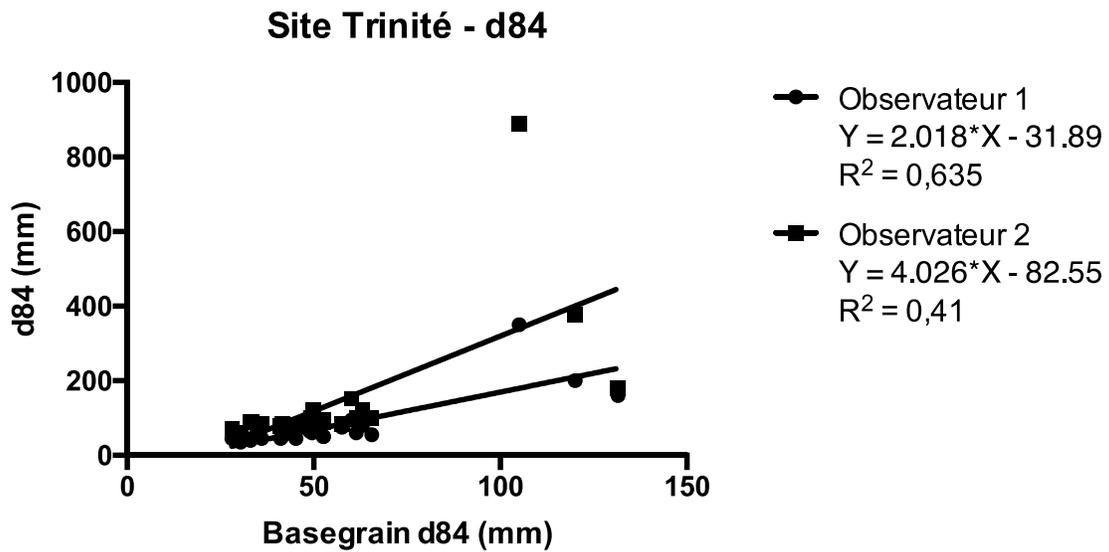


Figure 56 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN – Trinité

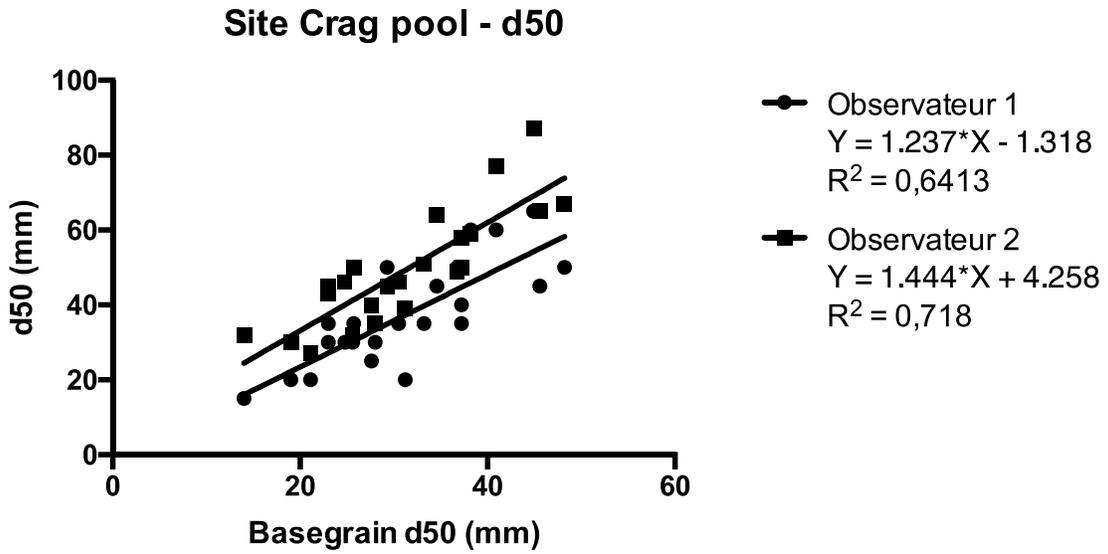


Figure 57 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN — Crag pool

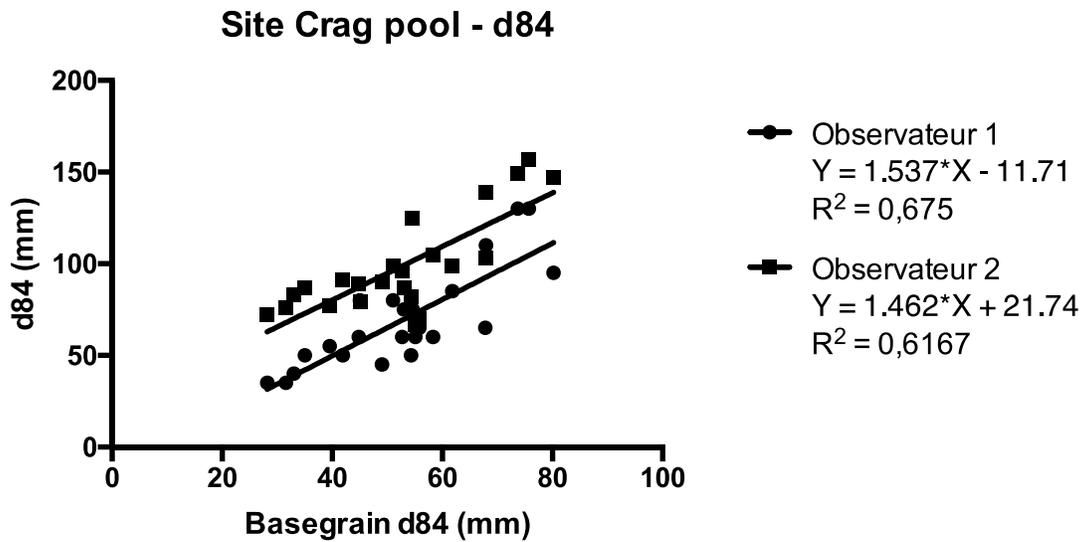


Figure 58 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN — Crag pool

Site Hill station - d50

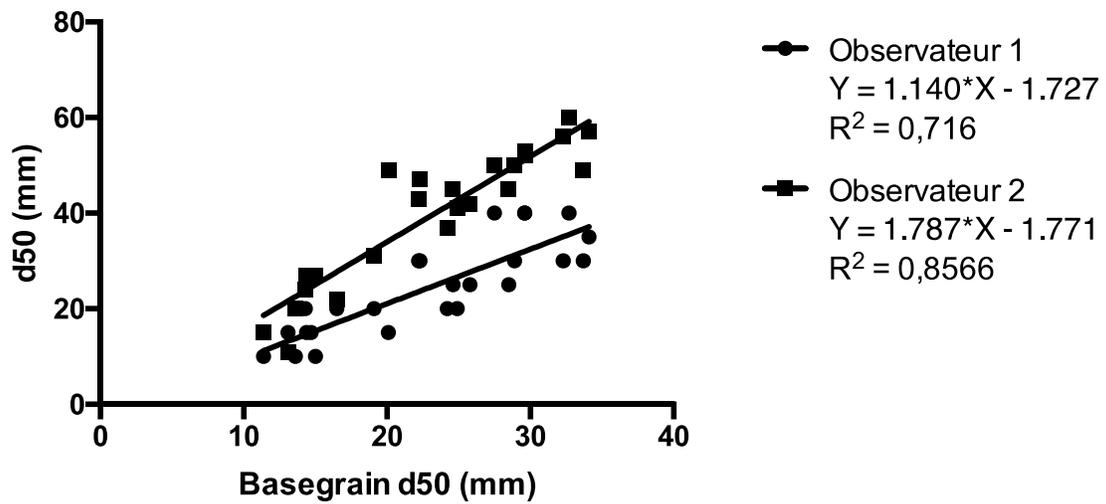


Figure 59 - Estimation visuelle d50 vs BASEGRAIN — Hill station

Site Hill station - d84

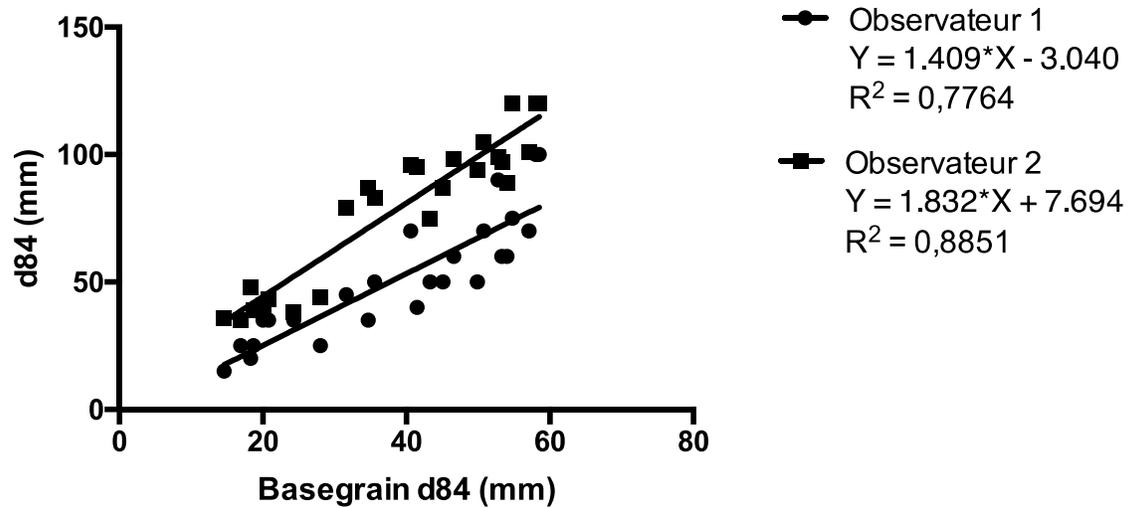


Figure 60 - Estimation visuelle d84 vs BASEGRAIN — Hill station

ANNEXE 2 : ESTIMATION DES INTERSTICES

Tableau 17 – Estimation des interstices – site Savane

Site	d50 (mm)	d84 (mm)	6mm	9mm	12mm	17mm	21mm
SV1	47.3	77	16	12	8	5	4
SV2	44.3	72.8	16	13	10	7	5
SV3	43.2	79.2	15	12	7	4	2
SV4	39.9	61.8	12	9	7	5	2
SV5	39.5	60.6	3	1	0	0	0
SV6	32.4	55.3	3	1	1	1	0
SV7	32.6	53	2	0	0	0	0
SV8	26.3	47.3	4	3	1	0	0
SV9	32.4	54.8	8	3	2	0	0
SV10	25.4	37.9	2	1	0	0	0
SV11		sable	0	0	0	0	0
SV12		sable	0	0	0	0	0
SV13	31.2	55.7	3	0	0	0	0
SV14	31.6	48.4	12	10	5	2	0
SV15	27.2	49.4	8	5	3	2	0
SV16	29.2	48.4	10	0	0	0	0
SV17	19.8	31.7	2	0	0	0	0
SV18	19	30.3	1	1	0	0	0
SV19	32.8	53.8	7	1	1	1	0
SV20	29.4	48.1	10	7	4	1	0
SV22	26.6	48.2	7	4	4	2	0
SV23	27	40.7	4	1	1	0	0
SV24	24.5	43.2	6	4	2	0	0
SV25	20.2	29.8	7	0	0	0	0
SV26	17.3	41.6	3	0	0	0	0
SV27	19.9	34.7	4	0	0	0	0
SV28	18	31.7	5	0	0	0	0
SV29	29.2	47.9	8	5	0	0	0
SV30	19.4	28.8	4	1	0	0	0

Tableau 18 - Estimation des interstices – site Trinité

Site	d50 (mm)	d84 (mm)	6mm	9mm	12mm	17mm	21mm
TR4	29.2	52.6	7	4	2	1	1
TR5	37.1	65.5	10	8	2	1	1
TR6	38.3	61.4	9	5	3	3	3
TR7	35.7	57.5	8	6	2	0	0
TR8				Limon			
TR9	32.6	48.9	6	5	0	0	0
TR10	28.9	45.2	12	3	1	0	0
TR11	21	35	11	4	0	0	0
TR12				Limon			
TR13	18	33	6	0	0	0	0
TR15	25.2	41.1	7	2	0	0	0
TR16	21.7	33.3	4	0	0	0	0
TR17	27.4	49.5	10	2	0	0	0
TR18	27.9	48.7	5	3	2	1	0
TR19	29.6	49.3	5	1	1	1	0
TR20	21.5	36	14	0	0	0	0
TR21	29.7	49.9	8	1	0	0	0
TR22	39	60.1	12	8	4	1	0
TR23	26.6	41.5	7	1	0	0	0
TR24	19	28	4	0	0	0	0
TR25	27.8	43.5	8	3	0	0	0
TR26	35.5	52.5	8	0	0	0	0
TR27	18.3	30.4	0	0	0	0	0
TR28	37.2	63	14	2	2	2	2
TR29	19.6	29.6	2	0	0	0	0

Tableau 19 - Estimation des interstices – site Crag pool

Site	d50 (mm)	d84 (mm)	6mm	9mm	12mm	17mm	21mm
CP7	29.3	45	15	4	2	1	0
CP11	37.2	67.8	10	3	1	0	0
CP12	37.2	58.3	8	3	2	0	0
CP18	36.8	53	17	8	0	0	0
CP15	34.6	52.7	23	13	1	2	1
CP16	31.2	55.1	0	0	0	0	0
CP4	28	55.8	5	2	2	1	0
CP23	24.8	39.5	6	0	0	0	0
CP5	30.5	54.3	7	0	0	0	0
CP19	23	51	12	0	0	0	0
CP9	40.9	73.7	30	15	9	5	2
CP6	45.6	61.8	25	9	6	2	1
CP25	33.2	54.6	24	11	7	0	0
CP14	38.2	67.9	30	15	9	3	3
CP24	48.2	80.2	29	12	5	1	0
CP27	23	35	9	2	0	0	0
CP13	25.6	41.9	2	0	0	0	0
CP8	25.7	44.8	5	0	0	0	0
CP10	19	28.2	0	0	0	0	0
CP29	21.1	31.6	1	0	0	0	0
CP3	sable		0	0	0	0	0
CP1	sable		0	0	0	0	0
CP2	14	33	2	0	0	0	0
CP21	27.6	49	6	4	0	0	0
CP20	44.9	75.7	26	16	11	2	1

Tableau 20 - Estimation des interstices – site Hill Station

Site	d50 (mm)	d84 (mm)	6mm	9mm	12mm	17mm	21mm
H1	29.6	46.6	7	3	2	0	0
H2	33.7	50.8	3	0	0	0	0
H3	24.2	43.3	4	1	0	0	0
H5	27.5	40.6	4	2	0	0	0
H6	28.9	54.8	5	1	1	0	0
H7	24.9	45.1	4	0	0	0	0
H8	28.5	53.3	5	2	0	0	0
H9	29.6	52.8	6	0	0	0	0
H11	32.3	57.1	6	1	0	0	0
H12	14.7	18.7	0	0	0	0	0
H13	11.4	14.6	0	0	0	0	0
H14	22.3	35.6	1	0	0	0	0
H15	très imbriqué		0	0	0	0	0
H16	13.6	18.3	0	0	0	0	0
H17	sable		0	0	0	0	0
H18	16.5	24.3	0	0	0	0	0
H19	13.1	16.9	0	0	0	0	0
H20	14.3	20	0	0	0	0	0
H21	sable		0	0	0	0	0
H22	25.8	54	4	0	0	0	0
H23	24.6	49.9	2	0	0	0	0
H24	15	28	0	0	0	0	0
H25	sable		0	0	0	0	0
H26	14.4	20.8	0	0	0	0	0
H27	sable		0	0	0	0	0
H28	22.2	41.5	3	2	1	0	0
H29	19.1	34.7	0	0	0	0	0
H30	32.7	58	6	2	1	0	0
H31	34.1	58.5	9	2	0	0	0