



HAL
open science

**Les bancs de graviers de l'Arc en Maurienne.
Constitution d'une base de données et analyse de
l'évolution des bancs de graviers à partir d'un levé
LiDAR et de données image**

C. Eldin

► **To cite this version:**

C. Eldin. Les bancs de graviers de l'Arc en Maurienne. Constitution d'une base de données et analyse de l'évolution des bancs de graviers à partir d'un levé LiDAR et de données image. Sciences de l'environnement. 2012. hal-02597290

HAL Id: hal-02597290

<https://hal.inrae.fr/hal-02597290>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UFR de Géographie – Université Paris 1 Panthéon Sorbonne

Master 2ème année Recherche *Espace, Dynamique des Milieux et des Risques*

Les bancs de graviers de l'Arc en Maurienne

Constitution d'une base de données et analyse
de l'évolution des bancs de graviers à partir
d'un levé LiDAR et de données image

ELDIN Cléa

Responsable de stage

PENARD Lionel, IRSTEA Lyon
CAMENEN Benoît, IRSTEA Lyon
GOB Frédéric, LGP-CNRS

Membres du jury

CORDIER Stéphane, LGP-CNRS
FORT Monique, PRODIG

Rapport de stage
Février-Juillet 2012

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toute l'équipe HH Irstea Lyon pour son accueil chaleureux, tout particulièrement Lionel PENARD et Benoît CAMENEN pour m'avoir encadrée durant ces six mois de stage. Merci à eux notamment pour leurs conseils avisés, leurs disponibilités et leurs rigueurs scientifiques.

Je remercie également Mohamed JABALLAH et tous les autres doctorants et permanents pour leur bonne humeur à la pause café et au sport, Marina, François, Thomas, Germain, Marco,...

Pour finir je salue les autres stagiaires et CDD d'Irstea, Armand un collègue appréciable mais qui chante et siffle à tue-tête sans arrêt, Julien, Kerstin, Coralie, Lucas, Alban, Raphaël, Géraldine et ceux que j'oublie....

Table des matières

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1. Contexte du stage.....	1
1.1 Présentation IRSTEA.....	1
1.2 Objectifs du stage.....	1
1.3 Plan de l'étude.....	3
2. Contexte de l'étude.....	3
2.1 Contexte géologique.....	3
2.2 Contexte climatique.....	4
2.3 Présentation de l'Arc en Maurienne.....	5
2.4 Le régime hydrologique et le transport sédimentaire de l'Arc en Maurienne.....	6
2.5 Présentation des zones d'étude.....	6
3. Les données.....	11
3.1 Les MNT Lidar.....	11
3.2 Les données image.....	13
CHAPITRE 2: METHODE ET RESULTATS.....	16
1. Méthode de délimitation des bancs de graviers de l'Arc à partir des MNT.....	16
1.1 Espace de travail.....	16
1.2 Frontières pour la construction du polygone.....	16
1.2.1 Frontière entre le banc et la berge	16
1.2.2.1 Cas de la frontière nette.....	17
1.2.2.2 Cas d'une frontière moins nette.....	18
1.2.2.3 Cas d'une frontière avec une incertitude élevée.....	20
1.3 Résultats de la méthode.....	22
2. Méthode de délimitation des bancs de graviers de l'Arc à partir des données image.....	24
2.1 Espace de travail.....	24
2.2 Les frontières du polygone.....	24
2.2.1 La frontière entre le banc et la berge.....	24
2.2.2 La frontière entre le banc et le chenal.....	25
CHAPITRE 3 : APPLICATION DES RESULTATS POUR L'ETUDE DES MOUVEMENTS DES BANCS.....	27
1. Étude des bancs	27
1.1 Analyse des zones d'érosion et de dépôts à court terme (mai à septembre 2010).....	27
1.1.1 Les secteurs particuliers.....	27
1.1.1.a Méthode de localisation des secteurs particuliers.....	27
1.1.1.b Application de la méthode.....	30
1.1.1.c Discussion.....	33
1.2 Étude des zones d'accumulation et d'érosion à court terme.....	42
2. Étude du mouvement des bancs de 2002 à 2010.....	49
2.1 Présentation de l'étude.....	49
2.2 Analyse diachronique des bancs.....	50
2.2.1 Evolution des bancs depuis 1997.....	50
2.2.2 Observations.....	50
2.2.3. Observations des zones végétalisées en rive droite.....	54
II. Comparaison des résultats manuels aux résultats automatiques.....	56
1. Présentation du programme TRAM.....	56
2. Évaluation du programme.....	56
CHAPITRE 4 : CONCLUSION.....	60

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1. Contexte du stage

1.1 Présentation IRSTEA

IRSTEA¹ est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. L'organisme est composé de chercheurs et d'ingénieurs issus de plusieurs disciplines, travaillant sur plusieurs thématiques tels que les risques environnementaux (crues, inondations,...), la surveillance de milieux aquatiques (usages de l'eau,...), les technologies propres (écotoxicologie, éco-évaluation,...), l'aménagement du territoire et enfin l'économie et la sociologie de l'environnement (observation de la biodiversité,...). Trois grands enjeux environnementaux portent IRSTEA, la qualité environnementale (coupler les méthodes et technologies pour comprendre et agir), la gestion durable de l'eau et du territoire (généraliser les approches multisectorielles pour mieux intégrer les eaux et territoires) et la gestion des risques naturels (élargir l'approche des risques par l'étude de la viabilité des systèmes environnementaux). Cet organisme est formé par différentes unités de recherche dont l'unité Hydrologie-Hydraulique, dans lequel le stage s'est effectué. Au sein de cette unité, trois équipes mènent leur activité sur les bassins versants, dont l'équipe *Météorologie* qui définit et met en œuvre les moyens techniques et nécessaires pour réaliser les différents projets de recherche sur les réseaux de mesure. L'équipe *Hydrologie des bassins versants* s'intéresse à la manière dont les flux hydrologiques se répartissent à une échelle spatio-temporelle, au travers des différentes composantes du cycle d'un bassin versant. Enfin, l'équipe *Hydraulique des rivières* axe ses recherches sur les écoulements dans le réseau hydrographique et leur effet, l'objectif étant une meilleure gestion des cours d'eau.

1.2 Objectifs du stage

Le stage s'inscrit dans le contexte de la thèse de Mohamed JABALLAH, (JABALLAH, 2010-2013) sous la direction de Benoît CAMENEN et André PAQUIER, qui étudie les évolutions morphologiques de l'Arc.

L'objectif du stage est le recensement des bancs de graviers de l'Arc, avec leurs principaux attributs morphologiques, permettant d'analyser la dynamique des bancs de graviers à court et long terme en s'appuyant sur des données image (photographies aériennes) et des modèles numériques de terrain (issus de levés Lidar). Parallèlement, un outil informatique a été développé en 2011 (MOREL, 2011) permettant la segmentation automatique de données Lidar d'une portion de cours d'eau en trois classes (eau, berges, bancs). En 2012, Armand POLI (stage de M2 Informatique UCB Lyon 1) développe cet outil afin que le programme segmente le cours d'eau à partir de photographies aériennes. La constitution de la base de données des bancs de graviers permettra, grâce à une méthode de délimitation des bancs, de comparer les résultats manuels de la méthode et les résultats automatiques du programme afin d'évaluer ce dernier.

L'Arc a été choisi comme site d'étude car l'équipe hydraulique des rivières étudie ce cours d'eau depuis quelques années et effectue des analyses (relevés granulométriques,...) toute l'année et plus particulièrement pendant les chasses.

Le stage se base sur les données MNT de mai et septembre où le but est le suivi du curage du bassin de Longefan. En effet, EDF a commandité les vols Lidar afin de suivre l'impact des sédiments du bassin sur le cours d'eau.

Le sujet du stage vise à étudier les mouvements des bancs de sédiments sur l'Arc. Les sédiments

1 Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (ancien CEMAGREF)

grossiers sont des éléments importants dans la dynamique hydrogéomorphologique de la rivière. En effet, lors de la période d'étiage la rivière n'ayant pas assez d'énergie, les sédiments grossiers sont déposés, tandis qu'en crue, ces derniers sont mobilisés pour ensuite être accumulés en aval. Lors d'une crue, les sédiments peuvent augmenter considérablement de la ligne d'eau et ainsi faire déborder le cours d'eau de son lit mineur et inonder les zones juxtaposées au cours d'eau. Une inondation crée un risque quand les zones inondées sont habitées. De plus, les enjeux économiques pour les autorités locales sont considérables quand le cours d'eau déborde. En effet, l'autoroute et la voie ferrée, qui relient Lyon à Turin, sont juxtaposées à la rivière ; les travaux indexés à ce phénomène sont importants.

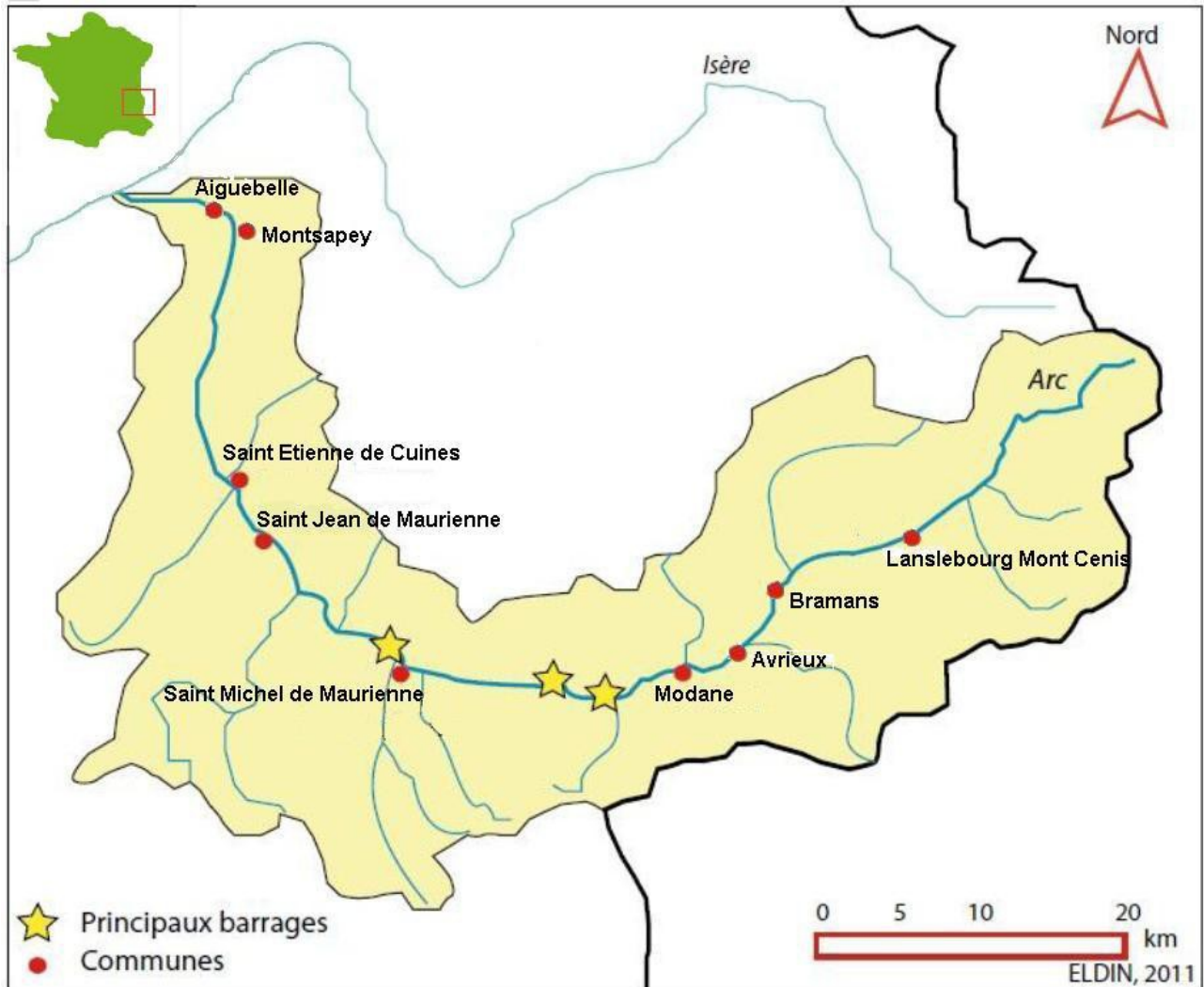


Figure 1 : Illustration du bassin versant de l'Arc en Maurienne

L'Arc s'inscrit dans la basse vallée de la Maurienne, une vallée intra-alpine. Le cours d'eau est entouré par des massifs relativement élevés (plus de 2000 m d'altitude) ; le grand massif de la Vanoise et la chaîne de la Lauzière borde la rivière en rive droite tandis que les massifs du Mont-Cenis, des Cerces, des Arves, des Grandes Rousses et de Belledonne la bordent en rive gauche. La vallée de la Maurienne est composée de deux ensembles géographiques, la Haute Maurienne et la Basse Maurienne ; ces deux ensembles se distinguent en partie par la vallée qui s'élargit. La carte de la figure 1 illustre le bassin versant de l'Arc en Maurienne où nous pouvons observer les principales communes et barrages sur le cours de l'Arc.

1.3 Plan de l'étude

Le premier chapitre présente l'introduction où nous mettons en contexte l'entreprise et les objectifs du stage. Le contexte général de l'étude englobe le contexte géologique, climatique et la présentation de l'Arc, les sites d'étude et des données qui sont aussi inscrits dans ce chapitre.

Le chapitre deux présente les deux méthodes ainsi que leurs résultats. La méthode de délimitation des bancs de graviers à partir des MNT et la méthode de délimitation des bancs de graviers à partir des données image sont présentées avec leurs résultats respectifs.

Enfin, le troisième chapitre présente l'étude des mouvements des bancs à partir des résultats des deux méthodes. Cette étude se divise en deux parties, l'une traitant les bancs en mai et septembre 2010 (les données MNT), tandis l'autre partie traite des bancs de 2002, 2006 et 2010.

2. Contexte de l'étude

2.1 Contexte géologique

La formation des Alpes a débuté au tertiaire, l'élévation du relief n'a pas été régulière, marquée par une alternance de phases de soulèvement et de repos. Pour schématiser, la première poussée, au début de tertiaire, a soulevé, à l'est, le massif cristallin interne ; tandis que la seconde poussée (fin du tertiaire) a affecté l'ouest du territoire. Au quaternaire, les Alpes ont connu quatre glaciations successives qui ont érodé l'édifice montagneux et laissé des empreintes dans le paysage actuel (cirques, moraines, lac glaciaires,...) Le soulèvement des Alpes se poursuit, en effet, certains massifs gagnent de 1 à 2 mm de hauteur chaque année.

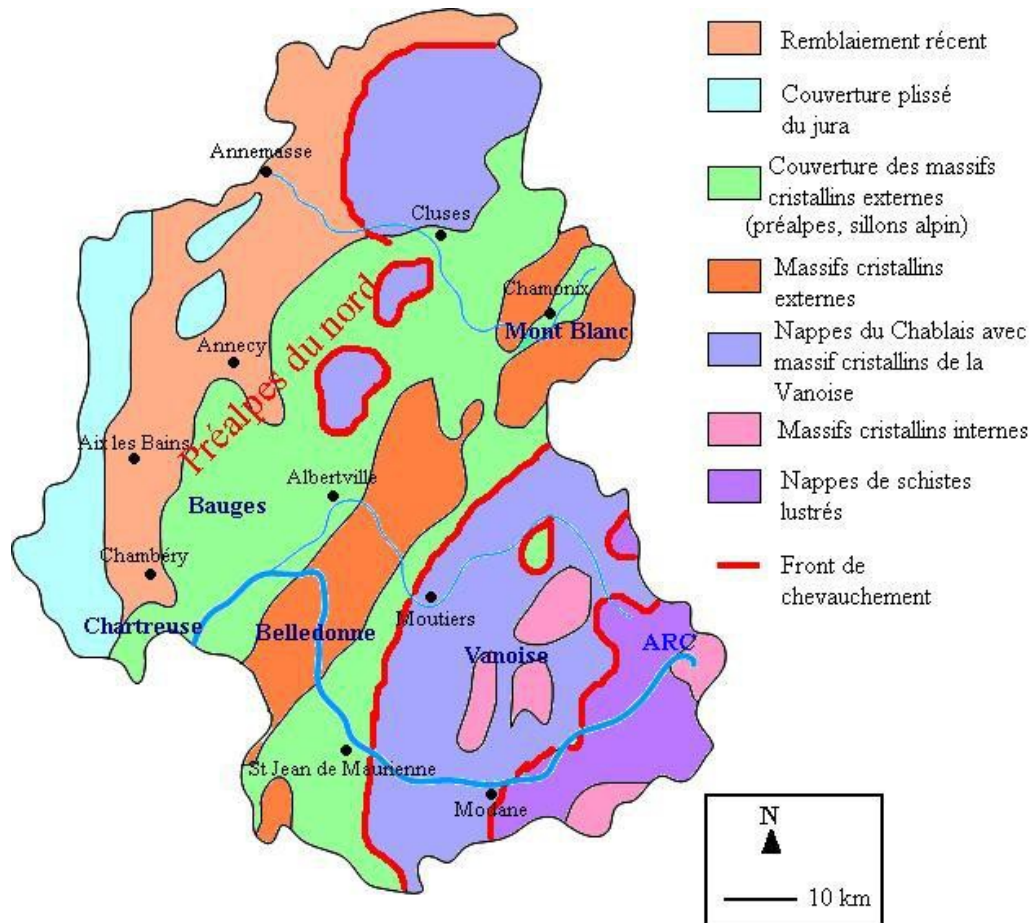


Figure 2 : Carte structurale d'ensemble des montagnes de la Basse Maurienne

La figure 2 illustre le contexte simplifié qui entoure l'Arc. La légende illustre des types de roches très simplifiés. Nous pouvons voir la rivière au sud de la carte.

D'un point de vue morphologique, le cours d'eau s'inscrit dans une zone globale découpée en trois grands ensembles :

- une topographie caractéristique avec des entonnoirs d'effondrement constituée de gypses blancs et cargneules jaunes du Trias.
- un complexe de calcaires massifs du Lias-Dogger, déterminant de vigoureux reliefs, des barres rocheuses ou des falaises abruptes.
- des complexes schisteux, particulièrement tendres à la base (oxfordien), devenant un peu plus dur (caleschistes du Jurassique supérieur-Crétacé) dans le haut.

Ces différents ensembles sont visibles sur la figure 3, une coupe orientée est-ouest, dans la vallée de la Basse Maurienne. Nous pouvons observer, sur cette figure, le cours de l'Arc, ainsi que les calcaires et schistes cités ci-dessus.

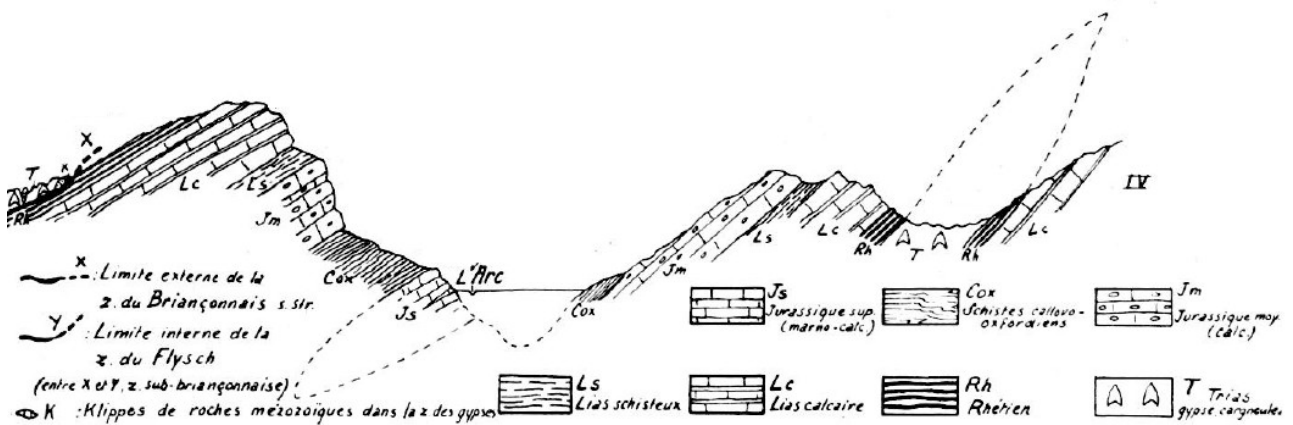


Figure 3 : Coupe orientée de la Vallée de la Maurienne à hauteur de la Basse Maurienne (issue de GIGNOUX et MOREL, 1937)

2.2 Contexte climatique

Globalement, la vallée de la Maurienne bénéficie d'un climat plutôt sec et bien ensoleillé qui se caractérise par des hivers froids et enneigés et des étés chauds, à tendance orageuse. Le climat est de type tempéré à tendance continentale.

Le foehn est un vent chaud et sec qui se retrouve sur l'ensemble des Alpes. L'effet de foehn se produit lorsqu'une masse d'air humide traverse les Alpes d'est en ouest. Elle déverse son humidité sur le versant italien et s'assèche en redescendant le versant français, suisse ou autrichien.

Ce phénomène se manifeste surtout au printemps et à l'automne. Au printemps, il réchauffe rapidement la terre, ce qui permet le démarrage la végétation ; à l'automne, il favorise le mûrissement des fruits.

La description du climat est complexe : cette zone d'étude est non seulement soumise à des influences océaniques (perturbations), continentales (froid l'hiver, chaud l'été) et méditerranéennes (vague de chaleur et sécheresse en été), mais aussi à la présence du relief qui introduit une différenciation spatiale avec de nombreux climats locaux et des microclimats (en fonction de l'altitude et des formes de relief, cuvettes, versants exposés...). Notons aussi la présence de retour d'est (provoquant de grosses chutes de neige en hiver sur l'est du site). Le climat varie selon le type de versants, en fonction de leur exposition :

- les versants adret sont dotés, grâce à l'ensoleillement, d'un climat chaud et sec (zone de prédilection des cultures et de l'habitat)
- les versants ubac sont en revanche ombragés et plus humides, ce qui en fait des lieux propices à l'extension de la forêt.

Les précipitations totales annuelles sont modérées et contrastées spatialement avec de forts écarts de 520 mm et 1628 mm tous les ans. La vallée présente un découpage net en trois secteurs, la Basse, la Moyenne et la Haute Maurienne. La Basse Maurienne jusqu'à Sainte Marie de Cuines est la zone la plus arrosée, la Moyenne Maurienne où l'effet écran provoqué par les massifs est maximal face aux perturbations océaniques venant de l'Ouest. Enfin, la Haute Maurienne où les précipitations sont plus élevées que les deux zones mais restent modérées compte tenu de l'altitude.

Les répartitions mensuelles annuelles montrent une relative régularité des précipitations tout au long de l'année. Les contrastes sont peu marqués et les régimes restent modérés. Les fortes précipitations sont en général constituées par :

- des orages pouvant être violents et fréquents principalement en été et fin d'automne.
- des masses d'air chaudes et humides de la Lombardie, de secteur est et sud-est se chargeant en vapeur d'eau lors de leur passage en Méditerranée. Ces nuages arrivent sur les versants italiens saturés et subissent une ascension extrêmement rapide. Des pluies diluviennes s'abattent alors sur les versants piémontais et débordent sur les versants français dont la vallée de la Maurienne.

La Lombardie, précédée par des dépressions océaniques de flux d'ouest et combinée à la fonte des neiges, est à l'origine des crues les plus importantes de l'Arc.

Étant donné la part des fortes altitudes dans le bassin versant de l'Arc, la neige est un paramètre climatique clé de l'hydrosystème où la rétention hivernale et la fonte printanière rythment le régime hydrologique. Bien entendu, l'épaisseur du manteau neigeux augmente avec l'altitude et est fortement influencée par l'exposition. La vallée de la Maurienne présente donc un climat montagnard sec (froid l'hiver et doux l'été). Les séquences sèches se situent globalement de mai à décembre. Les précipitations moyennes sont comprises entre 520 et 1628 mm, et présentes essentiellement sous forme neigeuses l'hiver et orageuses l'été. La tableau 1 illustre cette disparité dans la vallée de la Maurienne, où l'on remarque les grandes différences de précipitations entre les communes au sein d'une même vallée (cf. tableau 1 et figure 1).

Montsapey	Saint Alban des Hurtières	Saint Michel de Maurienne	Avrieux	Bessans
1628	1337,9	935	519,5	903

Tableau 1 : Moyennes annuelles (en mm) des précipitations calculées sur 25 ans (Données Météorologiques Nationale)

2.3 Présentation de l'Arc en Maurienne

L'Arc est un cours d'eau de montagne à caractère torrentiel situé dans la vallée de la Maurienne. La superficie de son bassin versant est de 1957 km². La rivière prend sa source à 2770 mètres d'altitude à l'amont du glacier des Sources de l'Arc et poursuit son cheminement jusqu'à sa confluence avec l'Isère à 290 mètres d'altitude sur un linéaire de 127 kilomètres ; la pente de la rivière varie de 0,5 à 6% (JODEAU, 2007) sur un lit de schistes et de roches cristallines se délitant facilement. La Maurienne est une vallée à très fort aménagement hydroélectrique (7 barrages, 3 liaisons avec les bassins versants voisins, 7 prises d'eau, 4 grands barrages d'altitude,...). Du fait des prises d'eau et restitutions, les débits de la rivière sont segmentés avec une alternance de longs tronçons en débit réservé (80% du cours de l'Arc) et de courtes sections à fort écoulement turbiné (JODEAU, 2007).

Le cours d'eau a été complètement remanié en 1995. En effet, durant les travaux dus à la construction de l'autoroute A43 reliant Lyon et Turin, l'Arc a été presque entièrement chenalisé. Suite à cet événement, tous les bancs ont été supprimés afin d'effectuer les travaux et modifications nécessaires. En 1997, nous partons donc d'un état initial au niveau hydro-sédimentaire, avec peu ou pas de bancs présents dans le cours d'eau.

2.4 Le régime hydrologique et le transport sédimentaire de l'Arc en Maurienne

Le régime hydrologique de l'Arc est de type nival avec un débit moyen en hiver de 6-8 m³/s et de 15-20 m³/s au printemps (CAMENEN, 2010). Le débit résiduel en période de basses eaux toutes centrales à l'arrêt est de l'ordre de 5 à 7 m³/s. En production maximum des centrales électriques sur la vallée, le débit peut être atteindre 150 m³/s. Pour une crue décennale, le débit atteint 500 m³/s et près de 800 m³/s pour une crue centennale (Études d'impacts, avril 2006).

Le bassin versant de l'Arc est soumis à deux types de régimes pluviométriques susceptibles de produire des crues. Un régime d'ouest avec des perturbations océaniques, générateur de crues

faibles, puis un régime du sud, l'effet de Foehn, générateur de crues exceptionnelles (HERVE, 2006). Les risques de crues se situent de mai à octobre avec une pointe critique en juin et juillet pour les crues fréquentes soutenues par la fonte des neiges.

Les petites crues (annuelles, biennales) peuvent être atténuées par les aménagements hydrauliques EDF voire quasiment supprimées, ce qui n'est pas le cas pour des crues moyennes à fortes, les barrages ne pouvant plus jouer le rôle d'écrêteur de crues (MARNEZY, 1999).

Chaque année, EDF effectue une chasse de barrage, c'est à dire un lâcher rapide mais contrôlé d'une grande quantité d'eau dans le but de libérer les sédiments piégés dans la retenue. Ce lâcher s'effectue selon des réglementations en adéquation avec des normes environnementales. Le flux de sédiments est constitué de sédiments grossiers (4×10^5 t/an) et de fines ($1,5 \times 10^6$ t/an) (MARNEZY, 1999). Le transport par charriage est plus important à la fonte des neiges (mai-juin-juillet), les éléments les plus gros étant mobilisés uniquement pendant les crues (JODEAU, 2007).

Globalement, les mouvements de sédiments sont des dynamiques importantes à étudier sur le cours d'une rivière. Les sédiments sont transportés quand le débit est assez élevé et quand le cours d'eau a une capacité de transport minimale pour leur mise en mouvement. Le dépôt ou l'érosion d'un cours d'eau découle du transport sédimentaire. Quand le niveau sédimentaire est peu élevé dans une rivière, cette dernière pour rééquilibrer son énergie, va avoir un pouvoir érosif important et donc éroder son chenal latéralement (érosion des berges), voir dans les cas extrêmes, horizontalement (le fond du chenal). Au contraire, quand le cours d'eau a sa capacité de transport saturée, il va déposer sa matière grossière pour récupérer son énergie. Ces zones de dépôts peuvent être à l'origine d'un risque d'inondation lors des crues ; les dépôts sédimentaires augmentent la ligne d'eau et peuvent être critiques dans la gestion du risque inondation sur le cours d'eau.

2.5 Présentation des zones d'étude

Deux sites d'étude ont été sélectionnés sur le cours de l'Arc en Maurienne. La figure 4 illustre ces deux zones d'étude dans le bassin versant.

Les coordonnées du site dans le système de projection Lambert 93 sont comprises entre [960487/6474310] pour l'amont (au tournant situé en aval de la commune de Pontamafrey-Montpascal) et [958012/6478265] pour la partie aval (à la confluence de l'Arc et du Glandon sur la commune de Saint-Étienne-du-Cuines). Cette zone se situe dans une vallée relativement étroite. La pente moyenne du site numéro 1 est d'environ 0,6 % (JODEAU et al, 2006). Le lit du cours d'eau est fait de graviers (où le diamètre médian est de 10 cm) et de sédiments fins (sable et limons). Ce site est suivi depuis quelques années par l'équipe d'Irstea, de plus, Mohamed JABALLAH étudie ce site dans le cadre de sa thèse. Le second site d'étude se situe à la confluence de l'Arc et de l'Isère.

Les coordonnées du site dans le système de projection Lambert 93 sont comprises entre [950101/6501184] pour l'amont et [949060/6500670] pour l'aval. La confluence s'inscrit dans un site plus ouvert car la vallée de l'Isère est plus large que la vallée de l'Arc. La méthode a été développée sur le zone d'étude 1 et validée sur la seconde zone d'étude. L'analyse du mouvement des bancs ne n'a été menée que sur la zone d'étude 1. La figure 5 illustre ces zones d'étude et permet d'observer les versants à forte pente. La figure 6 illustre le profil en long de la zone d'étude numéro un ; nous pouvons observer un dénivelé de 30 mètres sur 5 km entre la zone amont et aval. La figure 7 illustre quant à elle la zone d'étude plus largement, de Saint Jean de Maurienne au sud jusqu'à Aiguebelle au nord.

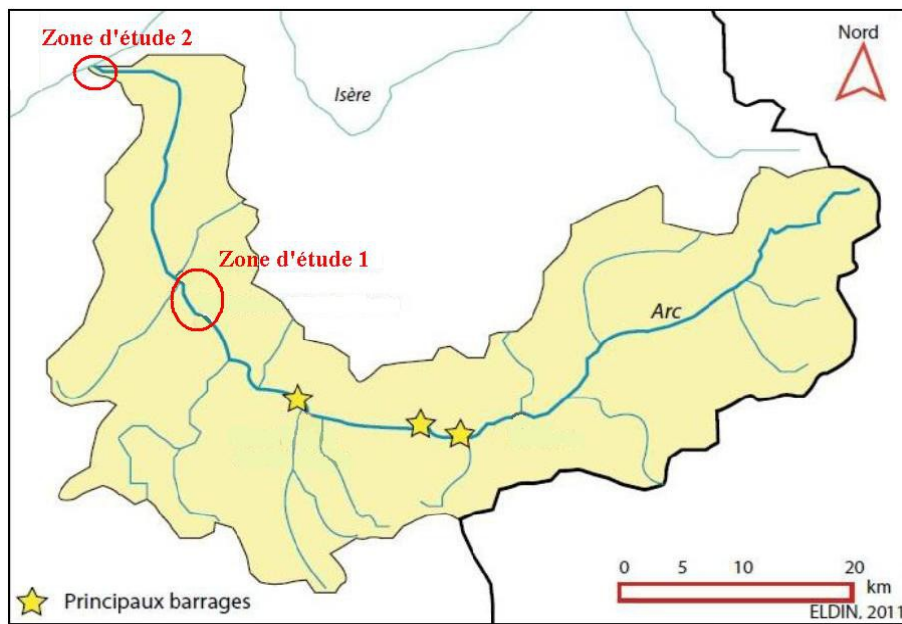


Figure 4 : Carte du bassin versant de l'Arc en Maurienne et identification des zones d'étude



Figure 5 : Image orthorectifiée de la zone d'étude numéro 1 en aval de Saint Jean de Maurienne jusqu'à Saint Etienne de Cuines (a) et zone d'étude numéro 2 à la confluence de l'Arc et de l'Isère (b)

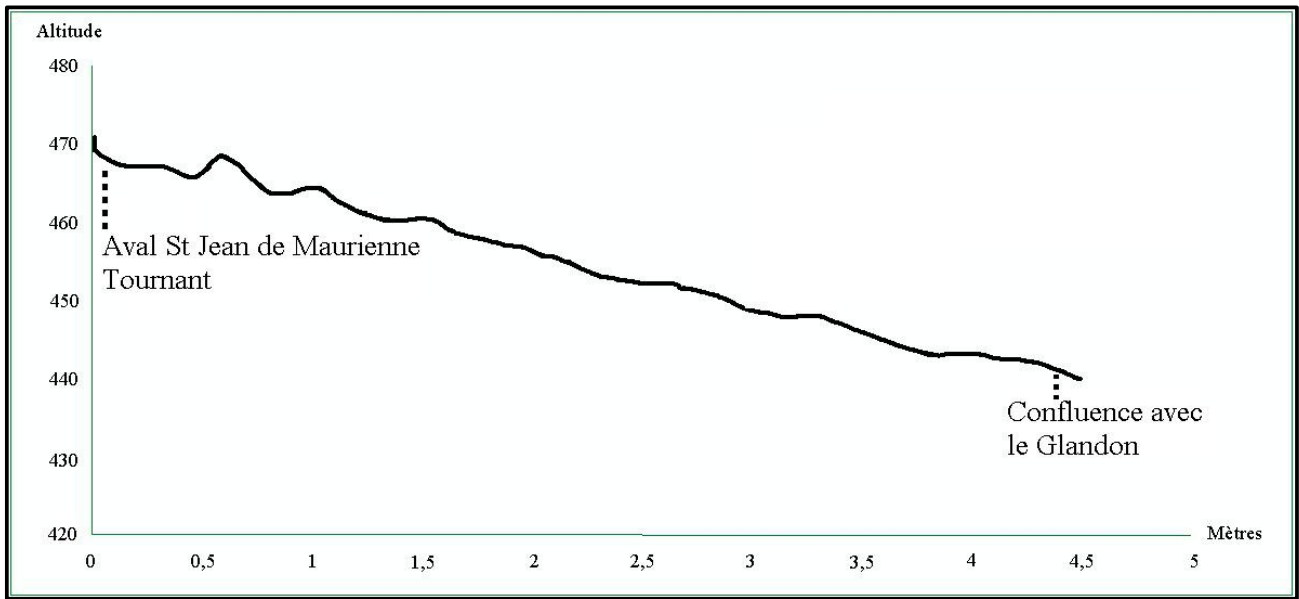


Figure 6 : Profil en long de Saint Jean de Maurienne à Saint Etienne de Cuines



Figure 7 : Image orthorectifiée d'une partie de la vallée de la Maurienne (St Jean de Maurienne au sud et Aiguebelle au nord)

2.6 Le banc

Par définition, le banc est le résultat d'une chronologie complexe de dépôts et d'érosion successifs associés aux crues. Théoriquement, les dépôts de sédiments sont localisés en fonction des caractéristiques de l'écoulement, généralement dans les zones à faible vitesse.

Le banc se situe dans l'espace de liberté d'une rivière : « Espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres » (MALAVOI, PIEGAY & BRAVARD, 1998).

L'Arc est contraint à un degré élevé d'aménagements sur le cours d'eau ; le banc de galets semble être donc le résultat d'un déséquilibre morphodynamique dans un système contraint par les digues et les barrages. La figure 9 est la représentation schématique d'un banc, présentant ses sous unités morphologiques (tête, queue de banc,...), les contraintes (berge, sens de l'écoulement) et l'effet de ces contraintes sur le banc où les éléments grossiers s'accumulent sur le bord du banc (tête et le long du banc) à proximité du chenal d'écoulement tandis que les éléments les plus fins se concentrent plus loin du chenal dans le profil du banc. Plus les vitesses d'écoulement diminuent, plus les matières transportées sont fines.

La figure 9 a été construite à partir de l'explication écrite et des définitions des entités du banc par Magali JODEAU (2007).

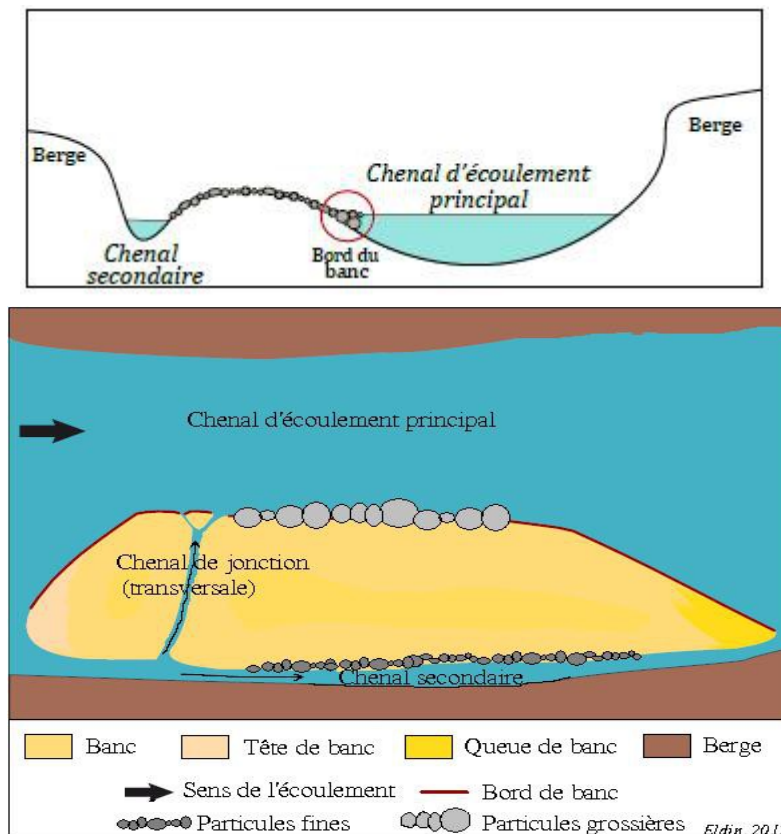


Figure 9 : Croquis d'un profil en travers d'un cours d'eau (a) et des sous unités morphologiques d'un banc (b)

- **Chenal d'écoulement principal**

Zone du lit à la cote la plus basse (talweg) dans laquelle s'écoule la part la plus importante du débit.

- **Chenal secondaire**

Situé le long de la berge, du côté opposé à l'écoulement principal. Il fait partie intégrante du banc de galet et n'est en eau que pour un débit critique supérieur au débit d'étiage. HICKIN (1969) le nomme « chenal intérieur » (inner channel) ou « dépression morte » (dead slough) dans le cas où il ne débouche pas sur l'écoulement principal.

- La tête du banc

Définie classiquement comme la partie amont du banc où le matériau grossier prédomine (JODEAU et al, 2008).

- La queue du banc

Définie comme la partie aval du banc composée principalement de sédiments fins (JODEAU et al, 2008)

- Le bord du banc

Il fait partie intégrante du banc et est la jonction du chenal d'écoulement principal et du banc. Cette zone peut contenir des renforcements (nook) : selon REMPEL et CHURCH (2002), cela correspond à des petites échancrures en bordure du banc, en contact avec l'écoulement principal mais où l'eau a une vitesse faible. Ces renforcements sont souvent les extrémités de chenaux de jonction qui ne sont plus en eau.

- Les chenaux de jonction ou chenaux transverses

Ils permettent la connexion en travers du banc entre le chenal secondaire et le chenal principal. PYRCE et ASHMORE (2005) les nomment « chenaux de chutes » (chute channel) et les décrivent comme des chenaux orientés diagonalement sur le banc en intersectant le sommet du banc. LUNT et BRIDGE (2004) les désignent comme des « chenaux en travers du banc » (cross-bar channels). Il est important de distinguer les chenaux de jonction éphémères (durée de faible vie) et les chenaux permanents (durée inter-crue, plus profonds que les chenaux éphémères).

3. Les données

Le stage nous a permis de travailler sur deux types de données : des modèles numériques de terrain et des données image dans l'objectif de répondre à deux analyses différentes.

3.1 Les MNT Lidar

L'entreprise EDF a commandité l'acquisition de ces données Lidar afin d'observer l'impact d'un curage du bassin de Longefan sur le cours de l'Arc. En effet, ce lâcher soudain d'une grande quantité a un effet sur le cours d'eau, qui est en débit réservé une très grande partie de l'année.

Les modèles numériques de terrain (MNT) disponibles ont été créés à partir de données Lidar (laser aéroporté) issues de deux levés Lidar effectués durant l'année 2010 avant et après la période de curage de barrages hydro-électriques ainsi que le curage d'un bassin de rétention au cours du mois de juin 2010.

Les deux levés datent du 9 mai 2010 (avant le curage) et du 5 septembre 2010 (après le curage). Ces MNT sont la représentation topographique de la zone étudiée avec une résolution de 25 cm (cf. figure 10). Une chasse de barrage en juin a été effectuée et un événement hydrologique (crue) en juillet ont eu lieu entre ces deux dates.

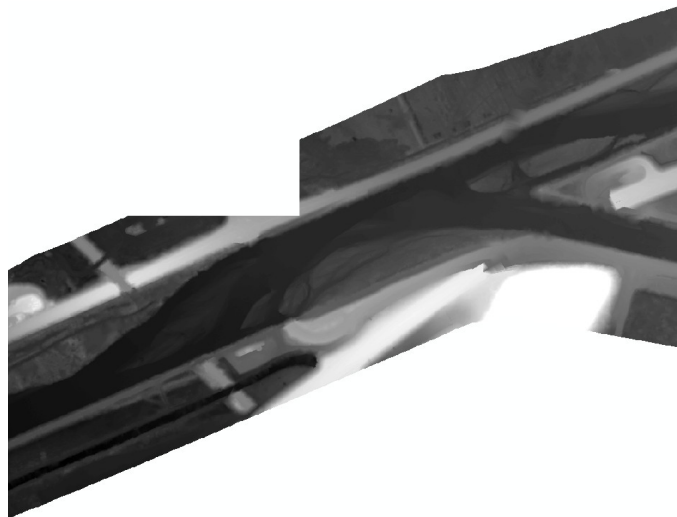


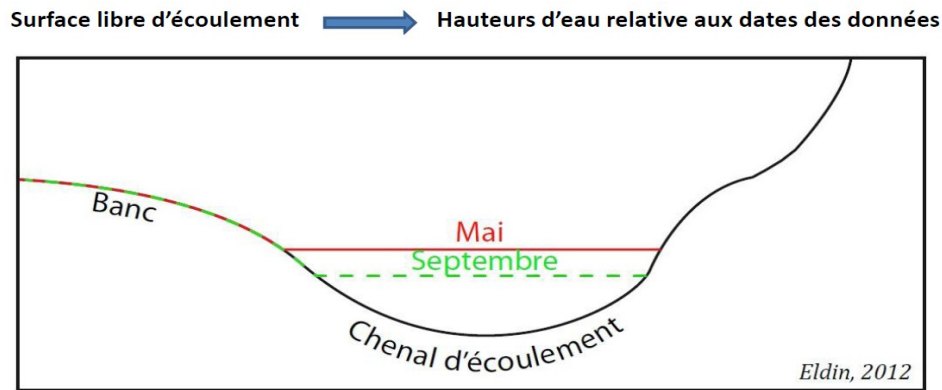
Figure 10 : Affichage brut d'une dalle MNT (site de la confluence de l'Arc et de l'Isère)

La figure 10 illustre l'affichage brut d'un MNT sous Arcgis. La variation de gris représente les altitudes où les couleurs foncées sont les altitudes faibles et où les couleurs qui tendent vers le blanc sont les altitudes élevées.

Mais les MNT Lidar ont une propriété caractéristique. En effet, comme nous le montre la figure 11, le trait rouge représente les altitudes de mai dont nous disposons et le trait vert pointillé, les altitudes de septembre. La ligne d'eau de mai est supérieure à celle de septembre ; ce paramètre est la conséquence climatique de la zone étudiée (la fonte des neiges augmente la hauteur d'eau de la rivière). Les altitudes du chenal d'écoulement correspondent à la surface libre d'écoulement.

La hauteur d'eau est donc relative à la date des données, nous ne disposons pas de données bathymétriques.

Cette différence de hauteur d'eau va nous poser problème dans le contexte de l'analyse des bancs. En effet, le retrait de l'eau sur le banc en septembre va faire émerger une partie du banc immergée en mai (cf. figure 12). Nous nous devons d'être vigilants sur le fait que ce phénomène n'est pas une accumulation de sédiments mais seulement l'émergence du banc par la variation de la hauteur d'eau. Ce phénomène est étudié dans la partie qui traite les secteurs particuliers dans le chapitre de



l'étude des mouvements des bancs.

Figure 11 : Illustration des altitudes dont nous disposons pour les deux dates

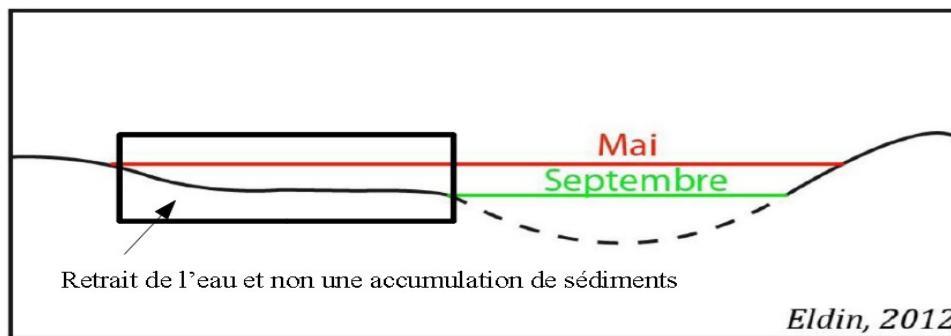


Figure 12 : Émergence d'une partie du banc en septembre

Cette particularité des données MNT est due à l'outil qui recueille ses données.

La figure 13 illustre la comparaison de l'intensité de retour du Lidar sur un plan d'eau fixe et sur une rivière. De cette observation, deux hypothèses semblent se profiler.

La première hypothèse est que l'intensité du retour Lidar est lié aux taux de MES (matières en suspension), fort dans la rivière et faible dans le plan d'eau.

En effet, l'eau absorbe la longueur d'onde du signal et l'intensité de retour du signal est donc très faible. Au contraire la rivière, ayant un taux de MES important, possède une intensité de retour du signal assez forte. « Dans une eau chargée en matières en suspension, le système Lidar donnera des points à sa surface » (MOREL, 2011) ; ce qui est le cas de l'Arc.

La seconde hypothèse lie la forte intensité de retour sur la rivière et l'agitation de la surface. Les vaguelettes font un effet miroir et le signal du Lidar est renvoyé dans toutes les directions.

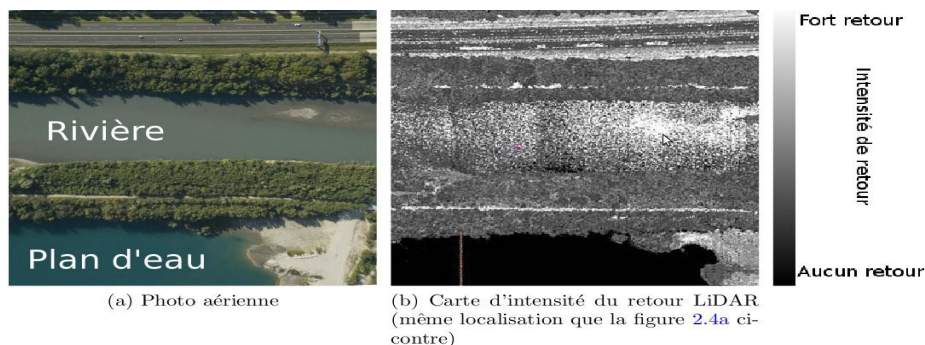


Figure 13 : Comparaison de l'intensité de retour entre un plan d'eau et une rivière avec un fort taux en MES (MOREL, 2011)

3.2 Les données image

Nous disposons de quatre jeux de données image de la même zone d'étude avec différentes échelles et résolutions, échelonnées de 2002 à 2010.

- Les données image de 2002

L'image de 2002 a une taille de pixel sur le terrain de 2,5 mètres (résolution spot 5). Cette image est issue de la thèse de Magali JODEAU (image satellite Spot 5 – 19-07-2002) (cf. figure 14). Cette image est suffisante pour recenser les bancs mais la résolution est trop faible pour les délimiter.



Figure 14 : Image Spot 5 de la zone d'étude en 2002 (a) et zoom sur un secteur (b)

- Les données image de 2006

Les images orthorectifiées de 2006 ont une taille de pixel de 0,5 mètres et sont issues de la base de données BE Ortho® de l'IGN. Au contraire de la photographie aérienne de 2002, les données image de l'IGN couvre toute la vallée de la Maurienne (cf. figure 15). Le zoom effectué nous permet de comparer les deux figures. En effet, l'image de 2006 a une plus haute résolution et offre de meilleures conditions pour construire les bancs avec une incertitude moins grande que pour l'image aérienne de 2002. Un second zoom a été réalisé afin de pouvoir comparer la résolution de l'image de 2006 avec les photographies aériennes de 2010.

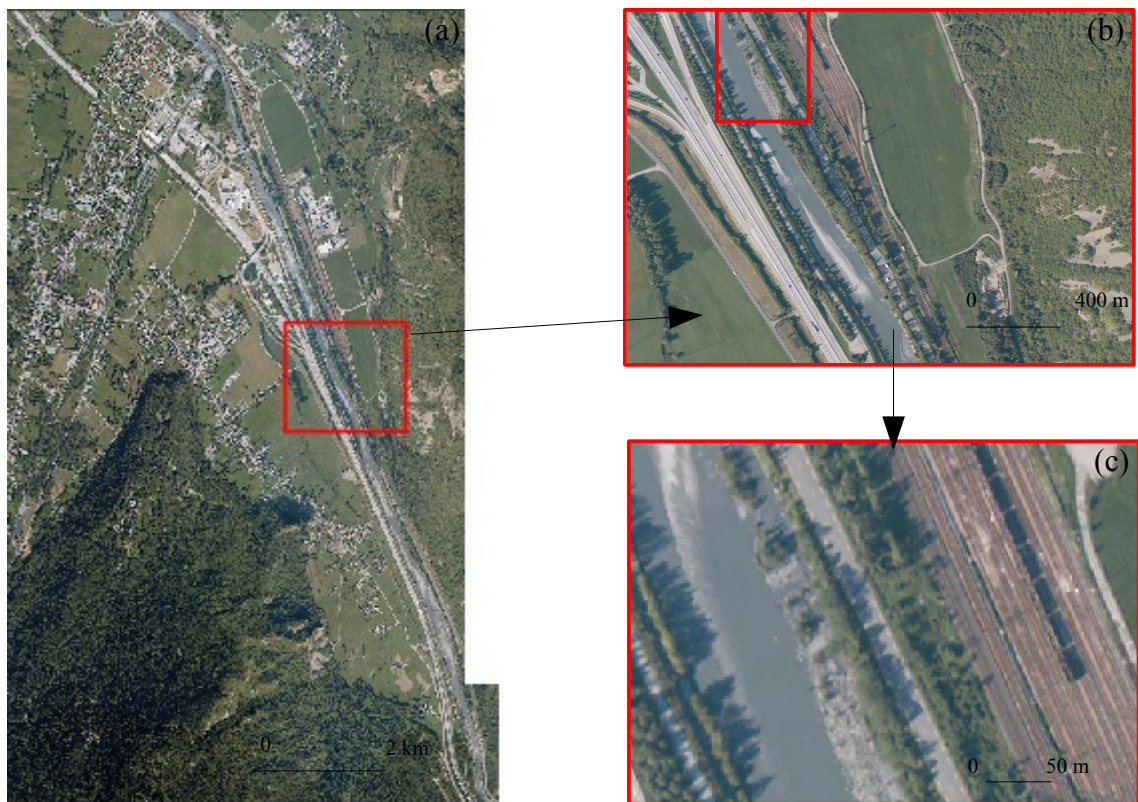


Figure 15 : Image orthorectifiée de la zone d'étude en 2006 (a) et deux zooms sur un secteur (b et c)

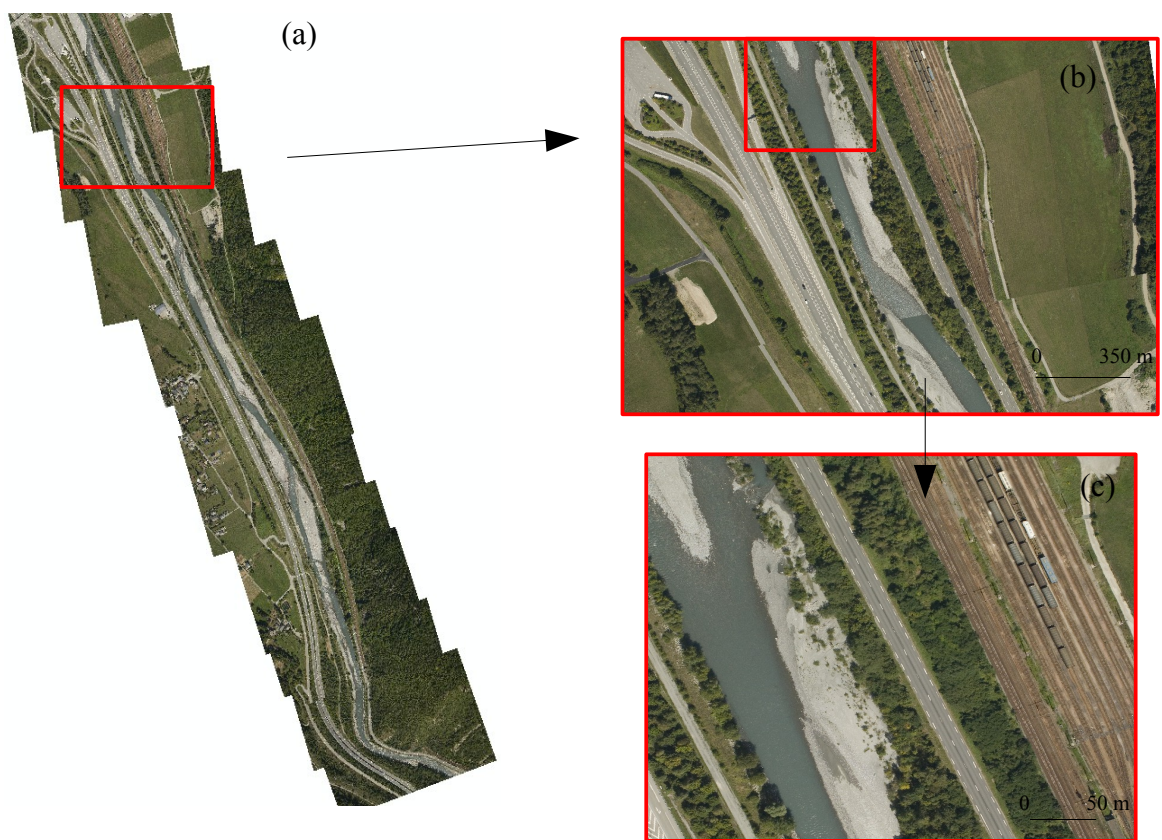


Figure 16 : Photographies aériennes géoréférencées de la zone d'étude en 2010 (a) et deux zooms sur un secteur (b et c)

- Les données image de 2010

Les photographies aériennes de 2010 ont une résolution de pixel de 0,07 mètres au centre de l'image, et ont été acquises conjointement aux données Lidar. Nous disposons de deux jeux de données, le premier en mai et le second en septembre. Le zoom b nous permet d'illustrer la différence de la qualité des différentes images entre 2006 et 2010 (cf. figure 16). Les différentes images présentent les mêmes secteurs localisés sur la zone d'étude.

Le traitement de ces données a été effectué par des outils informatiques. La correction et le géoréférencement des photographies aériennes ont été réalisés grâce au logiciel Arcgis 10 quand les données n'étaient pas géoréférencées ou orthorectifiées. Les données de 2002 et les deux jeux de données de 2010 ont bénéficié de ce traitement. Il s'agit de créer des images superposables au MNT de référence de 2010, afin d'avoir la même valeur métrique pour toutes les données dans la projection Lambert 93.

CHAPITRE 2: METHODE ET RESULTATS

Cette partie présente deux méthodes permettant de recenser les bancs de l'Arc. La première méthode s'applique à partir des données MNT Lidar, tandis que la seconde méthode est appliquée à partir des données image. Il est important de rappeler que les méthodes présentées sont développées et construites sous le logiciel Arcgis. Leurs résultats sont intégrés à la fin des méthodes.

1. Méthode de délimitation des bancs de graviers de l'Arc à partir des MNT

1.1 Espace de travail

Avant tout, il faut repérer le banc sur lequel nous voulons travailler (des bancs d'une longueur de 50 à 500 mètres en moyenne le long du site d'étude) ; puis délimiter l'espace de travail en affichant les données selon une échelle de 100 m sur 100 m environ, ce qui permet une lecture adéquate pour la construction des polygones. (cf. figure 17). Une fois la partie du polygone dessinée appartenant à l'espace de travail, il faut faire glisser l'affichage le long du banc, sans changer les paramètres d'affichage, pour continuer le polygone du banc que l'on construit.

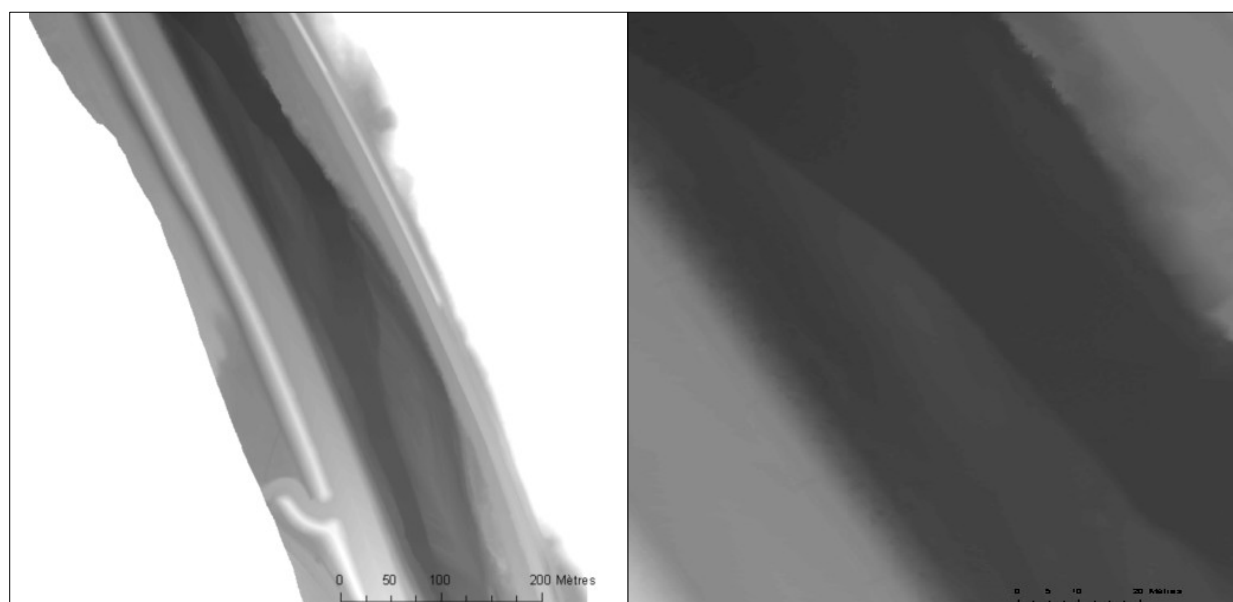


Figure 17 : Illustration de la mise à l'échelle de l'espace de travail

1.2 Frontières pour la construction du polygone

Pour construire le polygone du banc, nous devons en définir ses frontières. Nous distinguons deux types de frontières : la première est la frontière entre le banc et la berge et la seconde est la frontière entre le chenal et le banc.

1.2.1 Frontière entre le banc et la berge

Les bancs de galets et la berge se délimitent à première vue en une zone correspondant à l'addition de végétation en bordure de banc et la présence de blocs d'origine anthropique. Ces deux paramètres font fonction de protection et de stabilisation des berges (buissons, terre, blocs) (cf. figure 18 et 19). Comme la figure 19 (a) le montre ci-dessous, il est possible d'utiliser les photographies aériennes

géoreferencées afin de visualiser cette limite globalement.

La figure 18 nous montre la limite prise en bas de la berge, car la berge et le banc sont deux entités différentes de la rivière et le banc commence là où la berge se termine. Pour placer cette limite avec plus de précisions, les MNT sont indispensables. La carte des pentes est aussi utile, car nous pouvons observer une rupture de pente à la limite du banc et de la berge (cf. figure 19 (b)).

Pour créer la carte des pentes, il suffit d'utiliser la fonctionnalité *Arc Tool Box > Outils 3D Analyst > Raster_Surface > Pente*.

La carte des pentes construite à partir du *Raster* est très utile pour déceler les ruptures de pente dans la topographie du MNT.

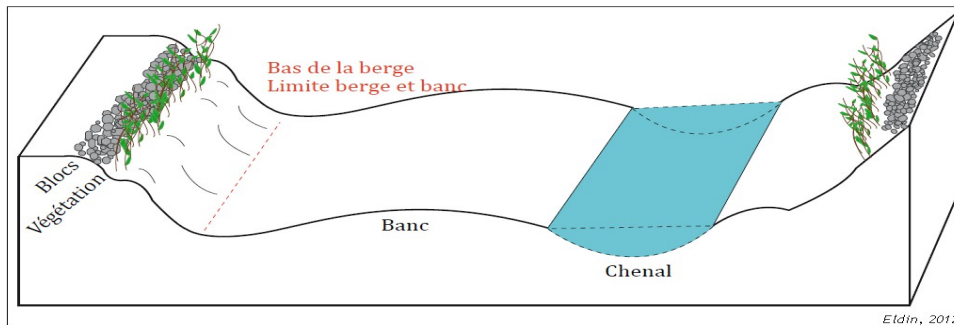


Figure 18 : Frontière prise entre le banc et la berge

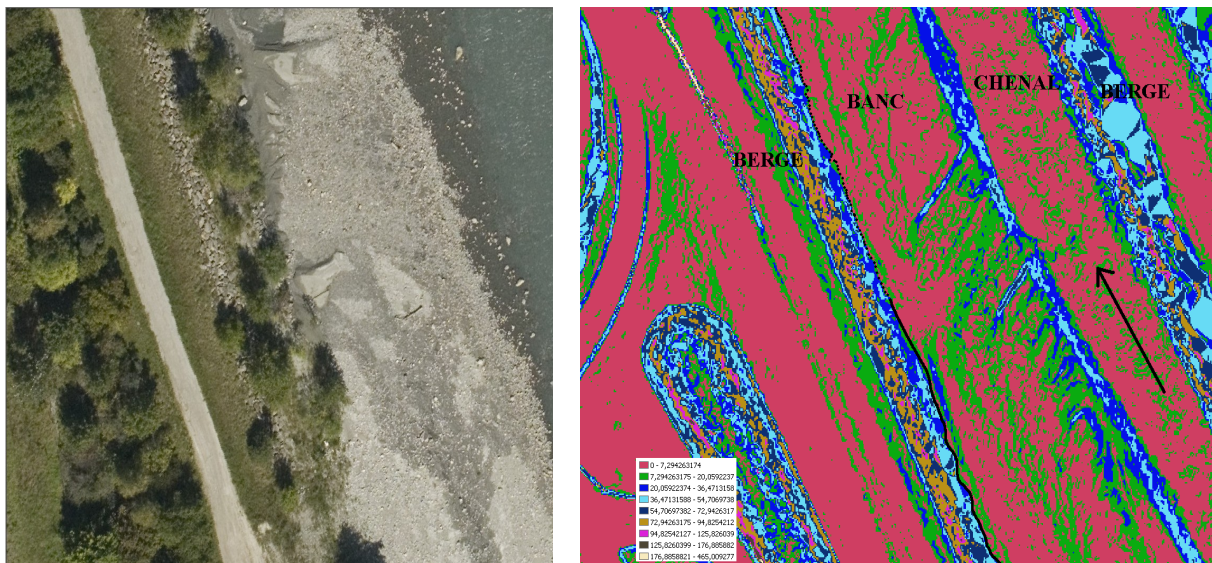


Figure 19 : Photographie aérienne de la limite entre le banc et la berge (végétations et blocs) (a) et délimitation de la frontière entre le banc et la berge par la carte des pentes (trait noir) (b). Ces deux figures ne sont pas situées sur la même zone

Ces ruptures de pentes sont donc la frontière à prendre pour construire le polygone du banc. Nous pouvons voir le début de la construction du polygone (trait noir sur la figure 19 (b)).

1.2.2 Frontière entre le banc et le chenal

Nous avons trois types de frontières liées à la difficulté de construction du polygone avec le moins d'incertitude possible. L'incertitude est la marge d'erreur liée à la construction du polygone. Nous avons plusieurs degrés dans l'incertitude liée à la netteté des frontières construites. Nous définissons cette marge d'erreur par la différence de frontières prises dans la construction de polygone par deux personnes différentes ; cette incertitude est donc la mesure de la distance entre deux frontières

possibles. Nous avons inséré le degré d'incertitude avec la présentation des frontières.

1.2.2.1 Cas de la frontière nette

Pour ce premier type de frontière, nous pouvons voir correctement la limite entre le banc et le chenal (cf. figure 20). Cette frontière correspond à la rupture de pente relativement nette où nous pouvons construire le polygone.

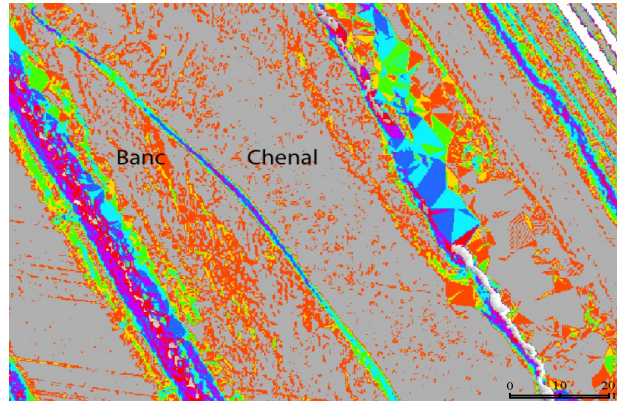


Figure 20 : Illustration de la limite nette entre le banc et le chenal à partir de la carte des pentes

Pour ce genre de cas, la frontière étant nette, la marge d'erreur liée à la construction du polygone est faible. La figure 21 illustre cette incertitude sur une portion de la zone d'étude une. La marge d'erreur de 2 mètres compte une incertitude faible. Nous pouvons observer que cette marge d'erreur est fréquente (trait vert sur la figure 21).

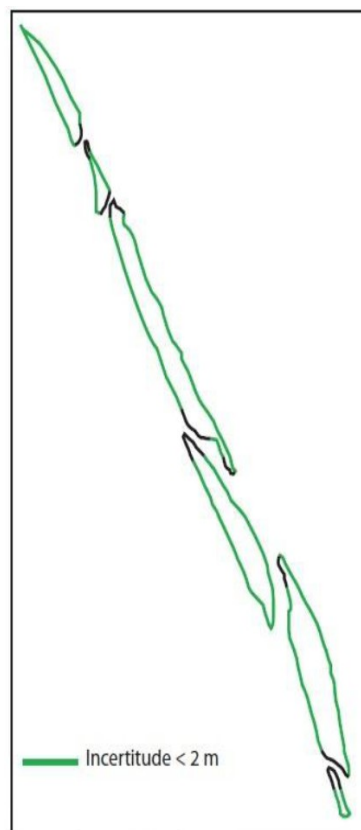


Figure 21 : Illustration de l'incertitude faible sur une portion de l'Arc sur la zone d'étude 1

1.2.2.2 Cas d'une frontière moins nette

Nous observons ce cas généralement en tête et en queue de banc. Ce type de frontière a un degré

d'incertitude un peu plus élevé que la frontière nette. Pour fermer ce polygone, nous devons appliquer un seuil, estimé sur les bancs de la zone d'étude 1 et 2. Ce seuil est estimé à 7,5 % (ce seuil est un pourcentage de pente) à partir de la carte des pentes. Dans le but de simplifier son application, nous divisons la distribution en deux classes. L'intervalle de la première classe se situe entre 0 et 7,5 % tandis que la seconde classe se situe entre 7,5 % et le maximum de la distribution. Comme nous le montre la figure 22, nous avons une carte bicolore où la couleur rouge représente la seconde classe [7,5;1673], celle qui nous intéresse (où la valeur 1673 représente la valeur maximale de la distribution). Nous commençons donc la construction du polygone à partir de ce seuil en suivant la ligne dessinée par le regroupement des valeurs situées dans cet intervalle (nous la voyons sur queue du banc en rouge). Le trait noir sur l'encadré de la figure 22 illustre le polygone construit grâce au seuil.

L'incertitude moyenne est plus élevée que pour la frontière nette ; en effet, elle se situe entre 2 et 6 mètres. Mais nous pouvons voir que cette marge d'erreur sur le même tronçon que pour le cas de la frontière nette est moins fréquente. Cette incertitude est représentée par le trait orange sur la figure 23.

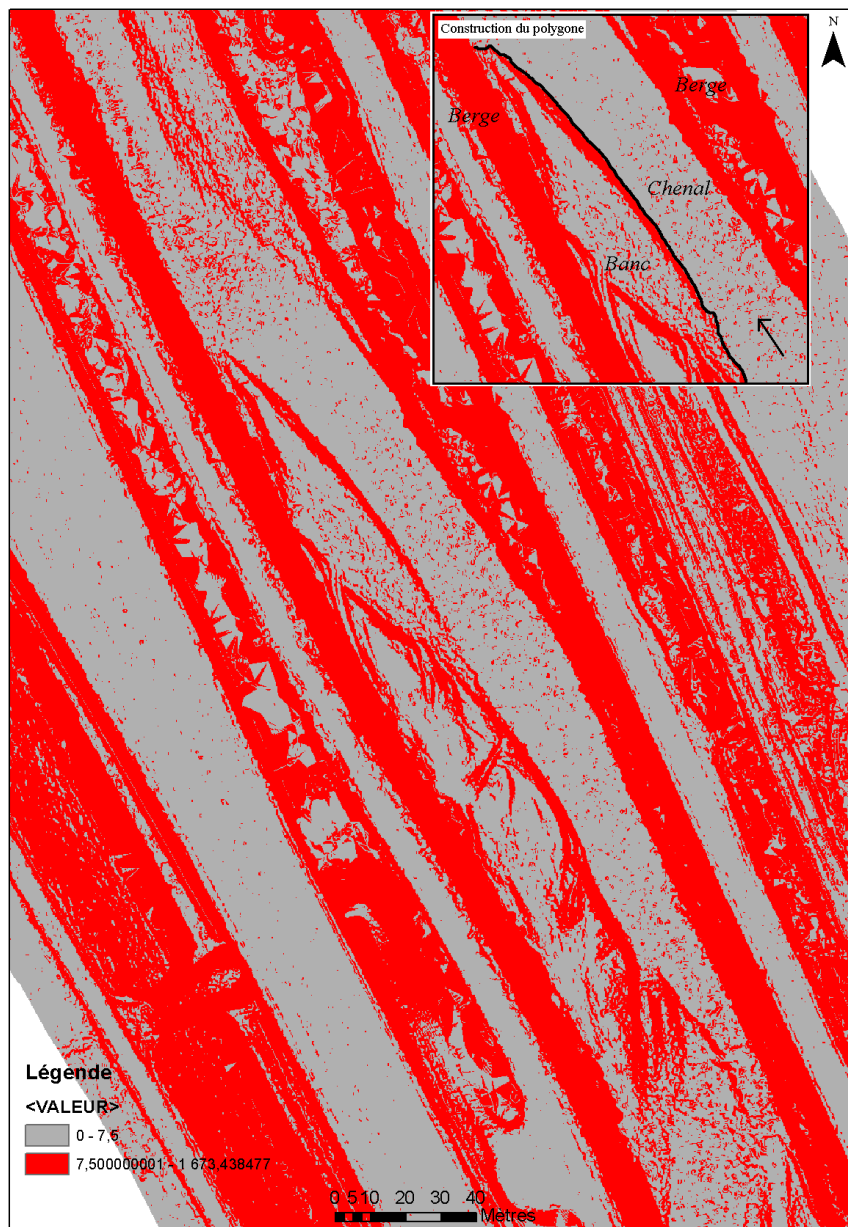


Figure 22 : Illustration de la limite moins nette entre le banc et le chenal à partir de la carte des pentes

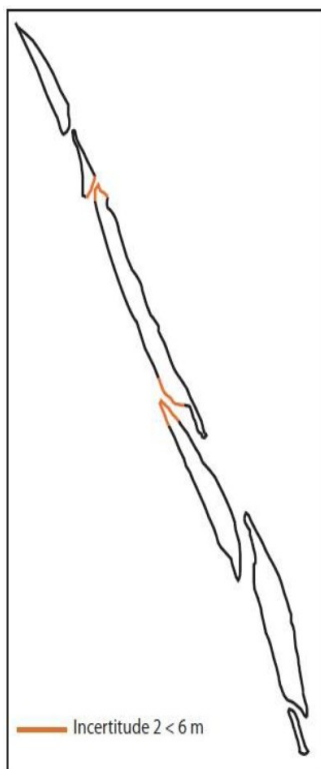


Figure 23 : Illustration de l'incertitude moyenne sur une portion de l'Arc sur la zone d'étude 1

1.2.2.3 Cas d'une frontière avec une incertitude élevée

La figure 24 illustre le cas où l'incertitude est très élevée. La carte des pentes nous donne le choix entre deux frontières (trait rouge et trait vert). Afin de construire correctement le polygone, le seuil a été appliqué et donne comme résultat le trait vert. Ce trait vert est donc la limite du polygone du banc, mais il ne suffit pas à fermer cette construction (entouré par le trait noir).

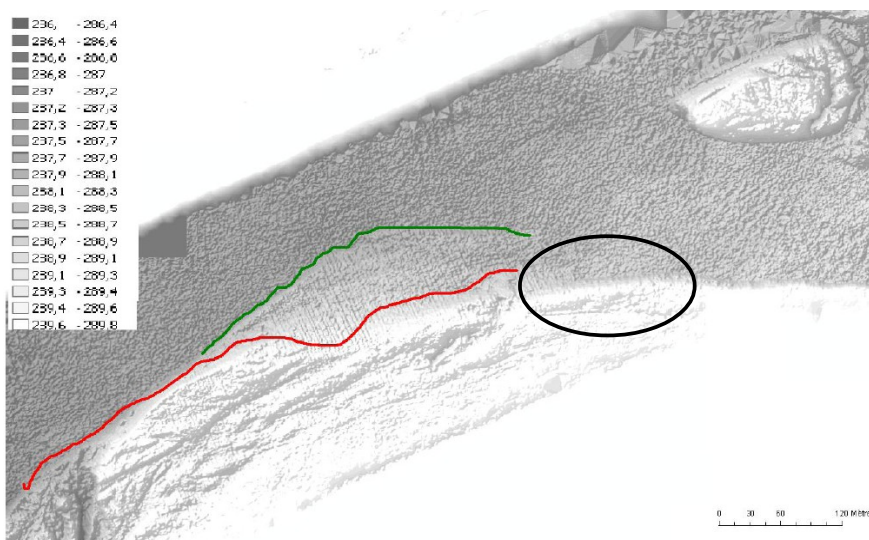


Figure 24 : Affichage du MNT et affichage des limites (trait rouge pour la carte des pentes et trait vert pour l'application du seuil). Le rond situe la zone où nous ne pouvons fermer le polygone

Afin de fermer le polygone, nous utilisons les isolignes. La figure 25 qui nous montre ces isolignes, permet de déterminer les deux caractéristiques à examiner pour fermer le polygone du banc. Ces deux caractéristiques se basent sur la forme de l'isoligne et le changement de direction de l'isoligne.

En effet, l'isoligne se divise en deux formes :

- l'isoligne rectiligne caractéristique du banc
- l'isoligne qui s'étale sur une surface, sinueuse qui est caractéristique du chenal (du au faible dénivelé).

La limite entre ces deux formes d'isoligne est également marquée par un est le changement de direction de l'isoligne que nous pouvons observer correctement dans l'encadré de la figure 25. Nous construisons donc la frontière séparant le banc du chenal sur la limite entre ces deux formes d'isoligne. Cette limite est montrée sur la figure 25 par le trait blanc.

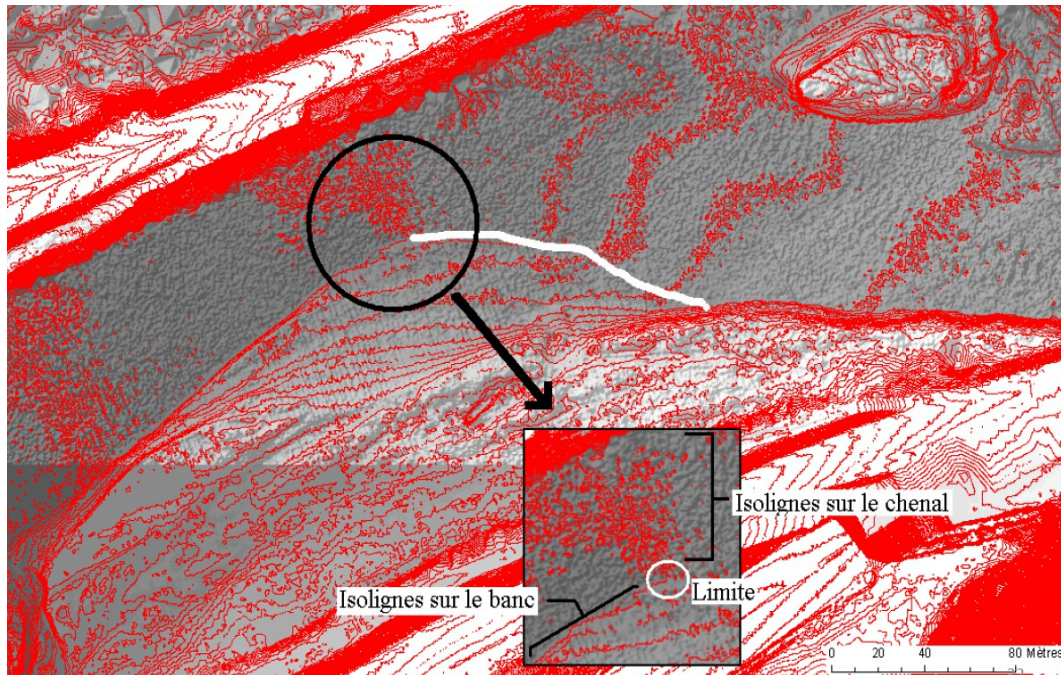


Figure 25 : Utilisation des isolignes pour fermer le polygone et caractéristiques des isolignes

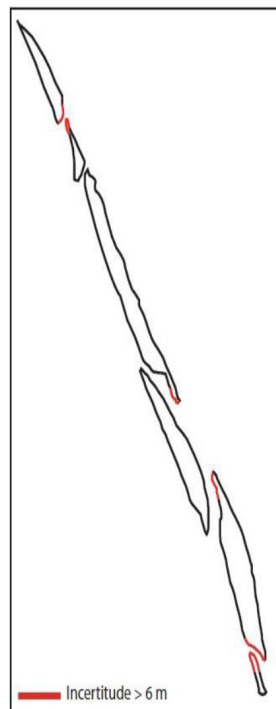


Figure 26 : Illustration de l'incertitude élevée sur une portion de l'Arc sur la zone 1

L'incertitude liée à ce type de frontière est très élevée (> 6 m), mais heureusement peu fréquente.

La figure 27 illustre la marge d'erreur sur la portion de l'Arc présentée précédemment. Nous observons que l'incertitude faible (< 2m) est majoritaire sur le tronçon et que les autres incertitudes (moyennes et élevées) sont peu fréquentes et situées sur les queues et têtes des bancs. Plus le degré d'incertitude est élevée, plus la surface sur laquelle cette incertitude s'étend est faible. Grâce à la marge d'erreur, la méthode est reproductible. L'incertitude élevée étant rare, cette méthode est relativement bonne.

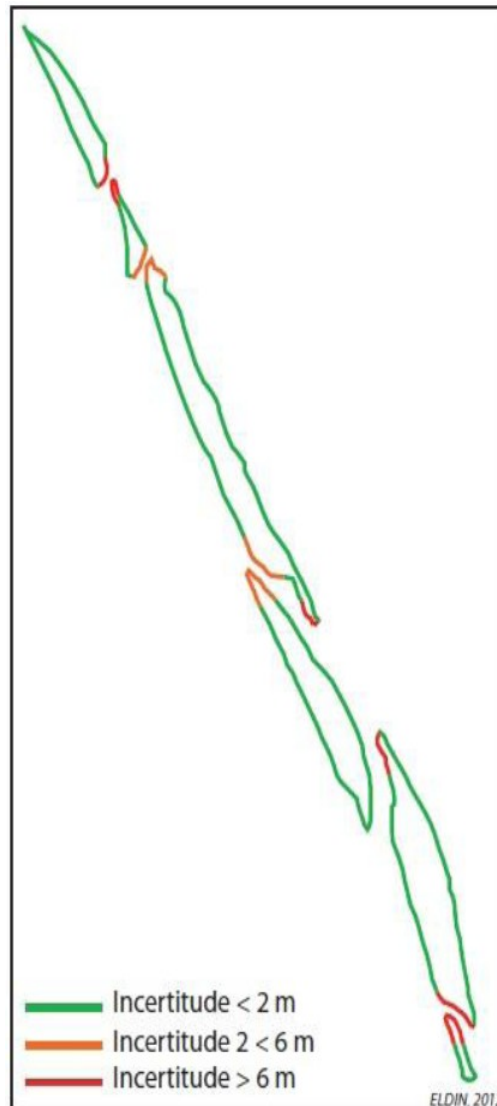


Figure 27 : Incertitude globale sur un tronçon de l'Arc

1.3 Résultats de la méthode

Les résultats de la zone 1 de mai sont présentés dans la figure 28, les résultats de la zone 2, à la confluence sont présentés en annexe (annexe 1). La figure 28 est le résultat de l'application de la méthode à partir des MNT. L'échelle nous montre la zone d'étude et le travail effectué. Ces résultats sont le fruit d'un long travail qui nous permet d'être précis et de localiser les zones d'érosion et de dépôts.

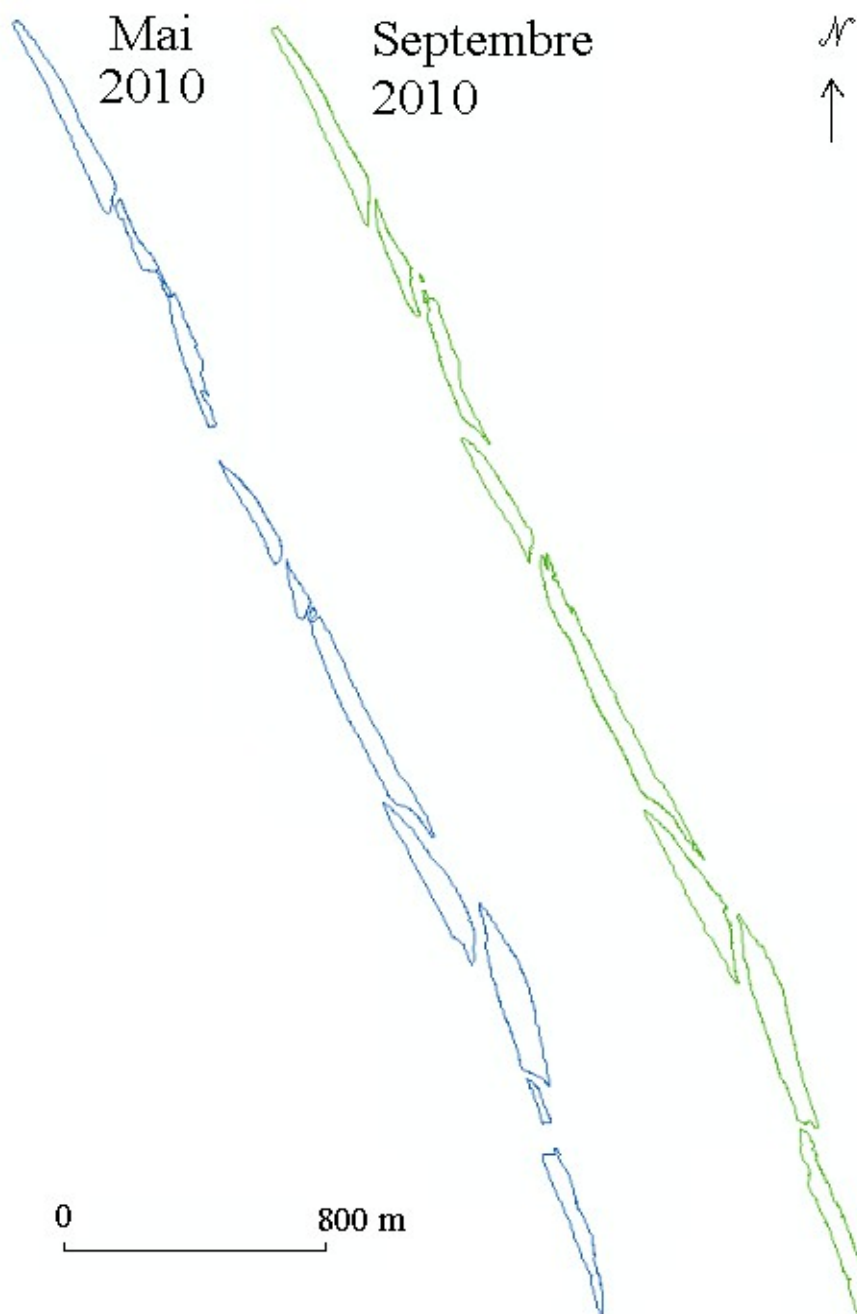


Figure 28 : Présentation des bancs de mai et septembre 2010 construits à partir de la méthode de délimitation des bancs à partir des MNT

La limite principale de cette méthode est son application longue et fastidieuse. Le fait que les MNT Lidar n'offrent pas de données bathymétriques n'est pas une limite en soi, car la méthode a été construite en connaissant ce paramètre des données.

Pour conclure, la reproductibilité reprend la marge d'erreur, sans cette dernière, n'importe quelle personne n'aurait pas pu l'appliquer avec des résultats proches. La marge d'erreur élevée et moyenne étant rare sur l'ensemble des zones d'étudiées, cette méthode est relativement bonne.

Pour pallier à la limite principale de la méthode, le programme TRAM a été développé pour segmenter automatiquement des bancs ; nous verrons ultérieurement la comparaison des résultats manuels et automatiques pour évaluer ce dernier.

2. Méthode de délimitation des bancs de graviers de l'Arc à partir des données image

2.1 Espace de travail

Comme pour la méthode de délimitation des bancs à partir des modèles numériques de terrain, l'échelle prise est la même. L'espace sur lequel nous travaillons se situe donc sur une échelle de 100 m sur 100 m environ afin d'avoir une lecture adéquate. Une fois le polygone dessiné sur l'espace de travail, il faut glisser l'affichage le long du banc, sans changer l'affichage, pour continuer le polygone du banc que l'on construit.

2.2 Les frontières du polygone

2.2.1 La frontière entre le banc et la berge

La végétation et les blocs sont des entités juxtaposées qui se situent sur la berge. Les altitudes sur les données image ne pouvant être observées, nous nous référons aux éléments du paysage pour placer les limites du banc. La figure 29, illustrant des photographies au sol de l'Arc en Maurienne, nous permet de localiser la position des éléments, tels que les blocs et la végétation. Cette observation nous permet de prendre le bas des blocs et de la végétation comme limite de la berge et du banc (cf. figure 30).



Figure 29 : Image de la végétation et des blocs qui constituent la berge (Google Street View)



Figure 30 : Image aérienne du banc où le trait est la limite du banc et de la berge

2.2.2 La frontière entre le banc et le chenal

La figure 31 illustre un exemple de la limite entre le banc et la berge à partir d'une image géoréférencée de mai 2010 afin de réaliser des essais pour la mise en place de la méthode. Cette image a une résolution relativement élevée contrairement à l'image de 2002 et 2006. L'analyse de la dynamique des bancs est donc réalisée globalement ; nous n'attendons pas une analyse précise et chiffrée car les images n'offrent pas, contrairement aux données MNT, des altitudes. La figure 32 illustre l'image datant de 2002, montrant la résolution faible de l'image et la difficulté d'une réelle précision pour la construction du polygone. Cette méthode est plus rapide que la méthode précédente car les polygones des bancs se construisent directement sur les images, sans aucune modification préalable.



Figure 31 : Image aérienne du banc où le trait rouge est la limite entre le banc et le chenal



Figure 32 : Image de la zone d'étude 1 datant de 2002 illustrant la difficulté de construire précisément les polygones des bancs

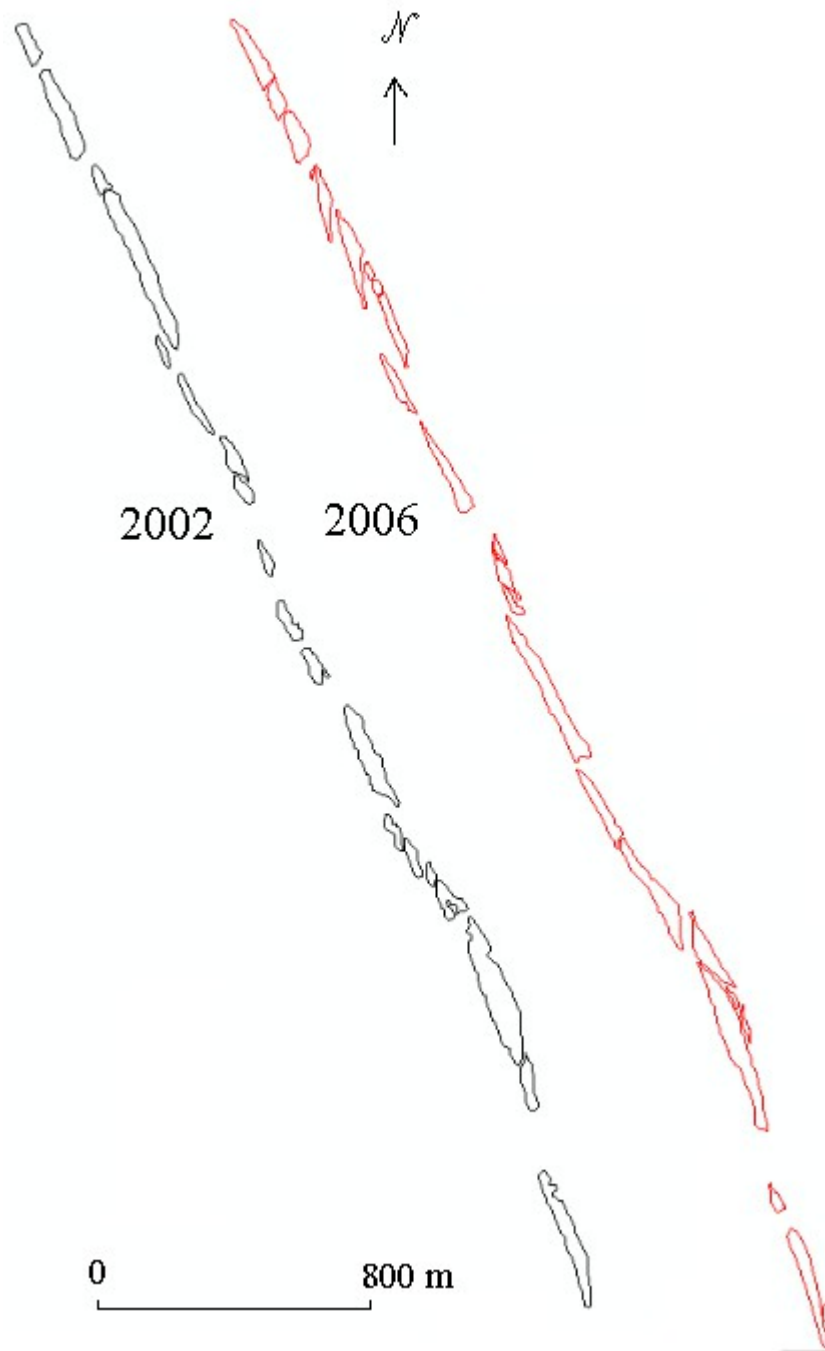


Figure 33 : Résultats de l'application de la méthode de construction des bancs à partir des données image pour 2002 et 2006

CHAPITRE 3 : APPLICATION DES RESULTATS POUR L'ETUDE DES MOUVEMENTS DES BANCs

1. Étude des bancs

1.1 Analyse des zones d'érosion et de dépôts à court terme (mai à septembre 2010)

Ce chapitre présente le second objectif du stage : l'étude de l'évolution des bancs. Nous utilisons les résultats des deux méthodes afin d'analyser la dynamique sédimentaire de la zone d'étude 1. Deux types d'étude sont présentées ; la première analyse utilise les résultats de la méthode MNT en mai et septembre 2010. Les données MNT nous permettant d'avoir des altitudes disponibles et mesurer cette érosion et dépôt. La seconde analyse, utilisant les résultats de la méthode des données image (2002 et 2006) et les résultats de la méthode à partir des MNT (mai et septembre 2010), consiste à comparer la forme des bancs et leur localisation de 2002 à 2010.

1.1.1 Les secteurs particuliers

1.1.1.a Méthode de localisation des secteurs particuliers

a) Présentation de la méthode

Les secteurs particuliers sont des zones planes et pouvant être étendues. Ces zones sont immergées en mai et émergées en septembre. Elles apparaissent donc en septembre (cf. figure 34). Deux hypothèses sont alors envisagées pour expliquer la variation de l'étendue des bancs :

- soit nous avons une accumulation de sédiments entre les deux dates
- soit une baisse du niveau d'eau entre mai et septembre, conséquence de la variation du débit (immersion de cette zone en mai et émergence en septembre).

Les secteurs particuliers, situés généralement en tête et en queue de banc, sont des parties de banc où la différence entre l'altitude moyenne de cette partie du banc et l'altitude moyenne de la surface libre d'écoulement est faible. Ces zones correspondent aux zones d'incertitude liées aux différents débits lors des deux relevés Lidar.

Dans le contexte de l'analyse de l'évolution des bancs, nous devons distinguer ces deux situations. C'est pourquoi, ces zones doivent être localisées, recensées et traitées à part.

La courbe de tarage, disponible sur la station de Sainte Marie de Cuines juxtaposée à la commune de Saint Etienne de Cuines (confluence du Glandon et de l'Arc), nous a permis de mesurer la différence de hauteur d'eau entre les deux dates. La ligne d'eau s'est abaissée de 6 cm à la station mais cette mesure n'est pas fixe sur toute la zone d'étude car elle dépend de la topographie locale ; elle nous donne un ordre de grandeur dans la différence de la hauteur de la ligne d'eau.

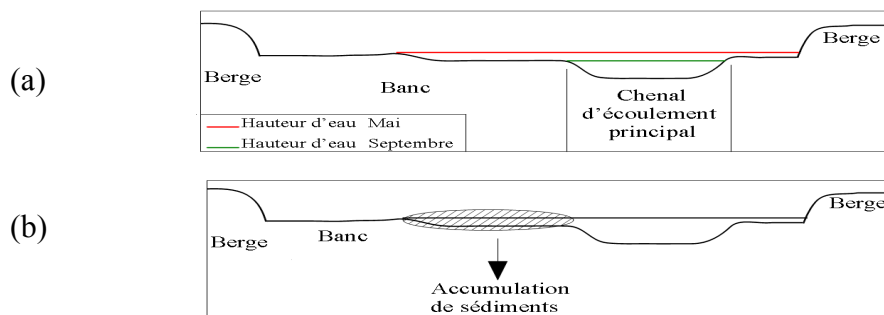


Figure 34 : Illustration de l'accroissement du banc par la variation de la hauteur d'eau (a) et par l'accumulation de sédiments (b)

b) Description de la méthode

Avant tout, nous devons construire les bancs de mai et de septembre avec la méthode de délimitation des bancs à partir des MNT (sous forme de polygone sous Arcgis 10). Ensuite, les différents rasters sont comparés entre eux afin d'appliquer la méthode décrite ci dessous.

Cette méthode illustre trois cas possibles appliqués sur les MNT disponibles.

(b : banc ; w : water/chenal libre d'écoulement)

Zone commune entre banc [mai] et banc [septembre] $Z_b(\text{mai}) > Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Érosion**
 $Z_b(\text{mai}) < Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Dépôt**

Zone commune du banc [mai] et chenal [septembre] $Z_b(\text{mai}) < Z_w(\text{sept}) \rightarrow$ **Érosion**
 $Z_b(\text{mai}) > Z_w(\text{sept}) \rightarrow$ **Érosion**

Zone commune du chenal [mai] et banc [septembre] $Z_w(\text{mai}) < Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Dépôt**
 $Z_w(\text{mai}) > Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Zone incertaine**

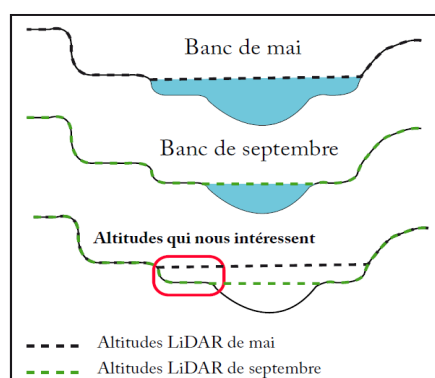


Figure 35 : Illustration des altitudes à comparer à partir des données MNT

Ces cas représentent les trois types de combinaisons possibles des jeux de données disponibles, ce qui nous permettra, entre autre, d'analyser le mouvement des bancs. Le troisième cas est celui qui nous intéresse car il représente la zone incertaine que nous étudions et que nous définissons par les secteurs particuliers (cf. figure 35). La figure 37 illustre cette zone entourée par le rectangle rouge. La figure 36 illustre un indice de l'hypothèse de la variation de la hauteur d'eau (qui a pour conséquence l'apparition du banc en septembre). L'hypothèse est la suivante : lorsque le banc de septembre s'inscrit dans le prolongement du banc de mai alors nous avons un indice pour la variation de la hauteur d'eau (banc à gauche sur la figure 36) ; au contraire, le banc de droite ne reflète que très peu la conséquence de la variation de la ligne d'eau ; le tracé semble plus aléatoire.

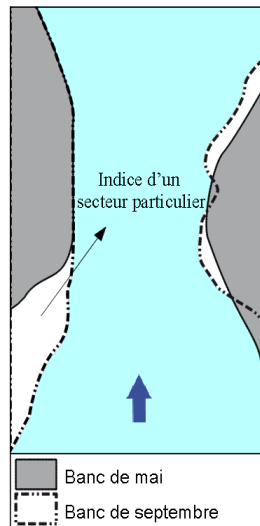


Figure 36 : Illustration des altitudes à comparer à partir des données MNT

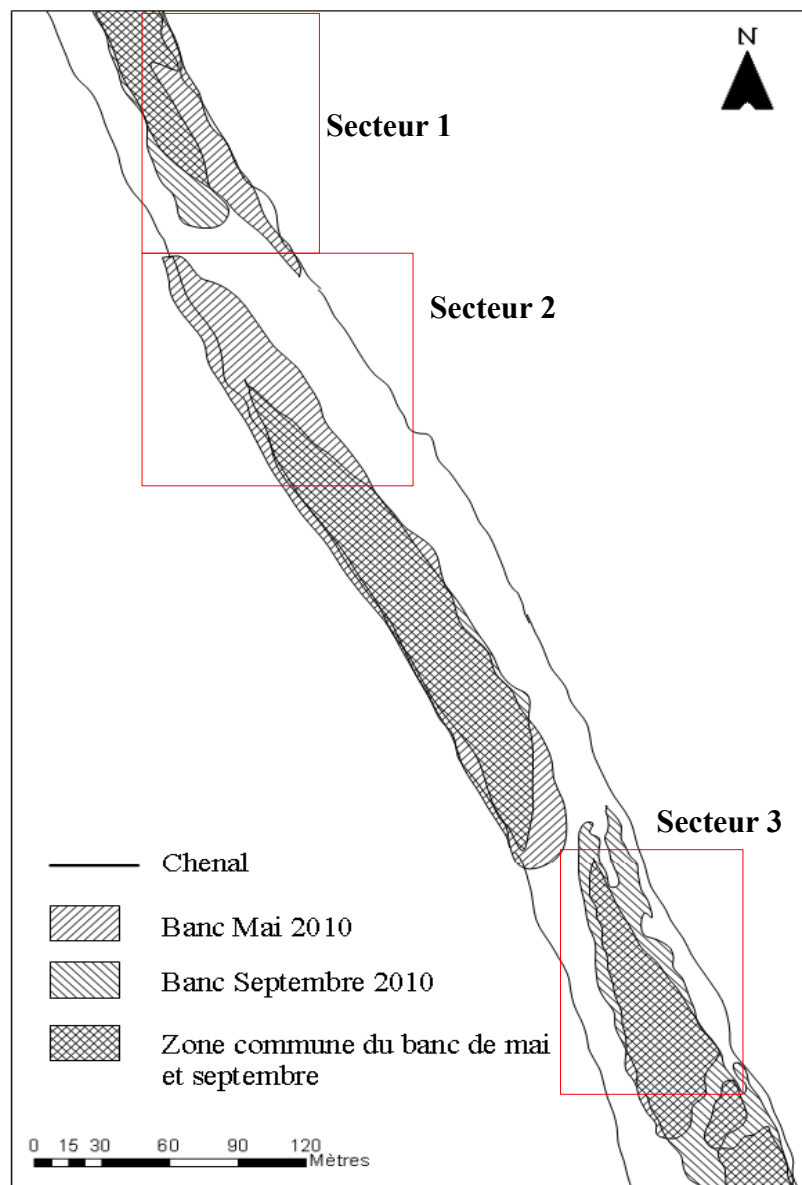


Figure 37 : Localisation des secteurs dits particuliers sur le tronçon étudié

1.1.1.b Application de la méthode

a) Zone commune du banc

Zone commune entre banc [mai] et banc [septembre] $Z_b(\text{mai}) > Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Érosion**

$Z_b(\text{mai}) < Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Dépôt**

Pour appliquer la méthode, nous prenons le premier cas qui est la zone commune entre le banc en mai et en septembre. Comme présenté, nous pouvons observer deux types de dynamiques, l'érosion ou le dépôt.

Pour ce cas, nous travaillons sur le raster du banc, qui est la soustraction du MNT de mai et du MNT de septembre (banc mai – banc septembre) ; ce raster nous permet d'observer les différentes dynamiques sédimentaires. La légende de la carte a été construite afin d'analyser directement s'il y a une érosion ou un dépôt sur la zone commune du banc en mai et en septembre.

Les altitudes de septembre supérieures aux altitudes de mai se traduit par du dépôt tandis que les altitudes de septembre inférieures aux altitudes de mai se traduit par de l'érosion.

Nous pouvons observer aisément sur le figure 4 que les zones de dépôt se situent globalement sur les bords des bancs tandis que les zones d'érosion se situent sur les bancs sur le côté de la berge.

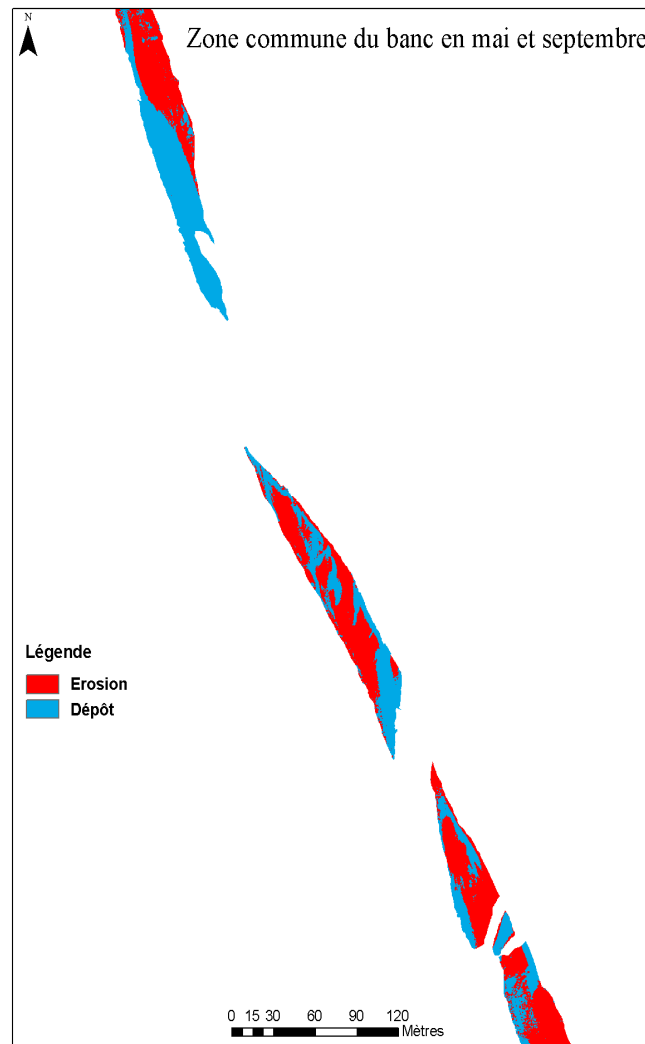


Figure 38 : Carte d'érosion et de dépôt sur la zone d'étude sur la zone étudiée

b) Zone commune du banc en mai et du chenal en septembre

Zone commune entre banc [mai] et chenal [septembre] $Z_b(\text{mai}) < Z_w(\text{sept}) \rightarrow \text{Érosion}$
 $Z_b(\text{mai}) > Z_w(\text{sept}) \rightarrow \text{Érosion}$

Le second cas de la méthode nous oblige à travailler sur le raster qui offre une zone commune entre le banc de mai et le chenal de septembre. En effet, le raster présenté sur la figure 39 est la soustraction du MNT du banc de mai et du MNT du chenal de septembre. Comme expliqué ci-dessus, nous ne pouvons observer que de l'érosion quelles que soit les différences des altitudes observées.

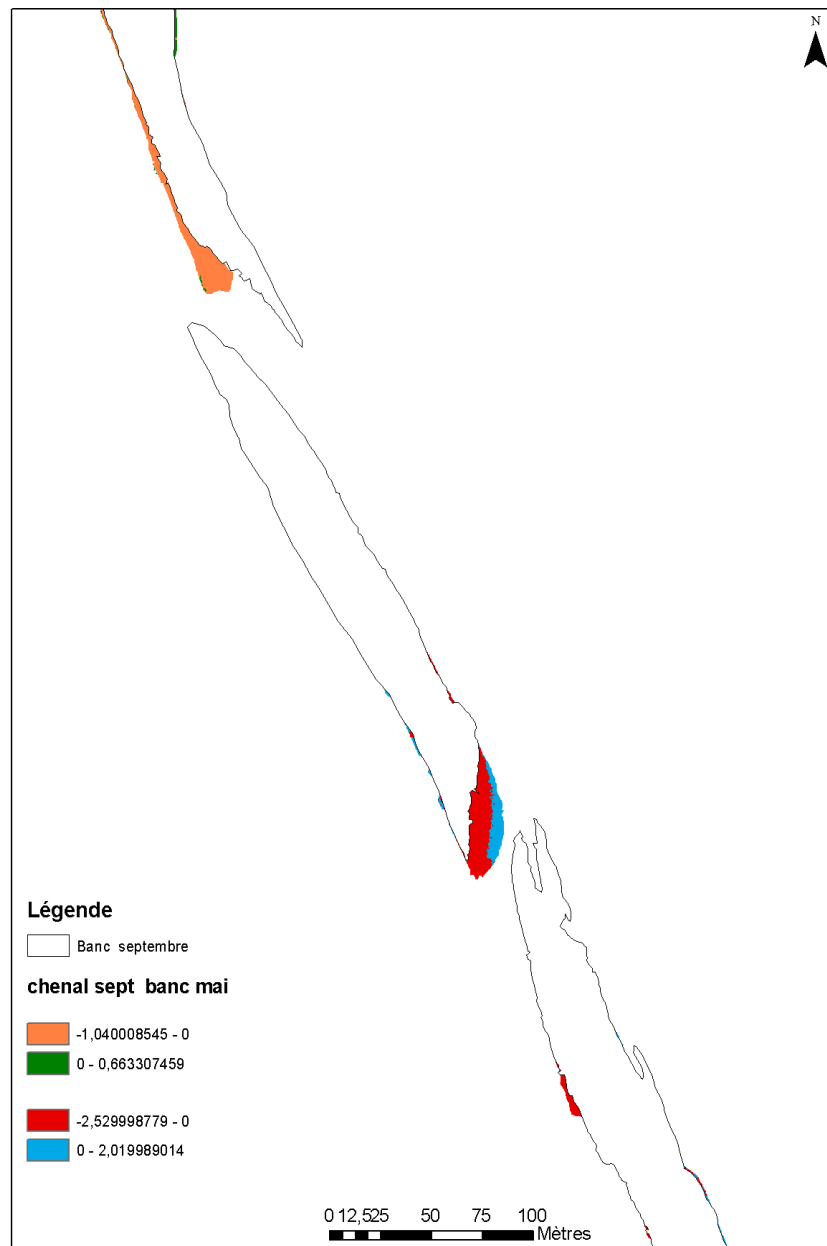


Figure 39 : Carte d'érosion et de dépôt sur la zone d'étude sur la zone étudiée

c) Zone commune du chenal en mai et du banc en septembre

Zone commune du chenal [mai] et banc [septembre] $Z_w(\text{mai}) < Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Dépôt**
 $Z_w(\text{mai}) > Z_b(\text{sept}) \rightarrow$ **Zone incertaine**

Pour ce dernier cas, nous appliquons la méthode sur un raster résultant de la soustraction du banc en septembre et du chenal en mai. La zone que nous devons observer est cette zone commune. Pour montrer cette zone en particulier, nous avons superposé au raster, les polygones des bancs de mai. L'application de la méthode sur le raster est illustrée sur la figure 40.

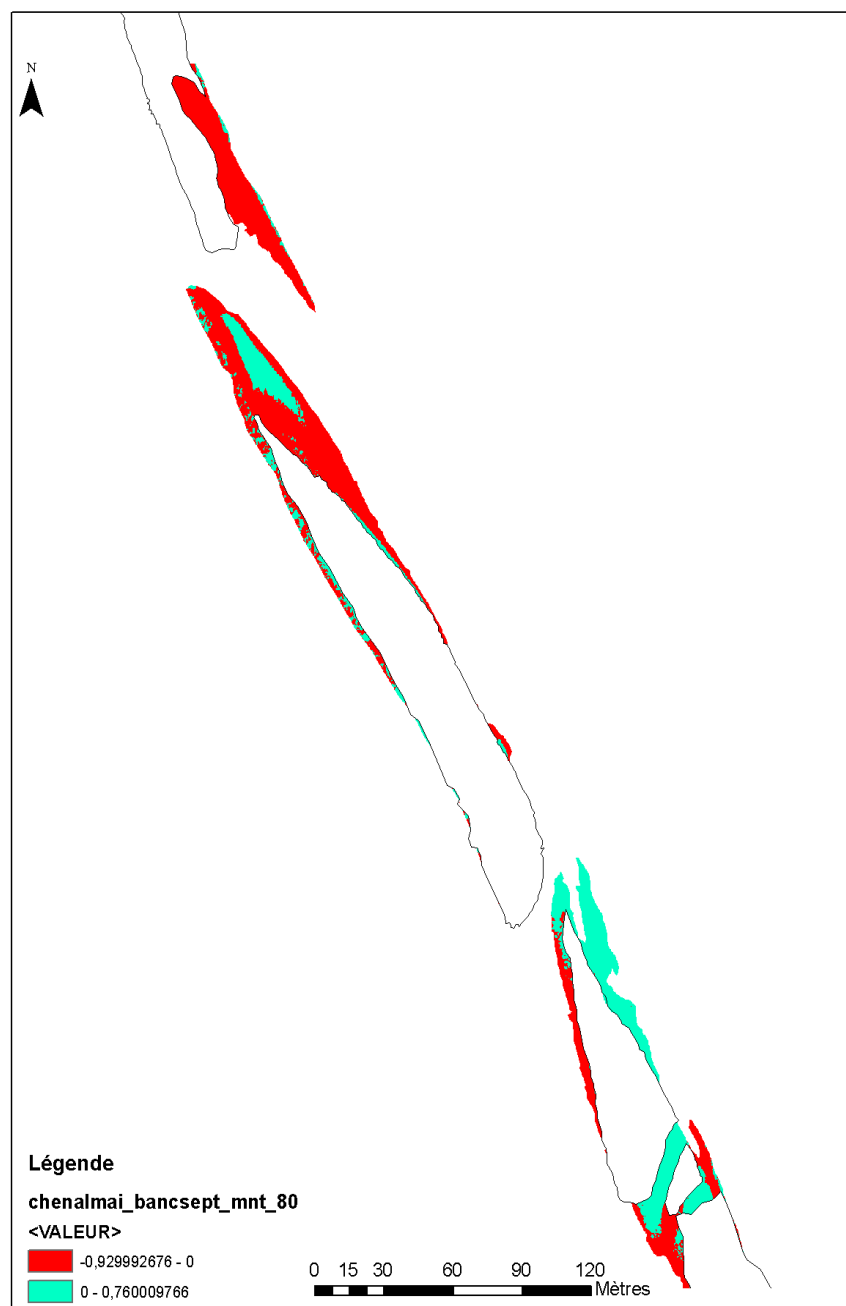


Figure 40 : Carte des secteurs particuliers et de dépôts sur la zone étudiée

1.1.1.c Discussion

Pour la discussion nous utilisons deux types de données. Le premier type de données utilisées sont les photographies aériennes à partir desquelles nous analysons visuellement les bancs de sédiments. La seconde nous permet d'obtenir des données quantitatives et ainsi analyser les bancs à partir des MNT, en construisant des profils.

a) Analyse des données quantitatives

Dans le but d'une démonstration quantitative, nous utilisons les altitudes des données MNT et reprenons l'exemple du secteur 2.

Pour rappel, le but de cette seconde étape est de comparer les altitudes du banc aux altitudes de la hauteur d'eau (chenal libre d'écoulement).

A partir des rasters de mai et de septembre, deux figures ont été construites :

- une carte représentant la soustraction du chenal de mai à celui de septembre (figure 41).
- des profils en travers issus des rasters de mai et septembre (figure 43, 44, 45 et 46).

La figure 41 est une carte simplifiée de la soustraction du MNT de mai sur celui de septembre. Les valeurs positives (couleur bleue ciel) étant les altitudes de septembre supérieures à celle de mai, tandis que les valeurs négatives (couleur orange) représentent les altitudes de septembre inférieures aux altitudes de mai.

A partir de cette figure, nous pouvons observer qu'une partie du banc de septembre, situé au nord-ouest de la zone d'étude, est immergée en partie par la ligne d'eau du chenal de mai. Il faut noter que tout le banc de septembre n'est pas recouvert par la ligne d'eau de mai. En effet, il existe une partie, en forme de triangle, du banc de septembre dont les altitudes sont supérieures à la hauteur d'eau de mai. Nous pouvons donc avancer l'hypothèse que la variation de la hauteur d'eau a fait émerger une grande partie du banc de septembre, mais qu'un dépôt s'est aussi formé sur le milieu du banc de septembre.

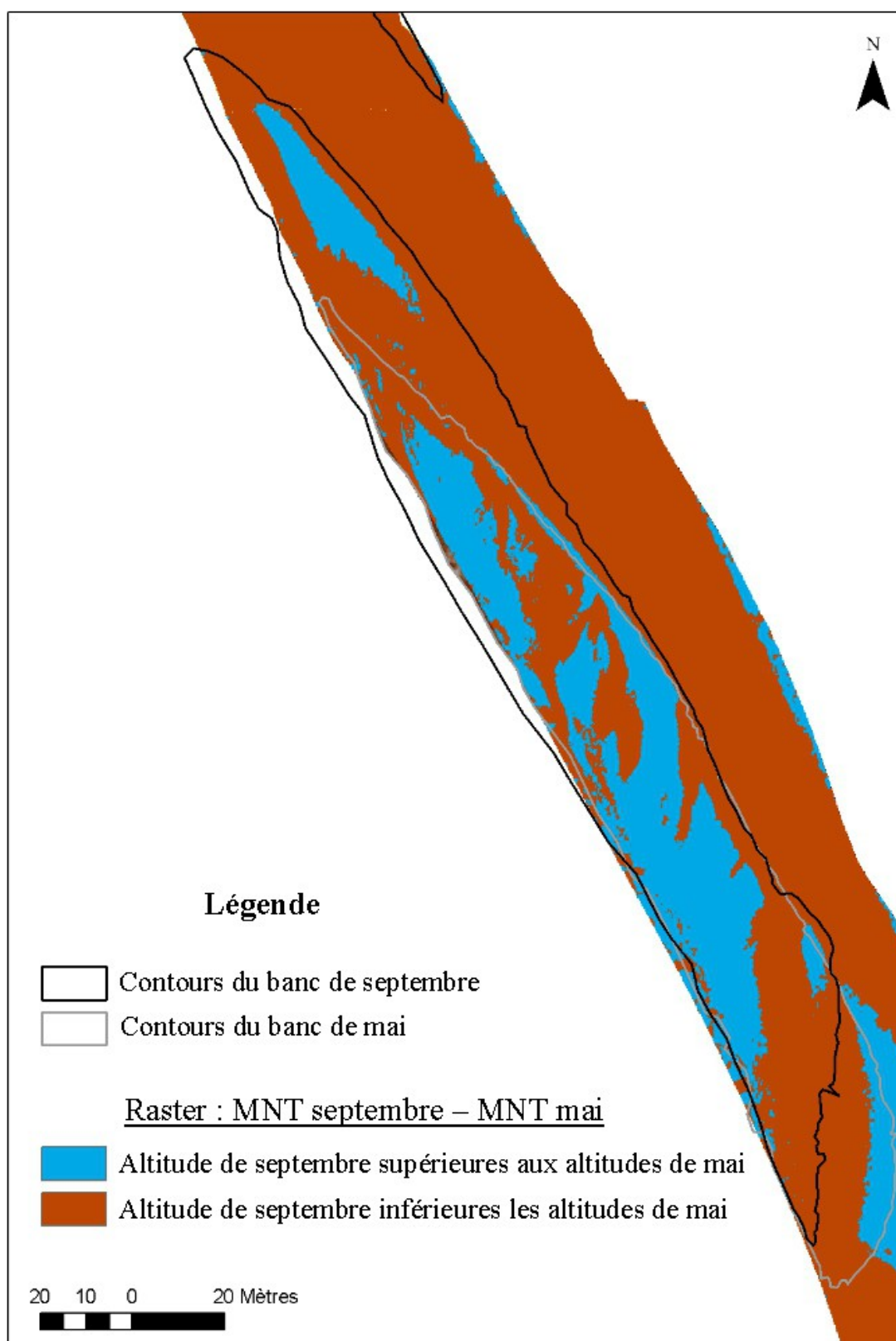


Figure 41 : Carte de différence des altitudes des MNT de septembre et de mai

Quatre profils en travers ont été construits à partir du MNT de mai et de septembre afin d'obtenir une autre vision de la zone étudiée et comparer les profils lors des deux dates. La figure 42 donne la position de ces profils sur le secteur 2. Ces profils permettent d'étudier plus en détail la comparaison des deux jeux de données et palier les constructions des classes de valeurs présentes sur la figure 41.

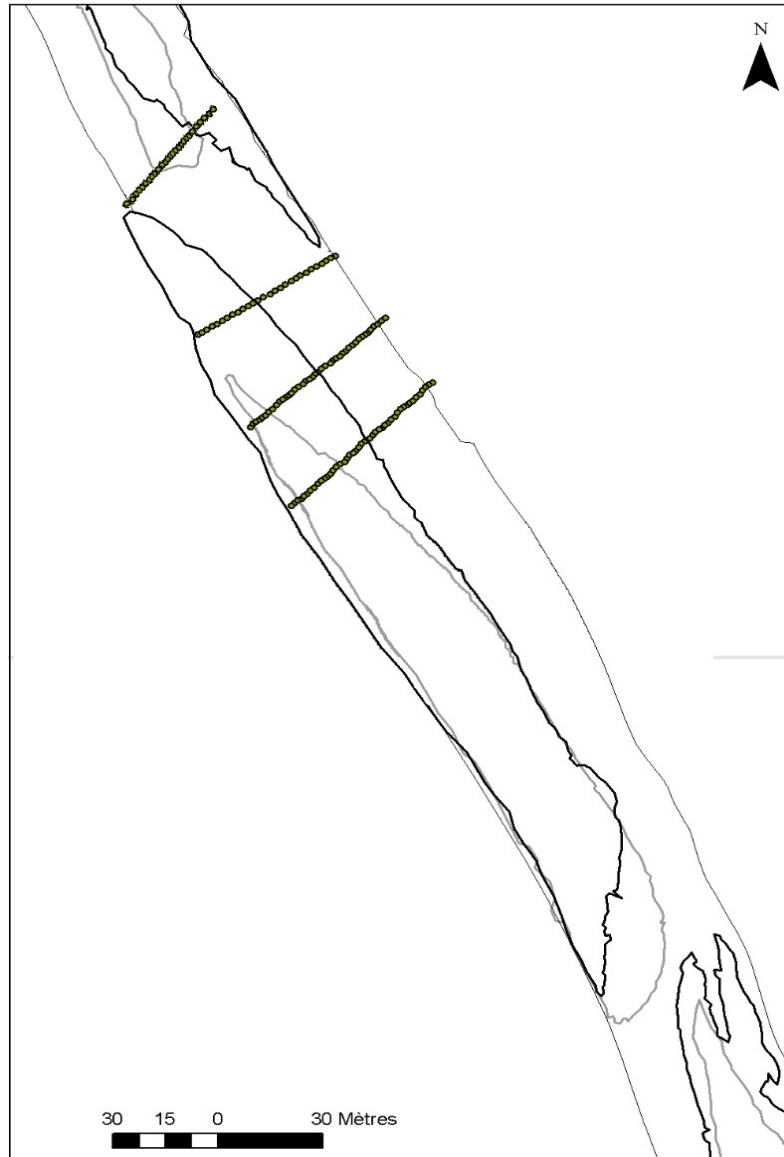


Figure 42 : Carte de localisation des profils construits à partir des MNT

- Le profil 1 :

La figure 43 illustre le profil 1 situé à l'aval du banc de septembre et mai ; il nous permet de comparer les altitudes des lignes d'eau des dates et nous pouvons observer clairement que la ligne d'eau de septembre est bien moins élevée que celle de mai.

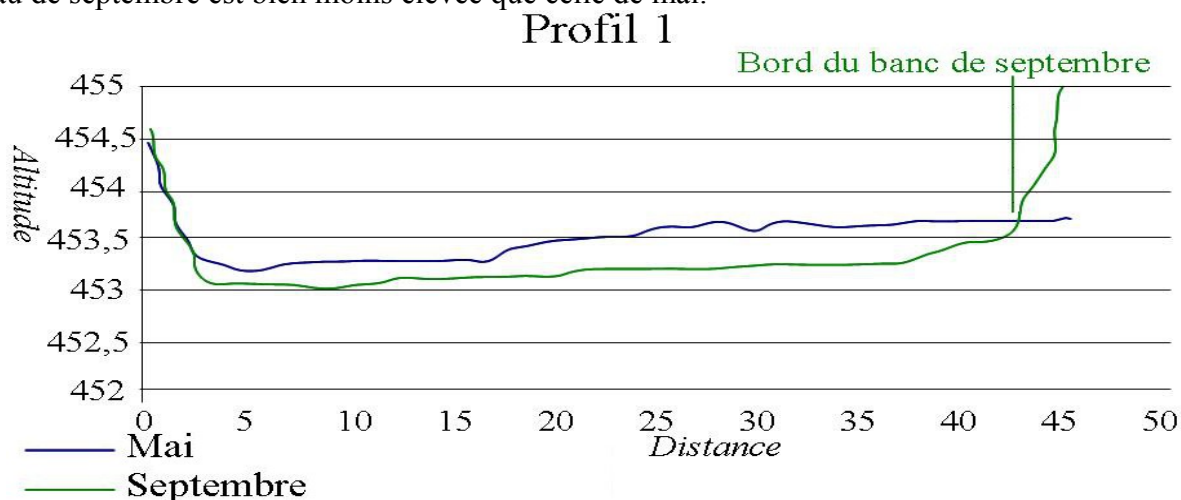


Figure 43 : Profil 1 réalisé perpendiculairement à l'écoulement

- Le profil 2 :

Le profil 2 (cf. figure 44) reprend la zone où d'après nos hypothèses, nous observons les deux phénomènes (la variation de hauteur d'eau et l'accumulation de sédiments). Le premier est la différence de hauteur d'eau élevée (50cm) entre mai et septembre.

Le second phénomène est le processus érosif ou d'accumulation de sédiments. De 0 à 2,5 m, nous observons une zone que la chasse ou la crue ont fortement érodée, les altitudes correspondant toutes deux aux berges de mai et septembre. De 2,5 à 5 m, il peut s'agir de la variation de la hauteur d'eau et non pas le processus d'érosion à l'origine de ce changement de topographie. Les altitudes de mai à cette distance correspondent à la ligne d'eau, ce chenal semblerait être rempli d'eau en mai (car la hauteur de la ligne d'eau le permet) et vide en septembre (hauteur d'eau en septembre beaucoup moins importante). Puis de 5 à 15 m, nous pouvons observer une zone d'accumulation de sédiments, car le banc de septembre se trouve au dessus de la ligne d'eau de mai ; il ne s'agirait donc pas ici d'un phénomène de variation de hauteur d'eau. Ces sédiments se sont probablement déposés à la fin de la crue ou de la chasse, lorsque l'énergie du cours est trop faible pour charrier son transport grossier.

Profil 2

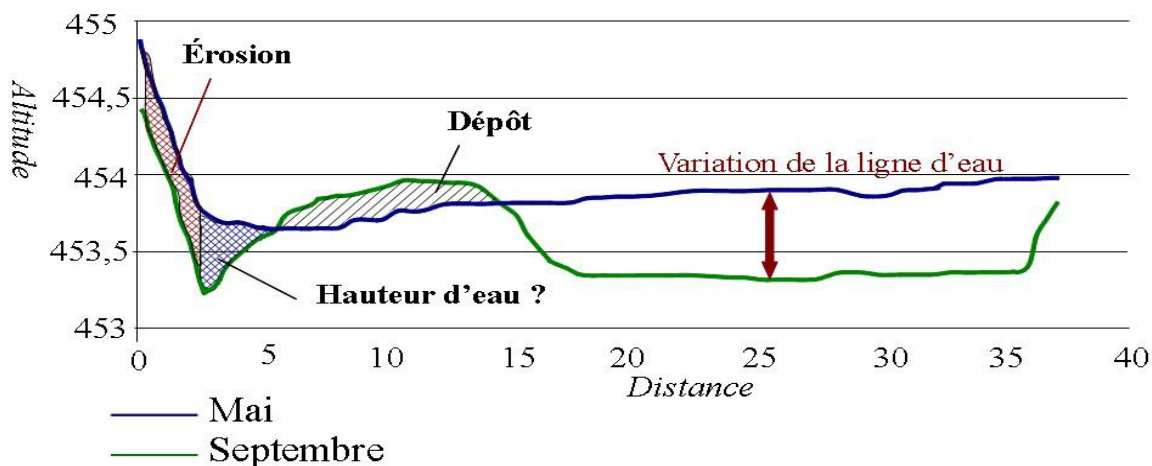


Figure 44 : Profil 2 réalisé perpendiculairement à l'écoulement

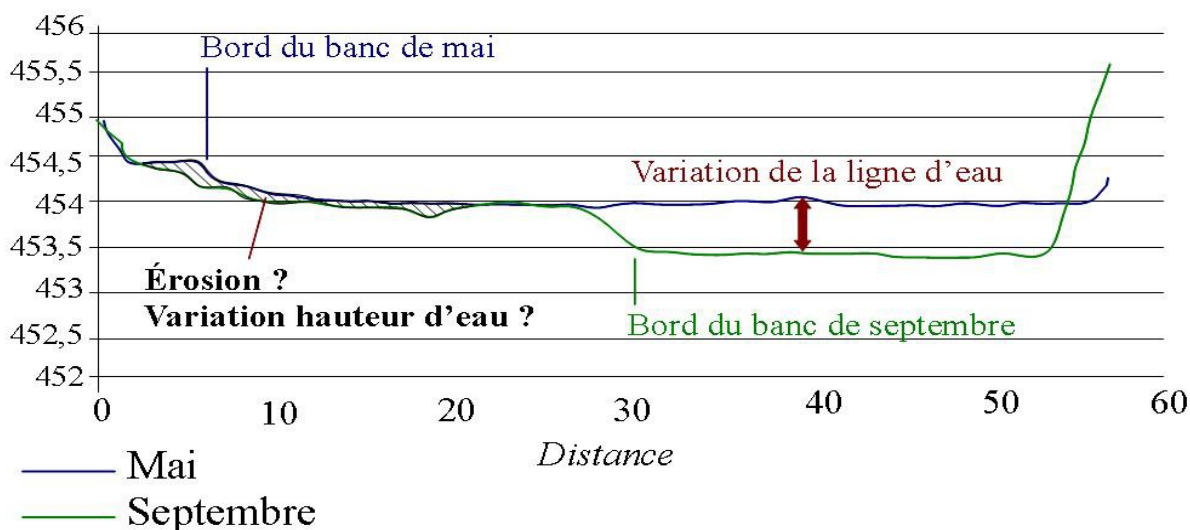
• Le profil 3 :

Le profil 3 (cf. figure 45 (a)) est plus intéressant car il est situé sur le banc de mai et celui de septembre. Le banc est visible par la rupture de pente sur le profil de mai et de septembre. Il est beaucoup plus étendu en septembre qu'en mai.

Nous pouvons comparer les altitudes aux deux dates et affirmer une érosion ou un dépôt jusqu'au bord du banc de mai, cette zone n'étant pas tributaire de la hauteur d'eau. En effet, la figure 45 (b), construite à partir du profil 3 schématise les zones tributaires ou non de la ligne d'eau de mai. La hauteur d'eau en mai tracée (trait pointillé rouge), toutes les zones en dessous ou au même niveau que cette ligne sont considérés comme étant tributaires de la ligne d'eau de mai.

Sur le profil 3, nous sommes certains d'une érosion de 0 à 7 m (7 m qui équivaut au bord du banc de mai). De 7 m à 30 m, nous ne pouvons ni affirmer une érosion ni l'hypothèse de la variation de la hauteur d'eau ; cette zone étant immergée en mai, mais émergée en septembre. Ensuite, à partir de 30 m, nous identifions clairement la différence de hauteur de la ligne d'eau qui n'est pas de 6 cm (d'après la courbe de tarage de Sainte Marie de Cuines), mais d'environ 50 cm dans ce secteur. Ce profil, ainsi que le profil 4 prouve que la variation de la hauteur de la ligne d'eau n'est pas uniforme sur la zone d'étude et peut être plus ou moins accentuée sur certains secteurs.

Profil 3



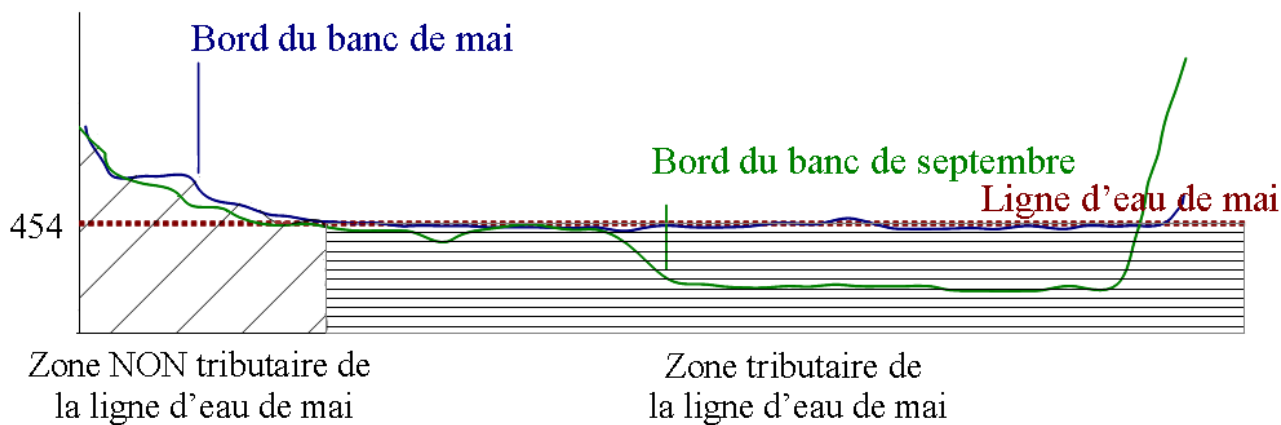


Figure 45 : Profil 3 réalisé perpendiculairement à l'écoulement (a) et schéma des zones tributaires de la hauteur d'eau de mai (b)

• Le profil 4 :

Comme pour le profil 3, le quatrième profil (cf. figure 46) nous offre une comparaison des bancs aux deux dates. En effet, de 0 à environ 20 m (bord du banc de mai), nous observons les conséquences des dynamiques d'érosion et de dépôts bien identifiées sur le banc aux deux dates. A partir de la frontière du banc de mai et du chenal, il est plus raisonnable d'envisager des hypothèses. Pour être certains de ces hypothèses, il faudrait disposer d'un suivi bathymétrique et sédimentaire effectué aux deux dates sur la zone d'étude. Du bord du banc de mai au bord du banc de septembre (de 20 m à 30 m environ), le banc de septembre est recouvert par la ligne d'eau de mai, nous observons donc un retrait de la ligne d'eau plutôt qu'une accumulation en septembre.

Profil 4

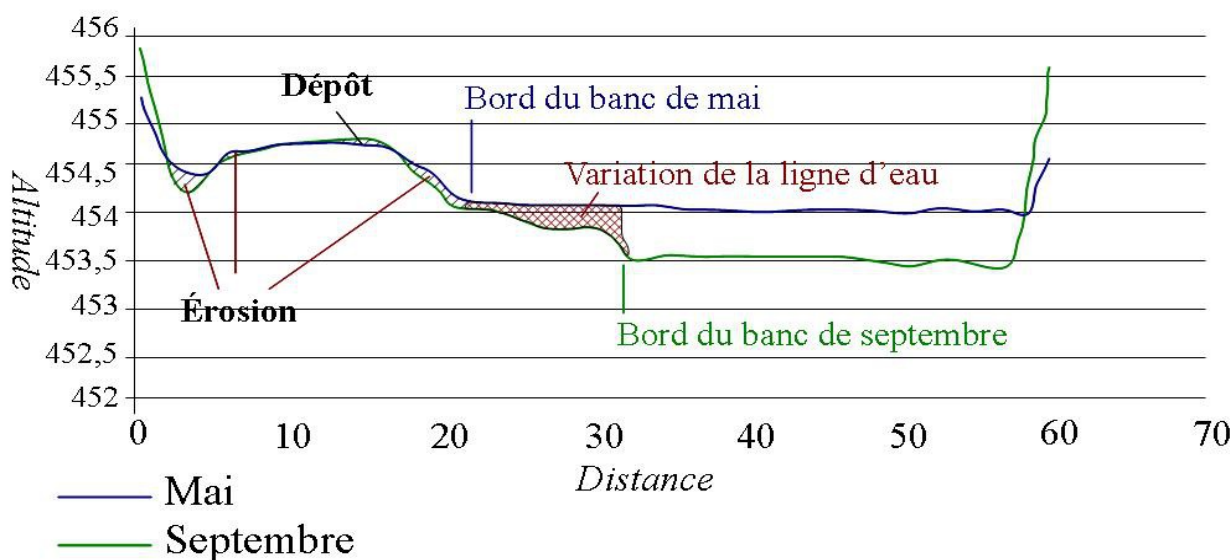


Figure 46 : Profil 4 réalisé perpendiculairement à l'écoulement

b) Analyse des photographies aériennes

Nous étudions plus en détail ces trois secteurs sélectionnés dans le tronçon d'étude. Elles ont été sélectionnées (cf. figure 42) afin de cibler les indices se basant sur la morphologie du banc de mai et de septembre et ainsi d'éliminer les secteurs qui ne rentrent pas dans la définition d'un secteur particulier.

Nous notons que trois figures suivantes sont constituées d'images aériennes (où l'image de mai a été superposée à l'image de septembre, qui a été mise en transparence à 50% ; les limites dessinées correspondent aux bords des bancs émergés) et de croquis dessinant l'image aérienne.

- Secteur 1

La figure 46 illustre un fort accroissement de la surface du banc. Ce fort accroissement s'explique soit par une immersion de cette partie du banc en mai et une émergence en septembre, soit par une accumulation de sédiments entre les deux dates.

Tout d'abord, nous voyons que le banc de septembre s'inscrit dans le prolongement du banc de mai. En effet, les deux limites de mai et septembre, situées en aval du croquis, se superposent sur une grande partie du banc. Cette première observation nous laisse penser que l'accroissement du banc serait dû à la différence de hauteur de la ligne d'eau entre mai et septembre.

Le second phénomène observé est la conséquence d'une dynamique sédimentaire. En effet, une partie du banc de mai a disparu sous l'eau en septembre. Sur la figure, nous observons ce phénomène par la partie du banc de mai colorié en rouge. Si la hauteur d'eau est la conséquence dominante de l'accroissement du banc de septembre, alors l'amas de sédiments observé sur le banc de mai a été érodé avant l'acquisition des données de septembre. Nous remarquons cet amas sur la figure 46. De plus, cette amas se situe au milieu du chenal d'écoulement de septembre, elle est donc directement exposée au processus érosif.

Dans cet exemple, nous avançons l'hypothèse d'une combinaison de la conséquence du débit sur les bancs (la différence de la hauteur d'eau de mai et septembre) et d'un processus érosif constaté en septembre.

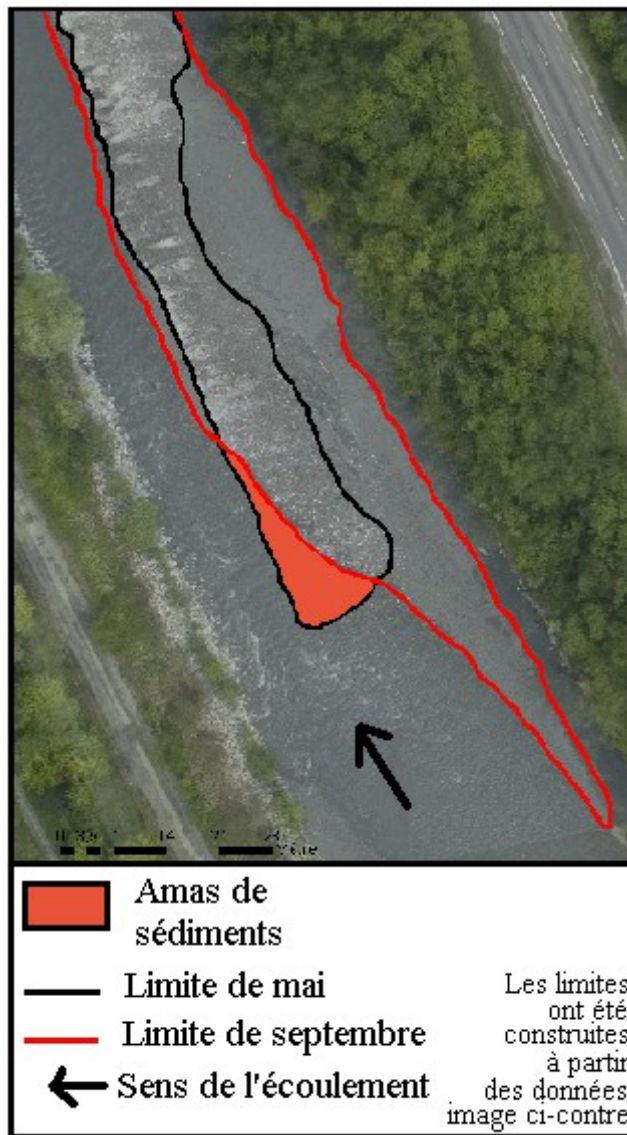


Figure 46 : Image aérienne de mai et septembre du secteur 1

- Secteur 2

La figure 47 illustre le second secteur observé sur le tronçon de la zone d'étude. Nous pouvons observer l'accroissement du banc de septembre, inscrit dans le prolongement des limites du banc de mai. Cet exemple rappelle l'observation du secteur 1.

Du fait de ce prolongement observé, il semblerait que cette zone soit tributaire de la différence de hauteur d'eau. Dans ce cas, la partie du banc est immergée en mai et émergée en septembre.

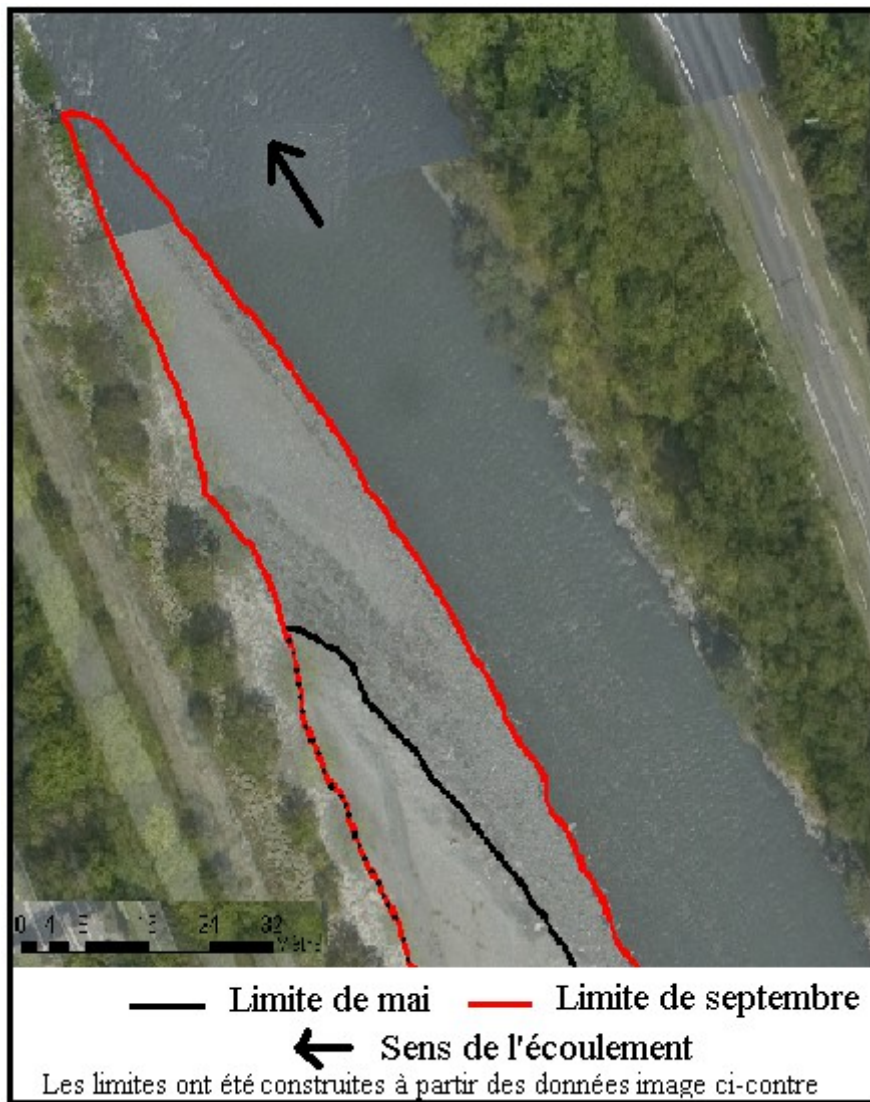


Figure 47 : Image aérienne du secteur 2

- Secteur 3

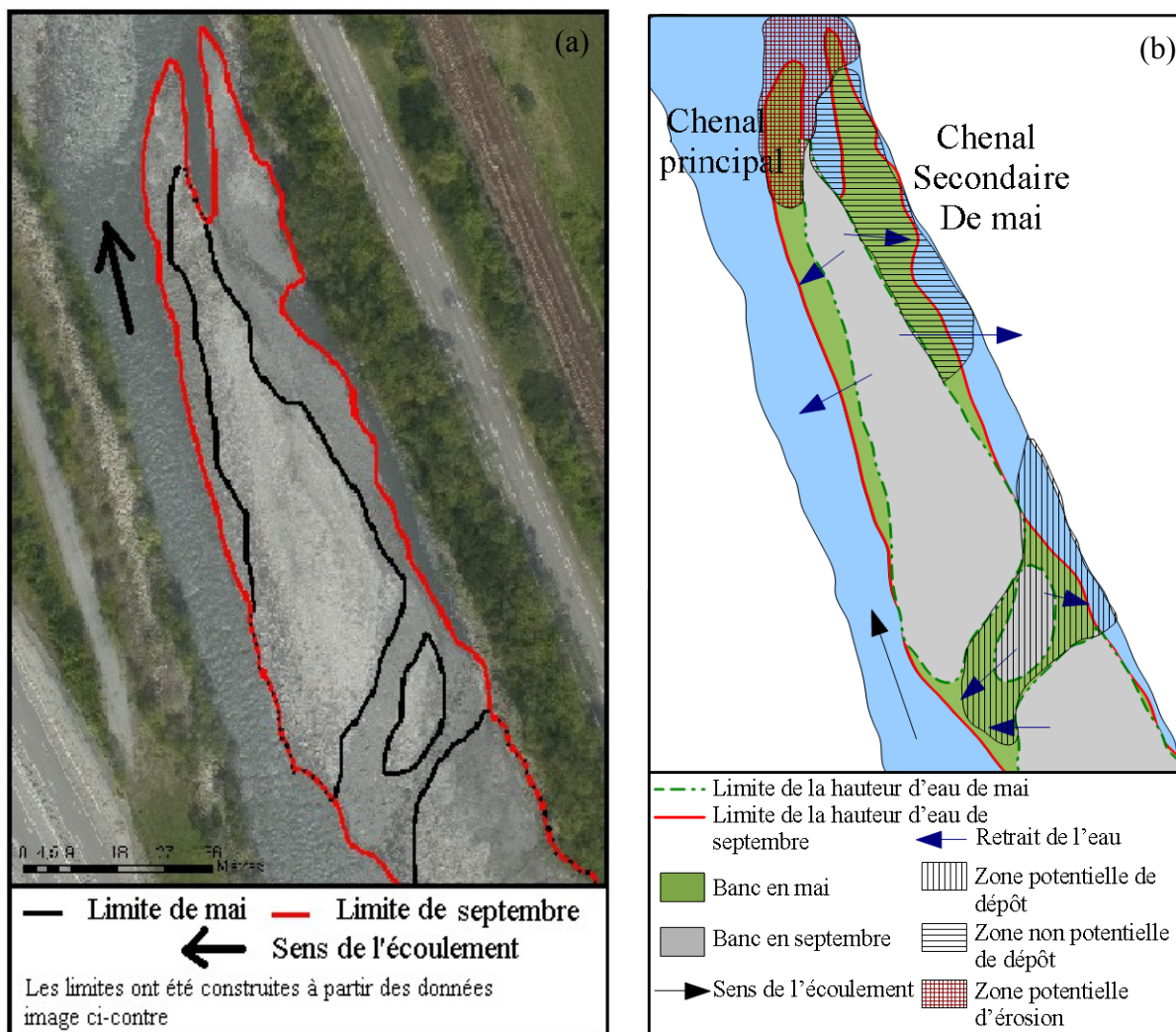


Figure 48 : Image aérienne du secteur 3 (a) et croquis de l'image (b)

La figure 48 illustre le secteur 3. Cette figure montre le prolongement du banc de septembre dans celui de mai. Ce banc, comme nous pouvons le constater en septembre, n'est qu'un seul banc. Nous pouvons avancer l'hypothèse que le banc en mai est divisé en surface (conséquence de la variation de la hauteur d'eau). Ce banc n'est donc peut être qu'un seul banc soumis à la variation de la ligne d'eau de mai à septembre. De plus, s'il y a des zones de dépôts de sédiments en rive droite, les dépôts devraient se situer plus à l'amont entre les deux bancs (sur la zone potentielle de dépôt sur la figure 48 (b)). En effet, lorsque le débit diminue, le cours d'eau dépose les sédiments à proximité du chenal d'écoulement principal. De plus, la zone potentielle de dépôts est appelée car elle est située à proximité du chenal d'écoulement ; logiquement, nous devrions observer des zones d'érosions plutôt que de l'accumulation.

Pour conclure, l'usage des photographies aériennes et des MNT Lidar nous permettrait d'isoler ces secteurs où nous constatons un fort accroissement de l'étendue du banc de mai à septembre. Les photographies aériennes nous permettent de sélectionner les secteurs susceptibles de nous intéresser, tandis que les MNT nous permettent de comparer les altitudes de mai et de septembre. Sur certains secteurs, les variations d'eau peuvent être à l'origine de cette étendue d'eau, mais il est possible que ce phénomène puisse être couplé à un dépôt en septembre.

1.2 Étude des zones d'accumulation et d'érosion à court terme

• Étude globale des bancs

Nous découpons le site d'étude numéro 1 en trois tronçons afin d'analyser progressivement les zones d'érosion et de dépôts entre mai et septembre. Le premier tronçon rassemble les trois bancs situés à l'aval de la zone d'étude, le second tronçon rassemble quatre bancs et enfin le dernier tronçon entoure le premier banc en amont de la zone d'étude, juste après le tournant (cf. figure 49).

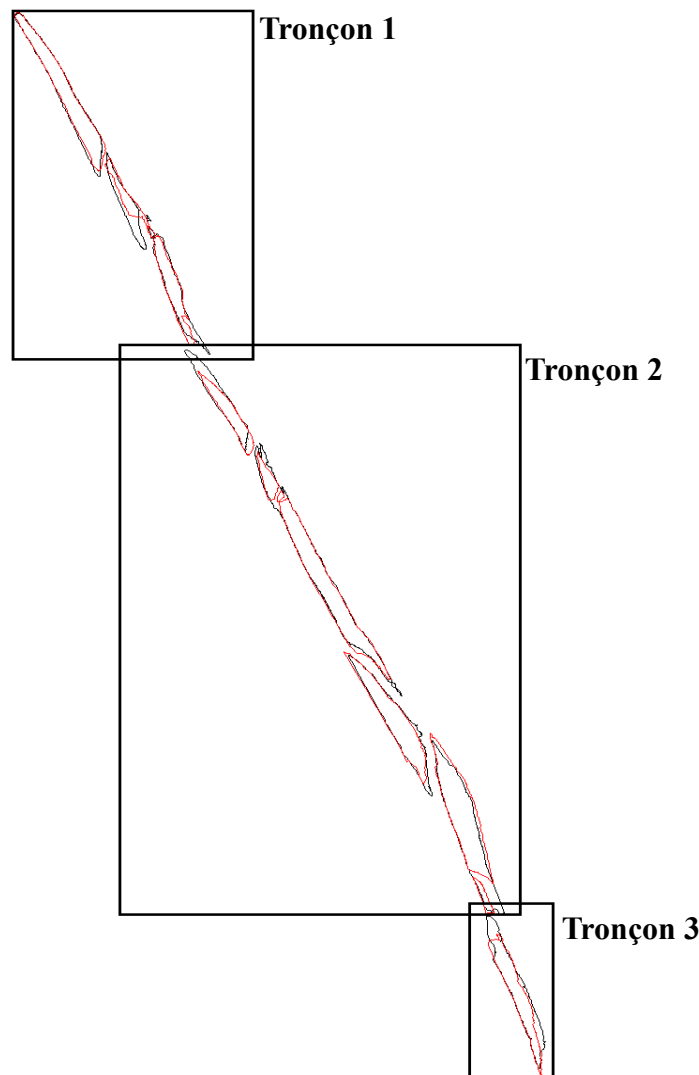


Figure 49 : Localisation des tronçons sur la zone d'étude numéro 1

Afin d'étudier les dépôts ou érosion entre mai et septembre, nous avons soustrait le MNT de mai à celui de septembre. Sur les trois figures (cf. figure 50, 51 et 52), la couleur orange représente les altitudes de septembre inférieures aux altitudes de mai. La couleur bleue représente les altitudes de septembre supérieures aux altitudes de mai. En annexe (cf. annexe 2, 3 et 4), nous présentons des cartes similaires des mêmes zones où les classes d'altitude sont plus nombreuses ; nous pouvons donc évaluer si l'érosion ou l'accumulation est faible ou très marquée. Sur les trois figures, les contours des bancs de mai et septembre ont été rajoutés pour aider à la compréhension des dynamiques sédimentaires.

Nous pouvons remarquer sur la figure 50, que les altitudes de la hauteur d'eau de septembre sont inférieures à celles de mai (du à la baisse du débit), excepté sur un site à l'amont du premier tronçon (valeurs extrêmes des altitudes [-0,899 ; 1,47]). Sur les trois bancs en aval du site d'étude, nous observons une érosion à l'intérieur du banc (côté berge), et des dépôts à l'extérieur des bancs, du côté du chenal.

La figure 51 illustre le second tronçon, où les altitudes de septembre inférieures à celles de mai couvrent la majorité du chenal (valeurs extrêmes des altitudes [-2,88 ; 2,059]); cette constatation montre que la hauteur d'eau de mai est supérieure à la hauteur d'eau de septembre et est aussi due à la baisse de débit. Sur les bancs, les zones de dépôts se situent en majorité à l'intérieur des bancs (côté berge), tandis que les zones d'érosion sont localisées en bord de banc du côté du chenal.

Nous pouvons observer sur le troisième tronçon (cf. figure 52) que les zones de dépôts se situent en majorité sur le banc, tandis que le chenal montre une baisse de la ligne d'eau constatée de mai à septembre (valeurs extrêmes des altitudes [-0,989 ; 1,239]).

Cette répartition des dynamiques d'érosion et d'accumulation sur le banc s'explique par les répartitions des vitesses dans le chenal principal d'écoulement. Nous notons qu'entre mai et septembre, une chasse de barrage a été effectuée et une crue survenue sur le cours d'eau. Nous avons donc deux phénomènes : lors du pic de crue, la vitesse et le débit plus élevés que la situation normale (étiage), un phénomène d'érosion survient sur les bancs, puis lors de la décrue, la vitesse et le débit baisse, la capacité de transport est saturée et donc des dépôts de sédiments.

Mois (2010)	Débit (m³/s)	Hauteur d'eau (m)
MAI	27,08	0,67
JUIN	38,85	0,80
JUILLET	34,10	0,78
AOUT	20,67	0,59
SEPTEMBRE	11,74	0,42
2010	15,73	0,45

Tableau 2 : Moyennes des débits et hauteurs d'eau relevés pour la période mai-septembre 2010

Le tableau 2 illustre les moyennes des débits et hauteur d'eau pour la période mai-septembre 2010. Nous remarquons donc une hausse du débit et de la hauteur durant le mois de juin, ce qui correspond à la crue et la chasse de barrage durant ce mois. Nous notons que la hauteur d'eau est doublée en juin par rapport à septembre ; la moyenne des débits de septembre est trois fois plus basse que celle de juin. Ces deux événements expliquent les dynamiques d'érosion et de dépôts sur les bancs du cours d'eau.

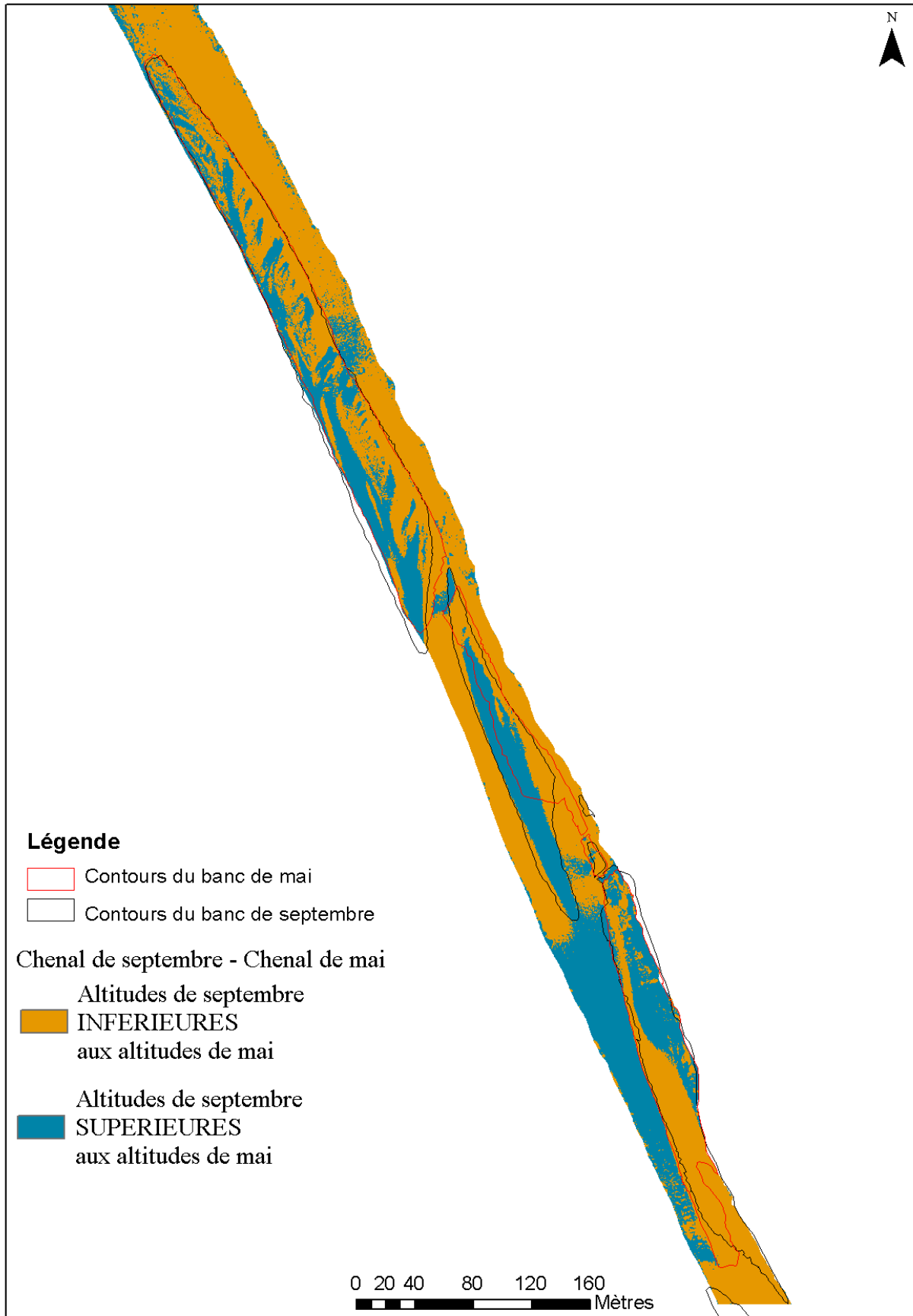


Figure 50 : Illustration des altitudes de septembre supérieures ou inférieures aux altitudes de mai sur le tronçon 1

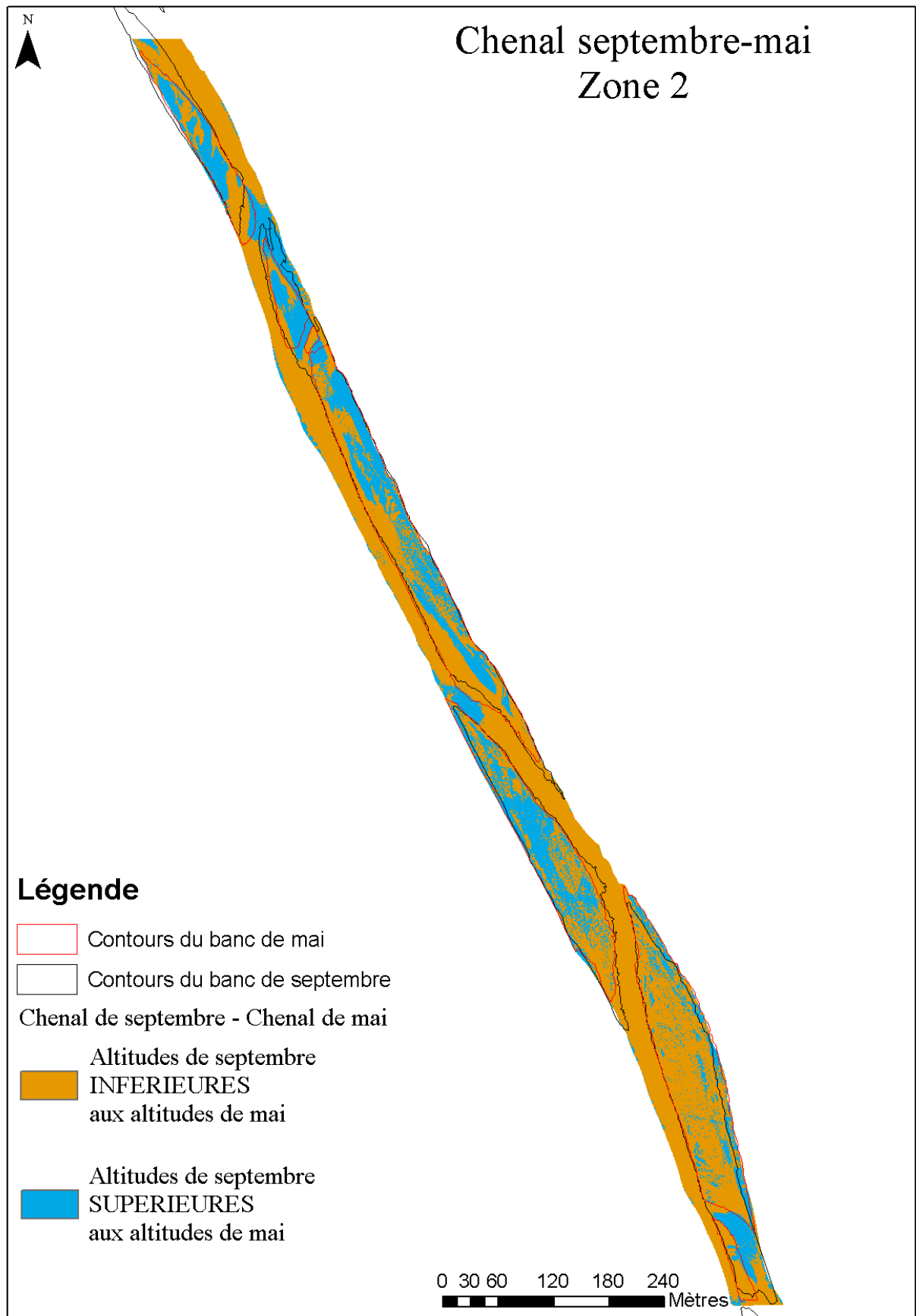


Figure 51 : Illustration des altitudes de septembre supérieures ou inférieures aux altitudes de mai sur le tronçon 2

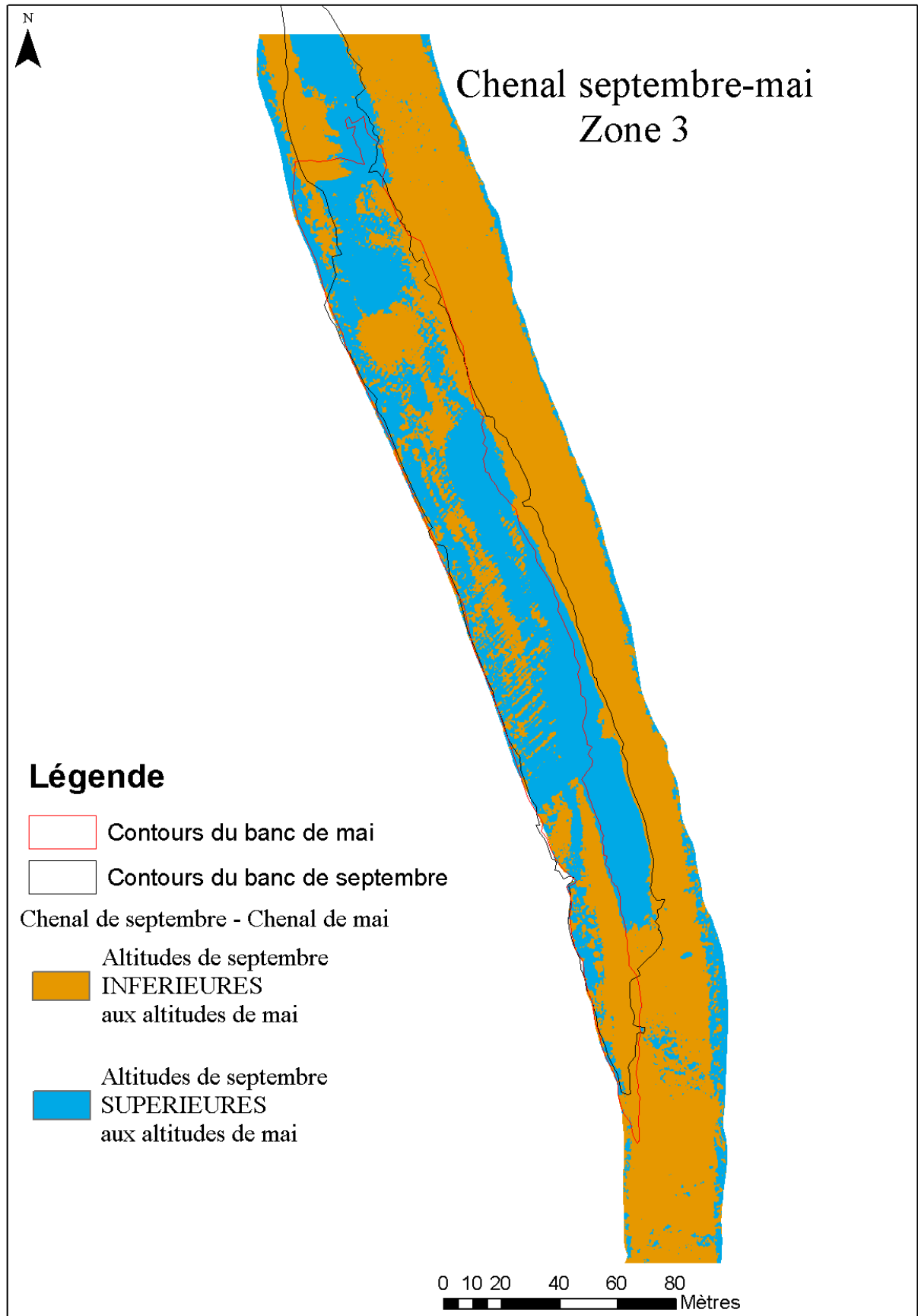


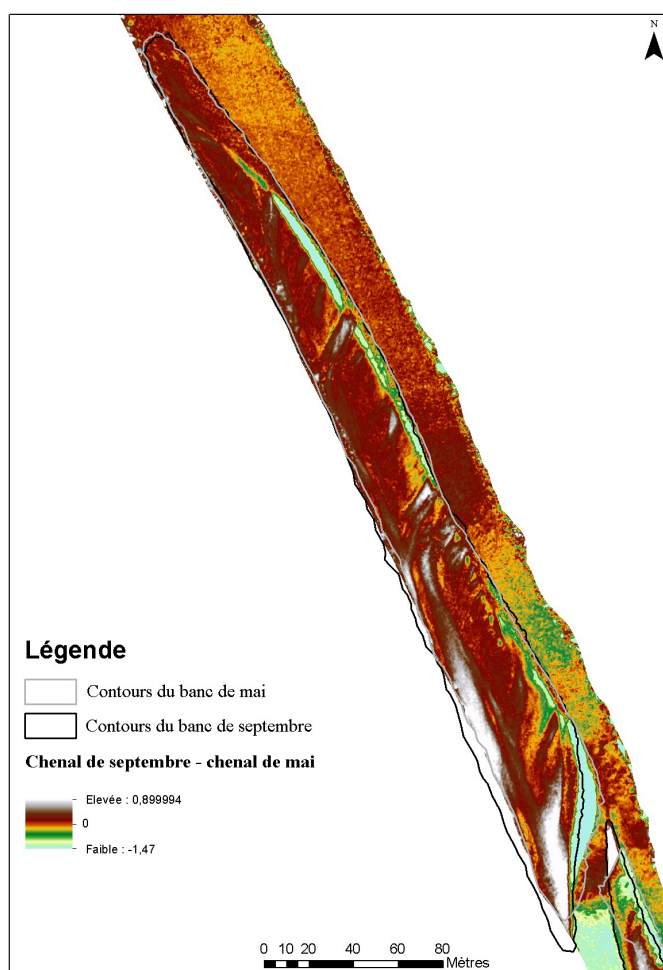
Figure 52 : Illustration des altitudes de septembre supérieures ou inférieures aux altitudes de mai sur le tronçon 3

● Étude locale des bancs

Dans cette étude locale des bancs, nous analysons deux bancs situés dans le tronçon numéro 1. Le banc 1 est le premier banc à l'aval du tronçon 1 et le second banc est le dernier banc du tronçon 1 (cf. figure 50).

Banc 1

La figure 53 reprend le raster où le chenal de mai a été soustrait au chenal de septembre. Comme nous pouvons l'observer sur la légende, les couleurs orangées tendent vers 0, les couleurs rouge, marron et blanche illustrent les zones de dépôts tandis que les couleurs jaune, verte et bleue ciel sont les altitudes négatives, des zones d'érosion. Sur le banc, l'érosion est marquée au niveau du bord du banc et du chenal et sur les chenaux transverses. Les dépôts sont localisés sur le banc et du côté des berges. La hauteur d'eau de mai étant supérieure à la hauteur d'eau de septembre, les altitudes du chenal d'écoulement principale devraient être toutes positives. Les altitudes du chenal sont très hétérogènes. Nous pouvons observer, au niveau de la tête du banc, que les altitudes de septembre sont supérieures aux altitudes de mai (couleurs verte et jaune dans le chenal). Certaines hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ce phénomène. La première hypothèse avance l'idée que des sédiments grossiers situés dans le chenal sont à l'origine de remous en septembre et le Lidar les enregistre en tant qu'altitude de la hauteur d'eau. La seconde hypothèse est que cette augmentation de la hauteur d'eau en septembre est due à des dépôts sédimentaires immergés et qui augmentent la hauteur de la rivière à des endroits localisés du cours d'eau. La dernière hypothèse, en lien avec la seconde hypothèse, explique que le fond du lit du chenal d'écoulement n'est pas uniformément plat ; la hauteur d'eau n'est donc pas la même et dépend de la topographie immergée sous le cours d'eau, avec une succession de zones de dépôts et d'érosion qui fait varier la hauteur d'eau ; cette variation de la hauteur d'eau est plus marquée en septembre qu'en mai.



Banc 2

La figure 54 illustre le même raster présenté sur la figure 50. Nous pouvons observer une érosion très marquée en tête de banc (jusqu'à 1,49 m) tandis qu'en queue de banc, nous voyons une grande zone de dépôts. La dynamique d'érosion ou de dépôts n'est donc plus répartie selon la proximité au chenal (coupure selon une orientation est-ouest), mais selon une limite relativement nette, qui coupe le banc en deux (selon une orientation nord-sud).

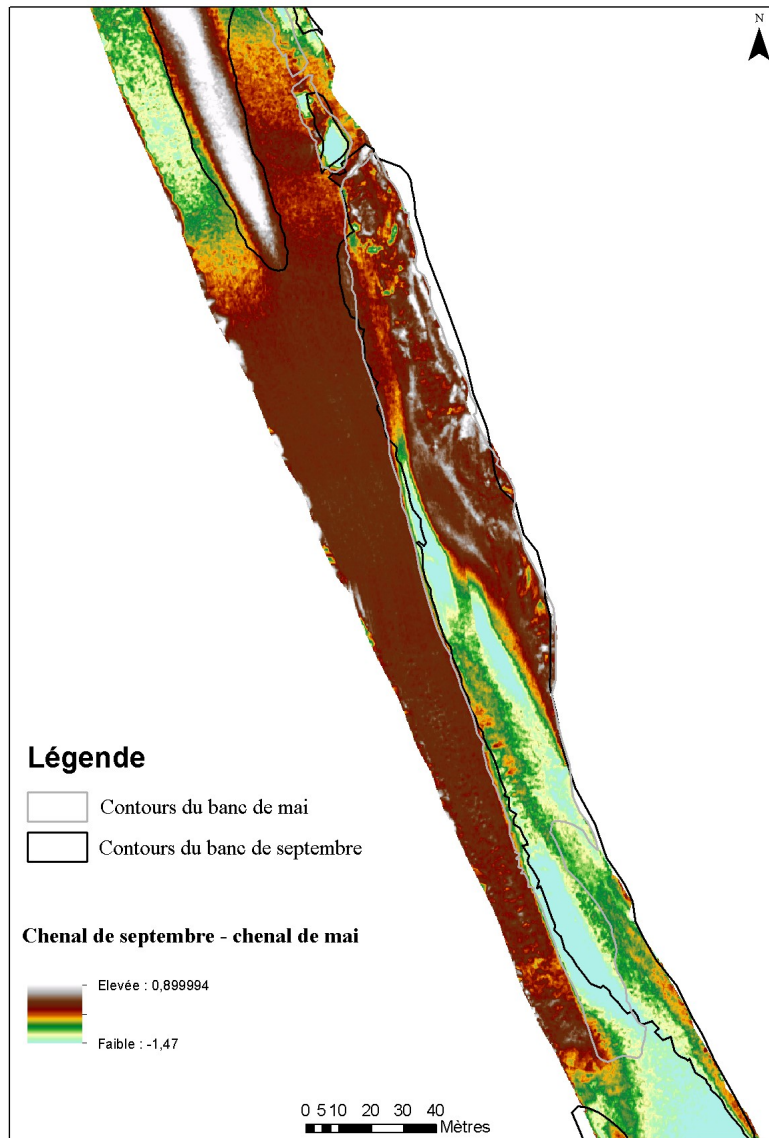


Figure 54 : Soustraction du raster de mai à celui de septembre illustrant le dernier banc du tronçon I

2. Étude du mouvement des bancs de 2002 à 2010

2.1 Présentation de l'étude

Cette étude permet d'étudier, sur une période plus longue, le mouvement des bancs, de montrer des tendances à l'érosion ou l'accumulation sur certains secteurs, et ainsi d'intégrer l'étude des bancs à court terme dans une étude plus globale. Cette étude se situe sur la zone d'étude 1 (cf. figure 55)

Les images de 2002 et 2006 n'offrent pas de données quantitatives comme les MNT, et nous ne possédons pas de dates précises de l'acquisition des données. La résolution différente des images est délicate et l'analyse doit être prise avec précaution.

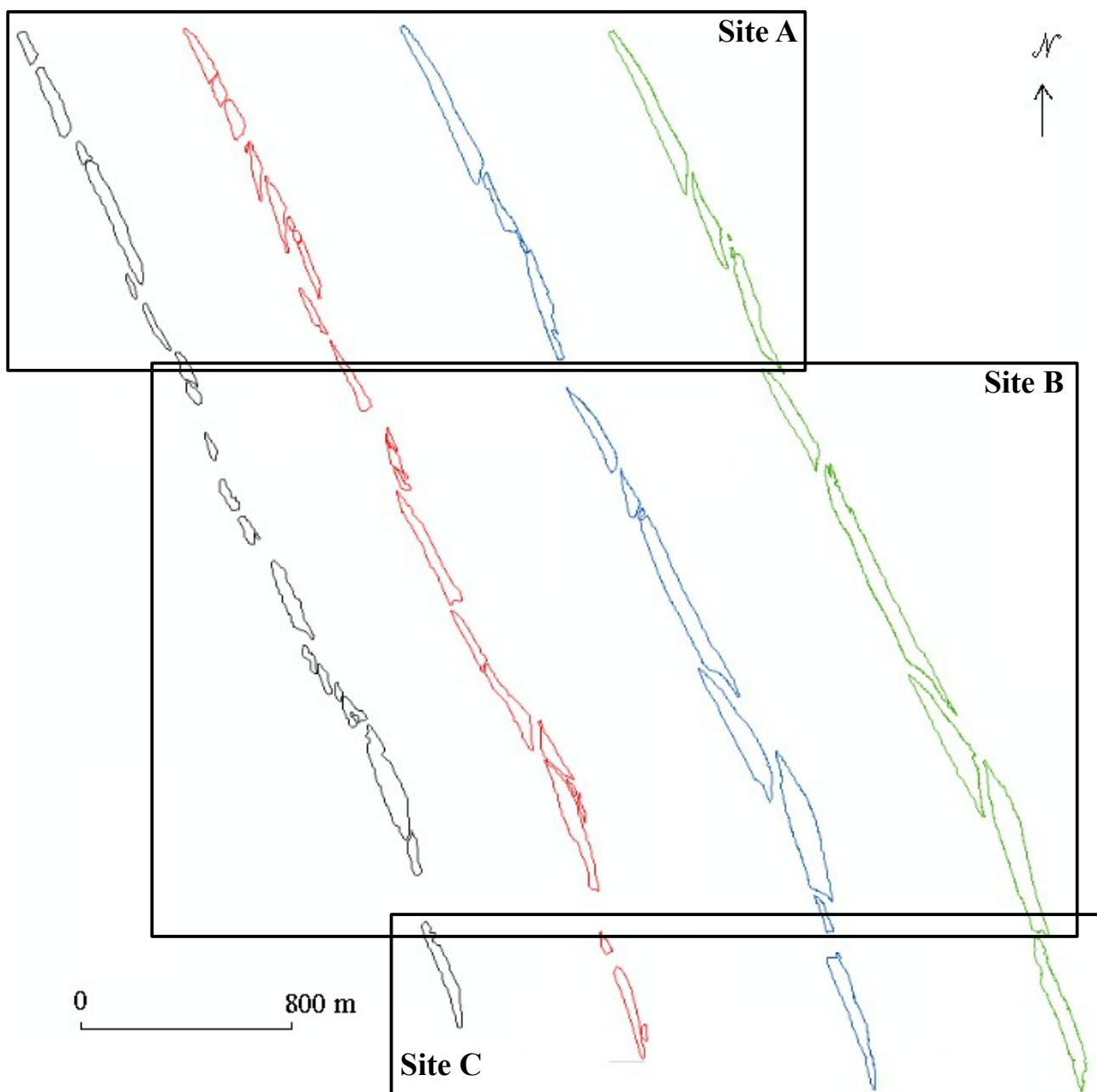


Figure 55 : Affichage des sites étudiés et des bancs analysés

2.2 Analyse diachronique des bancs

2.2.1 Evolution des bancs depuis 1997

Cette étude s'inscrit dans une analyse globale afin d'observer les mouvements grossiers des bancs dans ce secteur. Magali JODEAU (2007) a partiellement étudié l'évolution morphologique de la zone d'étude depuis 1997. Nous n'avons pas à notre disposition des données aussi anciennes, les commentaires de Magali JODEAU (2007) nous seront utiles dans le cadre de l'analyse.

Les données disponibles pour sa thèse sont quatre jeux de photographies géoréférencées depuis 1997 jusqu'à 2006. Il faut noter que 1997 correspond à un état initial après un remaniement du lit de la rivière pour la construction de l'autoroute A43. Les données sont de sources et de résolutions différentes mais permettent d'observer les grands traits d'évolution du secteur sur la période 1997-2006.

Magali JODEAU (2007) observe des zones végétalisées en rive droite, présentes depuis 1997. Nous pouvons utiliser ces zones afin de voir si ces dernières apparemment stables sont susceptibles d'être érodées ou en aggradation. Il est important de noter que JODEAU ne définit pas ces zones, qui sont soit des bancs stabilisés par la végétation, soit des berges. Il semblerait que ces zones aient plus des attributs de berges ; cette hypothèse se justifie par le fait qu'elle n'observe aucun banc dans le chenal en 1997, alors que ces zones sont déjà végétalisées à la même date. Soit ces sites sont des bancs très anciens (nous notons une végétation relativement dense) et le cours d'eau n'a pas la capacité nécessaire, via les crues, pour remodeler les bancs, soit ce sont des berges. Pour vérifier en partie cette hypothèse, une visite de terrain serait utile pour observer l'altitude de ces zones par rapport au banc et ainsi voir une probable rupture de pente ou des caractéristiques relatives aux berges.

Sur la photographie aérienne de 1997, JODEAU n'observe pas de bancs mais des blocs dispersés d'origine anthropique. Par exemple, à l'emplacement actuel de la tête de banc principal (situé à l'aval de la zone d'étude 1), il n'y a qu'un petit dépôt de galets.

D'après JODEAU, les bancs de galets semblent s'être mis en place après 1997. Les bancs sont bien visibles en 2001 ; un fort apport sédimentaire lors de la crue d'octobre 2000 est responsable de la formation de ces bancs. Depuis 2001, ces derniers sont sensiblement aux mêmes emplacements et se sont engraisés (avec l'apparition de chenaux de jonction) jusqu'en 2006.

2.2.2 Observations

Pour une meilleure analyse, la zone test a été découpé en trois sites. Aux premiers abords, il semblerait que la crue de 2006 ait remanié la majorité des bancs et érodé ou engraisé les plus stables. La remarque de JODEAU, indiquant que la crue d'octobre 2000 est responsable de la formation des bancs, nous fait donc penser que les crues quinquennales semblent être capables de modifier les bancs. La figure 56 illustre les observations suivantes.

- Analyse de 2002 à 2006 (cf. figure 56)

Site A : Nous pouvons observer la formation du banc de Magali JODEAU, étudié dans sa thèse (2007). De plus, des zones stables et instables se profilent le long du chenal. Entre 2002 et 2006, nous observons un changement du chenal d'écoulement principal. Une autre partie du tronçon juxtaposée à cette zone instable, est au contraire stable, liée principalement à la morphologie du lit avec une certaine ouverture du chenal et un étalement du profil.

Site B : En 2002, nous voyons la formation du banc de 2006, où la queue du banc s'est donc déportée sur la berge opposée. De plus, nous observons déjà une stabilité d'un banc qui s'engraisse.

Site C : Deux attributs composent l'évolution de ce banc, avec d'un côté un partage ou une division du banc, visible en 2006 et un engraissement de la tête du banc.

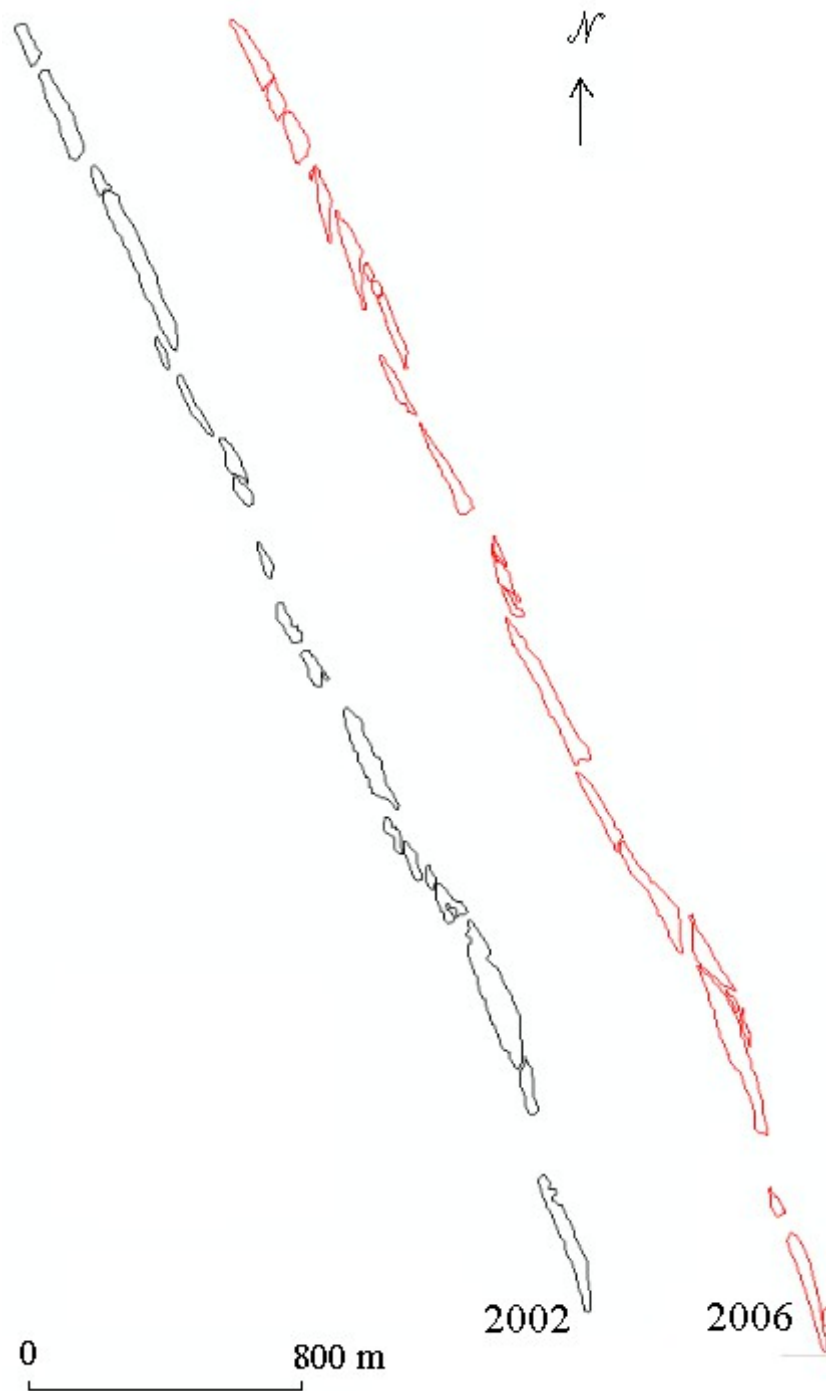


Figure 56 : Evolution des bancs de 2002 à 2006

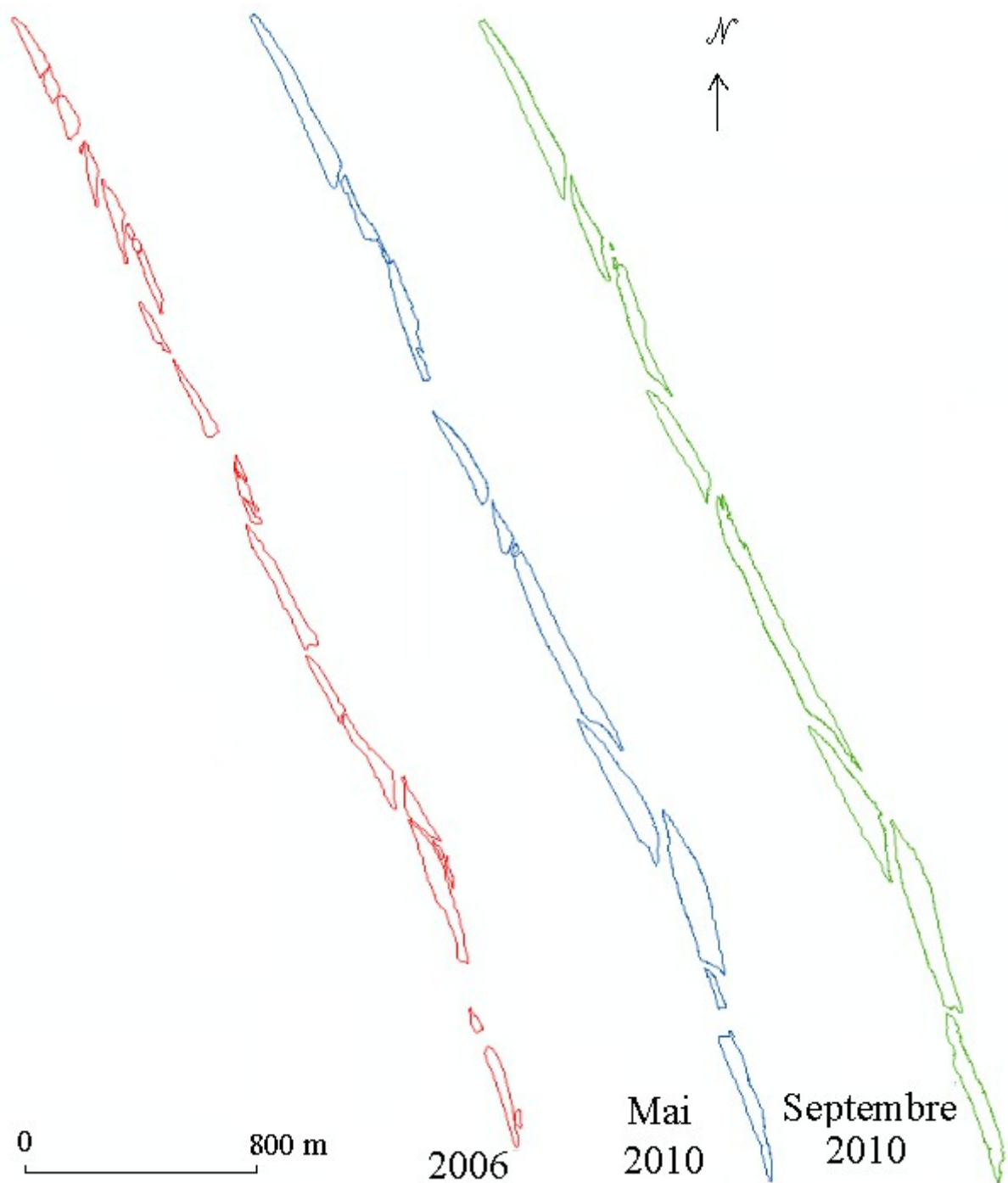


Figure 57 : Evolution des bancs de 2006 à 2010

- Analyse de 2006 à 2010 (cf. figure 57)

Site A : Nous pouvons observer la stabilité du dernier banc en aval de la zone d'étude (banc de Magali), qui subit un engraissement important.

Site B et C : On distingue l'engraissement et donc le rattachement de bancs isolés aux bancs principaux ou moyens.

Globalement, nous observons une augmentation de la superficie des bancs de 2006 à 2010. La crue n'a que très peu touché les bancs stables et mis fortement en mouvement les bancs moyens (changement de rives, changement du chenal d'écoulement,...)

La figure 58 est une carte de synthèse des mouvements des bancs de la zone d'étude numéro 1.

Nous voyons des zones stables et instables sur le cours d'eau. Ces zones stables sont par le regroupement de bancs dont l'évolution de leurs formes est continue et s'inscrit dans la durabilité. Au contraire, les zones instables regroupent les bancs qui se forment et se déforment, des bancs qui disparaissent et d'autres qui se forment suivant le mouvement des bancs.

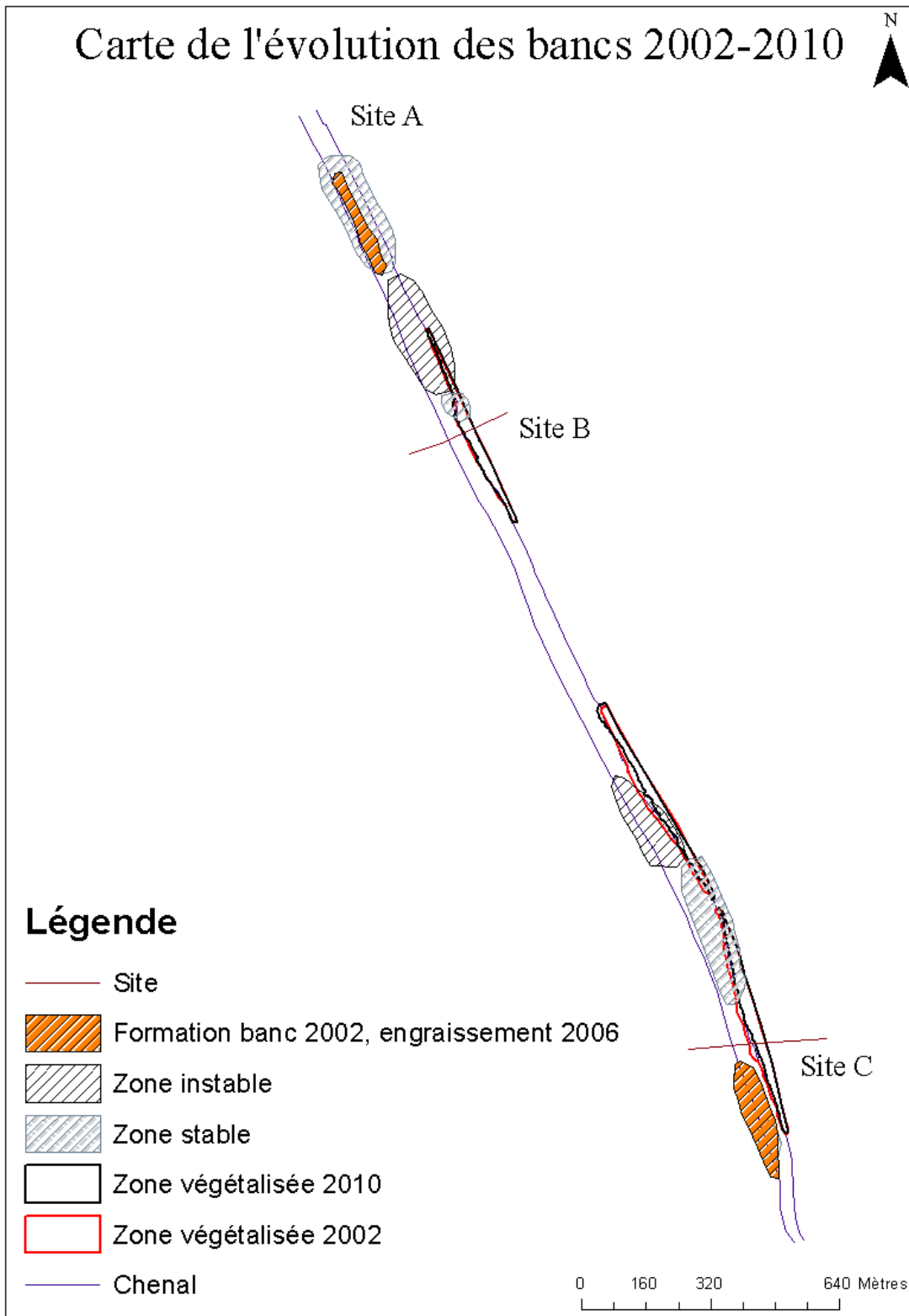


Figure 58 : Carte de synthèse de l'évolution des bancs de 2002 à 2010

2.2.3. Observations des zones végétalisées en rive droite

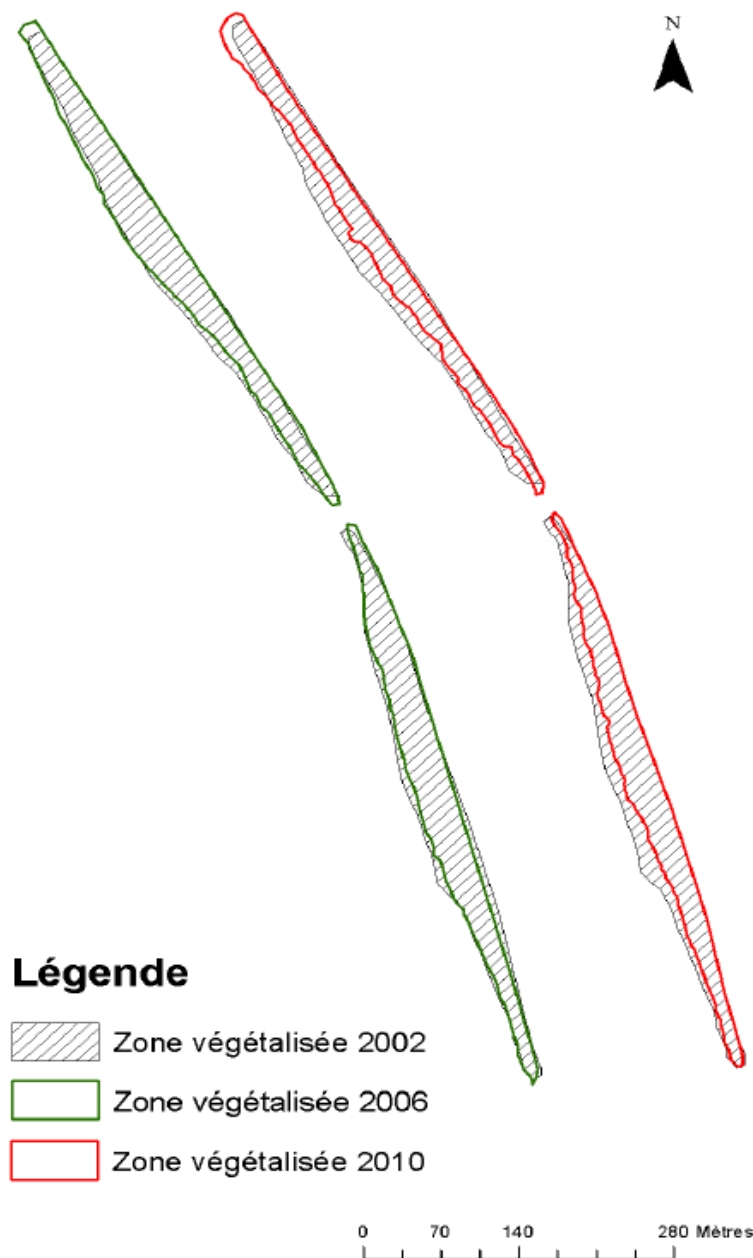


Figure 59 : Evolution des zones végétalisées situées à l'amont de la zone d'étude 1

La figure 59 illustre l'évolution de ces zones végétalisées. Nous n'observons pas de changement significatif sur ces zones végétalisées de 2002 à 2006. De petites modifications du tracé des limites sont visibles mais ces dernières sont la marge d'erreur liée aux différentes résolutions de l'image.

De 2006 à 2010, nous pouvons remarquer un changement important sur une des trois zones végétalisées. La différence entre 2006 et 2010 est trop importante pour que cette différence soit l'incertitude liée à la résolution des images. Ce site semblerait avoir subi une érosion liée aux crues (naturelles ou chasses) mais la source de changement peut être d'origine anthropique : travaux, terrain mis à nu et glissement lors de précipitations,...). Ces zones seraient faites de sédiments

sableux et donc relativement instables et érodables. L'érosion serait donc liée aux crues ou aux chasses de barrages. De 2006 à 2010, la zone végétalisée a reculé de 20 mètres au maximum sur certains secteurs, elle est donc significative.

Cette érosion est à mettre en relation avec les événements hydrologiques constatés sur les hydrogrammes que nous avons à disposition (cf. figure 60) sur la station de Pontamafrey. En effet, nous pouvons remarquer un événement plus ou moins marqué chaque année. L'hydrogramme de 2010 illustre les trois événements survenus sur l'Arc sur la période de mai à septembre 2010, relatives aux dates des données. Nous observons l'événement lié au curage de la retenue de Longefan (le premier pic sur l'hydrogramme), la chasse de barrage (le second pic) et enfin une crue (dernier pic) ; ces événements peuvent être mis en relation avec l'érosion de ces zones végétalisées. Mais nous observons sur l'hydrogramme de 2008, une crue exceptionnelle (encadré rouge dans l'hydrogramme de 2008) sur l'Arc, où le débit mesuré atteint 482 m³/s (les crues ou chasses de barrage n'atteignent pas 150 m³/s). Cette crue est sûrement à l'origine de cette érosion qui marque profondément ces zones végétalisées. Ces matériaux mis en mouvement ont pu être déposés sur les bancs, en aval de ces zones végétalisées.

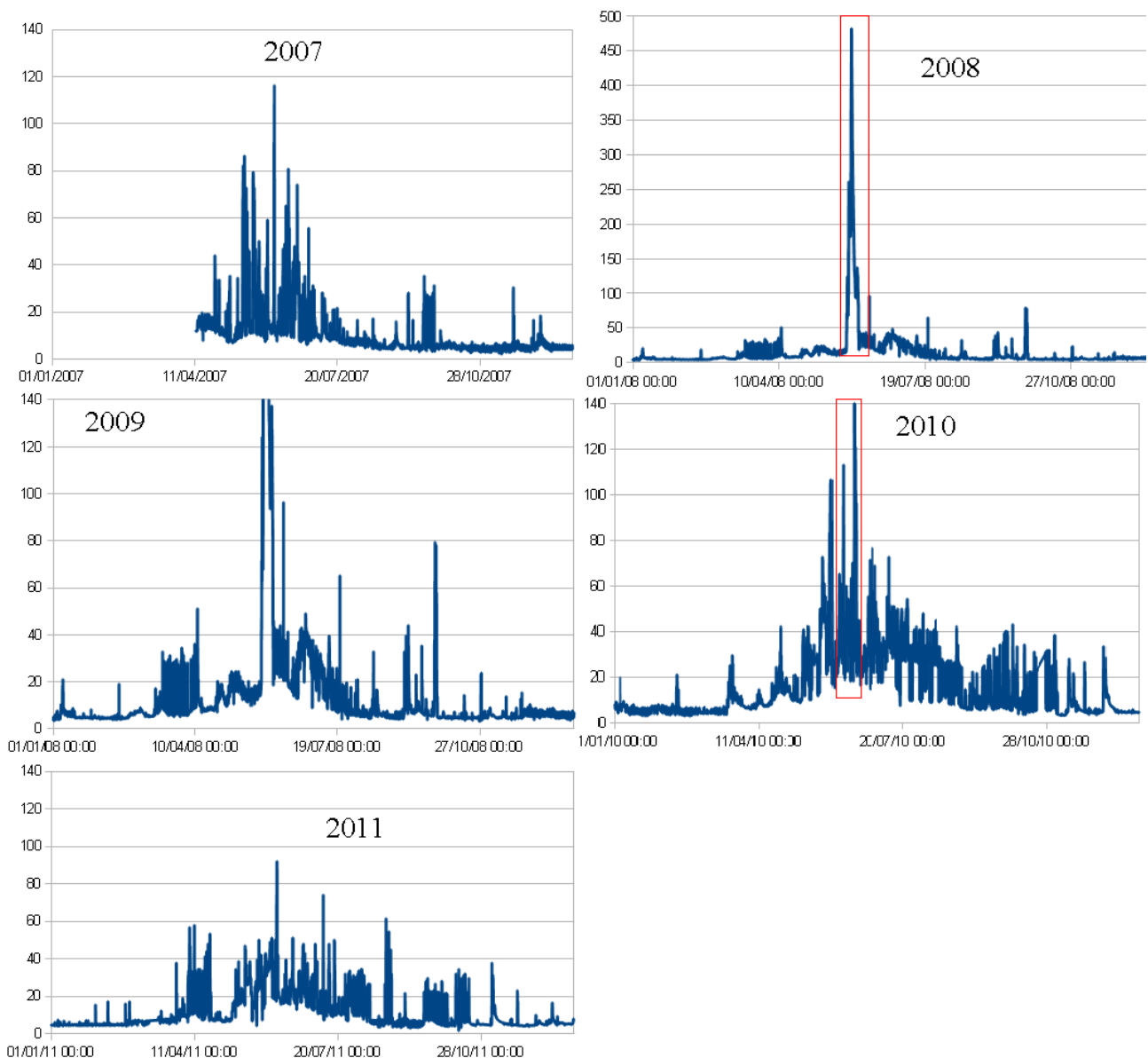


Figure 60 : Hydrogramme de l'Arc à la station de Pontamafrey pour 2007 à 2011

II. Comparaison des résultats manuels aux résultats automatiques

1. Présentation du programme TRAM

Un autre stage en parallèle s'est effectué durant lequel Armand POLI et Kerstin POLI ont développé le programme TRAM créé par Maxime MOREL en 2011.

Maxime MOREL a travaillé sur un outil informatique qui, par les altitudes fournies par les MNT, produit une segmentation automatique des bancs et de l'eau appartenant à un lit de rivière. Dans la continuité de ce projet, Armand POLI et Kerstin EBERT ont développé ce logiciel afin qu'il puisse segmenter automatiquement l'eau et les bancs à partir des données image. Les données produites par la méthode de délimitation des bancs à partir des MNT Lidar sont un support pour les comparer aux résultats automatiques de TRAM afin d'évaluer celui-ci. L'espace de travail sélectionné pour tester le programme est le banc en rive gauche, situé en amont de la confluence avec le Glandon sur la commune de Saint Etienne de Cuines, à l'aval du site d'étude numéro un.

2. Évaluation du programme

La figure 61 nous présente les données utilisées pour mai dans le but de comparer les résultats manuels aux résultats automatiques.

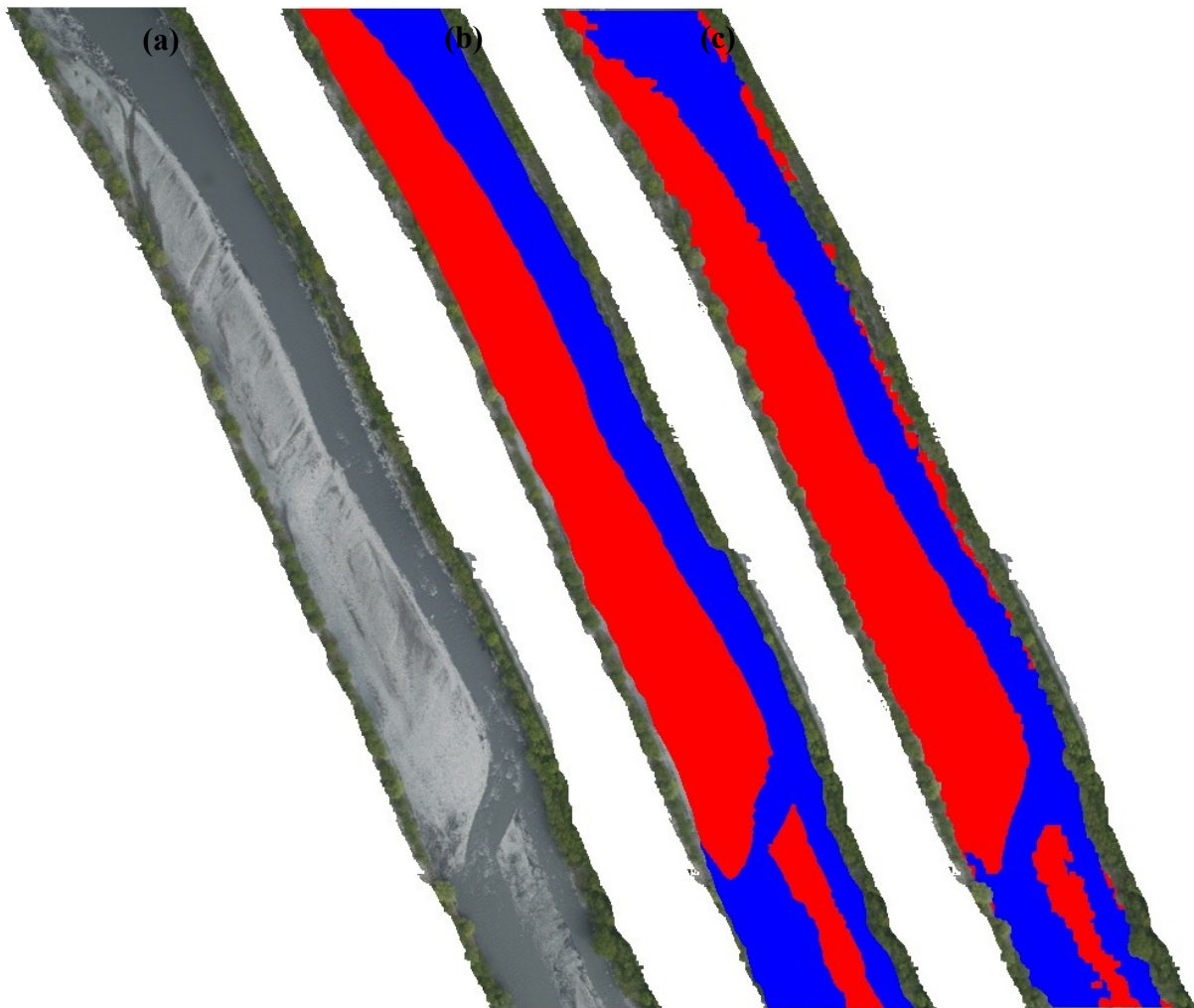


Figure 61 : Comparaison des images pour Mai 2010 : Image de référence pour la segmentation automatique (a), image affichant les résultats manuels (b) et image affichant les résultats automatiques (c). La couleur rouge représente le banc et le bleu représente l'eau

La figure présente les images de référence pour évaluer le programme TRAM et détecter les erreurs à traiter. L'image de référence a été implantée afin de visualiser la zone étudiée. Le (c) de la figure illustre le résultat du programme automatique (la couleur rouge représentant le banc et le bleu représentant l'eau), où nous pouvons voir que ce dernier a détecté en rive droite un dépôt sédimentaire qu'il traduit par un banc. Nous ne considérons pas ce dépôt comme un banc, mais comme des blocs localisés dans le chenal d'écoulement, qui ont pu bloquer des sédiments et s'étendre spatialement. Ces blocs sont remaniés beaucoup plus facilement qu'un banc ; ils ne sont pas stables et ces blocs ne proviennent pas de l'amont mais des berges ou à proximité. Le logiciel détecte, pour mai, aussi bien des bancs que des dépôts sédimentaires. Globalement, le programme restitue relativement bien la forme des bancs bien qu'il y ait quelques erreurs localement.

Le tableau 3 nous donne un ordre de grandeur statistique pour l'évaluation du programme en nous donnant les pourcentages de pixels bien placés, en sous détection et sur détection de l'image segmentée automatiquement par rapport à la référence manuelle. Nous observons le faible résultat au niveau des pixels traitant de la classe eau et les dépôts en rive droite qui ne sont pas présents dans les résultats manuels ; ce qui explique que les résultats sur l'eau et les bancs ne sont pas supérieurs à 90 %. Globalement les résultats sont satisfaisants avec des pourcentages supérieurs à 84 %.

	Segmentation manuelle de référence	Segmentation automatique via TRAM		
		Pixel bien placé	Sous détection	Sur détection
Total Pixel	124505	85,1 %	14,9%	10,3 %
Pixel Lit	97363	94,2 %	5,7%	2,4%
Pixel Eau	41725	82,1 %	17,8%	18,4 %
Pixel Banc	55638	84,3 %	15,6%	9,4 %

Tableau 3 : Tableau des pourcentages des différentes entités de la rivière entre la méthode manuelle et automatique en Mai (Armand POLI, 2012)

La figure 62 nous présente les données utilisées pour septembre dans le but de comparer les résultats manuels aux résultats automatiques. Cette figure présente, comme pour mai, l'image de référence, l'image affichant les résultats manuels et l'image présentant le résultat automatique. Le (c) de la figure présente le résultat automatique issu du programme, où nous pouvons remarquer que les résultats sont moins cohérents qu'avec la réalité du terrain. En effet, le rouge représentant le banc est plus présent que le banc affiché sur l'image d'origine. Nous observons que le logiciel est moins performant sur les images plus lumineuses, comme celles de septembre. L'image lumineuse engendre une sur détection de la part du logiciel qui amène à une erreur dans la segmentation du banc et de l'eau. Nous remarquons aussi la détection d'un banc à l'amont et l'aval de l'espace de travail. Le tableau 4 illustre la comparaison des images segmentées où le banc est mieux détecté que pour mai contrairement au lit et l'eau. Globalement le pourcentage des pixels bien placées sont un peu plus élevés. La sur détection de l'eau est très faible par rapport à mai contrairement au banc mais le total des pixels pour la sur détection reste plus bas qu'en mai. Les résultats restent satisfaisants.

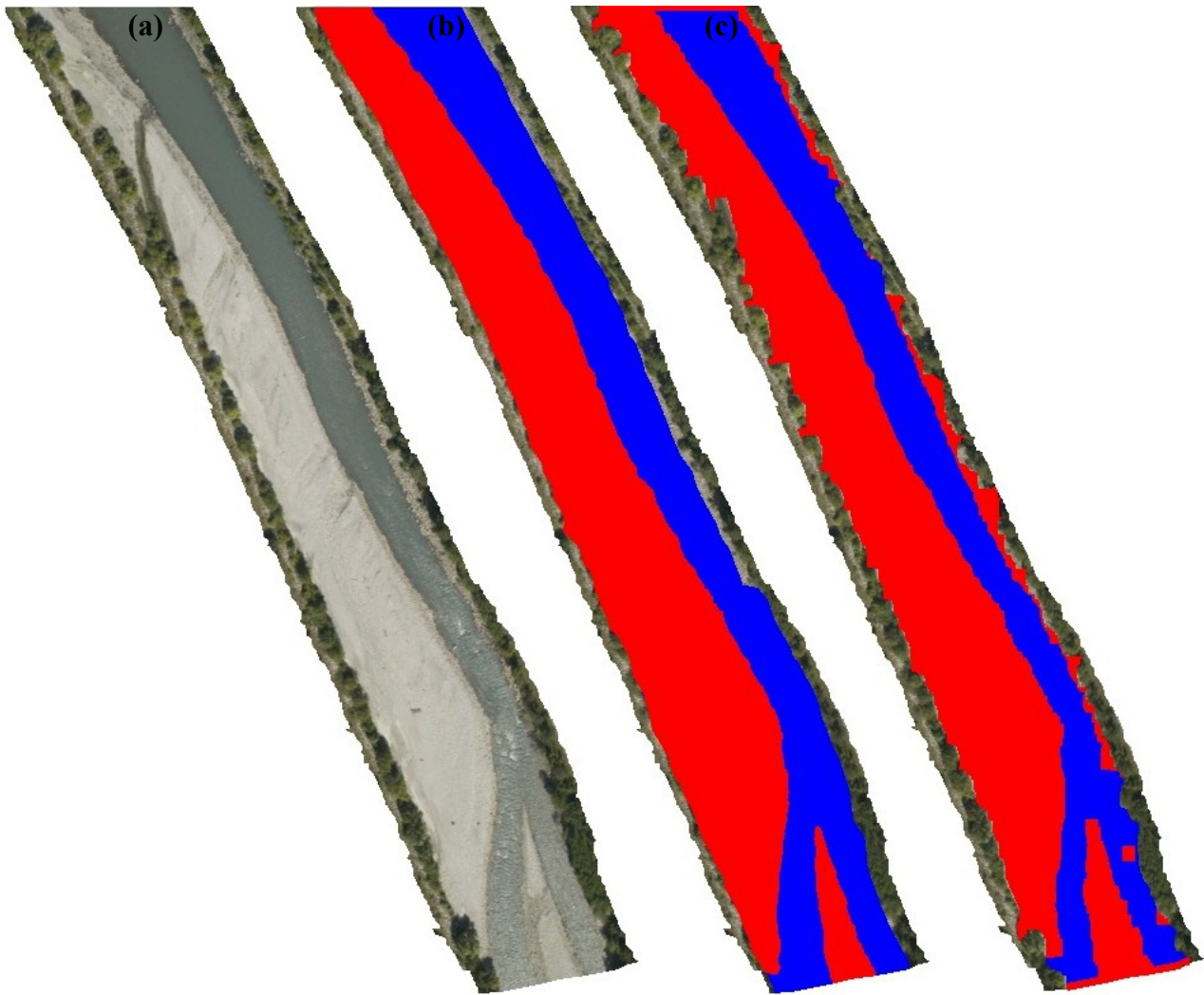


Figure 62 : Comparaison des images pour Septembre 2010 : Image de référence pour la segmentation automatique (a), image affichant les résultats manuels (b) et image affichant les résultats automatiques (c). La couleur rouge représente le banc et le bleu représente l'eau

	Segmentation manuelle de référence	Segmentation automatique via TRAM		
		Pixel bien placé	Sous détection	Sur détection
Total Pixel	114041	85,9 %	14 %	6,5 %
Pixel Lit	92304	90,7 %	9,2 %	2,8 %
Pixel Eau	36756	84,4 %	15,5 %	0,8 %
Pixel Banc	55548	86,1 %	13,8 %	12,9 %

Tableau 4 : Tableau des pourcentages des différentes entités de la rivière entre la méthode manuelle et automatique en Mai (Armand POLI, 2012)

Pour conclure, la segmentation automatique offre des résultats relativement satisfaisant en comparaison aux résultats manuels. En effet, les résultats automatiques sont supérieurs à 84 % pour mai et septembre. Ce logiciel est un bon outil dans le cadre de l'étude des mouvements des bancs, qui pallie à la méthode manuelle fastidieuse mais cependant précise. Néanmoins, des facteurs limitant la segmentation automatique, non présentés dans cette étude, ont été observés. En effet, le

programme ne détecte pas les bancs végétalisés (le programme se base sur la couleur de l'image, la végétation n'ayant pas la même couleur que les bancs, le programme ne le détecte pas). L'Arc ne possédant que très peu de bancs avec de la végétation, et l'espace d'étude se limitant au banc ci dessus, ce facteur n'a pas eu de répercussions sur les résultats automatiques. Elle sera problématique quant l'utilisation de cet outils sur d'autres cours d'eau où les bancs sont végétalisés.

CHAPITRE 4 : CONCLUSION

Lors de ce étaient fixés plusieurs objectifs auxquels nous avons répondu tout au long des six mois.

Tout d'abord, une méthode reproductible mise en place pour recenser et délimiter les bancs de graviers. En effet, l'incertitude mesurée sur tous les bancs permet la reproductibilité de la méthode à partir des MNT Lidar. Le principal inconvénient est que la méthode est longue et fastidieuse pour des sites d'étude relativement grands. Le programme informatique développé par l'équipe permet de pallier ce défaut. Mais la méthode manuelle développée reste tout de même précieuse car elle offre de meilleurs résultats.

Le second objectif du stage était l'étude des mouvements des bancs analysés à partir des MNT Lidar et des données image. L'étude à partir des MNT Lidar nous a permis de mettre en évidence deux phénomènes que nous avons eu besoin de différencier afin de ne pas les confondre. Le premier phénomène est la dynamique d'érosion et d'accumulation sur la zone d'étude et le second phénomène est la variation de la hauteur d'eau entre mai et septembre. La courbe de tarage disponible nous a permis d'évaluer dans un premier temps la différence de hauteur d'eau, qui est en moyenne de 6 cm ; elle paraît alors minime. Mais sur certains profils réalisés, la différence de hauteur d'eau s'élève à 50 cm. L'étude de ces secteurs dits particuliers est donc importante, car la variation de hauteur d'eau entraîne l'émergence de parties de bancs en septembre (immergées en mai). L'émergence de certains bancs peut être confondue avec du dépôt de sédiments et donc fausser les résultats de l'analyse. Ces secteurs ont donc été localisés et traités à part.

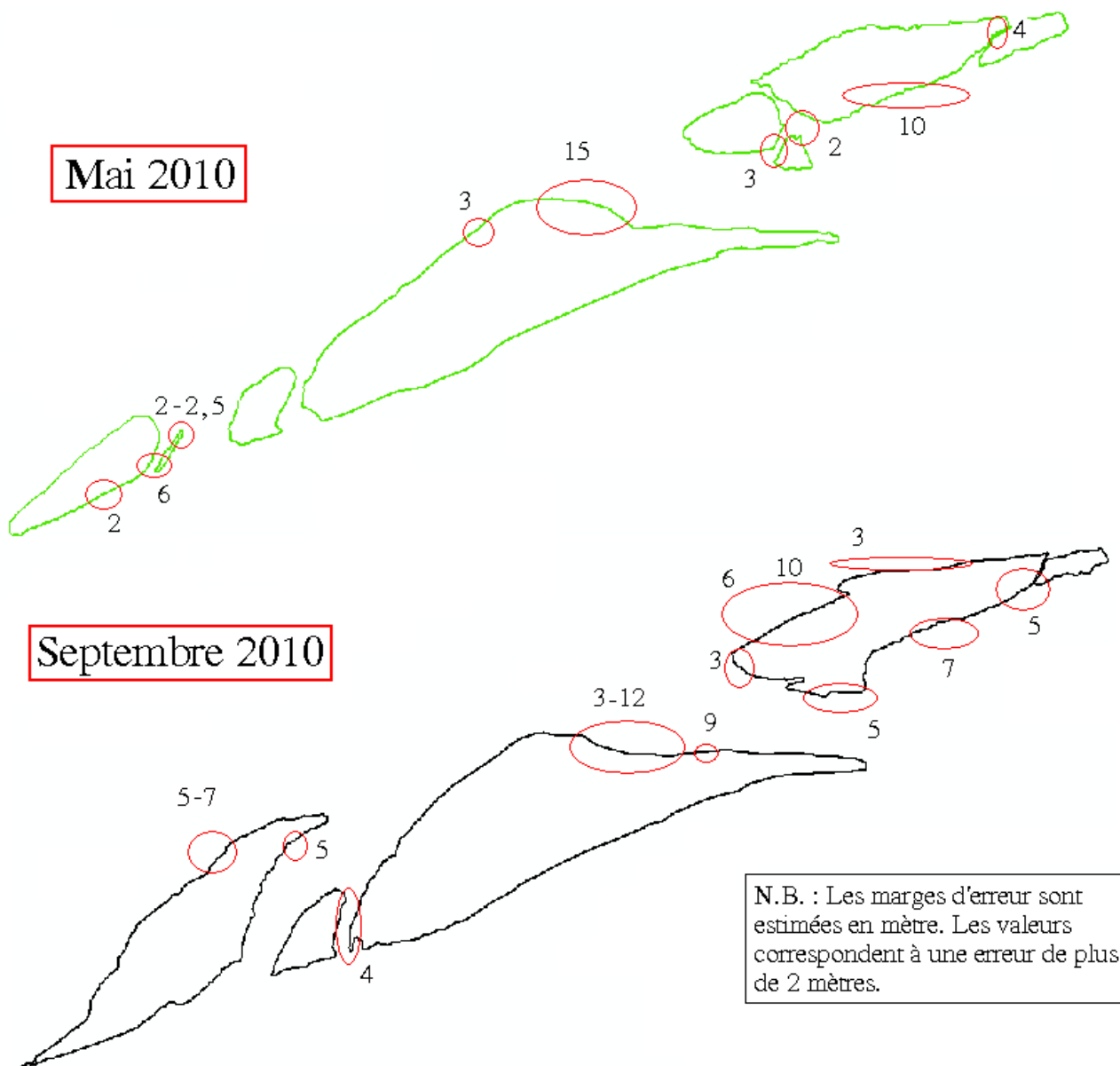
L'étude du mouvement des bancs de 2002 à 2010, à l'aide des données image, a permis d'élargir temporellement le contexte hydro-sédimentaire et a permis de révéler la formation des bancs, partant d'un état initial en 1997 puis de localiser les zones paraissant stables et au contraire instables.

Pour finir, cette étude rassemble un ensemble assez vaste partant d'une méthode de recensement des bancs à partir de données MNT et image et allant jusqu'à l'étude hydrosédimentaire de ces bancs, ce qui nous a permis d'appliquer la méthode mise en place durant le stage et de l'adopter au fur et à mesure de l'avancement.

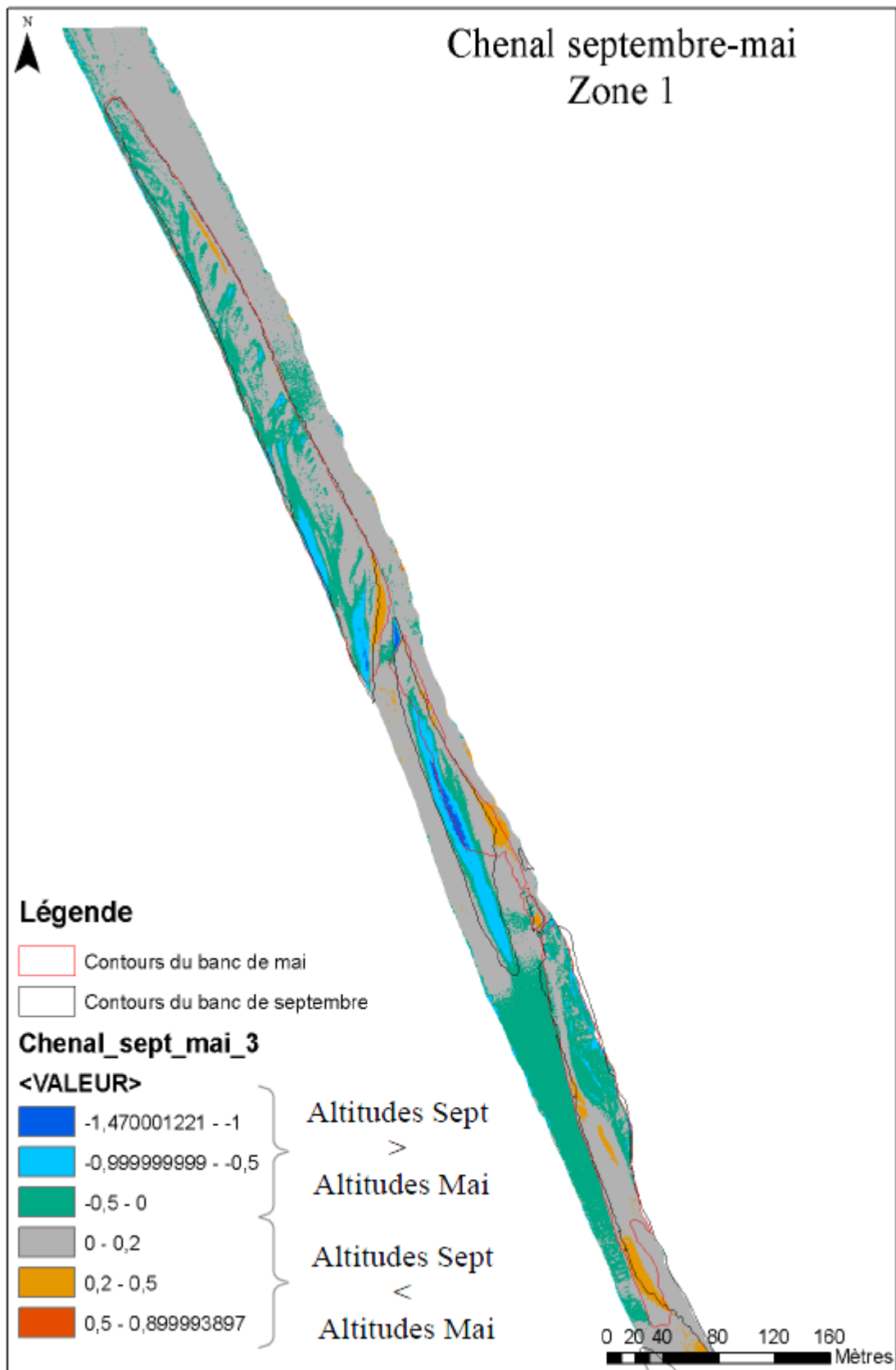
Cette méthode et cette étude peuvent être appliquées sur d'autres cours d'eau à condition que les MNT et données image soient disponibles.

Personnellement, travailler dans un environnement de travail à la fois professionnel et scientifique a été très agréable et formateur. Mes deux responsables de stage ont été à la fois très présents et m'ont laissé un espace de liberté important dans mon travail. Le stage s'est inscrit dans un contexte de collaboration avec des membres de l'équipe et m'a permis d'apprendre le travail en équipe. De plus, travailler avec des données, sur des logiciels performants et découvrir d'autres perspectives a été à la fois formateur et enrichissant.

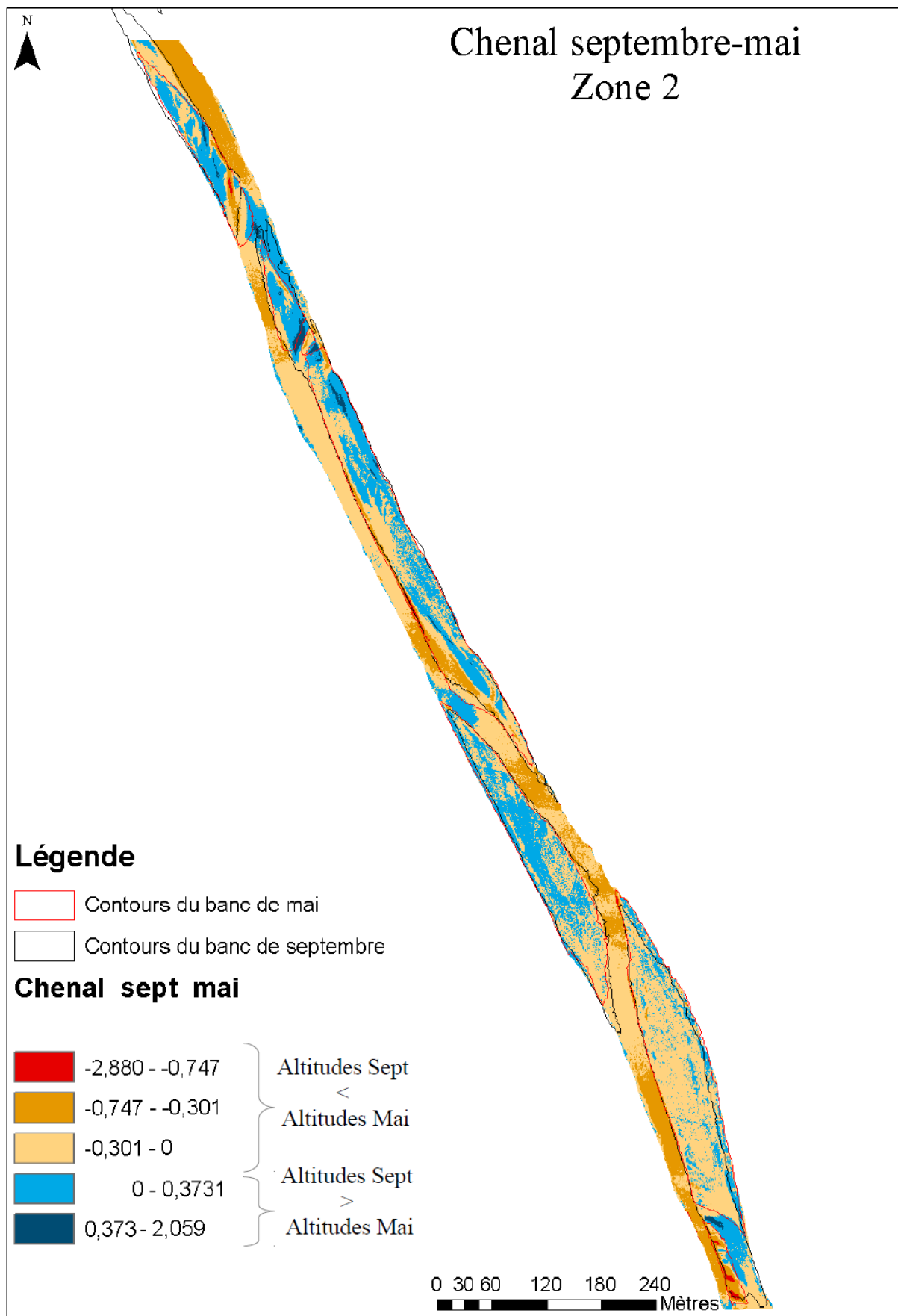
ANNEXES



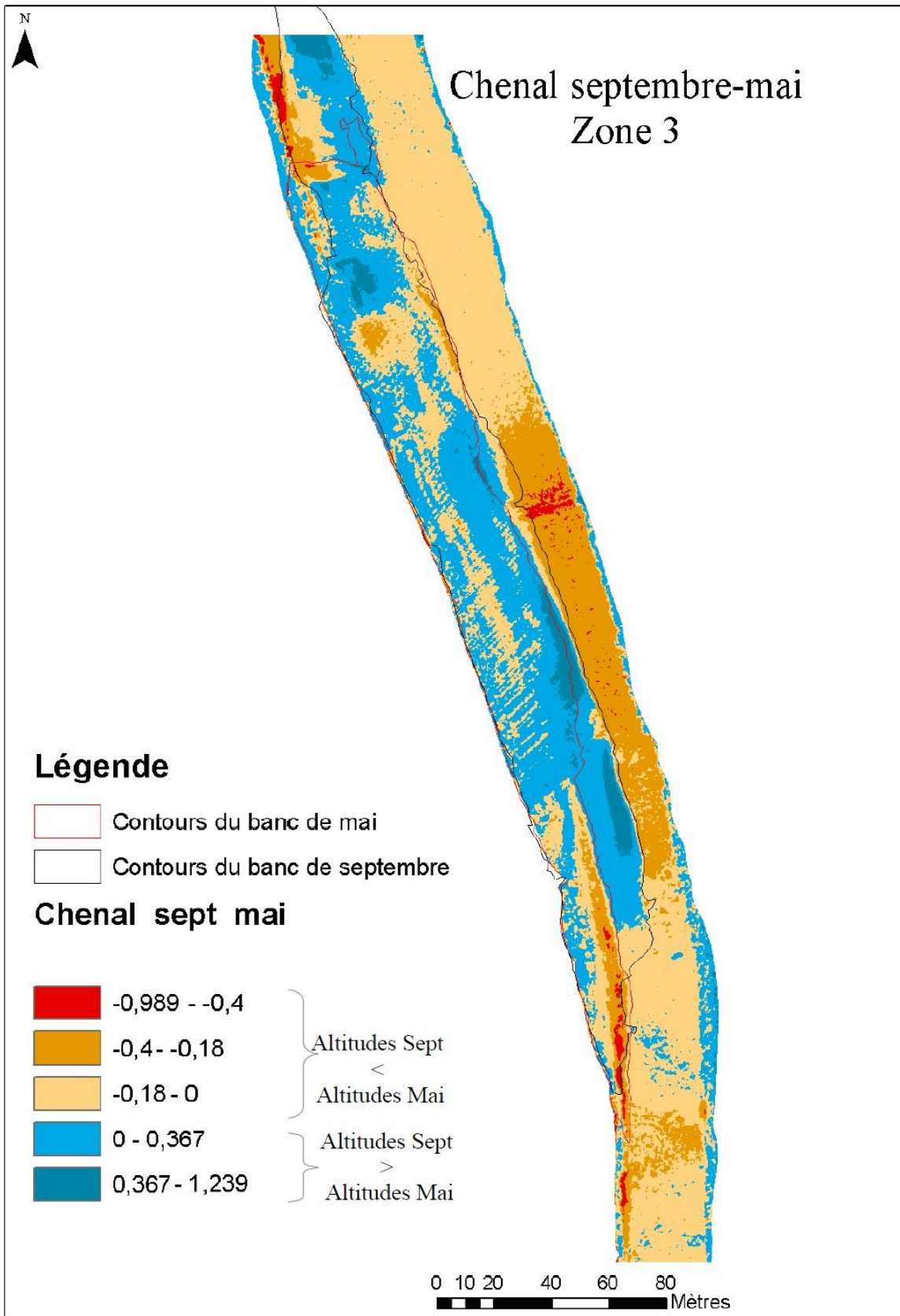
Annexe 1 : incertitude sur la zone d'étude numéro 2, à la confluence de l'Arc et l'Isère



Annexe 2 : Soustraction du chenal de mai à celui de septembre et affichage de l'érosion et accumulation faible, marquée et sévère sur le tronçon 1



Annexe 3: Soustraction du chenal de mai à celui de septembre et affichage de l'érosion et accumulation faible, marquée et sévère sur le tronçon 2



Annexe 4: Soustraction du chenal de mai à celui de septembre et affichage de l'érosion et accumulation faible, marquée et sévère sur le tronçon 3

BIBLIOGRAPHIE

M. CHURCH & D. JONES (1982) Channel bars in gravel-bed rivers in *Proc. Gravel-Bed Rivers: Fluvial Processes, Engineering, and Management*, Editors Hey RD, Bathurst JC & Thorne CR New York, 291–338.

ETUDE D'IMPACTS (avril 2006) Impacts de la construction de l'autoroute A43 Lyon-Turin

CHURCH, REMPEL (2002) Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshw Biol* 47:541–557

M. GIGNOUX, L. MOREL (1937) Géologie et morphologie de la vallée de la Valoirette (Savoie) In *Revue de géographie alpine*. 1937. Tome 25 n°2. pp 347-379

E. HICKIN (1969) A newly identified process of point bar formation in natural streams: *American Journal of Science*, 267, 999-1010

M. JODEAU, A. PAQUIER, A. HAUET, J. LE COZ, F. THOLLET & T. FOURNIER (2008) Effect of a reservoir release on the morphology of a gravel bar: Field observations and 2DH modeling in *Proc. 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics* Enschede, Hollande (RCEM)17-21 septembre 2007 (pp. 1029-1036)

M. JODEAU & A. PAQUIER (2006) Analysis of water and sediment flows over an alternate bar in a gravel bed river in *Proc. River flow*, Lisbonne, Portugal, 6-8 sept 2006. p. 1251-1257

M. JODEAU (2007) Morphodynamique d'un banc de galets en rivière aménagée lors de crues. Thèse de doctorat en Mécanique, Énergétique, Génie civil, Acoustique, Université Lyon 1. 231 p.

I.A LUNT, J.S. BRIDGE (2004) Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok river, Alaska, *Sedimentology*, 51 (3), 415-432

J.R. MALAVOI, J.P. BRAVARD, H. PIEGAY, E. HEROUIN & P. RAMEZ (1998) Guide technique N° 2. Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau. Agence de l'eau, Lyon, 39 p.

A. MARNEZY (1999) L'Arc et sa vallée; anthropique et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant. *Thèse d'état de l'université Joseph Fourier Grenoble I*.

T. MAROT (2010) Caractérisation des états de surface des rivières torrentielles par télédétection. Rapport fin d'étude de l'Agriculture et de l'Environnement de l'ENGEES Strasbourg. 74 p.

M. MOREL (2011) Extraction de données topographiques pertinentes pour l'étude hydraulique d'une rivière à partir d'un nuage de points LiDAR. Rapport de stage Irstea/Université Claude Bernard-Lyon 1. 70 p.

A. PAQUIER, P. RAMEZ & BALAYN (2003) Évaluation du transport de sédiments en rivière. Exemple d'application à l'Arc de Maurienne. Cemagref Éditions, Antony, pp. 11-31

J.L. PEIRY, B. COUVERT, P. LEFORT, P. BELLEUDY (1999) Transport solide et atterrissements - Guide méthodologique, *Les études de l'Agence de l'Eau*, n°65

A. POLI (2012) Segmentation d'un lit de rivière à partir de données Lidar et image. Rapport de stage Irstea/Université Claude Bernard-Lyon 1.

R. PYRCE & P. ASHMORE (2005) Bed-load path length and point bar development in gravelbed river models, *Sedimentology* 52, 839-857

