

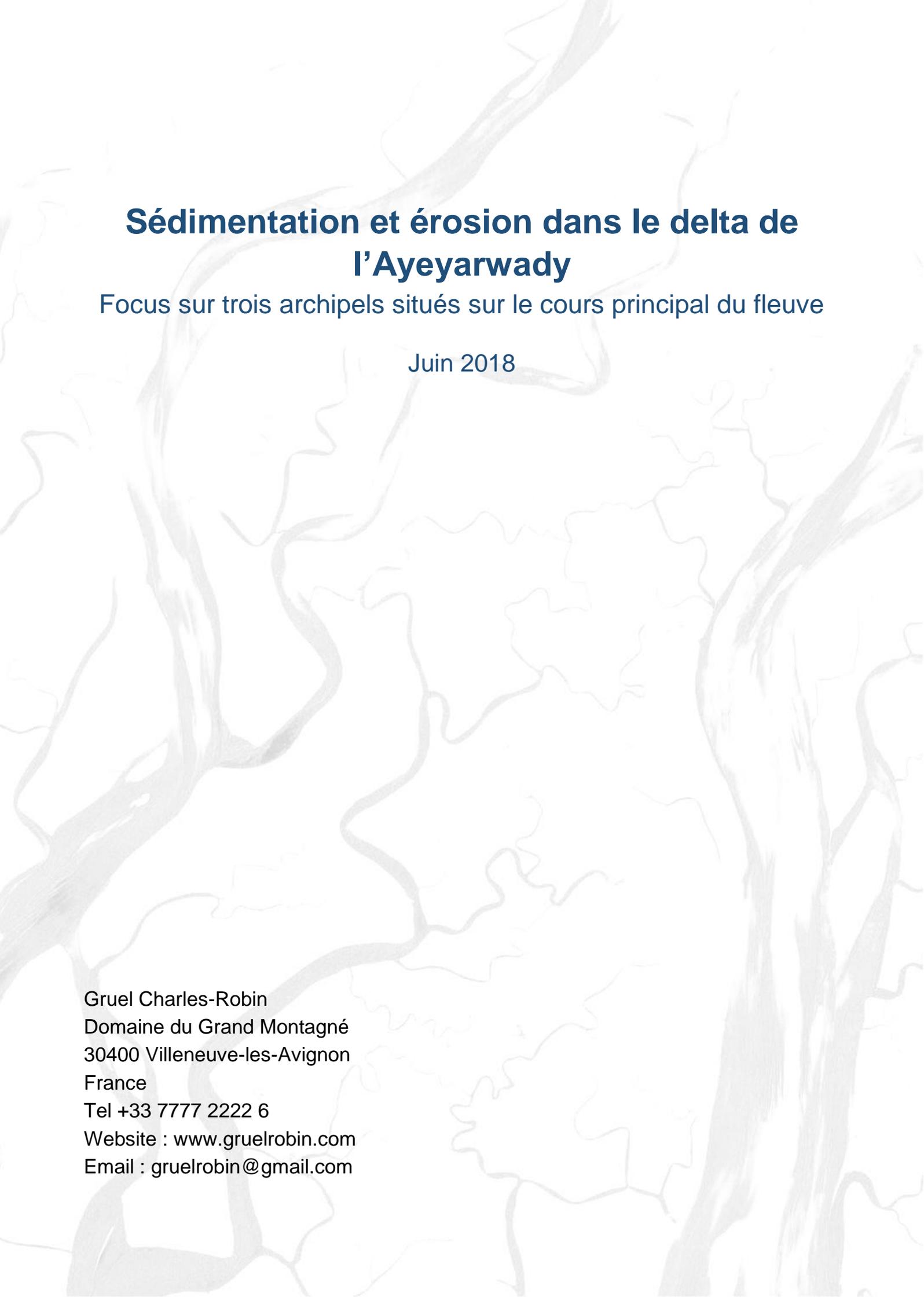
# Sédimentation et érosion dans le delta de l'Ayeyarwady

Focus sur trois archipels situés sur le cours principal du fleuve



Juin 2018

Gruel Charles-Robin



# **Sédimentation et érosion dans le delta de l'Ayeyarwady**

Focus sur trois archipels situés sur le cours principal du fleuve

Juin 2018

Gruel Charles-Robin  
Domaine du Grand Montagné  
30400 Villeneuve-les-Avignon  
France  
Tel +33 7777 2222 6  
Website : [www.gruelrobin.com](http://www.gruelrobin.com)  
Email : [gruelrobin@gmail.com](mailto:gruelrobin@gmail.com)

## Sommaire

Sommaire .....	1
Remerciements .....	4
Introduction .....	5
I/ Le fleuve Ayeyarwady et son delta .....	8
1/ Le bassin versant de l’Ayeyarwady .....	8
1.1/ Géographie du bassin et description du fleuve .....	8
1.2/ Climat .....	13
1.3/ Régime hydrologique .....	14
1.4/ Transport sédimentaire .....	17
1.5/ Aménagements hydrauliques .....	18
1.6/ Occupation du territoire et agriculture riveraine .....	22
1.7/ La pêche et la biodiversité aquatique .....	27
1.8/ La déforestation, l’exploitation minière et l’extraction du sable .....	27
2/ Le delta .....	33
2.1/ Caractéristiques .....	33
2.2/ Occupation du territoire et évolution .....	36
2.3/ Les endiguements et corrections du chenal .....	38
II/ Méthodes d’analyses .....	44
1/ Analyse spatiale .....	44
1.1/ Imagerie utilisée et données géographiques .....	44
1.2/ Indices de détection .....	45
2/ Enquête de terrain .....	46
2.1/ Enquête de terrain .....	46
2.2/ Méthodes de mesure .....	48
3/ Méthodes d’analyses multiscalaires .....	50
3.1/ Choix des trois sites d’étude et travaux réalisés .....	50
3.2/ Etude à l’échelle du delta .....	53
3.3/ Découpage du chenal par tronçons fluviaux .....	53
3.4/ L’étude des archipels à long terme .....	55
3.5/ L’étude des sites à court terme .....	55
III/ Résultats .....	58
1/ Echelle du delta et du chenal principal .....	58
1.1/ Evolution du delta .....	58
1.2/ Résistance des aménagements depuis 1955-1967 .....	62

1.3/ Échelle du tronçon sur le chenal principal .....	65
2/ Etude de trois « archipels » 1955-2018.....	76
2.1/ Site de Pyi Taw Thar (Nyaungdon / Pantanaw) .....	76
2.2/ Site de Shwe Din Gar Kyun / Tha Byu Ye Le Kyun (Nyaungdon / Danubiu) .....	82
2.3/ Site de Yae Paw Taung / Té Myei (Zalun / Ahpyauk) .....	84
3/ Caractérisation des îles visitées de 2017-2018 .....	90
3.1/ Site de Pyi Taw Thar (Nyaungdon / Pantanaw) .....	90
3.1.1/ Péninsule de Pyi Taw Thar Yawar Ma.....	93
3.1.2/ Ile de Pyi Taw Thar .....	100
3.2/ Site de Shwe Din Gar Kyun / Tha Byu Ye Le Kyun (Nyaungdon / Danubiu) .....	105
3.3/ Site de Yae Paw Taung / Té Myei (Zalun / Ahpyauk) .....	110
3.3.1/ Ile de Yae Paw Taung .....	110
3.3.2/ Ile de sable de Yae Paw Taung .....	115
IV/ Discussion .....	122
1/ Evolution du delta .....	122
2/ Autour des archipels .....	126
2.1/ L'île en question .....	126
2.2/ Les processus de construction .....	128
2.3/ Les processus d'érosion .....	131
2.4/ L'influence des endiguements .....	133
Bibliographie .....	135
Liste des figures.....	140
Liste des tableaux.....	146
Annexe 1.1 : Bassin de l'Ayeyarwady .....	147
Annexe 1.2 : Principaux sous-bassins de l'Ayeyarwady .....	148
Annexe 1.3 : Delta de l'Ayeyarwady .....	150
Annexe 1.4 : Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal.....	155
Annexe 2 : Dates des images satellites.....	160
Annexe 3 : Datation des terrains construits entre 1988 et 2018 suite à la mobilité du chenal .....	162
Annexe 4 : Caractéristiques principales de 17 tronçons du chenal principal entre 1988 et 2018 .....	165
Annexe 5.1 : Sites d'étude.....	177
Annexe 5.2 : Découpage des espaces en fonction des niveaux du fleuve à différentes dates .....	180
Annexe 5.3 : Les sites durant la période de crue (27/07/216).....	183
Annexe 6.1 : Phénologie et occupation des terres novembre 2017 à avril 2018 à partir des indices NDVI et NDWI (site 1).....	186

Annexe 6.2 : Phénologie et occupation des terres novembre 2017 à avril 2018 à partir des indices NDVI et NDWI (site 2) .....	189
Annexe 6.3 : Phénologie et occupation des terres novembre 2017 à avril 2018 à partir des indices NDVI et NDWI (site 3) .....	192
Annexe 7.1 : Evolution chronologique 1955-2018 Secteur n°1 Pyi Taw Tar .....	198
Annexe 7.2 : Evolution chronologique 1955-2018 Secteur n°2 Shwe Gin Dar Kyun / Tha byu Ye Le Kyu .....	205
Annexe 7.3 : Evolution chronologique 1955-2018 Secteur n°2 Yae Paw Taung / Té Myei .....	215

## Remerciements

Ce travail fut réalisé en collaboration et sur initiative de Benoît Ivars, doctorant en anthropologie à l'université de Cologne. Je tiens à le remercier tout particulièrement car sans lui cette étude sur les îles alluviales du delta de l'Irrawaddy n'aurait jamais eu lieu. L'organisation des travaux, la préparation du terrain et l'accès aux îles fut particulièrement efficace grâce à un travail préalable réalisé auprès des riverains. Je tiens également à remercier Jean-Philippe Venot de l'IRD qui a suivi et organisé l'étude et pris le temps pour une relecture très détaillée. Et enfin, un grand merci à Jean-Paul Bravard pour le temps qu'il m'a accordé dans l'interprétation des processus de formation des îles et la compréhension des résultats sur l'évolution du chenal.

## Introduction

Le fleuve Ayeyarwady, également nommé Irrawaddy, dont le bassin versant s'étend principalement entre les frontières du Myanmar (91%) a joui jusqu'à récemment d'une relative tranquillité avec peu de contrôle de ses affluents par des aménagements hydrauliques et des territoires forestiers encore vastes. Cette préservation des continuités écologiques pourrait en partie être expliquée par la fermeture économique et politique du pays jusque dans les années 2010. Dans le même temps, malgré son étendue, cet espace est resté très peu étudié des chercheurs. Voisin du Brahmapoutre et de la Salween, il s'agit du deuxième plus grand fleuve d'Asie du sud-est après le Mékong, avec une superficie de 418 000 km<sup>2</sup> (Gruel *et al.*, 2016) et situé au 12<sup>e</sup> rang mondial en termes de débit spécifique (Fort *et al.*, 2015), en raison d'un climat de mousson et d'apports nivaux provenant de l'Himalaya. Mais l'un des aspects les plus notables de ce fleuve figure dans ses apports sédimentaires résultants notamment d'une puissante tectonique entre les plaques indiennes et eurasiennes et des pluies intenses. Cette combinaison de facteurs le classe au 3<sup>e</sup> rang mondial en termes d'apports sédimentaires, juste après l'Amazonie et le Gange-Brahmapoutre (Robinson *et al.*, 2007). Les pluies intenses, les durées de restitution et le régime du fleuve favorisent un débit suffisant à la circulation des riverains et au transport des marchandises toute l'année sur une grande partie de ce fleuve qui traverse le pays du nord au sud. Cette position centrale du fleuve et son abondance favorisa l'installation et la circulation des populations dès 400 000 ans BP et c'est surtout le long de ce cours d'eau que s'installèrent les populations Birmanes et qu'elles fondèrent leurs empires, elles bâtirent de nombreuses cités état Pyus (civilisation proto-birmane), puis les cités de Bagan et de Mandalay.

Comme la plupart des fleuves d'Asie du sud-est, au contact de la mer l'Ayeyarwady se développe en un immense delta de près de 25 000 km<sup>2</sup> d'îles et s'étendant jusqu'à 35 000 km<sup>2</sup> si l'on considère la plaine alluviale qui le place au 10<sup>e</sup> rang mondial en termes de superficie (Anthony *et al.*, 2017). Mais en dépit de l'importance de ce territoire et des apports massifs en sédiments, les travaux de Syvitski *et al.* (2009) le classent « en péril » en raison de la réduction de son aggradation associée à sa compaction face à la montée du niveau marin. Car comme la plupart des deltas, il s'agit d'un espace agricole majeur pour le pays mais également à l'échelle mondiale. Il accueille une des plus fortes concentrations de population du Myanmar avec approximativement 15 millions de personnes (Brakenridge *et al.*, 2017). Parmi les facteurs indirects participants à cette menace, figure l'établissement depuis les années 2000, de nombreux barrages à travers l'ensemble du bassin (113 ayant un réservoir d'une surface de plus de 1 km<sup>2</sup> en 2018) ainsi que des barrages sur des affluents majeurs comme la Mu, la Myitnge et la Shweli qui drainent le centre et l'est du pays. Ces structures induisent alors une diminution des charges solides sensées approvisionner les plaines et développer le delta. En parallèle de la multiplication de ces structures venant bloquer les cours d'eau, on observe depuis quelques années des aménagements aux effets inverses avec une déforestation massive sur l'ensemble du territoire combinée au développement des mines d'or et de jade sur plus de 1200 km<sup>2</sup> en 2016, principalement dans les régions du nord et dans les bassins de la Chindwin et de la Mu (SOBA 3, 2017). Cette transformation de l'occupation des sols couplée aux intenses précipitations de cette région, provoque mécaniquement d'importants apports sédimentaires dans les rivières et donc dans le fleuve Ayeyarwady. Ces rejets massifs en sédiments s'ils ne sont pas directement rejetés dans la mer, se diffusent sur les marges du delta et influent directement les processus d'accrétion et d'érosion des îles alluviales.

Mais, contrairement au reste du fleuve qui est resté relativement préservé sur son cours principal et l'ensemble de ses marges, le delta a connu d'importants aménagements qui ont été entrepris par les britanniques au cours du 19<sup>e</sup> siècle. Une partie de ces aménagements ont rapidement disparu lors de crues majeures, mais ils ont été reconstruits et renforcés en grande partie au fur et à mesure de l'avancée du fleuve, jusqu'à s'étendre sur près de 1400 km en 2018. Ces aménagements avaient

pour objectif de favoriser la colonisation de ce territoire et de valoriser des espaces pour la production de riz en les drainant, en les isolant du fleuve et en les protégeant de la montée des eaux qui survient chaque année durant plusieurs mois à la saison des pluies.

Les fortes pluies survenant durant la saison des moussons associées aux apports conséquents en sédiments font du fleuve Ayeyarwady, et notamment dans son haut delta, un espace extrêmement dynamique où évoluent des îles alluviales. Ces îles connaissent alors d'importants changements d'une année sur l'autre et parfois même à l'échelle annuelle. A ces conditions physiques s'ajoute la présence des endiguements qui viennent concentrer le flux et confinent le fleuve dans un espace limité. Mais en fixant les limites du fleuve, ces aménagements visant à protéger des espaces extérieurs ont en contrepartie accentué la précarité de ceux qui vivaient à l'intérieur de ces digues. Bien qu'étant fragiles et constamment remodelés, ces territoires sont bien souvent cultivés dans leur totalité, des villages s'y implantent et se déplacent au grès des mouvements du fleuve. Des frontières administratives traversent le fleuve de part en part et leurs limites demeurent floues dans ce décor aux repères changeants et sans cesse redéfinies face aux mouvements incessants du chenal.

L'objectif initial porté par Benoit Ivars était de comprendre les logiques foncières et leurs repères dans cet espace instable ainsi que les modes culturels qui étaient appliqués en fonction des saisons et surtout en fonction du niveau du fleuve. Dans cette optique d'étude ethnographique, il fit commande de ces travaux de géomorphologie et d'analyse spatiale afin de mieux cerner l'histoire et l'organisation de ces espaces insulaires.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse générale des espaces fluviaux du delta et de sa structure, en étudiant son évolution d'une année sur l'autre entre 1988 et 2018 en nous basant sur des images satellites Landsat (d'une résolution de 30 m) et des cartes topographiques, pour remonter jusqu'à 1955. Cette analyse générale nous a permis d'identifier les secteurs les plus dynamiques où les changements survenaient le plus rapidement sur une fréquence continue depuis 30 ans. A partir de cette première évaluation nous avons ciblé les secteurs les plus dynamiques, situés sur le cours principal du fleuve. Nous avons découpé cet espace en tronçons jusqu'aux premières diffluences là où les influences tidales stabilisent les marges fluviales. Le but de cette analyse segmentée était d'accéder à une compréhension quantitative de l'évolution du fleuve depuis 30 ans et particulièrement des secteurs que nous voulions étudier. Sur cette base générale nous nous sommes focalisés sur 3 ensembles d'îles (archipels) fluviaux, existant en 2018 et situés sur la branche principale de l'Ayeyarwady entre Zalun et le sud de Nyaungdone. Chacun de ces archipels a été analysé sur une durée de 30 ans et nous avons pu remonter jusqu'à 1955 pour une analyse qualitative. Une datation des surfaces sédimentées nous a permis de connaître l'époque de formation des différents secteurs des îles. Par la suite, un deuxième travail réalisé à partir d'une imagerie Sentinel 2, d'une résolution de 10 mètres, nous a permis d'appréhender ces espaces à l'échelle annuelle, c'est-à-dire pour l'année inter-moussons 2017-2018. Un recueil d'informations sur les niveaux d'eau, les indices de surface en eau et indice de végétation à différentes périodes de l'année a été réalisé et nous a permis de prendre connaissance de la saisonnalité de ces espaces et de l'occupation des sols.

Une enquête de terrain a été entreprise entre le 26 et le 30 mars 2018 dans le but d'accéder à ses îles et d'observer les modes culturels en fonction de la morphologie des îles, de la proximité du fleuve et de la texture des sols. Afin de restituer l'espace dans sa dimension verticale, des mesures topographiques ont également été réalisées en différents points des îles. En parallèle des travaux d'analyses géomorphologiques, une enquête et des entretiens ont été menés par Benoît Ivars pour rendre compte des réalités agronomiques, afin de questionner les riverains sur l'historicité de leur territoire, sur leur manière d'appréhender cet espace changeant et ce nomadisme insulaire.

Compte tenu de l'évanescence de ces îles alluviales, cette étude s'inscrit à une échelle de temps très court, il s'agit ici plus que n'importe où d'un espace en constante transformation et les informations présentées dans ce rapport s'inscrivent dans un temps et un espace bien précis. Cette étude prend en compte des données anciennes à partir de l'imagerie et des données récentes issues

d'observation sur le terrain. Cependant, la dynamique du fleuve ne permet pas de reporter les résultats observés sur le terrain aux années à venir, dans le sens où environ 75% de l'espace visible et existant en mars 2018 aura disparu sous les eaux dès le mois de juillet de la même année. Lors du retrait des eaux survenant vers octobre 2018, 100% du territoire arpenté lors du terrain aura été transformé. Les îles visitées auront alors connu un processus d'aggradation des terres, pouvant être plurimétrique, sous de nouvelles couches de sable et de limon. Certaines parties de ces îles auront connues une érosion sur plusieurs dizaines hectares et d'autres secteurs l'accrétion de nouvelles terres sur des surfaces équivalentes. Le paysage s'en trouvera totalement transformé et de ce fait, les mesures réalisées seront devenues obsolètes. L'emplacement des cultures et le type de culture aura changé avec leur éloignement ou rapprochement du fleuve tout comme les limites de distribution des terres entre le towns et les villages. Seule une observation générale des stratégies agricoles sur le long terme et à l'échelle des secteurs, par comparaison des données antérieures, permettra d'interpréter et d'appréhender les logiques d'occupation des terres. Ici il ne s'agit donc pas de fixer les connaissances dans un temps donné mais bien de comprendre l'évolution historique du fleuve ainsi que les logiques et les stratégies d'adaptations à ces espaces changeants.

## I/ Le fleuve Ayeyarwady et son delta

### 1/ Le bassin versant de l'Ayeyarwady

#### 1.1/ Géographie du bassin et description du fleuve

Plusieurs terminologies existent pour désigner ce fleuve, la terminologie élaborée par les britanniques au 19<sup>e</sup> siècle qui est aujourd'hui la plus utilisée sur le plan international est Irrawaddy. Cependant, la terminologie utilisée par les birmans est Ayeyarwady, Aya signifiant rivière en Birman. Le nom Ayeyarwady viendrait du Sanskrit « Airavati » signifiant rivière des éléphants. Irravati serait également le nom d'une déesse de la mythologie hindoue mère de Airavata. Le fleuve n'est pas divinisé mais son nom ramènerait à la divinité Irawan l'éléphant blanc, monture d'Indra, roi des dieux hindous. Irawan serait « celui qui fait venir la pluie » (Brac de la Perrière, 2013 ; Sabrié, 2015).

Le bassin de l'Ayeyarwady s'étend sur une surface de 418 055 km<sup>2</sup> (Gruel *et al.*, 2016) mais d'autres sources proposent 411 000 ou encore 414 000 (Revenga *et al.*, 1998). Il s'agit du deuxième plus grand bassin versant d'Asie du sud-est après le Mékong, il serait cependant en 68<sup>e</sup> position à l'échelle mondiale. Mais à la douzième place en termes de débit spécifique (Fort *et al.*, 2015). En amont, il est voisin de deux autres grands fleuves que sont le Brahmapoutre à l'ouest et la Salween à l'est, dans la partie aval il partage ses limites avec le Kaladan à l'ouest et le Sittang à l'est (Annexe 1.1). Sur le plan étatique, il recouvre environ 60% du territoire du Myanmar, et les autres grands fleuves qui traversent le pays sont la Salween et le Sittang. Il s'avère que 90% du bassin versant de l'Ayeyarwady se trouve au Myanmar tandis que 6% est situé en Chine (Yunan, Xizang) et 4% en Inde (Manipur) (Gruel *et al.*, 2016), permettant au Myanmar d'avoir une grande souveraineté quant à la maîtrise de ses eaux et de leurs continuités.

Le bassin de l'Ayeyarwady (Annexe 1.1) est caractérisé par une grande diversité de climats et d'écosystèmes résultants de sa position latitudinale entre 15°42 est et 28°47 nord ainsi que d'un relief très contrasté qui peut être divisé en sept régions géographiques. En partant de l'amont on observe dans la chaîne himalayenne un relief très élevé culminant au-dessus des 3000 m et dominé par le Hkakabo Razi à 5881 m, qui est également le point culminant du Myanmar. A l'ouest du bassin sont présentes les chaînes de montagne Chin et Naga tandis qu'à l'est se trouve le vaste plateau Shan où l'interfluve avec la Salween est plus difficile à distinguer. La partie centrale dessine un vaste bassin couronné par les reliefs qui conduit vers le delta entre les chaînes de l'Arakan au sud-ouest qui se poursuit jusqu'à la mer avec notamment le mont Taungri, 1221 m et la chaîne du Bago Yoma au sud-est. Au-delà de cette chaîne les deltas de l'Ayeyarwady et du Sittang s'agrègent ensemble pour former un complexe où le partage des eaux devient complexe. Quelques reliefs isolés et situés dans la partie centrale comme le mont Popa (1518 m) témoignent d'un volcanisme aujourd'hui inactif. De nombreux bassins d'effondrement résultants d'une tectonique très active parsèment le bassin avec notamment la région du Manipur dans la partie indienne où la vaste plaine de Hugawng aux sources de la Chindwin. Ces bassins ou les plaines alluviales s'étendent ont un rôle majeur dans le stockage et la remobilisation des sédiments. Le fleuve Ayeyarwady emprunte certains de ces bassins et traverse la région centrale où confluent trois de ses principaux affluents (Chindwin, Mu et Myitnge). La courbe ipsométrique (figure 1) du bassin de l'Ayeyarwady montre une élévation médiane située à environ 300 mètres et 40% de la surface du bassin se situe en dessous de 100 mètres d'altitude correspondant en grande partie au bassin de la région centrale ainsi qu'au delta.

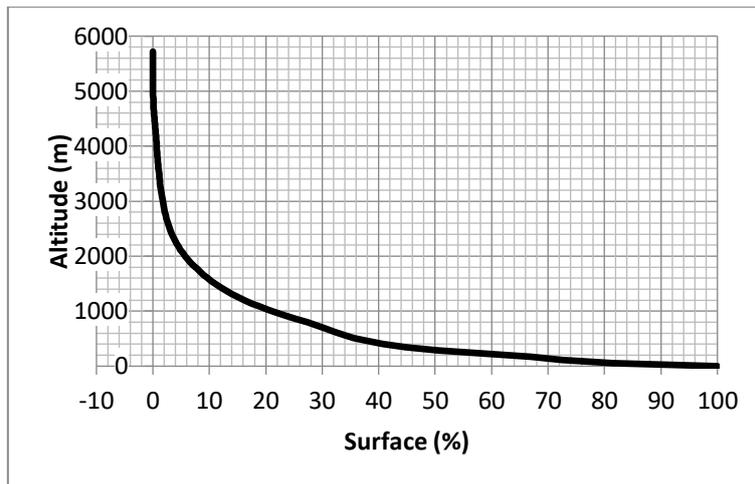


Figure 1 - Courbe hypsométrique du bassin de l'Ayeyarwady (Gruel *et al*, 2016)

### Géomorphologie du fleuve

Les caractéristiques géomorphologiques de l'Ayeyarwady sont fortement liées à la géologie et à la tectonique très active dans cette partie du monde. L'Ayeyarwady et son bassin correspondent à la zone de collision entre les plaques eurasiennes et la plaque indienne. Le bassin est ainsi coupé en deux par la faille de Sagaing que l'on peut facilement identifier puisque l'Ayeyarwady emprunte cette faille sur une grande partie de sa longueur entre Khata et Mandalay. La plaque indienne se dirige vers le nord tandis que la plaque eurasienne tend vers le sud (Wang *et al*, 2014). Le contraste entre la présence d'une géologie relativement jeune dans l'ouest de la faille de Sagaing, notamment dans les massifs Arkanais et des roches plus anciennes dans l'est, avec d'avantages de surfaces cristallines formant notamment le plateau Shan, montrent une subduction très active des deux plaques (SOBA, 2017).

Le fleuve Ayeyarwady était autrefois distinct de la Chindwin et poursuivait son cours vers le sud après Mandalay, au lieu de bifurquer vers l'ouest comme aujourd'hui. Son parcours suivait la faille de Sagaing et continuait sur ce qui est aujourd'hui la vallée du Sittang tandis que la Chindwin s'écoulait vers le delta. Les mouvements tectoniques et une surrection au sud de Mandalay firent bifurquer l'Ayeyarwady vers l'Ouest et capturer la Chindwin pour prendre son cours actuel.

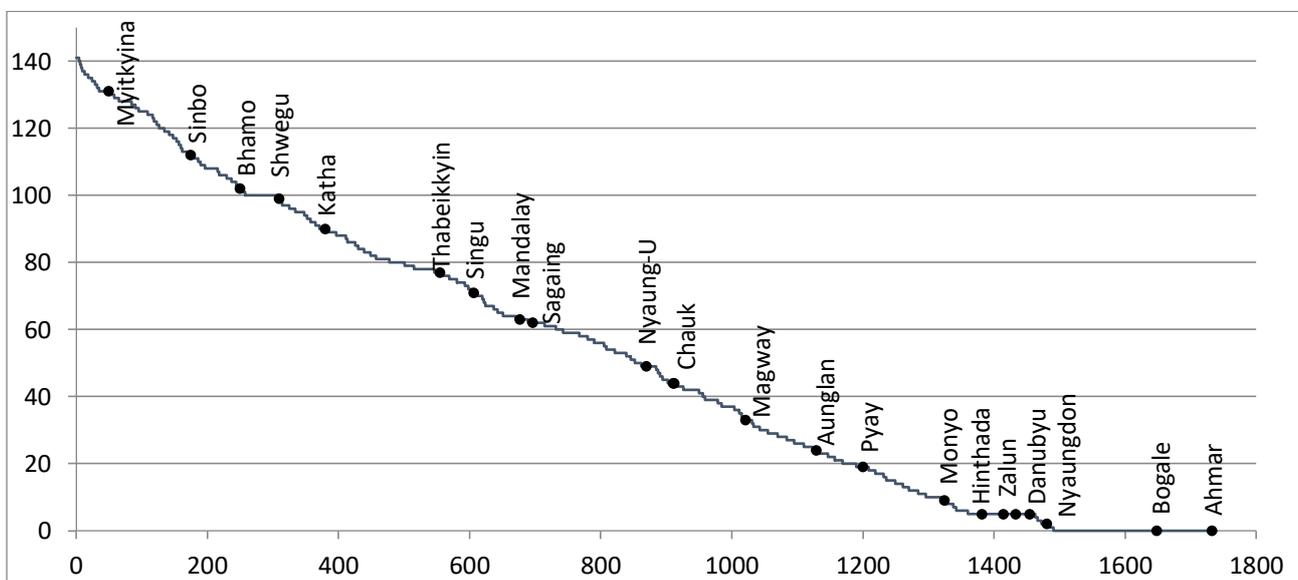


Figure 2 - Profil longitudinal de l'Ayeyarwady avec localisation des principaux townships (Gruel *et al*, 2016)

Tableau 1 - Zonation synthétique du fleuve Ayeyarwady (correspondance avec la carte de zonation, figure 3)

1	Depuis Myitsone, à 141 m d'altitude, à la confluence de la rivière Mali hka et de la rivière torrentielle N'mai hka le fleuve poursuit son parcours sur un chenal unique dans une vallée ou il est confiné par un lit rocheux. On retrouve localement des dépôts de sables sur les rochers.
2	A partir de Myitkyina et jusqu'à Ta Law Gyi, le fleuve se déploie dans la vallée et forme des méandres à large courbure, dont la migration est relativement lente. On observe quelques paléoméandres sur la rive gauche dont les plus récents datent de 2004. Des îles cultivées et des bancs de sables sont présents dès Myitkyina.
3	En aval de Ta law Gyi, le chenal reprend un axe plus rectiligne et une forme en tresse avec de nombreux bancs de sables alternés et médians ainsi que quelques îles cultivées.
4	A partir de Sinbo, le fleuve se retracte et traverse des gorges étroites, avec des secteurs où il ne fait parfois que 50 m. Ici le fleuve fait une largeur moyenne de 272 m (SOBA 3, 2017).
5	A 8 km en amont de Bhamo et sur une longueur de 29 km, le fleuve se redéploie dans un bassin où il se divise en de nombreux chenaux et anabranches étroites, sur sa rive droite la plaine est structurée de marécages isolés par des levées et de nombreux paléo chenaux noyés. Ici les îles commencent à être occupées de manière permanente, avec la présence de villages dans les secteurs amonts de la plaine, juste après les gorges.
6	Depuis Budaung jusqu'à Shwegu, le fleuve traverse de nouveau des gorges plus larges que les précédentes, d'une largeur moyenne de 506 m (SOBA 3, 2017).
7	Sortie des gorges le fleuve s'élargit et forme de nouveau des îles dans un secteur encore un peu confiné par des terrasses sur 20 km. Par la suite, la plaine alluviale s'élargit et le fleuve prend une forme en tressage complexe avec des anabranches tours à tour sur les deux rives. De vastes marais protégés par des levées naturelles et alimentés par des anabranches sont présents principalement sur la rive gauche.
8	Au niveau de Takaung le fleuve se rétrécit et emprunte l'axe rectiligne de la faille de Sagaing ou par moment il prend des formes en tressage avec des bancs de sables alternés et insulaires mais peu d'îles cultivées et encore moins habitées. Avant de se concentrer en un chenal unique et étroit d'environ 500 m de large (SOBA 3, 2017) jusqu'à Singu.
9	A partir de Male le fleuve se concentre davantage, confiné par les massifs rocheux, en suivant toujours l'axe de la faille avant d'être dévié vers l'ouest par une coulée basaltique jusqu'à Singu.
10	Depuis Singu, il se redéploie jusqu'à Mandalay sous forme d'un vaste réseau en tressage avec de nombreux chenaux et des anabranches, on retrouve ici de grandes îles habitées de manière relativement stables dans une large plaine alluviale, certaines parties d'îles ayant plus de 30 ans.
11	Après avoir rencontré la Myitngé en aval de Mandalay, le chenal se réduit, confiné par la faible largeur de la plaine et se limite à un ou deux chenaux avec des îles de taille plus réduite et moins occupées. On retrouve des bancs de sables alternés et médians. A l'approche de la Chindwin, 30 km avant la confluence principale, l'Ayeyarwady se concentre davantage et évolue peu latéralement par effet de backwater, ici les bancs de sable se font plus rares.
12	A sa rencontre avec la Chindwin et jusqu'à Minhla le fleuve reprend une trajectoire à plusieurs chenaux avec un tressage et une migration latérale très dynamique. Des îles de large surface habitées de manière plus ou moins permanente. La plaine alluviale est contrainte par les reliefs et le fleuve s'écoule en partie contre les marges stables structurées par la roche mère.
13	De Minhla et jusqu'à Pyay le fleuve est de nouveau confiné par le relief en un chenal unique avec des bancs alternés et localement la présence d'îles longilignes dans les secteurs où la vallée s'élargit un peu. Ici le fleuve a une largeur moyenne de 1146 m.
14	Entre Pyay et Kyangin le fleuve se déploie de nouveau par un élargissement de la plaine mais reste tout de même limité dans ses mouvements par les reliefs. On retrouve ici de nombreuses îles cultivées et habitées aux formes plus complexes.
15	Depuis Kyangin et jusqu'à Monyo, la plaine alluviale va s'étendre, la largeur du fleuve reste cependant relativement limitée sans contraintes apparentes dans ses déplacements et l'on constate peu d'îles. De nombreux paléo chenaux sont observables sur la rive gauche.
16	A partir de Monyo débute le delta, le fleuve se subdivise en de nombreux chenaux formant des anabranches tressées avec une migration latérale très importante puis des diffluences formant des méandres en direction de l'est (Myitmaka) puis de l'ouest (Bassein) formant également des méandres. Le chenal principal formé d'anabranches tressées reste très dynamique jusqu'à Myitkyina, puis perd peu à peu sa dynamique avec des bancs de sables de plus en plus rares.
17	C'est à partir des diffluences de la China bakir et de Shwelaung, en aval de Nyaungdon, que l'influence des marées débute et que les chenaux vont prendre une forme en méandre sur quelques kilomètres puis anastomosée jusqu'à la mer.

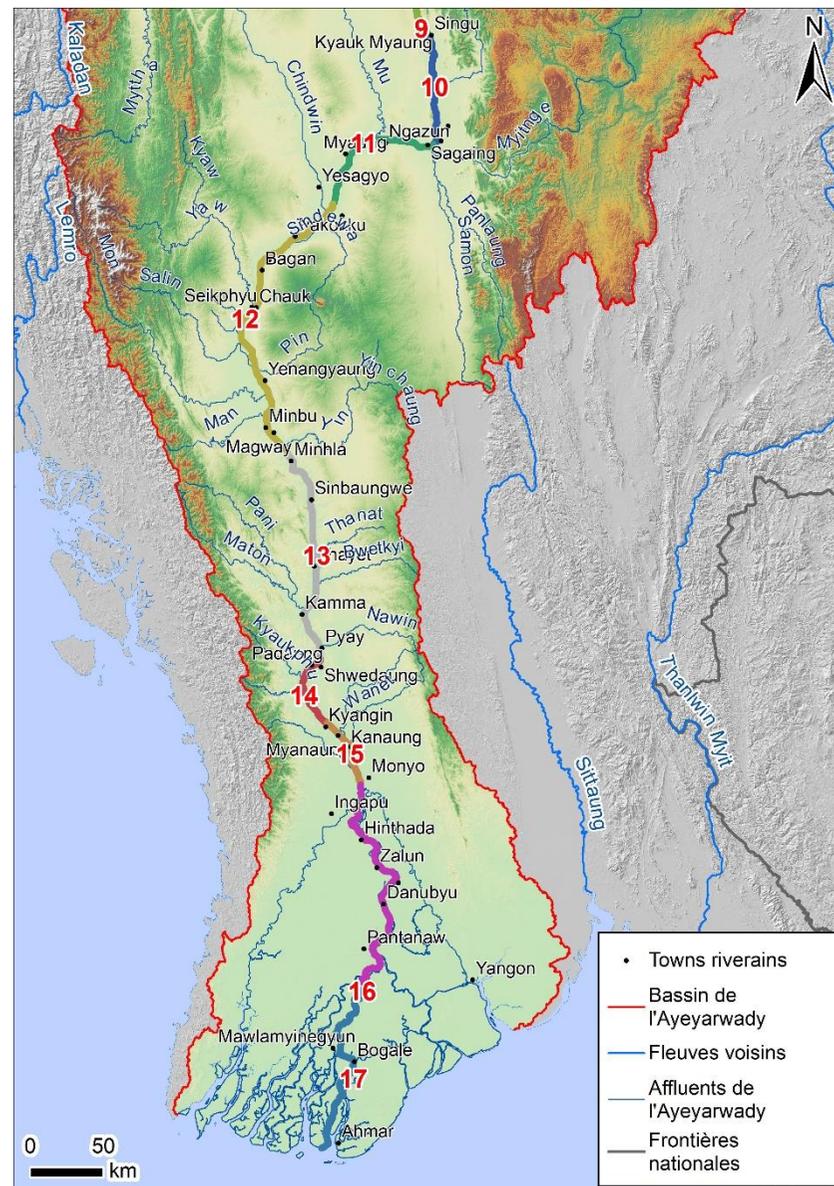
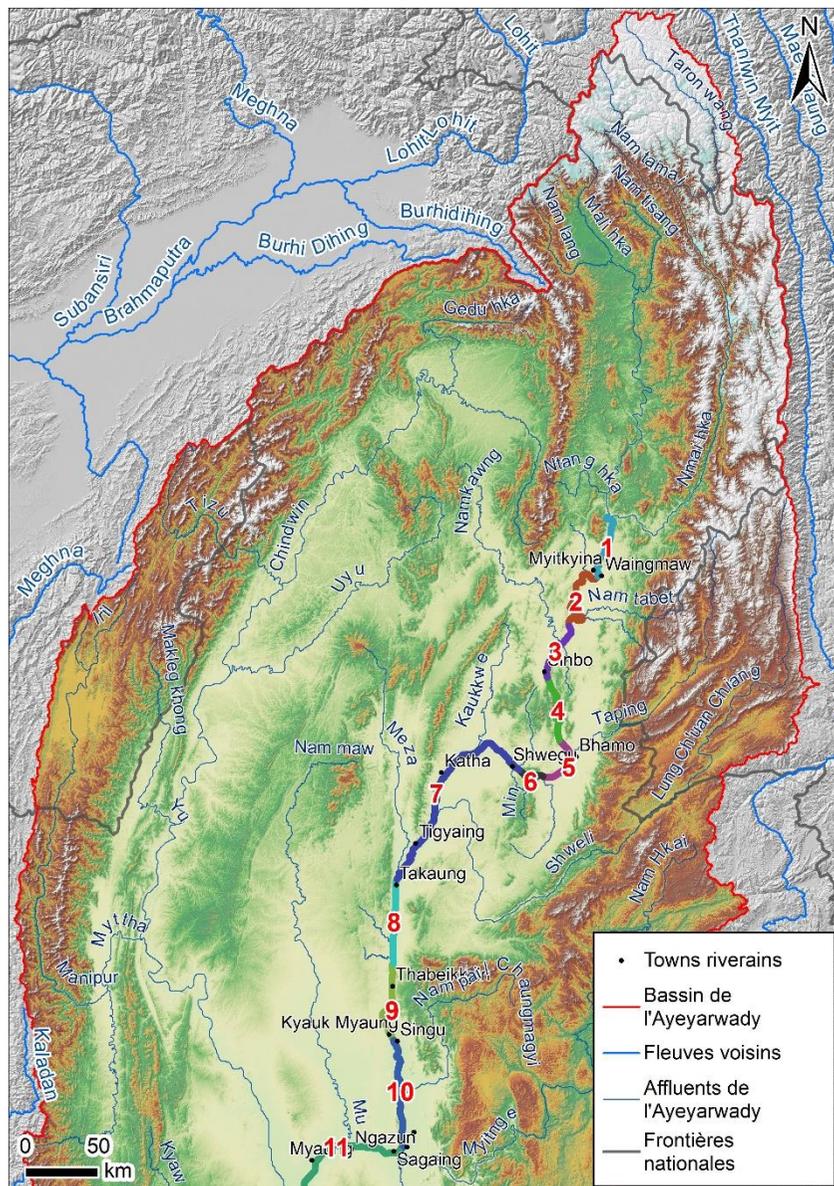


Figure 3 – Zonation de l'Ayeyarwady, les numéros correspondent à ceux du tableau synthétique (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016)

## Les principaux affluents

Le fleuve prend sa source à Myitsone (signifiant la rencontre entre les rivières, Myit étant rivière), de la confluence de deux affluents majeurs, la Mali hka et la N'mai hka. L'Ayeyarwady fait environ 1430 km depuis Myitsone jusqu'à Yangon et encore 30 km entre Yangon et la mer. Dans la littérature il est parfois mentionné que la Mali hka serait le prolongement de l'Ayeyarwady avec 735 km alors que dans d'autres ce serait plutôt la N'mai hka (830 km) plus longue mais moins abondante. Dans son parcours, l'Ayeyarwady rencontre de nombreux affluents jusqu'à Mandalay et la confluence de la Myitnge (annexe 1.2), et ses principaux contributeurs sont situés en rive gauche et drainent les régions de l'est. Lors de sa traversée dans la plaine centrale, la surface du bassin de l'Ayeyarwady est multipliée par 2,5 en l'espace de 116 km grâce notamment à la Myitnge, la Mu et la Chindwin ; cette dernière représentant 37% du bassin lors de sa confluence avec l'Ayeyarwady, soit 27% de la surface totale du bassin de l'Ayeyarwady en prenant en compte les secteurs avals (Gruel *et al*, 2016). La Myitnge, deuxième plus grand sous-bassin contribue pour 27% de la surface du bassin lors de sa confluence, soit 11% de la surface totale du bassin de l'Ayeyarwady. La Shweli placée en 5<sup>e</sup> position contribue pour 21% du bassin lors de sa confluence (Gruel *et al*, 2016).

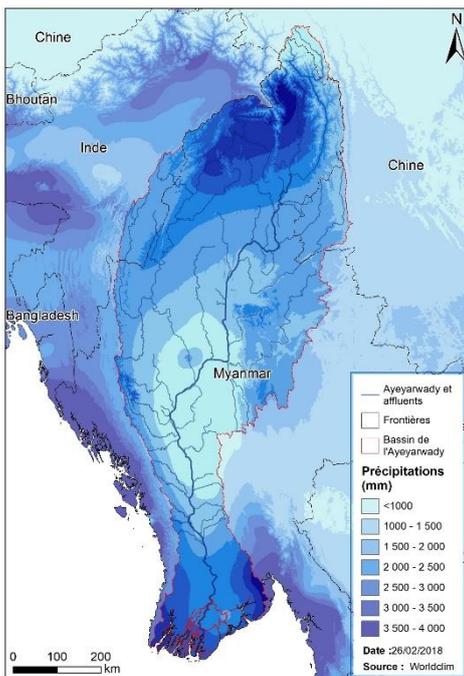
Tableau 2 – Principaux affluents de l'Ayeyarwady placés entre 6 et 9 sur l'ordre de Strahler et classés d'amont en aval (Gruel *et al*, 2016).

Affluents	Classement ordre de Strahler	Classement par surface	Surface du sous-bassin (km <sup>2</sup> )	Pourcentage de la surface du sous-bassin par rapport au bassin de l'Ayeyarwady
Mali hka	8	4	23 322	5,58
<b>N'mai hka</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>24 361</b>	<b>5,83</b>
Namkwi hka	6	30	825	0,20
Nam tabet	7	25	1 664	0,40
Nam mali	6	31	727	0,17
Namsang	6	36	312	0,07
Namkawng	7	8	9 410	2,25
Taping	7	7	10 023	2,40
Sinkan	7	19	2 360	0,56
Mosil	6	28	1 048	0,25
Min	6	32	727	0,17
Kaukkwe	6	15	3 360	0,80
<b>Shweli</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>23 022</b>	<b>5,51</b>
Meza	7	12	5 268	1,26
Baw	6	34	550	0,13
Pazigale	6	35	360	0,09
Nam pai	7	14	4 298	1,03
<b>Myitnge</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>47 032</b>	<b>11,25</b>
Mu	8	6	19 924	4,77
<b>Chindwin</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>114 169</b>	<b>27,31</b>
Sindewa	6	18	2 381	0,57
Yaw	7	9	6 857	1,64
Myemu	6	33	555	0,13
Salin	6	16	2 879	0,69
Pin	6	17	2 551	0,61
Mon	6	10	6 470	1,55
Man	6	21	2 269	0,54
Yin	7	11	6 268	1,50
Bwetkyi	6	24	1 908	0,46
Maton	7	13	5 261	1,26
Nawin	6	20	2 292	0,55
Kyaukphu	7	22	2 266	0,54
<b>Myitmaka</b>	<b>7</b>	<b>23</b>	<b>2 026</b>	<b>0,48</b>
<b>Pashin</b>	<b>6</b>	<b>26</b>	<b>1 511</b>	<b>0,36</b>

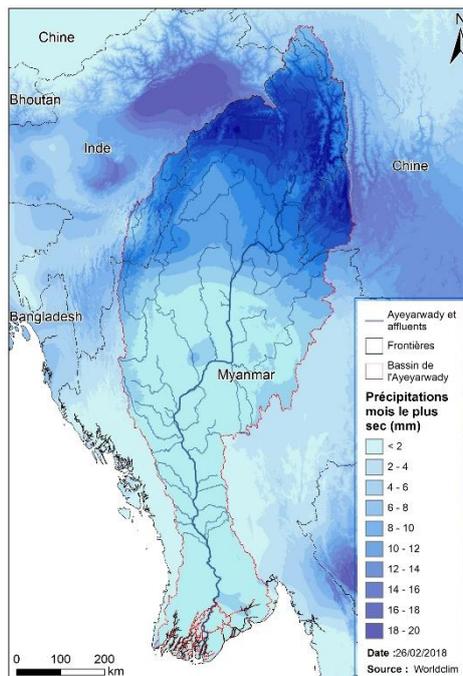
## 1.2/ Climat

Le régime hydrologique du fleuve se caractérise principalement par des apports pluviaux résultant des moussons du sud-ouest mais aussi de la fonte des neiges et des glaciers venant de l'Himalaya, situés principalement dans le bassin de la N'mai hka avec notamment le glacier de Languela. Les bassins de la Mali hka, de la Chindwin, de la Taping et de la Shweli possèdent également quelques reliefs ponctuels suffisamment élevés pour être recouvert de neige en hiver. Les sites les plus au sud étant le Kao-li-kung dans le massif Shan (25°11'N) et les Lang Ya Shan, Tasi Bum, Mt. Sanchao-Lu, (25°25'N) avec un début d'enneigement à 3200 m (Gruel *et al*, 2016).

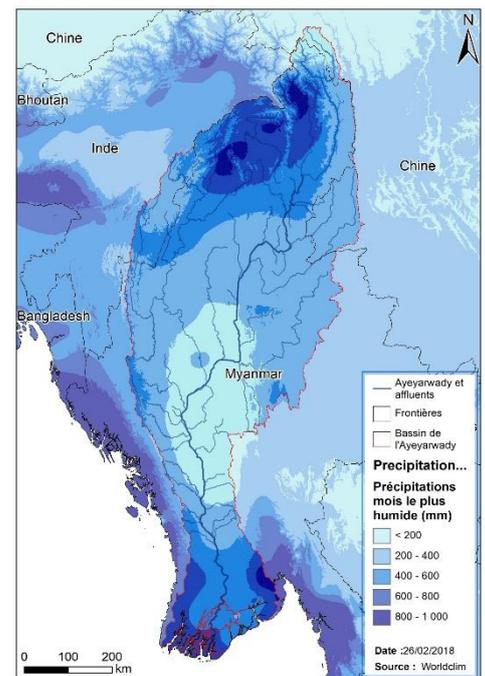
L'importance des précipitations dans cette région du monde et la quantité d'eau qui s'écoule dans le bassin est guidée à la fois par le régime des moussons très important mais aussi par la physiographie du territoire. La saison des pluies durant laquelle s'abat l'essentiel des précipitations avec environ 90% des précipitations annuelles s'étend de mai à octobre (Furuichi *et al*, 2009), le pic de la zone intertropicale de convergence apparait entre juin et aout. En dehors du delta qui reçoit en moyenne 2500 mm par an, les bassins les plus arrosés qui concentrent les maximums de précipitations sont la Mali hka et la Chindwin (Gruel *et al*, 2016). Environ 40% de l'écoulement de l'Ayeyarwady provient des secteurs situés en amont de Khata, soit environ 25% du bassin. La Chindwin présente un débit spécifique bien plus élevé par rapport à l'Ayeyarwady dans sa partie amont (SOBA 3, 2017). C'est également durant la saison des moussons que le fleuve est au plus haut. A l'opposé, la saison sèche s'étend de décembre à avril avec un étiage maximal en février et mars. La plaine centrale, aussi appelée région sèche se caractérise par un climat beaucoup plus aride pouvant s'expliquer en partie par l'effet de foehn induit par le relief arakanais. On observe une moyenne annuelle de 650 mm du côté de Nyaung-U et 900 mm vers Mandalay, dans cette partie du bassin de nombreux affluents sont saisonnier *Chaungmagyi* et ne sont mis en eau que durant les saisons de moussons, ces affluents soumis à des précipitations brutales et dans des régions avec un faible couvert végétal favorisent l'apport d'importantes quantités de sédiments grossiers dans cette partie aval du bassin (SOBA 3, 2017).



Précipitations moyennes annuelles



Précipitations moyennes durant le mois le plus sec



Précipitations moyennes durant le mois le plus humide

## Précipitations moyennes mensuelles de towns riverains

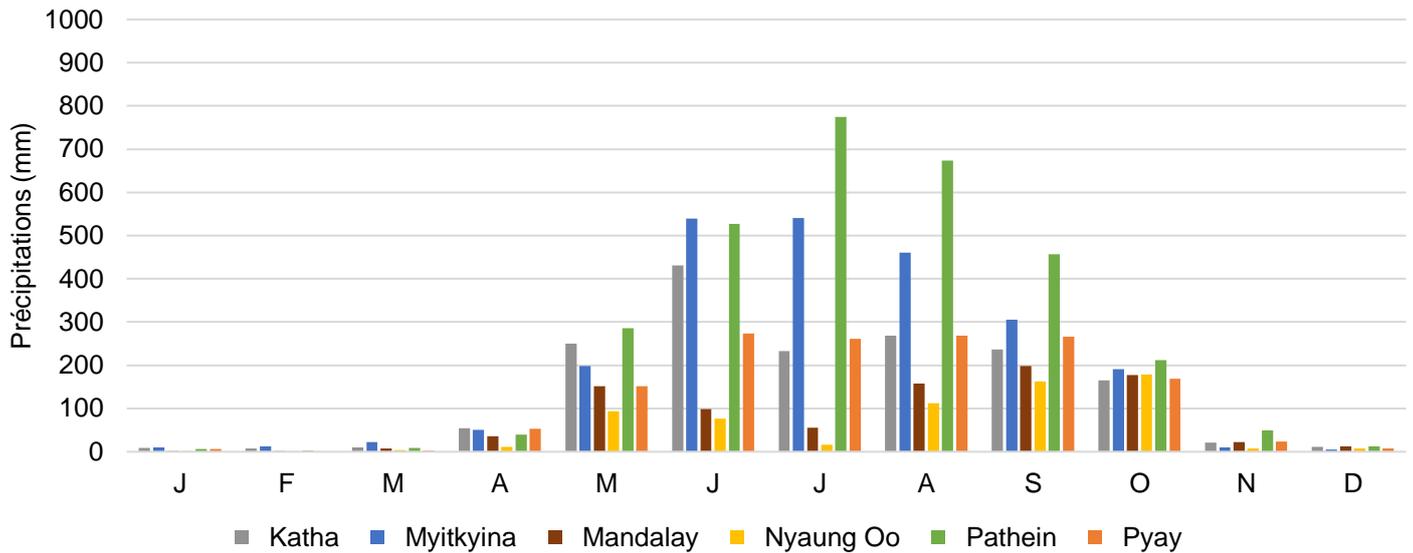


Figure 4 – Précipitations moyennes annuelle sur le bassin de l’Ayeyarwady (Sources : Worldclim et MMSIS, MIMU, Gruel 2016).

### 1.3/ Régime hydrologique

La combinaison des fortes précipitations provenant des moussons du sud-ouest couplée à la fonte des glaciers induit d’importantes quantités d’eau provoquant chaque année d’important changement dans le paysage.

Selon Van der Velden (2015), les moussons d’été entre mai et octobre représentent 92% des précipitations annuelles correspondant aux périodes de hautes eaux du fleuve. Le débit maximum moyen serait enregistré en aout est correspondrait à  $80\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  mesuré à Pyay durant la période allant de 1966 à 1996. L’enregistrement minimum pour cette même époque serait de  $56\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  et le maximum de  $102\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Le débit annuel moyen de l’Ayeyarwady est estimé par Robinson *et al* (2007) à  $440\pm 48\times 10^9$  mètres cube au niveau de Pyay (Robinson *et al*, 2007 ; SOBA 3, 2017). A partir d’enregistrements réalisés à Pyay, Furuichi *et al* (2009), ont calculé un débit moyen mensuel allant de  $6.3\times 10^9$  en février jusqu’à  $79.25\times 10^9$  en aout (SOBA 3, 2017).

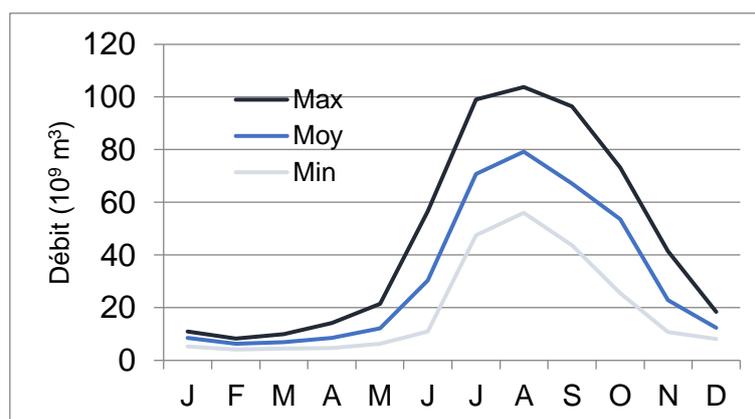


Figure 5 - Débit annuel moyen de l’Ayeyarwady à Pyay (1966-1996) (Sources : Swe, 2011)

L'Ayeyarwady supérieur depuis Myitsone jusqu'à Katha, fournit le plus grand volume et représente environ 40% du débit total de la rivière, soit environ 25% de la surface drainée totale. La deuxième plus grande contribution de débit provient de la partie supérieure de la Chindwin, où le ruissellement par unité de surface dépasse celui de l'Ayeyarwady supérieur (SOBA 3, 2017). L'Ayeyarwady moyen, entre Katha et Sagaing ainsi que la Chindwin moyenne, entre Hkmati à Mawlaik sont similaires au haut Chindwin en ce qui concerne le débit total, mais les taux de ruissellement sont plus bas dans ces régions plus basses du sud du fleuve (SOBA 3, 2017). Mais c'est dans le bas Ayeyarwady entre Mawlaik et Sagaing, que l'on retrouve les plus faibles apports malgré un couverture d'environ 45% du bassin hydrographique. Il s'agit d'une région sèche où les affluents sont relativement éphémères (SOBA 3, 2017).

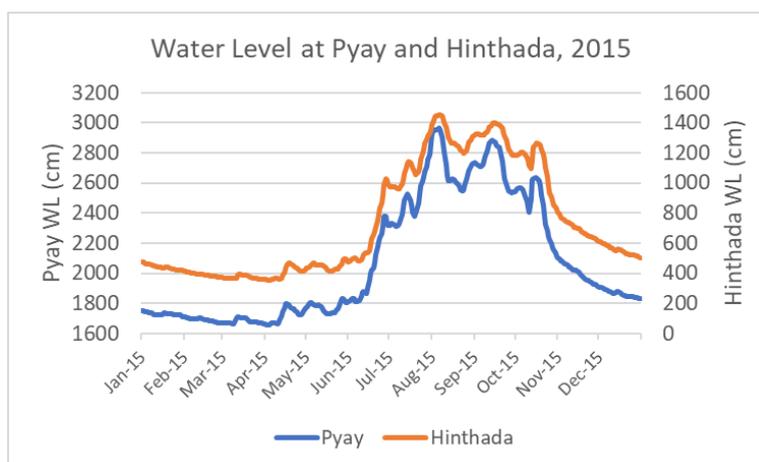


Figure 6 - Niveaux d'eau à Pyay et Hinthada en 2015 (Sources : DMH, SOBA 3, 2017)

Bien que les données relatives au débit du fleuve ne soient pas disponibles, nous avons pu recueillir les données de niveau d'eau à plusieurs stations situées le long du fleuve depuis le 13 mai 2017. Ces informations toutes relatives en raison de l'absence de profile en travers sont intéressantes car même si elles ne sont pas normalisées, elles nous permettent de prendre connaissance de la saisonnalité et des mouvements verticaux du fleuve durant l'année.

Au travers de la figure 7 présentant les niveaux d'eau durant l'année 2017-2018 sur 7 stations de l'Ayeyarwady, depuis Myitkyina jusqu'à Zalun. On observe que les niveaux d'eau enregistrés à Myitkyina fluctuent de manière très brusque et que ces fluctuations sont beaucoup plus progressives au fur et à mesure vers l'aval. Les augmentations rapides et baisses plus faibles que l'on observe en mai sont attribuables aux précipitations épisodiques associées aux premiers stades de la mousson. Les taux d'augmentation dépassent les taux de diminution en raison du ralentissement des taux de récession et de l'augmentation graduelle des niveaux de débit soutenu (SOBA 3, 2017). Au cours de cette partie montante de la mousson, des taux élevés d'affouillement peuvent mobiliser des matières plus fines déposées au cours de la saison sèche précédente et de gros volumes de sédiments, contribuant à une impulsion initiale de sédimentation. En juillet et en août, lorsque les niveaux de la rivière atteignent leurs maximums (tableau 4), les fluctuations du niveau d'eau sont réduites en raison des apports constants, l'augmentation du débit des rivières ne se traduit pas par de grands changements du niveau de l'eau, car les plaines d'inondation deviennent alors accessibles et répartissent d'avantage les eaux. En août, la mousson commence à décliner, entraînant des taux plus élevés de diminution quotidienne du niveau de l'eau. Cette baisse rapide des niveaux d'eau entraîne l'érosion des berges car les berges saturées deviennent instables lorsque les nappes se vidanges provoquant alors une décompression hydrostatique et entraînent les matériaux des berges (Malavoi et Bravard, 2010). La phase de décrue est définitivement engagée à partir de novembre et

la baisse du niveau du fleuve se fait progressive jusqu'au mois de février, les fluctuations du niveau d'eau sont les plus faibles pendant les mois secs de décembre et de janvier. On remarque qu'à partir de février, de petites fluctuations sont visibles et correspondent principalement aux apports provenant des débâcles dans le bassin de la Mali hka et surtout de la N'mai Hka.

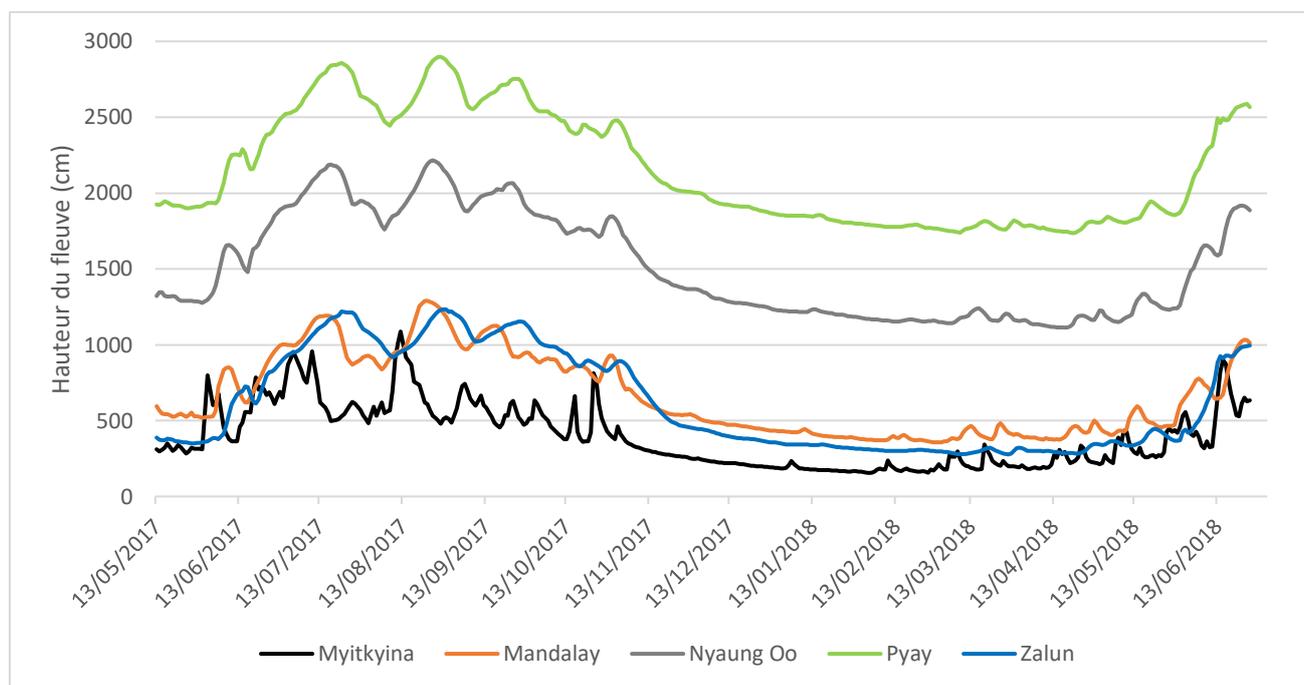


Figure 7 – Mesure du niveau d'eau du fleuve à différentes stations d'amont en aval entre le 13 mai 2017 et 26 mai 2018 (Sources : Department of Meteorology and Hydrology)

Durant la période allant du 13 mai 2017 au 26 mai 2018, le fleuve a connu des maximums de crue le 28 aout avec 12,33 m à Zalun et un minimum de 2,77 m le 27 mars 2018. Le tableau 3 présente les extrêmes minimum et maximum pour les 5 stations présentées dans la figure 7. On remarque que les niveaux les plus bas tombent durant la saison sèche mais que les stations situées en amont de Mandalay sont au plus bas dès février tandis que ceux situés à partir de Nyaung Oo ne le sont qu'en mars.

Tableau 3 - Niveaux maximums, minimums et leur amplitude à 5 stations différentes

	Myitkyina	Mandalay	Nyaung Oo	Pyay	Zalun
<b>Minimum (m)</b>	1,55 (3/02/2018)	3,57 (28/02/2018)	11,13 (17/04/2018)	17,36 (20/04/2018)	2,77 (27/03/2018)
<b>Maximum (m)</b>	10,87 (12/08/2017)	12,89 (21/08/2017)	22,16 (24/08/2018)	28,97 (26/08/2017)	12,33 (28/08/2017)
<b>Amplitude (m)</b>	9,32	9,32	11,03	11,61	9,56

Le Tableau 4 présente les vitesses d'écoulement du fleuve, mesurées à partir de 7 crues entre le 1 juin 2017 et le 18 mars 2018. On constate une vitesse moyenne d'environ 100 km par jour. La localité de Nyaungdone et le décalage de l'écoulement a été rajoutée par estimation.

Tableau 4 – Vitesse d'écoulement moyenne depuis Myitkyina jusqu'à Nyaungdon

Towns	Jours
Myitkyina	0
Shwegu	2
Mandalay	7
Nyaung Oo	8
Pyay	11
Hinthada	13
Zalun	13
Nyaungdone	14

#### 1.4/ Transport sédimentaire

La situation géographique de l'Ayeyarwady avec la présence de l'Himalaya, d'une forte activité tectonique et d'un régime de mousson classent ce bassin au troisième rang mondial en termes d'apports sédimentaires après l'Amazone et le Ganges-Brahmapoutres (Robinson *et al*, 2007). Mais malgré cette importance à l'échelle mondiale, les travaux sont assez limités. Plusieurs études ont été réalisées ces dernières années car jusqu'à récemment, les études se limitaient à Gordon (1885), Stamp (1940) Robinson *et al* (2007) et Furuichi (2009).

Gordon fut le premier à entreprendre l'évaluation des apports sédimentaires transitant dans l'Ayeyarwady en amont du delta, à Pyay. Ses enregistrements relatifs au débit s'étalèrent sur 10 ans (1869-1879), tandis que ceux qui concernaient les sédiments ne le furent que pendant 1 an, en 1878. Ces travaux lui permirent d'estimer la moyenne des transports sédimentaires à  $406.5 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$ . Mais les méthodes utilisées ne prenaient pas en compte les différentes profondeurs du fleuve et la variabilité des apports. Ces chiffres furent repris et recalculés par Robinson *et al* (2007) en identifiant un taux supérieur de  $421 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ . Robinson *et al* (2007) ont calculé un volume d'eau annuel de  $44\ 241 \text{ km}^3$  contenant une charge sédimentaire comprise entre 226 et 364 mégatonne par an.

Les travaux réalisés par Furuichi *et al* (2009), se sont basés sur les données du Department of Meteorology and Hydrology of the Government of Myanmar et se sont focalisés sur le transport des sédiments en suspension à Pyay entre 1966 et 1996. Toujours selon les travaux de Furuichi *et al* (2009), l'Ayeyarwady tendrait vers une augmentation du transport sédimentaire depuis les travaux Gordon (1870) et cela en dépit d'une baisse des débits depuis cette même époque.

Environ 50% du débit annuel serait fourni par les 20% de débits maximums (débits quotidiens  $> 13\ 867 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) (SOBA 3, 2017). La forme des chenaux et le mouvement des sédiments à grains grossiers dans l'Ayeyarwady sont déterminés par ces événements de débit de pointe de relative courte durée, avec le déplacement et le dépôt de matériaux plus fins se faisant pendant les crues de longues périodes.

Les récents travaux entrepris dans le cadre du programme SOBA, section 3 (2017) développé par *Ayeyarwady Integrated River Basin Management*, ont montré que l'Ayeyarwady présente une très grande diversité de conditions avec une complexité dans la répartition des sédiments dépendants des sous bassins, des conditions géologiques et tectonique, et des conditions climatiques. Les apports provenant des bassins situés en amont de Mandalay seraient responsables pour environ 50% des apports de sédiments dans le bassin (figure 8). Depuis Myitsone la taille des grains diminuerait progressivement jusqu'à la faille de Sagaing qui apporterait des grains beaucoup plus grossiers dus à l'intense activité qui provoquerait des mouvements de terrain. Il s'agit également d'un secteur où sont présentes de nombreuses exploitations minières parfois en bordure du lit de

l'Ayeyarwady. Des observations comparables sont faites dans la région sèche en aval de la Chindwin ou l'on retrouve de nouveau des graviers et sables grossier dans le lit du fleuve alors qu'ils devraient être beaucoup plus fin à ces endroits localisés dans le bas Ayeyarwady jusqu'en amont du delta. Ici ce sont d'avantage le contraste des saisons avec des pluies intenses en juillet aout et une saison sèche particulièrement intense induit d'importants apports sédimentaires formant des cônes dans le lit de l'Ayeyarwady. La Chindwin qui est le principal affluent de l'Ayeyarwady apporterait une grande quantité de sédiments mais en proportion moins importante que ce qui aurait été estimé jusque-là (50% par Garzanti *et al*, 2016). Notons tout de même que depuis les années 2000 de grandes surfaces de forêts et de lits de cours d'eau sont exploités pour l'or et que les rejets en masse se déversent dans la Chindwin.

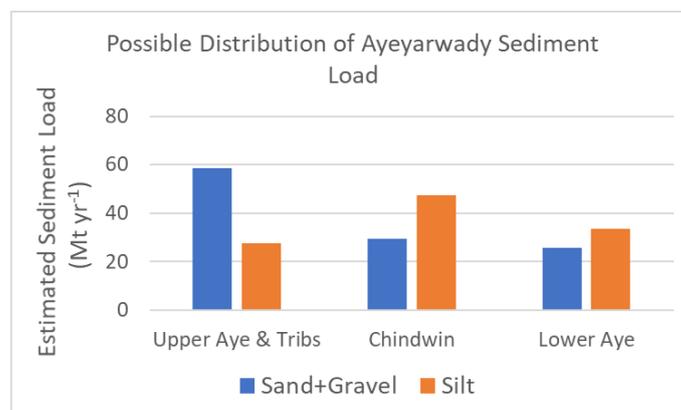


Figure 8 - Origine des sables et limons sur la Chindwin et le haut et bas Ayeyarwady, basée sur la distribution physiographique et les apports sédimentaires estimés (Sources : SOBA 3, 2017)

## 1.5/ Aménagements hydrauliques

### Barrages et retenues d'eau

Le Myanmar à une capacité hydroélectrique estimée à 39 720 megawatt, cependant, seulement 5,9% de ce potentiel serait exploité jusque-là (WEC, 2010 ; Irrigation Department, 2011 ; Kattelus *et al.*, 2014, Gruel *et al.*, 2016). Mais, l'ouverture récente du pays et la mise ne place de législations favorables aux accords commerciaux avec l'étranger ont favorisé la possibilité pour les investisseurs étrangers de participer au développement hydroélectrique du pays (Robinson, 2012 ; Webb *et al.*, 2012, Kattelus *et al.*, 2014, Gruel *et al.*, 2016). Le pays a connu depuis les années 2000 une véritable explosion des projets de construction de barrages hydroélectriques. Les pays voisins parmi lesquels la Chine, l'Inde et la Thaïlande sont impliqués dans de nombreux projets et sont de futurs importateurs en électricité produite au Myanmar.

A ce jour, en 2018, on ne compte pas moins de 113 grands barrages (ayant un réservoir d'une surface de plus de 1 km<sup>2</sup>) sur le bassin de l'Ayeyarwady, parmi lesquels figure le barrage de Thaphanseik construit en 2001 sur la rivière Mu (6<sup>e</sup> plus grand bassin versant de l'Ayeyarwady) qui présente une retenue d'environ 390 km<sup>2</sup> ou encore le barrage de Yeywa construit en 2011 sur la Myitnge (2<sup>e</sup> plus grand bassin versant) qui inonde sa vallée sur près de 70 km de long et une surface de 62 km<sup>2</sup>. D'autres barrages cascade sont présents sur la Shweli (5<sup>e</sup> plus grand bassin versant) et construits en 2008 et sont principalement localisés dans les parties chinoises du bassin de l'Ayeyarwady. Ces barrages sont beaucoup plus discrets mais néanmoins très dommageables pour les transits sédimentaires et la biodiversité puisqu'ils impliquent la dérivation du cours d'eau et un assèchement partiel du lit naturel.

Un projet de barrage, le projet Myitsone, a vu le jour en mai 2007 avec la signature d'un accord entre les autorités birmanes et le gouvernement chinois au travers de la *China Power Investment Corporation*, projetant la construction d'un ensemble de sept barrages d'une capacité de 3600 MW sur la Mali hka et la N'mai hka, les deux sources de l'Ayeyarwady ainsi qu'un grand barrage en aval de leur confluence sur le site de Myitsone. Sensé être le 20<sup>e</sup> plus grand barrage au monde, d'une hauteur de 152 mètres et inondant un territoire de 405 km<sup>2</sup>, c'est-à-dire la moitié des surfaces inondées par l'ensemble des 7 grands barrages existant à cette date, soit 819 km<sup>2</sup> (International River, 2013). Compte tenu des impacts majeurs sur le plan humain et écologique et des risques encourus résultant de la construction de telles infrastructures sur un fleuve aussi puissant et dans une région aussi sismique de grands mouvements tectoniques, inédits dans le pays ont eu lieu à travers le Myanmar et tout particulièrement dans l'état Kachin où ces infrastructures doivent être réalisées. En juin 2011 une première suspension des travaux de barrage est engagée résultant de la montée des tensions entre l'armée birmane et l'armée Kachin libre (KIA) et les conditions saisonnières, jusqu'à aboutir le 30 septembre 2011 par le gel du projet. Aujourd'hui, même si on retrouve régulièrement des articles de journaux portant sur le sujet et les discussions entre le gouvernement chinois et le gouvernement birman, le projet n'a toujours pas été repris.

Les impacts du projet Myitsone ont été répertoriés en 2009 par la Biodiversity and Nature Conservation Association (BANCA). Avec notamment des impacts directs sur les territoires inondés qui détruiraient 47 villages, des impacts à long termes et à l'échelle de tout le fleuve en touchant les ressources halieutiques par la rupture des continuum migratoires et la biodiversité en général. Des impacts sur l'agriculture située en aval avec un abaissement du niveau d'eau en raison d'une incision du lit et une érosion accentuée par l'arrêt du transit sédimentaire vers les plaines alluviales jusqu'au delta. Cet impact pouvant être à long termes car il réduirait davantage la résilience du delta face à la montée des océans due au changement climatique. Ces barrages induiraient des impacts beaucoup plus indirects tels que l'apparition de maladies comme le paludisme ou la bilharziose favorisée par la présence de retenues d'eau. Notons que l'Ayeyarwady longe et parcourt sur une grande partie de son cours la faille de Sagaing considérée comme l'une des plus actives au monde avec un glissement de 18 mm/an (International River, 2013 ; Vigny *et al.*, 2003 ; Wang, 2013 ; Wang *et al.*, 2014, Gruel *et al.*, 2016) et que Myitsone se situe à quelques kilomètres de cette dernière.

Le Myanmar est l'un des pays possédant les plus grandes ressources en eau avec environ 20 000 m<sup>3</sup> d'eau par an et par habitant (FAO AQUASTAT, 2012). Cependant la distribution saisonnière et spatiale de l'eau pose un défi majeur pour son utilisation et sa redistribution (Kattelus *et al.*, 2015). L'intensification de l'agriculture et son extension a par conséquent menée à une augmentation des besoins en eau. C'est notamment dans la région centrale particulièrement sèche que ces besoins se font sentir avec parfois de graves pénuries d'eau. L'évapotranspiration dans cette région serait environ deux fois supérieure à la pluviométrie annuelle (Kattelus, 2009) poussant les agriculteurs à avoir également recours aux eaux souterraines (NCEA, 2006). Selon the Agricultural Water Resources Study in Myanmar (2003), le bilan hydrique de la division de Mandalay est négatif entre janvier et juillet. Sur le delta, le sol enregistre un déficit durant les mois les plus chauds et les plus secs entre février et avril (MOAI, 2003 ; Kattelus, 2009).



Figure 9 – Systèmes de pompage dans le lit de l’Ayeyarwady afin d’approvisionner l’industrie du nickel de Takaung (gauche) et les cultures dans la région centrale sèche (photos : Gruel, projet SOBA 3, 2017).

De vastes travaux d’irrigation auraient été menés durant le moyen âge dans la région centrale sèche et il subsisterait encore de telles structures du côté de Shwebo. En 2018, nombre de retenues présentes au Myanmar ont un but hydroélectrique mais servent également à l’irrigation. On retrouve une forte densité de petits bassins d’irrigation dans la plaine centrale sèche, notamment sur la rive gauche de l’Ayeyarwady. En rive droite la rivière Mu connaît une succession de 3 barrages, avec notamment le barrage hydroélectrique de Thaphanseik (cité plus haut), en aval de ce barrage deux autres ruptures (figure 10, gauche) permettent la dérivation de grandes quantités d’eau vers l’ensemble de la plaine, mais le débit réservé semble très limité. On remarque aujourd’hui que le lit de la rivière en aval est faiblement alimenté (figure 10, droite) et que ce qui semblait être autrefois une rivière à méandres dans la partie aval est aujourd’hui en cour d’évolution. De tels aménagement sont également présents sur d’autres affluents de l’Ayeyarwady mais à des échelles plus petites.



Figure 10 – Dérivation de la rivière Mu, vers les périphéries de la plaine (gauche), les secteurs en aval de la dérivation ont un débit réservé très limité (droite), les images sont à la même échelle (Sources : Google earth)

### Digues et protection des berges

Les informations relatives aux structures protectrices, que ce soit les digues hautes, les digues basses (épis) et éventuels casiers de sédimentations sont assez limitées voire inexistantes. Depuis le fleuve, on observe une certaine diversité d’aménagements, des renforts de berges réalisés en général à proximité des villages et parfois devant des habitations isolées. Les structures sont assez variables en fonction des moyens, des matériaux disponibles et des densités d’habitations à protéger.

En ce qui concerne les renforts de berge ils sont en général constitués de matériaux rocheux cimentés et dallés, en général à proximité de grandes villes. Du côté de Myitkyina on observe l'utilisation des galets dans la construction des contreforts de berges (figure 12). En de nombreux endroits du fleuve, notamment sur les îles on observe des structures en damier formées de bambou et remplies de bloc rocheux ou de sacs de sable. Des aménagements visant à stabiliser les berges par piégeage des sédiments sont mis en place dans certains secteurs, on constate notamment depuis quelques années la présence de digues basses, épis (figure 11), dont le but est de capturer les sédiments et fixer les terrains. Certains d'entre eux semblent ne pas tenir d'une année sur l'autre et se retrouvent assez rapidement au milieu du chenal. Un large réseau de digues de protection des crues ont été réalisées au 19<sup>e</sup> siècle et renforcées ou reconstruit tout le long du 20<sup>e</sup> sur le delta et des secteurs situés un peu en amont de ce dernier (voir partie 25).



Figure 11 – Mise en place de digues basses (épis) à la perpendiculaire du chenal. En haut à gauche des épis en cours de sédimentation du côté de Bhamo (Sentinel 2, 5 février 2017) ; A droite vers Ta Naung taig en rive gauche (Google earth, 2017) leur but ici est de protéger de l'érosion les structures d'irrigation. Sur l'image du bas, la stabilisation de l'île vise également à la protection des berges des secteurs en aval, jugés comme prioritaire ici le township de Ahpyauk, mais induit probablement un déplacement de l'érosion sur d'autres secteurs (Google earth, 2018).



Figure 12 - Protection des berges, en haut à gauche : Restauration des berges de la ville de Myitkyina à partir de galets encore présents dans cette partie située en amont du fleuve ; en bas à gauche, à Shwegu, renforts de berges constituées de dalles et de blocs rocheux cimentés. En haut à droite : installation de structures en damiers formant des casiers de bambou et de bloc de roche ou sac de sable pour maintenir les berges à proximité des villages. Village insulaire situé au nord de Mandalay. En bas à droite : structures en damier résistant quelques peu à l'érosion qui a commencée à détruire la berge à droite et à gauche (photos : Gruel, projet SOBA 3, 2017)

## 1.6/ Occupation du territoire et agriculture riveraine

Les premières traces humaines sur les terrasses de l'Ayeyarwady dateraient de 400 000 ans et correspondraient à la culture de l'anyathien (Lubeigt, 2013) avec des restes d'une industrie sur galet retrouvé notamment à Chauk et Nyaung Oo (Pautreau *et al*, 2001). L'agriculture aurait débuté dans l'est de l'Asie dès le début de l'Holocène, il y a entre 8000 et 9000 ans selon Corlett (2014) et se serait d'abord déployée le long des grands fleuves tels que l'Ayeyarwady avec notamment le site de Letpanchibaw, non loin de Pakokku (Pautreau *et al*, 2001). Sur le plan historique elle aurait été occupée par les Pyus puis par les Bamars dès le 9<sup>e</sup> siècle dans la partie centrale et les Kachins dans les régions du nord (Sabrié, 2015). C'est en 1044 que le premier empire de Pagan aurait été fondé au sud-ouest de Mandalay. On ne dénombre pas moins de cinq anciennes capitales situées dans la vallée : Kyaukmyuang, Mandalay, Amarapura, Ava et Sagaing.

Trois types de pratiques culturelles seraient développées au Myanmar, dépendant de la topographie, du sol et des ressources en eau. La culture du « *le* » serait présente sur le delta de l'Ayeyarwady et impliquerait une unique culture de riz. La pratique du « *kaing* » serait développée dans la région centrale sèche et sur certains secteurs du delta et induirait deux cultures annuelles, l'une durant la

saison sèche (de novembre à avril) et l'autre durant la saison des pluies (d'avril à novembre). La pratique du « ya » également appelée culture itinérante consiste en l'utilisation des sols jusqu'à leur épuisement. Cette dernière pratique est réalisée sur les secteurs collinéens et montagneux ou les sols sont plus pauvres (UNESCAP, 1996).

Le Myanmar est devenu l'un des plus grands exportateurs de riz durant la période coloniale depuis 1824 jusqu'à 1948. Mais par la suite les exportations auraient été fortement restreintes entre 1962 et 1988 (Kyi *et al.*, 2000 ; UNDP, 2002 ; Fujita *et al.*, 2006 ; Kattelus, 2014). La riziculture est la culture dominante et elle représente la moitié des surfaces cultivées avec des concentrations particulièrement élevées dans la région centrale du bassin de l'Ayeyarwady, dans la plaine de la Mu, de la Chindwin et le long du fleuve représentant environ 20% de la production (FAO, 2009 ; Kattelus, 2009). Mais c'est dans le delta que la production est la plus importante et ce territoire représenterait environ 60% de la production nationale (UNDP, 2002 ; Kattelus, 2014). Parmi les autres cultures produites dans la région centrale sur les terrasses alluviales et les îles on retrouve également le piment, le coton, le maïs, les haricots et les arachides. Selon les sources, entre 89 et 98% de l'eau utilisée serait dédiée à l'irrigation des cultures (Kattelus, 2009). De vastes territoires de plaine et de montagne seraient déforestés et utilisés par des compagnies privées pour l'exploitation du maïs, de la banane, du Magnoc ainsi que pour le développement du caoutchouc et de la canne à sucre pour les biocarburants (Woods, 2015).

L'agriculture rivulaire est présente sur la presque totalité du cours de l'Ayeyarwady. Seuls les tronçons situés dans des gorges ne permettent pas une utilisation des sols ni la fixation d'îles sur de longues durées. La figure 15 présente les plaines alluviales de l'Ayeyarwady et correspond assez fidèlement aux territoires inondés lors des crues et aux terres alluviales. On retrouve ainsi les premières cultures alluviales en zone inondable à partir de Nawng Chein situé à 25 km en aval de Myitsone au début du bassin de Myitkina dans l'état Kachin. Les cultures et élevage insulaires sont visibles dès la première île située en aval du pont de Myitkyina. Et l'on constate les premiers regroupements d'habitations dès l'île située en face du centre-ville de Myitkyina. En amont de Myitsone, sur la Mali hka on ne trouve plus de cultures alluviales ou insulaires en dehors du bassin où se situe la ville de Putao. La rivière N'mai hka qui traverse les massifs himalayens, s'écoule dans des vallées très encaissées et présente un régime torrentiel sans plaine alluviale sur l'ensemble de sa longueur tandis que la Mali hka qui coule d'abord dans des vallées encaissées se redéploie dans un bassin où l'on retrouve quelques occupations rivulaires voir insulaires notamment au niveau de Pa La Na, sur l'un de ses principaux affluent, la Nam lang. Par la suite elle traverse de nouveau des vallées fortement confinées qui laisse peu de place à des cultures rivulaires.

Le paysage agricole diffère quelque peu d'amont en aval avec une intensification de l'agriculture qui s'accroît en direction de l'aval. On retrouve une typologie de parcellaire très variable en fonction du type de culture, de la proximité verticale ou horizontale du fleuve selon que l'on soit sur une rive ou sur une île. On remarque notamment un découpage foncier et parcellaire selon des bandes subparallèles correspondant parfois aux strates horizontales de dépôt et de formation de ces espaces terrestres. L'espace est totalement utilisé et il est fonction des durées d'inondations, on retrouve souvent des plantations jusqu'au bord de l'eau même en saison sèche lors de l'étiage. Seuls les larges bancs de sable fraîchement construits lors de la crue précédente semblent ne pas être utilisés. Le découpage parcellaire ne serait pas délimité par des limites physiques, mais uniquement par les cultures elles même. Les parcelles sont parfois délimitées par un petit talus de quelques centimètres servant de diguette (Lubeigt, 1974). L'herbe *Kaing*, ou herbe des éléphants est une large appellation pour les herbes poacées hautes, parfois de 3 m et plus, poussant sur les berges sont récoltées et utilisées pour les toitures car elle est étanche à la pluie mais poreuse à la fumée (Lubeigt, 1974).

Les bas-fonds, anciens chenaux, backswamps protégés par des levées, sont parfois utilisés pour le pâturage des bovins, ces mêmes bovins sont installés sur des zones surélevées durant les crues et sont envoyés hors de la plaine lorsque ces monticules sont absents des îles. Sur les îles et les terres

alluviales, les bovins ne travaillent jamais durant la saison sèche, en dehors du transport, en raison de la chaleur et de l'absence d'arbres et de points d'ombre (Lubeigt, 1974).

Toujours selon Lubeigt (1974), en parlant de l'agriculture insulaire de l'Ayeyarwady au nord de Mandalay au début des années 70, le calendrier agricole est régulé par les pluies et le niveau du fleuve qui s'élève à partir du 15 mai avec un pic d'inondation en juillet et août. A cette époque les plaines de l'Ayeyarwady sont recouverte d'eau au courant lent en raison de l'étalement du flot qui répartit les forces à travers la plaine. Le riz est semé entre avril et mai au moment des premières pluies et lorsque le sol redevient humide, par la suite sa croissance va suivre le niveau du fleuve. Par la suite, moissons et labours suivent la décrue du fleuve afin de laisser place aux arachides, afin qu'ils profitent de l'humidité pour entamer la croissance avant la saison sèche.

On retrouve une très grande diversité de cultures, le plus souvent en polyculture. Parmi lesquelles figure en première place le paddy (riz) mais également les haricots, maïs, arachides, sésame, courges, tapioca que l'on peut trouver indépendamment. Mais l'on trouve également des associations culturales avec par exemple arachide et haricot, haricot et maïs, courge et maïs. Selon Lubeigt (1974), on observe 4 variétés hâtives de paddy (cultivées seulement dans les îles de l'Ayeyarwady dont le cycle végétatif est très court (variant de 105 à 120 jours).

Une parcelle peut supporter deux récoltes avec par exemple le riz de juin à octobre puis l'arachide sur le reste de l'année. Le sésame semé durant la décrue est cultivé sur les niveaux supérieurs de la plaine en raison de la plus grande fertilité des sols et de la faible inondation durant la saison des moussons (Lubeigt, 1974). Les variétés *Shwe ba laye* et *tha htai gyi* ont un cycle de 4 mois, ils sont cultivés depuis les années 1950 ; Mayin nwai introduit dans les années 1960 atteint sa maturité au bout de 3 mois et demi ; Siphaw, originaire du Vietnam avec un cycle végétatif de 3 mois, est apparu dans les années 1970. Dans les secteurs plus stables de la plaine ainsi que sur les terrasses plus anciennes le parcellaire rizicole semble être plus sophistiqué et aménagé par des levées de terre ou les rizières formant des bassins irrigués par des canaux ou directement par la pluie.

La saison sèche est une période difficile pour toutes les cultures, les cultures vivrières sont donc assurées durant la saison des moussons, tandis que durant la saison sèche les riverains peuvent pratiquer d'autres activités agricoles complémentaires « commerciales » visant à augmenter les revenus (Lubeigt, 1974). D'autres activités annexes qui ne peuvent pas être réalisées durant la saison des pluies sont réalisées en saison sèche, comme par exemple l'orpaillage, travailler dans l'extraction de sable et graviers dans le lit du fleuve, que ce soit pour des entreprises ou de manière artisanale (SOBA 3, 2017).



Figure 13 – A droite : des cultures peuvent être établies jusqu'à la limite du fleuve, ici des haricots durant la saison sèche. A gauche : Des îles ou les secteurs les plus bas peuvent être consacrés au pâturage (Photos : Gruel, projet SOBA, 2017).

Les habitations sont très présentes dans la plaine alluviale et sont plus ou moins regroupées en villages parfois organisés en un ensemble géométrique, rectangulaire lorsque les terrains sont suffisamment éloignés du fleuve et de sa migration dans l'espace et dans le temps. Ces constructions sont généralement situées sur les parties les plus élevées des îles et de la plaine. Ces secteurs ne demeurent pas moins vulnérables et finissent par être balayé par la migration continue du fleuve. Ces habitats sont également régulièrement atteints par les crues saisonnières qui en temps normal inonde les parties les plus hautes des îles sous quelques décimètres mais qui lors d'épisodes particulièrement puissants pousse les habitants à fuir en attendant la décrue. Le plus souvent construit sur pilotis en bois de teck plus ou moins haut (0,55 à 2,2 m) (Lubeigt, 1974) mais également en structures de bambous, ces habitats sont pensés pour être noyés au rez-de-chaussée une partie de l'année. Cependant, étant donné la largeur de la plaine alluviale et la hauteur des îles de sable, cette surélévation des habitats n'est souvent pas très importante parfois juste à un mètre. Seuls les secteurs où la plaine est étroite et où les eaux sont particulièrement concentrées connaissent des maisons très hautes avec un plancher à plusieurs mètres de haut (figure 14 en bas à gauche). De petites cabanes temporaires de pêcheur ou de cultivateur parsèment les rives et les champs. Les habitations à long terme sont en général entourées d'arbres à croissance rapide tels que *Albizia procera* qui apporte de la fraîcheur durant la saison sèche mais dont les racines supportent des inondations durant plusieurs mois.



Figure 14 – Exemple d'habitats riverains, en haut à gauche une cabane de pêcheur saisonnière au milieu de plantations de haricots. En bas à gauche un village installé au-dessus du fleuve sur des terres stables. En haut et en bas à droite quelques habitations sur le point de disparaître face à la migration du fleuve (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017).

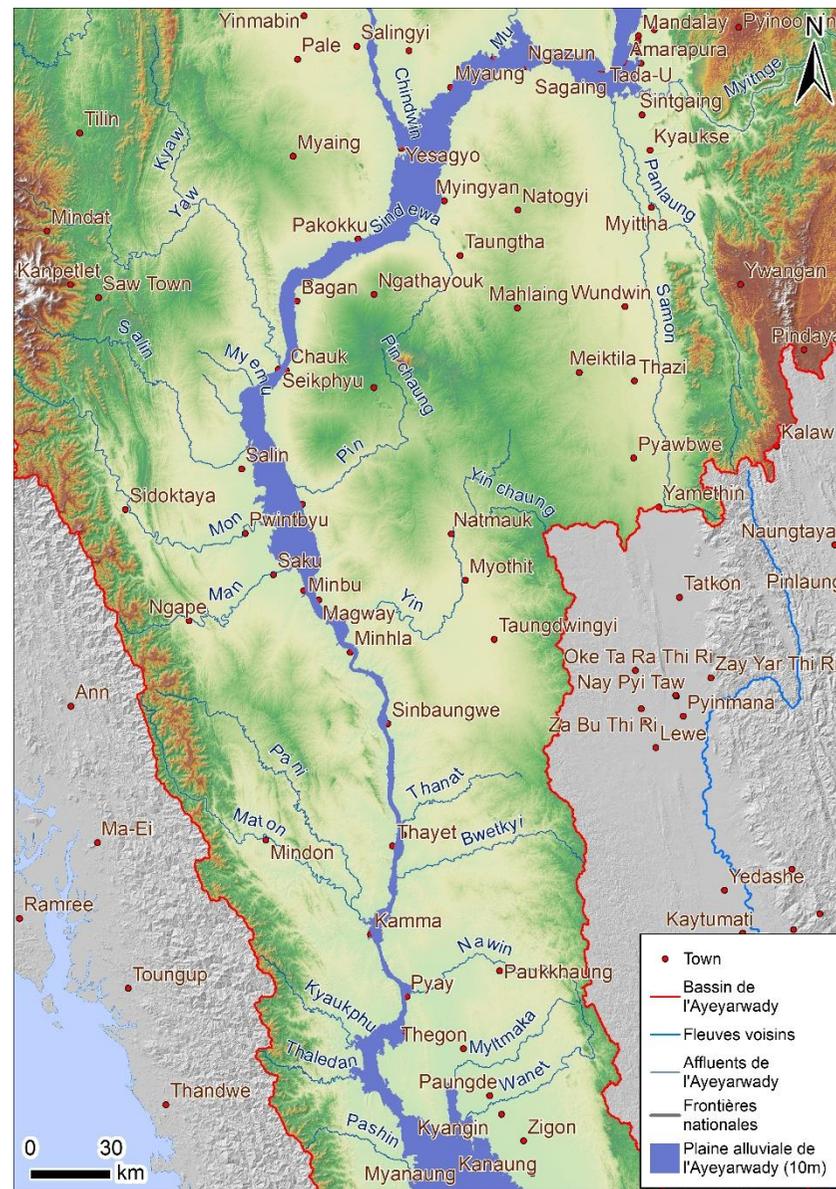
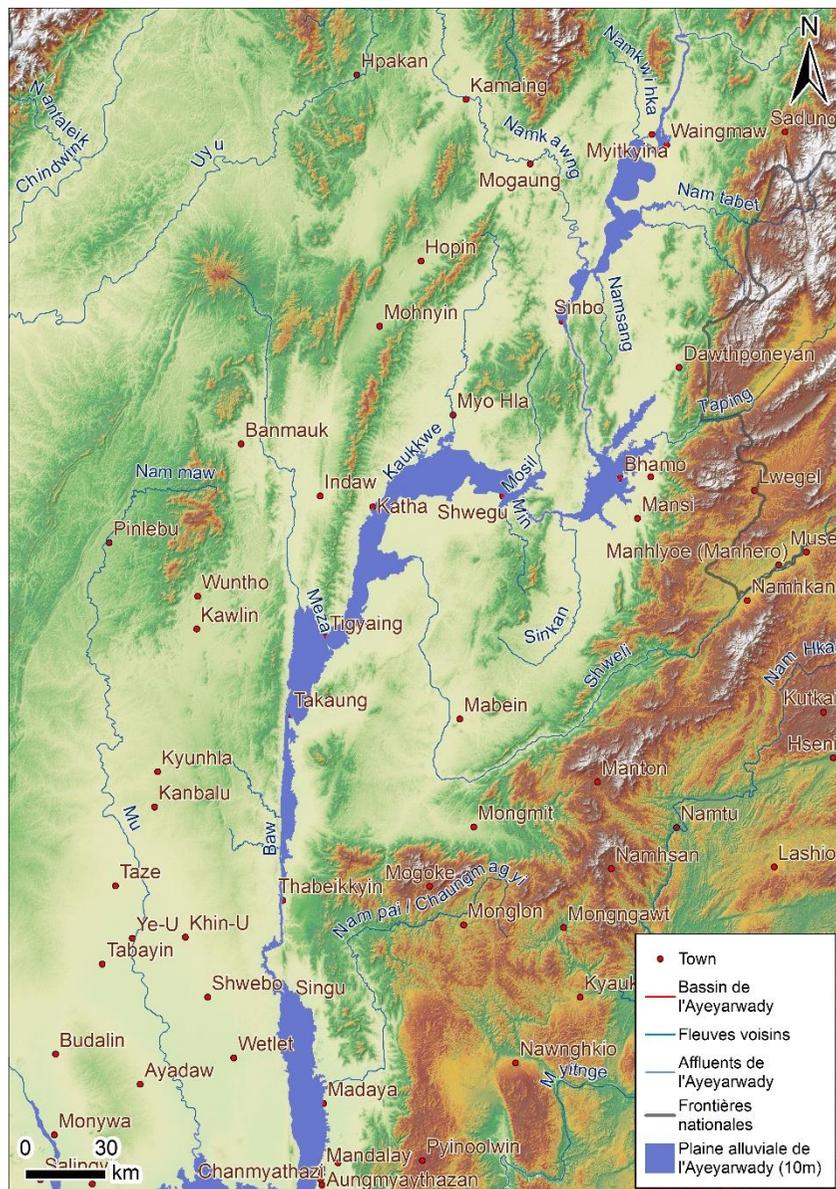


Figure 15 – Plaines alluviales de l'Ayeyarwady, délimitation des espaces situés entre 0 et 10 m au-dessus du fleuve à l'étiage. (Sources : SRTM, MIMU, Gruel et al, 2016)

## 1.7/ La pêche et la biodiversité aquatique

Le bassin de l'Ayeyarwady correspond pour partie au hotspot de biodiversité Indo-birman qui est classé parmi les cinq régions du monde où l'on retrouve le plus grand nombre d'espèces menacées (Mittermeier *et al.*, 2004 ; Critical Ecosystem, 2012). Kottelat et Whitten (1996) estiment que le bassin de l'Ayeyarwady accueille près de 200 espèces de poissons (Allen *et al.*, 2010). Les connaissances sur les espèces de poissons en Birmanie étant faibles en raison de la taille du territoire et du manque de travaux réalisés il est vraisemblable que la diversité spécifique soit en réalité sous-estimée (Ferraris and Britz, 2005 ; Yang *et al.*, 2016). Il n'y aurait pas à ce jour de véritable monographie sur les espèces présentes dans l'Ayeyarwady et son réseau hydrographique (Yang *et al.*, 2016).

Selon Abell *et al.* (2008), l'écorégion de l'Ayeyarwady abrite plus d'espèce de poisson d'eau douce endémiques (entre 119 et 195) que dans les autres écosystèmes de l'est himalayen. Le plus haut niveau d'endémisme rencontré au sein du bassin de l'Ayeyarwady serait au niveau des affluents qui drainent les massifs de l'Arakan et les montagnes Chin, la chaîne de Bago Yoma ainsi que les régions les plus au nord près des frontières chinoises. Les espèces marines seraient d'avantage connues., Parmi des espèces d'eau douce les mieux connues et les plus menacées figure le dauphin de l'Ayeyarwady (*Orcaella brevirostris*), la tortue (*Batagur trivittata*) qui avait été considérée comme disparue et redécouverte en 2002 dans la Chindwin. Le crocodile des estuaires (*Crocodylus porosus*) qui a été observé dans le delta. Et enfin le requin de l'Ayeyarwady (*Glyphis siamensis*) qui a probablement disparu.

Le dauphin de l'Ayeyarwady est classé en danger critique par l'UICN, les reliques de population estimée à 60 individus sont présentes entre Mandalay et la confluence de la Taping. Ils n'auraient jamais été observés en amont de Bhamo ou le fleuve traverse des gorges et des rapides (Smith, 2004). Les dauphins seraient présents dans les secteurs avec de larges bassins profonds, alimentés par d'importantes quantités d'eau douce, ou dans les secteurs côtiers (Smith and Jefferson 2002 ; Smith, 2004).

## 1.8/ La déforestation, l'exploitation minière et l'extraction du sable

### Les forêts et la déforestation

Le Myanmar est l'un des pays les plus boisés d'Asie du sud-est avec environ 49% de sa surface en 2005. Le pays est notamment connu pour ses réserves de teck (Bryant, 1997 ; Leimgruber *et al.*, 2005). Mais selon la United Nation's Food and Agriculture Organization (FAO, 2010), Le Myanmar aurait perdu en moyenne chaque année entre 1990 et 2010, une surface de 465 388 ha de forêt, soit 1,2% de sa couverture forestière. La perte totale de son couvert forestier sur cette période serait d'environ 20%, soit 7 446 215 ha (Woods, 2015). Un rapport alarmant prévoit une disparition d'un tiers des forêts restantes dans les 20 ans à venir si rien n'est fait pour réduire la déforestation (WWF, 2013). Selon Gupta (2005) les principales causes de cette déforestation sont l'agriculture et les cultures itinérantes réalisées sur des rotations de plus en plus courtes, dues à la pression démographique croissante. Une exploitation forestière commerciale est de plus en plus pratiquée à très grande échelle et représente un des secteurs économiques les plus importants au Myanmar (Springate-Baginski *et al.*, 2016). Des plantations de caoutchouc s'étendant sur près de 465 388 ha en pays Kachin état Shan auraient été financées par le gouvernement central.

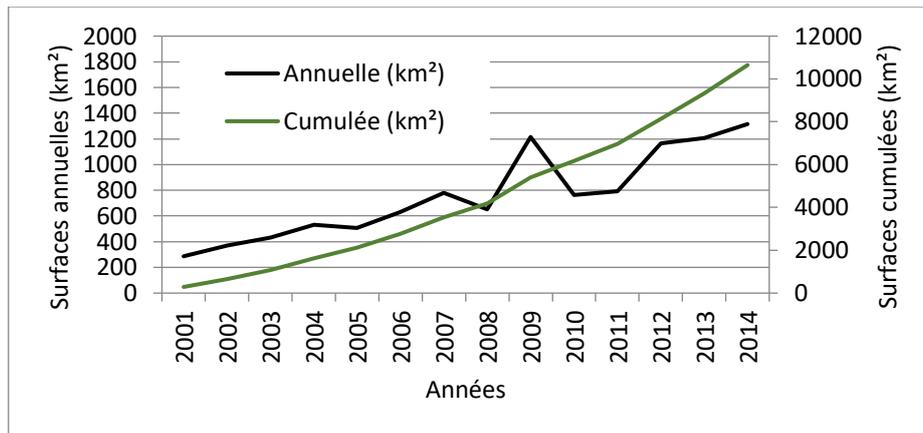


Figure 16 - Déforestation à l'échelle du bassin de l'Ayeyarwady entre 2000 et 2014 (Sources brutes : Hansen *et al*, 2013 ; Gruel, 2016)

La figure 16 présentant les surfaces déforestées chaque année entre 2000 et 2014 à l'échelle du bassin de l'Ayeyarwady montre une constante augmentation. On remarque une intensité multipliée par quatre durant cette période. Les bassins les plus touchés étant ceux de la Shweli et de la Taping.

Les ripisylves et les peuplements spontanés sont quasiment absentes du cours du fleuve et de ses îles ou l'agriculture et parfois élevage est omniprésent. On remarque également que la dynamique du fleuve est telle, que la capacité d'installation de peuplement forestier stable sur les berges sableuses et les îles est impossible. On retrouve cependant des massifs forestiers de taille importante dans les secteurs protégés du fleuve notamment dans les zones marécageuses isolées par des levées, dans les chenaux abandonnés. Ces massifs alimentés en eau par les crues et les nappes d'accompagnement sont très présents dans les sections à méandre en aval de Myitkyina, avant les gorges de Sinbo ou encore dans les backswamp situés en rive droite de la plaine de Bhamo et en rive gauche de la plaine de Shwegu (Figure 17, photo de gauche). De manière plus diffuse, on retrouve des arbres rivulaires dans les secteurs rocheux où dans les secteurs en gorges, impropres aux cultures alluviales (Figure 17, photo de droite).



Figure 17 – Boisements rivulaires, à gauche on peut voir quelques arbres au milieu du chenal avec en arrière-plan des boisements correspondant aux forêts marécageuses situées dans les backswamps en amont de Khata ; à droite, boisements rivulaires diffus montant jusqu'à environ 10 m de haut et correspondant à l'amplitude verticale du fleuve dans ce secteur confiné, en amont de Thabeikkyin (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017).

## Mines d'or et de jade

Le Myanmar est très connu pour ses ressources minérales telles que l'or, le plomb, l'argent, le zinc, l'étéint et le tungstène qui seraient exploitées dans des mines depuis le 15<sup>e</sup> siècle (Moody, 1999). En 2004, le ministère des mines aurait autorisé le permis pour 43 mines à grande échelle, 165 à petite échelle et 1320 exploitations de subsistance (Smith, 2007). L'exportation des ressources naturelles en gaz, pétrole, charbon, jade, pierre précieuse, métaux, et bois représente environ 70% des exportations nationales (Aung Lynn Oye *et al*, 2014). Mais parmi l'ensemble des ressources citées, l'or et le jade figure parmi les plus exploités et surtout les pratiques les plus destructrices en raison de l'étendue des surfaces exploitées et des rejets déversés dans les fleuves pour extraire de faibles quantités de matière. On classe généralement les exploitations minières en trois catégories : grande échelle, petite échelle et mines artisanales. Les mines à grande échelle « *Si-phwa-phyit* » sont le plus souvent financées par des sociétés étrangères et recourent à des technologies avancées en utilisant des machineries lourdes et des procédés chimiques complexes (Smith, 2007). Les mines à petite échelle « *ta-naing-ta-paing vary* » varient en taille et peuvent ou peuvent ne pas être mécanisées tandis que les exploitations artisanales sont caractérisées par des méthodes traditionnelles itinérantes telles que la batée et sont utilisées comme moyen de subsistance, complémentaire à d'autre revenu.

On classe les mines d'or en deux catégories : les mines sur terre ferme *kone-myaw* et les mines dans le lit des rivières *ye-myaw*. Parmi les méthodes d'exploitations sur terre ferme figure les exploitations souterraines réalisées par des puits et des tunnels « 4'x4' » pieds que l'on retrouve dans l'état Kachin et notamment la vallée de Hugawng. Cette technique nécessite l'utilisation du mercure mais est limitée en mécanisation. Les mines à ciel ouvert où l'on extrait l'or natif, les roches y sont concassées et lavées et les sédiments rejetés dans les rivières. Ces méthodes nécessitent l'utilisation d'une machinerie lourde et du mercure pour l'extraction. Concernant les exploitations dans le lit des rivières, dans l'état Kachin on retrouve de nombreux bateaux ou des dragues encrées le long des rives de la Chindwin, de l'Ayeyarwady ainsi que les N'mai et Mali Hka. Ces structures extraient les sédiments par succion à haute pression ou par dragage au moyen de godets avant de les filtrer et de les faire passer dans des bacs de mercure dans la plupart des cas (Osawa and Hatsukawa, 2015).





Figure 18 – Exemple d’exploitation aurifères dans le lit et les terrasses alluviales. En haut à gauche dans le lit de la N’mai hka quelques kilomètres en amont de Myitsonne et en haut à droite en bordure de l’Ayeyarwady à 25 km en amont de Singu. Les images du bas montrent des radeaux situés du côté de Myitkyina permettant l’extraction des sédiments et leur tri (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017)

La déforestation est l’impact le plus visible mais aussi le premier à être observé lors de l’établissement des exploitations minières. Les forêts sont ouvertes pour permettre l’exploitation mais aussi pour réaliser les infrastructures nécessaires à l’exploitation. Les rejets de sédiments dans les cours d’eau est un des impacts les plus notables de l’exploitation minière car il diffuse sur l’ensemble du cours d’eau aval. Selon DeLeon (2007), jusqu’aux années 1995, la plupart des mines étaient à petite échelle et consistaient en des techniques traditionnelles qui rejetées peu de dépôts dans le lit des rivières à l’exception de quelques sites en bordure de l’Ayeyarwady. L’exploitation minière dans son procédé d’extraction amène de grands changements dans la morphologie des rivières. Avec notamment le détournement de grandes quantités d’eau pour le lavage des sédiments, le dragage des sédiments du lit et les rejets qui déstabilisent et retournent le fond détruisant ainsi les habitats naturels. Mais ces rejets produisent également une importante turbidité par la mise en suspension de particules fines qui se rependent sur de très longues distances en aval avant leur dépôt. Cette activité est particulièrement néfaste dans le lit de rivière où les conditions sont initialement stables et les eaux claires, des eaux dans lesquels vivent des espèces inféodées à ces conditions à faible turbidité.

Un autre impact important mais relativement invisible est l’utilisation du mercure par les mineurs qui touche également la faune par bioaccumulation à travers l’ensemble de la chaîne alimentaire jusqu’aux prédateurs comme le dauphin de l’Ayeyarwady ou les populations riveraines elles même qui vivent du produit de la pêche. Selon Osawa et Hatsukawa (2015) les populations exploitant l’or sont vraisemblablement contaminées et ils montrent à partir de travaux réalisés en différents sites du bassin de l’Ayeyarwady et de son lit (nord de Mandalay), entre Tabaitgine et Sintku que d’importantes concentrations de mercure sont présentes dans les vases à hauteur de 10 µg/g. des échantillons prélevés par Smith *et al* (2007) sur des poissons en 2004 ont montré une pollution visible dès les affluents sources de l’Ayeyarwady (Mali hka et N’mai hka)

Aujourd’hui les régions où l’on observe les plus grandes exploitations d’or du bassin sont situées dans la région de Sagaing et de Mandalay ainsi que dans l’état Kachin. En 2015-2016 les surfaces exploitées et visibles sur les images Landsat correspondaient à 1200 km<sup>2</sup> dans le bassin de l’Ayeyarwady. Les sous-bassins les plus touchés étant la Chindwin (816 km<sup>2</sup>) et la rivière Mu (127 km<sup>2</sup>). Les bassins de Namkawng et la Meza sont également parmi les plus exploités à l’échelle de leur surfaces respectives (SOBA 3, 2017). Elles sont localisées principalement le long des cours d’eau mais on en observe sur les terrasses de l’Ayeyarwady. Cependant, leur exploitation est surtout réalisée dans le lit mineur et sur les berges durant la saison sèche. Mais c’est surtout le long de la Chindwin et de son affluent l’Uyu que l’on observe les plus grandes concentrations de mines d’or.

Les mines de jade sont beaucoup plus localisées mais s'étendent sur une grande surface avec notamment la mine de Hpakant qui s'étalait sur près de 75 km<sup>2</sup> en 2016.

Ces dernières années les surfaces d'exploitation ont augmentées de manière exponentielle ainsi que le montre le graphique ci-dessous avec une multiplication par 6 des surfaces exploitées entre 2005 et 2016, la Chindwin représentant plus des deux tiers des surfaces exploitées sur le bassin de l'Ayeyarwady en 2016.

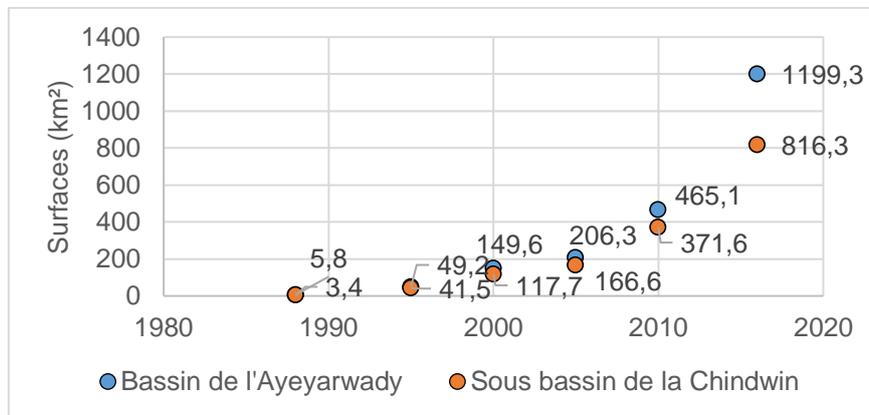


Figure 19 - Surfaces exploitées pour les mines sur le bassin de l'Ayeyarwady et le sous bassin de la Chindwin (Sources : SOBA 3, 2017)

### Extraction du sable dans le lit mineur

L'exploitation du sable est très présente sur le chenal principal de l'Ayeyarwady et particulièrement entre Mandalay et Nyaungdone. Cette extraction des granulats présents dans le lit mineur tend à augmenter les phénomènes d'érosion des berges par soutirage des matériaux du fond et des berges situés en amont et une érosion en aval par une augmentation de la puissance du fleuve délesté d'une partie de sa charge dû au piégeage des sédiments dans les fosses d'extraction. Le fleuve réajuste alors progressivement son lit dont le niveau a été imposé. Ces matériaux venant rehausser le fond sont arrachés aux berges, accentuant ainsi les phénomènes d'érosion et de déstabilisation des aménagements dans certains secteurs. L'extraction des volumes peut également engendrer une baisse du niveau moyen de l'eau et donc impacter les niveaux piézométriques, ce qui peut être néfaste à certaines cultures ou végétation dont le système racinaire se retrouve perché au-dessus de l'eau. On observe de nombreux regroupements de dragues et barges de stockage entre Mandalay et Nyaungdone. Ces navires sont observés en grande concentration entre Pyay et Hinthada. Une extraction artisanale serait également entreprise par les riverains durant les basses eaux.



Figure 20 – On observe de nombreuses dragues (en haut à gauche) en général regroupées avec des barges à proximité pour le stockage des sédiments (en haut à droite), sur certaines berges on retrouve des monticules de gravier extraits de manière artisanale (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017).

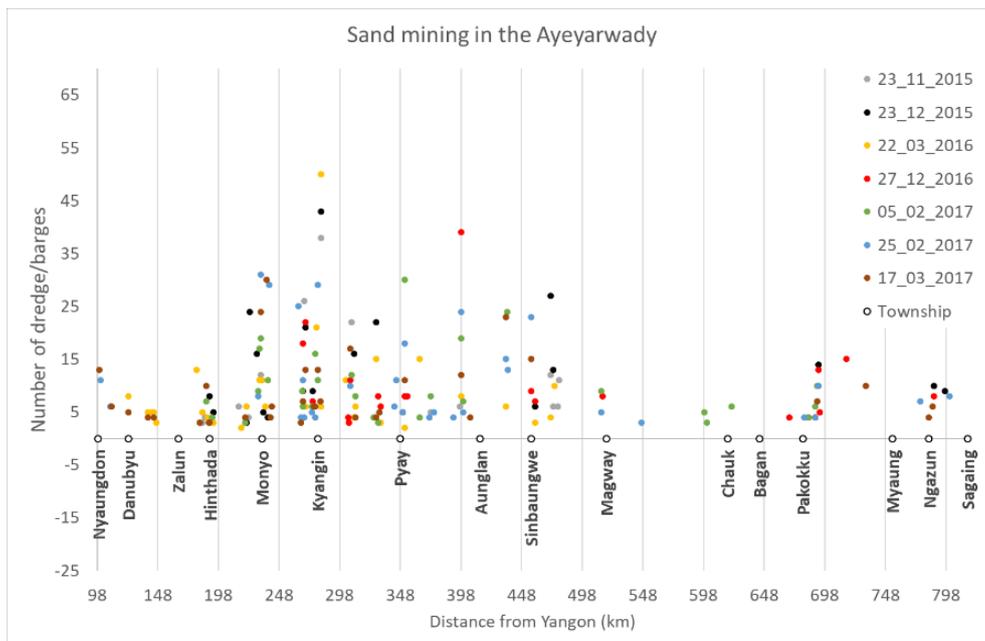


Figure 21 – Localisation et comptage des bateau à différentes dates par image satellite (Sentinel 2) des zones d'extraction du sable/gravier dans le lit mineur, entre 2015 et 2017 (Sources : SOBA 3, 2017)

## 2/ Le delta

### 2.1/ Caractéristiques

**Un jeu de cartes détaillées du delta et de la branche principale est présent en annexe 1.3 et 1.4.**

Le delta est situé entre les chaînes Arakanaises à l'ouest et le massif de Pegu Yoma à l'est. Le territoire intérieur délimité par les diffluences de Bassein et Myitmaka représente une superficie de plus de 26 000 km<sup>2</sup> correspondant à 6% du bassin versant. L'ensemble de la plaine alluviale du delta correspondant au delta ainsi qu'aux marais externes situés de part et d'autre des diffluences depuis Myanaung fait une surface de 35 800 km<sup>2</sup>. Ce delta forme un continuum deltaïque avec le Sittang à l'est de la Yangon river et partage des espaces en commun avec un interfluve difficile à délimiter.

Il résulte d'un apport rapide et conséquent de sédiments durant l'holocène aux environs de 7000-8000 BP qui aurait permis sa progression et son maintien jusqu'à aujourd'hui (Hedley *et al*, 2010). L'influence des marées très marquées associée à des apports sédimentaires importants positionnent le delta de l'Ayeyarwady au 10<sup>e</sup> rang des deltas les plus vastes au monde (Anthony *al*, 2017). Pour Volker (1964) le delta débute à Myanaung, qui se situe à la sortie des gorges, au niveau des derniers reliefs avant la plaine. Un chenal « principal » traverse le delta jusqu'à son centre avant de se subdiviser en de multiples diffluences. Le delta est délimité sur ses marges est et ouest par deux branches assez étroites. La diffluence est de Myitmaka est très étroite et se sépare du chenal principal environ 5 km en aval de Monyo pour rejoindre Htantabin. La diffluence ouest de Bassein rejoint directement l'océan en se séparant du chenal principal environ 20 km en aval de Monyo. La paléo-branche méandriforme de Daga est visible dans la partie centrale du delta, elle débute à 13 km au nord-ouest de Hinthada et poursuit en direction du sud jusqu'à Kyaunggon avant de se séparer en trois branches. On observe douze principales embouchures majoritairement localisées sur la partie ouest. Quelques reliefs rocheux « insulaires » subsistent dans l'ouest et le sud-ouest de la plaine. Avec notamment les massifs Miocène-Pliocène s'élevant à 15 m et situé au nord de Pathein. On retrouve plus en aval un autre massif, au sud de Myaungmya qui s'élève à environ 50 m d'altitude avec sa réserve forestière de Kyaukkon. Plus au sud se situe le massif Miocène du Byangyi taung à 43 m avec sa réserve forestière de Lebyauk. Dans le sud-est, non loin de Yangon vers Twantay on retrouve un massif Miocène-Pliocène s'élevant à 33 mètres et les réserves forestières de Thamo et de Wamyetsangyi.

D'après Anthony *et al* (2017) en se basant sur la classification de Galloway (1975) le delta est un exemple typique de système à dominante tidale formant de multiples estuaires. Ce système est caractérisé par de puissantes marées associées à un grand nombre de larges d'exutoires permettant la pénétration de la mer à marée haute. L'influence de la marée s'étendrait jusqu'à 300 km à l'intérieur des terres, au niveau de Hinthada, et une pénétration saline jusqu'à 100 km à l'intérieur des terres (Aung, 2003 ; Hedley *et al*, 2010) (figures 23). L'un des facteurs déterminant de la morphologie du delta serait également la faible profondeur de la mer d'Andaman (en moyenne 50 m) liée aux apports conséquents de l'Ayeyarwady mais aussi de ses voisins, le Sittang et la Salween. Toujours selon Anthony *et al* (2017), on observe grâce à la morphologie côtière mais aussi au travers de la granulométrie un gradient morpho-sédimentaire avec une influence des vagues plus marquée à l'ouest qu'à l'est ou il y aurait une dérive littorale induite par les apports sédimentaires du fleuve.

D'après le rapport SOBA (2017) relatif à l'étude hydraulique des eaux de surface du bassin de l'Ayeyarwady, la branche de Pathein recevrait environ 11,9 % des eaux du fleuve, la branche de Myitmaka environ 23,7 % et la branche principale 64,4%. Plus en aval dans la branche principale, la branche de Panheaing située au niveau du township de Nyaungdone recevrait environ 6,4%. Par la suite sur les 58% restant du chenal principal de l'Ayeyarwady, 34,1 % iraient vers la branche de Shwelaung tandis que 23,9 iraient vers la branche de China bakir.

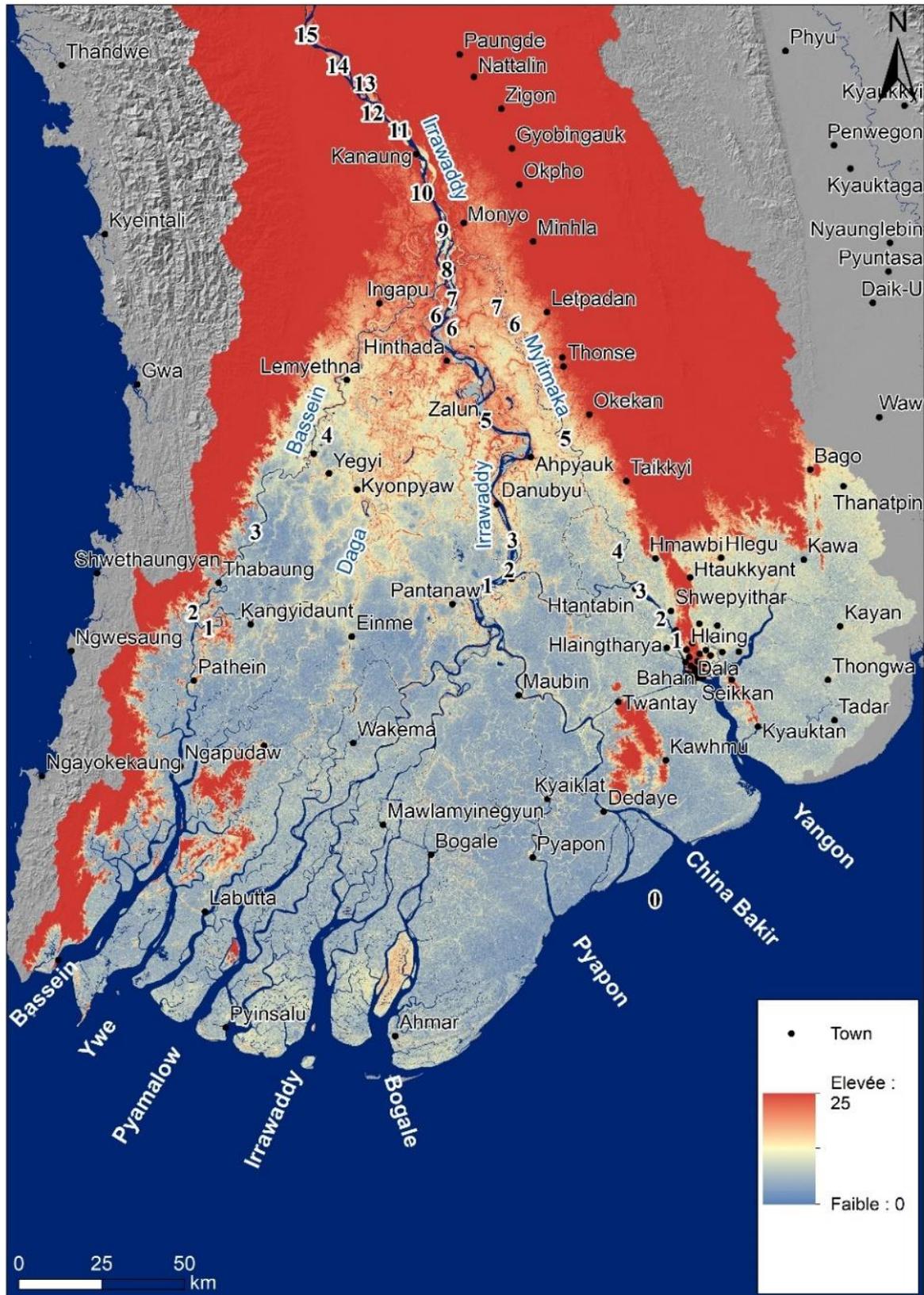


Figure 22 - Elévation des terres du bassin de l'Ayeyarwady entre 0 et 25 m au niveau du delta, d'après l'imagerie SRTM, les chiffres correspondent à l'élévation du fleuve sur les branches de Myitmaka, Bassein et Irrawaddy. A noter que certains secteurs comme l'île de Meinmahla Kyun (nord de Ahmar) sont anormalement plus élevés en raison probablement de la végétation de mangrove qui biaise les résultats (Sources : SRTM, MIMU).

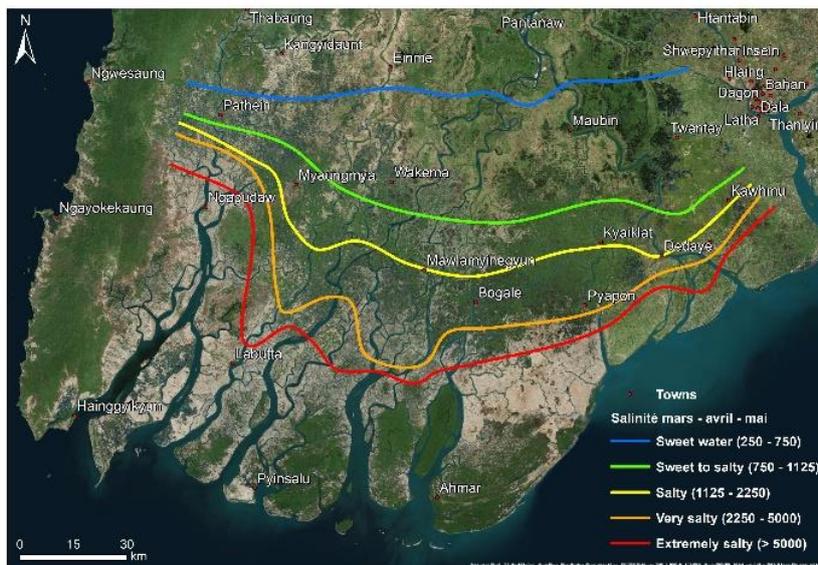
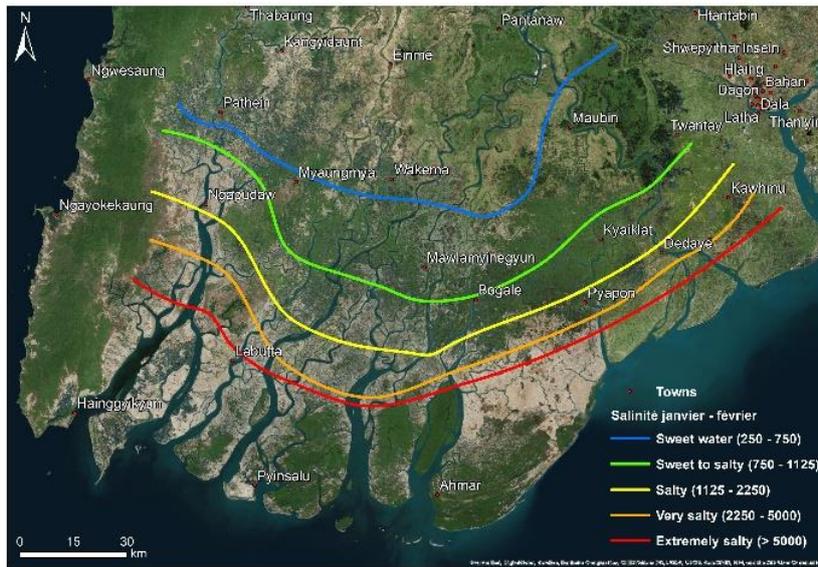


Figure 23 - Entrées salines en fonction des saisons, hors saison des pluies durant laquelle le fleuve les repousse au large (Sources : Google earth, MIMU, DoA & MoALI, 2015)

## 2.2/ Occupation du territoire et évolution

Selon Rodolfo (1969), le delta aurait progradé à une vitesse de 2,5 km sur 100 ans jusqu'au début du 20<sup>e</sup> siècle. Et il y aurait eu une progradation générale de 7,8 mètres par an entre 1974 et 2015. A l'échelle de l'ensemble du littoral, le delta aurait subi une érosion sur plus de la moitié de sa longueur, principalement sur ses marges ouest pour environ 240 km de littoral sur un total de 450 km (Anthony *et al*, 2017). Les secteurs qui connaissent les plus importantes avancées se situent vers l'embouchure proche de Yangon (Anthony *et al*, 2017). Cependant, il semblerait que le delta ait été tour à tour en régression et en progression sur certains secteurs. Le delta de l'Ayeyarwady est classé « en péril » par Syvitski *et al* (2009) en raison de la réduction de son aggradation associée à sa compaction face à une montée du niveau marin. A cela s'ajoute la multiplication depuis le début des années 2000 des barrages sur ses affluents (Mu, Shweli, Myitnge) qui participe à la rétention des sédiments. Il y aurait environ 200 grands barrages en Birmanie (SOBA 3, 2017), dont 113 ayant un bassin d'une surface de plus de 1 km<sup>2</sup>, sont sur le bassin de l'Ayeyarwady en 2018. Parmi les grands projets figure le barrage de Myitsone en amont de Myitkyina et sur ses deux sources (N'mai hka et Mali hka).

### La mise en valeur du delta

Selon Siok Hwa (1965), avant les britanniques, les terres étaient divisées en deux catégories, les terres de la couronne et les terres privées, les îles et les formations alluviales, sujettes à des changements réguliers étaient des terres royales, ces terres étaient administrées par des clients temporaires et permanents du roi en échange de certain droits et privilèges (Boutry *et al*, 2017).

Lors de l'annexion de la Birmanie par les britanniques, ces derniers transformèrent le delta en grenier à riz de l'empire britannique. Les bas fond du delta, les secteurs inondés durant la période des moussons étaient impropres à la colonisation avant la mise en place d'endiguements (South, 2003, Boutry *et al*, 2017) figure 25. Les cultures de paddy auraient été concentrées autour de villes telles que Bassein, Myaungmya, Ngathaingyaung, Hinthada, Danubyu (Adas, 1972 ; Boutry *et al*, 2017), mais n'auraient pas été intensives jusqu'à la fin du 18<sup>e</sup> siècle après la conquête de la basse Birmanie par Ava. Ce n'est qu'une fois que les britanniques ont annexé la basse Birmanie que la frontière du riz a progressé vers les parties les plus basses du delta. Trois époques caractériseraient cette colonisation, un développement agricole spectaculaire de 1852 à 1901 puis une fermeture progressive des limites agricoles à partir de 1901 jusqu'à 1929 menant à une période de crise agricole après la grande dépression (Boutry *et al*, 2017). Les superficies de paddy seraient passées de 600 000 acres en 1852-1853 à 6,7 million d'acres en 1902-1903 et 8,9 millions d'acres en 1922-1923 (Mya Than, 2001, Boutry *et al*, 2017).

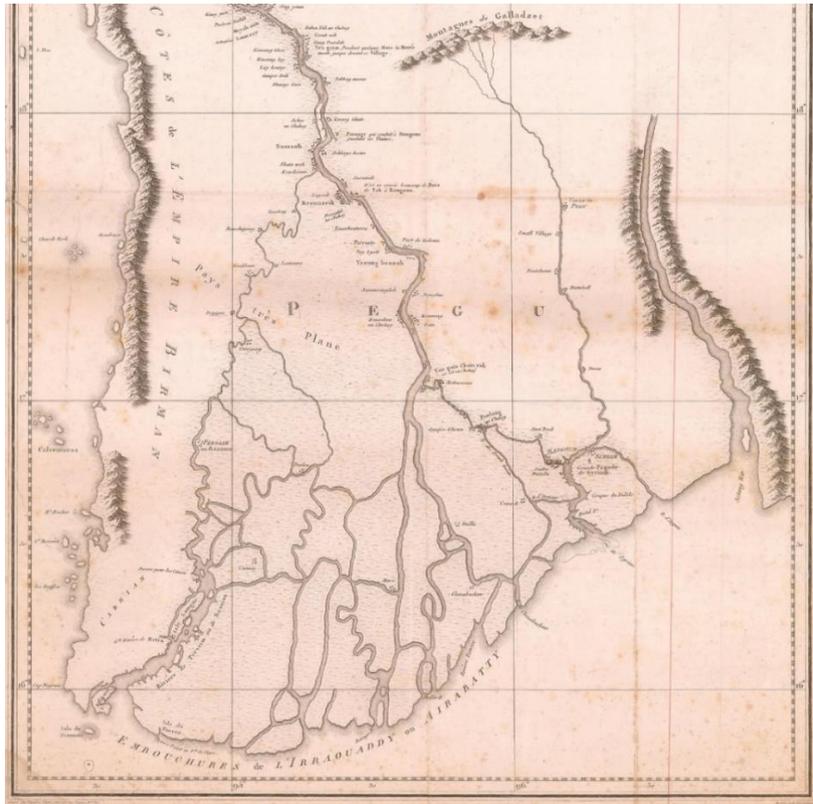


Figure 24 – Carte du delta de 1795, réalisée par Thomas Wood

## Les espaces naturels

Parmi les 15 écorégions occupant le bassin de l'Ayeyarwady et identifiées par Olson *et al* (2001). Deux d'entre elles sont présentes sur la partie deltaïque, à savoir les forêts marécageuses d'eau douce, qui occupent la partie continentale du delta, ainsi que les mangroves côtières que l'on retrouve dans les régions proches du littoral qui sont d'avantage soumises aux marées. Ces deux écorégions sont considérées comme étant en danger critique par le WWF.

Les forêts marécageuses d'eau douce sont connues sous le nom de *myaing* dans la partie amont du delta de l'Ayeyarwady. Ce sont des forêts clairsemées qui poussent dans les secteurs inondés durant 3 à 4 mois par an sous 2 à 3 mètres d'eau. On retrouve de telles forêts entre Yangon et Pyay. Les principales espèces que l'on observe sont *Albizia procera*, *Anogeissus sp.*, *Barringtonia acutangula*, *Butea frondosa*, on trouve également plusieurs espèces de *Lagerstroemia*, *Schleichera trijuga*, *Stephegyne parviflora*, ainsi que des bambous *Bambusa arundinaceae*. Dans les secteurs les plus inondés qui ne sont à sec que quelques semaines par an sont présentes des formations arborées relativement homogènes de *Xanthophyllum glaucum* et *Dalbergia reniformis* et des formations buissonnantes de *Combretum* et *Glochidion* (Yamada, 1997).

Les mangroves sont des forêts de structure assez simple et de diversité floristique assez faible par rapport aux autres types de forêt. *Sonneratia alba*, *S. caseolaris* et *Heritiera fomes* sont les principales espèces que l'on peut retrouver (Oo, 2002). Une zonation peut être observée en fonction de la fréquence d'inondation, les apports d'eau douce et le type de sol. Les Mangroves ont une grande importance dans l'évolution des deltas en ayant une action de piégeage des sédiments, favorisant l'aggradation des surfaces terrestres (Osti *et al*, 2010).

Le bas delta était en grande partie recouvert de Mangrove, mais les activités humaines qui se sont développées particulièrement après l'arrivée des britanniques dans la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle, notamment pour l'agriculture et l'aquaculture ont fait diminuer cette surface de 20345 km<sup>2</sup> à 1786 km<sup>2</sup> entre 1924 et 1995 (Hedley *et al*, 2010). L'exploitation de la mangrove s'est intensifiée ces dernières années à proximité de Yangon et les villes proches pour l'utilisation du bois de chauffe, le charbon pour la cuisson, avec une perte de plus de 20% de la Mangrove entre 1995 et 2005 (Leimgruber *et al*, 2005). Aujourd'hui seul le sanctuaire de Meinmahlakyun permet la conservation d'un massif forestier non fragmenté.

### 2.3/ Les endiguements et corrections du chenal

Les endiguements présents sur le delta visant à concentrer les eaux durant la saison des pluies afin de limiter l'érosion du delta et son inondation ont été initiés par les britanniques à partir de 1861 (Gordon, 1885) en commençant par la rive ouest de l'Ayeyarwady. Car selon Volker (1966), jusqu'aux années 1850 une grande partie du delta n'était pas cultivée en dehors des secteurs les plus élevés. Ces digues forment des fers à cheval entre les diffluents en protégeant les îles et en faisant face au chenal de sorte que les extrémités aval des digues restent ouvertes aux inondations. Ces aménagements visant avant tout à limiter les inondations, participent à la diminution de la sédimentation ce qui atténue l'aggradation du delta en raison de la concentration des flux sédimentaires qui sont directement transféré vers l'océan. 1300 km de digues auraient été érigées entre 1880 et 1920 et une partie d'entre elles n'auraient pas été maintenue après la crue de 1939 (Brakenridge *et al*, 2017). Des propositions auraient été faites pour équiper les digues d'écluses visant à réguler l'eau et les sédiments pénétrant dans le delta. De telles constructions auraient été réalisées sur la partie ouest de Nyangdone en bordure de la branche de l'Ayeyarwady mais l'expérience aurait échoué en raison d'un volume de sédiment trop important venant obstruer les exutoires (Volker, 1966). Plus récemment, des digues littorales et de petit polder auraient été construites sur le front marin pour réguler les entrées salines durant les marées (Kravtsova *et al*, 2008).

Les digues, en plus de guider les chenaux actuels, ont également eu pour effet de rompre les continuités de certaines branches aujourd'hui abandonnées. On remarque sur les images satellites l'existence d'une branche méandriforme majeure que l'on pourrait nommer Daga, (c'est ainsi qu'elle est nommée en aval de Kyonpyaw), dont le chenal était d'une largeur intermédiaire (environ 350 à 400 mètres de large) entre le chenal de l'Irrawaddy (au niveau de Danubiu) et celui de Bassein. Ce chenal se détachait du chenal principal, de l'Ayeyarwady à l'ouest de Hinthada et allant jusqu'à Kyaunggon avant de se subdiviser en trois nouvelles branches. Ces dernières sont aujourd'hui inactives, seul un chenal étroit ressemblant d'avantage à un canal, semble subsister au niveau de Kyonpyaw et en aval. Il est possible que la rupture de cette continuité résulte des aménagements britanniques et qu'elle a eu un impact sur les apports sédimentaires au niveau des exutoires situés entre Ywe et Bogale et donc sur l'évolution du front littoral de cette partie du delta. Cette branche était interconnectée en divers point avec les autres branches du delta, notamment avec la branche de Shwelaung à l'est et Bassein à l'ouest. Cependant la carte de 1795 (figure 24) ne fait pas mention de cette branche, peut-être était-elle réactivée occasionnellement ou déjà déconnectée du chenal principal lors de la mise en place des aménagements. D'autres indices tels que les digues réalisées dans la partie centrale du delta, au nord de Wakema suggèrent des aménagements réalisés en aval avant une obstruction totale en amont. On remarque la présence de dédoublements de digues en amont de Daga perpendiculaire au fleuve, à l'endroit de sa connexion avec le chenal principal.

Les endiguements réalisés sur les fleuves sont des structures dont l'altitude est supérieure à celle des terrains naturels, ces structures linéaires peuvent provoquer de nombreux changements et impacts sur le chenal et l'ensemble de la plaine alluviale (Malavoi et Bravard, 2010) avec notamment :

- Une déconnexion hydraulique et sédimentaire entre le lit mineur et le lit majeur ainsi que les annexes hydrauliques,
- Une incision du lit mineur, résultant de l'augmentation des débits dans les espaces intra-digues, surtout dans les sections les plus étroites,
- Une accentuation des inondations en aval.

Les endiguements sur le delta de l'Ayeyarwady peuvent avoir une importance variable en fonction de leur proximité d'une rive à l'autre ainsi qu'en fonction de leur hauteur. Ces aménagements surélèvent artificiellement le niveau de la plaine et ce recalibrage latéral et vertical de l'espace de mobilité modifie localement la capacité de mise en mouvement des sédiments grossiers par le fleuve.

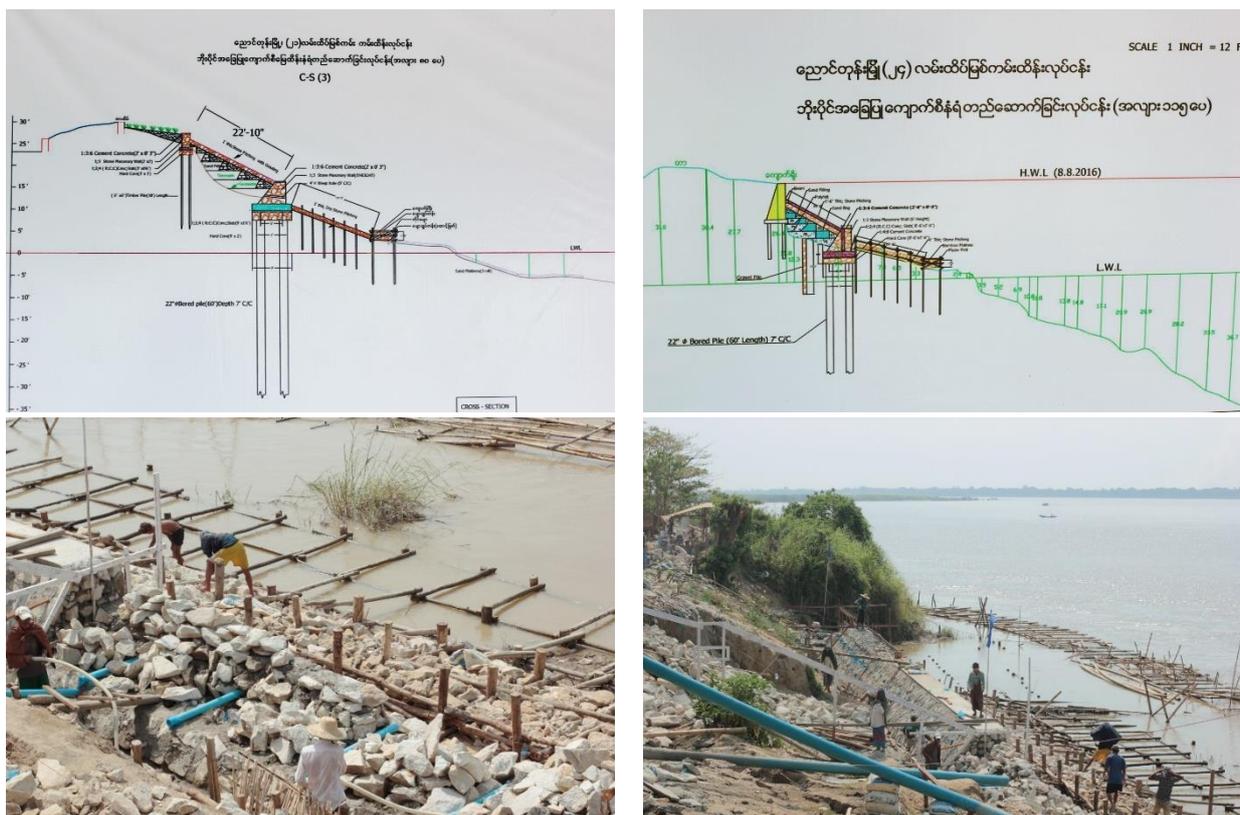


Figure 25 - Renforcement des contreforts des endiguements de l'agglomération de Nyaungdone sur la branche de Panheang (2017). Ces structures ont été réalisées sur des secteurs où les berges se sont effondrées par affouillement. Ici le niveau de référence « maximal » HWL correspondant au 8 août 2016 aurait atteint environ 8 m par rapport au niveau à l'étiage LWL. Sur ce point la digue ferait environ 9,5 m de haut (image en haut à droite). Ces structures sont constituées d'enrochements cimentés reposant sur un lit de sable. Des pieux de bois de longueur différentes (entre 3 et 5 m) selon l'emplacement servent de fondation. Les renforts trapézoïdaux, structurés par des roches maçonnées sont renforcés par une couche de béton sur leurs parties supérieures (Photos : Gruel, 2017).

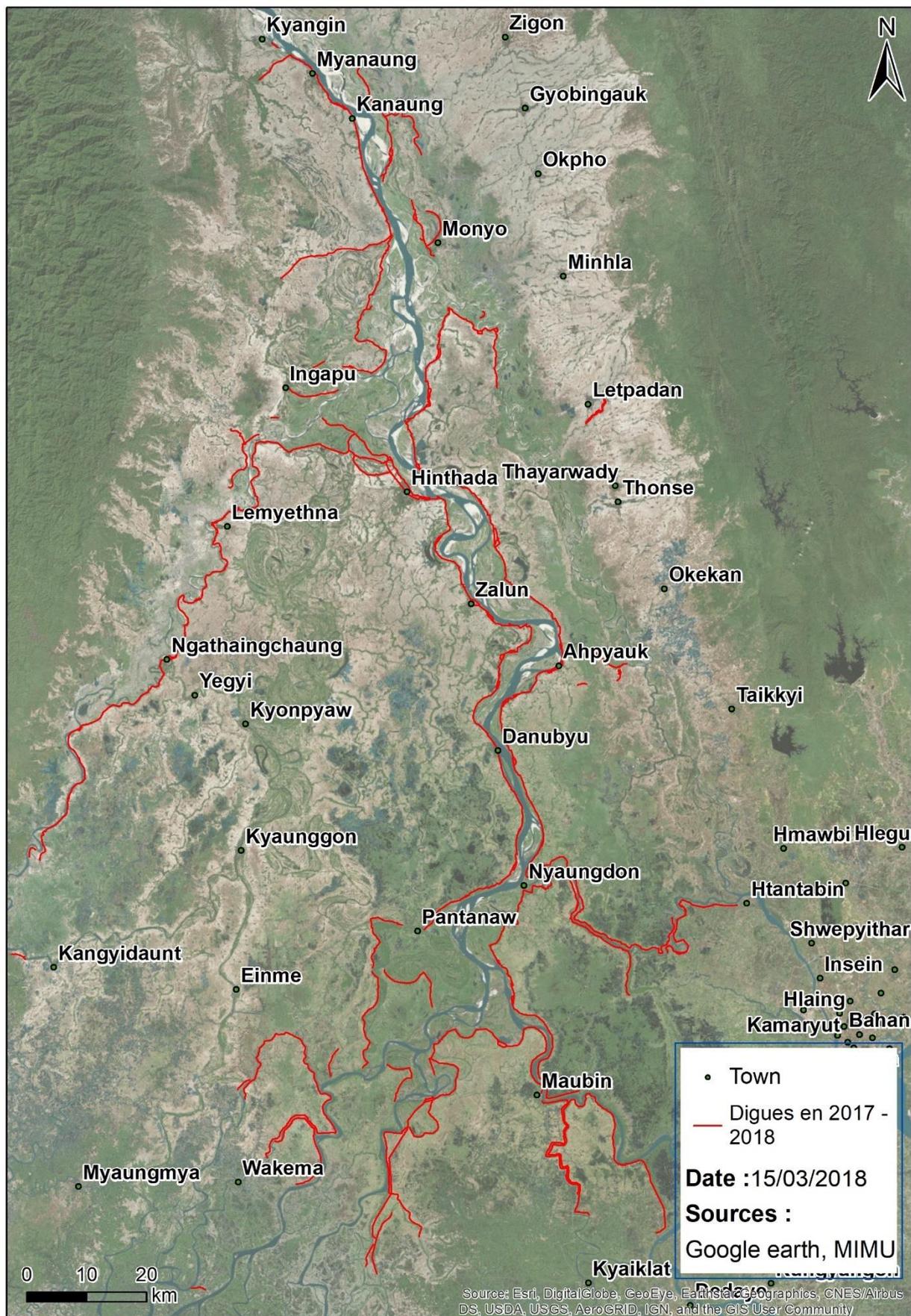


Figure 26 - Endiguements fluviaux sur le haut delta (Sources : Google earth, MIMU)

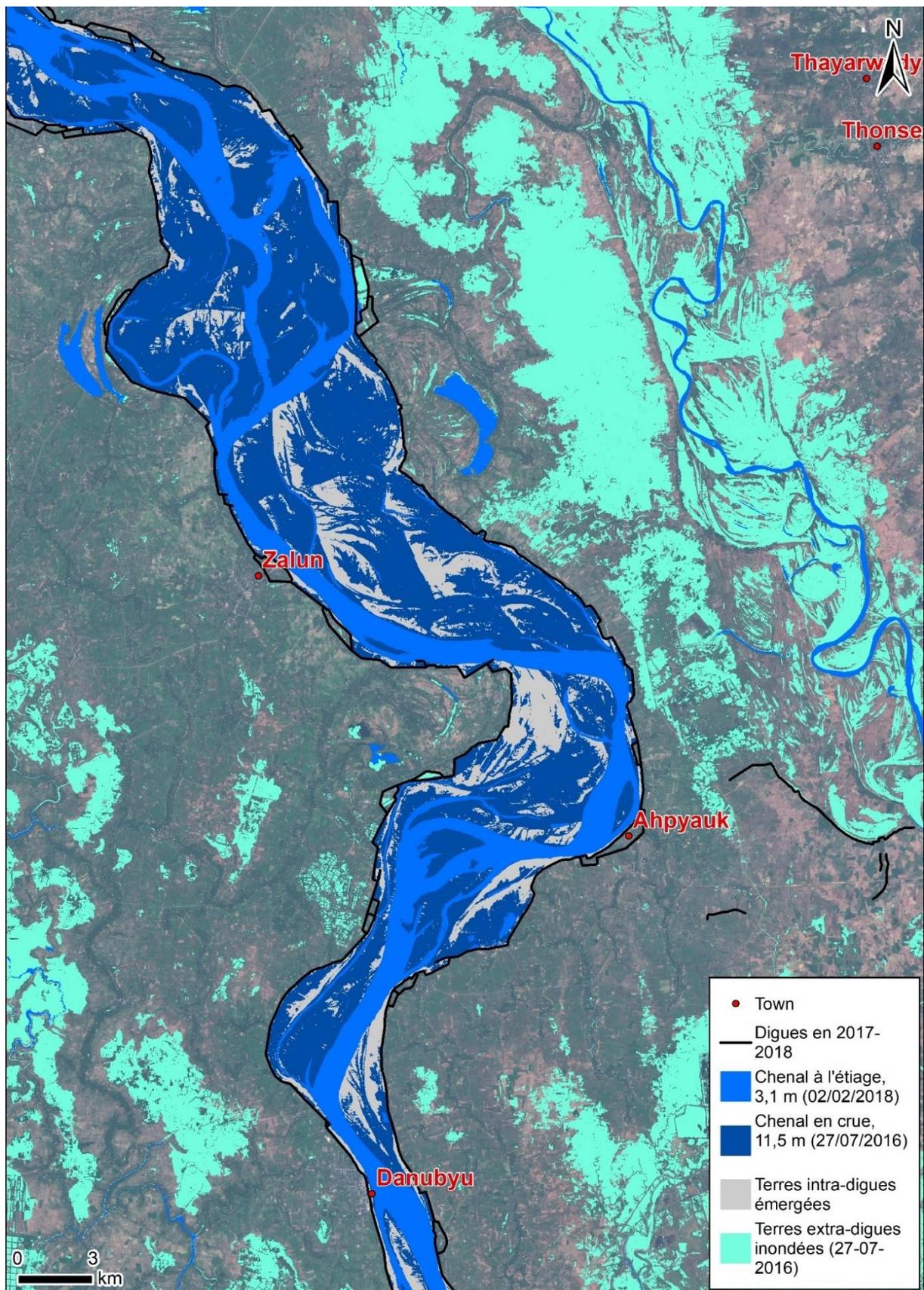


Figure 27 – Extension des eaux du chenal principal entre les digues et sur la plaine alluviale à l'étiage et en période de crue, le niveau d'eau correspond à la mesure de Zalun, secteur amont. Notons que la cartographie n'a pu être réalisée plus en amont en raison de l'absence d'images en période de crue. (Sources : Sentinel 2, MIMU)

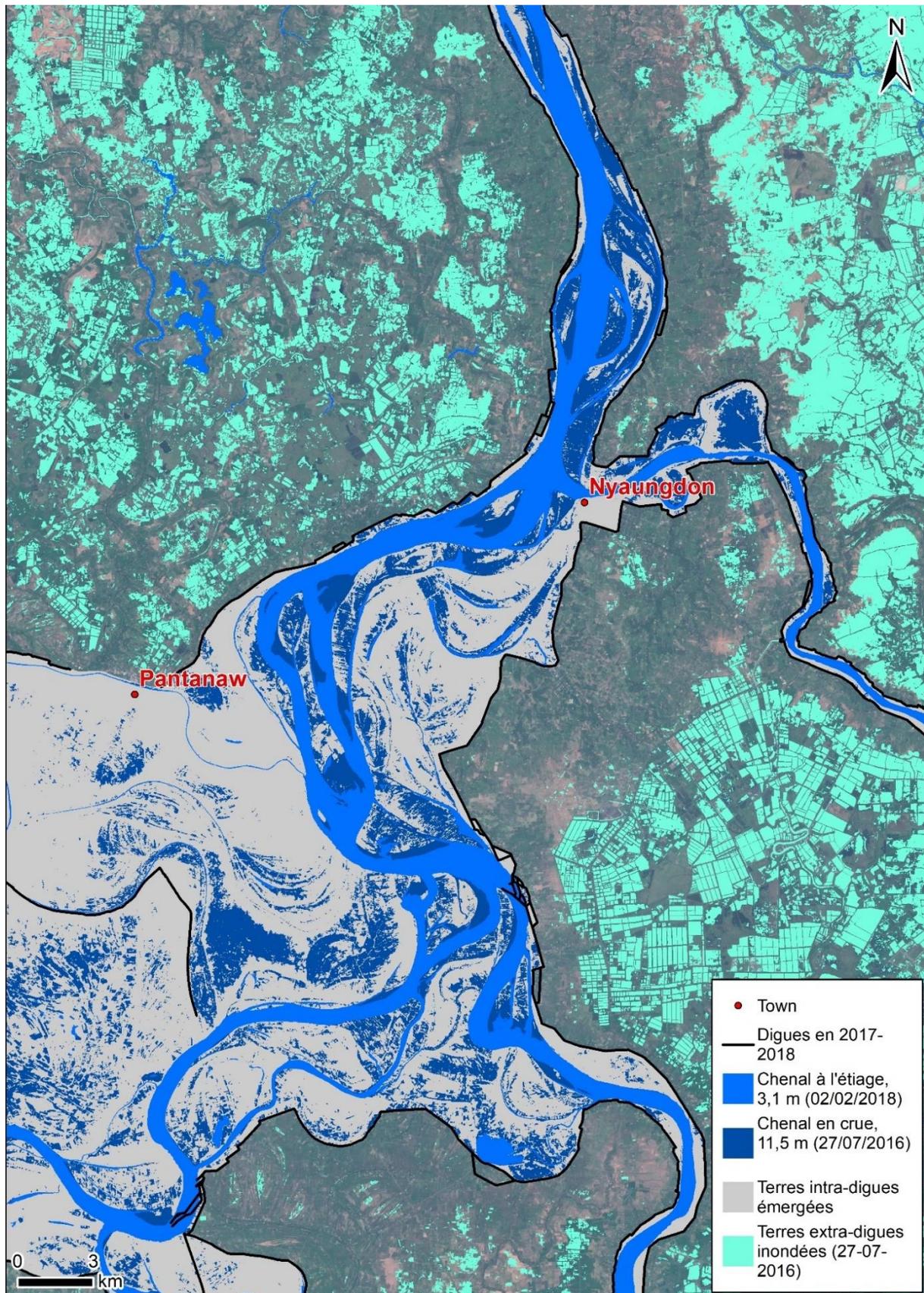


Figure 28 - Extension des eaux du chenal principal entre les digues et sur la plaine alluviale à l'étiage et en période de crue, le niveau d'eau correspond à la mesure de Zalun, secteur aval. (Sources : Sentinel 2, MIMU)

22 mars 2016



27 décembre 2016



Figure 29 – Réalisation de corrections temporaires par le creusement d'un canal entre Hinthada et Zalun visant à guider le chenal et lui donner un axe rectiligne. On remarque que le fleuve à effectivement emprunté le chenal dès la première année (2016) et a entamé une évolution déjà active avec une large bande active. On peut observer sur les images de février 2018 la branche ouest du fleuve est en cour d'abandon tandis que la nouvelle branche centrale tend à s'élargir et la branche est reste stable. Cependant la branche ouest risque de rester longtemps en eau étant donné qu'elle n'a pas été atterrie par des processus de sédimentation (Sources : Sentinel 2).

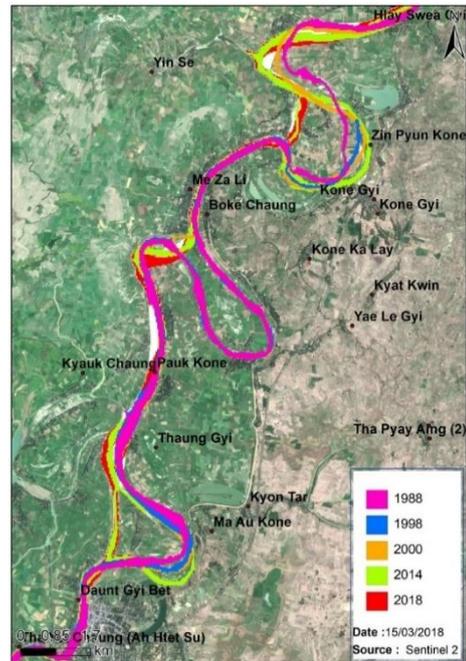


Figure 30 – Des recoupements de méandre visant probablement à réduire les distances de parcours en bateau ont été réalisés à différentes époques. Sur ces images, chaque couleur représente le chenal à différentes époques à gauche sur le chenal de Panheaing, sur ce site le chenal qui présentait une large courbure a été recoupé artificiellement vers 2000, aujourd'hui l'ancien méandre est un bras mort (oxbow lake). A droite sur la diffluence de Bassin on observe sur le méandre central à très large courbure, recoupé artificiellement vers 2000 peu de temps après la réalisation de ces chenaux artificiels, ces berges ont de nouveau été activées par le fleuve en amont et en aval et mènent vers une évolution lente vers un nouveau méandre (2014 et 2018) afin de restaurer une pente d'équilibre (Sources : Sentinel 2, MIMU).

## II/ Méthodes d'analyses

### 1/ Analyse spatiale

Les analyses SIG et de télédétection ont représentées une part majeure de ces travaux, elles étaient nécessaires à la préparation du terrain afin de posséder un maximum d'informations pour appréhender le mieux possible les observations in-situ. Ces analyses ont été réalisées en utilisant à la fois le logiciel Qgis, libre de droits et le logiciel Arcgis® avec lequel ont été réalisées les cartes présentes dans ce document. Dans le cadre des travaux d'analyses diachroniques nous avons principalement utilisé des images satellites, d'accès libre sur le site de l'USGS.

#### 1.1/ Imagerie utilisée et données géographiques

##### Landsat

L'imagerie Landsat a été utilisée pour l'étude de l'évolution des îles et du chenal sur une longue durée. Cette imagerie Landsat 5, 7 et 8 d'une résolution de 30 mètres nous a permis d'extraire les contours du fleuve et des terres de manière homogène sur 30 ans, depuis 1988 jusqu'à 2018. Mais des images antérieures Landsat 1-5 MSS d'une résolution de 60 m et disponibles entre 1973 et 1976 nous ont permis de repousser les limites sur 45 ans avec un manque de données entre 1977 et 1987. Afin de réaliser des analyses quantitatives comparables, nous avons utilisé les images entre 1988 et 2018 tandis que les images antérieures ont servi pour les observations qualitatives.

De manière à pouvoir comparer les années entre elles tout en limitant le biais lié au débit du fleuve, nous avons choisi d'utiliser les images durant la saison sèche aux mois de février et mars lorsque le fleuve est à son plus bas niveau, les dates sélectionnées pour cette étude sont en annexe 2. Ce choix a également été guidé par la disponibilité des images en cette saison, car c'est aussi durant cette saison que l'atmosphère est la plus claire et le moins recouverte par les nuages. L'imagerie Landsat est disponible selon une grille régulière et sur un pas de temps de 16 jours. Les canaux disponibles sur les images Landsat varient en disponibilité et en résolution selon les générations de satellites. Cependant, dans le cadre de cette étude nous nous sommes limités à l'utilisation des canaux vert et proche infrarouge pour la détection des surfaces en eau en utilisant l'indice NDWI (Normalized Difference Water Index) et le canal rouge pour la détection des bancs de sables. Seul deux années, 2012 et 2013, sont absentes de ces analyses en raison de la mauvaise qualité des images brutes délivrées par Landsat 7 SLC-on qui présente des défauts.

##### Sentinel 2

Cette imagerie ci a été utilisée pour l'analyse à court terme des îles à l'échelle annuelle. Elle a une résolution de 10 mètres pour les principaux canaux et n'est disponible sur le secteur que depuis le 23 novembre 2015, ce qui ne permet pas d'avoir un grand recul mais présente l'avantage d'avoir une vision beaucoup plus fine du delta et des îles que l'imagerie Landsat. La résolution de Landsat était suffisante à l'échelle du delta mais restait trop grossière à l'échelle des îles que nous avons étudiée, elle ne permettait pas d'observer les changements qui surviennent sur un pas intra-annuel ou d'observer l'évolution du parcellaire. De plus, l'évolution des îles se faisant sur des échelles très courtes, il aurait été difficile de connaître l'occupation des terres sur plusieurs années antérieures tant ces îles ont été transformées depuis. L'imagerie Sentinel est disponible sur un pas de temps beaucoup plus fréquent de 5 jours et parfois 2 jours étant donné que les secteurs que nous avons identifiés sont à la marge de deux axes de passage du satellite avec un recouvrement des images entre elles. L'imagerie Sentinel 2 offrait un large éventail de canaux utilisables à des résolutions

différentes, mais dans le cadre de ces travaux nous nous sommes limités aux canaux verts et proche infrarouge pour la détection des surfaces en eau en utilisant l'indice NDWI (Normalized Difference Water Index), les canaux rouge et infrarouge pour l'analyse du couvert végétal à partir de l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et enfin le canal rouge pour la détection des bancs de sables.

### Carte topographique

Les cartes topographiques disponibles sur le delta se limitent aux cartes topographiques 1 : 250 000<sup>e</sup> établies en 1955 par l'U.S. Army Map Service et en 1967 par l'U.S. National Imagery and Mapping Agency. Ces deux cartes bien que séparées par 12 ans (pour leur date d'édition) présentent de nombreux points semblables, les éléments toponymiques changent peu voire pas du tout. En ce qui concerne les délimitations du fleuve lui-même, certains secteurs sont bien renseignés et présentent des différences d'une carte à l'autre tandis que des secteurs ne présentent aucun changement sur cette période pourtant longue à l'échelle de l'évolution du fleuve. Ces cartes furent principalement utilisées pour la cartographie des digues ou pour identifier la localisation des villages entre 1955 et 1967, servant à la description qualitative.

### Myanmar Information Management Unit (MIMU)

Les données toponymiques géolocalisées correspondant à l'emplacement et à la nomination des villages, town et de leurs délimitations sont issues de Myanmar Information Management Unit (MIMU). Ces informations ont été utilisées dans le cadre de ce travail comme grille fixe permettant de se repérer dans l'espace mouvant des îles. Cependant la pertinence de ces délimitations dans l'espace fluvial de la bande active, la zone intra endiguements, est aujourd'hui en grande partie obsolète en raison des mouvements constants du fleuve. De plus nous ne connaissons pas la date de collecte de ces toponymes.

## 1.2/ Indices de détection

### NDWI (Normalized Difference Water Index)

Cet indice obtenu à partir des canaux verts et proche infra-rouge permet de révéler les surfaces en eau pour une date donnée. Il en résulte un raster dont les valeurs de chaque pixel s'étend de -1 à +1, zéro étant le seuil au-dessus duquel les surfaces correspondent à de l'eau. Les rasters résultants de cette manipulation ont été vectorisés de sorte que l'on puisse obtenir des données mesurables et comparables. Cet indice avait l'avantage d'être reproductible de manière homogène permettant de comparer les années entre elles. L'un des seuls biais pouvant entrer dans cette détection demeurait la charge sédimentaire en suspension qui pouvait fausser les résultats en détectant de la terre ferme là où le fleuve était particulièrement chargé en sédiments, mais ces conditions étaient surtout réunies durant la saison des pluies. Lorsque de telles observations (marginales) ont été faites, les seuils de détection ont été réhaussés manuellement pour correspondre à ce qui semblait être le plus représentatif.

### NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'indice NDVI obtenu à partir des canaux rouge et infra-rouge, permet de détecter les surfaces végétalisées, grâce à la chlorophylle. Cet indice permet donc de détecter et comparer les surfaces occupées par des végétaux à différentes périodes de leur croissance. Cet indice représente un gradient d'intensité de la chlorophylle qui varie selon la saison et qui ne permet pas la comparaison de manière quantitative. En revanche, cet indice est très utile pour comparer une même zone à des

saisons différentes pour définir les modes et saisonnalité de l'occupation des sols. Le gradient de cet indice s'étend de -1 à +1, toutes les valeurs inférieures à 0 correspondent à des surfaces non végétales, ou bien à des végétations sans chlorophylle. La valeur 0 correspond plutôt aux surfaces de sol nu, tandis que les valeurs positives entre +0,1 et +1 représentent les surfaces végétalisées.

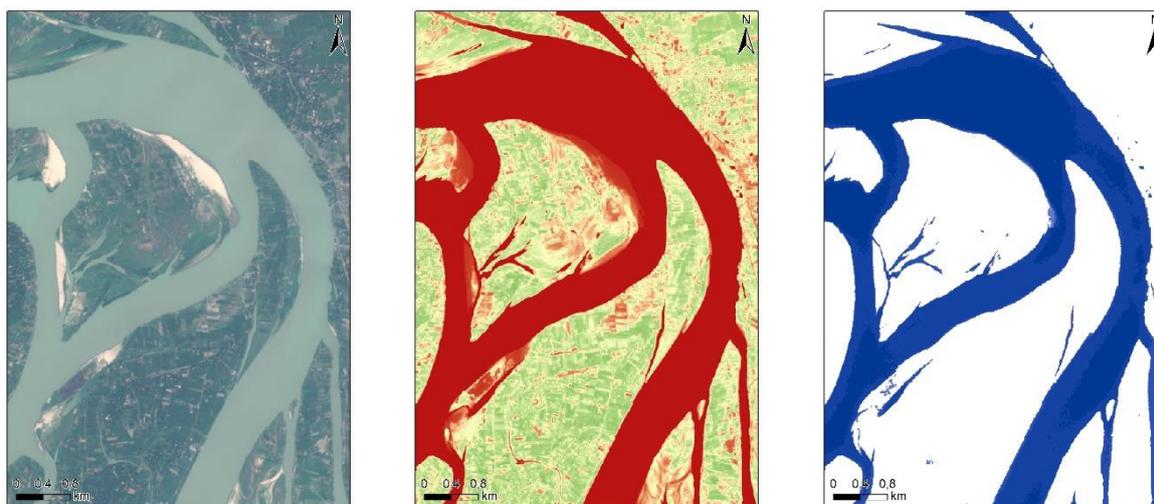


Image couleurs

Indice NDVI

Indice NDWI

Figure 31 – Image Sentinel 2 du 2 février 2018 (Sources : Sentinel 2)

### Bancs de sable

Afin de déterminer les limites de la bande active de chaque année, qui correspond à l'emprise de mobilité active du fleuve durant la saison des pluies, nous avons dû extraire les surfaces correspondant aux sédiments nus comme indice de ces mouvements, résultants soit de dépôts récents comme des bancs de sable médians ou des bancs de convexité, ou encore des surfaces abandonnées, tels que des chenaux secondaires, résultants par la baisse du niveau d'eau. Etant donné que nous n'avons que des images prises durant la saison sèche et donc une emprise minimale du fleuve, l'ajout des surfaces de dépôts de sable nous permettait de cartographier le lit moyen. Pour discriminer ce sable du reste, nous avons utilisé le canal rouge des images Landsat et Sentinel 2 qui semblait être le plus approprié pour discriminer le sable sec de l'eau et de la végétation. Cependant quelques limites étaient observables quant à la non détection du sable humide situé en bordure du fleuve et pouvant s'étendre sur de larges surfaces là où la topographie est peu accentuée.

## 2/ Enquête de terrain

### 2.1/ Enquête de terrain

Afin de rendre compte des réalités, des relevés de terrain ont été réalisés entre le 25 et 30 mars. Ces journées ont été choisies à cette période de l'année afin d'être réalisées en saison sèche lorsque l'accès au fleuve est plus facile et permettant meilleure lecture du paysage. De plus, c'est à cette saison que l'on peut voir l'étagement des cultures depuis le bord du fleuve à son minimum jusqu'au sommet des îles.

Dans ce cadre nous avons formé deux binômes, Benoît Ivars poursuivait ses travaux (qui avaient déjà débuté) de collecte des informations sur les modes de cultures, découpages administratifs et la

distribution des terres. Il était accompagné d'une interprète anglo-birmane avec laquelle il travaillait déjà depuis plusieurs mois. Pendant ce temps, l'autre équipe formée de Robin Gruel et d'un interprète franco-birman arpentaient l'île afin d'étudier la géomorphologie de l'île et les cultures présentes à différents étages, mais également de prendre différentes mesures de hauteur de l'île, des niveaux des crues passées, ainsi que les hauteurs de pilotis des habitations.

L'enquête de terrain et les informations transmises par Benoît Ivars préalablement à l'étude et au fur et à mesure des relevés ont permis d'identifier plusieurs facteurs déterminants quant à l'installation d'une agriculture et le type de culture sur les îles :

- Attribution de terres,
- Hauteurs des terres vis-à-vis du fleuve,
- Texture des sols.

L'objectif principal de l'étude consistait à caractériser ou du moins identifier les critères d'installation des habitants et de la mise en place de leurs cultures. Concernant les analyses géomorphologiques développées dans ce rapport lors de notre passage, il n'y avait pas de questionnaire pré établi car chaque île que nous avons visité était organisée différemment, avec une structuration différente de l'espace, des cultures différentes et une histoire plus ou moins ancienne. Les questions étaient posées au fur et à mesure de la visite en fonction des observations et pouvaient être :

- Pourquoi avoir établi ce type de culture à cet endroit,
- depuis quand ont-elles été établies ici,
- quel est le calendrier cultural,
- depuis quand ce territoire est-il cultivé,
- jusqu'où monte le niveau d'eau lors des crues (en demandant éventuellement les niveaux des années précédentes),

Les facteurs sociaux et administratifs liés à la distribution des terres et de leur utilisation ayant été pris en charge par Benoît Ivars, les travaux présentés dans ce rapport sont basés sur les aspects purement physiques, écologiques, d'observation sur le terrain ou des descriptions à partir de l'imagerie. Notons que les territoires visités étaient assez vastes pour le temps imparti, 3 secteurs eux même composés de deux îles ont été visités en moins de 4 jours. Les observations ont donc été assez limitées par cette contrainte majeure.

Le secteur n°1 de Pyi Taw Thar fut visité à deux reprises, le mercredi 28 sur le site de Pyi Taw Thar Yawar Ma et de sa péninsule et le vendredi 30 mars sur l'île de Pyi Taw Thar dans toute sa partie nord, nous avons parcouru l'île d'est en ouest puis longé les marges par le nord. Deux regroupements d'habitat ont été visités, l'un à l'est « le nouveau village » et l'autre à l'ouest beaucoup plus ancien.

Le secteur n°2 de Shwe Gin Dar Kyun a été visité assez sommairement le jeudi 29 mars au matin mais n'a pu être arpenté de manière exhaustive ni être mesuré, pour ces raisons les travaux relatifs à la description des étagements de culture et leur répartition est très brève et se base uniquement sur les images satellites.

Le secteur n°3 de Yae Paw Taung fut visité à deux reprises, le lundi 26 après midi et le mardi 27 avril. Le lundi après-midi une première visite assez brève du village de Yae Paw Taung Ywa Ma fut réalisée mais c'est le lendemain après-midi que les relevés autour du village et sur la partie est de l'île furent entrepris (jusqu'à 2 km à l'ouest). Le mardi matin nous avons étudié une « île de sable » (*Té Mye*) tout juste cultivée et sans nomination spécifique, située au sud-ouest de Yae Paw Taung.

## 2.2/ Méthodes de mesure

Faute de posséder un GPS permettant de mesurer une élévation absolue et précise, nous nous sommes résolus à mesurer l'élévation des berges, de certaines cultures et habitations en prenant pour référence le niveau de l'eau. Pour réaliser ces mesures nous avons utilisé un lasermetre (Disto 800) qui nous a permis d'obtenir des mesures verticales de précision millimétrique sans avoir besoin de mesurer les angles de visées, les distances et hauteur, etc... En prenant pour niveau de base (niveau 0) le niveau du fleuve, nous avons pu obtenir des élévations distantes du fleuve par report de mesure en utilisant comme nouveau niveau de base la mesure réalisée pour la mesure suivante. Ainsi nous avons pu déduire des altitudes relatives sur des secteurs éloignés du fleuve par addition ou parfois soustraction des élévations lorsque le point mesuré était en dessous du niveau de base. L'utilisation d'un GPS nous a permis de localiser ces points et ainsi d'obtenir des données avec des localisables précises et comparables pour un même site ou même entre les différents sites, étant donné qu'en cette période, les fluctuations du niveau du fleuve étaient peu importantes. Nous avons ainsi pu obtenir des données ponctuelles des hauteurs de certaines « terrasses » et chenaux secondaires, de niveau de crue en prenant la mesure de la limite supérieure des dépôts de sédiments sur les troncs d'arbres ou sur les habitations. Toutes ces mesures nous ont également permis de réaliser des profils topographiques sur les sites de Pyi Taw Thar. Sur certains secteurs où les arbres et habitats étaient présents, lorsque la hauteur de crue a pu être identifiée, nous avons utilisé cette hauteur comme nouveau point de référence (niveau de référence), pour connaître d'autres élévations distantes du fleuve.

18 stations de mesures du niveau du fleuve sont présentes sur le cours de l'Ayeyarwady depuis Myitkyina jusqu'à Zalun, mais seules deux d'entre elles sont situées sur le delta. La station de Zalun est la dernière et la plus proche de nos sites d'étude, elle est située à environ 20 km en amont du site n°3, à 60 km du site 2 et à 94 km du site 1.

Notons que durant la mission de terrain réalisée entre le 26 et le 30 mars, le deuxième jour, le fleuve se situait à l'étiage à son niveau minimal (2,77 m) de 2018, à cette période le fleuve ne connaît que de très faibles variations. Cependant, durant les 5 journées de terrain, à partir du troisième jour (mercredi 28 mars) le fleuve a connu une légère élévation de son niveau et a varié de 41 cm entre le 27 et le 30 mars en raison d'une crue résultant de la fonte des neiges survenue plus de 10 jours avant dans le bassin de la N'mai Hka.

Tableau 5 - Niveau du fleuve à Zalun durant les journées de terrain

Dates	Niveau du fleuve (m)
26/03/2018	2,78
27/03/2018	2,77
28/03/2018	2,83
29/03/2018	3,00
30/03/2018	3,18

Niveau minimum depuis le 13 mai 2017	2,77
Niveau maximum depuis le 13 mai 2017	12,33

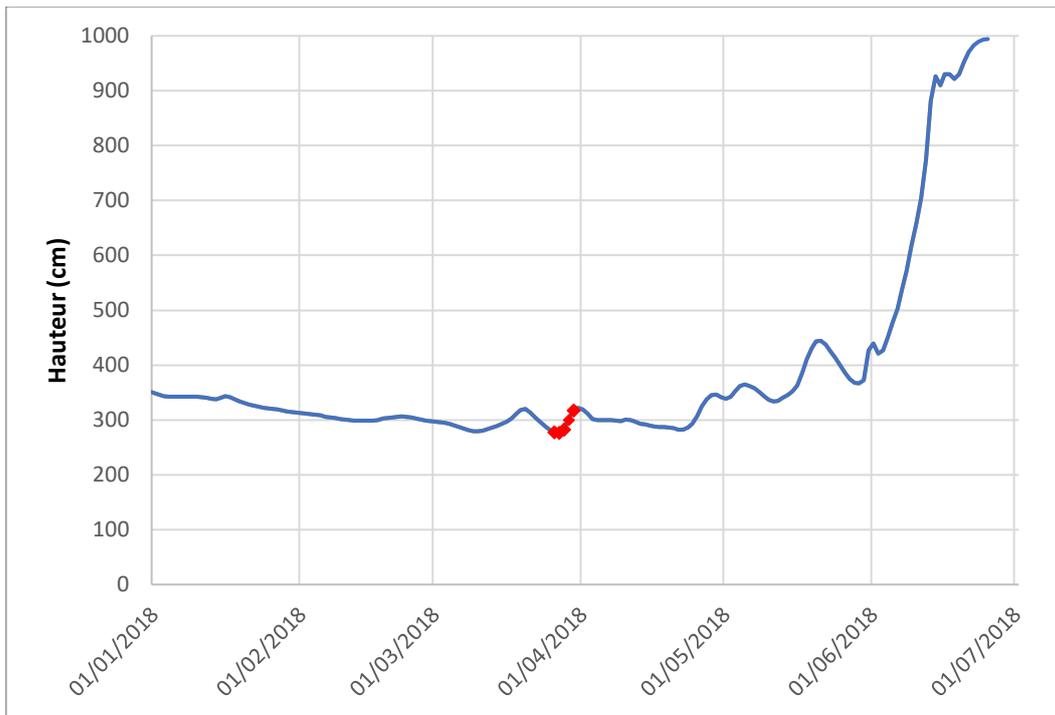


Figure 32 – Niveau du fleuve mesuré à Zalun lors des 5 journées de relevé (Sources : Department of Meteorology and Hydrology)

### 3/ Méthodes d'analyses multiscalaires

#### 3.1/ Choix des trois sites d'étude et travaux réalisés

Initialement, cinq secteurs candidats avaient été identifiés pour réaliser cette étude, localisés depuis la zone de diffluence entre la branche de Bassein et l'Ayeyarwady, au nord-ouest de Hinthada, jusqu'à la diffluence entre la China bakir et la Shwelaung au sud de Nyaungdon. Mais seul trois d'entre eux ont été retenus pour plusieurs raisons :

- Ces îles étaient situées entre deux township entre lesquels la distribution des terres alluviales récemment apparues était mise en question au niveau du partage des terres,
- La présence de contacts sur place permettant d'accéder à ces territoires,
- La diversité des formations alluviale, leur localisation sur le delta, leur ancienneté, leur histoire,
- L'accessibilité et le temps d'accès de ces îles conditionné par les moyens financiers.

Pour ces raisons nous avons décidé d'exclure les secteurs en amont de Zalun, car ils étaient trop éloignés et le temps d'accès trop long depuis l'hôtel. De plus ces secteurs extrêmement dynamiques (annexe 4, tronçon 1) correspondaient à des échelles spatiales beaucoup trop étendues et à des formations alluviales très complexes. Un autre groupement d'île avait également été proposé en nord de Pyi Taw Thar mais il a été abandonné avec pour préférence le site n°2 sur lequel des prises de contacts avaient déjà été faites.

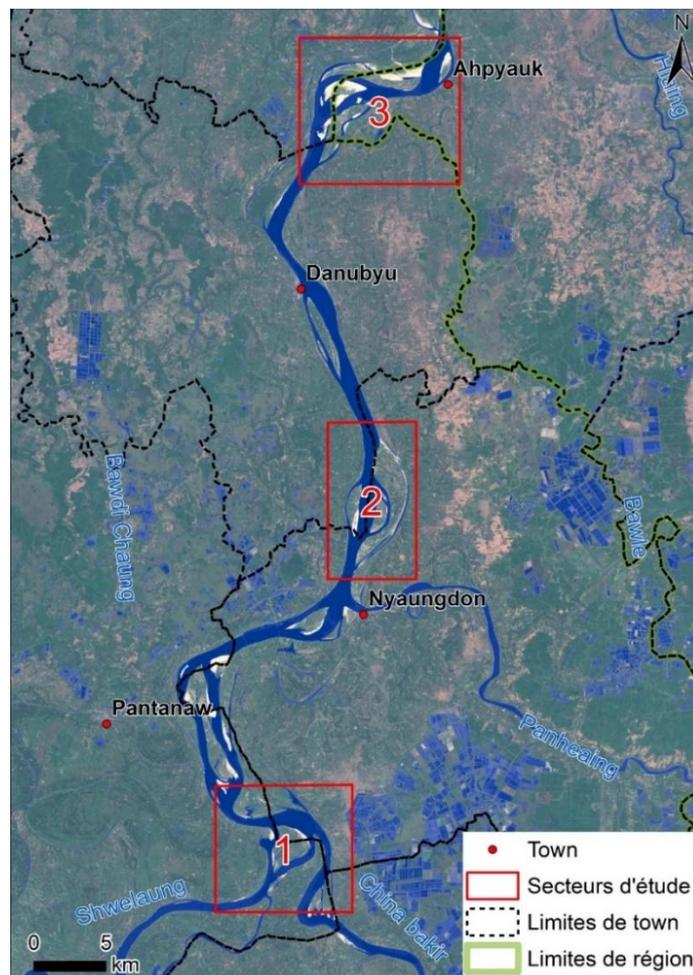


Figure 33 - Zones d'étude, plus de détails en annexe 5 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

### Secteur n°1 : Pyi Taw Thar

Sur le plan administratif, ce site présentait un intérêt car il se situe sur une zone de frontière entre les townships de Nyaungdon et de Pantanaw. Ce site correspond aux derniers secteurs (en aval) de formation d'îles alluviales formées de bancs de sables avant les îles anastomosées aux marges stables. Ce secteur avait été préalablement prospecté par Benoît Ivars, facilitant ainsi l'accessibilité aux différents secteurs et permettant de gagner du temps. Deux sites furent étudiés et arpentés, le village de Pyi Taw Thar Yawar Ma, situé sur une péninsule de 1,8 km<sup>2</sup> agrégée à une île de plus grande envergure et stabilisée par des digues. Le deuxième site était une île alluviale de 5 km<sup>2</sup> (surface le 2 février 2018) un peu en amont ou était présent le « nouveau village » de Pyi Taw Thar. Sur cette île étaient présent le territoire de deux autres villages à l'ouest Kat Tha Win et Kazin Toe Chaung Su. D'après l'imagerie SRTM, d'une résolution verticale inférieure à 2 m sur les terrains plats, sur ce secteur le fleuve serait à une altitude 0, au niveau de la mer (image radar prise en février 2000, durant la saison sèche) et était soumis aux influences tidales.

### Secteur n°2 : Shwe Gin Dar Kyun / Tha byu Ye Le Kyun

Ce site, situé entre les townships de Nyaungdon et Danubiu est composé de 4 îles en 2018 durant la saison sèche. Il nous a semblé intéressant car il était d'apparence assez stable tout en vivant une évolution constante, avec des secteurs anciens antérieurs à 1988. Dans un espace élargi par l'endiguement où le fleuve ne cesse de construire et de détruire des îles. Deux îles ont été explorées, l'île de Shwe Gin Dar Kyun d'une surface de 10,4 km<sup>2</sup> (2 février 2018) et l'île de Tha byu Ye Le Kyun dont la superficie est de 1,7 km<sup>2</sup> (2 février 2018). D'après l'imagerie SRTM, sur ce secteur le fleuve serait à une altitude de 2 et 3 m.

### Secteur n°3 : Yae Paw Taung / Té Myei

Ce site présentait un grand intérêt car il se situait à la croisée des régions de Yangon et de l'Ayeyarwady mais aussi de trois townships : Ahpyauk, Danubiu et Zalun. Ce secteur très dynamique avec de grands mouvements d'érosion et de dépôts, la disparition partielle et récente du village de Yae Paw Taung, probablement vieux de plus de 50 ans et épargné jusque-là. Nous avons arpenté une partie de l'île dont la surface était de 4,3 km<sup>2</sup> (2 février 2018). Nous sommes également allés sur la formation récente (5 ans) d'une île de 3 km<sup>2</sup> (2 février 2018) située au sud-ouest de Yae Paw Taung, cultivée depuis tout juste un an pour les plantations de haricots et de riz. Cette île nous a permis d'étudier un espace neuf en cour de formation et de colonisation. D'après l'imagerie SRTM, sur ce secteur le fleuve serait situé à 5 m d'altitude.

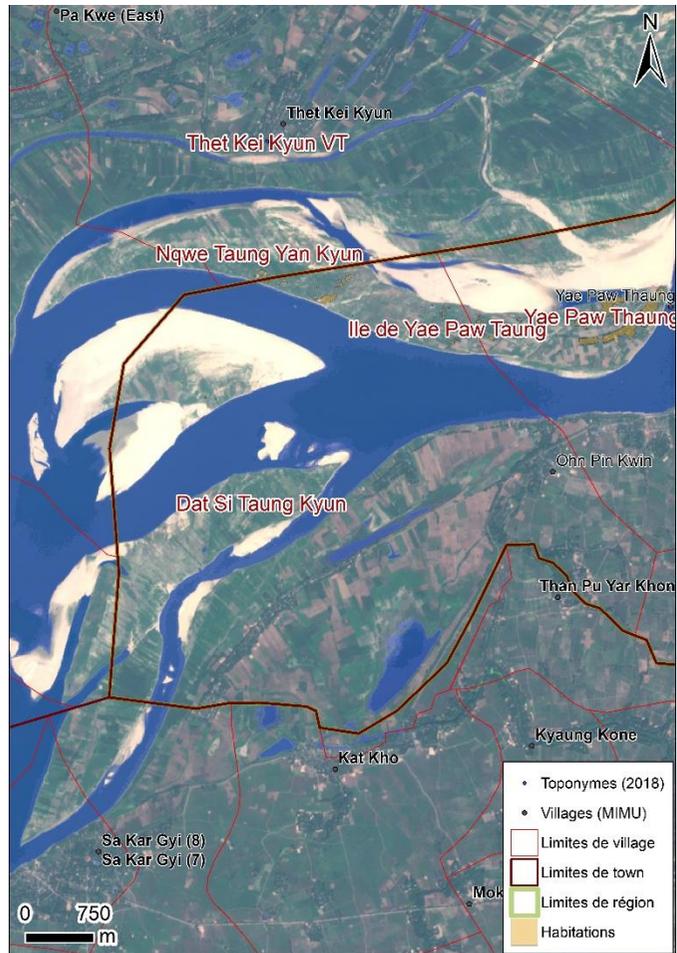
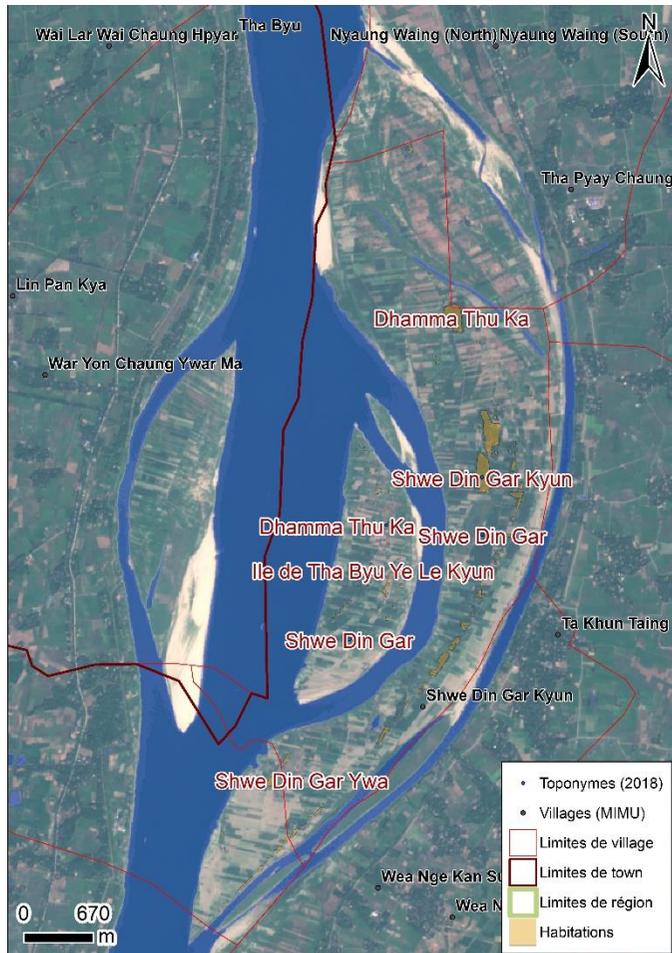
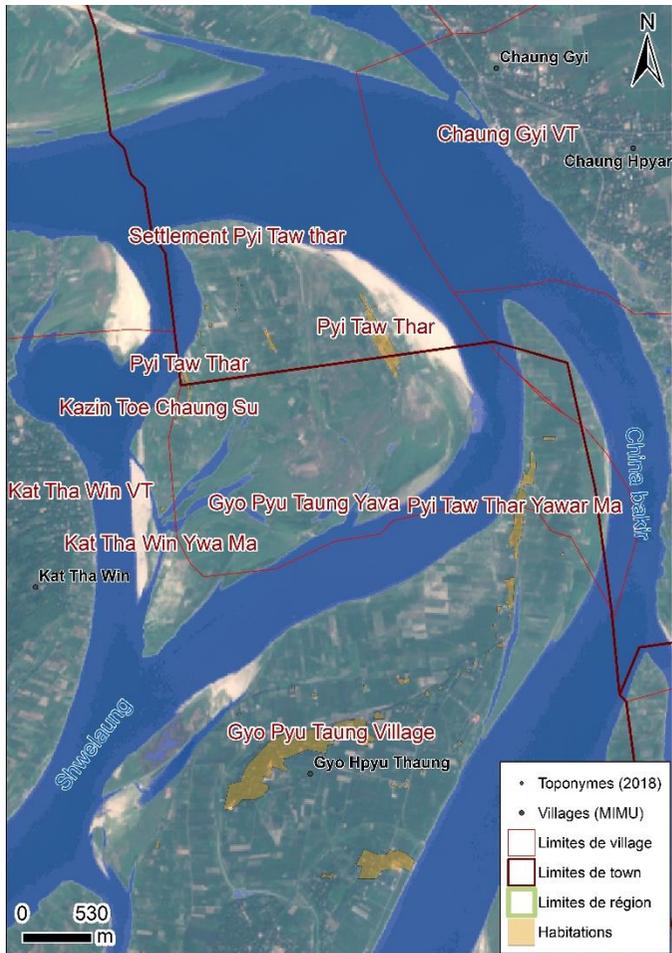


Figure 34 - Les trois sites d'études, site n°1 à gauche, site n°2 au centre, site n°3 à droite (Sources : Sentinel 2, MIMU)

### 3.2/ Etude à l'échelle du delta

Une première analyse de l'évolution des chenaux du delta a été réalisée à partir d'images Landsat s'étendant depuis 1988 jusqu'à 2018. Cette analyse a consisté à réaliser une zonation par l'identification des dynamiques de migration des chenaux. Trois classes ont été définies (très actif, actif, inactif), ces trois classes ont été définies sur une base qualitative, à savoir le déplacement du chenal d'une année sur l'autre. Par la suite, les zones considérées comme inactives ont été comparées avec les cartes de 1955 et 1967, afin d'observer si des changements avaient eu lieu et identifier les secteurs ayant connu des déplacements sur un pas de temps de 63 ans. Une nouvelle classe a été ajoutée pour les secteurs ayant connu des mouvements entre 1955 et 2018, ces tronçons ont été défini comme « peu actif ».

Une cartographie plus détaillée de cette évolution et des dates de formation des terres est située en annexe 3. Cette carte montre les zones de retrait du chenal d'une année sur l'autre, affichant ainsi une datation de la formation des surfaces aujourd'hui terrestres, Cette carte nous renseigne de l'espace de mobilité du fleuve sur 30 ans et de la date maximale d'utilisation des terres.

### 3.3/ Découpage du chenal par tronçons fluviaux

Lorsque nous avons entrepris de définir les limites de nos secteurs d'étude et de définir les îles à étudier nous nous sommes rapidement rendu compte de la difficulté à décrire une entité spécifique « l'île » ayant un caractère aussi éphémère et des contours aussi changeants, que ce soit sur 1 ou 5 ans, dépendants du niveau d'eau du fleuve des apports sédimentaires constant et de l'érosion qui redessine sans cesse les contours des berges.

A partir du premier travail de sectorisation du fleuve à l'échelle du delta nous avons pu identifier les limites de mobilité du fleuve, jusqu'ou il était encore actif pour transformer ses marges d'une année sur l'autre.

Ces travaux nous ont permis de constater que les îles évoluaient dans un cadre relativement délimité (à l'échelle du delta) avec notamment pour limites externes les endiguements, qui par ailleurs n'ont jamais cessé de s'élargir entre la rive gauche et la rive droite.

Afin d'étudier de manière plus quantitative le chenal et les îles dans leur ensemble et de ne pas se limiter à un cadre totalement artificiel, basé sur des limites subjectives, nous avons réalisé une sectorisation du chenal principal par tronçons à partir de l'analyse préliminaire de l'ensemble du delta. Cette analyse c'est focalisé sur la partie active du fleuve deltaïque et correspondant aux classes très actives, active et peu actives de la branche principale de l'Ayeyarwady et du début des branches secondaires. L'intérêt de cette analyse étant d'identifier les tendances de l'évolution du fleuve sur 30 ans (rétrécissement du chenal, amplification du tressage, etc.) en fonction des secteurs. Mais ces mesures ne pouvaient se réaliser à l'échelle de l'ensemble du fleuve étant donné les différences entre les secteurs amont et aval, les secteurs avec un chenal unique et ceux à plusieurs branches. Cette délimitation a été réalisée à partir du fuseau de mobilité, c'est à dire l'assemblage de l'ensemble des tracés du fleuve (surface en eau) ainsi que des surfaces de dépôts de sable afin de définir une emprise active (à l'étiage) du fleuve pour chaque année entre 1988 et 2018. Afin de limiter les biais liés à des détections erronées, comme par exemple les reflets de toitures des villages pouvant être confondues avec du sable, un nettoyage a donc été réalisé avec une élimination systématique des surfaces inférieures à 2000 m<sup>2</sup> (2 pixels).

A partir de l'ensemble des tracés du fleuve (zone de mobilité à l'étiage) nous avons réalisé un découpage manuel en section en identifiant les nœuds, les ruptures dans ce continuum (zone

d'inflexion interannuelles). Une sectorisation du chenal réalisée à partir de l'observation du fleuve en 2018 et généralisée sur 30 ans n'aurait eu aucun sens en raison des importants mouvements de migration amont aval. Les zones d'inflexions interannuelles correspondent donc aux nœuds qui séparent deux secteurs ayant une évolution, un style différent ou une position différente. Par exemple, un secteur en tressage durant 30 ans séparé par deux secteurs restés assez linéaires durant 30 ans. Nous avons ainsi pu distinguer 16 tronçons, dont la carte de découpage des tronçons est située en annexe 4. Le tronçon 4-5 était à l'origine composé de deux tronçons différents mais des observations postérieures ont montrées de grandes similitudes entre ces deux tronçons et une certaine incohérence à les distinguer, nous avons donc choisi de les assembler. Les archipels que nous avons étudiés et leurs limites ont été identifiés préalablement à ces travaux et appartiennent aux tronçons 6, 8 et 10. Les graphiques et commentaires détaillant l'évolution des autres tronçons sont situés en annexe 4.

A partir de l'assemblage des données de surface en eau et de banc de sable pour chaque année, nous avons pu entreprendre une analyse des bilans surfacique de chaque tronçon, par déduction des surfaces érodées et des surfaces agrégées d'une année sur l'autre.

Une analyse réalisée sur la base d'un découpage automatisé et normalisée à une échelle kilométrique, en utilisant par exemple le polygone de Thiessen aurait été sûrement plus précise. Mais pour des raisons de temps, nous nous sommes limités à des découpages manuels. Un deuxième facteur entrant en jeu était au niveau de la complexité de l'espace deltaïque, formé de plusieurs branches diffluentes ayant une hiérarchie allant de 1 (chenal principal) à 3 (branche diffluente de la diffluence du chenal principal). Par ailleurs, nous aurions pu également entreprendre des mesures par un indice de tressage (par exemple de Ashmore, 1991), mais nous ne pensons pas que cet indice aurait été pertinent sur cette partie du fleuve où le tressage n'est pas marqué et ressemble davantage à un chenal à anabranches. De plus le temps de réalisation aurait été trop important pour le format de cette étude.

A partir de ce découpage nous avons mesuré pour chaque année (à l'étiage) la surface en eau du fleuve, la surface de sédiments déposés, correspondant soit à des dépôts récents soit à des chenaux secondaires abandonnés par l'abaissement du fleuve. L'addition de ces deux éléments (eau et bancs de sable) correspond à la bande active du fleuve pour une année donnée. Bien entendu comme cela a été précisé précédemment, ces mesures sont totalement dépendantes du niveau du fleuve au moment de la prise de vue satellite, par exemple l'année 2002 est assez caractéristique d'une année avec un niveau d'eau plus élevé que la moyenne avec une surface en eau plus élevée pour l'ensemble des tronçons. Mais à l'échelle de 28 années disponibles sur 30 ans, on peut observer des tendances qui peuvent aider à nourrir la réflexion. Les surfaces en eau et les surfaces de dépôts sédimentaires frais (sable) extrait par télédétection ont pu être comparées d'une année sur l'autre de sorte que l'on puisse détecter les zones d'érosion et les zones d'accrétion. Ces zones ont été mesurées par année et par tronçon, permettant ainsi d'étudier la tendance du fleuve.

Nous avons normalisé ces mesures de surface en eau + sable en les rapportant à l'ensemble des tronçons, afin de permettre une lecture et une comparaison d'un tronçon à l'autre au travers des graphiques, sachant que par exemple le tronçon 1 faisait 165 km<sup>2</sup> et que le 16<sup>e</sup> en faisait 3.

*Surface normalisée = (Surface annuelle x Fuseau de mobilité total) / Fuseau de mobilité du tronçon*

**Surface annuelle** : Surface en eau ou en banc de sable pour un tronçon et pour une année donnée,

**Fuseau de mobilité total** : Surface de la zone de mobilité cumulée de toutes les années 1988-2018 de l'ensemble des tronçons,

**Fuseau de mobilité du tronçon** : Surface de la zone de mobilité cumulée de toutes les années 1988-2018 du tronçon,

### 3.4/ L'étude des archipels à long terme

Afin de mieux comprendre les processus d'évolution des archipels et des îles étudiées, nous avons réalisé une extraction des surfaces en eau à partir de l'indice NDWI pour chaque année (voir annexe 2). Cette extraction a alors été vectorisée de sorte que l'on puisse obtenir des couches mesurables, de pouvoir établir une chronologie d'évolution des îles et une datation des surfaces des terres existantes en 2018. La principale difficulté de cette étude résidant dans l'identification des contours de l'objet île, qui était totalement dépendant du niveau d'eau lors de la prise de vue satellite et extrêmement changeant d'une année sur l'autre. Pour ces raisons nous nous sommes limités à une zone et non pas à une île. La cartographie de datation des terrains réalisée est en réalité une représentation de la date de formation des premiers dépôts de sédiment (banc de sable) visible en saison sèche en un point donné, date à partir de laquelle ces espaces vont évoluer sans subir d'érosion latérale ni être de nouveau recoupé par le fleuve (et être détectable sur image satellite). Cette datation permet d'avoir une notion de l'âge maximal des terrains comme support des cultures et habitats et de recouper ces dates avec celle recueillies lors du terrain, notamment les dates d'installation d'habitations ou l'établissement des premières cultures.

Cette carte de datation n'est cependant pas parfaite et nécessiterait un travail plus précis, l'année 2001 manque car au moment de la création de la carte les données pour l'année 2001 étaient inutilisables en raison d'une couverture nuageuse trop dense, de plus le manque de données pour les années 2012 et 2013 induit des biais sur certains secteurs où le fleuve très mobile a eu un déplacement latéral suffisamment puissant pour éroder un secteur en 2012 et déposer de nouvelles terres en 2014 à ce même endroit.

Les détails cartographiques de l'évolution des îles entre 1955 (carte) et 2018 (Landsat) sont visibles en annexes 7.1. A noter que l'année 1999 présentait quelques petits nuages sur les secteurs 1 et 2, pour ces raisons quelques aberrations sont visibles dans le découpage du fleuve. La grille de découpage administratif générée par MIMU ainsi que les noms de village et leur localisation ont été utilisés comme repère spatiaux, afin d'aider à la comparaison. Cependant ils ne peuvent être utilisés comme lieu absolu en 2018 car ils ne sont qu'une réalité collectée à une date donnée et peuvent s'être déplacés depuis.

### 3.5/ L'étude des sites à court terme

Comme nous l'avons précédemment vu, l'évolution des terres alluviales étant tellement rapide, nous avons décidé dans un premier temps de n'utiliser que les images prises depuis la dernière saison des pluies, celle de 2017. Car depuis cette date, les sites ont globalement peu changé et avant cette date, certaines îles notamment l'île de sable de Yae Paw Taung et Pyi Taw Thar étaient très différentes de celle de mars 2018 (lors des relevés de terrain). Le principal problème qui s'est posé à cette analyse, fut le manque d'images durant la saison des pluies, car nous ne pouvions utiliser que l'image du 13 septembre 2017 qui n'était disponible que sur le site n°3. Nous avons donc décidé d'utiliser également des images de 2016 durant la saison des pluies afin de compléter, en partant du principe que les secteurs qui étaient les plus élevés en 2016 et encore présent en 2017 n'avaient globalement pas diminué en hauteur (en tout cas sur les secteurs les plus élevés qui étaient aussi ceux qui nous intéressaient) mais avaient continué à se surélever en 2017. Seuls les secteurs ayant disparus entre temps, emportés par l'avancée latérale du fleuve étaient incohérents avec cette cartographie, nous avons donc traité les images antérieures à août 2017 par découpage sur la base des limites maximales de 2017 (lorsque l'île était à son extension maximale). Cela nous a permis de collecter 3 dates supplémentaires : 27 juillet 2016, 4 novembre 2016 et 26 novembre 2016.

Les images ont été superposées entre elles afin d'identifier les lignes d'eau et d'établir un gradient d'élévation du fleuve nous permettant de produire une carte du relief relatif. Les images en saison sèche étant particulièrement nombreuses en raison du couvert nuageux absent à cette période, cette cartographie présente le défaut de sur-représenter les détails des bas-reliefs, situés en général là où sont présents les bancs de sables et de ne pas suffisamment détailler la topographie des secteurs les plus élevés, là où sont présents les cultures et les habitats qui nous intéressent.

Cette cartographie présente également un biais au niveau des secteurs habités, qui en plus de former des ensembles de toitures non submergées sont également le plus souvent entourés d'arbres, détectés comme terre ferme avec l'indice NDWI sur les images alors que ces derniers sont inondés sous la canopée. On peut nuancer ce biais par le fait que la présence de ces arbres est un indicateur de stabilité, de maturité des sols et de distance verticale vis-à-vis du fleuve, puisque ces derniers ne peuvent résister qu'à une durée limitée d'inondation avant asphyxie, qui est variable en fonction des espèces. Hélas nous n'avons aucune information spécifique sur ces espèces et leur résistance à l'hydromorphie.

Afin de rendre compte au mieux des réalités topographiques, nous avons entrepris de mesurer les berges des sites étudiés. Comme cela a été spécifié dans la partie méthode de mesure, faute de posséder des mesures d'altitude absolues comparables entre elles d'un site à l'autre, nous nous sommes résolus à des mesures relatives en nous basant sur le niveau d'eau. Cette mesure étant totalement dépendante du débit au moment des mesures nous avons utilisé la mesure du niveau du fleuve au niveau de la station de Zalun afin de « normaliser » les mesures. Il s'agit de la station la plus proche des sites, mais aussi la dernière du fleuve avant l'océan. Cette station se situe à 95 km du site n°1 (ce qui correspond à environ une journée de déplacement des pics de crue), pour ces raisons sur ce site en particulier, les mesures ont été réalisées en prenant en compte le niveau d'eau de Zalun du jour précédent. Cette « normalisation » servant tout juste à donner une idée des hauteurs d'eau (à Zalun) pour un jour donné en croisant les dates de prises de vues satellitales avec le niveau d'eau du jour même. Ainsi que les mesures prises in situ également croisées avec le niveau d'eau à Zalun.

Hélas, lors du recueil des données de niveau d'eau nous n'avons pu remonter jusqu'à des dates antérieures au 13 mai 2017, ce qui ne nous permet pas de connaître les niveaux d'eau exacts pour le 27 juillet 2016, date à laquelle le fleuve était particulièrement haut, ni même les 4 et 26 novembre 2016. Mais avons réussi à recueillir les niveaux approximatifs du fleuve pour le 27 juillet 2016 et avons identifié la hauteur du fleuve pour ce jour-là à environ 11,5 m (figure 36).

Heureusement nous avons pu recueillir le niveau pour l'image du 13 septembre 2017. Mais cette date n'est disponible dans son intégralité que sur le secteur de Yae Paw Taung (N°3). Les secteurs 1 et 2 ne sont visibles que partiellement car ils se situent aux limites de l'emprise de l'image satellite. On constate cependant que sur ces deux autres sites en date du 13 septembre, le fleuve semble suffisamment haut pour inonder toute la surface des îles, seul les arbres, habitations et les *kaing* (*Saccharum spontaneum*) sortent hors de l'eau.

Le 13 septembre 2017 le fleuve était à une hauteur de 10,51 m à Zalun, à ce moment-là le fleuve était dans une phase de crue ascendante. Aux cours de l'année 2017, le niveau du fleuve a dépassé ce niveau sur une durée de 63 jours durant trois périodes :

- 9 juillet au 3 août (25 jours) avec un pic de crue le 21 juillet à 12,18 m,
- 19 août au 18 septembre (20 jours), avec un pic de crue le 28 août à 12,33 m,
- 13 septembre au 11 octobre (18 jours), avec un pic de crue le 25 septembre à 11,52 m.

Le 17 novembre 2017 le fleuve était à une hauteur de 5,56 m à Zalun, à ce moment-là le fleuve était en phase de décrue. Au cours de l'année 2017, le niveau du fleuve a dépassé ce niveau sur une durée de 160 jours du 10 juin au 17 novembre.

Enfin, précisons de nouveau que le site n°2 de Shwe Din Gar Kyun a été visité mais n'a pu être arpenté et mesuré, pour ces raisons la description des étagements de culture et leur répartition en est très brève et se base uniquement sur les images satellites.

Le premier travail consista à réaliser une carte des niveaux d'eau du fleuve à différentes périodes de l'année. Etant donné le coefficient morphogène annuel des îles (aggradation, érosion, accrétion) il était impossible d'établir une telle carte sur une base pluri annuelle. Seule la production de modèle numérique de Terrain pouvant nous aider à connaître l'élévation des différents secteurs des îles. Or, les seuls MNT disponibles (SRTM, ASTER) d'une résolution spatiale de 30 m et altitudinale d'environ 2 m (sur ces secteurs plats) et datant de 2000 nous ne pouvions nous baser que sur des données relatives. Dans cette démarche nous avons collecté l'ensemble des images Sentinel 2 disponibles depuis sa mise en place en novembre 2015 (liste des images en annexe 2). Comme nous l'avons vu, ces images sont d'une résolution de 10 m et permettent d'identifier beaucoup plus de détails que les images Landsat (30 m). Leur pas de temps plus court permettant également d'avoir des images prises à différents moments de l'année et nous donnant également plus de chance d'avoir des prises de vues sans couverture nuageuse, surtout à la saison des moussons où la visibilité des territoires est presque nulle. Après avoir traité l'ensemble de ces images en utilisant l'indice de surface en eau (NDWI) afin d'en extraire les contours nous avons pu délimiter les contours des terres émergées pour l'ensemble des dates.

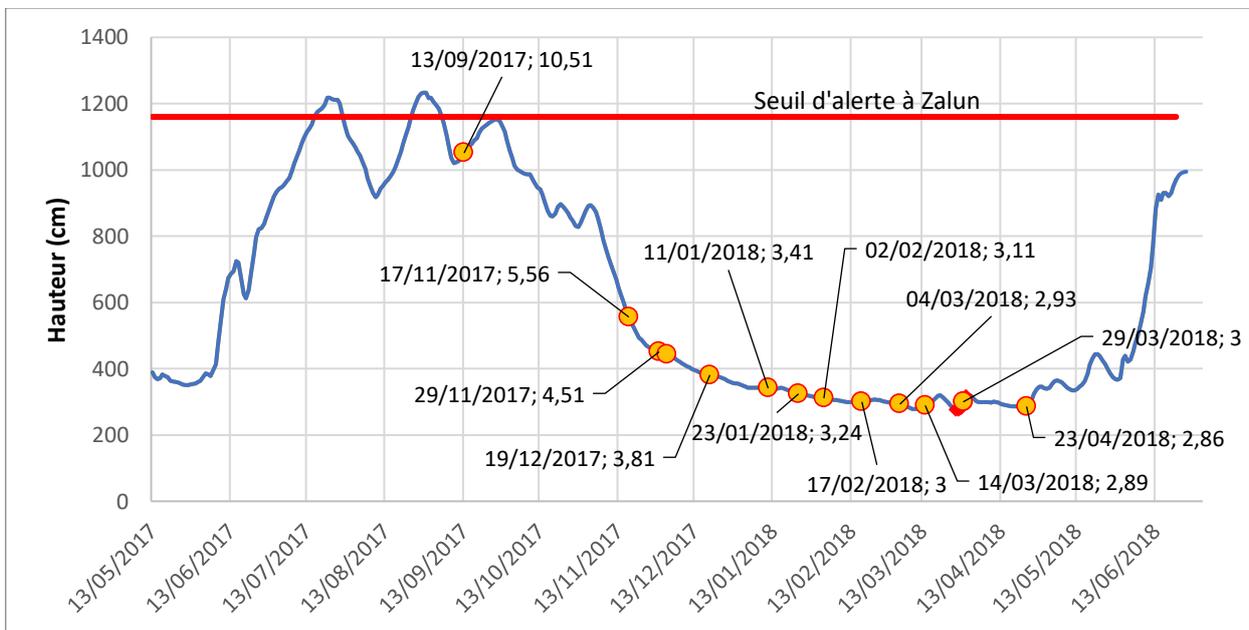


Figure 35 – Niveau du fleuve à Zalun avec localisation temporelle des images satellites utilisées pour la carte des niveaux d'eau, la ligne rouge correspond au seuil d'alerte au-dessus duquel le fleuve dépasse le niveau des digues de Zalun (Sources : Department of Meteorology and Hydrology).

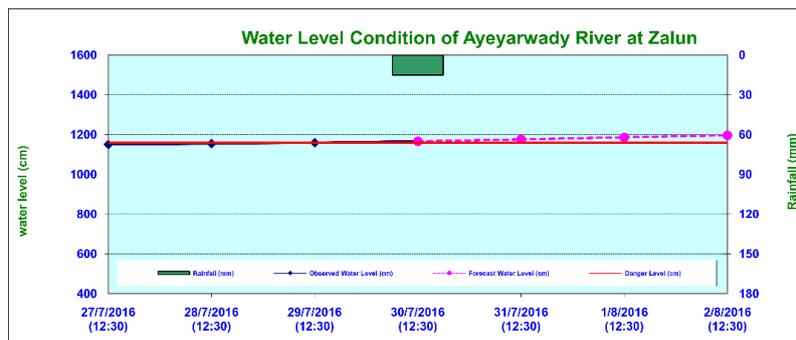


Figure 36 - Niveau du fleuve à Zalun à environ 1150 m le 27 juillet 2016 (Sources : Department of Meteorology and Hydrology)

### III/ Résultats

#### 1/ Echelle du delta et du chenal principal

##### 1.1/ Evolution du delta

A partir de la carte de zonation des chenaux du delta correspondant aux figures 38 et 39, on observe que depuis 1988 la branche de Bassein a connu des mouvements jusqu'à Ngathaingchaung. Il faut cependant nuancer cette information car comme nous l'avons vu avec les figures 29 et 30, certains secteurs ont été modifiés artificiellement par recouplement de méandre pour la navigation, dans ces secteurs, les boucles de méandres étaient trop amples et rallongeaient les temps de navigation. Ces sections étaient relativement stables avant les aménagements mais le recouplement artificiel de méandre a nécessairement augmenté la pente et induit un changement dans les dynamiques. Il est probable que le chenal va de nouveau migrer jusqu'à atteindre un point de relatif équilibre et former des nouveaux des méandres. En dehors de ces secteurs, cette diffluence entretient une dynamique forte de manière presque discontinue jusqu'à Lemyethna qui serait situé à 5 mètres d'altitude d'après les données SRTM. On observe un changement léger depuis 1967 très en aval au niveau de Ngapudaw et il s'agirait plutôt d'une rétractation du chenal.

La diffluence est de Myitmaka présente un débit beaucoup plus faible, il semblerait que presque chaque année à l'étiage, durant la saison sèche, ses connections amont avec le chenal principal soient rompues. Par ailleurs, la carte de 1795 (figure 24) nous informe que cette saisonnalité existait déjà à l'époque. Cette branche présente une dynamique de migration latérale un peu plus importante que celle de Bassein en descendant jusqu'à 5 m d'altitude (SRTM), à la même latitude que Zalun. Quelques tronçons présentent de petites évolutions sont également observables plus en aval jusqu'à 7 km en amont de Htantabin.

De manière plus isolée, le secteur de Htantabin présente d'importants mouvements sur un secteur bien délimité. On y observe à la fois une migration en double courbure de méandre et également un élargissement du chenal à partir de 2000. Il est possible que des transformations artificielles du chenal en amont ou en aval (extraction de sable, modification de berges) aient eu lieu dans ces secteurs et aient induit ce changement de dynamique. On bien un apport massif de sédiment en aval qui aurait obstrué et provoqué une élévation du niveau d'eau.

Le chenal principal présente une dynamique très puissante jusqu'à la latitude de Maubin sur les branches de Shwelaung et de l'Ayeyarwady, certaines sections de ces deux branches présentent encore des mouvements jusqu'au niveau de Wakema. La branche de China bakir s'arrête plus tôt, 15 km en amont de Maubin. La branche qui relie Nyaungdone à Yangon est quant à elle assez peu active. On observe également deux sections linéaires assez peu actives sur le chenal principal, en aval de Zalun et de Danubyu.

Les paléochenaux visibles sur les images satellites nous renseignent également sur une dynamique plus ancienne, mais néanmoins intéressante pour comprendre l'histoire du delta. Une analyse plus détaillée serait nécessaire pour comprendre l'histoire et l'évolution des chenaux avant 1967 et 1988-2018, Cependant, on observe que les mouvements dessinés par le fleuve sont visibles sur les images satellites et correspondent bien aux données depuis 30 ans mais descendent parfois plus en aval. Les branches de Shwelaung et Yazudaing semblent avoir été actives plus en aval avant 1988 (figure 37) que lors de ses 30 dernières années et on peut le confirmer à partir des cartes de 1955-1967. On observe des mouvements « peu actif » très en aval jusqu'au niveau de Bogal. L'observation des changements entre les cartes de 1967 et l'imagerie satellite depuis 1988 à 2018 montre que ces secteurs situés dans le bas delta ont connu des évolutions dans les courbes de méandres les plus

amples. Certaines branches comme la branche Irrawaddy, après sa subdivision avec la branche Yazudaing, se sont rétractées ou ont parfois été abandonnées. Ces mouvements semblent alternés pourraient être dues à un mouvement alterné du courant le plus vif d'une branche à l'autre selon l'axe du fleuve et selon les époques.

Par ailleurs, comme cela a été évoqué dans la partie 1 section 2.3, on remarque notamment la présence autrefois d'un chenal majeur de style méandrique, la Daga, ayant traversé le delta dans sa partie centrale depuis l'ouest de Hinthada jusqu'à Kyaunggon avant de se subdiviser en trois branches (figure 37 à gauche). Aujourd'hui cette branche conserve un chenal étroit dans sa partie aval au niveau de Kyonpyaw mais elle semble d'avantage alimentée par les nappes ou par des canaux en aval.



Figure 37 – A gauche, paléochenal de la branche de Daga entre Hinthada et Kyaunggon et à droite un paléochenal méandrique au niveau de Pantanaw, à la diffluence des branches de Shwelaung et China bakir (Sources : Google earth)

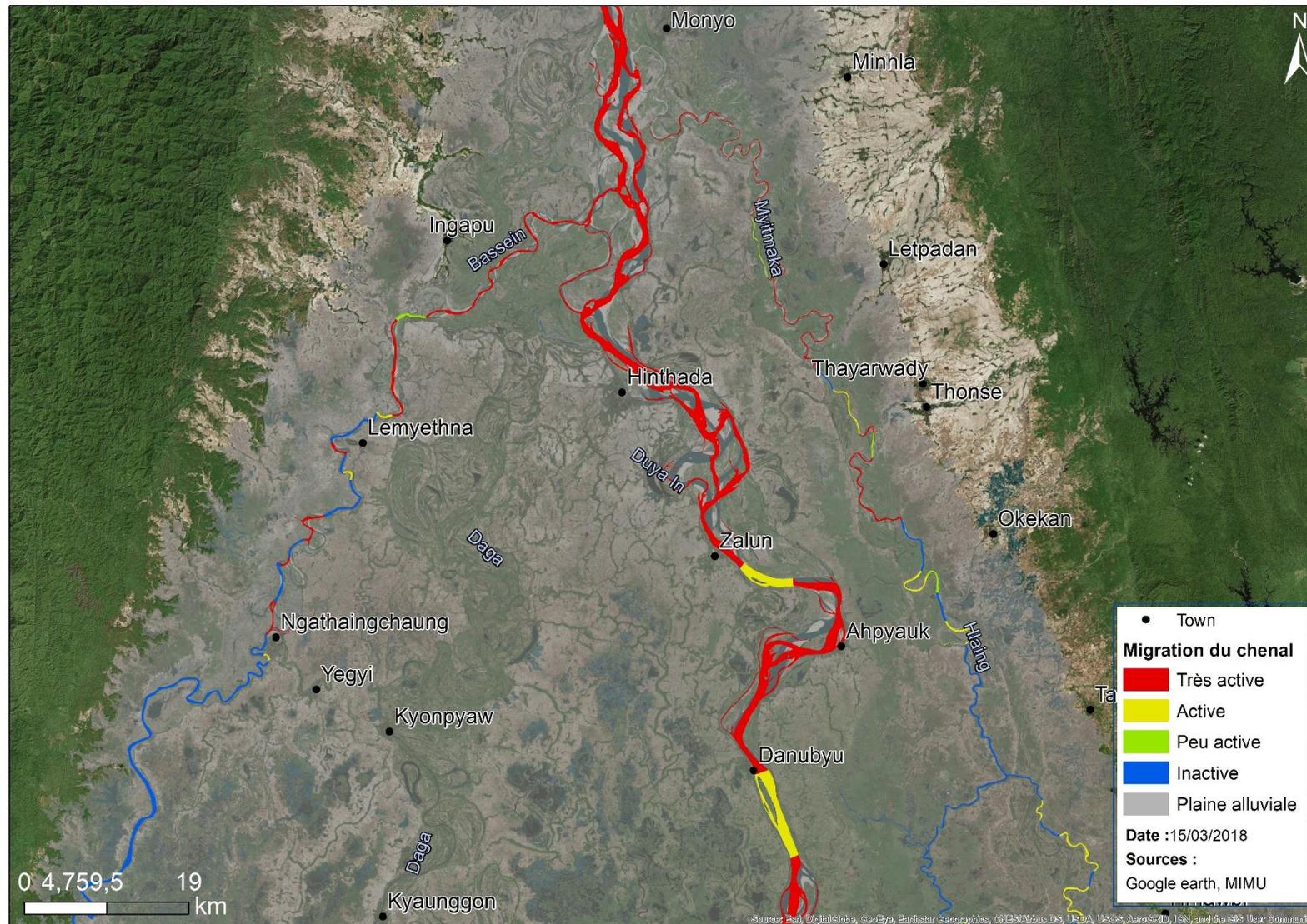


Figure 38 – Dynamique des chenaux du delta depuis 1967, partie amont (Sources : Google earth, MIMU)

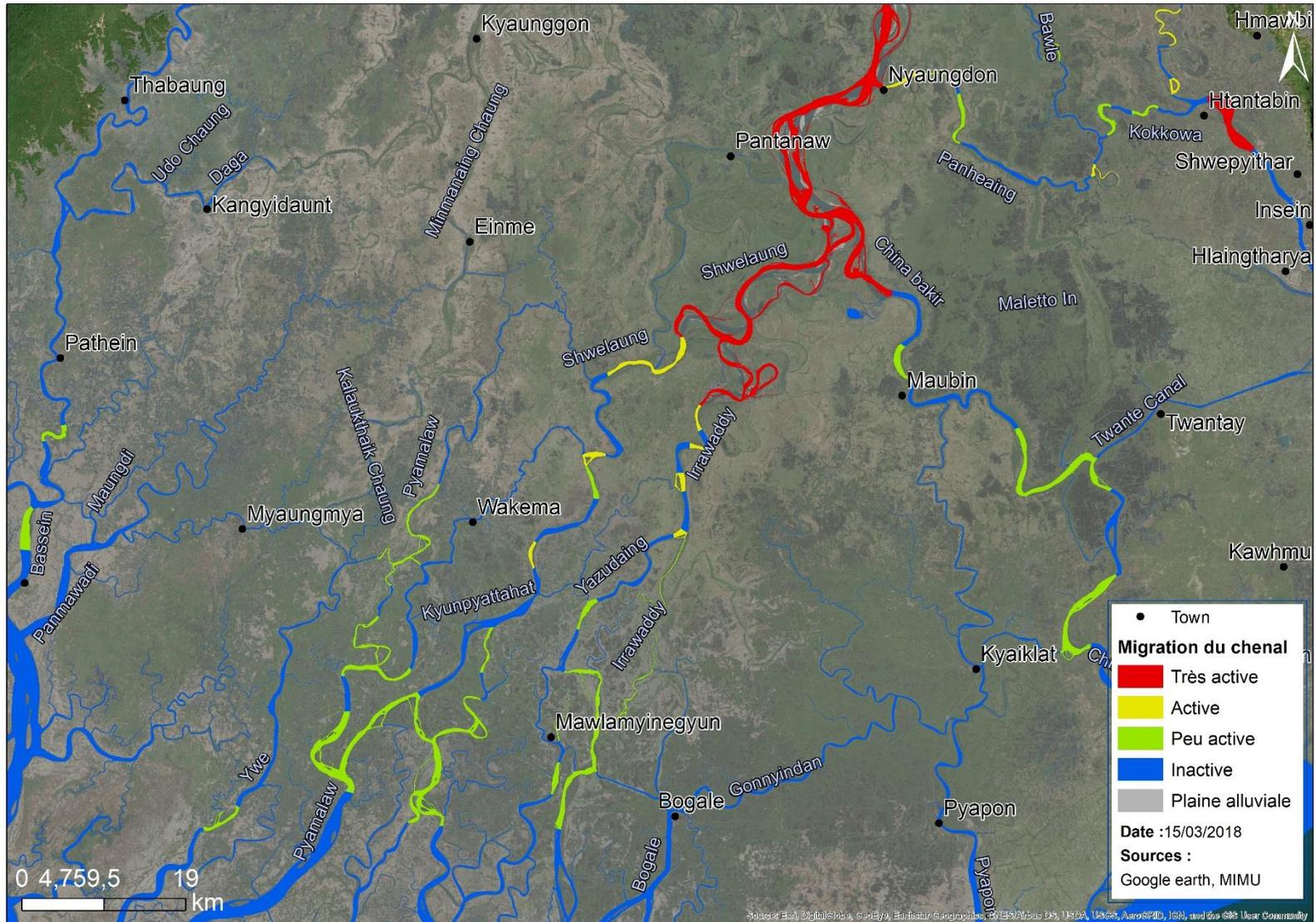


Figure 39 – Dynamique des chenaux du delta depuis 1967, partie aval (Sources : Google earth, MIMU)

## 1.2/ Résistance des aménagements depuis 1955-1967

Les endiguements présents de manière plus ou moins continue le long de l'Ayeyarwady et de ses multiples diffluences font une longueur minimale totale de 1393 km. Ces aménagements ont connu de nombreuses modifications depuis les débuts de leur construction par les britanniques à partir de 1860. Ici sur les figures 41 nous n'avons pu identifier que les modifications apportées entre 1955-1967 et 2018 à partir des cartes topographiques ou bien les quelques changements survenus localement et visibles sur les images Google earth disponibles.

Entre 1955-1967 et 2018, pas moins de 183 km de digues ont disparus, cela représente 18% des digues qui étaient présentes en 55-67. Ce chiffre de 183 km pourrait être doublé si l'on considère la stratégie d'aménagement, qui consiste à construire de nouvelles digues en retrait au fur et à mesure de l'avancée du fleuve, formant par endroit des strates successives de retrait, des dédoublements de digues. Certains secteurs ont connu de nombreuses reconstructions des digues (figure 40) mais ces digues probablement superficielles ne semblent pas résister face à l'affouillement lorsqu'elles sont situées au bord du chenal et particulièrement dans les concavités.

Les exemples explicités en figures 40 sont assez démonstratifs, on remarque l'angulosité des digues qui témoigne des axes autrefois empruntés par les digues mais aujourd'hui tronqués. Les aménagements sont construits année après année et il y a de grandes chances que cette érosion ne cessera « temporairement » que lorsque la courbe du chenal atteindra un point de rupture dans l'amplitude de sinuosité menant à une défluviation, et créant ainsi un bras mort à l'endroit de la courbe. Notons que la figure 40 (droite) correspond au site d'étude n°1 de Pyi Taw Thar.

On observe globalement que depuis 1955-1967, les endiguements n'ont eu de cesse de s'éloigner d'une rive à l'autre en laissant place au fleuve et à ses divagations. Il ne semble pas y avoir eu de situation inverse ou le fleuve aurait été d'avantage corseté depuis 1955-1967.

- 1393 km de digues sont présente en 2018 sur les marges fluviales du delta,
- 1178 km de digues étaient présentes en 1967,
- 1074 km de digues ont persistées depuis 1967 jusqu'à 2018,
- 183 km (minimum) de digue présente en 1967 ont été détruites entre 1967 et 2018.
- 319 km (minimum) de digues ont été reconstruites depuis 1967.

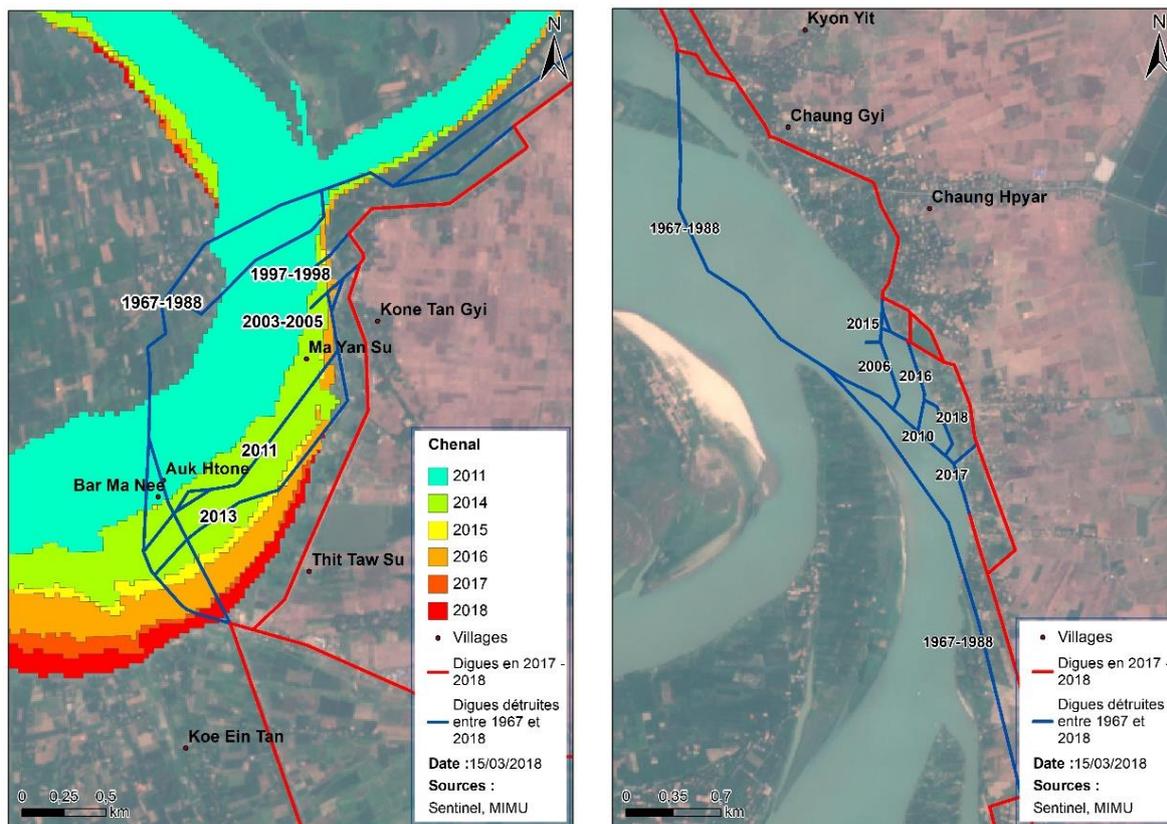


Figure 40 – Exemple non exhaustif de deux sites où les endiguements ont été détruits lors de crues puis reconstruits successivement. A gauche au nord-ouest du town de Maubin, ce secteur fut successivement détruit dans ce secteur en concavité par la progression du chenal postérieurement à 1967, la dernière digue encore présente sur l'image fut construite en 2013 au moment où la précédentes commençait à s'éroder ; à droite à Chaung Gyi au sud-ouest du town de Nyaungdon, secteur d'étude de Pyi Taw Thar, ce secteur en évolution plus lente dans cette branche a connu une succession de petites digues avec un retrait continu. L'érosion de ce secteur aurait pu débuter bien avant 1955 à en croire les cartes et la structure de la digue. (Sources : Sentinel 2, MIMU)

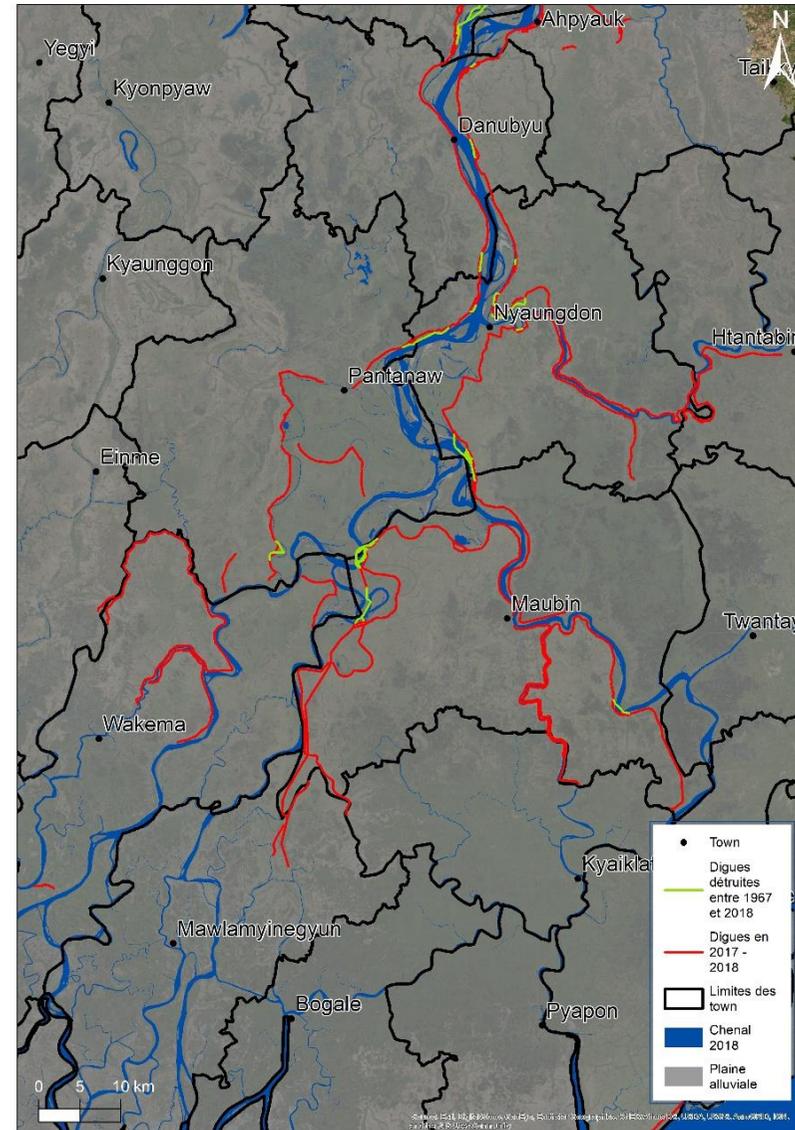
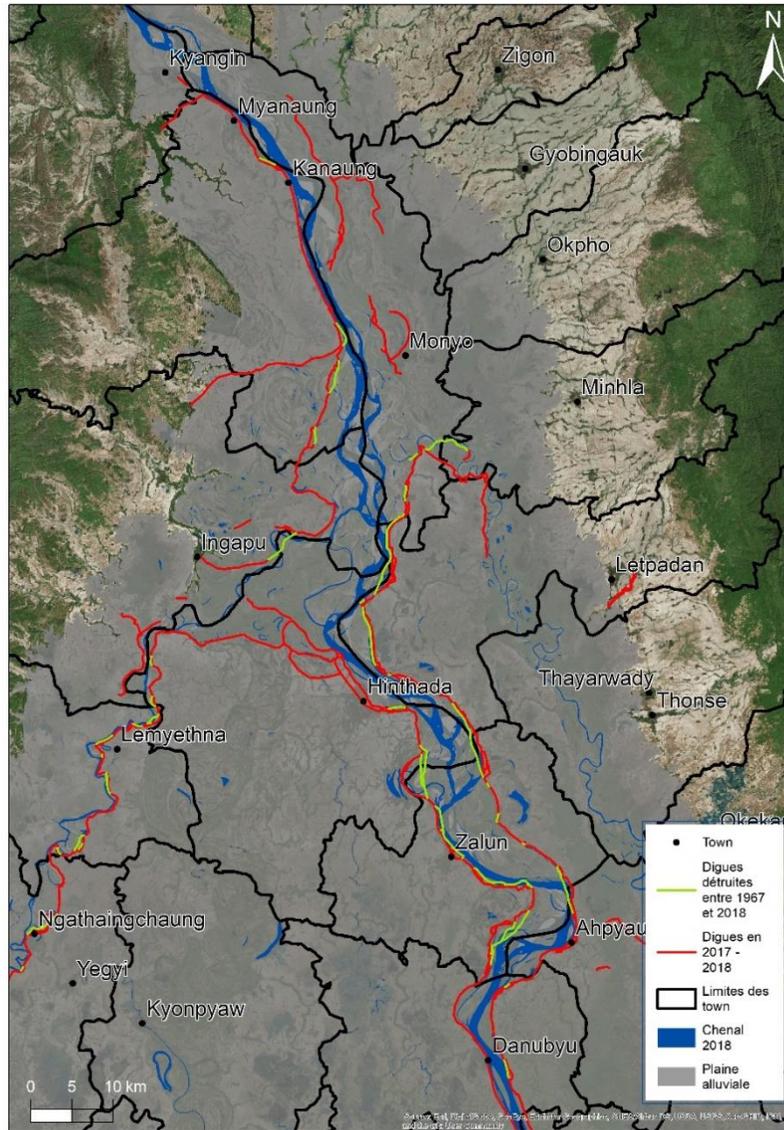


Figure 41 - Endiguement présents en 2018 et détruits entre 1955-1967 et 2018 (Sources : Google, MIMU)

### 1.3/ Échelle du tronçon sur le chenal principal

#### 1.3.1/ Tendence générale du chenal principal

La figure 42 représente les surfaces cumulées par tronçon en eau et les bancs de sable entre 1988 et 2018. Il permet d'identifier sur 30 ans les secteurs présentant de fortes dynamiques avec une proportion importante de bancs de sables ainsi qu'une faible surface en eau. En effet, les surfaces en eau et en bancs de sable de chaque année pour chaque tronçon ont été normalisées à l'échelle de la surface totale de mobilité sur ce tronçon vis-à-vis de la surface totale de la zone de mobilité de l'ensemble des tronçons. Les secteurs 7, 14 et 16 qui sont ceux qui cumulent les plus grandes surfaces sont ceux qui ont connu le moins d'amplitude et d'emprise latérale. Les tronçons 1,2 et 3 sont ceux qui ont connu le plus de mouvements avec une large emprise latérale durant les 30 ans. En termes de dynamique et d'amplitude de migration on peut classer grossièrement ces 17 tronçons en 3 groupes :

Tableau 6 – Classement des tronçons en fonction de leur amplitude latérale de mobilité

	1	2	3	4-5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Large																
Moyenne																
Faible																

On remarque sur le graphique 42 qui présente le cumule des surfaces en eau et sédiments par tronçon, une corrélation des surfaces de bancs de sable diminuant d'amont en aval. Mais la numérotation des tronçons n'est pas forcément fidèle à la répartition d'amont en aval en raison de la subdivision du chenal en 3 branches, Panheaing, China bakir et Shwelaung, puis de la subdivision de Shwelaung en deux autres branches. C'est pour cette raison que le tronçon 17 se situe sur le graphique après le tronçon 9 qui correspond à la branche de Panheaing (au niveau de Nyaungdon) tandis que le tronçon 15 précède le tronçon 14.

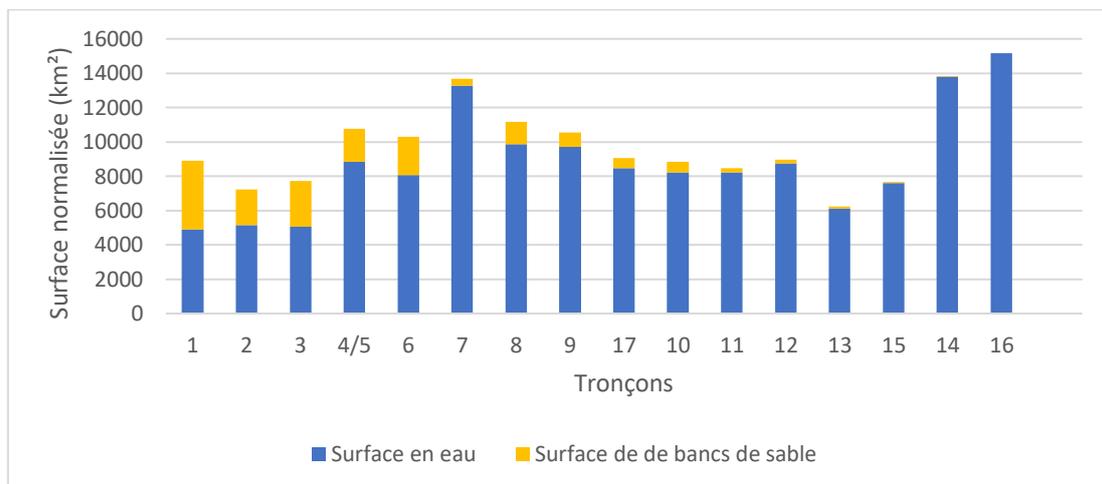


Figure 42 – Surfaces cumulées en eau et en bancs de sable entre 1988 et 2018, classé d'amont en aval (voir annexe 4)

Une analyse du bilan surfacique par agrégation des surfaces en eau et des surfaces de banc de sable a été réalisée entre chaque année en dehors des années 2012 et 2013. La figure 43 correspond à la répartition des bilans surfacique d'une année sur l'autre entre 1988 et 2018 pour chaque tronçon, exprimé en pourcentage de la surface de chacun des tronçons. On observe globalement au niveau de la médiane de l'ensemble des tronçons que sur l'ensemble des années il y a plus de tronçon en

accrétion que de tronçons en érosion. Les secteurs 2, 3, 17, 10, 12, 13 et 15 ont une médiane négative, en dehors du tronçon 17 (la branche de Nyaungdone) qui est proche de 0, les tronçons négatifs ont une médiane qui varie entre -0,2% et -0,3%. En ce qui concerne les secteurs ayant une médiane positive (tendant davantage vers une accrétion), on remarque des valeurs bien au-dessus du reste concernant les tronçons 4-5 avec 2%, 8 avec 0,6% et 11 avec 1%.

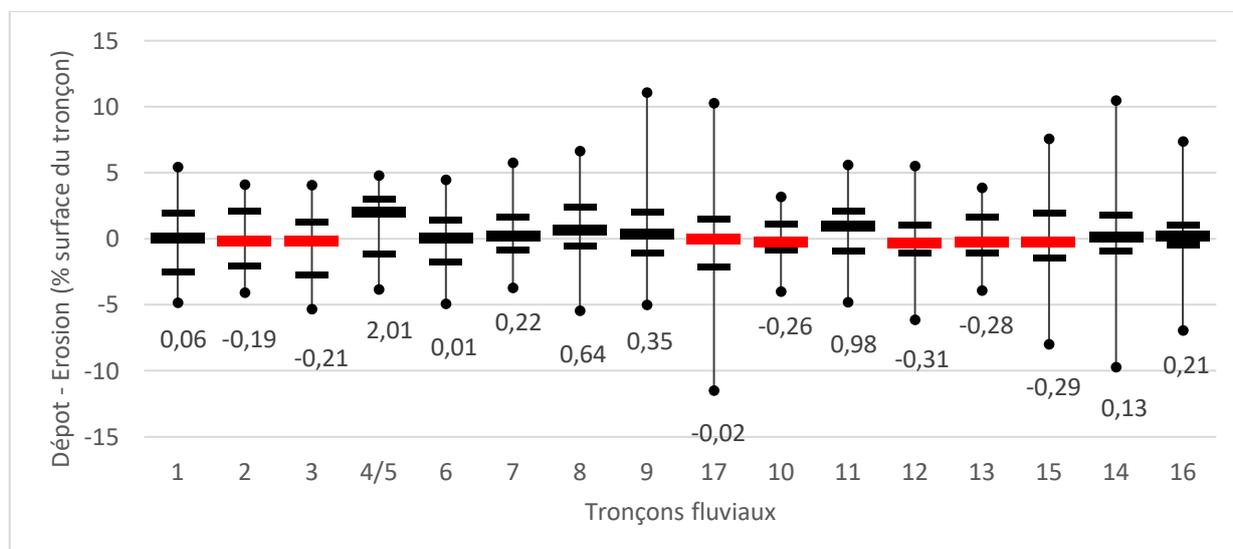


Figure 43 - Bilan surfacique exprimé en pourcent de la surface de chaque tronçon sur 30 ans et par tronçon

Le tableau 7 présente la recette des bilans de chaque année entre 1988 et 2018 ainsi que la somme totale de l'ensemble des tronçons, exprimé en superficie érodée ou gagnée ainsi que le pourcentage par rapport à la surface du tronçon. On remarque que la moitié des tronçons présentent un bilan négatif sur 30 ans avec notamment les secteurs 3 et 17 qui montrent une érosion particulièrement importante. Concernant les tronçons ayant un bilan positif on observe globalement des résultats bien plus importants, notamment sur les tronçons 4-5 avec 25% du tronçon gagné en terre, le tronçon 8 qui a gagné 21% ou encore le secteur 11 avec près de 19% en plus. A l'échelle de l'ensemble des tronçons regroupés, on constate que le bilan est tout juste positif avec 0,58% de territoires gagnés sur le fleuve, soit 3,85 km<sup>2</sup> de terre.

Tableau 7 – Bilan surfacique total de 1988 à 2018, voir figure 44

Tronçons	Surface du tronçon (km <sup>2</sup> )	Bilan total (km <sup>2</sup> )	Pourcentage de la surface du tronçon
1	165,11	-4,80	-2,91
2	46,96	-1,08	-2,29
3	95,40	-13,54	-14,20
4 et 5	29,46	7,46	25,34
6	58,41	-2,92	-5,00
7	31,62	2,84	8,98
8	27,45	5,69	20,72
9	23,92	3,98	16,63
10	68,43	-1,12	-1,64
11	36,22	6,72	18,54
12	15,76	-0,44	-2,82
13	28,31	0,17	0,59
14	10,44	1,15	11,03
15	20,34	-0,05	-0,25
16	2,90	0,20	7,03
17	4,30	-0,41	-9,45
<b>Total</b>	<b>665,03</b>	<b>3,85</b>	<b>0,58</b>

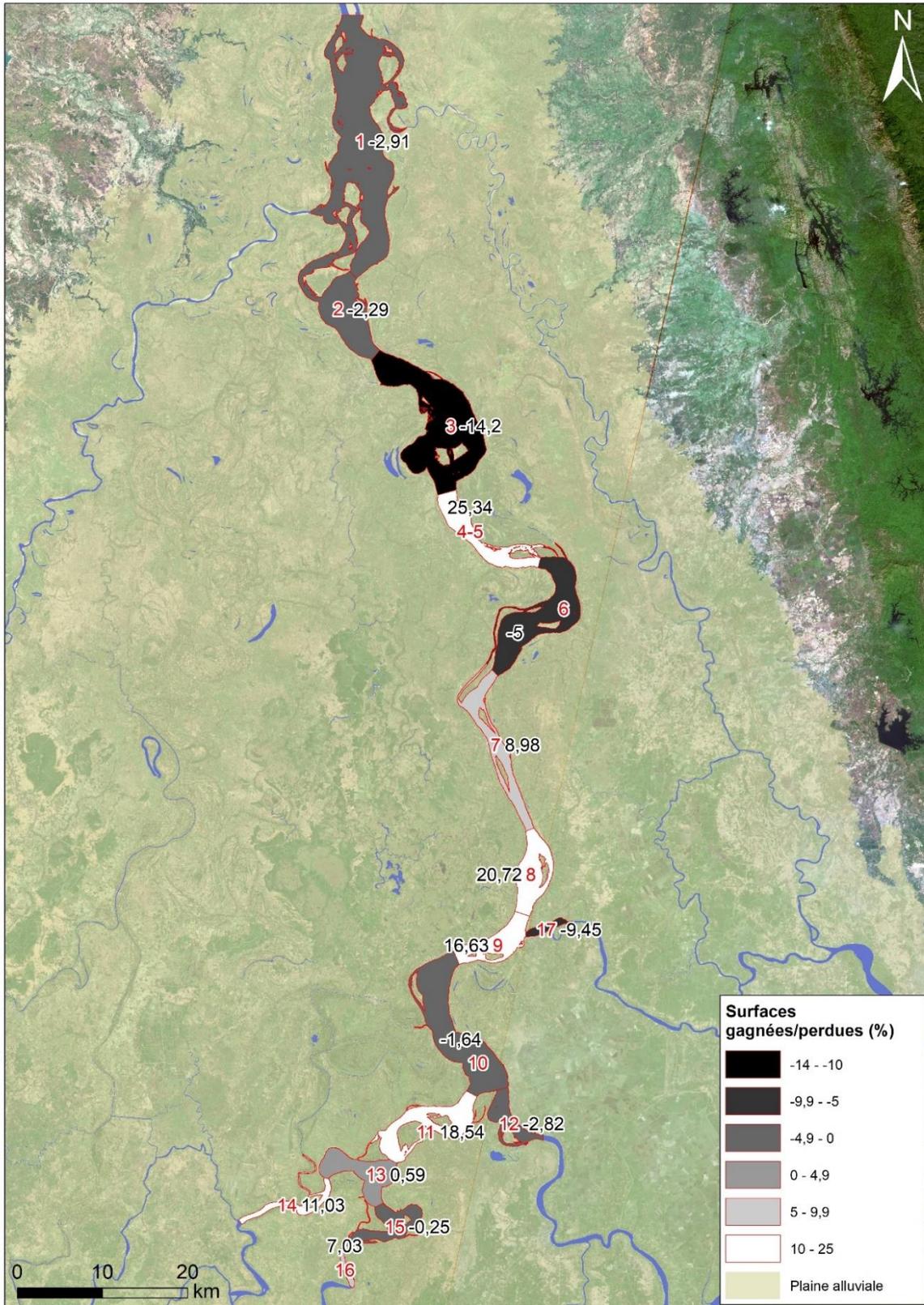


Figure 44 – Bilan surfacique entre 1988 et 2018, surfaces de terres gagnées et perdues exprimées en pourcentage de la surface du tronçon, données correspondantes au tableau 7 (Sources : Sentinel 2)

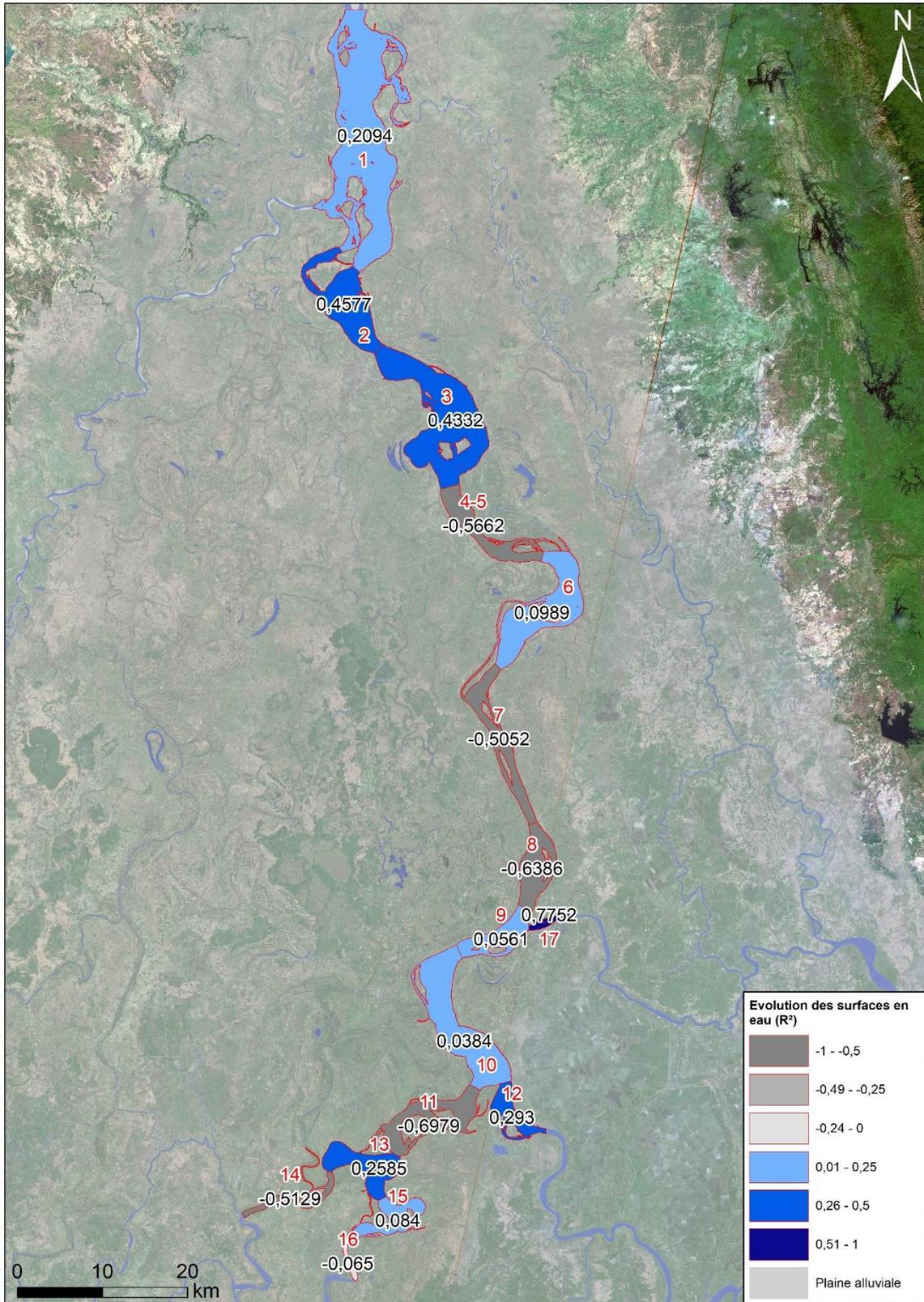


Figure 45 – Tendence évolutive des surfaces en eau entre 1988 et 2018 ( $R^2$  = coefficient de détermination linéaire sur la période 1988-2018, les graphiques correspondant à ces données sont en annexe 4). On remarque que les secteurs 2, 3 et 17 connaissent depuis 1988 une forte augmentation de leur surface en eau tandis qu'à l'opposé les secteurs 4-5, 7, 8, 11 et 14 se seraient rétractés avec une diminution importante de leur surface relative. (Sources : Sentinel 2)

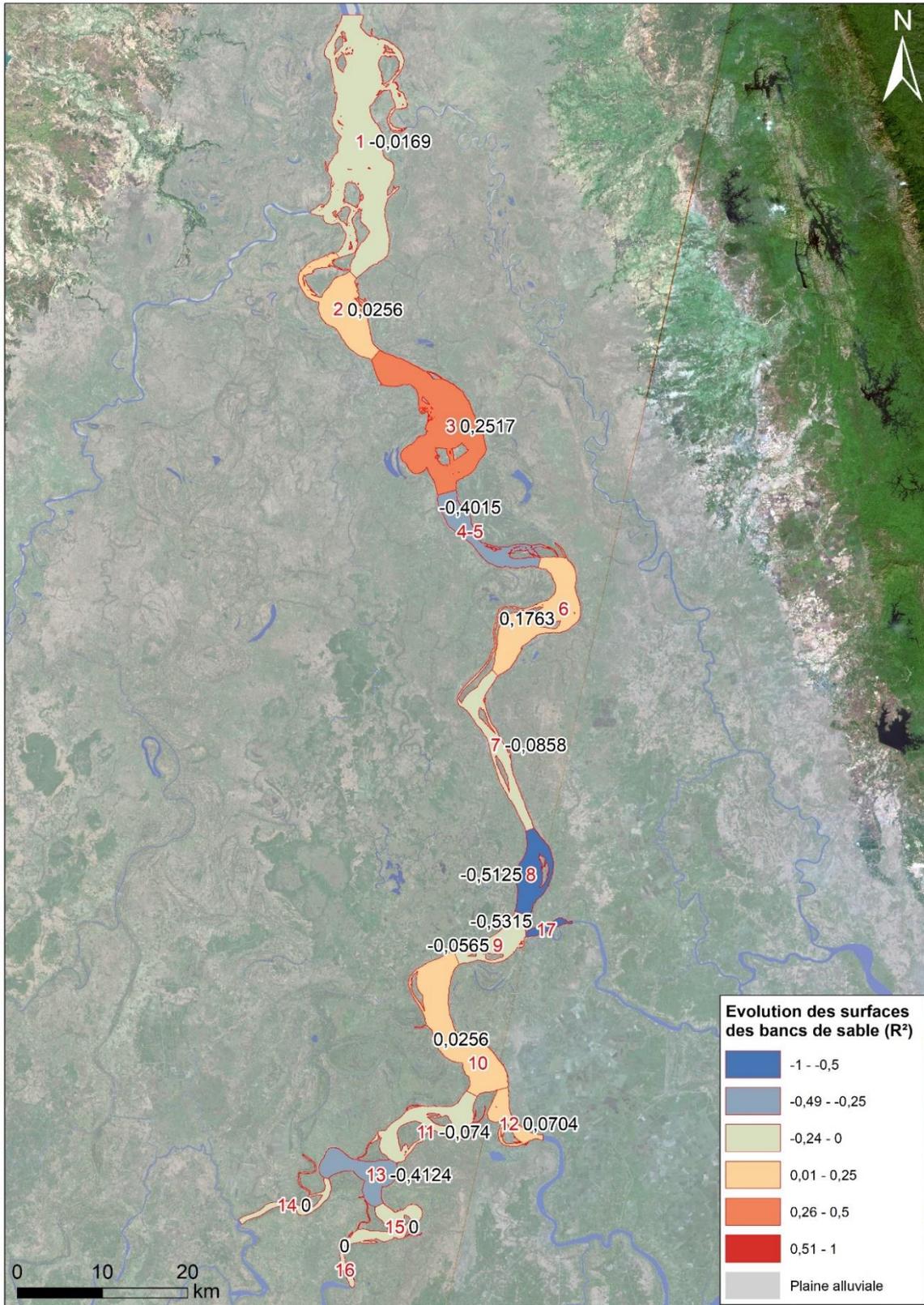


Figure 46 - Tendence évolutive des surfaces de banc de sable entre 1988 et 2018 ( $R^2$  = coefficient de détermination linéaire sur la période 1988-2018, les graphiques correspondant à ces données sont en annexe 4) On constate que les secteurs 8 et 17 présentent une forte diminution des bancs de sables ainsi que les tronçons 4-5 et 13. A l'opposé seul le secteur 3 montre une augmentation des surfaces de dépôts de sable et dans une moindre mesure le tronçon 6. (Sources : Sentinel 2)

### 1.3.2/ Analyses des tronçons des archipels

Ici nous présentons une analyse des résultats pour les tronçons dans lesquels sont inclus les archipels étudiés. Le secteur n°1 de Pyi Taw Thar correspondant au tronçon 10, le site n°2 de Shwe Gin Dar Kyun correspondant au tronçon 8 et le site n°3 de Yae Paw Taung correspondant au tronçon 6.

#### Tronçon 10 / Archipel n°1 (Pyi Taw Thar)

Ce tronçon comprend la zone d'étude N°1 de Pyi Taw Thar située en aval du tronçon, il s'agit d'un tronçon assez vaste (68 km<sup>2</sup> de fuseau de mobilité 1988-2018)) et ressemblant beaucoup au tronçon n°6. En 2018 il était structuré par deux chenaux sur la majorité de sa longueur et sa partie aval correspondait à la deuxième zone de diffluence de l'Irrawaddy en deux branches, la China bakir (est) et de la Shwelaung (ouest).

Dans ce secteur, les endiguements sont assez éloignés du chenal et les paléochenaux permettent d'identifier une activité du fleuve bien plus à l'ouest avant 1955. En dehors de l'extrémité amont et de la partie aval en rive gauche au niveau de l'agglomération de Chaung Gyi qui a connu un retrait constant de ses digues depuis 1967 (et probablement bien avant) face à la migration du fleuve vers l'est. Cette érosion avance chaque année et devrait se poursuivre encore pendant plusieurs années. Depuis 1967, au moins 12 km de digues ont disparu dans ce tronçon, dont pas moins 4,2 km au sud du village de Chaung Gyi, depuis 2010. On remarque sur le graphique des surfaces cumulées que sur 30 ans ce tronçon connaît une amplitude de migration modérée. Les surfaces en eau ( $R^2 = 0,0384$ ) et les surfaces de banc de sables ( $R^2 = 0,0256$ ) de ces secteurs sont très constantes durant les 30 années et on remarque des fluctuations entre avant et après 2007. Les surfaces de banc de sables sont faibles, ce qui s'explique par la localisation de ce site très en aval, dans des secteurs où l'influence des marées est déjà très perceptible. Le bilan surfacique sur 30 ans est négatif, surtout depuis 2004 avec une médiane de -0,26 % et une perte de 1,64 % de terres (1,12 km<sup>2</sup>) au profit du fleuve en 30 ans. Seules les période 1993-1995 et 2001-2003 tendraient vers une accrétion.

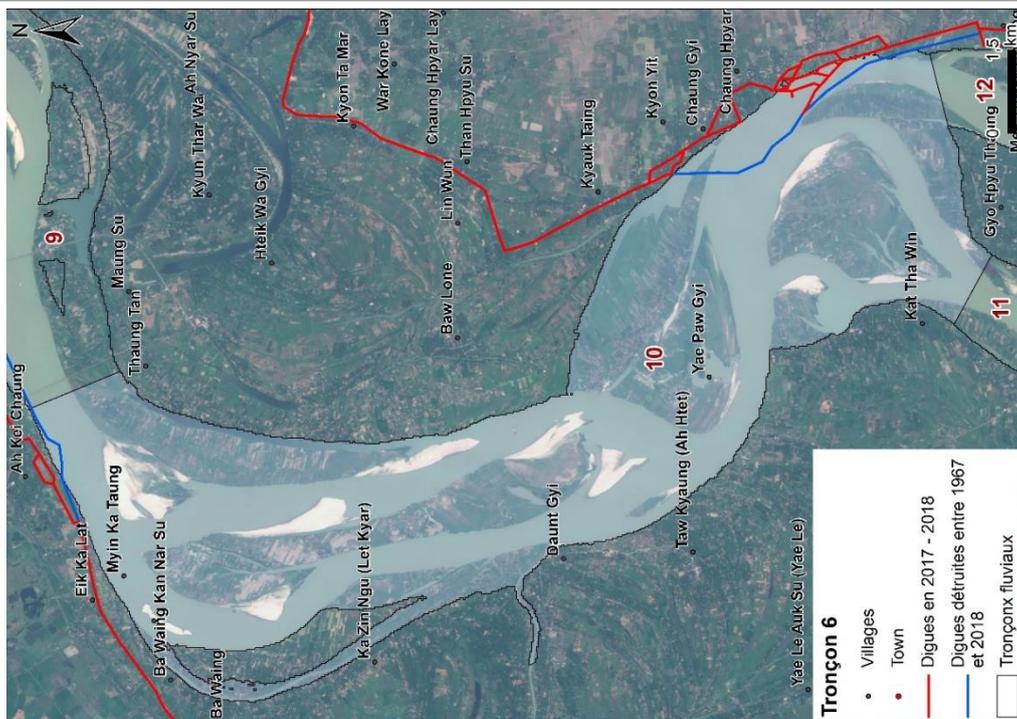
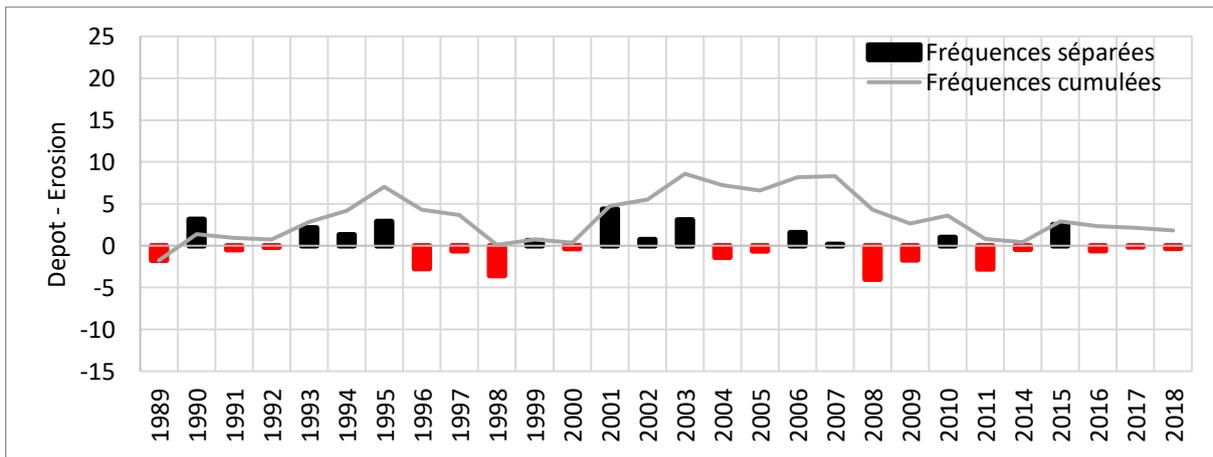
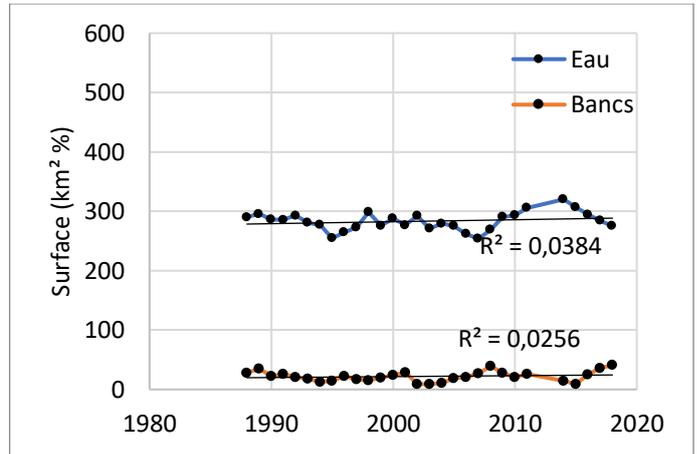
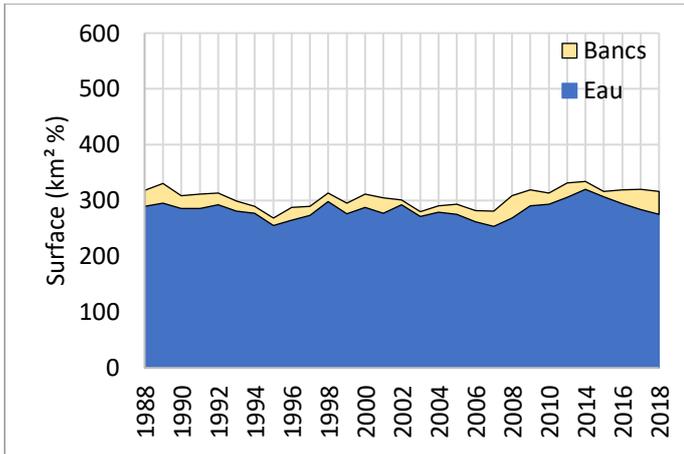


Figure 47 - Evolution du tronçon 10, le graphique en haut à gauche montre les surfaces de la bande active (eau + banc de sable) tandis que le graphique en haut à droite reprend les mêmes données tout en permettant de mieux discerner l'évolution des surfaces en eau des surfaces de banc de sable, ces graphiques ont été normalisé à l'échelle de tous les tronçons. Le graphique du bas représente le bilan surfacique par année. La carte représente le tronçon avec le fuseau de mobilité 1988-2018 ainsi que les digues présentes en 2017-2018 et celles disparues depuis 1955-1967.

## Tronçon 8 / Archipel 2 (Shwe Gin Dar Kyun)

Ce tronçon d'une surface de 27 km<sup>2</sup> de fuseau de mobilité 1988-2018 correspond à la totalité de zone d'étude n°2 (Shwe Gin Dar Kyun / Tha byu Ye Le Kyun). Il s'agit d'une zone d'élargissement du chenal succédant à 20 km de chenal unique ou presque. On constate au moins 4 îles en 2018 et la présence de 4 chenaux durant la saison sèche. On remarque que depuis 1967 les endiguements n'ont connu que quelques petits réajustements sur une faible translation latérale du fleuve correspondant à 4,68 km. Il s'agirait en 2018 d'une zone de stockage des sédiments en provenance du tronçon 6 et transféré par le tronçon 7 qui est rectiligne et de plus en plus concentré avec plutôt une fonction de transfert des sédiments et peu d'espace de stockage.

On observe sur les courbes et sur le graphique des surfaces cumulées que globalement ce secteur reste assez stable avec une amplitude de mouvement moyenne sur 30 ans. Les surfaces en eau ont nettement diminué depuis 1988 ( $R^2 = 0,6386$ ) avec une baisse progressive mais surtout visible depuis les années 2000. On observe une tendance semblable concernant les surfaces de banc de sables ( $R^2 = 0,5125$ ) avec une rupture marquée entre avant et après 2002 menant vers une diminution constante. Le bilan surfacique général est nettement positif avec une médiane à 0,64% et un gain de terre de 20,7% de la surface du tronçon, soit 5,7 km<sup>2</sup> gagné sur le fleuve. On constate sur le graphique du bilan annuel que depuis 1999 le secteur a été en constante accrétion en dehors des années 2001, 2008 et 2018 qui étaient des années où l'érosion était dominante.

Sur ce tronçon, nous serions donc plutôt face à un chenal principal qui se rétracterait de plus en plus, en abandonnant des chenaux secondaires et en concentrant ses eaux. Cela signifie que nous serions plutôt sur un lieu de stockage des sédiments mais que ces dépôts diminueraient au fur et à mesure de l'élévation des terres. Le tronçon aurait une fonction de plus en plus de transfert sédimentaire, dans le prolongement du tronçon 7.

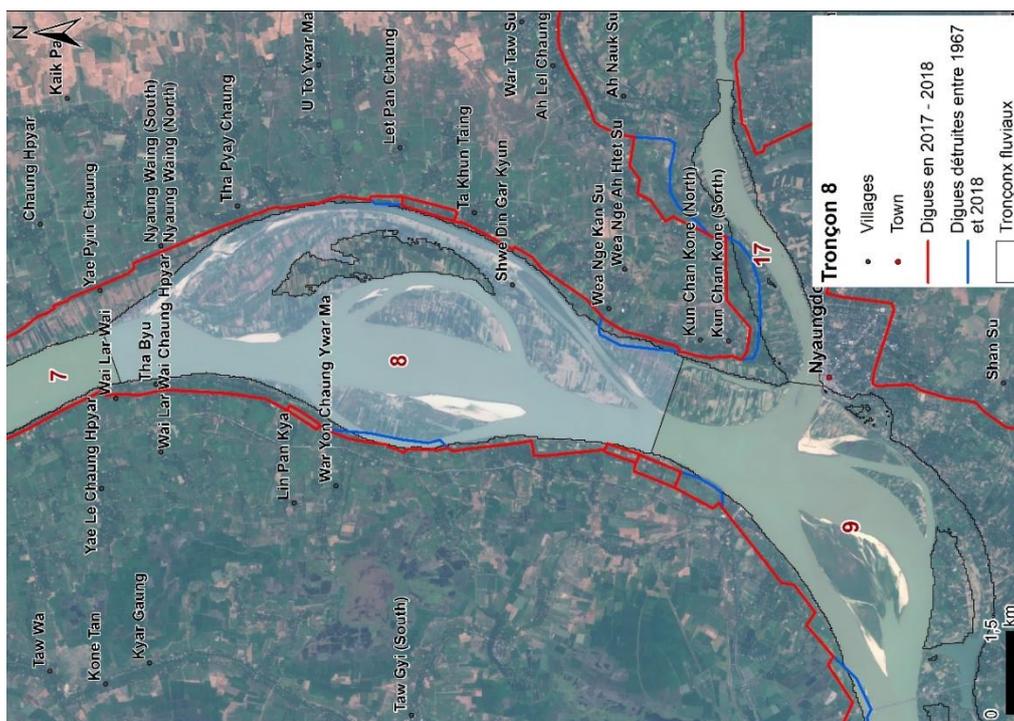
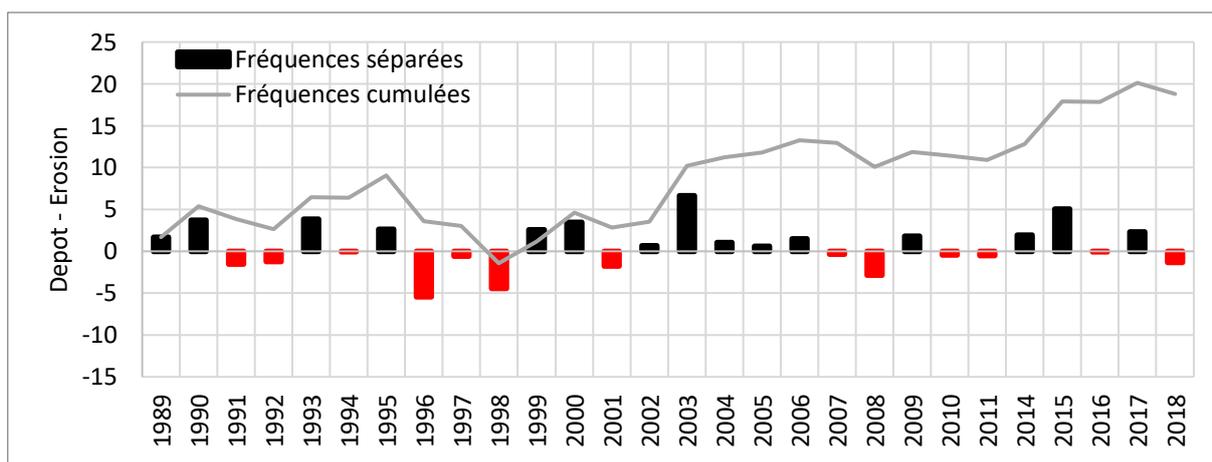
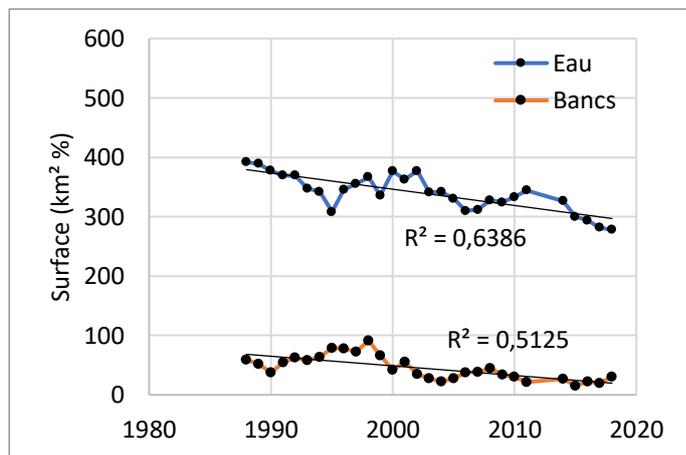
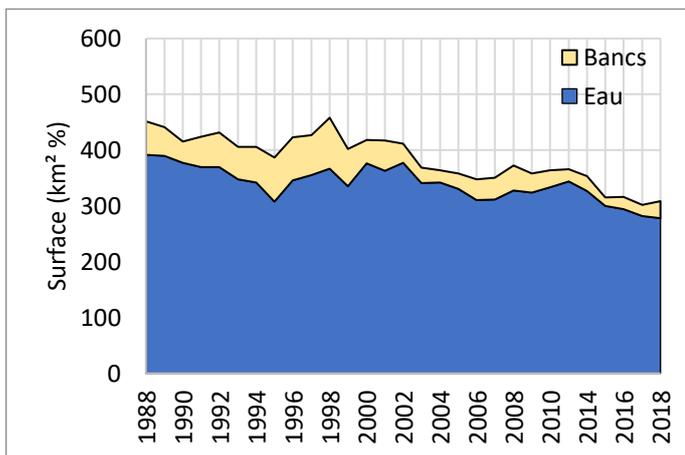


Figure 48 – Evolution du tronçon 8, le graphique en haut à gauche montre les surfaces de la bande active (eau + banc de sable) tandis que le graphique en haut à droite reprend les mêmes données tout en permettant de mieux discerner l'évolution des surfaces en eau des surfaces de banc de sable, ces graphiques ont été normalisé à l'échelle de tous les tronçons. Le graphique du bas représente le bilan surfacique par année. La carte représente le tronçon avec le fuseau de mobilité 1988-2018 ainsi que les digues présentes en 2017-2018 et celles disparues depuis 1955-1967.

## Tronçon 6 / Archipel 3 (Yae Paw Taung)

Ce tronçon d'une surface de 58 km<sup>2</sup> comprend la zone d'étude n°3 (Yae Paw Taung) qui est située dans la moitié aval du tronçon. Ce secteur est particulièrement complexe et dynamique, on observe une migration des îles par transfert progressif vers l'aval. Ce tronçon est formé de chenaux principaux et de chenaux secondaires déconnectés en saison sèche formant des anabranches dynamiques. En 2018 au moins deux chenaux sont présents, parfois trois sur certaines parties en aval. On constate également la présence d'une anabranchement en rive droite restée stable pendant 30 ans et formant un canal parallèle qui relie le fleuve 22 km en aval. Les endiguements sont présents sur toute la longueur du chenal, au moins 18,5 km de digues ont disparu depuis 1967, ce qui correspond approximativement à 50% de la longueur des digues présentes en 2018 sur ce tronçon. On observe une amplitude de mouvement moyenne sur 30 ans sur le graphique avec une surface en eau assez constante ( $R^2 = 0,0989$ ), on remarque sur le graphique que les surfaces de bancs de sable sont importantes et semblables au tronçon 3 (annexe 4). Ces surfaces de banc de sable restent également constantes sur les 30 ans ( $R^2 = 0,1763$ ). Le budget sédimentaire de 1988 à 2018 est quasiment neutre avec une médiane à 0,01% mais néanmoins un bilan sur 30 ans négatif avec -5 % de la surface du tronçon, soit 2,92 km<sup>2</sup> de terres perdues. Sur le plan inter annuel on constate aussi que ce budget tourne autour de 0 avec une période plutôt négative (érosion) avant 2003.

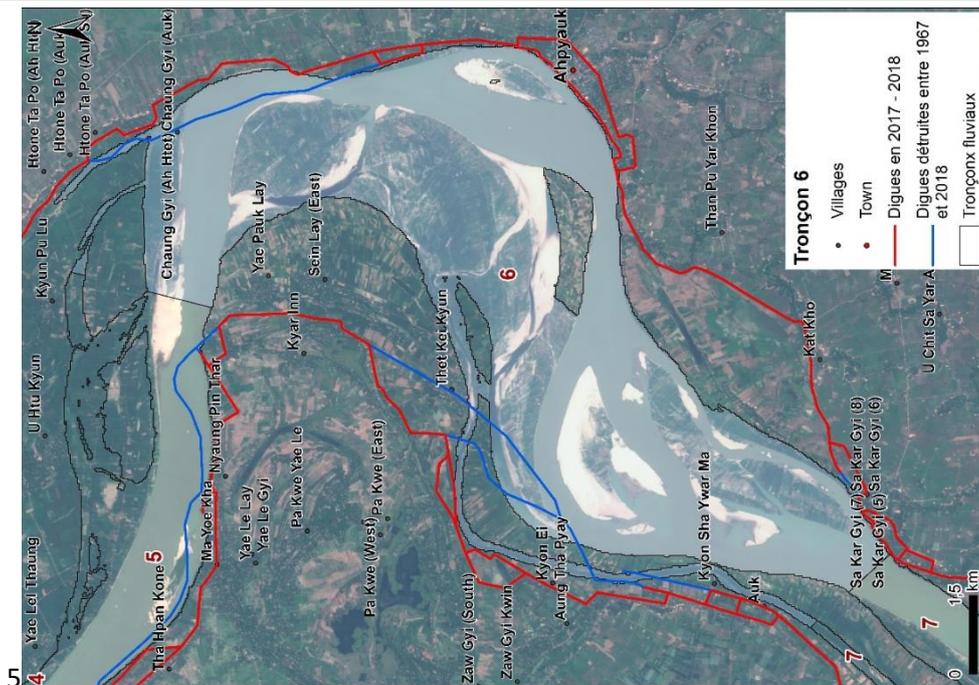
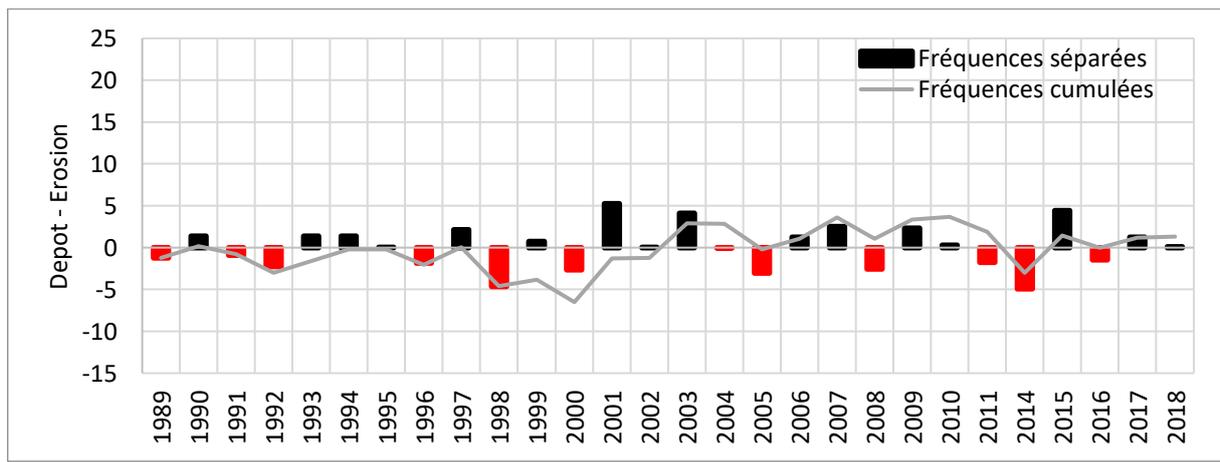
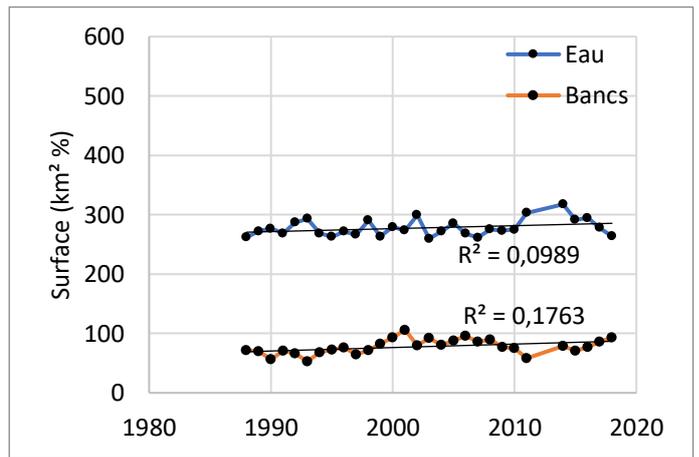
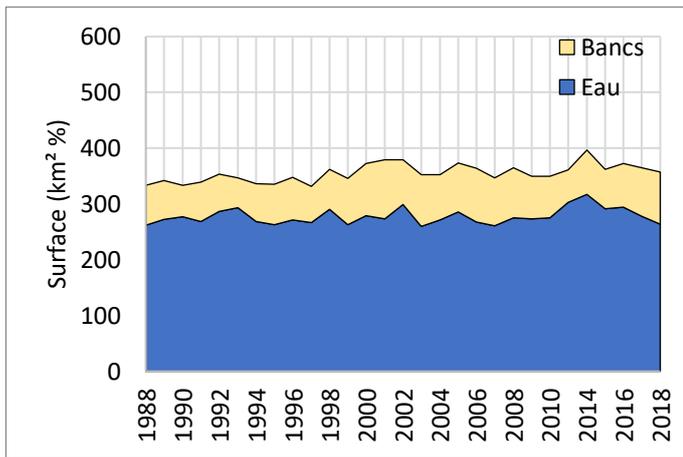


Figure 49 - Evolution du tronçon 6, le graphique en haut à gauche montre les surfaces de la bande active (eau + banc de sable) tandis que le graphique en haut à droite reprend les mêmes données tout en permettant de mieux discerner l'évolution des surfaces en eau des surfaces de banc de sable, ces graphiques ont été normalisé à l'échelle de tous les tronçons. Le graphique du bas représente le bilan surfacique par année. La carte représente le tronçon avec le fuseau de mobilité 1988-2018 ainsi que les digues présentes en 2017-2018 et celles disparues depuis 1955-1967.

## 2/ Etude de trois « archipels » 1955-2018

### 2.1/ Site de Pyi Taw Thar (Nyaungdon / Pantanaw)

En 2018 il s'agit d'un secteur assez complexe, correspondant à la zone de difffluence entre les branches de la China bakir et le Shwelaung et correspond à un plus grand ensemble (tronçon 10) avec une forte mobilité latérale. Ce secteur présente une grande complexité en raison de sa position de carrefour entre deux branches majeures. Comme on peut le voir sur la figure 34 et en annexe 5.1 concernant les branches qui succèdent directement à ce site. La branche de Shwelaung (tronçon 11) semble se retracter peu à peu en un chenal unique avec d'avantage de dépôts que d'érosion, tandis que la branche China bakir (tronçon 12) semble plutôt aller vers un processus inverse avec d'avantage d'érosion et un élargissement des surfaces en eau depuis 2014 mais néanmoins deux époques différentes entre avant et après 2003. Il est probable qu'actuellement en 2018, la branche de China bakir soit dans une phase plus vive avec un gain d'énergie, qui pourrait s'expliquer par la physiologie du chenal en amont. La branche China bakir est située dans le prolongement de la courbure du fleuve en amont, là où le courant est le plus fort, tandis que la branche Shwelaung aujourd'hui divisée en deux branches par l'île de Pyi Taw Tar pourrait avoir un peu perdu en énergie et aurait tendance à se stabiliser temporairement et à s'insister. On remarque en 2018 la présence de bancs de sables au milieu du chenal de la China bakir à l'endroit de sa difffluence, ce qui pourrait être un indice de changement de dynamique. On observe sur la carte de datation des sols (figure 51) que la berge située dans la courbe se prolongeant vers la China bakir est antérieure à 1988 et on remarque sur la figure 41 (endiguements détruits) que depuis 1967 au moins, le fleuve n'a jamais cessé de migrer vers l'est et de ronger petit à petit les berges situées au niveau des villages de Chung Gyi. Il est fort probable que ces berges soient très anciennes et n'aient jamais été érodées par le fleuve depuis au moins la mise en place des endiguements au 19<sup>e</sup> siècle. Comme on le voit au travers des cartes de 1955 et des images satellites (Annexes 3) le fleuve se déploie depuis au moins 63 ans dans une zone assez définie. Cependant on peut remarquer grâce aux paléochenaux (méandriques) situés plus à l'ouest, que le fleuve évoluait autrefois beaucoup plus vers l'ouest, peut être lorsqu'il était connecté à une des difffluences de la Daga lorsque celle-ci était encore connectée en amont.

L'observation des images satellites permet de constater que l'évolution des chenaux ne subit aucune contrainte et que les vieilles berges de l'est ne présentent qu'une faible cohésion face au fleuve. On observe depuis 1967 une certaine cyclicité « chaotique » de ce secteur. Le modèle, illustré par les figures en annexe 7.1, pourrait être schématisé ainsi :

- 1 : Une naissance des îles par accrétion de bancs de sables de convexité sur les rives droite en amont.
- 2 : Accroissement de la surface du banc jusqu'à obstruction partielle du chenal.
- 3 : Insularisation par avulsion du banc de sable et donc établissement d'un chenal en rive gauche.
- 4 Migration du banc en aval avec accrétion progressive sur les parties aval, élargissement de l'île et érosion sur les parties amont, en parallèle d'une érosion de la rive gauche des terrains situés en aval de l'île, sur l'autre rive (Péninsule de Pyi Taw Thar) en raison de la translation du chenal.
- 5 : Le chenal en aval de l'île prend une courbure dont l'angle est de plus en plus aigu.
- 6 : Déconnexion du chenal en aval de l'île, devenu bras mort par sa perpendicularité aux courants et vis-à-vis des chenaux principaux (ici entre les deux branches China bakir et Shwelaung).
- 7 : Atterrissement progressif du bras mort connectant ainsi l'île (qui ne l'est plus) avec les terres « fermes » situées au sud.

On peut observer 3 cycles entre 1955 et 2018 : de +/-1955 à 1973 ; de 1973 à 2000 ; de 2000 à 2018 mais en 2018 le processus n'est toujours pas abouti et pourrait prendre encore entre 3 et 5 ans avant que l'île de Pyi Taw Tar ne soit agrégée aux terres de Gyo Hpyu Thaung en aval.

La carte de datation des sols (figure 51), permet de constater qu'en 2018, les plus anciens terrains (sur le point d'être érodés) de l'île de Pyi Taw Tar sont apparus en 2005 et sont situés à l'ouest (figure 51), en concavité de l'île au niveau des habitations (appartenant au village de Pyi Taw Tar) et dont certaines situées en bordure du fleuve sont présentes depuis 6 ans (donc installées vers 2012). A cette époque les terrains étaient formés depuis 7 mais restaient localisés sur un banc de convexité actif, fortement soumis à l'activité du fleuve, ils ne se sont réellement éloignés du fleuve que vers 2008.

Concernant l'autre rive, sur la péninsule au niveau de Pyi Taw Thar Yawar Ma, les terrains les plus anciens sont antérieurs à 1988, probablement entre 1967 et 1973 (au niveau du village de Gyo Hpyu Thaung). Mais les terrains au sud-ouest du village de Pyi Taw Thar Yawar Ma sont apparus en 1996, tandis que les terres où est localisé le village n'existent que depuis 1998-2002. Une autre partie du village existait encore en 2017 plus au nord sur des terrains apparus en 2002. En 2018 ces habitants se sont installés sur la partie est de Pyi Taw Tar sur des terrains formés entre 2011 et 2014.

En 2018 la progression de l'île de Pyi Taw Thar et les dépôts se forment sur les parties est (figure 51, gauche). Sur la péninsule de Pyi Taw Thar Yawar Ma cette progression se fait par le sud-est et devrait continuer ainsi durant plusieurs années à moins que le fleuve ne traverse précocement le village de Pyi Taw Thar Yawar Ma par une défluviation en raccordant et réactivant le bras mort situé dans son prolongement.

On constate sur le découpage administratif des townships (figure 51), qu'en 2018 l'île de Pyi Taw Tar est coupée en deux townships, au nord (Nyaungdone) tandis que le sud se trouve sur les territoires de Pantanaw. Jusqu'à 2004 l'île était située exclusivement sur le territoire de Pantanaw, mais ce n'est qu'à partir de 2005 que l'île a migré sur des territoires de Nyaungdone, ces mêmes espaces occupés en 2018 à l'ouest de l'île. A Pyi Taw Thar Yawar Ma, en 2018, la majorité des terres font partie du township de Pantanaw tandis que ne subsiste sur les territoires de Nyaungdone que de petits espaces à l'extrémité nord (bientôt érodée) et les bordures est (en cour d'accrétion).

## Pyi Taw Thar Yawar Ma

En 2018 on observe sur la péninsule de Pyi Taw Thar Yawar Ma un habitat regroupé sur les secteurs ouest avec quelques habitats dispersés dans les secteurs les plus récents à l'est. Les images Google earth montrent que le village était présent en 2010 mais absent en 2004 car l'emplacement du village était à ce moment-là en bordure du fleuve (branche China bakir). Les images Landsat (résolution 30 m) suggèrent une très probable installation en 2009, sur des terrains abandonnés par le fleuve depuis 2006.

En 2016 le village était divisé entre deux sites, l'un au nord de la « péninsule » et l'autre était Pyi Taw Thar Yawar Ma. Le village au nord a commencé à disparaître en 2016 lors de la crue (figure 50, A1), l'année suivante (2017) des habitations étaient installées sur l'autre rive (nouveau village), sur l'île de Pyi Taw Thar (figure 50, A2). Des habitations faisant probablement parties du même village étaient également installées encore plus au nord, à l'apex de la péninsule jusque vers 2015 avant de disparaître en 2016. Il semblerait d'après les images Google earth (très haute résolution) qu'aucune habitation n'était présente avant 2017 au niveau du nouveau village (figure 50, A1). Même si d'après les habitants, en 2014 il y avait quelques maisons, en 2015 environ 30 habitants, en 2016 environ 120 et en 2018 quelques un en plus. Durant la saison des pluies de 2017 le reste du village a déménagé du secteur nord pour s'installer sur l'autre rive (du moins une partie). Des vestiges d'habitations étaient présents en 2018 et montraient que certaines maisons les plus loin dans les

terres n'avaient pas disparues à cause de l'érosion. Elles ont été démontées par anticipation, mais se situaient à très grande proximité de ce qui est aujourd'hui (2018) la berge (30 à 50 m). Le village sud de Pyi Taw Thar Ywar Ma a également commencé à disparaître en 2016, mais seulement sur ses marges, c'est surtout à partir de 2017 que le village a commencé à être entamé par le fleuve (figure 50, B2, ligne rouge).

L'île de Pyi Taw Thar était occupée par deux principaux villages l'un à l'est, le nouveau village (déjà cité) et un autre à l'ouest. Un regroupement composé de quelque maison était également présent sur la partie centrale de l'île ainsi que quelques habitats dispersés sur la partie nord de l'île au milieu des champs de piment. Le village de l'ouest que nous avons visité, faisait partie de Pyi Taw Thar, ce village a commencé à disparaître durant l'été 2017, les habitants se seraient alors réinstallés dans le nouveau village à l'est ou dans des habitats dispersés. Les terres sur lesquelles est présent ce village ont apparues en 2005-2006. Lors de notre passage, les habitants des lieux nous ont affirmé que le village était présent depuis 2012, cependant les images Google earth montrent la présence d'habitats diffus en 2010 puis une « densification » après l'été 2013.

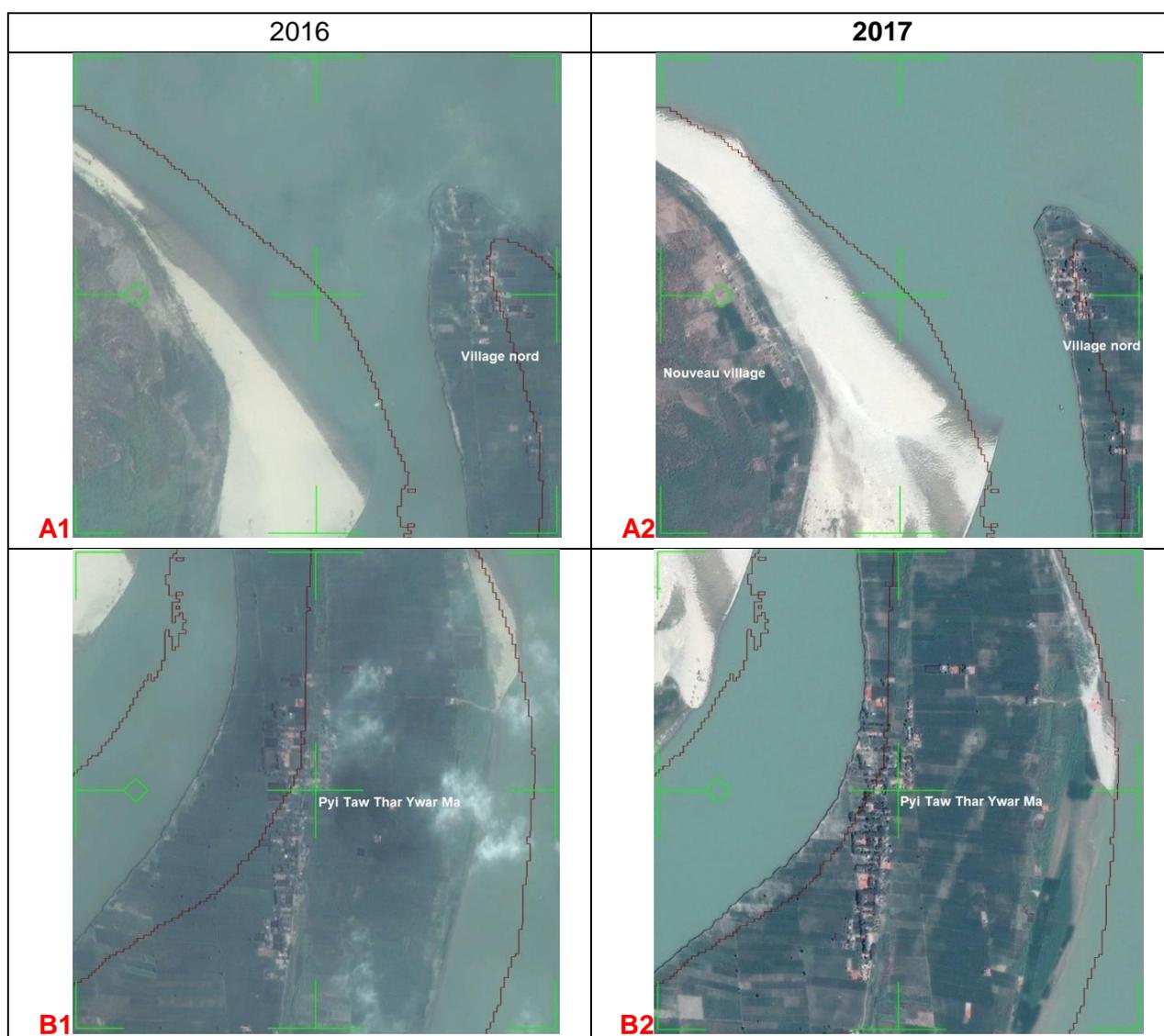


Figure 50 - Localisation du village nord de Pyi Taw Thar (A1 et A2) et du village de Pyi Taw Thar Ywar Ma (B1 et B2) montrant la disparition des villages face à l'érosion et le déplacement des villages d'une rive à l'autre en 2016 et 2017. Les limites rouges correspondent aux limites des berges en 2018. On observe sur l'image A2 que sur la rive ouest, le nouveau village de Pyi Taw Thar est apparu en 2017 (Sources : Google earth)

Tableau 8 – Calendrier synthétique d'installation et déménagement des villages

Villages	Apparition des terre	Installation du village	Disparition du village
Pyi Taw Thar Yawar Ma	1998-1999	Vers 2009	2017- ??
Village nord péninsule	2000-2001	Vers 2009	2016-2017
Pyi Taw Thar ouest	2005-2006	Vers 2010	2017- ??
Pyi Taw Thar est	2011	2017	??

Les sables situés à la base sont probablement issus d'une charge de fond, ils se sont déposés par le fleuve lorsque ce secteur était soumis à des turbulences, probablement lorsque ces espaces correspondaient à des bancs de convexité. Les sols de la partie ouest du village sont apparus en 1997 sous la forme de bancs de convexité avec une diminution progressive des courants car il s'agissait de l'emplacement du bras mort (en devenir, car totalement déconnecté en 2002) raccordant les branches de China bakir et Shwelaung. Cette structuration des sols avec une formation sableuse grossières non cohésives surmontée d'une « carapace » de limon cohésif induit une érosion par sapement entraînant les blocs limoneux sous leur propre poids. Sur certains secteurs, cette érosion découpe les berges en dent de scie avec des anses et des caps, donnant l'impression que le fleuve mange la terre par bouchées.

L'érosion survient principalement durant la saison des pluies lorsque les terres sont submergées. Mais il est probable qu'une partie importante des berges disparaît par décompression hydrostatique lors de la décrue, lorsque que le niveau d'eau baisse plus vite que les nappes se retrouvent perchées. Concernant l'érosion survenue après les périodes de crue, on remarque une légère régression des terres sur les marges nord-ouest de la péninsule entre le 17 novembre et le 19 décembre sur environ 10 m de large. Puis une stabilisation jusqu'à mai.

Les terres où se situe le village sont apparues en 1998-1999 et en 2000-2001 pour le village situé au nord (disparu en 2017). Ce secteur nord est le secteur le plus ancien, il s'agissait jusque dans les années 2005-2006 d'une zone de bancs de sable et vraisemblablement marécageuses dans l'ouest. Jusqu'à 2009, les terrains où se situe le village de Pyi Taw Thar Yawar Ma étaient très proche du fleuve et ne progressaient pas (sur le fleuve), ou de quelques 10<sup>e</sup> de mètres par an tout au plus. A ce moment-là, la partie sud du village située sur une berge légèrement concave tendait même vers une dynamique d'érosion. C'est la migration d'un banc d'amont vers l'aval et sa fixation sur les berges qui a permis le redéploiement des terres dans ce secteurs est de la péninsule. Il est fort probable que les terres (subsistant en 2018) aient été relativement sableuses jusque vers 2010, peut-être même plus tard en raison de la position de ces secteurs vis-à-vis du fleuve et des courants turbulents. Par la suite la distance horizontale et verticale du chenal a permis le dépôt de limons durant les phases de crues/décrue ainsi que grâce à la végétation spontanée ou cultivée qui a permis le ralentissement du courant et le piégeage des sédiments.

### Pyi Taw Thar (île)

En termes de dynamique géomorphologique, l'île de Pyi Taw Thar présente une dynamique générale assez « simple » à une échelle de temps assez courte avec migration constante selon un axe nord-ouest sud-est. Son histoire est extrêmement récente (13 ans) et en 2018 les espaces terrestres les plus anciens situés à l'ouest datent de 2005. Les secteurs situés au nord-ouest sont dans une dynamique d'érosion (figure 51, gauche) tandis que les secteurs à l'est sont en cour d'accrétion. Sur ces secteurs on observe de grandes plages de sable correspondant au front pionnier. L'île s'est

formée par la fusion de plusieurs petites îles et présente une topographie assez complexe avec de nombreux chenaux et dépressions qui se comblent année après année.

Les rives ouest de l'île, situées à proximité du village ouest étaient formées de berges verticales ayant une élévation oscillant entre 3,5 et 3,7 m (niveau du fleuve étant à 3 m à Zalun la veille), tandis que les secteurs situés plus au nord avaient des berges d'une hauteur de 4 m. Les secteurs les plus récents, situés à l'est au niveau du village est, présentaient une élévation beaucoup plus importante, autour de 5 m et par la suite la berge descendant en pente douce sur 300 m. Comme nous l'avons précisé au sujet de Pyi Taw Thar Yawar Ma, le secteur est soumis à des variations tidales et de petites variations de mesures sont à prendre en compte, la comparaison des hauteurs de berges entre les deux sites (péninsule et île) montre que le nouveau village se situe à priori bien au-dessus des autres terres alluviales environnantes, ce que montre également les images satellites prises le 27 juillet 2016 lorsque le fleuve était à 11,5 m à Zalun.

Les berges verticales situées à l'ouest de l'île étaient structurées par une base non cohésive de sable grossier sur environ 2,5 à 3 m d'épaisseur avec par endroit de minces feuillets horizontaux de limon. Une deuxième unité supérieure constituée d'une « carapace » de limons compacts sur environ 80 cm.

Les sables situés à la base sont probablement issus d'une suspension graduée, et se seraient déposés lorsque ce secteur était soumis à des turbulences, probablement dans les bancs de convexité des années 2005-2010. Ces bancs de sable ont été très important durant toute l'histoire de l'île et occupaient les 2/3 de sa surface actuelle de l'île jusqu'en 2016.

Les terres où se situe le village ouest sont apparues en 2005 tandis que les terrains où est présent le village est existent depuis 2012. Ces secteurs ouest sont les plus anciens et il s'agissait jusque vers 2010 d'un ensemble de larges bancs de sables avec de nombreux chenaux et bas-fonds marécageux. Bien que les terres aient commencées à apparaître en 2005, ces terrains étaient sûrement assez bas jusqu'en 2010 et le village c'est positionné sur une levée probablement formée en 2007. Tandis que les parties est, beaucoup plus récentes où se situe le village est sont restées un vaste banc de convexité de 2011 à 2016 avec une végétalisation des espaces les plus hauts pendant les saisons sèches. Une grande partie des terrains du village se sont formés en 2012 sur un banc qui a rapidement progressé en altitude jusqu'à atteindre 5 m (en 6 ans). Les secteurs sud de l'île, non visités sont beaucoup plus bas avec des eaux calmes et densément végétalisés car protégés du fleuve et des dépôts sédimentaires par la création de levées en amont de l'île.

Concernant l'érosion survenue après les périodes de crue, on remarque une légère régression des terres sur les marges nord-ouest de l'île entre le 17 novembre et le 19 décembre sur environ 10 m de large. Puis une stabilisation jusqu'à mai.

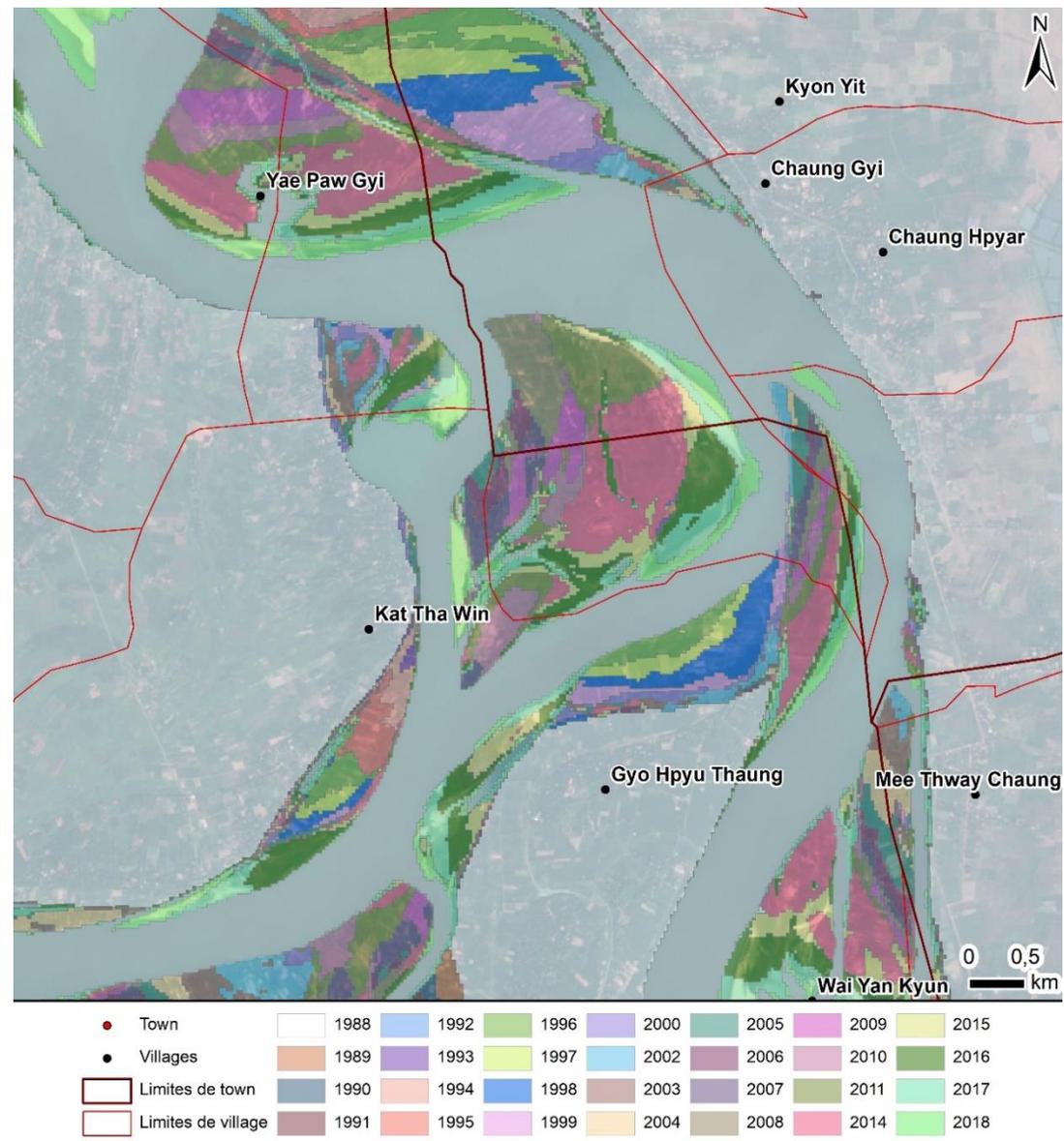
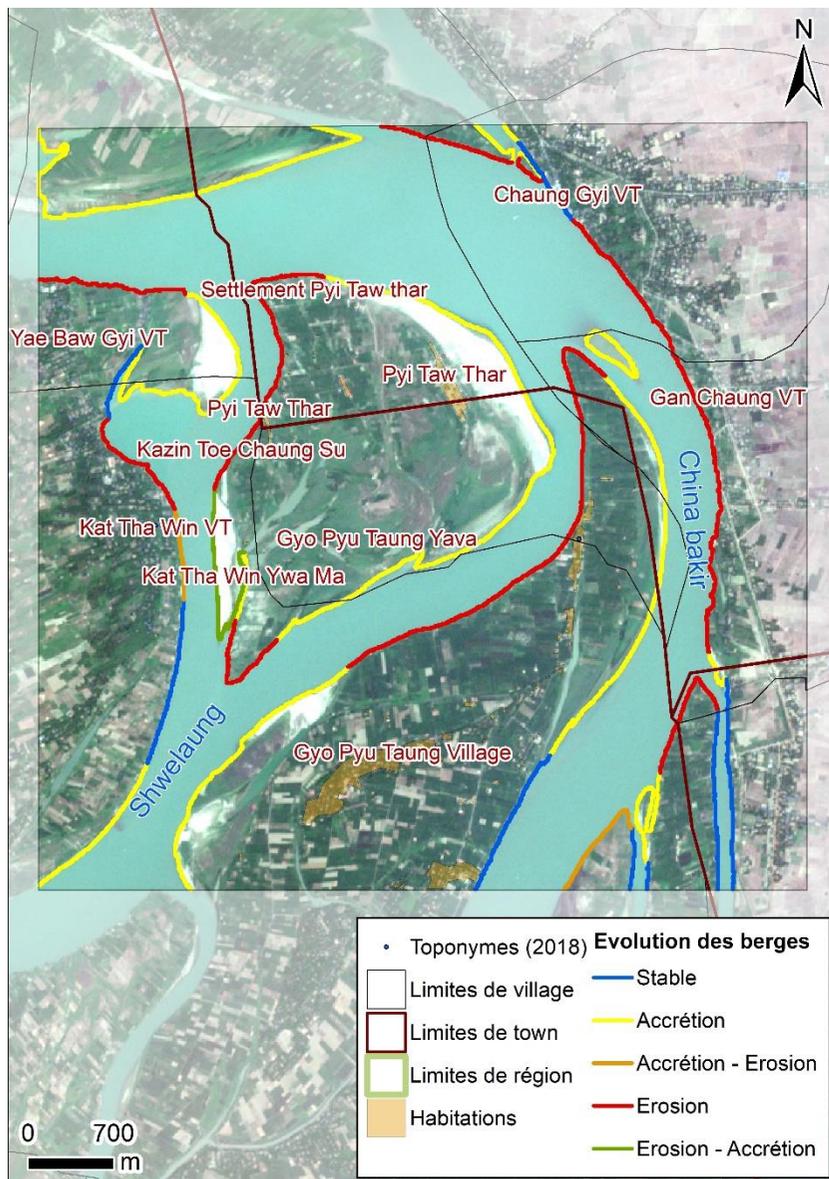


Figure 51 – Dynamique des berges entre 2014 et 2018 (gauche), date de formation des terrains alluviaux 1988-2018 (droite), les secteurs en blanc transparent n'ont pas été transformés depuis 1988, secteur n°1 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

## 2.2/ Site de Shwe Din Gar Kyun / Tha Byu Ye Le Kyun (Nyaungdon / Danubiu)

En 2018 il s'agit d'un ensemble de 3 grandes îles et de 3 petites îles. Ce secteur correspond à un élargissement de la zone de mobilité du fleuve succédant à un long tronçon étroit (n°7) ayant une fonction de zone de transfert des sédiments (voir annexe 4), tandis que ce secteur par son espace de mobilité potentiel permet le stockage et la remobilisation des sédiments. On constate sur la carte de datation des sols (figure 52) que les berges externes actuelles sont antérieures à 1988 et que la zone de mobilité du fleuve semble continue depuis 1955. Si l'on remonte jusqu'à 1955 ces limites externes semblent ne pas avoir beaucoup changées avec seulement quelques digues rompues sur la rive gauche (voir figure 41). Une partie importante de l'île principale (Shwe Din Gar) est antérieure à 1988 et il est probable (si le fleuve n'a pas balayé le territoire entre 1976 et 1988) à en croire les images de 1973 à 1976 et les cartes topographiques que la moitié est de ce territoire existait déjà en 1955. Cette île est séparée des « terres stables » délimitées par les digues et situées à l'est par un chenal déconnecté durant la saison sèche (en 2018). Ce chenal est régulièrement déconnecté depuis 2006 mais le processus d'atterrissement semble s'être accentué après 2012. Ce que confirment les résultats vus précédemment avec la tendance évolutive du tronçon 8 qui inclut ces îles (voir partie 1.3.2) et qui tendrait vers une concentration des eaux dans le chenal central, une diminution des surfaces de banc de sable et un bilan surfacique positif avec d'avantage de dépôt que d'érosion. Comme nous l'avons vu, ce secteur a eu un gain d'espaces terrestre de 5,69 km<sup>2</sup> depuis 1988.

L'observation d'une année sur l'autre entre 1988 et 2018, montre une longue période de 1988 à 2012 où des îles évoluaient entre deux chenaux principaux situés aux extrémités est et ouest. Entre 1973 et 1976 les îles étaient beaucoup plus petites et un chenal principal traversait le secteur tandis que sur les cartes de 1955 et 1967 (identiques sur cette zone) deux grandes îles occupaient l'espace. A l'avenir il se pourrait que le chenal principal, en amont, vienne balayer progressivement les marges nord-ouest de l'île de Shwe Din Gar.

L'île de Tha byu Ye Le Kyun possède dans sa partie nord des sols formés après 1992, par la suite l'île a constamment migré vers l'aval. En 1992, cette île était raccordée à ce qui est aujourd'hui l'île de Shwe Din Gar, avant de se diviser en deux vers 1997. L'île de Tha Byu Ye Le Kyun s'érode continuellement sur ses marges ouest et migre vers le sud-est tandis que sur l'autre rive (gauche) du bras qui la sépare de l'île de Shwe Din Gar Kyun, le fleuve érode cette dernière dans sa partie concave. Le processus devrait se poursuivre sur plusieurs années jusqu'à disparition de l'île de Tha Byu Ye Le Kyun ou sa fusion avec l'île de Shwe Din Gar Kyun par atterrissement du bras qui les sépare.

On constate sur le découpage administratif inter townships, que de 1992 à 2016, une partie des secteurs ouest de l'île de Tha Byu Ye Le Kyun étaient sur le town de Danubiu. Mais en 2018 le township de Danubiu ne possède que quelques terrains, situés en bordure de l'île de Shwe Din Gar, dans la partie nord.

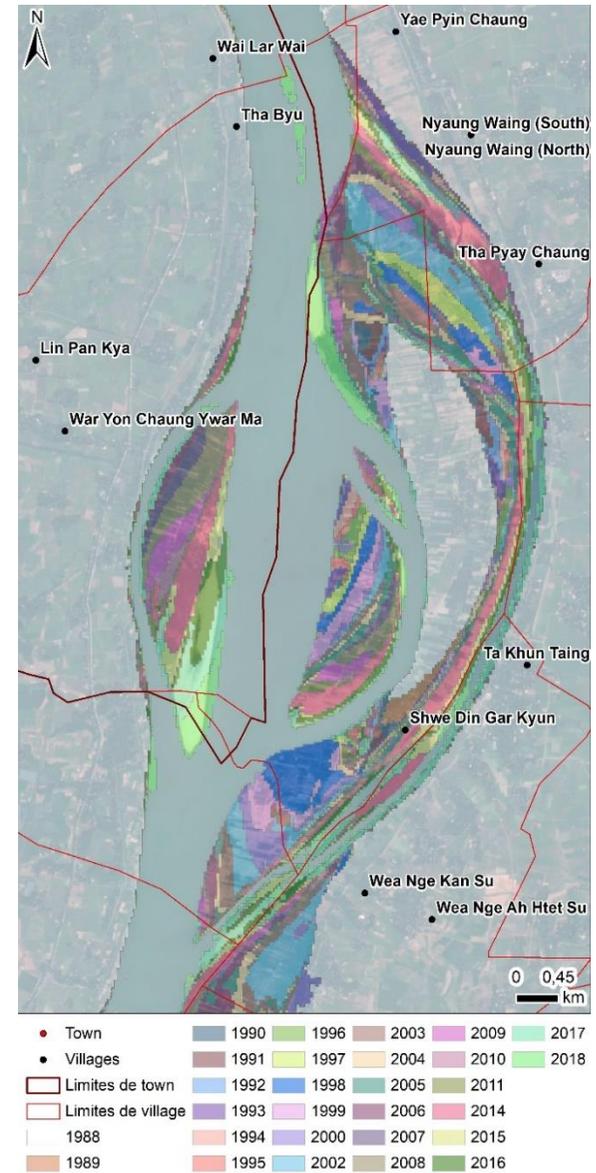
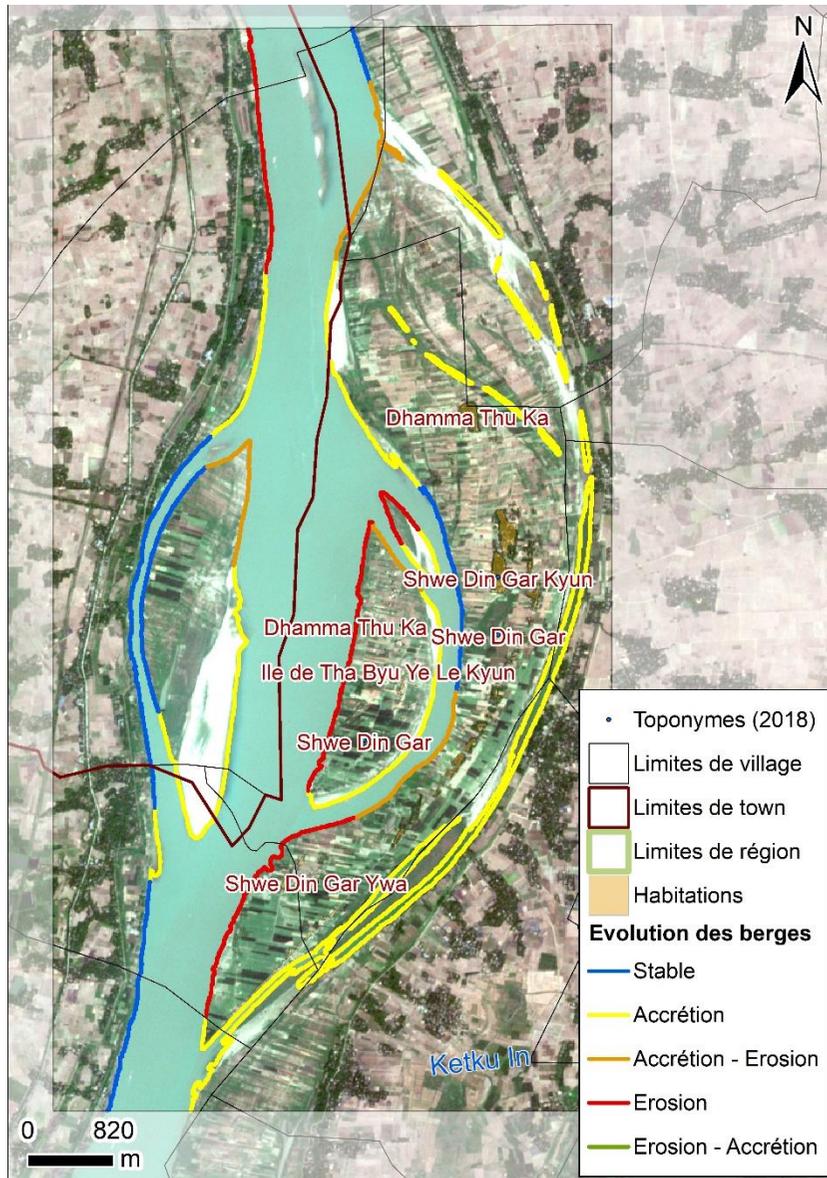


Figure 52 - Dynamique des berges entre 2014 et 2018 (gauche), date de formation des terrains alluviaux 1988-2018 (droite), les secteurs en blanc transparent n'ont pas été transformé depuis 1988, secteur n°2 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

### 2.3/ Site de Yae Paw Taung / Té Myei (Zalun / Ahpyauk)

Ce site se situe sur un secteur formant une boucle (tronçon 6) très dynamique avec de grandes surfaces de bancs de sable (figure 49). En 2018 on observe de nombreux chenaux secondaires permanents ou connectés durant les eaux moyennes et hautes (figure 60). Un ensemble de 4 îles principales aux contours fluctuants selon le niveau d'eau très contrasté dans ce secteur (amplitude de 8 m environ). Les tendances évolutives du secteur (partie 1.3.2) montrent peu de changements observables depuis 1988. Ce secteur peu contraint latéralement se positionne entre deux secteurs assez rectilignes formés d'un chenal unique ayant une fonction de transfert des sédiments avec peu de stockage, ces sections amont et aval seraient possiblement dans un processus de stabilisation et d'incision pouvant déporter l'énergie accumulée et les sédiments provenant du tronçon 3 vers l'aval au niveau du secteur d'étude.

La carte topographique (sur ce secteur 1955 et 1967 sont semblables) et l'imagerie Landsat nous montrent l'existence d'îles formant un réseau d'anabranches de manière continue depuis 1973 avec la présence d'une île de grande surface (Yae Paw Taung) dont certaines parties seraient présentes de manière (très probablement) continue depuis 1955. On observe la mise en place partielle avant 1973 de l'anabranchement, formant un canal étroit de 20 km de long et située le long des digues en rive droite. Une multitude de petites îles, probablement des bancs de sable, d'une durée de vie annuelle ou biannuelle, sont observables entre 1988 et 2000, avant que le paysage ne se « simplifie » avec la présence d'îles plus massives et de chenaux plus larges.

L'île de Yae Paw Taung visitée lors des journées de terrain, a constamment changée de forme depuis 1973, formées de 2 îles qui ont fusionné dans les années 70. Elle semble avoir conservé une position assez stable et une forme massive « similaire » entre 1976 et 1997. Avec des accrétions et érosion continues sur les marges mais la persistance d'un « noyau » stable. Avec la présence d'un chenal actif mais moins large entre elle et Ahpyauk durant une longue période. A partir de 1998 on discerne plus nettement que l'île s'allonge avec une accrétion importante en aval (ouest) puis une migration de l'île vers la rive droite (nord, nord-ouest), alors que jusque-là elle persistait sur la rive gauche (sud-est), formant ainsi deux chenaux principaux. Cette migration vers la rive droite se faisant au détriment du chenal de droite qui rétrécit d'année en année et qui est actuellement en cours d'atterrissement avec une déconnection en saison sèche 2015- 2016. L'île devrait poursuivre plus lentement sa migration en rive droite jusqu'à fusionner avec la plaine du village de Thet Kei Kyun. La carte de datation de formation des terrains permet de voir qu'il ne reste aujourd'hui qu'environ un tiers de l'île actuelle, qui est antérieure à 1988, voir peut-être 1955 si le fleuve n'a pas balayé ces espaces entre 1955 et 1973. On observe sur les images Landsat que cette partie ancienne de l'île ne cesse de s'éroder par l'est. Cette tendance devrait encore se poursuivre sur quelques années compte tenu de la présence d'une île « banc de sable » au nord d'Ahpyauk. Cette dernière, existante depuis 2004, est issue de la scission de l'île de Yae Paw Taung. Mais malgré son ancienneté elle semble persister comme banc de sable plus ou moins végétalisé et cultivé avec probablement des haricots étant donné l'organisation du parcellaire et au regard de sa position vis-à-vis des courants du chenal qui induit un dépôt de sable important dans ce secteur à courant fort. Les images satellites de haute résolution issue de Google earth (figure 11 et 55) nous permettent de constater que des épis transversaux noyés et des traverses ont été réalisés afin de stabiliser cet îlot. Ces aménagements visant très probablement à ralentir le courant pour la protection des berges du township de Ahpyauk devenues vulnérables depuis que l'île de Yae Paw Taung a disparue dans ce secteur. La stabilisation de cette île située sur un secteur dynamique au regard des dépôts de sable a sans doute une influence sur l'érosion des villages de Yae Paw Taung, en déportant la puissance du chenal plus vers l'ouest. De 2000 jusqu'à 2011 l'île a connu une érosion constante sur ses berges nord et ce n'est qu'à partir de 2012 que les secteurs situés à l'est se sont mis à disparaître d'est en ouest à une vitesse moyenne de 170 m par an, c'est à dire 20,9 ha par an (figure 53).

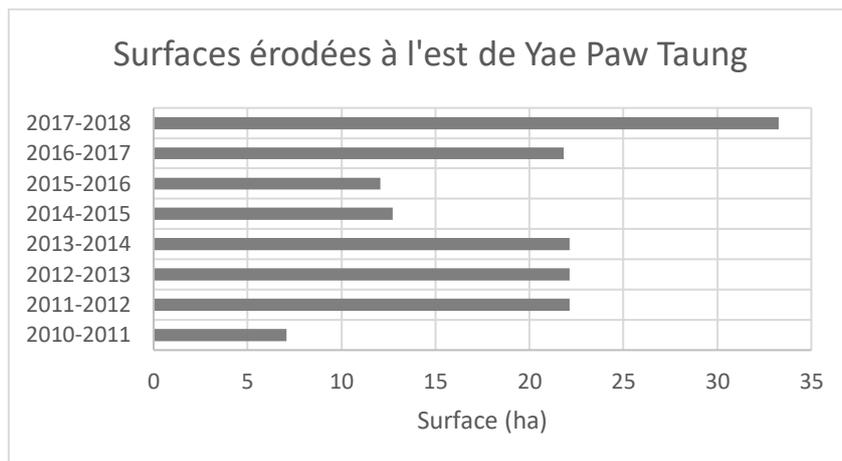


Figure 53 – Surfaces érodées à l’est du village de Yae Paw Taung entre 2010 et 2018

Une île d’une surface d’environ 3 km<sup>2</sup> et sans nomination de ses riverains c’est établi en 2013 avec une croissance d’évolution très forte (figure 54). Cette île initialement constituée de 2 bancs de sables a fusionné en une seule île en 2015 avec un axe de migration sud-est nord-ouest. Cette île présentait des berges douces de dépôt jusqu’en 2017. Ce n’est que depuis la saison des pluies de 2017 que cette île a entamée un processus d’érosion frontale avec des fronts de taille d’environ 6 m de haut à l’étiage. Quelques habitats saisonniers sont présents en 2017 sur les secteurs le plus élevés.



Figure 54 - Evolution de la surface de l’île « île de sable » entre 2014 et 2018

Il est probable que la durée de vie de cette île ne soit que de quelques années, en effet sa migration progressive vers le nord-ouest risque de provoquer sa fusion avec ce qu’il restera de la partie ouest de l’île de Yae Paw Taung, ou plutôt son remplacement à cet endroit avec l’atterrissement progressif du chenal en rive droite (nord de l’île).

### Village de Yae Paw Taung et terres limitrophes

En 2018, on observe sur la partie est de l’île de Yae Paw Taung la présence d’un village « Yae Paw Taung » de structure allongée longeant un ancien bras mort. Un autre village situé à 200 m au nord-ouest du village de Yae Paw Taung Ywar Ma. Plus à l’ouest, on retrouve d’autres villages semblant moins structurées et plus diffus avec des habitats dispersés. Ici nous ne traiterons que de la partie est de l’île. Ces villages sont très anciens et remonteraient au-delà de 1987, peut-être même étaient-ils là en 1955 étant donné que d’après les cartes topographiques une île et un village du même nom

était présent mais à un peu plus de 1 km au nord-ouest de la localisation de 1988-2018 (voir annexe 7.3). L'imagerie satellite montre peu d'érosion sur les marges nord de l'île entre 2013 et 2018, en revanche les berges de l'extrémité est se sont déplacées de 600 à 700 vers l'ouest durant ces 5 ans et 1 km depuis 2011 (7 ans). L'imagerie (Google earth) montre dans ce secteur un groupe de 4 grands villages aligné selon un axe nord-ouest sud-est en 1987 (figure 55), les deux villages présents en 2018 étant les deux plus à l'ouest. L'érosion c'est principalement faite du nord vers le sud jusque vers 2004, par la suite les berges situées à l'est se sont rabattues vers l'ouest. Deux villages situés à l'est de Yae Paw Taung Ywa Ma ont ainsi disparu en 2012 et 2016 tandis que celui aujourd'hui situé au nord-ouest (village nord-ouest) a entamé une érosion de ses parties nord dès 2002 mais subsiste encore aujourd'hui sur son extrémité sud. Ce village a légèrement migré vers le sud entre 2011 et 2014 avec quelques habitations. On observe également que les deux villages situés à l'est ont vu leur surface augmenter après 2005 alors que le village ouest commençait à disparaître. Le village de Yae Paw Taung Ywa Ma lui-même a commencé à s'éroder sur ses parties nord à partir de 2010 et environ 300 m de village ont disparu entre 2010 et 2018.

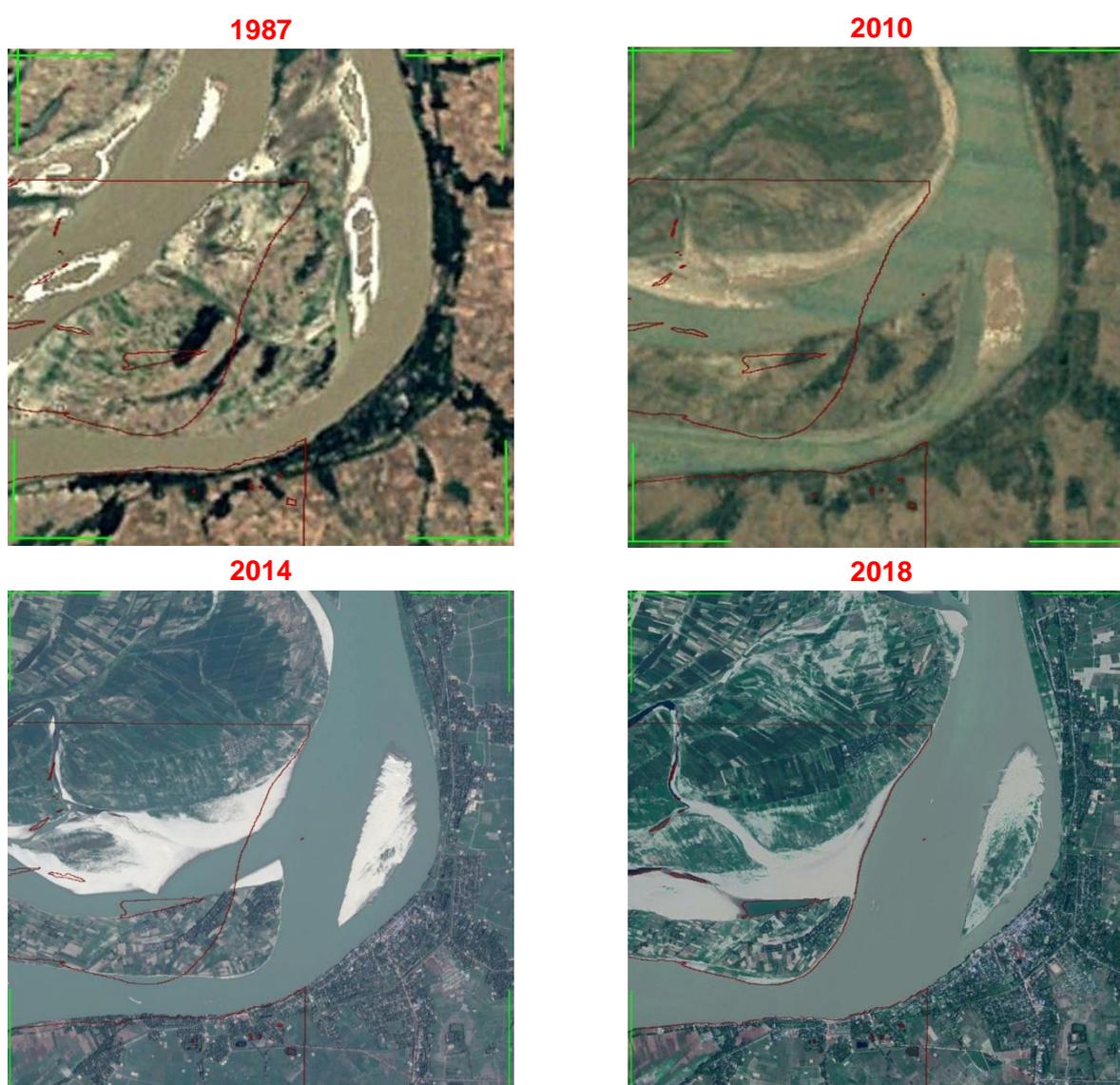


Figure 55 – Villages de l'île de Yae Paw Taung entre 1987 et 2018, les limites en rouge correspondent aux limites des berges en 2018. (Sources : Google earth)

Tableau 9 - Calendrier synthétique d'installation et déménagement des villages

Villages	Apparition des terre	Installation du village	Disparition du village
Yae Paw Taung ouest	Avant 1955	Avant 1987 (1955 ?)	2002- ??
Yae Paw Taung Ywa Ma	Avant 1955	Avant 1987 (1955 ?)	2010- ??
Yae Paw Taung est 1	Avant 1955	Avant 1987 (1955 ?)	2011-2016
Yae Paw Taung est 2	Avant 1955	Avant 1987 (1955 ?)	2004-2012

### Île de sable de Yae Paw Taung

Cette île très récente et apparue en 2014 (figure 58, droite), ne connaît de cultures à « grande échelle » que depuis l'année 2018, même si quelques signes de cultures semblent être visibles depuis 2016. Il s'agit d'un espace principalement recouvert par du sable. Quelques habitations (environ 10 ou 15) dispersées correspondant d'avantage à des cabanes saisonnières de 10 à 15 m<sup>2</sup> et en rez-de-chaussée étaient présentes en 2018. Il n'y en avait que 3 ou 4 en 2017, localisées sur les secteurs surélevés à l'ouest de l'île. Il semblerait que pour l'instant ces habitats soient déplacés d'une année sur l'autre. On observe sur les images Google earth que les premières cultures sont apparues sur l'île en 2016 localisées en des points précis sur des zones basses et limoneuses, à faible courant et protégées par des bancs de sables il est fort probable qu'il s'agisse de rizières de décrue au vu de la localisation de ces cultures et leur texture sur imagerie. L'année suivante, en 2017, ces espaces potentiellement rizicoles semble subsister dans le même secteur avec des conditions semblables mais on voit également apparaître des cultures dont les délimitations sont assez peu discernables, probablement de haricots sur des surfaces très sableuses. A cette époque les herbacées ne recouvraient que quelques secteurs très localisés.

Cette île présente une très grande dynamique de mouvement avec un déplacement constant selon un axe sud-est nord-ouest, les secteurs les plus anciens de 2014 sont de nouveau en train de disparaître, avec une érosion de toute la façade sud-est de l'île (figure 58, gauche). Les dépôts de sable se faisant en masse d'une année sur l'autre tout autour de l'île avec en 2018 pas moins de 3 m d'épaisseur de sable sur une surface de 1,5 km<sup>2</sup>, en plus des dépôts venus s'accumuler sur le reste de l'île qui fait aujourd'hui jusqu'à 7,5 m de haut sur des secteurs datant de 2015-2016. Soit une élévation d'environ 1,5 à 2 m par an sur certains secteurs qui sont déjà dans un processus d'érosion active. L'observation des images Sentinel 2 entre le 17 novembre 2017 et le 24 avril 2018 montrent une importante érosion sur la face sud de l'île (figure 56) avec environ 75 m à la perpendiculaire de l'île (secteurs élevés), dont 55 entre le 17 novembre et le 19 décembre. Durant les trois mois suivant l'érosion est beaucoup plus progressive. De tels changements post-crue ne semblent pas avoir eu lieu sur les autres secteurs d'étude. Il est probable que les raisons en soient la structure particulièrement peu cohésive et la situation de ces terres vis-à-vis du courant vif. Un secteur nord de l'île de Dat Si Taung Kyun, située au sud de celui-ci présente une érosion post crue de l'ordre de 140 m dans sa partie la plus concave.

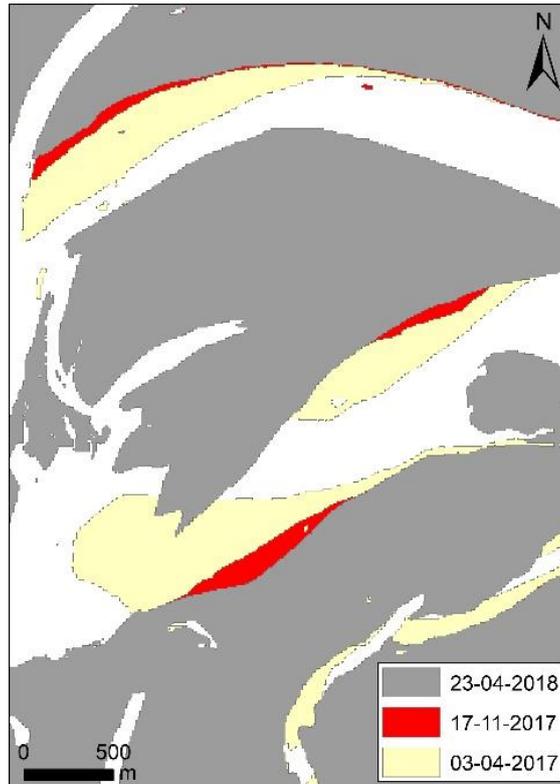


Figure 56 – Surfaces érodées dans le secteur sud-ouest de Yae Paw Taung. Les surfaces grises correspondent aux espaces terrestres en avril 2018. En jaune les surfaces disparues en saison des pluies entre le 3 avril et le 17 novembre 2017 et en rouge les surfaces disparues en période de décrue entre le 17 novembre et le 23 avril 2018.

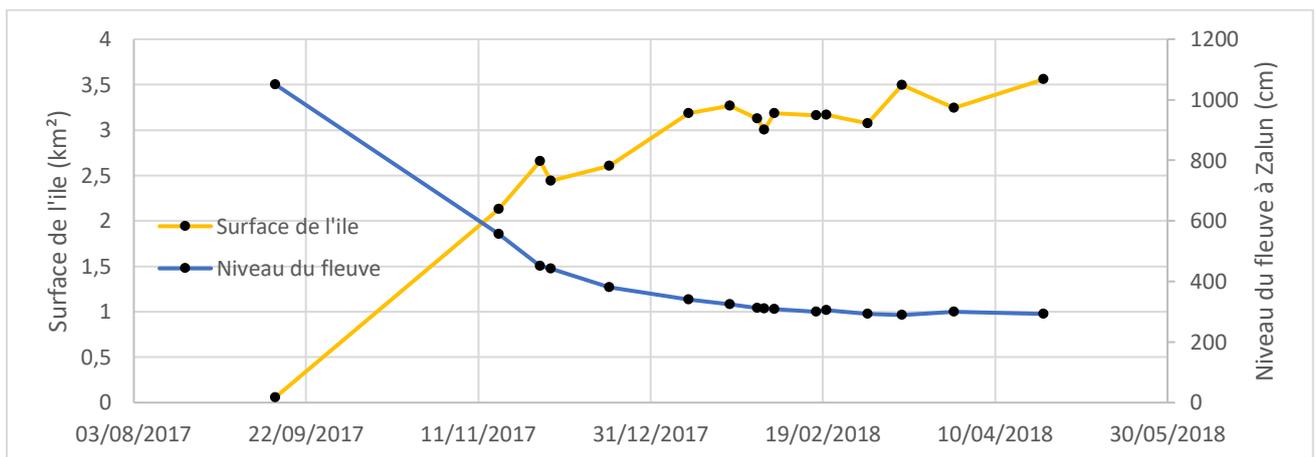


Figure 57 - Surface de l'île en 2018 et niveau d'eau

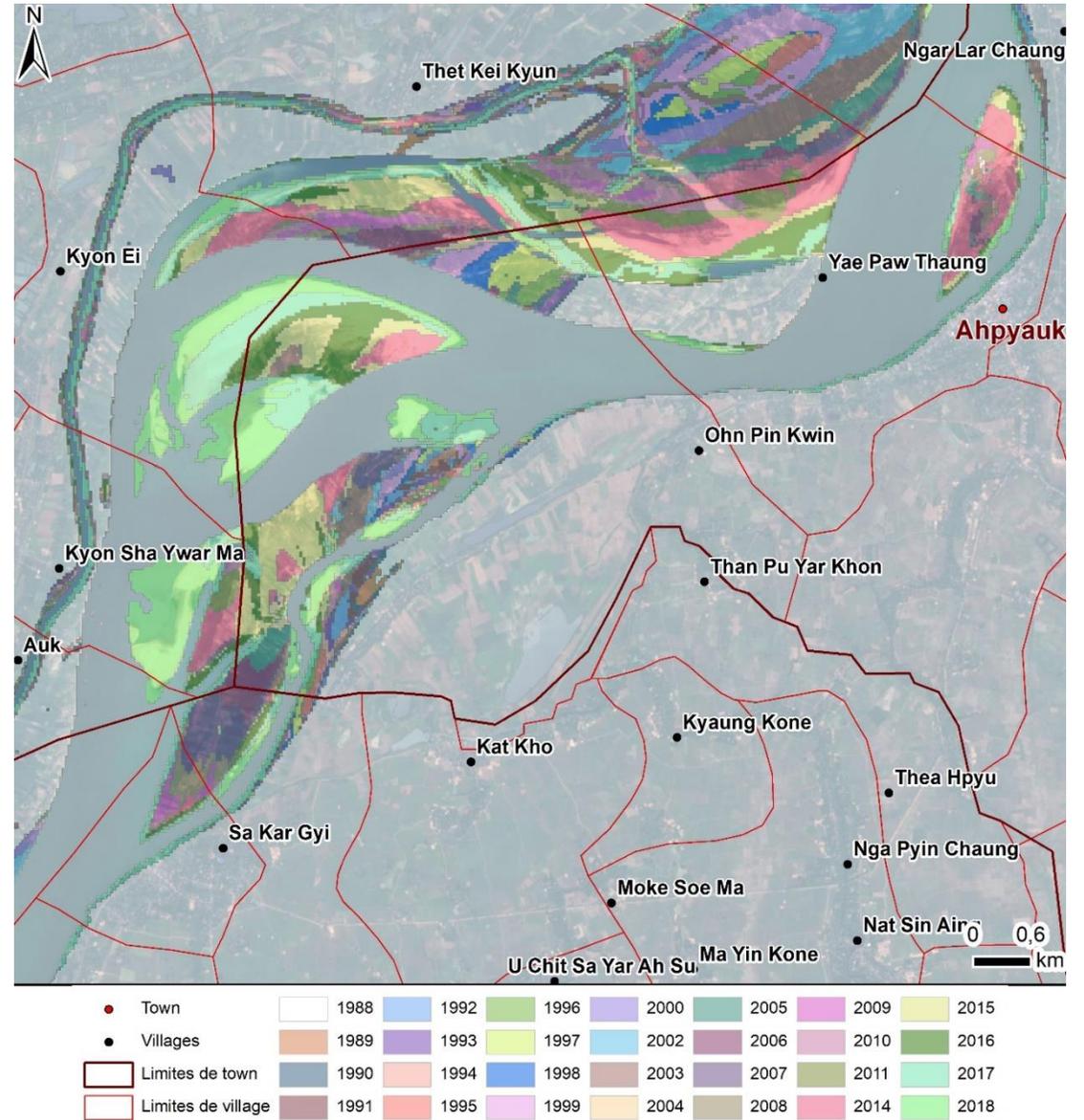
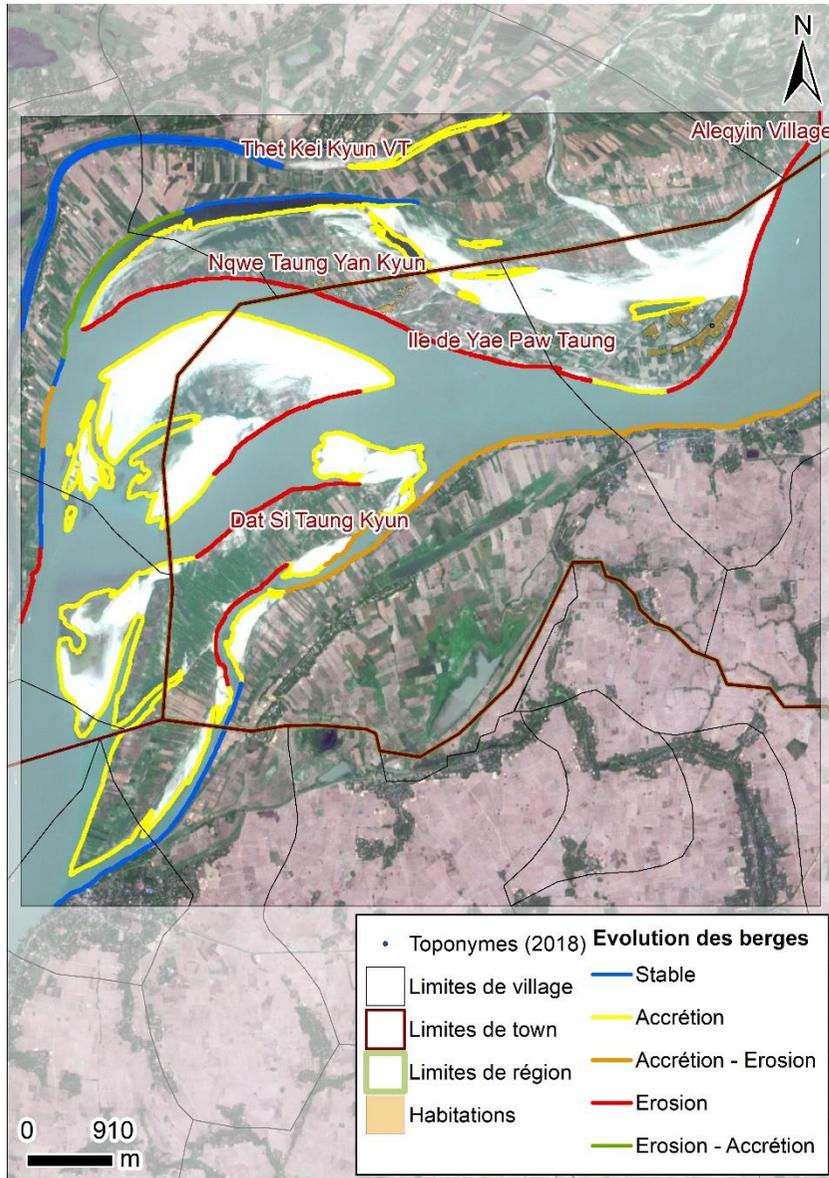


Figure 58 - Dynamique des berges entre 2014 et 2018 (gauche), date de formation des terrains alluviaux 1988-2018 (droite), les secteurs en blanc transparent n'ont pas été transformés depuis 1988, secteur n°3 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

### 3/ Caractérisation des îles visitées de 2017-2018

Lors de notre visite des différents sites, au travers des échanges avec les riverains nous avons identifié plusieurs critères déterminants la mise en place des cultures et le type de culture :

- La distribution des terres par l'administration,
- La durée d'émergence des terres, dépendante de leur distance verticale vis-à-vis du fleuve (hauteur),
- La nature des sols (sableuse, limoneuse, etc.), dépendant également en partie de la distance verticale et horizontale des terres.

Les facteurs sociaux et administratifs liés à la distribution des terres et leur utilisation ayant été prise en charge pas Benoît Ivars, les travaux présentés ici sont essentiellement basés sur les aspects physiques ou agricoles. Assez rapidement après ses premières visites de prospection, Benoît Ivars a pu identifier la nature des sols comme étant l'un des critères majeurs à l'installation des cultures, notamment la présence de limon et son épaisseur liée à la fois à la date de formation, à la présence de végétation mais surtout à l'influence du fleuve sur les années suivantes.

#### 3.1/ Site de Pyi Taw Thar (Nyaungdon / Pantanaw)

**Sentinel 2  
(29-03-  
2018)**



**Occupation des sols simplifiée (mars 2018)**

- Habitations
- Occupation des sols**
- Haricots et kaing
- Kaing
- Piments
- Riz
- Sable

**Datation des sols 1988-2018**

- |      |      |             |
|------|------|-------------|
| 1988 | 1998 | 2009        |
| 1989 | 1999 | 2010        |
| 1990 | 2000 | 2011        |
| 1991 | 2002 | 2014        |
| 1992 | 2003 | 2015        |
| 1993 | 2004 | 2016        |
| 1994 | 2005 | 2017        |
| 1995 | 2006 | 2018        |
| 1996 | 2007 | Transect    |
| 1997 | 2008 | Habitations |

**Terres émergées a différentes époques**

- |  |   |
|--|---|
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #008000; margin-right: 5px;"></span> ~4 m (27-07-2016)    | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #A9A9A9; margin-right: 5px;"></span> ~0,5 m (02-02-2018)         |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #404040; margin-right: 5px;"></span> ~3 m (04-11-2016)    | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #D3D3D3; margin-right: 5px;"></span> ~0,25 m (17-02-2018)        |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #696969; margin-right: 5px;"></span> ~2 m (26-11-2016)    | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #E0E0E0; margin-right: 5px;"></span> ~0,1 m (29-03-2018)         |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #808080; margin-right: 5px;"></span> ~1,5 m (17-11-2017)  | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #F0F0F0; margin-right: 5px;"></span> 0 m (14-03-2018)            |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #909090; margin-right: 5px;"></span> ~1 m (02-12-2017)    | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ADD8E6; margin-right: 5px;"></span> Surface en eau (14-03-2018) |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #A0A0A0; margin-right: 5px;"></span> ~0,75 m (19-12-2017) | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #FFD700; margin-right: 5px;"></span> Transect                    |
|  | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #DC143C; margin-right: 5px;"></span> Habitations                 |

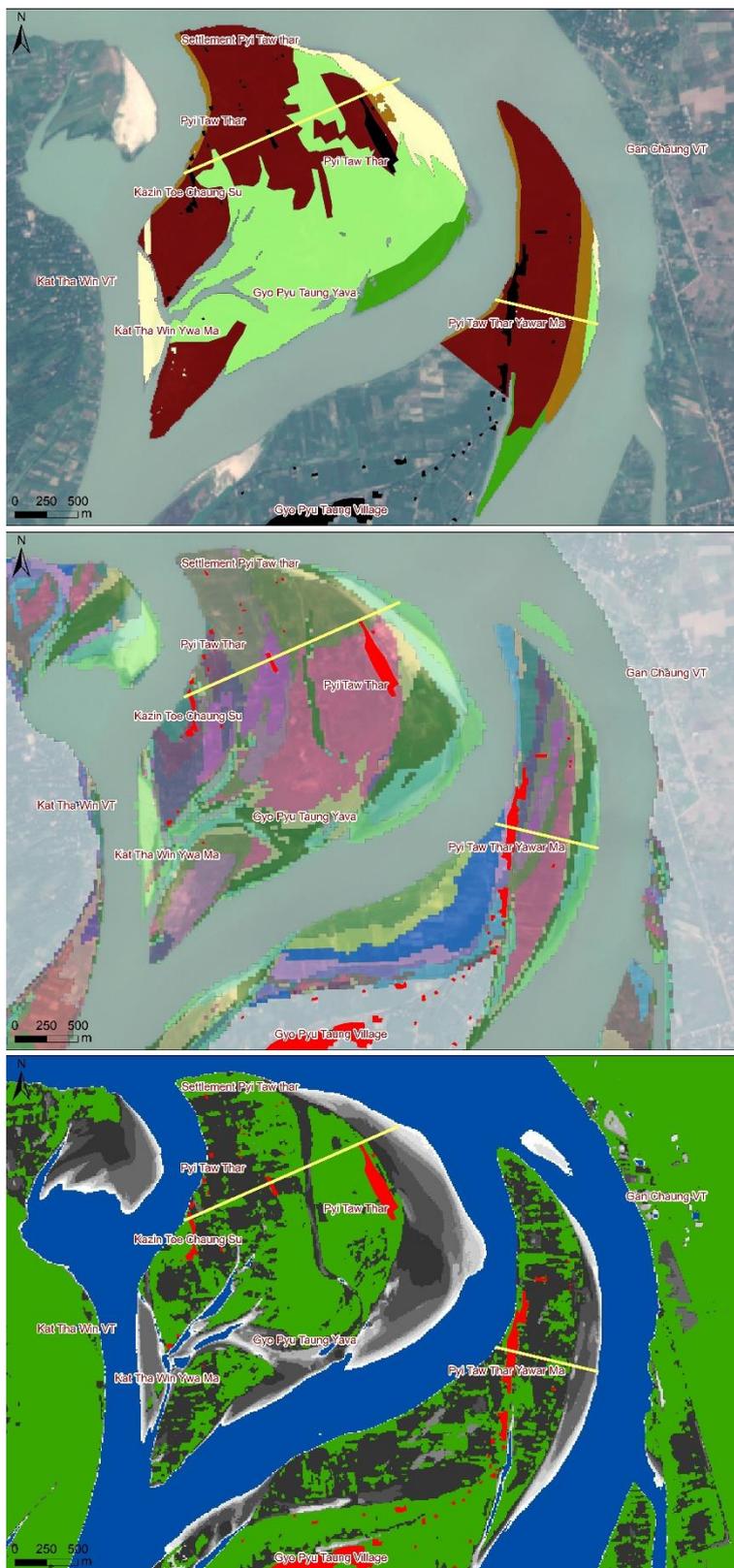


Figure 59 – Cartes de la zone d'étude n°1 et localisation des transects (figures 61 et 62) (Sources : Sentinel 2)



Figure 60 – Contours des terres durant les basses, moyennes et hautes eaux, les mesures sont celle du niveau du fleuve à Zalun. Sur ce secteur n°1 si 2,89 m = 0 ; 5,56 m = environ 1,5 m ; 11,5 m = environ 4 m. (Sources : Sentinel 2)

### 3.1.1/ Péninsule de Pyi Taw Thar Yawar Ma

Le village de Pyi Taw Thar Yawar Ma est localisé sur une surélévation située à environ 4 m de haut, correspondant à des terrains formés entre 1998 et 2006. On remarque que la limite de ces secteurs a fluctué durant plusieurs années avec des avancées et des retraits (figure 61 et annexe 7.1) formant ainsi une berge suffisamment élevée par accumulation de dépôt pour laisser place à une installation du village 3 ans après l'éloignement du fleuve. Des habitations dispersées situées à l'est et au nord-est du village sont également présentes, les installations au nord-est (3) semblent être apparues après 2014 tandis que celles situées à l'est (4 ou 5) sont présentes depuis 2016 mais se sont déplacées d'une année sur l'autre. En 2018 les habitats les plus proches de la rive est sont installés en bordure de la berge de 2015 (2,8 m de hauteur).

En termes de dynamiques géomorphologiques, l'espace entourant le village de Pyi Taw Thar Yawar Ma peut être grossièrement divisé en deux secteurs, un secteur à l'ouest, sud-ouest du village antérieur à 2002 et en cours d'érosion et la partie est, correspondant à la péninsule, aujourd'hui postérieure à 2004 en cours d'érosion à l'ouest et d'accrétion à l'est. Le village se situant dans la partie la plus « angulaire » de la courbe du fleuve, qui est aussi le secteur où le courant est le plus puissant, l'érosion de ce secteur devrait continuer en s'accroissant encore chaque année.

Les rives ouest de la péninsule formées d'une berge verticale ont une élévation variant de 3,8 à 4,6 m (mesurée à l'étiage, 2,77 m à Zalun la veille) avec une moyenne autour de 4 m et une hauteur de 4,4 au niveau du village. Tandis que les secteurs est en cours d'accrétions présentent des berges à pente douce. Notons que ce secteur est également soumis à des variations tidales (faibles, car il se situe en limite) et que de ce fait les mesures réalisées le même jour sont approximatives entre elles.

Ces berges étaient structurées par une base non cohésive de sable grossier sur environ 2,5 m d'épaisseur avec par endroit de minces feuillets horizontaux de limon. Une deuxième unité supérieure était constituée de limons compacts sur environ 1,5 m.

Sur la péninsule de Pyi Taw Thar Yawar Ma on retrouve essentiellement des cultures de piment, présentes sur les parties les plus hautes de ce territoire. Quelques cultures de Bétel sont présentes ainsi que de Maïs très localement. Le bétel (qui est une culture qui demande des aménagements sophistiqués) est plutôt localisé sur le front pionnier de colonisation des nouvelles terres hautes disponibles (formées, limoneuses puis distribuées), probablement en raison de leur éloignement horizontal vis-à-vis des secteurs en érosion (ce seront donc les plus tardivement érodées), mais également verticales car au cours de l'année ce sont les derniers espaces à être envahis par les eaux.

#### Transect nord-ouest à sud-est

On observe une régression progressive de l'élévation des terres d'ouest en est, ce qui correspond à la progression des espaces terrestres par accrétion progressive selon un axe nord-ouest sud-est au niveau du village de Pyi Taw Thar Yawar Ma (figures 51 et 59). Avec l'avancée de ces terres a suivi le front pionnier des cultures. En 2018 les piments étaient parfois présents jusqu'au bord de l'eau sur la berge ouest en érosion active (~ 4 m). Mais sur cette berge ouest, une grande partie de la longueur de la bordure était occupée par une bande végétale d'herbes (*Saccharum spontaneum*) pouvant monter jusqu'à 3 m de haut. Cette marge allant de quelques mètres jusqu'à 50 m de large dans les secteurs les plus larges, vers le nord de la péninsule. Selon notre informateur local, si cette bande n'était pas cultivée c'est parce que les surfaces étaient trop faibles pour être cultivées et le propriétaire trop loin pour s'en occuper. S'agissant de terrain en sursis qui disparaîtront très probablement durant l'été 2018. Cependant, contrairement au reste de l'île dans sa partie haute « le plateau », ces espaces présentaient d'importantes quantités de sable assez grossier. Il semblerait que dans ce secteur où le fleuve a une puissance maximale, ce dernier ait une capacité de traction suffisante pour mobiliser du

sable grossier jusqu'à 4 m (hauteur maximale de l'île). L'hypothèse la plus probable serait que les herbes auraient filtrées les sédiments grossiers, bloquant le passage du sable sur l'île et son dépôt dans les cultures. Nous n'avons pas réussi à savoir si les herbes étaient présentes sur les marges dans un but de stabilisation des berges, de barrière au sable, de ralentissement du courant ou si personne ne se risquait à des cultures si proches des berges. Dans ces secteurs particulièrement sableux, quelques petites parcelles (aux limites semblants floues) de haricots ou même de gombo (très localement) étaient plantés au milieu des herbes, mais la récolte avait probablement eu lieu et ces espaces n'étaient pas entretenus.

Le reste des parties hautes, sur le plateau, était presque entièrement utilisées pour les plantations de piments, en dehors de quelques petites parcelles de maïs très localisées. Ces cultures semblaient a priori n'être présentes qu'à partir d'une hauteur minimale de 2,5 m et cela jusqu'au maximum (~ 4 m). Les mesures ponctuelles qui ont été réalisées du côté de la berge est donnaient une élévation minimale des piments à 2,8 m. La localisation de ces limites correspondant à peu près (sachant que la végétation émergente biaise la détection de l'eau) aux limites du niveau d'eau du 4 novembre 2016 (figures 35 et 91). Le recoupement des images et des mesures permet de savoir qu'en 2017 ces terres ont émergées entre 11 octobre et le 17 novembre, avec probablement la libération des terrains vers le 5 novembre.

Comme en témoignent les traces de sédiment laissées sur le tronc des arbres par la dernière crue, servant d'indice du niveau maximal de 2017 (il est fort peu probable que ces traces bien marquées soient antérieures à 2017, compte tenu de l'intensité des pluies dans ces régions qui auraient totalement lavées les troncs d'arbres), ainsi que la localisation des niveaux désignées par les habitants sur leur maison, durant la dernière saison des pluies le fleuve est monté à environ 5,2 m, soit environ 1 m au-dessus du sol au niveau du village de Pyi Taw Thar Yawar Ma et du reste des terres situées à environ 4 m.

Au milieu du « plateau » de l'île situé à environ 3 m, sont présents des micro reliefs correspondant aux anciennes berges et à des paléo chenaux. Ses dépressions aujourd'hui peu profondes sont chaque année comblées par les dépôts de limon qui aplanissent peu à peu le relief. Un peu plus au sud du village (hors transect) un bras mort est présent et correspond à une zone de fermeture liée à la berge à l'ouest et fermé à l'est par la migration des dépôts formant un lobe. Cette configuration permet de protéger du courant des secteurs inondés et favorise le dépôt de sédiments fins durant les crues et l'accumulation de vases durant la phase de décrue progressive et pendant la saison sèche. Sur ces secteurs calmes on peut observer des cultures de riz en bordure (tableau 10, photo 7, 8). Lors de notre passage le riz était présent depuis le bord de l'eau (niveau 0, le plus bas de l'année 2018) jusqu'à environ 1 m au-dessus du niveau. Seul quelques secteurs le long de ce bras mort étaient utilisés pour le riz, le reste était occupé par les kaing (*Saccharum spontaneum*). Des pieux venaient border les limites sud de la zone de distribution (tableau 10, photos 8).

À l'est, les premières paleo berges correspondant aux années 2012 à 2015 font passer les terrains de 2,8 à 1,5 avec des fluctuations de quelques 10<sup>e</sup> de cm jusqu'à la berge de 2017. Sur cette zone libérée depuis 2015 étaient présents des herbes kaing (*Saccharum spontaneum*) en très grande densité jusqu'à la berge de 2017. Sur les secteurs les plus anciens, notamment entre les berges 2015 et 2016 étaient présents des plantations de haricots (variété Pelow) au milieu des herbes hautes (Tableau 10, photo 5), à en croire les images NDVI (Annexe 6.1, 02/02/18, abs 45 ; ord 17) il est possible que ces cultures aient été entretenues jusqu'au mois de mars (image 4/03/2018) puis laissées à la végétation après cela. Sur ces secteurs en pente les sables étaient grossiers mais les secteurs les plus bas, où l'eau reste plus longtemps dans l'année, les sols étaient davantage sablo-limoneux avec des strates sableuses. Il semblerait d'après les images Google earth que l'ensemble de la zone gagnée depuis 2015 soit encore utilisée pour les haricots ou laissée à la végétation spontanée ce qui est logique compte tenu de la l'élévation et de la texture des sols. Entre les berges de 2017 et 2018 était présente une dune de 2 m de haut correspondant à des dépôts frais de la dernière saison des pluies (plus au nord d'autres dépôts montent jusqu'à 3 m). Entre cette dune et la

berge de 2015, il est probable que certains de ces secteurs de bas fond aient également été utilisé pour le riz (au moins depuis 2017 en raison de la physionomie du secteur) à d'autres moments de l'année en raison de la nature des sols, de la protection de ces espaces par les cordons dunaires en amont, garantissant un courant lent. Les images Sentinel 2 à partir de l'indice NDVI (Annexe 6.1, 19/12/17, abs 44 ; ord 14), suggèrent ce type de culture localement entre le 19 décembre (invisible le 17 novembre) et le 4 mars 2018.

Tableau 10 – Photos des différents secteurs de la péninsule de Pyi Taw Thar Ywar Ma

<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> 
<p>Sur les rives est, quelques petits bancs de sable allant jusqu'à 3 m de haut, datant de la dernière crue forment des cordons dunaires non colonisés par la végétation</p>	<p>Ces cordons dunaires (image de gauche) forment des levées, isolent du fleuve certains secteurs bas formant des marais permettant l'accumulation de sédiments fin (limons) et le développement d'une végétation de poacées et cypéracées</p>
<p style="text-align: center;">3</p> 	<p style="text-align: center;">4</p> 
<p>Depuis la berge, le banc de texture sablo-limoneuse situé à 1,5 m et formé durant la saison des pluies 2017 à été colonisé par une végétation poacée basse (50 cm). Cette végétation participe à la fixation des sols et par sa rugosité elle permet d'engager un processus de dépôt des limons.</p>	<p>Un peu plus dans les terres, sur des espaces qui se sont formé en 2016, le sol est déjà structuré par une croûte de limon d'environ 20 cm, la végétation est beaucoup plus développée et formée de <i>Saccharum spontaneum</i> de 2 m de haut. Cette végétation dense participe ainsi à la capture des sédiments fins (limon) permettant ainsi l'aggradation progressive de l'île sur ces secteurs.</p>

<p style="text-align: center;">5</p> 	<p style="text-align: center;">6</p> 
<p>Toujours sur les berges est de la péninsule, lorsque l'on se rapproche des anciennes berges de 2012-2015 on observe des plantations de haricots déjà récoltés au milieu de la végétation, ici les sols sont limoneux mais situés entre 1,5 et 2 m au dessus du fleuve</p>	<p>Les berges situées sur l'autre rive (ouest) en bordure de falaise (front d'érosion) sont situées à 4 m de haut mais sont néanmoins très sableuses sur une largeur de 10 à 20 m en raison de la proximité du fleuve et de sa puissance dans ce secteur, ces secteurs vulnérables et sableux sont également utilisées pour la culture des haricots</p>
<p style="text-align: center;">7</p> 	<p style="text-align: center;">8</p> 
<p>La migration progressive d'un banc de sable qui a formé ce qui est aujourd'hui la péninsule de Pyi Taw Thar Ywar Ma (à droite) à isolé une berge beaucoup plus ancienne et datant de 2002 (à gauche) entre lesquels c'est formé un bras mort connecté au fleuve par l'aval.</p>	<p>Sur ces secteurs protégés mais néanmoins proches de l'eau ont été établis le long des berges sur une mince bande des rizières de décrue, ici en phase de maturation, localisée entre 1 m et 1,5 m au dessus de l'eau. Notons que le drapeau blanc a gauche aurait été fixé à cet endroit pour délimiter les terres distribuées</p>
<p style="text-align: center;">9</p> 	<p style="text-align: center;">10</p> 
<p>Sur l'ensemble des secteurs les plus élevés de la péninsule, entre 2,5 et 4 m étaient présentes des cultures de piments appartenant à au moins 10 variétés différentes, ces terres étaient limoneuses sur une couche d'une épaisseur allant de 0,5 à 1,5 m.</p>	<p>Certains secteurs proches de la rive gauche où situés un peu plus bas pouvaient être recouvert d'une mince couche de sable issus de la suspension graduée</p>

11



Les marges ouest de la péninsule étaient en général non cultivées sur une largeur variable allant de quelques mètres jusqu'à 50 m. Sur ces espaces souvent sableux étaient plantés des haricots déjà récoltés au moment de notre passage (cf image 6). Cette végétation laissée libre envahissait l'espace et permettait la capture des grains de sables et limons par effet de peignage, et permettait le ralentissement du courant en favorisant le dépôt des limons sur les espaces cultivés.

12



Plus rarement on pouvait voir des cultures de piments jusqu'à la berge érodée. Avec ici une mince marge non cultivée de quelques décimètres. Confirmant que l'érosion n'avait presque pas eu cours après la plantation des piments. Ces secteurs étaient bien souvent recouverts d'une mince couche de sable (cf image 10).

13



Sur les marges ouest et nord de la péninsule, la berge était dans un processus d'érosion active durant la saison des pluies. On pouvait y lire les différentes phases de construction des terrains avec une strate d'environ 2,5 m d'épaisseur de sable surmontée d'une carapace de limon sur environ 1,5 m. Ces terrains se sont formés en 2001 et ont probablement commencé à être limoneux à partir de 2006 car jusque là il s'agissait d'un banc de convexité.

14



Ici cela correspond à l'emplacement du village nord de la péninsule détruit en 2017.

Les berges étaient plus ou moins verticales et l'érosion semblait assez peu active durant la saison sèche. Ce que confirme les images sentinelles qui ne montrent aucune avancée du fleuve depuis novembre, contrairement à d'autres secteurs comme Yae Paw Taung

15



16



L'eau était directement pompée dans le fleuve ou in situ au centre de l'île au moyen de forage dans les nappes situées à 3-4 m

17



Des habitations ont été établies sur les parties est, les plus récentes de la péninsule. Ici installées depuis 1 an (2017). On remarque à droite une pépinière pour les semis de piments surélevée d'environ 1,5 m

18



Ecole, située dans le centre du village, construite en matériaux lourds contrairement au reste des bâtiments du village

19



Habitations légères situées dans le village et pouvant être démontée et déplacée d'une année sur l'autre

20



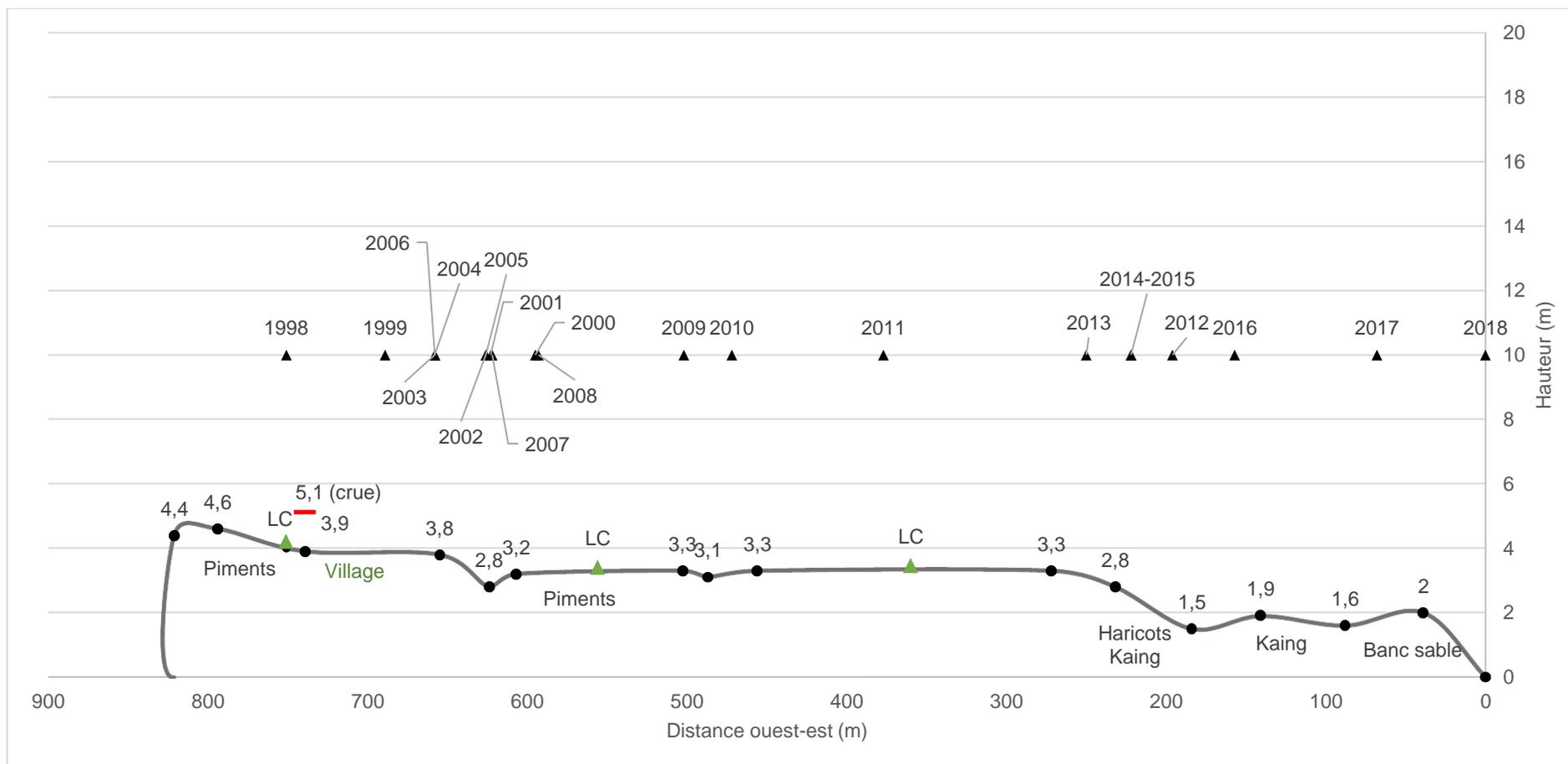


Figure 61 - Profil topographique de Pyi Taw Thar Yawar Ma (niveau d'eau à Zalun, 2,77 m) avec localisation de l'emplacement des berges par année (triangle), notons que ce déplacement montre des avancées et des retraits. Le transect n'étant qu'une représentation axiale par croisement d'informations, il n'est ici qu'un indicateur ponctuel et ne traduit pas la morphologie de la ligne d'eau dans son ensemble, LC correspondant aux limites de colonne de distribution

### 3.1.2/ Ile de Pyi Taw Thar

Sur l'île de Pyi Taw Thar on retrouve essentiellement des cultures de piment, présentes sur toutes les parties hautes de ce territoire. Des cultures de haricots sont également présentes sur les marges et des rizières sur les parties les plus basses. On remarque également que de vastes superficies de terres (est et sud-est) sont recouvertes d'herbes kaing, essentiellement *Saccharum spontaneum* et ne sont pas utilisées, ou ne l'étaient pas lors de notre passage.

#### Transect nord-est à sud-ouest

Seule la moitié nord de l'île a été parcourue lors de la journée de terrain, des mesures ont été prises autour de l'île ainsi que dans sa partie centrale. Même si l'absence d'eau ne permettait pas de faire des mesures directes, les niveaux de crue (2017) visibles sur les habitations, arbres permettaient d'avoir un point de repère relatif. Comme à Pyi Taw Thar Yawar Ma, un profil topographique a été réalisé (figure 59) sur les berges en pentes douces situées à l'est, au niveau du nouveau village de Pyi Taw Thar, de manière à identifier les différents étages et l'occupation des terres qui lui sont associées. De l'autre côté sur la berge ouest quelques mesures ont été faites au niveau du village ouest. Ces mesures est et ouest ayant été prises selon un axe assez rectiligne, elles ont été assemblées pour réaliser un profil (figure 62), l'élévation des secteurs situés au milieu ont été estimées à posteriori à partir des indices de crue et du recoupement des mesures faites sur les périphéries.

Au fur et à mesure de la formation de l'île d'ouest en est, on peut observer une discontinuité dans l'élévation, avec trois secteurs assez plats divisés par deux bras morts. On remarque que les berges les plus récentes, à l'est, sont plus élevées d'un mètre (5 m d'aggradation en 7 ans) que les berges anciennes de l'ouest (4 m d'aggradation en 12 ans). En 2018 lors de notre passage, les piments recouvraient une grande partie des espaces arpentés sur le plateau ouest entre le village et le bras mort qui coupe l'île en deux. Il ne semblait pas y avoir d'autres cultures à grande échelle en dehors de quelques plantations de bétel et de haricots en marges. En revanche, une part non négligeable de *Saccharum spontaneum* recouvrait la surface de l'île, principalement localisé sur les berges et dans les zones basses. Depuis la berge ouest (~ 3,6 m), soumise à l'érosion et faisant front au fleuve, on pouvait constater une bande parfois large de plusieurs dizaines de mètres et formant un léger bourrelet (élévation ~ 4 m) avec un sol meuble constitué de dépôts de sable grossier (tableau 11, photo 12). Ces terrains très sableux n'étaient en général pas cultivés et étaient occupés par *Saccharum spontaneum* (récoltées sur ces secteurs). Comme nous avons pu le voir sur la péninsule de Pyi Taw Thar Yawar Ma, la présence de cette végétation formant un corridor et créant un effet de rugosité permettait le filtrage et piégeage des sédiments grossiers. Ces dépôts semblaient, à priori, beaucoup plus abondant sur ces marges-ci que sur celle de Pyi Taw Thar Yawar Ma. Sur ces espaces en « déprise » étaient présentes des plantations de haricots probablement déjà récoltés, expliquant probablement la présence d'une végétation herbacée si dense et non entretenue. Les sols où étaient présentes les plantations de piments étaient de texture limoneuse. Un chenal abandonné traversant l'île, composé de sable grossier et entouré d'herbacées était situé entre 1,6 et 2 m de hauteur par rapport au niveau du fleuve. Sur ces terrains aucune culture n'était présente, probablement en raison de sa proximité verticale avec le fleuve empêchant toute culture de haricot car tardivement émergées. Ces terrains étaient également trop distants et trop sableux pour permettre la culture du riz de décrue, en tout cas à ce moment de l'année.

Le plateau situé entre les deux bras morts était de nouveau presque totalement utilisé pour les cultures de piments, la texture des sols était limoneuse. Plus à l'est une terrasse plus basse était visible, formée à la fois par la construction d'une berge en 2009 puis par l'installation d'un petit chenal

en 2013, coupant l'île en deux. Ces terrains situés à environ 3,5 m de haut, les piments seraient plantés dès septembre d'après nos informateurs. Ce chenal fut actif jusqu'en 2016, avec d'important dépôts de sables, puis son comblement progressif ainsi que la présence d'une levée en amont permis le dépôt de limons dans le lit. Cette aggradation des terrains et le changement de texture permis la plantation de piments très bas dans le chenal (~ 2,6 m) dès 2017. Les berges est du chenal, qui étaient beaucoup plus verticales étaient densément colonisées par *Saccharum spontaneum* et ne semblaient pas être utilisées.

Sur le plateau est, situé plus haut que le reste de l'île (entre 4 et 5 m), les piments étaient de nouveau présents mais une part importante des surfaces n'étaient pas utilisées (3/4). Il s'avère, d'après Benoît Ivars, que la nouvelle limite de distribution des terres de 2017-2018 se trouvait à mi-chemin entre le village et le bras mort, certains secteurs pouvaient maintenant être cultivés tandis que d'autres restaient en réserve. Mais cette limite n'était pas identifiable sur les images Sentinel 2. Plus à l'est, après le village situé dans la partie la plus haute de l'île à environ 5 m de haut, on observait des berges en pente douce correspondant aux secteurs les plus récents de l'île, ces berges en pente presque régulière étaient de nouveau couvertes de hautes herbes descendant jusqu'à environ 3 m sur un substrat sableux mais avec de nouveau localement des plantations de haricots.

Dans les secteurs sud de l'île qui n'ont été explorés que depuis le bateau (hors du transect), nous avons pu observer des rizières dans les parties les plus basses qui étaient protégées du courant, formées de vastes bancs sablo limoneux à très faible dénivelé. Certaines parties étaient densément repiquées et une partie avait déjà été récoltée tandis que d'autres secteurs étaient plus diffus et avaient une répartition aléatoire (tableau 11, photo 1 et 2).

Comme nous l'avons vu le village de Pyi Taw Thar ouest est installé sur des terrains fixés depuis 2005 à une hauteur d'environ 4 m mais il a fallu attendre environ 5 ans pour que les populations s'installent durablement sur ces espaces. Les années suivantes les terrains ont constamment avancé vers l'est (sud-est) jusqu'à 2011. C'est en 2011 que les terrains du village Pyi Taw Thar est se sont formés. Durant les années suivantes l'évolution de l'île s'est faite progressivement vers le sud-est. Ce n'est que 6 ans plus tard que les premières habitations ont occupé l'espace. Les habitats dispersés situés dans la partie centrale et nord de l'île et à priori sur des secteurs localisés à environ 4 m de hauteur sont apparus entre 2015 et 2016.

Tableau 11 - Photos de l'île de Pyi Taw Thar

1	2
	
<p>Sur la partie est de l'île étaient présents de larges bancs de convexité aux reliefs peu accentués. Sur ces surfaces sableuses étaient plantées des rizières de décrue aux limites diffuses et avec des densités variables. Ce riz semblait être d'avantage concentré dans les petites dépressions où le limon était concentré et où l'eau persistait plus longtemps.</p>	<p>Sur le même banc de convexité que pour l'image de gauche, étaient présentes des rizières beaucoup plus denses et la texture des sols était beaucoup plus limoneuse due à une localisation dans des secteurs plus calmes ainsi que grâce au piégeage des sédiments par la végétation elle-même. On pouvait remarquer qu'une partie avait déjà été récoltée sur les parties surélevées tandis que d'autres secteurs plus bas et plus tardifs étaient encore dans un stade de maturation.</p>

<p style="text-align: center;">3</p> 	<p style="text-align: center;">4</p> 
<p>Sur les rives est et sud-est de l'île étaient présentes des maisons de pêcheur situées sur des terrains à moins de 1 m au-dessus de l'eau.</p>	<p>Les cordons dunaires formés entre 2013 et 2018 s'élevant jusqu'à 5 m étaient recouvert d'un substrat limoneux et de <i>Saccharum spontaneum</i> sur les parties les plus hautes. Une végétation plus diffuse au fur et à mesure que l'on se rapprochait du fleuve et des textures sableuses</p>
<p style="text-align: center;">5</p> 	<p style="text-align: center;">6</p> 
<p>Le village de Pyi Taw Thar était situé sur les secteurs les plus élevés de l'île à environ 5 m de haut, en bordure de terrasse</p>	<p>Des plantations de haricots étaient présentes au milieu de <i>Saccharum spontaneum</i> ou parfois en petites parcelles comme ici, situées entre le village de Pyi Taw Thar et le fleuve dans les parties hautes du cordon dunaire</p>
<p style="text-align: center;">7</p> 	<p style="text-align: center;">8</p> 
<p>Sur cette île l'agriculture était principalement tournée vers les piments et le parcellaire était partagé entre des secteurs totalement cultivés et d'autres non utilisés occupés par la végétation spontanée (Poacées). Il semble que la distribution des terres soit un des critères expliquant l'absence des cultures sur ces secteurs</p>	<p>Les cultures de piments descendaient jusqu'à environ 2,5 m. Sur les terrasses situées au dessus de 3,5 m environ, les piments étaient planté dès septembre (d'après les habitants)</p>

9



Des bras morts ayant un sol de texture sableuse et dont les berges étaient envahies de *Saccharum spontaneum* traversaient l'île mais n'étaient pas cultivés

10



Un habitat situé au milieu de l'île était destiné à abriter les personnes ayant perdues leurs maisons lors de la crue

11



Les berges de la rive ouest étaient structurées par une base sableuse d'environ 3 m à 3,5 m d'épaisseur recouverte d'une couche de limon sur environ 80 cm. Les berges n'étaient pas verticales et l'érosion semblait avoir lieu durant la saison des pluies mais c'était arrêtée après novembre.

12



Comme cela avait été observé sur la péninsule de Pyi Taw Thar Ywar Ma, les marges ouest de l'île, soumises à l'érosion et aux courants du fleuve en saison des pluies étaient recouvertes de sable et envahies *Saccharum spontaneum*, on y cultivait également des haricots (déjà récoltés)

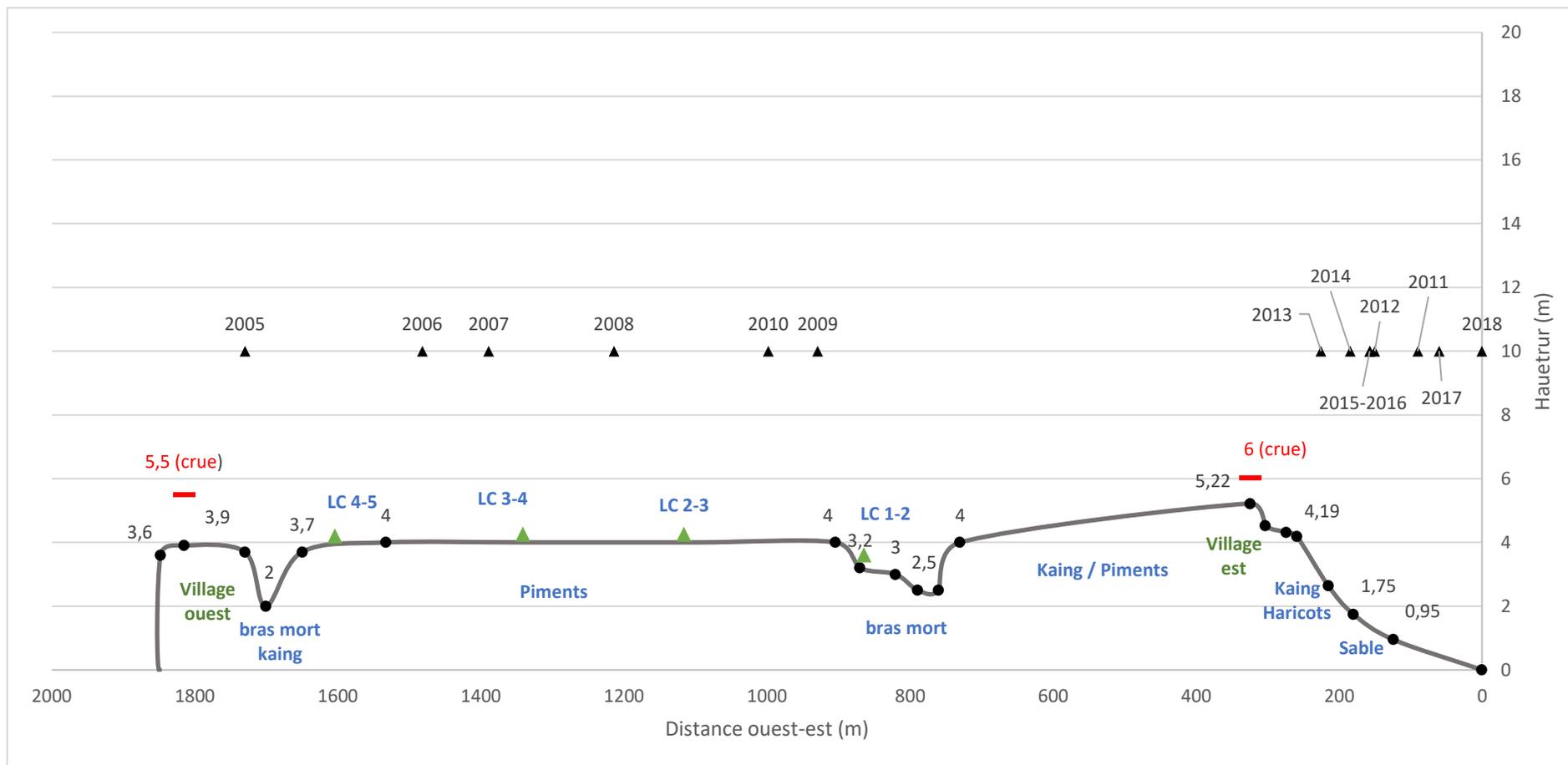


Figure 62 - Profil topographique de Pyi Taw Thar (niveau d'eau à Zalun, 3 m) avec localisation de l'emplacement des berges par année, LC correspond aux limites de colonnes de distribution des terres.

### 3.2/ Site de Shwe Din Gar Kyun / Tha Byu Ye Le Kyun (Nyaungdon / Danubiu)

Ce secteur fut visité brièvement et seule l'île de Shwe Din Gar Kyun fut arpentée. Des observations qualitatives ont été effectuées. Il s'agissait d'un secteur très surélevé d'au moins 6 m de haut, correspondant à des terres formées avant 1988 et peut être même déjà présentes en 1955 au niveau du village de Shwe Din Gar Kyun. Ici nous nous limiterons à quelques commentaires de photos et à une cartographie sommaire des cultures observées en différents points.

Sur cette île les cultures de maïs dominaient le territoire mais on pouvait également trouver des surfaces assez importantes dédiées au tabac et à son séchage sur des parcelles de maïs déjà récolté. On trouvait aussi quelques petites parcelles de piments et une parcelle aménagée pour la culture du bétel. Des parcelles de maïs étaient globalement toutes en cour de récolte en dehors de parcelles situées près de la rive est qui n'étaient pas encore mures. Sur ces berges à l'est on pouvait également trouver des haricots sur les cordons sableux. La topographie était structurée par une berge verticale à l'ouest en cour d'érosion et d'environ 6 m de haut. Tandis que sur la rive est, les berges étaient en pente douce. Des cuvettes formant des bas fond étaient présentes en différents points de l'île, les plus profondes étaient pour partie envahies de poacées (*Saccharum spontaneum*). Depuis le village en allant vers l'est on pouvait voir 3 terrasses parallèles successives (figure 63, flèches) et photos 3 et 4. La terrasse la plus élevée correspondant à celle où était le village et la pente menant à la terrasse du dessous (terrasse intermédiaire) correspondait à la berge de 1988-1992 tandis que la pente menant aux basses terrasses suivantes correspondait à la berge de 2001-2011. Durant ces laps de temps la berge est restée stable et les strates se sont accumulées avant de progresser « brutalement » vers l'est. Depuis 2012, la berge se déplace progressivement chaque année vers l'est provoquant l'atterrissement du chenal.

Concernant l'érosion survenue après les périodes de crue, on remarque une très légère régression des terres sur les marges ouest de l'île de Tha Byu Ye Le Kyun et Shwe Din Gar Kyun entre le 2 décembre et mai.



Figure 63 - Distribution des cultures autour du village de Shwe Din Gar Kyun, cartographie partielle. L'élévation indiquée est très approximative et les classes se recourent en raison de l'absence de mesures précises réalisées sur ce secteur (Sources : Google earth)

Tableau 12 - Photos du site de Shwe Din Gar Kyun

<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> 
<p>A l'est de l'île était présent un chenal, inactif durant la saison sèche mais néanmoins connecté au fleuve par l'aval. Ce chenal est en cours d'atterrissement et connaît chaque année une diminution de sa durée d'activité. Bien que ces espaces semblaient favorables à la riziculture de décrue, nous n'avons pas observé de telles cultures lorsque nous sommes passé. En revanche, les marges sud-est des îles de Tha Byu Ye Le Kyun étaient utilisées pour des rizières</p>	<p>Sur les bordures du bras mort situé à l'est des dépôts de sables formaient des cordons sur lesquels poussaient des poacées, principalement (<i>Saccharum spontaneum</i>) ainsi que des plantations de haricots, parfois au milieu de la végétation spontanée</p>
<p style="text-align: center;">3</p> 	<p style="text-align: center;">4</p> 
<p>Plusieurs terrasses et anciens cordons dunaires parallèles à la branche est se succèdent formant des ondulations dans le relief avec une constante élévation au fur et à mesure de l'avancée vers le village au centre de l'île. On observe au fur et à mesure que l'on monte vers le village une texture de plus en plus limoneuse. Les secteurs les plus bas, les plus récents et les plus sableux étaient utilisés pour les haricots et parfois semblaient ne pas être utilisés. Au fur et à mesure de la progression vers les niveaux les plus hauts par pallier correspondant aux différentes terrasses on pouvait voir le maïs à différents stades de croissance. Dans les secteurs le plus bas (ici à gauche, arrière plan vu depuis le chenal est, vers le village) le maïs étaient encore en phase de floraison tandis que les secteurs les plus haut il était déjà mature et bien souvent récolté (ici à droite, deuxième plan, vu depuis le village, vers le chenal est).</p>	

5



Le maïs était en grande partie déjà récolté avec en arrière plan une parcelle de bétel

6



Les plans de tabacs semblaient être présent sur les niveaux supérieurs et intermédiaire. Sur les niveaux supérieurs il était déjà récolté en partie et en cours de séchage tandis que sur les terrasses les plus basses comme ici, de texture limoneuse, il était encore en phase de croissance.



Figure 64 – Contours des terres durant les basses, moyennes et hautes eaux, les mesures sont celle du niveau du fleuve à Zalun. Sur ce secteur les mesures par rapport au niveau d'eau n'ont pas été réalisées. (Sources : Sentinel 2)

### 3.3/ Site de Yae Paw Taung / Té Myei (Zalun / Ahpyauk)

#### 3.3.1/ Ile de Yae Paw Taung

Sur l'extrémité est de l'île de Yae Paw Taung on retrouve en mars 2018 une très grande diversité de cultures avec une certaine prédominance du maïs, mais aussi des piments ainsi que des aubergines et tomates souvent regroupées ensemble, des haricots étaient également présent mais en grande partie récolté pour certaines variétés et parfois déjà envahis par la végétation spontanée.

Sur le plan géomorphologique, l'histoire de la construction de ces terrains est trop ancienne pour être comprise à partir des images satellites. En 2018, les processus géomorphologiques dominants correspondent à une érosion généralisée de l'île avec un front nord et surtout un front est très actif. Au nord on pouvait observer un chenal en cour d'atterrissement progressif mais situé à 7 m en contrebas de l'île au niveau du village nord-ouest. Durant la saison sèche 2015-2016 ce bras ne s'embles pas s'être déconnecté par assèchement, durant la saison sèche 2016-2017 il s'est déconnecté aux alentours du 10 janvier et en 2017-2018 ce bras était déjà déconnecté vers le 15 décembre (niveau du fleuve à Zalun de 3,9 m). Les secteurs situés au nord du chenal, sur les rives convexes étaient dans une phase de colonisation avec des zones cultivées (surement des haricots). Sur la berge sud de l'île de Yae Paw Taung, étaient présent des dépôts récents peu élevés montant jusqu'à environ 1,5 à 2 m et correspondant à des bancs de convexité en migration, protégés du courant par la façade est de l'île. L'île elle-même, dans le secteur de Yae Paw Taung Ywa Ma, pourrait être distinguée en 3 unités aux processus différents (figure 65). On pouvait ainsi distinguer :

- Une partie très élevée au-dessus de 6 m, mais principalement située entre 7,5 et 8,3 m (niveau du fleuve à Zalun de 2,73 m ce jour-là) Cette zone correspondant au village de Yae Paw Taung Ywa Ma, au village situé au nord-ouest ainsi qu'à l'ouest de la zone d'étude ou sont présentes des habitations et où débute probablement un autre village (Ye Byan ?). Ce secteur antérieur à 1955, très élevé étant probablement inondé durant plusieurs semaines par an. En 2017 les zones situées à cette hauteur ont été inondées durant au moins 63 jours cumulés sur trois périodes (figure 35). Les courants probablement lents à cette hauteur, cumulés à la végétation importante favorisent le dépôt de sédiments fins, principalement limoneux, nécessaires aux cultures. Seules les marges de l'île où le courant et les turbulences sont plus importantes peuvent être recouvertes par des dépôts de sable. C'est notamment le cas sur les zones est de l'île. En 2017 ces secteurs ont été délaissés par le fleuve dès le 1 octobre, en 2016 aussi probablement si l'on en croit les images du 15 octobre avec un niveau déjà bien bas. Sur ces zones élevées étaient principalement présentes des cultures de maïs à tous les stades de maturité. Des plantations d'aubergines, parfois mélangées à des tomates, étaient en général présentes sur des parcelles plus petites et à proximité des habitations. Des cultures de piments étaient également présentes de manière aléatoire et isolées.
- Une zone intermédiaire d'une élévation comprise entre 3 m et 6 m, correspondant à deux bras morts, l'un selon un axe est-ouest situé entre les deux villages (photo 5 et 6) et l'autre traversant de part en part l'île du nord au sud. Le bras mort est-ouest probablement antérieur à l'autre daterait probablement de plus de 50 ans (antérieur à 1955). Ce chenal fossile totalement obstrué en amont, d'une hauteur d'environ 3 m dans la partie la plus profonde présentait de petits dépôts de sables venant de l'est mais surtout d'importantes couches de limon correspondant aux eaux de décantation des sédiments en suspension. Ce bras mort était probablement recouvert par des couches d'argiles qui favorisaient le prolongement de la durée d'inondation de cet espace perché. Ces espaces sont inondés chaque année de juin jusqu'à janvier (pour les années 2016, 2017, 2018), ce qui correspond à environ 6 mois

d'inondation maximum pour les parties les plus basses. Lors de notre passage, ce chenal était principalement utilisé pour les cultures de maïs dont une surface assez importante était encore à un stade immature, mais nous ne savons rien des variétés utilisées.

Le chenal situé à l'ouest suivant un axe nord-sud et reliant la rive droite et gauche de l'île présentait davantage de signes d'activités. Il serait probablement antérieur à 1975. Bien qu'étant perché entre 4 et 5 m au-dessus du niveau d'eau ce dernier était recouvert sur une grande partie de sa surface par des dépôts de sables. Une végétation spontanée de grandes herbacées (notamment *Saccharum spontaneum*) qui recouvraient une importante partie de sa surface dans les secteurs les plus bas. La comparaison des images Google earth à la même période donne le sentiment que le fleuve était beaucoup moins actif sur ce secteur entre 2011 et 2016 et que depuis cette date les dépôts et érosion de surfaces, se sont accentués. On remarque d'ailleurs que le parcellaire a changé dans son organisation entre ces deux périodes avec en 2018 une certaine « désorganisation » dans les secteurs les plus bas avec une augmentation des surfaces d'herbacées (*Saccharum spontaneum*). Peut-être cette recrudescence de l'activité pourrait être due à l'aggradation du chenal au nord diminuant ainsi les différences de hauteurs entre les deux niveaux. Sur ces espaces étaient présent des champs de maïs mais surtout des haricots sur des parcelles délimitables mais également au milieu des herbacées dans les secteurs les plus sablonneux. De petites parcelles de piments étaient présentes localement. Ces espaces étaient également inondés jusqu'à mi-décembre en 2016 et mi-octobre en 2017 soit une durée d'inondation d'environ 4 mois maximum.

- Une zone basse située entre le fleuve (0 m) et 2 m au-dessus au sud de l'île et correspondant à un banc de convexité en migration d'est en ouest (photo 2). Ces terrains très récents formés en 2015 pour les parties les plus à l'est forment une berge à pente douce déconnectée du reste de l'île par « l'ancienne » berge perchée 2 à 3 m au-dessus. Ces terrains de texture sableuse avec par endroit de fines couches de limons étaient utilisé pour des cultures de maïs. Ces plantations étaient encore jeunes lors de notre passage. Ces terrains semblent avoir été libéré par le fleuve à partir de début octobre et mi-novembre en 2017.

Les berges qui entouraient l'île dans sa partie la plus élevée (secteur est) étaient structurées par une base de texture sableuse sur environ 4 m surmontée d'une strate de 4 m de limon compact (photos 11 et 12). Dans les parties sud de l'île on retrouvait 2 m de sable à la base surmonté d'une strate de 5 m de limon (photo 8). La distance de ces secteurs vis-à-vis du fleuve durant des dizaines d'année ayant permis le dépôt des limons sur des hauteurs très importante, couplé à une élévation rendant difficile pour le fleuve la tractation du sable jusqu'à de telles hauteurs. On remarque cependant des dépôts superficiels de sable sur les marges sud et est, là où le fleuve est le plus vif depuis quelques années. L'ancienneté du village et sa stabilité durant plus de 50 ans ne permet pas de comprendre les processus géomorphologiques à partir de l'imagerie, seules des mesures granulométriques pourraient permettre de comprendre les processus en jeux sur ce site.

Afin de prendre connaissance des niveaux maximum du fleuve dans le village de Yae Paw Taung Ywa Ma, 10 mesures du niveau de crue correspondant très certainement au niveau maximum de la crue 2017 oscillaient entre 0,85 et 1,2 m au-dessus du sol. Etant donné que le village se situait entre 7,5 et 8 m au-dessus du fleuve à l'étiage. Il est fort probable que la crue de 2017 soit montée jusqu'à environ 8,5 à 9 m au niveau de l'île. Des mesures plus directes réalisées dans le village au nord-ouest de Yae Paw Taung Ywa Ma nous ont données une hauteur de crue à 8,5 et une hauteur maximale des pilotis à 9 m (photo 9).

Tableau 13 – Photos du site de Yae Paw Taung

<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> 
<p>Au pied du village de Yae Paw Taung Ywa Ma, à l'emplacement même des terres érodées l'année précédente, une butte de sable située entre 2 et 3 m au-dessus du fleuve avait été utilisée pour la plantation de haricots. Déjà récoltés au moment de notre passage. En arrière-plan on peut voir le chenal secondaire asséché, situé au nord de l'île.</p>	<p>Sur les marges sud de l'île des bancs de sables situés jusqu'à 2 m de haut au plus près des terrasses supérieures elles même situées à 4 et 5 m (1<sup>e</sup> plan). Des maïs encore en pleine croissance ont été plantés sur ces espaces sableux et ont été libéré par le fleuve vers la mi-novembre</p>
<p style="text-align: center;">3</p> 	<p style="text-align: center;">4</p> 
<p>Dans la partie centrale de l'île, principalement dans les paléochenaux à texture plus sableuse, on retrouve dans plantations de haricots alignées en rangées sur des parcelles bien délimitées</p>	<p>Comme sur le reste des secteurs d'étude, on retrouve des haricots plantés de manière aléatoire, presque sauvage, sur les marges des îles, dans les parties les plus instables et les plus sableuses comme ici au milieu d'un paléochenal. Sur certaines berges on pouvait même en observer parfois sur les pentes abruptes des berges</p>
<p style="text-align: center;">5</p> 	<p style="text-align: center;">6</p> 
<p>Ici le paléochenal est-ouest est utilisé pour le maïs à cycle tardif en raison de la présence d'eau jusqu'au mois de janvier dans les parties les plus basses, on y remarque des petits bancs de sable, indices de la capacité du fleuve à la mobilisation des sédiments grossiers sur ces secteurs perchés à plus de 6 m.</p>	

7



Les cultures de maïs étaient les plus représentées sur l'île à tout les niveaux, on pouvait y observer tout les stades de croissance jusqu'à la récolte

8



Sur cette île l'eau permettant d'irriguer les cultures était pompée directement dans le fleuve. Sur cette berge sud, on pouvait observer à la base 2 m de sable puis 5 m de limon.

9



La dernière crue de 2017 est montée jusqu'à environ 8,5 m au niveau de cette maison et la hauteur maximale des pilotis était à 9 m. Ces habitations étaient situées en limite nord du village, à quelques mètres de la berge. Son propriétaire nous a dit attendre de vendre sa récolte de l'année pour déménager.

10



On retrouvait des cultures d'aubergines et de tomates, parfois associées, en général les parcelles se trouvaient à proximité des habitations, ici à l'extrémité est du village de Yae Paw Taung Ywa Ma

11



Les marges nord de l'île perchées à 7,5 m de haut, le bras situé au nord était en cours d'atérissage et certaines parties un peu plus élevées commencées à être colonisées pour les plantations de haricots (arrière plan gauche)

12



Le village de Yae Paw Taung Ywa Ma situé entre 7,5 et 8 m de haut a commencé à disparaître par le nord à partir de 2010 et devrait débuter une érosion par l'est à partir de 2018, la base de la berge était structurée par 4 m de sable surmontée d'une strate de 4 m de limon.

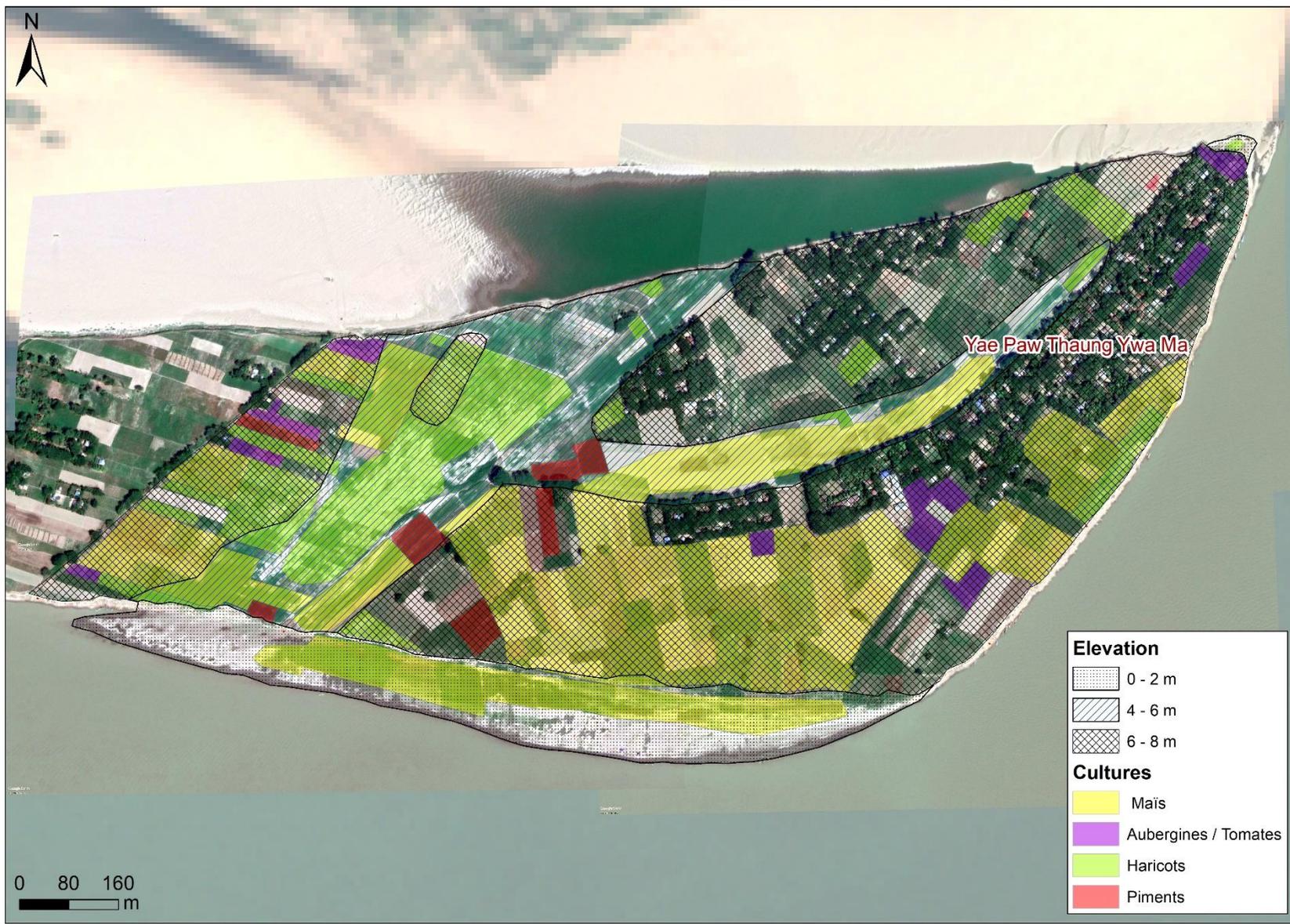


Figure 65 - Occupation des sols (partielle) à l'est de l'île de Yae Paw Taung le 27 mars 2018. (Sources : Google earth)

### 3.3.2/ Ile de sable de Yae Paw Taung

En 2018 on ne retrouvait sur l'île que des cultures de haricots en dehors de quelques petites parcelles de riz bien localisées dans les zones calmes les plus basses entre 0 et 1,5 m. Au moins 8 variétés de haricots différents étaient cultivées sur l'île. Ces cultures étaient présentes de manière plus ou moins synchronique sur environ 70 ha, correspondant à environ 20% de la surface de l'île, mais lors de notre passage une grande partie de ces terrains n'étaient pas entretenus ou bien les récoltes avaient déjà eu lieu. On pouvait observer deux modes d'organisation des cultures différents, l'un se faisait sur des parcelles délimitées entretenues avec une élimination systématique des herbacées qui étaient probablement brûlées. Ces terrains étaient principalement localisés dans la partie ouest des secteurs végétalisés, le reste des espaces végétalisés étaient occupés par des plantations « sauvages » les haricots semblaient semés sans un soin particulier et selon une répartition aléatoire, sur des petites parcelles, parfois ils suivaient les microreliefs. Ces cultures de haricots étaient présentes entre 3 m et 7,5m, la hauteur maximale.

On peut décrire les processus géomorphologiques et les modes d'occupation des terres associés selon 4 zones. Contrairement aux autres secteurs étudiés, ici le fleuve reste très actif avec des dépôts de sable jusqu'au sommet de l'île, à 7,5 m.

- Les eaux calmes protégées connectées au fleuve à l'ouest, ces espaces localisés à l'ouest de l'île sont protégés du courant par la présence d'un banc de sable de 3 m de haut formé depuis 2016 et qui a doublé de surface en 2017. La présence de ce banc est venue protéger les berges et permettre le dépôt d'importantes épaisseurs de limon favorisant ainsi le développement de la végétation herbacée mais aussi la culture du riz. Lors de notre passage il n'y avait qu'une seule parcelle de quelques 150 m<sup>2</sup> située entre 0,8 et 1,3 m au-dessus du niveau d'eau sur la berge nord, plus ancienne. Mais il est fort probable que des cultures aient précédé dans la saison et soient aujourd'hui abandonnées. Cette berge présentait une épaisseur de limon bien plus large probablement en raison de son âge (2 ans) et surtout de la présence de végétation et d'une protection du courant tandis que la berge sud correspondait au banc de sable et datait de quelques mois.
- Les surfaces recouvertes de sables, majoritaire sur cette île, représentent environ 80% de la surface de l'île et seraient situées entre 0 et environ 3 m. Les marges nord et ouest de l'île correspondent aux dépôts de convexité avec une pente douce et constante et dont les limites dépendent des fluctuations du niveau d'eau (figure 66). Ces espaces recouverts de sable n'étaient utilisés pour aucune culture. Un deuxième type de banc était présent sur la partie sud de l'île. Ce dernier s'est formé en 2016 et 2017 sur une hauteur de 3 m (tableau 14, photo 1,3,4) et ne semble pas avoir été construit par les mêmes processus avec d'importants contrastes de hauteur et un front de dune active de 3 m de haut. La texture des sédiments, très grossière, sans couches limoneuses, ne semble pas convenir au développement des plantes herbacées dans les parties les plus hautes (en dehors de quelques pieds dispersés). Il est possible que ce banc se soit construit de manière très rapide lors des crues et que la topographie en plateau et sa frontalité avec les secteurs les plus turbulents du fleuve n'ait pas permis le dépôt de limons nécessaire au développement de la végétation. En revanche on observe des surfaces colonisées par les herbacées dans les parties les plus basses de ce banc, sur l'extrémité ouest. Elle pourrait s'expliquer par la protection de ces espaces vis-à-vis des courants, la faible pente, sa localisation proche du niveau de l'eau en saison sèche et surtout la présence de limons (plutôt issus de la décantation).

- Les terres moyennes correspondent à des espaces relativement plats situés entre 3 et 6 m d'élévation, sur ces secteurs l'on pouvait observer la présence de champs de haricot, en cour de récolte au moment de notre passage (27 mars 2018), ces haricots semblent avoir été planté plus tardivement que dans le reste de l'île et se situaient entre 3 et 5 m au-dessus de l'eau. On remarque au travers de l'indice NDVI (annexe 6.3) que le 2 février il n'y avait aucune trace de végétation mais que le 4 mars une végétation était déjà à un stade de maturité (faible chlorophylle). Cela signifierait que la croissance aurait eu lieu entre le 2 février et le 4 mars pour une récolte fin mars. Ces terrains situés entre 3 et 6 m de haut auraient été libéré par le fleuve aux alentours du 5 novembre 2017. Ces secteurs présentaient une couche uniforme de limon dessiqué en polygones d'environ 12 cm d'épaisseur correspondant probablement à la dernière crue, les couches inférieures étaient sableuses. Ces secteurs restaient protégés de l'érosion et sont dans un processus de construction.
- Les terres hautes, correspondent à des espaces situés entre 6 et 7,5 m. Ces secteurs semblaient peu utilisés au moment de notre passage en raison de la présence de *Saccharum spontaneum* en forte densité. On pouvait remarquer de petites parcelles de haricots bien délimitées et sur d'autres endroits des haricots au milieu de la végétation herbacée. En réalité il semblerait que les récoltes aient eu lieu bien avant et que les espaces étaient déjà en jachère, bien que le temps restant avant que ces secteurs soient de nouveau sous les eaux soit d'environ 3 mois. L'indice NDVI (annexe 6.3) nous montrant une période de croissance aux alentours du 2 février mais terminée vers le 4 mars. Ces secteurs ayant été libéré du fleuve théoriquement vers le 10-15 octobre. On pouvait observer sur ces secteurs élevé une topographie assez contrastée formée de microrelief correspondant très certainement aux dépositions et érosion successives durant les deux dernières saisons des pluies et dessinés par les trois pics de crue de l'année 2017 survenu sur ces hauteurs. On pouvait constater un niveau supérieur plat vers 7,5 m avec environ 10 cm de limon. Ces niveaux supérieurs ont certainement été formé en 2017 lors de la première crue (pic le 21 juillet) et ce pourrait être les deux autres crues-décru de la même année (pics les 28 aout et 25 septembre) qui auraient sculpté ces reliefs. Ces secteurs présentaient un sol mélangé de sable et de limons, on pouvait observer des cultures sur les parties les plus hautes des dunes qui pourraient être les premiers espaces cultivé. L'érosion sur la berge sud permettait de lire la stratification, l'ensemble de ce secteur était structuré par une importante couche de sable d'environ 5,5 m surmontée d'une strate plus compacte limoneuse ou limono-sableuse de 80 cm environ.

Sur ce secteur nous n'avons pas pu réaliser de mesures des niveaux de crue mais l'image satellite du 13 septembre et les mesures réalisées corrélées aux niveaux d'eau nous permet d'estimer approximativement la hauteur des crues maximales de 2017 à environ 1,5 m au-dessus des secteurs les plus élevés, soit environ 9 m.

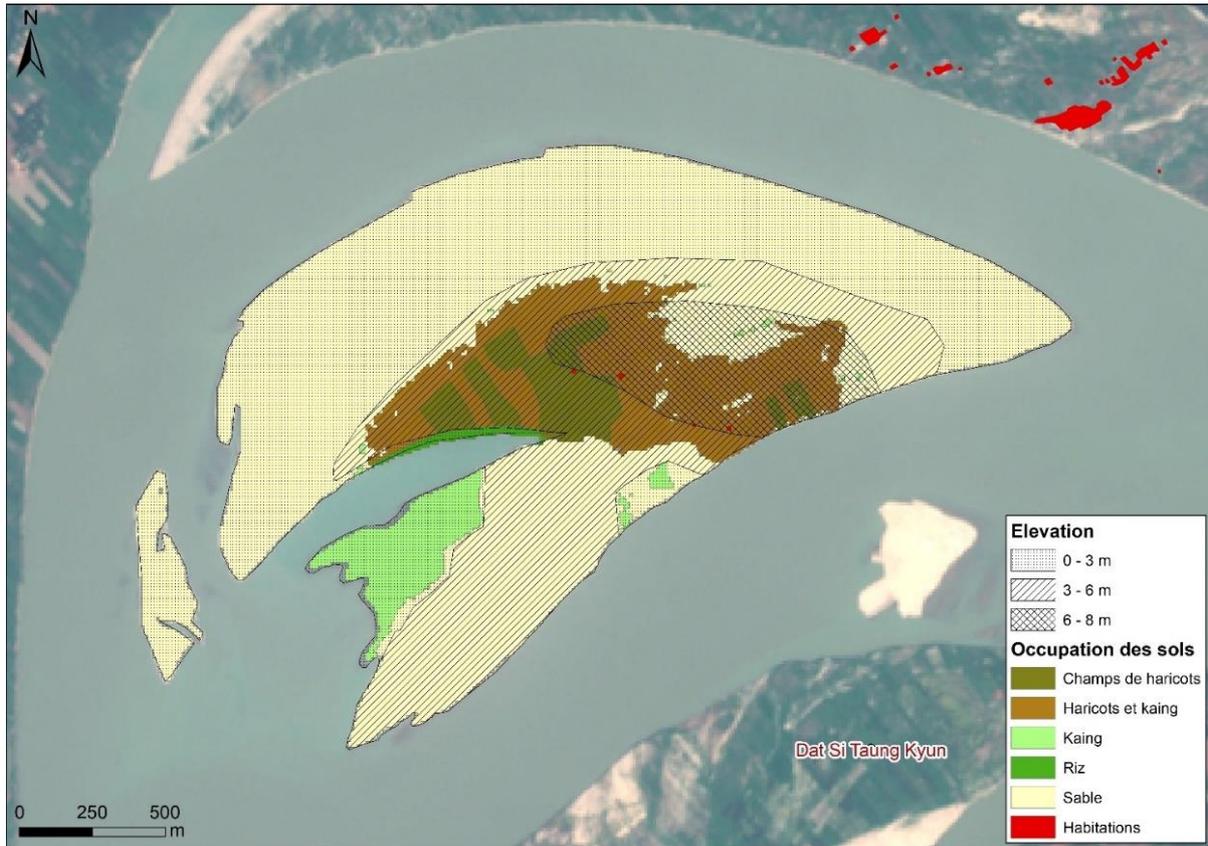


Figure 66 – Occupation des sols et élévation sur l'île de sable de Yae Paw Taung, les surfaces de « riz » correspondent aux rizières existantes et potentielles (potentiellement déjà récoltées) (Sources : Sentinel 2)

Tableau 14 – Photos des différents secteurs de l'île « île de sable »

1	2
	
<p>Sur cette image on peut observer à gauche un banc de sable de 3 m de haut déposé lors de la dernière crue de 2017 et au fond à droite une berge datant de 2016 également à 3 m de haut en partie recouverte de <i>Saccharum spontaneum</i> à partir de 1,3 m et sur laquelle sont présentes les parcelles de haricots, entre les deux une zone calme protégée du courant favorisant le dépôt des limons et le développement des héliophytes avec localement des rizières de décrue (zoom photo de droite).</p>	<p>Parcelle de riz de décrue en phase de maturation située entre 0,8 et 1,3 m par rapport au niveau du fleuve et située dans les secteur calme protégé des courants rapides du fleuve et favorable au dépôt de limons. Au moment de notre passage il n'y avait que cette modeste parcelle d'environ 150 m<sup>2</sup> dont les contours étaient nettement délimités.</p>

3



Vaste banc de sable issu de la charge de fond déposé lors des crues de 2017, on remarque que la végétation herbacée est très clairsemée et différente des espaces à substrat limoneux.

4



Même secteur que sur l'image de gauche, avec le front de dune active de 2,5 à 3 m de haut formée en 2016 et 2017, à gauche la berge limoneuse haute de 3 m également mais plus ancienne permet le développement d'une végétation dense, protégée du courant par le banc de droite.

5



Cette parcelle de haricots bien distincte entre les poacées (*Saccharum spontaneum*) était la plus proche du niveau d'eau et se situait à 3 m. Elle était en cour de récolte, ici la strate de limon était d'une épaisseur de 10 à 20 cm.

6



Ces parcelles de haricots situées à une hauteur un peu plus élevée que celle de l'image de gauche, à environ 5 m de haut, avait déjà été récoltée et commençait à être envahie par la végétation. Des habitations temporaires étaient présentes sur ces espaces.

7



A environ 5 m au dessus du fleuve, on observe à gauche des dépôts de limon et à droite le début du banc de sable situé au sud de l'île déposé postérieurement. Sur les dépôts de limon sont présents les vestiges d'une plantation de haricots récolté et totalement desséchée.

8



La berge sud de l'île à commencée à être érodée à partir de juillet 2017 et c'est poursuivie de manière soutenue jusqu'en décembre, on voit la même limite du banc de sable que sur l'image de gauche, des cultures semblent avoir été tentées sur une partie des zones sableuses probablement en raison d'une couche de limon à quelques cm en dessous du sable, ou bien le vent peut avoir recouvert les cultures d'une couche de sable.

9



Ici, à 6 m de haut, on observe des haricots un peu moins desséchés que dans d'autre lie de cette zone élevée mais néanmoins récoltés. Au vu de la proximité des cultures vis-à-vis de la berge, on devine que le fleuve a avancé depuis leur plantation (figure 56), sur ces secteurs frontaux au fleuve des dépôts de sable étaient présent en plus grande densité que dans les autres parties hautes mais centrales. Les blocs de limon disséqué en bloc dissociés et disposés sur du sable non cohésif s'effondraient sous leur propre poids.

10



Les habitats consistaient en une habitation faite d'herbe kaing (*Saccharum spontaneum*) et de bambou et de taules, d'environ 10 m<sup>2</sup>. Ici l'habitation était située à 7 m au-dessus du fleuve, sur une des parties les plus hautes de l'île mais d'autres se situaient à environ 5 m. Les cultures de haricot déjà récoltées étaient présentes tout autour de l'habitat

11



Des plantations de haricots étaient présentes jusqu'en haut de l'île et occupaient presque tout l'espace, lors de notre passage il ne subsistait que des restes desséchés, certains espaces semblaient être délimités en parcelle défrichées. On constate que depuis la récolte la végétation spontanée n'a pas conquis cet espace là.

12



D'autres secteurs situés également sur les secteurs les plus élevés 6 à 7 m semblaient être moins aménagés et les parcelles mal délimitées ou du moins plus difficiles à discerner à cette époque de l'année. Il est probable que la végétation herbacée (*Saccharum spontaneum*) n'ai pas beaucoup évoluée depuis la récolte et que son développement ait été antérieur.

13



Sur les parties les plus hautes et centrales de l'île on pouvait observer une micro topographie faite de butes et de creux, qui semblait pour partie structurée en sillons correspondant au passage du courant. Dans ces secteurs, la végétation était davantage développée sur le sommet des butes mais était probablement postérieure à leur formation et aurait profitée de ces espaces libérés en premier. D'après les images il n'y avait pas de végétation à cet endroit en février 2017. Cette topographie a probablement été sculptée lors des trois crues et décrues majeures qui ont eu lieu en 2017.

14



Au milieu de cette topographie, des cultures de haricots étaient présentes sur certaines butes qui s'élevaient jusqu'à 7,5 m peut être 8 m. Il s'agit probablement des premiers secteurs à avoir été colonisés à partir de la décrue de novembre.



Figure 67 -- Contours des terres durant les basses, moyennes et hautes eaux, les mesures sont celle du niveau du fleuve à Zalun. Sur ce secteur n°3 si 2,89 m = 0 ; 5,56 m = environ 3 m ; 11,5 m = environ 8 m (Sources : Sentinel 2)

## IV/ Discussion

### 1/ Evolution du delta

Les travaux réalisés à l'échelle du delta montrent un espace complexe structuré en plusieurs compartiments aux dynamiques très différentes. Sur un plan transversal, d'ouest en est, on observe des vastes territoires stables et protégés par les digues mises en place au 19<sup>e</sup> siècle. A l'opposé de ces espaces protégés, on observe deux branches étroites (Bassein et Myitmaka) plus ou moins libres de mouvements et la branche principale de l'Irrawaddy, confinée sur ses deux rives par les digues et correspondant à des terres alluviales régulièrement remodelées, des espaces où le fleuve poursuit son déplacement incessant et qu'il inonde chaque année. Au sein de la zone fluviale intra-digues de la branche de l'Irrawaddy, on peut distinguer trois « mega zones » longitudinales : l'une en amont, débute au niveau de Kaunaung, après les gorges et se poursuit jusqu'en amont de Zalun. Elle correspond à un vaste chenal en tresses extrêmement mobiles. Cette zone ressemble beaucoup aux secteurs situés en aval de la confluence avec la Chindwin. La deuxième « mega zone » qui succède, correspond au chenal principal entre l'amont de Zalun et le secteur de Pyi Taw Thar, à la difffluence des branches de China bakir et de Shwelaung. Cette méga zone est très hétérogène et elle est structurée par différents compartiments fluviaux dont certains rectilignes ont aujourd'hui des fonctions de transfert et d'autres en multiples chenaux formant des îles et bancs de sables sont plutôt des espaces de stockage sédimentaire. La troisième zone correspond aux différentes branches diffluentes (Panheaing, Shwelaung, China bakir) dont les berges se stabilisent progressivement vers l'aval. Dans ces secteurs le fleuve est de plus en plus influencé par les marées et le courant est ralenti par effet de backwater, les chenaux prennent des formes en méandres sur la branche de Shwelaung, puis des formes anastomosées plus en aval avec une fixation progressive des berges.

Lors de ces travaux à l'échelle deltaïque nous nous sommes concentrés sur les secteurs que nous avons identifiés comme étant la partie active du chenal principal du delta, comprise entre l'apex du delta au niveau de Monyo, à la première difffluence (Myitmaka) et le début des difffluences de Shwelaung et China bakir. Il s'agit de secteurs où d'importants mouvements de migration latérale ont eu lieu entre 1988 et 2018 et qui ont été identifiés de manière qualitative comme « très actif » et « actif ». On a pu observer que ce chenal était structuré en différents secteurs ayant parfois connu une certaine pérennité dans leur forme fluviale entre 1988 à 2018 mais néanmoins des changements avec une accentuation des caractéristiques pour certains d'entre eux.

Les secteurs de stockage sédimentaire structurés par de multiples chenaux formant des îles et une largeur intra-digues importante pourraient être qualifiés de « foyer » d'îles. L'observation d'images Landsat et des cartes de 1955 et 1967 montre que ces espaces ont constamment été occupés par des îles sur une zone de mobilité latérale maximale correspondant aux digues. Ces digues pouvant être définies comme une limite extrême de mobilité du fleuve depuis leur construction, à partir des années 1860, date de début d'implantation des aménagements sur le delta. Les cartes de 1955 et 1967 montrent que dès cette époque certaines digues étaient déjà présentes à leur emplacement de 2018 ou bien beaucoup plus proches d'une rive à l'autre, signifiant que le chenal évoluait autrefois (postérieurement à la construction des digues) dans un espace beaucoup plus confiné qu'en 2018.

Dans certains cas, certaines berges distantes des digues en 2018 n'ont presque pas évoluées depuis 1988, tandis que d'autres situées dans la courbure du fleuve, là où le courant est le plus puissant, poursuivent sans cesse leur migration en détruisant continuellement les digues réaménagées année après année sur le nouveau front d'érosion. A contrario, certains secteurs situés dans des zones à courant fort et où sont présentes des digues, semblent avoir résisté au temps et le fleuve semble s'y

buter, contraint par la berge. Mais sur ces secteurs, l'on ne sait si les digues sont responsables du maintien des berges ou si leur retrait continu depuis le 19<sup>e</sup> siècle ne les a pas menées à s'établir sur des espaces à plus forte cohésion. Par exemple, des sols qui seraient structurés par d'épaisses couches d'argiles déposées dans d'anciens marais aujourd'hui comblés. Ou bien des sols suffisamment anciens pour être indurés par la migration des oxydes de fer, comme cela a pu être observé sur des berges non insulaires. D'autres secteurs comme les tronçons 4-5 situés loin des digues depuis 1988 semblent être relativement stables et tendant vers un rétrécissement de la bande active. Cependant l'emplacement des digues et l'observation des levées et paléchenaux suggère qu'autrefois le fleuve était beaucoup plus proche de la rive gauche et potentiellement plus dynamique dans ce secteur-là. Cette localisation « témoin » des digues, amène à penser une mobilité du fleuve beaucoup plus active avant 1988 ou du moins un déplacement radical de la zone active vers la rive droite.

Plus en aval, l'observation générale des aménagements, couplée aux indices laissés par les paléoméandres montre un secteur aval, au niveau de Pyi Taw Thar, qui aurait eu une très grande amplitude de mouvement depuis 1860 avec une translation généralisée d'ouest en est. Les courbures des paléochenaux et leurs formes amènent à penser que des chenaux formés de méandres auraient précédé le chenal en tressages et anabranches à banc de sable visible en 1988-2018 et que ce style en méandre se serait peu à peu déplacé vers l'aval. On remarque d'ailleurs, à partir d'une observation qualitative, dans les secteurs en aval de Pyi Taw Thar, qu'entre 1988 et 1990 le chenal principal était méandriforme et qu'il a évolué progressivement vers un tressage avec une multiplication des branches depuis l'amont vers l'aval. Cette évolution du méandre vers le tressage pourrait être expliquée par une potentielle augmentation des apports de sédiments venant de l'amont. La branche de Daga fixée depuis une date inconnue par les digues ou naturellement, présente la signature d'un style méandriforme et pourrait être le témoin d'une époque où le delta était moins approvisionné en sédiments. Tandis que les autres branches qui n'ont jamais cessées d'être approvisionnées en eau et en sédiments ont depuis longtemps effacées leurs paléo méandres par migration latérale du chenal.

Très en aval dans le bas delta, où les influences marines sont de plus en plus fortes, on constate des mouvements légers dans des courbes de chenaux avec tantôt des rétractations tantôt des élargissements locaux de chenaux. Certaines de ces évolutions pourraient peut-être s'expliquer par un balancement des flux sédimentaires dictés par le courant qui fluctue d'un chenal à l'autre en fonction de la position des branches vis-à-vis du courant. Par exemple entre les branches de China bakir et de Shwelaung qui ont été tour à tour le chenal le plus vif en fonction de l'axe du chenal amont et de la présence de banc de sable et îles venues obstruer partiellement les chenaux à l'endroit des diffluences, privilégiant une branche plutôt que l'autre.

A l'échelle des tronçons de la partie active du chenal principal, on observe des évolutions assez différentes. On identifie dans la zone amont (tronçons 1, 2, 3) ce qui pourrait être un front de progradation avec un étalement des surfaces en eau mais aussi une augmentation en parallèle des surfaces de bancs de sable qui ne sont pas recouvert par l'eau mais progressent en parallèle de l'étalement des flots. Ce comportement pourrait potentiellement traduire une diminution de la profondeur du chenal et son étalement dû à des apports de sédiments de plus en plus importants. Les courbes de tendances des surfaces en eau et sédiments montrent d'ailleurs une tendance continue dans le temps.

Les tronçons situés en aval (4 à 17) présentent des intermittences selon les secteurs avec des tendances opposées. Certains montrent clairement un rétrécissement des surfaces en eau et une diminution parallèle des surfaces en banc de sable, signifiant potentiellement une incision du chenal. Les tronçons 4-5, 7 et le 8 (correspondant au secteur d'étude n°2) semblent être de plus en plus contractés avec un abandon des chenaux secondaires tandis que d'autres comme le site n°3 de Yae

Paw Taung ne semblent pas avoir beaucoup changé dans le temps et restent des espaces où les îles naissent, évoluent et disparaissent.

Il est fort probable que la concentration des eaux dans un chenal unique en amont de Yae Paw Taung (tronçon 4-5) induise une amplification du courant qui se traduit alors par une dynamique plus forte en aval au niveau du tronçon 6 et l'accentuation de l'érosion et de la formation d'île par l'accumulation des dépôts.

Le tronçon n°17 correspondant à la branche de Panheaing au nord de l'agglomération de Nyaungdone est assez intéressant car il est connecté au chenal principal et on y observe plusieurs phases d'évolution sur une courte distance avec une époque où le chenal évoluait en méandre dans les années 1955 avant de prendre une forme en anabranches formé de petits bancs de sables alternés. Puis en évoluant encore pour devenir à partir de 2003 un chenal de plus en plus stable avec une disparition des bancs de sables et un recouvrement de ces derniers par une extension des surfaces en eau. Ce comportement pouvant être attribué à des apports de sable de plus en plus importants dans le chenal principal faisant monter le niveau d'eau dans la branche de Panheaing.

Cette analyse par tronçons est à prendre avec précaution, car une observation qualitative du fleuve montre également une certaine cyclicité de l'évolution du chenal dans un espace assez limité, avec un retour (telle une longueur d'onde) non symétrique. Ces tendances sont observables sur certains tronçons et on peut le voir par les fluctuations des courbes avec des périodes tandis que certains tronçons montrent une tendance marquée. Les tronçons montrant des fluctuations pourraient être des secteurs encore soumis à un équilibre dynamique, et dont la fréquence semble être en partie déterminée et délimitée par le confinement du chenal (en grande partie déterminé par les digues) tandis que les secteurs présentant une tendance pourraient être en cour d'évolution. La méthode que nous avons utilisé par découpage en tronçon permet d'isoler des processus et des tendances locales qui seraient lissées à l'échelle de l'ensemble du fleuve, mais cette méthode accentue des tendances sur des secteurs qui sont à mettre en relation directe avec les parties situées en amont et en aval. Pour ces raisons une zonation kilométrique aurait peut-être été plus pertinente mais néanmoins longue à mettre en place compte tenu du format temporel de cette étude et également complexe dans un espace comme le delta qui se subdivise tour à tour en branches diffluentes, qui répartissent les flux.

Néanmoins, les résultats sont intéressants à plus d'un titre, car ils permettent avant tout de mieux comprendre l'histoire de chaque partie du fleuve. Mais il est difficile de discerner et de définir une quelconque tendance sans entreprendre des analyses plus fines à partir d'échantillons. On ne peut que suspecter des grands changements à venir dans la morphologie du fleuve si l'on prend connaissance des récents changements d'occupation du sol entrepris à grande échelle (mines d'or et de jade, déforestation, exploitation du sable dans le lit mineur, mise en place de barrages). Ces changements apparus dans une relative simultanéité, pourraient commencer à influencer l'évolution du delta. Les signes de ces changements pouvant se traduire par des changements morphologiques tels que la multiplication des îles, l'incision du fleuve, l'élargissement du chenal, l'élévation du niveau d'eau entre les ligues. Le delta est le dernier espace d'expression du fleuve mais c'est probablement le plus complexe, car c'est dans cet espace que confluent et se combinent les facteurs, les processus et les changements ayant lieu dans l'ensemble du bassin versant. L'étude réalisée par SOBA sur l'observation du bassin versant a montré que de grandes transformations avaient eu lieu sur l'ensemble du territoire depuis les années 2000. Certains aménagements contribuant théoriquement à une augmentation massive des apports sédimentaires dans les cours d'eau. On pense notamment aux mines d'or particulièrement présentes dans le haut Ayeyarwady ainsi que dans les sous-bassins de la Mu et surtout de la Chindwin où l'on retrouve également des mines de jade. Ces surfaces exploitées s'étendaient sur près de 1200 km<sup>2</sup> en 2016 et participent à d'importants rejets dans les cours d'eau. En parallèle de ces activités et sur une même période, le Myanmar connaît depuis les années 2000 une déforestation exponentielle et généralisée participant également à la déstabilisation des sols et à leur transfert vers l'Ayeyarwady. D'autres aménagements comme la création de

barrages notamment sur des affluents majeurs Myitnge, Shweli, Taping et Mu ont des effets inverses en piégeant les sédiments grossiers. De manière plus localisée on observe une exploitation du sable et du gravier dans le lit mineur de l'Ayeyarwady réalisé entre Mandalay et Nyaungdone et particulièrement entre Pyay et Hinthada, participant vraisemblablement à une accentuation de l'érosion à l'échelle locale en amont et en aval des sites d'exploitation ainsi qu'à un réajustement permanent du lit.

## 2/ Autour des archipels

### 2.1/ L'île en question

Même si la littérature relative aux formes fluviales et les facteurs de contrôle est assez vaste, celle qui porte sur les îles et les processus de construction semble être assez limitée. Tout au long de ces travaux, le terme d'île et de bancs de sables ont été utilisés tour à tour sans jamais être clairement défini. Parmi les distinctions que l'on peut trouver dans la littérature figure les critères de Malavoi et Bravard (2010) :

- Les îles sont généralement végétalisées par une strate arborée tandis que les bancs le sont par une strate herbacée pionnière.
- Les îles sont généralement stables dans l'espace et dans le temps alors que les bancs sont fréquemment remobilisés.
- Le sommet des îles se situe au même niveau que celui de la plaine alluviale lors que les bancs sont bien en dessous du niveau de pleins bords.

Mais dans le cadre de cette étude nous n'avons pu observer une semblable typologie ; nous n'aurions à faire sur l'Ayeyarwady qu'à des bancs de sable et non à des îles en raison de l'absence de végétation rivulaire arborée d'origine spontanée ; ou même un début de régénération naturelle d'espèce arborescentes sur le delta. Les seuls arbres présents sur les archipels étudiés avaient été plantés au milieu des villages ou de manière ponctuelle en bordure de cultures et l'ensemble des îles sont utilisées et cultivées jusqu'à la rive du chenal. La seule végétation rivulaire observée est une végétation herbacée pionnière pouvant monter jusqu'à 3 m en ce qui concerne *Saccharum spontaneum* et composée de plantes herbacées appartenant aux familles des poacées et des cypéracées. Mais leur importance doit être soulignée car elle demeure une des clés de la stabilisation des terres et surtout de l'établissement des cultures. Les arbres plantés aux milieux des villages ne présentent pas un comportement ripicole, avec une architecture propre aux espèces rivulaires et semblent d'avantage choisis pour leurs larges ports, faisant ombrage aux habitations et au bétail. Ils sont probablement choisis pour leur croissance rapide (ce qui est aussi un aspect propre aux espèces pionnières et rivulaires). Un autre critère entrant en compte dans la sélection des espèces se situait au niveau de l'hydropériode et de leur résistance aux longues durées d'inondation avec environ 2 mois cumulés en 2017 sur les secteurs les plus élevés ou étaient présentes les habitations. Il est fort probable que l'un des facteurs pouvant expliquer l'absence de végétation arborée en dehors de l'agriculture, même à un stade immature et sur des berges restées stables depuis plus de 30 ans soit l'absence de banque de graine ou même de population mère (foyer) favorisant la propagation des semences et la régénération. L'agriculture est omniprésente sur l'ensemble des plaines alluviales du fleuve et l'on ne retrouve aujourd'hui que quelques secteurs forestiers dans les backswamps entre Myitkyina et Shwegu mais ce sont des régions aux climats très différents et les espèces présentes ne sont probablement pas les mêmes que celles qui peuvent se développer sur le delta. On retrouve aussi quelques petits massifs peut être spontanés disséminés sur des îles en aval de la confluence de la Chindwin et situés en région sèche. Les seules populations mères pouvant permettre la dissémination de propagules et une régénération d'espèces adaptées aux conditions abiotiques du delta seraient probablement situées le long des affluents.

A l'échelle du delta, une première distinction pourrait être établie entre ce que l'on appellerait les îles rocheuses, les îles deltaïques et les îles alluviales. En effet, le delta de l'Ayeyarwady peut être défini comme un vaste réseau de plusieurs milliers d'îles aux échelles variables formant des terres emboîtées les unes dans les autres par un réseau de chenaux anastomosés. Certaines sont aujourd'hui fixées et fossilisées par la construction de levées et de basses terrasses naturelles mais

surtout par les aménagements britanniques du 19<sup>e</sup> siècle. Certaines îles rocheuses correspondant au relief d'origine tectonique dominant cet espace relativement plat et sont situées dans des secteurs très localisés, notamment au sud-ouest et au sud-est du delta, il s'agit de massifs rocheux miocènes et pliocènes témoins des reliefs aujourd'hui fossilisés par la plaine deltaïque formée durant l'Holocène.

Mais l'espace défini comme alluvial, beaucoup plus localisé au sein de l'espace deltaïque est un espace aux contours bien délimités et qui correspond aux secteurs régulièrement transformés par le fleuve au milieu duquel se forment des îles éphémères, cet espace pourrait être en partie défini aujourd'hui par sa position entre les digues (intra-digues). Même si depuis 1860, ces endiguements n'ont eu de cesse de s'éloigner d'une rive à l'autre avec la migration du fleuve et la destruction des digues, ces aménagements définissent probablement les limites externes maximales de mobilité du fleuve depuis leur implantation. Une étude historique à travers les archives permettrait de mieux retracer l'évolution du fleuve en suivant la chronologie des constructions depuis les premiers aménagements du 19<sup>e</sup> jusqu'à aujourd'hui. Ce sont ces îles alluviales qui ont fait l'objet de cette étude. Une typologie vernaculaire des paysages riverains définie par les habitants des îles a été identifiée par Benoit Ivars, mais dans ce rapport nous nous sommes limités à une caractérisation géomorphologique.

Au-delà du concept d'île, connu comme étant un espace terrestre entouré d'eau de manière permanente ou temporaire. L'île fluviale pouvait présenter quelques difficultés car ses limites changeantes d'une année sur l'autre le sont également d'une saison sur l'autre. Leurs surfaces et leurs limites changent fortement en fonction du niveau du fleuve qui varie parfois avec une amplitude de 8 à 9 m au cours de l'année. Même durant la saison sèche l'étendue des îles peut fortement varier dans des secteurs peu profonds. La distinction et la désignation d'entités géographiques « îles » pouvant parfois être difficile à définir sur un cours terme et en ne se basant que sur un instantané. C'est le cas de l'île de Shwe Din Gar Kyun qui a été tantôt rattachée à la plaine alluviale à l'est, tantôt subdivisée en plusieurs îles et tantôt regroupées entre elles. L'île de Yae Paw Taung présente les mêmes difficultés dans le découpage puisqu'elle était de plus en plus proche de la plaine et le bras la séparant est maintenant atterri une bonne partie de l'année depuis 2017.

Les travaux réalisés sur trois secteurs et six sites dans le cadre de cette étude nous ont montré une très grande diversité de contextes. Ils nous ont permis de voir que chaque site a ses propres caractéristiques géomorphologiques et agronomiques. L'agriculture est présente sur chacun des sites puisqu'elle conditionne le choix des sites d'étude ; cependant des parties de ces îles n'étaient parfois pas ou plus utilisées au moment de notre passage. La position longitudinale des îles (d'amont en aval) est l'un des facteurs structuraux, conditionnant le type d'île, son processus de formation, son altitude relative au-dessus de la ligne d'eau du chenal et le type de culture. Le découpage en tronçons nous a permis d'établir une zonation du chenal principal et des diffluences dans leur sections encore dynamiques. En identifiant une baisse progressive de l'activité du fleuve dû à l'effet de backwater qui ralentit le courant et la capacité de transport des sédiments avec une réduction progressive des bancs de sable d'amont en aval ainsi qu'un rétrécissement de la largeur de la bande active. Cette baisse pouvant être également attribuée à la répartition des énergies entre les différentes diffluences au fur et à mesure de la descente du fleuve vers les zones d'influence tidale. Nous avons ainsi pu remarquer que des tronçons ont été plutôt des espaces de production d'îles tandis que d'autres n'étaient que des lieux de transfert de matériaux entre ces foyers d'îles. Ces espaces de transfert caractérisés par un chenal rectiligne ont pu être occupés par des îles de morphologie longiligne sur de longues périodes depuis 1955.

Les mesures réalisées sur les différents sites, même si elles étaient limitées par le temps, ont permis de constater des hauteurs d'îles très différentes entre le site de Pyi Taw Thar et le site de Yae Paw Taung. Sur le site de Pyi Taw Thar situé à la confluence des branches China Bakir et Shwelaung, on a observé des hauteurs maximales comprises entre 4 et 5 m environ pour un niveau de crue 2017

situé à environ + 5,5 m. En revanche sur le site de Yae Paw Taung situé 80 km en amont dans un secteur assez large mais néanmoins très dynamique on a mesuré des îles s'élevant au maximum à 6,5 m pour l'île de sable vieille de 5 ans et à 8,3 m pour l'île de Yae Paw Taung antérieure à 1955, pour un niveau de crue 2017 autour de + 8,5 m. On peut attribuer ces différences d'altitude relative à la largeur de la plaine alluviale (intra-digues) qui est beaucoup plus importante dans les secteurs aval, participant ainsi à l'étalement des flots et donc à un seuil maximal beaucoup plus bas que les secteurs plus confinés situés en amont. Mais aussi à une puissance réduite dans les secteurs avals.

Concernant les îles alluviales du delta de l'Ayeyarwady, plutôt que de distinguer l'île du banc de sable sur la base de l'absence ou de la présence d'une végétation ligneuse, à partir des observations que nous avons réalisées lors de nos relevés, nous pourrions davantage baser nos critères sur l'agriculture et les modes cultureux. En distinguant trois grands types d'îles correspondant en réalité à trois stades de maturité :

- **Les bancs de sable** : ils ont des contours particulièrement changeants en raison de l'instabilité des berges, de leur faible dénivelé et ils correspondent à des dépôts de charge de fond émergés à l'étiage. Ces bancs pouvant monter jusqu'à une altitude relative de 6 m ; ils peuvent occuper des surfaces très variables et fluctuer fortement en fonction du niveau d'eau. Ils migrent à très grande vitesse, ne vivent en un point donné qu'un an ou deux et ils évoluent vers le stade du banc de sable végétalisé si la hauteur, la distance du chenal ou une levée protègent ces espaces du courant, permettant à une première couche de limon de se déposer.
- **Les îles de sable** : c'est le stade intermédiaire entre le banc de sable et l'île alluviale, structuré par une base sableuse et un dépôt de limon au sommet ; on y observe un développement végétal important, souvent dominé par *Saccharum spontaneum*. Ces espaces sont également utilisées temporairement pour la culture des haricots. Ce type d'île correspond au site « île de sable » situé au sud-ouest de Yae Paw Taung.
- **Les îles alluviales** : elles correspondent à un stade de maturité de l'île ; elles sont structurées par une base sableuse issue de la charge de fond qui est surmontée par une couche de limon suffisamment épaisse (au minimum 80 cm) pour conserver l'humidité sur ces secteurs perchés et supporter une agriculture diversifiée. Ce type d'île, ou plutôt de terrain correspond aux secteurs les plus élevés de Pyi Taw Thar, Shwe Din Gar Kyun et Yae Paw Taung.

Les îles présentent cependant rarement une morphologie homogène et sont en réalité une mosaïque de terrains plus ou moins récents, plus ou moins limoneux, aux combinaisons changeant tout au long de l'histoire de l'île.

## 2.2/ Les processus de construction

La littérature relative aux îles alluviales semblant assez limitée, peu de travaux portent sur la construction des îles alluviales. Osterkamp (1998) propose huit facteurs ou processus repris par Gautier *et al* (2016) à l'origine de la formation des îles, on citera notamment :

- Les mécanismes d'avulsion, visibles dans le bas delta et dans la plaine centrale,
- L'incision du lit qui déconnecte les terres,
- La croissance végétale durant une période de calme hydrologique,
- La formation d'un dépôt en arrière d'un obstacle,

- Des affleurements de seuils rocheux favorisant les dépôts, comme on en observe sur le haut Ayeyarwady
- La néotectonique et la surrection des terres.

Lors de l'analyse de l'évolution des tronçons et des archipels, nous avons observé que depuis l'apex du delta jusqu'au secteur de Pyi Taw Thar, les mécanismes de formation des îles pouvaient être le fruit de l'évolution d'un banc médian ou de convexité migrant et croissant progressivement vers l'aval en s'agrégeant à d'autres bancs de sable. Nous avons également vu sur le secteur de Pyi Taw Thar que cette construction par accrétion pouvait être combinée à une défluviation résultant pour partie de la présence du banc de sable venu obstruer partiellement le chenal principal. Dans les secteurs en aval de Pyi Taw Tha, où l'on commence à voir des chenaux évoluant sous forme de méandres à anabranches, les îles semblent davantage être le fruit de défluviations résultant de la courbure des chenaux et probablement d'une amplitude topographique faible (contraste entre la hauteur maximale des îles et le niveau du fleuve à l'étiage).

Même si aucune mesure granulométrique n'a été réalisée en dehors d'observations qualitatives pour étayer les processus de construction des îles et caractériser la texture des sédiments, un modèle théorique de construction des îles peut être établi à partir des observations faites sur les sites de formation récente de l'île de sable de Yae Paw Taung (vieille de 5 ans), formée à partir d'un banc de sable médian et de l'île de Pyi Taw Tha (vieille de 16 ans) formée par la combinaison d'un banc de convexité et d'une déconnection par défluviation.

- 1- Apparition d'un banc de sable à l'étiage sous forme de banc médian ou de convexité correspondant à des dépôts issus de la charge de fond formés lors de crues,
- 2- Accumulation de sable issus d'une suspension graduée, d'une année sur l'autre avec réduction progressive de la granulométrie résultant elle-même de l'exhaussement progressif du banc.
- 3- Début d'apparition, dès l'abaissement du fleuve en septembre, d'une végétation herbacée (ex *Saccharum spontaneum*) pouvant atteindre 3 m de haut sur les secteurs protégés du courant et permettant un premier dépôt limono-sableux ou limoneux. Présence de cyperacées (*Carex*, *Cyperus*) sur sol limoneux à partir de décembre dans les secteurs les plus bas, à l'abri du courant, constamment inondés ou proche de l'eau à l'étiage. Ces espaces peuvent alors être utilisés pour des rizières de décrue.
- 4- La végétation qui s'est développée durant la saison sèche est de nouveau submergée par la montée du fleuve. Les sables en suspension graduée continuent à se déposer sur l'île mais diminuent de taille au fur et à mesure de l'exhaussement de l'île et en fonction de l'intensité du courant ; cette intensité dépend de la position de l'île qui continue de migrer vers des secteurs plus calmes. La végétation, par l'effet de la rugosité croissante, filtre les sables grossiers, en ralentissant le courant, elle favorise le dépôt des sédiments fin (limons) qu'elle piège. Dans les secteurs sans végétation, les limons ne font que circuler dans la colonne d'eau sans se déposer.
- 5- Lorsque le niveau du fleuve redescend, cette végétation peut de nouveau se redéployer sur des surfaces gagnées par dépôt de limon. Le courant, ralenti par la végétation, a favorisé le dépôt de propagules et la texture des sols, beaucoup plus limoneuse, forme une « carapace » plus stable, moins drainante que le sable, et qui conserve davantage l'humidité. Sur ces sols des haricots peuvent être plantés dès la décrue, après le brûlis ou la coupe de la végétation, mais une fois la récolte terminée, ces espaces sont de nouveau abandonnés à la végétation qui va reprendre de souche. Lors de la crue suivante, le processus de piégeage des limons par la végétation va se poursuivre et l'aggradation de l'île va entraîner une diminution constante de la granulométrie.

- 6- A partir d'un certain seuil correspondant potentiellement au niveau d'eau maximum en période de crue de mousson, et à la capacité de mise en suspension des particules grossières, on n'observe plus qu'un dépôt de limon et des dépôts superficiels de sable dans les secteurs proches des courants forts du fleuve. Les couches de limon s'accumulent par rétroaction positive au fur et à mesure de l'aggradation de l'île et de l'augmentation de la densité de végétation. Ces terrains peuvent alors être utilisés pour d'autres cultures que les haricots. Mais la mise en place de cultures plus « sophistiquées » que les haricots, avec parfois plusieurs récoltes et cultures dans l'année sur une même parcelle, ainsi que l'établissement des limites du parcellaire induisent l'élimination systématique de la végétation herbacée telle que *Saccharum spontaneum* au profit de cultures sur de plus longues périodes. L'absence de végétation durant les crues des années suivantes ainsi que la hauteur des digues stabilise peu à peu le processus d'aggradation de l'île. Lors des crues suivantes, les limons circulent sur l'île mais seul de faibles épaisseurs de sédiment viennent recouvrir les terres lors des décrues et poursuivre l'aggradation de l'île.
- 7- La durée d'isolement de l'île par rapport au chenal principal sur de très longues périodes favorise la cohésion des strates par un processus d'induration lié à la migration des ions ferriques.

Sur les différents sites nous avons pu observer la présence d'une strate de sable large et continue issue de la charge de fond, avec parfois des fines strates de limon intercalées pouvant correspondre aux différentes années mais pouvant également avoir été construites au cours d'une seule et même année lorsque plusieurs crues et décrues se sont succédé, comme en 2017 avec trois crues d'une amplitude allant jusqu'à 3 m (à Zalun). A partir d'un seuil variable selon les sites, on observe une apparition généralisée et continue des limons, mais les dépôts peuvent être localement approvisionnés en sable lors d'épisodes particulièrement violents ou sur des secteurs soumis à des courants forts tels que les berges de concavité. Sur l'île de sable de Yae Paw Taung on a pu observer du sable déposé jusqu'au sommet de l'île à + 7,5 m et une strate de limon épaisse de 80 cm dont la limite inférieure débutait à partir de + 5,5 m. L'imagerie montre que ces secteurs n'ont été végétalisés qu'après la crue de 2017-2018. D'autres secteurs de cette même île, protégés du courant présentent une croute de limon épaisse de 20 cm à partir de + 3 m, avec une occupation totale par les poacées (*Saccharum spontaneum*) et les cultures de haricots. Sur ces secteurs, on a pu remarquer une présence généralisée des herbacées, apparues dès 2016-2017.

Sur le site de Pyi Taw Thar, le sable issu d'un transport par suspension graduée est visible jusqu'à + 3 m sur les berges verticales de l'ouest de la péninsule. Mais les berges situées à l'est, formées dans des secteurs protégés du courant et dans des espaces végétalisés sont structurées par des couches limoneuses apparaissant dès l'altitude relative de + 1 m ou même sous le niveau d'eau, là où elle stagne.

On remarque la présence d'une végétation herbacée pionnière représentée par des espèces appartenant aux familles des Poacées et des Cypéracées, particulièrement actives dès la première année d'apparition des terres ; elles ont un rôle primordial dans la construction des îles et surtout le dépôt de sédiments fins nécessaires à une implantation agricole. En dehors de *Saccharum spontaneum* qui est une espèce caractéristique, cette végétation n'a pas été identifiée lors de la phase de terrain par manque de connaissances sur les espèces végétales du Myanmar. Pour ces raisons nous nous sommes limités à les identifier par leurs familles ou genre. On a pu observer plusieurs types de formations végétales correspondant à différents types de milieux dépendant du substrat et de la proximité du fleuve à l'étiage. Les plantes les plus présentes et les plus efficaces pour piéger les sédiments semblent être *Saccharum spontaneum*, une poacée à recouvrement très dense et s'élevant à une hauteur de plus de 3 m (Figure 68, E) ; son implantation nécessite préalablement un sol de texture limoneuse voire limono-sableuse sur au moins quelques centimètres d'épaisseur. Il semblerait que l'époque de libération des eaux ne soit pas le facteur majeur car elles

occupent les espaces situés sur une large amplitude d'élévation depuis le sommet des îles jusqu'à 1 m au-dessus du niveau d'eau. Cependant on a pu observer qu'en toute logique les plantes situées dans les secteurs les plus élevés se développent plus lentement en saison sèche que celles qui sont proches de l'eau qui apparaissent en décalé après émergence de ces espaces. Les espaces situés entre l'eau et les Poacées (entre 0 et 1 m) sont colonisés par des héliophytes (figure 68, D), principalement des cypéracées (*Carex*, *Cyperus*). En raison du courant calme ou protégé grâce à la présence de levées, ces sols ont une texture limoneuse (figure 68, C). Les secteurs totalement sableux situés dans le courant vif, tels que les bancs de sable (figure 68, A), ayant connu une baisse rapide du niveau, ne permettent pas le dépôt de limon et de propagules. Sur ces espaces dunaires on a pu remarquer l'implantation d'une végétation éparse, très différente de celle des zones limoneuses. Les secteurs sableux et proches du niveau d'étiage sont occupés par une végétation basse disséminée par hydrochorie ; elle correspond aux laisses de crue successives qui accompagnent la décrue (figure 68, B).



Figure 68 – Développement de la végétation en fonction des dépôts et du courant

### 2.3/ Les processus d'érosion

L'érosion est un processus continu durant la formation des îles. Lorsque l'île apparaît sous forme d'un banc de sable et qu'elle se développe verticalement et horizontalement, des processus d'érosion laminaire subaquatique ont lieu. Avec une migration des grains du bas vers le haut et une déportation de la masse générale de l'île vers l'aval. Ce n'est que lorsque l'île atteint une surface et une hauteur déterminée à l'étiage et que sa position vis-à-vis du chenal le permet que des processus d'érosion frontaux et latéraux ont lieu et forment des berges à parois verticales. Cette érosion peut débiter alors que l'île poursuit son développement. Mais ce n'est qu'à partir du moment où l'île commence à atteindre un seuil limite, une hauteur limite, qui est pour partie fonction de la hauteur de la plaine alluviale (ici artificiellement délimitée par les digues) et qu'elle commence à se rapprocher de cette dernière, que les processus d'érosion prédominent sur les processus d'accrétion et d'aggradation, jusqu'à ce que l'éloignement vis-à-vis des courants morphogènes soit suffisant pour fixer et agréger les terres avec la plaine.

L'île de sable de Yae Paw Taung est un cas typique de banc de sable médian, qui était en phase de croissance et de migration avec des dépôts et des érosions laminaires entre 2014 et 2017. Mais c'est depuis la saison des pluies de 2017 que l'île a commencé à être érodée à partir du Sud-Est en raison de sa position frontale vis-à-vis du courant vif. Cette érosion est survenue principalement durant la saison des pluies lorsque les terres ont été submergées. Mais une partie importante des berges a disparu lors de la décrue, probablement lorsque que le niveau d'eau s'est mis à baisser plus vite que les nappes et qu'elles se sont retrouvées perchées. Cette vidange aurait alors entraîné une décompression hydrostatique entraînant les matériaux des berges (Malavoi et Bravard, 2010). Comme nous l'avons vu sur les images entre novembre et mars (figure 56), cette érosion c'est poursuivi dans les secteurs où le courant était vif de manière soutenue jusqu'au mois de janvier en raison d'une structure particulièrement uniforme, la texture étant sableuse et surmontée d'une mince couche de limon au sommet. Par la suite, durant la saison sèche qui va de janvier à mars, cette érosion c'est poursuivi de manière moins soutenue. Durant cette période calme, la strate limoneuse, disséquée et fragmentée en blocs (polygonisation) à proximité des berges, s'est effondrée sous son propre poids à cause du sapement des berges dû à la faible cohésion des strates inférieures.

Les autres sites étudiés ne semblent pas avoir connu d'érosion postérieure à novembre et l'essentiel des surfaces a disparues lors des hautes eaux. Les sites de Pyi Taw Thar (île et péninsule) pourtant structurées par une base de sable de forte épaisseur proportionnellement à la couche de limon n'ont pas vécu de tels changements, peut être en raison d'une baisse du niveau d'eau beaucoup plus progressive dans cette partie très en aval et possiblement en raison d'une hauteur moins importante entre le talweg du chenal, le haut de la berge et une pente du chenal plus douce. On a pu d'ailleurs observer à Pyi Taw Thar que les berges étaient tantôt verticales tantôt en paliers voir obliques (tableau 11, photo 9), contrairement à l'île de sable de Yae Paw Taung où elles plongent presque verticalement dans l'eau.

La végétation herbacée (poacées et cypéracées), si importante pour la fixation des sols par capture des sédiments fins, ne semble pas avoir un enracinement suffisamment important pour maintenir les sols. D'ailleurs des observations antérieures réalisées sur le cours de l'Ayeyarwady dans des secteurs où étaient présents des arbres ont montré que leur enracinement ne maintenait pas les sols car ils n'avaient pas le temps de s'adapter à la morphologie de la berge, trop vite érodée.

Certains secteurs plus anciens, comme l'île de Yae Paw Taung au niveau du village, présentent comme les autres secteurs un pied de berge sableux et un sommet limoneux mais ces strates présentent des signes d'induration marquée avec à certaines hauteurs des signes de précipitations d'oxydes ferriques. Il a été particulièrement difficile d'extraire des échantillons de limon sur cette partie de l'île. En dehors de Yae Paw Taung, seules les berges non insulaires et non transformées depuis 1955 montrent des signes d'induration des sables et limons. Les berges non insulaires et non transformées depuis au moins 1955 sont parfois structurées à la base des berges par une strate d'argile exhumée et dont la surface supérieure forme une dalle qui émergent parfois hors de l'eau. Ces strates peuvent être des reliques de dépôts d'argiles issus de matières organiques mis en place dans d'anciens marais ; ce serait potentiellement l'indice de l'absence du passage du fleuve sur ces espaces depuis longtemps.

Les observations réalisées à partir de l'imagerie montrent une activité fluviale particulièrement dynamique jusque dans des secteurs très en aval et face à laquelle les aménagements ne semblent pas être suffisamment résistants. Comme nous l'avons déjà évoqué, certains secteurs pourtant situés dans des secteurs à courant vif (berge en concavité) et en bordure externe (non insulaire), sont probablement structurés par des sédiments plus cohésifs, probablement plus anciens, car ils n'ont pas été érodés depuis 1988. Les aménagements les surplombent parfois mais il est fort possible que leur résistance ne tienne pas uniquement à leur construction mais également à la présence de sols plus cohésifs.

## 2.4/ L'influence des endiguements

Bien que n'ayant été étudiés qu'au travers de la comparaison des cartes de 1955-1967 et des images Google Earth récentes, les endiguements sont une des clés de la compréhension de l'évolution du fleuve dans le delta et de l'évolution des îles alluviales. Construit à partir des années 1860, ils ont peu à peu isolé des territoires de l'influence du fleuve. Certaines branches majeures ont ainsi été totalement abandonnées, stoppant à la fois le passage de l'eau et l'approvisionnement en sédiments de certains territoires et de leurs exutoires. A l'opposé, les autres branches et le chenal principal ont bénéficié du surplus de ces apports détournés par les aménagements. Les digues sont présentes de manière continue de part et d'autre du chenal principal entre Monyo et Pantanaw. Ce corsetage plus ou moins étroit selon les secteurs nous informe sur la dynamique du fleuve sur 150 ans, depuis leur établissement. Même si des digues ont disparu et si d'autres ont été reconstruites, on observe grâce aux cartes et aux images satellite un élargissement permanent du chenal par réajustement des digues.

L'objectif de cet aménagement était dans un premier temps de protéger des espaces vis-à-vis des inondations puis par la suite de permettre le développement de l'agriculture et plus spécifiquement de la riziculture sur des espaces qui étaient avant cela inondés pendant de longues périodes de l'année. Mais en mettant en place ces aménagements, les secteurs situés dans le lit (entre les digues) se sont vu attribuer des caractères permanents là où le fleuve était peut-être plus mobile avant cela. Ces aménagements créent une véritable distinction entre les terres intérieures sans cesse transformées et précaires et les terres extérieures épargnées de l'érosion mais tout de même impactées lors des crues majeures.

Les digues provoquent une déconnexion hydraulique entre le lit mineur et le lit majeur et les annexes hydrauliques (bras morts, marais), elles peuvent participer à l'incision du lit mineur suite à l'augmentation des débits dans la zone intra-digue par concentration des eaux dans un espace plus étroit. Et mécaniquement, l'absence de zone tampon permettant d'écrêter la crue accentue les inondations en aval. Des impacts écologiques résultent de ces aménagements au niveau de la plaine et des annexes fluviales qui sont alors déconnectées du chenal.

Ces structures réalisées dans un but de protection des cultures, mais limitant les mouvements latéraux du fleuve, amplifient les phénomènes mais elles peuvent également accentuer l'incision ou l'aggradation du plancher sédimentaire. En concentrant les eaux, ces digues augmentent la puissance du courant et accentuent les phénomènes d'érosion et de dépôt. La transformation des berges et des îles serait beaucoup plus lente avec un chenal pouvant s'étaler sur l'ensemble de la plaine. La hauteur des digues, variable selon les secteurs, devient alors le niveau (artificiel) de la plaine alluviale, le plafond minimal que peuvent atteindre les îles. Permettant théoriquement aux îles alluviales (intra-digues) d'être plus élevées que les terres extérieures aux digues.

Il est fortement probable que le développement des mines d'or et de jade ainsi que la déforestation massive à l'échelle du bassin depuis les années 2000-2005, combinés à des facteurs naturels (fortes précipitations) occasionne des érosions intenses dans l'ensemble du bassin et induise progressivement un transport massif de sédiments dans les cours d'eau jusqu'au delta. De tels changements dans la charge disponible et mobilisable par le fleuve occasionnent d'importants transformations et peuvent amener à une évolution de la forme du lit. Avec par exemple le développement d'une morphologie de tressage par étalement des eaux et diminution des profondeurs et une accentuation des défluviations dans un chenal qui s'exprimait jusque-là en méandres ou selon un chenal unique. Ces changements géométriques peuvent être autant d'indices décrivant un changement en cours. Ces changements observés sur 30 ans et détaillés précédemment à l'échelle

du delta par un découpage en tronçons pourraient aller dans le sens d'une vague sédimentaire se déplacement progressivement d'amont en aval.

La plaine alluviale intra-digues étant confinée par les digues dans un espace artificiellement restreint latéralement et verticalement. Un apport excessif de sédiments pour un chenal devenu sous calibré pourrait avoir des répercussions sur l'amplitude des crues. Les sédiments grossiers, transportés en masse par le fleuve lors de crues s'accumulant entre les digues. En faisant monter le niveau minimal du lit du fleuve et en colmatant les talwegs, les apports sédimentaires ne participent pas à l'élévation des îles de manière concomitante, car ces dernières sont limitées verticalement par les digues qui imposent un plafond maximal. Ce rapprochement progressif entre le talweg du fleuve qui monte et le sommet des îles fixé par la hauteur de digue amène donc à des inondations de plus en plus récurrentes pour les populations installées sur les secteurs les plus élevés.

## Bibliographie

- Adas, M., 1972. Imperialist Rhetoric and Modern Historiography: The Case of Lower Burma before and after Conquest. *Journal of Southeast Asian Studies* 3 (02): pp 175–92.
- Allen, D.J., Molur, S., Daniel, A.D., 2010. The status and distribution of freshwater biodiversity in the Eastern Himalaya. Gland, Cambridge, UK, IUCN, Switzerland, and Coimbatore, Zoo Outreach Organisation, India.
- Anthony, E.J., Besset, M., Dussouillez, P., 2017. Recent shoreline changes and morpho-sedimentary dynamics of the Ayeyarwady River delta : assessing the impacts of anthropogenic activities on delta shoreline stability. WWF Asia and Helmsley Foundation, Yangon, Myanmar, 43 p.
- SOBA 1.2, 2017. Surface water resources. Ayeyarwady State Of the Basin Assessment, eWater Ltd, p 214.
- SOBA 3, 2017. Sediments and geomorphology of the Ayeyarwady. Ayeyarwady State Of the Basin Assessment, World Wildlife Fund Greater Mekong, p 302.
- Aung, T.T., 2003. Myanmar: the study of processes and patterns National Centre for Human Resources Publishing S/R No. 21, Yangon.
- Aung Lynn, T., Oye, Mari., 2014. Natural resources and subnational governments in Myanmar: Key considerations for wealth sharing. Subnational governance in Myanmar discussion paper series, p 65.
- Ashmore, P. E., 1991. How do gravel bed rivers braid ? *Can. J. Earth Sci.* 28. 326-341.
- BANCA., 2009. Environmental impact assessment (special investigation) on hydropower development of Ayeyawady river basin above Myitkyina, Kachin state, Myanmar. October 2009, Yangon, Myanmar.
- Boutry., M, Allaverdian., C, Mellac., M, Huard., S, Thein., U.S, Win., T.M, 2017. Land tenure in rural lowland Myanmar, from historical perspectives to contemporary realities in the dry zone and the delta. P 287.
- Brac de la Perrière, B., 2013. Vivre avec le fleuve 2/3. Des dieux et des fleuves. Radio show, culture monde, 11-12.
- Brakenridge, G.R., Syvitski, J.P.M., Niebuhr, E., Overeem, I., Higgins, S.A., Kettner, A.J., Prades, L., 2017. Design with nature: Causation and avoidance of catastrophic flooding, Myanmar. *Earth-Science Reviews* 165, p 81-109.
- Bryant, R.L., 1997. *The Political Ecology of Forestry in Burma, 1824–1994*. London, UK: C. Hurst & Co., 257 p.
- Corlett, R.T., 2009, *The ecology of tropical east asia*. Oxford University press, 291 p.
- Critical Ecosystem., 2012. Indo-Burma biodiversity hotspot, 381 p.

DeLeon, S, D., 2007. Artisanal ruby mining in Myanmar: environmental and social impacts.

FAO., 2009. Myanmar agricultural atlas.

FAO., 2010. Global forest resource assessment 2010: Country report Myanmar. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

FAO AQUASTAT (2012) AQUASTAT Country Database

Ferraris, C.J., Britz, R., 2005. A diminutive new species of *Glyptothorax* (Siluriformes : Sisoridae) from the upper Irrawaddy River basin, Myanmar, with comments on sisorid and erethistid phylogenetic relationships. *Ichthyol. Explor. Fres.*, 16, 375–383.

Fort, M., Bétard, F., Arnaud-Fassetta, G., 2015. *Géomorphologie dynamique et environnement*. Armand Colin. 335 p.

Frenken, K. 2012. Irrigation in Southern and Eastern Asia in figures, AQUASTAT survey. 2011. FAO Water Reports 37. Food and Agriculture Organisation of the UN. Rome 487.

Fujita, K., Okamoto, I., 2006. Agricultural policies and development of Myanmar's. Agricultural sector: An overview.

Furuichi, T., Win, Z., Wasson, R.J., 2009. Discharge and suspended sediment transport in the Ayeyarwady River, Myanmar: centennial and decadal changes. *Hydrological Processes*, 23, 1631–1641.

Galloway, W.E., 1975. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of delta depositional systems. In: Broussard, M.L. (ed.), *Deltas: Models for Exploration*. Texas Geological Society, Houston, pp. 87–98.

Gautier, E., Grivel, S., Garcia Govea, C., Dépret, T., Virmoux, C., Brunstein, D., *Analyse compare de la dynamique des îles fluviales de trois grands cours d'eau. Lena, Napo et Loire*. BSGLG, 67.

Gordon, R., 1893. Hydraulic work in the Irawadi Delta. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 113 (1893), p 276-313.

Gruel, C-R., Bravard, J-P., Gunnell, Y., 2016. Geomorphology of the Ayeyarwady river, Myanmar : a survey based on rapid assessment methods. *World Wild Fund, Université Lyon 2*. P 133.

Hedley, P.J., Bird, M.I., Robinson, R.A.J., 2010. Evolution of the Irrawaddy delta region since 1850, *The Geographical Journal*, 176, 138–149.

Hwa, C.S., 1965. Land tenure problems in Burma, 1852 to 1940. *Journal of the Malaysian branch of the Royal Asiatic Society* 38 p 207.

International River, 2013. Independent expert review of the Myitsone dam EIA, 16 p.

Irrigation Department, 2011. Presentation at Training workshop on small hydropower technology for developing countries. 23–24 June 2011. HRC, Hangzhou.

Kattelus, M., 2009, Planning and management of water resources in Myanmar: role of

agriculture and hydropower, Master thesis, Helsinki University of technology, 157 p.

Kattelus, M., Mizanur Rahaman, M., Varis, O., 2014. Myanmar under reform: Emerging pressures on water energy and food security. *Natural Resources Forum*, 38, 85–98.

Kattelus, M., Mizanur Rahaman, M., Varis, O., 2015. Hydropower development in Myanmar and its implications on regional energy cooperation. *Sustainable Society*, 7, 43–65.

Kottelat, M. and Whitten, T. 1996. Freshwater biodiversity in Asia with special reference to fish. World Bank Technical Paper 343.

Kravtsova V.I., Mikhaïlov, V.N., Kidyaeva, V.M., 2009. Hydrological regime, morphological features and natural territorial complexes of the Irrawaddy river delta (Myanmar). *Vodn, Resur.* 36, pp 259-276.

Kyi, K.M., Findlay, R., Sundrum, R.M., Maung, Mya, Nyunt, Myo, Oo, Zaw, 2000. Economic development of Burma, a vision and strategy. Olof Palme International Center, Stockholm, p 228.

Leimgruber, P., Kelly, D.S., Steininger, M.K., Brunner, J., Müller, T., Songer, M., 2005. Forest cover change patterns in Myanmar (Burma) 1900-2000. *Environmental Conservation, Foundation for Environmental Conservation*, p. 1–9.

Lubeigt, G., 1974, Les villages de la vallée de l'Irrawaddy (Birmanie central). *Etudes rurales*, 53-56, p 259–299.

Lubeigt, G., 2013, L'Irrawaddy, Le long fleuve tranquille des Birmans, CNRS, IRASEC, p 5.

Malavoi, J-R., Bravard, J-P., 2010. *Éléments d'hydromorphologie fluviale appliquée*. ONEMA. 224 p.

Mittermeier, R.A., Robles, Gil, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J.D., Brooks, T.M., Mittermeier, C.G., Fonseca, G.A.B., 2004. Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Ecoregions. Mexico City: CEMEX.

MOAI, 2003. Agricultural sector review project, Agricultural water resources study in Myanmar.

Mya Than., 2001. Changing Faces of the Ayeyarwady (Irrawaddy) Delta (18502000). Presented at the conference The Chao Phraya Delta: Historical Development, Dynamics and Challenges of Thailand's Rice Bowl, Bangkok.

NCEA., UNEP., 2006. Myanmar: National Environmental Performance Assessment (EPA) Report. ADB T.A. No. 6069REG: National Performance Assessment and Subregional Strategic Environment Framework in the Greater Mekong Subregion.

NOAA Historical Hurricane tracks: <https://coast.noaa.gov/hurricanes>

Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., Kassem, K.R., 2001. Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. Vol 51, n°11 *BioScience*, p 933–938.

Oo, N.W., 2002. Present state and problems of mangrove management in Myanmar. *Trees – Structure and Function*, 16, 218–223.

Osawa, T., Hatsukawa, Y., 2015. Artisanal and small-scale gold mining in Myanmar: Preliminary research for environmental mercury contamination. *HCS journal* N°25. P 221-230.

Osterkamp, W.R., 1998. Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands*, 18/4, 530-545.

Pautreau, J-P., Pauk Pauk, U., Domett, K., 2001. Le cimetière de Hna. Premiers jalons d'une chronologie préhistorique. *Archaeologia*, p 58-65.

Revenga, C., Murray, S., Abramovitz, J., Hammond, A.. 1998. *Watersheds of the World: Ecological Value and Vulnerability*. World Resources Institute: Washington, DC

Robinson, R.A.J., Bird, M.I., Oo, N.W., Hoey, T.B., Aye, M.M., Higgitt, D.L., Lu, X.X., Swe, A., Tun, T., Win, S.W., 2007. The Irrawaddy river sediment flux to the Indian ocean: the original nineteenth-century data revisited. *Journal of Geology*, 115, 629–640

Robinson, G., 2012. Myanmar pushes reform to woo investors. *Financial Times*, 19 March.

Rodolfo K.S., 1969, Bathymetry and marine geology of the Andaman basin, and tectonic implications for southeast Asia. *Geological Society of America bulletin*, p 1203-1230.

Sabrié, M., 2015. *Le fleuve Irrawaddy, facteur d'intégration de la Birmanie*. Thèse EHESS, 465 p.

South, A., 2003. *Mon Nationalism and Civil War in Burma: The Golden Sheldrake*. New York: Routledge Curzon.

Springate-Baginski, O., Treue, T., Htun, K., 2016, Legally and illegally logged out. The status of Myanmar's timber sector and options for reform. P 40.

Smith, B.D., Jefferson, T.A., 2002. Status and conservation of facultative freshwater cetaceans in Asia. *Raffles Bulletin of Zoology Supplement* 10:173-187.

Smith, B.D., 2004, *Orcaella brevirostris* (Ayeyarwady river subpopulation), IUCN red list of threatened species, 9 p.

Smith, M., 2007. Environmental governance of mining in Burma. In M Skidmore and Wilson, *Myanmar: The state, community and the environment*, Canberra: Act Asia Pacific Press.

Swe, H.W., 2011. *Sediment dynamics in Irrawaddy river, Myanmar*, Department of geography, National University of Singapore, 265 p.

Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vorosmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., Nicholls, R.J., 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nat. Geosci.* 2:681–686

- UNDP, 2002. Myanmar Agricultural Sector Review Investment Strategy, Volume 1, Sector Review.
- Van der Velden J., 2015. Understanding the dynamics of the Ayeyarwady river, Myanmar, Utrecht University.
- Vigny, C., Socquet, A., Rangin, C., Chamot-Rooke, N., Pubellier, M., Bouin, M.N., Bertrand, G., Becker, M., 2003. Present-day crustal deformation around Sagaing Fault, Myanmar. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 108, 2533, doi:10.1029/2002JB001999.
- Volker, A., 1966. The deltaic area of the Irrawaddy river in Burma in Scientific problems of the humid tropical zone deltas and their implications Proceedings of the Dacca Symposium UNESCO 373–379.
- Wang, Y., 2013, Earthquake geology of Myanmar. PhD thesis, California Institute of Technology, 317 p.
- Wang, Y., Sieh, K., Tun, S.T., Lai, K.Y., Myint, T., 2014. Active tectonics and earthquake potential of the Myanmar region. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 119, 3767–3822.
- Webb, E.L., Phelps, J., Friess, D.A., Rao, M., Ziegler, A.D., 2012. Environment-friendly reform in Myanmar. *Science*: 336, p295.
- WEC, 2010. Survey of Energy Resources 2010. London, United Kingdom
- Woods, K., 2015. Commercial agriculture expansion in Myanmar: links to deforestation, conversion timber, and land conflicts. *Forest Trends Report Series*, 56 p.
- World Commission on Dams., 2000, Dams and development, en new framework for decision-making. 356 p.
- WWF., 2013. Ecosystems in the Greater Mekong: Past Trends, Current Status, Possible Futures.
- Yamada, I., 1997. Tropical rain forests of southeast asia. A forest ecologist's view. University of Hawai'i press, Honolulu, 416 p.
- Yang, M.L., Jiang, W.S., Wang, W.Y., Pan, X.F., Kong, D.P., Han, F.H., Chen X.Y., Yang, J.X., 2016. Fish assemblages and diversity in three tributaries of the Irrawaddy River in China: changes, threats and conservation perspectives. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems.*, p15..

## Liste des figures

Figure 1 - Courbe hypsométrique du bassin de l'Ayeyarwady (Gruel <i>et al</i> , 2016).....	9
Figure 2 - Profil longitudinal de l'Ayeyarwady avec localisation des principaux townships (Gruel <i>et al</i> , 2016) ..	9
Figure 3 – Zonation de l'Ayeyarwady, les numéros correspondent à ceux du tableau synthétique (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016) .....	11
Figure 4 – Précipitations moyennes annuelle sur le bassin de l'Ayeyarwady (Sources : Worldclim et MMSIS, MIMU, Gruel 2016). .....	14
Figure 5 - Débit annuel moyen de l'Ayeyarwady à Pyay (1966-1996) (Sources : Swe, 2011) .....	14
Figure 6 - Niveaux d'eau à Pyay et Hinthada en 2015 (Sources : DMH, SOBA 3, 2017) .....	15
Figure 7 – Mesure du niveau d'eau du fleuve à différentes stations d'amont en aval entre le 13 mai 2017 et 26 mai 2018 (Sources : Department of Meteorology and Hydrology).....	16
Figure 8 - Origine des sables et limons sur la Chindwin et le haut et bas Ayeyarwady, basée sur la distribution physiographique et les apports sédimentaires estimés (Sources : SOBA 3, 2017) .....	18
Figure 9 – Systèmes de pompage dans le lit de l'Ayeyarwady afin d'approvisionner l'industrie du nickel de Takaung (gauche) et les cultures dans la région centrale sèche (photos : Gruel, projet SOBA 3, 2017).....	20
Figure 10 – Dérivation de la rivière Mu, vers les périphéries de la plaine (gauche), les secteurs en aval de la déviation ont un débit réservé très limité (droite), les images sont à la même échelle (Sources : Google earth) .....	20
Figure 11 – Mise en place de digues basses (épis) à la perpendiculaire du chenal. En haut à gauche des épis en cours de sédimentation du côté de Bhamo (Sentinel 2, 5 février 2017) ; A droite vers Ta Naung taig en rive gauche (Google earth, 2017) leur but ici est de protéger de l'érosion les structures d'irrigation. Sur l'image du bas, la stabilisation de l'île vise également à la protection des berges des secteurs en aval, jugés comme prioritaire ici le township de Ahpyauk, mais induit probablement un déplacement de l'érosion sur d'autres secteurs (Google earth, 2018). .....	21
Figure 12 - Protection des berges, en haut à gauche : Restauration des berges de la ville de Myitkyina à partir de galets encore présents dans cette partie située en amont du fleuve ; en bas à gauche, à Shwegu, renforts de berges constituées de dalles et de blocs rocheux cimentés. En haut à droite : installation de structures en damiers formant des casiers de bambou et de bloc de roche ou sac de sable pour maintenir les berges à proximité des villages. Village insulaire situé au nord de Mandalay. En bas à droite : structures en damier résistant quelques peu à l'érosion qui a commencée à détruire la berge à droite et à gauche (photos : Gruel, projet SOBA 3, 2017) .....	22
Figure 13 – A droite : des cultures peuvent être établies jusqu'à la limite du fleuve, ici des haricots durant la saison sèche. A gauche : Des îles ou les secteurs les plus bas peuvent être consacrés au pâturage (Photos : Gruel, projet SOBA, 2017). .....	24
Figure 14 – Exemple d'habitats riverains, en haut à gauche une cabane de pêcheur saisonnière au milieu de plantations de haricots. En bas à gauche un village installé au-dessus du fleuve sur des terres stables. En haut et en bas à droite quelques habitations sur le point de disparaître face à la migration du fleuve (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017). .....	25
Figure 15 – Plaines alluviales de l'Ayeyarwady, délimitation des espaces situés entre 0 et 10 m au-dessus du fleuve à l'étiage. (Sources : SRTM, MIMU, Gruel <i>et al</i> , 2016).....	26
Figure 16 - Déforestation à l'échelle du bassin de l'Ayeyarwady entre 2000 et 2014 (Sources brutes : Hansen <i>et al</i> , 2013 ; Gruel, 2016).....	28
Figure 17 – Boisements rivulaires, à gauche on peut voir quelques arbres au milieu du chenal avec en arrière-plan des boisements correspondant aux forêts marécageuses situées dans les backswamps en amont de Khata ; à droite, boisements rivulaires diffus montant jusqu'à environ 10 m de haut et correspondant à l'amplitude verticale du fleuve dans ce secteur confiné, en amont de Thabeikkyin (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017).....	28

Figure 18 – Exemple d’exploitation aurifères dans le lit et les terrasses alluviales. En haut à gauche dans le lit de la N’mai hka quelques kilomètres en amont de Myitsone et en haut à droite en bordure de l’Ayeyarwady à 25 km en amont de Singu. Les images du bas montrent des radeaux situés du côté de Myitkyina permettant l’extraction des sédiments et leur tri (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017) .....	30
Figure 19 - Surfaces exploitées pour les mines sur le bassin de l’Ayeyarwady et le sous bassin de la Chindwin (Sources : SOBA 3, 2017) .....	31
Figure 20 – On observe de nombreuses dragues (en haut à gauche) en général regroupées avec des barges à proximité pour le stockage des sédiments (en haut à droite), sur certaines berges on retrouve des monticules de gravier extraits de manière artisanale (Photos : Gruel projet SOBA 3, 2017).....	32
Figure 21 – Localisation et comptage des bateau à différentes dates par image satellite (Sentinel 2) des zones d'extraction du sable/gravier dans le lit mineur, entre 2015 et 2017 (Sources : SOBA 3, 2017) .....	32
Figure 22 - Elévation des terres du bassin de l’Ayeyarwady entre 0 et 25 m au niveau du delta, d’après l’imagerie SRTM, les chiffres correspondent à l’élévation du fleuve sur les branches de Myitmaka, Bassein et Irrawaddy. A noter que certains secteurs comme l’île de Meinmahla Kyun (nord de Ahmar) sont anormalement plus élevés en raison probablement de la végétation de mangrove qui biaise les résultats (Sources : SRTM, MIMU). .....	34
Figure 23 - Entrées salines en fonction des saisons, hors saison des pluies durant laquelle le fleuve les repousse au large (Sources : Google earth, MIMU, DoA & MoALI, 2015) .....	35
Figure 24 – Carte du delta de 1795, réalisée par Thomas Wood.....	37
Figure 25 - Renforcement des contreforts des endiguements de l’agglomération de Nyaungdone sur la branche de Panheaing (2017). Ces structures ont été réalisées sur des secteurs ou les berges se sont effondrées par affouillement. Ici le niveau de référence « maximal » HWL correspondant au 8 aout 2016 aurait atteint environ 8 m par rapport au niveau à l’étiage LWL. Sur ce point la digue ferait environ 9,5 m de haut (image en haut à droite). Ces structures sont constituées d’enrochements cimentés reposant sur un lit de sable. Des pieux de bois de longueur différentes (entre 3 et 5 m) selon l’emplacement servent de fondation. Les renforts trapézoïdaux, structurés par des roches maçonnées sont renforcées par une couche de béton sur leurs parties supérieures (Photos : Gruel, 2017).....	39
Figure 26 - Endiguements fluviaux sur le haut delta (Sources : Google earth, MIMU) .....	40
Figure 27 – Extension des eaux du chenal principal entre les digues et sur la plaine alluviale à l’étiage et en période de crue, le niveau d’eau correspond à la mesure de Zalun, secteur amont. Notons que la cartographie n’a pu être réalisée plus en amont en raison de l’absence d’images en période de crue. (Sources : Sentinel 2, MIMU).....	41
Figure 28 - Extension des eaux du chenal principal entre les digues et sur la plaine alluviale à l’étiage et en période de crue, le niveau d’eau correspond à la mesure de Zalun, secteur aval. (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	42
Figure 29 – Réalisation de corrections temporaires par le creusement d’un canal entre Hinthada et Zalun visant à guider le chenal et lui donner un axe rectiligne. On remarque que le fleuve à effectivement emprunté le chenal dès la première année (2016) et a entamé une évolution déjà active avec une large bande active. On peut observer sur les images de février 2018 la branche ouest du fleuve est en cour d’abandon tandis que la nouvelle branche centrale tend à s’élargir et la branche est reste stable. Cependant la branche ouest risque de rester longtemps en eau étant donné qu’elle n’a pas été atterrie par des processus de sédimentation (Sources : Sentinel 2). .....	43
Figure 30 – Des recoupements de méandre visant probablement à réduire les distances de parcours en bateau ont été réalisé à différentes époques. Sur ces images, chaque couleur représente le chenal à différentes époques à gauche sur le chenal de Panheaing, sur ce site le chenal qui présentait une large courbure a été recoupé artificiellement vers 2000, aujourd’hui l’ancien méandre est un bras mort (oxbow lake). A droite sur la diffluence de Bassein on observe sur le méandre central à très large courbure, recoupé artificiellement vers 2000 peu de temps après la réalisation de ces chenaux artificiels, ces berges ont de	

nouveau été activées par le fleuve en amont et en aval et mènent vers une évolution lente vers un nouveau méandre (2014 et 2018) afin de restaurer une pente d'équilibre (Sources : Sentinel 2, MIMU). .....	43
Figure 31 – Image Sentinel 2 du 2 février 2018 (Sources : Sentinel 2).....	46
Figure 32 – Niveau du fleuve mesuré à Zalun lors des 5 journées de relevé (Sources : Department of Meteorology and Hydrology) .....	49
Figure 33 - Zones d'étude, plus de détails en annexe 5 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	50
Figure 34 - Les trois sites d'études, site n°1 à gauche, site n°2 au centre, site n°3 à droite (Sources : Sentinel 2, MIMU).....	52
Figure 35 – Niveau du fleuve à Zalun avec localisation temporelle des images satellites utilisées pour la carte des niveaux d'eau, la ligne rouge correspond au seuil d'alerte au-dessus duquel le fleuve dépasse le niveau des digues de Zalun (Sources : Department of Meteorology and Hydrology). .....	57
Figure 36 - Niveau du fleuve à Zalun à environ 1150 m le 27 juillet 2016 (Sources : Department of Meteorology and Hydrology) .....	57
Figure 37 – A gauche, paléochenal de la branche de Daga entre Hinthada et Kyaunggon et à droite un paléochenal méandriforme au niveau de Pantanaw, à la diffluence des branches de Shwelaung et China bakir (Sources : Google earth).....	59
Figure 38 – Dynamique des chenaux du delta depuis 1967, partie amont (Sources : Google earth, MIMU) ...	60
Figure 39 – Dynamique des chenaux du delta depuis 1967, partie aval (Sources : Google earth, MIMU) .....	61
Figure 40 – Exemple non exhaustif de deux sites où les endiguements ont été détruits lors de crues puis reconstruits successivement. A gauche au nord-ouest du town de Maubin, ce secteur fut successivement détruit dans ce secteur en concavité par la progression du chenal postérieurement à 1967, la dernière digue encore présente sur l'image fut construite en 2013 au moment où la précédentes commençait à s'éroder ; à droite à Chaung Gyi au sud-ouest du town de Nyaungdon, secteur d'étude de Pyi Taw Thar, ce secteur en évolution plus lente dans cette branche a connu une succession de petites digues avec un retrait continu. L'érosion de ce secteur aurait pu débiter bien avant 1955 à en croire les cartes et la structure de la digue. (Sources : Sentinel 2, MIMU).....	63
Figure 41 - Endiguement présents en 2018 et détruits entre 1955-1967 et 2018 (Sources : Google, MIMU)..	64
Figure 42 – Surfaces cumulées en eau et en bancs de sable entre 1988 et 2018, classé d'amont en aval (voir annexe 4).....	65
Figure 43 - Bilan surfacique exprimé en pourcent de la surface de chaque tronçon sur 30 ans et par tronçon .....	66
Figure 44 – Bilan surfacique entre 1988 et 2018, surfaces de terres gagnées et perdues exprimées en pourcentage de la surface du tronçon, données correspondantes au tableau 7 (Sources : Sentinel 2).....	67
Figure 45 – Tendence évolutive des surfaces en eau entre 1988 et 2018 ( $R^2$ = coefficient de détermination linéaire sur la période 1988-2018, les graphiques correspondant à ces données sont en annexe 4). On remarque que les secteurs 2, 3 et 17 connaissent depuis 1988 une forte augmentation de leur surface en eau tandis qu'à l'opposé les secteurs 4-5, 7, 8, 11 et 14 se seraient rétracté avec une diminution importante de leur surface relative. (Sources : Sentinel 2) .....	68
Figure 46 - Tendence évolutive des surfaces de banc de sable entre 1988 et 2018 ( $R^2$ = coefficient de détermination linéaire sur la période 1988-2018, les graphiques correspondant à ces données sont en annexe 4) On constate que les secteurs 8 et 17 présentent une forte diminution des bancs de sables ainsi que les tronçons 4-5 et 13. A l'opposé seul le secteur 3 montre une augmentation des surfaces de dépôts de sable et dans une moindre mesure le tronçon 6. (Sources : Sentinel 2) .....	69
Figure 47 - Evolution du tronçon 10, le graphique en haut à gauche montre les surfaces de la bande active (eau + banc de sable) tandis que le graphique en haut à droite reprend les mêmes données tout en permettant de mieux discerner l'évolution des surfaces en eau des surfaces de banc de sable, ces graphiques ont été normalisé à l'échelle de tous les tronçons. Le graphique du bas représente le bilan surfacique par	

année. La carte représente le tronçon avec le fuseau de mobilité 1988-2018 ainsi que les digues présentes en 2017-2018 et celles disparues depuis 1955-1967. ....	71
Figure 48 – Evolution du tronçon 8, le graphique en haut à gauche montre les surfaces de la bande active (eau + banc de sable) tandis que le graphique en haut à droite reprend les mêmes données tout en permettant de mieux discerner l'évolution des surfaces en eau des surfaces de banc de sable, ces graphiques ont été normalisé à l'échelle de tous les tronçons. Le graphique du bas représente le bilan surfacique par année. La carte représente le tronçon avec le fuseau de mobilité 1988-2018 ainsi que les digues présentes en 2017-2018 et celles disparues depuis 1955-1967. ....	73
Figure 49 - Evolution du tronçon 6, le graphique en haut à gauche montre les surfaces de la bande active (eau + banc de sable) tandis que le graphique en haut à droite reprend les mêmes données tout en permettant de mieux discerner l'évolution des surfaces en eau des surfaces de banc de sable, ces graphiques ont été normalisé à l'échelle de tous les tronçons. Le graphique du bas représente le bilan surfacique par année. La carte représente le tronçon avec le fuseau de mobilité 1988-2018 ainsi que les digues présentes en 2017-2018 et celles disparues depuis 1955-1967. ....	75
Figure 50 - Localisation du village nord de Pyi Taw Thar (A1 et A2) et du village de Pyi Taw Thar Ywar Ma (B1 et B2) montrant la disparition des villages face à l'érosion et le déplacement des villages d'une rive à l'autre en 2016 et 2017. Les limites rouges correspondent aux limites des berges en 2018. On observe sur l'image A2 que sur la rive ouest, le nouveau village de Pyi Taw Thar est apparu en 2017 (Sources : Google earth) ....	78
Figure 51 – Dynamique des berges entre 2014 et 2018 (gauche), date de formation des terrains alluviaux 1988-2018 (droite), les secteurs en blanc transparent n'ont pas été transformé depuis 1988, secteur n°1 (Sources : Sentinel 2, MIMU).....	81
Figure 52 - Dynamique des berges entre 2014 et 2018 (gauche), date de formation des terrains alluviaux 1988-2018 (droite), les secteurs en blanc transparent n'ont pas été transformé depuis 1988, secteur n°2 (Sources : Sentinel 2, MIMU).....	83
Figure 53 – Surfaces érodées à l'est du village de Yae Paw Taung entre 2010 et 2018.....	85
Figure 54 - Evolution de la surface de l'île « île de sable » entre 2014 et 2018.....	85
Figure 55 – Villages de l'île de Yae Paw Taung entre 1987 et 2018, les limites en rouge correspondent aux limites des berges en 2018. (Sources : Google earth) .....	86
Figure 56 – Surfaces érodées dans le secteur sud-ouest de Yae Paw Taung. Les surfaces grises correspondent aux espaces terrestres en avril 2018. En jaune les surfaces disparues en saison des pluies entre le 3 avril et le 17 novembre 2017 et en rouge les surfaces disparues en période de décrue entre le 17 novembre et le 23 avril 2018.....	88
Figure 57 - Surface de l'île en 2018 et niveau d'eau .....	88
Figure 58 - Dynamique des berges entre 2014 et 2018 (gauche), date de formation des terrains alluviaux 1988-2018 (droite), les secteurs en blanc transparent n'ont pas été transformé depuis 1988, secteur n°3 (Sources : Sentinel 2, MIMU).....	89
Figure 59 – Cartes de la zone d'étude n°1 et localisation des transects (figures 61 et 62) (Sources : Sentinel 2) .....	91
Figure 60 – Contours des terres durant les basses, moyennes et hautes eaux, les mesures sont celle du niveau du fleuve à Zalun. Sur ce secteur n°1 si 2,89 m = 0 ; 5,56 m = environ 1,5 m ; 11,5 m = environ 4 m. (Sources : Sentinel 2).....	92
Figure 61 - Profil topographique de Pyi Taw Thar Yawar Ma (niveau d'eau à Zalun, 2,77 m) avec localisation de l'emplacement des berges par année (triangle), notons que ce déplacement montre des avancées et des retraits. Le transect n'étant qu'une représentation axiale par croisement d'informations, il n'est ici qu'un indicateur ponctuel et ne traduit pas la morphologie de la ligne d'eau dans son ensemble, LC correspondant aux limites de colonne de distribution .....	99
Figure 62 - Profil topographique de Pyi Taw Thar (niveau d'eau à Zalun, 3 m) avec localisation de l'emplacement des berges par année, LC correspond aux limites de colonnes de distribution des terres. ...	104

Figure 63 - Distribution des cultures autour du village de Shwe Din Gar Kyun, cartographie partielle. L'élévation indiquée est très approximative et les classes se recoupent en raison de l'absence de mesures précises réalisées sur ce secteur (Sources : Google earth) .....	106
Figure 64 – Contours des terres durant les basses, moyennes et hautes eaux, les mesures sont celle du niveau du fleuve à Zalun. Sur ce secteur les mesures par rapport au niveau d'eau n'ont pas été réalisées. (Sources : Sentinel 2) .....	109
Figure 65 - Occupation des sols (partielle) à l'est de l'île de Yae Paw Taung le 27 mars 2018. (Sources : Google earth) .....	114
Figure 66 – Occupation des sols et élévation sur l'île de sable de Yae Paw Taung, les surfaces de « riz » correspondent aux rizières existantes et potentielles (potentiellement déjà récoltées) (Sources : Sentinel 2) .....	117
Figure 67 - – Contours des terres durant les basses, moyennes et hautes eaux, les mesures sont celle du niveau du fleuve à Zalun. Sur ce secteur n°3 si 2,89 m = 0 ; 5,56 m = environ 3 m ; 11,5 m = environ 8 m (Sources : Sentinel 2) .....	121
Figure 68 – Développement de la végétation en fonction des dépôts et du courant.....	131
Figure 69 – Bassin de l'Ayeyarwady (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016) .....	147
Figure 70 – Sous bassins de l'Ayeyarwady, partie amont (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016) .....	148
Figure 71 – Sous bassins de l'Ayeyarwady, partie aval (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016).....	149
Figure 72 – Delta de l'Ayeyarwady (sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016) .....	150
Figure 73 – Delta de l'Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016) .....	151
Figure 74 – Delta de l'Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016) .....	152
Figure 75 -- Delta de l'Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016).....	153
Figure 76 – Delta de l'Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016) .....	154
Figure 77 – Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	155
Figure 78 – Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	156
Figure 79 – Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	157
Figure 80 – Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	158
Figure 81 – Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	159
Figure 82 – Cartographie de la zone de mobilité du fleuve entre 1988 et 2018. Correspond aux espaces occupés par le fleuve puis construits suite à son déplacement. Chaque couleur correspond à l'année ou le fleuve a abandonné définitivement l'espace jusqu'à 2018. L'ensemble de ces espaces datés correspond à l'emprise totale du fleuve à l'étiage, les secteurs non datés n'ont donc jamais été traversé par le fleuve à l'étiage entre 1988 et 2018. (Sources : Google earth, MIMU).....	162
Figure 83 - Cartographie de la zone de mobilité du fleuve entre 1988 et 2018 (Sources : Google earth, MIMU).....	163
Figure 84 - Cartographie de la zone de mobilité du fleuve entre 1988 et 2018 (Sources : Google earth, MIMU).....	164
Figure 85 - Tronçons 1 à 3 (Sources : Sentinel 2).....	165
Figure 86 - Tronçons 4-5 à 8 (Sources : Sentinel 2).....	166
Figure 87 - Tronçons 9 à 17 (Sources : Sentinel 2).....	167
Figure 88 - Zone d'étude 1 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	177
Figure 89 - Zone d'étude 2 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	178
Figure 90 - Zone d'étude 3 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	179
Figure 91 – Espaces terrestres émergés à différentes dates, site 1 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	180
Figure 92 - Espaces terrestres émergés à différentes dates, site 2 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	181
Figure 93 - Espaces terrestres émergés à différentes dates, site 3 (Sources : Sentinel 2, MIMU) .....	182
Figure 94 – Territoires inondés en période de crue (11,5 m à Zalun), le 27 juillet 2016, site 1, (Sources : Sentinel 2) .....	183

Figure 95 – Territoires inondés en période de crue (11,5 m à Zalun), le 27 juillet 2016, site 2, (Sources : Sentinel 2) .....	184
Figure 96 - Territoires inondés en période de crue (11,5 m à Zalun), le 27 juillet 2016, site 3, (Sources : Sentinel 2) .....	185
Figure 97 – Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°1 .....	188
Figure 98 - Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°2.....	191
Figure 99 - Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°3, île de sable .....	194
Figure 100 - Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°3 Yae Paw taung .....	197
Figure 101 – Evolution chronologique 1955-2018 du secteur n°1 (Sources : MIMU).....	198
Figure 102 - Evolution chronologique 1955-2018 du secteur n°2 (Sources : MIMU).....	205
Figure 103 - Evolution chronologique 1955-2018 du secteur n°1 (Sources : MIMU).....	215

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Zonation synthétique du fleuve Ayeyarwady (correspondance avec la carte de zonation, figure 3) .....	10
Tableau 2 – Principaux affluents de l’Ayeyarwady placés entre 6 et 9 sur l’ordre de Strahler et classés d’amont en aval (Gruel <i>et al</i> , 2016).....	12
Tableau 3 - Niveaux maximums, minimums et leur amplitude à 5 stations différentes.....	16
Tableau 4 – Vitesse d’écoulement moyenne depuis Myitkyina jusqu’à Nyaungdon.....	17
Tableau 5 - Niveau du fleuve à Zalun durant les journées de terrain .....	48
Tableau 6 – Classement des tronçons en fonction de leur amplitude latérale de mobilité.....	65
Tableau 7 – Bilan surfacique total de 1988 à 2018, voir figure 44.....	66
Tableau 8 – Calendrier synthétique d'installation et déménagement des villages.....	79
Tableau 9 - Calendrier synthétique d'installation et déménagement des villages .....	87
Tableau 10 – Photos des différents secteurs de la péninsule de Pyi Taw Thar Ywar Ma.....	95
Tableau 11 - Photos de l’île de Pyi Taw Thar .....	101
Tableau 12 - Photos du site de Shwe Din Gar Kyun.....	107
Tableau 13 – Photos du site de Yae Paw Taung .....	112
Tableau 14 – Photos des différents secteurs de l’île « île de sable ».....	117
Tableau 15 – Dates des images Landsat utilisées .....	160
Tableau 16 : Imagerie Sentinel 2 disponible et couverture nuageuse par secteur.....	161
Tableau 17 – Surface en eau / banc de sable et bilan surfacique des tronçons .....	172

## Annexe 1.1 : Bassin de l'Ayeyarwady



Figure 69 – Bassin de l'Ayeyarwady (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016)

Annexe 1.2 : Principaux sous-bassins de l'Ayeyarwady

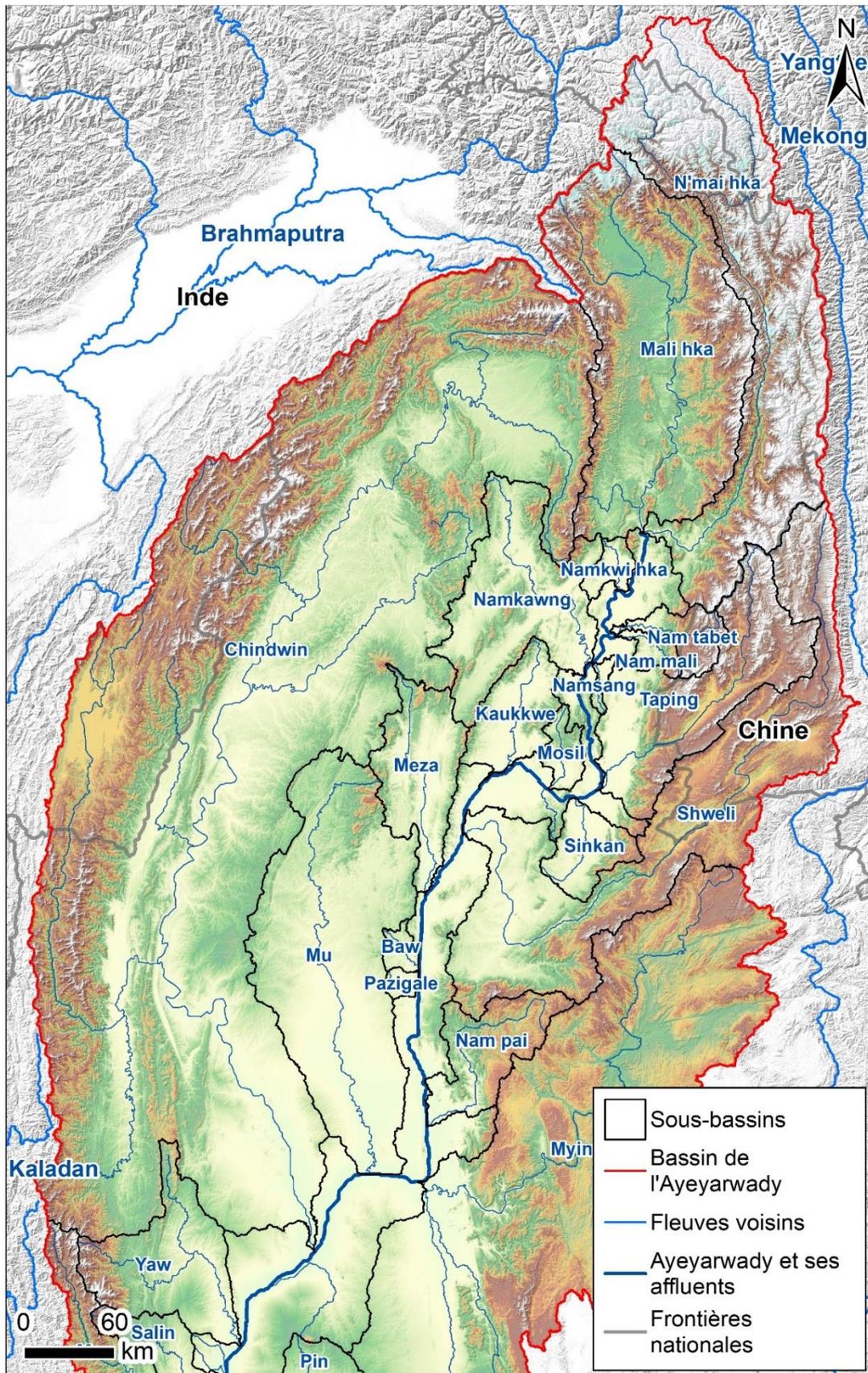


Figure 70 – Sous bassins de l'Ayeyarwady, partie amont (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016)

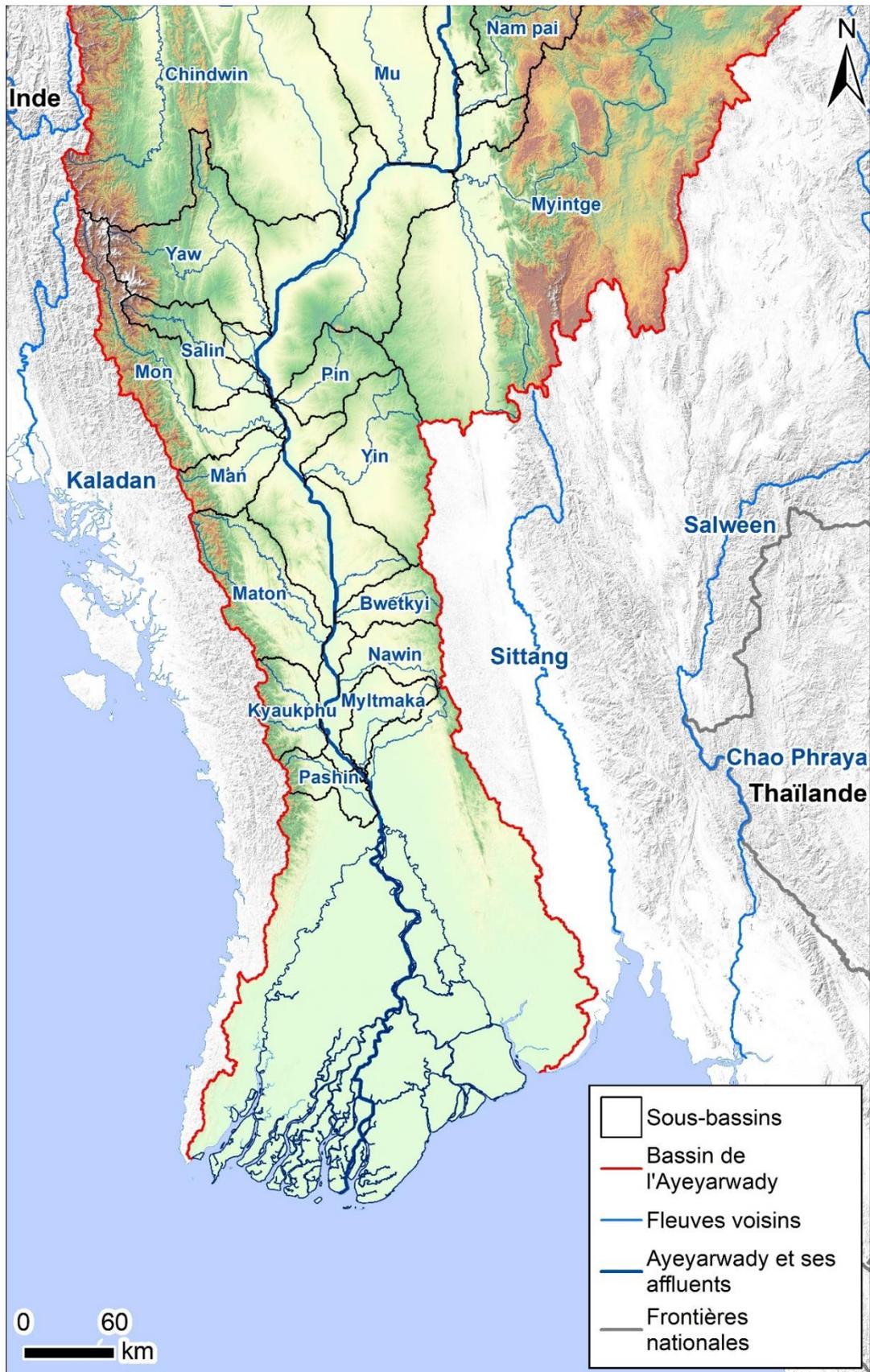


Figure 71 – Sous bassins de l’Ayeyarwady, partie aval (Sources : SRTM, MIMU, Gruel 2016)



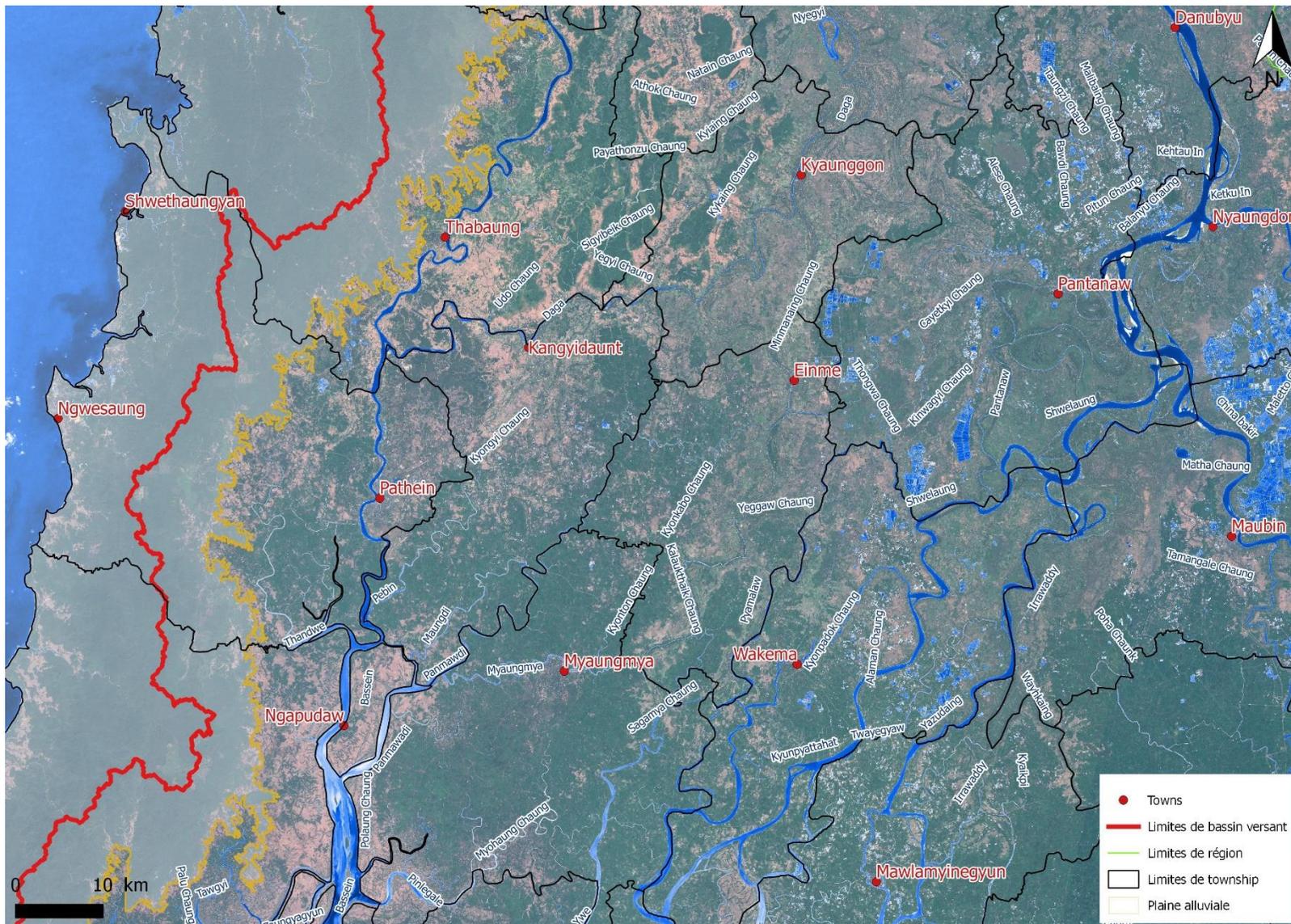


Figure 73 – Delta de l’Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016)

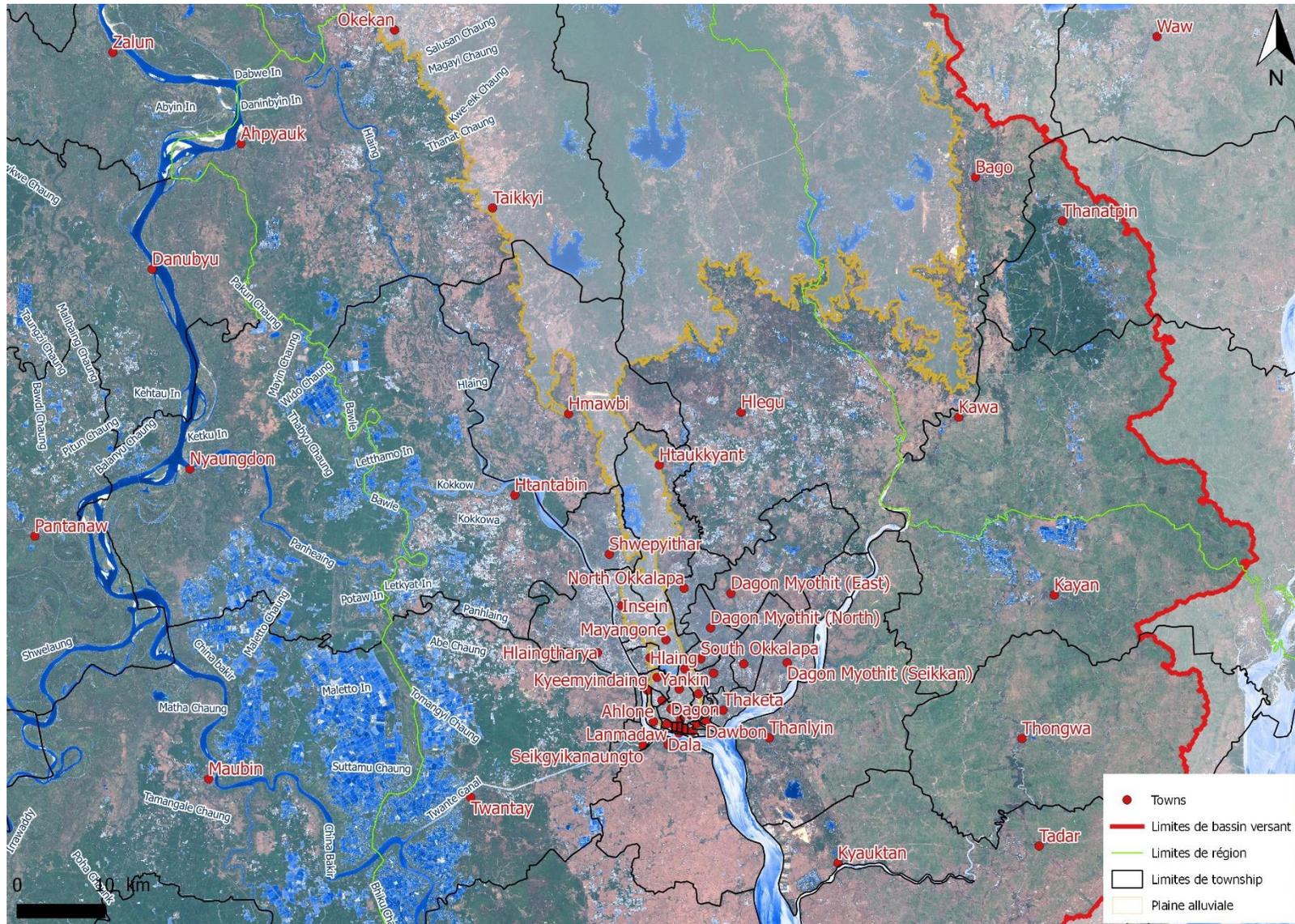


Figure 74 – Delta de l’Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016)



Figure 75 -- Delta de l'Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016)

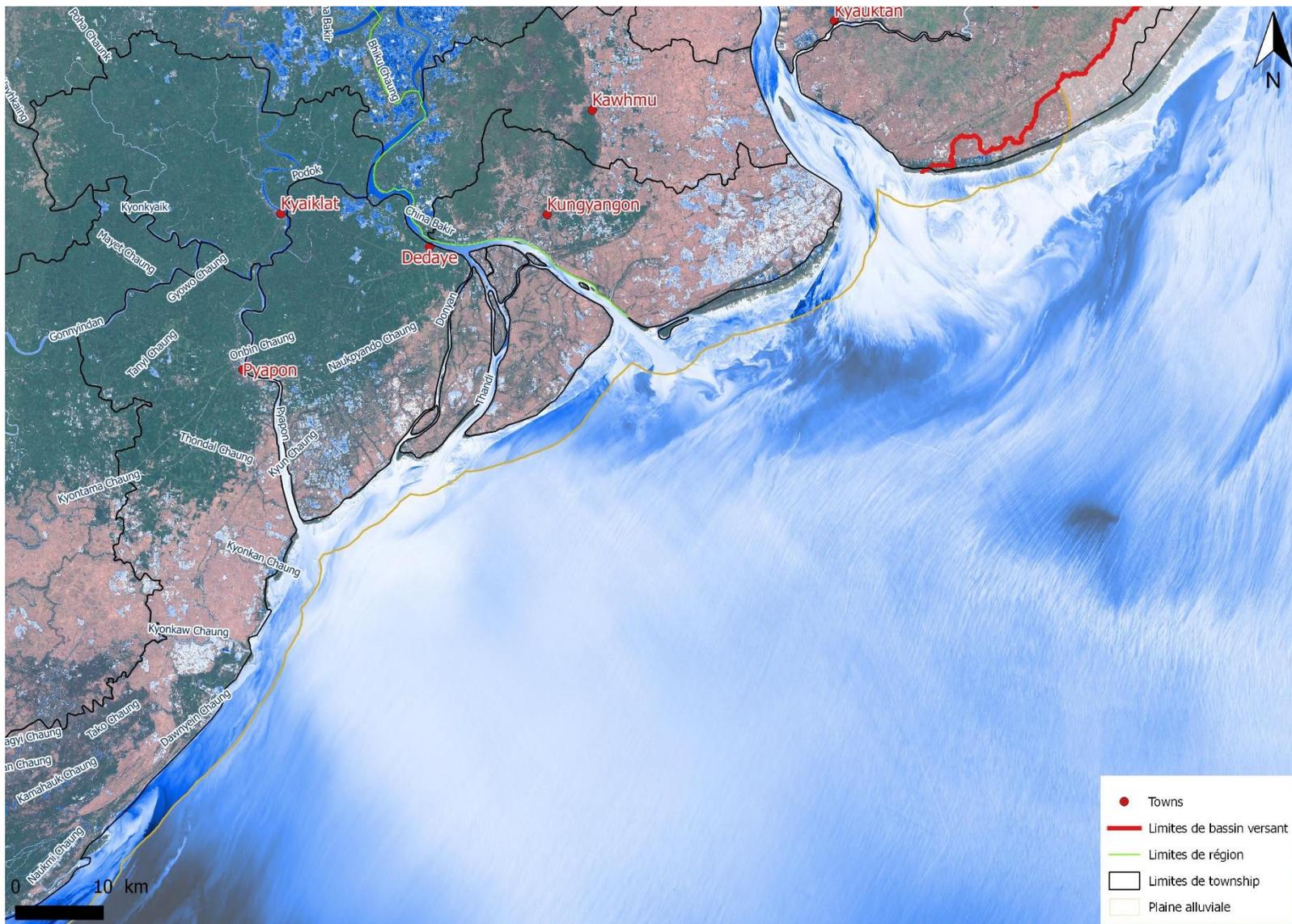


Figure 76 – Delta de l’Ayeyarwady (Sources : Sentinel 2, MIMU, Gruel 2016)

## Annexe 1.4 : Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal

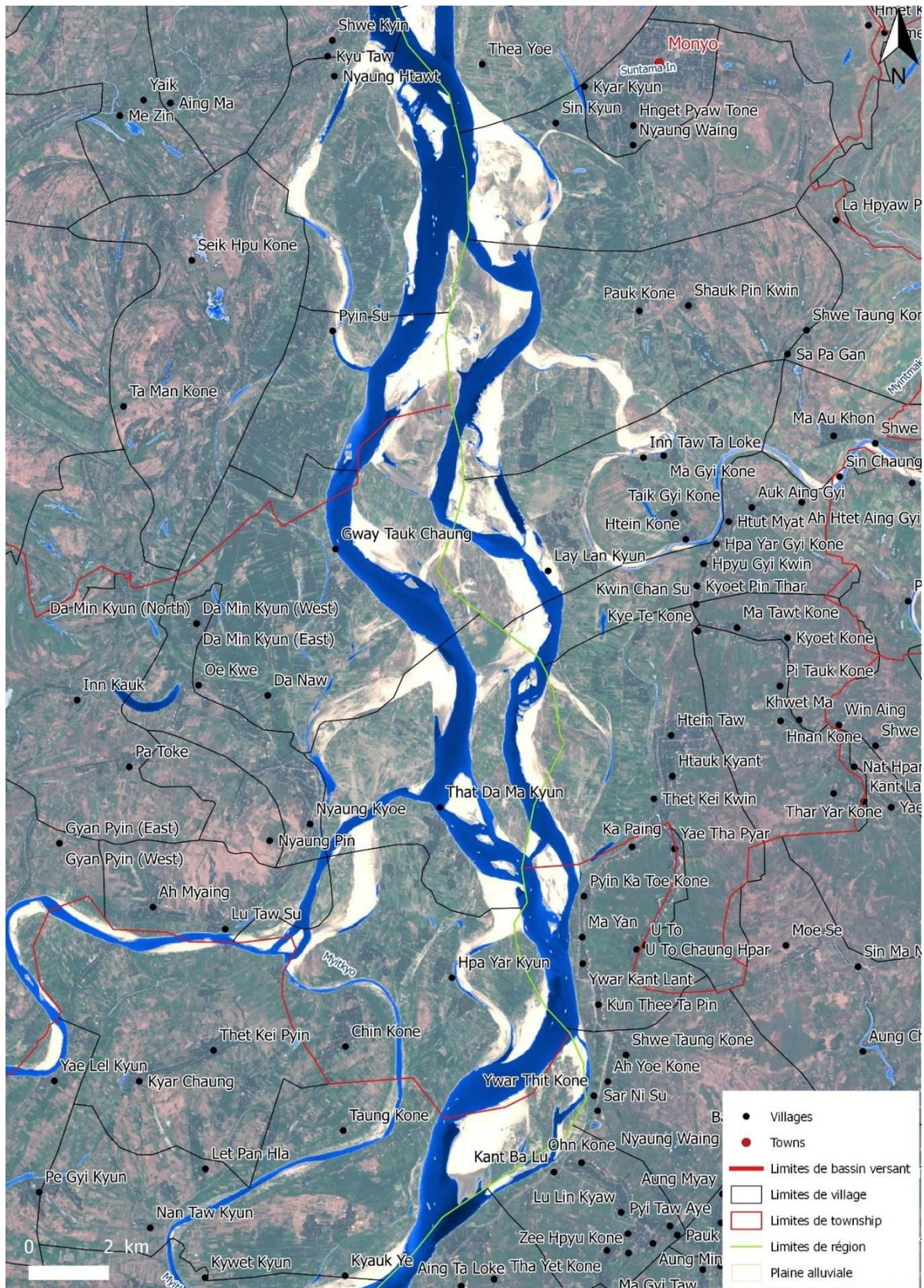


Figure 77 – Delta de l'Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU)

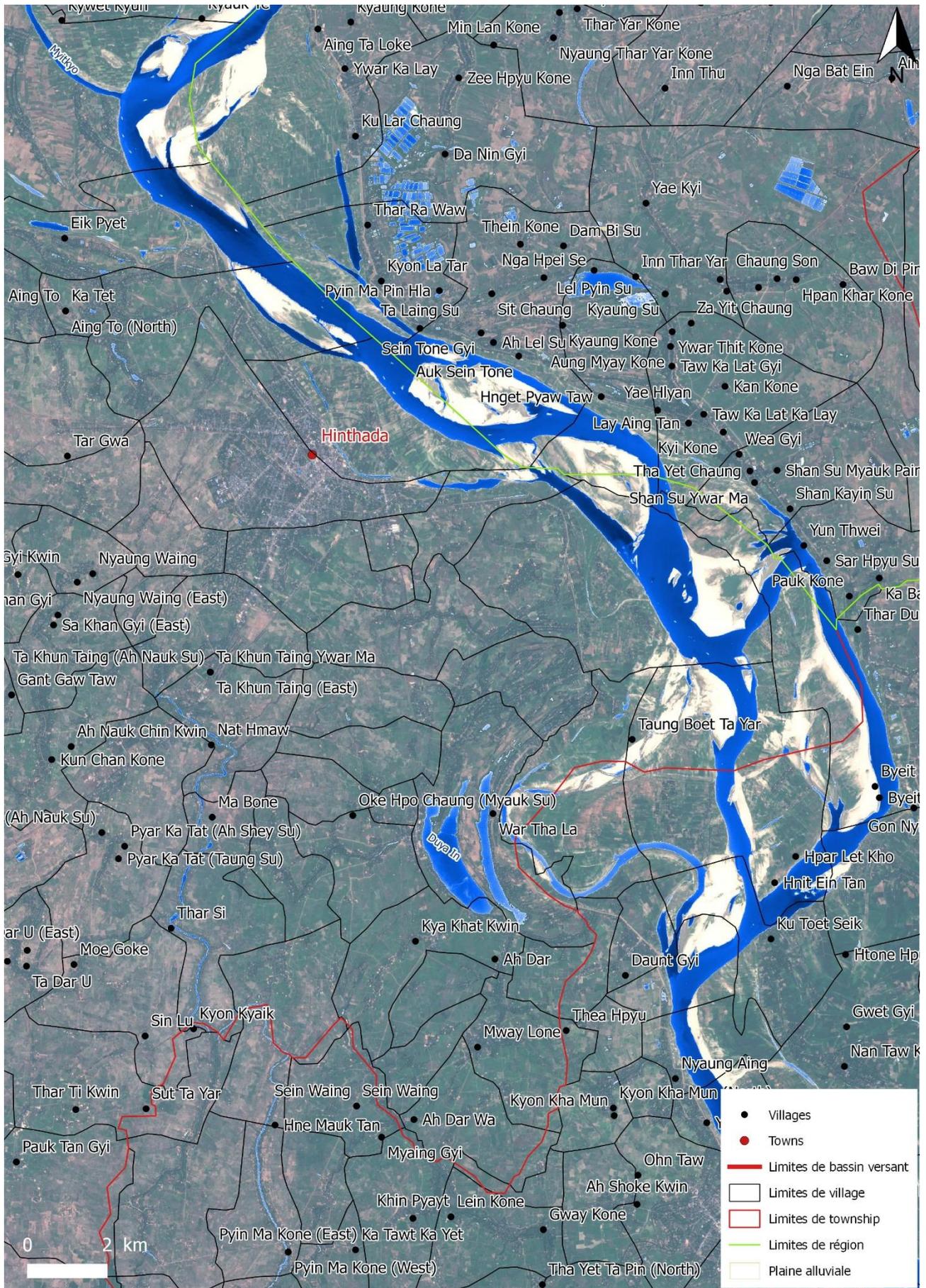


Figure 78 – Delta de l’Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU)

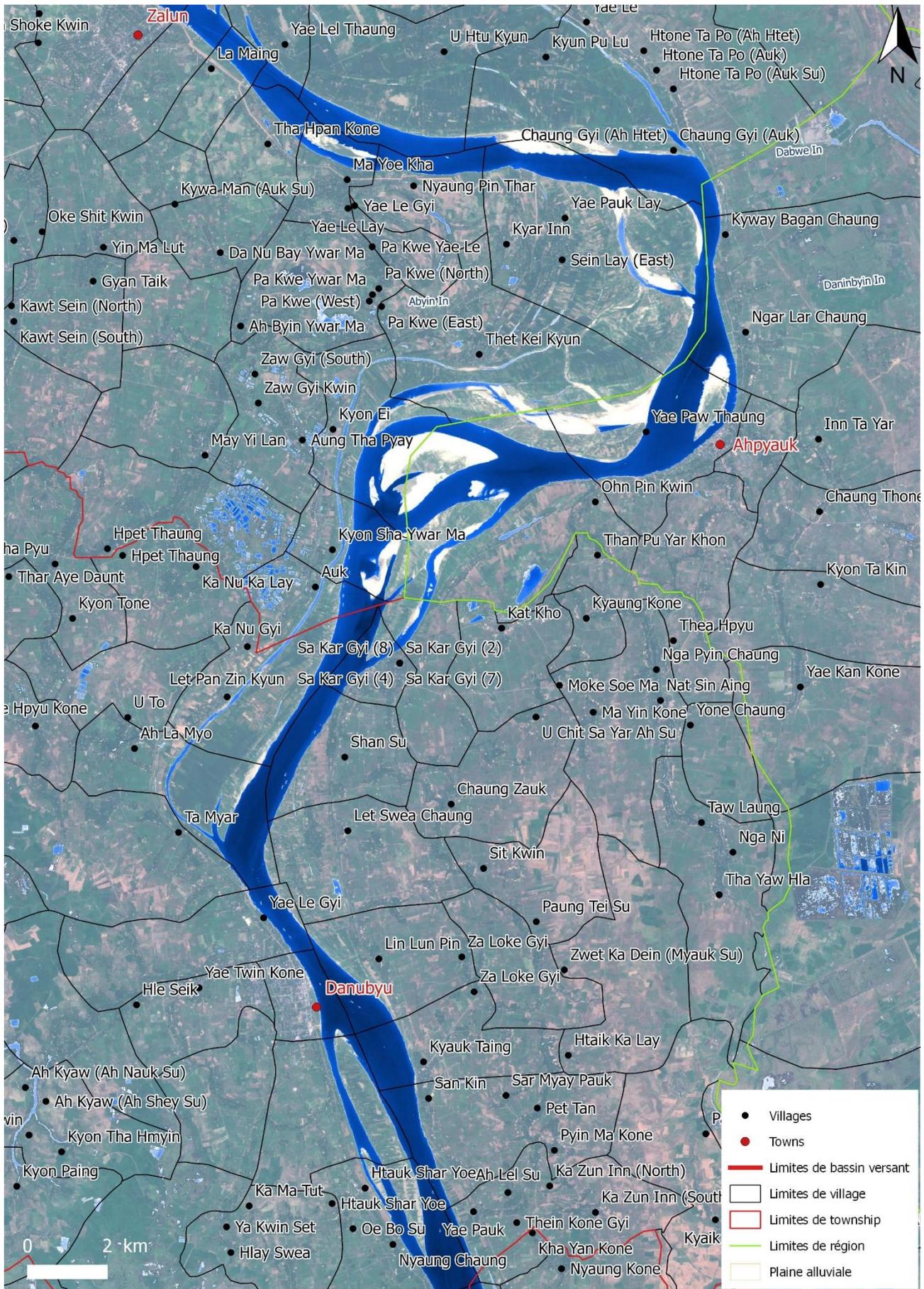


Figure 79 – Delta de l’Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU)

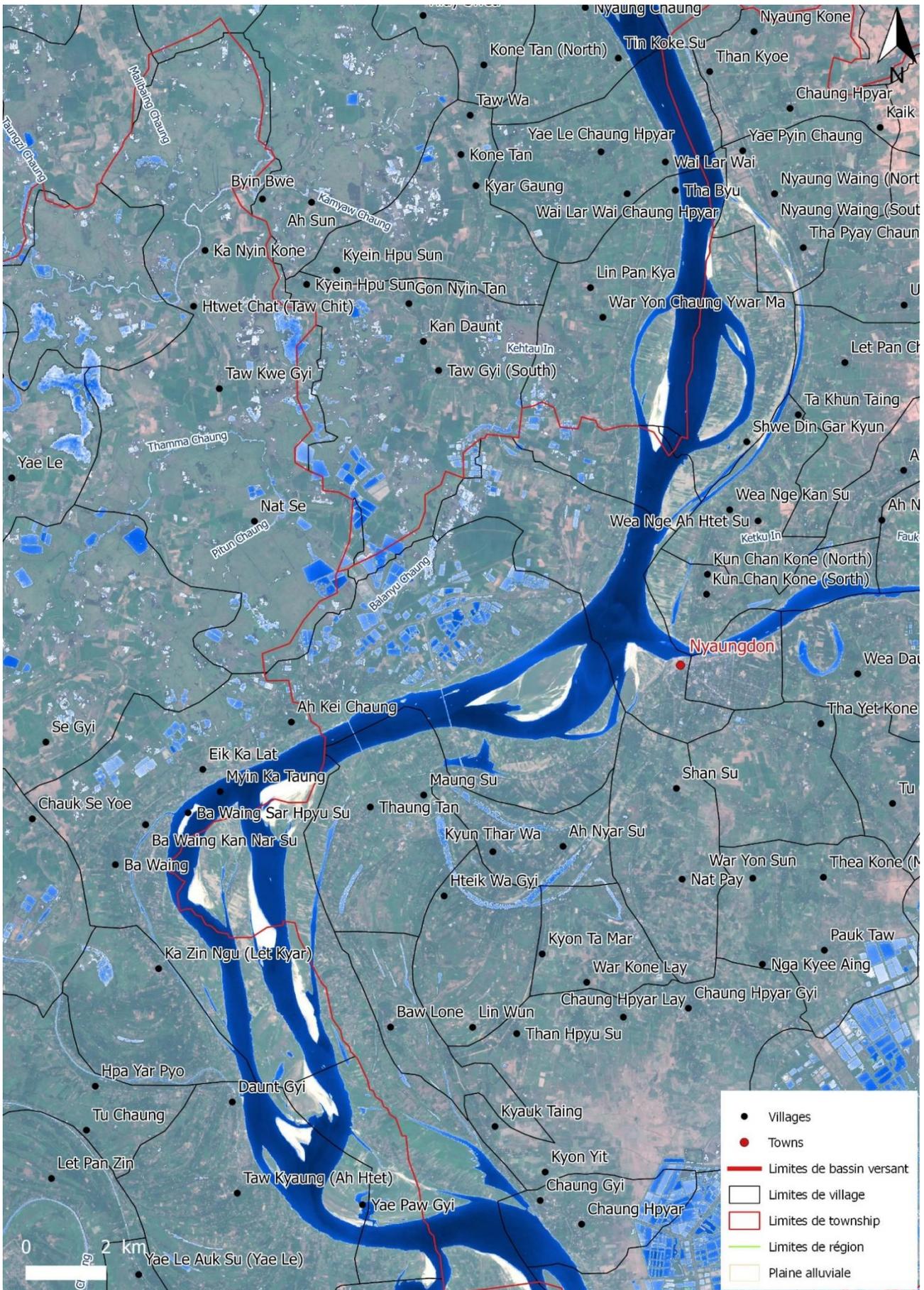


Figure 80 – Delta de l’Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU)

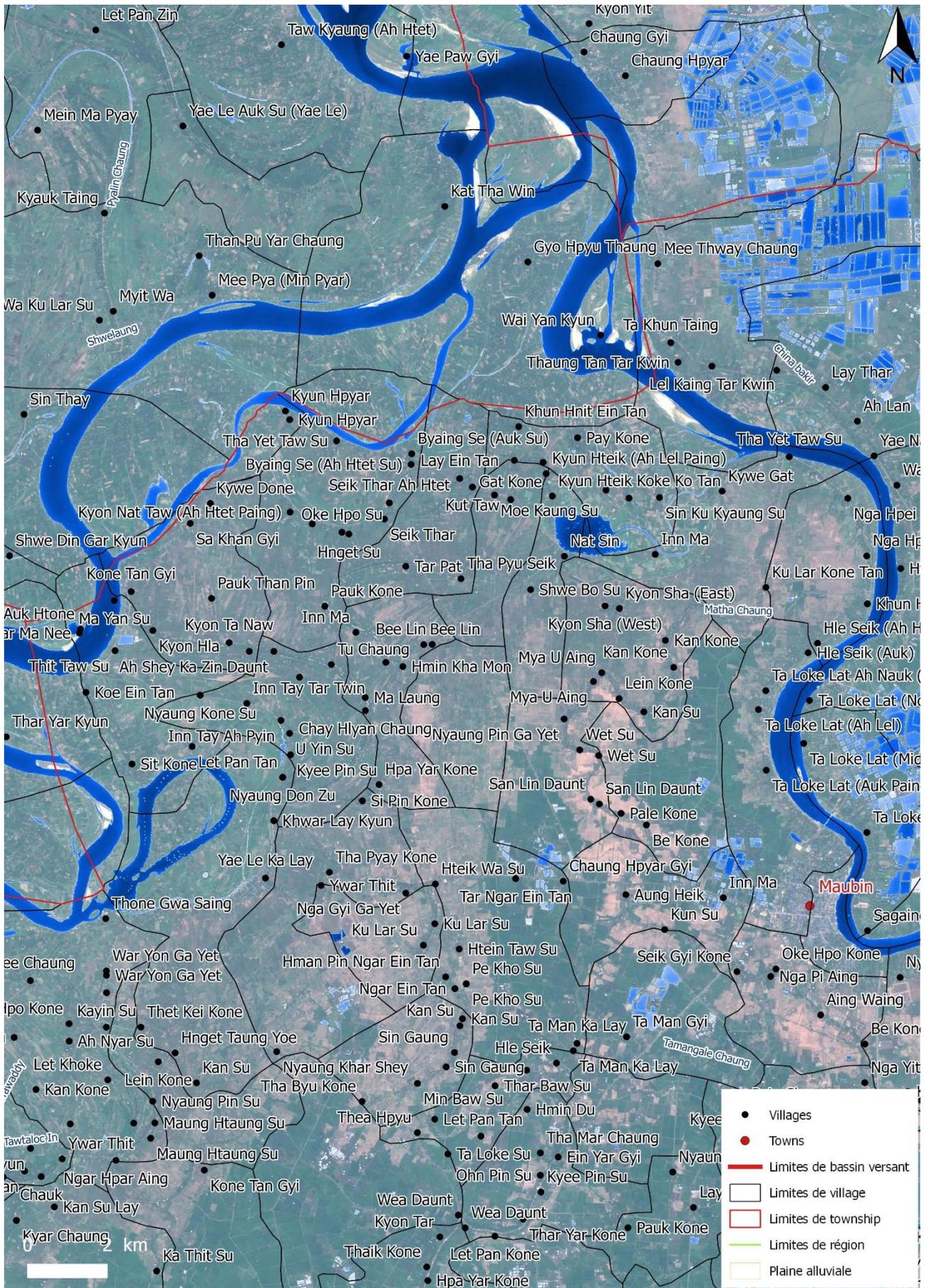


Figure 81 – Delta de l’Ayeyarwady, chenal principal (Sources : Sentinel 2, MIMU)

## Annexe 2 : Dates des images satellites

Tableau 15 – Dates des images Landsat utilisées

Années	Dates	Landsat
2018	25 Février	L8 OLI
2017	06 Février	L8 OLI
2016	04 Février	L8 OLI
2015	17 Février	L8 OLI
2014	02 Mars	L8 OLI
2011	28 Janvier	L4-5 TM
2010	03 Février	L4-5 TM
2009	16 Février	L4-5 TM
2008	01 Mars	L4-5 TM
2007	11 Février	L4-5 TM
2006	24 Février	L4-5 TM
2005	05 Février	L4-5 TM
2004	19 Février	L4-5 TM
2003	24 Février	L7 SLC-on
2002	05 Février	L7 SLC-on
2001	26 Février	L7 SLC-on
2000	24 Février	L4-5 TM
1999	9 Mars	L4-5 TM
1998	02 Février	L4-5 TM
1997	30 Janvier	L4-5 TM
1996	29 Février	L4-5 TM
1995	26 Février	L4-5 TM
1994	11 Mars	L4-5 TM
1993	3 Janvier	L4-5 TM
1992	21 Mars	L4-5 TM
1991	3 Mars	L4-5 TM
1990	16 Mars	L4-5 TM
1989	9 Février	L4-5 TM
1988	07 Février	L4-5 TM
1976	22 janvier	L1-5 MSS
1975	15 février	L1-5 MSS
1974	11 février	L1-5 MSS
1973	10 janvier	L1-5 MSS

Tableau 16 : Imagerie Sentinel 2 disponible et couverture nuageuse par secteur

Dates	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3
2015-11-23		Partie Hors image	
2015-12-23		Partie Hors image	
2016-01-09	Partiellement	Partiellement	Partiellement
2016-01-19			
2016-01-22			Fortement
2016-02-08			
2016-02-18			
2016-03-19			
2016-03-22		Partie Hors image	
2016-04-18			
2016-04-21		Partie Hors image	Faiblement
2016-07-27		Faiblement	
2016-08-19	Partiellement	Fortement	Faiblement
2016-10-15	Faiblement	Partiellement	
2016-11-04	Localement	Localement	
2016-11-17		Hors image	
2016-11-24			
2016-12-04			Faiblement
2016-12-14		Localement	
2016-12-17	Faiblement	Partie Hors image	
2016-12-27		Partie Hors image	
2017-01-03			Localement
2017-01-13			Hors image
2017-01-16			
2017-01-26			
2017-02-05			
2017-02-12			
2017-02-25			
2017-03-14			
2017-03-17			
2017-04-03			
2017-04-23	Fortement	Localement	Fortement
2017-04-26	Localement	Hors image	
2017-09-13	En partie	Hors image	
2017-10-23	En partie	Hors image	Localement
2017-11-17		Faiblement	Faiblement
2017-11-29	Hors image	Fortement	
2017-12-02			
2017-12-19			
2017-12-22			
2018-01-11		Partie Hors image	
2018-01-23			
2018-01-31			
2018-02-02			
2018-02-05		Partie Hors image	
2018-02-17			
2018-02-20			
2018-03-04			
2018-03-22			
2018-03-29			
2018-04-03	Non collecte	Non collecte	Non collecte
2018-04-06	Non collecte	Non collecte	Non collecte
2018-04-13	Non collecte	Non collecte	Non collecte
2018-04-16	Non collecte	Non collecte	Non collecte
2018-04-18	Non collecte	Non collecte	Non collecte
2018-04-21	Non collecte	Non collecte	Non collecte
2018-04-23			

**Légende couverture nuageuse :**

**Localement :** un ou deux petits nuages

**Faiblement :** nuage diffus qui n'obstrue pas la visibilité mais filtre un peu

**Partiellement :** une partie de l'île n'est pas visible

**Fortement :** L'île est en grande partie cachée

**Hors image :** l'île est en dehors de l'emprise de l'image.

### Annexe 3 : Datation des terrains construits entre 1988 et 2018 suite à la mobilité du chenal

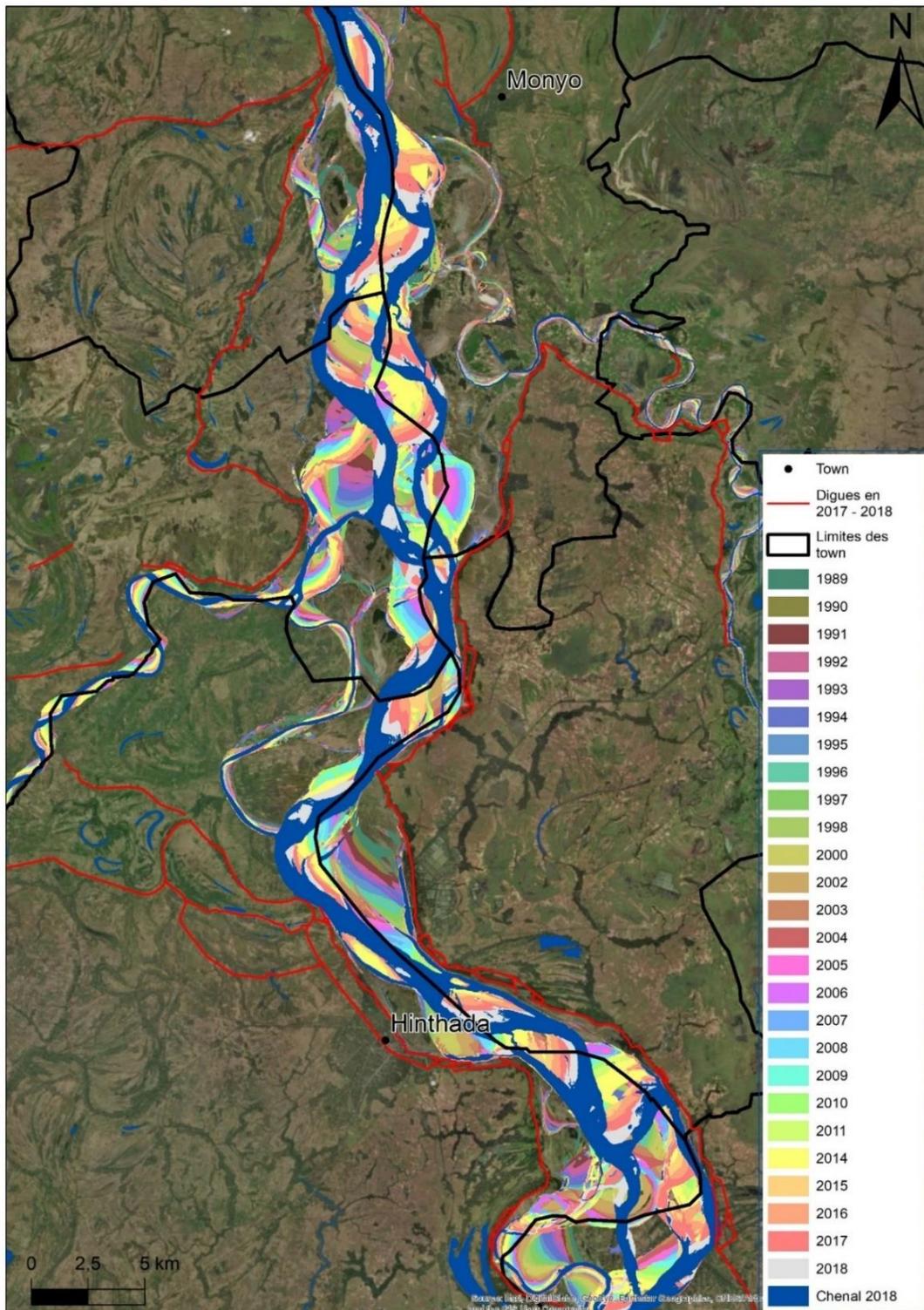


Figure 82 – Cartographie de la zone de mobilité du fleuve entre 1988 et 2018. Correspond aux espaces occupés par le fleuve puis construits suite à son déplacement. Chaque couleur correspond à l’année où le fleuve a abandonné définitivement l’espace jusqu’à 2018. L’ensemble de ces espaces datés correspond à l’emprise totale du fleuve à l’été, les secteurs non datés n’ont donc jamais été traversés par le fleuve à l’été entre 1988 et 2018. (Sources : Google earth, MIMU).

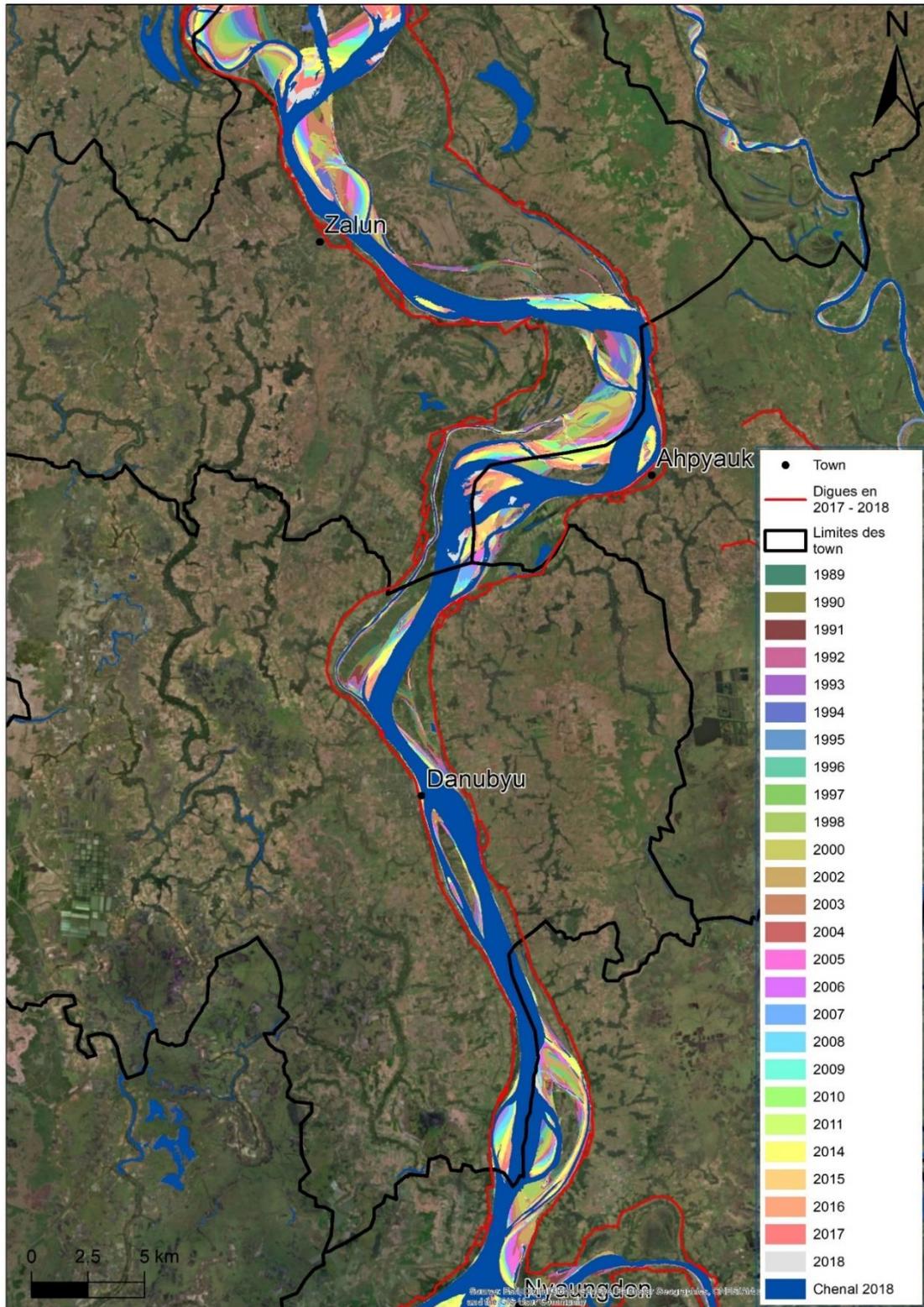


Figure 83 - Cartographie de la zone de mobilité du fleuve entre 1988 et 2018 (Sources : Google earth, MIMU).

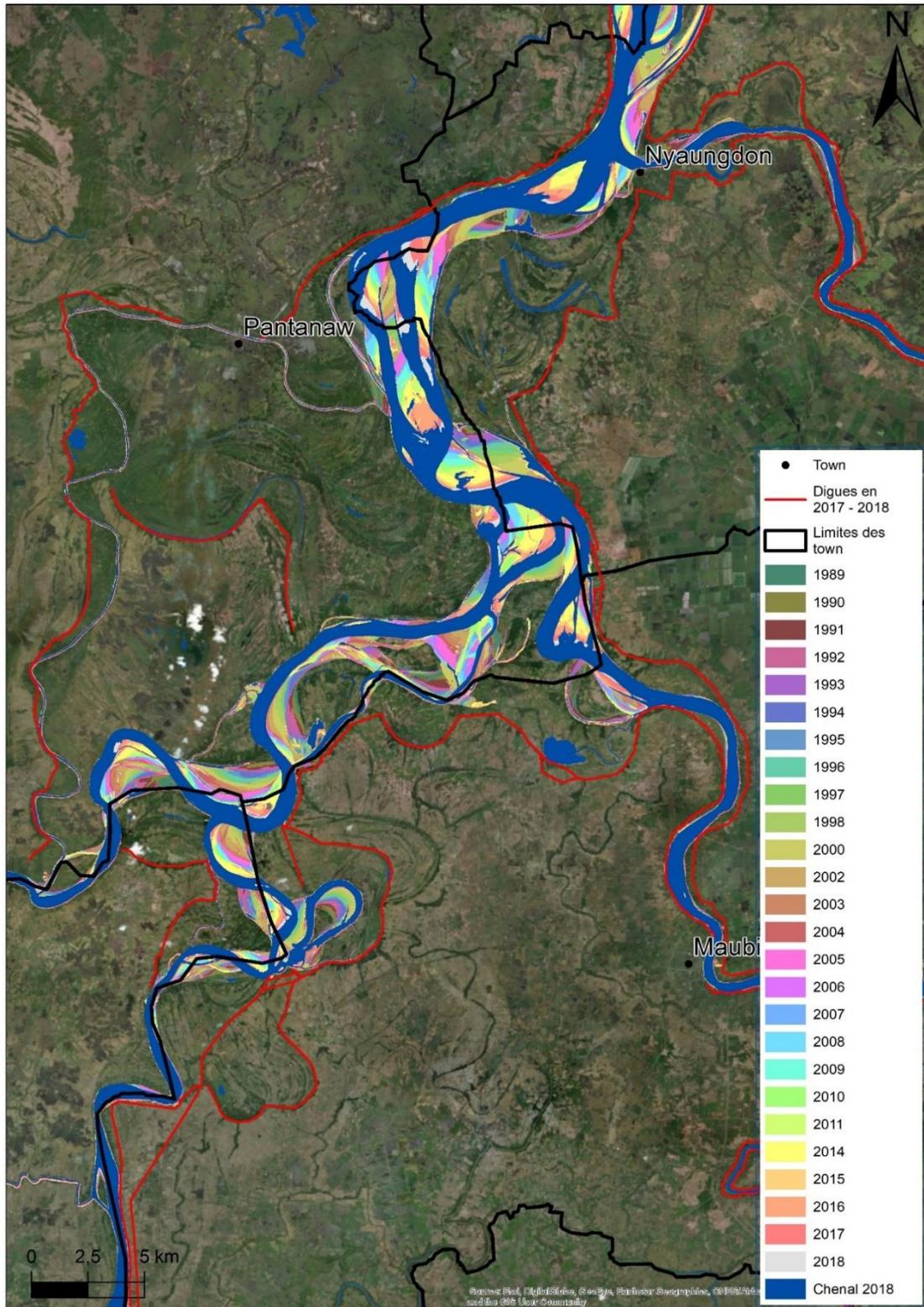


Figure 84 - Cartographie de la zone de mobilité du fleuve entre 1988 et 2018 (Sources : Google earth, MIMU).

Annexe 4 : Caractéristiques principales de 17 tronçons du chenal principal entre 1988 et 2018

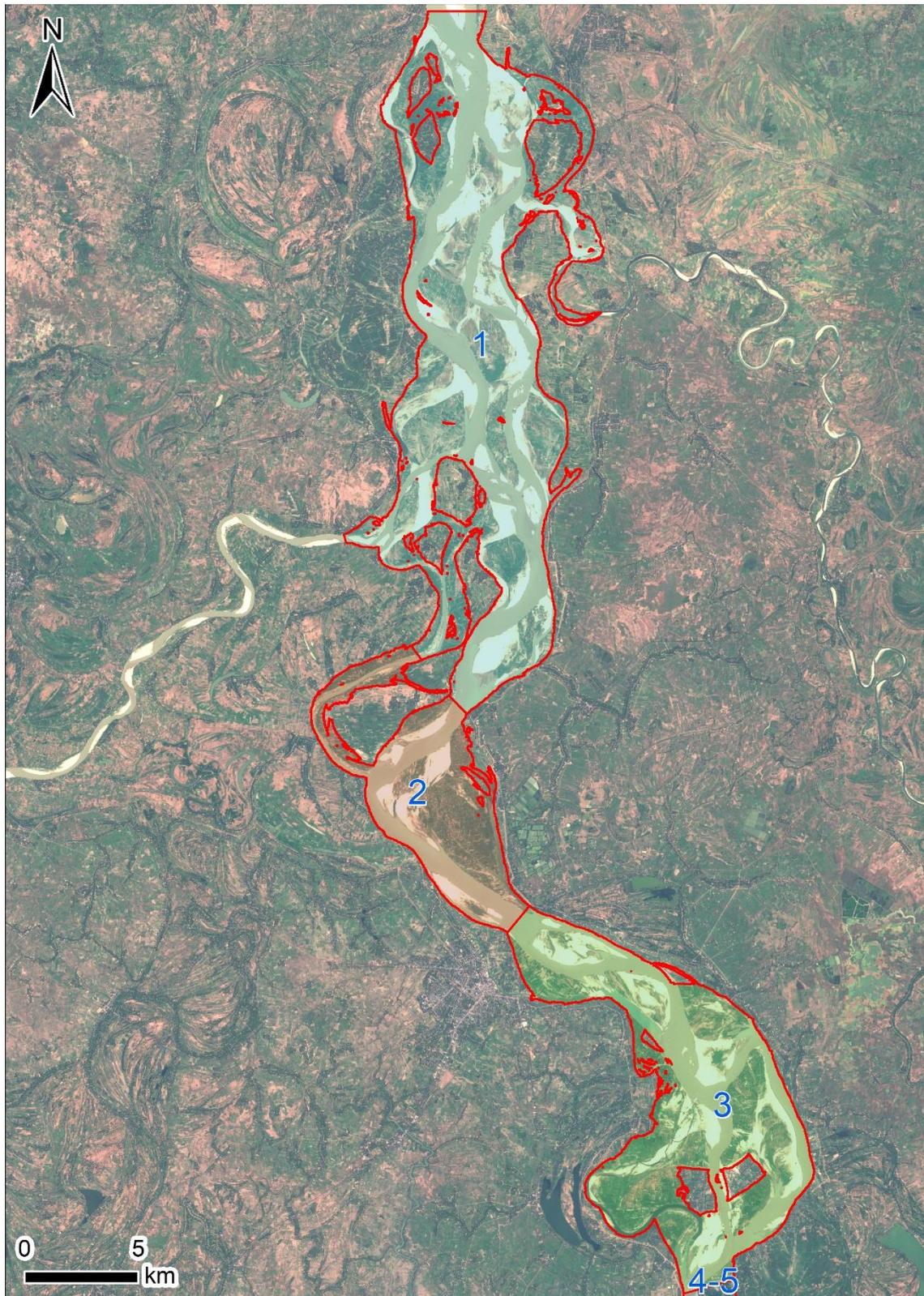


Figure 85 - Tronçons 1 à 3 (Sources : Sentinel 2)



Figure 86 - Tronçons 4-5 à 8 (Sources : Sentinel 2)

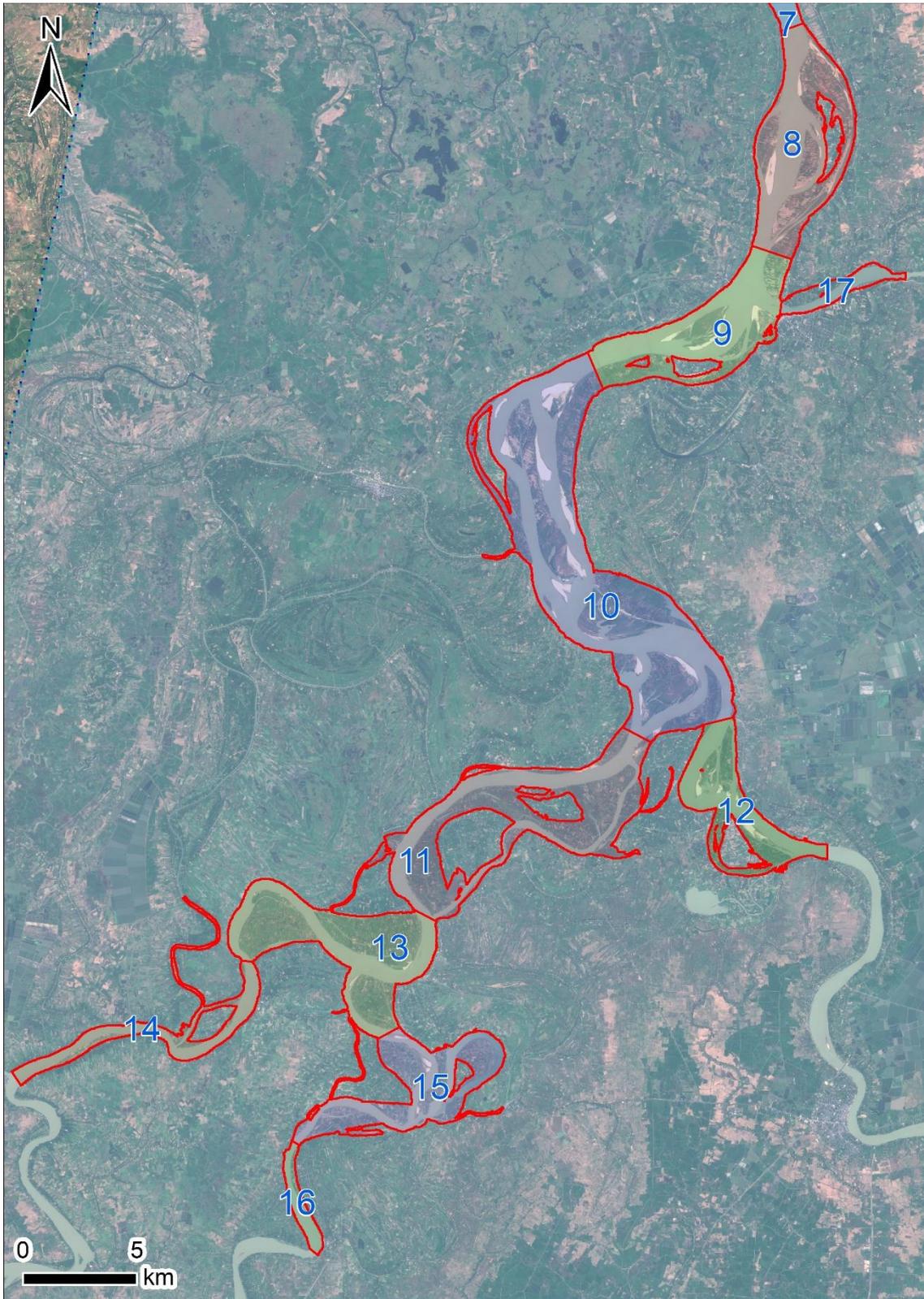


Figure 87 - Tronçons 9 à 17 (Sources : Sentinel 2)

### Tronçon 1 :

Ce tronçon correspond à la partie amont du delta, là où le fleuve commence à se partager en trois branches. On remarque en 2018 qu'il s'agit d'un chenal en anabranches tressées à deux ou trois chenaux avec la présence de vastes îles dont le cycle de vie est assez court, seul quelques îles ont conservé des terres sur plus de 30 ans. Les endiguements sont présents sur la totalité de la longueur du chenal, environ 30% de ces digues ont disparues puis reconstruites entre 1967 et 2018. On remarque que ce secteur est extrêmement dynamique sur 30 ans avec une amplitude de migration latérale très importante, une bande active très large avec des surfaces de dépôts tout justes inférieures aux surfaces en eau et donc une activité intense durant la saison des pluies. La surface en eau n'a pas beaucoup changé en 30 ans, avec une très légère augmentation ( $R^2 = 0,2094$ ). Les surfaces de banc de sable ont diminué légèrement au milieu de la période et sont revenues à une proportion semblable aux années 1990 ( $R^2 = -0,0169$ ). Le budget sédimentaire sur 30 ans montre une légère érosion avec 4,8 km<sup>2</sup> disparu. Sur le plan chronologique interannuel on n'observe pas de tendance particulière, avec des oscillations positives et négatives.

### Tronçon 2 :

En 2018 ce tronçon correspond à un chenal unique et à une partie d'une anabranch. Les endiguements sont présents sur l'ensemble de la longueur du fleuve, entre 1967 et 2018, 90% des digues situées sur la rive gauche ont disparues. Ce secteur présente une importante amplitude de migration sur 30 ans. On remarque sur ce tronçon que les surfaces sédimentaires sont beaucoup plus faibles que les surfaces en eau. On remarque sur 30 ans une légère augmentation des surfaces en eau ( $R^2 = 0,4577$ ) et une stagnation des surfaces de banc de sables ( $R^2 = 0,056$ ). Le budget sédimentaire est semblable au tronçon 1 avec une valeur médiane de -0,19%. Sur 30 ans, le budget total est également négatif avec l'érosion de 1,08 km<sup>2</sup>.

### Tronçon 3 :

Il s'agit d'un élargissement de la bande active ou sont présent 3 à 4 chenaux. Un canal rectiligne a été réalisé en 2016 afin de cour contourner les anabranches du fleuve et de reconcentrer le flux (figure 29). Les endiguements sont présents sur l'ensemble de la longueur du fleuve, entre 1967 et 2018, plus de 60% de la longueur des digues ont disparues. Ce secteur présente une amplitude de migration latérale sur 30 ans importante. On observe des surfaces de dépôts de sable très important presque semblables aux surfaces en eau (2/3). Sur le plan chronologique on remarque une augmentation des surfaces en eau entre 1988 et 2018 ( $R^2 = 0,4332$ ). Les surfaces sédiment ont également augmentées très légèrement ( $R^2 = 0,2517$ ). Le budget sédimentaire montre une érosion très nette avec un budget total correspondant à 13,54 km<sup>2</sup> de terres perdues, que l'on peut expliquer pour partie par les aménagements qui ont augmenté artificiellement le nombre de chenaux mais n'ont pas comblé les autres chenaux qui ne peuvent donc être libéré.

### Tronçon 4-5 :

Ce secteur est aujourd'hui sous forme d'un chenal unique et rectiligne avec une petite anabranch en cour d'atterrissement et mises en eau durant la saison des pluies. Il s'agit en 2018 d'une zone de transfert des sédiments entre le tronçon 3 et le tronçon 6. Les endiguements sont présents sur les deux rives, mais en 2018 seule la rive droite est soumise à l'avancée du fleuve, 90% de la longueur de cette digue à disparue entre 1967 et 2018. Ce secteur présente une amplitude de migration latérale moyenne sur 30 ans, mais qui semble avoir diminuée entre 1988 et 2018. Les surfaces en eau ont fortement diminué ( $R^2 = 0,5662$ ) tout comme les bancs de sable ( $R^2 = 0,4015$ ). Le budget sédimentaire total sur 30 ans est très nettement en accrétion avec 7,46 km<sup>2</sup> de terres gagnées. Sur le plan inter annuel on observe deux périodes d'accrétion entre 1989 et 1995 puis entre 2002 et 2010

avec ponctuellement des années d'érosion. On observerait donc une rétractation du chenal dans ce secteur.

### Tronçon 7 :

Ce tronçon correspond à un chenal très rectiligne avec une anabranchement stable et une autre activée en saison des pluies, on remarque une île longiligne restée très sable au cours des 30 ans et semblant évoluer depuis 1967 avec une même morphologie. En 2018, ce chenal est une zone de transfert de sédiments entre le secteur 6 et le secteur 8 avec peu de dépôt et d'érosion. Les endiguements n'ont presque pas changé depuis 1967 (environ 5% de digue disparue). On observe que ce tronçon est resté extrêmement stable au cours des 30 ans avec une migration latérale très limitée. La surface en eau semble avoir globalement diminuée de manière significative ( $R^2 = 0,5052$ ). Les surfaces sédimentaires sont assez faibles et suivent les niveaux de l'eau, même si les résultats ne sont pas significatifs, il semblerait cependant que ces bancs de sable diminuent globalement ( $R^2 = -0,0858$ ). Le budget sédimentaire total sur 30 ans montre un gain de terres de 2,84 km<sup>2</sup> correspondant principalement aux terres situées en amont.

### Tronçon 9 :

Ce tronçon du chenal principal correspond à une zone de diffuence entre la branche de l'Ayeyarwady et la branche de Panheaing (tronçon 17) qui rejoint Yangon. On observe une destruction d'environ 50% des endiguements en rive droite survenu entre 1967 et 2018. On remarque que ce secteur présente en 2018 entre 2 et trois chenaux. Des backswamps sont présents en rive gauche et correspondent à un chenal abandonné en 1991. On remarque que globalement sur 30 ans ce tronçon connaît une amplitude de migration latérale moyenne. Les surfaces en eau semblent assez stables sur 30 ans ( $R^2 = 0,0561$ ) avec une certaine diminution allant de 1993 à 2001. Les surfaces de bancs de sables ont fortement diminué 1988 à 1991 pour être presque inexistantes entre 1992 et 1998 avant d'être de nouveau présentes mais d'une surface constante jusqu'à 2018. Le budget sédimentaire total sur 30 ans est positif avec une surface gagnée de 3,98 km<sup>2</sup>. Sur le plan inter annuel on remarque que le bilan est positif (accrétion) entre 1988 et 1995 et que par la suite il est globalement négatif (érosion).

### Tronçon 11 :

Ce secteur est caractérisé par la présence de deux chenaux, l'un vif (Shwelaung) et l'autre est une anabranchement antérieur à 1988, assez étroite au début mais réactivée après 1997. Sur ce secteur les digues sont assez éloignées du chenal en dehors de la partie aval en rive gauche qui a connu quelques destructions entre 1967 et 2018 et qui se poursuit encore chaque année. On remarque que ce secteur prend une forme en méandres dans sa partie aval jusqu'en 1997 avant de prendre une forme à anabranches. Les îles se forment par migration de petits bancs de sable et par défluviation. Avec sur 30 ans une amplitude de mouvement assez importante. Les surfaces en eau ont très nettement diminué entre 1988 et 2018 ( $R^2 = 0,6979$ ), tandis que les surfaces de banc de sables très faibles ont connu une période avec des dépôts un peu plus importants entre 1989 et 1992. Les dépôts de 2008 et 2009 correspondent à un abaissement du niveau du fleuve. Le bilan surfacique total sur 30 ans est de 6,72 km<sup>2</sup> de terres gagnées qui semble surtout marquée après 2002. Ce changement pourrait être dû à une inversion de débit avec la branche China bakir qui aurait pris l'avantage sur celle de Shwelaung.

### Tronçon 12 :

Ce secteur correspond à la dernière zone encore très active de la branche « China bakir », il s'agit d'un secteur traversé par un chenal principal et deux autres chenaux dans la partie amont avec une anabranchement dans la partie aval, abandonnée après 1992 et en cour de fermeture. Sur ce tronçon, les

îles se forment par défluviation ainsi que par migration de petits bancs de sables. Ce secteur connaît une amplitude de migration moyenne sur 30 ans. Les surfaces en eau ont globalement augmenté ( $R^2 = 0,293$ ) mais on remarque que de 1988 à 2007 il n'y a pas de changements, ce n'est qu'après 2007 jusqu'à 2018 que les surfaces augmentent. Les bancs de sable sont visibles de 1988 jusqu'à 1994, ils ne réapparaissent qu'après 2014 mais cela correspond davantage à la baisse du niveau d'eau. Le bilan surfacique total est négatif avec une perte de 0,44 km<sup>2</sup> avec quelques années à plus forte accrétion entre 1993 et 1995 ainsi qu'en 2003 et 2004.

### Tronçon 13 :

Ce tronçon correspond à une zone de diffluence de la Shwelaung en deux branches, « Shwelaung » et « Irrawaddy ». On observe un style en méandre dont le rayon est particulièrement important avec des anabranches perpendiculaires venant recouper les courbes. Ce secteur présente une très grande amplitude de migration latérale, semblable (à proportions égales) aux sites situés en amont (tronçons 1, 2, 3). C'est un secteur où les digues ne sont présentes que sur la partie amont en rive gauche mais l'avancée du fleuve n'a jamais cessé de détruire ces digues depuis 1967 et probablement bien avant comme en témoigne la structuration des digues. A l'échelle globale. On observe une légère augmentation des surfaces en eau ( $R^2 = 0,2585$ ) mais on remarque que la surface en eau a diminué de 1988 à 1995 avant d'augmenter de manière continue jusqu'à 2018. Les bancs de sédiments étaient présents entre 1988 et 1992 avant de disparaître jusqu'à 2018. On observe donc un élargissement du fleuve et la disparition du sable. Le bilan surfacique total est tout juste positif avec 0,17 km<sup>2</sup> gagné. On constate qu'entre 1990 et 1995 cette section était plutôt en accrétion.

### Tronçon 14 :

Ce tronçon correspond à la branche « Shwelaung », il s'agit de la dernière partie de cette branche à être encore assez active. On observe que cette section est restée très peu active durant les 30 années avec une faible amplitude de migration. On retrouve ici un style plutôt anastomosé. Les digues sont assez éloignées du chenal et semblent ne pas avoir connu de destruction depuis 1967. Sur ce secteur les surfaces en eau ont diminué entre 1988 et 2018 ( $R^2 = 0,5129$ ) tandis que les bancs de sables ont été presque absents durant cette période. Le bilan surfacique total est positif avec 1,15 km<sup>2</sup> de gagné. Avec deux périodes continues entre 1991 et 1995 puis entre 2003 et 2006.

### Tronçon 15 :

Ce secteur à méandres correspond au début de la branche Irrawaddy, il est formé d'étroites anabranches et d'un paléo méandre abandonné en 2000 et encore connecté au fleuve en 2018. Quelques petits bancs de sables actifs sont encore visibles dans ces secteurs. Les endiguements très présents dans ce secteur ont connu des changements importants entre 1967 et 1988 avec la destruction d'une digue de plus de 4 km lors de la migration du méandre aujourd'hui déconnecté. Ce secteur pourtant situé très en aval des autres présente une amplitude de migration assez importante, durant les 30 ans la surface en eau est restée relativement similaire ( $R^2 = 0,084$ ) en dehors d'une phase plus élevée entre 1999 et 2003 attribuable à la période de recouplement du méandre. Les bancs de sédiments étaient présents mais de très faible surface entre 1990 et 1999, avant de disparaître jusqu'à 2018 ou ils réapparaissent légèrement. Le bilan surfacique total est presque neutre avec une perte de 0,05 km<sup>2</sup>. Seules les périodes 1993-1995 et 2003-2006 tendent vers une accrétion.

### Tronçon 16 :

Ce tronçon de style anastomosé correspond à la branche « Irrawaddy », il s'agit de la dernière partie de cette branche à être encore assez active. On observe que cette section est restée très peu active durant les 30 années avec une faible amplitude de migration. Les digues sont présentes sur la rive gauche mais semblent ne pas avoir connu de destruction depuis 1967. Depuis 1988 ce tronçon n'a

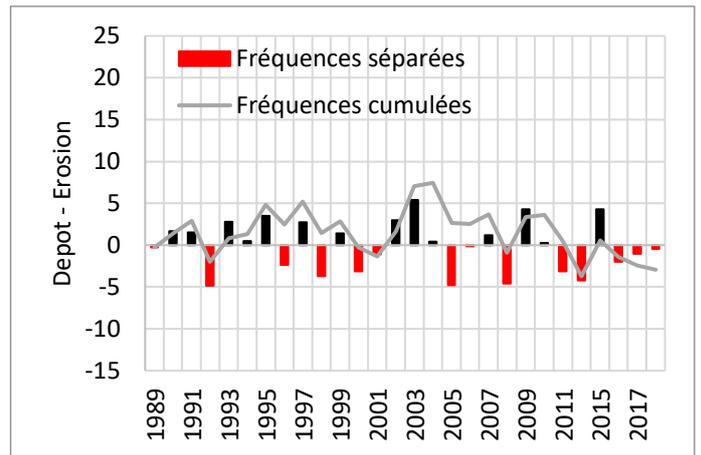
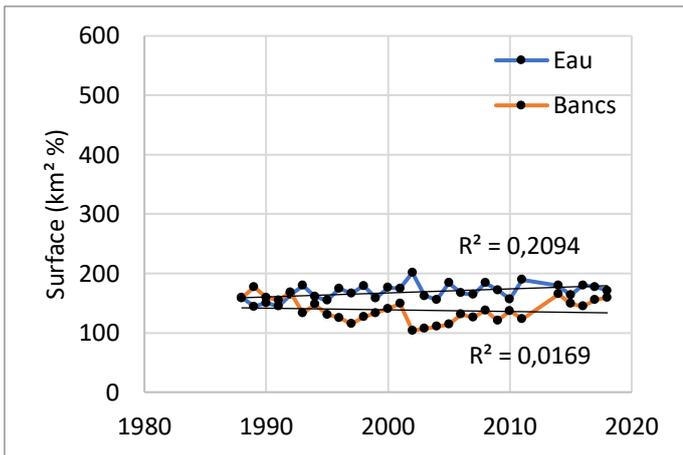
connu aucune évolution au niveau des surfaces en eau ( $R^2 = 0,065$ ). Et les bancs de sable sont totalement absent durant toute cette période. Le bilan surfacique total est légèrement positif avec un gain de terres de 0,2 km<sup>2</sup> mais rien de significatif sur le plan chronologique.

### Tronçon 17 :

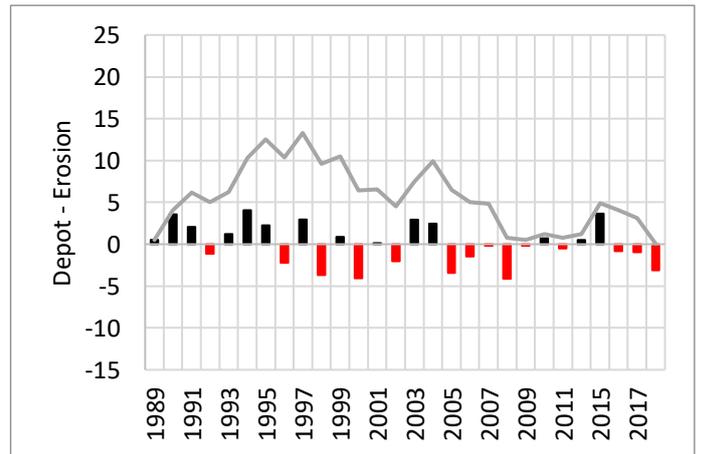
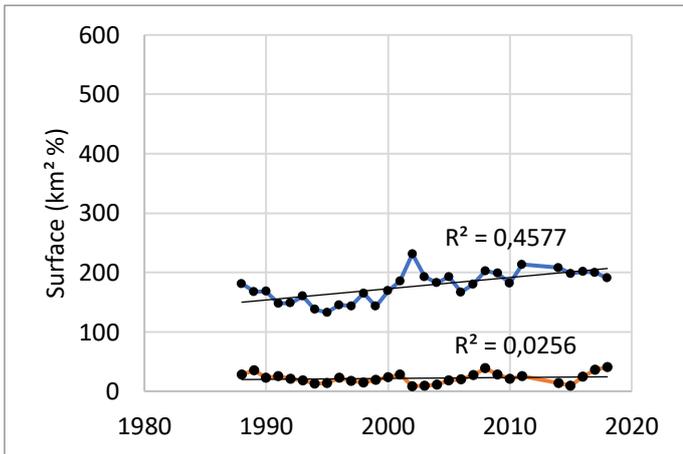
Ce secteur correspond à la branche de Panheaing qui relie l'Irrawaddy à Yangon au niveau de Nyaungdon. Cette branche est le dernier secteur encore actif de cette branche dans la continuité du chenal principal. D'autre section sont de nouveau actives vers la branche de Bassein. En 2018 ce tronçon est un chenal unique semblable aux secteurs 14 et 16. Des endiguements sont présent de part et d'autre de ce tronçon et la presque totalité de la digue (5,3 km) située en rive gauche à disparue entre 1967 et 2018. Ce secteur semblant assez calme en 2018 a connu entre 1988 et 2018 une amplitude de migration moyenne. En revanche on constate une augmentation significative des surfaces en eau durant cette période ( $R^2 = 0,7752$ ), on observe également de grandes surfaces de banc de sable de 1989 à 1992, qui vont diminuer jusqu'à 2003 avant de disparaître totalement jusqu'à 2018 ( $R^2 = 0,5315$ ). Le bilan surfacique total est négatif avec 0,41 km<sup>2</sup> de terres disparues sur un secteur assez petit on observe une période d'aggradation entre 1992 et 1995 puis dominé par l'érosion jusqu'à 2018.

Tableau 17 – Surface en eau / banc de sable et bilan surfacique des tronçons

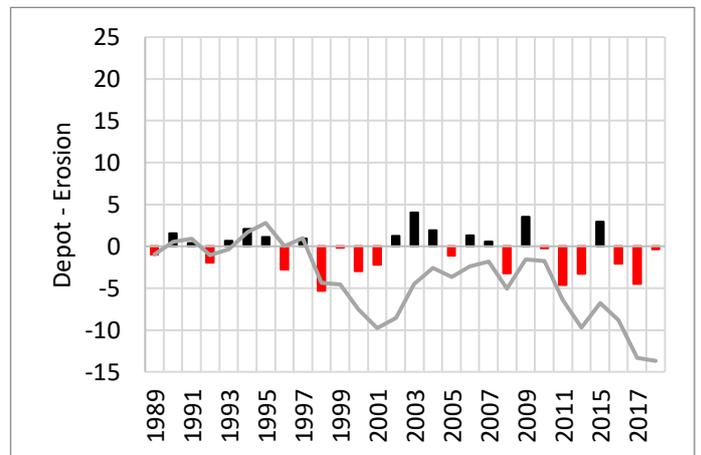
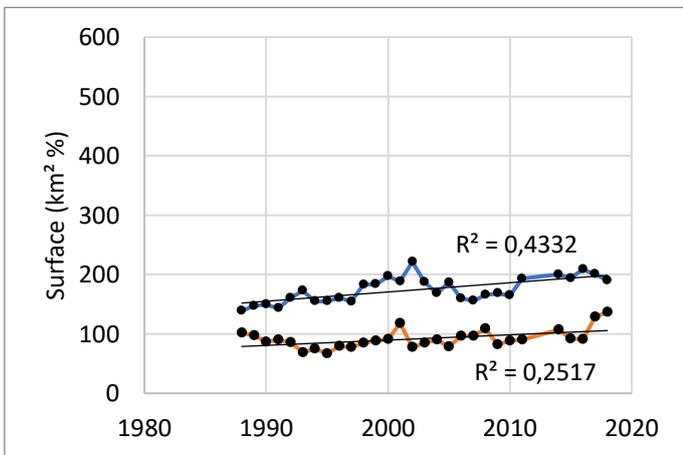
1



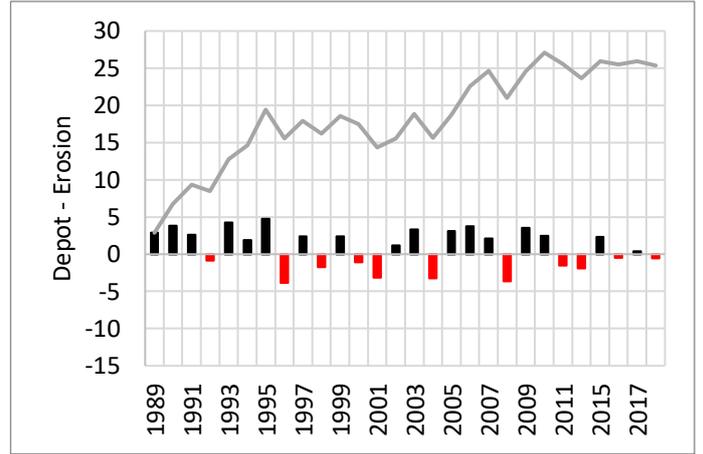
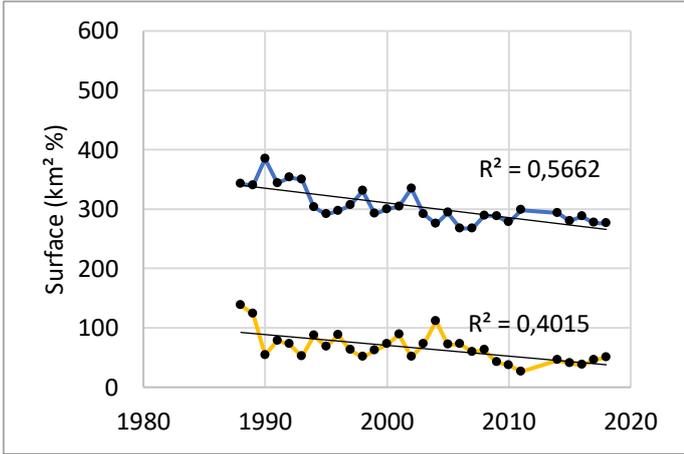
2



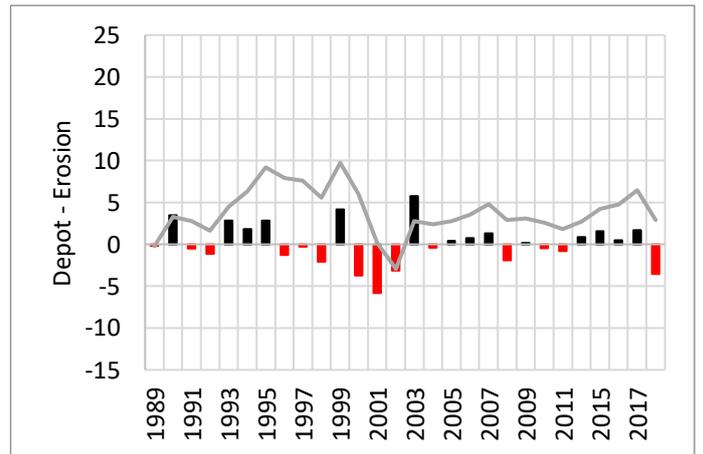
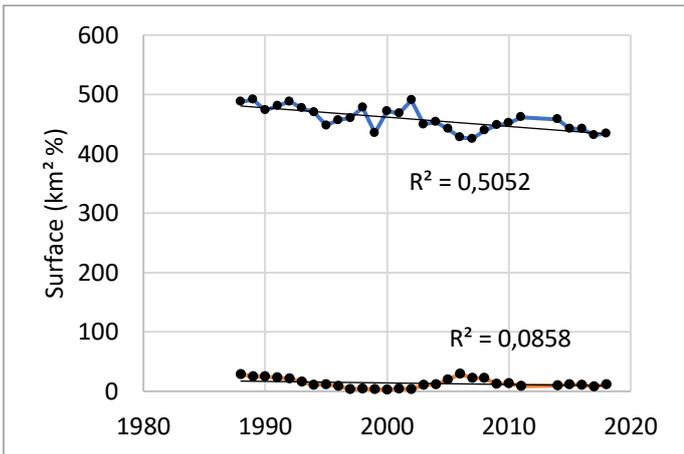
3



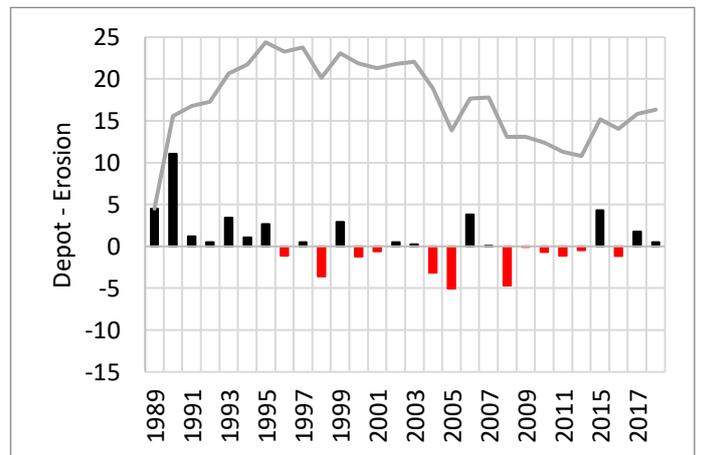
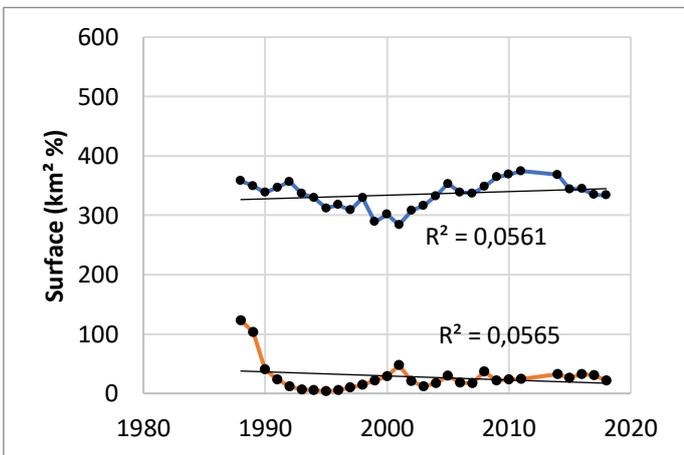
4-5



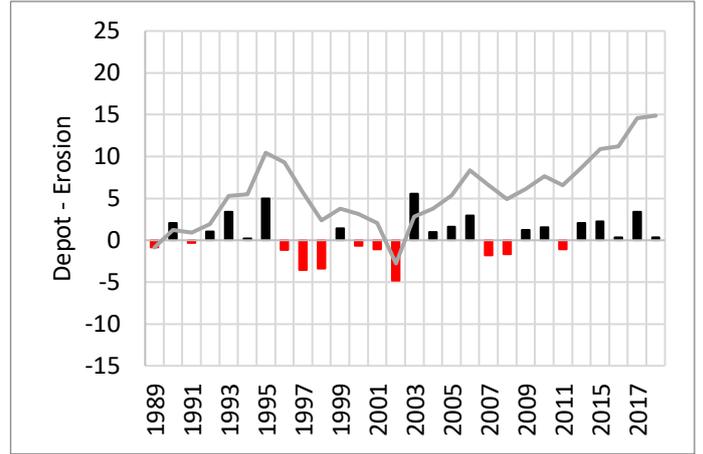
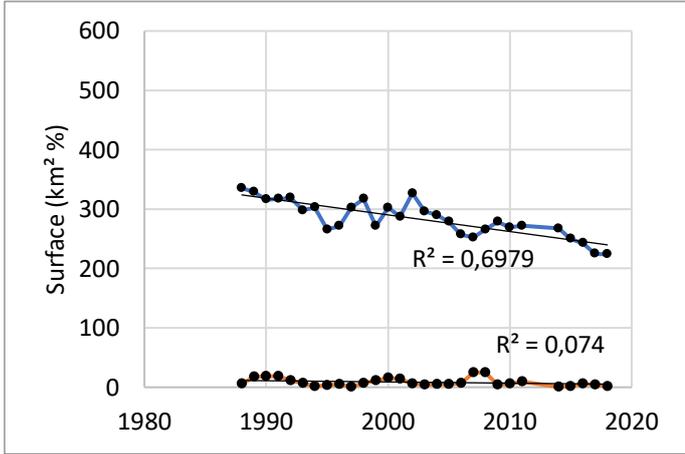
7



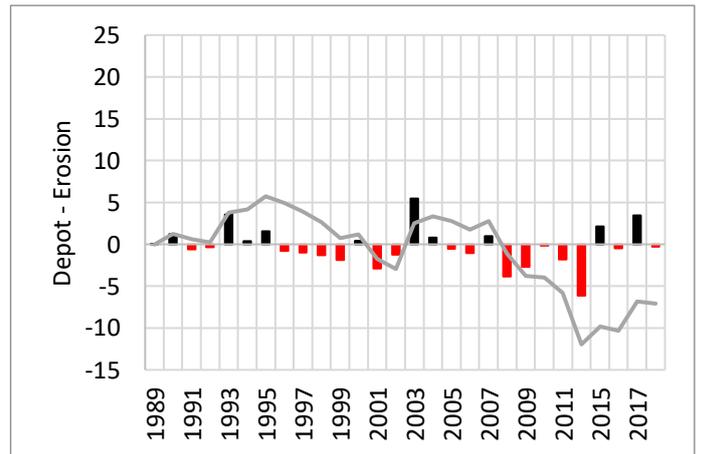
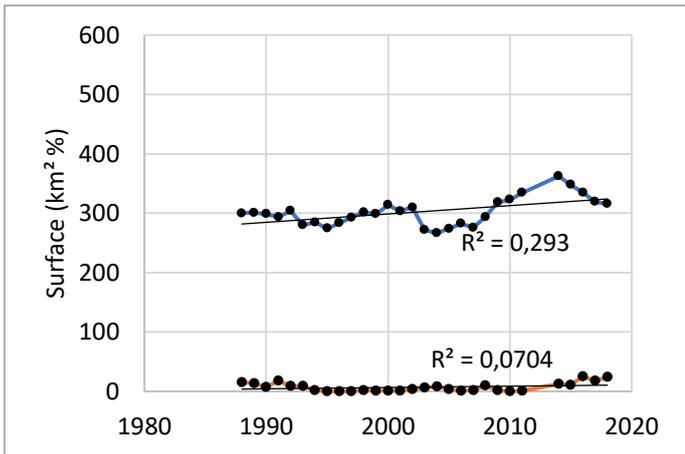
9



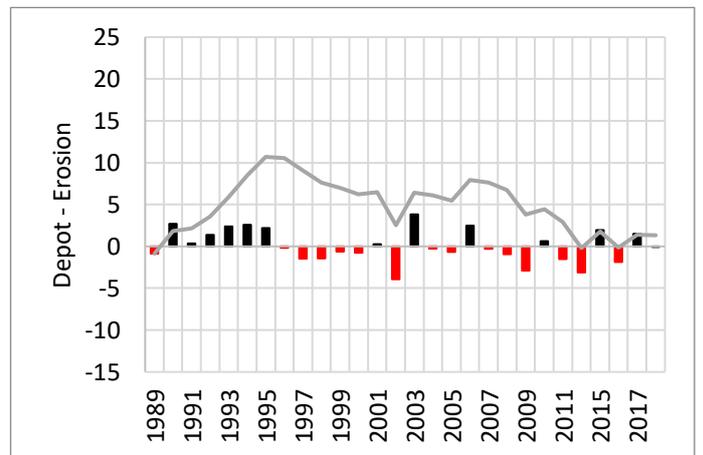
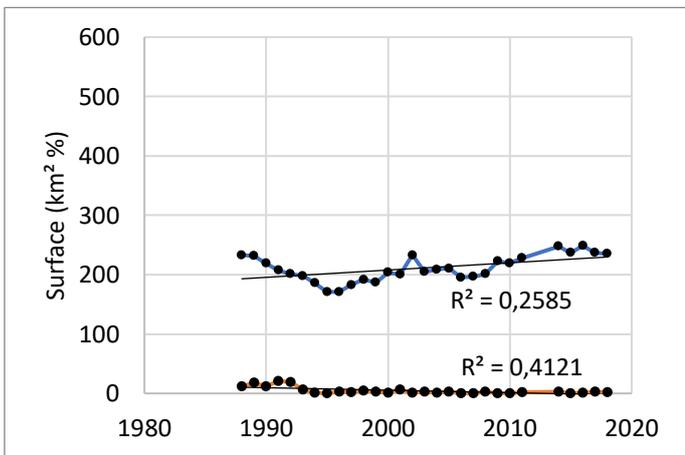
11



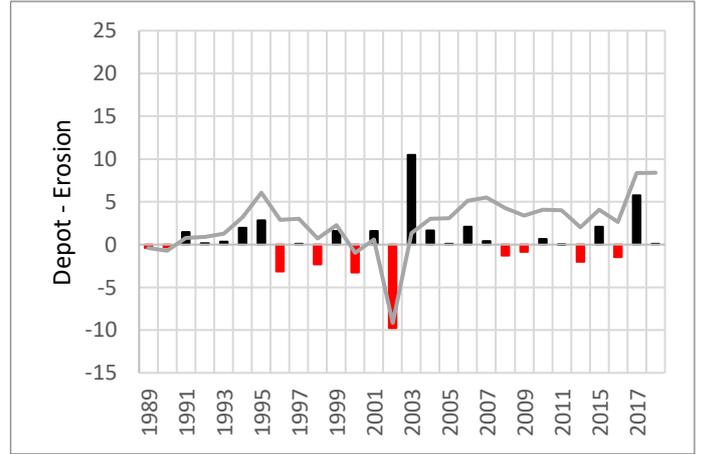
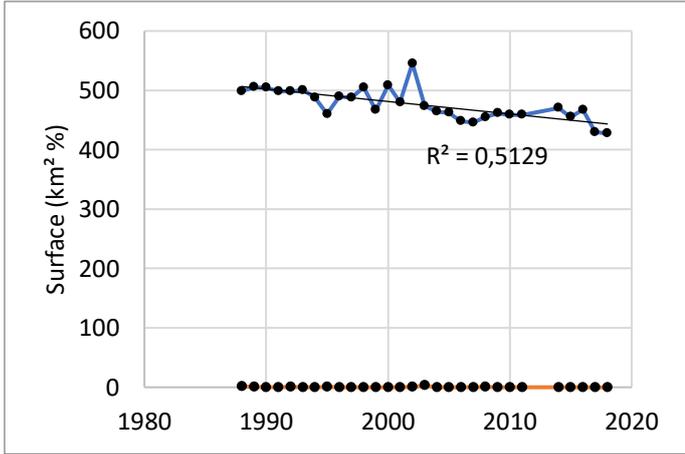
12



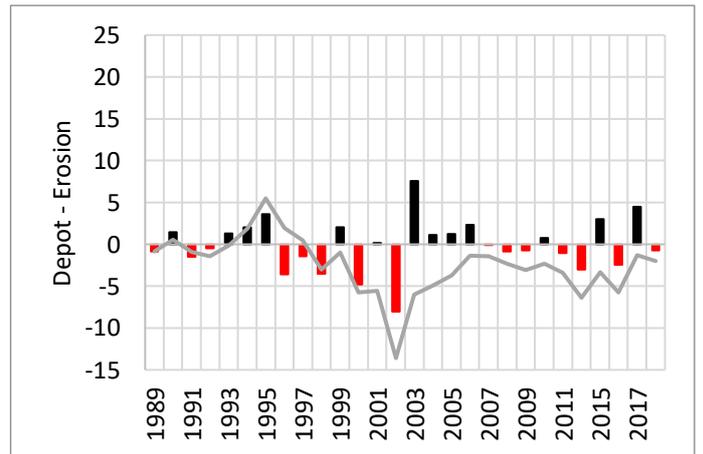
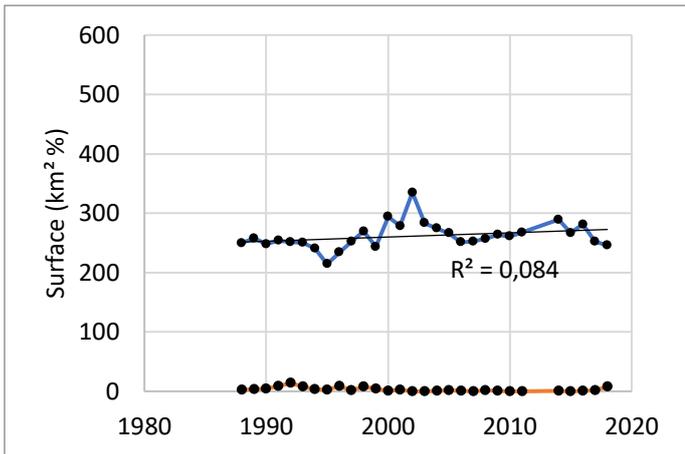
13



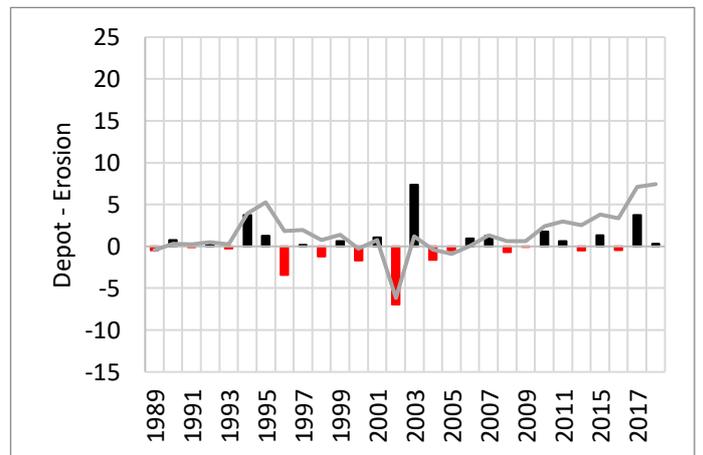
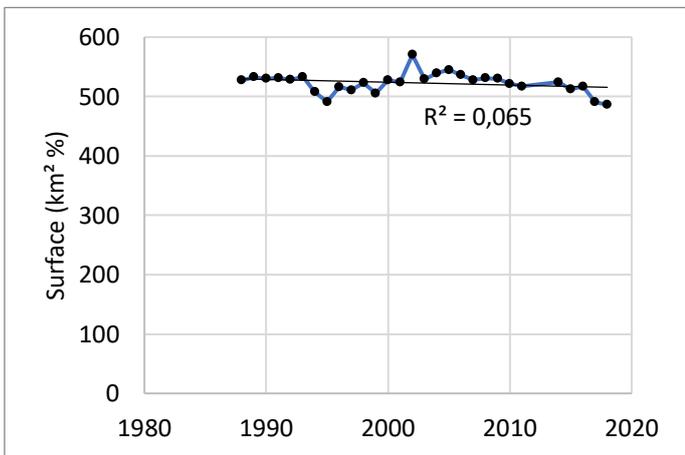
14

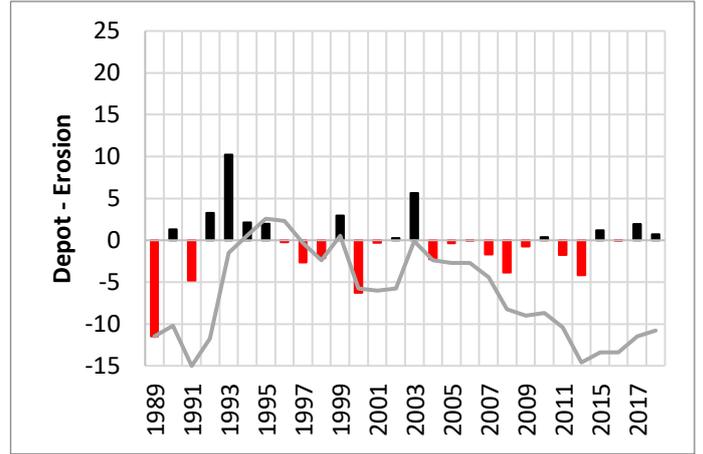
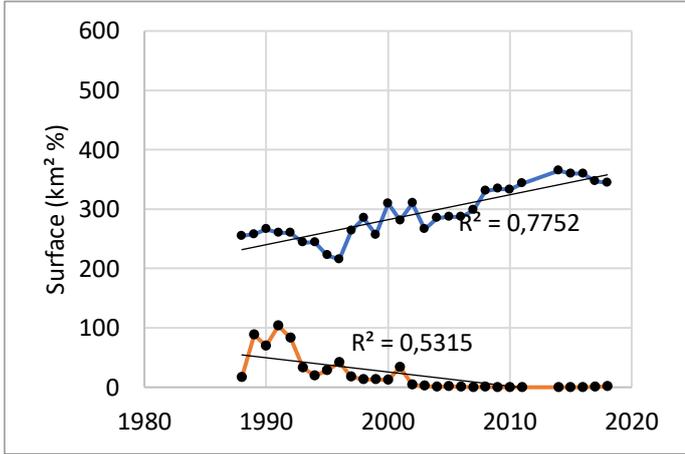


15



16





Annexe 5.1 : Sites d'étude

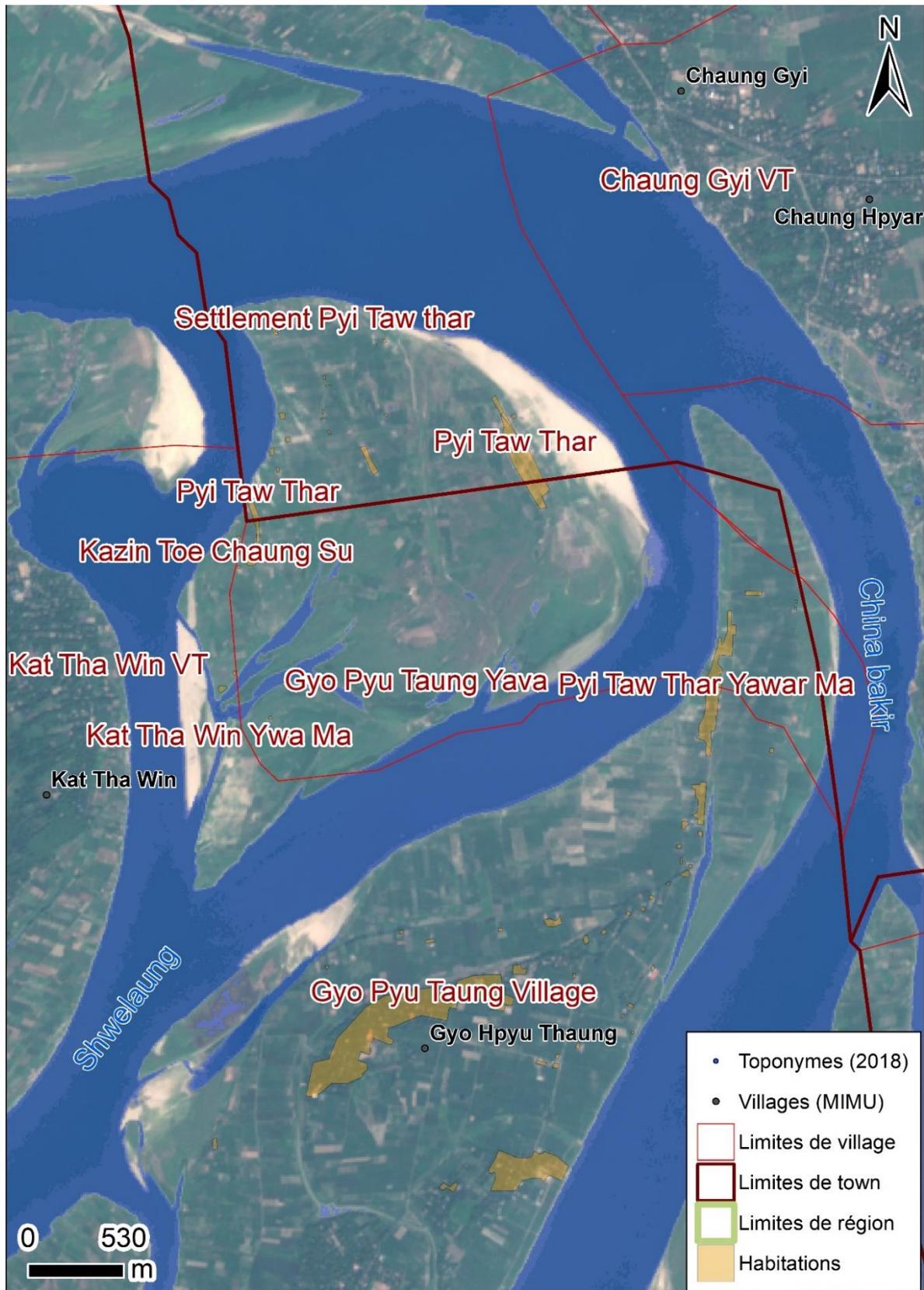


Figure 88 - Zone d'étude 1 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

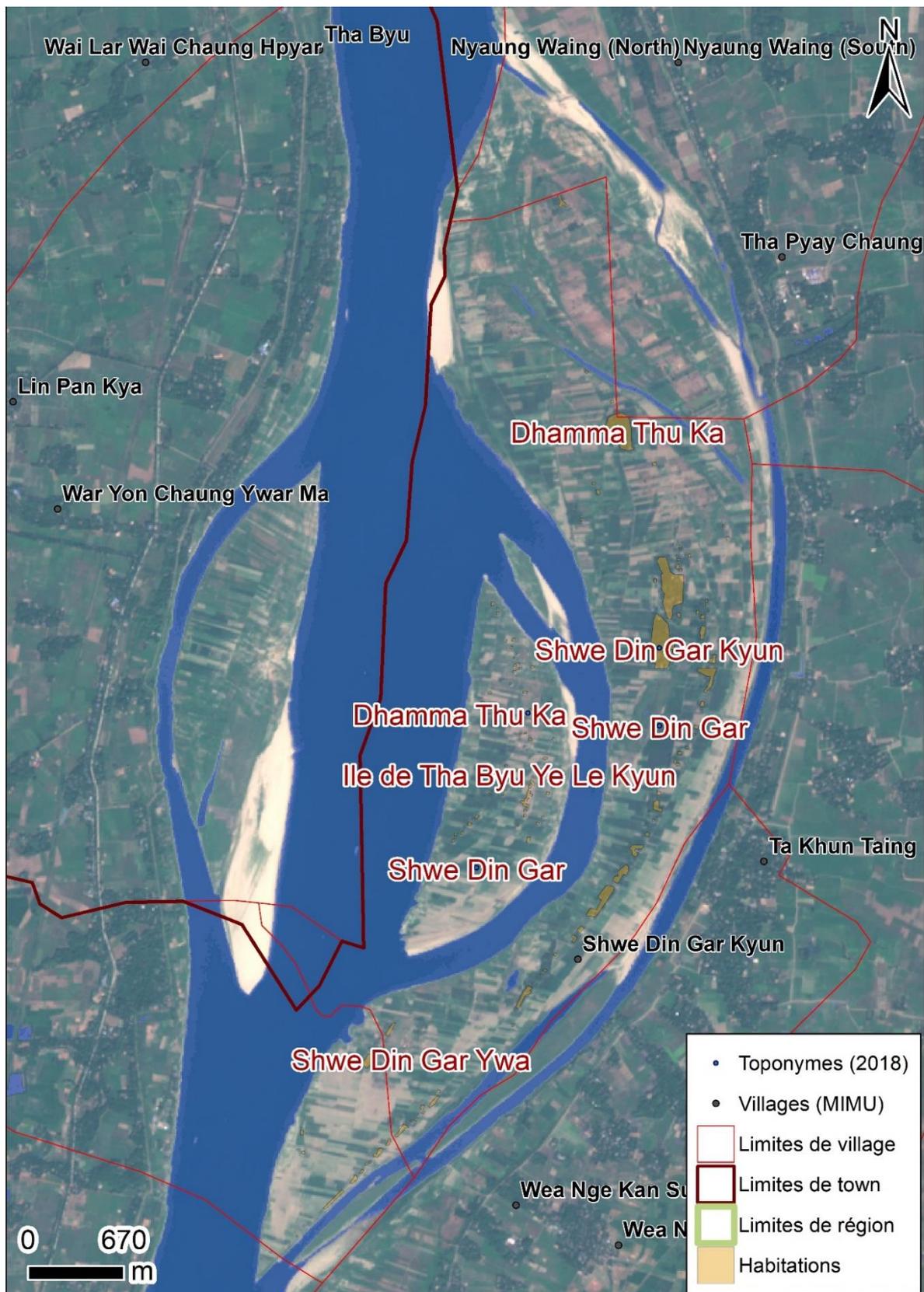


Figure 89 - Zone d'étude 2 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

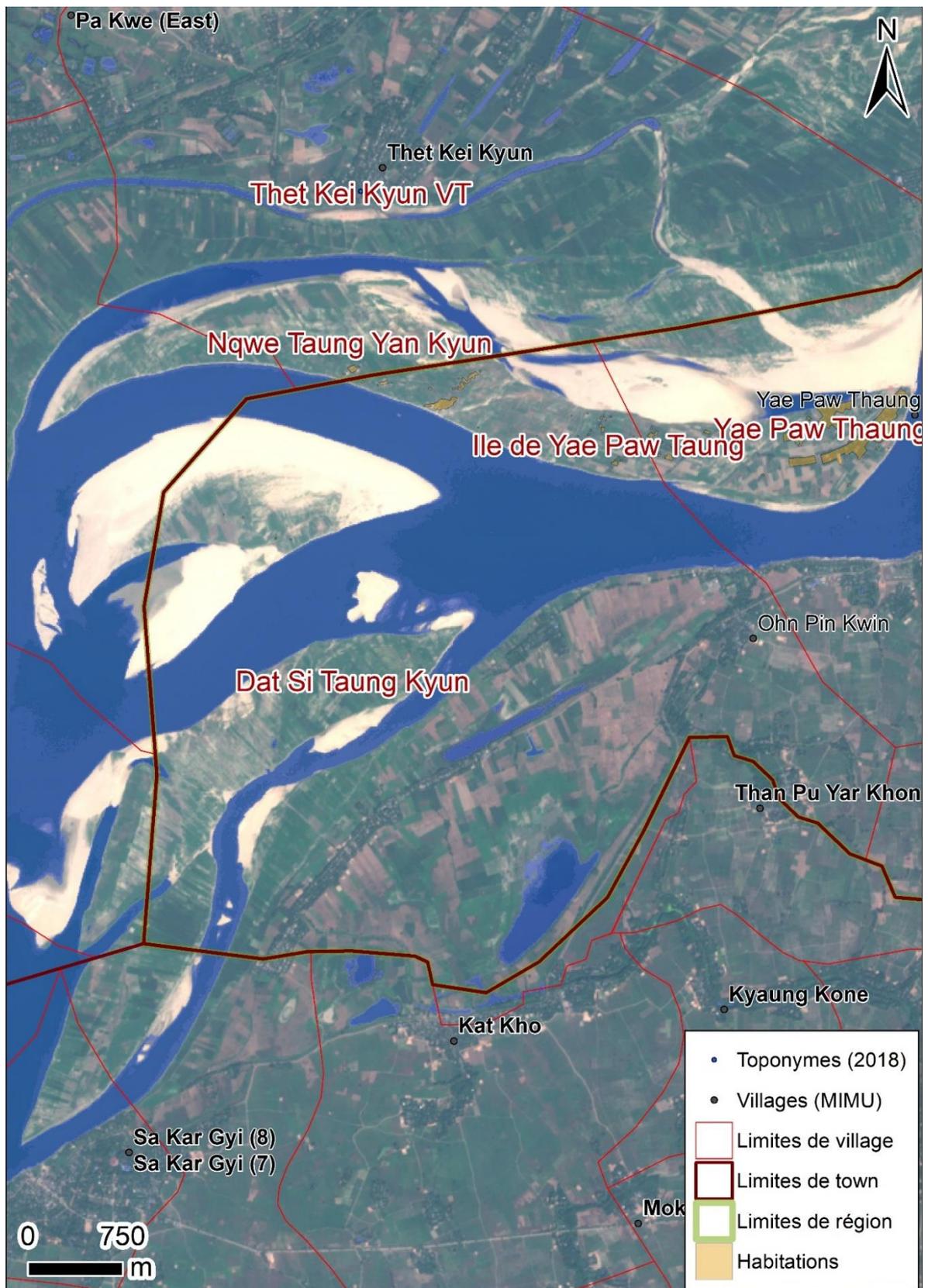


Figure 90 - Zone d'étude 3 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

Annexe 5.2 : Découpage des espaces en fonction des niveaux du fleuve à différentes dates

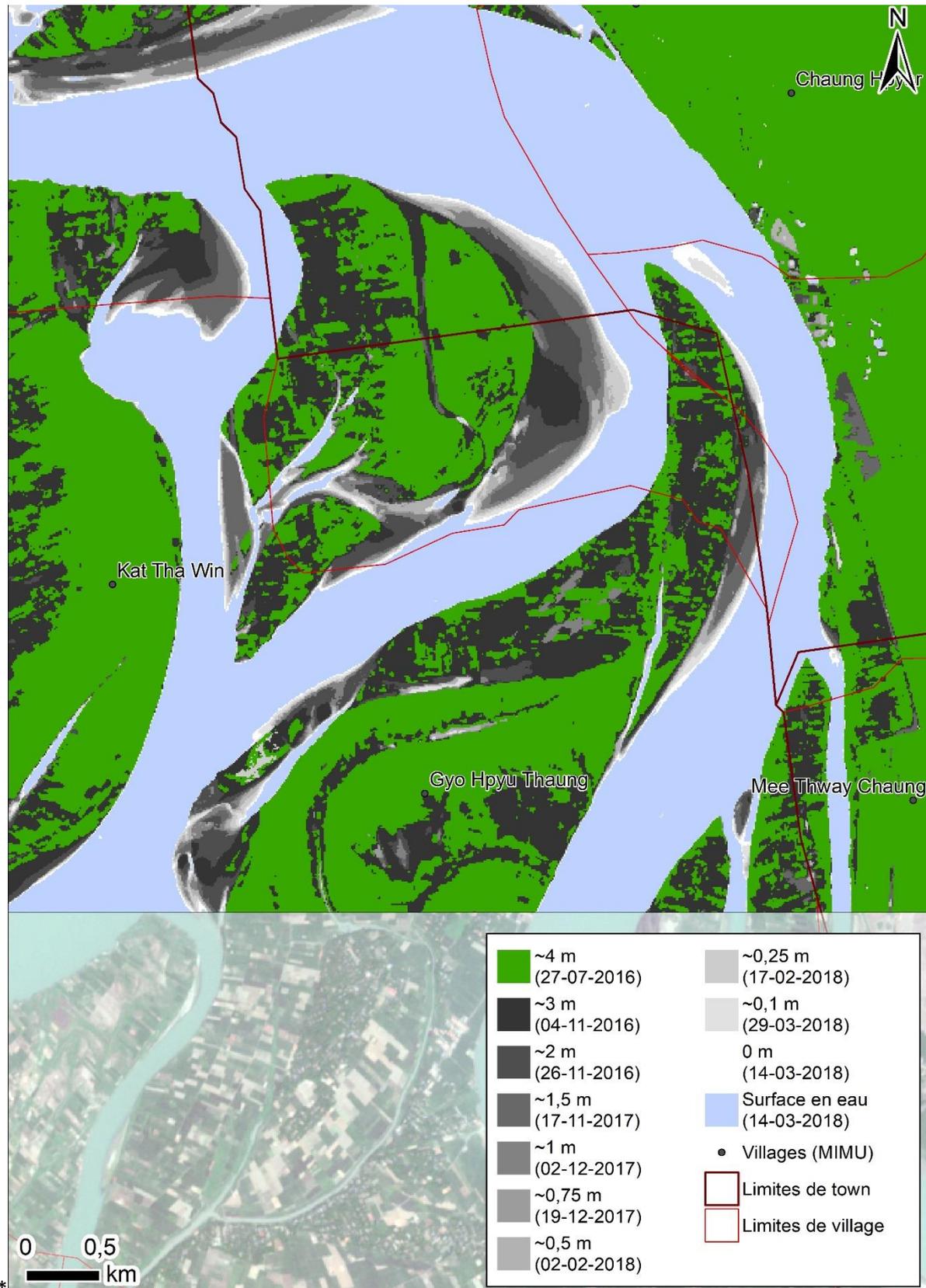


Figure 91 – Espaces terrestres émergés à différentes dates, site 1 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

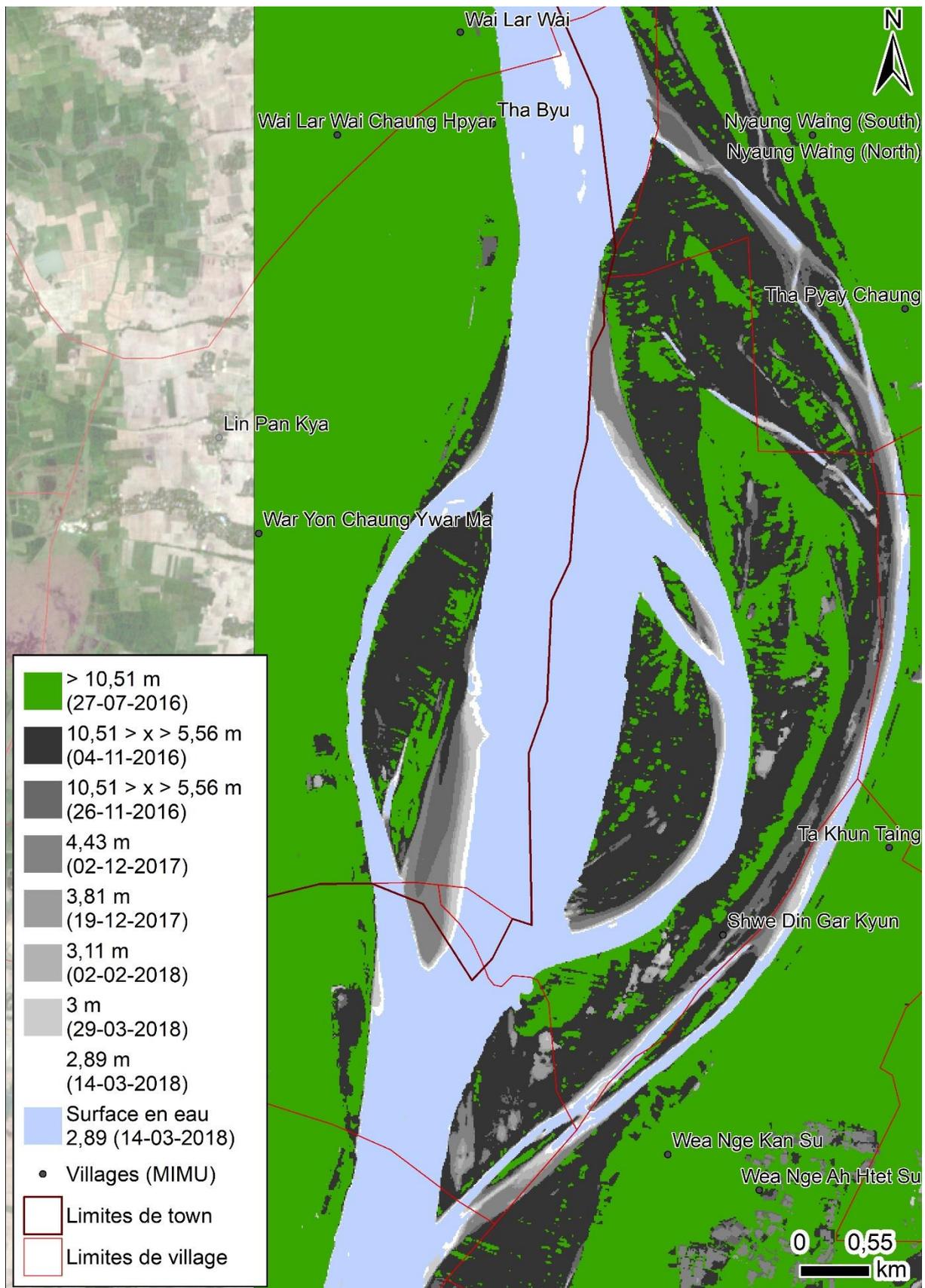


Figure 92 - Espaces terrestres émergés à différentes dates, site 2 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

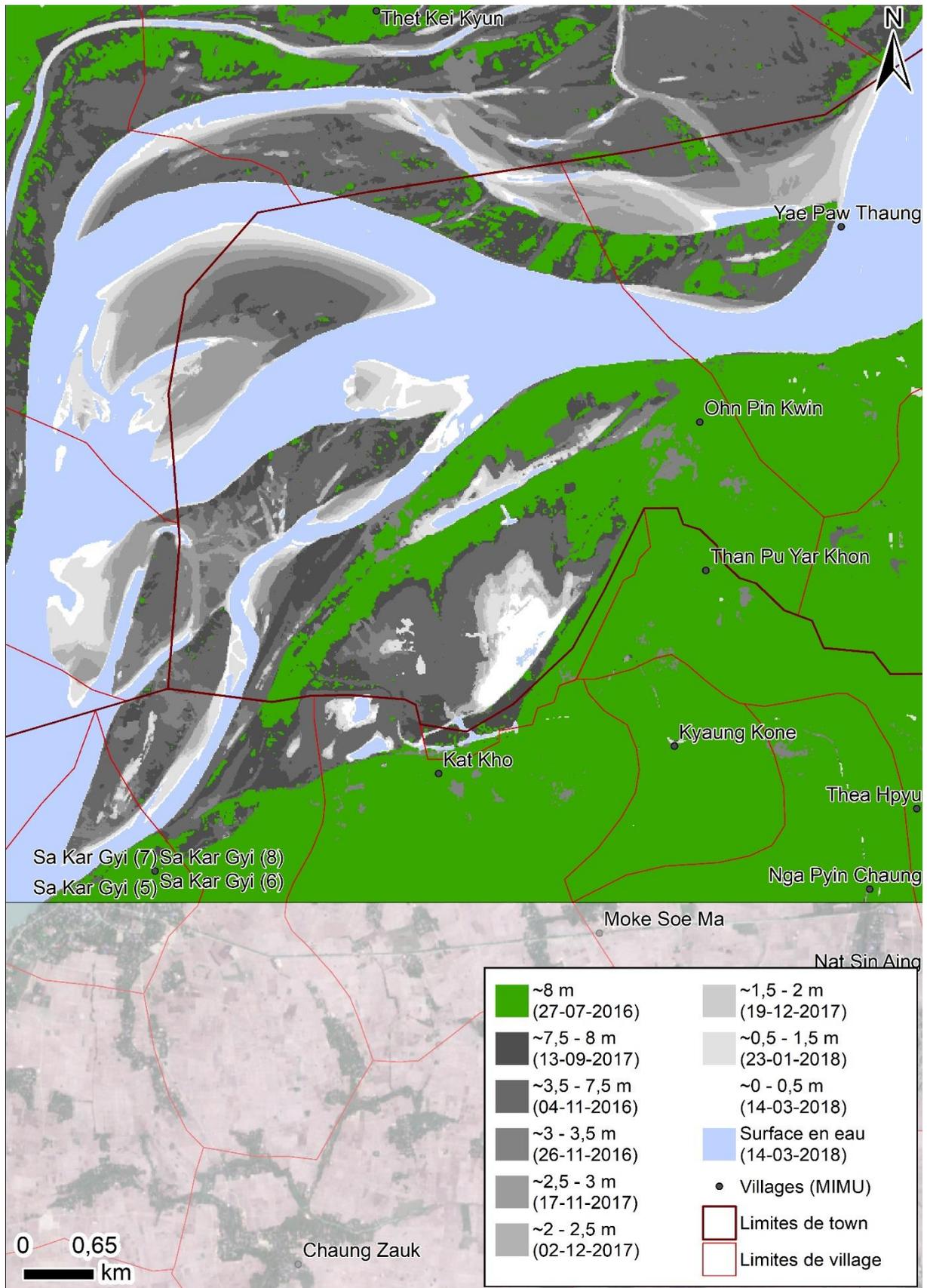


Figure 93 - Espaces terrestres émergés à différentes dates, site 3 (Sources : Sentinel 2, MIMU)

Annexe 5.3 : Les sites durant la période de crue (27/07/2016)

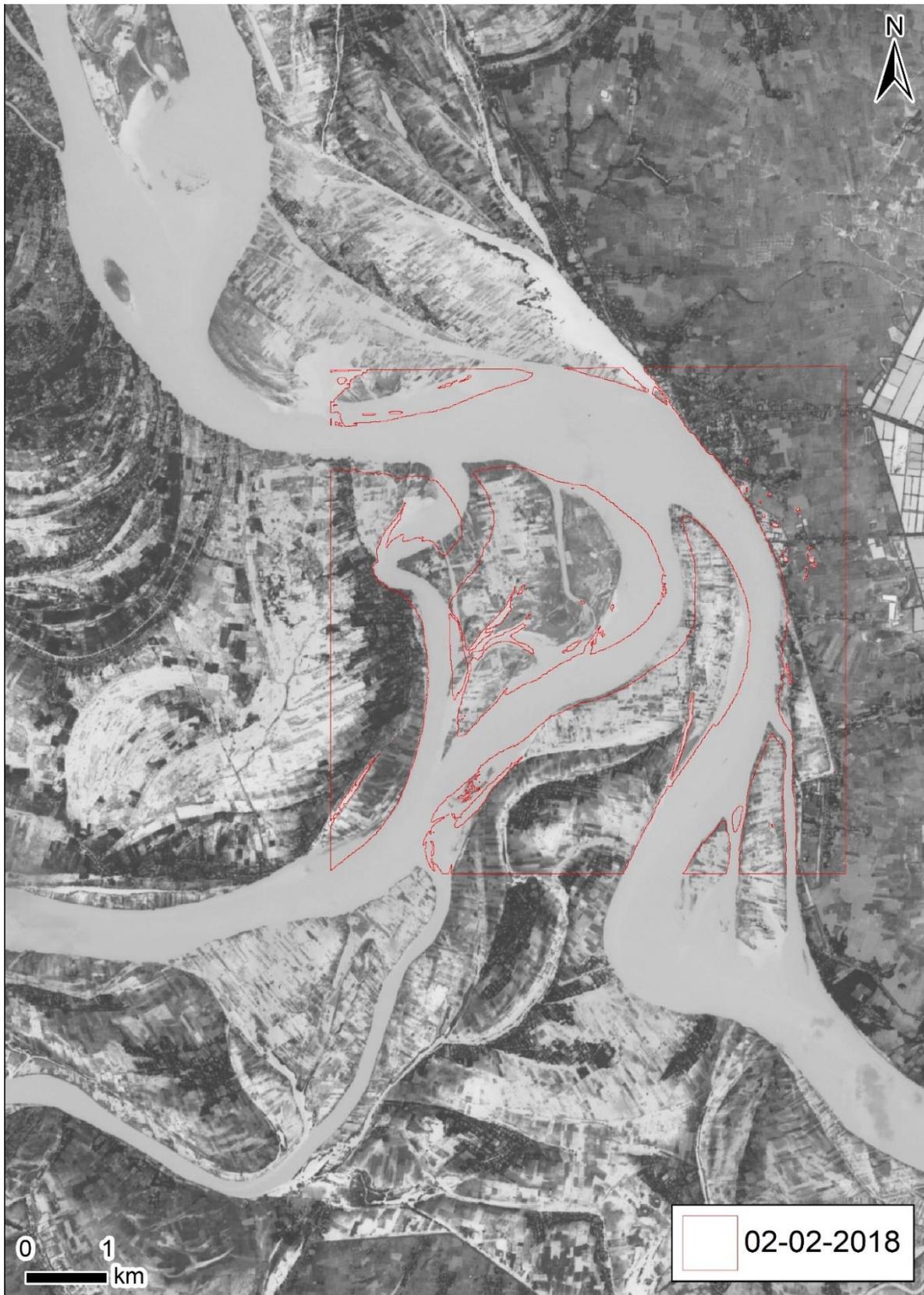


Figure 94 – Territoires inondés en période de crue (11,5 m à Zalun), le 27 juillet 2016, site 1, (Sources : Sentinel 2)



Figure 95 – Territoires inondés en période de crue (11,5 m à Zalun), le 27 juillet 2016, site 2, (Sources : Sentinel 2)

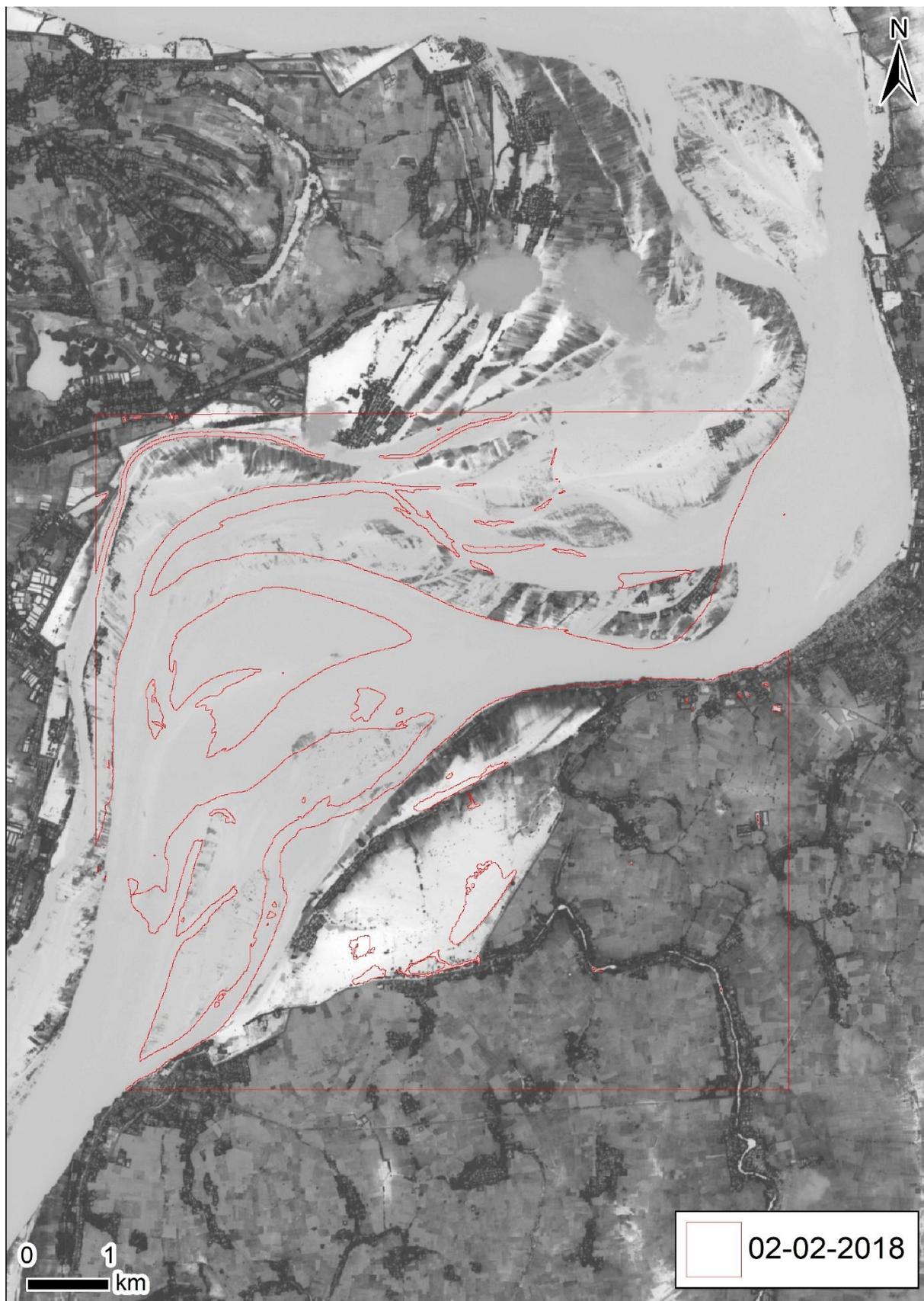
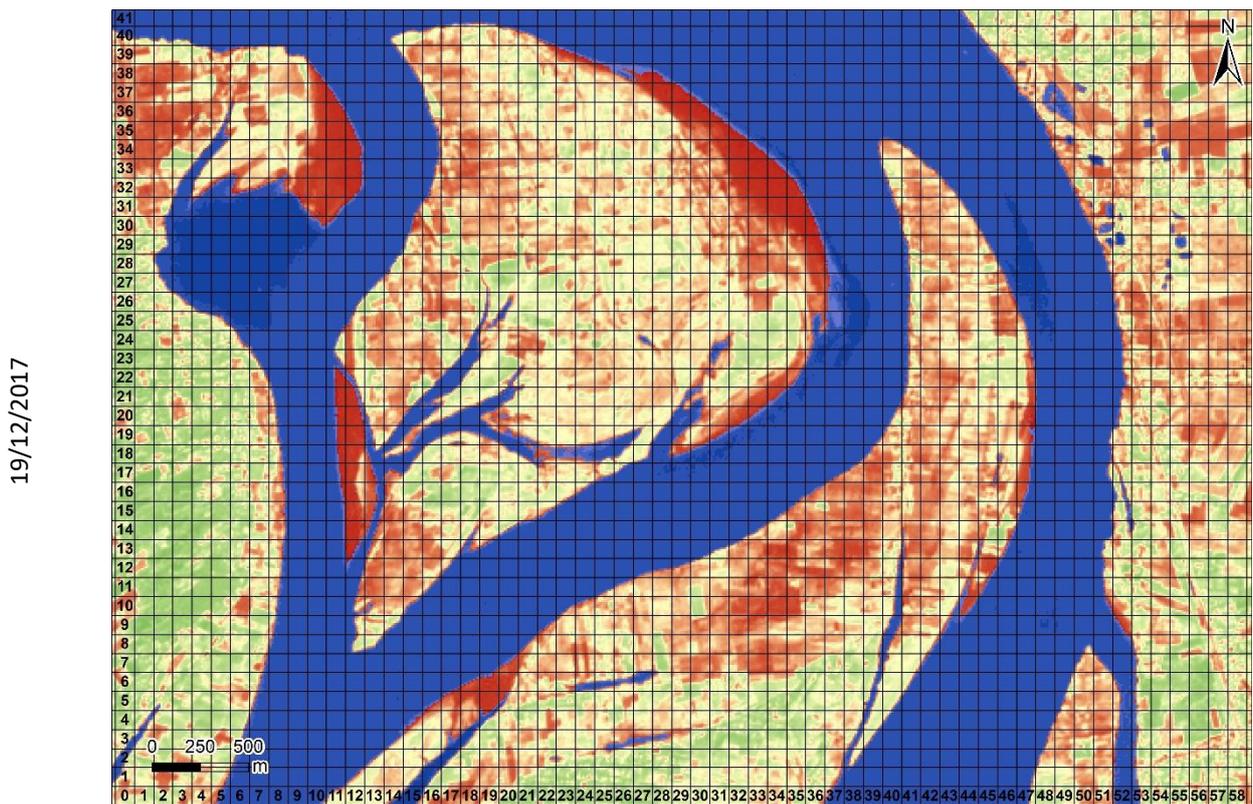
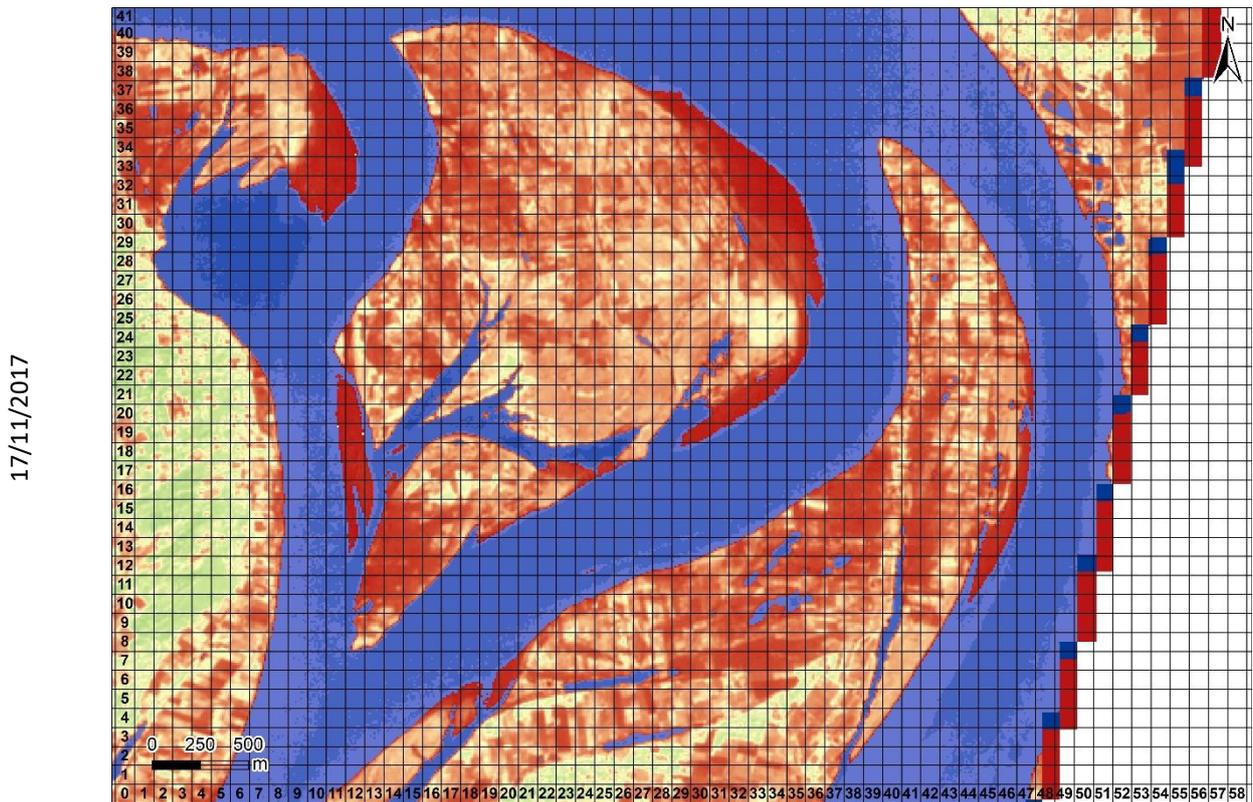
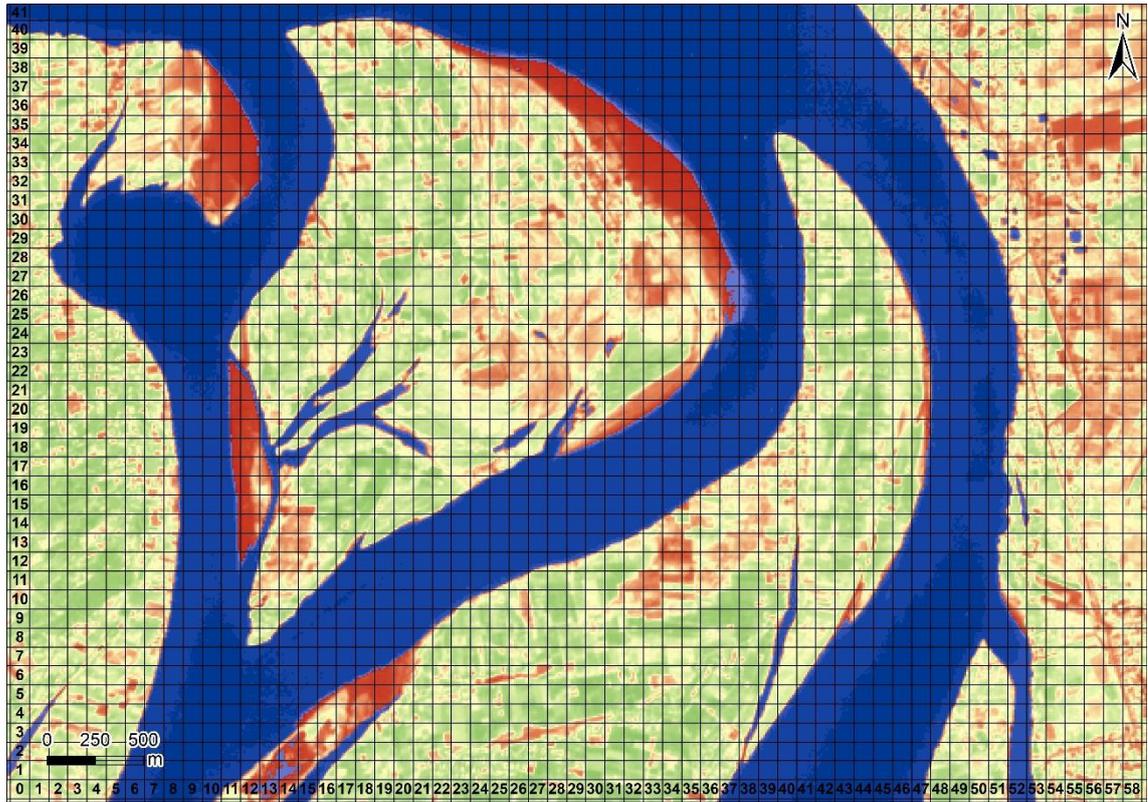


Figure 96 - Territoires inondés en période de crue (11,5 m à Zalun), le 27 juillet 2016, site 3, (Sources : Sentinel 2)

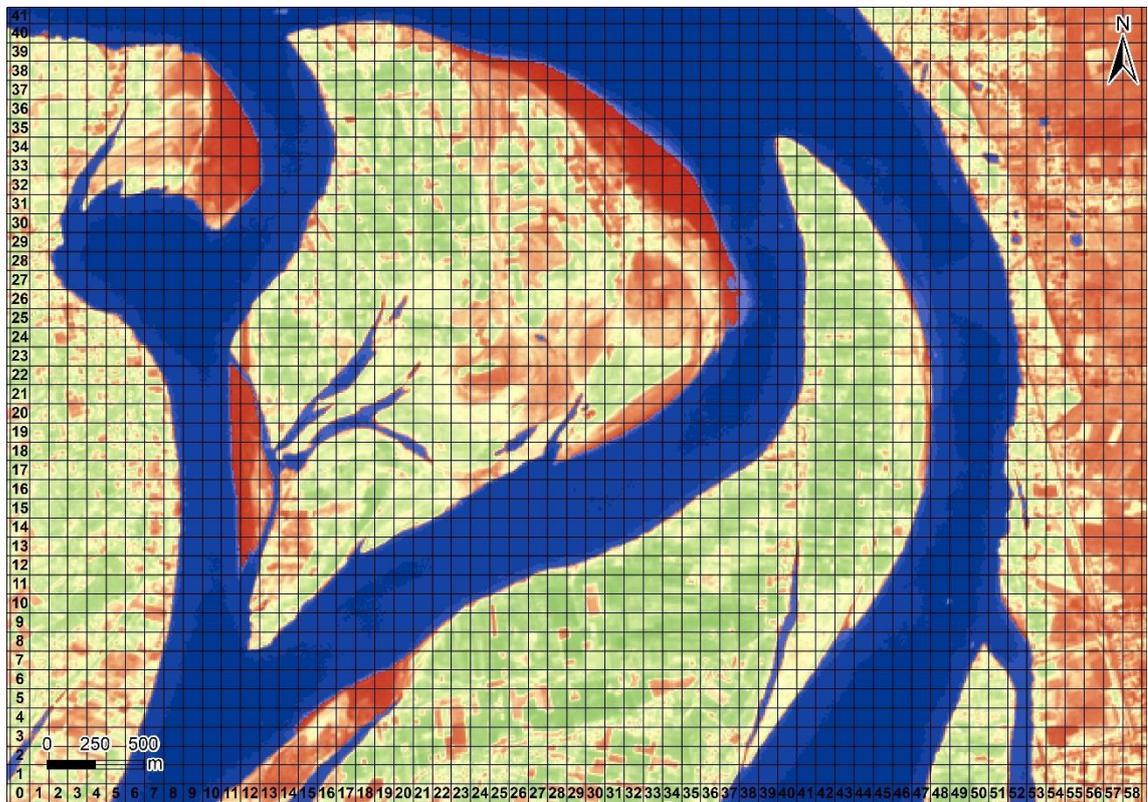
Annexe 6.1 : Phénologie et occupation des terres novembre 2017 à avril 2018 à partir des indices NDVI et NDWI (site 1)



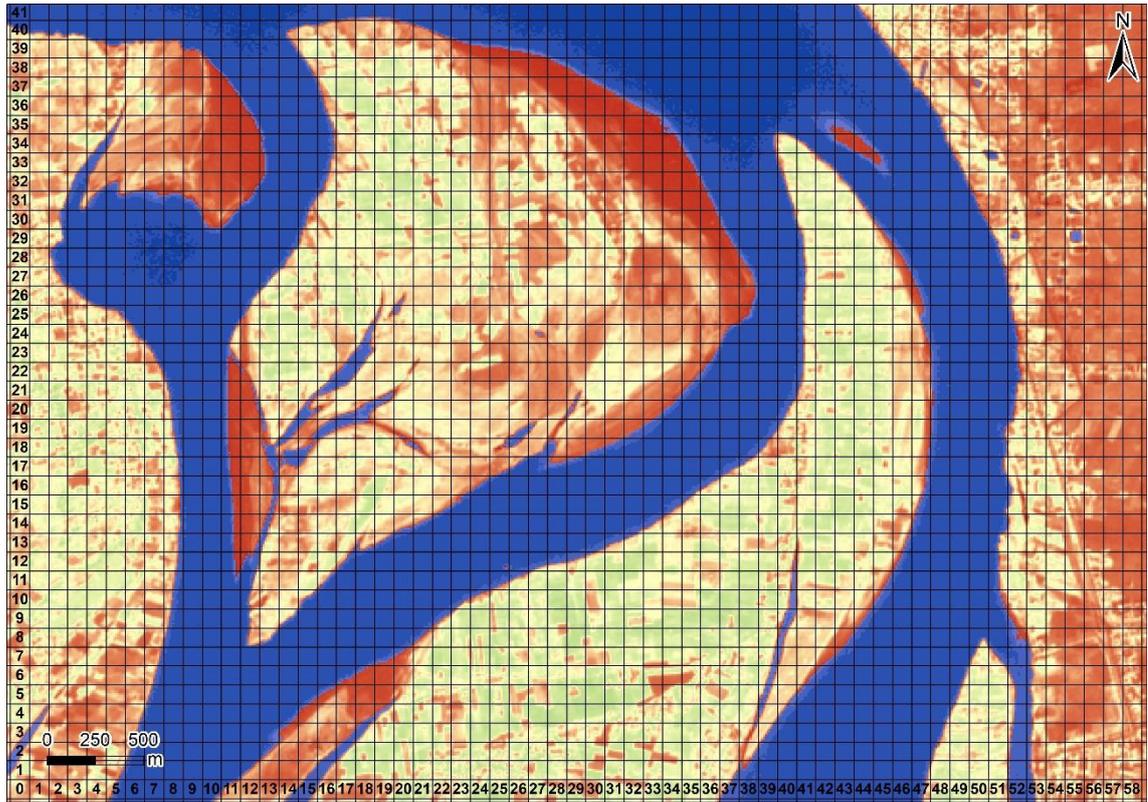
02/02/2018



04/03/2018



29/03/2018



23/04/2018

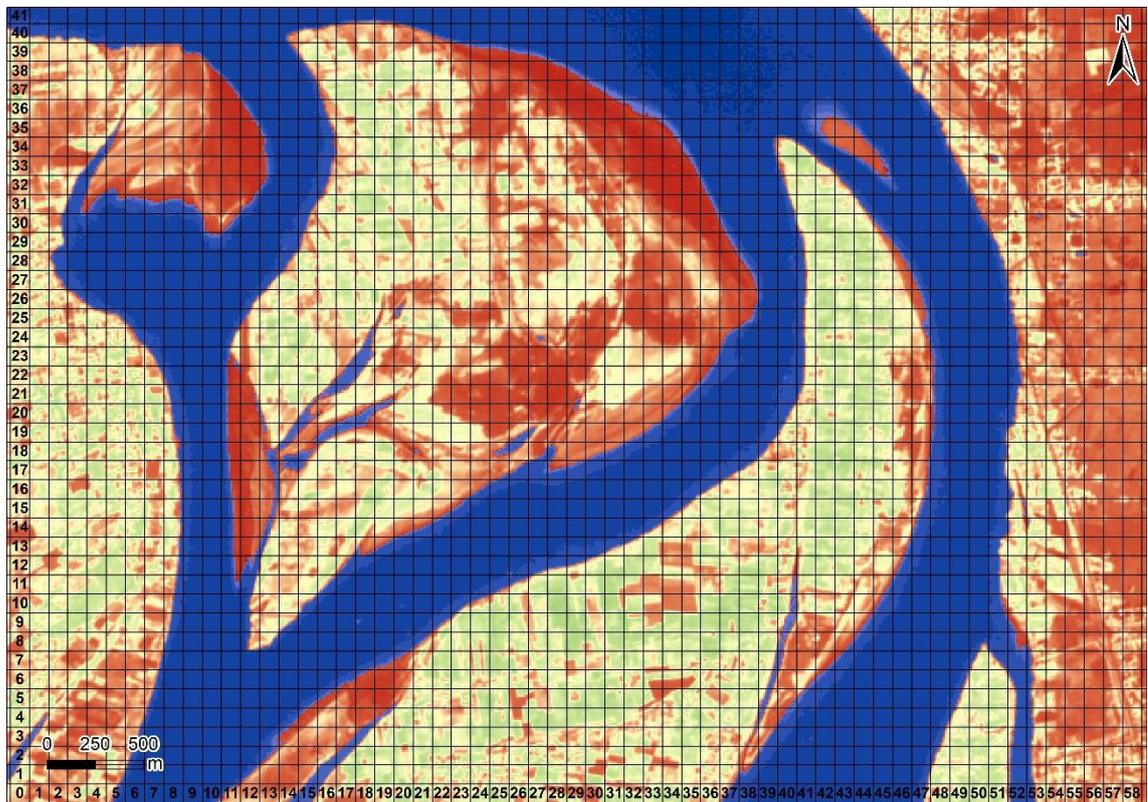
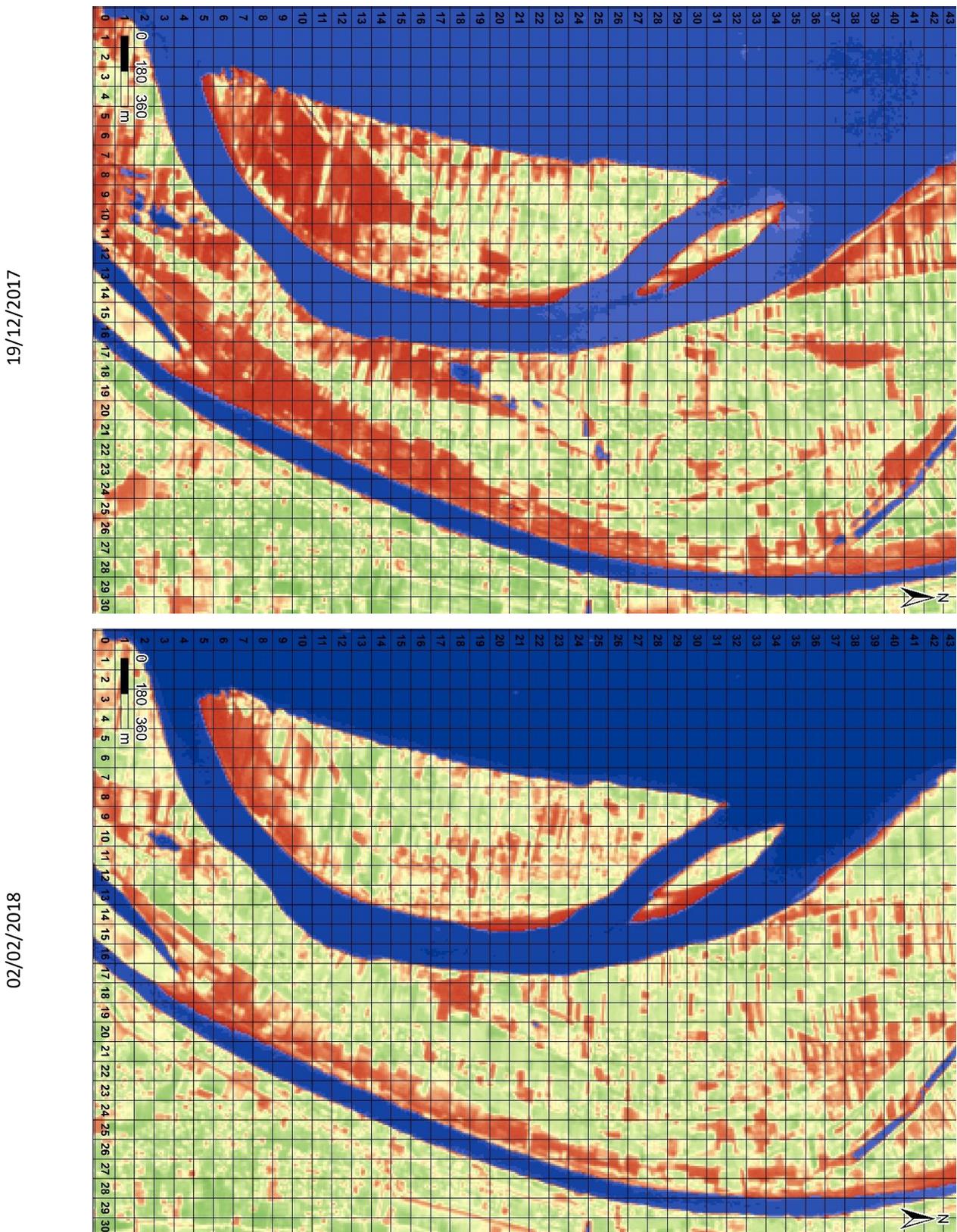
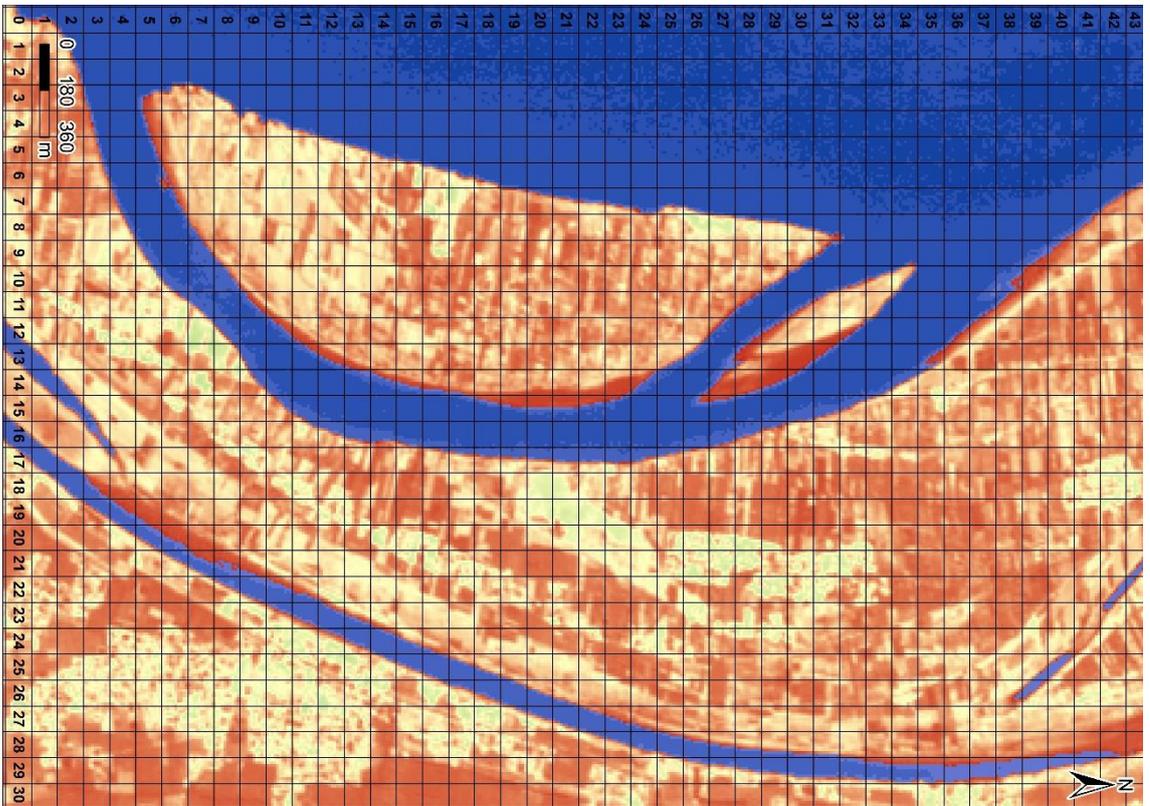
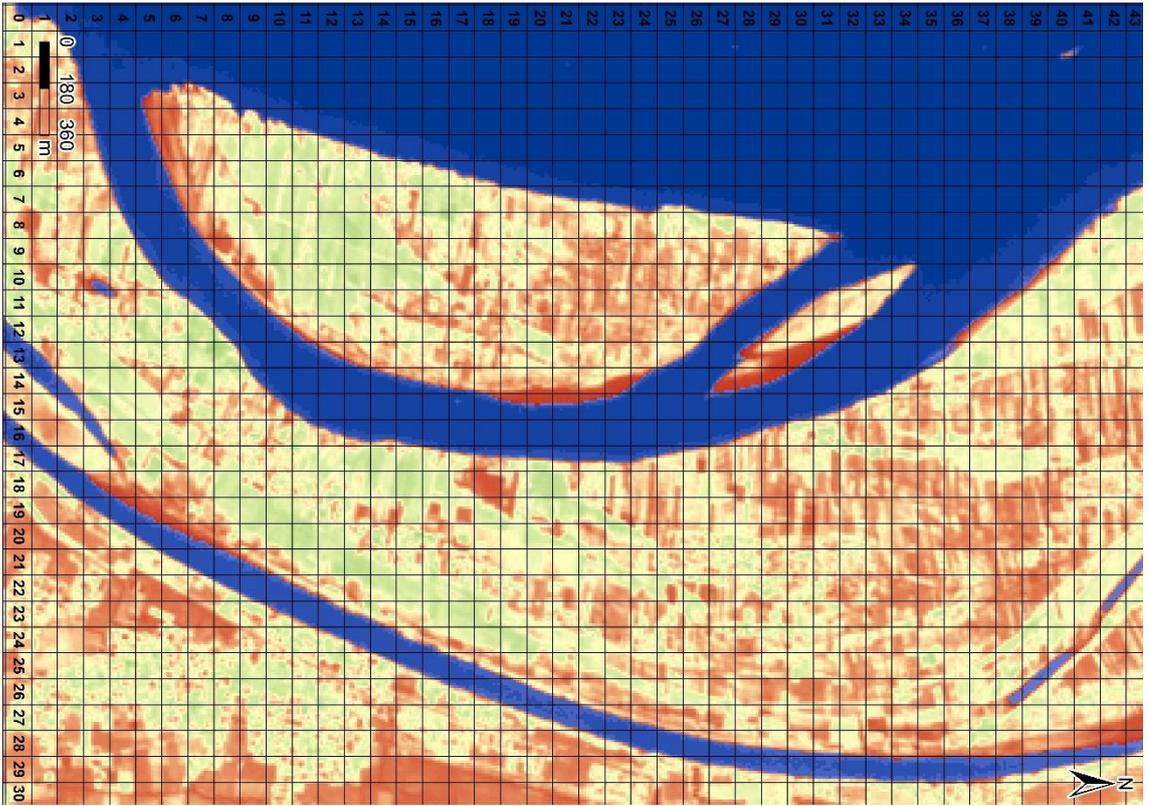


Figure 97 – Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°1

Annexe 6.2 : Phénologie et occupation des terres novembre 2017 à avril 2018 à partir des indices NDVI et NDWI (site 2)





23/04/2018

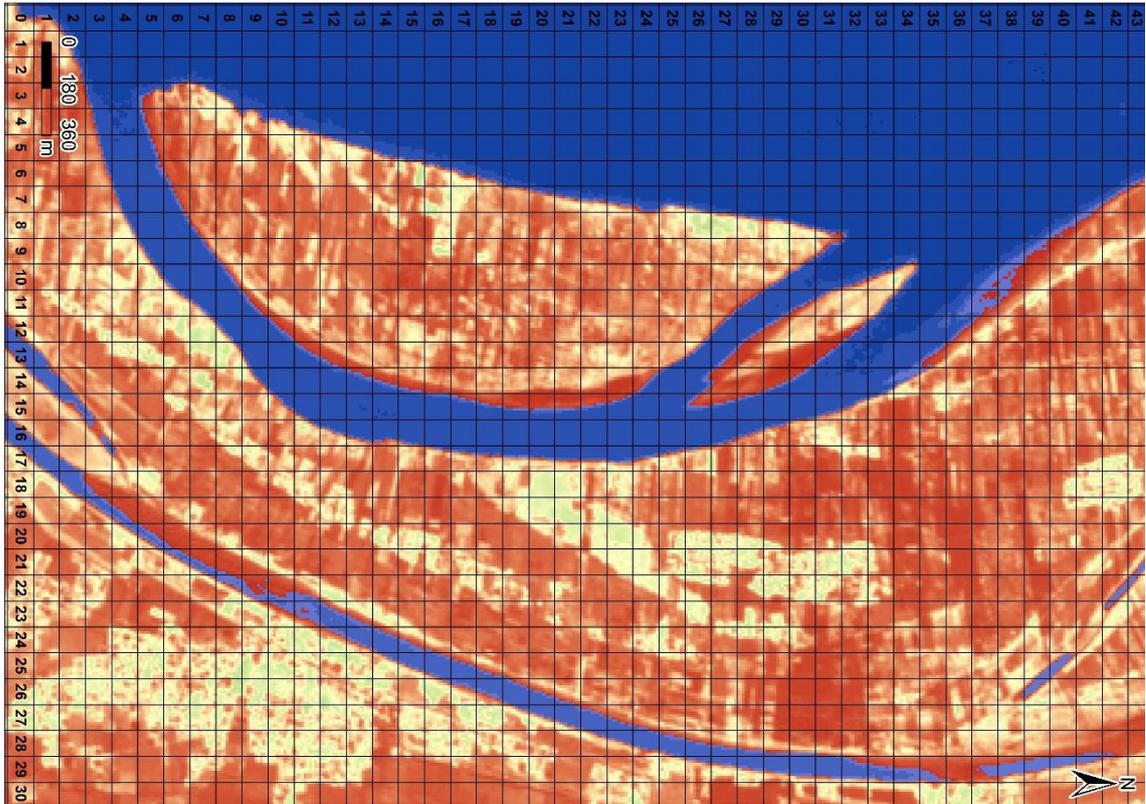
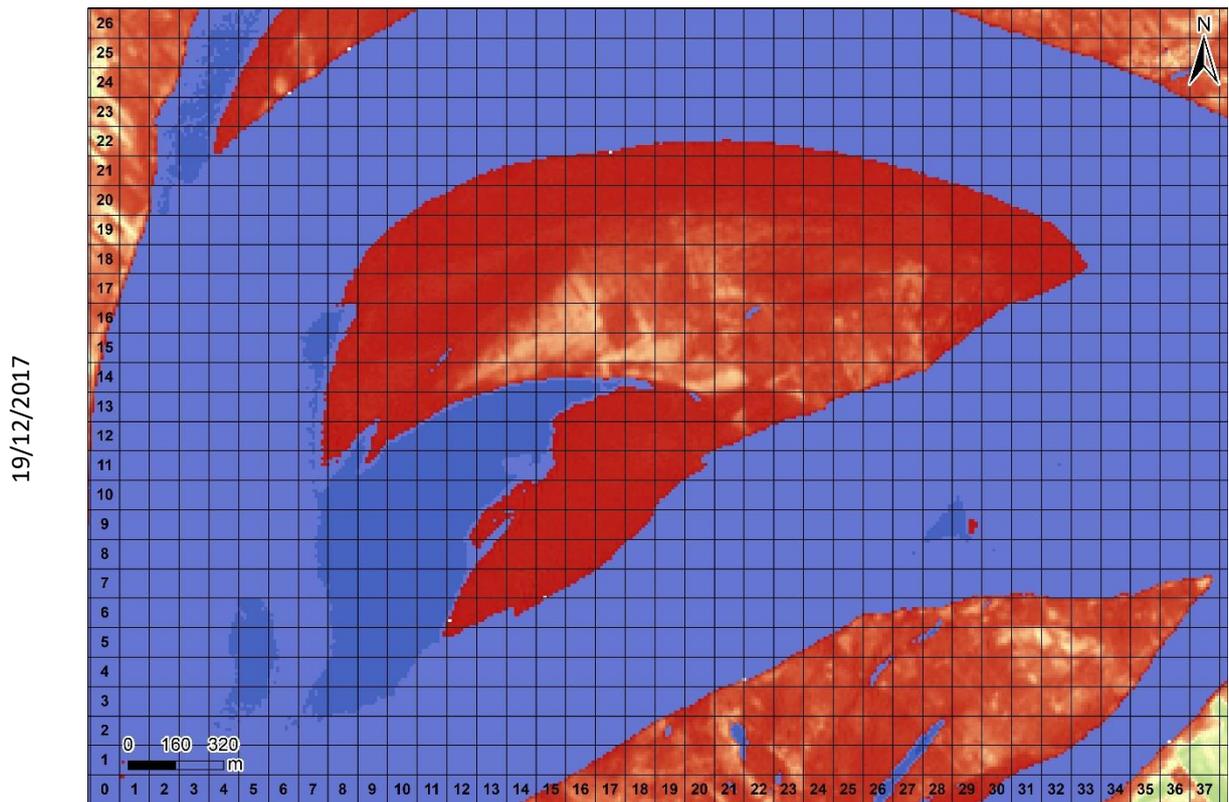
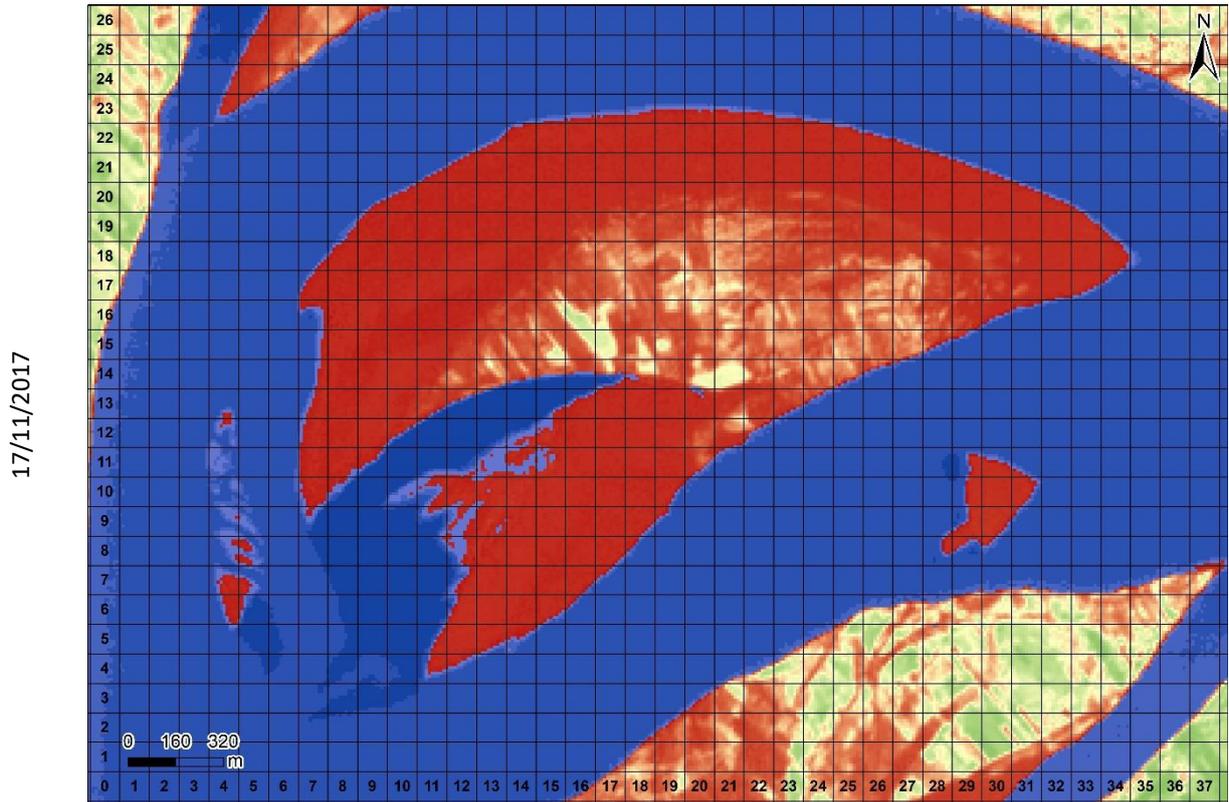
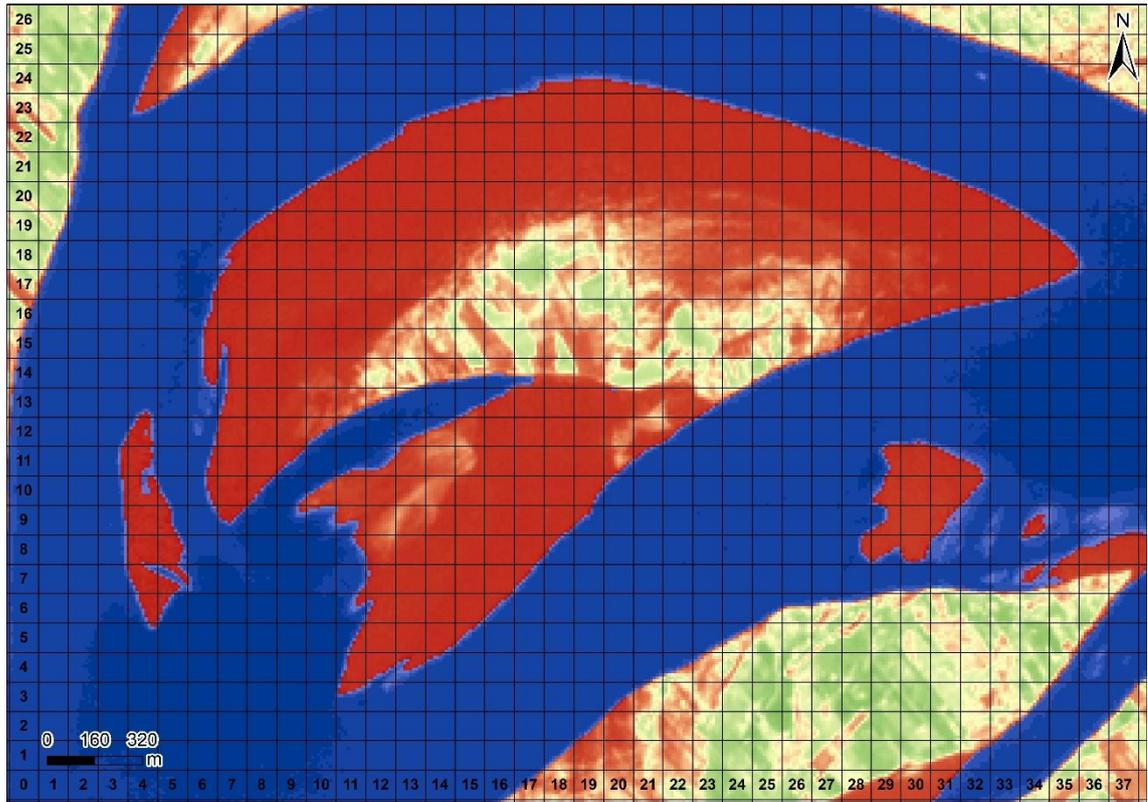


Figure 98 - Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°2

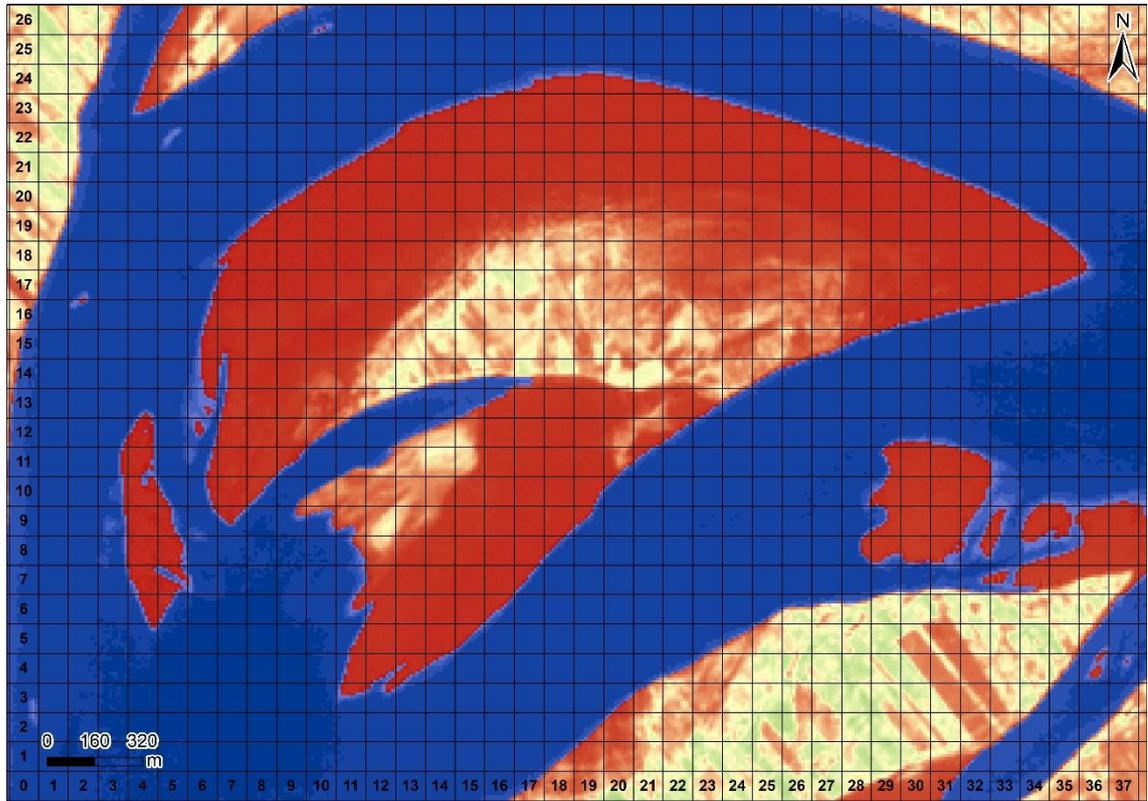
Annexe 6.3 : Phénologie et occupation des terres novembre 2017 à avril 2018 à partir des indices NDVI et NDWI (site 3)



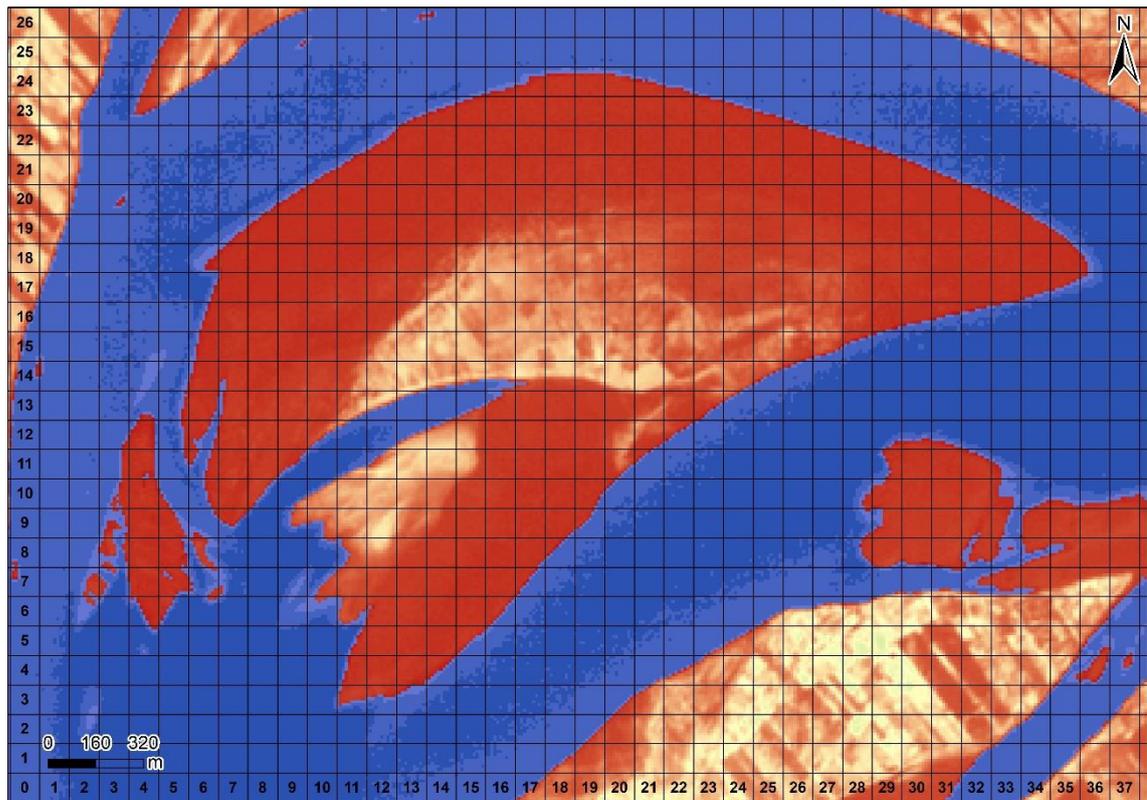
02/02/2018



04/03/2018



29/03/2018



23/04/2018

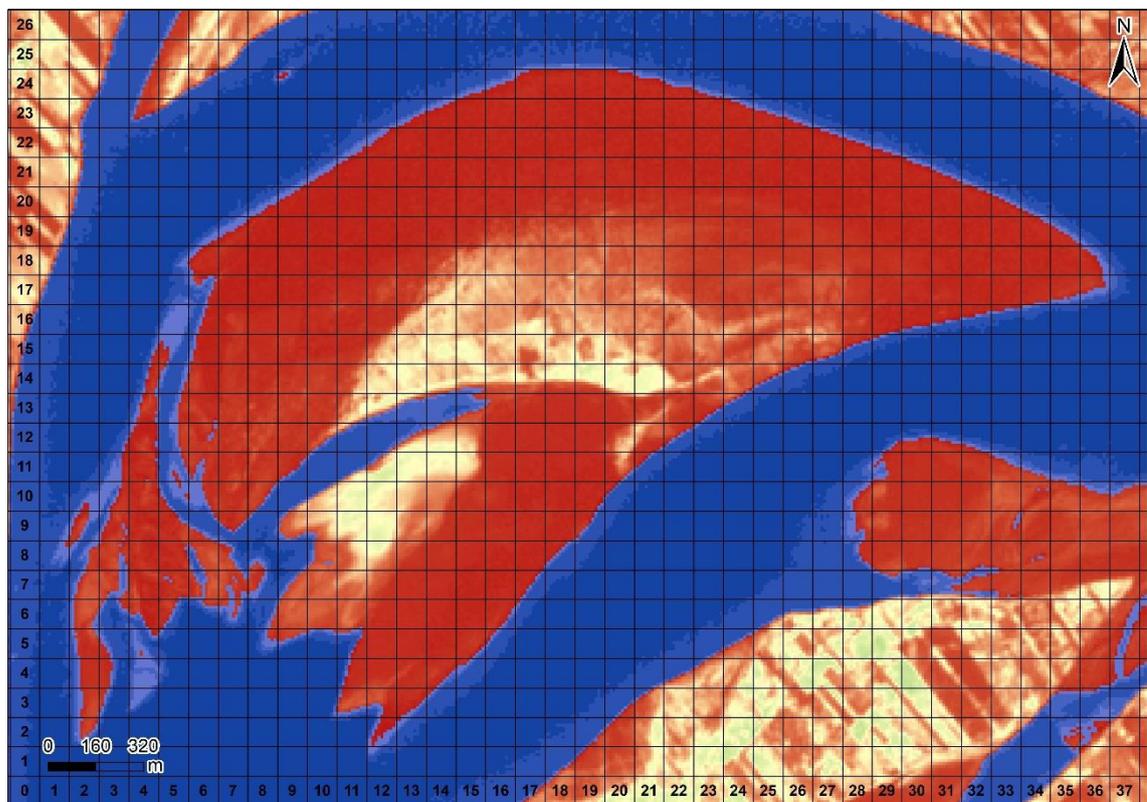
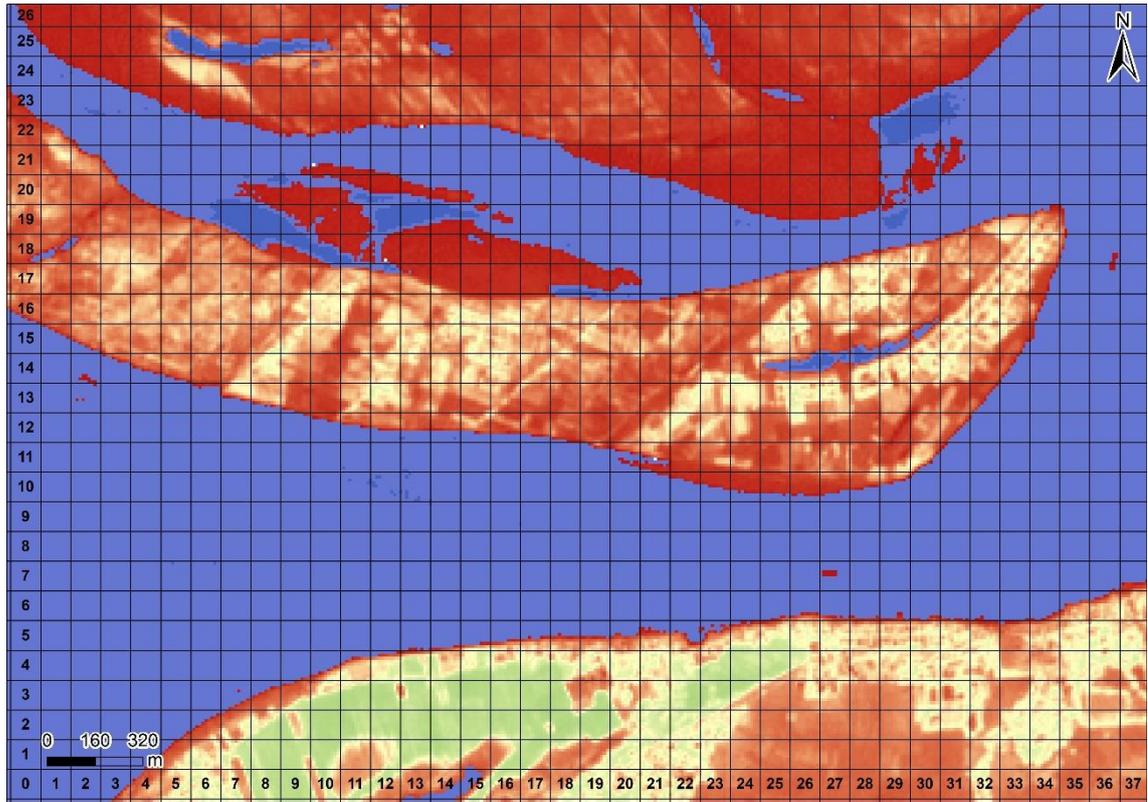
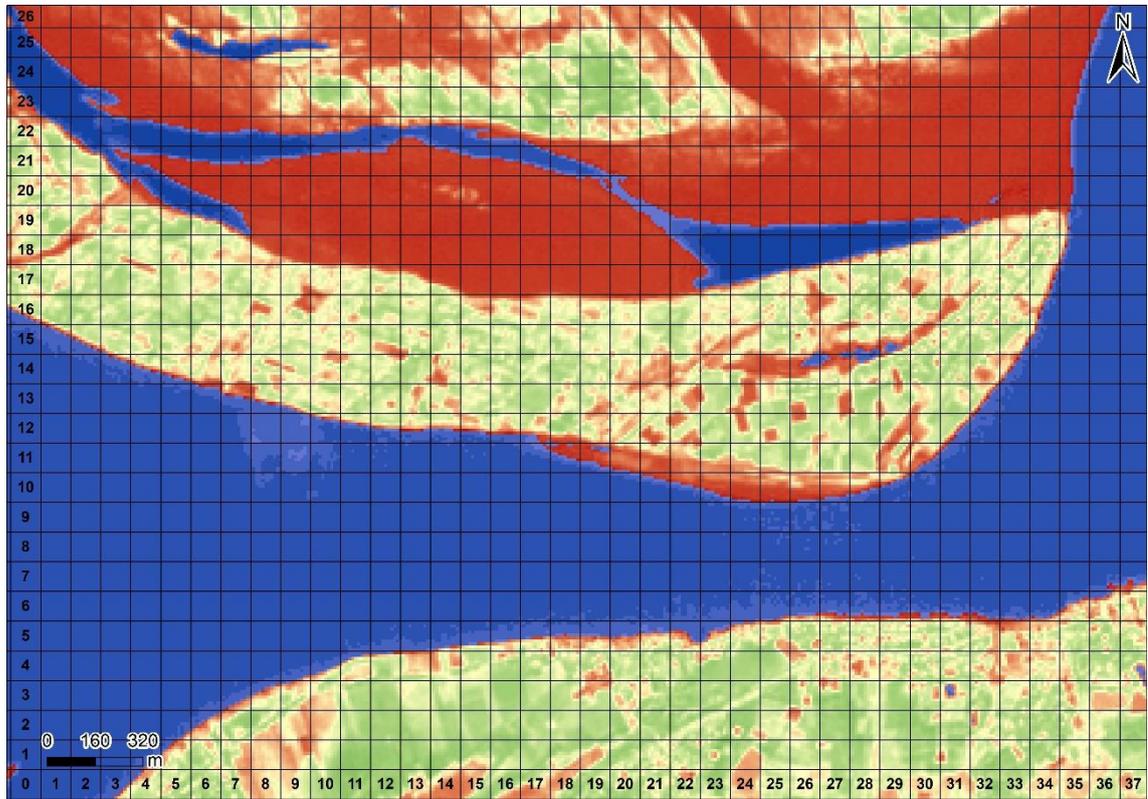


Figure 99 - Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°3, île de sable

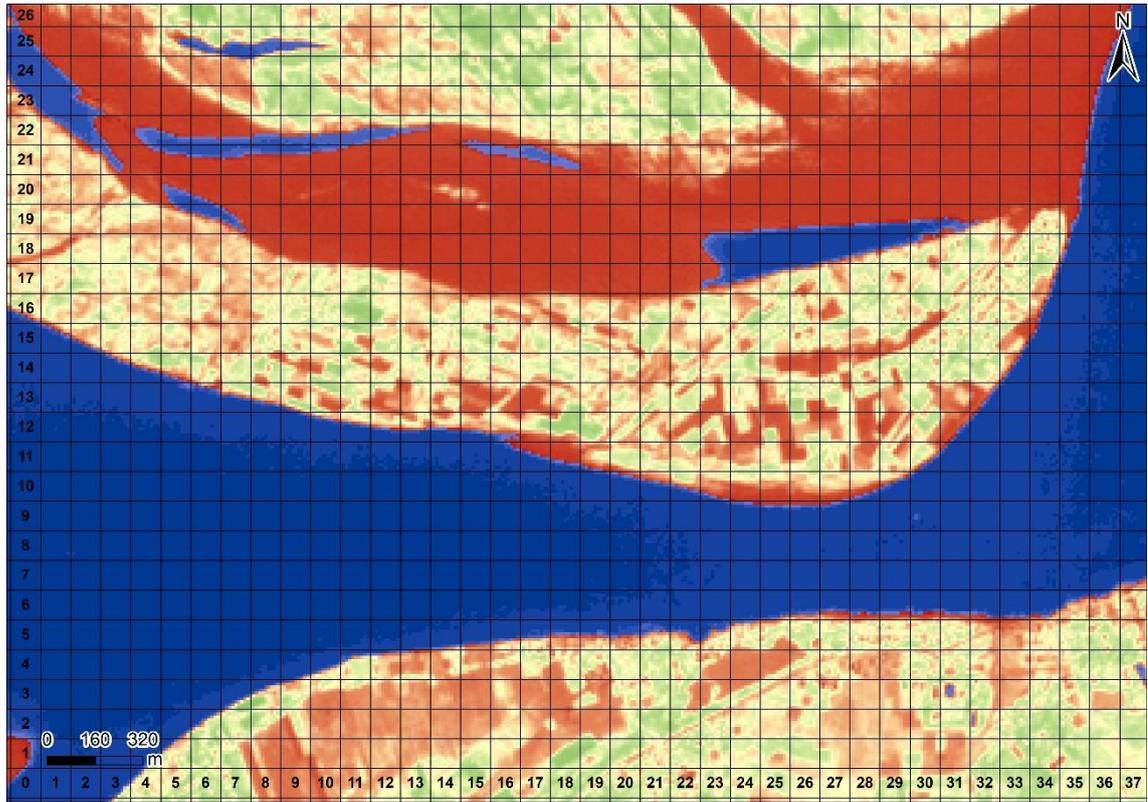
17/11/2017



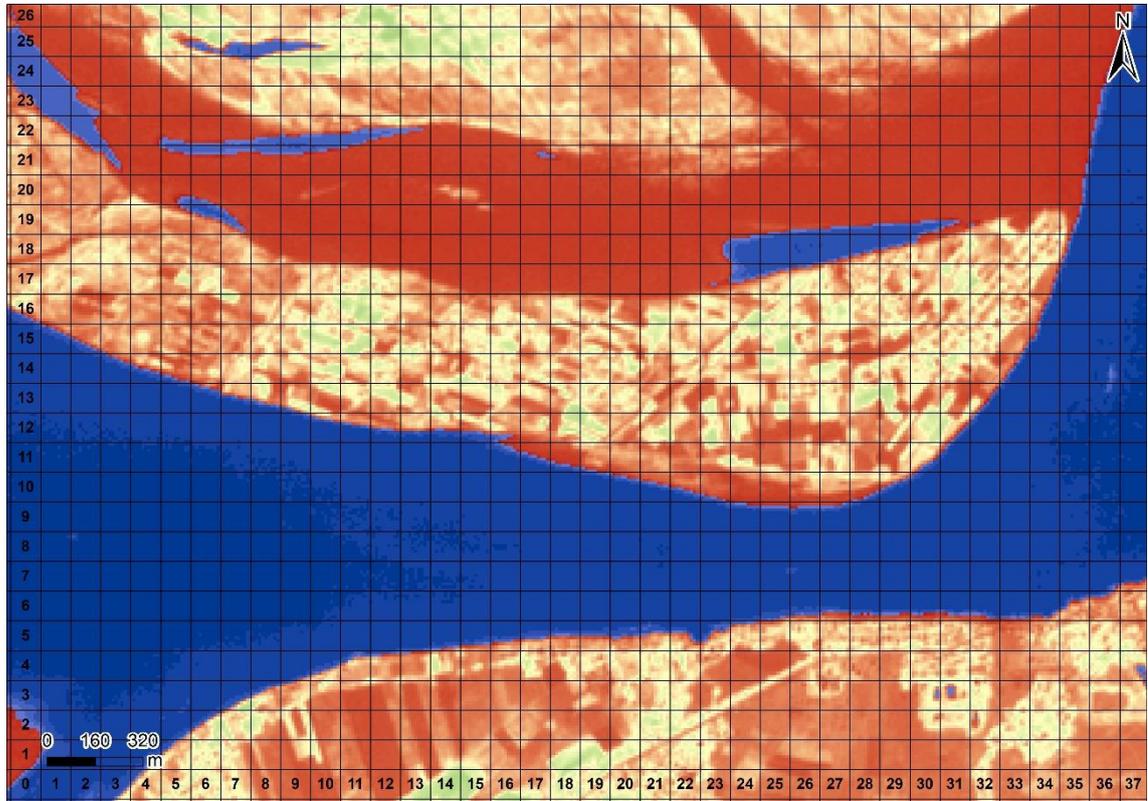
19/12/2017



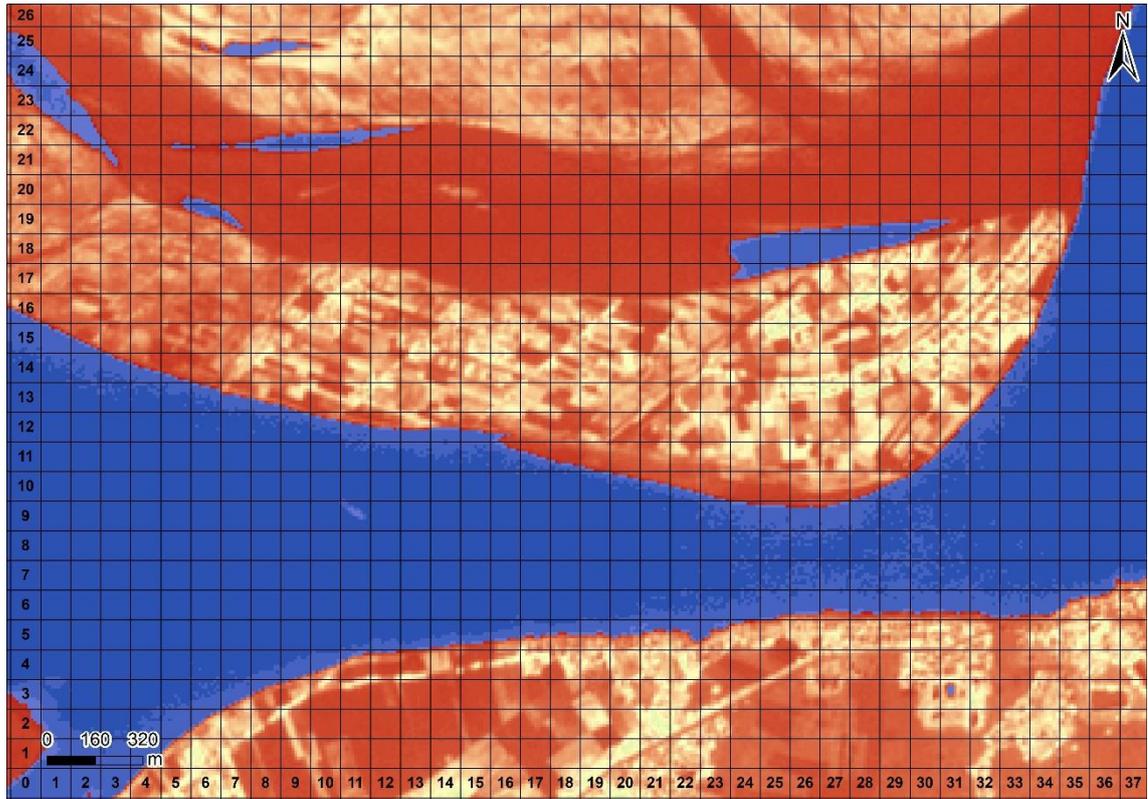
02/02/2018



04/03/2018



29/03/2018



23/04/2018

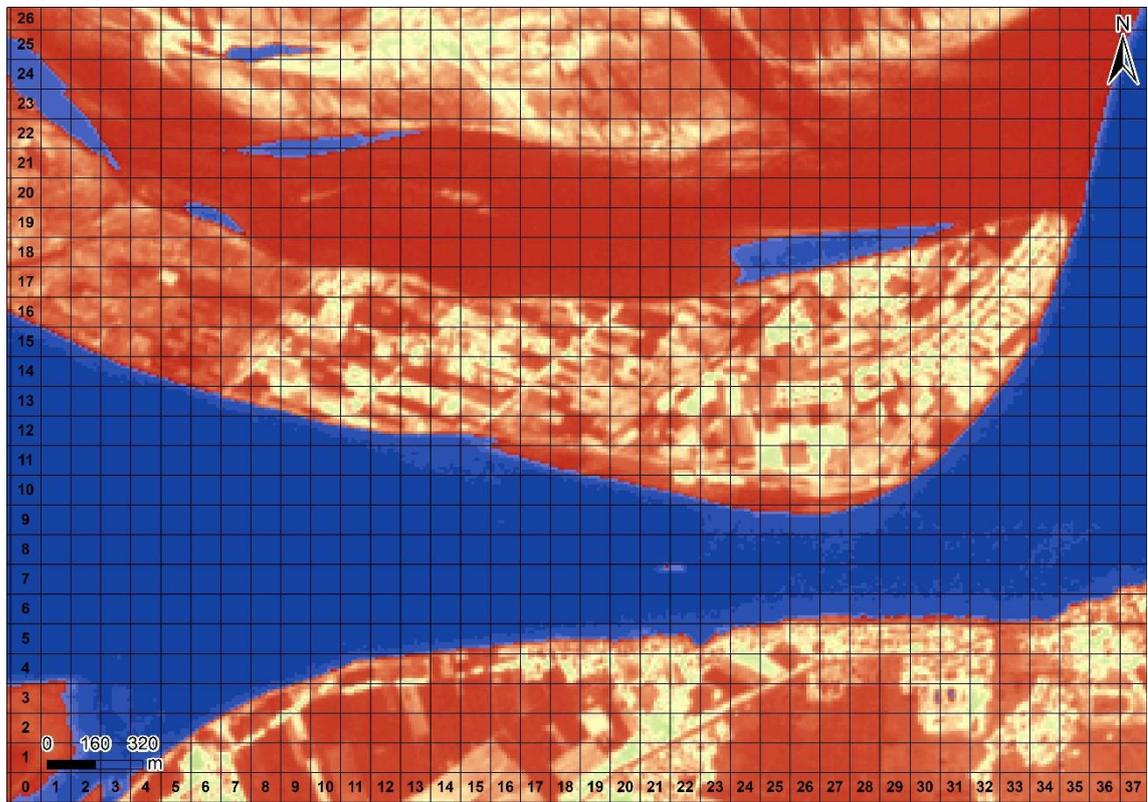


Figure 100 - Indice NDVI et NDWI, 2017-2018 sur le site n°3 Yae Paw taung

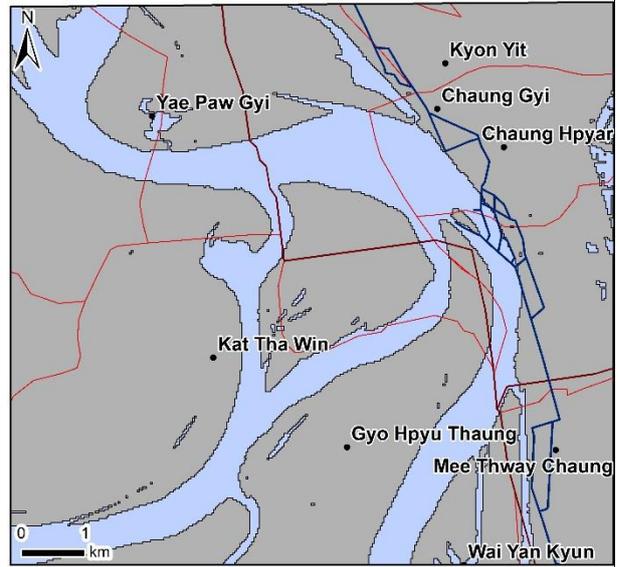
## Annexe 7.1 : Evolution chronologique 1955-2018 Secteur n°1 Pyi Taw Tar



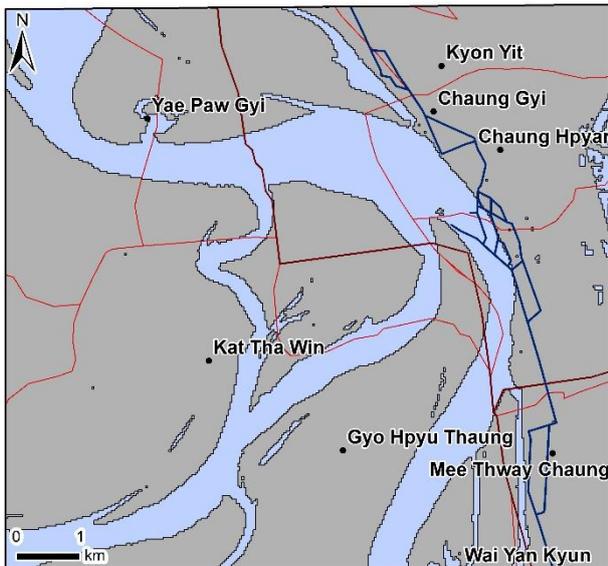
Figure 101 – Evolution chronologique 1955-2018 du secteur n°1 (Sources : MIMU)



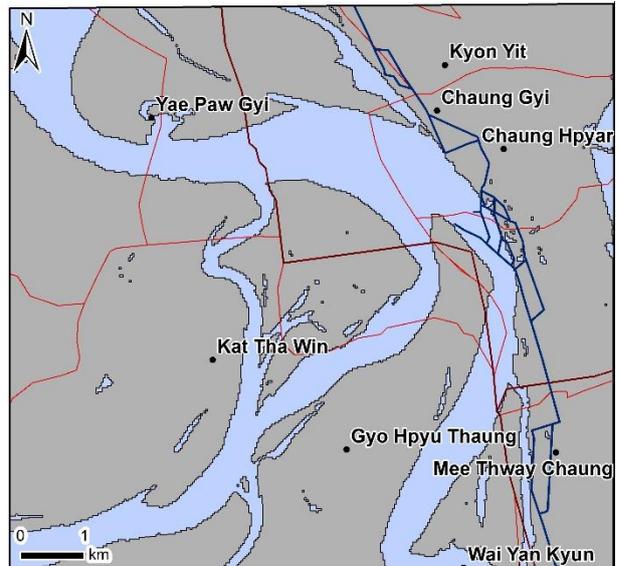
2018 (Sentinel 2)



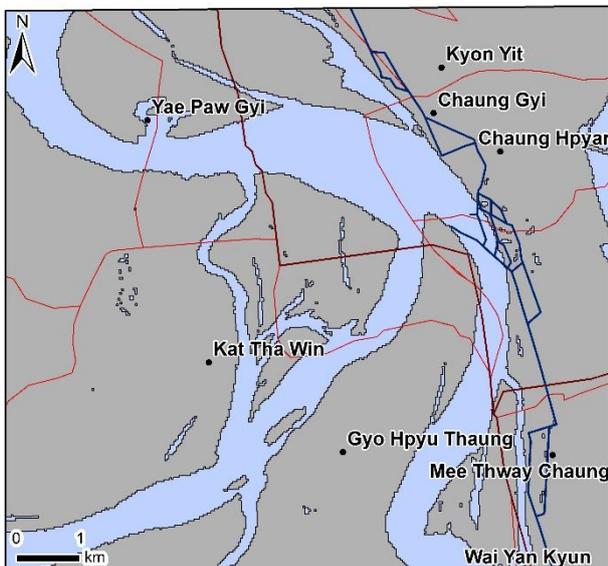
2018 (Landsat 8)



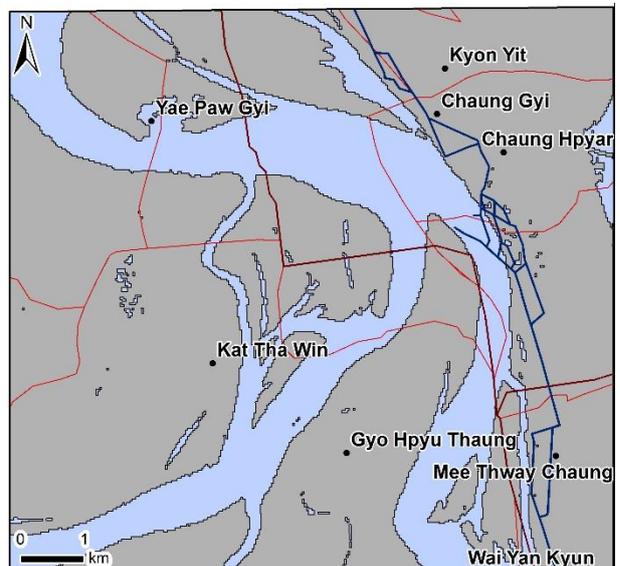
2017 (Landsat 8)



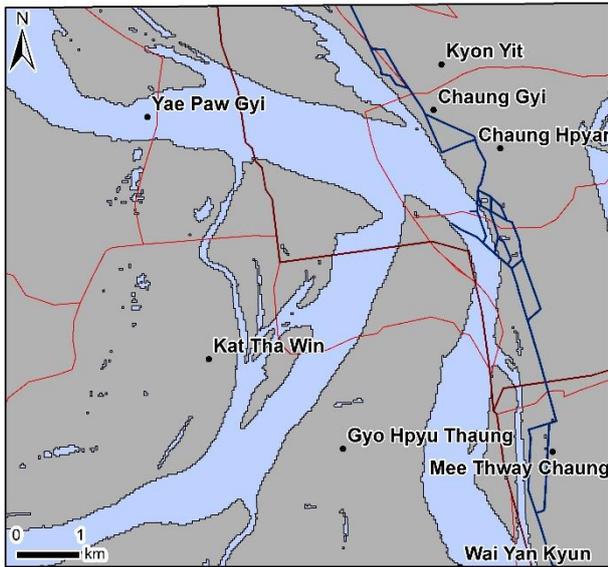
2016 (Landsat 8)



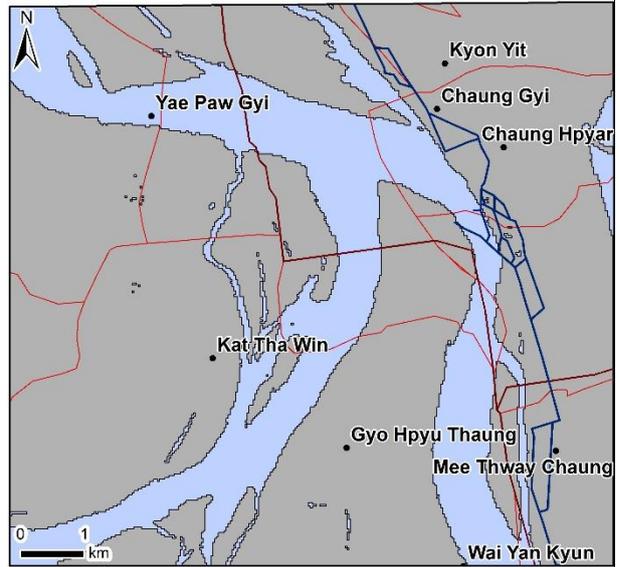
2015 (Landsat 8)



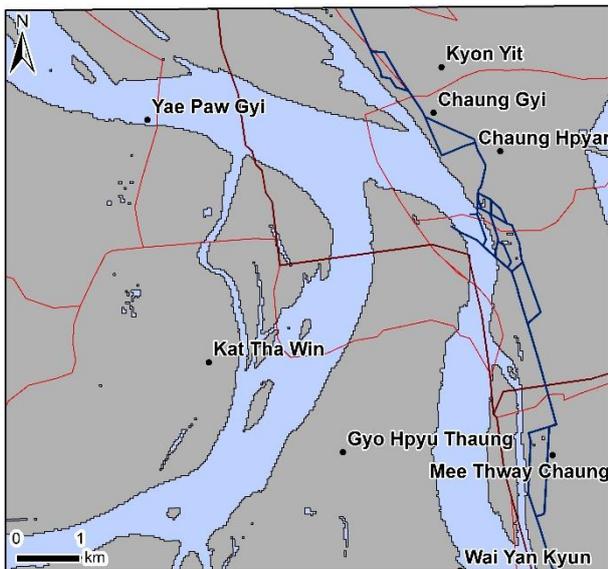
2014 (Landsat 8)



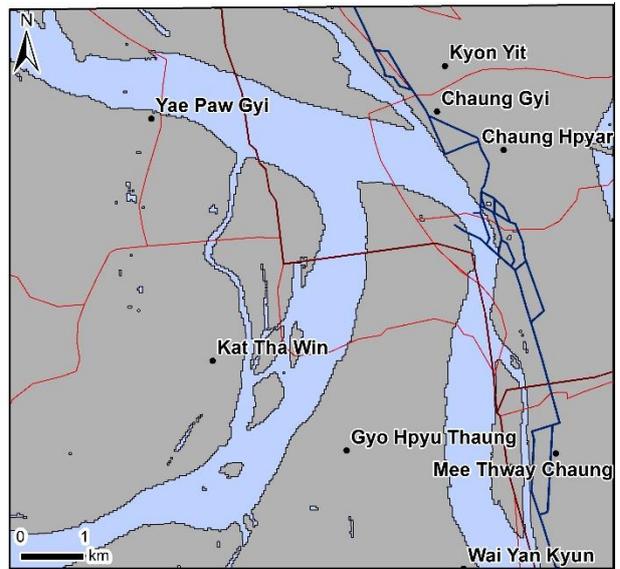
2011 (Landsat 4-5)



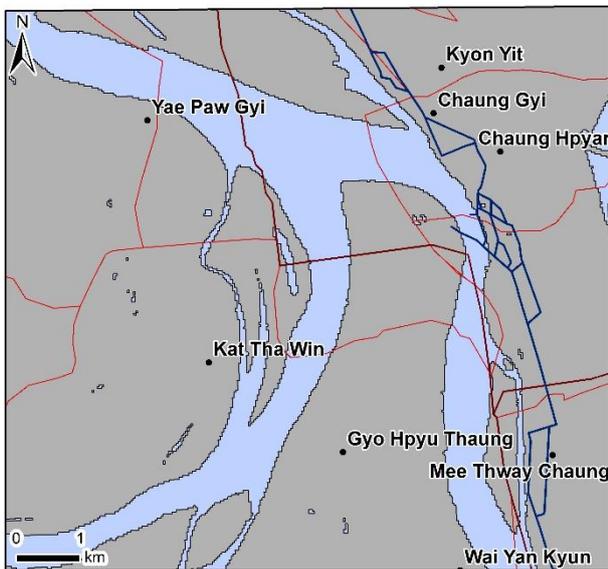
2010 (Landsat 4-5)



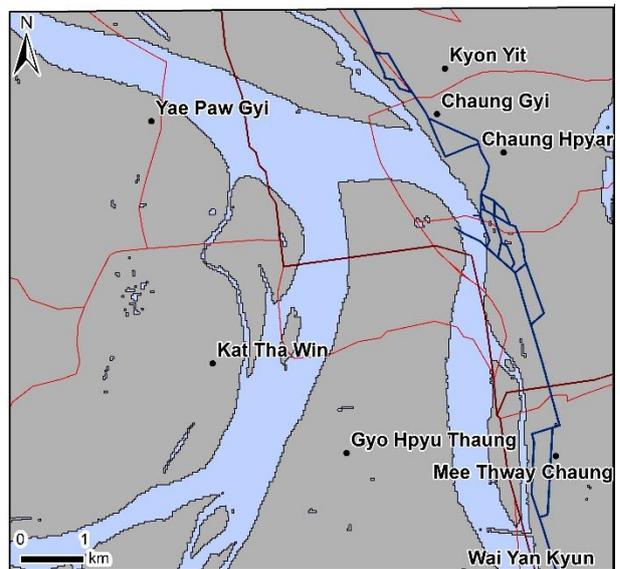
2009 (Landsat 4-5)



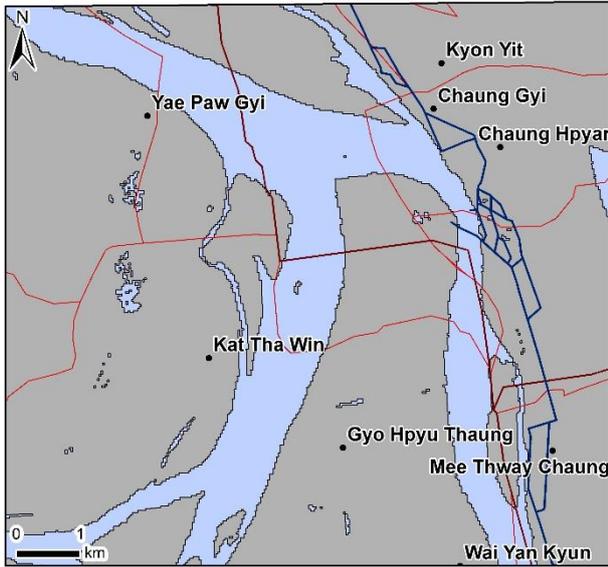
2008 (Landsat 4-5)



2007 (Landsat 4-5)



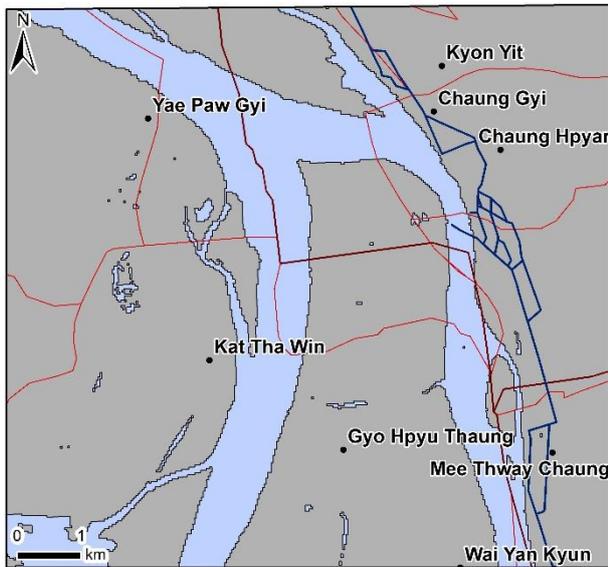
2006 (Landsat 4-5)



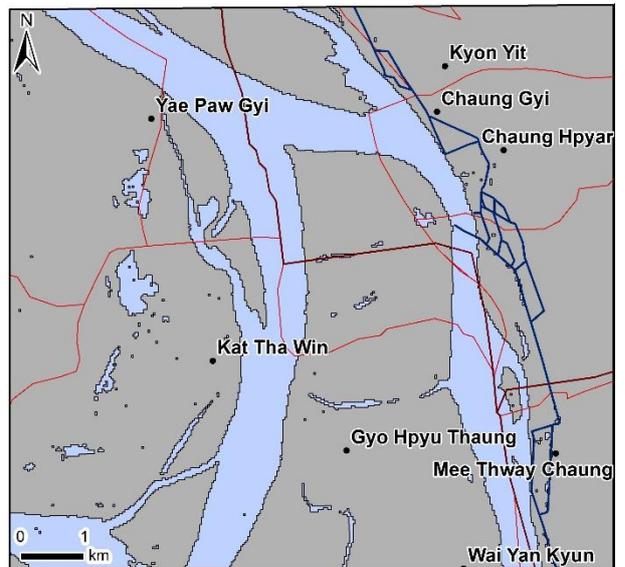
2005 (Landsat 4-5)



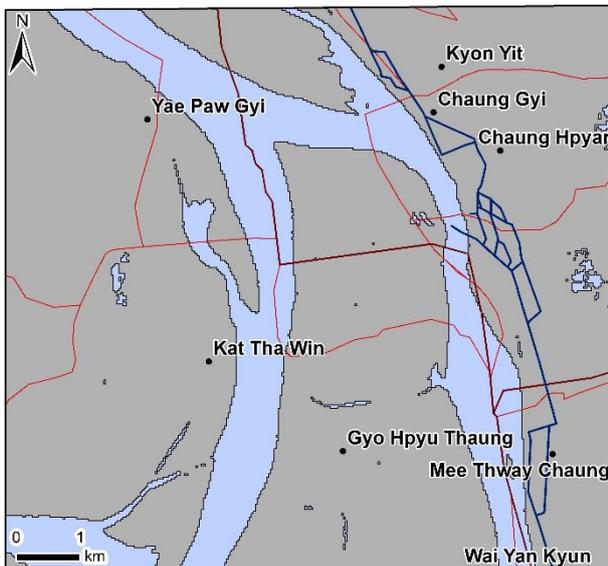
2004 (Landsat 4-5)



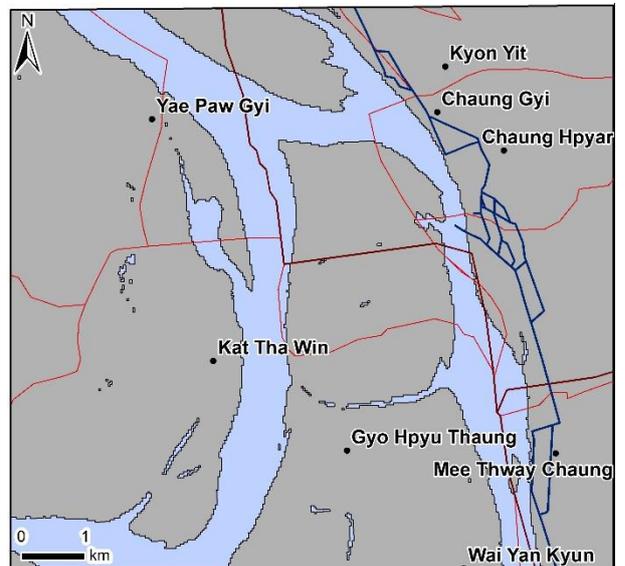
2003 (Landsat 7)



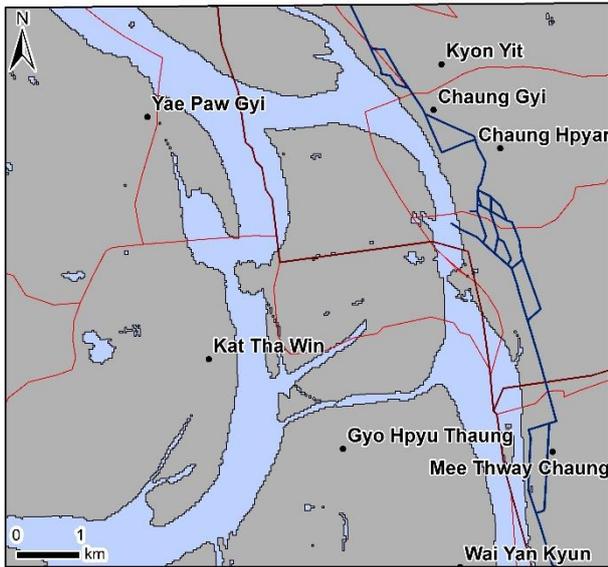
2002 (Landsat 7)



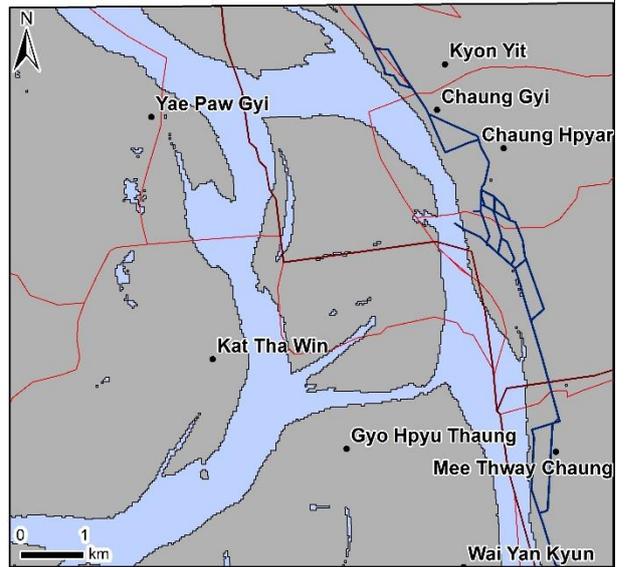
2001 (Landsat 7)



2000 (Landsat 4-5)



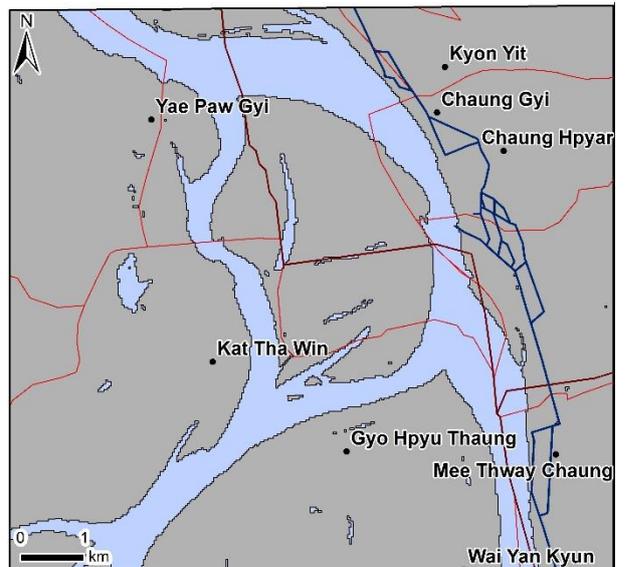
1999 (Landsat 4-5)



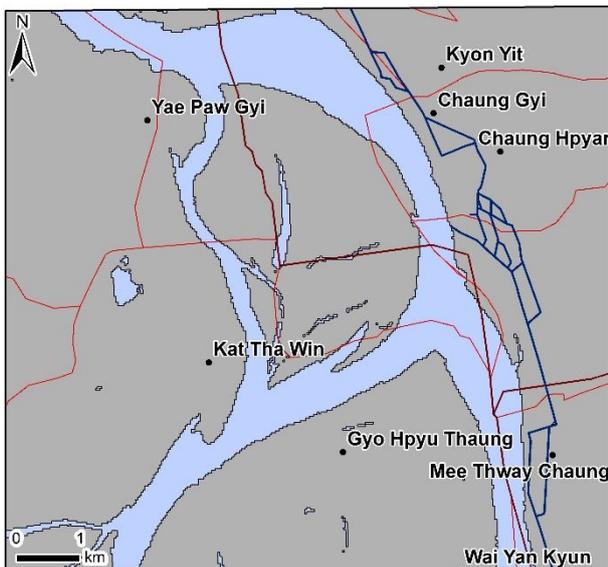
1998 (Landsat 4-5)



1997 (Landsat 4-5)



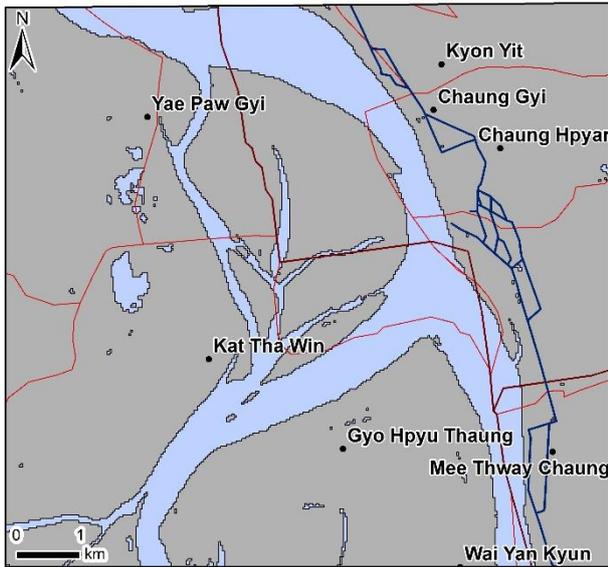
1996 (Landsat 4-5)



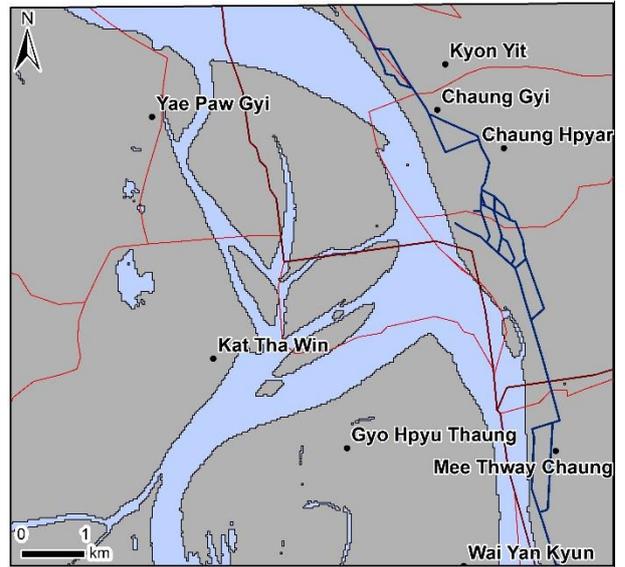
1995 (Landsat 4-5)



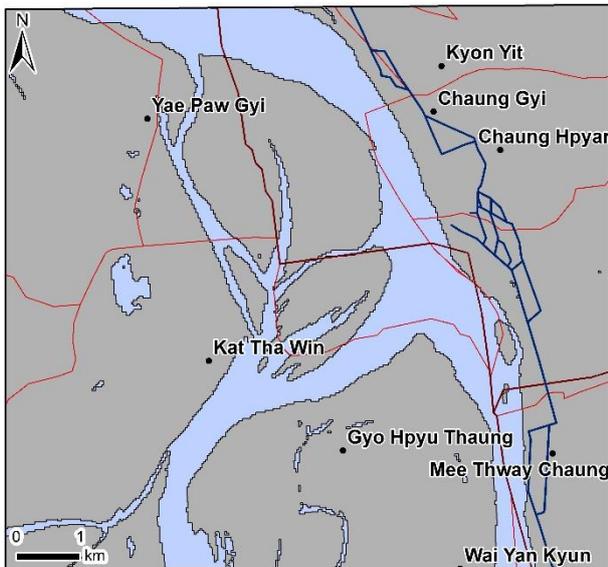
1994 (Landsat 4-5)



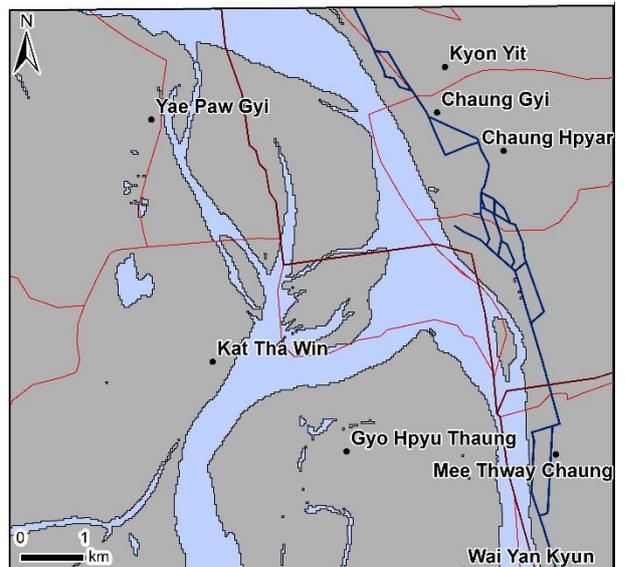
1993 (Landsat 4-5)



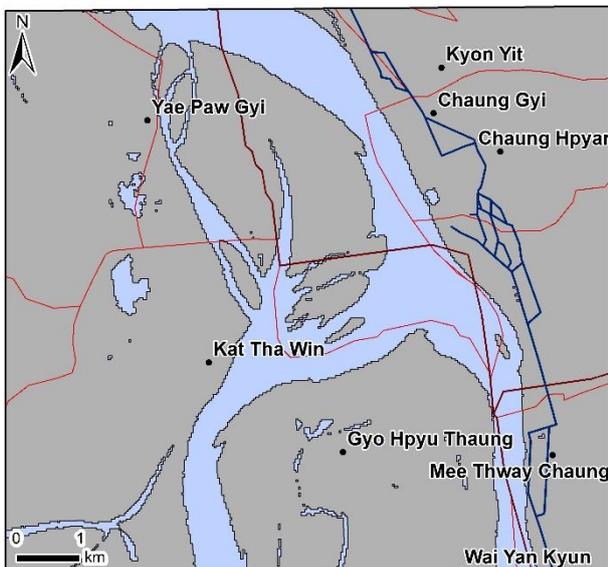
1992 (Landsat 4-5)



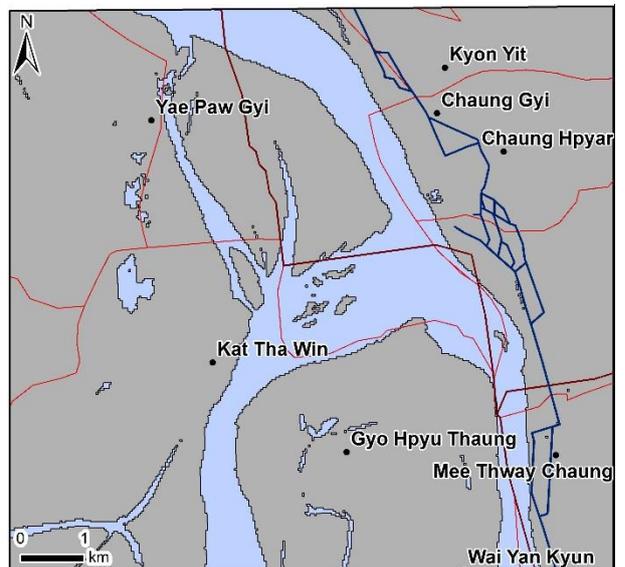
1991 (Landsat 4-5)



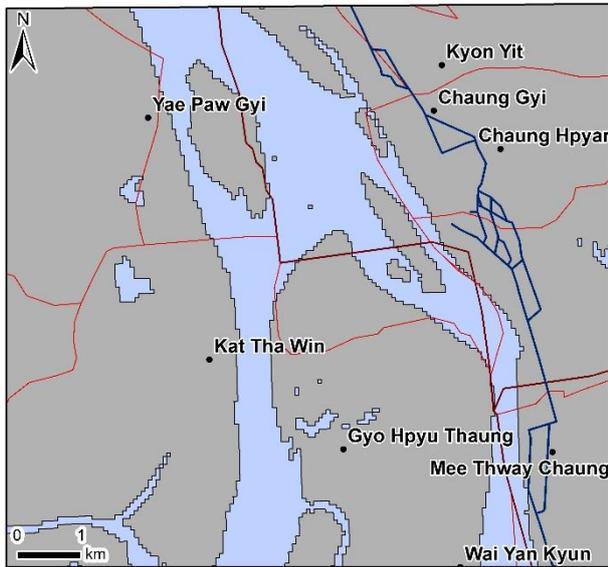
1990 (Landsat 4-5)



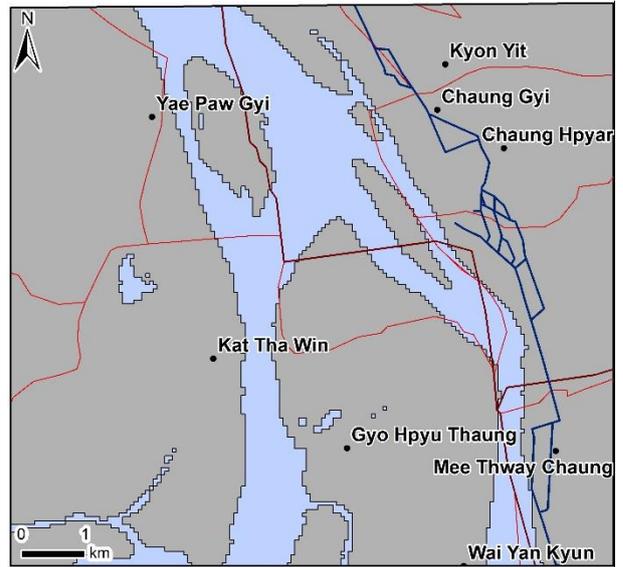
1989 (Landsat 4-5)



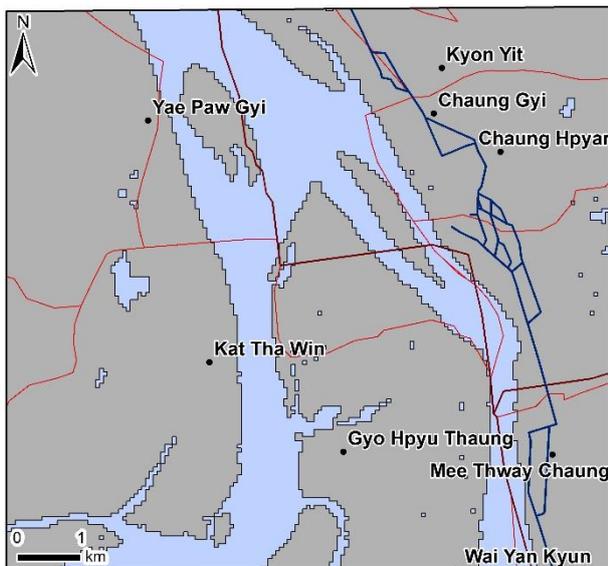
1988 (Landsat 4-5)



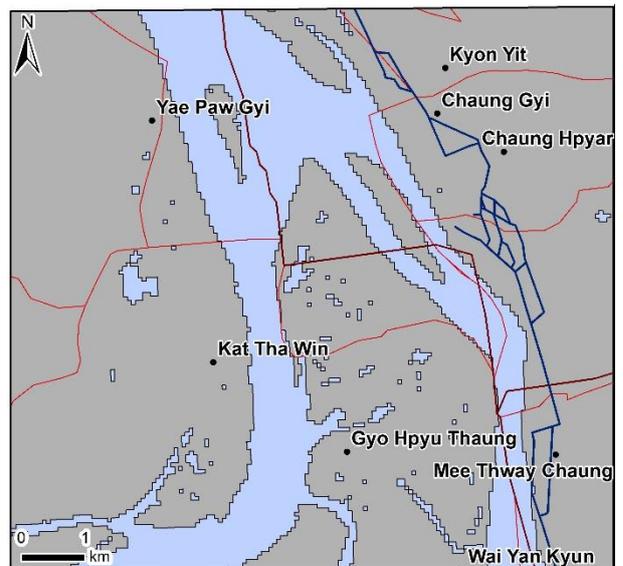
1976 (Landsat 1-5)



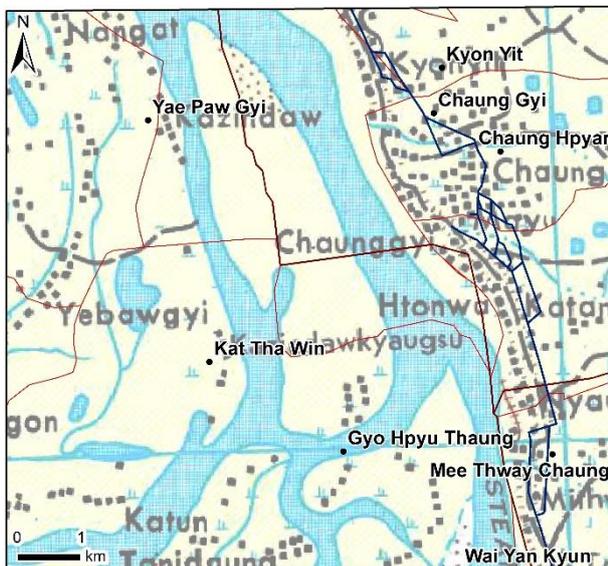
1975 (Landsat 1-5)



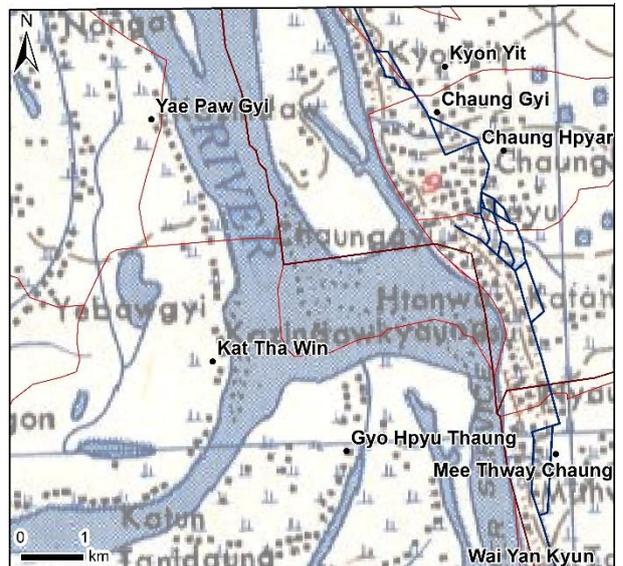
1974 (Landsat 1-5)



1973 (Landsat 1-5)



1967 (Carte topographique)



1955 (Carte topographique)

Annexe 7.2 : Evolution chronologique 1955-2018 Secteur n°2 Shwe Gin  
Dar Kyun / Tha byu Ye Le Kyu



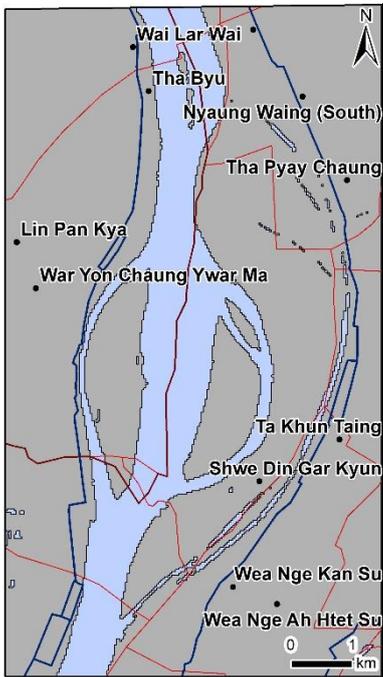
Figure 102 - Evolution chronologique  
1955-2018 du secteur n°2 (Sources :  
MIMU)



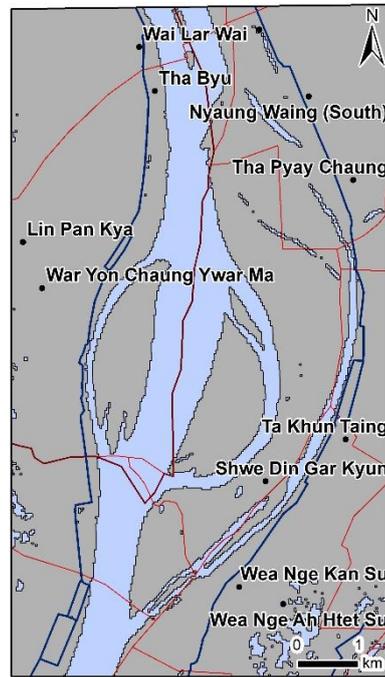
2018 (Sentinel 2)



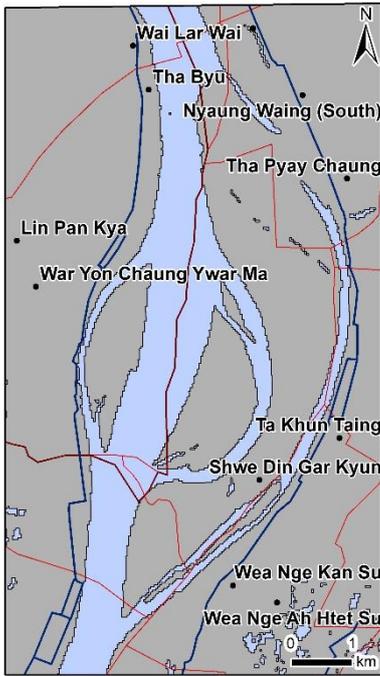
2018 (Landsat 8)



2017 (Landsat 8)



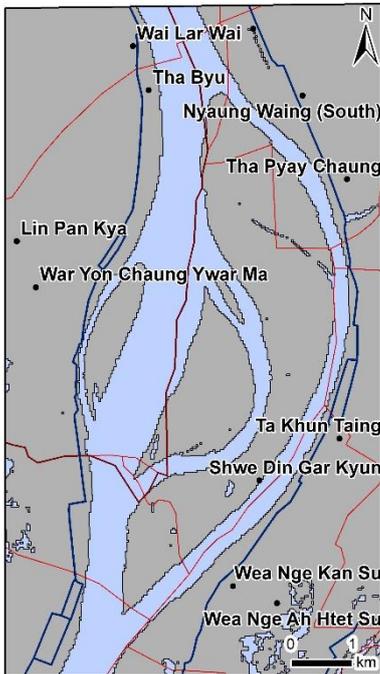
2016 (Landsat 8)



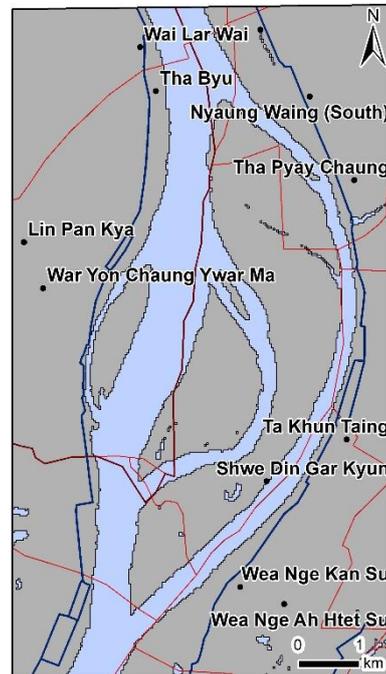
2015 (Landsat 8)



2014 (Landsat 8)



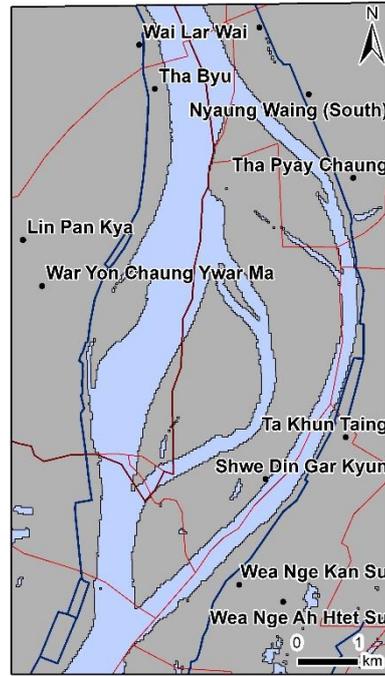
2011 (Landsat 4-5)



2010 (Landsat 4-5)



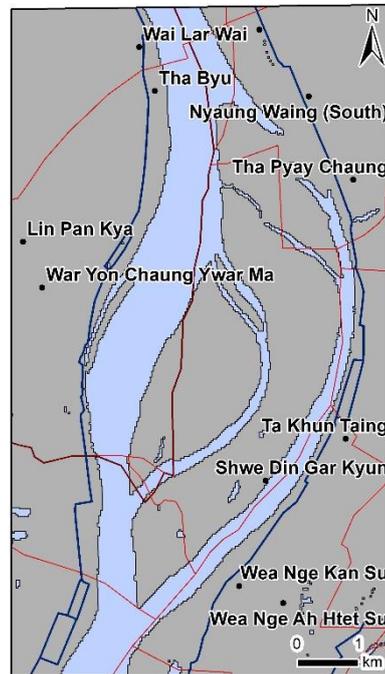
2009 (Landsat 4-5)



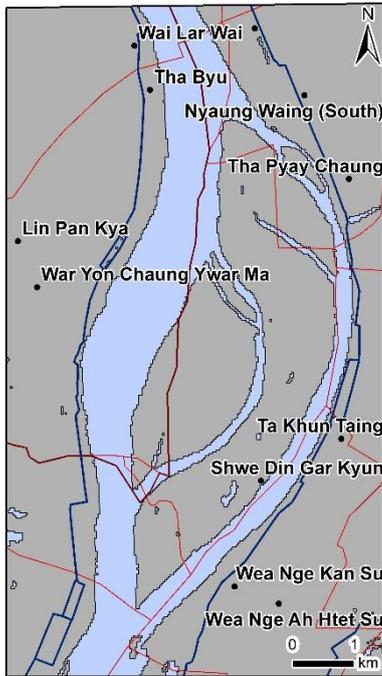
2008 (Landsat 4-5)



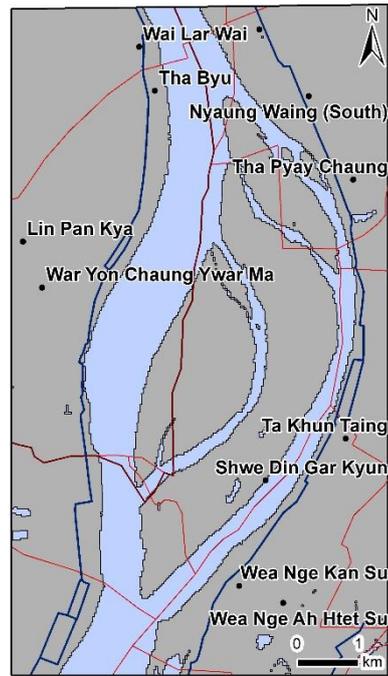
2007 (Landsat 4-5)



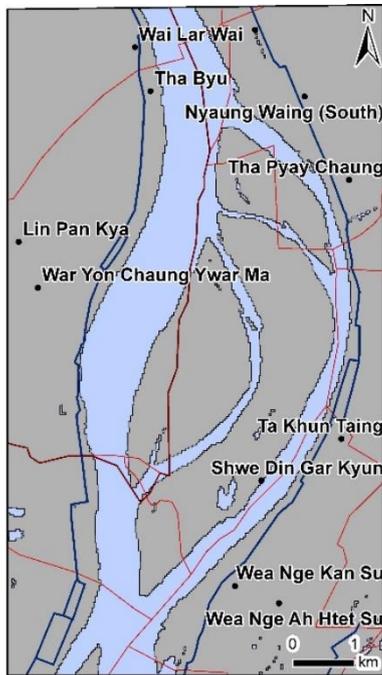
2006 (Landsat 4-5)



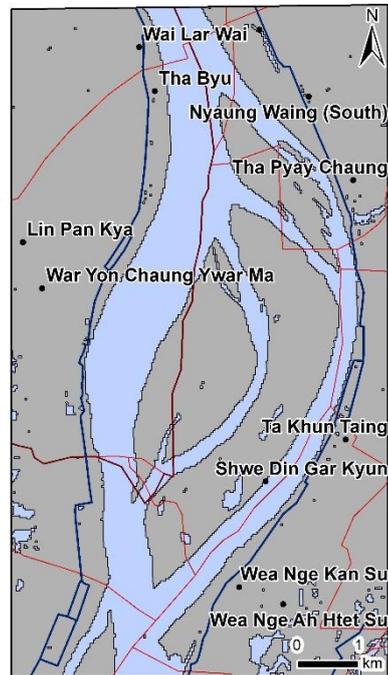
2005 (Landsat 4-5)



2004 (Landsat 4-5)



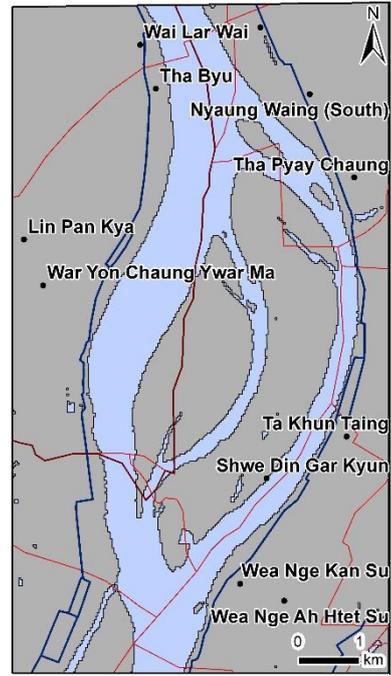
2003 (Landsat 7)



2002 (Landsat 7)



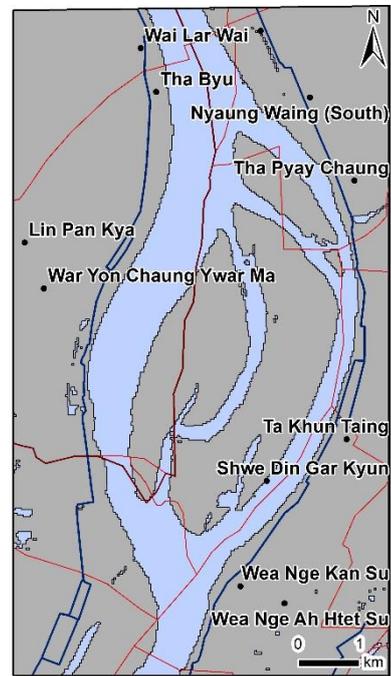
2001 (Landsat 7)



2000 (Landsat 4-5)



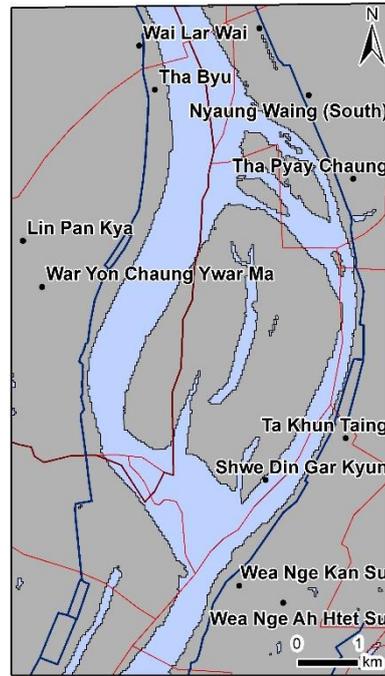
1999 (Landsat 4-5)



1998 (Landsat 4-5)



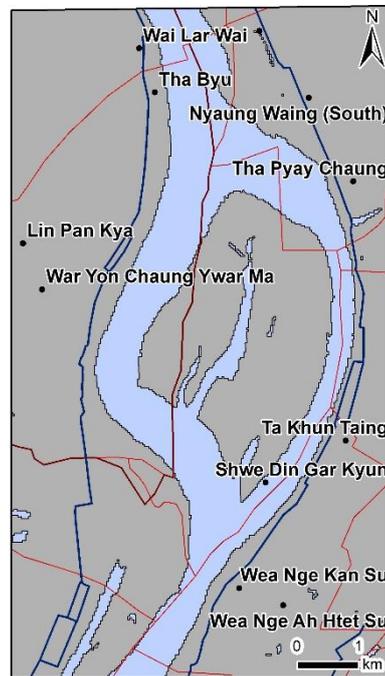
1997 (Landsat 4-5)



1996 (Landsat 4-5)



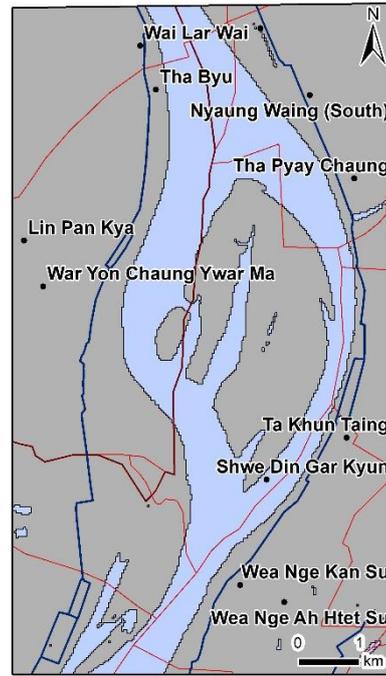
1995 (Landsat 4-5)



1994 (Landsat 4-5)



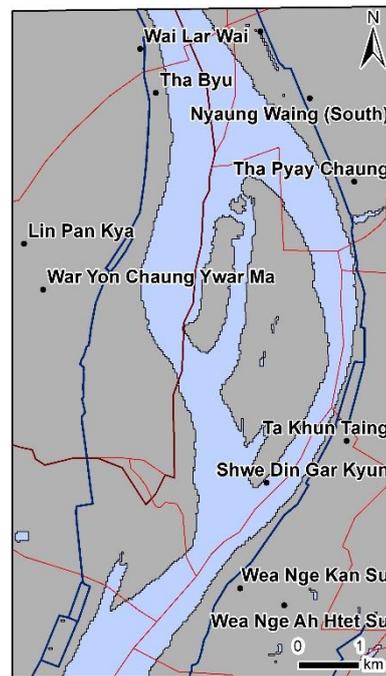
1993 (Landsat 4-5)



1992 (Landsat 4-5)



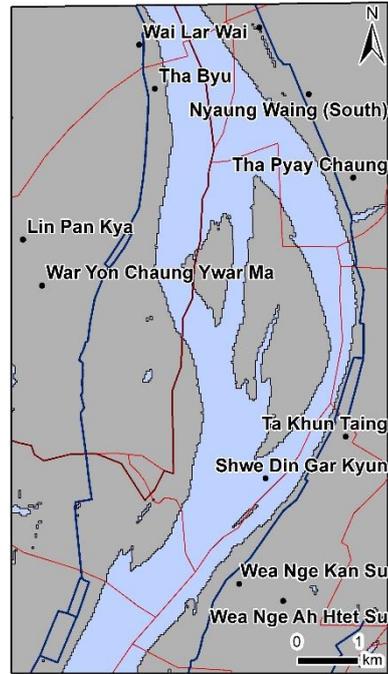
1991 (Landsat 4-5)



1990 (Landsat 4-5)



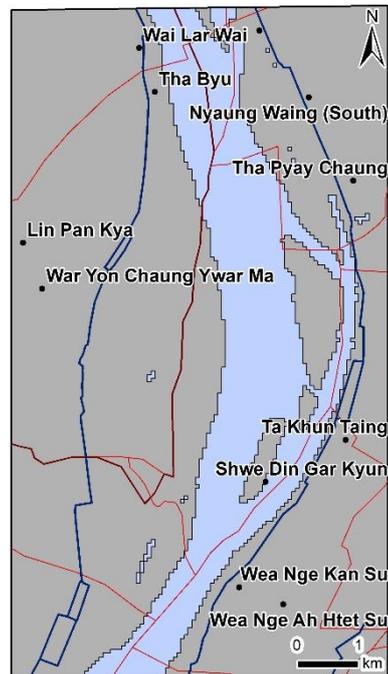
1989 (Landsat 4-5)



1988 (Landsat 4-5)



1976 (Landsat 1-5)



1975 (Landsat 1-5)



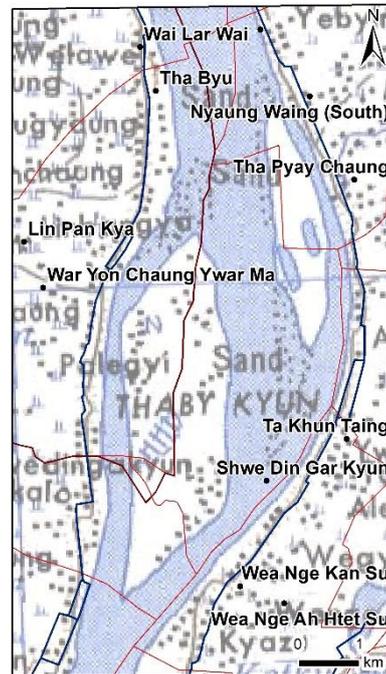
1974 (Landsat 1-5)



1973 (Landsat 1-5)



1967 (Carte topographique)



1955 (Carte topographique)

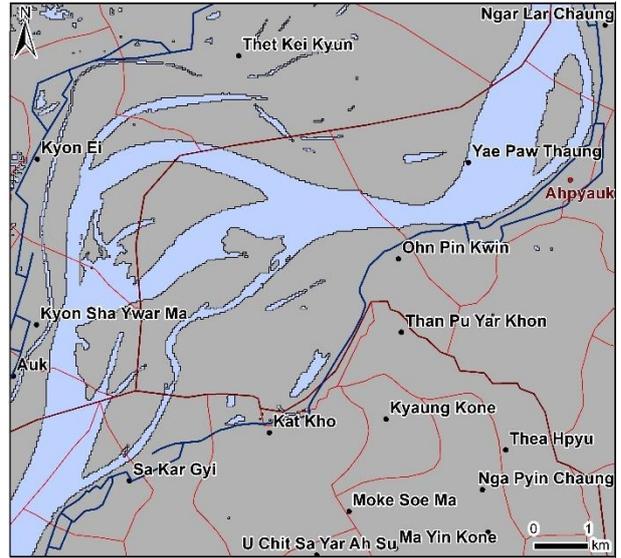
## Annexe 7.3 : Evolution chronologique 1955-2018 Secteur n°2 Yae Paw Taung / Té Myei



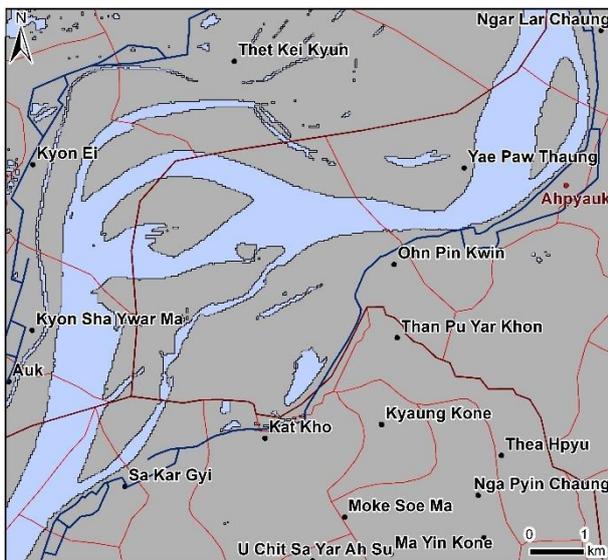
Figure 103 - Evolution chronologique 1955-2018 du secteur n°1 (Sources : MIMU)



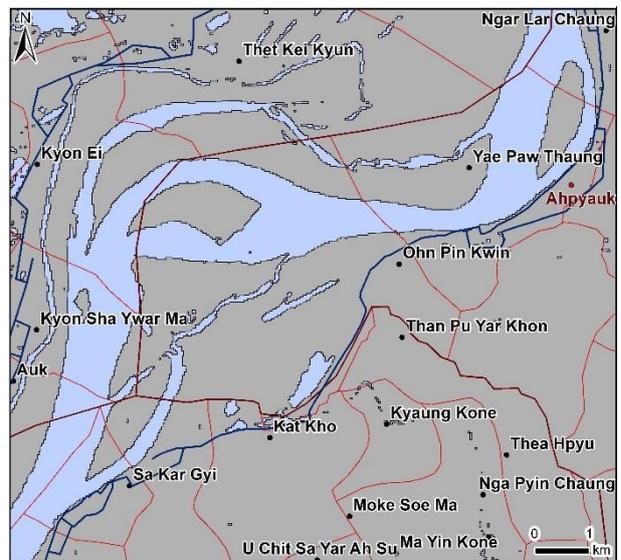
2018 (Sentinel 2)



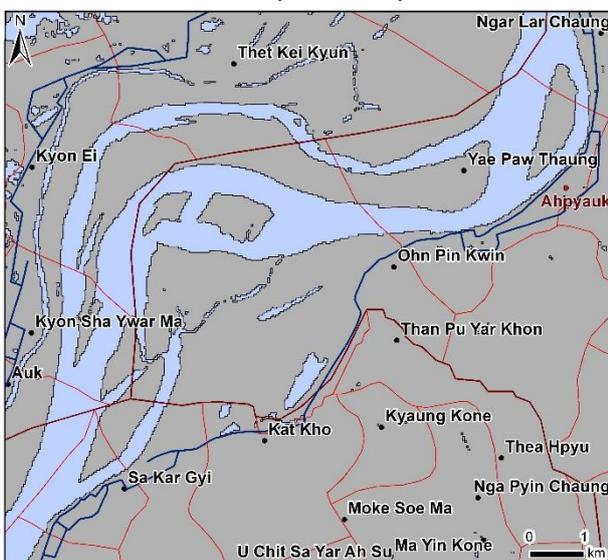
2018 (Landsat 8)



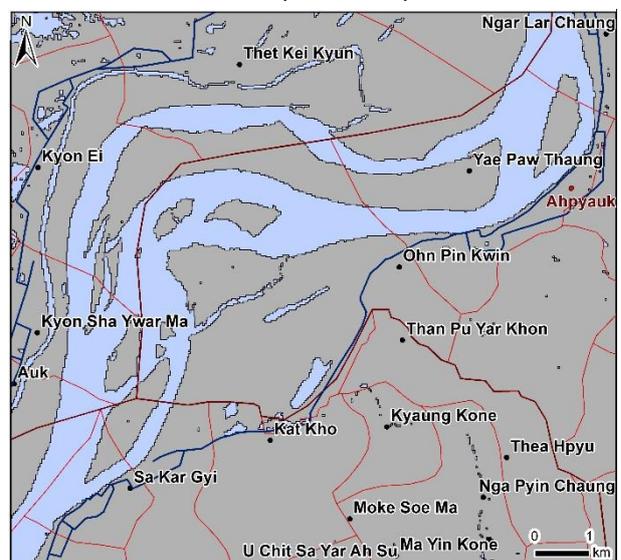
2017 (Landsat 8)



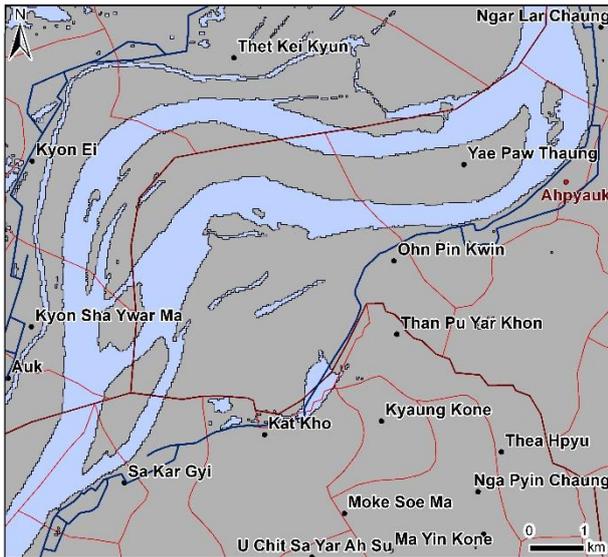
2016 (Landsat 8)



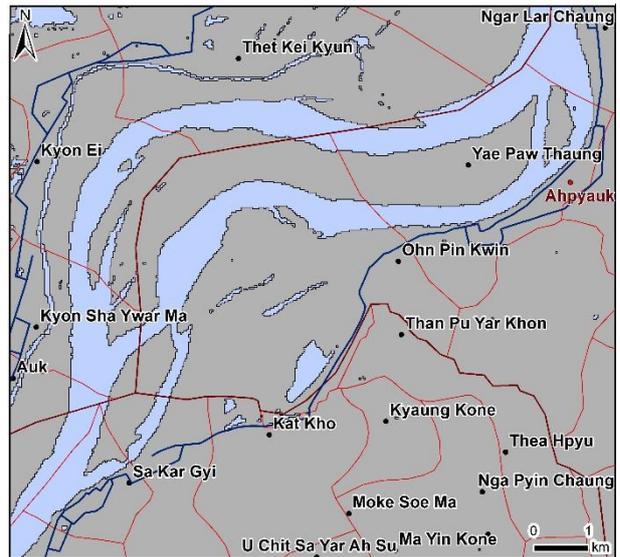
2015 (Landsat 8)



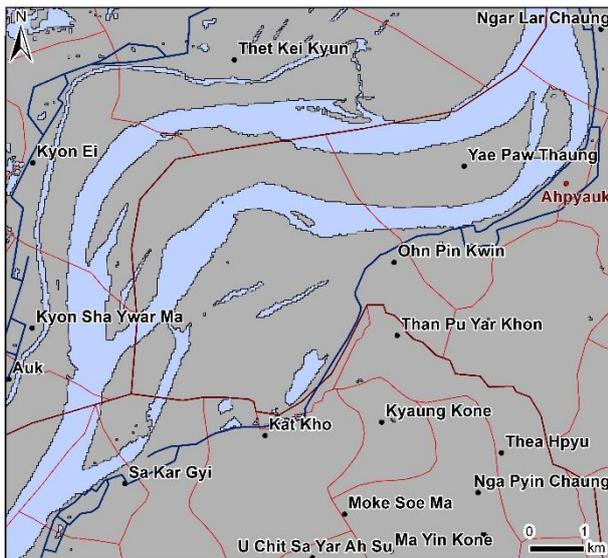
2014 (Landsat 8)



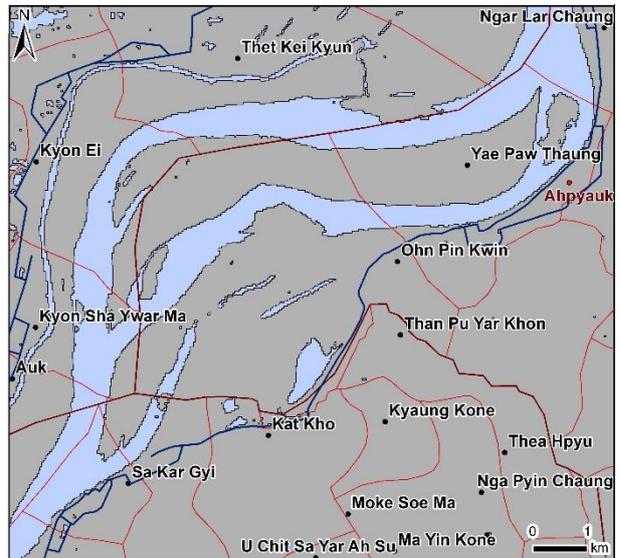
2011 (Landsat 4-5)



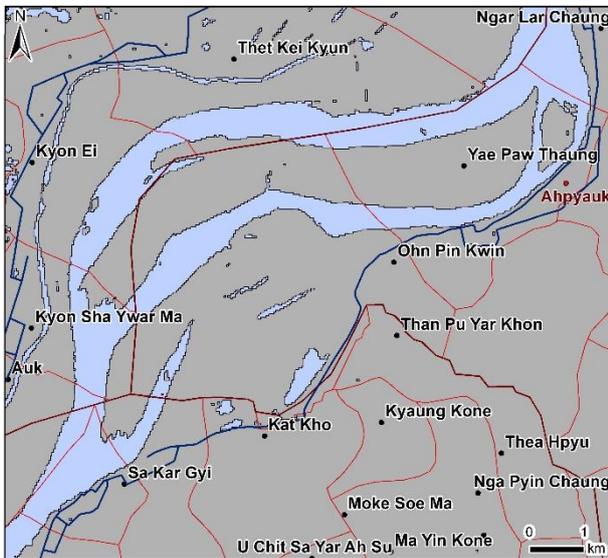
2010 (Landsat 4-5)



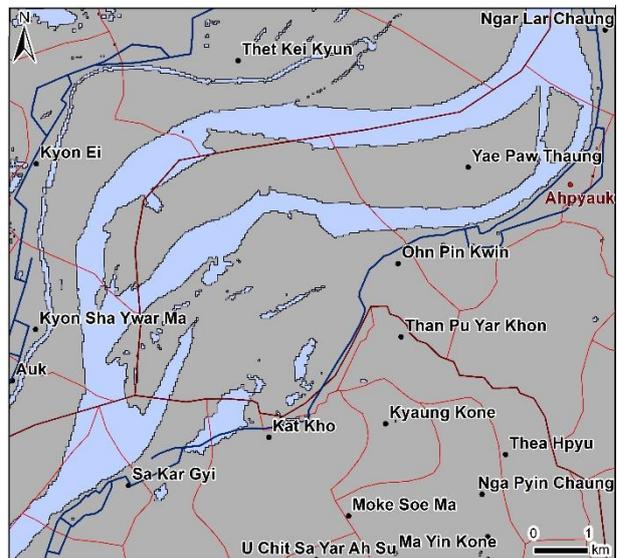
2009 (Landsat 4-5)



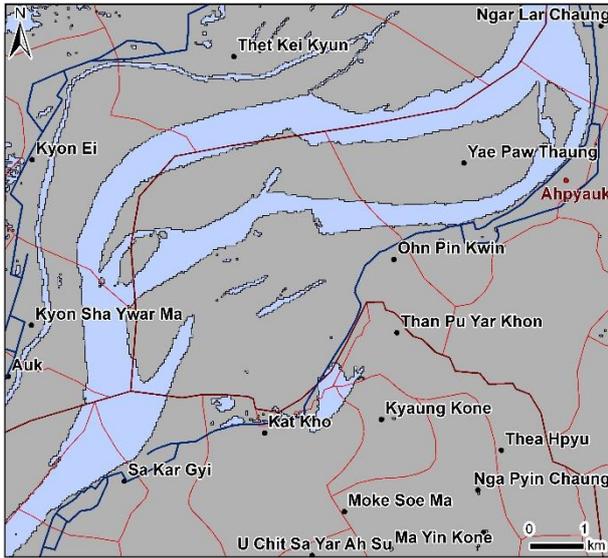
2008 (Landsat 4-5)



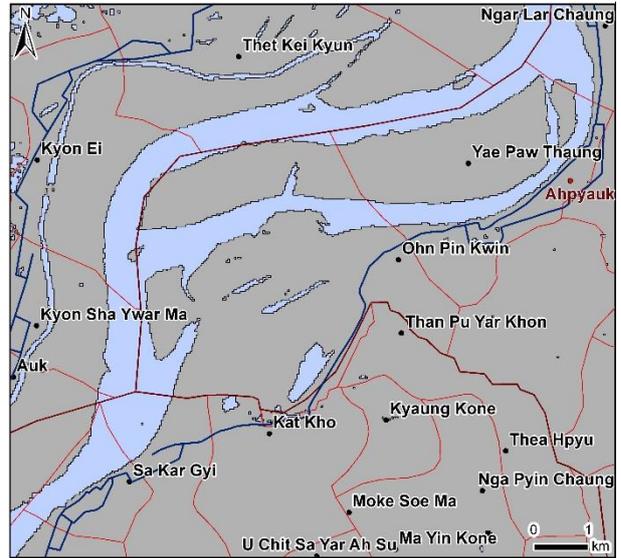
2007 (Landsat 4-5)



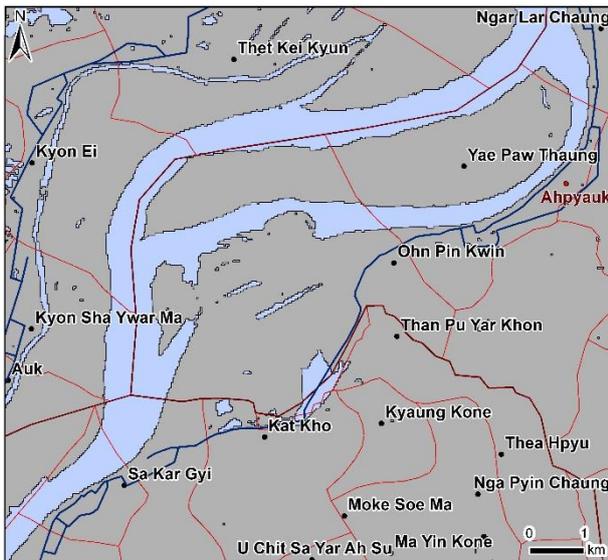
2006 (Landsat 4-5)



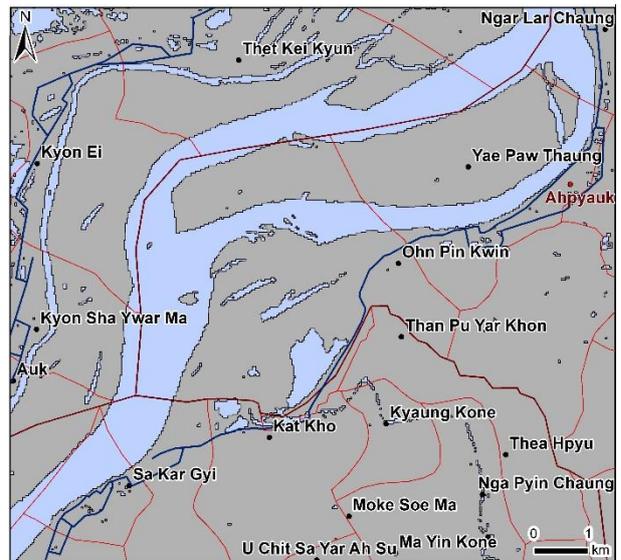
2005 (Landsat 4-5)



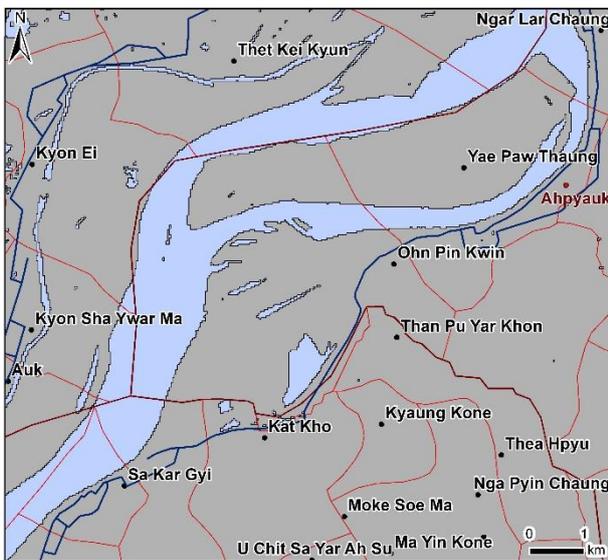
2004 (Landsat 4-5)



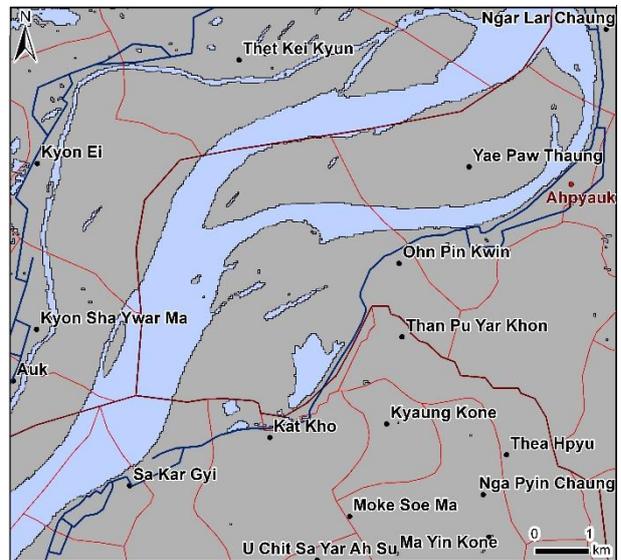
2003 (Landsat 7)



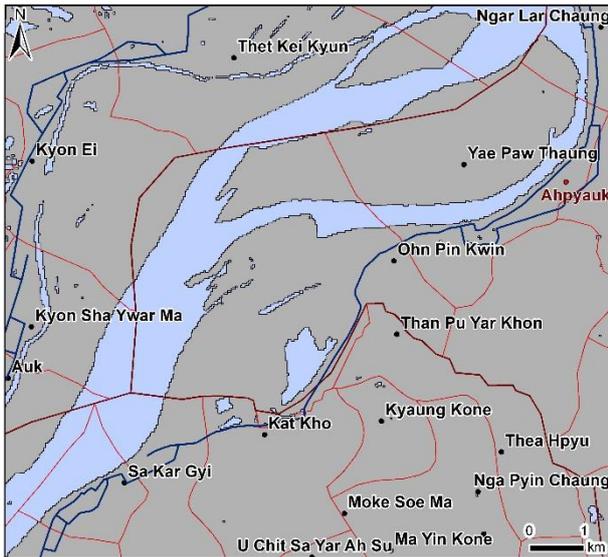
2002 (Landsat 7)



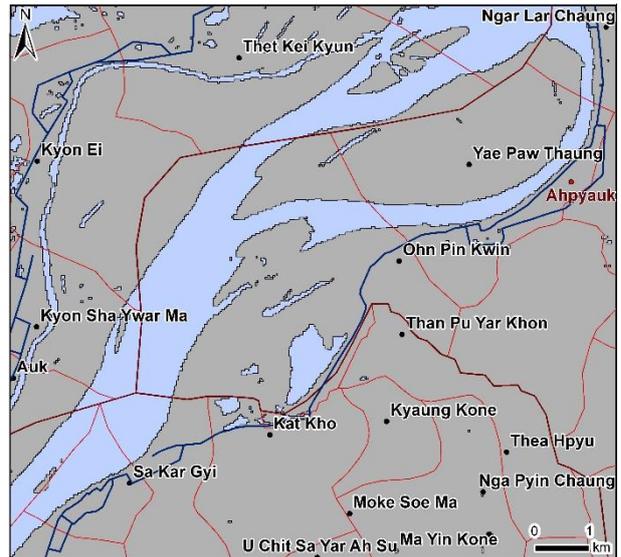
2001 (Landsat 7)



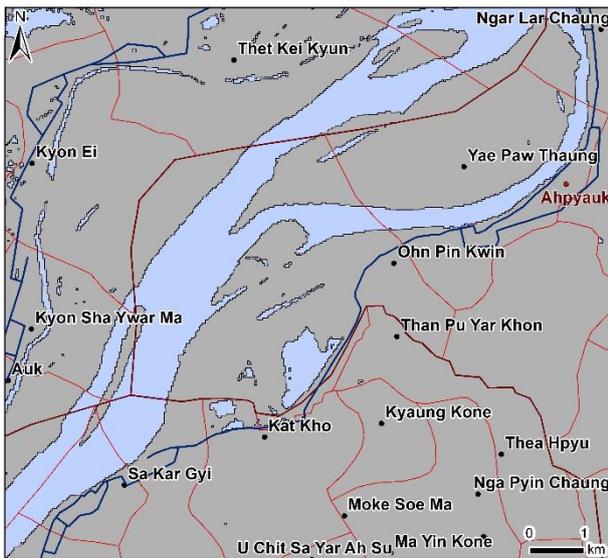
2000 (Landsat 4-5)



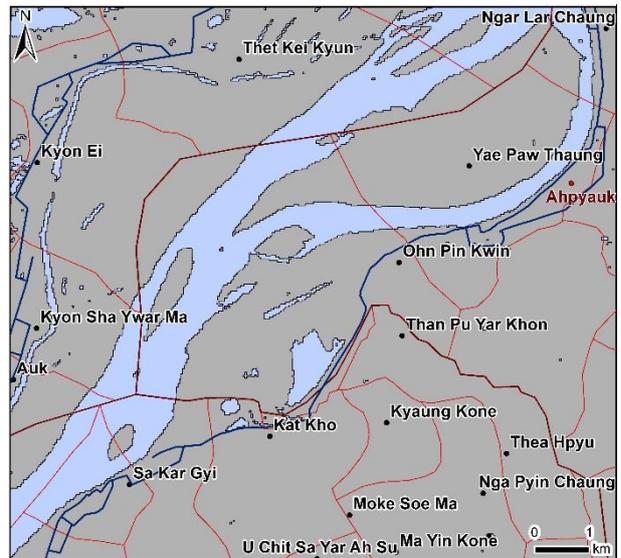
1999 (Landsat 4-5)



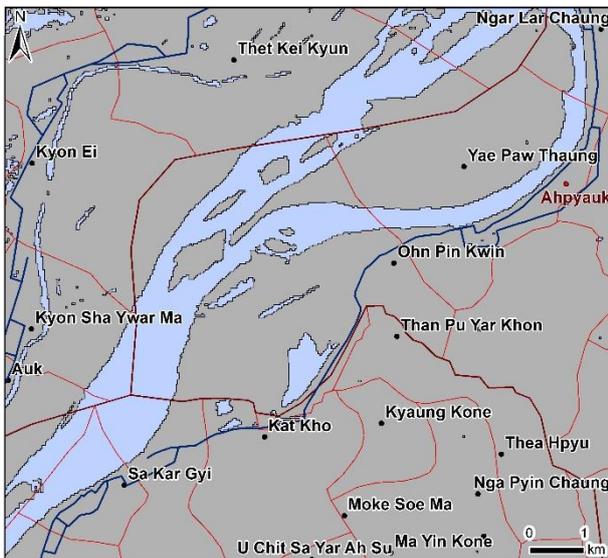
1998 (Landsat 4-5)



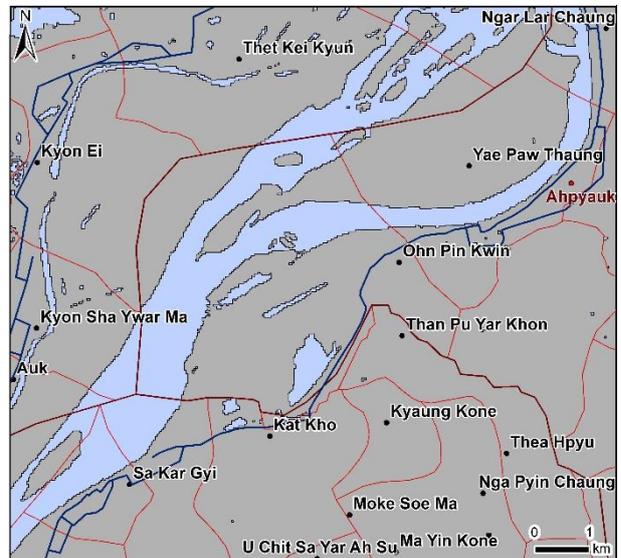
1997 (Landsat 4-5)



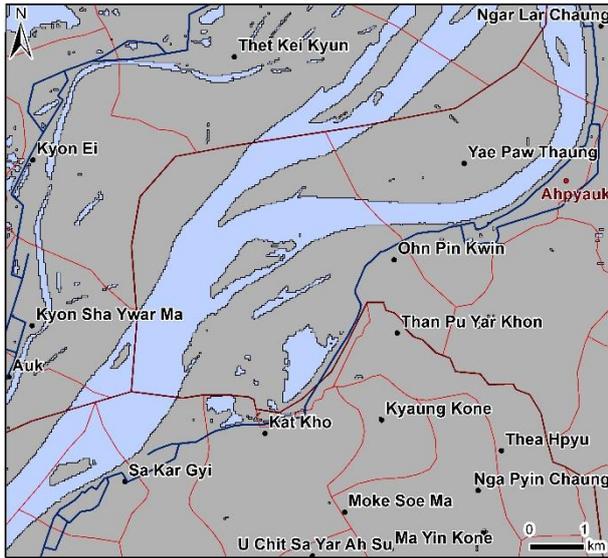
1996 (Landsat 4-5)



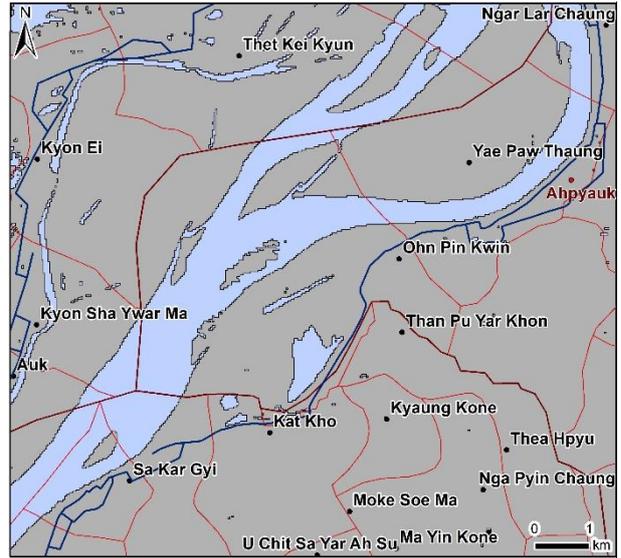
1995 (Landsat 4-5)



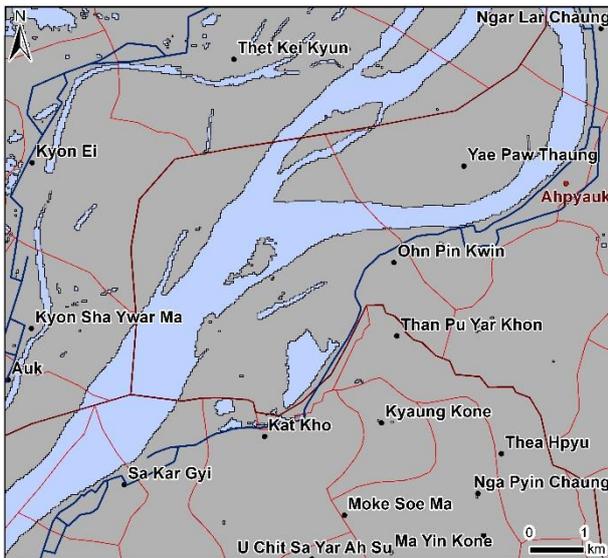
1994 (Landsat 4-5)



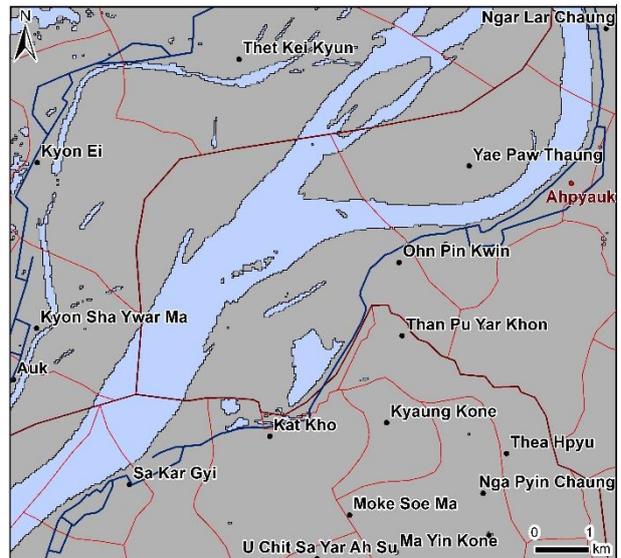
1993 (Landsat 4-5)



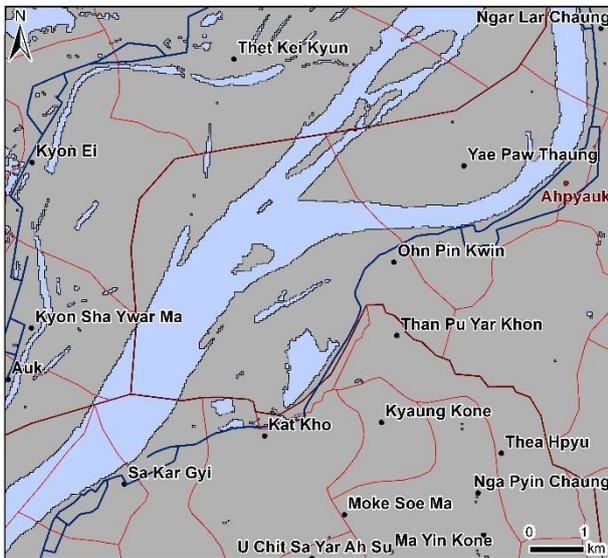
1992 (Landsat 4-5)



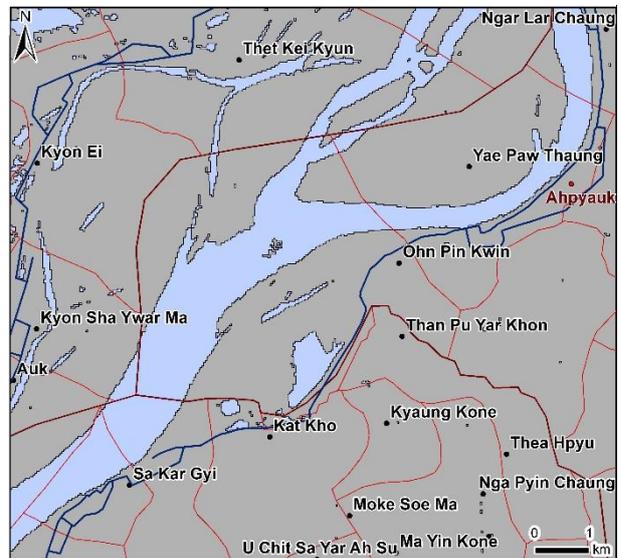
1991 (Landsat 4-5)



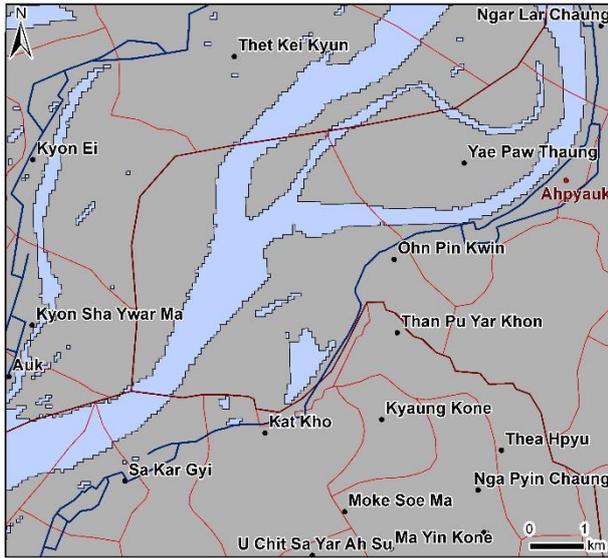
1990 (Landsat 4-5)



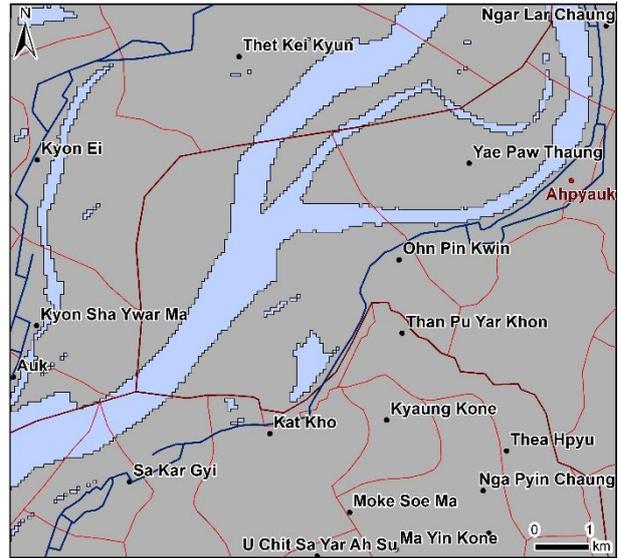
1989 (Landsat 4-5)



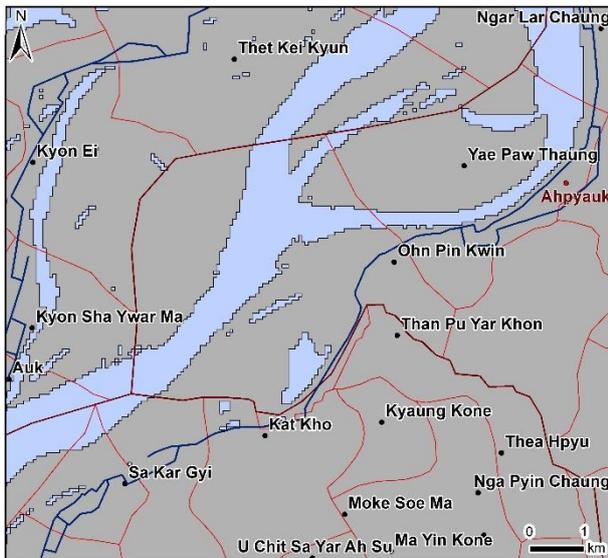
1988 (Landsat 4-5)



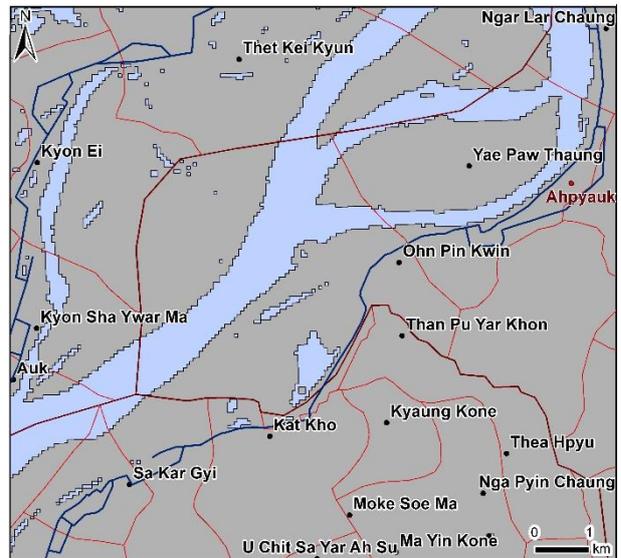
1976 (Landsat 1-5)



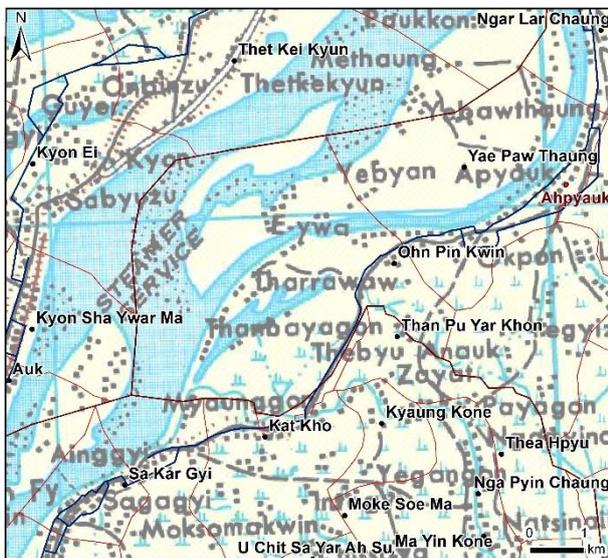
1975 (Landsat 1-5)



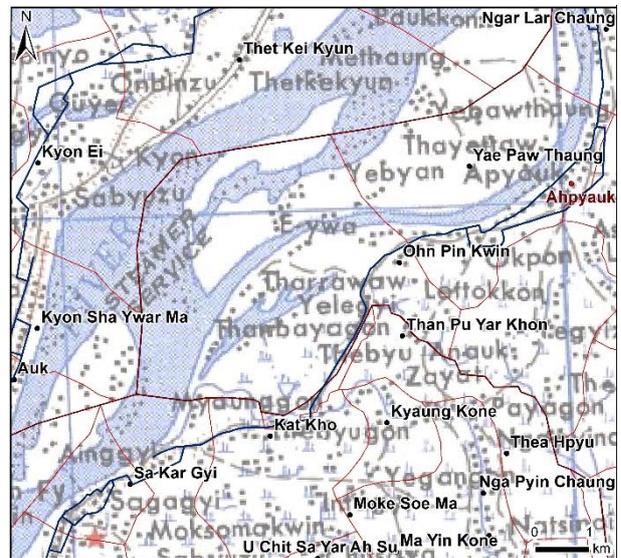
1974 (Landsat 1-5)



1973 (Landsat 1-5)



1967 (Carte topographique)



1955 (Carte topographique)

