

Stage DAE 4 – IMA

La Télédétection : Application au bassin versant de Mae Thang en Thaïlande

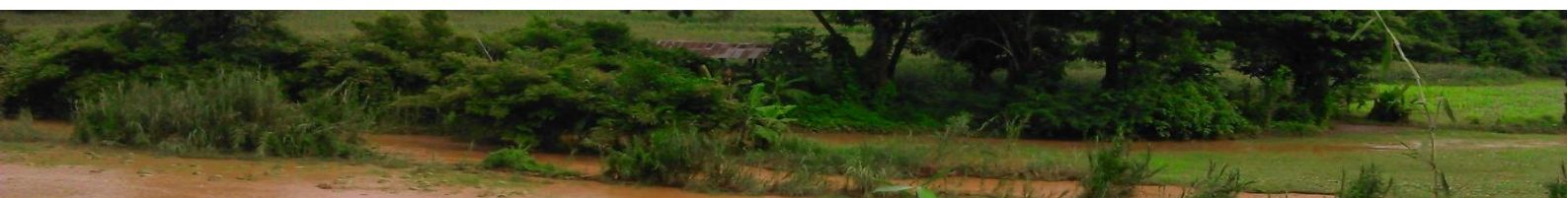
11 Mai – 22 Juillet 2016



PICHEREAU Baptiste

Tuteurs professionnels : **LOINTIER** Marc et **ROBAIN** Henri – Chercheurs IRD UMR 242

Tuteurs universitaires : **ANDRIAMAHEFA** Heriniaina – Agence de L'Eau Seine-Normandie
RODRIGUES Stéphane – Enseignant Chercheur à l'Université François Rabelais



Remerciements

Grâce à Madame **GRELLIER** Séraphine et à Monsieur **ROBAIN** Henri ainsi que Monsieur **JANEAU** Jean-Louis, j'ai eu la chance de pouvoir découvrir le monde de la recherche tant en France qu'en Thaïlande.

Ils m'ont permis d'apprendre tellement de choses, de découvrir une autre culture, une autre vision de la vie. Pour tout ceci, je tiens à les remercier. Ce fût une très belle expérience.

De plus, je souhaiterais remercier très chaleureusement l'équipe du bassin versant de Huay Ma Nai. Ils ont été là pour moi tout au long de mon séjour, présent pour m'aider et faire de ce séjour en Thaïlande un merveilleux souvenir.

Mille mercis **Kun Add**. Merci de m'avoir accueilli chez toi les weekends me permettant d'avoir un accès à internet et donc de pouvoir communiquer avec ma famille. Tu m'as hébergé sous ton toit, tu m'as nourri et présenté à ta famille. Ce fût un très grand plaisir.

Enfin, je remercie très chaleureusement Monsieur Marc **LOINTIER** qui a été très pédagogique et d'un grand soutien. Merci pour votre aide et vos conseils, vous m'avez beaucoup apporté.



Résumé

Ce stage s'intègre dans un projet de recherche mené par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Préalablement à ce stage, j'ai passé 2 mois en Thaïlande. Durant ce séjour j'ai dû effectuer divers missions concernant le bassin versant de Huay Ma Nai. Tout d'abord la réalisation d'une cartographie de l'occupation du sol en 2015. Puis, un enregistrement au GPS de l'ensemble des terrasses présentes sur le bassin versant et enfin une étude sommaire des données hydrologiques.

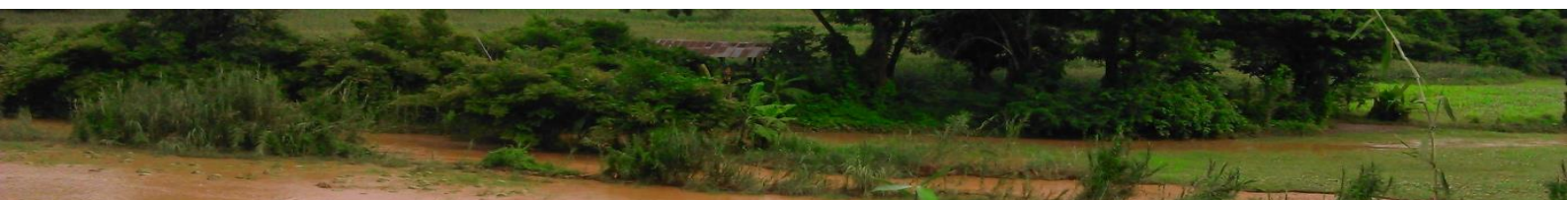
Tout ceci fût effectué dans le but de répondre à une problématique majeure en Thaïlande, mais aussi en Asie du Sud-Est, l'érosion. L'évolution des pratiques agricoles et les aménagements réalisés par l'Homme modifie le paysage mais aussi les sols. C'est dans ce contexte général, que ce stage s'inscrit.

L'objectif de ce dernier est de réaliser les cartes de l'occupation du sol, du bassin versant, manquantes entre 2001 et 2016 ainsi que de discuter de la dynamique des pratiques culturelles. Et pour ce faire, nous utilisons les données d'observation de la terre (télédétection). C'est-à-dire qu'à partir des images satellites des années manquantes, nous parvenons à la réalisation d'une carte de l'occupation du sol.

Cependant, le manque de données a limité le travail. En effet, suite à un problème technique sur le satellite Landsat 7, je n'ai pas pu avoir les images sur une période donnée. Néanmoins, nous sommes parvenus à étudier l'image satellite de 2016. Au regard des précédentes cartes de l'occupation du sol, on a pu déterminer deux années phares dans la dynamique agricole, 2002 et 2003. En effet, au cours de ces deux années, on a une modification importante dans le type de culture en place. C'est à partir de 2003 que nous avons une prédominance croissante du maïs. Ce dernier ne cesse s'étendre au détriment des forêts, des tamariniers et autres cultures. Aujourd'hui il occupe plus du tiers de la surface de Huay Ma Nai.

Outre l'occupation du sol, les aménagements réalisés par l'Homme peuvent affecter l'érosion des sols. C'est pourquoi prochainement, les chercheurs de l'IRD vont étudier l'impact des terrasses sur la réponse hydrologique du bassin versant en lien avec les variations de l'occupation du sol.

Cette problématique présente un enjeu mondial, aussi bien en Europe qu'en Asie. Les sols sont de plus en plus soumis à des modifications (biologiques, chimiques, structurales, etc...) d'origines anthropiques. Dans un contexte de croissance démographique et une raréfaction des ressources naturelles, la préservation de l'environnement et qui plus est, de notre source d'alimentation, est plus que pressante.



Préambule (en Français)

Inscrit dans un projet de recherche mené par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), mon stage a pour but de participer à la constitution de données et d'analyses permettant d'apporter des réponses à une problématique majeure, l'érosion des sols.

En 2015, je suis parti 2 mois au nord de la Thaïlande, dans la province de Phrae. J'y ai réalisé un certain nombre de missions. Une d'entre elles fût la cartographie de l'occupation du sol du bassin versant de Huay Ma Nai (ou Mae Thang). À partir d'un GPS, j'ai enregistré l'ensemble des cultures présentes sur le sol du bassin versant. Outre cette tâche, il a fallu répertorier les terrasses antiérosives présentes sur le flanc des sous bassins de Huay Ma Nai, tout en analysant les possibles détériorations observées. Puis, grâce à un théodolite, j'ai pu faire le profil de versants où étaient localisées des terrasses. Enfin, une étude préliminaire du régime hydrologique fût commencée.

La finalité est d'acquérir des données concernant l'érosion des sols du bassin versant. En effet, en plus d'être situé dans une région avec des fortes pentes, le bassin versant subit les aléas d'un climat tropical en plus des actions de l'Homme (mécanisation, aménagements, etc...).

C'est dans ce contexte que j'ai pu effectuer un second stage avec l'IRD. Au cours de ce dernier, l'objectif est de réaliser la carte de l'occupation du sol des années qui en sont dépourvues. Parallèlement, j'ai pu discuter de la dynamique des pratiques culturelles depuis 2001 à aujourd'hui.

La visée de mon travail est d'apporter des données et analyses aux chercheurs de l'IRD. Et pour cause, la suite de la mission sera d'étudier l'effet des terrasses sur le comportement hydrologique du bassin versant en lien avec les variations de l'occupation du sol. Les terrasses antiérosives ont été construites par le Land Development Department (LDD) en 2014. Le LDD est une administration sous la tutelle du ministère thaïlandais du développement.

Ce travail est réalisé à partir des images satellites obtenues grâce à la banque de données (Earth Explorer) de l'Institut d'études géologiques des Etats-Unis (United States Geological Survey ou USGS).

Ces derniers ont regroupés un ensemble d'images satellites gratuites. Pour ce stage, nous nous sommes basés sur les images produites par deux satellites, le Landsat 7 et le Landsat 8.

Le premier fût lancé en 1999. Toujours en service aujourd'hui, il a connu un problème technique en 2003. Depuis cette date, l'ensemble des images produites sont inutilisables. C'est en 2013 que le Landsat 8 est mis en orbite. Ces complications ont fortement limité le travail. En effet, une grande partie des années dépourvues de carte de l'occupation du sol était dans cet intervalle de temps.

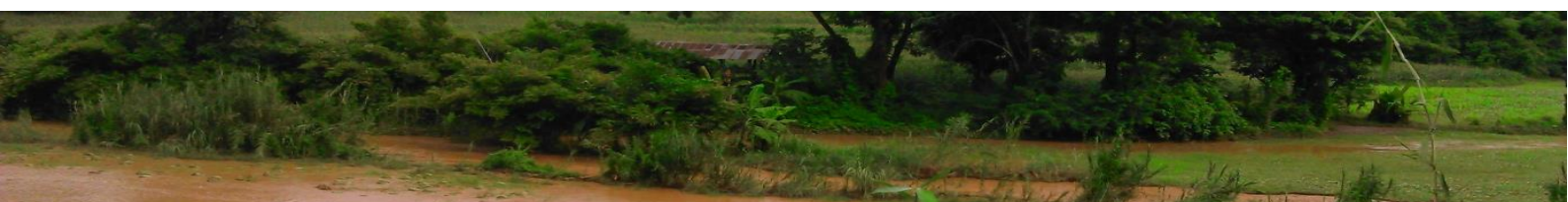
Mise à part les images satellites, nous avons à disposition les cartes de l'occupation du sol qui ont pu être réalisées, notamment celle que j'ai accompli sur le terrain en 2015.

Une fois les données (gratuites) acquises, nous avons commencé le travail par la découverte d'une technique, la télédétection. La télédétection est une technologie permettant d'acquérir des informations d'une surface donnée à distance et ceci grâce aux images satellites.

C'est-à-dire que nous avons utilisés des images satellites des années où nous connaissions l'occupation du sol pour effectuer la carte de l'occupation des années qui en sont dépourvues.

La télédétection s'appuie sur les rayonnements électromagnétiques (mesures dans le spectre visible et infra-rouge) et permet d'obtenir une signature spectrale des objets. La signature spectrale est en quelque sorte l'empreinte digitale d'un objet, c'est son identité fréquentielle.

Selon Paul *et al.* (1982), le rayonnement électromagnétique est une « propagation [...] de l'énergie sous forme d'ondes vectorielles ». Cette énergie est caractérisée par sa longueur d'onde, son amplitude,



sa fréquence et sa périodicité. En fonction de ces paramètres, on obtient une multitude de rayonnements électromagnétiques, qui sont représentés dans un spectre électromagnétique.

Parmi ces rayonnements, nous avons le spectre visible ou lumière visible. L'ensemble des couleurs ont une fréquence qui leur est propre.

Chaque objet recevant un rayonnement électromagnétique va l'absorber ou le réfléchir. La réflexion d'un objet est une source d'information considérable sur ce dernier. Et pour cause, en sachant quelles longueurs d'ondes ont été réfléchies, on peut déterminer la nature de l'objet en question mais aussi ses caractéristiques (morphologiques, chimiques, structurales). Cette méthodologie est utilisée notamment dans le domaine de l'astronomie afin de déterminer la composition des planètes et autres objets célestes.

Dans le cadre de ce stage, nous utilisons la télédétection pour déterminer les types de cultures présentes sur le bassin versant de Huay Ma Nai.

Grâce aux images satellites des années ayant une carte de l'occupation du sol et par photo-interprétation, nous avons pu effectuer des classifications supervisées.

Le protocole est le suivant. Par photo-interprétation et à partir des connaissances du terrain, il faut dans un premier temps réaliser des parcelles d'entraînement (ROI : *Region Of Interest*). Ces ROIs permettent au modèle statistique d'acquérir une banque de données de référence pour chaque classe (forêt, eau, culture, etc...). Ces parcelles d'entraînement sont réalisées à partir d'un outil, le *Semi Automatic Classification Plugin* (SCP) sur QGIS. Ce logiciel permet donc, de faire des parcelles d'entraînement, à partir des images satellites des années où nous possédons une carte d'occupation du sol. Il est requis d'effectuer plusieurs ROI pour une même classe, à différents endroits de l'image.

Une fois ces parcelles d'entraînement créées, on choisit une des techniques de classification supervisée parmi les trois proposées par QGIS. Nous avons choisis la technique du « *Spectral Angle Mapping* » (ou SAM). Cette méthode utilise un calcul de l'angle entre un vecteur créé à partir des parcelles d'entraînement (pixels de référence) et ceux de l'image satellite à classer. Plus la différence entre la valeur de l'angle de référence et la valeur de l'angle des pixels de l'image est faible, et plus le pixel étudié est proche de la classe (forêt, eau, culture, etc...).

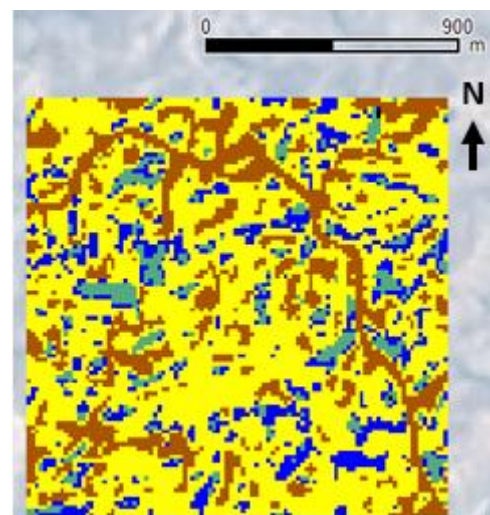
Une fois le modèle statistique paramétré, nous n'avons plus qu'à le lancer. Ce dernier produit alors une classification supervisée (Figure 1). Il identifie chaque pixel et l'associe à une classe en lui attribuant une couleur préalablement définie.

Comme expliqué précédemment, nous avons rencontré quelques problèmes techniques qui nous ont limités dans l'acquisition de données. Malgré la recherche d'images satellites sur quatre satellites différents, nous ne sommes pas parvenus à compléter la base de données. Cependant, selon Marc LOINTIER, des données d'un autre satellite (SPOT ARCHIVE, avec une résolution de 10 mètres) seront très prochainement gratuites et seront utilisées pour réaliser les cartographies d'occupation du sol, entre 2005 et 2013.

La figure 2 synthétise le principe de la classification supervisée.

Néanmoins, nous sommes donc parvenus à réaliser une classification supervisée de l'année 2016 à partir de l'image satellite de cette même année, mais aussi d'autres années (2002 et 2015). Ces années *témoins* ou années de références ont permis à la fois de paramétrer le modèle statistique mais aussi de tester la qualité de production de l'outil SCP.

Figure 1 : Classification supervisée de 2016.
bleu : eau, vert : couvert forestier, marron : sols nus,
jaune : cultures. (Outil : QGIS)



En effet, en comparant la carte de l'occupation du sol de 2015 et la classification supervisée de cette même année, on a observé des divergences.

On a émis plusieurs hypothèses face à ces différences. La première est le fait qu'il y ait un décalage dans le temps entre le moment où a été réalisée la carte de l'occupation du sol (juillet/août 2015) et le moment où a été pris l'image par le satellite (26 octobre 2015). Outre le temps, l'espace est une des raisons de cette différence. Les images satellites, que nous avons traitées, ont une résolution spatiale de 15 mètres. Ainsi, les petites parcelles (comme les plants de banane), avec une superficie inférieure à $15 * 15$ mètres (soit 225 m²), voient leur signature spectrale additionnée avec celles d'autres cultures voisines. Par conséquent, nous avons une perte de l'information.

Outre les classifications supervisées, on a pu observer l'évolution de la dynamique agricole depuis 2001 à aujourd'hui. En effet, on a pu recenser, malgré quelques dates manquantes, plusieurs cartes de l'occupation du sol (2001 à 2004 puis 2012 et enfin 2014 à 2015). Au regard de ces dernières, on a pu observer à la fois deux tournants dans la dynamique de l'occupation du sol mais aussi une tendance qui perdure depuis 2003.

En 2001, le bassin versant est occupé à plus de 60 % par du haricot mungo. On distingue néanmoins une multitude de cultures telles que des tamariniers. Des zones de jachères sont présentes, aujourd'hui totalement absent du paysage. Puis en 2002, le soja, alors absent en 2001, occupe 60 % de Huay Ma Nai. Le haricot mungo disparaît et l'on voit apparaître quelques patchs de maïs (2,1 % du bassin versant).

Un nouveau tournant apparaît en 2003. Le maïs est cultivé sur 39 % du bassin versant au détriment du soja (23 %). Néanmoins, on continue d'avoir une diversité dans les cultures (banane, mangue, jachères, tamarin, haricot vert, etc...) bien que leur surface reste faible.

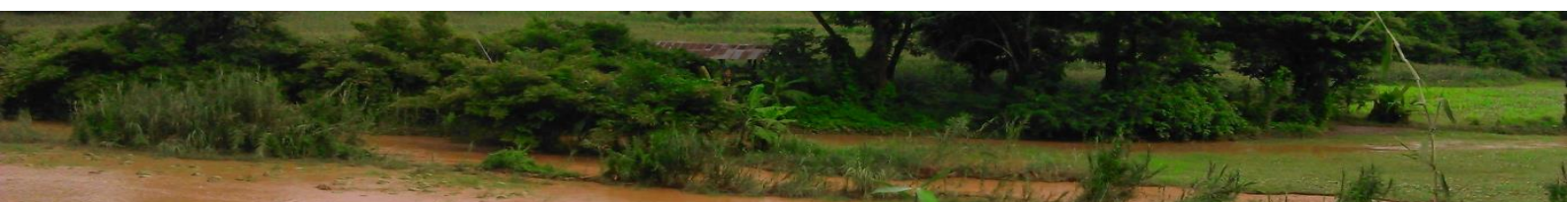
Depuis cette année, le maïs ne cesse de prendre de l'ampleur. En 2015, il occupait plus du tiers de Huay Ma Nai. La diversité culturelle s'est appauvrie. On ne retrouve plus de zones de jachères, ni même de soja. Les plants de banane sont éparpillés contrairement aux bambous qui se localisent essentiellement le long des ruisseaux.

En parallèle de ces évolutions, des aménagements sont apparus. La construction de terrasses antiérosives ont vu le jour en 2014. Au cours de mon stage, j'ai pu observer l'état de conservation de ces dernières. Beaucoup ont été érodées. L'efficacité de ces structures est remise en cause.

La suite du travail mené par les chercheurs de l'IRD sera d'étudier l'impact potentiel des terrasses sur le comportement hydrologique du bassin versant en lien avec l'occupation du sol. Par ailleurs, une étude comparative entre 2014 (année sans terrasses) et 2015 (année avec terrasses) sur deux sous bassins (l'un absent d'aménagements et l'autre constitué de terrasses) sera réalisée.

La finalité est de parvenir à évaluer l'érosion des sols du bassin versant en lien avec l'occupation du sol et les aménagements effectués.

Aucune réponse ne peut encore être apportée au jour d'aujourd'hui. Cependant, en observant après chaque épisode pluvieux une accumulation importante de sédiments à l'exutoire des sous bassins, les effets des aménagements pourront être quantifiés.



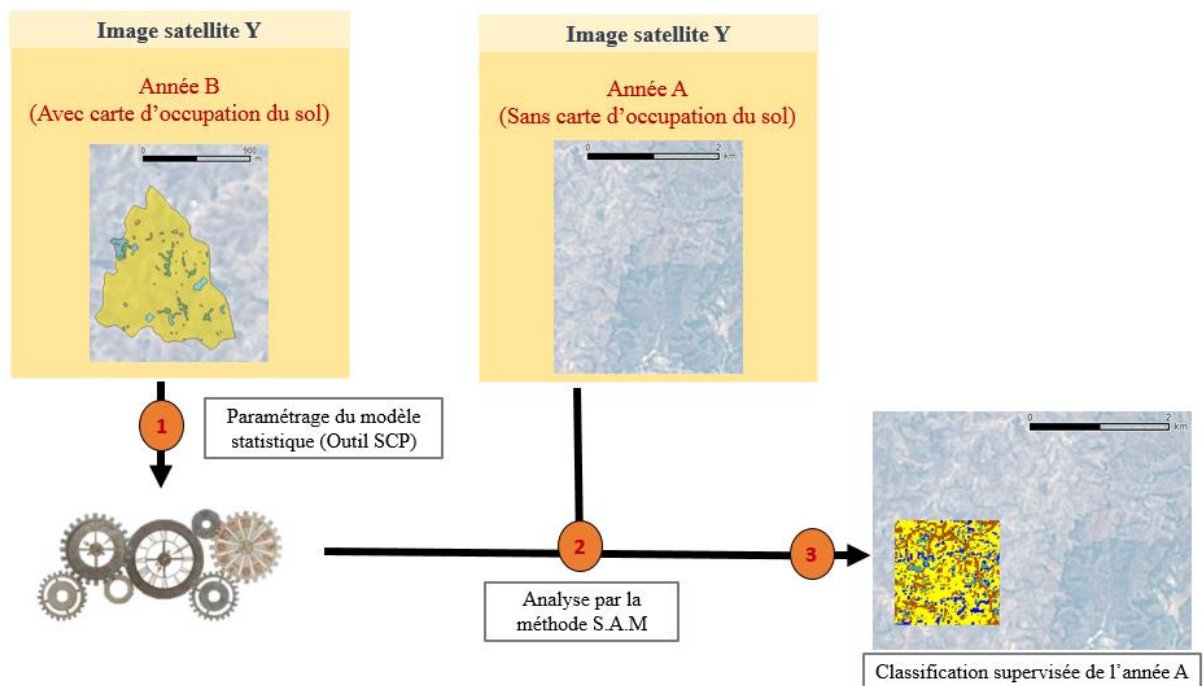


Figure 2 : Principe de la classification supervisée.

Avant-propos

Ce stage s'inscrit dans le contexte d'un premier stage effectué en 2015. En effet, l'été dernier, je suis parti 2 mois dans le nord de la Thaïlande avec l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Au cours de ce stage, j'ai collecté de nombreuses données cartographiques, topographiques mais aussi morphologiques concernant le bassin versant de Huay Ma Nai (ou Mae Thang).

Après avoir réalisé une carte de l'occupation du sol de ce dernier (Annexe 1), j'ai recensé et analysé l'ensemble des terrasses (hillsides ditches) présentes sur les sous bassins composant Huay Ma Nai. Ces constructions ont pour objectif de limiter l'érosion des fortes pentes. Selon le Land Development Department (LDD), 6.4 millions d'hectares seraient fortement vulnérables face à ce phénomène en Thaïlande. On estime l'érosion aujourd'hui entre 20 et 50 tonnes par hectare et par an ([Bricquet et Janeau, 2005](#)). Aujourd'hui, l'efficacité de ces structures est remise en cause. Sur le flanc des collines où sont présentes les terrasses, j'ai réalisé un transect au théodolite. Cela a aussi pour but de quantifier la part de sédiments qui a été érodée.

Enfin, un début d'analyse des relevés pluviométriques entre le mois de Mai 2014 et Mai 2015, en lien avec la concentration des sédiments en suspensions, fût fait. L'idée est, à partir d'événements pluviométriques similaires, de comparer la charge de sédiments présents à l'exutoire du bassin versant. Nous cherchons à étudier l'impact potentiel des terrasses, qui furent construites entre 2014 et 2015, sur le comportement hydrologique du bassin versant.

Le stage de 2016 est dans la même philosophie d'acquisition de données. Outre l'impact des terrasses sur l'érosion des sols, l'occupation du sol est un facteur non négligeable pour la stabilité structurale de ce dernier. La finalité de ce stage est de parvenir à compléter la base de données de l'occupation du sol entre 2005 et 2016 à partir d'images satellites.

La dernière étape du projet de recherche sera d'étudier le régime hydrologique du bassin versant : une étude comparative de deux sous bassin-versants de Huay Ma Nai, l'un composé de terrasses et l'autre n'ayant pas été aménagé. Cette étude va s'appuyer sur nos analyses de changements d'occupation du sol, durant ce stage.

Remarque : les mots en gras sont des termes définis dans le lexique (p. 21)



Sommaire

Avant-propos

1. Introduction	2
2. Matériels et Méthodes.....	3
2.1. Contexte	3
2.1.1. Organisme d'accueil, l'IRD.....	3
2.1.2. Le bassin versant de Huay Ma Nai	3
2.2. La télédétection.....	5
2.3. Les données satellites.....	7
2.3.1. Les satellites : Landsat 7 et Landsat 8	7
2.3.2. Protocole de sélection des images satellites.....	8
2.4. Traitements effectués : Vectorisation et classification supervisée .	9
2.4.1. Vectorisation des données d'occupation du sol	9
2.4.2. Le recalibrage des images satellites : Fusion P + XS.....	9
2.4.3. La classification supervisée.....	11
3. Discussion et résultats	13
3.1. Les classifications obtenues	13
3.1.1. Année 2015.....	13
3.1.2. Année 2002.....	14
3.1.3. Année 2016.....	15
3.1.4. De 2001 à 2016 : une pratique culturelle qui évolue dans le temps	16
3.2. La fabrication de la P + XS	18
3.3. La classification supervisée, un outil performant ?	19
4. Conclusion.....	20
Lexique.....	21
Références	22
Tableaux et figures	24
Annexes.....	25
Table des matières	32



1. Introduction

Les sols sont soumis à de multiples pressions naturelles et anthropiques (machinisme agricole, par exemple) qui perturbent le fonctionnement du biotope. Il en résulte une très forte érosion des sols, ce phénomène peut être modulé en fonction de nombreux paramètres (occupation du sol, climat, composition du sol, etc...). L'Asie du Sud-Est est de plus en plus vulnérable à ce dernier. Et pour cause, l'évolution rapide de la pratique agricole est l'un des facteurs prédominant (Valentin *et al.*, 2008). Cela se répercute sur l'hydrologie des bassins versants. C'est un problème d'autant plus important puisque les provinces du nord de la Thaïlande alimentent « non seulement les rizières, les jardins et les vergers de la Plaine centrale (le « bol de riz » du royaume), mais également les industries et les six millions d'habitants de Bangkok » (Barnaud, 2004).

Tout ceci est accru par un système devant répondre à une croissance de la population et donc de la demande impliquant la recherche de techniques avec un fort rendement dans un temps restreint (Valentin *et al.*, 2008). Outre le changement de la pratique agricole, on constate une évolution dans le mode de vie qui se reflète au travers du système agricole. Or « les facteurs socio-économiques [...] sont des indicateurs de poids de l'activité humaine dans la favorisation ou la limitation du risque érosif » (El Hage Hassan *et al.*, 2013).

La conjugaison de ces variables impactent l'état des sols. Afin de limiter les effets néfastes de ces pratiques, diverses techniques sont réfléchies et mises en place. Une de ces solutions serait la construction de terrasses antiérosives. Leur fonction est de ralentir le ruissellement et retenir la terre sur le haut des versants, selon Roose (2006).

Bien que leur efficacité soit mal connue, mes observations sur le terrain me permettent de juger de leur résistance dans le temps ainsi que de leur fonctionnalité (Fig. 3).

Parallèlement à cette étude de l'état de conservation de ces terrasses, une évaluation de la dynamique agricole (occupation du sol) permettrait par la suite de corréler le bilan hydrique du bassin versant avec d'une part, la période avant construction des terrasses et celle après la construction de ces dernières et d'une autre part, avec l'observation des changements de l'occupation de sol.



Figure 3 : Terrasse dégradée par l'érosion.

En outre, un examen de l'évolution des pratiques agricoles et de l'occupation des sols conduirait notre regard sur les mutations de la société. L'agriculture est le reflet des mouvances de cette dernière. Elle s'y est adaptée, notamment par la « pluriactivité » (Bouchet, 2003), afin de répondre sans cesse aux demandes des populations. L'Asie du Sud-Est va voir sa démographie atteindre les 600 millions de consommateurs de riz. Face à cela, elle devra « accroître d'environ 30 % sa production rizicole durant le prochain quart de siècle » (Trébuil et Hossain, 2000). La Thaïlande devra elle aussi s'adapter.

L'objectif de ce stage est de mettre en place une méthodologie permettant de suivre l'évolution de l'occupation du sol en utilisant les données d'observation de la Terre. Cette technique est ce que l'on appelle la télédétection. Une fois cette base de données acquise, une étude comparative du comportement hydrologique du bassin versant de Huay Ma Nai, avant et après construction des terrasses, sera réalisée par les chercheurs de l'IRD.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Contexte

Ce stage s'inscrit dans un cadre méthodologique. En effet, ma mission est d'apporter les éléments nécessaires, pour contribuer à la problématique scientifique de l'équipe « Biophys », en utilisant les techniques spatiales et le Système d'Information Géographique (SIG – logiciel QGIS).

Après avoir présenté l'institut dans lequel j'ai travaillé, je présenterai les données exploitées et les outils qui m'ont permis de les traiter.

2.1.1. Organisme d'accueil, l'IRD

Mon stage se déroule au sein de l'unité de recherche de l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES – UMR 242), dans l'équipe « Biophys » spécialisée en sciences des sols et localisée dans les locaux de l'IRD. Ce département est un composé de multiples équipes d'organismes différents (Institut de recherche pour le développement - IRD, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, Institut national de la recherche agronomique – INRA, Université Paris Est Créteil Val de Marne – Paris 12 et enfin le Centre national de la recherche scientifique – CNRS).

La mission de cette équipe est de « contribuer à l'innovation en gestion durable de la biodiversité, des écosystèmes et des ressources biologiques et à l'élaboration des stratégies d'adaptation aux changements planétaires ». Par ailleurs, la particularité de l'IRD est la volonté de « former aux avancées de l'écologie, des sciences de l'environnement et de l'ingénierie écologique » (IRD) les chercheurs et employés de multiples organismes à l'étranger. En effet, l'IRD travail en équipe avec des centres de recherche étrangers (Thaïlande, Laos, Vietnam, etc...).

2.1.2. Le bassin versant de Huay Ma Nai

À 550 km au nord de Bangkok, en Thaïlande, la province de Phrae possède un des 3 bassins versants d'étude de l'IRD en Asie (Fig.4).



Figure 4 : Localisation du bassin versant de Huay Ma Nai.
(Source : Maglinao et Valentin, 2003)



Avec une surface de 93 hectares, le bassin versant de Huay Ma Nai est subdivisé en 5 sous bassins (Annexe 2). Ce dernier s'inscrit dans un contexte de climat tropical avec une pluviométrie annuelle de 1100 mm (MSEC). L'annexe 3 présente la part de sédiments en suspension en fonction de la pluviométrie. On constate une importante quantité de sédiments après chaque épisode pluvieux. Entre le 1^{er} Mai 2014 et le 1^{er} septembre 2014, j'ai pu calculer, grâce au logiciel HYDRAS, une quantité de sédiment à l'exutoire du bassin versant de 4238 g/L. Ce type de climat est caractérisé par deux saisons, la saison sèche (de novembre à mai) et une saison des pluies (de juin à octobre). L'élévation moyenne est de 440 mètres d'altitude avec des pentes allant de jusqu'à 15° (Figure 5), voir plus dans certaines zones. Quant à la géologie du terrain, celle-ci est de type grès et silice (Maglinao et Valentin, 2003).

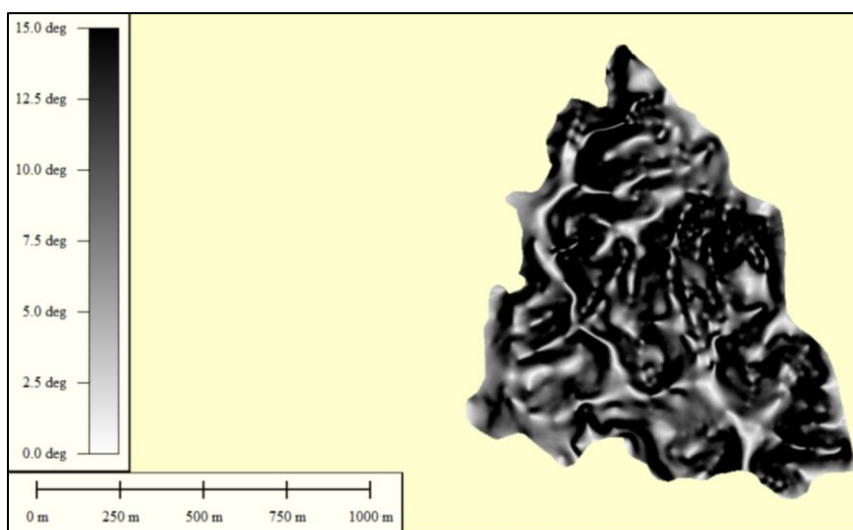


Figure 5 : Carte des pentes déduites du MNT du bassin versant de Huay Ma Nai.
(Outil : QGIS)

Concernant la pédologie, le sol est quant à lui de type Alfisol sur la majeure partie du bassin versant. C'est-à-dire un sol ferrugineux (MSEC).

Le bassin versant de Huay Ma Nai est composé d'une multitude de parcelles appartenant à divers agriculteurs. Leur revenu dépend essentiellement du riz. Cependant, les champs qu'ils cultivent sur ce bassin versant sont en quelques sortes un revenu complémentaire. De ce fait, les cultures, qui y sont mises, sont fonction de la loi du marché. Depuis quelques années, le maïs se revend bien.

En 2015, j'ai eu en charge de réaliser quatre missions sur le bassin versant de Huay Ma Nai.

La première consista à réaliser une cartographie de l'occupation du sol de ce dernier. Pour cela j'avais à disposition un GPS Garmin ainsi que des logiciels (GPS Track Maker et Surfer) permettant d'introduire la donnée au sein d'une cartographie. Le premier a pour but de lire les données GPS. Une fois lues, nous pouvons les convertir de telle façon à ce qu'elles soient utilisables, sous format Excel, par le logiciel de cartographie Surfer.

Sur le terrain, le protocole d'acquisition des données était le suivant : Il fallait que je fasse le pourtour des différentes cultures présentes dans le bassin versant. Dans le cas du maïs, il fallait que je détermine le sens d'implantation des cultures (dans le sens de la pente ou bien le long des courbes de niveau). Cependant, cette partie du travail fût parfois complexe suite à la vitesse de croissance des plants. Il était difficile, par moment, de bien délimiter et d'évaluer le sens des cultures. Par ailleurs, la morphologie du terrain est particulière. Le relief est tel que nous avons des collines en forme de demi-



orange. Par conséquent, une culture de maïs peut être dans le sens de la pente sur un flanc mais peut par la suite, suivre les courbes de niveau.

La deuxième problématique porte sur les terrasses. Ces dernières ont été construites par le LDD en 2014. Elles sont présentes sur certains sous bassins. L'objectif de mon travail fût d'analyser l'état de conservation de ces structures et donc leur efficacité (Annexe 4).

Le protocole était le suivant : Avec un GPS, je marchais le long des terrasses dans un sens pour enregistrer l'ensemble du tracé. Puis, je retournais sur mes pas pour noter à chaque dégradation diverses informations. Les dégradations étaient soit des effondrements, des éboulements ou bien la présence de ravines. Pour chacune de ces perturbations, il a fallu mesurer avec un décimètre la profondeur et la largeur de ces dernières.

Ainsi, j'ai pu créer un dossier Excel contenant l'ensemble des altérations répertoriées.

Une fois ces terrasses étudiées, j'ai eu à réaliser la coupe de certains versants. Grâce à un théodolite, j'ai pu constituer le profil (Figure 6).

Les mesures partaient du bas de la colline pour remonter au fur et à mesure. Tous les mètres, j'effectuais une mesure. Une fois arrivé à une terrasse, il y avait quatre mesures à faire. La première était localisée au bord de la terrasse (1), puis une au milieu de la terrasse (2). La troisième était au pied du talus de la terrasse (3) et enfin la dernière (4) était au sommet du talus (Annexe 5).

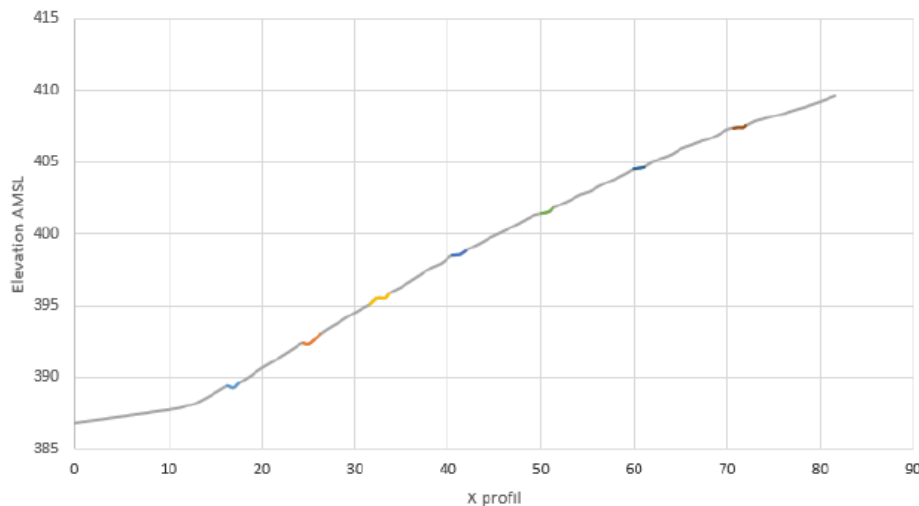


Figure 6 : Profil des terrasses du sous bassin n°1.

À partir du profil ci-dessus, il est possible de distinguer (en couleur) les différentes terrasses présentes sur le flanc d'un des sous bassins. Par ailleurs, on remarque une morphologie linéaire des terrasses, signe d'une dégradation.

Enfin, j'ai collecté un ensemble de données pluviométriques entre mai et août 2014 ainsi qu'entre mai et mi-juillet 2015. Comme expliqué précédemment, l'objectif est d'effectuer une comparaison entre deux sous bassins (avec terrasses et sans terrasses) pour un même épisode pluviométrique. À partir de là, il sera intéressant d'étudier la réponse hydrologique de chacun de ces derniers.

2.2. La télédétection

Grâce à la télédétection, il est possible d'acquérir des informations sur une surface donnée. Pour cela, des images satellites sont collectées puis interprétées. Ces dernières sont obtenues à partir de satellites équipés de **capteurs** optiques ou radar, qui vont recevoir les **rayonnements**



électromagnétiques émis par les surfaces étudiées. Cette énergie électromagnétique peut être transmise, absorbée et réfléchiée par ces mêmes surfaces (Lillesand *et al.*, 2004).

Chaque objet a une capacité à réfléchir la lumière ainsi qu'à l'absorber (Kamel, 2005) dans différentes zones du **spectre électromagnétique**. Selon le [Département de la Politique Scientifique fédérale belge](#)¹, on appelle cela la **signature spectrale** d'un objet (Figure 7). La télédétection exploite cette dernière. Paul *et al.* (1984) définissent cette technique de la façon suivante : « Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques ou biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance ». Les capteurs à bord des satellites vont étudier ces signatures spectrales en plusieurs endroits du spectre. Ils sont donc munis de bandes spectrales de mesure (nommés « canaux »), 4 pour les premiers satellites lancés en 1973, 6 ou 8 aujourd'hui en moyenne.

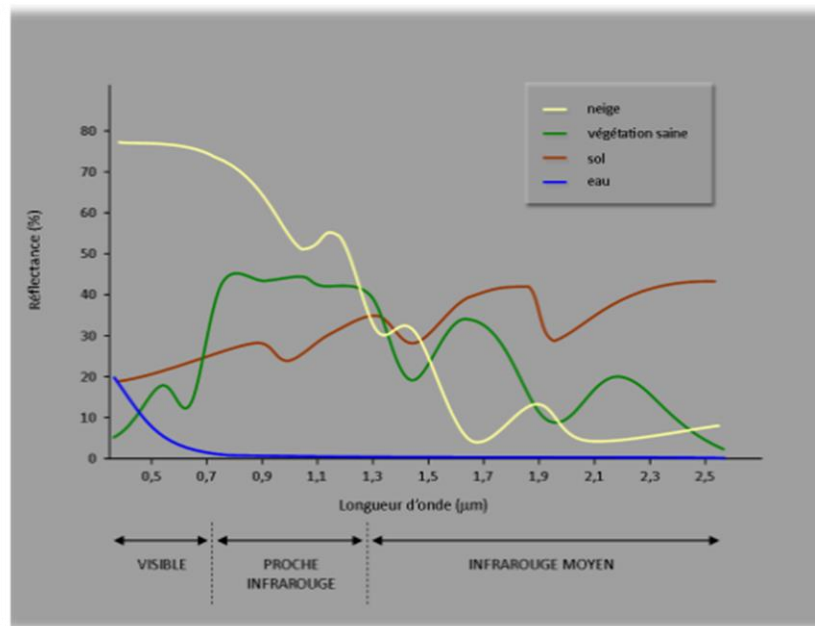


Figure 7 : Signature spectrale de surfaces naturelles.
(Source : UVED)

Cette intensité d'énergie est variable suivant l'objet étudié. La valeur énergétique des pixels (compte numérique) traduiront cette variabilité d'intensité énergétique reçue par le satellite (De Joinville, 2015). On peut analyser cette information en réalisant l'histogramme des différents canaux (Figure 9). L'histogramme est un exemple de représentation de cette information.

En fonction du type de codage, c'est-à-dire du nombre de bits², la définition de l'image produite sera nuancée. Pour un codage en 8 bits, la possibilité des valeurs du compte numérique de chaque pixel sera comprise entre 0 (noir) et 255 (blanc), soit 2^8 correspondant à 256 valeurs (Annexe 6). Pour un codage en 16 bits, on aura 2^{16} valeurs du compte numérique possible pour chaque pixel, donc une plus grande sensibilité des différences d'intensités et donc une plus grande précision dans les traitements (Figure 8).

¹ Etablissements scientifiques fédéraux belges ou BELSPO : Belgian Science Policy

² Le bit est un langage binaire dont les valeurs possibles sont 0 et 1.



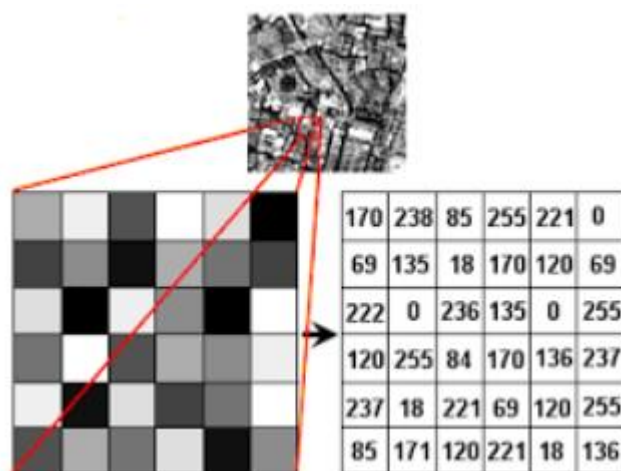


Figure 8 : Composition d'une image satellite.
(Source : Académie de Rennes)

Pour la visualisation, il est possible d'ajuster le contraste d'une image. On peut effectuer pour cela un ajustement de contraste. C'est-à-dire que nous modulons le **facteur de contraste** en bornant l'histogramme aux valeurs des comptes numériques présents dans l'image. Au regard de la figure ci-dessous, l'intervalle [0,20] en abscisse, ne code pour aucun pixel. Cependant, le facteur de contraste passe par cet intervalle et de ce fait intègre un surplus d'information inutile à l'image.

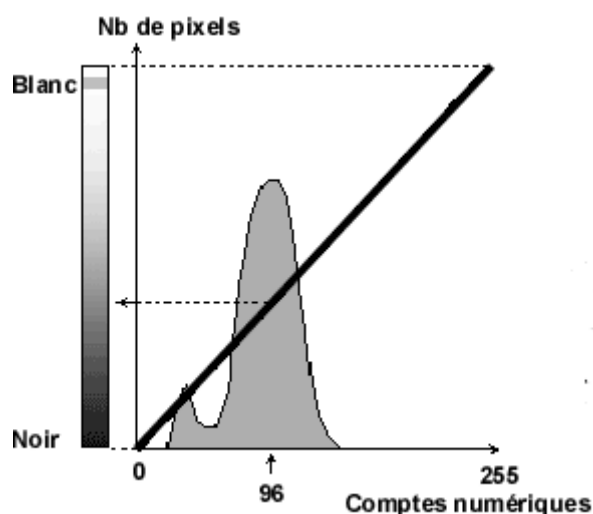


Figure 9 : Histogramme d'une image satellite et son facteur de contraste.
(Source : BELSPO)

2.3. Les données satellites utilisées

2.3.1. Les satellites : Landsat 7 et Landsat 8

Ma mission consista dans un premier temps à recueillir un maximum d'images satellites exploitables pour lesquelles je possède une carte de l'occupation du sol. Il se trouve que nous possédons sept cartes d'occupation du sol : 2001, 2002, 2003, 2004, 2012, 2014 et 2015. Pour les années 2001, 2004 et 2012, nous ne sommes pas parvenus à acquérir une image satellite utilisable. En ce qui concerne l'année 2003 et 2014, leur proximité avec 2002 et 2015 apporte peu dans cette étude.

De ce fait, nous avons sélectionné les années 2002 et 2015 comme support de travail. Ce choix s'explique d'une part par le fait que je connais le terrain en 2015 et d'autre part, l'année 2002 jouxte une année manquante (2001) et qui plus est, marque un tournant dans l'occupation du sol (Tab. 1).



Années	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
<i>Carte de l'occupation du sol</i>	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
<i>Image satellite (Mai <-> Octobre)</i>	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
Années	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
<i>Carte de l'occupation du sol</i>	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non	
<i>Image satellite (Mai <-> Octobre)</i>	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	

Tab. 1 : Récapitulatif des années avec ou sans carte de l'occupation du sol et images satellites.
(Vert : Années témoins, Jaune : Années avec études possibles, Rouge et Gris : Aucun traitement possible)

Grâce à la banque de données d'images satellites de l'Institut d'études géologiques des Etats-Unis (USGS : United States Geological Survey – Earth Explorer), nous avons pu collecter de multiples images satellites. Ces dernières proviennent de deux appareils, le Landsat 7 ainsi que le Landsat 8.

Le premier fût lancé le 15 avril 1999 (NASA). Il nous a fourni les images entre 1999 et aujourd'hui. Cependant, un problème technique est survenu entre mai et octobre 2003. De ce fait, les données sont inanalysables depuis cette date (Annexe 7).

De 2013 à aujourd'hui, le Landsat 8 effectue la suite du travail. Selon la NASA, ce satellite possède deux capteurs, le capteur thermique à infrarouge (TIRS) et l'Operational Land Imager (OLI). Ce dernier est celui que l'on a utilisé. Avec ses 9 canaux, il possède une **résolution spatiale** de 30 mètres tandis que le TIRS, avec ses 2 canaux, en possède une de 100 mètres (Annexe 8).

Une fois ces informations acquises, nous pouvons rechercher les images satellites des années où nous ne possédons pas de carte d'occupation du sol.

2.3.2. Protocole de sélection des images satellites

Etant donné que les cultures sont à leur maximum de croissance durant la période de juin à août, il y est plus facile d'y déterminer les types de cultures présentes sur le bassin versant.

Nous avons donc sélectionné les images satellites entre le mois de mai (début des semis) et le mois d'octobre (récolte) pour les années allant de 2000 à aujourd'hui. Comme on peut le constater au tableau 1, de nombreuses années présentent des absences de données. En effet, beaucoup ne possèdent ni carte d'occupation du sol ni d'images satellites. Il est alors difficile de les traiter.

Somme toute, nous possédons quatre années où il est possible d'avoir des *témoins*. C'est-à-dire des années où il est possible de corréler la carte de l'occupation du sol avec l'image satellite correspondante. Ces *témoins* permettront, par la suite, de déterminer les zones et types de cultures sur les images satellites pour les années où nous ne disposons pas de carte d'occupation du sol. Nous aborderons cela plus en détail ultérieurement. Les années *témoins* choisies sont : 2002 (14 octobre³) et 2015 (26 octobre).

En ce qui concerne les années qui nécessitent d'être complétées, seulement 2016 possède une image satellite exploitable (Annexe 9). Nous pouvons donc effectuer notre étude sur uniquement cette année. Malgré nos recherches sur 4 satellites différents (Landsat 7, Landsat 8, EO1⁴ et ASTER), il a été difficile de trouver les images satellites d'autres années (forte couverture nuageuse en général sur les mois sélectionnés). Cependant, l'équipe de science des sols prévoit le recours au satellite français SPOT, dont les images d'archives vont devenir gratuites prochainement.

³ Date à laquelle a été prise l'image

⁴ Capteur d'essai pour préparer le Landsat 8



2.4. Traitements effectués : Vectorisation et classification supervisée

Cette phase de traitement se déroule en trois étapes.

La première correspond à la vectorisation des cartes raster de l'occupation du sol, dont celle que j'ai réalisée en 2015. Dans un second temps nous avons fusionné l'image dite panchromatique de résolution 15 m avec les 7 canaux multispectraux de 30 m (outil du logiciel QGIS / OTB : *Pan Sharpening*). De ce fait, nous aurons une amélioration de la résolution spatiale et ainsi la troisième étape de classification supervisée en sera d'autant plus efficace. Celle-ci consiste à réaliser une classification, grâce à un modèle statistique et de cartographier les types.

2.4.1. Vectorisation des données d'occupation du sol

Comme évoqué précédemment, j'ai pu réaliser, en 2015, une carte de l'occupation du sol grâce à un GPS. Cette réalisation s'est ajoutée aux autres cartes d'occupation du sol. Ces dernières sont des images raster. C'est-à-dire que l'image est composée d'une multitude de pixels ([Lillesand et al., 2004](#)).

L'utilisation d'une image raster, ou matricielle, a ses limites. En effet, pour comparer ces cartes aux données satellites, la donnée vectorielle permet de redimensionner l'image sans affecter la qualité. Et pour cause, le dessin vectoriel est recalculé à chaque nouvelle visualisation, contrairement aux images raster ([Haber, 2000](#)).

Au final, une image vectorielle est une image « mobile », que l'on peut redimensionner indéfiniment et superposer en transparence aux données satellites. À l'opposée, une image raster est une image « fixe ».

Dans le contexte ci-présent, j'ai vectorisé les cartes de l'occupation du sol de 2002 et 2015.

2.4.2. Le recalibrage des images satellites : Fusion P + XS

Pour chaque image satellite extraite depuis Earth Explorer, nous avons l'ensemble des images pour chaque canal. Ces dernières ont une résolution spatiale à 30 mètres. Cependant, parmi ces canaux, le B8 possède quant à lui une résolution spatiale à 15 mètres. Il correspond à l'imagerie **panchromatique** (P), c'est-à-dire « l'enregistrement du rayonnement dans un unique intervalle de longueur d'onde situé dans le domaine du visible » ([BELSPO](#)).

L'objectif est alors, à partir de l'image panchromatique, de « donner » de la résolution spatiale (15 mètres) aux canaux multispectraux (à 30 mètres). De cette façon, nous aurons à la fois une bonne **résolution spectrale** (multitude de bandes spectrales) mais aussi une résolution spatiale intéressante pour la détermination des cultures. Cette technique se nomme le *Pan Sharpening*.

2.4.2.1. Le sur-échantillonnage

Afin de passer d'une résolution spatiale de 30 à 15 mètres, il est nécessaire d'effectuer un sur-échantillonnage. Cela consiste à diviser un pixel avec une dimension de 30 mètres en des pixels de 15 mètres ([Mangolini et al., 1993](#)). De ce fait, nous divisons par quatre le pixel de l'image multispectrale (ou XS) - (Figure 10).

Une fois ce sur-échantillonnage réalisé, il est possible de fusionner les données multispectrales avec les données panchromatiques. Ce processus s'appelle le *Pan Sharpening*.



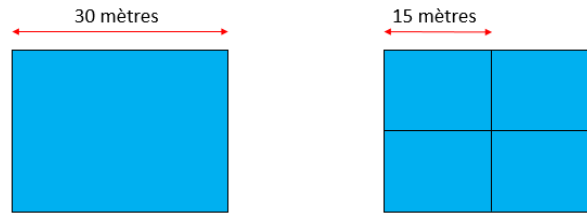


Figure 10 : Sur-échantillonnage d'un pixel.

À noter que pour avoir une résolution spatiale plus fine, il faut que le capteur reçoive plus d'énergie (Propos recueilli auprès de Marc LOINTIER). De ce fait, on utilise une bande passante dans le spectre optique beaucoup plus large que celle des canaux multispectraux.

2.4.2.2. Pan Sharpening

Avant de réaliser une fusion P + XS, l'image panchromatique est filtrée dans le domaine de Fourier ([Manzanera, 2010](#)). Nous utilisons un filtre passe-bas. Ce dernier a pour objectif d'atténuer ou d'éliminer « les hautes fréquences spatiales de l'image [...] sans modifier les basses fréquences » ([Barra et Tilmant, 2008](#)). C'est-à-dire que nous atténuons « les bruits et les détails » ([Frindel, 2014](#)).

Prenons une forêt dense d'un même type d'arbre. Les variations de l'intensité des pixels seraient très faibles, on parle de basses fréquences. Si on a une forêt fragmentée, on constaterait des changements d'intensités brutales. Dans l'espace de Fourier, on dit que la fréquence est élevée spatialement.

On cherche donc, via la **transformée de Fourier**, à limiter ces perturbations liées à ces changements d'intensités, au travers d'un filtrage ([Manzanera, 2010](#)).

Une fois ce filtrage effectué, nous pouvons réaliser la fusion P + XS. Le résultat est une image contenant l'ensemble des bandes spectrales avec une résolution spatiale de 15 mètres (Figure 11b).

Au vu des figures ci-dessous, on distingue clairement la différence de résolution spatiale. La figure 11b est plus lisse, on aperçoit beaucoup moins les pixels contrairement à la figure 11a.

Nous avons à partir de là les outils en main pour la dernière étape, la détermination des cultures sur les images satellites. Pour ce faire, il nous faut des échantillons *témoins*.



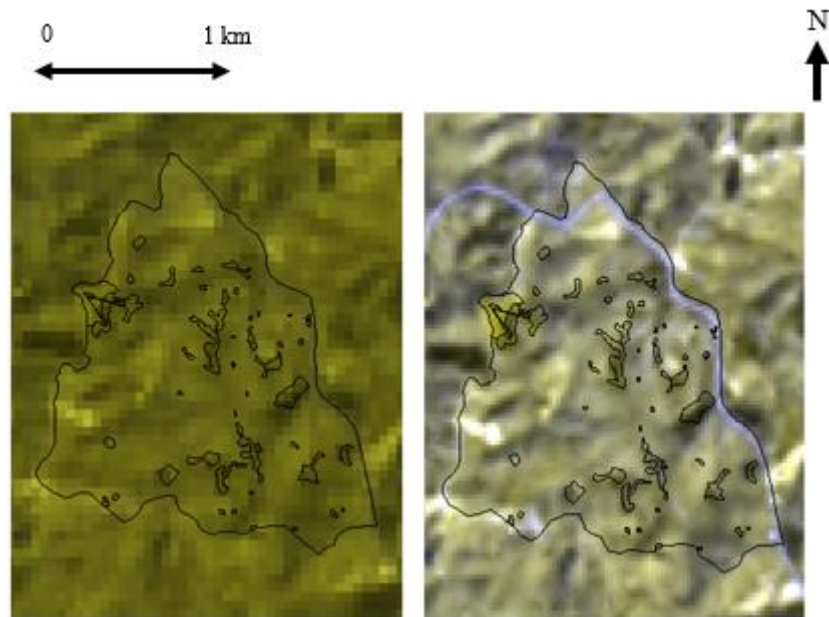


Figure 11a : Composition colorée à 30 mètres du bassin versant de Huay Ma Nai en 2015 (Outil : MultiSpec).

Figure 11b : Composition colorée à 15 mètres du bassin versant de Huay Ma Nai en 2015 (Outil : MultiSpec).

2.4.3. La classification supervisée

L'objectif de la classification d'image est de classer « automatiquement l'ensemble des pixels de l'image en classe ou thème de type d'occupation du sol » [traduction personnelle] (Lillesand *et al.*, 2004). Pour ce faire, deux étapes sont à suivre. La première est la phase de « *training stage* ».

2.4.3.1. Parcelles d'entraînement ou ROI : Region Of Interest

À ce stade, nous effectuons un paramétrage de l'outil *Semi Automatic Classification Plugin* (SCP). Grâce aux cartes de l'occupation du sol et à leur image satellite correspondante, il est possible de les superposer. Ainsi, nous pouvons déterminer quels pixels correspondent à quelles surfaces observées.

La **combinaison colorée** (RVB) utilisée ci-contre est une combinaison 5/4/3. C'est-à-dire que nous avons attribué la couleur rouge au canal 5, la couleur verte au canal 4 et la couleur bleu pour le canal 3. Le canal 5 très sensible dans l'infra-rouge (la chlorophylle reflète beaucoup dans l'infra-rouge), nous pouvons localiser de cette manière les zones végétalisées. Il est possible de réaliser une multitude de combinaisons colorées en fonction du nombre de canaux à disposition (Figures 12a & 12b). Ainsi, il est plus aisé de mettre en avant différentes classes (forêts, eau, cultures) de l'image satellite.

À partir de la photo-interprétation, et mon expérience du terrain, nous pouvons compléter au fur et à mesure la banque de données du ROI (Figure 13). Ceci, en observant les images satellites avec les cartes de l'occupation du sol.





Figure 12a : Composition colorée RVB 652.
Mise en évidence des espaces agricoles (violet).

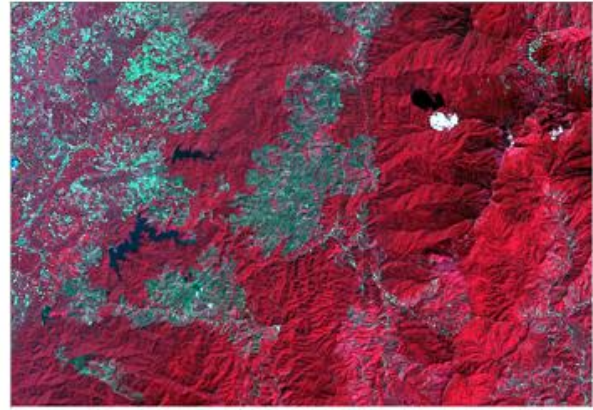


Figure 12b : Composition colorée RVB 543.
Mise en évidence du couvert forestier (rouge).

Selon [Congedo et al. \(2013\)](#), le ROI (*Region Of Interest*, ou *Training area*) est un polygone « dessiné au-dessus d'une région homogène d'une image afin de recouvrir un ensemble de pixels appartenant à la même classe de couverture terrestre » [traduction personnelle]. Ces parcelles d'entraînement permettront, par la suite, au modèle statistique de se constituer une base de données de référence.

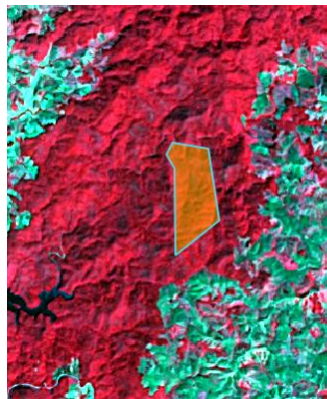


Figure 13 : Création d'un ROI (en orange) sur un couvert forestier (en rouge).
(Outil : QGIS)

Une fois avoir échantillonné des zones représentatives de chaque type de culture, nous pouvons passer à l'étape de classification

2.4.3.2. Les modèles statistiques de classification

Après avoir réalisé notre banque de donnée de signatures spectrales, il est possible de lancer le modèle statistique. Le logiciel QGIS nous propose trois techniques afin d'effectuer cette classification supervisée. Il en existe cependant une multitude de méthodes statistiques.

Celle que nous avons effectuée est la technique de « *Spectral Angle Mapping* » ou SAM. Cette méthode utilise la différence d'angle entre la réflectance du spectre de référence et celle du spectre des pixels mesurés ([Kruse et al., 1993](#)). Ces deux spectres sont assimilés à des vecteurs dans un espace à n dimensions (Figure 14), avec n valant le nombre de bandes spectrales (donc de canaux). Plus l'angle est faible et plus le pixel est proche de la valeur de référence ([Mohd Shafri et al., 2007](#)).



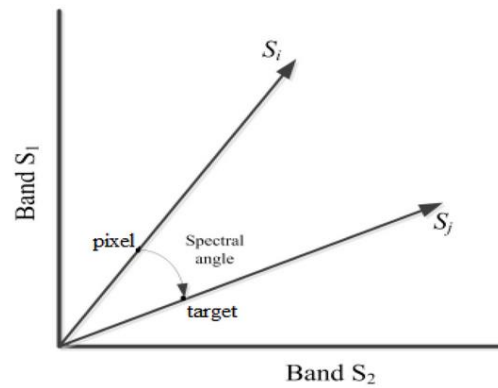


Figure 14 : Schématisation de la technique SAM.
Avec S_i , la réflectance du pixel de référence et S_j , la réflectance de la valeur mesurée.
(Source : Ren H. et al., 2014)

Nous avons privilégié cette méthode qui donne de bons résultats (Mr. LOINTIER Marc, communication personnelle).

À partir d'une image satellite où nous connaissons la localisation des cultures (ou bien grâce aux cartes de l'occupation à disposition et donc par photo-interprétation), nous réalisons des parcelles d'entraînement pour chaque classe. Ces ROIs permettent au modèle statistique d'acquérir une base de données références, laquelle sera comparée aux pixels à catégoriser.

3. Discussion et résultats

La phase de traitement des données fût longue et semée de difficultés. Néanmoins, nous sommes parvenus à produire des classifications supervisées. Il sera intéressant au cours de cette partie de discuter à la fois des résultats obtenus mais aussi des évolutions observées ainsi que des outils utilisés.

3.1. Les classifications obtenues

Après traitement des différentes images multispectrales et panchromatiques, nous sommes parvenus à effectuer une classification supervisée pour les années 2002, 2015 et 2016.

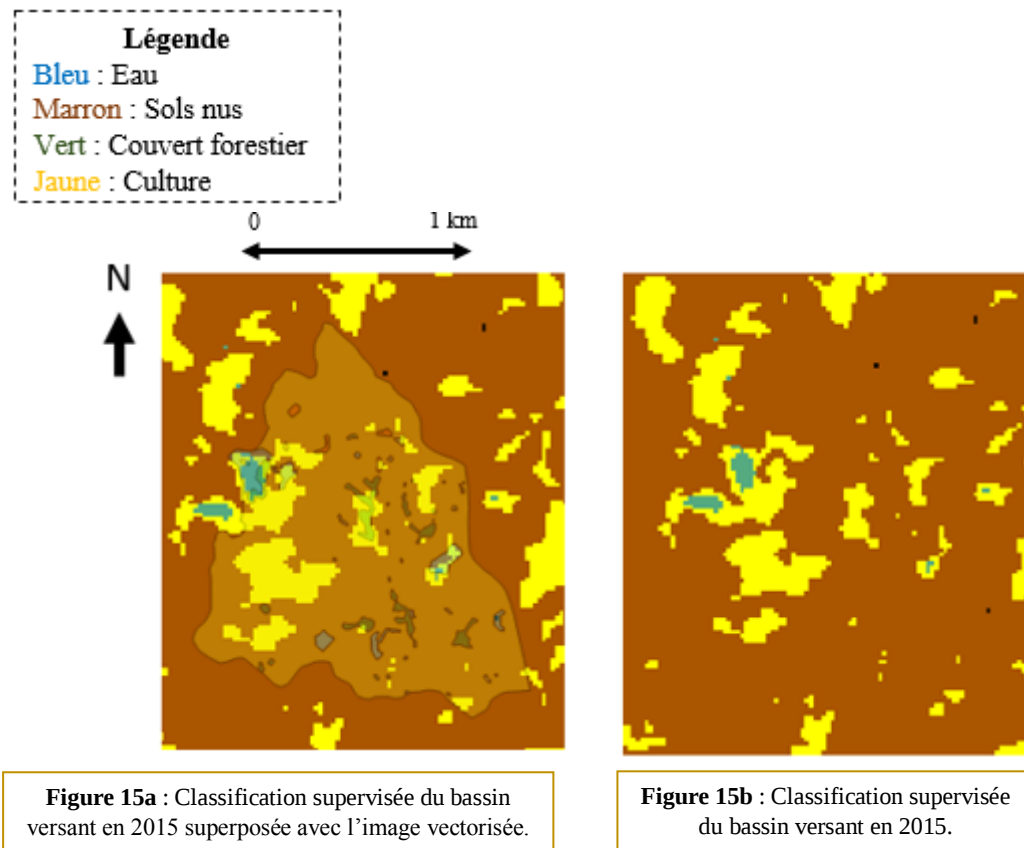
3.1.1. Année 2015

Pour effectuer la réalisation de la classification supervisée de 2015 (Figure 15b), nous avons établi 4 classes. Ces dernières sont : les forêts (vert), l'eau (bleu), les sols nus (marron) et les cultures (jaune). Ce choix des classes s'explique suite aux difficultés de distinctions des différentes cultures. Nous les avons donc groupées ensemble. Néanmoins, nous sommes parvenus à distinguer les forêts des cultures. De ce fait, il est possible d'évaluer l'emprise de ces dernières sur le couvert forestier.

Afin d'obtenir un résultat au plus près de la réalité, nous avons réalisé, au minimum, 3 ROIs pour chacune des classes.

Au regard des figures 15a et 15b, on peut constater une prédominance des sols-nus ainsi que des patches de champs de maïs. La classification supervisée révèle quelques terrains forestiers. Cependant, en comparant la production du SCP et la carte de l'occupation du sol, on constate des divergences.





Théoriquement, il aurait fallu, à partir des ROIs de 2015, effectuer une classification supervisée de 2002. Cependant, l'image satellite de 2002 a été réalisée à partir du Landsat 7 contrairement à l'image satellite de 2015 qui, quant à elle, a été réalisée à partir du Landsat 8. De ce fait, il a fallu concevoir des parcelles d'entraînement (ou ROI) pour l'année 2002.

3.1.2. Année 2002

En ce qui concerne l'année 2002 (Figure 16b), la méthodologie d'acquisition des ROIs est la même. Nous avons 4 classes : Eau (bleu), Couvert forestier (vert), sols nus (marron) et soja (rose). Le soja est une classe car son occupation du sol en 2002 est majoritaire sur les autres cultures.

De même que pour l'année 2015, nous avons, pour chaque classe, sélectionné 3 parcelles d'entraînement minimum. Il a été, là aussi, difficile de distinguer les différentes cultures. En 2002, nous avons une occupation du sol (Annexe 10) marquée par des cultures de types arbres fruitiers. Du tamarinier au longanier en passant par le manguier, le bananier et le bambou, on a essentiellement des arbres (Figure 16a). Or, la réflectance entre un couvert forestier et un couvert d'arbres fruitiers est proche. Ainsi, nous avons regroupés ensemble ces deux catégories.

En 2002, on constate une prédominance de l'occupation du sol par le soja avec une part non négligeable de couvert forestier. En ce qui concerne les sols nus, ces derniers sont moins présents en comparaison à 2015. Et pourtant, les images satellites de ces deux années ont été prises le même mois.



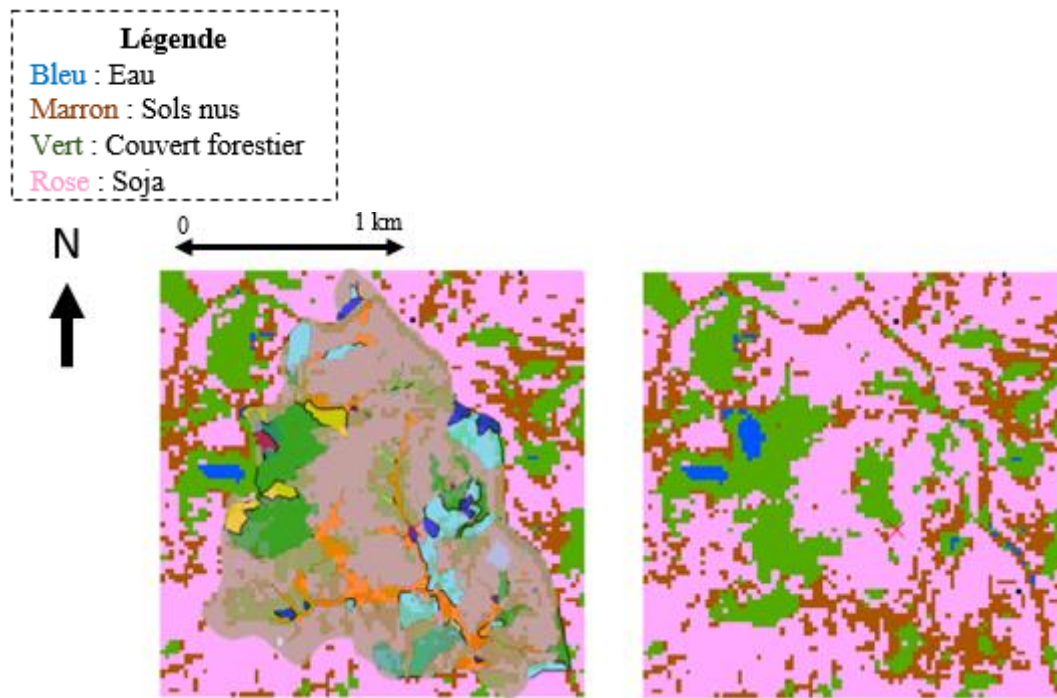


Figure 16a : Classification supervisée du bassin versant en 2002 superposée avec l'image vectorisée de 2015. (Outil : QGIS)

Figure 16b : Classification supervisée du bassin versant en 2002. (Outil : QGIS)

3.1.3. Année 2016

À partir des parcelles d'entraînement effectuées pour l'année 2015, nous avons pu réaliser la classification supervisée de l'année 2016 (Figure 17b). En effet, les images satellites de ces deux années ont été prises par le même satellite. À noter que l'image satellite de 2016 date du 5 mai.

Bien que l'image présente une qualité qui laisse à désirer (Annexe 9), l'outil SCP présente un résultat très intéressant. Et pour cause, nous pouvons constater, au vue des figures 17a et 17b, le pourtour du bassin versant. La figure 17a présente la classification supervisée de 2016 superposée avec la carte de l'occupation du sol de 2015. Au regard de cette superposition, on parvient à discerner les limites (routes) du bassin versant, en marron, sur la figure 17b.

Cette teinte correspond aux sols nus. Les codes couleurs sont les mêmes que l'année 2015. Avec donc le bleu pour l'eau, le jaune pour les cultures et le vert pour le couvert forestier.

La classification supervisée de 2016, contrairement à 2015, met plus en avant certaines classes, notamment l'eau et le couvert forestier. En comparant avec l'image satellite brute, on peut observer des correspondances. Le fait que la classification supervisée de 2016 soit plus riche en termes de détails par rapport à celle de 2015 est intéressant. Le modèle statistique est parvenu à trouver plus de résultats positifs pour certaines classes.

On peut, peut-être, expliquer ceci par la différence de qualité d'image. C'est le même satellite qui a réalisé les clichés, mais les conditions environnementales ne sont jamais les mêmes.

Autre explication, notamment concernant les eaux. En 2015, il n'y avait pas ou peu d'eau dans les ruisseaux. Par conséquent, la réponse spectrale est plus faible. Il se pourrait alors, qu'en 2016, le cliché ait pu être pris après un épisode pluviométrique.

Cependant, cela n'explique pas la différence vis-à-vis du couvert forestier. Néanmoins, il y a une bonne correspondance entre la classification supervisée de 2016 et la carte de l'occupation du sol de 2015. Par exemple, le champ de cassave (cercle rouge : Figure 17b) ressort très bien aussi bien pour la



classification de 2015 que 2016. En 2016, une parcelle de tamarin ressort (cercle violet : Figure 17b), elle aussi, bien. On la distingue, légèrement, en 2015.

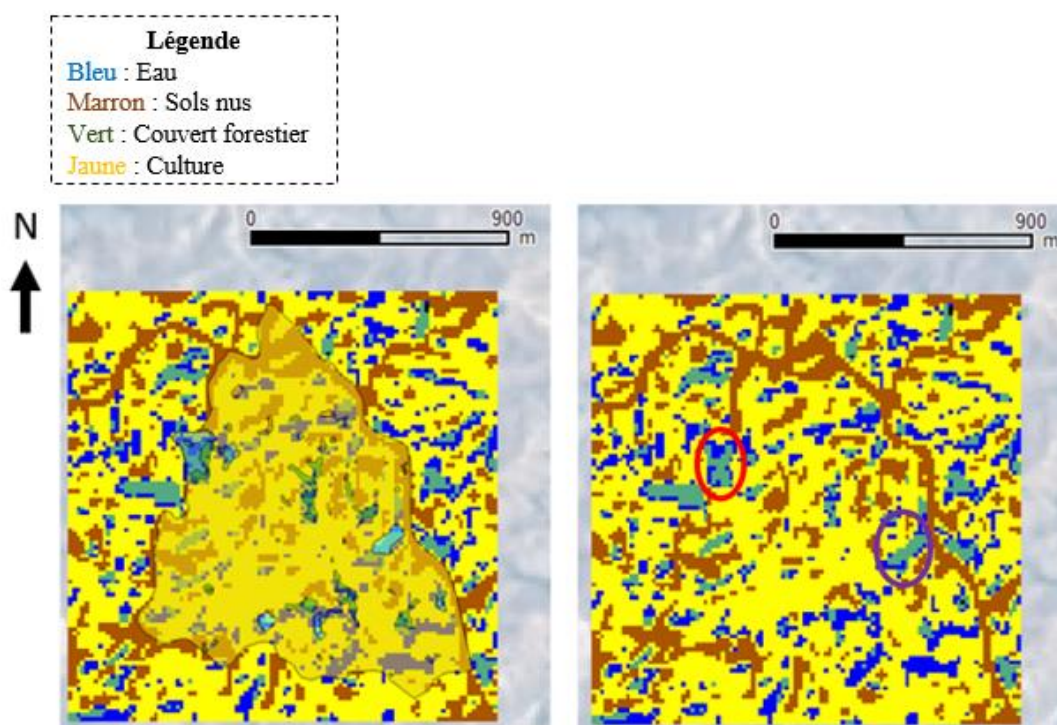


Figure 17a : Classification supervisée du bassin versant en 2016 superposée avec l'image vectorisée de 2015. (Outil : QGIS)

Figure 17b : Classification supervisée du bassin versant en 2016. (Outil : QGIS)

En somme, la classification de 2016 révèle un bassin versant similaire à celui que j'ai pu étudier l'année précédente. L'outil est concluant dans son résultat. Mais il l'est moins pour l'année 2015. Ce qui semble paradoxal. Mais il est nécessaire de rappeler que les images ne sont pas prises à la même période : octobre 2015 (récolte) et mai 2016 (semi).

3.1.4. De 2001 à 2016 : une pratique culturelle qui évolue dans le temps

Depuis l'année 2001 (Annexe 11), l'occupation du sol du bassin versant de Huay Ma Nai a beaucoup évolué. Et pour cause, cette année-là, les terres étaient occupées à plus de 60 % par des haricots mungo. On distingue des patchs de forêts (13 %), deuxième couvert en termes de superficie, de tamariniers et de jachères, principalement. Puis, l'année 2002 (Annexe 10) marque un premier tournant dans l'occupation du sol.

À cette époque, le soja occupe plus de 60 % des cultures, alors absent jusque-là. Par ailleurs, on recense une multitude de cultures diverses et variées (environ 15 types). Un deuxième tournant apparaît l'année suivante.

Et pour cause, en 2003 (Annexe 12), le maïs, après avoir occupé 2 % du territoire en 2002, s'étend sur 39 % du bassin versant. Sa surface croît au détriment de celle du soja (23 %). Cependant, on continue d'avoir une diversité dans les cultures (bananier, mangui, jachères, tamarinier, haricot vert, etc.).

À partir de 2003, le maïs ne cesse de conquérir du territoire (Figure 18). En 2004 (Annexe 13), il est cultivé sur 63 % du bassin versant. À contrario, le soja ne représente plus que 2 % des cultures.



Nous nous retrouvons dans le scénario inverse de 2002. En l'espace de 2 ans, le paysage de Huay Ma Nai a complètement changé.

Néanmoins, des couverts restent préservés, notamment suite à leur localisation. Par exemple, le bambou, localisé le long des cours d'eau, voit sa surface très peu évoluée ($\approx 10\%$).

Lorsque l'on se projette 8 ans plus tard, en 2012, le maïs occupe plus de 90 % de la surface du bassin versant. Le bambou n'est présent que sur 0,4 % du territoire tandis que les forêts voient leur occupation du sol régresser de 7 % entre 2004 et 2012. Elles sont visibles sur 4 % du bassin versant Huay Ma Nai.

En 2014 et 2015, le paysage est bien différent de celui de 2002. Le maïs occupe la quasi-totalité du bassin versant. La diversité des cultures n'est plus la même. On ne retrouve plus de soja, plus de manguiers ni même d'haricots verts.

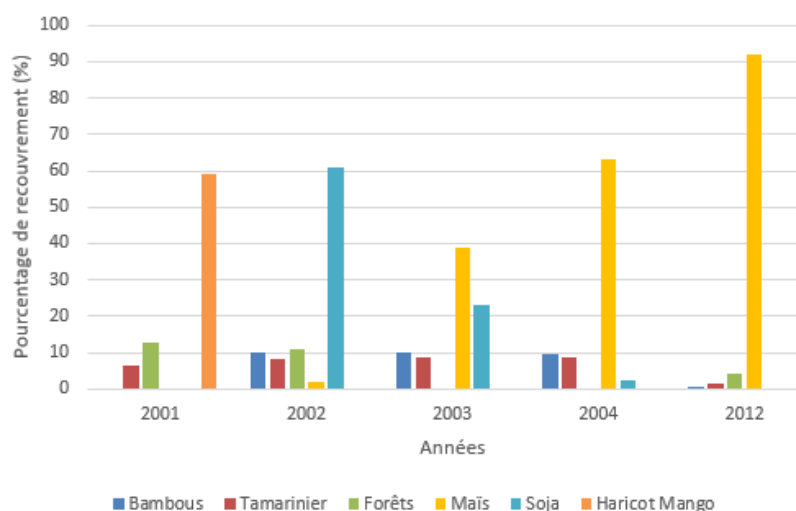


Figure 18 : Evolution de l'occupation du sol de Huay Ma Nai entre 2001 et 2012.

La figure ci-dessus montre l'évolution des trois cultures qui ont pu prédominer sur le bassin versant entre 2001 et 2014 mais aussi d'autres cultures minoritaires en termes de surface de recouvrement.

Je ne connais pas les pratiques cultures dans les années antérieures, mais en 2015, la mécanisation a marqué la physionomie de Huay Ma Nai. En effet, on observe des lignes de culture allant dans le sens de la pente. Ainsi, à chaque épisode pluvieux auxquels j'ai pu assister, de nombreuses ravines venaient serpenter le long des cultures. Des pieds étaient sortis de terre (Figure 19). Par conséquent, la charge sédimentaire transportée par le ruissellement s'est accrue.



Figure 19 : Ravines le long des plants de maïs.



Des cuves sont situées à l'exutoire de chaque sous-bassin. Durant l'été 2015, l'équipe thaïlandaise a dû vider (Figure 20) 5 fois en 2 mois les cuves d'environ 14 mètres cubes (Figure 21).

Ces interventions n'étaient pas aussi fréquentes par le passé, selon les dires des collègues thaïlandais.

En somme, l'occupation du sol a beaucoup évolué en 15 ans, et avec elle, le bassin versant en lui-même. Ceci peut s'expliquer par des changements dans la demande de la société mais aussi par le changement des pratiques culturelles des agriculteurs, en réponse aux demandes. Outre l'impact sur la physionomie du bassin versant, les mutations du couvert végétal et les interventions de l'Homme (terrasses, mécanisation, etc...) ont affecté d'autres unités du bassin versant, notamment l'hydrologie.



Figure 20 : Intervention après épisode pluvieux.



Figure 21 : Cuves après intervention.

Nonobstant, les observations portées sur l'occupation du sol à partir de la classification supervisée est à nuancer. Et pour cause, la superposition des cartes de l'occupation du sol avec les réalisations faites à partir du SCP divergent sur certains points. Revenons sur les outils utilisés afin de comprendre ces divergences.

3.2. *La fabrication de la P + XS*

Cette étape du processus de classification est fondamentale. Elle permet donc d'obtenir des images satellites avec une résolution spatiale intéressante (15 mètres) grâce aux images panchromatiques ainsi qu'une résolution spectrale riche et cela grâce aux images multispectrales.

Les P + XS semblent donner de bons résultats. Et pour cause, la superposition des P + XS est correcte. On n'a pas remarqué de décalage entre les images multispectrales et les images panchromatiques.

Un œil entraîné peut, à partir des compositions colorées formées depuis ces P + XS, parvenir à déterminer des zones particulières. Dans mon cas, le fait d'avoir été sur le terrain, l'été dernier, m'a permis d'identifier plus facilement certains secteurs et d'associer les pixels aux cultures correspondantes.

Cependant, le décalage entre la période où j'ai effectué la carte de l'occupation du sol et la date à laquelle fût prise l'image satellite rend difficile le travail. Et pour cause, dans le cas de l'année 2015, l'image satellite d'étude date d'octobre alors que la carte de l'occupation du sol date de mi-juillet / début août. Entre temps, les agriculteurs ont pu faire la récolte. Ceci explique pourquoi nous avons regroupé l'ensemble des cultures en 2015.

Mais nous verrons cette problématique dans la suite de la discussion.



3.3. La classification supervisée, un outil performant ?

Au vue des images obtenues, les classifications supervisées réalisées présentent des divergences avec la carte de l'occupation du sol correspondante.

On peut expliquer ces différences à travers deux points. Tout d'abord, l'étude réalisée est une étude diachronique. De plus, pour une même année, il y a des décalages dans le temps entre le moment de la mise en forme de la carte de l'occupation du sol (juillet/août 2015) et la réalisation de l'image satellite (26 octobre 2015). On a pu remarquer ce détail notamment pour l'année 2015. Une bonne partie de l'image satellite est composée de sols nus contrairement à la carte de l'occupation du sol. À noter que au moment de mon départ (le 22 août 2015), les plants de maïs mesuraient plus de 1,85 mètre, ils étaient prêts à être récoltés.

Outre le décalage dans le temps, la résolution des images est une autre limite dans l'application de la classification supervisée. En effet, grâce à la fusion P + XS, nous sommes parvenus à acquérir des données avec une résolution spatiale de 15 mètres. Cependant, comme a pu le constater, les cultures ont été fragmentées spatialement sur le bassin versant et qui plus est, ont vu leur surface diminuer au détriment du maïs. Par exemple, en 2015, l'emprise des bananes sur le bassin versant était très faible. Je pouvais faire le tour en quelques pas, de même pour certaines cultures de tamariniers. Or avec une résolution spatiale de 15 mètres, la diversité culturelle est affaiblie par la prédominance des autres cultures majoritaires aux alentours. Et pour cause, ayant donc une faible superficie, leur signature spectrale a été additionnée avec celle du maïs, par exemple. Or la valeur du compte numérique du pixel est la résultante des réflectances. Donc, on a une perte de l'information.

Cependant, comme dit précédemment, les chercheurs de l'IRD auront la possibilité d'accéder à une nouvelle source de données. Les images du satellite SPOT seront prochainement gratuites.

En attendant et en vue de minimiser la perte de ces informations, il est possible de réaliser un maximum de parcelles d'entraînement pour chaque classe. De cette manière, le modèle statistique acquiert une plus grande richesse d'informations pour l'ensemble des classes. En effectuant une fusion des ROIs, avec QGIS, de chaque entité (ex : Lac) d'une même classe (ex : Eau), on obtient un ROI avec une valeur pondérée.

Néanmoins, lorsque nous nous retrouvons dans une situation telle que la nôtre, où les parcelles occupent une surface bien inférieure à la dimension d'un pixel, cette alternative est limitée.

Nous avons réalisé un maximum de ROI pour chaque classe, en moyenne 4. Malgré cela, on a pu constater des anomalies qui nous ont limités dans le travail.

Il est important de rappeler les limites de la télédétection. En effet, les signatures spectrales sont propres à une classe mais la lecture de cette dernière n'est pas la même. Chaque satellite est paramétré. Par ailleurs, des classes différentes, par exemple les routes et les sols nus, peuvent présenter un spectre proche. Ainsi, le modèle statistique rencontre des problèmes dans l'interprétation de la donnée. De plus, les conditions environnementales ne sont jamais les mêmes.

Cependant, il est mis en place sur le satellite SENTINEL (projet européen, « copernicus »), deux canaux qui auront une résolution spatiale de 60 mètres et dédiés à la correction atmosphérique.



4. Conclusion

Ce stage a permis à la fois de compléter, avec les outils à disposition, une partie de la banque de données sur la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de Huay Ma Nai. Mais aussi, de découvrir la télédétection.

En réponse aux objectifs du stage, nous sommes parvenus à réaliser une classification supervisée de l'année 2016. Cette dernière a été donc obtenue à partir de l'outil SCP de QGIS. Concernant les autres années, nous avons été limités par les données à notre disposition. Et pour cause, comme expliqué précédemment, parmi les années sans carte d'occupation du sol (2005 à 2011 puis 2013 et 2016), une seule avait une image satellite analysable. Malgré la quête de données sur quatre satellites différents, aucun ne nous permettait de compléter les années manquantes.

Néanmoins, nous sommes parvenus à analyser la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de Huay Ma Nai. Ce dernier a été marqué par deux tournants majeurs depuis les années 2000. Les années 2002 et 2003 ont été marquées par un renversement dans l'occupation du sol. En effet, après une présence d'haricot mungo sur plus de 60 % du bassin versant en 2001, ce dernier se voit être succédé par le soja sur une superficie égale en 2002 puis le maïs en 2003 avec 63 % d'occupation du sol. À partir de cette année, le maïs est resté la culture majoritaire du bassin versant, au détriment d'autres cultures comme les tamariniers ou encore les forêts.

Outre les évolutions culturelles du bassin versant, ce dernier est affecté par les aménagements de l'Homme.

Et pour cause, outre la volonté de corrélérer le comportement hydrologique du bassin versant avec la dynamique de l'occupation du sol, la suite du projet sera menée dans une optique particulière.

Une étude comparative de deux sous bassins (l'un avec des terrasses et l'autre moins aménagé) sera réalisée par la suite. Ceci, additionné à l'étude de l'occupation du sol, permettra d'avoir une vision globale du comportement hydrologique du bassin versant. Et ainsi, de rechercher des solutions aux maux révélés.

En dernière analyse, ce stage a été une ouverture vers un domaine des sciences que je ne connaissais pas. Je suis d'autant plus content d'avoir pu découvrir cette technique, que je l'étudierai au cours de mon prochain voyage d'étude en Autriche, à l'Université des Ressources Naturelles et des Sciences de la Vie à Vienne (BOKU⁵)

La télédétection est un outil en pleine expansion, son utilité est grandissante. Dans le contexte qui est celui d'aujourd'hui (déforestation, changement climatique, disparition progressif des barrières de corail, urbanisation au dépend des campagnes, etc...), cette technique est un moyen d'illustrer et d'étudier les évolutions de l'impact de l'Homme sur l'environnement à différentes échelles.

Outre les aménagements et l'évolution des pratiques agricoles, l'utilisation d'engrais (à la main) est un risque supplémentaire dans la préservation de l'environnement ainsi que de la santé des agriculteurs.

Après une première expérience aventureuse en Thaïlande avec l'IRD, cette seconde immersion dans le monde de la recherche est venue compléter mon apprentissage. En effet, ces deux années m'ont permis d'acquérir une rigueur scientifique mais aussi des connaissances sur les préoccupations environnementales du monde d'aujourd'hui.

⁵ Universität für Bodenkultur



Lexique

Capteur : Instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée et qui délivre un signal électrique correspondant et mesurable.

Composition colorée : Représentation significative obtenue par une ou plusieurs combinaisons de couleurs (Selon Paul et al, 1982). En d'autres termes, la composition colorée à associer à chacune des couleurs primaires (rouge, vert, bleu), un canal (donc une bande spectrale).

Transformée de Fourier : Mathématiquement l'application de la transformée de Fourier permet de passer d'une fonction à une autre. Concrètement, dans le cas ci-présent, cette transformée permet de passer du domaine spatiale (image) ou temporel au domaine fréquentiel. Dans ce dernier, on effectue le filtre passe-bas. Puis, on réalise une transformée de Fourier inverse pour revenir dans le domaine spatial ou temporel [Définition personnelle].

Emulsion photographique : Couche(s) sensible(s) coulée(s) (et superposées s'il y en a plusieurs) sur un même support d'émulsion.

Facteur de contraste : Nombre déterminé par la pente maximale de la courbe caractéristique de l'émulsion traitée, et qui exprime le rapport existant entre le contraste de l'image photographique (négative ou positive) et ceux du sujet photographié.

Signature spectrale : Quantité d'énergie émise ou réfléchie, d'un objet en fonction de la longueur d'onde, qui lui est propre.

Spectre électromagnétique : Il correspond à l'ensemble des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou de leur énergie (*Source : UVED*).

Rayonnement électromagnétique : Propagation, à la vitesse de la lumière, de l'énergie sous forme d'ondes vectorielles transversales qui interagissent avec la matière de façon ondulatoire, tantôt corpusculaire selon la longueur d'onde du rayonnement.

Réflectance : Rapport de l'énergie réfléchie par un milieu matériel à l'énergie incidente.

Résolution spatiale : Elle correspond à la taille réelle du plus petit élément représenté dans un jeu de données (*Source : EMSE*)

NB : Les définitions, sauf celles indiquées, sont tirées de la référence suivante.

< **Paul S., Alouges A., Bonneval H., Pontier L.**, 1982. Dictionnaire de télédétection aérospatiale. MASSON, Paris. >



Références

Bricquet J.P., Janeau J.L. 2005. MSEC: An Innovative Approach to Soil Erosion Management. Erosion and land use changes in Northern Thailand: results of a four years study on a small watershed. CD-Rom IRD Thailand editions. 179 Wireless Road - Lumpini, Pathumwan – Bangkok 10330 – Thailand

Barnaud. C., 2004. Erosion des sols et systèmes agraires dans les hautes terres du nord de la Thaïlande – Une approche de la complexité par une modélisation d’accompagnement, Thèse, Université Paris X-Nanterre.

Hussein El Hage H., CHARBEL L., TOUCHART L., « Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqôra », *Physio-Géo*, Volume 9 | -1, pp. 141-156.

Roose, E. Les terrasses antiérosives en Afrique : typologie, efficacité, limites et améliorations. In : Actes de les jornades sobre terrasses i prevencio de riscos naturals. Palma de Majorque : Consell de Mallorca, 2006, p. 105-118. Jornadas sobre Terrasses i Prevencio de Riscos Naturals, Palma de Majorque (ESP), 2006/09/14-16.

Bouchet H., 2003. Place et rôle des agriculteurs et attentes de la société. Rapport, Conseil économique et social, 124 p.

Trébuil G., Hossain M., 2000. MUTATIONS DE L'AGRICULTURE EN ASIE DU SUD-EST. *Revue Tiers Monde*, Vol : 41, No. 162, (avril-juin 2000), pp. 277-299

MSEC. Thailand – Maeyom Watershed [en ligne]. Disponible sur : < <http://msec.obs-mip.fr/Stations-and-systems/Maeyom-watershed> > (consulté le 31.07.2016)

Maglinao, A. R., Valentin, C., 2003. Catchment approach to managing soil erosion in Asia. In Harwood, R. R.; Kassam, A. H. (Eds.), Research towards integrated natural resources management: Examples of research problems, approaches and partnerships in action in the CGIAR. Rome, 2003, pp.21-46.

Lillesand T. M., Kiefer R., Chipman J., 2004. Remote sensing and interpretation image. WILEY, United States of America, 5^{ème} édition.

Haber E - Laboratoire de cartographie appliquée - IRD. Qu'est-ce qu'un système d'information géographique [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.cartographie.ird.fr/publi/documents/sig1.pdf> > (consulté le 21.07.2016).

Kamel S. Cours Télédétection ECO II [en ligne]. Disponible sur : < http://www.e-se.u-psud.fr/IMG/pdf/cours_teledec.pdf > (consulté le 13.05.2016).

BELSP0. Qu'est-ce que la télédétection [en ligne]. Disponible sur : < <http://eoedu.belspo.be/fr/guide/deftele.asp?section=1> > (consulté le 07.06.2016).

Paul S., Alouges A., Bonneval H., Pontier L., 1982. Dictionnaire de télédétection aérospatiale. MASSON, Paris.



UVED – ENVCAL. Suivi de l'environnement par télédétection [en ligne]. Disponible sur : < <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/index.html> > (consulté le 10.07.2016).

ENSG - De Joinville O. Introduction à la télédétection [en ligne]. Disponible sur : < <http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=29> > (consulté le 17.05.2016).

NASA. NASA Science Missions [en ligne]. Disponible sur : < <http://science.nasa.gov/missions/landsat-7/> > (consulté le 06.07.2016).

Académie de Rennes. Images satellites [en ligne]. Disponible sur : < http://www.ac-rennes.fr/pedagogie/svt/applic/images_sat/ima_sat/ima_sat.htm > (consulté le 24.07.2016).

CNES. The ORFEO Tool Box Software Guide [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.orfeo-toolbox.org/packages/OTBSoftwareGuide.pdf> > (consulté le 15.07.2016).

Mangolini M., Ranchin T., Wald L., 1993. Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P), et d'images radar. De l'optique au radar, les applications de SPOT et ERS, 1993, Paris, France. Cépaduès-Editions, Toulouse, 1993 pp.199-209.

Manzanera A. (2014). Traitement d'images et vision artificielle [en ligne]. Cours. ENSTA, 54 p. Disponible sur : < <http://perso.ensta-paristech.fr/~manzaner/Cours> > (consulté le 15.07.2016).

Barra V., Tilmant C. (2008). TP2 – Filtrage d'image dans le domaine fréquentiel [en ligne]. Cours. ISIMA, 5 p. Disponible sur : < <http://www.isima.fr/~vbarra/IMG/pdf/TP3.pdf> > (consulté le 18.07.2016).

Frindel C. (2014). Traitement d'images – Convolution spatiale [en ligne]. Cours. CREATIS, 50 p. Disponible sur : < https://www.creatis.insa-lyon.fr/~frindel/Cours_ANIMAG/Cours_TSAI2.pdf > (consulté le 31.08.2016)

Fritsch Jean-Marie, 1995. Occupation des sols et régimes hydrologiques : les enseignements des bassins versants guyanais. *Annales de Géographie*, t. 104, n°581-582, 1995. pp. 26-63.

Congedo L., Munafo M., Macchi S. (2013). *Investigating the Relationship between Land Cover and Vulnerability to Climate Change in Dar es Salaam. Rapport, Rome : Sapienza University.* Disponible sur : < http://www.planning4adaptation.eu/Docs/papers/08_NWP-DoM_for_LCC_in_Dar_using_Landsat_Imagery.pdf > (consulté le 22.07.2016).

Mohd Shafri H., Suhaili A., Mansor S., 2007. The performance of maximum likelihood, spectral angle mapper, neural network and decision tree classifiers in hyperspectral image analysis. *Journal of Computer Science*, vol. 3 (6), ISSN 1549-3636: 419-423.

Kruse, F. A., A. B. Lefkoff, J. B. Boardman, K. B. Heidebrecht, A. T. Shapiro, P. J. Barloon, and A. F. H. Goetz, 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 44 : 145 - 163.

Ren R., Wang Y. L., Huang M. Y., Chang Y. L., Kao H. M., 2014. Ensemble empirical mode decomposition parameters optimization for spectral distance measurement in hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing*, vol. 6 (3) : 2069-2083.

Lillesand T. M., Kiefer R. W., 1987. Remote sensing and image interpretation. WILEY, Chichester , n°8.



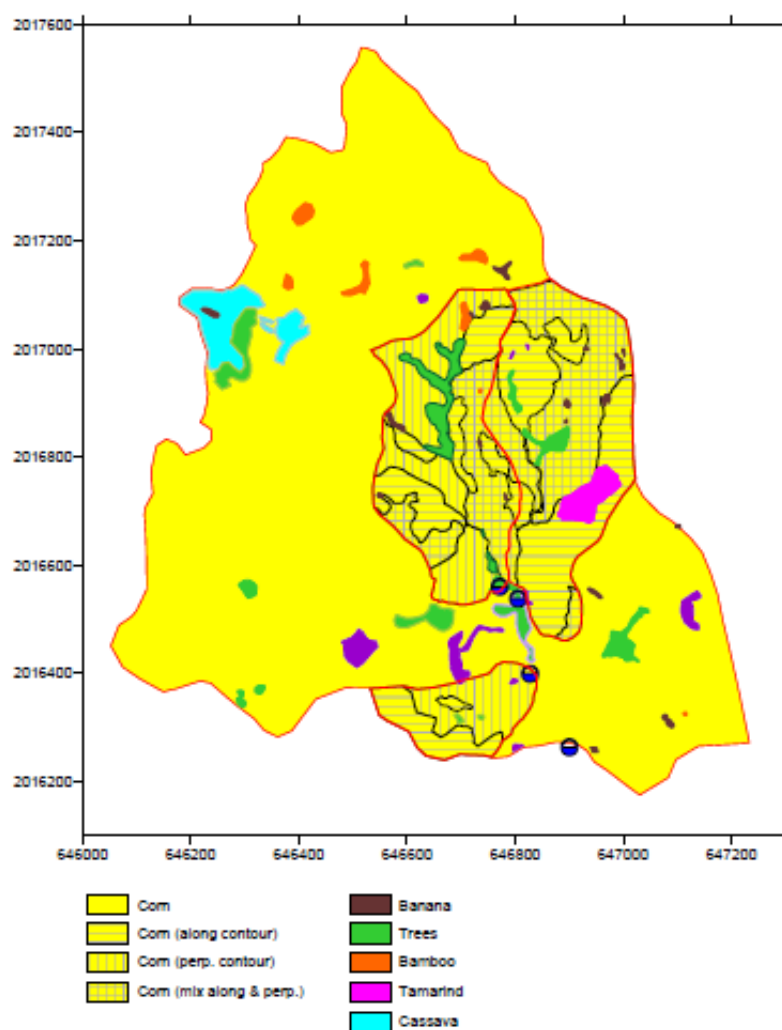
Tableaux et figures

- Fig. 1 – Classification supervisée de 2016 – Partie Préambule
- Fig. 2 – Principe de la classification supervisée – Partie Préambule
- Fig. 3 – Terrasse dégradée par l'érosion – p.2
- Fig. 4 – Localisation du bassin versant de Huay Ma Nai – p.3
- Fig. 5 – Carte des pentes déduites du MNT du bassin versant de Huay Ma Nai – p.4
- Fig. 6 – Profil des terrasses du sous-bassin n°1 – p.5
- Fig. 7 – Signature spectrale du surfaces naturelles – p.6
- Fig. 8 – Composition d'une image satellite – p.6
- Fig. 9 – Histogramme d'une image satellite et son facteur de contraste – p.7
- Fig. 10 – Sur-échantillonnage d'un pixel – p.9
- Fig. 11a – Composition colorée à 30 mètres du bassin versant de Huay Ma Nai en 2015 – p.10
- Fig. 11b – Composition colorée à 15 mètres du bassin versant de Huay Ma Nai en 2015 – p.10
- Fig. 12a – Composition colorée RVB 652. Mise en évidence des espaces agricoles – p. 11
- Fig. 12b – Composition colorée RVB 543. Mise en évidence du couvert forestier – p. 11
- Fig. 13 – Création d'un ROI (en orange) sur un couvert forestier (en rouge) – p. 11
- Fig. 14 – Schématisation de la technique SAM. Avec S_i , la réflectance du pixel de référence et S_j , la réflectance du de la valeur mesurée – p.12
- Fig. 15a – Classification supervisée du bassin versant en 2015 superposée avec l'image vectorisée – p.13
- Fig. 15b – Classification supervisée du bassin versant en 2015 – p.13
- Fig. 16a - Classification supervisée du bassin versant en 2002 superposée avec l'image vectorisée de 2015 – p.14
- Fig. 16b – Classification supervisée du bassin versant en 2002 – p.14
- Fig. 17a – Classification supervisée du bassin versant en 2016 superposée avec l'image vectorisée de 2015 – p.15
- Fig. 17b – Classification supervisée du bassin versant en 2016 – p.15
- Fig. 18 – Evolution de l'occupation du sol de Huay Ma Nai entre 2001 et 2012 – p.16
- Fig. 19 – Ravines le long des plants de maïs – p.17
- Fig. 20 – Intervention après épisode pluvieux – p.17
- Fig. 21 – Cuves après intervention – p.17

Tab. 1 - Récapitulatif des années avec ou sans carte de l'occupation du sol et images satellites – p. 8

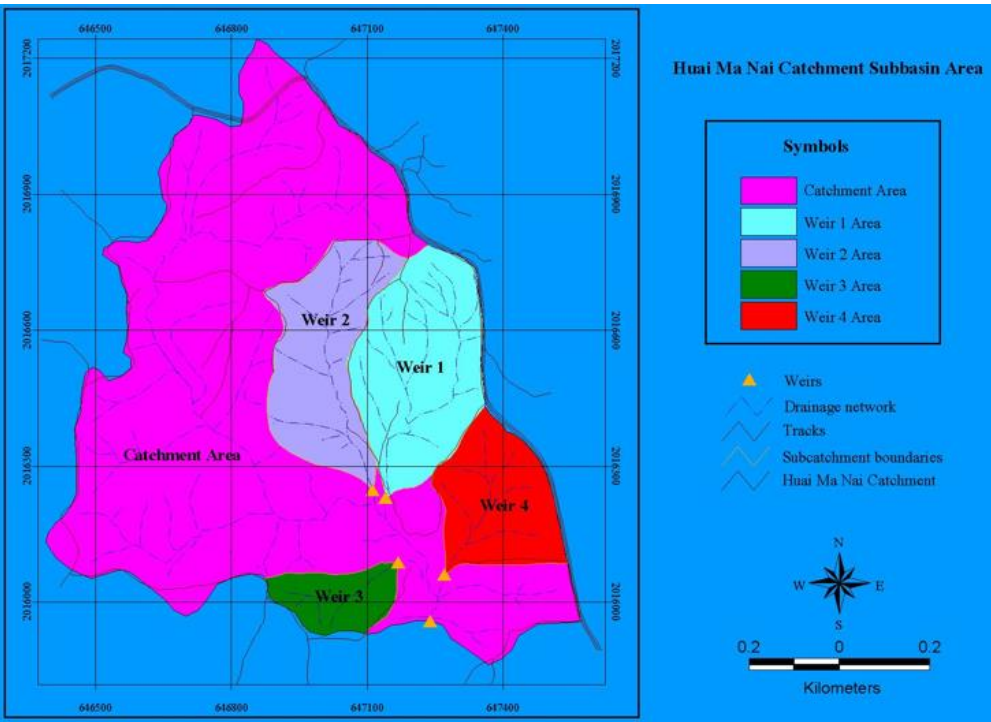


Annexes

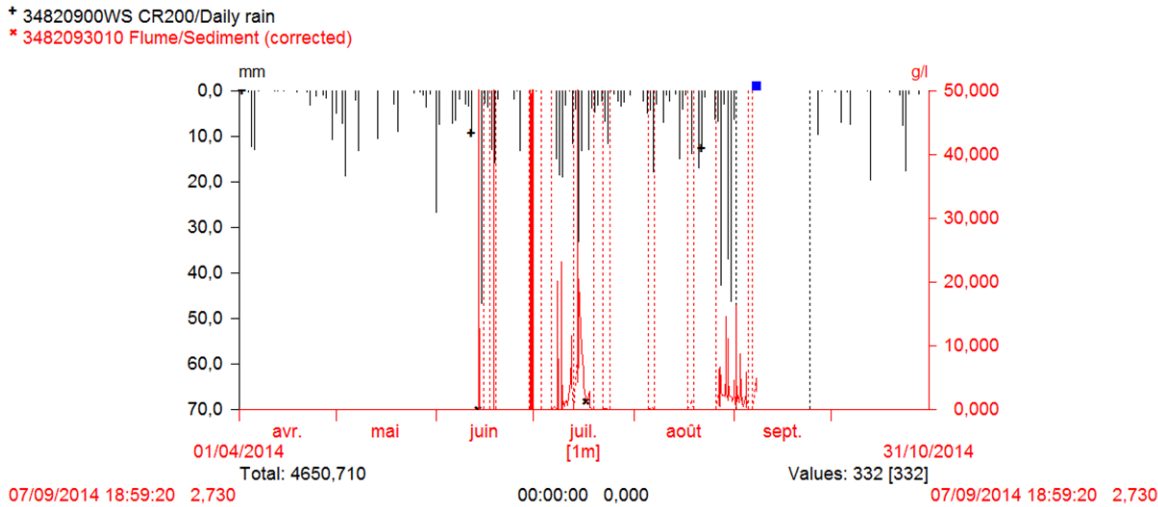


Annexe 1 : Carte de l'occupation du sol 2015 du bassin versant de Huay Ma Nai.
(Outil : Surfer)



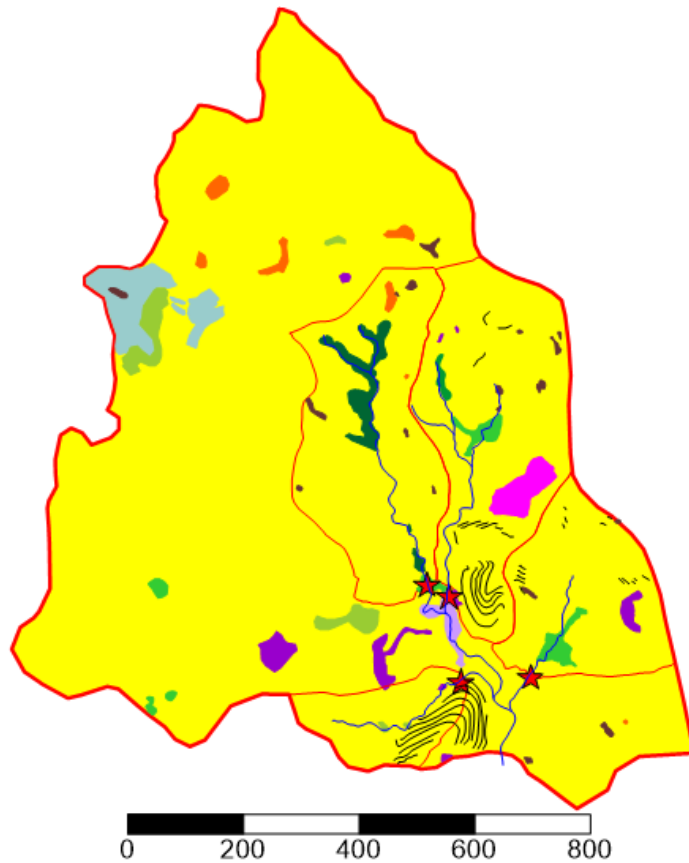


Annexe 2 : Subdivision du bassin versant de Huay Ma Nai
(Source : Bricquet et Janeau, 2005)

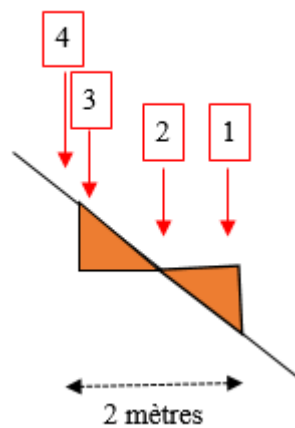


Annexe 3 : Sédiments en suspension en fonction de la pluviométrie journalière
(Outil : HYDRAS)





Annexe 4 : Localisation des tracés au GPS des terrasses.
(Outil : Surfer)



Annexe 5 : Protocole de mesure des terrasses à partir du théodolite.

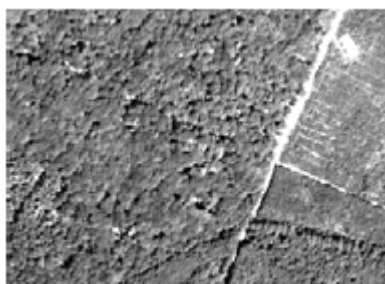


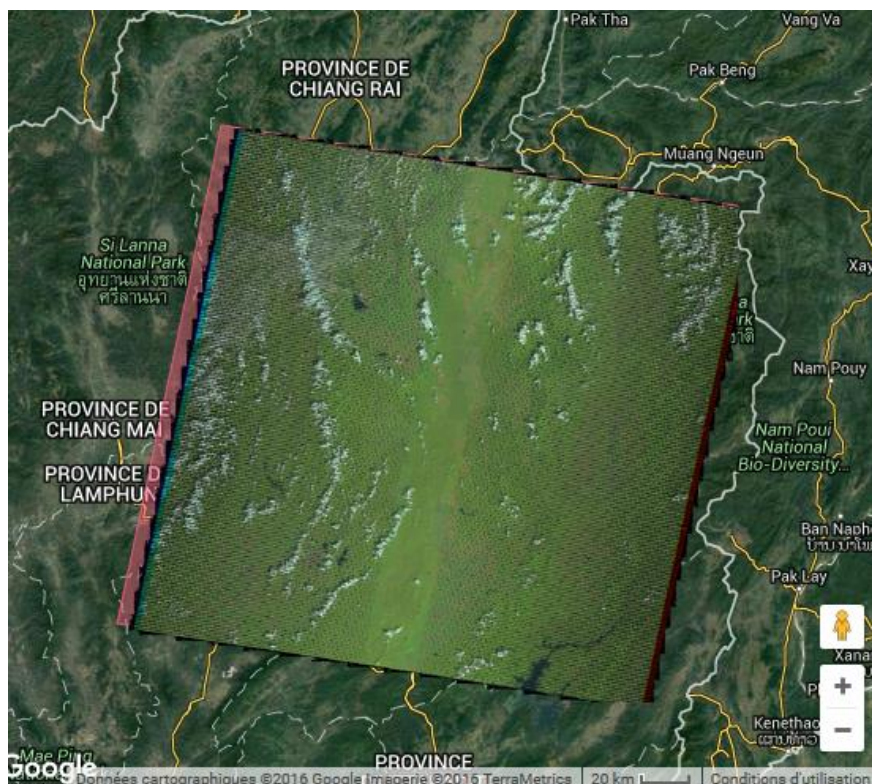
Image en 8 bits : 0-255



Image en 1 bits : 0-1

Annexe 6 : Codage en 8 bits (image de gauche) et codage en 1 bit (image de droite).
(Source : KAMEL, 2005)



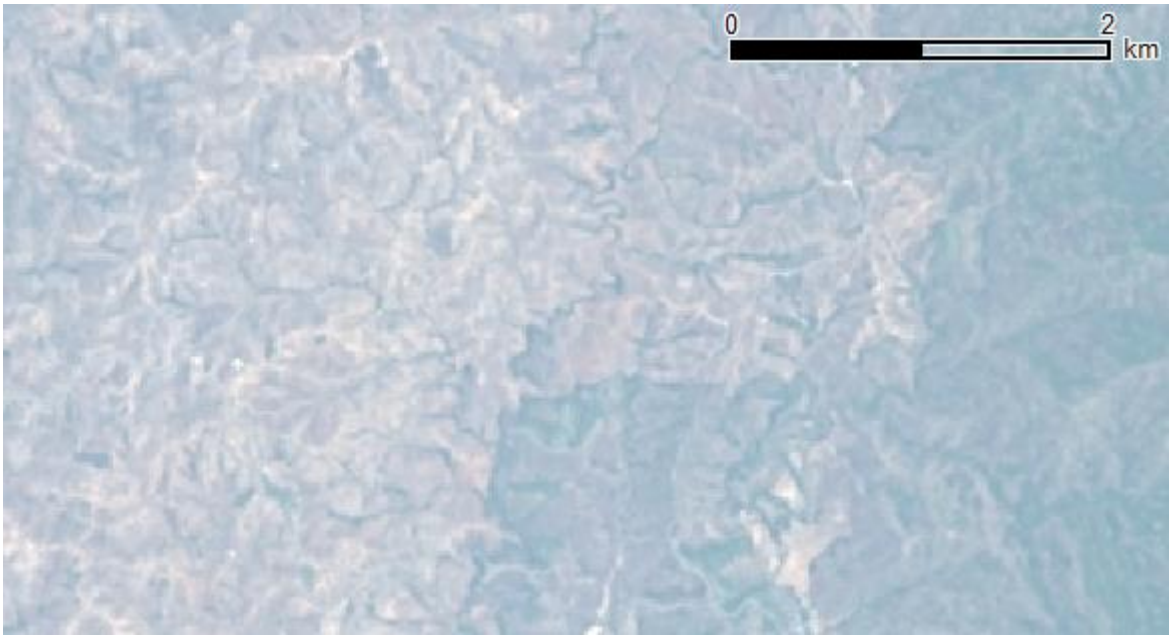


Annexe 7 : Image satellite du Landsat 7, le 19 octobre 2003.
(Source : EarthExplorer)

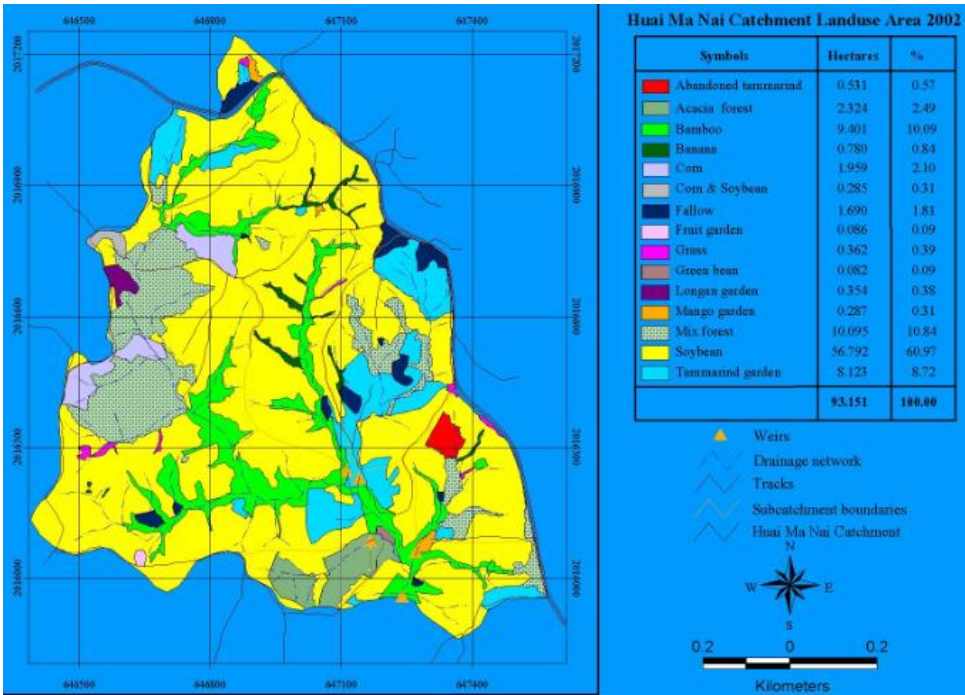
Landsat 8 Bands	Wavelength [micrometers]	Resolution [meters]
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 (resampled to 30)
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 (resampled to 30)

Annexe 8 : Différents canaux du Landsat 8.
(Source : USGS)



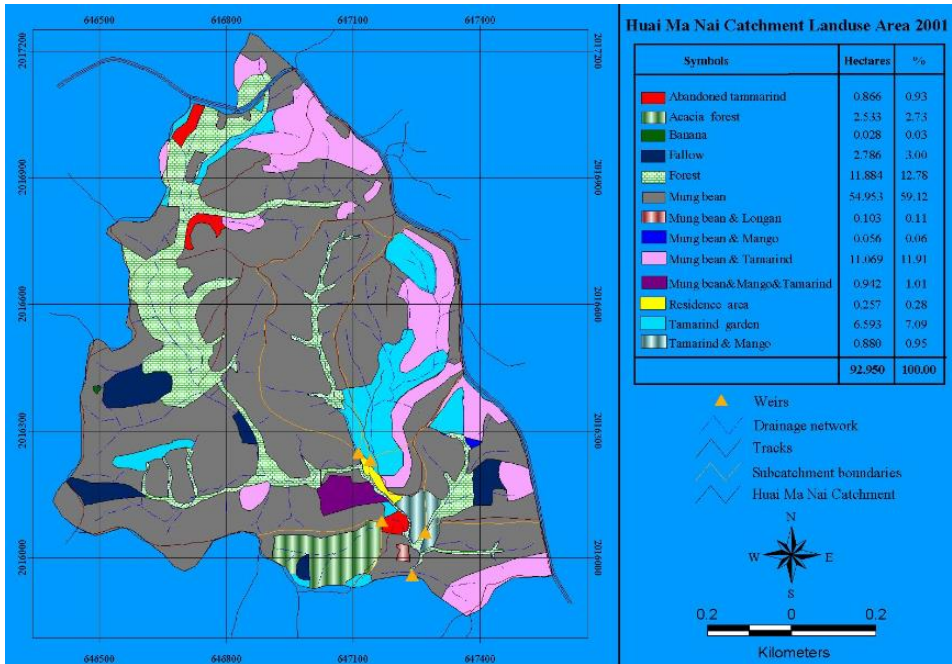


Annexe 9 : Image satellite du Landsat 8, le 5 mai 2016.
(Source : Earth Explorer)

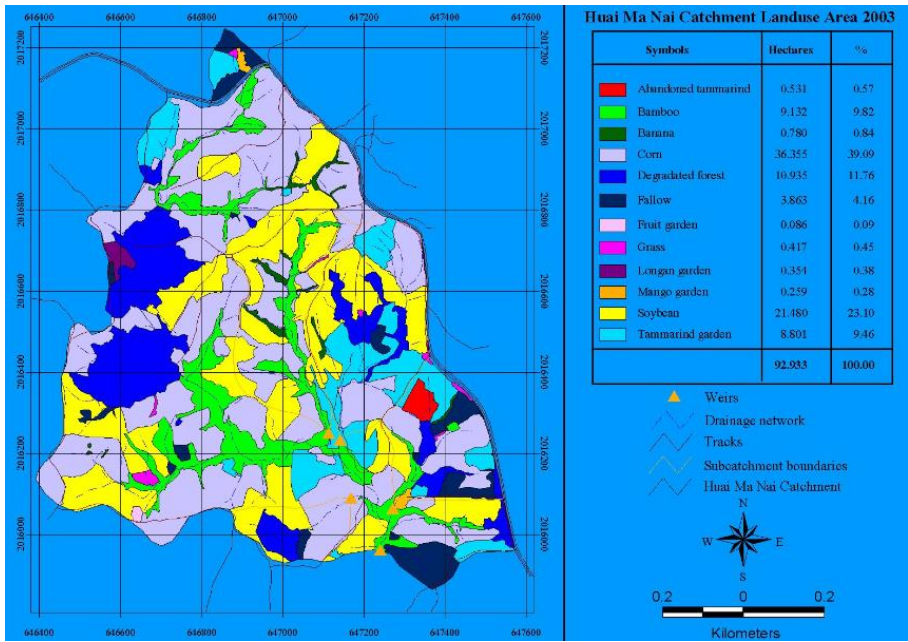


Annexe 10 : Carte de l’occupation du sol en 2002.
(Source : MSEC)



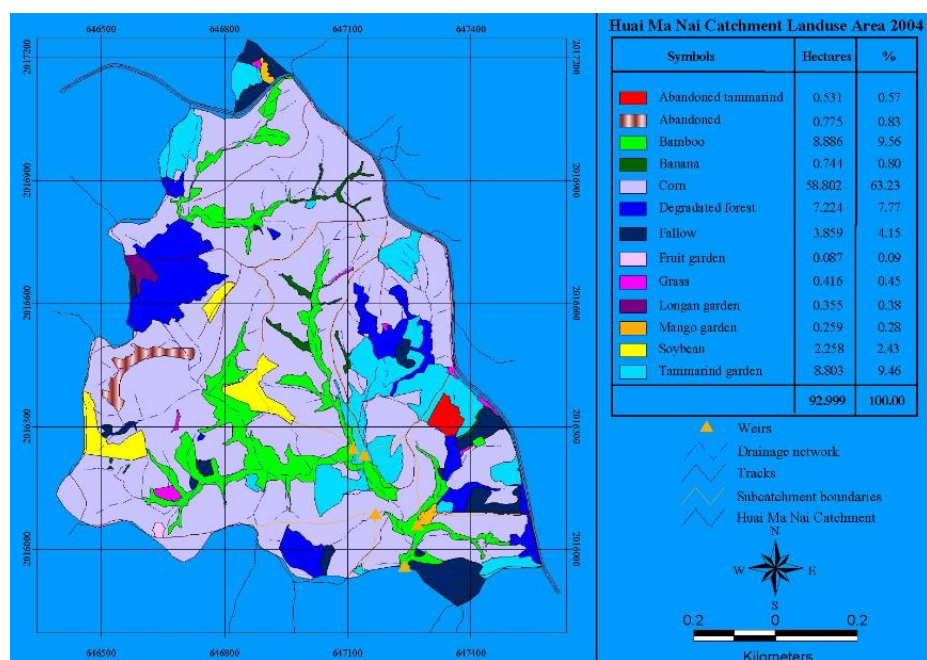


Annexe 11 : Carte d’occupation du sol en 2001
(Source : MSEC)



Annexe 12 : Carte d’occupation du sol en 2003
(Source : MSEC)





Annexe 13 : Carte d'occupation du sol en 2004
 (Source : MSEC)



Table des matières

Remerciements

Résumé

Préambule (en Français)

Avant-propos

1. Introduction	2
2. Matériels et Méthodes	3
2.1. Contexte	3
2.1.1. Organisme d'accueil, l'IRD	3
2.1.2. Le bassin versant de Huay Ma Nai	3
2.2. La télédétection	5
2.3. Les données satellites	7
2.3.1. Les satellites : Landsat 7 et Landsat 8	7
2.3.2. Protocole de sélection des images satellites	8
2.4. Traitements effectués : Vectorisation et classification supervisée	9
2.4.1. Vectorisation des données d'occupation du sol	9
2.4.2. Le recalibrage des images satellites : Fusion P + XS	9
2.4.2.1. Le sur-échantillonnage	9
2.4.2.2. Pan Sharpening	10
2.4.3. La classification supervisée	11
2.4.3.1. Les parcelles d'entraînement ou ROI : Region Of Interest	11
2.4.3.2. Les modèles statistiques de classification	12
3. Discussion et résultats	13
3.1. Les classifications obtenues	13
3.1.1. Année 2015	13
3.1.2. Année 2002	14
3.1.3. Année 2016	15
3.1.4. De 2001 à 2016 : une pratique culturelle qui évolue dans le temps	16
3.2. La fabrication de la P + XS	18
3.3. La classification supervisée, un outil performant ?	19
4. Conclusion	20



Lexique	21
Références	22
Tableaux et figures	24
Annexes.....	25
Tables des matières	32

