Rapport de fin de projet :

Formation en cartographie de l'occupation du sol par télédétection du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) de la République d'Haïti

Camille Lelong, UMR TETIS-CIRAD, F-34398 Montpellier, France

Stéphane Dupuy, UMR TETIS-CIRAD, F-34398 Montpellier, France

Raffaele Gaetano, UMR TETIS-CIRAD, F-34398 Montpellier, France

Ce rapport a été élaboré dans le cadre du projet Territoires Productifs Résilients (PTPR) en Haïti.

Référence à citer :

Lelong, C., Dupuy, S., Gaetano, R., 2021. « Rapport de fin de projet : Formation en cartographie de l'occupation du sol par télédétection du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) de la République d'Haïti ». Montpellier (France): CIRAD-UMR TETIS, 24 pages.

© Cirad, Département ES/ UMR TETIS / 2020.

SOMMAIRE

Table des matières

..... 2

RESUME/SUMMARY..... 3

1. Contexte 4

2. Formation aux traitements des données de télédétection..... 6

2.1. Formation à Montpellier 6

2.2. Poursuite de la formation, à distance 6

3. Formation à la définition d'une nomenclature et d'une référence terrain..... 7

3.1. Formation à Montpellier 7

3.2. Poursuite de la formation, à distance 8

4. Production de cartes à très haute résolution spatiale 11

5. Restitution du projet 13

5.1. Déroulement 13

5.1. Discussions 14

6. Conclusion 16

7. Annexe 1 : diaporama présenté par le Cirad lors de la restitution du projet (le 6 avril 2021)..... 18

RESUME

Ce rapport final rassemble les diverses activités réalisées dans le cadre du projet de formation et renforcement des capacités en cartographie de l'occupation du sol par télédétection du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) de la République d'Haïti. Il relate notamment le déroulement de l'accueil au Cirad à Montpellier de deux agents du CNIGS : Marie Esther Manasse et Gabriel Jean-Baptiste, en janvier et février 2020. Puis il explicite la poursuite de cette formation à distance, essentiellement par visioconférences hebdomadaires et suivi par courriels, qui a permis de rendre autonomes ces deux agents et leur collègue Philémon Mondésir dans la production de cartes d'occupation du sol à l'échelle régionale à partir de séries temporelles d'images satellitaires. En parallèle, une formation à la construction d'une base de données de référence fondée sur l'information de vérité terrain a été livrée, elle aussi à distance, et dont ont pu bénéficier aussi les agents du TPR et en particulier Jery Rambao. Le Cirad a alors mené un suivi rapproché des campagnes de terrain et de la photo-interprétation qui les a complétées, et a accompagné le CNIGS dans la constitution de cette base de référence. Enfin, le Cirad a assisté le CNIGS dans leur production de cartes à partir de la chaine de traitements Iota2. En parallèle, à des fins de comparaison, le Cirad a produit ces cartes à partir d'autres types de données sur son prototype de chaine Moringa. Un ensemble de 9 cartes d'occupation du sol de la région des Nippes, à différentes résolutions spatiales et suivant différents niveaux de précision de nomenclature, a ainsi été délivré au TPR et déposé sur le Dataverse du Cirad afin d'en assurer la diffusion. La base de données de référence constituée par le Cirad à partir des informations de terrain recueillies par le CNIGS et le TPR a aussi été déposée sur le Dataverse. Enfin, le Cirad a analysé les compromis que le CNIGS ou le TPR devraient prendre en compte dans le futur pour, soit augmenter la précision des cartes produites, soit étendre cette cartographie à l'ensemble du territoire Haïtien si besoin, et à mettre à jour les différents produits au cours des ans. Ce rapport conclut sur l'impact de la présente formation en termes d'opérationnalité, et d'usage dans différents projets de gestion des territoires.

SUMMARY

This final report brings together the various activities carried out as part of the "capacity building in remote sensing land cover mapping" project of the National Center for Geo-Spatial Information (CNIGS) of the Republic of Haiti. It relates in particular the training at CIRAD in Montpellier of two CNIGS agents: Marie Esther Manasse and Gabriel Jean-Baptiste, in January and February 2020. Then it explains its continuation with distance courses (weekly videoconferences and email follow-ups) which made it possible for the CNIGS to get the autonomy in land cover maps production at a regional scale from time series of satellite images. At the same time, training in the construction of a reference database based on ground truth information was delivered, and could also benefit other CNIGS agents like Philemon Mondesir, as well as TPR agents, and in particular Jery Rambao. CIRAD then carried out close monitoring of the field campaigns and the photo-interpretation that supplemented them, and supported the CNIGS in setting up this reference database. Finally, CIRAD assisted the CNIGS in their production of maps with the Iota2 processing chain. In parallel, for comparison purposes, CIRAD produced these maps from other types of data with its own prototype chain (Moringa). A set of 9 land cover maps of the Nippes region, at different spatial resolutions and according to different levels of nomenclature precision, was thus delivered to the TPR and deposited on the CIRAD Dataverse for dissemination. The reference database compiled by CIRAD from field information collected by CNIGS and TPR has also been deposited on the Dataverse. Finally, Cirad analyzed the compromises that the CNIGS or the TPR should consider in the future to either increase the accuracy of the available maps, or extend this mapping to the entire Haitian territory if necessary, and to update the different products over the years. This report finally reviews the impact of this project in terms of operationality, and future use in territory management.

1. CONTEXTE

En octobre 2019, l'UMR TETIS du Cirad s'est vu confier, par la World Bank et le projet Territoires Productifs Résilients (TPR) en Haïti, des activités de formation. Cette collaboration entrait dans le cadre du projet de « Formation pour l'utilisation de l'outil géospatial pour la mesure de l'état initial » du TPR, et en particulier dans sa Composante 1 (Renforcement des capacités institutionnelles et organisationnelles pour la conduite d'interventions au niveau des territoires), Sous-composante 1.1.iii.

Les objectifs spécifiques de cette convention concernaient donc : « **le renforcement des capacités de cartographie, d'imagerie satellite, de collecte des données et d'analyse, dans une perspective de développement et de diffusion des instruments de soutien aux décisions spatiales** ».

Un besoin spécifique des agents du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) avait en effet été identifié, portant sur la **maîtrise de protocoles, méthodes et outils de traitement pour la production de cartes d'occupation des sols**, ne se limitant pas uniquement à leur mise en œuvre opérationnelle autonome, mais aussi à leur compréhension. Il est en effet important que ces agents puissent s'approprier les éléments clés garantissant un transfert durable de connaissances. L'objectif à long terme était de donner au CNIGS les moyens de produire ces cartes régulièrement (mises à jour) et sur l'ensemble du territoire d'intervention du TPR (territoire des Nippes, voire tout le territoire Haïtien).

Pour répondre aux exigences des différents partenaires du TPR, la formation a été orientée sur la production automatique de **cartes régionales d'occupation du sol à partir de séries temporelles d'images optiques à haute résolution Sentinel-2,** pour, à court terme, être en mesure de couvrir toute l'île. Pour renforcer la complémentarité avec les actions menées par le CNES dans le cadre du Recovery Observatory (RO-HAITI), grâce auxquelles le CNIGS avait déjà bénéficié d'une formation sur ce même outil, nous avons choisi de nous baser sur la méthodologie mise en place dans la **chaîne de traitement *iota²***. Cette chaine, développée dans le cadre des activités du CES Occupation des Sols du Pôle Thématique Surfaces Continentales THEIA, est en effet un outil « clefs-en-mains » dans lesquels les différents traitements sont automatisés. Il a vocation à produire des cartes d'occupation des sols à grande échelle (territoire, pays entier), à résolution décamétrique, et avec capacité de mise à jour annuelle. C'est donc un outil bien dédié aux applications du TPR et du CNIGS en général.

Dans cette perspective, le projet de formation s'articulait autour de trois grands volets :

A. Un renforcement des connaissances en télédétection, notamment sur les séries temporelles de données satellitaires de type Sentinel-2, et une formation pratique sur les outils de l'OrfeoToolBox (OTB);
B. Une formation méthodologique, technique et logicielle, sur la production de cartes d'occupation du sol avec la chaine de traitements Iota2, depuis l'installation de la chaine à la validation des cartes en passant par le téléchargement des données de télédétection.
C. Une formation méthodologique sur la construction d'une nomenclature pour les cartes d'occupation du sol obtenues par télédétection et sur la constitution d'une base de données de référence pour les classifications (la vérité-terrain) ;

Cette formation se complétait d'un accompagnement du CNIGS par l'UMR TETIS pour la mise en œuvre de ces démarches sur les trois bassins versants d'intervention du TPR dans la région des Nippes.

En parallèle, une réflexion devait être menée autour d'autres outils potentiels de cartographie de l'occupation du sol, comme une chaine de traitement plus complexe, et l'usage de données satellitaires à très haute résolution spatiale (Pléiades, SPOT6/7…) selon les enjeux et compromis entre les besoins des utilisateurs et les capacités techniques des producteurs.

Pour atteindre ces objectifs, une équipe de trois chercheurs de l'UMR-TETIS a été mobilisée sur ce projet, composée de C. Lelong, S. Dupuy et R. Gaetano, qui se sont relayés au cours des différents aspects de cette formation en fonction de leurs domaines de compétences et ont souvent dû travailler de concert pour répondre aux différents besoins pédagogiques du CNIGS.

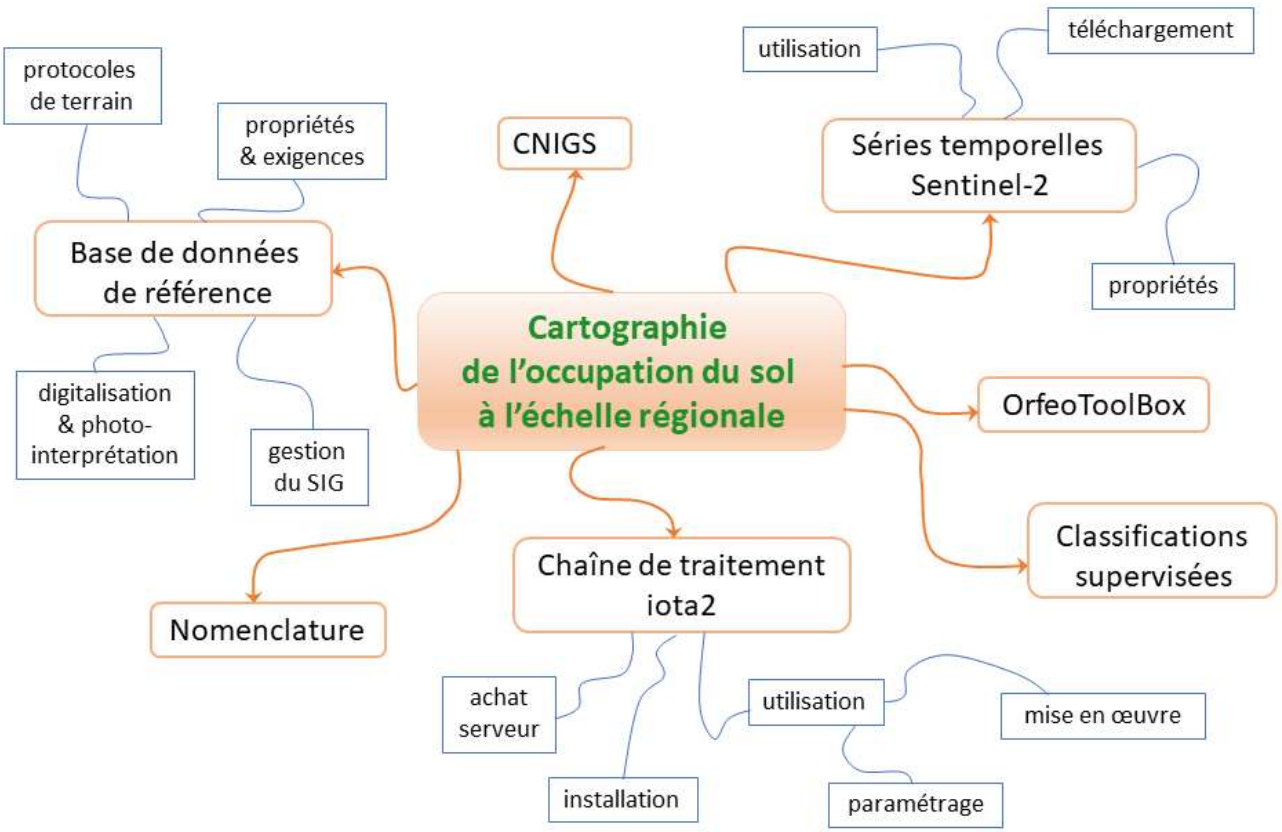


Figure 1 : Plan de formation du CNIGS par le Cirad dans le cadre du projet TPR en Haïti

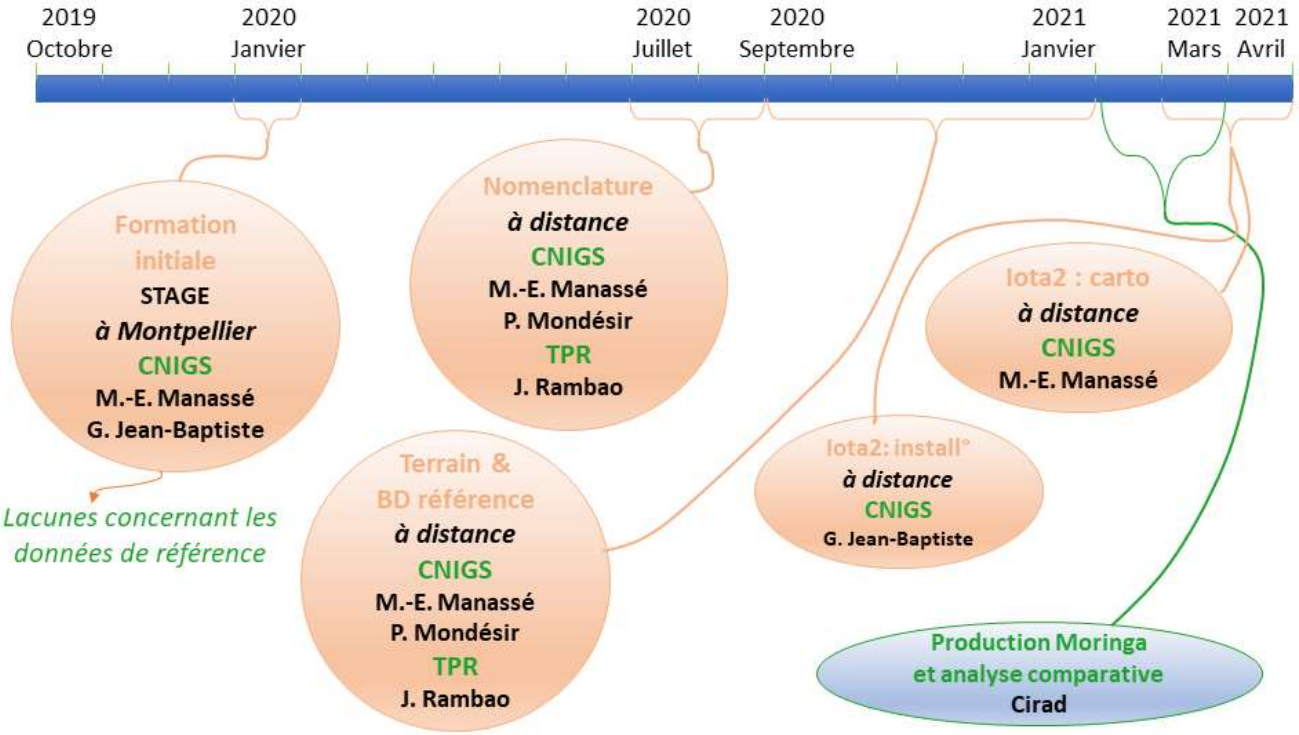


Figure 2 : calendrier du projet de formation du CNIGS par le Cirad dans le cadre du projet TPR en Haïti

2. FORMATION AUX TRAITEMENTS DES DONNEES DE TELEDETECTION

2.1. Formation à Montpellier

Deux agents du CNIGS ont été accueilli à l'UMR TETIS du Cirad du 14 janvier au 13 février 2020 : Marie-Esther Manasse et Gabriel Jean-Baptiste afin d'être formés sur la chaîne de traitements Iota2 pour la cartographie de l'occupation du sol dans les Nippes. Les détails de cette formation ont été consignés dans le rapport de C. Lelong, R. Gaetano, et S. Dupuy : « Formation et renforcement des capacités en cartographie de l'occupation du sol par télédétection du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) de la République d'Haïti », 2020, Montpellier (France): CIRAD-UMR TETIS, 17 pages, téléchargeable à l'adresse suivante : https://agritrop.Cirad.fr/597948

Au cours de ce séjour, ces deux agents ont reçu une formation approfondie, à la fois théorique et pratique, sur les différents aspects méthodologiques couverts par la cartographie de l'occupation des sols par télédétection. En particulier, les spécificités des séries temporelles d'images ont été abordées, avec plus d'emphase sur les données Copernicus et en particulier Sentinel2, ainsi que la manipulation des données de télédétection avec l'OrfeoToolBox (plateforme libre d'outils numériques de traitement des données de télédétection). Enfin, ils ont reçu une robuste formation couvrant aussi bien l'installation que l'utilisation de la chaîne Iota2, que la production des cartes et leur évaluation.

De plus, les deux agents du CNIGS ont été formés à la construction d'une nomenclature de carte d'occupation des sols telle qu'on peut l'envisager par télédétection, et à la constitution d'une base de données de référence pour l'apprentissage et la validation des cartes.

Cependant, il s'est avéré qu'aucune information de terrain n'était alors disponible pour la zone des Nippes en Haïti, concernée par ce projet. La formation s'est donc articulée autour d'une base de données, extrêmement limitée mais au moins existante comme point de départ, sur le département du Nord-Ouest d'Haïti. Une première carte d'occupation du sol couvrant le département du Nord-Ouest a ainsi été produite**,** figurant 6 classes d'occupation du sol bien différenciées, mais avec seulement 54% de précision globale.

A l'issue de ce séjour, le CNIGS avait acquis l'autonomie en matière de production de ces cartes et toutes les compétences requises pour à la fois installer la chaine sur le serveur acheté dans le cadre du TPR à cette fin, et mettre en œuvre la chaîne jusqu'à la production et l'évaluation des cartes, une fois la base de données de référence dans les Nippes effectivement construite.

Outre les cours fondamentaux et travaux pratiques suivis durant leur séjour, les agents du CNIGS ont reçu de la documentation didactique afin de pouvoir approfondir éventuellement leurs compétences mais aussi les transférer à leurs collègues en Haïti : supports de cours et de travaux pratiques, manuels d'utilisation, guides « pas à pas », bibliographie.

2.2. Poursuite de la formation, à distance

Le Cirad s'est toujours tenu, durant toute la durée du projet, à disposition du CNIGS (et du TPR en général) pour aider les agents à finaliser l'installation de la chaine de traitements et pour télécharger les séries temporelles. Cette disponibilité a maintes fois été rappelée lors des visioconférences hebdomadaires, pendant lesquelles le CNIGS assurait notamment de sa capacité à mettre en œuvre cette chaîne. Le calendrier des opérations de cartographie du CNIGS a donc été validé par les différentes parties le 7 janvier.

Le Cirad a notamment insisté pour que le téléchargement des données Sentinel-2 (une série annuelle entière) soit entrepris dans les plus brefs délais compte tenu du temps nécessaire à la récupération de

ce gros volume de données, surtout avec de faibles débits internet. Les fondements méthodologiques du traitement de la série temporelle Sentinel-2 sous Iota2 ont alors été à nouveau explicités pour renforcer la compréhension du processus par les agents du CNIGS. Ceux-ci se sont alors engagés à récupérer toute la série de données pour le 15 janvier au plus tard.

Nous avons été informés le 26 février par Gabriel Jean-Baptiste du CNIGS qu'il rencontrait encore des difficultés pour la chaîne sur leur serveur. Un document de travail complémentaire a donc été livré le 2 mars 2021, reprenant en mode « pas à pas » la formation initiale dispensée à Montpellier, afin de permettre à G. Jean-Baptiste d'installer la suite logicielle nécessaire pour finaliser l'installation de Iota2: Gaetano R., 2021 : « Guide à l'installation de la chaîne iota2 sur un server Linux via un terminal distant depuis Windows ». Montpellier (France) : CIRAD, 18 pages. Raffaele Gaetano s'est ensuite tenu en « hot-line » avec Gabriel Jean-Baptiste jusqu'à ce que tout soit parfaitement en place et opérationnel. Par la suite, R. Gaetano a aussi assisté M.E. Manassé pour l'installation des mises à jour requises pour mettre la chaîne à niveau à sa dernière version publiée.

Le Cirad a alors réitéré sa proposition de support technique et méthodologique pour lancer la chaine et aboutir à la production des cartes dans les délais impartis dans le projet. Toutefois, le CNIGS ne s'est manifesté que le 15 mars suivant. R. Gaetano s'est alors tenu à disposition par visio, quasi quotidiennement, doublées d'un suivi rapproché par courriel, pour aider Marie Esther à régler tous les détails de mise en œuvre au pas à pas et ce jusqu'à la fin des traitements. Une carte d'occupation des sols du département des Nippes a ainsi été obtenue Marie-Esther à partir de la chaîne iota2 et de la série annuelle d'images Sentinel-2 en date du 27 avril 2021.

Le CNIGS possède donc à présent tous les outils, ainsi que la formation et donc les compétences requises pour mettre en œuvre la chaine de traitement pour la production des cartes d'occupation du sol. Ils sont donc en théorie capable de produire ces cartes en autonomie. Il est toutefois vivement conseillé au CNIGS de se tenir informé des différentes mises à jour du logiciel iota2, qui est un outil de développement vivant et en régulière évolution, amené à subir des modifications dans les mois, les années à venir. En particulier, il est recommandé de consulter régulièrement les pages https://framagit.org/iota2-project/iota2 et https://www.theia-land.fr/product/iota-2/ et de maintenir un niveau constant de pratique de l'outil pour conserver ce savoir-faire.

3. FORMATION A LA DEFINITION D'UNE NOMENCLATURE ET D'UNE REFERENCE TERRAIN

3.1. Formation à Montpellier

Lors de leur séjour à Montpellier, les agents du CNIGS ont bénéficié de conseils et de discussions concernant la définition d'une nomenclature pour la cartographie du sol, adaptée à la fois aux besoins des utilisateurs et aux capacités de discrimination de la télédétection. Toutefois, alors que la zone principalement ciblée par le TPR était la région des Nippes, c'est seulement sur le département du Nord-Ouest d'Haïti que la formation a pu s'effectuer, en raison d'un manque total d'information sur les Nippes. Les détails de cette formation ont été consignés dans le rapport de C. Lelong, R. Gaetano, et S. Dupuy : « Formation et renforcement des capacités en cartographie de l'occupation du sol par télédétection du Centre National de l'Information Géo-Spatiale (CNIGS) de la République d'Haïti », 2020, Montpellier (France), CIRAD-UMR TETIS, 17 pages, téléchargeable à l'adresse suivante : https://agritrop.Cirad.fr/597948.

Même pour le CNIGS, pourtant habitué en théorie au Corine Land Cover et équivalents, la définition d'une nomenclature pertinente est apparue très compliquée. La difficulté semblait résider dans l'identification elle-même des types d'occupation du sol, et non des pratiques culturales ou des modes de culture, cohérente, qui puisse correspondre à une réalité objective et non à l'appréciation personnelle du cartographe et, enfin, qui soit effectivement approchable par l'imagerie à haute résolution spatiale de type Sentinel-2. Le lien entre la réalité du terrain et la réalité de la télédétection semblait manquer aux agents du CNIGS et le Cirad s'est appliqué à resserrer ce maillon.

Cette formation initiale à la constitution de la base de données de référence a forcément été fortement entravée par l'impossibilité de se rendre en Haïti par les agents du Cirad (crise politique en Haïti puis Codiv19). En effet, il aurait été bien plus aisé de se retrouver, comme initialement prévu, directement en situation sur le terrain. Les outils de prise de points et de collecte d'information avec une tablette-GPS, mais aussi la façon d'appréhender cette information et de la mettre en relation avec la télédétection, auraient été bien plus facilement appréhendés par les agents du CNIGS, n'ayant au départ aucune réelle expérience en ce domaine. La première partie de la formation, à Montpellier, a donc certainement été un peu stérile, car trop théorique.

Il est surtout apparu en conclusion de ce séjour un **manque rédhibitoire, en quantité comme en qualité, de données de référence fiables** pour pouvoir avoir recours à une méthode de cartographie basée sur l'analyse d'images et l'apprentissage automatiques. Ce problème s'est avéré particulièrement sérieux, car dans le contexte du TPR la disponibilité de telles données est d'importance fondamentale, et **l'absence d'un protocole permettant leur récolte et mise à jour régulière ne peut qu'engendrer une remise en cause du volet géo-spatial du projet.**

Il a donc été décidé de poursuivre l'accompagnement du CNIGS dans cette démarche, en proposant dès le mois de juillet 2020 une formation par la pratique, en direct et in situ dans la zone d'intérêt prioritaire pour le TPR que sont les Nippes.

3.2. Poursuite de la formation, à distance

Le Cirad a alors procédé à une deuxième phase de formation, basée sur une application directe des concepts en situation réelle. Concrètement, nous avons accompagné, par le biais de visioconférences hebdomadaires complétées par courriel, le CNIGS (Marie-Esther Manassé et Philémon Mondésir, ainsi que plus sporadiquement Boby Piard) et le TPR (Jery Rambao, et plus sporadiquement Carl Mondé, Jean-Daniel Lamy), tout au long de leurs travaux de définition de la nomenclature finale de la carte d'occupation du sol des Nippes et de la constitution de la base de données de référence nécessaires à sa production. Cette phase s'est déroulée de juillet 2020 à mars 2021.

Il s'est avéré très difficile aux différents partenaires du TPR de bien s'approprier le concept de nomenclature, car tous issus de domaines d'application très variés et ayant des points de vue différents. De nombreuses discussions ont porté sur la définition de classes d'occupation du sol pertinentes, tant pendant la définition de la nomenclature que lors des réflexions autour de la digitalisation des relevés de terrain. Cela a permis de clarifier à nouveau les définitions et de bien formaliser la démarche. La différence entre la classe d'occupation du sol, c'est à dire la *nature* de la surface, et les *usages/pratiques/modes* de culture a clairement été explicitée et illustrée par des exemples concrets issus du terrain Haïtien. Finalement, la nomenclature adoptée pour la récolte d'informations de terrain a été validée en septembre 2020. Elle a alors été dissociée suivant deux niveaux hiérarchiques : le premier niveau correspondant à des classes habituellement bien reconnues à partir des données Sentinel-2, le deuxième niveau scindant certaines classes en plusieurs sous-classes plus précises car d'intérêt particulier pour le TPR, mais a priori peu accessibles à cette résolution. Il a été décidé de conserver ces deux niveaux et d'évaluer leur impact en termes de précisions des classifications sur les produits eux-mêmes. Enfin, un troisième niveau (niveau « 0 »), a aussi été proposé afin de produire des cartes de plus haute fiabilité en termes de discrimination, aux dépends de la précision de caractérisation des classes. La nomenclature finalement validée en mars 2021 et retenue pour la cartographie est donc celle présentée au tableau 1.

Tableau 1 : Intitulé des classes dans les trois niveaux de nomenclature validés pour la cartographie de l'occupation des sols dans les Nippes :

Code0	Nom de classe niveau 0
1	Bâti
2	Culture non ligneuse
3	Végétation ligneuse (cultivée et naturelle)
4	Pâturage, prairie et savane herbacée
6	Zone humide côtière (mangrove)
5	Rocher, sol nu et plage
7	Eau
8	Routes (origine OSM)

Code1	Nom de classe niveau 1
1	Bâti
2	Culture non ligneuse
3	Agroforesterie et arboriculture
4	Végétation naturelle ligneuse
5	Pâturage, prairie et savane herbacée
6	Zone humide côtière (mangrove)
7	Rocher, sol nu et plage
8	Eau
9	Routes (origine OSM)

Code2	Nom de classe niveau 2
1	Bâti
2	Culture sans couvert arboré
3	Culture avec présence d'arbres
4	Système agro-forestier
5	Arboriculture
6	Végétation arborée
7	Végétation arbustive
8	Pâturage, prairie et savane herbacée
9	Zone humide côtière (mangrove)
10	Rocher, sol nu et plage
11	Eau continentale
12	Eau marine
13	Routes (origine OSM)

Pendant cette période de formation, une importante remise à niveau a été faite concernant les principes fondamentaux d'une base de données de référence pour garantir une bonne utilisation des chaines de traitements automatiques des données de télédétection : ses caractéristiques essentielles, les écueils à éviter. En effet, c'est cette base de référence qui permet d'établir des clefs de correspondance entre les variables issues de la télédétection et la réalité du terrain, afin de guider l'algorithme de classification dans sa phase d'apprentissage des classes, puis pour en valider les produits. C'est l'étape la plus fondamentale, qui conditionne tout le processus de traitement et de production de la carte.

Compte tenu de la grande complexité et variabilité des terrains de la zone des Nippes, cette base de données de référence doit être robuste, et reposer principalement sur de l'information issue du terrain, seule source de vérité. La photo-interprétation d'images satellites peut permettre de compléter ces informations, mais seulement une fois que le terrain est bien appréhendé dans sa réalité. Nous avons eu de grandes difficultés à convaincre les agents du CNIGS de cette nécessité d'une campagne de terrain, car ils étaient peu habitués à ce type de démarche, pourtant la plus fiable et la plus acceptable. Clairement, sans expérience de terrain, tout miser sur de la photo-interprétation d'images, même de type Pléiades ou Google Earth, est dangereux. Mais, grâce au dynamisme des agents du TPR et leurs retours d'expérience du terrain dans d'autres applications, nous avons ensemble fini par trouver les arguments pour organiser deux campagnes de terrain, d'une semaine chacune, respectivement en septembre et novembre 2020.

Les protocoles de terrain ont alors été explicités, illustrés, co-définis, puis commentés et discutés à chaque retour des équipes de terrain : liste des caractéristiques à relever, protocole d'échantillonnage, acquisition de photos de contexte, relevés GPS. Cette démarche a conduit aussi à déployer à chaque campagne deux binômes CNIGS+TPR, afin de confronter les relevés et en garantir une meilleure fiabilité. 500 points de mesure ont ainsi été enregistrés sur le terrain. De nombreux allers-retours ont ensuite été pratiqués entre le Cirad et le CNIGS pour corriger et améliorer au coup par coup la base de polygones digitalisés à partir des informations de terrain, de même que les propositions de photo-interprétation complémentaire du CNIGS. Il a été en particulier évoqué, outre la qualité géométrique de ladite base, la quantité de polygones nécessaires pour entrainer les modèles de classification et leur adéquate répartition dans les différentes classes en fonction de la complexité et de la variabilité intrinsèque de ces classes. Malgré toutes ces préconisations, le CNIGS a transmis en date du 18 janvier 2021 une base de données de référence « finale » pourtant incomplète (683 polygones au total, avec des classes sous-représentées) et contenant encore des erreurs. Avant de pouvoir la valider et l'utiliser

en entrée des chaines de traitement, le Cirad a donc dû finaliser ces corrections et surtout compléter la base afin d'obtenir une densité de polygones suffisante (ajout de 916 polygones, pour aboutir au nombre total de 1599). La **base de référence finale validée** a été transmise par le Cirad à tous les partenaires du projet en date du 17 février 2021. Elle est accessible sur http://dataverse.Cirad.fr sous la référence suivante : *Dupuy, S.; Lelong, C.; Manasse, M.-E.; Rambao, J.; Mondésir, J. P.; Gaetano, R., 2021, "Nippes - Haïti - 2020, Reference Spatial Database", doi:10.18167/DVN1/29RZMQ, CIRAD Dataverse, V1*.

L'ensemble du protocole de collecte de données sur le terrain, de digitalisation et de mise en forme de cette base de référence a été livré, en date du 1er mars 2021, aux différents partenaires du projet, sous forme d'un **guide méthodologique de référence** complet rédigé par Camille Lelong et Stéphane Dupuy : « Guide technique - Constitution d'une base de données de référence dédiée à l'apprentissage et la validation des classifications d'images satellites : la vérité-terrain », 2021, Montpellier (France) : Cirad, 16 pages, téléchargeable à : http://agritrop.Cirad.fr/597844. Ce guide s'applique non seulement aux interventions en matière de cartographie au sein du TPR, mais aussi pour toute autre cartographie que pourra entreprendre dans l'avenir le CNIGS.

Figure 3 : répartition des polygones implémentés dans la base de données de référence livrée par le Cirad (référence : Dupuy, S et al. 2021, http://dx.doi.org/10.18167/DVN1/29RZMQ)

Tableau 2 : distribution par classe des polygones de référence, en nombre et en surface couverte :

Classe	Nb polygones	Surface (Ha)
Bâti	268	9.91
Culture sans couvert arboré	368	60.20
Culture avec présence d'arbres	90	41.86
Système agro-forestier	181	16.63
Arboriculture	34	35.90
Végétation arborée	109	61.13
Végétation arbustive	148	22.64
Pâturage, prairie, savane herbacée	153	9.55
Zone humide côtière (mangrove)	34	4.75
Rocher, sol nu et plage	149	74.82
Eau continentale	32	76.58
Eau marine	33	84.09
total	1599	498.06

4. PRODUCTION DE CARTES A TRES HAUTE RESOLUTION SPATIALE

Compte tenu des spécificités du paysage agricole dans le département des Nippes, comportant une large proportion de cultures ligneuses et d'autres milieux arborés ou arbustifs, il a souvent été évoqué, en amont de ce projet de formation, le potentiel de l'imagerie satellitaire à très haute résolution (de type Pléiades). Dans la théorie, l'apport de ce type de données réside dans sa plus grande adéquation au contexte agricole tropical : petit parcellaire, grande variabilité de cultures, hétérogénéité des pratiques, complexité des associations de végétation ligneuse et herbacée… Le Cirad a donc développé un prototype de chaîne de traitement appelé Moringa, reposant sur les mêmes principes algorithmiques que iota2, mais permettant d'intégrer différentes variables issues des données à très haute résolution spatiale en sus de la série temporelle Sentinel-2 et de classifier des objets (segmentés au préalable) plutôt que les pixels.

Nous avons donc proposé de tester ce prototype sur le département des Nippes, afin d'évaluer les apports réels de cette approche par rapport à iota2, mais aussi les contraintes supplémentaires qu'elle impose. Nous avons ainsi appliqué en parallèle Moringa et iota2 à la même base de données de référence, celle validée le 17 février 2021 dans le cadre du TPR et disponible sous la référence suivante : *Dupuy, S.; Lelong, C.; Manasse, M.-E.; Rambao, J.; Mondésir, J. P.; Gaetano, R., 2021, "Nippes - Haïti - 2020, Reference Spatial Database", doi:10.18167/DVN1/29RZMQ, CIRAD Dataverse, V1*. Seules les données en entrée différèrent, comprenant des variables extraites de la série annuelle Sentinel-2, plus l'altitude et la pente issus du MNT Lidar pour iota2, et ces mêmes variables accompagnées de variables issues d'une image Pléiades ou SPOT6/7 pour Moringa (dont certains indices de texture).

Le document « Rapport méthodologique - Cartographie de l'occupation du sol sur le site des NIPPES à Haïti », par S. Dupuy, C. Lelong et R. Gaetano, 2021, Montpellier (France) : Cirad, 44 pages, (téléchargeable à http://agritrop.Cirad.fr/597938/) décrit toute la méthodologie suivie, incluant la description de la chaîne de traitement Moringa, les données satellitaires utilisées, les variables extraites de ces données utilisées en entrée de la chaîne, et la constitution de la base finale de données de référence issue de la vérité terrain. Ce document présente aussi les **6 cartes produites** et délivrées à l'ensemble des partenaires du TPR le 18 mars 2021 par le biais du https://dataverse.Cirad.fr (Dupuy, Stéphane; Lelong, Camille; Gaetano, Raffaele, 2021, "Nippes - Haïti - 2020, Land Cover Map at very high spatial resolution", https://doi.org/10.18167/DVN1/QOLTTE, CIRAD Dataverse, V1") et en explicite une évaluation quantitative et qualitative.

Le document « Rapport méthodologique – Inter-comparaison des produits de cartographie de l'occupation du sol avec les chaînes Iota2 et Moringa : cas d'étude de la région des NIPPES en Haïti », par R. Gaetano, C. Lelong et S. Dupuy, 2021, Montpellier (France) : Cirad, 31 pages, (téléchargeable à http://agritrop.Cirad.fr/597991/) décrit toute la méthodologie suivie pour appliquer la chaine Iota2 et les **3 cartes produites** et délivrées à l'ensemble des partenaires du TPR le 18 mars 2021 par le biais du https://dataverse.Cirad.fr (Gaetano, Raffaele; Dupuy, Stéphane; Lelong, Camille, 2021, "Nippes - Haïti - 2020, Land Cover Map at high spatial resolution", https://doi.org/10.18167/DVN1/ZAN2WN, CIRAD Dataverse, V1). Ce rapport dresse aussi une évaluation quantitative et qualitative comparée entre les différentes cartes produites par les différentes chaines, et selon le niveau de nomenclature considéré.

Cette expérimentation fait apparaitre que, globalement, la cartographie de l'occupation du sol à partir d'une série multi-temporelle d'images Sentinel-2 traitée avec une chaîne du type Iota^2 donne de très bons résultats en termes de discrimination des grandes classes d'occupation du sol à l'échelle régionale, voire nationale. Cela correspond, dans les Nippes, à une nomenclature de niveau 0 (92% de précision globale) ou de niveau 1 (88% de précision globale) parmi les trois niveaux hiérarchiques définis dans le Tableau 1. La carte obtenue, à **10m de résolution spatiale**, présente un bon niveau de

fiabilité et une précision spatiale correcte. C'est donc **l'outil à privilégier en priorité** par les agents du CNIGS et du TPR en général pour des objectifs de cartographie de ce type, surtout avec la perspective de devoir mettre à jour annuellement ces cartes. En effet, il s'agit **d'une chaîne de traitements relativement peu couteuse en ressources informatiques et facile à mettre en œuvre**.

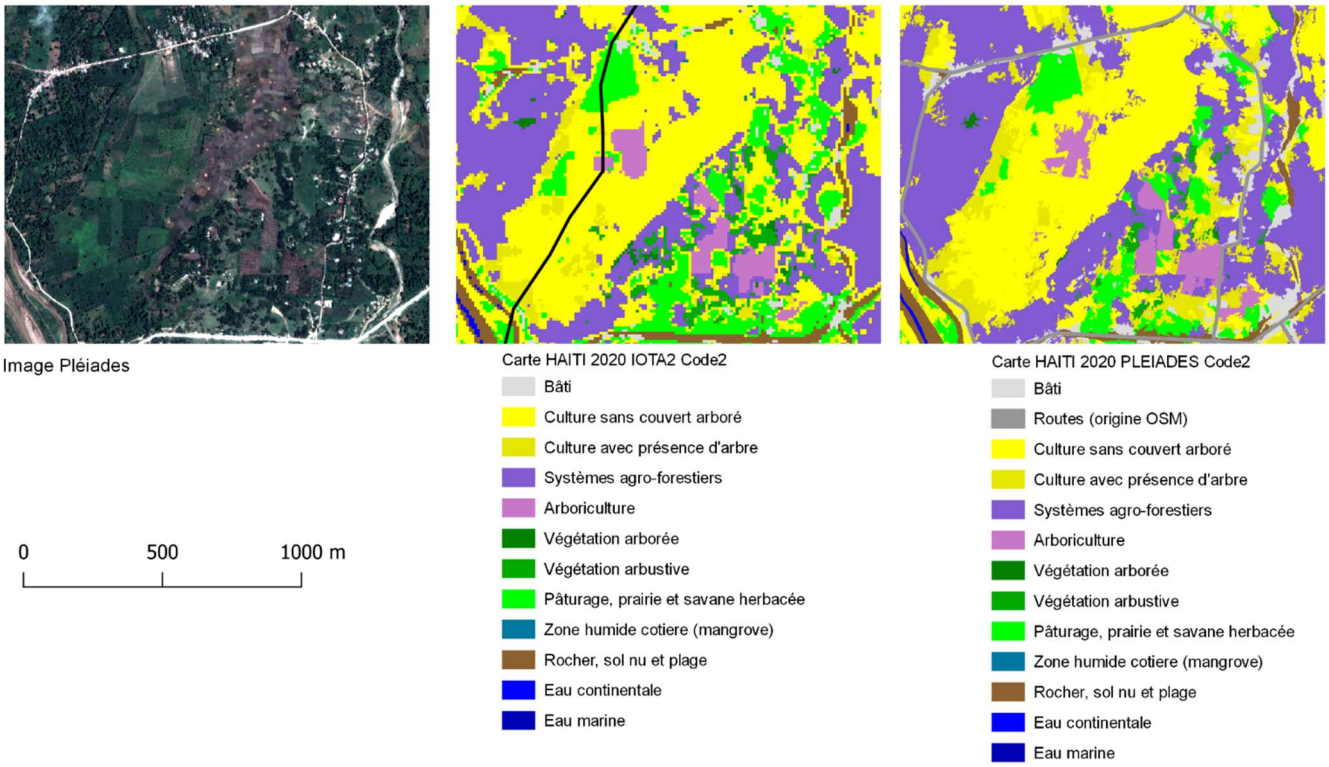


Figure 4 : Extrait de la carte d'occupation du sol en 2020, obtenue avec IOTA2 (à gauche) et Moringa utilisant une image Pléiades (à droite) au niveau de nomenclature « 2 ». Zoom sur une zone située au Nord-Ouest du bassin versant de Rivière Froide, région des Nippes. Contient des informations © CNES 2020 - distribution AIRBUS DS. Références : Gaetano, R et al 2021. https://doi.org/10.18167/DVN1/ZAN2WN et Dupuy, S et al. 2021 https://doi.org/10.18167/DVN1/QOLTTE.

La très haute résolution spatiale, par le biais d'une image de type Pléiades (ou éventuellement SPOT6/7) permet d'accéder non seulement à des cartes à plus grande résolution (0,5m/pixel), mais aussi à une meilleure précision dans la délimitation des objets fins et des contours entre transitions d'occupations des sols. Elle permet aussi d'atteindre un niveau de nomenclature plus fin (niveau 2), incluant une discrimination de différents types de couverts ligneux (distinction entre arboriculture/systèmes agroforestiers/forêts/brousse arbustive). En revanche, les données à THRS ont un coût, contrairement aux données Sentinel-2, qui peut être assez prohibitif à grande échelle (2125 USD pour 100km^2). Aussi, la manipulation de données à THRS implique une segmentation préalable afin d'appliquer une classification orientée objet, donc un paramétrage parfois difficile à ajuster au mieux. Enfin, la chaîne Moringa demande des ressources numériques importantes, aboutissant à des temps de calculs de plusieurs journées. Par-dessus tout, les exigences en termes de données de référence sont très fortes, nécessitant une grande quantité d'informations de terrain et une grande rigueur dans la digitalisation des objets pour construire la base nécessaire à l'apprentissage du classifieur.

Ainsi, selon les attentes des utilisateurs finaux de ces cartes d'occupation du sol, il faudra établir les bons compromis entre la complexité et le coût de la méthode, d'une part, et le niveau désiré de précision spatiale à petite échelle et de détail dans la nomenclature, d'autre part. Il serait par exemple plus judicieux d'opter pour une approche de type Moringa incluant de la très haute résolution spatiale pour des actions ciblées, sur un territoire restreint (un bassin versant, au maximum) avec de fortes contraintes de discrimination des types d'occupations du sol spécifiques (distinction entre arboriculture/agroforesterie/foresterie, par exemple). Au contraire, **on privilégiera l'approche iota2 pour des cartes à l'échelle régionale ou nationale, et pour les actions de suivi dans le temps nécessitant une mise à jour régulière pour détecter rapidement les changements**.

5. RESTITUTION DU PROJET

5.1. Déroulement

Le 6 avril 2021, les différents partenaires du projet TPR se sont réunis par visioconférence sur TEAMS-Cirad afin de suivre la restitution de ce projet de formation et d'en discuter les bénéfices, limites et perspectives.

Tableau 3 : personnalités invitées à la restitution du 6 avril 2021 :

NOM Prénom	Affiliation	@email
FOFANA Soumelane	World Bank	sfofana@worldbank.org
GROSJEAN Christophe	World Bank	cgrosjean@worldbank.org
COELLO Barbara	World Bank	barbara.coello@gmail.com
EDMOND Bernard	TPR (Coordonnateur central)	edmondbernard@hotmail.com
VOLCY Marc André	TPR (Coordonnateur local)	voloinn@hotmail.com
RAMBAO Jery	TPR (Consultant)	rambaoj@gmail.com
MONDE Carl	TPR (Consultant)	carlmonde@gmail.com
MEDARD Alex	TPR (ancien coordinateur)	alexmedard@gmail.com
SALVANT Rostand	TPR (ancien M&E central)	rostantsalvant@yahoo.fr
LAMY Jean-Daniel	MARNDR (Point focal TPR)	lamyjdaniel@gmail.com
NORRIS Dimitri	MDE (Point focal TPR)	dimitrinorris@hotmail.com
EDMOND Bruno	Direction Départementale de l'agriculture des Nippes	b.edmond@gmail.com
MAGUET Brutus	Direction Départementale de l'agriculture des Nippes	brutusmaguet@gmail.com
LOCHARD Jean Gardy	Spécialiste Infrastructures des Nippes	
PIARD Boby	CNIGS	bepiard@yahoo.fr
MONDESIR Philemon	CNIGS	mondesirphilemon@yahoo.fr
MANASSE Marie-Esther	CNIGS	manassemesther@yahoo.fr
JEAN-BAPTISTE Gabriel	CNIGS	gjeanbaptiste3@gmail.com
DEBOISSEZON Hélène	CNES	Helene.DeBoissezon@cnes.fr
COLLET Agwilh	CNES	Agwilh.Collet@cnes.fr
TOMASINI Linda	CNES (point focal Geodev)	Linda.tomasini@cnes.fr
FAIVRE Robin	SERTIT (univ. Strasbourg)	robin.faivre@unistra.fr
FAURE Jean-François	IRD (coordinateur Geodev)	jean-francois.faure@ird.fr
GAETANO Raffaele	Cirad (UMR TETIS)	raffaele.gaetano@Cirad.fr
DUPUY Stéphane	Cirad (UMR TETIS)	stephane.dupuy@Cirad.fr
LELONG Camille	Cirad (UMR TETIS)	camille.lelong@Cirad.fr

La séance a débuté à 9h00, heure de Port-au-Prince (15h00 heure de Montpellier), par une introduction générale de Bernard Edmond, Coordinateur Central du TPR en Haïti, suivie d'une présentation de Jery Rambao, coordinateur des intervenants et responsable de l'évaluation d'impact du TPR, sur le contexte de la cartographie de l'occupation du sol comme outil de prise de décision dans le cadre du TPR : état initial, estimation des risques d'érosion, dispositif d'évaluation des dégâts avant/après…

A 9h20, Camille Lelong, chargée de recherches au Cirad, a pris la parole pour exposer, avec l'assistance de Raffaele Gaetano, chargé de recherches au Cirad, le déroulement de ce projet de formation, en décrivant tour à tour :

- les objectifs en renforcement des compétences de ce projet,
- le calendrier de cette action de formation,
- les données satellites mises à disposition par le Recovery Observation Program du CNES et les données topographiques de l'IGN-FI
- la construction de la nomenclature de la carte d'occupation du sol
- la constitution de la base de données de référence à partir de campagnes d'acquisition de vérité-terrain
- la production cartographique à partir des chaînes de traitement Iota2 et Moringa
- les 9 cartes produites, correspondant à 3 niveaux de nomenclature et 3 jeux de données satellites différents

- l'évaluation et l'intercomparaison de ces cartes
- les apports, bénéfices, contraintes, limitations des deux chaînes de traitement
- le bilan en terme de compétences acquises par le CNIGS
- les préconisations du Cirad pour le futur de la cartographie au sein du TPR.

La totalité du diaporama présenté est annexé à ce rapport (cf Annexe 1).

A l'issue de cette présentation, à partir de 10h15, plusieurs participants (S. Fofana, C. Mondé, H. Deboissezon, C. Grosjean) ont réagi en commentant le bilan de ce projet et en posant une première série de questions au Cirad et au CNIGS.

11h00, Marie-Esther Manassé, cadre CNIGS, a ensuite pris la parole pour exposer le déroulement de son parcours au travers de cette action de formation. Elle conclut en observant qu'elle ne se sent pas encore en confiance pour gérer en autonomie la chaine Iota2 (encore en cours de traitement au jour de la restitution, mais aboutie au 27 avril). Philémon Mondésir, cadre au CNIGS, intervient pour signaler qu'il est beaucoup plus optimiste et considère de son côté que le CNIGS a acquis les compétences pour gérer en autonomie la suite des opérations de cartographie au sein du TPR. Il évoque aussi que les cartes des Nippes délivrées à l'issue de ce projet constituent un défi technique relevé par le Cirad, avec un niveau de précision jamais atteint en Haïti jusqu'à ce jour.

Dès 11h10, s'engagent des discussions concernant différents aspects techniques de la cartographie, les apports de la formation pour le CNIGS même au-delà des objectifs du TPR, les limites de la méthodologie, les applications possibles en aval.

A 12h10, Jery Rambao conclut que le TPR est satisfait de ce qui a été fait dans ce projet, qu'il connait déjà à peu près comment valoriser les cartes produites, et qu'il compte désormais sur le CNIGS pour l'appliquer. Christophe Grosjean, au nom de la World Bank, se déclare satisfait de la restitution et des discussions qui s'y sont tenues et clôture la réunion à 12h20.

5.1. Discussions

Globalement, la World Bank, le TPR et le CNES ont affirmé leur reconnaissance au Cirad pour l'aboutissement de ce projet et en particulier pour la production de cartes d'occupation du sol qui pourront directement être utilisées par le TPR.

Jery Rambao a précisé que ces cartes seront un outil de prise de décisions à trois niveaux :
- Capacité de connaitre l'état initial au temps t_o (à remettre à jour régulièrement)
- Possibilité d'évaluer le risque d'érosion par l'intermédiaire d'outils tels que RUSLE, dont la fiabilité avait été remise en cause en raison du manque de carte à jour
- Potentiel d'évaluation des dégâts avant/après un événement et les applications de protocoles du TPR.

Il a déclaré que le TPR voyait très bien comment utiliser et valoriser cette carte et attendait désormais le CNIGS pour la mettre en pratique.
Philémon Mondésir a aussi affirmé que l'aboutissement de ce projet constitue un défi technique, relevé avec un niveau de précision jamais atteint auparavant en Haïti. Il estime que cette formation a permis au CNIGS de revoir toute leur méthodologie, notamment en matière de recueil de données de référence sur le terrain comme au bureau. Selon lui les retombées de ces évolutions vont impacter toutes les activités du CNIGS, pas seulement dans le cadre du TPR. Il considère que le CNIGS a atteint une bonne maitrise de la chaîne Iota2 et qu'il s'agit maintenant d'une question de pratique pour la mettre en œuvre de façon opérationnelle.
Hélène de Boissezon, pour le CNES, informe que le présent projet a parachevé avec succès le programme Recovery Observatory et que ses impacts vont rayonner probablement au-delà de l'agriculture en Haïti (environnement, aménagement du territoire…).

Les ***limites*** de la méthodologie ont été questionnées, notamment par Bernard Edmond, Carl Mondé, Christophe Grosjean et Jean Gardy Lochard (spécialiste infrastructures des Nippes).

a) Il ressort par exemple que le TPR pourrait avoir besoin de mieux discriminer différentes espèces ligneuses, non seulement dans les espaces agroforestiers, mais aussi dans les zones humides, qui ne sont pas toutes de la mangrove. Or, les cartes d'occupation du sol telles que produites à l'heure actuelle ne permettent pas une distinction tranchée de la plupart des couverts arborés ou arbustifs. Il s'agit là d'une limite purement technologique : celle de l'information physique accessible par télédétection satellitaire. La résolution spatiale de Sentinel-2 n'est nettement pas suffisante pour analyser des pixels suffisamment « purs » (un seul type de végétation) qui puissent caractériser les arbres. Pour Pléiades, les quelques bandes spectrales (4) ne suffisent pas pour identifier des espèces ligneuses. Notre expérimentation avec Moringa montre que même l'association des deux ne compense pas les limites physiques des deux types de capteurs et que le signal traité ne contient pas l'informations nécessaire. Il faudrait alors avoir recours à des capteurs de type WorldView 2 ou 3, qui proposent 8 à 16 bandes spectrales à très haute résolution spatiale pour commencer à discriminer les espèces arborées et augmenter la précision de classification des différentes occupations du sol à dominante ligneuse. Rappelons que ce type de données coûte plus de 50USD au km2…Toutefois, il serait possible d'améliorer le niveau de caractérisation actuel de ces classes si les informations recueillies sur le terrain étaient plus précises, documentant toutes les espèces présentes dans la parcelle, par exemple, mais aussi leur densité de plantation, leur structure et agencement dans l'espace, etc…. Il faudrait donc concentrer une campagne de terrain sur ces seuls types d'occupation du sol, augmentant drastiquement le nombre d'entités de référence pour atteindre un ordre de grandeur de 200 polygones par sous-classe souhaitée être discriminée. C'est une autre façon de travailler que celle de l'occupation du sol globale, focalisée sur les espaces ligneux uniquement, bien plus couteuse en temps comme en argent. C'est aussi un domaine de recherches très actuel en télédétection, non opérationnel. On peut à ce stade encourager plutôt une démarche de cartographie in situ, sur le terrain, aidée bien entendu par les outils géomatiques, et en particulier la délimitation des occupations du sol pouvant tout à fait être générée au préalable par télédétection, comme support d'un SIG qui serait renseigné directement par l'observation de terrain.

b) La carte d'occupation des sols produite dans le cadre de ce projet n'informe pas en l'état sur les pratiques et les changements de pratiques au sein d'une même classe d'occupation du sol. La première raison est contextuelle, ou contractuelle si on peut dire. En effet, l'objectif fixé dans le cadre de ce projet était l'obtention d'une carte d'occupation du sol uniquement, comportant des classes discutées entre le TPR et le CNIGS qui finalement étaient peu orientées vers l'agriculture à proprement parler, celle-ci étant plus une classe parmi les autres qu'un objet de cartographie thématique en soi. Il aurait tout à fait été possible d'établir au sein des classes agricoles, en particulier les cultures annuelles, des sous-classes informant sur la pratique de l'irrigation ou non, sur des rotations éventuelles, ou d'autres types de pratiques selon qu'elles présentent ou non des éléments visuels ou temporels particuliers qui pourraient permettre de les reconnaitre. Pour cela, il aurait été nécessaire, à nouveau, de renseigner ces informations dans la base de données de terrain, laquelle n'a pas vraiment été orientée en ce sens. La base de données de terrain n'a pas fourni suffisamment de données sur les cultures, ni sur les pratiques ni même sur les espèces cultivées. En revanche, à partir de cette première carte d'occupation du sol et en y associant des données complémentaires, il serait possible de fournir certains indicateurs des pratiques (irrigation, rotations, structure de plantation…).

c) La présente carte d'occupation du sol ne permet pas à elle seule de détecter les zones de dégradation. A nouveau, il aurait fallu plus de données collectées sur le terrain dans des zones étant par ailleurs considérées comme dégradées, avec des variables types (agro, pédo, morphologiques…) permettant déjà de définir ce qu'est une zone dégradée dans l'absolu, puis vérifier que cela représente un « facies » à la fois spatial, radiométrique et temporel. Sur cette base il serait alors possible de caractériser aussi ces zones dégradées du point de vue de la télédétection et inclure cette information dans la carte. En revanche, elle constitue telle qu'elle une variable d'entrée essentielle à toute forme de modélisation ou d'analyse spatiale ayant la vocation de cartographie les zones dégradées, ou tout au moins à risque de dégradation. On peut citer par exemple le modèle RUSLE, qui intègre l'occupation du sol, la densité de végétation et les données topographiques pour estimer le risque d'érosion. Associée par exemple aux modèles numériques de terrain, aux cartes de sol informant sur la nature du substrat, à des données météo sur la pluviosité, ainsi qu'aux pratiques d'usage du sol, la carte d'occupation du sol est une source d'information de première importance pour établir des indicateurs de dégradation. Mais ce type d'application nécessite un cadre plus large que celui seul de la télédétection, qui reste un outil intermédiaire.

Soulemane Fofana a quant à lui relevé les aspects plus administratifs du projet et a souhaité conclure la séance en demandant au CNIGS s'ils se déclaraient capables de répondre aux sollicitations du TPR et des ministères pour produire les cartes d'occupation du sol dont ces instances auraient besoin dans le futur. La réponse du CNIGS a été affirmative.

6. CONCLUSION

Cette action de renforcement des compétences des agents du CNIGS en Haïti s'est traduit par la transmission par le Cirad d'une formation robuste en matière de :

- Définition d'une nomenclature de carte d'occupation du sol issue de la télédétection à plusieurs résolutions, se basant sur les compromis en entre utilisateurs et producteurs desdites cartes
- Construction d'une base de données de référence permettant l'apprentissage des modèles de classification automatiques, tenant compte des spécificités du terrain et de la variabilité des classes définies dans la nomenclature
- Protocole d'échantillonnage et de collecte d'informations de vérité-terrain sur l'occupation du sol
- Installation d'une chaine de traitements d'images de télédétection sur un serveur: Iota2
- Téléchargement et prise en main de séries multitemporelles de données à haute résolution : Sentinel-2
- Utilisation de fonctions de traitement des images de télédétection sur une plateforme de type Orfeo Tool Box
- Classification de séries multitemporelles d'images avec une chaine de traitement automatique : Iota2
- Production et évaluation de cartes d'occupation du sol par télédétection.

Globalement, **le transfert aux agents du CNIGS des compétences méthodologiques et techniques requises pour être autonomes dans la production de cartes d'occupation des sols à partir de séries temporelles d'images satellites et d'une chaine de traitement de type Iota2 est concluant**. En témoigne la carte produite en fin de projet par le CNIGS, qui répond aux critères de validité et de fiabilité des utilisateurs potentiels de la carte.

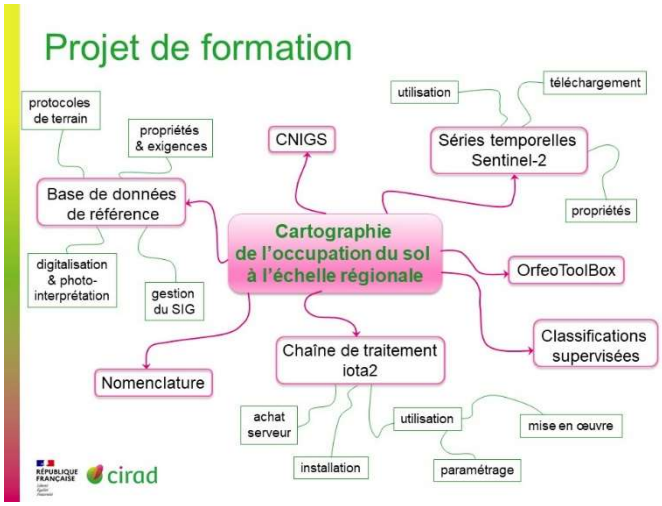
Toutefois, il semble que plusieurs freins pourraient être considérés comme points à débloquer dans le futur, comme les débits internet pour télécharger les données, la segmentation des tâches entre informaticiens, géomaticiens et agents de terrain qui provoque une certaine inertie dans l'accomplissement des étapes en raison d'un manque de fluidité entre les parties, ou encore un manque de maturité scientifique au-delà de la technique pure dans les protocoles à suivre.

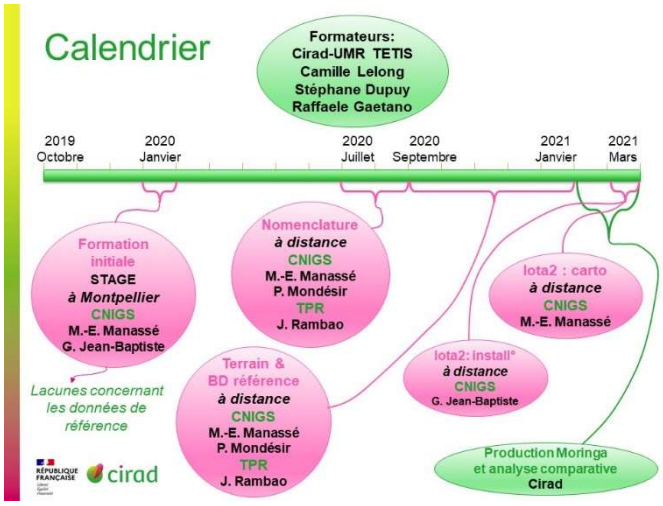
Des pistes d'amélioration peuvent aussi être envisagées, comme l'intégration à la chaîne, en complément des séries temporelles d'images de télédétection Sentinel-2, des données topographiques par le biais du MNT (altitudes et pentes), ou encore différentes propriétés géologiques des sols par le biais de cartes des sols renseignant au minimum la nature du substrat (basaltique vs. calcaire en particulier). Un meilleur ciblage et une plus grande variété des informations qualitatives collectées sur le terrain pourraient aussi permettre de mieux préciser certains types d'occupation du sol, que ce soit en validité de discrimination qu'en termes de spécification des classes. Cela ouvrirait de plus grandes perspectives en matière d'utilisation desdites cartes (analyses des pratiques, indicateurs des risques d'érosion, etc…). Le CNIGS doit aussi se tenir informé des mises à jour de la chaîne Iota2 et des améliorations méthodologiques proposées par le pôle Théia, ainsi que des évolutions des produits Copernicus en termes de disponibilité de données satellites (images de résolution spatiale inférieure à 5m/pix d'ici 4-5 ans par exemple).

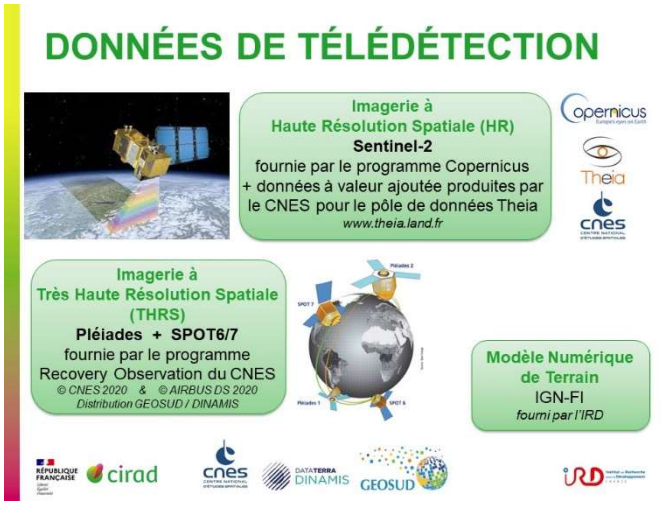
Par ailleurs le Cirad a produit plusieurs types de cartes d'occupation du sol de la région des Nippes en Haïti. Ces cartes correspondent respectivement à, d'une part, trois niveaux de précision dans la nomenclature et, d'autre part, trois résolutions de produits différents : 10m/pixel, 5m/pixel et 0,50m/pixel. Les précisions de chaque carte en termes de discrimination des classes d'occupation du sol, de délimitation des espaces de même occupation du sol, et de détection de types particuliers d'occupation du sol ont ainsi pu être analysées et comparées. Il en a résulté des propositions de compromis et des préconisations pour les futurs travaux de cartographie en Haïti.

Principalement, il apparait que **la chaine Iota2 appliquée à une série temporelle d'images de type Sentinel-2 donne des produits cartographiques à 10m /pixel de résolution spatiale valides et d'une bonne fiabilité, à condition de ne pas vouloir trop détailler la nomenclature** (confusions importantes dans les différentes classes ligneuses, en particulier) **et sous réserve d'une <u>base de données de référence particulièrement robuste</u>**. La nécessité éventuelle de fournir aux utilisateurs des produits plus précis, aussi bien d'un point de vue géométrique que dans le niveau de nomenclature, devra diriger le CNIGS sur le long terme vers des méthodes plus adaptées à l'extraction d'information à partir d'images à très haute résolution spatiale. Toutefois, cette approche devra se restreindre à des études aux échelles locales à régionales (typiquement un bassin versant) et non à une emprise nationale exhaustive, compte tenu des volumes de données considérés, de leur coût, des hautes performances informatiques nécessaires, et de la complexité des chaines à mettre en œuvre.

7. Annexe 1 : diaporama presente par le Cirad lors de la restitution du projet (le 6 avril 2021).







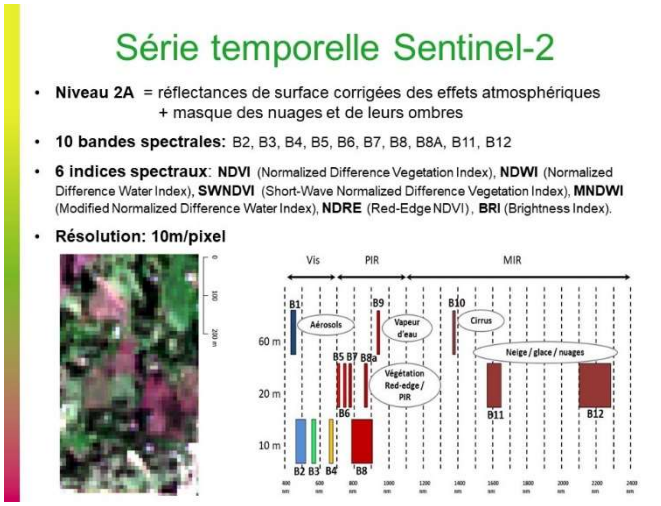


Image à THRS SPOT6/7

- **3 images:** 13/12/2019, 26/9/2020 & 5/10/2020: zones partielles, forte couverture nuageuse
- **Mosaïquage :** Assemblage des 3 images en 1 seule
- **Corrections radiométriques :** Réflectance au niveau de l'atmosphère (OTB)
- **Corrections géométriques :** Orthorectification (MNT IGN LiDAR, OTB) + correction polynomiale ordre 2 pour calage sur orthoimage l'IGN (Erdas Imagine)
- **Pansharpening (fusion multirésolution)** (Bayes, OTB)

Image à THRS SPOT6/7

- **PANchro + 4 bandes spectrales:** B, V, R, PIR
- **4 Indices spectraux (sur pansharpened): NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index R/NIR), **RVI** (Ratio Vegetation Index R/NIR), **NDWI2** (Normalized Difference Water Index G/NIR), **BI2** (Brightness Index 2 G/R/NIR)
- **12 Indices de texture** (Haralick): **Energy, Contrast, Correlation, Variance** avec 3 radius = 3x3, 11x11, 23x23 pixels
- **Résolution: 1,5m/pixel**

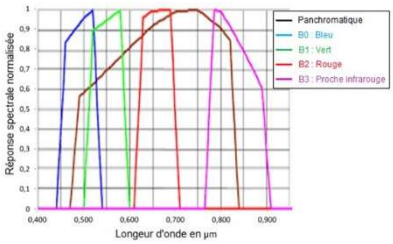
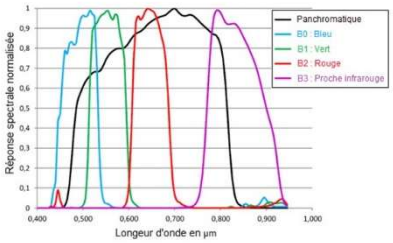


Image à THRS Pléiades

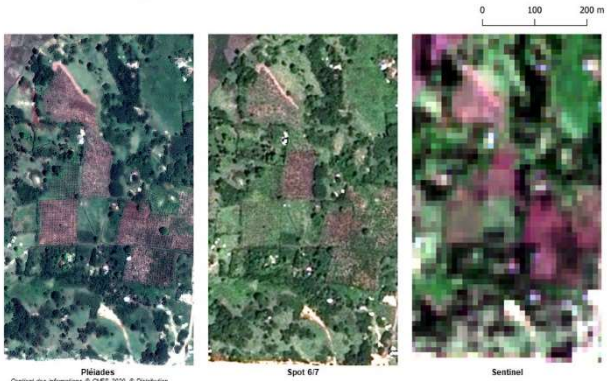
- **5 images:** 10/9/2019, 19/09/2020, 24/09/2020, 15/10/2020 & 31/12/2020: zones partielles, forte couverture nuageuse
- **Mosaïquage :** Assemblage des 3 images en 1 seule
- **Corrections radiométriques :** Réflectance au niveau de l'atmosphère (OTB)
- **Corrections géométriques :** Orthorectification (MNT IGN LiDAR, OTB) + correction polynomiale ordre 2 pour calage sur orthoimage l'IGN (Erdas Imagine)
- **Pansharpening (fusion multirésolution)** (Bayes, OTB)

Image à THRS Pléiades

- **PANchro + 4 bandes spectrales:** B, V, R, PIR
- **4 Indices spectraux (sur pansharpened): NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index R/NIR), **RVI** (Ratio Vegetation Index R/NIR), **NDWI2** (Normalized Difference Water Index G/NIR), **BI2** (Brightness Index 2 G/R/NIR)
- **16 Indices de texture** (Haralick): **Energy, Contrast, Correlation, Variance** avec 3 radius = 3x3, 11x11, 23x23, 43x43 pixels
- **Résolution: 0,5m/pixel**



Comparaison des résolutions



Contient des informations © CNES 2020, © Distribution Airbus DS, tous droits réservés

Contient des informations © Airbus DS 2020, © Production IRD, Inrae, IGN – distribution GEOSUD/DINAMIS tous droits réservés

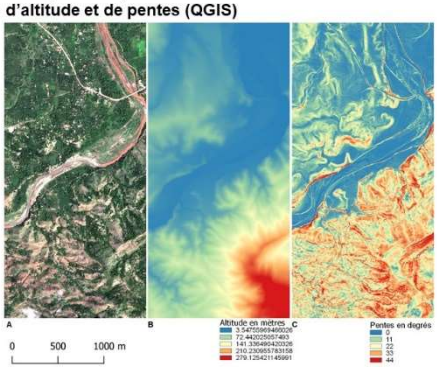
Données à valeur ajoutée traitées par le CNES pour le pôle de données Theia www.theia-land.fr à partir de données Copernicus. Les traitements utilisent les algorithmes développés par les Centres d'Expertise Scientifique de Theia.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

cirad

Données topograpiques

- **Modèle Numérique de Terrain (MNT):** IGN FI de 2014 (LiDAR)
- **Résolution altimétrique: 20cm**
- **Résolution spatiale: 1,5m**
- **Cartes d'altitude et de pentes (QGIS)**



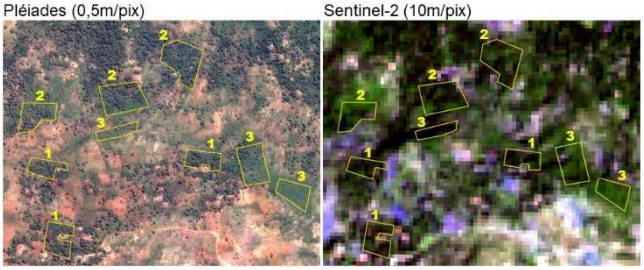
NOMENCLATURE

Travaillée 01/2020
Rediscutée 08/2020
Validée/terrain 09/2020

Classes recherchées par les utilisateurs du TPR	
Culture annuelle ou pluriannuelle sans couvert arboré	
Culture annuelle ou pluriannuelle avec présence d'arbres	*Définition assez ambigüe et détection limitée*
Système agro-forestier	*Détection limitée*
Arboriculture monospécifique	*Discrimination très faible*
Végétation naturelle arborée	
Végétation naturelle arbustive	
Pâturage, prairie et savane herbacée	
Zone humide côtière (mangrove)	
Espace ouvert sans ou avec très peu de végétation : rocher, sol nu et plage	
Eau continentale	*Discrimination très faible*
Eau marine	
Bâti	
Routes	

NOMENCLATURE

Pléiades (0,5m/pix) Sentinel-2 (10m/pix)



1: Système agroforestier

2: Végétation naturelle arborée

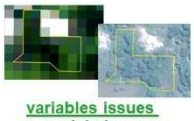
3: Végétation naturelle arbustive

NOMENCLATURE

Corrigée 09/2021
Adaptée 02/2021
Validée/carto 03/2021

Classes recherchées	Classes regroupées	
Nom de classe niveau 2	Nom de classe niveau 1	Nom de classe niveau 0
Culture annuelle ou pluriannuelle sans couvert arboré	Culture non ligneuse	Culture non ligneuse
Culture annuelle ou pluriannuelle avec présence d'arbres		
Système agro-forestier	Agroforesterie et arboriculture	Végétation ligneuse (cultivée et naturelle)
Arboriculture monospécifique		
Végétation naturelle arborée	Végétation naturelle ligneuse	
Végétation naturelle arbustive		
Pâturage, prairie et savane herbacée	Pâturage, prairie et savane herbacée	Pâturage, prairie et savane herbacée
Zone humide côtière (mangrove)	Zone humide côtière (mangrove)	Zone humide côtière (mangrove)
Espace ouvert sans ou avec très peu de végétation : rocher, sol nu et plage	Rocher, sol nu et plage	Rocher, sol nu et plage
Eau continentale	Eau	Eau
Eau marine		
Bâti	Bâti	Bâti
Routes	Routes	Routes

DONNÉES DE RÉFÉRENCE
⇒ vérité terrain



variables issues de la télédétection

réalité du terrain

Clefs de correspondance

guider l'algorithme

phase d'apprentissage des classes d'occupation du sol

évaluer les produits

Accompagnement et formation

Constitution de la base de données de référence

Campagne de collecte d'informations sur le terrain

Accompagnement et formation

Préparation des sorties terrain

Liste des caractéristiques à relever

Protocole d'échantillonnage

Campagne de collecte d'informations sur le terrain

Photos de contexte

Gestion du SIG

2 sorties sur le terrain binômes CNIGS + TPR (sept. & nov. 2020)

500 points enregistrés

Accompagnement et formation

Constitution de la base de données de référence

- Photointerprétation
- Cohérence
- Variabilité
- Numérisation des polygones
- Représentativité
- Homogénéité

« **Guide Technique** : Constitution d'une base de données de référence dédiée à l'apprentissage et la validation des classifications d'images satellites : la vérité-terrain. ». C. Lelong & S. Dupuy. https://agritrop.cirad.fr/597844/

Base partielle constituée par le CNIGS (janv. 2021) 683 polygones

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE cirad

BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE

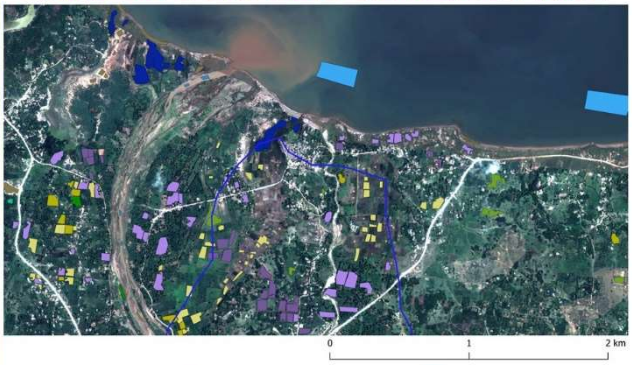
Corrections et compléments par le Cirad (fév. 2021)

1599 polygones référencés

Classe	Nb polygones	Surface (Ha)
Bâti	268	9.91
Culture sans couvert arboré	368	60.20
Culture avec présence d'arbres	90	41.86
Système agro-forestier	181	16.63
Arboriculture	34	35.90
Végétation arborée	109	61.13
Végétation arbustive	148	22.64
Pâturage, prairie, savane herbacée	153	9.55
Zone humide côtière (mangrove)	34	4.75
Rocher, sol nu et plage	149	74.82
Eau continentale	32	76.58
Eau marine	33	84.09
total	1599	498.06

"Nippes - Haïti - 2020, Reference Spatial Database", S. Dupuy, C. Lelong, M.-E. Manasse, J. Rambao, P. Mondésir, R. Gaetano: https://doi.org/10.18167/DVN1/29RZMQ

BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE



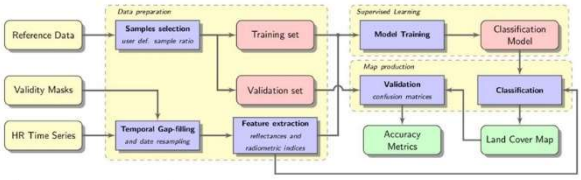
Production cartographique

- Série temporelle Sentinel-2
- Random Forest
- Base de référence
- Apprentissage automatique
- Outil « clefs en main »
- Complémentarité avec Recovery Observatory CNES www.recovery-observatory.org
- iota2
- cartes d'occupation du sol
  - annuelle
  - grande échelle
  - résolution décamétrique
- Automatisation des traitements
- Développement CESBIO Toulouse Theia CES OS
  - OrfeoToolBox
  - Python

Production cartographique

iota2

Schéma simplifié de la chaîne de traitement



- **Préparation des données :**
  - **Vecteur :** création des jeux d'apprentissage et de validation
  - **Images :** prétraitements, traitement des pixels nuageux, extraction d'indices
- **Apprentissage supervisé :** construction du modèle d'apprentissage
- **Production des cartes :**
  - **Génération :** inférence du modèle et post-traitements éventuels
  - **Evaluation :** calcul de la matrice de confusion et des indices dérivés

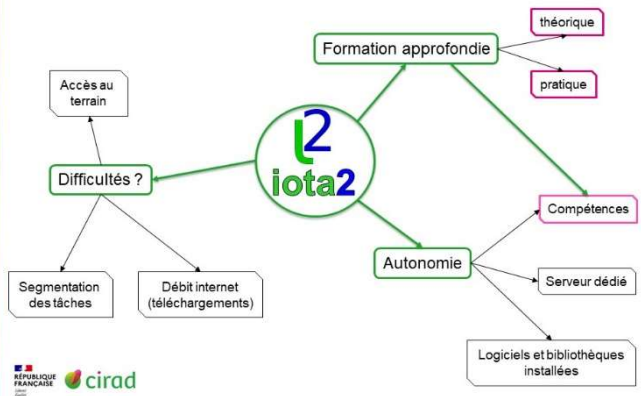
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE cirad — CESBIO Theia

Production cartographique

- architecture des données
- Iota2.py
- configuration
- Formation au Cirad 14/01-13/02/2020 *M.-E. Manassé & G. Jean-Baptiste*
  - OTB
  - S-2
  - iota2
- « Hotline » email+visios 26/03-30/04/2021 Lancement *M.-Esther Manassé*
- iota2
  - évaluation
  - production
  - utilisation
  - installation
- « Hotline » email 1-5/03/2021 Installation *G. Jean-Baptiste*
- Supports didactiques
  - Cours Fondamentaux
  - Guide « pas à pas »
  - Manuels
  - Biblio
  - Travaux pratiques

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE cirad

Production cartographique



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

cirad

Territoires Productifs Résilients en Haïti: Expérimentation sur le prototype *Moringa* pour la carto-OS à très haute résolution spatiale

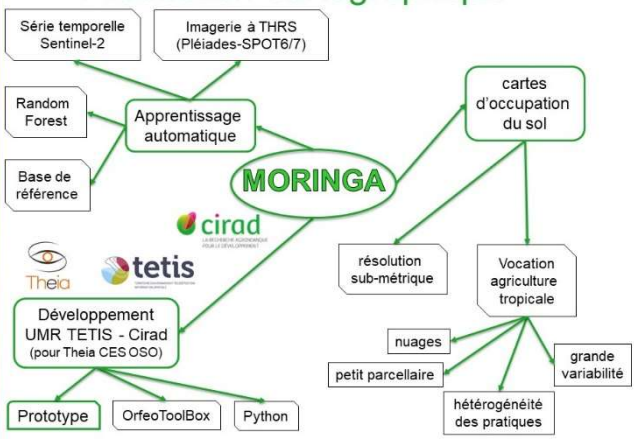
Camille Lelong, Stéphane Dupuy & Raffaele Gaetano

CIRAD, UMR TETIS, F-34398 Montpellier, France.

TETIS, Univ Montpellier, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, INRAE, Montpellier, France

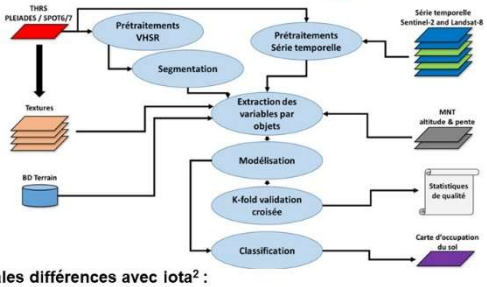
tetis

Production cartographique



La chaîne Moringa

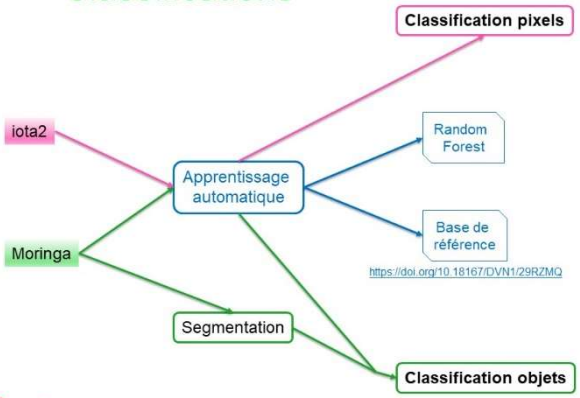
cirad



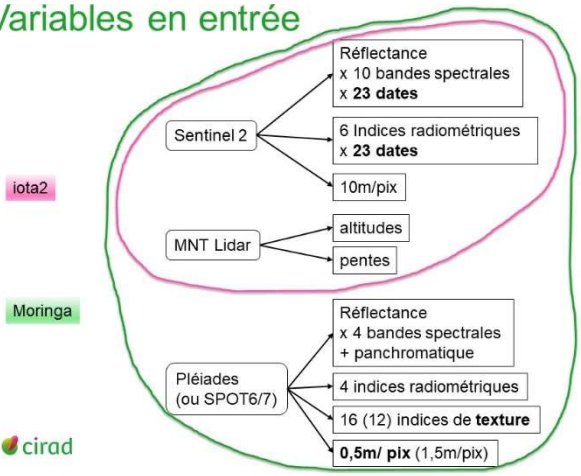
- **Principales différences avec iota^2 :**
  - **Mobilisation d'images et indices à THRS** pour une description plus fine des surfaces, recalage de la série temporelle Sentinel-2 pour plus de précision
  - **Segmentation THR** et **approche à objet**, pour gérer le multi-résolution, améliorer la qualité spatiale et optimiser la stratégie de classification

Theia

Classifications



Variables en entrée



Classifications

- Paramétrages identiques pour les deux chaînes de traitement

Détails consignés ici:

- Raffaele Gaetano, Camille Lelong, Stéphane Dupuy, 2021. « Rapport méthodologique : inter-comparaison des produits de **cartographie de l'occupation du sol avec les chaines Iota2 et Moringa**: cas d'étude de la région des Nippes en Haïti », Montpellier (France) : Cirad, 31 pages https://agritrop.cirad.fr/597991/
- Stéphane Dupuy, Camille Lelong, Raffaele Gaetano 2021. Rapport méthodologique - **Cartographie de l'occupation du sol sur le site des NIPPES** à Haïti, Montpellier (France) : Cirad, 44 pages https://agritrop.cirad.fr/597938.

- Même base de données de référence:

- *"Dupuy, S.; Lelong, C.; Manasse, M.-E.; Rambao, J.; Mondésir, J. P.; Gaetano, R., 2021, "Nippes - Haiti - 2020, **Reference Spatial Database**", Montpellier (France) : CIRAD Dataverse,* https://doi.org/10.18167/DVN1/29RZMQ
- Camille Lelong, Stéphane Dupuy, 2021. Guide technique - Constitution d'une **base de données de référence** dédiée à l'apprentissage et la validation des classifications d'images satellites : la vérité-terrain, Montpellier (France) : Cirad, 16 pages, http://agritrop.cirad.fr/597844 .

- Ces rapports détaillés fournissent la description des **méthodes et données** mobilisées ainsi que l'**évaluation qualitative et quantitative complète des produits obtenus.**

Cartes d'occupation du sol dans les Nippes

"Nippes - Haïti - 2020, Land Cover Map at high spatial resolution", R. Gaetano, S. Dupuy, C. Lelong: http://dx.doi.org/10.18167/DVN1/ZAN2WN

iota2 → Haute résolution spatiale → 10m/pixel

iota2 → 3 niveaux de précision de la nomenclature → 9 cartes

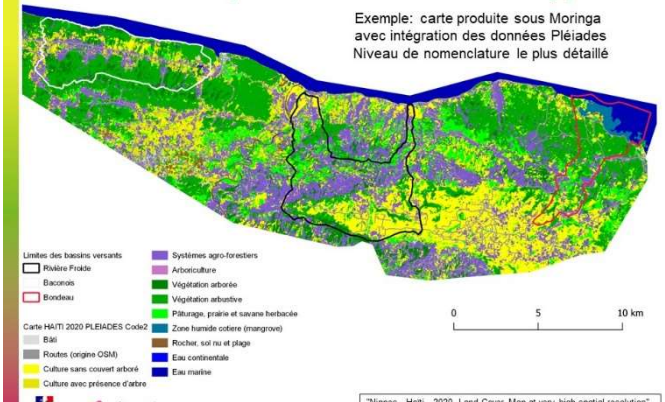
Moringa → 3 niveaux de précision de la nomenclature → 9 cartes

Moringa → Très haute résolution spatiale → 0,5m/pixel, 1,5m/pixel

"Nippes - Haïti - 2020, Land Cover Map at very high spatial resolution", S. Dupuy, C. Lelong, R. Gaetano: http://dx.doi.org/10.18167/DVN1/QOLTTE

Carte d'occupation du sol dans les Nippes

Exemple: carte produite sous Moringa avec intégration des données Pléiades
Niveau de nomenclature le plus détaillé



"Nippes - Haiti - 2020, Land Cover Map at very high spatial resolution", S. Dupuy, C. Lelong, R. Gaetano: http://dx.doi.org/10.18167/DVN1/QOLTTE

Précisions de classification globales

	Niveau 0			Niveau 1			Niveau 2		
	IOTA2	Moringa Spot	Moringa Pléiades	IOTA2	Moringa Spot	Moringa Pléiades	IOTA2	Moringa Spot	Moringa Pléiades
Précision globale	**91,8%**	**90,3%**	**91,8%**	**87,6%**	**86,9%**	**88,5%**	**76,8%**	**78,2%**	**80,4%**
Indice de Kappa	**0,89**	**0,86**	**0,89**	**0,85**	**0,84**	**0,86**	**0,73**	**0,75**	**0,78**

Des précisions:

- du même ordre de grandeur pour les 3 approches, sauf au niveau 2 de nomenclature
- en baisse à mesure que la nomenclature est plus détaillée
- meilleures avec Moringa&Pléiades, surtout pour le niveau 2

→ Définir le compromis entre précision de classification et détail de la nomenclature

Précisions de classification par classe

Classes Niveau 0	F-scores IOTA2	F-scores Moringa Spot	F-scores Moringa Pléiades	Classes Niveau 1	F-scores IOTA2	F-scores Moringa Spot	F-scores Moringa Pléiades	Classes Niveau 2	F-scores IOTA2	F-scores Moringa Spot	F-scores Moringa Pléiades
Espace bâti	82,8%	83,9%	86,8%	Espace bâti	81,1%	80,8%	86,7%	Espace bâti	87,9%	80,6%	86,5%
Culture non ligneuse	81,8%	77,6%	81,2%	Culture non ligneuse	83,2%	78,5%	81,4%	Culture sans couvert arboré	72,9%	73,5%	76,9%
								Culture avec présence d'arbres	27,2%	37,1%	40,1%
Végétation ligneuse (cultivée et naturelle)	95,3%	93,8%	94,9%	Agroforesterie et arboriculture	74,4%	75,3%	79,2%	Système agro-forestier	73,6%	74,7%	78,9%
								Arboriculture	54,5%	62,0%	64,1%
				Végétation naturelle ligneuse	89,8%	90,1%	91,4%	Végétation arborée	69,7%	68,7%	71,1%
								Végétation arbustive	63,2%	70,6%	72,7%
Pâturage, prairie et savane herbacée	73,8%	76,4%	78,4%	Pâturage, prairie et savane herbacée	79,2%	77,1%	78,4%	Pâturage, prairie et savane herbacée	78,5%	76,8%	78,9%
Zone humide côtière (mangrove)	98,5%	96,9%	94,9%	Zone humide côtière (mangrove)	97,7%	98,0%	96,3%	Zone humide côtière (mangrove)	99,2%	98,2%	97,1%
Rocher, sol nu et plage	85,8%	84,2%	83,2%	Rocher, sol nu et plage	87,7%	82,7%	84,4%	Rocher, sol nu et plage	83,0%	82,4%	84,5%
Eau	100,0%	99,6%	99,9%	Eau	99,9%	99,7%	99,9%	Eau continentale	98,6%	92,2%	97,3%
								Eau marine	100,0%	99,9%	100,0%

→ Définir le compromis entre précision de classification et détail de la nomenclature

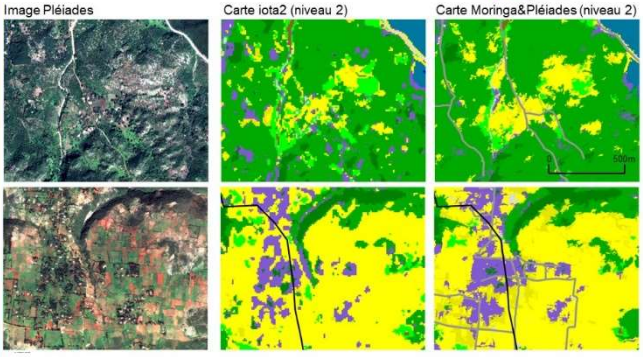
Précisions spatiales

Pâturage, prairie et savane herbacée
Zone humide cotiere (mangrove)
Rocher, sol nu et plage
Eau continentale
Eau marine
Bâti
Routes (origine OSM)
Culture sans couvert arboré
Culture avec présence d'arbre
Systèmes agro-forestiers
Arboriculture
Végétation arborée
Végétation arbustive

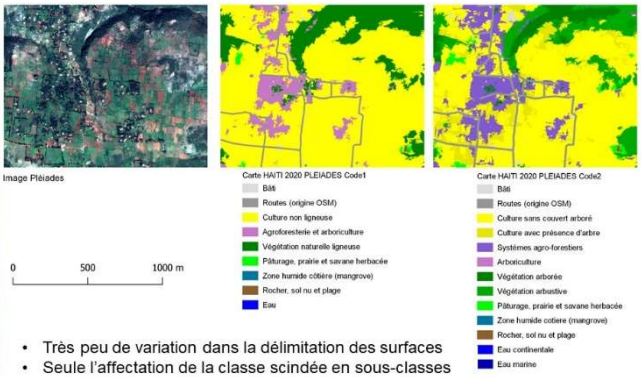
Avec les données Pléiades:

- Meilleure détection des limites de parcelles
- Moins de fausses détection

Image Pléiades | Carte iota2 (niveau 2) | Carte Moringa&Pléiades (niveau 2)



Précisions dans la nomenclature



- Très peu de variation dans la délimitation des surfaces
- Seule l'affectation de la classe scindée en sous-classes plus détaillées varie

CONCLUSIONS

Carto-OS iota2 & série temporelle Sentinel-2:
- bon niveau de fiabilité
- précision spatiale correcte
- données gratuites et renouvelées régulièrement
- chaîne peu couteuse en ressources informatiques (comparée à Moringa)
- facilité de mise en œuvre

Attention:
Importance capitale de la qualité de la base de données de référence

Outil à privilégier pour la carto-OS à l'échelle régionale ou nationale avec volonté de mise à jour régulière (annuellement), pour la détection de changement, etc…

CONCLUSIONS

Apport de la THRS:
- meilleure résolution
- meilleures précisions spatiales
- meilleure discrimination des couverts ligneux (arboriculture/SAF/forêts/brousse arbustive)
- accès à une nomenclature plus détaillée

Désavantages de la THRS:
- Coûts (2125 USD pour 100km^2 pour Pléiades)
- Ressources numériques importantes nécessaires
- Plusieurs jours de processus
- Segmentation, avec paramétrage complexe
- Exigence accrue sur la base de données de référence

THRS à envisager
- pour des actions ciblées (hot-spot)
- sur un territoire restreint (un bassin versant, au maximum)
- ayant de fortes contraintes de discrimination d'occupations du sol spécifiques

BILAN

9 cartes des Nippes, mises à disposition du TPR couvrant les 3 bassins versant des Nippes: Baconois, Rivière Froide, Bondeau

"Nippes - Haïti - 2020, Land Cover Map at high spatial resolution", R. Gaetano, S. Dupuy, C. Lelong: http://dx.doi.org/10.18167/DVN1/ZAN2WN

"Nippes - Haïti - 2020, Land Cover Map at very high spatial resolution", S. Dupuy, C. Lelong, R. Gaetano: http://dx.doi.org/10.18167/DVN1/QOLTTE

Capacité du CNIGS à poursuivre l'opération et à l'étendre à d'autres régions

Département Environnement et Société

Unité Mixte de Recherche « Territoire, Environnement, Télédétection et Information Spatiale »

Maison de la Télédétection, 500 rue Jean François Breton, 34093 Montpellier

Tél. : 04 67 54 87 54

www.Cirad.fr