

Le contrôle de la végétation dans les emprises ferroviaires : une approche multi-scalaire

■ Flavien VIGUIER - André PEREIRA - Fatoumata BAH - Christophe BERTHAUD - Pauline CAPRINI - Arnaud DURAND
Mathias STUDER - Benjamin HUGONET - Antoine GOINEAU - Léna MAATOUG

La gestion du couvert végétal présent dans les emprises ferroviaires se pose comme un enjeu majeur pour la maintenance du Réseau Ferré National (RFN). Avec plusieurs dizaines de millions d'euros de dépenses annuelles, le deuxième poste de coût pour SNCF Réseau, et de nombreux incidents (chute d'arbres, patinage de train, incendies...) le suivi et la maîtrise de la végétation sont au cœur des enjeux d'optimisation de la disponibilité du réseau. Afin d'atteindre l'excellence opérationnelle et de production, SNCF a démarré en 2013 un programme de travail visant à améliorer la connaissance, le suivi et la maîtrise du couvert végétal. Plusieurs campagnes d'acquisitions de données ont donc été mises en œuvre afin de quantifier précisément la végétation présente dans les emprises. En combinant et comparant acquisitions satellitaires, photogrammétrie par drone, mesures LiDAR et travaux de validation terrain, SNCF souhaite définir le domaine de pertinence de différentes méthodes de mesures en vue du lancement d'acquisitions sur l'ensemble du territoire. Cet article présente donc une comparaison des outils et méthodes déployés ainsi qu'une analyse des traitements réalisés et de la qualité des livrables obtenus à l'aide de chacun de ces outils.

MOTS-CLÉS

Surveillance de la végétation, Réseau ferré, Photogrammétrie, Télé-détection, Données satellite, LiDAR, Drone, Surveillance, Maintenance

maçonnerie des ouvrages d'art, des modifications de la géométrie des voies ou bien encore des dysfonctionnements des dispositifs de drainage hydraulique.

- L'écologie : les dépendances vertes ferroviaires sont considérées comme des milieux naturels à haute valeur écologique. Elles sont donc soumises à une réglementation stricte.
- La logistique car la mobilisation des moyens et outils de débroussaillage implique de lourds travaux de programmation.
- Des enjeux financiers. Les incidents végétations impliquent chaque année des pertes estimées à 350 000 minutes (le coût de chaque minute perdue pouvant atteindre plusieurs milliers d'euros).
- Des enjeux sociaux et sociétaux. Chaque incident végétation impacte plusieurs centaines à plusieurs milliers de voyageurs, ce qui a des conséquences directes sur l'économie française (retards...) et véhicule une image négative de SNCF.

En somme, la surveillance de la végétation est nécessaire, pour éviter les départs d'incendies, garantir la qualité de l'eau, ou encore protéger un habitat c'est pourquoi la gestion du couvert végétal SNCF est soumis à un cadre réglementaire strict (application de directives, décrets et arrêtés).

■ Présentation du secteur ferroviaire sélectionné

La présente étude a pour objet l'acquisition de données permettant la réalisation d'une cartographie précise du couvert végétal pour en optimiser sa gestion. Afin de réaliser une étude comparative de différentes méthodologies d'acquisitions, un secteur du

Contexte

Afin d'assurer la sécurité des biens et des personnes empruntant le réseau ferré, SNCF réalise quotidiennement des opérations de surveillance et de maintenance des installations. Pour mener à bien ces travaux, les équipes opérationnelles doivent s'adapter à un environnement complexe à fortes contraintes (circulations ferroviaires, présence d'installations électriques, difficultés d'accès...) et appliquer de contraignantes mais indispensables procédures de sécurité. La somme de ces facteurs rend difficile l'organisation des opérations de maintenance.

La maîtrise de la végétation, représente pour SNCF Réseau le deuxième poste de dépense (120 M€ par an) car la ressource végétale impacte régulièrement la disponibilité du système

ferroviaire et la sécurité des circulations (incendies, chute d'arbres...).

Ainsi la gestion raisonnée du couvert végétal des 30 000 km de lignes du Réseau Ferré National (RFN) exploité doit répondre à des enjeux divers :

- La sécurité du personnel et des circulations. Le couvert végétal peut induire des masques pour la signalisation ferroviaire (signaux mécaniques ou lumineux...), réduire la visibilité des conducteurs des trains, induire la prolifération d'obstacles sur les voies (animaux, branches...), engendrer des ruptures caténaïres (en cas de chute d'arbres) et rendre difficile, voire interdire le cheminement des agents en activité sur le terrain.
- La pérennité des installations. La prolifération de la végétation implique un vieillissement prématuré de la

réseau de lignes à grande vitesse (LGV) a été retenu. En effet, en raison de leur large importance (plus d'une centaine de mètres), les emprises des LGV représentent un terrain d'étude idéal (diversité du couvert végétal, surfaces importantes...). De plus, au regard de l'importance du trafic ferroviaire et des vitesses de circulation, les exigences concernant la visibilité et la prévention des retards/accidents vis-à-vis de la végétation revêtent une importance primordiale.

Par ailleurs, il est à noter que les méthodes actuellement utilisées pour réaliser l'inventaire végétal ne sont pas parfaitement adaptées :

- les mesures directes sur le terrain par "tournées à pieds" sont chronophages et impliquent la mobilisation d'importantes ressources en personnel ;
- les images obtenues lors des acquisitions vidéo par train ne sont pas exploitables en raison de la vitesse de circulation des trains et du manque de visibilité (partie supérieure des déblais/talus non visible, partie inférieure des remblais/talus non visible).

Au regard de ces contraintes, les équipes SNCF ont démarré un programme de recherche visant à intégrer de nouvelles méthodologies d'acquisitions (drones, images satellites, images aériennes, Lidar) dans les processus de surveillance du couvert végétal tout en qualifiant tant d'un point de vue technique qu'économique les

apports de chacune de ces méthodes. L'inventaire végétal de l'ensemble des LGV étant en cours de réalisation, l'expérimentation a été menée sur un tronçon de 25,6 km de la ligne reliant Paris à Marseille (cf figure 1)

■ Les objectifs

L'objectif de SNCF est de tendre vers une maîtrise de la végétation des dépendances vertes du Réseau Ferré National (RFN) à un coût raisonnable, tout en garantissant sécurité, pérennité des installations et qualité environnementale ; en somme d'atteindre l'excellence opérationnelle de la "production végétation". Afin de répondre à ces problématiques, SNCF s'est engagée dans une démarche professionnelle de maîtrise de la végétation en passant d'un traitement curatif à un traitement préventif. La première étape pour atteindre l'objectif consiste en la réalisation d'un schéma directeur qui définit une stratégie d'entretien "macroscopique" de la végétation sur le réseau. Une fois définie pour l'ensemble des dépendances vertes, cette stratégie générale d'entretien sera déclinée pluriannuellement en respectant les contraintes budgétaires fixées par la Direction de la Maintenance.

La seconde étape est l'élaboration de plans de gestion. Ils constituent une maille plus fine du schéma directeur et répondent au plus près à la mise en œuvre opérationnelle des presta-

tions d'entretien. Les plans de gestion sont établis par unité géographique et par ligne, ils se construisent en se basant sur un inventaire de la végétation (nature, hauteur, densité...) et la connaissance des contraintes du terrain (configuration topographique, accès, réglementation des eaux superficielles et souterraines...). Ces données permettent de définir les zones d'interventions prioritaires et d'établir un calendrier prévisionnel des travaux de végétation en recherchant l'optimum économique à long terme.

La mise en place d'un schéma directeur et d'un plan de gestion d'un espace consiste avant tout à élaborer un document de synthèse sur la situation actuelle. Ce document a pour but d'établir un état des lieux permettant d'identifier précisément les enjeux de l'emprise étudiée : l'inventaire végétal est donc la première étape. Le besoin en entretien des dépendances vertes du RFN, tout comme le coût associé à cet entretien, sont conditionnés par un ensemble de facteurs, facteurs représentant les critères pertinents à retenir pour l'inventaire.

Afin d'appréhender ces critères, il est important de définir les dépendances vertes ferroviaires. Celles-ci prennent en compte l'ensemble des espaces, situés au-delà du bord extérieur de la piste longeant les voies. Comme le montre les figures 2 et 3, elles sont scindées en deux parties, bande de proximité et abords :

- la bande de proximité s'étend sur une distance de 3 mètres, à partir du bord extérieur de la piste longeant la voie. Les interventions dans cette zone sont fortement conditionnées par les contraintes de sécurité ferroviaire ;
- les abords s'étendent au-delà de la bande de proximité et jusqu'à la limite extérieure des emprises.

Sur les Lignes à Grande Vitesse (LGV), la limite de l'emprise est clairement formalisée par des clôtures.

Les facteurs dimensionnant l'entretien des dépendances vertes peuvent être classés en différentes catégories selon qu'ils modifient les protocoles d'entretien, le coût lié à un protocole d'entretien, ou la fréquence avec laquelle les opérations doivent être réalisées.



Figure 1. La zone d'expérimentation

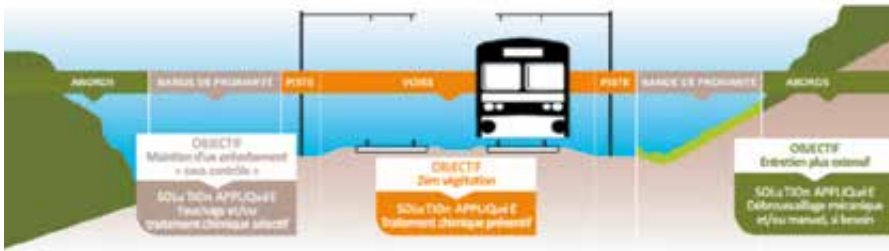


Figure 2. Les différentes zones de maintenance de la végétation



Figure 3. Les différentes bandes d'analyse de la végétation

Les strates de végétation :

La première catégorie de facteurs conditionne la végétation attendue et par conséquent les protocoles d'entretien à envisager. Il s'agit donc de distinguer une typologie de végétation en fonction de la strate de végétation selon la classification suivante (cf. figure 4) :

- absence de végétation,
- couverture herbacée,
- couverture arbustive peu dense (moins de 25 % d'arbustes sur l'hectomètre),
- couverture arbustive moyennement dense (plus 25 % d'arbustes sur l'hectomètre),
- couverture arborée peu dense : présence d'arbustes et d'arbres de plus de 6 m de haut (hauteur de la caténaire),
- couverture arborée moyennement dense : présence de nombreux arbres et arbustes, plus de 40 arbres à l'hectomètre, le couvert se rapproche d'un bosquet ou d'un bois.

La densité est un critère qui permet de définir les machines-outils pouvant être utilisées pour assurer les interventions de coupe de la végétation.

Les hauteurs de végétation :

La classification des hauteurs de végétation (0 - 0,5 m ; 0,5 - 1 m ; 1 - 3 m ; 3 - 7 m ; 7 - 12 m ; > 12 m) est également un élément indispensable pour définir les protocoles d'entretien. La dynamique végétale aux abords des voies est fortement liée à celle des parcelles contiguës situées hors emprises SNCF, c'est pourquoi il est important d'étudier l'occupation des sols sur un large corridor (dans les emprises et au-delà des emprises).

La deuxième catégorie de facteurs conditionne les données liées à la topographie ou au réseau ferré.

La pente des talus :

La pente est un critère primordial dans

l'analyse et le contrôle du couvert végétal. En effet, en présence de déblais, la hauteur de végétation tolérable est limitée, car les arbres poussant en surplomb des voies peuvent rapidement représenter un danger pour les installations.

De plus, les techniques d'industrialisation et de mécanisation du traitement de la végétation ne sont envisageables que dans des pentes transversales n'excédant pas 50°. Au-delà il est nécessaire de procéder aux opérations manuellement, avec de l'équipement léger (débroussailluse, pulvérisateur à dos, tronçonneuse) ce qui augmente considérablement le coût d'intervention.

La distance à l'infrastructure :

Pour finaliser l'étude du couvert végétal, il est nécessaire de disposer d'informations sur la distance arbre-infrastructure. En effet, en corrélant cette donnée avec la pente des talus et la hauteur de végétation il devient possible de définir le niveau de criticité de chaque arbre. De plus, une évaluation des risques potentiels liés à la chute des arbres peut être envisagée : rupture ou amorçage caténaire, chute sur la voie...

Solution proposée : la maîtrise de la donnée au service de la végétation : mise en place d'une campagne de tests

Afin de définir la méthodologie de mesure et de contrôle du couvert végétal la plus pertinente, les équipes SNCF ont décidé de mener une campagne de tests en confrontant différentes technologies d'acquisition : relevés satellitaires, photogrammétrie par drone, mesures LiDAR aéroportées et contrôle terrain. Ces méthodes de mesures ont été sélectionnées car elles permettent d'obtenir des données dans des formats et avec des échelles différentes. Par ailleurs, afin d'atteindre l'optimum économique, SNCF a souhaité mettre en œuvre des technologies disposant de coûts d'acquisitions variables (de quelques dizaines d'euros par kilomètre pour le satellite à plusieurs centaines d'euros pour les acquisitions LiDAR).



Figure 4. Exemple de classification de la végétation



Figure 5. Relevé terrain de la typologie de végétation

■ Mesures manuelles in situ : obtenir la vérité terrain

Tout d'abord, une campagne de mesure terrain a été effectuée pour déterminer avec précision la végétation présente dans les emprises. L'objectif était ici de fournir des échantillons de référence pour toutes les strates de végétation ainsi que pour les classes de hauteurs et de densités. Un relevé par échantillonnage a donc été réalisé : chaque échantillon type (uniforme en typologie et strate de végétation) a été relevé par l'intermédiaire d'un capteur GNSS configuré en mode temps réel réseau. La figure 5 illustre une zone d'échantillon de typologie herbacée.

Basé sur ces données, établissant la vérité terrain, le traitement et l'analyse des différentes méthodologies d'acquisition ont pu être initiés.

■ Acquisition par système drone

Le DT-18, présenté en figure 6, est un mini-drone à voilure fixe de type avion, conçu par le constructeur français Delair-Tech. Ce système de drone, entièrement électrique et automatisé est formé d'un vecteur aérien et d'une station sol. Il est autorisé par la Direction Générale de l'Aviation Civile

à évoluer dans le cadre du scénario S4, soit hors vue du télépilote (au-delà d'un kilomètre de distance).

Le vecteur aéronautique intègre un autopilote, une centrale inertielle, une liaison pour la communication avec la station sol, ainsi que deux baies de chargement interchangeables selon le type de mission. La station sol offre la possibilité de réaliser des plans de vols préprogrammables et ainsi d'automatiser le vol du vecteur.

Étude réglementaire

Avant tout déploiement de drones sur le territoire national, une étude réglementaire doit être réalisée. Elle permet de valider la faisabilité des acquisitions (pas de survol de zone peuplée, pas d'intervention à proximité d'un aéroport...). L'analyse réglementaire est indispensable pour toute opération drone et revêt une importance primordiale lors du déploiement hors vue du télépilote.

L'étude du secteur d'expérimentation a permis de montrer que la zone de vol n'était sous l'influence d'aucune zone aérienne contrôlée, ni d'aucun aéroport, aérodrome, héliport, ou base ULM (cf. figures 7 et 8). La phase d'acquisition était donc conforme au cadre légal

Poids à vide	1,7 kg
Charge utile	0,3 kg
Envergure	180cm
Longueur	120cm
Matériaux	Carbone, composite
Propulsion	Électrique 250 W, hélice avant
Batterie	Lithium-Ion Polymère 16V- 18,8 Ah
Décollage	Lancement manuel
Autonomie	120 minutes
Altitude en vol	Jusqu'à 150 m
Vitesse de croisière	50 km/h
Conditions météorologiques	Vents jusqu'à 45 km/h - pluie modérée



©Redbird

Figure 6. Le drone Delair-Tech DT-18

du scénario S4 : opérations hors vue directe du télépilote, hors zone peuplée au sens aéronautique, dans un volume de dimension horizontale illimitée et de hauteur maximale à 150 m du sol et des obstacles artificiels.

En préparation de la mission, un dossier de vol, cosigné par SNCF et Redbird (l'opérateur de drone réalisant la mission), a été rédigé puis transmis à la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) afin de présenter les travaux programmés et l'étude réglementaire réalisée. Ce dossier a été complété par l'envoi d'un e-mail déclaratif, 48 heures avant le début des opérations, pour



©Redbird

Figure 7. Visualisation du tracé de la portion de voie survolée sur fond de carte aéronautique OACI



©Redbird

Figure 8. Visualisation du tracé de la portion de voie survolée et de l'espace aéronautique sur fond de carte Google Satellite



confirmer la réalisation de l'intervention. L'ensemble des procédures ayant été respecté, les vols ont pu être réalisés.

Mise en place de points d'appui

Afin d'assurer le géoréférencement des acquisitions, et d'ainsi permettre la réalisation d'une analyse comparative avec les différentes sources de données, un ensemble de points de contrôle nommés GCP (*Ground Control Point*) a été positionné sur le parcours. Au regard des contraintes d'intervention (impossibilité d'accéder aux emprises de la Ligne à Grande Vitesse, présence de nombreux ouvrages d'art...) le déploiement de cibles tous les 500 m environ a été décidé (soit 47 cibles). Afin d'éviter toute déformation des livrables (orthophotographies, nuages de points...), les GCP ont été répartis sur l'ensemble de l'emprise de mesure (points situés à quelques mètres ou à plusieurs centaines de mètres des emprises, mise en place de cibles à l'est et à l'ouest de la ligne...). La position des cibles a alors été relevée à l'aide d'un équipement GNSS en mode NRTK (coordonnées X, Y, Z relevées avec une précision de l'ordre de 2,5 cm). Les cibles, visibles sur les photographies, ont été utilisées comme points d'appui lors du traitement photogrammétrique des données.

Acquisition RVB et PIR

En vue de réaliser une cartographie de la végétation, le DT 18 a été équipé de la baie dite "DT-4Bands" (cf. figure 9), composé d'un couple de capteurs de 1,3 MPix chacun permettant d'obtenir des acquisitions synchrones dans les domaines du proche infrarouge et du visible (RVB).

L'importance du relief sur la zone d'étude a interdit la réalisation des acquisitions en un vol unique. En

effet, les différents masques naturels (collines, talus...) bloquaient la liaison radio entre le vecteur et la station sol réduisant ainsi le rayon d'action du drone. Trois vols d'une durée moyenne de 30 minutes, à une hauteur de 130 mètres par rapport au sol et à partir de trois lieux de décollage différents, ont donc été nécessaires pour couvrir l'acquisition complète des 25 km de ligne. Plus de 3 500 images ont ainsi été récoltées par chacun des deux capteurs (proche infrarouge et visible).

Les images ont été acquises avec un taux de recouvrement important (70 % en transversal et longitudinal), permettant ainsi à tout point de la scène d'être visible sur plusieurs images.

De plus, l'équipement GNSS et la centrale inertielle dont est doté l'aéronef ont permis d'enregistrer pour chaque prise de vue la liste – non exhaustive – des métadonnées suivantes :

- Le nom de la photographie
- La longitude et la latitude, en degrés, de l'aéronef au moment de la prise de vue
- L'altitude relative au point de décollage, en mètres, de l'aéronef au moment de la prise de vue
- Les angles de roulis, tangage, et lacet (angles de prise de vue) de l'aéronef au moment de la prise de vue.

■ Acquisition par satellite

Présentation du système Pléiades

Le système Pléiades, composé de deux satellites d'observation de la Terre, fournit une capacité d'acquisition d'images à très haute résolution avec une répétitivité quotidienne en tout point du globe. Les images panchromatiques (470 - 830 nm) ont une taille de pixel ré-échantillonné à 0.50 m. Les images multispectrales se composent



(source Airbus Defense and Space)

Figure 10. Stéréo et Tristéreo Pléiades

de 4 bandes (bleu 430 - 550 nm, vert 500 - 620 nm, rouge 590 - 710 nm, proche-infrarouge 740 - 940 nm) et ont une taille de pixel ré-échantillonné à 2.00 m. La fauchée théorique est de 20 km. L'encodage de la mesure est réalisé sur 12 bits, donc 4096 valeurs par bande sont possibles pour chaque pixel.

L'agilité des satellites Pléiades permet des acquisitions multiples le long de la trace. La configuration "tri-stéréoscopique" fournit 3 images acquises avec des points de vue différents, autorisant la reconstruction de la scène observée par des techniques classiques de stéréophotogrammétrie (cf figure 10).

Spécification de l'acquisition

Une programmation du système Pléiades a été réalisée pour une acquisition d'images en condition tri-stéréoscopique sur une emprise couvrant le tracé de la LGV sur la zone considérée (4 km de large pour une distance de 27 km). Après plusieurs tentatives infructueuses en raison de la couverture nuageuse importante lors de l'été 2014, trois images satisfaisant les spécifications ont été acquises par Pléiades 1A le 5 septembre 2014.

■ Acquisition LiDAR à l'aide du Riegl VUX-1

Le LiDAR Riegl VUX-1 est un scanner laser aéroporté spécialement développé pour être embarqué sur système drone. En effet, malgré son poids de 3.5 kg (poids du LiDAR seul), ce LiDAR multi-échos (cf. figure 11) permet d'acquérir jusqu'à 500 000 points par seconde pour une altitude de vol pouvant atteindre 300 mètres sol. L'ouverture du capteur (plus de 300°) et sa précision théorique

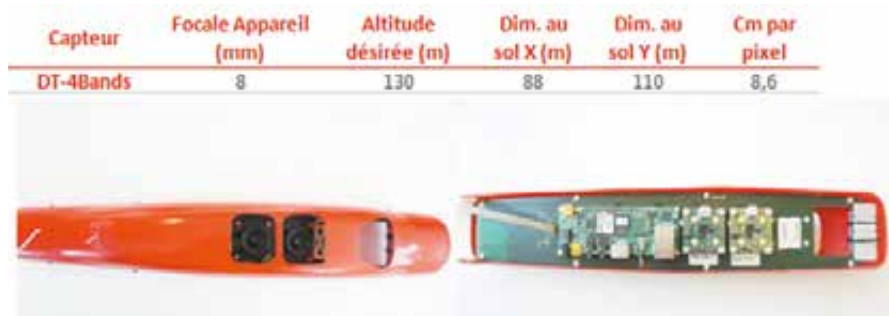


Figure 9. Le capteur du DT-18 : le DT-4Bands

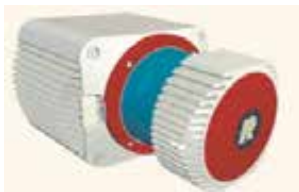


Figure 11. le scanner laser Riegl VUX-1

© Riegl

de 25 mm (précision absolue) en font le capteur le plus performant du marché pouvant être déployé sur drone.

Les acquisitions

A la date d'intervention (au dernier trimestre 2014) aucun système de mini-drone ne disposait de la capacité d'emport et de l'autonomie suffisante pour permettre d'effectuer les acquisitions sur les 25 km de la zone d'étude, il a donc été décidé, en accord avec la société Riegl, de réaliser les acquisitions à partir d'un autogyre (cf. figure 12).

Afin de se positionner dans des conditions d'acquisitions similaires à une intervention drone, l'ensemble des vols de l'autogyre a été effectué à une hauteur de 150 m/sol (hauteur maximale autorisée réglementairement pour les vols de drones). De plus, pour valider les capacités du capteur (précision, répétabilité...) les mesures ont été réalisées sur une plage de vitesse comprise entre 80 et 120 km/h. Il est à noter que ces vitesses sont plus élevées que les vitesses généralement atteintes par les mini-drones, néanmoins, déployer le capteur dans ces conditions nous a



Figure 12. le VUX-1 monté sur autogyre

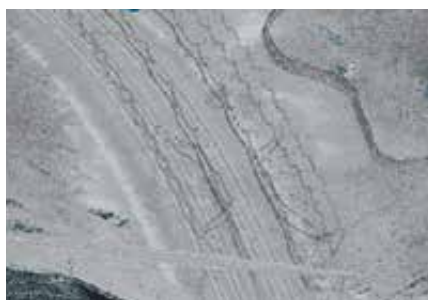


Figure 13. nuage de points acquis à l'aide du VUX-1

permis d'étudier ses limites opérationnelles et techniques.

Pour un vol aller/retour réalisé à une vitesse de 80 km/h avec une fréquence de 600 kHz le VUX-1 fournit un nuage de points d'une densité supérieure à 25 points/m² (cf. figure 13) ce qui est parfaitement adapté à l'étude et au contrôle du couvert végétal.

Les traitements réalisés

Afin d'aboutir à l'extraction de données utiles et exploitables par le métier végétation, un ensemble d'analyses a dû être réalisé sur chacune des données acquises. Des traitements dits de "bas niveau" (tri des données, réalisation des orthophotos...) aux traitements "métiers", SNCF et ses partenaires (Redbird pour les relevés par drone et le SERTIT pour les acquisitions satellitaires) ont appliqué et mis en place différents processus d'extraction et de valorisation des données.

■ Valorisation de la donnée drone

Traitements photogrammétriques

Les opérations de traitements ont démarré par une étape de tri et de sélection des clichés acquis. Cette étape a permis de ne conserver que les clichés représentant un intérêt pour l'étude (suppression des clichés acquis hors emprise ferroviaire, des clichés sur-exposés...). Un ensemble de traitements photogrammétriques a alors été appliqué afin de valoriser la donnée acquise. Tout d'abord, en combinant les photographies brutes avec les métadonnées de positionnement et les coordonnées des cibles, un modèle tridimensionnel de la zone d'étude a été construit (par corrélation dense d'images).

L'étape initiale d'autocorrélation des images permet d'obtenir un premier nuage de points altimétriques dit "épars". Les points de liaison contenus dans ce nuage épars correspondent aux pixels communs identifiés sur différentes images.

Les coordonnées des points d'appui sont alors intégrées afin d'améliorer la précision du géoréférencement. Une fois les cibles repérées sur les images, des calculs d'aérotriangulation permettent de densifier le nuage de points (nuage de points dix fois plus dense) et d'obtenir une représentation 3D plus réaliste de la zone d'étude. Chaque point ainsi déterminé en trois dimensions (coordonnées X, Y, Z) contient en complément une information radiométrique (couleur RVB pour les points issus des données visibles, et valeur PIR pour ceux issus des images infrarouges comme présenté en figure 14) qui permettent une visualisation et une compréhension plus aisée des données extraites.

Le modèle tridimensionnel de la zone est alors construit avec précision, par triangulation des points, permettant l'export de deux orthophotographies géoréférencées d'une résolution spatiale de 10 cm (orthophotographie à une bande dans le proche infrarouge, et à trois bandes RVB dans le visible).

Analyse spectrale

Une fois les orthophotographies créées, la société Redbird a pu procéder à la cartographie de la zone d'étude en respectant le cahier des charges fourni par SNCF. Pour cela la végétation a été classifiée selon les catégories suivantes :

- Ombres portées
- Sols nus



Figure 14. Photo brute drone (RVB à gauche et PIR à droite)



Figure 15. Gestion de la végétation par classes de hauteurs

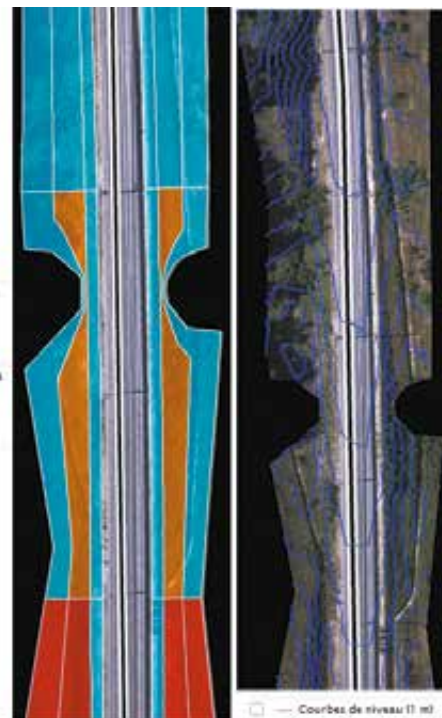


Figure 16. Indicateur topographique

- Végétation herbacée
- Végétation arbustive
- Végétation arborée.

Cette classification s'est effectuée par une méthode dite "non supervisée" reposant sur l'analyse des propriétés spectrales des différentes classes recherchées (cf figure 15).

Le calcul de la hauteur de la végétation a dans un dernier temps permis de discriminer les classes de végétation arborée et arbustive.

Réalisation du MNS et extrapolation du MNT

Le MNS

A l'issue des traitements photogrammétriques, un Modèle Numérique de Surface géoréférencé a été exporté au format GeoTIFF. Dans ce MNS, l'information contenue dans chaque pixel correspond à son élévation (absolue). Le nuage de points altimétriques dense a également été exporté et a servi de base à la réalisation du Modèle Numérique de Terrain.

Le MNT

Le Modèle Numérique de Terrain a été réalisé par interpolation de l'élévation des points tridimensionnels situés dans les zones de sol nu, et des points les plus bas situés dans les zones de végétation herbacée (ces zones laissant apparaître à la fois des éléments de végétation et de sol nu). Bien que fastidieuse, cette étape permet d'obtenir une représentation correcte de la topographie de la

zone d'étude. En comparant MNS et MNT on obtient alors les valeurs de densité et de hauteur de végétation ; données indispensables à la maîtrise de la végétation pour les équipes de Maintenance SNCF.

Le MNT géoréférencé a été exporté au format GeoTIFF avec une résolution spatiale de 10 cm.

Détermination des classes de pente

Afin de simplifier les opérations de traitement mais également de se mettre en concordance avec les capacités des outils de maintenance de la végétation classiquement utilisés par SNCF (Epareuse, tronçonneuse, engin rail/route...) il a été décidé de représenter la topographie du terrain par un indicateur visuel simplifié : la zone d'étude a ainsi été divisée en tuiles de 100 m de long, de part et d'autre de la voie ferrée, dans la bande de proximité ainsi qu'au niveau des abords et des pistes. Cet indicateur permet d'identifier rapidement les moyens pouvant être mobilisés pour réaliser l'entretien du couvert végétal, les référentiels de maintenance SNCF définissant les plages d'utilisation de chaque machine-outil pour assurer la réalisation des travaux au meilleur coût tout en assurant un haut niveau de sécurité.

Chaque tuile a ainsi été classée en déblai, remblai ou plat selon la valeur de pente qui lui est associée (cf. figure 16). De plus, afin d'affiner cette représentation topographique les tuiles

situées aux abords de la piste ont été divisées en deux dans le sens de la largeur. On comprend aisément que ce découpage de la topographie ne permet pas d'obtenir une représentation exacte du terrain naturel (nombreuses approximations dans les classes de pentes), néanmoins, elle nous fournit les informations suffisantes à la programmation des moyens d'intervention et peut donc être directement utilisée par les équipes de maintenance.

■ Valorisation des acquisitions satellitaires

Pour obtenir des livrables comparables à ceux réalisés à l'aide des acquisitions drone, un Modèle Numérique de Surface est généré grâce au corrélateur MicMac de l'IGN, à un pas de 1 m.

Les images panchromatiques et multispectrales les plus nadirales sont orthorectifiées par modèle à fonctions rationnelles avec prise de points d'appuis sur la BD ORTHO de l'IGN, puis fusionnées par la méthode bayésienne, pour obtenir une image à 4 canaux avec un pixel rééchantillonné à 50 cm (cf. figure 17).

L'image multispectrale est corrigée des effets atmosphériques par une transformation en réflectance TOC (Top of Canopy), permettant de passer d'un compte de pixels à une valeur physique. Afin de bien délimiter la zone d'étude et

©Redbird

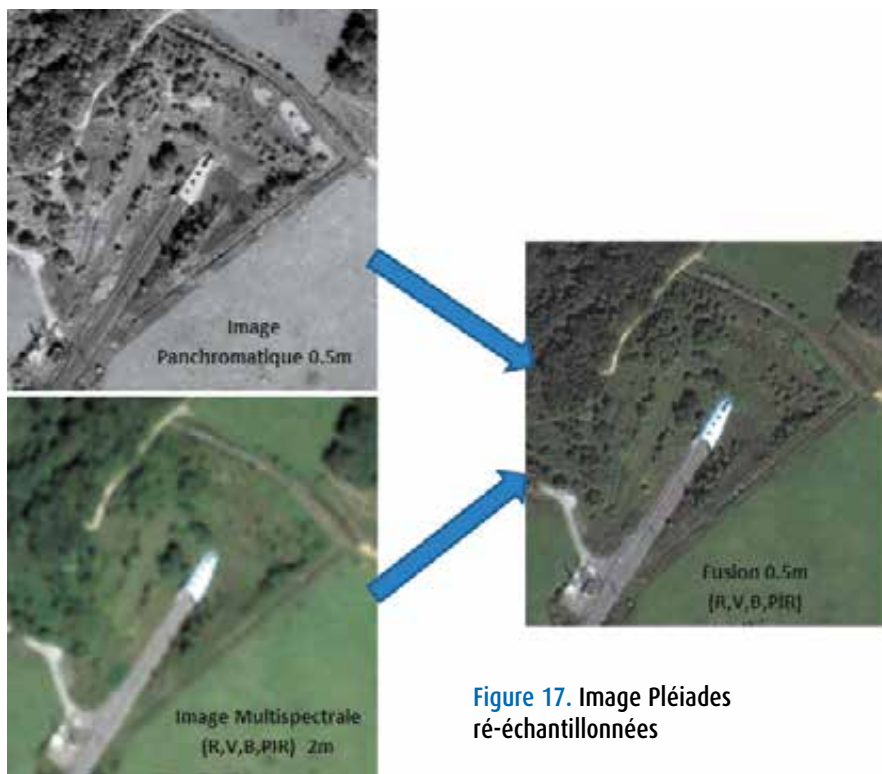


Figure 17. Image Pléiades ré-échantillonnées

croisées avec les informations acquises lors des relevés terrain par une discrimination des essences. Cependant, en raison de la diversité des essences présentes dans les emprises ferroviaires et de la faible représentation d'échantillons de pixels par essence et masse végétale, l'analyse trouve ses limites mais pourrait être consolidée par une approche multi-temporelle.

Les traitements réalisés sur les données drones et satellites nous fournissent des livrables de forme identique (nuage de points 3D, MNS, MNT, classification de la végétation et répartition des classes de pentes par transects de 100 m...) qui pourront être étudiés et comparés afin de définir le domaine de pertinence de chacune des méthodes.

■ **Valorisation de la donnée LiDAR**

Afin d'extraire le nuage de points 3D des acquisitions LiDAR plusieurs opérations de traitement et d'analyse des données acquises sont nécessaires. Nous avons tout d'abord réalisé un premier calcul de la trajectoire en combinant les données du VUX-1 (mesures GNSS+INS) avec les acquisitions satellitaires réalisées sur le pivot GPS SNCF ainsi que sur les stations du Réseau GNSS Permanent situées à proximité. Afin d'éliminer toutes les fautes de mesure, le calcul a été effectué en aller-retour et nous avons obtenu une trajectoire d'une précision inférieure à 10 cm. A partir de cette trajectoire nous avons pu exporter le nuage de points 3D. Afin d'optimiser la précision du nuage de points nous avons procédé à un recalage des données en utilisant une vingtaine de GCP répartis sur l'ensemble de la zone d'étude (un point tous les kilomètres

ne disposant pas d'informations cadastrales précises, les emprises de la LGV sont digitalisées par photo-interprétation en analysant l'impact du tracé de la voie dans le paysage, les clôtures n'étant pas toujours visibles à cette résolution spatiale.

L'analyse de l'environnement des emprises est réalisée sur une largeur de 400 m de part et d'autre de l'axe central de la ligne, selon la nomenclature présentée précédemment. Une cartographie d'occupation du sol est produite à partir de l'image multispectrale par méthode supervisée basée sur les SVM (*Support Vector Machine*) et orientée-objet.

L'analyse de la végétation à l'intérieur des emprises, basée sur la nomenclature présentée précédemment, est réalisée par une méthode ad-hoc s'appuyant sur une analyse orientée-objet de l'image fusionnée et un arbre de règles de décision construit sur des critères radiométriques et la prise en compte des échantillons terrain.

Le MNS est transformé en Modèle Numérique de Terrain (MNT) par élimination des éléments de sursol et ré-interpolation de type IDW. La différence entre ces deux données permet d'obtenir un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) indiquant pour chaque

pixel la hauteur de la végétation. La pente des talus est obtenue par moindres carrés en considérant les altitudes du MNT entre des transects de 10 m.

Une analyse statistique sur la végétation à l'intérieur des emprises est réalisée sur des tuiles délimitées en longitudinal par l'axe central de la ligne ainsi qu'en transversal par des transects situés aux points kilométriques ainsi que tous les 100 m. Une fois les données classifiées, les informations de superficie par classe ainsi que des pourcentages sont calculés et exprimés pour chaque tuile. Il est ainsi possible d'analyser la densité de végétation arborée par tuile, comme le montre la figure 18.

Afin d'affiner les opérations de traitement, les données images ont été

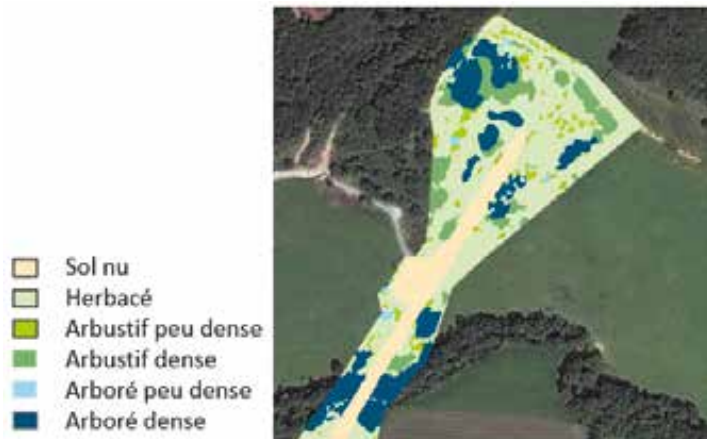


Figure 18. Classification par la hauteur de la végétation

environ) et avons alors exporté le nuage de points final. L'analyse des données a ainsi pu être démarrée afin de valoriser les acquisitions LiDAR.

Afin d'extraire les informations sur le couvert végétal nous avons procédé à deux classifications distinctes :

- classification automatique, basée sur l'analyse des différents échos laser acquis par le VUX-1, en utilisant le logiciel Terrasolid,
- classification supervisée, basée sur la répartition spatiale des points, en utilisant le logiciel Canupo. Pour classifier de manière pertinente la végétation nous avons segmenté le linéaire d'étude en zones présentant des caractéristiques végétales identiques.

Il est à noter qu'au regard de la masse de travail représentée par cette double classification nous avons concentré notre analyse sur un linéaire de 5 kilomètres.

Ces deux classifications nous ont permis de comparer les méthodes d'analyse mais également d'affiner l'extraction du couvert végétal. En effet, en présence de végétation basse et dense (ronces par exemple) l'utilisation des multi-échos laser trouve ses limites, limites aisément comblées par une analyse spatiale des données. La classification finale des nuages de points a alors été obtenue par combinaison de ces deux approches et peut être visualisée en *figure 19*.

Une fois le nuage de points classifié nous avons construit le modèle numérique de terrain avec un pas de 5 mètres. Les lignes de ruptures ont été

intégrées afin d'optimiser la représentation du terrain. En comparant Modèle Numérique de Terrain et Modèle Numérique de Surface nous avons obtenu le volume du couvert végétal présent sur la zone ; information importante pour planifier et quantifier les opérations de surveillance et de maintenance.

En complément de cette analyse du couvert végétal nous avons investi une solution d'individualisation d'arbres (*cf. figure 20*). En combinant les données de la normale de chaque point avec la répartition spatiale du nuage (densité des nuages de points, barycentre de sous-groupes de points, hauteur moyenne) nous avons pu extraire chaque arbre présent sur la zone d'étude. Ces travaux, encore au stade de l'innovation/développement nous permettent de nous projeter vers une exploitation future et massive de LiDAR pour la quantification du couvert végétal. Néanmoins, des étapes de robustification de code et d'automatisation des processus doivent encore être réalisées pour permettre la mise en production de l'outil. En effet, les temps de traitements actuellement constatés (plusieurs heures nécessaires pour traiter quelques kilomètres) ne nous permettent pas une industrialisation immédiate.

L'individualisation des arbres est une étape importante dans l'analyse et la maintenance de la végétation car elle nous permet de quantifier précisément les volumes de coupe végétale et donc de planifier et mettre en œuvre



Figure 20. Individualisation d'arbres à partir du nuage de points LiDAR

les opérations de débroussaillage au meilleur coût. Néanmoins, cette information n'est pas suffisante pour établir une cartographie du risque végétation précise. En effet, cette donnée doit être complétée par l'angle d'inclinaison des troncs, afin de pouvoir évaluer le risque inhérent à chaque arbre (croisement des données topographiques, hauteur des arbres, angle d'inclinaison et distance à l'infrastructure). Des premiers tests ont été réalisés à l'aide du logiciel Computree développé par l'ONF mais les résultats obtenus n'ont pas été concluants. En effet, la densité des nuages de points acquis lors de cette expérimentation est insuffisante pour permettre une extraction robuste des diamètres et de l'orientation des troncs. De plus amples investigations seront menées prochainement à partir d'une nouvelle campagne d'acquisition (avec des vitesses d'acquisition drone plus faibles) mais également en combinant les nuages de points du VUX-1 avec des données acquises à l'aide d'un scanner dynamique (à partir d'un système Riegl VMX-450).

Résultats et analyses

Après traitement des données, une analyse des domaines de pertinence de chacune des technologies de mesure a été menée. Cette analyse, présentée ci-après nous permet la définition des process de mesure et de contrôle de la végétation à déployer pour quantifier le couvert végétal présent dans les emprises ferroviaires.

■ Utilisation de systèmes drones Points forts

L'utilisation de drones pour l'inspection de la végétation aux abords des

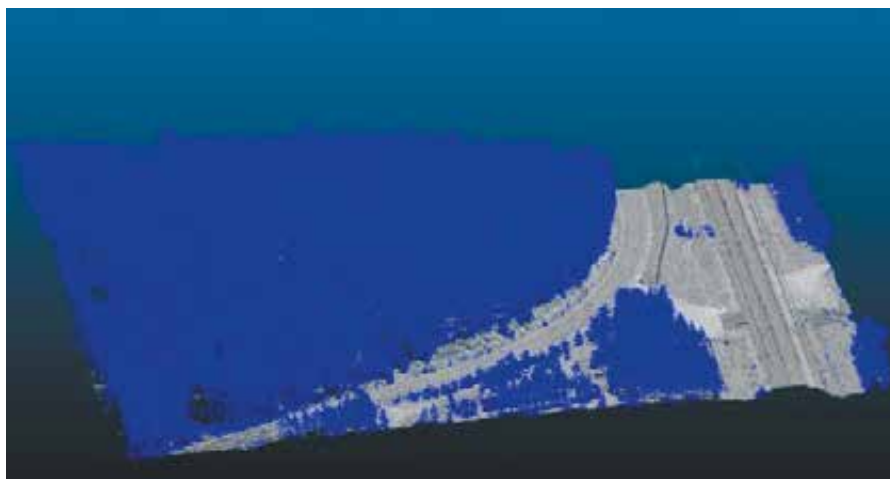


Figure 19. Classification de la végétation



voies présente des avantages majeurs :

- **Réactivité** : une opération de survol peut être déployée de manière rapide (moins d'une heure entre la préparation et le décollage). Cette rapidité rend possible la réalisation d'acquisitions y compris au cours de journées présentant des conditions météorologiques difficiles (précipitations, vent important) : le système peut être mis en œuvre durant une accalmie et fournir des résultats exploitables.
- **Répétabilité** : l'archivage des plans de vol nous permet de nous projeter sur la réalisation de vols réguliers. Ainsi, le contrôle régulier de la végétation et l'analyse de ses évolutions peuvent être envisagés.
- **Disponibilité** : la hauteur de vol autorisée en France étant limitée à 150 m, les acquisitions drones sont dans la majeure partie du temps réalisées à une altitude inférieure à une éventuelle couverture nuageuse.
- **Qualité des données** : la faible hauteur de vol permet l'obtention de données avec une résolution spatiale de quelques centimètres. Cette résolution est particulièrement bien adaptée pour la détection d'éléments tels que les clôtures, nécessaires à la délimitation de l'emprise. De plus, la végétation de petite taille (quelques cm²) est également représentée par plusieurs pixels rendant ainsi possible leur détection et leur quantification.
- **Densité de mesure** : les traitements photogrammétriques réalisés sur des images de résolution spatiale d'ordre centimétrique et ayant un taux de recouvrement important permettent d'obtenir des données topographiques d'une densité importante (jusqu'à plusieurs centaines de points altimétriques par m²).
- **Intervention non intrusive** : la capacité des drones à réaliser un relevé exhaustif des emprises ferroviaires sans perturber les circulations représente le point fort majeur de l'utilisation de cette technologie. Ainsi, la cartographie des infrastructures est réalisée en toute sécurité sans impacter la disponibilité du système ferroviaire.
- **Coût** : aucun accès aux emprises n'étant nécessaire, le coût complet de l'intervention drone (coût d'acquisition + coût lié aux mesures de sécurité à

mettre en œuvre lors de l'accès aux emprises) est plus faible que le coût habituellement observé lors d'interventions humaines. De plus, le coût des opérations drones n'étant pas à ce jour encore stabilisé (les travaux ayant été réalisés à titre expérimental) nous pouvons aisément imaginer une réduction du montant des observations lors du lancement d'opérations de surveillance récurrentes, réduction qui rendra la solution drone toujours plus intéressante économiquement.

Points faibles

Malgré ses nombreux atouts, l'utilisation de systèmes drones peut parfois s'avérer complexe. Nous pouvons citer, par exemple, les difficultés rencontrées pour définir un plan de vol respectant scrupuleusement la réglementation (pas de survol de zones habitées, pas de vol à proximité d'aéroports, aérodromes, zones sensibles...). Les optimisations techniques et technologiques (intégration de systèmes de détecter/éviter, certification des systèmes drones...) associées à une évolution de la réglementation permettront sans aucun doute de pallier ces difficultés. Néanmoins, dans l'attente de ces modifications la plus grande rigueur réglementaire doit être apportée lors de la définition du plan de vol afin d'assurer la sécurité des usagers de l'espace aérien mais également des personnes au sol.

Les limites de poids imposées par la réglementation française ainsi que les performances des technologies existantes (batteries, capteurs, équipements de géoréférencement et centrales inertielles) limitent également les performances des systèmes de drones :

- Pour les vols hors vue (scénario S4) le poids maximum des drones est limité à 2 kg, ce qui restreint le choix des charges utiles embarquées. De même l'autonomie allouée par des batteries de faible poids est encore limitée.
- Les centrales inertielles et système GNSS présents sur l'aéronef étant également soumis à cette restriction de poids, ils permettent d'obtenir un géoréférencement absolu d'une précision d'ordre métrique. Lorsqu'un géoréférencement des données précis est désiré, la pose de cibles au sol

géoréférencées s'avère nécessaire et alourdit la logistique des opérations.

- Le volume de données acquis par drone étant considérable sur des missions d'envergure, de fortes puissances de calcul sont nécessaires pour manipuler ces données, notamment lors des traitements photogrammétriques.

Au cours de la mission végétation, d'autres contraintes organisationnelles et techniques ont été constatées. Tout d'abord, afin de profiter de créneaux météorologiques favorables, l'acquisition des images a été réalisée par trois vols différents à des horaires distincts. Ces horaires d'acquisitions ont été à l'origine de disparités radiométriques importantes pouvant rendre l'interprétation des clichés complexe. De plus, l'ensemble des vols n'ayant pas été réalisés lorsque le soleil était situé au zénith, de nombreuses ombres portées ont péjoré la qualité des clichés et donc l'interprétation image. A titre d'exemple, le pourcentage d'ombre portée oscille (par tuile de longueur de 100 m) entre 0 et 85 % pour une moyenne de 15 %. Le choix des horaires d'acquisition apparaît donc, comme pour toute opération aérienne classique, être un élément déterminant lors de la prise de vue par drone.

Par ailleurs, les conditions météorologiques locales (vent...) peuvent impliquer des modifications des plans de vol ; modifications pouvant être à l'origine de données lacunaires. Ainsi, malgré un paramétrage permettant un recouvrement important entre clichés (plus de 70 % en longitudinal et transversal) l'aérologie locale peut parfois fortement influencer les acquisitions et les résultats.

L'analyse des données nous a également permis d'étudier la qualité et la précision des livrables et de définir les limites d'acquisitions par drone. Nous pouvons citer par exemple la détection de la végétation au niveau des pistes et itinéraires ferroviaires. En effet, les résultats obtenus ne nous permettent pas une discrimination fiable des zones avec ou sans végétation : certains éléments comme les poteaux caténaires, par exemple, sont classifiés comme de la végétation (*cf. figure 21*).



Figure 21. Erreur de classification des données (caténaïres, cerclés en vert, classifiés comme de la végétation)

Ces erreurs de classification pourront sans aucun doute être corrigées lors de la réalisation des prochaines missions, mais elles démontrent la complexité des traitements et la rigueur d'analyse devant être appliquée afin d'aboutir à des livrables à haute valeur ajoutée au service des métiers.

De plus, l'interprétation de la hauteur des arbres n'a pas permis de réaliser la cartographie complète du risque végétation (identification des arbres dangereux). Pour déterminer le risque de chute d'arbres sur la voie, il aurait fallu réaliser une étape supplémentaire d'extraction et de modélisation de la caténaire, afin de déterminer la distance végétation/installations électriques pour identifier les zones de potentiels amorçages électriques, ainsi que le risque de rupture caténaire liée à une chute d'arbres. En raison de la faible taille des câbles, l'extraction des caténaïres est difficile à réaliser à partir de clichés.

En somme, le traitement des données acquises par drone permet d'obtenir une classification juste et cohérente de la typologie de végétation. Cependant, il s'agit d'une typologie minimale (herbacé, arbustif, arboré) n'étant pas totalement représentative de l'ensemble de la végétation présente dans les emprises ferroviaires. De plus, en raison de la hauteur de vol du

drone et du recouvrement choisi, nous n'avons pu couvrir qu'un corridor d'une centaine de mètres. Ce corridor semble trop limité pour déterminer les types de végétation présents aux abords de nos emprises. Cette information est primordiale, car elle nous permet d'identifier les risques potentiels végétation qui peuvent être liés à une nouvelle infrastructure, la modification des cultures agricoles... Lors des futures opérations, le mode opératoire sera adapté pour permettre l'acquisition de données sur un corridor d'environ 200 m. Enfin, bien qu'initialement prévue, l'extraction des essences de végétation n'a pas été réalisée en raison de la complexité de l'opération et de l'intérêt secondaire de cette information pour la réalisation des opérations de surveillance et de maintenance du couvert végétal.

■ Satellite

Points forts

Grâce à sa grande agilité et la qualité de l'instrument imageur (très haute résolution, bandes spectrales, large fauchée), le satellite Pléiades est un outil particulièrement adapté à la problématique de l'étude. L'orbite héliosynchrone assure une revisite temporelle dans des conditions d'ensoleillement similaires et maîtrisées : quelle que soit la date, l'acquisition d'une image est réalisée à une heure solaire constante et proche du midi solaire afin de minimiser les ombres. En outre, le système Pléiades propose un approvisionnement flexible grâce à une capacité de programmation réactive, un vaste catalogue d'archives disponibles, et l'achat d'images au km² à des coûts raisonnables.

Les images délivrées ont permis de fournir des produits d'une grande qualité géométrique et thématique, répondant au besoin d'analyse de l'environnement de la ligne, ainsi que de cartographie du type de végétation dans les emprises, selon les spécifica-

tions exprimées par SNCF. La matrice de confusion présentée ci-dessous permet de mettre en évidence une bonne performance de la classification avec un coefficient Kappa égal à 0.79.

Par ailleurs, bien que la digitalisation des clôtures sur les aspects paysagers soit moins précise que celle réalisée sur les données drones, les informations sur les limites des emprises ferroviaires restent de bonne qualité. L'approche satellitaire permet donc l'obtention d'une vision très élargie (~350 m) de l'occupation du sol au voisinage de la ligne. Il est donc plus facile de déterminer le type de végétation vers lequel la dynamique naturelle tend.

Points faibles

Le rayonnement réfléchi à la surface de la terre ne traverse pas les couches nuageuses dans les longueurs d'ondes mesurées par l'instrument. Par conséquent, la date d'acquisition n'est pas maîtrisée et une météo perturbée sur la zone peut allonger le délai d'acquisition d'une image exploitable. Pour ce chantier, nous avons par exemple obtenu les images deux mois après la date d'acquisition initialement prévue du fait de conditions particulièrement défavorables pour la saison, ce qui peut avoir un impact important sur la programmation des interventions de maintenance de la végétation.

Par ailleurs, bien que l'analyse de la matrice de confusion montre une bonne discrimination des zones sans végétation, elle révèle une légère confusion entre les zones arbustives et arborées avec les zones herbacées. De plus, l'exploitation du MNS, d'une précision altimétrique estimée à +/-1.50 m, se révèle délicate. Les hauteurs de végétation sont ainsi difficiles à déterminer et insuffisamment précises et ne permettent pas de satisfaire les besoins exprimés par SNCF (précision décimétrique). Enfin, il est

		Classification				
		Absence	Herbacé	Arbustif	Arboré	
Validation	Absence	44	4	0	1	49
	Herbacé	6	245	12	6	269
	Arbustif	0	24	50	2	76
	Arboré	0	3	9	94	106
		50	276	71	103	500

difficile, voire impossible d'exploiter les mesures de pentes fournies par traitement des données satellites. En effet, la résolution spatiale est insuffisante pour extraire les classes de pentes précisément, en particulier sur les talus étroits ou de faible dénivelée.

■ Utilisation d'un scanner laser aéroporté

Points forts

Les scanners laser aéroportés sont déployés depuis de nombreuses années dans le cadre d'opérations de surveillance et d'inspection de la végétation. La densité de points acquis, combinée à l'utilisation des multi-échocs laser permet une extraction simple, rapide et précise du couvert végétal et de la topographie de la zone inspectée. Ces avantages ont été confirmés lors du déploiement du LiDAR Riegl VUX-1 sur un autogyre. L'intégration prochaine de ce capteur dans un système drone laisse espérer de nouvelles perspectives de développements en raison de la précision et de la densité de mesure :

- Réactivité et agilité : comme évoqué précédemment, le déploiement de systèmes drones peut être réalisé en quelques minutes y compris en présence d'une couverture nuageuse importante car les vols sont limités à une hauteur de 150 m/sol. Cette caractéristique nous permet de nous projeter sur un déploiement régulier (opérations récurrentes) de LiDAR sur drone sans être dépendant des conditions météorologiques (pour l'aviation classique les acquisitions sont principalement réalisées durant la période estivale).
- Exhaustivité : les acquisitions étant réalisées à une altitude et à une vitesse relativement faibles (vitesse d'acquisition visée de 50 km/h), nous obtenons des nuages de points relativement denses. Cette densité est également accentuée par la mise en place de vols aller-retour (acquisition redondante) pour assurer un atterrissage en toute sécurité. La densité de mesure nous permet d'individualiser chaque arbre et nous laisse envisager l'extraction automatique des troncs et de leur orientation : informations indispensables pour mettre en place une

analyse poussée du couvert végétal.

- Qualité : les données étant acquises avec une précision de l'ordre de 5 centimètres, nous quantifions très précisément le risque végétation. Nous pouvons citer en exemple le calcul des distances végétation-infrastructure ou végétation-installation électrique qui sont des données entrantes indispensables à la programmation et à la réalisation des opérations de maintenance.

Points faibles

Bien que très pertinente, l'utilisation d'un système LiDAR sur drone présente un ensemble de limites techniques et économiques qui ne nous permettent pas d'envisager un déploiement massif à court terme :

- coût : l'acquisition et le traitement de données LiDAR implique un coût important (plusieurs centaines d'euros par kilomètre) ne pouvant être supporté uniquement par les équipes "maintenance de la végétation". Il est donc indispensable de mutualiser ces données avec différents métiers et applications (études hydrauliques, analyse des installations électriques...). A ce jour, nous estimons que le déploiement d'une telle technologie trouve sa pertinence pour l'acquisition de linéaires d'une longueur maximale de 25 kilomètres. Au-delà il est préférable d'effectuer les relevés à l'aide de systèmes aéroportés classiques ;
- réglementaire : le poids du Riegl VUX-1 (5 kg en intégrant le LiDAR, la centrale inertielle, le capteur GNSS et les différents accessoires) impose une utilisation de drones d'une masse comprise entre 15 kg (pour les voilures fixes) et 20 à 25 kg pour les voilures tournantes. De tels systèmes drones n'étant actuellement autorisés qu'en vol à vue, il est difficile d'envisager une utilisation pour le contrôle de longs linéaires. Une évolution réglementaire allié à une amélioration de la sécurité des drones (intégration de dispositifs de "détecter/éviter"...) seront donc nécessaires. Les travaux en cours dans le cadre du Plan National Drone de la Nouvelle France Industrielle laissent présager une issue positive à moyen terme ;

- traitement : les traitements des données LiDAR imposent l'utilisation d'importantes ressources informatiques et engendrent de nombreuses heures de calculs, ce qui interdit la livraison des résultats de manière simple et rapide. De plus, le niveau d'automatisation des traitements n'est pas encore optimal ; de nombreux développements complémentaires (extraction automatique des troncs et de leur orientation, classification...) devront être réalisés pour rendre cette technologie opérationnelle à faible coût.

Analyse comparative

■ Bilan satellite / photogrammétrie par drone

Acquisitions des images :

L'acquisition de données sur des tracés linéaires de plusieurs centaines de kilomètres reste difficile à industrialiser par drone : à titre d'exemple, une ligne à grande vitesse couvre en moyenne 500 km. En effet, les contraintes réglementaires qui autorisent des aéronefs agréés pour un scénario S4 sont pour le moment encore importantes. Parallèlement, pour optimiser la précision d'acquisition, l'implantation de GCP est indispensable, ce qui engendre des coûts d'intervention importants (coûts pouvant être réduits lors de la mise en place d'opérations récurrentes). A l'inverse, malgré de nombreuses contraintes pour obtenir des clichés parfaitement exploitables (absence de nuages) l'approche satellite facilite les aspects de planification et le rapport surface/efficacité de la mesure.

Traitement des données :

La résolution spatiale des données issues du drone permet de détecter des éléments de façon plus précise que la résolution spatiale des données issues du satellite. Ainsi, il est possible de détecter la présence de végétation sur la piste ou de délimiter de façon plus détaillée la position des emprises ferroviaires par drone. Les informations issues du MNT comme les classes de hauteurs ou de topographie sont elles aussi de qualité supérieure par drone (que les acquisitions soient effectuées par photogrammétrie ou lasergrammé-

DONNÉES	DRONE Photogrammétrie	SATELLITE
Délimitation des emprises	***	**
Géométrie	**	**
Classification végétation sur voie	***	**
Classification végétation emprise et abords	**	**
Déblai / remblai	**	*
Pentes	**	*
Hauteur de végétation	**	*
Grands linéaires	*	***

trie). Il est à noter que la classification de la végétation à l'intérieur des emprises n'ayant pas été réalisée par la même chaîne de traitement, il est difficile de comparer la précision des typologies de végétation obtenues.

Le traitement automatique des images issues des drones et du satellite permet d'obtenir une classification juste et cohérente de la végétation. Les deux méthodes apportent une bonne discrimination des strates de végétation (herbacée, arbustive, arborée) sur les abords. Cependant, les informations obtenues sont dans les deux cas plutôt macroscopiques. En effet, la discrimination des essences reste un point à améliorer autant pour l'acquisition photogrammétrique par drone que par satellite. Bien que le drone soit un outil avec des focalisations à très haute résolution, les informations de présence/absence de végétation sur piste ne sont pas assez fiables pour être utilisées seules. L'avantage de la résolution des images drone permet par contre d'avoir des informations sur la topographie (déblais/remblais/plats). En conclusion, bien que le drone permette d'obtenir des données plus précises, il est encore difficile d'envisager une acquisition complète sur de grands linéaires (le domaine de pertinence de la solution "drone photogrammétrique" est actuellement estimé à un linéaire de 50 kilomètres maximum). L'aspect réglementation limite les travaux de grande ampleur. L'approche satellitaire, quant à elle, représente une solution intéressante pour repérer les zones prioritaires et évaluer les budgets sur l'ensemble de la ligne grâce aux statistiques (exemple : pourcentage de strate arborée/arbustive/herbacée). Il sera ainsi possible de créer le schéma directeur.

■ Bilan LiDAR / photogrammétrie par drone

Acquisitions des données :

L'acquisition photogrammétrique par drone sur un linéaire d'une vingtaine de kilomètres est relativement simple à mettre en œuvre. En effet, un cadre réglementaire a été défini par le législateur et des moyens d'acquisition adéquats ont été développés. L'acquisition LiDAR par drone, est quant à elle, pour l'instant plus expérimentale : aucun cadre législatif n'a encore été posé et il n'existe que très peu de drones de moins de 25 kg capables d'embarquer ce type de capteur (LiDAR multi-échocs permettant d'atteindre des précisions de mesure de l'ordre de 5 cm). De nombreux développements,

techniques et réglementaires, seront donc nécessaires pour permettre l'industrialisation de cette solution.

Qualité des données :

Afin d'étudier la qualité des données acquises, une analyse comparative des nuages de points LiDAR et photogrammétrique a été entreprise. Cette analyse géométrique se concentre uniquement sur l'étude de la densité et la précision relative des nuages de points. En effet, au regard de la précision de géoréférencement nécessaire pour l'étude de la végétation (précision de 10 à 20 mètres), aucune analyse de la précision absolue n'a été menée.

Nous avons tout d'abord mené une analyse visuelle des nuages de points (cf. figure 22). Cette analyse nous permet de constater un lissage global du nuage de points photogrammétrique : les clôtures, installations caténaïres et la végétation de petite taille (inférieure à 1 m de hauteur), sont soit sous-représentées, soit totalement absentes. La plate-forme ferroviaire est également représentée de manière partielle (pas de détection des rails, banquette de ballast lissée...). Pour confirmer ces résultats nous avons extrait différents profils en travers afin de quantifier ce lissage dans les données ; des extraits de

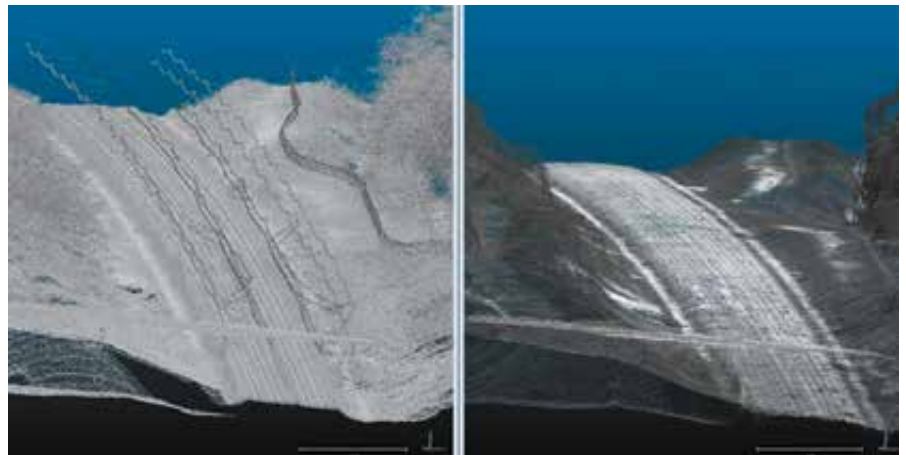


Figure 22. Analyse visuelle des nuages de points LiDAR et photogrammétriques

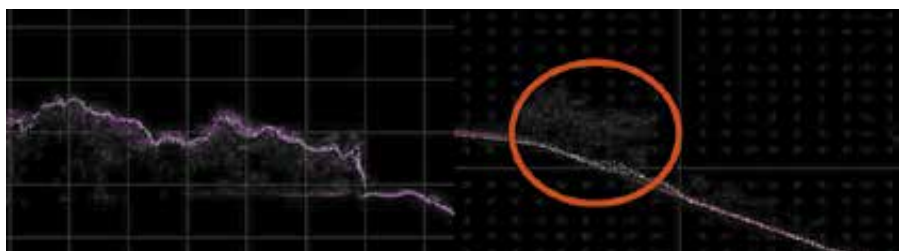


Figure 23. Profils en travers comparatifs - Nuage de points photogrammétrique en blanc et nuage de points LiDAR en violet

► profils en travers extraits sont présentés en *figure 23*.

L'extraction de ces profils confirme les hypothèses de l'analyse visuelle : un lissage global du nuage de points photogrammétrique est observé. Ainsi, le sommet des arbres, les changements de hauteur de végétation (ou les clairières) et la végétation de faible taille sont peu représentés sur le nuage de points photogrammétrique, alors qu'ils sont parfaitement modélisés dans le nuage de points LiDAR. De plus, en présence de végétation sous les installations électriques (caténaïres), d'importantes aberrations (erreurs de plusieurs mètres) des hauteurs de végétation sont constatées. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer ces différences dans les nuages de points :

- incapacité des outils de photogrammétrie à réaliser une corrélation d'images en présence d'éléments situés sur plusieurs profondeurs de champ (fil électrique au premier plan et végétation au second plan). Ce problème pourrait être résolu en augmentant le recouvrement entre images et en intégrant des images obliques dans les calculs. L'adaptation des paramètres de corrélation d'images aux conditions d'acquisitions et au type d'objet à modéliser est une piste qui peut également être exploitée pour améliorer la qualité des nuages de points photogrammétriques ;
- défaut de corrélation sur les images

sur-éclairées ou sous-éclairées. Ces zones ne disposant pas d'une dynamique suffisante pour un appariement de qualité, les logiciels déterminent un coefficient de corrélation trop faible (voire mauvais) ce qui induit une suppression des points calculés au niveau des zones surexposées ou sous-exposées.

Un exemple est présenté en *figure 24*. Dans le cas présent les images sont sur-éclairées et les zones présentant des pixels "sombres" ne sont pas traitées : les arbres (dans le cercle rouge) sont sous-représentés alors qu'ils atteignent une hauteur de plus de 5 mètres. Pour pallier ces défauts, il est indispensable de régler correctement les paramètres de prise de vue avant le vol mais également de réaliser les acquisitions lorsque le soleil se trouve à son zénith. Les effets d'ombres dans les images seront ainsi minimisés et les coefficients de corrélation obtenus conformes à l'extraction et au calcul d'un nuage de points de qualité. Utiliser des capteurs plus résolus ou présentant des caractéristiques techniques plus abouties (possibilité de modifier l'ensemble des paramètres images au cours du vol) peut également être envisagé. Néanmoins, étant limité par le poids maximal du drone (2 kg), cette possibilité semble difficilement envisageable à très court terme. Il semble donc plus simple d'utiliser des logiciels qui permettent d'adapter les paramètres de traitement des données

aux conditions d'acquisition. Cette solution rend possible l'utilisation de clichés acquis dans de mauvaises conditions, mais ne permet pas de corriger l'ensemble des défauts des clichés (ombres portées...). Bien que les traitements corrigent un certain nombre de défauts, il est toujours préférable de bien étudier en amont les différents paramètres permettant d'aboutir à l'obtention de données de qualité (sensibilité et résolution du capteur adaptées au type de mission, heure et conditions de vol...).

- absence de détection du sol nu dans le nuage de points photogrammétriques. Cette conclusion, bien que triviale, doit impérativement être mentionnée dans le cadre de nos travaux (surveillance de la végétation dans les emprises ferroviaires). En effet, la présence d'un couvert végétal dense nous interdit la détermination de la topographie par photogrammétrie. Pour établir une cartographie du risque végétation, il est indispensable de maîtriser la topographie des emprises, c'est pourquoi il est important de rappeler ce phénomène trop souvent négligé lors de la fourniture des résultats (phénomène non négligé par la société Redbird dans le cadre de notre étude). Pour pallier ce manque, il peut être intéressant de combiner acquisitions LiDAR et photogrammétriques. En effet, la topographie des emprises ferroviaires n'est modifiée que très rarement et un même MNT (extrait à l'aide de données LiDAR) peut être exploité pendant plusieurs années.

Au regard de la précision de détermination des hauteurs de végétation nécessaire (précision de l'ordre du mètre), nous pouvons valider l'utilisation des deux technologies de mesures. En effet, les défauts constatés sur les nuages de points photogrammétriques seront facilement détectés et corrigés lors de la réalisation des tournées terrain mises en œuvre préalablement au démarrage des travaux d'élagage. Par ailleurs, il est important de noter qu'une analyse comparative globale nuage/nuage a également été menée, mais en raison d'une différence de densité entre les nuages de points trop importante (densité du nuage de points photogrammétrique inférieure à la densité du nuage de points LiDAR)



Figure 24. Défaut de corrélation dans les images drone



cette analyse n'a pas fourni de résultats concluants et exploitables.

Traitement des données :

Ces deux technologies de mesure nous permettent d'obtenir des données hautement résolues indispensables à la détermination de la topographie ainsi que du couvert végétal présent dans les emprises. La grande majorité des traitements photogrammétriques est automatisée ce qui permet une fourniture rapide des résultats. En opposition, le volume des nuages de points LiDAR combiné à l'absence de logiciels spécialisés dans l'analyse précise de la végétation imposent de nombreux développements et donc d'importantes opérations de traitement.

■ Bilan général

Après avoir analysé les différentes méthodologies d'acquisition et les résultats obtenus, nous avons pu établir une analyse comparative complète de chacune des techniques. Cette analyse est présentée ci-contre.

Conclusion et perspectives

■ Conclusion

Ce chantier nous a permis de tester et de comparer différentes technologies de mesures dans le cadre d'une opération de quantification du couvert végétal. Les précisions d'acquisition et la qualité des livrables fournis ont rendu possible la définition des domaines de pertinence de chacun de ces outils de mesure. Grâce à ces différents tests, les spécialistes SNCF disposent maintenant d'un outil d'aide à la décision pour la surveillance, la maintenance et le contrôle de la végétation présente dans les emprises ferroviaires. L'approche multi-scalaire nous permet de nous projeter sur une amélioration progressive de la connaissance du milieu ferroviaire. En effet, il n'est économiquement pas envisageable de déployer des acquisitions LiDAR (méthodologie la plus précise) sur l'ensemble du territoire national, mais en combinant les différentes méthodes nous pourrions dans un premier temps réaliser du ciblage des zones à risques (par satellite) puis dans un deuxième temps analyser précisément le risque en utili-

DONNÉES	DRONE Photogrammétrie	LiDAR
Délimitation des emprises	***	****
Géométrie	**	****
Classification végétation sur voie	**	***
Classification végétation emprise et abords	**	****
Déblai / remblai	**	****
Pentes	**	***
Hauteur de végétation	**	****

Analyse technique

DONNÉES	SATELLITE	DRONE Photogrammétrie	LiDAR
Sol nu	Proche de la réalité	Légère surestimation, certaines zones herbacées sont considérées en sol nu	Très bonne détermination
Herbacée	Légère surestimation	Légère sous-estimation	Difficile à estimer précisément
Arbustive	Légère sous-estimation	Proche de la réalité	Proche de la réalité
Arborée	Proche de la réalité	Sous-estimation	Proche de la réalité
Discrimination des ensembles végétalisés	Bonne	Le pourcentage important d'ombres portées ne permet pas d'exploiter toutes les données visuellement	Bonne
Présence Végétation sur piste	Non	Peu fiable	Proche de la réalité
"Essences"/ Espèces	Non	Non	Non
Densité	Difficile à évaluer	Bonne	Bonne
Hauteur	Estimation des grands ensembles	Proche de la réalité	Bonne
Topographie	Peu fiable	Fiable	Très fiable
Discrimination des essences	Non réalisé	Non réalisé	Non réalisé
Résolution spatiale	50 cm	5 cm	Plusieurs dizaines à centaines de points par m ²
Acquisitions des images (logistique et réglementation)	Simple à mettre en œuvre mais difficulté pour obtenir des images sans nuages	Facile à déployer dans les zones où les vols S4 sont autorisés	Absence de cadre réglementaire permettant l'industrialisation
Grands linéaires	Parfaitement adapté	Jusqu'à une cinquantaine de kilomètres	Jusqu'à 25 km environ



▶ sant l'outil drone photogrammétrique ou lasergrammétrique.

Cette expérimentation confirme également l'intérêt et l'apport grandissant des drones dans la surveillance des réseaux linéaires. Pas ou peu utilisé par le passé, cet outil tend à se généraliser grâce à un cadre réglementaire, des évolutions technologiques et un écosystème favorables. Forte de cette expérience, SNCF va progressivement déployer ce nouvel outil dans sa production. En effet, les coûts de mises en œuvre des drones, alliés à leur flexibilité et leur réactivité d'intervention font (et feront pour de longues années) des aéronefs télépilotes un outil indispensable pour la surveillance et l'inspection du couvert végétal. De plus, les drones peuvent être déployés sur de nombreuses autres applications (inspection d'installations électriques, d'ouvrages, levés topographiques, suivi de glissements...) ce qui rend cet outil flexible (multimétiers) et économiquement très avantageux pour la surveillance et la maintenance de réseaux linéaires tels que le réseau ferré national. En effet, les évolutions technologiques et réglementaires de ces prochains mois/années, rendront ces systèmes plus sûrs, plus précis et plus simples à mettre en œuvre, ce qui assurera leur déploiement massif offrant ainsi de nouvelles perspectives aux équipes de maintenance SNCF.

■ Perspectives

L'acquisition de données multi-sources (acquisition drone, scan dynamique, photographies au sol...) ne représente que l'étape d'inventaire de la végétation. La seconde étape consiste à l'élaboration de stratégies de maintenance et d'utilisation des ressources humaines et matérielles. SNCF a pour objectif d'exploiter au mieux ces données afin de prédire : les zones prioritaires de surveillance et de maintenance, les moyens à déployer, les dates d'intervention pour optimiser ainsi les interventions d'urgence. Les plans de Maintenance mèneront à des prescriptions d'actions : identifier un risque potentiel de chute d'arbre sur la voie et intervenir en préventif pour résoudre le problème. Une expérimentation fera l'objet d'un projet de développement d'algorithmes

d'analyse prédictive de la végétation. Les résultats seront validés *in situ* par différentes campagnes d'acquisitions sur une ligne ferroviaire présentant des caractéristiques représentatives de la topographie (déblais, remblais, zones rurales et urbaines...) et de la végétation (tout type de végétation est présent sur le secteur) adaptées à cette étude. Les algorithmes de prédiction développés s'intégreront parfaitement à l'application SIGMA, le SIG dédié à maîtrise de la végétation de SNCF, ainsi qu'à d'autres applications métiers SNCF. ●

Contacts

Flavien VIGUIER (SNCF)

flavien.viguiere@reseau.sncf.fr

André PEREIRA (SNCF)

andre.pereira@reseau.sncf.fr

Fatoumata BAH (SNCF)

ext.bee-engenering.fatoumata.bah@sncf.fr

Christophe BERTHAUD (SNCF)

christophe.berthaud@reseau.sncf.fr

Pauline CAPRINI (SNCF)

pauline.caprini@reseau.sncf.fr

Arnaud DURAND (SERTIT)

arnaud.durand@sertit.u-strasbg.fr

Mathias STUDER (SERTIT)

mathias.studer@sertit.u-strasbg.fr

Benjamin HUGONET (Redbird)

hugonet@redbird.fr

Léna MAATOUG (Redbird)

maatoug@redbird.fr

Antoine GOINEAU (Redbird)

goineau@redbird.fr

Références

[Colomina et Molina, 2014] Colomina, I. et Molina, P. (2014). *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing : A review*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (92):79-97.

[Ferraz, 2012] Ferraz, A. (2012).

Cartographie 3D d'une forêt à partir de données LiDAR aéroporté. Thèse de doctorat, Institut de Physique du Globe de Paris.

[Riegl, 2015] Riegl (2015). *Lightweight Airborne Laser Scanner with Online Waveform Processing*, Riegl VUX-1.

[Skarlatos et al., 2013] Skarlatos, D., Procopiou, E., Stavrou, G. et Gregoriou, M. (2013). *Accuracy assessment of minimum control points for UAV photography and georeferencing*. In First International

Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment.

[Brodu et al., 2012] Brodu, N., Lague, D., *3D Terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology*. Cornell University Library [Viguiere et al., 2014] Viguiere, F., Pollet, N. et Goussu, G. (2014). *La législation drone*. XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie, (141):25-29.

[@delair-tech, 2015] @delair-tech (2015). *delair-tech Airborne Sensing*.

URL : <http://www.delair-tech.com/>.

[@Office National des Forêts, 2015] @Office National des Forêts (2015). *Computree*. URL : <http://computree.onf.fr/lang=fr>

[@Terrasolid, 2015] @Terrasolid (2015). *Terrasolid Software - Software for Processing LiDAR Point Clouds and Images*.

URL : <http://www.terrasolid.com/home.php>.

[@DGM-CloudCompare, 2015] @DGM-CloudCompare (2015). *CloudCompare - 3D point cloud and mesh processing software - Open Source Project*. URL : <http://www.danielgm.net/cc>.

ABSTRACT

Keys word: Vegetation monitoring, Railway network, Photogrammetry, Remote sensing, Satellite data, LiDAR, Monitoring, Drone/UAV, Maintenance

Vegetation management in railway rights-of-way is one of the major stakes for SNCF infrastructure maintenance. With more than several tens of millions of euros of expenses each year, the second most important SNCF Network expenditure after track maintenance, vegetation management and control must be lead precisely to optimise availability of railway network. To optimize its vegetation knowledge SNCF started in 2013 experimentations to improve land cover knowledge, monitoring and control: some acquisitions have been made to quantify vegetation in railway rights-of-way. By combining satellite measurement, UAV photogrammetry, aerial laser scanning and on-site control, SNCF aims to define the scope of each measurement method in order to start acquisition on the whole network. This article presents an analysis of data processing results but also a comparison of all methods and tools.