



**HAL**  
open science

# Identification des grandes trouées dans les forêts de montagne à partir de modèles photogrammétriques

Gwennoline Sola

► **To cite this version:**

Gwennoline Sola. Identification des grandes trouées dans les forêts de montagne à partir de modèles photogrammétriques. Géographie. 2018. dumas-02138891

**HAL Id: dumas-02138891**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02138891>**

Submitted on 24 May 2019

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

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

# Identification des grandes trouées dans les forêts de montagne à partir de modèles photogrammétriques

## Rapport de stage de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master 2 GEOgraphie Information interface  
Durabilité EnvironnementS (GEOIDES)

**Gwennoline SOLA**

Organisme d'accueil : IRSTEA – Grenoble

2018

### Maîtres de stage :

Marc FUHR, Ingénieur-chercheur, IRSTEA  
Grenoble

Jérôme BOCK, ONF pôle R&D, Agence  
Savoie

### Rapport préparé sous la direction de :

Franck GIAZZI, Maître de conférences,  
Université Grenoble Alpes

### Devant un jury composé de :

Mélanie BERTRAND, Ingénieur de recherche, Université Grenoble Alpes (Examineur)

Franck GIAZZI, Maître de conférences, Université Grenoble Alpes (Référent)



## Résumé

De nombreuses forêts de montagne sont aujourd'hui couvertes de peuplements vieillis. Dans un souci de renouvellement de ces peuplements, la mise en place d'une sylviculture par trouée a été proposée. La sylviculture par trouée est une pratique nouvelle dans le massif des Alpes et soulève des questions quant au suivi des trouées et à leur dynamique de renouvellement, notamment sur les temps nécessaires à l'obtention de régénérations. La photogrammétrie semble être une méthode prometteuse pour permettre de répondre à ces questions et l'utilisation des photos aériennes acquises par l'IGN permet de pouvoir étudier un territoire à grande échelle. A travers la création de Modèles Numériques de Surface (MNS) et de Modèles Numériques de Hauteur (MNH), et leur analyse avec deux approches différentes, il a été possible de mettre en place une méthodologie permettant l'identification des zones de trouées forestières et dans certains cas l'identification de trouées individuelles.

Mots clés : Trouées forestières, Photos aériennes, Photogrammétrie, MNS, MNH, PhotoScan, Computree

## Abstract

Many mountain forests are today composed of old tree stands. In order to replace those stands, the Forest Management Guide for the Alps proposes a management using forest gaps. This technique is quite new for the Alps and raise questions regarding the follow-up of those gaps and especially the time needed for regeneration. Photogrammetry seems to be a promising technique in order to answer those questions and the aerial photographic took by the National Geographic Institute allow us to study larger areas. Through the production of Digital Elevation Model (DEM) and Canopy Height Model (CHM) and their analyses with two different approaches, it has been possible de create a methodology allowing the identification of gaps areas and occasionally the identification of individual gaps.

Key words: Forests gaps, Aerial photographic, Photogrammetry, DEM, CHM, PhotoScan, Computree



# Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>3</b>
<b>Liste des acronymes .....</b>	<b>9</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>11</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Méthodologie .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. Sites et données .....</b>	<b>17</b>
1.1.1. Sites d'études.....	17
1.1.1.1. Les trouées d'Esserts-Blay .....	18
1.1.1.2. Les trouées de La Frasse .....	19
1.1.1.3. Établissement d'une référence manuelle.....	20
1.1.2. Données photogrammétriques.....	22
<b>1.2. Création des modèles .....</b>	<b>23</b>
1.2.1. La photogrammétrie .....	23
1.2.1.1. Principes généraux .....	23
1.2.1.2. Les données en entrée .....	23
1.2.1.3. Le traitement .....	24
1.2.1.4. Les produits en sortie .....	25
1.2.2. PhotoScan .....	25
1.2.2.1. Présentation du logiciel .....	25
1.2.2.2. Chaîne de traitement.....	26
<b>1.3. Identification des trouées .....</b>	<b>29</b>
1.3.1. Approche 1 : Approche raster.....	29
1.3.1.1. Création des seuils.....	30
1.3.1.2. Individualisation des trouées.....	30
1.3.2. Approche 2 : Approche « arbre ».....	31
1.3.2.1. Présentation du logiciel .....	32
1.3.2.2. Chaîne de traitement.....	32
<b>1.4. Relevés de hauteur sur le terrain.....</b>	<b>33</b>
<b>2. Résultats.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1. Le modèle Numérique de Surface.....</b>	<b>34</b>
2.1.1. Ligne de vol/ensemble des images .....	34
2.1.2. Les résultats sur les sites.....	36
<b>2.2. Identification des trouées forestières .....</b>	<b>37</b>
2.2.1. Approche raster .....	37
2.2.2. Comparaison des trouées interprétées et des trouées modélisées .....	39
2.2.3. Approche arbre .....	41
<b>Discussion/conclusion .....</b>	<b>43</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>45</b>
<b>Sitographie.....</b>	<b>46</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>47</b>



## Liste des figures

Figure 1 : Principe d'implantation d'une trouée (Fuhr, 2012) .....	14
Figure 2 : Localisation des sites d'études .....	17
Figure 3 : Localisation des trouées sur le site d'Esserts-Blay en 2006 (a) et 2013 (b) (source : BD ORTHO®).....	18
Figure 4 : Localisation des trouées sur le site de la Frasse en 2006 (a) et 2013 (b) (source : BD ORTHO®).....	19
Figure 5 : Classes photointerprétées sur l'orthophoto de 2013 .....	20
Figure 6 : Photo-interprétation des trouées d'Esserts-Blay en 2013 (source : BD ORTHO® IGN©) .....	21
Figure 7 : Photo-interprétation des trouées de La Frasse en 2013 (source : BD ORTHO® IGN©) .....	21
Figure 8 : Etapes de construction des modèles photogrammétriques. ....	23
Figure 9 : Information de trajectoire, (source : pix4D).....	23
Figure 10 : Principes de recouvrement des photos aériennes (source : TETIS/ENGREF).....	24
Figure 11 : Principes de stéréoscopie (source : ENSG).....	24
Figure 12 : Produits issus des traitements photogrammétriques. (Source : Drones Imaging) .....	25
Figure 13 : Fonctionnement général de PhotoScan .....	25
Figure 14 : Méthodologie générale mise en place sur PhotoScan .....	26
Figure 15 : Etape d'alignement (a) et de création des markers (b) sur le site d'Esserts-Blay. (Source : Agisoft PhotoScan) .....	27
Figure 16 : Nuage de points dense sur le site d'Esserts-Blay. (Source : Agisoft PhotoScan).....	28
Figure 17 : Modèle Numérique de Hauteur (source : Humboldt State University) .....	30
Figure 18 : a) nuage de points dense obtenu sur une ligne de vol, b) nuage de points denses obtenu sur l'ensemble des lignes de vol. Remarquer les zones de No Data en gris. ....	35
Figure 19 : limites des zones de trouée modélisées avec un seuil à 7 m sur le site d'Esserts-Blay. (Source : BD ORTHO®) .....	37
Figure 20 : Identification des trouées après utilisation des données IGN sur le site d'Esserts-Blay. (source : BD ORTHO(R®)) .....	38
Figure 21 : Influence de la fermeture morphologique sur l'individualisation des trouées sur le site d'Esserts-Blay .....	39
Figure 22 : Comparaison des trouées photo-interprétées et des trouées modélisées. (Réalisation : Sola G., IRSTEA 2018, Source : BD ORTHO®) .....	40
Figure 23 : Délimitation des couronnes et positions des apex sur une zone de trouée et forêt.....	41
Figure 24 : Délimitation des couronnes et positions des apex sur une zone ouverte .....	42
Figure 25 : Limites des zones de trouées avec un seuil à 7,5 m sur le site de La Frasse. (source : BD ORTHO®).....	49
Figure 26 : Comparaison des trouées photo-interprétées et des trouées modélisées. (Source : BD ORTHO®).....	50
Figure 27 : Délimitation des couronnes et positions des apex sur une dalle du site de La Frasse. (Source : Computree) .....	51



## Liste des acronymes

GSM : Guide des Sylvicultures de Montagnes des Alpes du Nord

IGN : Institut national de l'Information géographique et forestière

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MNH : Modèle Numérique de Hauteur



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Marc Fuhr pour m'avoir permis de réaliser ce stage au sein de l'IRSTEA, pour sa disponibilité et son soutien ainsi que pour ses nombreux conseils rédactionnels.

Je tiens également à remercier Jérôme Bock pour son aide sur Computree, et pour l'ensemble des questionnements méthodologiques qui sont apparus au cours de ce stage.

Je remercie également mon référent pédagogique Franck Giazzi, pour ses conseils avisés quant à la rédaction de ce présent rapport.

Je remercie aussi Laurent Borgniet pour son aide précieuse avec PhotoScan. Patrick Vallet pour m'avoir aidé avec R et la construction de modélisation de croissance d'arbres.

Je remercie Gilles Favier qui m'a accompagné sur le terrain que j'ai enfin pu voir autrement qu'en pixels.

Je remercie aussi mes relecteurs pour leur aide et leurs conseils précieux. Les membres du bureau 142 pour leur soutien lors de la longue attente des données.

Je remercie tout spécialement Charles et Lucas dont la clairvoyance et le professionnalisme justifient cette présente ligne.

Enfin je remercie l'ensemble des personnes d'IRSTEA pour la bonne ambiance qui règne dans le centre, et le groupe de stagiaires et autres non permanents pour l'ambiance festive... en dehors des heures de travail.



## Introduction

L'IRSTEA (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) est un organisme de recherche travaillant sur « les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés, sécheresse, crues, inondations, l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaines ». Le centre de Grenoble est spécialisé sur la connaissance et la gestion des écosystèmes, des territoires et des risques naturels en montagne. Ce stage s'est déroulé au sein de l'équipe BIOSSES (Biodiversité et socio-écosystèmes, conservation, restauration et politiques de la nature) dans l'unité de recherche LESSEM (Laboratoire EcoSytèmes et Société En Montagne). Il s'inscrit dans un partenariat IRSTEA – ONF qui fait l'objet d'une convention pluriannuelle en cours (2017-2020) dont un axe vise à explorer l'apport de la photogrammétrie pour la caractérisation et le suivi de la régénération dans les trouées forestières.

Le « Guide de Sylviculture de Montagne des Alpes du Nord » (GSM) préconise dans de nombreuses situations une sylviculture par trouée. En effet, de nombreuses forêts de montagnes sont aujourd'hui couvertes de peuplements vieillis, à structure régulière riche en gros bois, voire en très gros bois (Fuhr, 2012). Ces peuplements, qui jouent un rôle de protection contre les risques naturels, ont fait l'objet d'une gestion conservatrice. Cependant, au début des années 80, les gestionnaires forestiers se sont inquiétés de l'avenir et du renouvellement de ces peuplements par crainte d'une phase de sénescence généralisée qui induirait un effondrement massif de très grandes surfaces (figure 1).

La sylviculture par trouée est une technique sylvicole qui présente de nombreux avantages. Elle permet le renouvellement de certains peuplements lorsque ce n'est pas possible avec une sylviculture pied à pied (forte pente), elle permet également de limiter les dégâts d'intervention. Elle est aussi utilisée dans les situations froides pour apporter de la chaleur, lumière et eaux aux semis (Gauquelin et Courbeau, 2006). Les tailles de trouées peuvent varier selon le contexte. En effet, dans un contexte de risques naturels, elles auront tendance à être plus petites que dans les peuplements à dominance de gros et très gros bois sans impact paysager (Gauquelin, 2014).

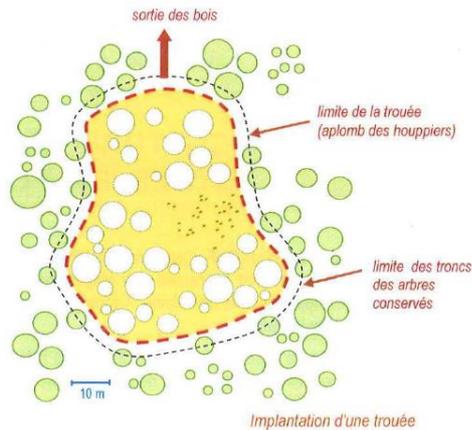


Figure 1 : Principe d'implantation d'une trouée (Fuhr, 2012)

Cet itinéraire sylvicole est relativement nouveau pour le massif des Alpes et soulève plusieurs questions, notamment sur les temps nécessaires à l'obtention de régénérations, variables selon les types de peuplements et les contextes stationnels. Afin d'analyser la dynamique de renouvellement de ces trouées, une étude rétrospective a été faite sur 33 trouées afin de reconstituer la dynamique de fermeture des trouées d'origine naturelle et de celles d'origine sylvicole. Cette étude s'est faite par photo-interprétation de clichés aériens espacés dans le temps (projet INTERREG, 2011). Elle a permis de mettre en évidence que la vitesse de fermeture du couvert doit s'envisager selon deux seuils de perception, la fermeture complète du couvert qui s'obtient après 10 ans dans les contextes les plus favorables et la « cicatrisation visuelle » qui, elle, est atteinte dans un délai de moins de 5 ans en contexte favorable (Fuhr *et al.*, 2015).

Dans les stations non contraignantes, comme les étages du subalpin et du montagnard, les vitesses de fermeture sont relativement rapides. À l'étage du subalpin, malgré une variabilité importante, la cicatrisation est beaucoup plus lente qu'aux étages du montagnard et du haut montagnard. Si on prend le cas d'un contexte stationnel contraignant, la cicatrisation est très lente dans certaines trouées situées dans une station à faibles potentialités avec des périodes de déficit hydrique. Cette lenteur ne s'observe cependant pas dans les trouées replantées. Cet effet de taille sur la vitesse de fermeture n'est pas observé dans les trouées dont la taille est située dans les recommandations du GSM. Concernant les temps de fermeture, pour les étages du montagnard et du haut montagnard de fertilité moyenne à bonne, en cas de trouées sans régénération préexistante, il faut 20 à 25 ans pour reconstituer un peuplement avec une surface sans couvert de l'ordre de celle des peuplements matures. Pour l'étage du subalpin ainsi que les stations contraignantes du montagnard et du haut montagnard, le temps nécessaire est beaucoup plus long. Il faut attendre 70 ans pour que la trouée puisse être considérée comme fermée. Dans les cas où les trouées comportent des tâches de régénération existantes, il faut entre 30 et 35 ans pour une fermeture naturelle dans le cas où celles-ci sont situées au subalpin ou dans les stations

contraignantes du haut montagnard et du montagnard et moins de 15 ans dans les autres situations.

Dans le cadre de ce stage, j'ai utilisé les techniques de photogrammétrie. En effet, la photogrammétrie, définie comme la « **science et art dont le sujet d'étude est la photographie dans l'intention de recueillir des données conduisant à des restitutions dimensionnelles et de déterminer la forme et la position d'un objet dans l'espace** » permet un travail sur des données tridimensionnelles. Les potentialités sont importantes pour pouvoir détecter les ruptures de hauteur dans les modèles issus des traitements photogrammétriques et l'outil semble prometteur pour suivre la dynamique des trouées à l'échelle d'un territoire.

La détection et la délimitation des trouées, bien qu'elle semble facile lorsque celles-ci sont entourée d'arbres hauts, est une tâche complexe. La littérature montre que la définition même des trouées peut parfois prêter à confusion mais que celles-ci dépendent généralement du milieu dans lequel elles sont étudiées. Pour certains auteurs comme Brokaw (1982, in Betts *et al.*, 2005) en milieu tropical, une trouée est définie comme « une ouverture avec des limites verticales s'étendant à travers l'ensemble des niveaux à une hauteur de 2m ». D'autres auteurs définissent les trouées comme des "sections de canopée dont la hauteur est inférieure à 15m au niveau du sol" (Nakashizuka *et al.*, 1995)

Pour travailler sur les thématiques de caractérisation des canopées (structure et identification d'espèces), le Lidar a majoritairement été utilisé (Lefsky *et al.*, 2002, Hyypä *et al.*, 2008 in St-Onge *et al.*, 2015). Comprendre les dynamiques des trouées nécessite d'étudier leurs caractéristiques spatiales et temporelles (Vepakomma *et al.*, 2008). La photogrammétrie permet de s'affranchir des limites pouvant apparaître avec une méthode basée sur l'optique, qui pourrait apporter des problèmes d'illumination et séparabilité spectrale (Koukoulas & Blackburn, 2004, Tanaka & Nakashizuka, 1997 in Vepakomma *et al.*, 2008). Grâce au gain de qualité des nuages de points obtenus par photogrammétrie, il est désormais possible d'identifier des arbres de façon individuelle. St-Onge *et al.* (2015) a ainsi montré que la caractérisation de la distribution des hauteurs d'arbres issues des analyses faites sur des nuages de points photogrammétriques peut être menée avec une précision similaire à celle obtenue avec des données Lidar.

Les modèles numériques de surface ont été utilisés par différents auteurs comme alternative au travail de terrain et à l'interprétation manuelle des photos aériennes. Pour caractériser les hauteurs des arbres, Nakashizuka *et al.* (1995) ont calculé les différences entre des modèles de surface faits en hiver et en été. Cette approche nécessite cependant que les peuplements soient composés de feuillus qui perdent leur feuillage en hiver afin de pouvoir identifier les points au sol. Cette méthode a été reprise par Fujita *et al.* en 2003 dans des peuplements de résineux. La différence de cette méthode est l'utilisation de points faits sur le terrain pour avoir les points sol.

En fonction de différents paramètres, plusieurs auteurs proposent de travailler par seuil de hauteur en-dessous duquel tout est considéré comme étant de la trouée. Cette méthode permet d'identifier les trouées à un temps donné mais empêche de caractériser l'origine de ces trouées (Vepakomma *et al.*, 2008).

L'objectif principal de ce stage est la mise en place d'une méthodologie permettant la délimitation des trouées à partir de modèles issus des traitements photogrammétriques.

Les enjeux de ce travail sont doubles. Tout d'abord, il s'agit de mettre en place une méthodologie reproductible pour les gestionnaires pour permettre une actualisation des résultats à chaque campagne IGN. Ensuite, cette méthodologie devrait permettre de produire des bilans homogènes sur de grandes surfaces (à l'échelle du département par exemple).

Pour atteindre cet objectif, j'ai travaillé en trois étapes. Tout d'abord, j'ai construit des modèles issus de photographies aériennes avec le logiciel PhotoScan (Agisoft©) en utilisant plusieurs paramétrages. L'enjeu est aussi de trouver les paramètres optimums à mettre en place pour générer les Modèles Numériques de Surface (MNS) les plus satisfaisants. Ensuite, j'ai utilisé deux approches successives pour identifier les trouées. La première approche est une « approche raster » qui consiste à classer les Modèles en « trouée/non trouée » en appliquant un seuil de hauteur sur le Modèle Numérique de Hauteur (MNH). La deuxième approche est une « approche arbre » qui consiste à identifier les couronnes d'arbre sur le MNS ou MNH et permettre ensuite avec des traitements de faire ressortir les trouées. Enfin, à titre exploratoire, les MNH ont été caractérisés selon les stades de développement identifiés lors du projet INTERREG afin d'étudier leurs potentialités à distinguer différentes hauteurs au sein d'une même trouée.

J'ai mis en place cette méthodologie sur deux sites situés en Savoie sur les communes d'Esserts-Blay dans le massif de la Lauzière et sur la commune de Beaufort dans le massif du Beaufortain. Je l'ai ensuite appliquée sur le site des Saisies (Villard-sur-Doron) pour vérification et validation.

# 1. Méthodologie

## 1.1. Sites et données

### 1.1.1. Sites d'études

Trois sites d'études situés dans le Beaufortain ont été retenus pour ce travail. Ces sites ont été choisis car on dispose d'une photo-interprétation manuelle préalable ayant permis d'identifier et de délimiter des trouées lors du projet INTERREG (Esserts-Blay et La Frasse). La photo-interprétation a été actualisée à partir des ortho-photos de 2013 et permet de fournir une référence pour pouvoir par la suite juger de la qualité des trouées modélisées. Sur ces deux sites, on dispose également de relevés de végétation à l'intérieur des trouées.

Le troisième site, aux Saisies (Villard-sur-Doron) (figure 2), est un site qui servira à la validation de la méthodologie mise en place sur les deux premiers. La validation sera faite dans un premier temps de façon visuelle sur l'orthophoto de 2013, puis les hauteurs prises sur le terrain seront comparées avec les hauteurs issues du MNH pour avoir une évaluation de la qualité du MNH.

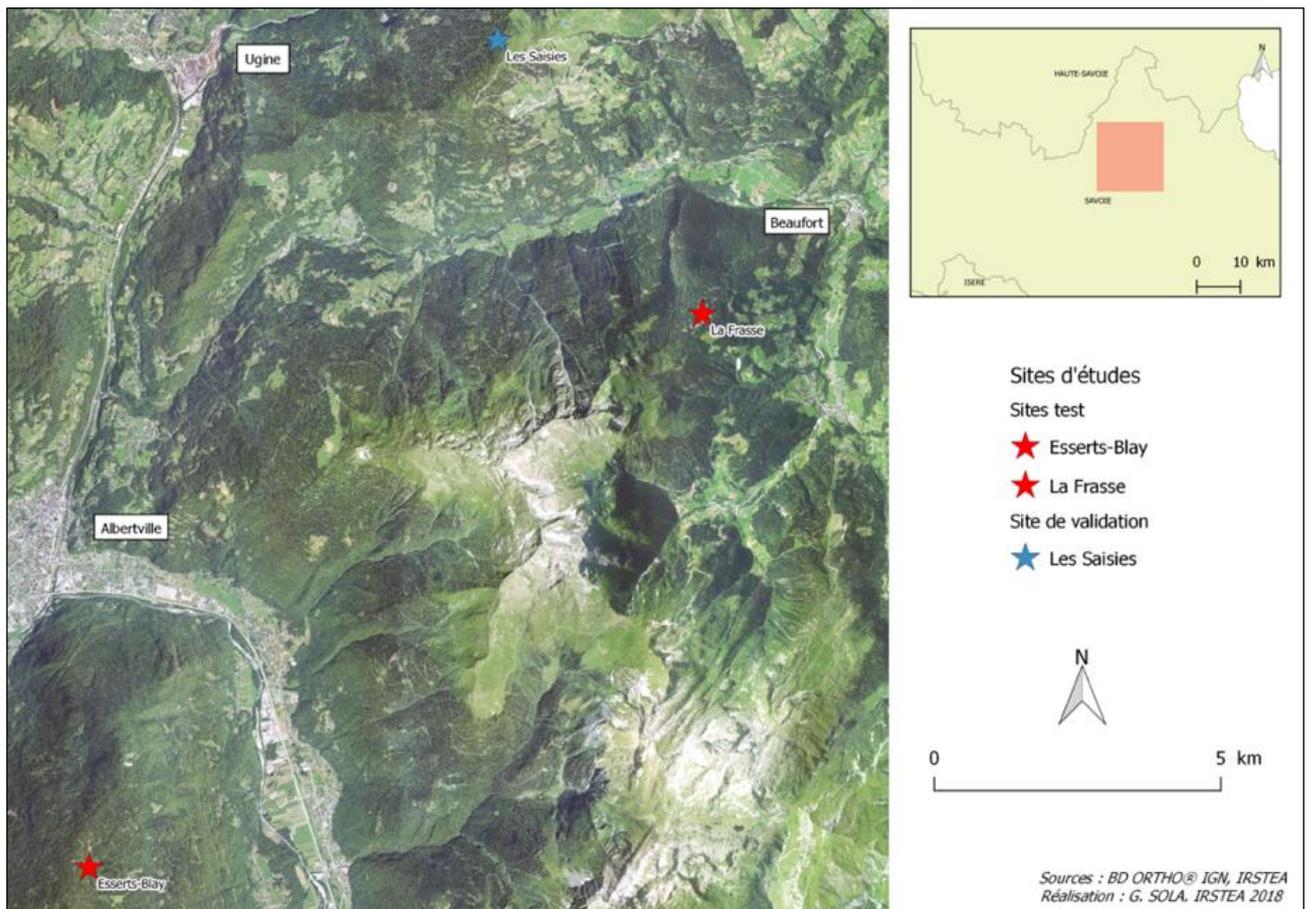


Figure 2 : Localisation des sites d'études

### 1.1.1.1. Les trouées d'Esserts-Blay

Sur le site de d'Esserts-Blay, les trouées délimitées lors du projet INTERREG sont au nombre de cinq, situées dans des peuplements du haut montagnard à une altitude moyenne de 1564 mètres. La trouée la plus haute est la trouée 4 située à 1590 mètres, et la plus basse, la trouée 5 située à 1540 mètres. Leur taille varie de 0,3 ha à 0,5 ha (tableau 1). Les relevés dendrométriques montrent que la surface de l'ensemble des trouées est majoritairement occupée par des peuplements déjà avancés (Fuhr, 2012).

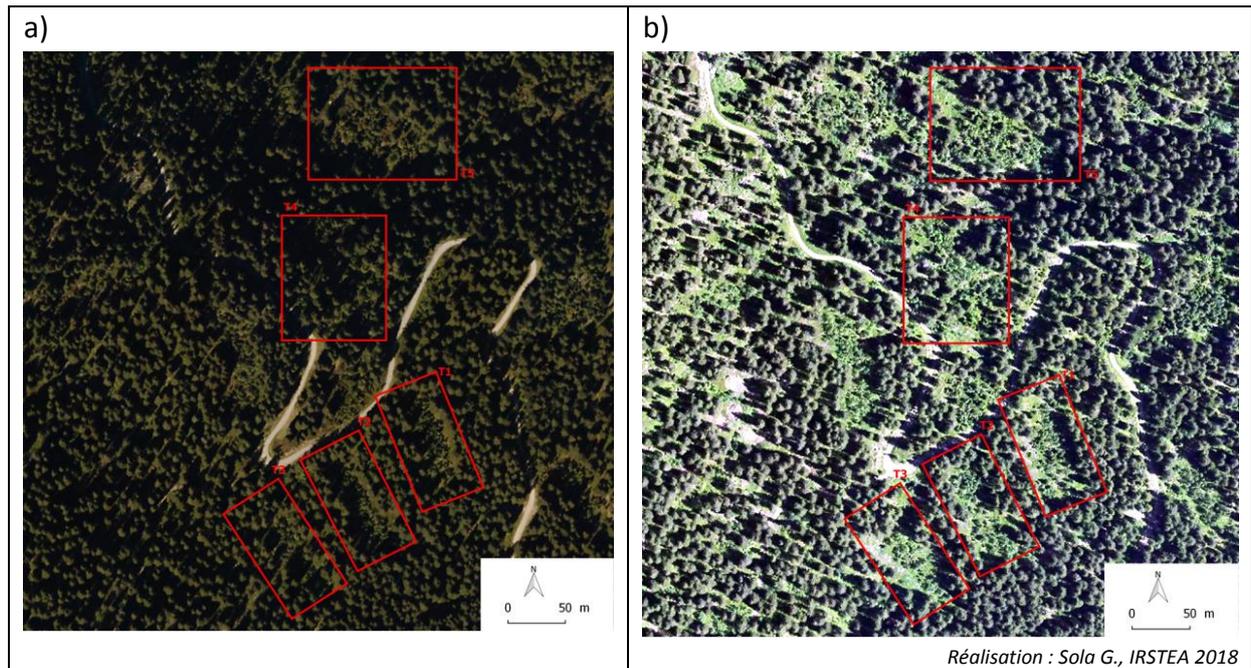


Figure 3 : Localisation des trouées sur le site d'Esserts-Blay en 2006 (a) et 2013 (b) (source : BD ORTHO®)

La localisation des trouées est présentée à la fois sur l'ortho de 2006 et de 2013 pour illustrer les modifications qui peuvent avoir lieu. On remarque que les trouées sont plus grandes sur l'ortho de 2013 que sur celle de 2006. Cela peut s'expliquer par des travaux d'agrandissement des trouées sur certains côtés ayant été faits entre les deux années. S'ajoute à ces coupes un biais dû aux conditions d'éclairage et la position des ombres sur l'image. En effet, on se rend compte que l'orientation du soleil sur l'ortho de 2006 fait que les ombres sont dans les trouées (figure 3).

Tableau 1 : Caractéristiques des trouées du site d'Esserts-Blay (âge des trouées en 2011)

Trouée	Exposition	Altitude (m)	Etage	Origine	Structure peuplement environnant	Type de station
<b>EB1</b> 0,4 ha / 25 ans <sup>1</sup>	Sud-est	1560	Haut montagnard	Coupe	Régulier GB <sup>2</sup>	Pessières et sapinières sèches
<b>EB2</b> 0,3 ha / 25 ans	Sud-est	1565	Haut Montagnard	Coupe	Régulier GB	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>EB3</b> 0,4 ha / 25 ans	Sud-est	1565	Haut Montagnard	Coupe	Régulier GB	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>EB4</b> 0,5 ha / 29 ans	Nord-est	1590	Haut Montagnard	Coupe	Régulier GB	Pessières et sapinières sèches
<b>EB5</b> 0,5 ha / 29 ans	Nord-est	1540	Haut Montagnard	Coupe	Régulier GB	Forêt à hautes herbes du subalpin

### 1.1.1.2. Les trouées de La Frasse

Sur le site de La Frasse, six trouées ont été délimitées lors du projet INTERREG. Elles sont situées à des altitudes comprises entre 1575 et 1705 mètres (tableau 2).

Sur les six trouées, seulement cinq seront étudiées (FRA8, FRA10, FRA11, FRA14 et FRA16). Les trouées FRA14, FRA10 et FRA11, dont l'origine est une coupe dans des peuplements réguliers, ont la majorité de leur surface sans couvert contrairement à la trouée FRA8 située dans un peuplement irrégulier qui a la majorité de sa surface occupée par des recrûs. Le projet INTERREG montre une vitesse de fermeture lente. La régénération est très abondante dans cette trouée mais les perchis sont encore peu nombreux. La totalité des tiges du stade du bas perchis est représentée par les espèces pionnières et le sorbier. Cependant, l'épicéa domine le stade de régénération (Fuhr, 2012).

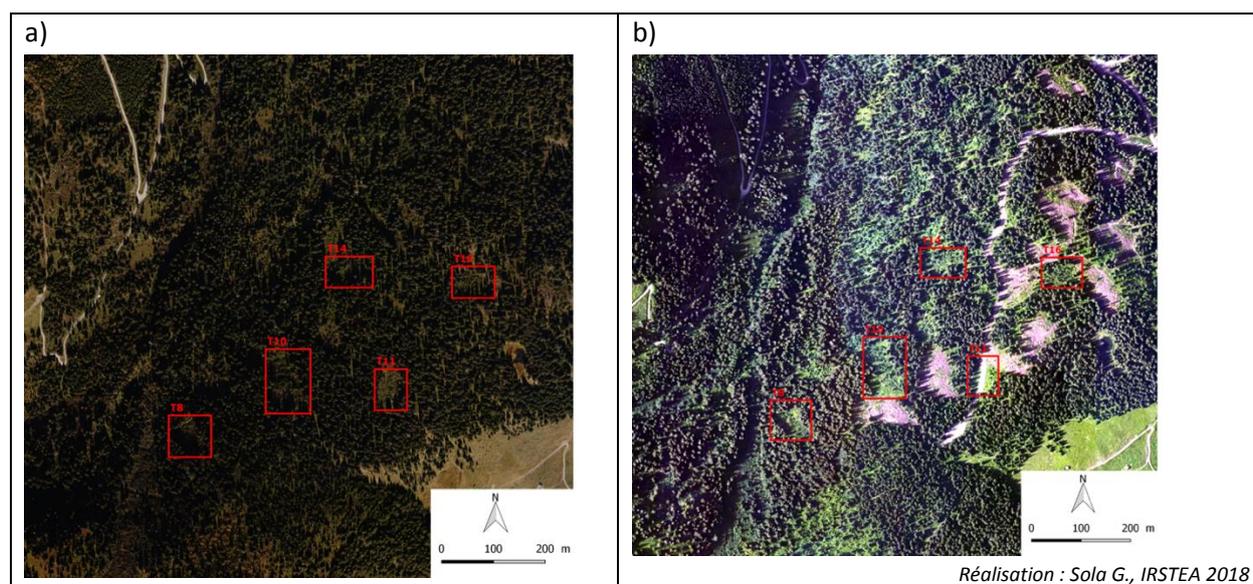


Figure 4 : Localisation des trouées sur le site de la Frasse en 2006 (a) et 2013 (b) (source : BD ORTHO®)

<sup>1</sup> Age des trouées en 2011

<sup>2</sup> Peuplement régulier de Gros Bois

Le site de La Frasse est un site qui a été exploité depuis la première photo-interprétation faite sur les images de 2006. En effet, on remarque qu'entre 2006 et 2013 les trouées ont beaucoup changé. Certaines ont été agrandies comme les trouées 10 et 11 (figure 4) et de nouvelles ont été faites comme celles situées entre les trouées 10 et 11. Du fait de ces modifications, la photo-interprétation faite en 2013 ne prend pas en compte toutes les trouées du projet INTERREG et prend également certaines plus récentes.

Tableau 2 : Caractéristiques des trouées du site de La Frasse

Trouée	Exposition	Altitude (m)	Etage	Origine	Structure Peuplement environnant	Type de station
<b>FRA8</b> 0,4 ha / 21 ans <sup>3</sup>	Nord-Ouest	1670	Subalpin	coupe	Irrégulier	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>FRA10</b> 0,7 ha / 21 ans	Nord-Ouest	1670	Subalpin	coupe	Régulier GB	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>FRA11</b> 0,4 ha / 21 ans	Nord-Ouest	1640	Subalpin	coupe	Régulier GB	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>FRA14</b> 0,3 ha / 21 ans	Nord-Ouest	1705	Subalpin	coupe	Régulier GB	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>FRA16</b> 0,2 ha / 33 ans	Nord-Ouest	1705	Subalpin	chablis	Régulier BM GB <sup>4</sup>	Pessières très acidiphile du subalpin
<b>FRA5</b> 0,5 ha / 31 ans	Sud-est	1575	Haut Montagnard	mixte	Régulier BM	Pessières très acidiphile du subalpin

### 1.1.1.3. Établissement d'une référence manuelle

Afin de pouvoir évaluer les trouées obtenues sur les modèles photogrammétriques, une photo-interprétation des orthophotos de 2013 a été faite suivant la méthodologie mise en place lors du projet INTERREG. Cette méthodologie consiste à interpréter manuellement les photos aériennes orthorectifiées sur une grille régulière de 5m x 5m. Chaque élément du quadrillage a été affecté à une classe des classes suivantes (figure 5).

Classes	Interprétation
Classe 1	Peuplement haut, gros houppiers jointifs
Classe 2	Peuplement bas, petits houppiers jointifs (recrus)
Classe 3	Végétation non arborée (trouées)
Classe 4	Autres

Figure 5 : Classes photointerprétées sur l'orthophoto de 2013

<sup>3</sup> Age des trouées en 2011

<sup>4</sup> Peuplement régulier de bois moyen et gros bois

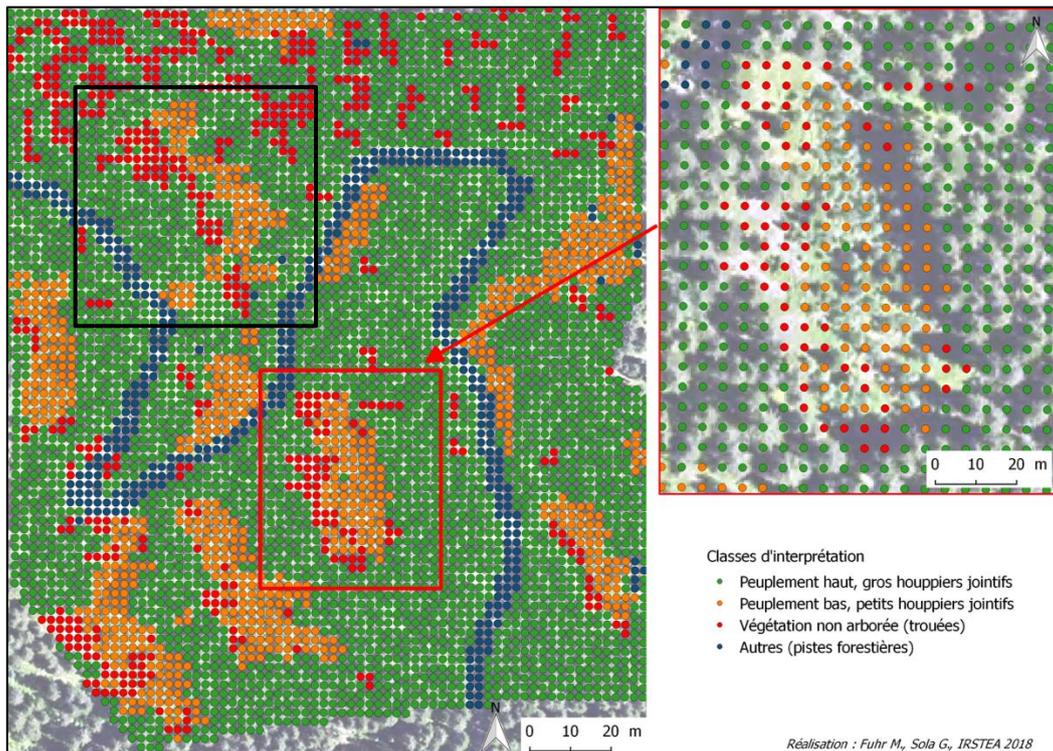


Figure 6 : Photo-interprétation des trouées d'Esserts-Blay en 2013 (source : BD ORTHO® IGN©)

Avec ces mesures, quatre trouées sur les cinq ont été identifiées et serviront de base pour l'évaluation des surfaces modélisées (figure 6). Pour le site de La Frasse, six trouées ont été mesurées Les trouées 8, 10, 11 et 14 avec leurs modifications et deux nouvelles trouées (figure 7).

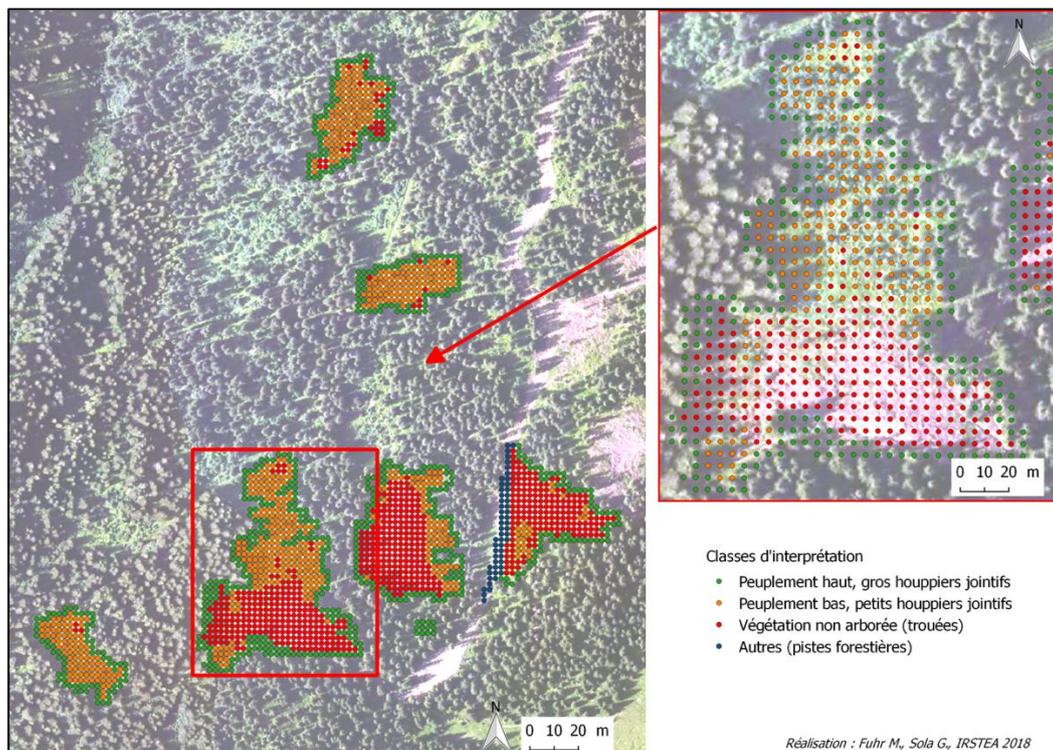


Figure 7 : Photo-interprétation des trouées de La Frasse en 2013 (source : BD ORTHO® IGN©)

Tableau 2 : Surface des trouées par photo-interprétation (2013)

	Trouée	Surface (m <sup>2</sup> )
Esserts-Blay	1	3725
	2	3625
	3	4550
	4	/
	5	5050
La Frasse	1	3325
	2	2550
	3	2350
	4	10900
	5	6925
	6	4700

La trouée 4 sur le site d'Esserts-Blay, identifiable par l'encadré noir sur la figure 6 n'a pas pu être mesurée car beaucoup de travaux ont eu lieu dans cette trouée. De ce fait, il est compliqué de pouvoir l'identifier individuellement car elle est contenue dans une zone de trouée plus importante et éparse (tableau 2).

### 1.1.2. Données photogrammétriques

Les données utilisées pour la création des Modèles Numériques de Surface sont les prises de vues brutes faites par l'IGN en 2016 avec une résolution de 25cm. Pour le site d'Esserts-Blay, 43 images ont été utilisées et 38 pour le site de La Frasse (tableau 4). Les informations sur les caméras ont également été utilisées pour augmenter la qualité de la modélisation.

Tableau 3 : Caractéristiques des photos utilisées

	Esserts-Blay	La Frasse	Villard sur Doron
Nombre de photos	43	38	80
Résolution (pixels)	14650x10700	14400x10440	14650x10700 (31 images) 14400x10440 (49 images)
Taille du photosite (µm)	6.8	6.8	6.8

Pour chaque image, les coordonnées x,y et z de la caméra ainsi que les angles Oméga, Phi et Kappa étaient disponibles. Les coordonnées ont été utilisées lors de l'alignement des photos mais du fait de la version utilisée du logiciel, les angles n'ont pas pu être utilisés (voir discussion).

Une étape de prétraitement a été nécessaire avant de pouvoir utiliser les photos aériennes. En effet, les photos, fournies au format « .jp2 » ont été converties au format « .jpg » pour pouvoir être traitées par le logiciel PhotoScan. Cette conversion a été faite à l'aide d'un script python du fait du nombre important d'images (annexe 1).

## 1.2. Création des modèles

### 1.2.1. La photogrammétrie

#### 1.2.1.1. Principes généraux

La photogrammétrie est une technique qui à partir d'un ensemble de prises de vues 2D, permet de reconstruire une scène en 3D. A partir de deux clichés, il est possible de reconstituer ce relief, on parle alors de stéréoscopie. Dans le cadre de ce projet on parlera de photogrammétrie aérienne qui correspond à l'ensemble des techniques et des matériels utilisés pour aboutir à la représentation d'un territoire étendu à partir des clichés de la prise de vue aérienne (Ingeo) (figure 8).

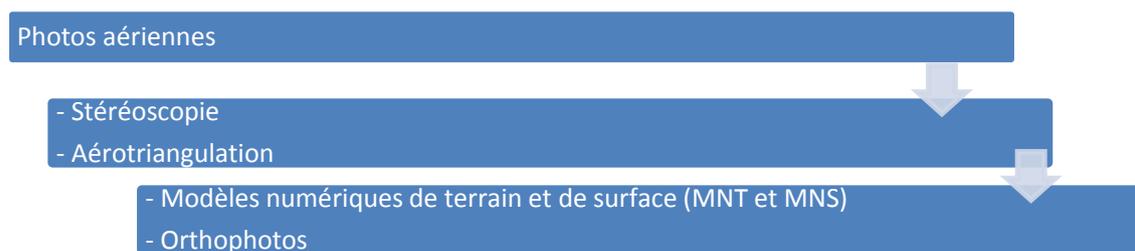


Figure 8 : Etapes de construction des modèles photogrammétriques.

#### 1.2.1.2. Les données en entrée

La photogrammétrie utilise des photos aériennes et les caractéristiques internes et externes des prises de vues.

Les caractéristiques internes et externes des prises de vues correspondent aux caractéristiques du vol, la position et l'orientation de la caméra. Un avion se déplace selon trois axes qui sont appelés roulis (roll), tangage (pitch) et lacet (yaw) (figure 9). Lors d'un vol, l'avion peut être sujet à des perturbations qui peuvent impacter la qualité des photos.

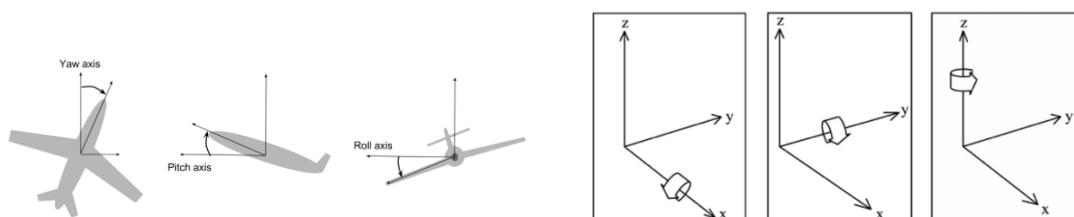


Figure 9 : Information de trajectoire, (source : pix4D)

Les angles Oméga (autour de l'axe x), Phi (autour de l'axe y) et Kappa (autour de l'axe z) sont les angles qui permettent de faire la rotation des informations x, y et z dans le système de coordonnées des prises de vues (figure 9).

La qualité des résultats issus des traitements photogrammétriques est intrinsèquement liée au recouvrement des photos. Dans les cas de photographies aériennes et pour un meilleur résultat, il est nécessaire d'avoir un recouvrement de 60% pour deux images qui se suivent sur la même direction de vol et un recouvrement de 30% sur des images côte à côte sur deux lignes de vol différentes (figure 10).

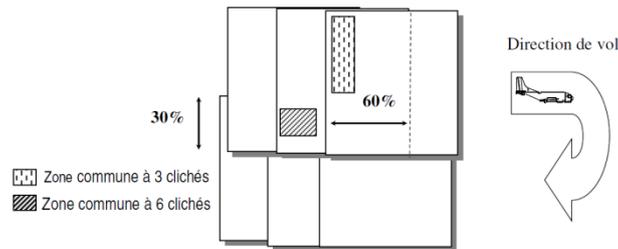


Figure 10 : Principes de recouvrement des photos aériennes (source : TETIS/ENGREF)

### 1.2.1.3. Le traitement

L'étape principale est ensuite l'aérotriangulation dont l'objectif est de déterminer pour chaque photo la position exacte de la caméra au moment de la prise de vues aériennes. A l'aide de cette position, on pourra déterminer l'orientation des images, créer des modèles stéréoscopiques et lire correctement les coordonnées indiquées dans les modèles.

La reconstitution de la troisième dimension est rendue possible grâce à la stéréoscopie qui correspond à traiter deux clichés de la même scène pris à deux endroits différents (figure 11).

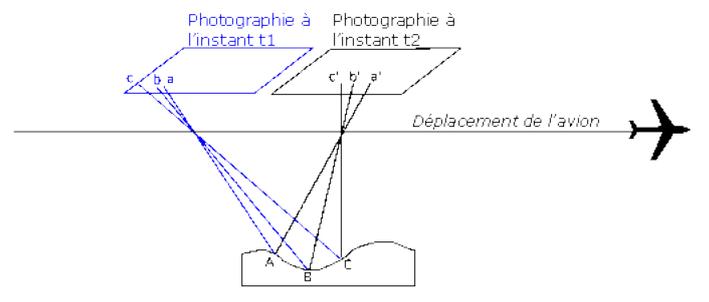


Figure 11 : Principes de stéréoscopie (source : ENSG)

#### 1.2.1.4. Les produits en sortie

Les traitements photogrammétriques permettent d'obtenir différents produits. L'orthophotographie (images assemblées et corrigées géométriquement), son géoréférencement (position dans un système de coordonnées) et le Modèle Numérique de Surface qui donne l'altitude Z pour chaque couple de coordonnées x, y (figure 12).

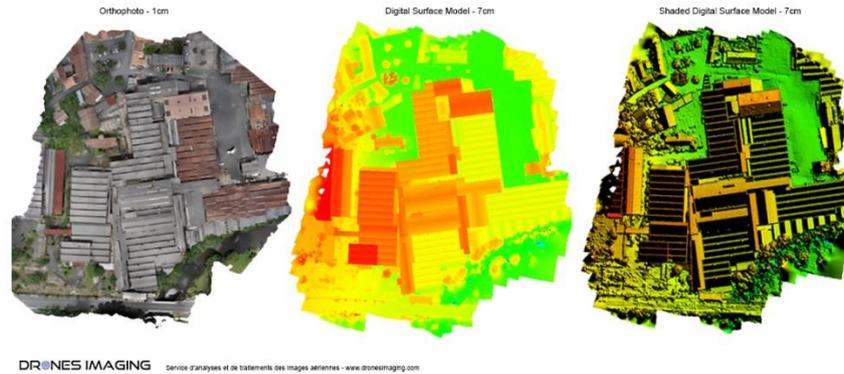


Figure 12 : Produits issus des traitements photogrammétriques. (Source : Drones Imaging)

### 1.2.2. PhotoScan

#### 1.2.2.1. Présentation du logiciel

« Agisoft PhotoScan est une solution avancée de modélisation 3D à base d'images visant à créer du contenu 3D à partir d'images fixes. Les photos peuvent être prises à partir de n'importe quelle position à condition que l'objet à reconstruire soit au moins sur deux photos » (Agisoft PhotoScan, 2015). L'alignement de l'image et la reconstruction du modèle 3D sont entièrement automatisés (figure 13).

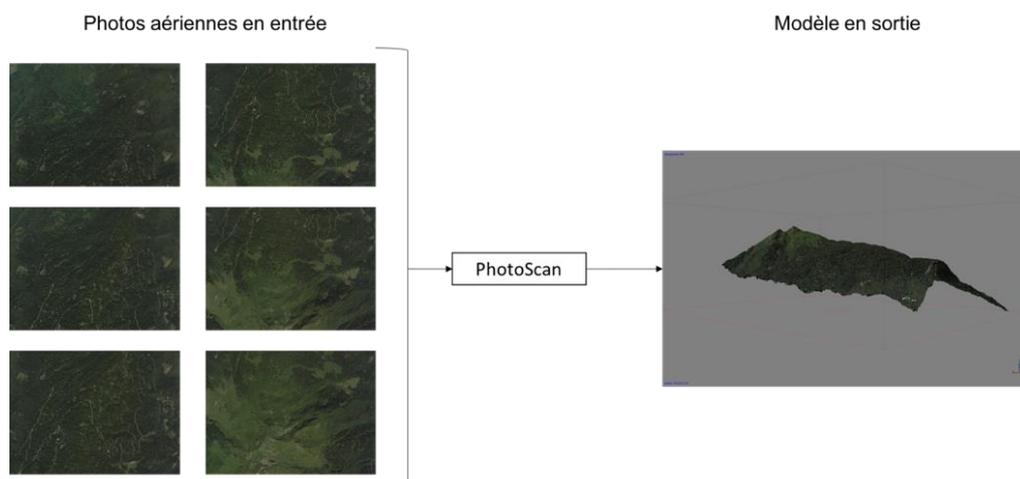


Figure 13 : Fonctionnement général de PhotoScan

### 1.2.2.2. Chaîne de traitement

La chaîne de traitement de PhotoScan se décompose en trois grandes étapes principales, l’alignement des photos, le placement des points de contrôle (markers) et la densification du nuage de points (figure 14).

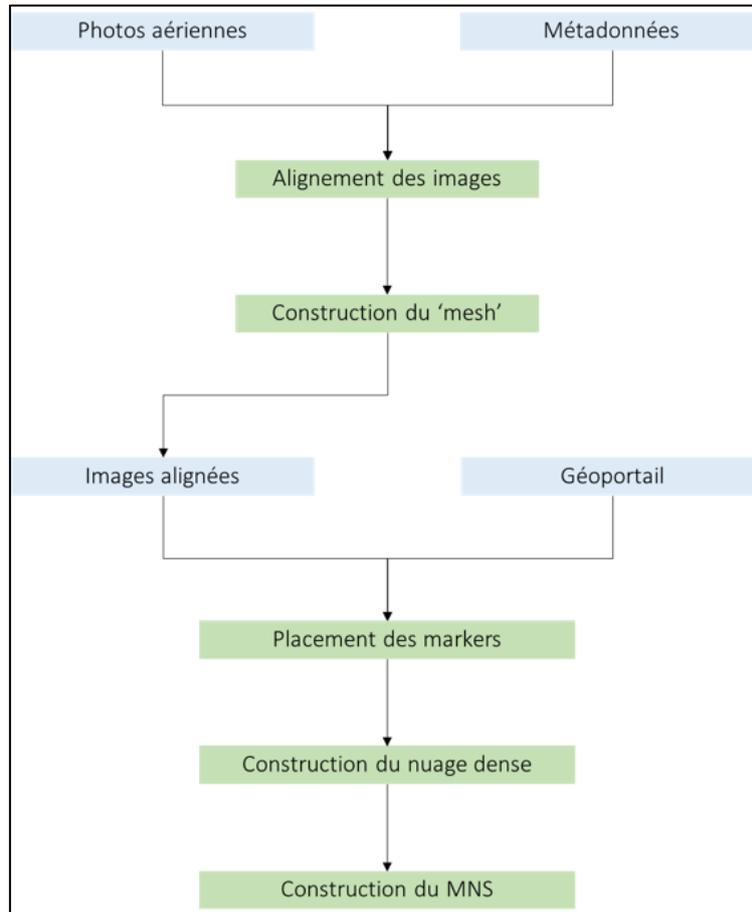


Figure 14 : Méthodologie générale mise en place sur PhotoScan

#### L’alignement des caméras

L’alignement des caméras est l’étape lors de laquelle le logiciel cherche des points homologues sur les photos en entrée. Le résultat de cette étape est un nuage de points épars et les positions estimées des caméras (figure 15.a). Il est cependant possible de réduire le temps de traitement qui peut être très long en fonction du nombre d’images en entrée et sa lourdeur en entrant les positions des caméras si ces dernières sont connues.

Lors de l’alignement des caméras, PhotoScan estime les paramètres d’orientation interne et externe de la caméra. Ces informations, bien que mises à disposition, n’ont pas été utilisées du fait de la non prise en charge du format des données par la version du logiciel. Les données permettant un meilleur alignement des images étaient les informations concernant la caméra (taille du photosite, nombre de pixels de la photo) ainsi que les positions des caméras avec les coordonnées x,y et z.

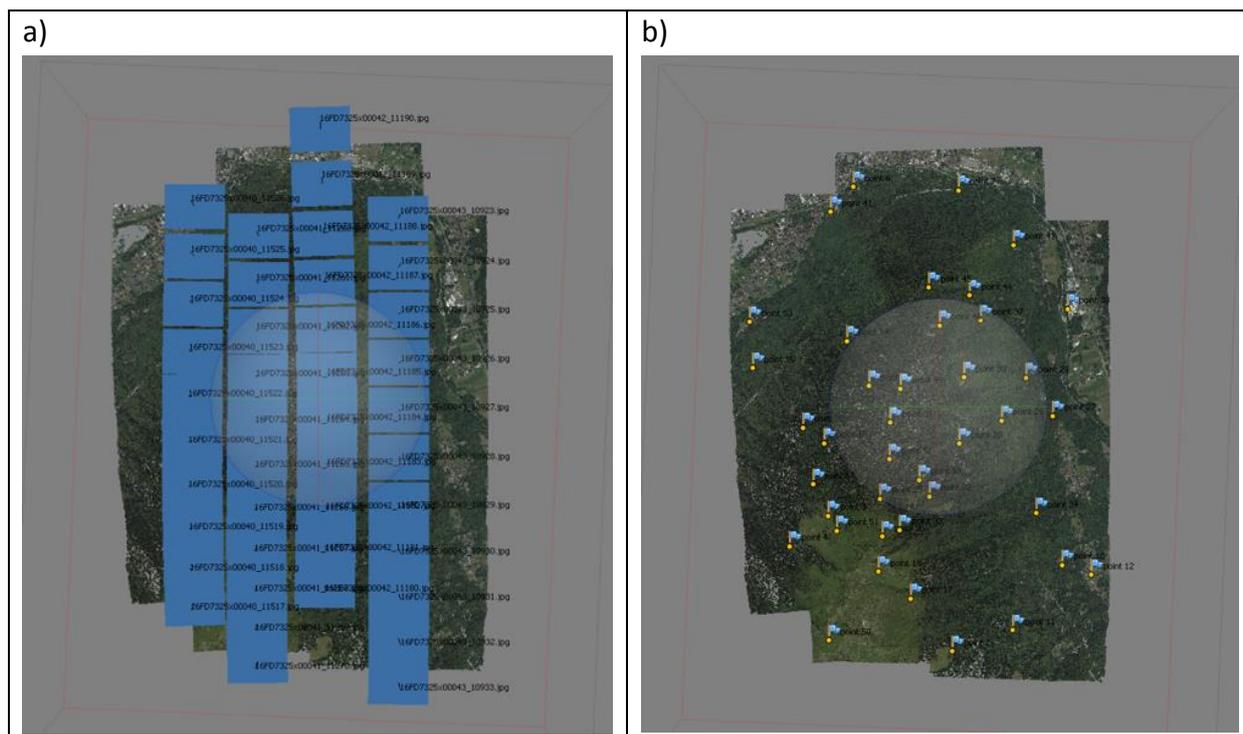


Figure 15 : Etape d'alignement (a) et de création des markers (b) sur le site d'Esserts-Blay. (Source : Agisoft PhotoScan)

### La création des markers

Après avoir aligné les photos, j'ai placé des points de contrôle sur l'ensemble des images. Les points de contrôle sont utilisés pour optimiser l'emplacement et l'orientation des caméras ce qui permet de créer de meilleurs modèles (Agisoft PhotoScan, 2015). Le référentiel des points s'est fait sur le site Géoportail. Une fois les points placés, j'ai supprimé ceux qui avaient une erreur trop importante. Pour le site d'Esserts-Blay, 57 points ont été initialement placés de façon la plus régulière possible à raison d'environ 9 points par images. Au final, 40 points ont été conservés pour une erreur moyenne de 1,26 mètre (figure 15.b).

Ensuite, j'ai utilisé les markers pour optimiser le nuage de points épars et construire le nuage de points dense.

### La densification du nuage

« PhotoScan permet de générer et de visualiser un modèle en nuage de points dense. Sur la base d'une approximation des positions des caméras, le programme calcule les informations de profondeur pour chaque caméra afin de les combiner en un seul nuage de points dense » (Agisoft PhotoScan, 2015). Le temps de traitement pour réaliser ce nuage de point peut être conséquent. Pour le nuage de points dense final sur le site d'Esserts-Blay (figure 16), le traitement aura duré plus de 3 heures pour la construction d'un nuage de plus de 109 millions de points avec une densité de 1,57 points/m<sup>2</sup> (tableau 5). Afin de limiter ces temps de traitement, des premiers essais ont été fait sur de plus petites emprises (tableau 4).



Figure 16 : Nuage de points dense sur le site d'Esserts-Blay. (Source : Agisoft PhotoScan)

J'ai testé deux approches sur une première emprise autour des trouées. La première consiste à aligner l'ensemble des photos sur l'emprise choisie et la deuxième consiste à aligner les photos ligne de vol par ligne de vol afin de limiter les artéfacts dus au moment de la prise de vue (ombre, illumination).

Tableau 4 : Paramètres utilisés pour les premiers essais de MNS sur le site d'Esserts-Blay

	Essai 1 (une ligne)	Essai 2 (ensemble des lignes)
Informations initiales		
Emprise	10.9 km <sup>2</sup>	19.9km <sup>2</sup>
Nombre d'images	6	15
Résolution au sol	18.5 cm/pix	19.6 cm/pix
Erreur de reprojection	0.702 pix	0.761 pix
Alignement des photos		
Accuracy	High	High
Pair selection	Generic	Generic
Key point limit/tie point limit	0 / 0	0 / 0
Adaptative camera model fitting	Yes	Yes
Temps de traitement	4'14	25'
Nuage de points dense		
Quality	High	Medium
Depth filtering	Moderate	Moderate
Temps de traitement	25'12	21'55
Modèle Numérique de Surface		
Size	12641 x 14807	8923 x 6878

Au vu des résultats obtenus (voir 2.1.1.), il a été décidé de travailler sur une modélisation sur l'ensemble des lignes de vols. L'emprise des sites a été redéfinie et une modélisation a été réalisée sur l'ensemble du massif suivant ces paramètres :

Tableau 5 : Paramétrages utilisés pour la création des MNS sur les trois sites

	Esserts-Blay	La Frasse	Villard-sur-Doron
Informations initiales			
Emprise	50,7 km <sup>2</sup>	47.1 km <sup>2</sup>	11.3 km <sup>2</sup>
Nombre d'images	43	38	80
Résolution au sol	20 cm/pix	20.8 cm/pix	19.5 cm/pix
Erreur de reprojection	0.756 pix	0.833 pix	0.597 pix
Alignement des photos			
Accuracy	High	High	High
Pair selection	Generic	Generic	Generic
Key point limit/tie point limit	0 / 0	0 / 0	40000 / 4000
Adaptative camera model fitting	Yes	Yes	yes
Temps de traitement	1h35	11'28	2h50
Nuage de points dense			
Quality	Medium	Medium	Medium
Depth filtering	Aggressive	Aggressive	Aggressive
Temps de traitement	2h49	17h30	
Modèle Numérique de Surface			
Size	11610 x 14129	13903 x 12466	6266 x 6017

Il est à noter que sur le site de Villard-sur-Doron (Les Saisies), les paramètres utilisés sont différents. L'emprise est plus petite que les autres sites (11.3 km<sup>2</sup>) mais le nombre de photos est plus important (80 photos) (tableau 6). Cela est dû à un problème lors de l'alignement des photos. J'ai donc décidé de faire un alignement avec beaucoup d'images mais de travailler ensuite sur une région remesurée uniquement au-dessus des trouées.

### 1.3. Identification des trouées

#### 1.3.1. Approche 1 : Approche raster

La première approche pour identifier les trouées est une approche raster qui consiste à travailler sur un modèle numérique de hauteur ou canopée (MNH/MNC). Le MNH est la différence entre le modèle numérique de surface obtenu par photogrammétrie et le Modèle Numérique de Terrain (RGEAlti®) de l'IGN. Le MMH permet de travailler directement sur les hauteurs de végétation (figure 17).

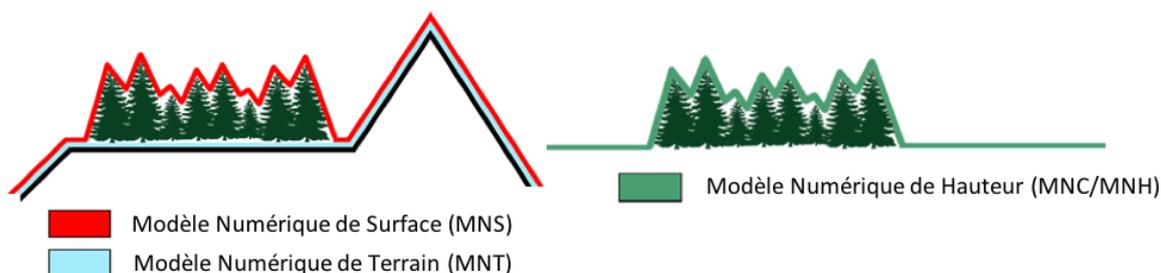


Figure 17 : Modèle Numérique de Hauteur (source : Humboldt State University)

Une fois les MNH créés pour les deux sites, une emprise plus petite a été faite autour des trouées pour pouvoir tester la méthodologie sur une zone plus faible et limiter les temps de traitement. Une emprise de 3 km<sup>2</sup> a été définie autour du site d'Esserts-Blay et une emprise de 2,5 km<sup>2</sup> autour des trouées du site de La Frasse avec pour les deux sites une résolution de 1 mètre.

### 1.3.1.1. Création des seuils

Une fois les MNH créés, des seuils ont été fixés afin de délimiter les zones considérées en trouées ou non. Ces seuils ont été fixés par rapport au percentile 95 de la hauteur maximale sur l'emprise considérée afin d'éviter de prendre en compte les valeurs aberrantes. Une fois identifiée, la hauteur a été divisée par 3 ou 4.

Tableau 6 : Seuils de définition des zones de trouées

	Esserts-Blay	La Frasse
Zmax percentile 95	27.73	22.70
Quart	6.93	5.7
Tiers	9.33	7.57

Le choix final du seuil s'est fait de façon visuelle en comparant les limites des trouées avec les résultats de la photo-interprétation faite sur l'orthophoto de 2013 (voir 2.2.2.). Pour le site d'Esserts-Blay, sont considérées comme zone de trouées les zones dont la hauteur est inférieure à 7 mètres. Pour le site de La Frasse ce seuil est défini à 7,5 mètres.

### 1.3.1.2. Individualisation des trouées

S'est ensuite posé la question de pouvoir identifier les trouées de façon individuelle. Deux « problèmes » sont apparus, le premier étant la continuité dans les zones de trouées. En effet, dans certaines parties de la zone d'étude, les zones de trouées étaient continues avec des îlots d'arbres hauts il était donc impossible de les individualiser. Le second problème était le classement en trouée de zones de non trouées tel que les zones ouvertes de formation herbacées ou les routes.

Pour permettre une identification individualisée des trouées et supprimer au maximum les zones identifiées en trouées à tort (routes, zones de formations herbacées), la BD TOPO® et

la BD FORET® ont été ajoutées. Dans la BD TOPO®, uniquement les routes ont été utilisées. Une largeur moyenne a été mesurée sur certains tronçons facilement identifiables sur l'orthophoto de 2013 et une zone tampon de 2m a été créée autour du linéaire. Concernant la BD FORET®, les zones de formations herbacées ont été sélectionnées. Les couches de chemins et de formations herbacées ont été fusionnées, rasterisées et reclassifiées en binaire afin de pouvoir par la suite passer ces zones en classe de forêt pour qu'elles ne soient pas identifiées comme trouées.

Concernant les trouées ne pouvant pas être individualisées avec la BD TOPO®, une autre approche a été mise en place qui consiste à travailler sur les largeurs de polygones. En effet, cette approche qui correspond à une ouverture morphologique consiste à travailler sur les parties des polygones ayant une largeur plus faible grâce au recouplement des zones tampons. C'est le cas de la trouée 3 du site d'Esserts-Blay, la BD TOPO® a permis de fermer une première partie de la trouée mais une autre partie reste connectée à une zone de trouée plus conséquente. Deux buffers de 5m ont été créés, le premier à l'intérieur des polygones identifiés en trouée et le second a été créé sur les limites du premier.

Cette technique a également permis de supprimer les petits polygones isolés ou très linéaires dans des zones de forêts ou les résidus des découpages fait avec la BD TOPO® et la BD FORET®.

L'approche raster est une approche robuste pour appréhender la problématique de l'identification des zones de trouées et pour les potentialités de pouvoir identifier les trouées de façon individuelle. Cependant, cette approche nécessite d'avoir un MNT relativement précis en fonction de la résolution du MNS obtenu en premier lieu. C'est pourquoi on s'est intéressé à une deuxième approche pour laquelle le MNT n'a pas été utilisé.

### 1.3.2. Approche 2 : Approche « arbre »

Le principe de cette approche repose sur la possibilité de pouvoir travailler directement sur le MNS et de se passer du MNT qui dans certains cas peut être imprécis où non disponible. Le but est de délimiter les couronnes d'arbres et les points les plus hauts dans l'emprise de ces couronnes pour ensuite définir la hauteur des arbres. Suite à cela, tout ce qui n'est pas identifié en temps qu'arbre est identifié en trouée.

### **1.3.2.1. Présentation du logiciel**

La plateforme Computree a été initiée en 2010 dans le cadre d'une collaboration entre le département Recherche, Développement et Innovation (RDI) de l'Office national des forêts (ONF) et l'École nationale supérieure des arts et métiers (ENSAM) de Cluny au sein du projet ANR Emerge. La plateforme Computree est un outil collaboratif de traitement de données dans des contextes forestiers ou de gestion des milieux naturels en général. Elle propose un environnement modulaire permettant de traiter principalement des données de télédétection : LIDAR terrestre et aérien, photographies aériennes ou satellites, données rasters (Computree).

Différents plugins ont été mis en place et insérés à la plateforme. Le plugin utilisé est le plugin SEGMA mis en place par B. St-Onge (St-Onge *et al.*, 2015).

### **1.3.2.2. Chaîne de traitement**

Cette méthode permet d'individualiser et de décrire les couronnes et apex des arbres. Cette méthode s'est révélée relativement performante dans les peuplements à forte dominante résineuse.

La méthode se décompose en cinq étapes et permet de travailler directement sur les MNS.

- Le remplissage des trous permet de remplir les trous correspondant à des valeurs de « no data » ou à des valeurs de hauteur trop faible par interpolation moyenne des pixels voisins.
- L'application d'un filtre Gaussien qui permet de lisser le MNS afin de limiter le nombre de micro-variations de la surface. La valeur du filtre dépend de la scène étudiée. Plus la valeur est faible, plus le filtre est faible et plus il y a aura une segmentation des houppiers (jeunes peuplements). Au contraire, plus la valeur est forte, moins il y aura de segmentation de houppiers (peuplements matures).
- La détection des maximums permet de localiser les points hauts susceptibles de correspondre aux apex des arbres et servent de points de départ pour la croissance de région.
- Le filtrage des maximums par voisinage permet de filtrer les maximums en fonction de la structure de voisinage des houppiers afin de limiter la sur-détection. Les pixels autour du maximum local sont ajoutés jusqu'à ce que les conditions fixées soient atteintes. Ces conditions sont l'atteinte d'une rupture forte entre deux couronnes et d'un radius maximum autour du maximum local.
- La création des bassins versants permet de segmenter les couronnes d'arbres dans le MNS en appliquant la méthode des bassins versants. Cette méthode consiste à créer

une source à chaque minimum du relief pour ensuite remplir l'ensemble du relief. La délimitation se fait ensuite quand les différentes sources se rencontrent (Barnes *et al.*, 2014).

Une fois que les bassins versants sont identifiés, ils permettent de définir des emprises de découpe qui sont les couronnes. Ces emprises sont ensuite utilisées pour découper le nuage de points et garder les items contenus dans ces emprises, notamment les apex (points les plus hauts). Ensuite, les métriques sélectionnées sont calculées sur ces emprises.

J'ai testé de nombreux paramètres pour évaluer les influences de ceux-ci sur les résultats. Dans l'ensemble de ces paramétrages uniquement deux essais seront présentés ici. Le premier essai est celui de base à partir duquel les paramètres ont été modifiés (tableau 7). Les paramétrages du deuxième essai sont ceux pour lequel les résultats étaient les moins aberrants.

Tableau 7 : Paramétrages utilisés dans Computree

	Essai 1	Essai 2
Filtre Gaussien	1	0.8
Detection maximum	0.3	0.3
Voisinage	2/1.5/10	0.5/1.5/10
Bassins versants	2	2

J'ai ensuite exporté les délimitations de couronnes et les apex contenant les métriques dans des fichiers shapefiles et je les ai fusionnés. Pour pouvoir ensuite classer les couronnes par valeur de hauteurs, j'ai soustrait les percentiles 95 et 5 pour supprimer les valeurs extrêmes.

#### 1.4. Relevés de hauteur sur le terrain

Afin de pouvoir évaluer le MNH, des mesures de hauteur sur le terrain ont été faites sur les sites de La Frasse et Villard-sur-Doron.

J'ai construit une grille de points réguliers afin d'avoir une couverture complète de la zone et ainsi avoir des points de mesures dans différents types de milieu (trouées, peuplements bas, peuplements hauts). Sur le site de Villard-sur-Doron, 18 points ont été mesurés. Sur le site de La Frasse, 26 points ont été faits. Sur ce site, il a également été décidé de prendre plusieurs points assez rapprochés de différentes hauteurs pour pouvoir évaluer les variations entre cellules voisines dans le MNH.

Ensuite, j'ai extrait les valeurs des MNH à la localisation de ces points et comparées avec les valeurs mesurées sur le terrain.

## 2. Résultats

**L'ensemble des résultats présentés dans cette partie sont les résultats acquis sur le site d'Esserts-Blay. Les résultats pour le site de la Frasse sont présentés dans les annexes.**

### 2.1. Le modèle Numérique de Surface

#### 2.1.1. Ligne de vol/ensemble des images

Les deux approches testées dans un premier temps sur le site d'Esserts-Blay ont permis de mettre en avant les problèmes pouvant être rencontrés lors du choix des photos à mettre en entrée.

Le premier essai sur une ligne de vol unique donne un Modèle Numérique de Surface d'une bonne qualité (36.9 cm/pix) par rapport aux photos d'origine d'une résolution d'environ 25 cm (tableau 8). Cependant, bien que la résolution du modèle soit bonne, la densité du nuage de points est moins bonne avec 7.33 points/m<sup>2</sup> (tableau 9). Cette densité de nuage de points assez faible s'explique par les zones de No Data dans le nuage de points (figure 18.a). Ces zones où il n'y a pas de points peuvent s'expliquer par la présence d'ombres sur les photos aériennes en entrée. En effet, si l'on regarde le nuage de points, on remarque que les zones de no data sont toujours plus ou moins à droite des zones où le nuage de points est le plus dense et les hauteurs les plus élevées (figure 18.a.).

Le deuxième essai sur l'ensemble des lignes de vol est quant à lui plus satisfaisant pour la densité de points (1.63 points /m<sup>2</sup>) mais avec une résolution moins bonne (78.4 cm/pix) (tableau 9). Cette résolution plus faible est due à la capacité de traitement de l'ordinateur utilisé qui, du fait du nombre d'images utilisé, ne pouvait calculer un nuage de points dense de haute qualité.

Des zones de No Data persistent mais sont plus réduites sur le modèle prenant en compte toutes les lignes de vols (figure 18.b.). Cela s'explique par la capacité de l'algorithme à aller chercher des points de correspondance sur l'ensemble des photos. Les conditions d'illumination étant différentes, les zones d'ombres peuvent ne plus apparaître sur certaines lignes et donc permettre à l'algorithme de placer des points là où ça n'aurait pas été possible sur une seule ligne de vol.

a)



b)



Figure 18 : a) nuage de points dense obtenu sur une ligne de vol, b) nuage de points denses obtenu sur l'ensemble des lignes de vol. Remarquer les zones de No Data en gris.

Tableau 8 : Modèles de surface et densités des nuages de points sur le site d'Esserts-Blay

DEM / Nuage de points dense		
	Essai 1 (Une seule ligne)	Essai 2 (Ensemble des lignes)
Résolution	36.9 cm/pix	78.4 cm/pix
Densité de points	7.33 points/m <sup>2</sup>	1.63 Points /m <sup>2</sup>

Au vu des résultats obtenus avec ces deux approches et en gardant à l'esprit que la méthodologie doit être appliquée à l'échelle du massif et réutilisable pour les gestionnaires, il a été décidé de garder les paramétrages du deuxième essai tout en apportant quelques modifications lors de la création du nuage de points dense. Le mode de filtrage de la profondeur a été paramétré comme « agressif » à la place de « modéré » dans les essais précédents pour régler la plupart des valeurs aberrantes.

### 2.1.2. Les résultats sur les sites

La résolution du MNS est du même ordre de grandeur, pour les trois sites respectivement 79.9 cm/pix, 83.4 cm/pix et 78 cm/pix pour les sites d'Esserts-Blay, La Frasse et Villard-sur-Doron (tableau 10). Par rapport à la résolution de base des photos aériennes, la résolution obtenue pour les modèles est très moyenne, cela étant dû au nombre de photos traitées et à la capacité de l'ordinateur utilisé. Malgré cette résolution, la densité de points est plutôt bonne et suffisante pour l'utilisation ultérieure du MNS. 1.57 points/m<sup>2</sup> pour Esserts-Blay, 1.44 points/m<sup>2</sup> pour La Frasse et 1.64 points/m<sup>2</sup> pour Villard-sur-Doron.

Tableau 9 : Modèles de surface et densité de points sur les trois sites d'étude

	DEM / Nuage de points	
Esserts-Blay	Résolution	79.9 cm/pix
	Densité de points	1.57 points/m <sup>2</sup>
La Frasse	Résolution	83.4 cm/pix
	Densité de points	1.44 points/m <sup>2</sup>
Villard-sur-Doron	Résolution	78 cm/pix
	Densité de points	1.64 points/m <sup>2</sup>

## 2.2. Identification des trouées forestières

### 2.2.1. Approche raster

Les résultats obtenus en calculant les MNH sont satisfaisants et permettent d'avoir des valeurs sur l'ensemble de l'emprise.

Sur le site d'Esserts-Blay, il a été décidé de garder un seuil de 7 mètres (figure 19) pour délimiter les trouées (un quart de la hauteur max sur l'emprise). Ce seuil a été choisi car contrairement au seuil de 9m, il ne surestimait pas la taille des trouées et permettait de faciliter la fermeture de certaines.

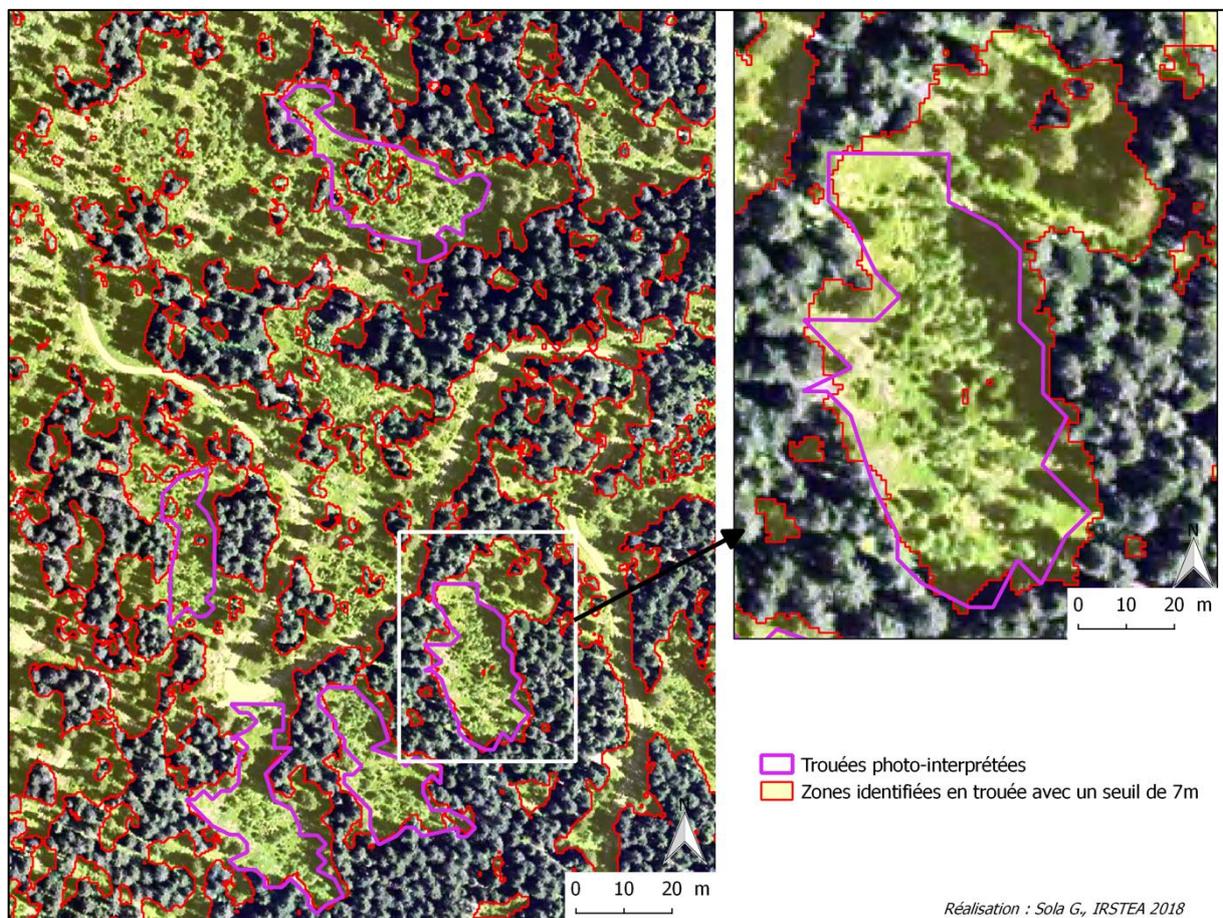


Figure 19 : limites des zones de trouée modélisées avec un seuil à 7 m sur le site d'Esserts-Blay. (Source : BD ORTHO®)

Afin de pouvoir identifier des trouées individuelles mais également de supprimer les zones identifiées en trouée qui ne le sont pas, l'utilisation de la BD Forêt et de la BD Topo s'est révélée utile. L'utilisation des routes a permis de découper certaines zones de trouées et de permettre une identification individuelle d'entre-elles (encadré violet sur la figure 20). Cependant, La BD FORET® n'étant pas assez précise par rapport aux emprises modélisées avec le MNH, certaines zones de formations herbacées sont restées identifiées en trouées, c'est notamment le cas de la zone identifiée par les encadrés bleus sur la figure 20.

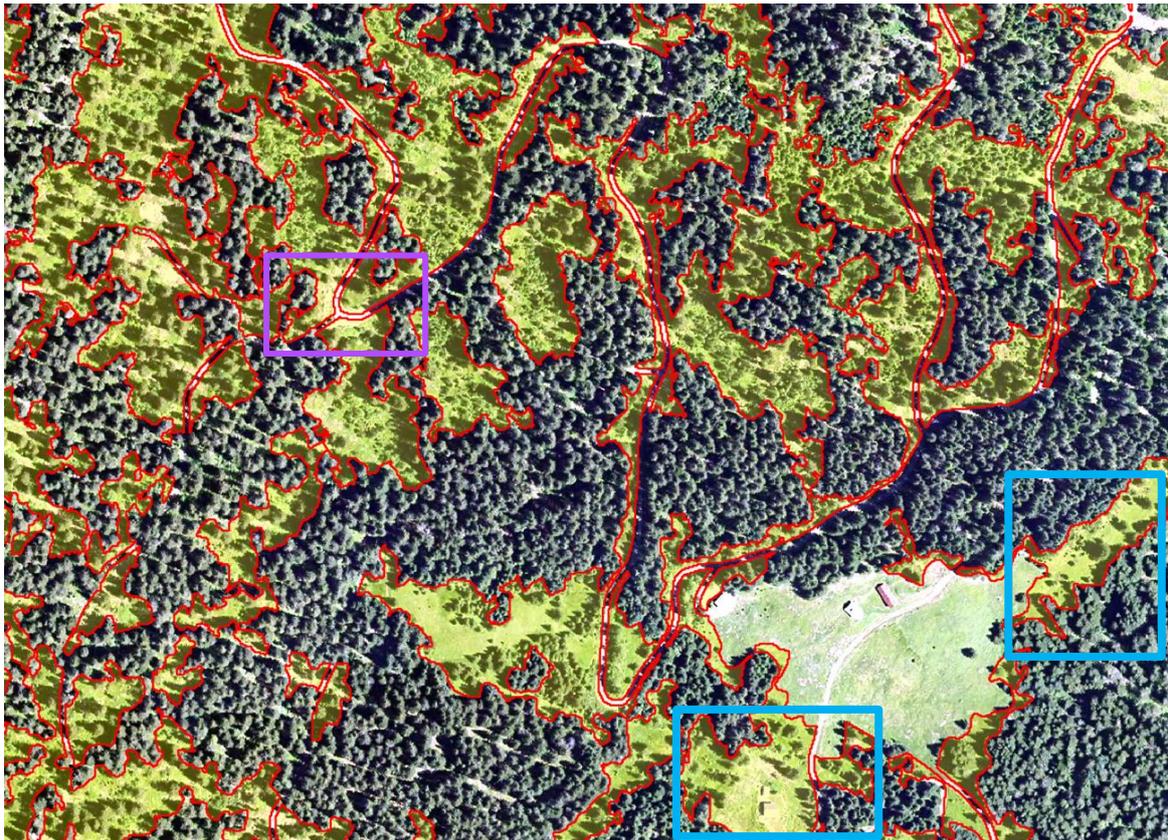


Figure 20 : Identification des trouées après utilisation des données IGN sur le site d'Esserts-Blay. (source : BD ORTHO(R®))

Le problème d'individualisation se pose lorsque celles-ci sont contenues dans des zones de trouées continues où l'utilisation des données de l'IGN ne peut pas avoir d'impact. C'est notamment le cas de la trouée 1 qui a été fermée d'un côté avec la BD TOPO® mais qui reste reliée à une autre trouée (encadré noir, figure 21.a.).

La méthode de fermeture morphologique a permis de fermer les trouées sur lesquelles les comparaisons devaient être faites mais aussi de supprimer les zones identifiées en trouées mais trop petites pour être d'intérêt dans la méthodologie (figure 21.b.).

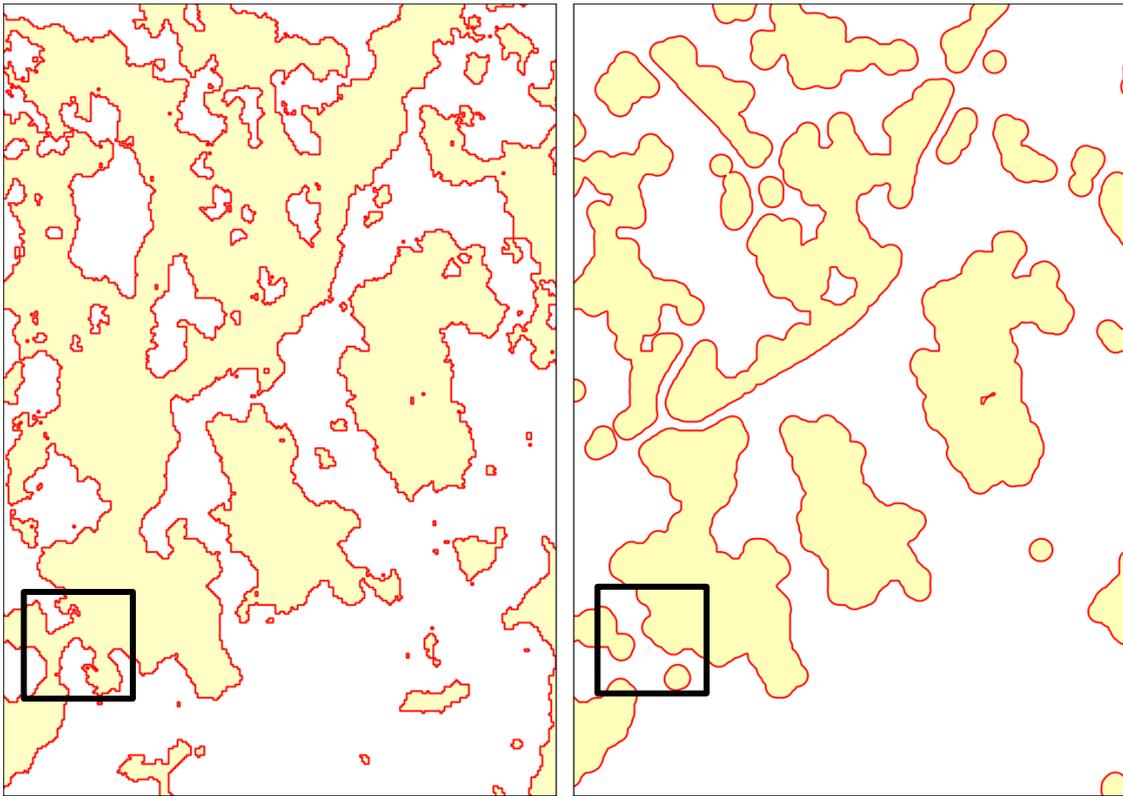


Figure 21 : Influence de la fermeture morphologique sur l'individualisation des trouées sur le site d'Esserts-Blay

### 2.2.2. Comparaison des trouées interprétées et des trouées modélisées

Les résultats de la modélisation comparés à l'interprétation visuelle sont satisfaisants dans le sens où les limites des trouées sont très bien identifiées. On remarque cependant que certaines parties sont identifiées en trouées dans la modélisation mais en non trouées dans l'interprétation (figure 22).

Une première comparaison visuelle des zones identifiées en trouées a été faite avec les trouées photo-interprétées. Les résultats montrent que les trouées ont généralement une surface plus faible sur les résultats de la photo-interprétation. Si on prend l'exemple de la trouée 3 (encadré figure 22) on remarque qu'une partie entière de la trouée a été considérée comme peuplement haut alors qu'elle a été identifiée en trouée sur le MNH. Ces différences peuvent s'expliquer par des travaux qui auraient pu être réalisés entre 2013 et 2016 ou uniquement par la subjectivité de la photo-interprétation. En effet, un retour sur la photo-interprétation manuelle montre que la zone au Nord-est de la trouée 1, classée en trouée par le MNH a été par erreur interprétée en forêt de la part la présence de trois préexistants (et de leurs ombres) à l'intérieur de la trouée (figure 22).

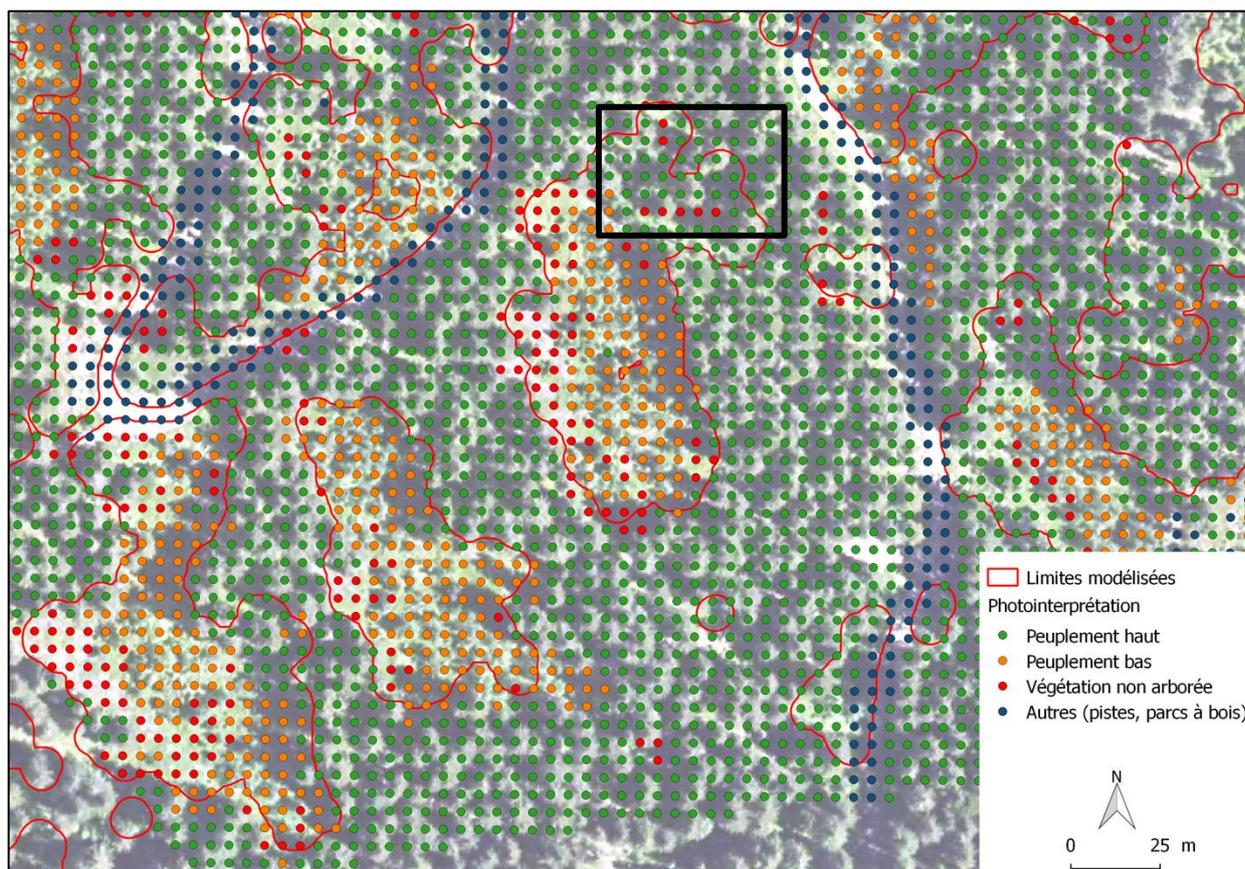


Figure 22 : Comparaison des trouées photo-interprétées et des trouées modélisées. (Réalisation : Sola G., IRSTEA 2018, Source : BD ORTHO®)

Les surfaces des trouées modélisées ont été calculées et comparées avec les surfaces calculées par photo-interprétation. Sur les trois trouées, deux d'entre elles ont une surface plus importante (environ 1000 m<sup>2</sup> de plus) que sur la photo-interprétation (tableau 10). Cependant, pour la trouée 2, la surface modélisée est moins importante que la surface interprétée avec environ 332 m<sup>2</sup> de différence. Cette différence se voit très bien sur la figure 8, on remarque que la partie au sud de la trouée identifiée par photo-interprétation comme peuplement bas (figure 22).

Tableau 10 : Comparaison des surfaces en m<sup>2</sup> des trouées sur le site d'Esserts-Blay

		Modélisée	Photo-Interprétée	Différence
Esserts-Blay	Trouée 1	4933,2	3725	1208,2
	Trouée 2	3292,53	3625	-332,47
	Trouée 3	5529,85	4550	979,85

Cependant il est important de garder à l'esprit que les modélisations ont été faites sur les photos aériennes acquises en 2016 et la photo-interprétation sur les orthophotos de 2013 ce qui peut expliquer les différences entre les surfaces et les délimitations.

### 2.2.3. Approche arbre

L'approche par détection de couronne a montré des résultats plutôt intéressants sur les zones de forêt avec une bonne détection des houppiers (figure 23). On remarque cependant que les résultats sur les zones ouvertes sont moins cohérents avec des polygones très allongés (figure 26). En modifiant les paramètres et notamment le paramètre du filtrage des maximums par voisinage, on obtient des résultats globalement similaires dans les zones de forêt et un peu moins aberrants dans les zones ouvertes malgré la forme des polygones qui reste très linéaire.

Concernant la détection des valeurs maximum dans le MNS les résultats sont satisfaisants et ont permis de définir des hauteurs cohérentes par rapport à une interprétation visuelle de l'orthophoto. On retrouve la forme des trouées avec les valeurs les plus élevées sur les bordures (plus de 20 mètres) et des valeurs plus faibles au centre des trouées (inférieur à 10 mètres). Les zones de non data correspondent aux zones qui n'ont pas été détectées car inférieures à 0,3 mètres. Au vu des résultats obtenus malgré le nombre d'essais réalisés, il a été décidé de mettre de côté cette approche et de se concentrer sur une approche raster en travaillant sur le MNH.

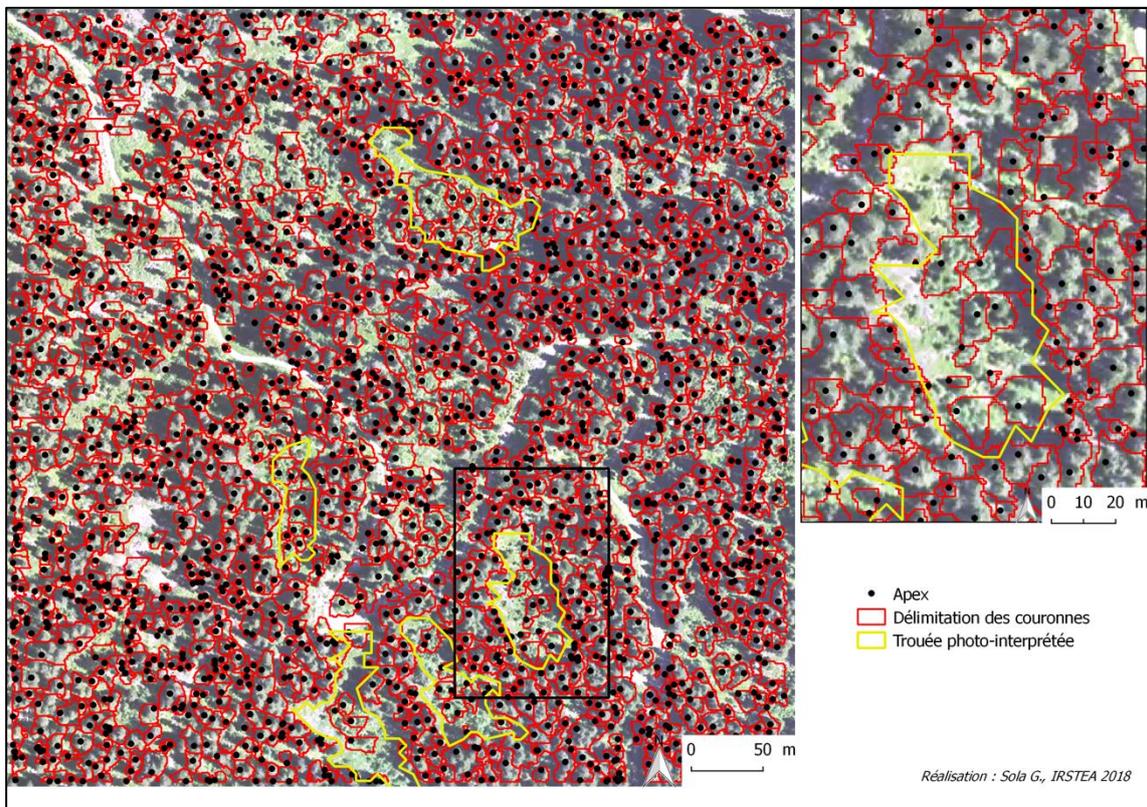


Figure 23 : Délimitation des couronnes et positions des apex sur une zone de trouée et forêt

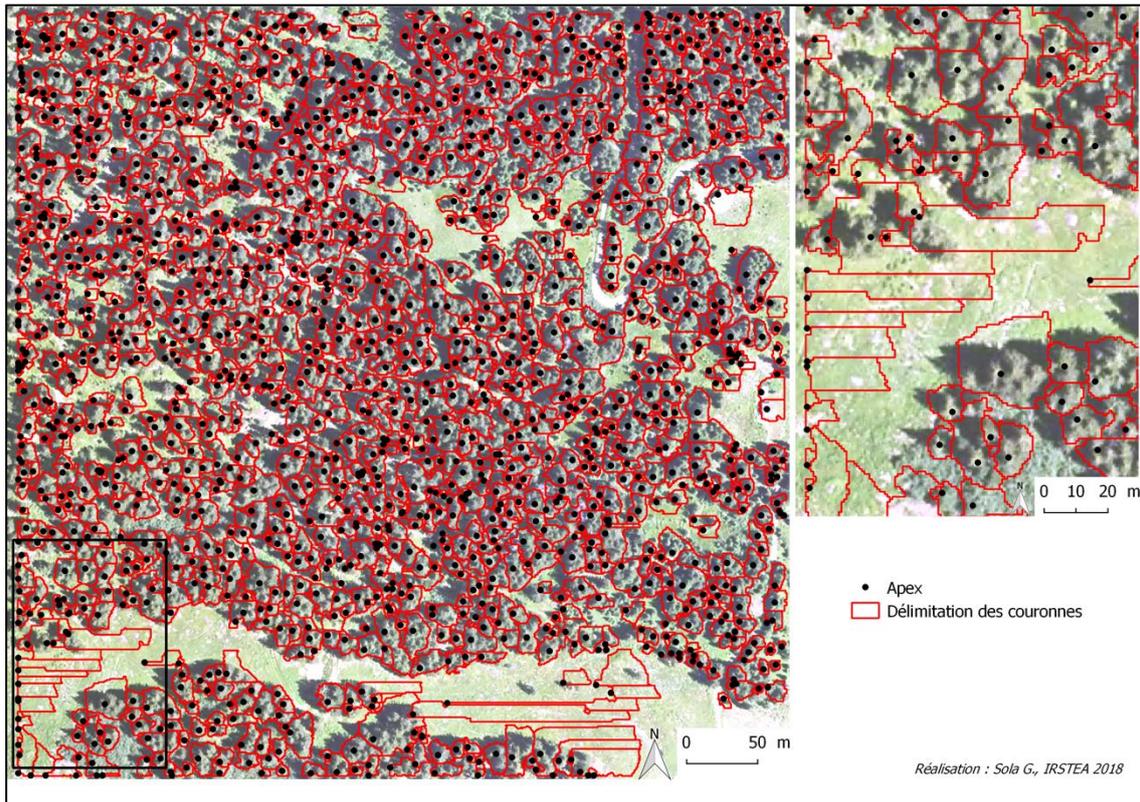


Figure 24 : Délimitation des couronnes et positions des apex sur une zone ouverte

## Discussion/conclusion

Le travail réalisé lors de ce stage a permis de mettre en avant plusieurs limites et des pistes d'amélioration quant à l'identification et la caractérisation des trouées forestières.

Concernant la création des MNS, j'ai rencontré deux limites principales d'ordre technique. La première est due à la version utilisée de PhotoScan, toutes les informations disponibles sur les photos aériennes n'ont pas pu être utilisées comme les angles oméga, phi et kappa. La seconde limite est la puissance de l'ordinateur qui, ici, n'a pas permis d'obtenir des nuages de points denses aussi denses et complets que souhaités par rapport à la qualité des images en entrée. Bien que la photogrammétrie puisse permettre de s'affranchir des limites pouvant apparaître avec une méthode basée sur l'optique (Vepakomma et al., 2008), on remarque que les zones d'ombres restent limitantes pour l'obtention d'une bonne densité avec des points plus nombreux et plus homogènes.

Cependant, les résultats obtenus avec l'approche raster sont satisfaisants pour l'identification des trouées, mais les MNH produits restent à améliorer. Il a été possible de délimiter les trouées en appliquant un seuil et de pouvoir les individualiser à l'aide d'opérations spatiales (fermetures morphologiques, etc). A travers ces différentes étapes, on peut se rendre compte des questionnements pouvant être soulevés quant à la définition des trouées (Betts *et al.*, 2005). En effet, lors de ce stage, à différentes étapes de la méthodologie, s'est posée la question des limites des trouées. Quand peut-on dire que c'est une trouée, à partir de quelle taille ? A quel endroit peut-on considérer que la trouée est fermée ?

Par contre, il n'a pas été possible de pouvoir caractériser les trouées de façon précise avec les MNH obtenus. Les mesures de hauteur faites sur le terrain n'ont pas permis de valider les valeurs des MNH à l'intérieur des trouées. Les différences de valeur mesurées et estimées peuvent être expliquées par différents paramètres comme la position du GPS ou la modification des peuplements entre 2016 et 2018. Elles sont trop importantes et il n'est pas possible de pouvoir en dégager une tendance.

Une des améliorations également importante serait de pouvoir travailler sur un ensemble de données de la même année. En effet, dans la présente méthodologie, le fait de travailler sur plusieurs années a introduit une incertitude lors des phases d'interprétation et d'évaluation des résultats. Les modèles ont été produits sur des photos aériennes prises en 2016, comparés sur des ortho-photos de 2013 et ensuite, des hauteurs d'arbres de 2018 ont été comparées avec les modélisations.

En ce qui concerne l'amélioration des MNH, il serait possible d'utiliser les données Lidar pour travailler à partir de MNT plus précis. Cependant, cela ne serait pas reproductible à plus grande échelle car la couverture en données lidar reste très localisée.

Un des sous objectifs de ce stage était aussi d'explorer la faisabilité de l'identification des trouées en utilisant uniquement le MNS. L'approche « arbre » par modélisation des couronnes est une approche qui semble prometteuse avec cependant des améliorations à apporter. Comme pour l'approche « raster », les résultats obtenus sont directement liés à la qualité du nuage de points en entrée. Du fait de la résolution des MNS, l'ensemble des traitements ont été fait sur une grille d'une résolution de 80 cm pour des images en entrée d'environ 25 cm ce qui dégrade d'emblée les résultats finaux. Les résultats obtenus sur les zones de forêts sont satisfaisants dans l'ensemble car on remarque une bonne délimitation des couronnes et une identification des apex satisfaisante. Cependant, les résultats obtenus sur les zones ouvertes sont plus critiquables du fait de la forme des couronnes identifiées qui, malgré les changements de paramétrages effectués, restent très linéaires. On remarque cependant que ces formes allongées se retrouvent majoritairement sur les bordures des dalles du nuage de points découpé. L'identification des apex dans les zones ouvertes est aussi parfois contestable car certains points ont été identifiés comme point « haut » alors qu'une simple interprétation visuelle le contredit. Pour améliorer les résultats, il pourrait être pertinent de classer les points avant de faire les traitements afin d'éviter l'identification d'apex sur les habitations ou identifier les zones ouvertes pour qu'elles ne soient pas prises en compte lors du traitement.

Toujours dans l'optique de pouvoir se passer du MNT et de travailler uniquement avec les MNS, des pistes sont à approfondir avec l'utilisation de Computree (utilisé dans l'approche « arbre ») en créant des indices topographiques qui permettraient de classer les trouées directement dans le MNS.

Au final, je pense que les résultats sont satisfaisants quant à la mise en place d'une méthodologie pour l'identification des trouées. Quant à leur caractérisation, des pistes d'approfondissement ont pu être déterminées pour continuer le travail sur ce sujet.

## Bibliographie

AGISOFT. 2015. Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur : Professional Edition, Version 1.1. 87 pages

BARNES R., LEHMAN C., MULLA D., 2014. Priority-flood : An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models. *Computer & Geosciences* 62. 117-127.

BETTS H. D., BROWN L. J., STEWART G. H., 2005. Forest canopy gap detection and characterization by the use of high-resolution Digital Elevation Models. *New Zealand journal of ecology*, vol 29, No, 1. 95-103.

FUHR M., 2012. Dynamique des grandes trouées en forêt de montagne (Alpes du Nord). Projet INTERREG, rapport final.

FUHR M., 2015. Dynamique de la régénération dans les grandes trouées en forêt de montagne des Alpes du Nord. ONF-IRSTEA.

FUHR M, WEYANT J., DURAND N., RIOND C., 2015. Dynamique de fermeture des grandes trouées dans les forêts de montagne des Alpes du Nord. RDV techniques n°47 – hiver-printemps 2015 – ONF

GAUQUELIN X., COURBAUD B., 2006. Guide des sylvicultures de montagne – Alpes du Nord françaises. Cemagref CRPF Rhône-Alpes, ONF (Ed.), ISBN n°2 – 84207 – 306 – 1

GAUQUELIN X., 2014. Sylviculture en forte pente dans les Alpes du Nord : intervenir par trouées. RDV techniques n°45-46 – été-automne 2014 – ONF

FUJITA T., ITAYA A., MIURA M., MANABE T., YAMAMOTO S., 2003. Canopy structure in a temperate old-growth evergreen forest analyzed by using aerial photographs. *Plant ecology* 168, 23-29.

NAKASHIZUKA, T., KATSUKI T., TANAKA H., 1995. Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. *Ecological Research*,10. 13–18.

ST-ONGE B., AUDET F-A, BEGIN J., 2015. Characterizing the Height Structure and Composition of a Boreal Forest Using an Individual Tree Crown Approach Applied to Photogrammetric Point Cloud. *Forest*, 6. 3899-3922.

TANAKA H., NAKASHIZUKA T., 1997. Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan. *Ecology*, 78(2). 612-620.

UMR TETIS Cemagref-CIRAD-ENGREF. 2010. Construction d'un Modèle Numérique de Terrain par stéréoscopie aérienne ou satellitaire. Présentation pour l'atelier Mercator. 36 pages.

VEPAKOMMA U., KNEESHAW D., FORTIN M-J., 2012. Spatial contiguity and continuity of canopy gaps in mixed wood boreal forests: persistence, expansion, shrinkage and displacement. Journal of Ecology 100. 1257-1268.

VEPAKOMMA U., ST-ONGE B., KNEESHAW D., 2008. Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multipi-temporal lidar data. Remote Sensing of Environment 112. 2326-2340.

## Sitographie

[http://rdinnovation.onf.fr/projects/computree/wiki/Fr\\_wiki\\_v4](http://rdinnovation.onf.fr/projects/computree/wiki/Fr_wiki_v4) consulté le 03/07/2018

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558969-How-are-defined-omega-phi-kappa-> consulté le 05/06/2018

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/205675256> consulté le 05/06/2018

<http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=90> consulté le 25/05/2018

[http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP\\_216\\_Online/lesson7-1/applications.html](http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson7-1/applications.html) consulté le 06/08/2018

<https://www.dronesimaging.com/> consulté le 07/08/2018

<http://www.ingeo.fr/photogrammetrie.html> consulté le 06/08/2018

## Annexes

Annexe 1 : Script de conversion des photos aériennes

Annexe 2 : Résultats obtenus sur le site de La Frasse

## Annexe 1 : Script de conversion des photos aériennes

```
## conversion photos aeriennes IGN JP2 to JPG

## importer
import os
import sys
import shutil #delets folders created previosly during tests
from pgmagick import Image

#delets test folder convert in PVA
shutil.rmtree("./2016_convert/")
#
# creates folder convert in PVA
pathConv = "./2016_convert/" ##create variable containing the path to the folder
os.mkdir(pathConv, 0777) ##create folder with permissions (777 => rwx)

for dir in os.listdir("./"):
    if dir == "2016_16FD73_C_25_JP2_E095":
        for file in os.listdir("./2016_16FD73_C_25_JP2_E095/"):
            if file.endswith(".JP2"):
                img = Image("./2016_16FD73_C_25_JP2_E095/"+file.split(".")[0]+".JP2")
                img.write("./2016_convert/"+file.split(".")[0]+".jpg")
```

## Annexe 2 : Résultats obtenus sur le site de La Frasse

Sur le site de La Frasse, le seuil de 7,5 mètres a été retenu car il permettait d'identifier les zones de trouées de façon plus précise que le seuil de 6 mètres. Les zones de trouées identifiées sont plus importantes que les trouées photo-interprétées servant de référence (figure 25). Les trouées photo-interprétées sont englobées dans des zones de trouées beaucoup plus importantes du fait des travaux faits sur ce site.

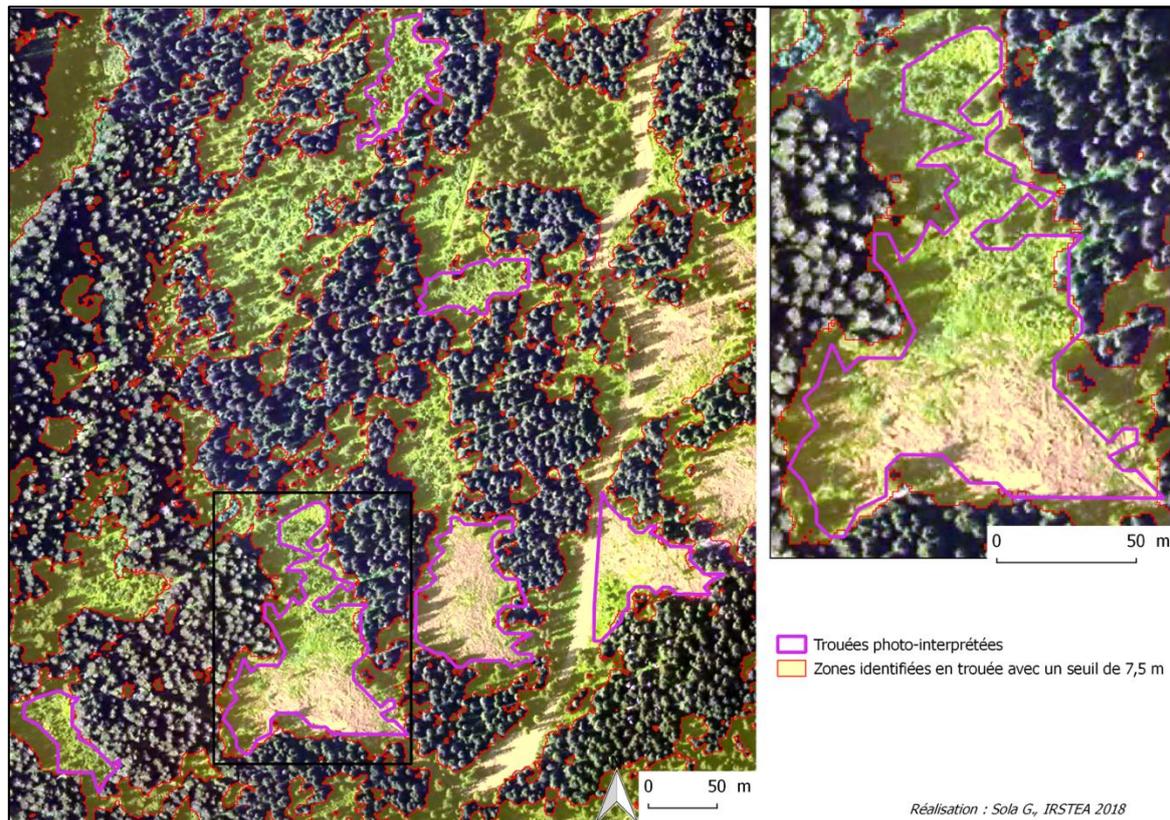


Figure 25 : Limites des zones de trouées avec un seuil à 7,5 m sur le site de La Frasse. (source : BD ORTHO®)

Sur le site de la Frasse, les BD TOPO® et BD FORET® n'ont pas permis de travailler à l'individualisation des trouées, la piste forestière que l'on aperçoit sur l'orthophoto de 2013 n'était pas répertoriée dans la BD TOPO® à disposition. La méthode de fermeture morphologique a cependant permis d'individualiser certaines trouées qui ont ensuite été comparées avec la photo-interprétation (figure 26).

Tableau 11 : Comparaison des surfaces en m<sup>2</sup> des trouées sur le site de La Frasse

		Modélisée	Photo-interprétée	Différence
La Frasse	Trouée 3	2978.74	2350	628.74
	Trouée 4	13850.23	10900	2950.23
	Trouée 5	6963.16	6925	38.16

Contrairement aux résultats sur le site d'Esserts-Blay où une des trouées étaient sous-estimée sur la modélisation, sur le site de La Frasse, les surfaces photo-interprétées des trois trouées individualisées sont plus petites (tableau 11). Lorsque l'on regarde les résultats de la photo-interprétation sur la trouée 4, on se rend compte des erreurs d'interprétation due à l'ombre (figure 26). En effet, la partie encadrée en rouge montre que les zones d'ombres ont été interprétées en peuplement haut (figure 26).

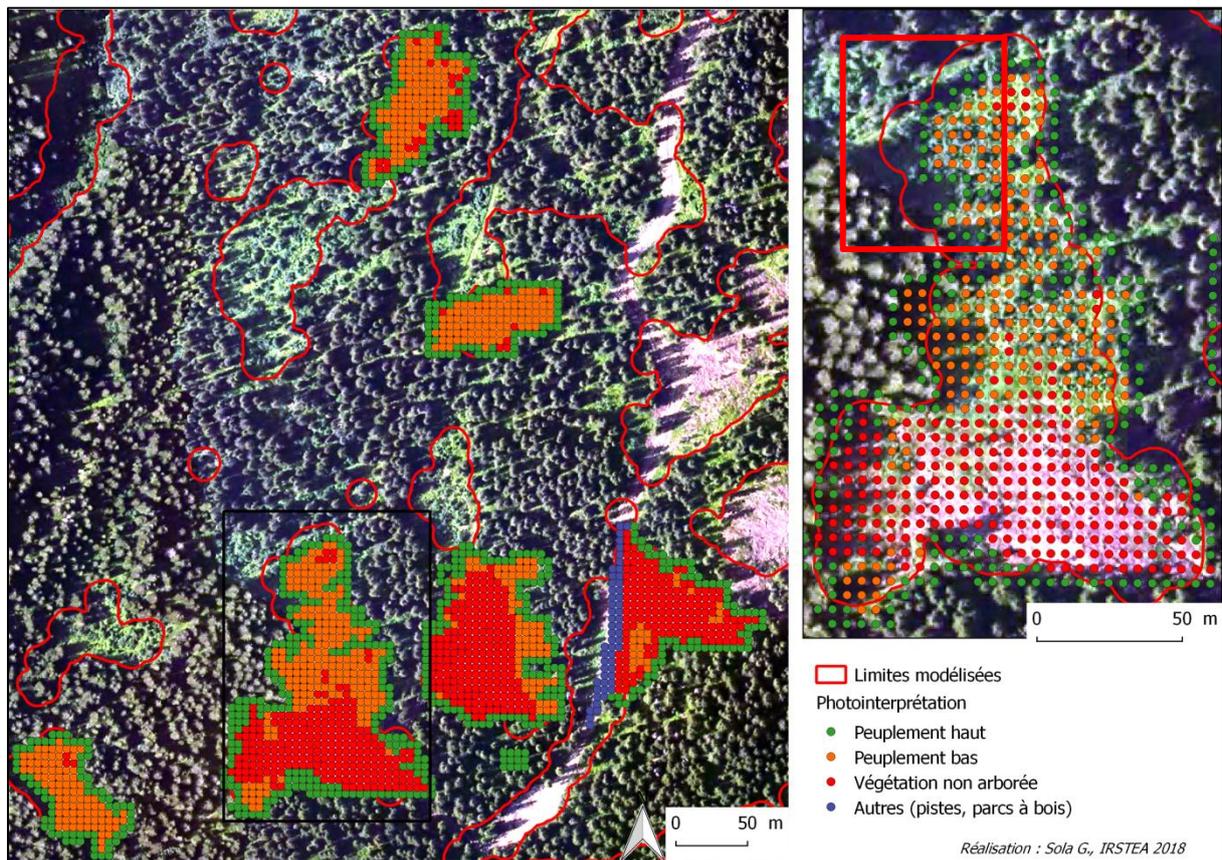


Figure 26 : Comparaison des trouées photo-interprétées et des trouées modélisées. (Source : BD ORTHO®)

Concernant l'approche arbre, on retrouve les mêmes problèmes de polygones allongés que sur le site d'Esserts-Blay. Cependant, alors que l'on pensait que ces formes pouvaient, entre autres, être liées aux bordures des dalles, on se rend compte que même au centre de la dalle (figure 27) ce phénomène se produit. Ces formes allongées se retrouvent également sur certaines zones de forêts où l'on peut voir sur l'orthophoto des peuplements hauts (encadré vert, figure 27). Ces erreurs peuvent s'interpréter sur ce site par une qualité du MNS moins bonne et une topographie différente que sur le site d'Esserts-Blay.

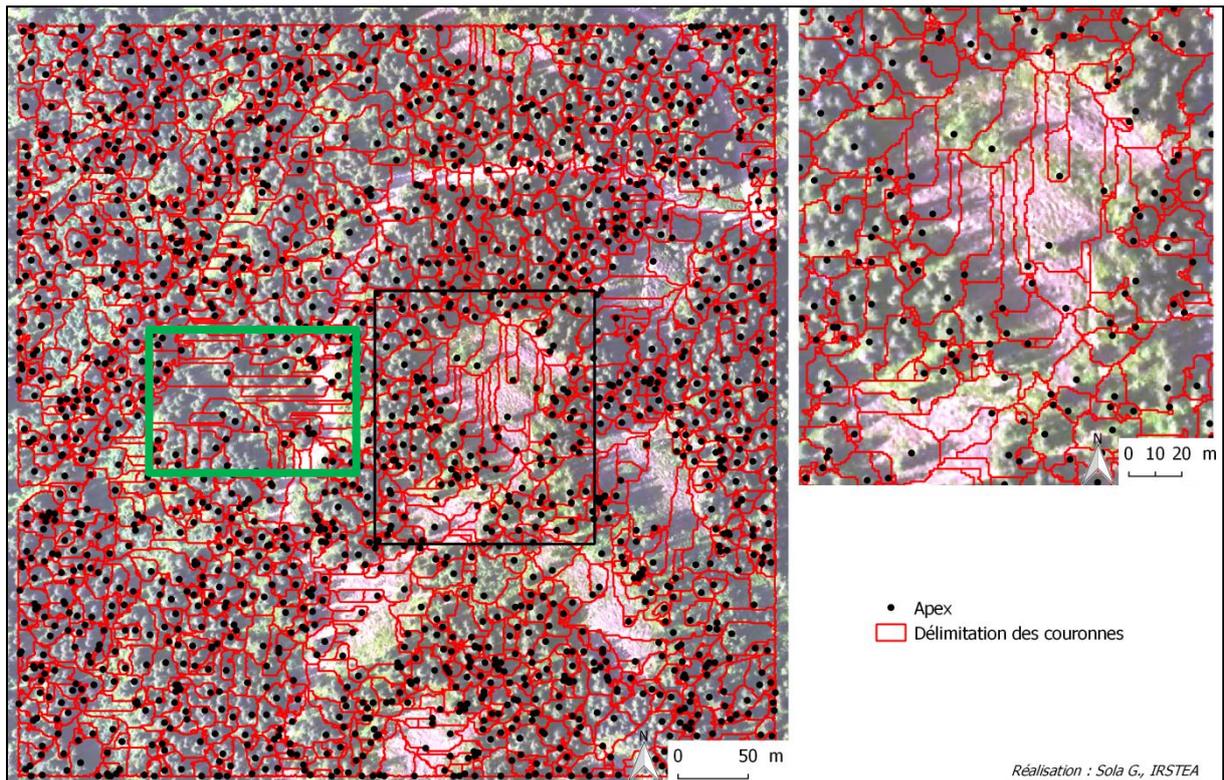


Figure 27 : Délimitation des couronnes et positions des apex sur une dalle du site de La Frasse. (Source : Computree)

