# Rapport Synthèse

# Détection et dénombrement automatisé de monticules de plantation sur des images acquises par drone grâce à l'apprentissage profond

Présenté à



Félix Brochu-Marier, ing.f. Éric Lapointe, ing.f.

Par:



Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.

Marc-Antoine Genest, M.Sc.

Mathieu Varin, M.Sc.

Camille Armellin, B.Sc.

Batistin Bour, M.Sc.



Septembre 2021



Mots-clés: monticule, plantation, peuplier hybride, photogrammétrie, drone, télédétection, intelligence artificielle, apprentissage profond, vision par ordinateur, traitement d'images, segmentation Référence à citer : Genest, M.-A., Varin, M., Armellin, C. et Bour, B. 2021. Détection et dénombrement de monticules de plantation sur des images acquises par drone grâce à l'apprentissage profond. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport

2021-23. 28 pages + 5 pages en annexe.

# Table des matières

| 1. | Intr    | oduction   | 4  |
|----|---------|--|----|
| 2. | Obj     | ectifs   | 4  |
| 3. | Dor     | nnées utilisées  | 5  |
|    | 3.1     | Orthomosaïques RVB et modèle numérique de surface                | 5  |
|    | 3.2     | Délimitation des secteurs de plantation par photo-interprétation | 6  |
|    | 3.3     | Données de validation  | 6  |
| 4. | Mé      | thode  | 7  |
|    | 4.1     | Création du jeu de données de référence                          | 7  |
|    | 4.2     | Prétraitement des données  | 9  |
|    | 4.3     | Modélisation par apprentissage profond                           | 10 |
|    | 4.4     | Entraînement de l'algorithme                                     | 12 |
|    | 4.5     | Dénombrement des monticules                                      | 14 |
|    | 4.6     | Validation   | 15 |
|    | 4.7     | Création de l'outil et implémentation de l'interface graphique   | 16 |
| 5. | Rés     | ultats et discussion   | 16 |
|    | 5.1     | Résultats de l'apprentissage                                     | 16 |
|    | 5.2     | Validation sur les orthomosaïques de 2019                        | 17 |
|    | 5.3     | Validation sur les orthomosaïques de 2020                        | 19 |
|    | 5.4     | Comparaison des résolutions spatiales                            | 23 |
|    | 5.5     | Effet de la projection   | 24 |
| 5  | Cor     | nclusion   | 24 |
|    | 6.1     | Résumé des résultats   | 24 |
|    | 6.2     | Recommandations pour l'utilisation de la méthode                 | 25 |
|    | 6.3     | Pistes d'amélioration  | 26 |
| D. | áfáranc |  | 28 |



# Liste des figures

| Figure 1 : Secteurs de plantation de monticules (en rouge) de 2019 et 2020                      |
|---|
| validation terrain de juin 2021   |
| ·   |
| Figure 3: Exemple d'une tuile de 2048 par 2048 pixels annotée. Chaque monticule est identific   |
| par un point blanc sur l'orthomosaïque  |
| Figure 4: Trois exemples d'imagettes utilisées pour l'entraînement de l'algorithme              |
| d'apprentissage profond. Gauche : orthomosaïque, centre : modèle numérique de surface           |
| droite: annotation  |
| Figure 5 : Schéma de l'architecture utilisée pour la segmentation des monticules11              |
| Figure 6: Exemple de l'orthomosaïque du secteur Dorset 56 bloc 2 (gauche), du raster de         |
| classification binaire (centre) et du raster de nombre de monticules par objet (droite)14       |
| Figure 7: Statistiques de l'entraînement de modèle de segmentation par apprentissage. Le poin   |
| rouge indique le moment où l'algorithme final a été retenu                                      |
| Liste des tableaux  |
|   |
| Tableau 1 : Liste des hyperparamètres pour l'entraînement de l'algorithme.         13           |
| Tableau 2: Comptabilisation des monticules des mosaïques de 2019.    18                         |
| Tableau 3 : Résultats de la validation terrain de juin 2021. Les erreurs supérieures à 10 % son |
| en rouge19  |
| Γableau 4 : Résultats de prédictions pour l'ensemble des plantations de 2021. Les champs        |
| grisés n'ont pas été pris en compte pour la précision globale, car l'orthomosaïque ne couvrai   |
| pas l'entièreté du terrain à prédire. Les erreurs supérieures à 10 % sont en rouge.             |



#### Résumé

Ce rapport présente une nouvelle méthode de dénombrement de monticules de plantation, étape cruciale lors de la planification du reboisement de peupliers hybrides chez Domtar. En effet, des centaines de milliers de monticules sont faits chaque année par Domtar et un jeune arbre est planté sur chacun d'entre eux. Puisque ces opérations impliquent le déplacement et la plantation d'un grand volume d'arbres, un dénombrement précis et une méthode reproductible pour y arriver sont nécessaires. La technique développée fait appel à l'apprentissage profond afin d'atteindre ces objectifs.

Pour ce faire, des orthomosaïques générées à partir d'images acquises par drone ainsi que leur modèle numérique de surface correspondant ont été fournis par Domtar. L'identification manuelle des monticules sur ces images par photo-interprétation a ensuite permis de créer un jeu de données suffisamment grand pour entraîner un algorithme d'apprentissage profond visant à automatiser la détection des monticules de plantation. Le rôle de cet algorithme étant uniquement la détection des monticules par segmentation d'image, un deuxième algorithme de vision par ordinateur a été développé pour dénombrer les monticules détectés. Finalement, une interface graphique incorporant ces outils et permettant leurs utilisations de façon intuitive a été implémentée.

Des tests effectués sur les orthomosaïques des plantations de 2019 et 2020 ont permis de quantifier la précision de détection globale attendue pour les années futures. En effet, une précision globale de détection de 95,5 % a été mesurée. Les erreurs notées varient entre 10 % pour les terrains complexes et 0,5 % pour les terrains uniformes. Cette précision est satisfaisante pour la planification des opérations de reboisement, où une précision de 90 % est normalement tolérée puisque l'impact sur le nombre de plants à prévoir est faible.

Le développement de cette méthode de dénombrement de monticules de plantation constitue d'abord une preuve de concept intéressante démontrant la puissance des nouvelles avancées technologiques multidisciplinaires, soit l'imagerie acquise par drone et l'analyse des données grâce à l'intelligence artificielle. De plus, il s'agit d'un transfert technologique complet, fournissant une méthode et une interface graphique réutilisable et reproductible pour les opérations futures de Domtar.

3



#### 1. Introduction

Le partenaire du projet, Domtar, détient de nombreuses terres privées utilisées entre autres pour la plantation de peupliers hybrides. Ces derniers sont essentiellement dirigés vers les usines de transformation de Windsor afin de générer des produits de pâtes et papiers. Lors de la préparation des zones de plantation, Domtar utilise une technique élaborée par Éric Lapointe, ing. forestier chez Domtar [1]. Elle consiste à creuser un trou à l'aide d'une pelle mécanique, et de déplacer à proximité le matériel dégagé afin de créer un monticule où l'arbre sera planté [2]. Il pourra ainsi profiter d'un sol remanié et d'une cuvette humide à proximité pour faciliter sa croissance.

La planification du nombre de plants à commander est une étape importante puisque cela implique des centaines de milliers de plants par année, donc un coût non négligeable pour Domtar. La méthode actuellement employée est de délimiter, sur des orthomosaïques de drone, des petites zones de quelques m² et d'y dénombrer les monticules. Ensuite, une extrapolation est réalisée en fonction de la superficie totale des secteurs de plantation. Cela engendrait des écarts moyens entre 15 et 20 % par rapport au nombre de plants estimés et plantés. Une technique de dénombrement par intelligence artificielle a également été développée par l'Université TELUQ [3] sur ces orthomosaïques, visant à créer des zones d'intérêt et à classifier s'il s'agit d'un monticule grâce à un algorithme d'apprentissage profond. Cette technique a atteint une précision moyenne de 77 %, démontrant le potentiel de l'intelligence artificielle.

Des survols de drone sont en effet déjà une pratique utilisée par Domtar pour capter des images des secteurs à planter. Comme les images étaient déjà disponibles à une très haute résolution spatiale permettant de bien voir les monticules, le potentiel de développer une méthode performante automatisée de télédétection basée sur l'intelligence artificielle était manifeste.

#### 2. Objectifs

L'utilisation de l'intelligence artificielle, et en particulier l'apprentissage profond, en télédétection est une pratique de plus en plus reconnue. Une méthode reproductible utilisant les dernières avancées en vision par ordinateur a donc été développée, ayant trois objectifs principaux :

- 1. Développer un modèle de détection automatique de monticules de plantation;
- 2. Atteindre un taux de détection global supérieur à 90 %;

4

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc.

 Développer un outil intuitif, incluant une interface graphique, permettant de réutiliser la méthode développée, et permettant de fournir une précision reproductible dans le futur.

#### 3. Données utilisées

Cette section décrit les données fournies par Domtar et utilisées dans le projet. À noter que ces données peuvent être facilement acquises chaque année comme c'est actuellement le cas, permettant ainsi une reproductibilité complète de la méthode développée dans le but d'obtenir un dénombrement automatique des monticules.

# 3.1 Orthomosaïques RVB et modèle numérique de surface

Des images acquises par un modèle de drone DJI MAVIC 2 Pro ont été utilisées afin de générer, avec le logiciel Pix4D, deux types de données : une orthomosaïque rouge - vert - bleu (RVB) ainsi qu'un modèle numérique de surface (MNS). Dans ce projet, 18 orthomosaïques de 2019 et 38 de 2020 ont été fournies, couvrant différents secteurs des terres privées de Domtar en Estrie, montrées à la figure 1. À noter que les images de 2019 ont été acquises par drone à une hauteur de 120 mètres, tandis que les images de 2020 ont été acquises à une hauteur de 80 mètres et moins. Cette différence a un impact important sur la résolution spatiale, variant de 2,5 centimètres ou plus pour 2019 et de moins de 1 cm à 2,5 cm pour 2020.

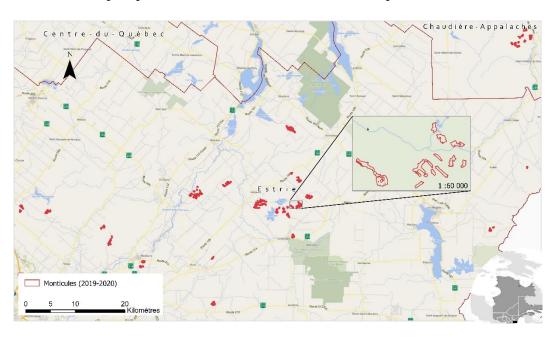


Figure 1 : Secteurs de plantation de monticules (en rouge) de 2019 et 2020.

CERFO
Centre d'enseignement et de recherch en foresterie de Sainte-Foy inc.

5

# 3.2 Délimitation des secteurs de plantation par photo-interprétation

Les secteurs de plantation ont été photo-interprétés, ce qui a permet de limiter les erreurs potentielles en dehors des plantations. Celle-ci a été réalisée par Domtar et comporte une couche géospatiale de polygones délimitant les contours des zones où il y a présence de monticules. Ces polygones ont été utilisés pour découper (*clip*) les prédictions faites sur les orthomosaïques.

#### 3.3 Données de validation

En ce qui concerne la validation de la méthode, deux données ont été fournies par Domtar :

- Reprojection d'une orthomosaïque de 2020, permettant d'évaluer l'effet de la projection des orthomosaïques générées;
- Nombre de peupliers plantés pour chacune des orthomosaïques de 2019 et 2020.
   Ce nombre d'arbres provient directement de la compagnie ayant fait le reboisement dans les monticules de plantation.

De plus, une campagne terrain a été organisée en juin 2021 par le CERFO afin de visiter plusieurs secteurs de plantation. Des points GNSS ont été collectés par deux étudiants du cégep Sainte-Foy avec des appareils *EOS Arrow* (précision < 1 m) afin d'identifier chaque monticule et d'y indiquer la présence de peuplier planté ou non. La figure 2 montre un exemple de points collectés par les étudiants. Cette campagne avait comme objectif principal de dénombrer précisément le nombre de monticules plantés et non plantés de certains secteurs afin de créer une valeur de référence. Cette valeur de référence a été utilisée pour déterminer l'erreur de plantation (nombre de monticules n'ayant pas été reboisés) et l'erreur de prédiction (différence entre la valeur de référence et le nombre de monticules prédits).

Finalement, cette valeur de référence sera utilisée, avec les images et les prédictions de l'algorithme, afin de récolter des statistiques sur les différentes conditions observables pouvant nuire à la performance de l'algorithme. Ces conditions sont la résolution spatiale de l'orthomosaïque, la présence d'ombre, la présence d'obstacle (roches, souches, etc.) et les bordures des terrains.

CERFO
Centre d'ensignement et de recherche

6

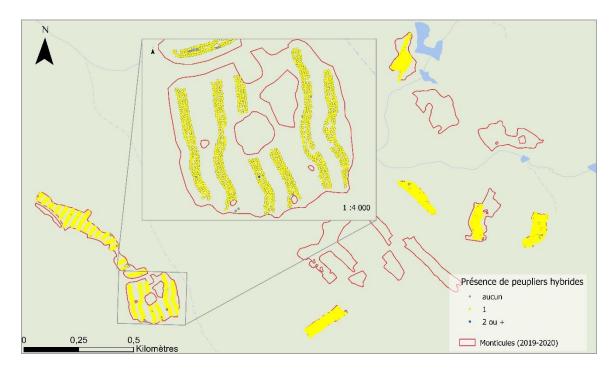


Figure 2 : Exemple d'extraction des points GNSS collectés par les étudiants lors de la validation terrain de juin 2021.

#### 4. Méthode

Cette section résumera les principales étapes du projet permettant la réalisation de l'algorithme de détection de monticules par apprentissage profond ainsi que la création de l'outil.

## 4.1 Création du jeu de données de référence

L'utilisation d'algorithmes d'apprentissage profond requiert une grande quantité de données pour être performante. Ainsi, un jeu de données a été manuellement annoté (numérisation ponctuelle) par trois étudiants du cégep Sainte-Foy et Marc-Antoine Genest du CERFO. Pour ce faire, des orthomosaïques construites à partir d'images acquises par drone, fournies par Domtar, ont d'abord été découpées en petites tuiles de 2048 par 2048 pixels. Près de 1000 tuiles, choisies pour couvrir l'éventail des conditions observables dans les différentes orthomosaïques, ont été annotées par photo-interprétation afin d'identifier chaque monticule présent sur la tuile, tel que montré à la figure 2.

CERFO
Centre d'ensignement et de recherche



Figure 3: Exemple d'une tuile de 2048 par 2048 pixels annotée. Chaque monticule est identifié par un point blanc sur l'orthomosaïque.

Ensuite, chaque tuile sélectionnée a été jumelée à son MNS correspondant et découpée en imagettes plus petites, qui seront fournies en entraînement à l'algorithme. Afin de faciliter l'apprentissage de ce dernier et d'augmenter la reproductibilité face aux différentes résolutions au sol des orthomosaïques, une stratégie visant à avoir un champ de vision équivalent pour chaque imagette a été employée lors du découpage des tuiles. En effet, des imagettes de plus grandes tailles étaient découpées lorsqu'une résolution au sol plus fine était observée, et de plus petites tailles pour des résolutions grossières. Ces imagettes ont finalement été échantillonnées de façon bilinéaire à une taille de 256 par 256 pixels, comme illustrées à la figure 4. Cette stratégie a permis de créer un peu plus de 12 000 imagettes, de champ de vision environ équivalent et où chaque monticule a environ le même nombre de pixels.

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en forestarie de Sainte-Fou inc.

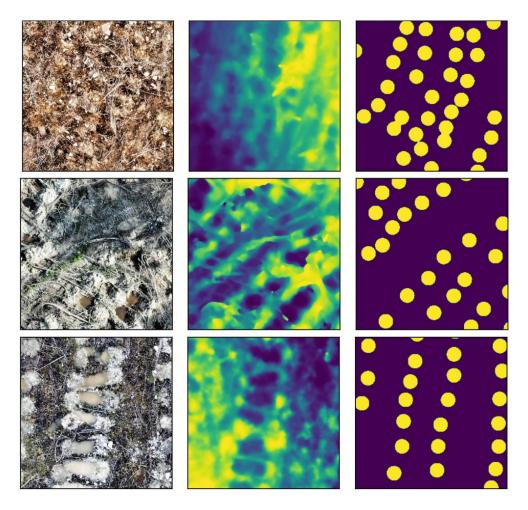


Figure 4: Trois exemples d'imagettes utilisées pour l'entraînement de l'algorithme d'apprentissage profond. Gauche : orthomosaïque, centre : modèle numérique de surface, droite : annotation.

#### 4.2 Prétraitement des données

Maintenant que le jeu de données est construit et suffisant, il est nécessaire de prétraiter les données afin de faciliter l'apprentissage de l'algorithme, ainsi que de remédier à certains problèmes dans les données.

En ce qui concerne l'orthomosaïque, les valeurs numériques des pixels varient entre 0 et 255 (8 bits). Cependant, les algorithmes d'apprentissage profond sont plus performants lorsque des données normalisées lui sont fournies [3] [4]. Les imagettes ont donc été normalisées en les divisant par la valeur maximale, soit 255, pour que les valeurs des pixels varient entre 0 et 1. Ensuite, il a été observé lors des premiers tests que l'algorithme était moins performant pour identifier les monticules dans les zones d'ombres. Afin de pallier ce problème, l'histogramme

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en forosterie de Sainte-Fov inc.

9

de l'intensité lumineuse de l'orthomosaïque a été uniformisé par un algorithme d'égalisation d'histogramme. Pour ce faire, l'orthomosaïque a été convertie dans l'espace de couleur HLS (*hue-lightness-saturation*). L'histogramme de l'intensité lumineuse (canal « L ») est égalisé, puis l'orthomosaïque est reconvertie dans l'espace de couleur RVB.

Pour ce qui est du MNS, les valeurs numériques doivent également être prétraitées afin d'obtenir une donnée entre 0 et 1. Cependant, le MNS est, à la différence de l'orthomosaïque, une mesure relative qui dépend de l'altitude du terrain. De plus, l'information pertinente contenue dans le MNS pour identifier les monticules n'est pas la valeur même du pixel, mais plutôt la différence avec la valeur de ses pixels voisins. Le MNS est donc normalisé une imagette à la fois (256 x 256 pixels), selon les valeurs minimale et maximale observées sur celle-ci.

# 4.3 Modélisation par apprentissage profond

L'algorithme choisi est un algorithme de segmentation sémantique, permettant d'attribuer une classe par pixel, soit une valeur de 1 si le pixel fait partie d'un monticule, ou 0 s'il y a absence de monticule. Le résultat de cette segmentation est une image de la même taille que l'imagette à prédire (voir la colonne droite de la figure 3), et est utilisé pour le dénombrement de monticules.

L'architecture utilisée (voir figure 4) pour l'algorithme est inspirée d'une des architectures les plus utilisées et performantes en termes de segmentation sémantique : le UNet [5]. Toutefois, afin de retirer un maximum d'informations de l'orthomosaïque et du MNS, une architecture novatrice a été développée. Celle-ci comporte deux encodeurs pour un seul décodeur, comparé au UNet original à un seul encodeur. Ainsi, l'orthomosaïque seule sera fournie à un premier encodeur, tandis que le deuxième n'aura en entrée que le MNS correspondant. Ces deux encodeurs traiteront leurs données respectives afin de créer des encodages propres à chaque donnée, qui ne seront fusionnés qu'au niveau de l'espace latent, avant le décodage. Par la suite, un décodeur se servira de l'encodage fusionné pour déterminer la présence de monticules sur l'orthomosaïque.

En plus du deuxième encodeur, d'autres ajouts ont été faits au Unet original. D'abord, un bloc *Squeeze and excite* [6] a été ajouté après chaque bloc de convolutions des encodeurs. Ces blocs permettent de mieux filtrer les informations trouvées par les convolutions, et ont démontré une augmentation importante de la performance, particulièrement au niveau des encodeurs.

10



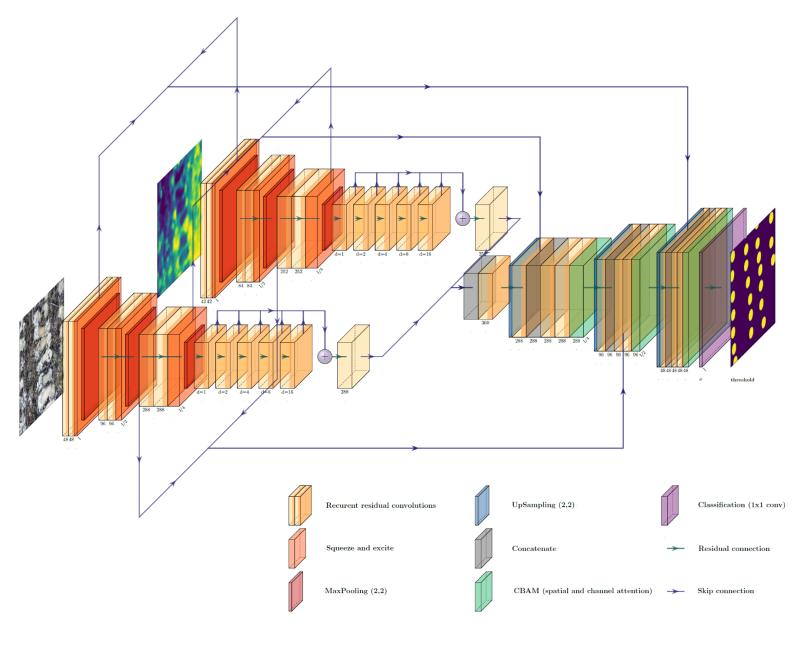


Figure 5 : Schéma de l'architecture utilisée pour la segmentation des monticules.



Ensuite, dans l'architecture originale, le champ de vision de l'algorithme est augmenté par des opérations de ré-échantillonnage (*MaxPooling*), diminuant la qualité des cartes de caractéristiques. Afin de garder une bonne résolution spatiale tout en augmentant le champ de vision, un bloc dense de convolutions avec différents ratios de dilatation [7] a été ajouté à partir du troisième *MaxPooling*. Ce remplacement permet de garder une résolution minimale raisonnable en ne divisant la taille de l'orthomosaïque que par huit, tout en allant chercher un champ de vision de 128 x 128 pixels sur une imagette de 256 x 256.

Finalement, un dernier changement a été fait au niveau du décodeur, afin d'augmenter l'analyse spatiale et spectrale de l'algorithme. En effet, des blocs *CBAM* [8] ont été ajoutés après chaque bloc de convolutions du décodeur. Ces blocs sont des modules « d'attention » qui ont, en quelque sorte, le rôle de pointer à l'algorithme où sont les informations importantes. Il y a deux principales façons de pointer une information : premièrement, il peut s'agir d'un canal de l'orthomosaïque, par exemple une couleur, appelée « attention spectrale ». Deuxièmement, il peut s'agir d'une forme particulière sur l'orthomosaïque, appeler « attention spatiale ». Le module *CBAM* est donc constitué des deux types d'attention, un à la suite de l'autre, permettant à l'algorithme de bien assimiler les différentes informations provenant de l'orthomosaïque et du MNS.

#### 4.4 Entraînement de l'algorithme

Pour la modélisation, le jeu de données de référence a été séparé par secteur, à un ratio d'environ 80 % - 10 % - 10 % pour l'entraînement, les tests et la validation, respectivement. Cela a permis de s'assurer que l'algorithme n'ait jamais vu d'imagettes des secteurs de test et validation lors de l'entraînement. L'algorithme final a été entraîné sur une carte graphique RTX3090, avec tensorflow 2.4.0, python 3.8.6, CUDA 11.1, et avec les hyperparamètres décrits au tableau 1.

Des fonctions d'augmentation de données ont également été utilisées afin d'augmenter la taille du jeu de données et ainsi permettre d'augmenter la performance et la généralisation de l'algorithme.

D'abord, les fonctions de transformations spatiales suivantes ont été utilisées :

- Rotations 90, 180 et 270 °;
- Flip vertical et horizontal.

CERFO
Centre d'ensignement et de recherche en forestraire de Sainte-Foy inc.

12

Ensuite, les transformations spectrales suivantes ont permis d'augmenter la robustesse dans l'ombre et la généralisation pour les différentes saisons d'acquisition et couleurs observables :

- Masque d'ombre sur l'orthomosaïque ;
- Ajout de bruit gaussien par canal de couleur ;
- Échange aléatoire de canaux de couleur.

Finalement, les fonctions d'augmentation suivantes ont permis à l'algorithme de mieux généraliser les différences de résolution spatiale dans les orthomosaïques :

- Ré-échantillonnage aléatoire de la résolution bilinéaire ;
- Crop aléatoire et ré-échantillonnage.

Tableau 1 : Liste des hyperparamètres pour l'entraînement de l'algorithme.

| Nom du paramètre | Description                                     | Valeur              |
|------------------|---|---------------------|
| batch_size       | Nombre d'imagettes que l'algorithme voit en     | 8                   |
|                  | même temps pour l'optimisation.                 |                     |
| n_epoch          | Nombre de fois que le modèle voit l'ensemble    | 120                 |
|                  | du jeu d'entraînement.                          |                     |
| n_filtres_rgb    | Nombre de filtres de convolutions pour les      | 48 – 96 – 288 – 288 |
|                  | quatre niveaux de convolutions de l'encodeur    |                     |
|                  | de l'imagette RVB.                              |                     |
| n_filtres_dsm    | Nombre de filtres de convolutions pour les      | 42 - 84 - 252 - 252 |
|                  | quatre niveaux de convolutions de l'encodeur    |                     |
|                  | du MNS.   |                     |
| activation       | Fonction d'activation utilisée pour tous les    | Swish [9]           |
|                  | blocs à l'exception des blocs d'attention.      |                     |
| activation de    | Fonction utilisée pour la classification finale | Sigmoïde            |
| classification   | des monticules (dernière couche du modèle)      |                     |
| optimizer        | Stratégie d'optimisation de l'algorithme lors   | Ranger [10]         |
|                  | de la descente de gradient.                     |                     |
| loss             | Fonction de perte pour le calcul de l'erreur et | Dice loss + focal   |
|                  | l'optimisation de l'algorithme.                 | loss + IoU loss     |

13



#### 4.5 Dénombrement des monticules

Le résultat de la segmentation sémantique réalisée par l'algorithme est un raster de probabilités, donnant une probabilité par pixel de l'orthomosaïque selon qu'il appartienne à un monticule. Plus il a de chance de faire partie d'un monticule, plus la valeur tendra vers 1, tandis qu'elle tendra vers 0 à l'inverse. Afin d'obtenir une classification binaire finale, une valeur seuil de 0.5 a été appliquée, mettant à 1 toutes les valeurs supérieures ou égales au seuil, et à 0 les autres. Le raster résultant est un masque des monticules sur le terrain, où chaque monticule est masqué par un rond de pixel de valeur égale à 1. La figure 5 montre une orthomosaïque, sa prédiction et le dénombrement de monticules par objets.

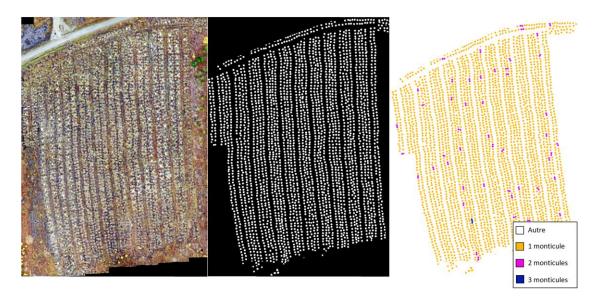


Figure 6: Exemple de l'orthomosaïque du secteur Dorset 56 bloc 2 (gauche), du raster de classification binaire (centre) et du raster de nombre de monticules par objet (droite).

Afin de déterminer le nombre de monticules sur un secteur, les ronds blancs du masque issu de la prédiction ont été séparés en différents objets. La première étape est réalisée par un algorithme de composants connectés (connectedComponents de OpenCV [11]). Cependant, un problème survient lorsque deux ronds blancs (ou plus) de monticules se superposent pour ne créer qu'un seul objet. Toutefois, le prétraitement des orthomosaïques lors de la création du jeu de données permettait de garder le nombre de pixels fixes par monticule. Ainsi, en divisant l'aire d'un objet par le nombre de pixels d'un monticule, il est possible de retrouver le nombre de monticules dans un objet. Le dénombrement des monticules sur un secteur peut finalement se faire en additionnant le nombre de monticules par objet, et ce pour chaque objet détecté sur l'orthomosaïque.

14

#### 4.6 Validation

La validation de l'algorithme a été faite en cinq principales étapes :

- 1) Validation théorique de l'apprentissage : cette validation consiste à comparer quantitativement l'erreur d'entraînement d'un algorithme à l'erreur qu'il commet sur des imagettes qu'il n'a jamais vues. La différence entre ces deux erreurs doit être aussi faible que possible, indiquant une bonne généralisation du problème à résoudre.
- 2) Mesure de la précision sur la plantation de 2019 : les mosaïques de 2019 ont été utilisées pour tester l'application du modèle sur un grand territoire et d'en tirer une erreur précise pour une année complète de validation.
- 3) Mesure de la précision sur la plantation de 2020 : les dénombrements de 2020 et les points GPS récoltés sur le terrain ont été utilisés afin de déterminer quantitativement l'erreur attendue pour 2020 et les années futures. Pour ce faire, la différence entre le nombre de monticules et le nombre d'arbres a d'abord permis de déterminer l'erreur de plantation. Ensuite, les points GPS ont été exportés dans une couche géospatiales et comparés aux prédictions de l'algorithme, permettant de calculer l'erreur de prédiction. Par la suite, il a été possible de déterminer qualitativement les causes d'erreurs pouvant nuire aux performances de l'algorithme par une comparaison visuelle des points GPS et des prédictions de l'algorithme. Finalement, une erreur globale a pu être déterminée en comparant les prédictions pour l'ensemble des orthomosaïques et le nombre d'arbres reboisés sur ces terrains.
- 4) Étude de l'effet de la résolution spatiale : les orthomosaïques de différentes résolutions de 2020 sont comparées entre elles afin de déterminer s'il y a une différence de performance entre les orthomosaïques à très haute résolution (< 1,5 cm) et celles à moyenne résolution (entre 1,5 et 2,5 cm). De plus, les orthomosaïques de 2019 sont également comparées pour déterminer l'effet d'une basse résolution (> 2,5 cm).
- 5) Étude de l'effet de la projection : les orthomosaïques de différentes projections de 2020 sont comparées entre-elles pour déterminer l'effet des projections (déformations). De plus, une mosaïque reprojetée servira de test pour mesurer l'effet du calcul d'une reprojection sur une mosaïque.

CERFO

Centre d'enseignement et de recherche en forcetario de Salona Fou lor.

15

# 4.7 Création de l'outil et implémentation de l'interface graphique

Afin de s'assurer de la reproductibilité de la méthode et de faciliter son utilisation ainsi que le transfert technologique, une application constituée d'une interface graphique et de tous les scripts nécessaires au fonctionnement de la méthode a été implémentée.

Cette application est programmée grâce à la bibliothèque *Kivy 2.0.0* sous *Python 2.8.1*, et est compilée avec les bibliothèques nécessaires aux différents traitements. Le but est de simplifier le dénombrement de monticules, nécessitant uniquement les chemins d'accès des orthomosaïques et MNS préalablement générées à indiquer dans l'application afin d'obtenir les dénombrements voulus. Un guide d'utilisation de cette application se trouve en annexe.

À noter que la bibliothèque *Kivy* offre des perspectives intéressantes pour le futur. En effet, le projet présent vise l'implémentation d'une interface graphique sur un ordinateur permettant de réutiliser facilement et de façon reproductible la méthode développée. Cependant, *Kivy* offre également le potentiel de transférer l'application sur une tablette ou un téléphone, via un outil disponible sur *Play Store*.

#### 5. Résultats et discussion

Cette section présente les différents tests permettant de quantifier la performance de l'algorithme. Le détail des tests, les résultats ainsi que leurs analyses sont présentés dans les sous-sections suivantes.

# 5.1 Résultats de l'apprentissage

Lors de l'entraînement, une validation est faite après chaque étape, permettant de faire un suivi de l'apprentissage de l'algorithme, illustré à la figure 6. Cette figure permet d'abord de montrer que l'apprentissage a permis d'atteindre un score de validation d'environ 80 %. Il est cependant à noter qu'il s'agit du F1 score de la segmentation sémantique, c'est-à-dire la classification de chacun des pixels de l'orthomosaïque.

Ensuite, on peut observer qu'il n'y a pas eu de sur-apprentissage important, normalement marqué par une grande différence entre le score d'entraînement et celui de validation, ou encore par une baisse majeure de la performance au milieu de l'entraînement. Il est cependant possible d'observer une légère augmentation de la fonction de perte ainsi qu'une petite diminution du score entre le 40° et le 60° cycle. Il s'agit du comportement typique d'un sur-apprentissage, très

CERFO
Centre d'environment et de recherche

16

faible dans le cas présent. L'algorithme retenu sera celui enregistré au cycle 43 afin de s'assurer d'une meilleure généralisation.

Finalement, on observe une convergence rapide et constante vers une solution finale, démontrant une stabilité de l'algorithme et des hyperparamètres. Ceci indique généralement qu'une bonne généralisation a été atteinte et que les résultats de l'algorithme semblent satisfaisants et reproductibles.

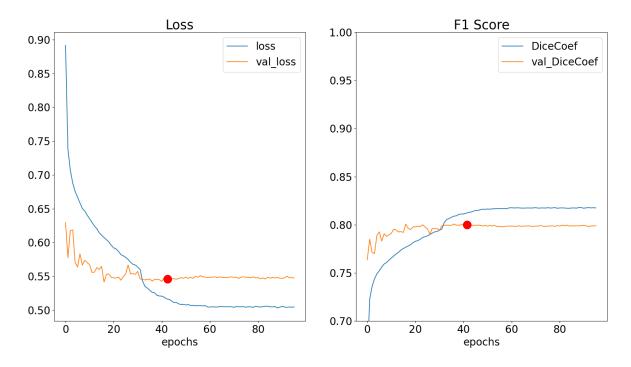


Figure 7: Statistiques de l'entraînement de modèle de segmentation par apprentissage. Le point rouge indique le moment où l'algorithme final a été retenu.

# 5.2 Validation sur les orthomosaïques de 2019

La première validation a été effectuée sur les orthomosaïques de 2019. Ces secteurs ayant été reboisés en 2020, le nombre d'arbres plantés par terrain était disponible à des fins de comparaisons avec les prédictions de l'algorithme. Bien que certaines mosaïques de 2019 aient été utilisées pour l'entraînement de l'algorithme, seules 5 % des orthomosaïques ont été utilisées à cette fin, laissant donc la majorité de celles-ci encore inconnues pour l'algorithme. Le tableau 2 récapitule les résultats des tests.

Le premier élément à noter est que l'algorithme produit, en général, de l'omission. En effet, la majorité des erreurs sont négatives, indiquant qu'il omet des monticules dans la zone de

CERFO
Centre d'enseignement et de recherch en foresterie de Sainte-Foy inc.

17

prédictions. Ce n'est cependant pas étonnant, étant donné la faible précision du découpage de l'orthomosaïque avec le contour des secteurs de plantation photo-interprété. Les secteurs étant assez denses en monticules, peu de commissions sont possibles, alors que plusieurs cas difficiles provoquent des erreurs d'omission. Les erreurs positives importantes sont, entre autres, causées par des monticules n'ayant pas été reboisés par choix des reboiseurs.

Tableau 2: Comptabilisation des monticules des mosaïques de 2019.

| Nom du secteur                       | Nombre de<br>monticules reboisés | Nombre de<br>monticules prédits<br>par l'algorithme | Erreur [%] |  |  |
|--------------------------------------|----------------------------------|---|------------|--|--|
| 2019-10-29-MAGILL_ch_47_zone1        | 1400                             | 1700  | +21,4      |  |  |
| 2019-10-29-MAGILL_ch_47_zone2        | 4750                             | 4435  | -6,6       |  |  |
| 2019-10-29-MAGILL_ch_47zone3         | 8600                             | 8166  | -5,1       |  |  |
| 2019-10-29-MAGILL_ch_47_zone4        | 12350                            | 12200   | -1,2       |  |  |
| 2019-10-29-MAGILL_ch_47_zone5        | 6150                             | 5866  | -4,6       |  |  |
| 20190906_DUDSWELL_ch_121_zone1       | 16450                            | 12356   | -24,9      |  |  |
| 20190906_DUDSWELL_ch_121_zone3       | 3750                             | 3484  | -7,1       |  |  |
| 20190906_DUDSWELL_ch_121_ZONE4       | 1450                             | 1299  | -10,4      |  |  |
| 20190906_DUDSWELL_ch_121zone5        | 1350                             | 1088  | -19,4      |  |  |
| 20191010-BURY_ch67                   | 6500                             | 5842  | -10,1      |  |  |
| 20191010-WESTBURY_Z1                 | 3750                             | 3526  | -6,0       |  |  |
| 20191014-WESTBURY_Z2                 | 2050                             | 2107  | -2,8       |  |  |
| 2020-04-24_westburymonticules_100m   | 14800                            | 12383   | +16,3      |  |  |
| 20191014_USINE_Zone_1                | 7150                             | 6595  | -7,8       |  |  |
| 2019-10-14-USINE_Zone_2              | 8900                             | 8704  | -2,2       |  |  |
| 20191015-STOKE_zone1                 | 2300                             | 2115  | -8,0       |  |  |
| 20191015-STOKE_zone2                 | 6600                             | 6138  | -7,0       |  |  |
| 20191015-STOKE_zone3                 | 13100                            | 13564   | +3,5       |  |  |
| Moyenne des erreurs (valeur absolue) |                                  |   |            |  |  |

Ensuite, il est important de noter que les mosaïques de 2019 ont été générées avec un drone prenant des images à une hauteur de vol de 120 mètres. Cependant, la majorité des orthomosaïques d'entraînement ont été prises en 2020 à une hauteur de vol généralement de



80 mètres. Cette différence de hauteur diminue la résolution au sol des orthomosaïques de 2019, et leur plus faible proportion (5 %) dans le jeu de données rend l'algorithme moins performant à cette résolution. Ceci amplifie les erreurs d'omissions, principalement causées par une sous-estimation du nombre de monticules.

Finalement, malgré ces principales erreurs, l'algorithme atteint une performance moyenne de 90,9 % des monticules de détectés, ce qui s'approche de la performance visée et est prometteur pour les tests de 2020.

# 5.3 Validation sur les orthomosaïques de 2020

La campagne terrain de juin 2021 a permis de calculer les erreurs de plantation et de prédiction des monticules, et de les comparer aux erreurs attendues provenant du dénombrement de 2020 (tableau 3). Les résultats de l'ensemble des prédictions de 2020 ont également été comparés avec les données sur le nombre d'arbres plantés par terrain, présentés au tableau 4.

Tableau 3 : Résultats de la validation terrain de juin 2021. Les erreurs supérieures à 10 % sont en rouge.

| Nom du secteur       | Nombre de<br>monticules<br>validés | Nombre<br>de<br>monticules<br>prédits | Nombre<br>d'arbres<br>plantés | Erreur de plantation [%] | Erreur de prédiction [%] |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ditton partie 1      | 2116                               | 2097                                  | 1976                          | 6,6                      | 0,9                      |
| Frontenac 255 bloc 3 | 643                                | 668                                   | 634                           | 1,4                      | -3,9                     |
| Frontenac 277        | 604                                | 602                                   | 589                           | 2,5                      | 0,3                      |
| Magill bloc 1        | 668                                | 647                                   | 659                           | 1,3                      | 3,1                      |
| Magill bloc 4        | 539                                | 534                                   | 534                           | 0,9                      | 0,9                      |
| Magill bloc 5        | 763                                | 678                                   | 738                           | 3,3                      | 11,1                     |
| Magill bloc 6        | 641                                | 641                                   | 632                           | 1,4                      | 4,2                      |
| Magill bloc 8        | 794                                | 721                                   | 790                           | 0,5                      | 9,2                      |
| Magill bloc 9        | 2544                               | 5468                                  | 2504                          | 1,6                      | 3,0                      |
| Scotstown            | 2764                               | 2845                                  | 2694                          | 2,5                      | -2,9                     |
| Watopeka partie 50 m | 1498                               | 1492                                  | 1303                          | 13,0                     | 0,4                      |
| Watopeka partie 80 m | 812                                | 817                                   | 755                           | 7,0                      | -0,6                     |
|                      | 3,5                                | 3,4                                   |                               |                          |                          |

19



D'abord, en ce qui concerne l'erreur de plantation, il est possible d'observer une erreur moyenne de 3,5 % (tableau 3). Cependant, cette erreur est biaisée par des valeurs extrêmes provenant, entre autres, de terrains n'ayant pas été reboisés au complet volontairement. En enlevant ces valeurs extrêmes, il est possible de s'attendre à une erreur de plantation d'environ 2,5 %. À noter que cette erreur est une erreur d'omission, allant dans le même sens que l'omission de l'algorithme.

Tableau 4 : Résultats de prédictions pour l'ensemble des plantations de 2021. Les champs grisés n'ont pas été pris en compte pour la précision globale, car l'orthomosaïque ne couvrait pas l'entièreté du terrain à prédire. Les erreurs supérieures à 10 % sont en rouge.

| Nom du secteur                        | Nb de<br>monticules<br>prédits | Nb de<br>monticules<br>reboisés | Diff. | Erreur<br>attendue<br>[%] | Impact<br>d'une<br>poche de<br>50 arbres<br>[%] |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------|---------------------------|---|
| 2020-08-20 - Dorset bloc 1 80m        | 7001                           | 7517                            | 516   | 7,4%                      | 0,7%  |
| 2020-08-20 - Dorset bloc 2 80m        | 4317                           | 4250                            | -67   | -1,6%                     | 1,2%  |
| Stornoway 80m bloc 1 et 2             | 20501                          | 22750                           | 2249  | 11,0%                     | 0,2%  |
| Stornoway 80m Bloc 3                  | 6588                           | 8450                            | 1862  | 28,3%                     | 0,8%  |
| Ditton partie 1 80m 30-10-2020        | 29120                          | 31500                           | 2380  | 8,2%                      | 0,2%  |
| Ditton partie 2 80m 30-10-2020        | 8924                           | 8700                            | -224  | -2,5%                     | 0,6%  |
| Dorset 56 bloc 1 80m 22-10-2020       | 6600                           | 6750                            | 150   | 2,3%                      | 0,8%  |
| Dorset 56 bloc 2 80m 22-10-2020       | 3156                           | 3950                            | 794   | 25,2%                     | 1,6%  |
| Dorset 56 bloc 5 22-10-2020           | 6024                           | 6400                            | 376   | 6,2%                      | 0,8%  |
| Dorset 56-3 80m 13-11-2020            | 10998                          | 11450                           | 452   | 4,1%                      | 0,5%  |
| Dorset 56-4 80m 13-11-2020            | 7185                           | 7150                            | -35   | -0,5%                     | 0,7%  |
| Dorset 60 80m 22-10-2020              | 23549                          | 25450                           | 1901  | 8,1%                      | 0,2%  |
| Dorset 60 B-1 80m 22-10-2020          | 6284                           | 6847                            | 563   | 9,0%                      | 0,8%  |
| Dorset 60 B-2 80m 22-10-2020          | 8541                           | 8600                            | 59    | 0,7%                      | 0,6%  |
| Frontenac_255_monticules blocs 1 et 2 | 7553                           | 7400                            | -153  | -2,0%                     | 0,7%  |
| Frontenac_255_monticules blocs 3 100m | 1792                           | 1750                            | -42   | -2,3%                     | 2,8%  |
| Frontenac_277_monticules 50m          | 3592                           | 3557                            | -35   | -1,0%                     | 1,4%  |
| Island Brook 80m 6 aout 2020          | 30135                          | 30200                           | 65    | 0,2%                      | 0,2%  |
| Magill 80m bloc 1 13-08-2020          | 1132                           | 1300                            | 168   | 14,8%                     | 4,4%  |

20



| Magill bloc 10 80m 03-09-2020       | 2593   | 2650   | 57      | 2,2%  | 1,9% |
|-------------------------------------|--------|--------|---------|-------|------|
| Magill bloc 11 80m 03-09-2020       | 4626   | 4900   | 274     | 5,9%  | 1,1% |
| Magill bloc 12 80m 03-09-2020       | 5198   | 5150   | -48     | -0,9% | 1,0% |
| Magill bloc 13 80m 03-09-2020       | 9596   | 10550  | 954     | 9,9%  | 0,5% |
| Magill bloc 14 80m 03 et 28-09-2020 | 2740   | 2950   | 210     | 7,7%  | 1,8% |
| Magill bloc 15 80m 28-09-2020       | 2280   | 2350   | 70      | 3,1%  | 2,2% |
| Magill bloc 16 80m                  | 5125   | 5250   | 125     | 2,4%  | 1,0% |
| Magill bloc 2 80m 03-09-2020        | 1786   | 1800   | 14      | 0,8%  | 2,8% |
| Magill bloc 3 80m 13-08-2020        | 1667   | 1700   | 33      | 2,0%  | 3,0% |
| Magill bloc 4 80m 13-08-2020        | 1205   | 1250   | 45      | 3,7%  | 4,1% |
| Magill bloc 5 80m 03-09-2020        | 672    | 750    | 78      | 11,6% | 7,4% |
| Magill bloc 6 80m 03-09-2020        | 614    | 650    | 36      | 5,9%  | 8,1% |
| Magill bloc 7 80m 03-09-2020        | 5419   | 5750   | 331     | 6,1%  | 0,9% |
| Magill bloc 8 80m 03-09-2020        | 718    | 800    | 82      | 11,4% | 7,0% |
| Total général                       | 274906 | 287971 | -13 065 | -4,5% | -    |

Ensuite, pour ce qui est de l'erreur de prédiction, une erreur moyenne de 3,4 % a été mesurée lors de la validation terrain (tableau 3) et de 4,5 % pour l'ensemble des terrains reboisés en 2021, avec une erreur maximale de 14,8 % (tableau 4). La variabilité des secteurs validés a permis d'isoler les principales causes de ces erreurs :

• Les bordures des parcelles. Cette erreur peut être expliquée par deux phénomènes. Premièrement, les terrains étant généralement grands, la proportion d'imagettes montrant une bordure de terrain est plus faible que la celle montrant un centre de terrain. Ainsi, le jeu de données est déséquilibré en termes de bordures de parcelles, causant un plus faible apprentissage en bordure et donc une baisse de performance. Deuxièmement, les bordures de parcelles sont souvent irrégulières, n'ayant pas toujours quatre monticules de larges, étant parfois à l'ombre ou possédant d'autres irrégularités. Ces caractéristiques sont également moins représentées dans le jeu de données et rendent les monticules plus difficiles à détecter, expliquant encore une fois les omissions plus fréquentes à ces endroits.



- <u>L'ombre</u>. Bien que des mesures de prétraitement aient permis d'augmenter la détection des monticules dans l'ombre, des limites persistent. En effet, les endroits très ombragés montrent très peu de détails sur les monticules, rendant la détection difficile à partir de l'orthomosaïque. De plus, puisque l'ombre est généralement en bordure des arbres et que les MNS générés sont moins précis en bordure et aux transitions des arbres et sols, la détection grâce au MNS est également plus difficile, causant d'avantages d'erreurs d'omission.
- <u>Les terrains irréguliers</u>. Tous les endroits qui ne sont pas réguliers, c'est-à-dire avec quatre monticules de large et absence de débris, sont composés d'irrégularités ayant une faible représentation dans le jeu de données. La performance de détection en est donc réduite.
- Les monticules à albédo élevé. Ces erreurs semblent être une confusion entre les monticules gris apparaissant très clairs sur l'orthomosaïque et les roches réfléchissant beaucoup de lumière. Cette confusion crée des erreurs d'omission à certains endroits sur les parcelles. Il est à noter que ces erreurs sont principalement causées par un moins bon apprentissage sur des particularités moins fréquentes dans les secteurs. Il suffirait de trouver et d'identifier des secteurs ayant ces particularités en grand nombre et de les ajouter au jeu de données initial afin d'augmenter la performance de l'algorithme.

Finalement, il est possible de comparer l'erreur de prédiction avec l'erreur attendue, soit le nombre d'arbres plantés sur les secteurs de 2020 déclarés par les reboiseurs de 2021. En général, l'erreur de prédiction (tableau 3 : 3,4 %) est similaire à l'erreur attendue (tableau 4 : 4,5 %). Cependant, dans certains cas comme Magill bloc 1, on retrouve une grande différence (3,1% vs 14,8 %). Cette différence est expliquée par le fait que la validation terrain était une validation partielle et ne comptabilisait pas toutes les erreurs du terrain. Dans le cas de Magill bloc 1, seules des rangées centrales ont été validées, alors qu'une majorité des erreurs d'omission se trouvaient en bordure du terrain. Le reste de la différence entre l'erreur de prédiction et attendue est en fait l'erreur de perte ou erreur humaine, causée par des plants comptabilisés, mais non reboisés. Cette erreur est estimée entre 3 et 4 %.

En conclusion, une erreur moyenne de **4,5** % est attendue lors de l'utilisation de l'algorithme pour le dénombrement des monticules. Cette erreur peut varier selon le type de terrain analyser. Une erreur plus grande, autour de 10 % peut être observée pour les petits terrains ayant plus 22

**CERFO** 

d'omissions en bordure, et une erreur plus faible est attendue pour les grands terrains plus uniformes. Deux autres erreurs ont pu être estimées grâce aux résultats, soit une erreur de plantation (monticules présents n'ayant pas été reboisés) estimée à **2,5** %, et l'erreur de perte ou humaine (arbres dénombrés lors du reboisement, mais n'ayant pas été plantés) d'environ 3 %.

# 5.4 Comparaison des résolutions spatiales

Afin de comparer l'effet de la hauteur de vol, et donc de la résolution, les orthomosaïques ont été séparées en trois groupes :

- 1. <u>Faible résolution</u>: Les orthomosaïques de 2019, ayant été acquise à une hauteur de vol de 120 mètres, et donnant généralement des orthomosaïques à 3 cm ou plus de résolution au sol.
- 2. <u>Moyenne résolution</u>: Les orthomosaïques de 2020 ayant été acquises à une hauteur de 80 mètres obtiennent une résolution au sol entre 2,5 et 1,5 cm.
- 3. <u>Haute résolution</u>: Les mosaïques de 2020 ayant été acquises à une hauteur de 50 mètres obtiennent une résolution au sol plus petite ou égale à 1,2 cm.

Toutefois, le deuxième groupe (moyenne résolution) est largement surreprésenté, constituant plus de 70 % du jeu de données. Les résultats attendus sont donc une augmentation de l'erreur pour les orthomosaïques à faible et hautes résolutions spatiales, étant donné un surapprentissage pour les orthomosaïques à moyenne résolution.

En ce qui concerne la faible résolution spatiale, des erreurs de commission commencent à être observées à partir d'une résolution de 2,5 cm. En effet, des trous, des roches ou autres objets ronds pouvant ressembler à un monticule sont confondus, augmentant la quantité de faux positifs dans la détection. Ensuite, un autre problème survient à une hauteur de vol de 120 mètres. À cette hauteur, la résolution spatiale devient très faible comparée aux orthomosaïques de 2020, et l'orthomosaïque doit être prétraitée avant d'être prédite. Le prétraitement choisi consiste en une interpolation intermédiaire entre la résolution spatiale de l'orthomosaïque et la résolution optimale, afin de ne pas trop détériorer l'orthomosaïque par une forte interpolation. Les prédictions sont donc faites à faible résolution, diminuant le nombre de pixels attendus par monticule. Cependant, puisque l'algorithme prédit des ronds de taille fixe, les monticules prédits ont souvent une superposition élevée, causant des erreurs d'omissions par l'algorithme de dénombrement.

23



Pour ce qui est de la haute résolution spatiale, un problème similaire fait que les ronds prédits ne couvrent pas toujours l'entièreté du monticule. Ainsi, lors de la classification par l'algorithme, les monticules incomplets peuvent être classés comme n'étant pas un monticule, causant des erreurs d'omission.

#### 5.5 Effet de la projection

Afin de tester la projection, deux tests ont été faits :

- 1. Comparer deux orthomosaïques générées avec des projections différentes;
- Comparer une orthomosaïque et sa reprojection dans un autre système de coordonnées.

Pour ce qui est du premier test, aucune différence n'a été notée pour les orthomosaïques ayant différentes projections. Un problème peut toutefois survenir lors du découpage de la prédiction avec le contour photo-interprété. Si ces deux données ne sont pas dans le même système, un décalage peut avoir lieu et couper une partie des prédictions importantes pour le dénombrement du terrain.

Par contre, pour le deuxième test, une augmentation de l'erreur a été remarquée pour l'orthomosaïque ayant été reprojetée. En effet, l'équation permettant de projeter une orthomosaïque interpole la nouvelle projection de façon à dénaturer l'orthomosaïque originale, causant des déformations. Puisque l'algorithme n'a vu aucune de ces orthomosaïques reprojetée lors de son entraînement, sa précision de détection en est diminuée.

#### 6 Conclusion

#### 6.1 Résumé des résultats

Les tests ont d'abord démontré la fiabilité de l'algorithme de détection de monticules, ayant moins de 10 % d'erreurs sur la majorité des mosaïques de 2019 et de 2020, et atteignant une précision globale de près de 95,5 %. La précision atteinte est suffisante pour la majorité des opérations de reboisements effectués par Domtar, et démontre le potentiel d'utilisation de l'algorithme au niveau de la production.

Les résultats et la validation ont permis d'identifier les principales erreurs de l'algorithme, nécessitant une vérification suite à la prédiction de l'algorithme. Notamment, les parties ombragées, les terrains irréguliers, l'albédo élevé d'un monticule, une modification de la résolution spatiale ou encore une reprojection des données sont des causes d'erreurs pouvant 24



provoquer de l'omission. Ces facteurs sont donc à considérer lors de l'analyse des prédictions, et pourraient nécessiter un comptage manuel à certains endroits pour s'assurer de la précision de la détection.

La dernière source d'erreur importante est l'omission en bordure des terrains. Bien que les grands terrains soient moins affectés par cette erreur puisque le grand nombre de monticules au centre du terrain rend négligeable le nombre de monticules en bordure (et donc son erreur), les petits terrains de 1500 monticules et moins perdent significativement en précision. Par exemple, certains petits blocs de Magill, comptant parfois moins de 1000 monticules, ont été prédits avec des précisions parfois inférieures à 90 %, plus bas que la précision attendue de l'algorithme.

## 6.2 Recommandations pour l'utilisation de la méthode

L'algorithme étant sensible aux différences qu'il peut y avoir entre les données utilisées pour son entraînement et celles utilisées pour faire les prédictions, il est primordial de garder une méthode de prise de données reproductible et uniforme. Afin d'obtenir la meilleure précision possible, il est donc recommandé de suivre les conseils suivants :

- <u>Heure de la journée</u> : plusieurs erreurs d'omissions ont été observées dans les parties ombragées, un vol en milieu de journée est idéal afin de diminuer l'impact de l'ombre au sol faite par les arbres.
- Angle du capteur: Le drone utilisé a un système de stabilisation permettant de garder le capteur orienté au nadir. Avoir ce paramètre est important pour la génération d'orthomosaïques de qualité. La prise d'images non centrée sur le nadir (p.ex. un capteur non stabilisé) peut causer des artefacts sur l'orthomosaïque qui réduiront la précision de détection de l'algorithme. Par contre, un vol au nadir a comme conséquence de surexposé le capteur lorsque le soleil est au zénith. Malgré les erreurs causées par le fort albédo de certains terrains (p.ex. les roches), le nombre de monticules omis sur un terrain ombragé est plus grand que le nombre de monticules omis par une surexposition du capteur. Il est donc conseillé de conserver les vols en milieu de journée.
- <u>Hauteur de vol et résolution spatiale</u>: l'algorithme a été entraîné majoritairement avec des orthomosaïques prises à une hauteur de 80 mètres, il est conseillé de voler à une altitude permettant d'avoir une résolution spatiale entre 1,5 et 2 cm. De plus, il est

CERFO
Centre d'enseignement et de recherch
en forestarie de Sainte-Fox inc.

25

recommandé d'utiliser le meilleur MNT disponible (p.ex. lidar) lors de la planification du vol de drone afin d'obtenir une élévation stable pendant l'acquisition et donc d'uniformiser la résolution au sol.

- <u>Projection</u>: la projection ne semble pas affecter la précision de l'algorithme si la mosaïque n'est pas reprojetée par la suite. Par contre, seules les projections NAD\_1983\_MTM\_7, WGS\_1984\_UTM\_Zone\_19N et GCS\_WGS\_1984 ont été testées, et toutes autres projections sont susceptibles à une baisse de précision.
- <u>Validation</u>: la plupart des causes d'erreurs étant connues, il est conseillé de faire une validation visuelle de la prédiction afin de s'assurer d'avoir une bonne précision dans les zones susceptibles d'avoir des erreurs. De plus, une validation en bordure pour les plus petits terrains peut être nécessaire pour obtenir une précision satisfaisante.

De façon générale, il est donc conseiller de générer les données et de les utiliser de la même façon qu'elles l'ont été en 2020 afin d'avoir la méthode la plus reproductible possible. L'application de ces conseils pour la prise de données et la validation devrait permettre d'obtenir une précision globale de 95,5 %. Cette précision devrait également augmenter pour les secteurs uniformes et ayant une grande superficie.

À noter que ces recommandations sont basées sur les validations faites avec les orthomosaïques de 2019 et 2020, et avec un seul drone. Un changement de drone ou de caméra aurait un impact en fonction de la hauteur ainsi que sur les caractéristiques des images captées. Les recommandations pourraient donc ne pas s'appliquer, et une validation sur ce nouvel appareil de mesure serait nécessaire.

#### 6.3 Pistes d'amélioration

La première piste d'amélioration, et probablement la plus simple et connue dans le domaine de l'intelligence artificielle, serait d'augmenter le nombre de données de référence. Ceci dit, ayant déjà un algorithme performant en main, il serait possible de récolter des données stratégiques pour améliorer l'algorithme là où la précision est plus faible. En effet, comme observé lors de l'analyse des résultats, les principales causes d'erreurs sont l'irrégularité du terrain et des bordures, l'ombre au sol ou encore l'albédo élevé de certains monticules. Il serait donc possible de recueillir et d'identifier manuellement, au travers des années, des secteurs comportant ce type de difficultés. L'algorithme pourrait ensuite être réentraîné en combinant le jeu de données initial et ce nouveau jeu de données « difficile ».

26

Dans le même ordre d'idée, il serait intéressant d'augmenter la robustesse de l'algorithme visà-vis les variations de résolution spatiale. En effet, si un terrain est en pente, le vol de drone ne sera pas fait à la même hauteur pour tout le terrain, modifiant la résolution à certains endroits dans l'orthomosaïque. Si le terrain a une pente forte, il serait donc possible de retrouver des zones où la résolution est inférieure à celle recommandée. Afin d'augmenter la précision aux résolutions plus basses et plus hautes, il serait intéressant d'ajouter ce type de données au jeu de données initial et de réentraîner le modèle. Alternativement, il serait possible de planifier le vol pour que le drone suive la topographie, sa hauteur par rapport au sol restant fixe.

Ensuite, l'algorithme de dénombrement de monticules qui compare l'aire d'un objet pour y déterminer le nombre de monticules pourrait être remplacé par un algorithme d'intelligence artificielle d'estimation de la densité [12]. En effet, l'algorithme utilisé présentement a comme risque de sous ou sur-évaluer le nombre de monticules d'un objet si la résolution spatiale n'est pas optimale. Il serait ainsi possible de le remplacer par un algorithme de vision pouvant valider la segmentation sur l'orthomosaïque et y corriger les erreurs de superposition et estimer précisément le nombre de monticules dans un objet.

Finalement, une dernière piste d'amélioration et perspective de l'algorithme consisterait à corriger le nombre de monticules prédits si ceux-ci ne sont pas tous aptes à être reboisés. En effet, certains terrains ne sont pas reboisés entièrement puisque le sol n'est pas propice pour y planter un arbre. Il s'agirait donc d'ajouter une classe de prédiction à l'algorithme, soit « peut être planté » ou « ne peut être planté », et de compter uniquement les monticules pouvant être plantés dans le dénombrement final.

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche en forestreix de Sainte-Foy inc.

27

#### Références

- [1] Roy, G. «Opérations forestières et de scierie, Des arbres matures en 15 ans au Québec !,» 09 01 2018. [En ligne]. Available: https://www.operationsforestieres.ca/des-arbres-matures-en-15-ans-au-quebec-2904/. [Accès le 13 08 2121].
- [2] Prévost, M. et N. Thiffault, La Préparation de Terrain, Les Publications du Québec, 2013.
- [3] Samit, B. et D. Abhishek, «Impact of Data Normalization on Deep Neural Network for Time Series Forecasting,» *CoRR*, n° %11812-05519, 2018.
- [4] Sun, J., X. Cao, H. Liang, W. Huang, Z. Chen et Z. Li, «New Interpretations of Normalization Methods in Deep Learning,» *AAAI*, vol. 34, n° %104, pp. 5875-5882, 2020.
- [5] Ronneberger, O., F. Fischer et T. Brox, *U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation*, Proc. MICCAI, 2015.
- [6] Jie, H., S. Li, A. Samuel, S. Gang et W. Enhua, *Squeeze-and-Excitation Networks*, CVPR, 2018.
- [7] lyakaap, «Kaggle-Carvana-3rd-place-solution,» 2018. [En ligne]. Available: https://github.com/lyakaap/Kaggle-Carvana-3rd-Place-Solution. [Accès le 9 07 2021].
- [8] Sanghyun, W., P. Jongchan, L. Joon-Young et S. K. In, *CBAM: Convolutional Block Attention Module*, Springer, Cham, 2018.
- [9] Prajit, R., Z. Barret et V. L. Quoc, Searching for Activation Functions, CoRR, 2017.
- [10] Hongwei, Y., H. Jianqiang, H. Xiansheng et Z. Lei, *Gradient Centralization: A New Optimization Technique for Deep Neural Networks*, CoRR, 2020.
- [11] OpenCV, «Structural Analysis and Shape Descriptors,» [En ligne]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group\_\_imgproc\_\_shape.html. [Accès le 09 07 2021].
- [12] Vishwanath, A. S. et M. P. Vishal, «A survey of recent advances in CNN-based single image crowd counting and density estimation,» *Pattern Recognition Letters*, pp. Volume 107 Pages 3-16, 2018.

CERFO

Centre d'enseignement et de recherche en forcetario de Salona Fou lor.

28