



**CONSERVATOIRE
BOTANIQUE NATIONAL
PYRÉNÉES
ET MIDI-PYRÉNÉES**

**APPORT DU DRONE DANS LES TRAVAUX
D'EXPERIMENTATION SUR LES CUEILLETES –
GENTIANE JAUNE**

Anouar HAMDJ

Table des matières

I Introduction :.....	8
II Sites et objectifs des vols :.....	8
II-1 Sites :	8
II-2 Objectifs :	10
III Matériel utilisé et méthodes :.....	10
III-1 Drone :	10
III-2 Capteur :	11
III-3 Planification des vols :	11
III-4 Analyses des images :	12
III-4-1 Photogrammétrie :.....	12
III-4-2 Télédétection :	13
III-4-2-1 Sélection des données d'apprentissage :.....	13
III-4-2-2 Calcul des variables :	14
III-4-3 Evaluation des résultats de la classification :.....	15
III-4-4 Délimitation et nettoyage des contours des espèces et des unités de végétations classées :.....	15
III-4-5 Relevés terrain :	16
IV Résultats et discussion :	17
IV-1 Déroulement des vols :	18
IV-1-1 Campsaure :	18
IV-1-2 Superbagnères :	19
IV-1-3 Esquierry :	20
IV-1-4 Montailou :.....	21
IV-2 Traitement des images :	22
IV-2-1 photogrammétrie :	22
IV-2-1-1 Campsaure :.....	22
IV-2-1-2 Superbagnères :.....	24
IV-2-1-3 Esquierry :	24
IV-2-1-4 Montailou :	25
IV-2-2 Télédétection et cartographie de la répartition de la Gentiane :.....	25
IV-2-2-1 Campsaure :.....	26
IV-2-2-2 Superbagnères :	28
IV-2-2-3 Esquierry :.....	29
IV-2-2-4 Montailou :	30

IV-3 Indicateurs :	31
IV-3-1 Estimation du taux de recouvrement par maille de 1m ² :.....	31
IV-3-1-1 Campsaure :.....	31
IV-3-1-2 Superbagnères :.....	34
IV-3-1-3 Esquierry :.....	35
IV-3-1-4 Montailou :.....	37
IV-3-2 Estimation de la démographie :.....	38
IV-3-2-1 Campsaure :.....	39
IV-3-2-2 Superbagnères :.....	40
IV-3-2-3 Esquierry :.....	40
IV-3-2-4 Montailou :.....	41
IV-3-2-5 Récapitulatif :	41
IV-3-3 Calcul du taux de recouvrement par zone de vol et comparaison avec la cartographie de 2017 :.....	42
V Conclusion :	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Informations des zones survolées	19
Tableau 2 : Informations des zones survolées	20
Tableau 3 : Informations des zones survolées	21
Tableau 4 : Evaluation du résultat de l'analyse par télédétection sur le site de Campsaure	26
Tableau 5 : Comparaison entre les relevés terrain et les résultats obtenus par modélisation	27
Tableau 6 : Evaluation du résultat de l'analyse par télédétection sur le site de Superbagnères	28
Tableau 7 : Comparaison entre les relevés terrain et les résultats obtenus par modélisation	29
Tableau 8 : Evaluation du résultat de l'analyse par télédétection sur le site d'Esquierry	29
Tableau 9 : Comparaison entre les relevés terrain et les résultats obtenus par modélisation	30
Tableau 10 : statistiques descriptive des classes de démographie basée sur la superficie	38
Tableau 11 : Classes de démographie basée sur les superficies des rosettes	39
Tableau 12 : Répartition des rosettes par classes de demographie à Campsaure	40
Tableau 13 : Répartition de nombre de rosette par classes de demographie à Superbagnères.....	40
Tableau 14 : Répartition de nombre de rosette par classes de demographie à Esquierry	41
Tableau 15 : Répartition de nombre de rosette par classes de demographie à Montailou	41
Tableau 16 : Comparaison entre les taux de recouvrement de 2017 et ceux calculés par la télédétection	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude « Esquierry »	8
Figure 2 : Localisation de la zone d'étude « Campsaure »	9
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude « Superbagnères »	9
Figure 4 : Localisation du secteur d'étude « Montailou »	10
Figure 5 : drone à rotors de type DJI M210 RTK v2	11
Figure 6 : les informations récoltées dans le bordereau de terrain	17
Figure 7 : Zones de vol de drone sur le plateau de Campsaure	19
Figure 8 : Zones de vol de drone à Superbagnères	20
Figure 9 : Zones de vol de drone à Esquierry	21
Figure 10 : Zones de vol de drone à Montailou	22
Figure 11 : Comparaison de la densité de végétation sur un même endroit (en 2022 image de gauche, en 2023 image de droite)	22
Figure 12 : Densité importante de la végétation qui empêche de reconnaître facilement la gentiane à l'œil nu	23
Figure 13 : Fluctuation de la luministe observé le jour du vol qui influence sur la qualité de l'orthophoto sur le secteur du vol 03	23
Figure 14 : Extrait d'une orthophoto sur un des sites à Superbagnères	24
Figure 15 : Qualité de l'orthophoto sur le secteur d'Esquierry : les rosettes de gentiane présentent différentes textures ou niveaux de couleur	24
Figure 16 : Rosettes des gentianes sur une orthophoto de 3 cm de résolution à Montailou	25
Figure 17 : différence entre une orthophoto brute (à gauche) et après lissage « smoothing » à droite	25
Figure 18 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Campsaure (Zone 01 et 02)	27
Figure 19 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Campsaure (Zone 03)	28
Figure 20 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Superbagnères (Zone 01 et 02)	29
Figure 21 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur d'Esquierry	30
Figure 22 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Montailou (Zone 01 et 02)	31
Figure 23 : Répartition spatiale des mailles sur les zones du vol Campsaure-1 et Campsaure-2	32
Figure 24 : Répartition spatiale des mailles sur la zone du vol Campsaure-3	33
Figure 25 : Proportion de mailles par classe de taux de recouvrement sur les 3 secteurs de Campsaure	34
Figure 26 : Répartition spatiale des mailles par classe de taux de recouvrement sur 2 secteurs à Super-Bagnères	35
Figure 27 : Répartition des mailles par classe de taux de recouvrement sur 2 secteurs à Super-Bagnères	35
Figure 28 : Répartition spatiale des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry	36
Figure 29 : Répartition des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry	36
Figure 30 : Répartition spatiale des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry	37
Figure 31 : Répartition des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry	38
Figure 32 : Histogramme des superficies de chacune de classe de démographie	39
Figure 33 : Proportion des rosettes exploitables ou non sur tous les sites	42

I Introduction :

Le programme PyCup a constitué une première occasion d'expérimenter l'usage d'un drone pour le suivi de la Gentiane jaune. Au cours de ce programme, du temps a été consacré à la maîtrise du pilotage de drone sur le terrain, à la planification des vols, ainsi qu'à l'identification des capteurs les plus efficaces pour capturer des images à diverses hauteurs. Cette phase d'expérimentation a également permis de développer des compétences en photogrammétrie et en télédétection.

En capitalisant sur cette expertise, PyCup+ ambitionne de passer à une phase opérationnelle, dans laquelle le drone sera utilisé pour soutenir les décisions concernant la gestion des sites exploités pour la gentiane depuis plusieurs années.

Ce rapport présente les sites étudiés et les objectifs fixés et met en lumière les méthodes utilisées et les résultats obtenus.

II Sites et objectifs des vols :

II-1 Sites :

Les sites choisis se trouvent dans les départements de la Haute-Garonne et de l'Aude.

En Haute-Garonne :

- Plateau d'Esquierry (cf. figure 1) : site nommé « Esquierry » dans le rapport

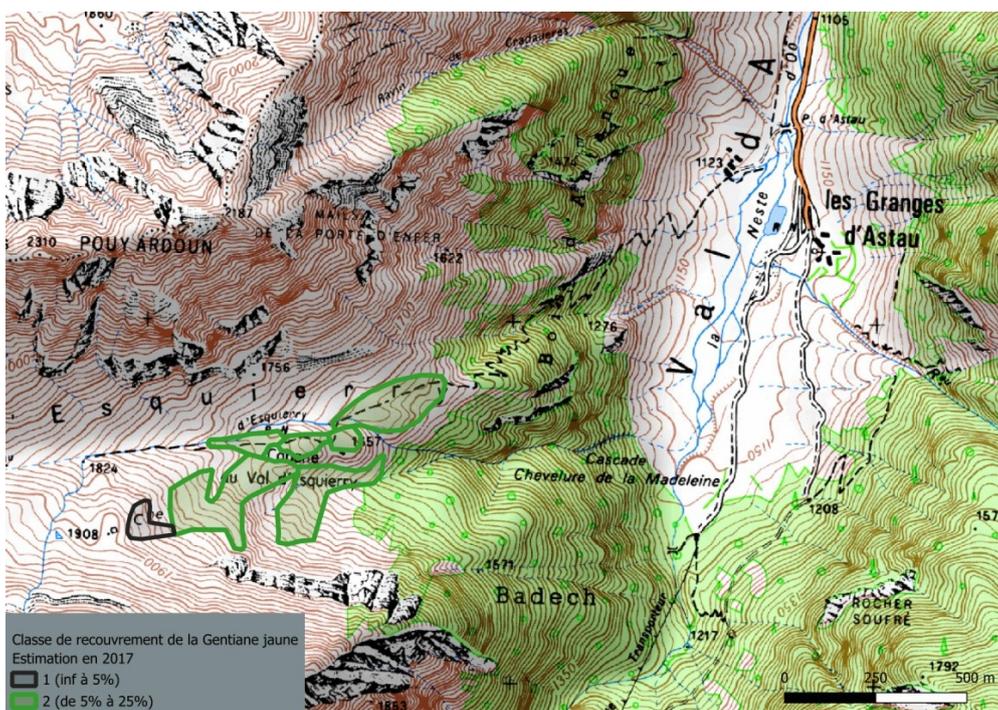


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude « Esquierry »

- Plateau de Campsaure (cf. figure 2) : site nommé « Campsaure » dans le rapport

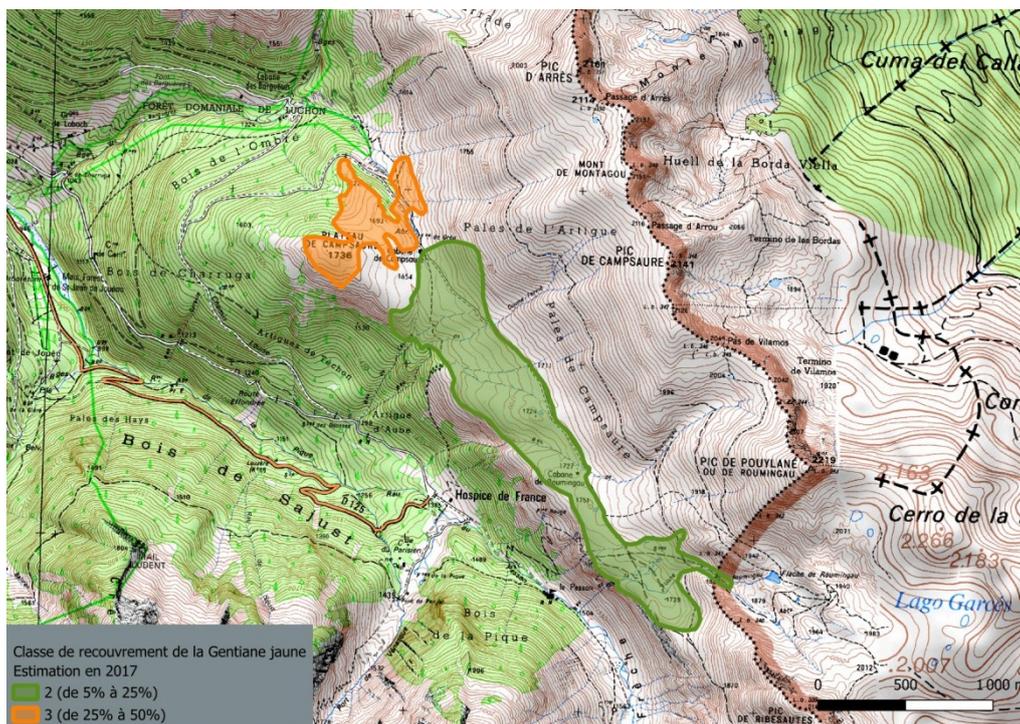


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude « Campsaure »

- Station de ski Superbagnères (cf. figure 3) : site nommé « Superbagnères » dans le rapport

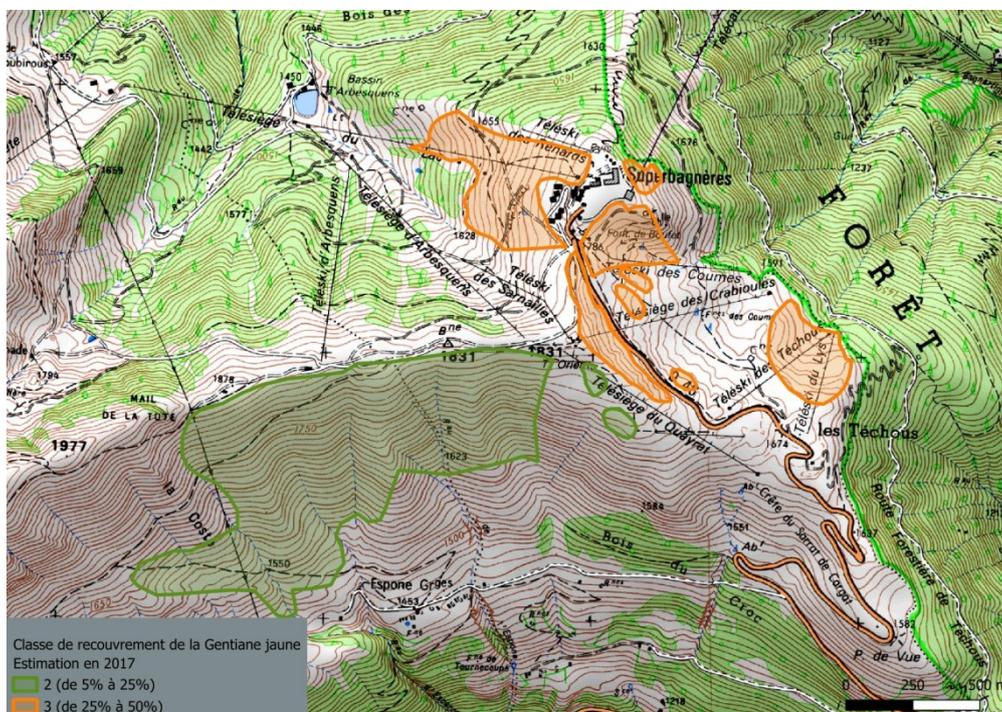


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude « Superbagnères »

Dans l'Aude :

- La parcelle de terrain, qui relève de la propriété communale de Montailou (cf. figure 4), se situe à l'intérieur des frontières administratives de la commune de Merial. Ce site sera nommé « Montailou » dans le rapport.

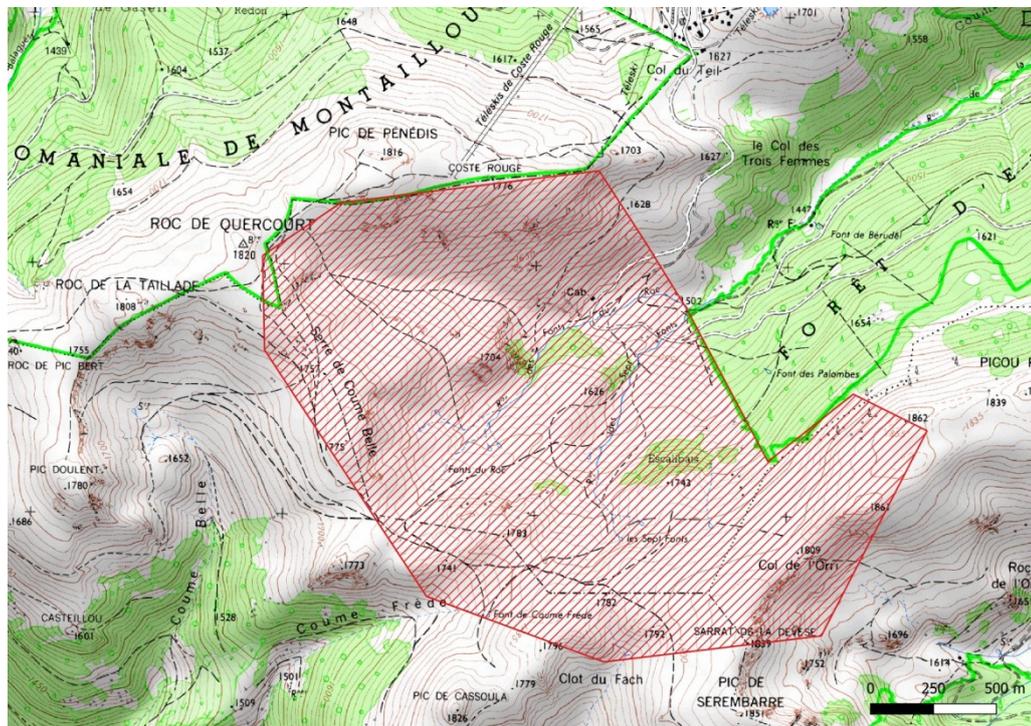


Figure 4 : Localisation du secteur d'étude « Montailou »

II-2 Objectifs :

Depuis 2017, un suivi a été effectué sur ces différents sites, sauf pour Montailou (cf. figures 1, 2 et 3). Ces suivis ont permis de réaliser une première cartographie de la répartition de la gentiane et d'estimer le taux de recouvrement. Les objectifs du projet PyCup+, en se basant sur ces suivis, sont les suivants :

- actualiser les zones de répartition de la gentiane,
- évaluer et comparer le taux de recouvrement avec celui estimé en 2017,
- définir des secteurs d'isodensité,
- estimer la démographie de l'espèce,
- et proposer des unités de gestion pour chaque site exploité.

En ce qui concerne le site « Montailou » (cf. figure 4), l'objectif est de réaliser un état initial de la répartition cartographique de la gentiane jaune et d'évaluer le potentiel d'exploitation du site.

La section suivante présente le matériel et la méthode utilisés pour atteindre ces objectifs.

III Matériel utilisé et méthodes :

III-1 Drone :

Le drone employé est identique à celui qui a été utilisé lors du programme PyCup. Il est de type à rotors (cf. figure 5) avec quatre hélices. Il décolle et atterrit à la verticale. Il est adapté à la

géomorphologie des sites suivis. Il est piloté automatiquement par l'intermédiaire d'une console de vol et un planificateur de vol, indispensable pour acquérir des images destinées à produire des orthophotos. Son autonomie de vol est de 25 min en moyenne lorsque les conditions météorologiques sont bonnes (absence de brouillard et de précipitation, vitesse du vent inférieure à 35 Km/h).

Le drone est équipé d'une nacelle à laquelle peut être accroché le capteur, décrit dans la partie qui suit, et qui a pour rôle l'acquisition des images.



Figure 5 : drone à rotors de type DJI M210 RTK v2

III-2 Capteur :

Le capteur utilisé est de type multispectral « Sentera AGX710 », comprenant :

- trois bandes dans le spectre visible (rouge, vert et bleu)
- deux bandes des le spectre invisible (red-edge et le proche infrarouge)

Avec une résolution spatiale de 12 millions de pixels, il permet la production d'une orthophoto d'une résolution de 5,4 mm depuis une altitude de vol de 20 mètres. Le temps nécessaire pour capturer deux images successivement est de 0,5 seconde.

Sa résolution spectrale facilite le calcul d'indices radiométriques, tels que le NDVI, favorisant ainsi la différenciation de la gentiane jaune par rapport à d'autres végétations environnantes.

L'activation du capteur pour la prise de clichés est automatisée par le biais d'un planificateur de vol, tel que décrit dans la partie suivante.

III-3 Planification des vols :

Le planificateur de vol utilisé est UGCS, qui est particulièrement conçu pour s'adapter aux géomorphologies complexes des sites. Il permet au drone de suivre le profil du relief grâce à un modèle numérique de terrain intégré, la BD-Alti de l'IGN avec une résolution de 5 mètres. Cela garantit une altitude de vol constante par rapport au sol et une résolution homogène pour les images capturées, tout en prenant en compte les microreliefs afin d'éviter d'éventuels incidents. Pour fonctionner efficacement, UGCS nécessite d'être configuré avec ces paramètres, principalement issus de la première expérimentation sur PyCup :

- résolution de l'image (et hauteur de vol en conséquence) : en ce qui concerne la Gentiane jaune, il est conseillé de ne pas dépasser 1,2 cm de résolution pour des estimations démographiques. Pour une cartographie de la répartition spatiale, une résolution maximale

- de 2,5 cm peut être acceptée.
- recouvrement latéral et frontal entre les images : 60%, il permet d'obtenir une orthophoto de meilleure qualité et aussi d'optimiser le temps de vol.
- limites de la zone à survoler ;
- orientation du capteur, en général perpendiculaire au sol ;
- temps de prise entre deux photos : il est paramétré en mode automatique pour minimiser le nombre d'images enregistrées.

Avec les paramètres spécifiés, le planificateur procède à l'évaluation de la durée estimée du vol. Si cette durée venait à dépasser l'autonomie des batteries disponibles sur le site (12 unités pour un vol de 2 heures), une réévaluation de certains paramètres pourrait être nécessaire. Cela pourrait signifier, par exemple, de réduire la surface à couvrir et se concentrer sur des zones considérées essentielles pour la gestion de la Gentiane jaune (en fonction de sa densité ou son exploitation).

Il est également envisageable d'ajuster ces paramètres afin d'assurer la sécurité du drone, en prenant en considération les obstacles présents sur les sites surveillés, tels que les lignes à haute tension, les installations des stations de ski ainsi que la présence de promeneurs. Ces réajustements entraîneraient une diminution de la résolution, permettant ainsi au drone d'évoluer à une altitude supérieure.

En définitive, le paramétrage UGCS joue un rôle déterminant dans le succès des interventions sur le terrain et dans le traitement des images collectées, comme cela sera développé dans la section suivante.

III-4 Analyses des images :

Les images générées seront d'abord soumises à un traitement photogrammétrique afin de créer une orthophoto. Par la suite, cette orthophoto sera analysée par des méthodes de télédétection (classification d'image) pour identifier les zones où la gentiane est présente. Les résultats seront ensuite comparés avec les observations effectuées sur le terrain pour évaluer la précision de la classification. Enfin, des indicateurs seront développés à l'aide d'outils de géotraitement via des logiciels SIG.

III-4-1 Photogrammétrie :

Les images recueillies font l'objet d'un traitement visant à produire une orthophoto, en utilisant le logiciel de photogrammétrie « Metashape ». Les différentes étapes du processus sont les suivantes :

- alignement des photos
- création des nuages de points denses
- création du maillage et de la texture
- création d'un modèle numérique de surface
- création d'une orthophoto

Deux vérifications sont effectuées en deux étapes distinctes:

- La première intervient après la phase d'alignement des images, durant laquelle les photos mal localisées – responsables d'importantes déformations des nuages de points – sont retirées. Cette étape est répétée jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant. En général, ces images problématiques se situent la plupart du temps sur les bords de la zone survolée ou dans les zones de croisement avec d'autres vols.

- La seconde vérification a lieu après la création de l'orthophoto, afin d'évaluer la qualité de cette dernière et d'identifier les zones affectées par des artefacts dus à une triangulation incorrecte entre les images. L'outil Metashape permet de corriger ces artefacts par une triangulation localisée.

Le temps d'exécution des différentes étapes par Metashape varie en fonction du volume d'images à analyser et de la résolution des pixels de chacune d'elles. À titre d'exemple, un projet comprenant 1300 images nécessite environ deux heures de traitement pour obtenir une orthophoto. Naturellement, la durée de ce traitement dépend également des caractéristiques de l'ordinateur utilisé, comme la carte graphique et la mémoire vive. Plus le nombre d'images augmente, plus le processus s'allonge, et l'orthophoto produite prend du poids, ce qui alourdit d'autant le temps nécessaire pour le traitement via la télédétection, comme expliqué dans la section suivante.

III-4-2 Télédétection :

L'analyse de l'orthophoto par télédétection s'effectue en adoptant la méthode de classification supervisée orientée objet, laquelle se divise en trois phases :

- 1) Segmentation de l'image en objets en utilisant un algorithme de segmentation, qui se base sur le regroupement des pixels en région lorsqu'ils sont composés d'une texture, forme et valeur similaire
- 2) Apprentissage : un algorithme de classification construit un modèle en apprenant à partir d'un ensemble de données d'apprentissage étiquetées avec les classes des espèces observées sur l'orthophoto (cf. partie III-4-2-1). Chacune de ces classes doit être associée à des attributs tels que les valeurs numériques des bandes spectrales composant l'image et d'autres variables (cf. partie III-4-2-2).
- 3) Classification : après validation de la partie apprentissage, en exécutant différents tests, le modèle est utilisé pour la prédiction.

L'analyse est généralement effectuée à l'aide de logiciels spécialisés en télédétection tels qu'Erdas et Envi. Ces logiciels étant trop coûteux la solution choisie a été de se diriger vers des alternatives libres comme Orfeo ToolBox pour la segmentation et R pour l'apprentissage et la classification.

Ces logiciels gratuits, exigent en contre-partie un investissement en temps pour en maîtriser l'utilisation (lignes de code et bibliothèques incluses dans R). Aussi les utilisateurs sans formation en programmation peuvent rencontrer des difficultés.

III-4-2-1 Sélection des données d'apprentissage :

Les données d'apprentissage nécessaires pour les analyses par télédétection représentent des unités de végétations et/ou espèces observées sur une orthophoto. Elles doivent être exhaustives et bien réparties sur l'image.

Pour constituer les données d'apprentissage, différentes sources d'informations sont utilisées :

- Interprétation à l'œil nu de l'orthophoto produite pendant la phase de photogrammétrie
- Observations faites sur le terrain le jour du vol pouvant avoir un apport important si l'interprétation à l'œil nu de l'orthophoto ne permet pas de reconnaître les espèces et les unités de végétations (à cause de sa résolution insuffisante).

A titre d'exemple sur le site « Esquierry » les données d'apprentissage sont constituées de ces catégories identifiées sur l'orthophoto :

- Rosette de feuilles de Gentiane jaune (espèce cible de l'analyse)
- Inflorescence de la Gentiane jaune
- Substrat rocheux
- Sol nu
- Végétation dense
- Végétation moins dense

III-4-2-2 Calcul des variables :

Pour produire un modèle prédictif de classification, les algorithmes ont besoin de variables telles que :

- Les bandes spectrales qui constituent l'orthophoto. Une orthophoto produite à partir des images prises par le capteur multispectral est composée des bandes rouge, vert, bleu, Rededge et proche infra-rouge (NIR ou PIR)
- Les indices de couleurs (Spectral color) calculés à partir des valeurs des bandes spectrales dans le visible (rouge, vert et bleu) à titre d'exemple :
 - BI (Brightness Index)
 - CI (Color Index)
 - HI (Hue Index)
 - SI (Saturation Index)
 - RI (Redness Index)
- Les indices radiométriques (quelques exemples ci-dessous) calculés à partir des valeurs numériques des bandes dans le visible (rouge, vert et bleu) et l'invisible (Rededge et proche infra-rouge) :
 - NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) : le NDVI est un indice compris entre -1 et 1. Les valeurs négatives représentent des zones dépourvues de végétation. Les valeurs très faibles représentent des zones avec peu de végétation. Les valeurs modérées représentent des zones comportant des arbustes et des pâturages. Les valeurs élevées représentent des zones de végétation dense comme les forêts. Il est calculé comme suit :

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

- GLI (Green Leaf Index) : l'indice de verdure, également appelé indice de feuille verte, représente la relation entre la réflectance dans le canal vert par rapport aux deux autres canaux de lumière visible (rouge et bleu). Cet indice a été conçu à l'origine pour être utilisé avec une caméra numérique RVB pour estimer la couverture végétale. Il est calculé comme suit :

$$GLI = \frac{(Green - Red) + (Green - Blue)}{(2 * Green) + Red + Blue}$$

- SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) : cet indice est similaire au NDVI mais il supprime les effets des pixels du sol. Il utilise un facteur d'ajustement du fond de la canopée, L, qui est fonction de la densité de la végétation et nécessite souvent une connaissance préalable des quantités de végétation. Huete (1988) suggère une valeur optimale de L=0,5 pour tenir compte des variations de premier ordre du sol. Cet indice est mieux utilisé dans les zones où la végétation est relativement éparse et où le sol est visible à travers la canopée. Il est calculé comme suit :

$$SAVI = \frac{1.5 * (NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.5)}$$

III-4-3 Evaluation des résultats de la classification :

En règle générale, l'évaluation des résultats de la classification se réalise en confrontant les relevés de terrain de l'espèce ciblée aux résultats obtenus par modélisation.

Cette comparaison peut porter sur certains indicateurs, tels que le nombre d'inflorescences ou de rosettes. Concernant la Gentiane jaune, il est difficile de modéliser le nombre exact de rosettes, notamment celles en touffes. Pour vérifier la robustesse de la classification, on superpose la superficie modélisée à celle relevée sur le terrain, avec pour objectif d'estimer les proportions correspondantes. Toutefois, l'estimation et la cartographie de la superficie des rosettes de Gentiane jaune sur le terrain demandent beaucoup de temps et une logistique particulière. Une autre approche a été utilisée, consistant à effectuer une photo-interprétation sur les transects survolés par un drone. Dans ce cadre, les relevés effectués sur le terrain servent à identifier les rosettes de gentiane en se basant sur les schémas des relevés réalisés. Une fois la photo-interprétation effectuée il y aura une comparaison entre les contours des rosettes de gentiane cartographiés et ceux modélisés par le calcul à l'aide de ces indicateurs :

- Vrais positifs (TP) : la superficie de la rosette modélisée correspond à celle de la rosette photo-interprétée
- Vrais négatifs (TN) : la superficie de la rosette modélisée ne correspond pas à celle de la rosette photo-interprétée
- Faux négatifs (FN) : la superficie des autres classes correspond à celle des rosettes photo-interprétées

Ces derniers permettront de calculer :

- Precision of class : la précision se calcule avec cette formule : Precision = TP / (TP+FP) ; plus la précision est proche de 0 plus il y a une surestimation de la superficie des rosettes de la gentiane
- Recall of class : le rappel ou retour se calcule avec cette formule : Recall = TP / (TP+FN) ; plus le retour est proche de 0 plus il y a une sous-estimation de la superficie des rosettes de la gentiane
- F-score of class : la F-Measure fournit un score unique qui équilibre les deux préoccupations de précision et de rappel en un seul chiffre. Plus le F-score est proche de 1 plus la superficie des rosettes se rapproche de la réalité.

Il est important de préciser que les évaluations ne porteront que sur les transects et non sur la totalité de la zone modélisée. Une fois que l'évaluation sera considérée satisfaisante, le résultat de la modélisation, présenté sous forme de raster, sera nettoyé selon les indications fournies dans la partie suivante.

III-4-4 Délimitation et nettoyage des contours des espèces et des unités de végétations classées :

Les images classées présentent de nombreuses zones éparpillées et de petite taille. Ces zones sont constituées de pixels incorrectement classés, ce qui est appelé « effet poivre et sel ».

Pour remédier à ce problème, deux outils de généralisation de raster, « Nettoyage de limites » et « Filtre majoritaire », sont utilisés pour lisser les bords des zones d'un raster :

- *L'outil Filtre majoritaire remplace les cellules en fonction de la valeur majoritaire présente dans leurs voisinages contigus.*
- *L'outil Nettoyage de limites généralise ou simplifie les rasters en lissant les limites entre les zones. Il applique une méthode d'expansion et de contraction pour évaluer chaque cellule sur la base de ses voisins immédiats.*

Une fois que le nettoyage est satisfaisant la phase de production d'indicateurs (cf. paragraphe 2.2) peut commencer.

III-4-5 Relevés terrain :

Des relevés de terrain, qui font 20 m² (soit 1 m * 20 m ou 2 m * 10 m), ont été réalisés le même jour que le vol du drone. Les informations notées dans les relevées (cf. bordereau en figure 6) sont les suivantes :

- Nombre d'individus cueillables et leurs classes démographiques : C, D et F (+ nombre de hampes florales pour la classe F)
- Nombre d'individus non cueillables et leurs classes démographiques : a, b, c, d, f et A, B
- Taux de recouvrement de la Gentiane jaune ; ce taux est estimé à l'œil nu
- Croquis des rosettes de gentianes présentes sur les cinq premiers mètres du transect, accompagnées de leur classification démographique. Ce croquis a pour but de repérer sur l'orthophoto les rosettes représentées afin d'évaluer leurs superficies. Ces superficies permettront d'explorer l'éventuelle corrélation entre la superficie d'une rosette isolée ou en touffe et sa catégorie démographique. En cas d'existence de cette relation, elle pourra servir à estimer la démographie de la Gentiane jaune sur la base des résultats de modélisation.

Ces informations sont utilisées pour :

- ✓ juger de la robustesse de la modélisation (cf. paragraphe III.4.3)
- ✓ estimer la démographie de la Gentiane jaune à partir des résultats de modélisation

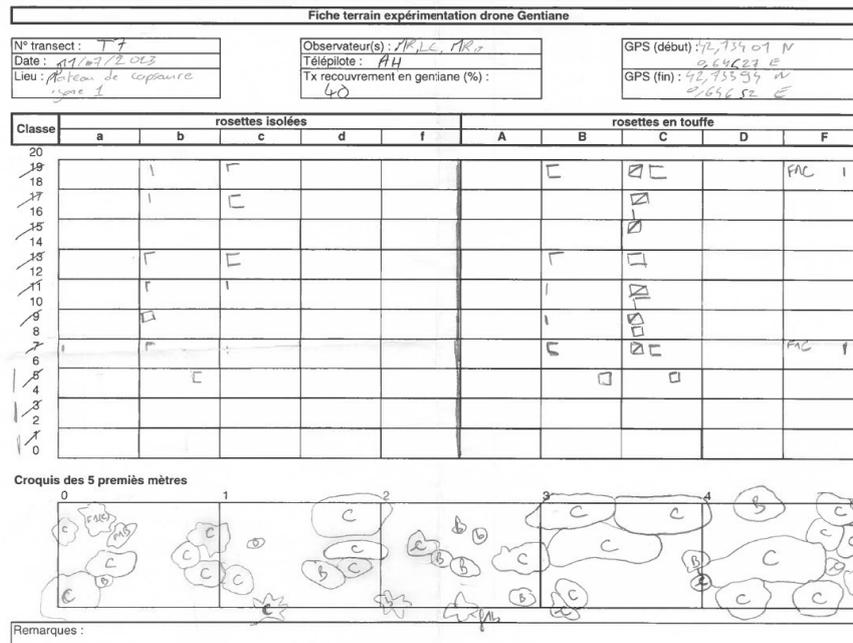


Figure 6 : Les informations récoltées dans le bordereau de terrain

Sur le transect, les rosettes sont classées en se servant de la main et d'une observation visuelle. Les rosettes isolées sont réparties en 4 catégories :

- a si le pouce de la main dépasse la largeur de la plus grande feuille de la rosette,
- b si la largeur de la feuille est supérieure au pouce d'une main, mais inférieure à la surface d'une paume de main fermée par rapport à la longueur d'une feuille,
- c si la surface de la plus grande feuille est inférieure à la largeur d'une main ouverte par rapport à la longueur de la feuille,
- d si la surface de la plus grande feuille est supérieure à la largeur d'une main ouverte par rapport à la longueur de la feuille.

La même approche est utilisée pour classer les touffes de rosettes, en se basant sur la feuille la plus grande afin de déterminer les catégories A, B, C ou D. Cette méthode souffre d'un manque de précision en raison de certains facteurs, comme l'interprétation de l'observateur et la morphologie de la main. De plus, il est impossible d'appliquer cette méthode sur un modèle de géotraitement.

Afin d'évaluer la démographie de la Gentiane, une expérimentation sera menée pour modéliser spatialement la démographie, en examinant si un lien existe entre la superficie d'une rosette isolée ou en touffe et sa classification démographique. Il s'agit d'utiliser les croquis des relevés (cf. figure 6) pour déterminer la superficie de chaque classe et vérifier si une relation existe.

IV Résultats et discussion :

Après avoir présenté la méthode et le matériel utilisés, cette partie décrit les résultats:

- déroulement du vol,
- traitement des images,
- croisement avec les relevés de terrain,
- production des indicateurs.

IV-1 Déroulement des vols :

IV-1-1 Campsaure :

Le plateau de Campsaure se situe entre l'Hospice de France et la ligne de crête qui relie les sommets du pic d'Aubas, du pic de Campsaure et du pic de Pouylané, à une altitude allant de 1600 m à 2200 m. Ce territoire est composé d'une mosaïque de ruisseaux, de zones humides, de tourbières, de landes, de prairies et de pelouses.

Après avoir mené une prospection visuelle et utilisé un drone pour explorer les zones d'accès difficile, notamment les Pales de l'Artigue, des observations de Gentiane jaune ont été faites sur l'ensemble du site, avec des variabilités de densité d'un lieu à l'autre. La superficie de la population dépasse largement celle établies par la cartographie de 2017 (1 km²), recouvrant désormais une superficie de 5 km².

Suite à cette prospection, il apparaît que l'ensemble du secteur ne peut pas être survolé dans le temps alloué. Des choix ont donc dû être faits concernant les zones à explorer, en se concentrant sur celles où la densité de la Gentiane jaune est significative.

Le choix s'est porté sur trois secteurs (cf. figure 7 ci-dessous) :

- à l'entrée du plateau de Campsaure au niveau de la cabane de Campsaure : zones de vol 01 (Campsau-1) et 02 (Campsau-2).
- au fond du plateau au niveau de la source : zone de vol 03 (Campsau-3)
- entre le Pales de l'Artigue et le Pales de Campsaure

Le secteur cartographié en 2017 entre les cabanes de Campsaure et de Roumingau, qui présentait une densité de classe 2, a été exclu, car la gentiane y est peu abondante. Elle a été observée de manière éparse et peut parfois manquer complètement.

Concernant les deux premiers secteurs, les vols ont été menés en 2022 et 2023. Pour le troisième secteur, les vols n'ont pas pu être effectués en raison de conditions climatiques défavorables.

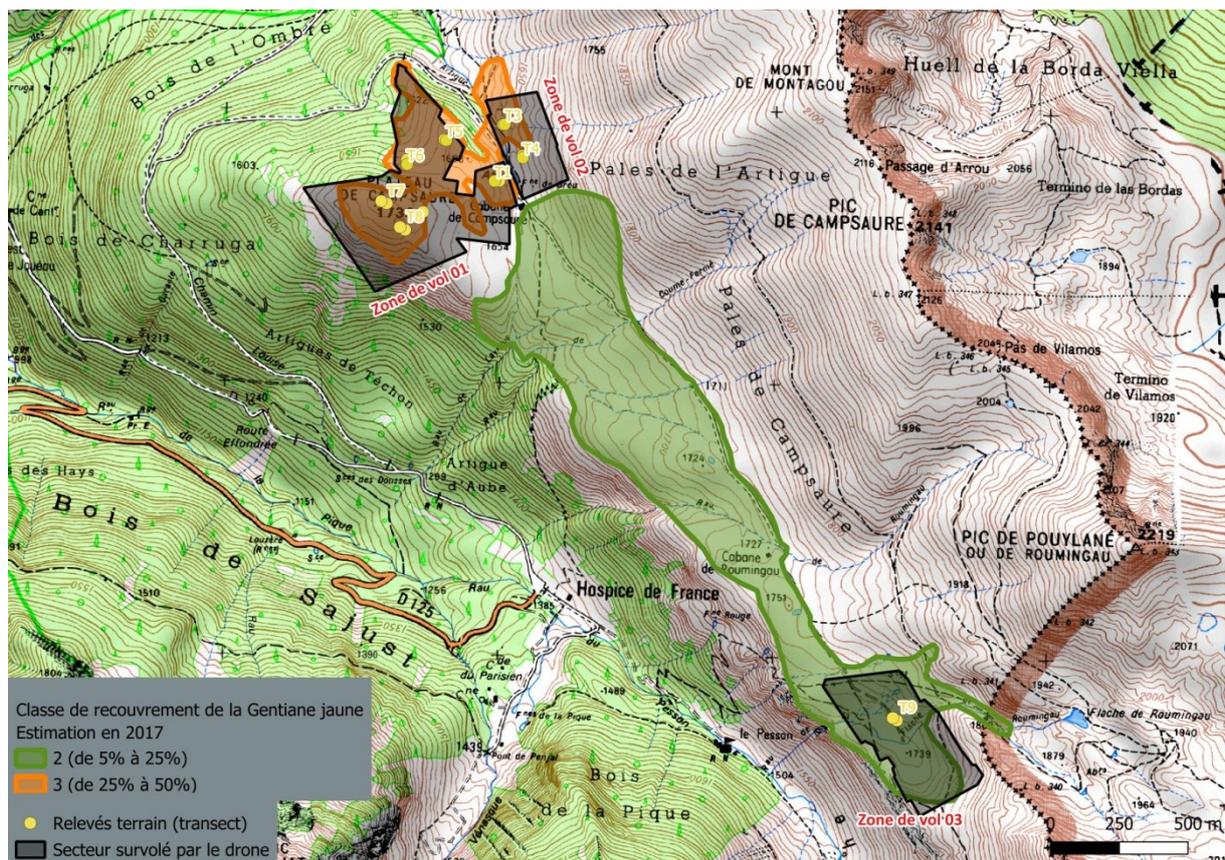


Figure 7 : Zones de vol de drone sur le plateau de Campsaure

Le tableau ci-dessous présente les superficies des zones survolées ainsi que le nombre de transects réalisés.

Tableau 1 : Informations des zones survolées

Secteur	Zone de vol	Superficie de la zone survolée (m ²)	Nombre de transects	Date du vol	Résolution des images
Campsaure	Campsaure-1	273085,2578	6	19/07/2022 21/07/2022 11/07/2023	1,2 cm 1,4 cm 1,8 cm
	Campsaure-2	69161,78961	2	21/07/2022	0,8 cm
	Campsaure-3	147231,828	1	11/07/2023	1,1 cm

La superficie totale de la zone survolée s'élève à 48 hectares, représentant ainsi la moitié de celle prospectée en 2017. Pour ce site, 3 jours de terrain ont été consacrés en 2022 et 4 jours en 2023. Le drone a pu voler durant la moitié du temps à cause des conditions météorologiques défavorables.

IV-1-2 Superbagnères :

La zone ciblée pour l'étude est située autour de la station de ski de Superbagnères, où se trouvent des remontées mécaniques dispersées autour de l'hôtel central, le plus haut point de la station. Les installations de remontées mécaniques présentent un risque pour le vol du drone, ce qui a conduit à la décision de voler à une altitude plus élevée pour éviter toute collision avec les pylônes et câbles. Les différents secteurs comportent des zones de prairies, de landes et de pelouses.

En 2017, une prospection a mené à une première cartographie de la distribution de la Gentiane et une estimation de sa couverture (cf. figure 8).

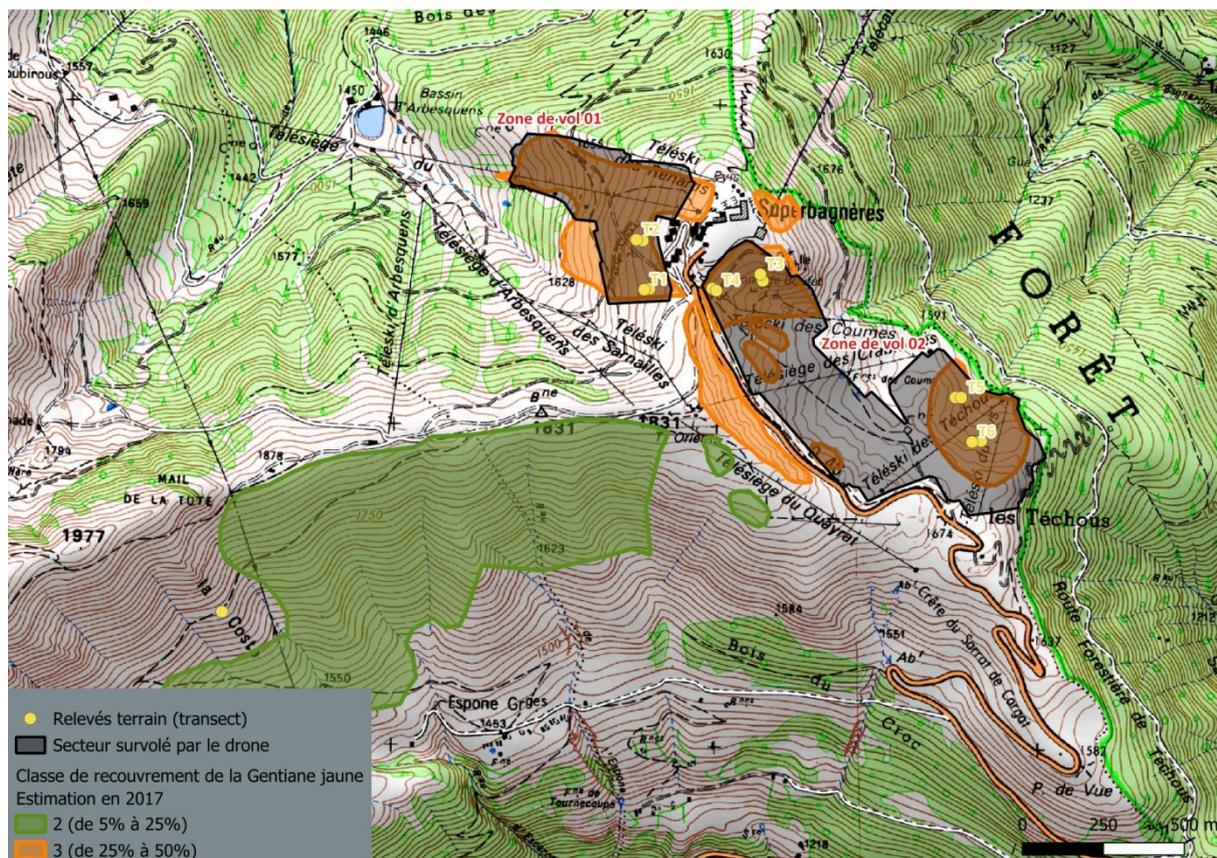


Figure 8 : Zones de vol de drone à Superbagnères

La résolution établie est de 2,2 cm, ce qui permettra de survoler ce secteur en toute sécurité tout en évitant les remontées mécaniques. Avec cette résolution, deux zones ont pu être survolées, comme indiqué sur la carte ci-dessus (cf. figure 8). L'autre zone n'a pas pu être explorée en raison des conditions météorologiques défavorables. Sur quatre jours consacrés à l'étude du site, seuls deux jours ont été propices aux vols, les deux autres jours étant marqués par de mauvaises conditions météorologiques. Le tableau ci-dessous indique les superficies des zones survolées ainsi que le nombre de transects réalisés :

Tableau 2 : Informations des zones survolées

Zone de vol	Superficie de la zone survolée	Nombre transect	Date du vol	Résolution des images
Super-B1	154471,9311	2	18/07/2023	1 cm 2,1 cm
Super-B2	373971,6985	4	18/07/2023 20/07/2023	2,45 cm

IV-1-3 Esquierry :

En 2017, une étude du site d'Esquierry a été réalisée afin de produire une cartographie pour estimer la répartition et le recouvrement de la Gentiane. L'objectif était de survoler les mêmes zones.

Situé sur le plateau d'Esquierry, le site nécessite une montée de 700 mètres de dénivelé positif, ce qui a demandé une certaine organisation pour faire monter le drone, nécessitant la présence de trois personnes.

Le vol s'est déroulé le 18 juillet 2022, sur une superficie de 12,5 ha, dans une zone où la densité de Gentiane est élevée. La résolution des images obtenues est de 1,42 cm.

Une journée de vol planifiée en 2023 afin de couvrir l'ensemble du site n'a pas pu se faire en raison des conditions météorologiques défavorables et d'un emploi du temps surchargé.

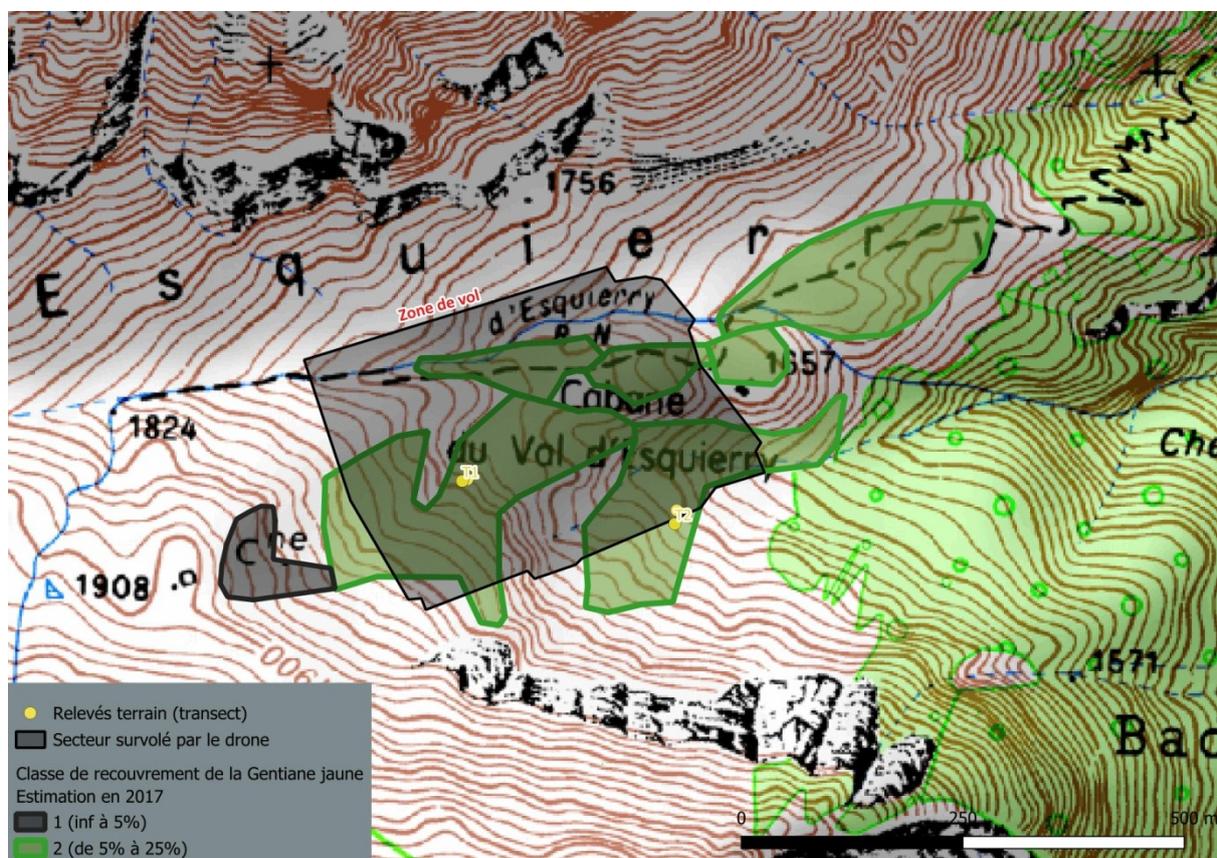


Figure 9 : Zones de vol de drone à Esquierry

IV-1-4 Montailou :

Ce site s'étend sur deux vallons et couvre une superficie de plus de 2 km². L'expérimentation se déroulera dans chacune des deux sections des vallons. Il n'y avait pas eu de suivis sur ce site précédemment.

Le tableau ci-dessous décrit les zones survolées ainsi que les sections avec leurs superficies respectives.

Tableau 3 : Informations des zones survolées

Zone de vol	Superficie de la zone survolée	Date du vol	Résolution de l'image
1	384311,2109	14/07/2023	2,96 cm
2	378543,9623	15/07/2023	2,78 cm

Il n'y a pas eu de transect. La hauteur de vol a été déterminée pour couvrir une grande surface, étant donné le temps limité pour ce secteur.

Le site est composé d'une mosaïque de Gentianes, Genévrier, lande à Callune et Myrtill, prairies et pelouses.

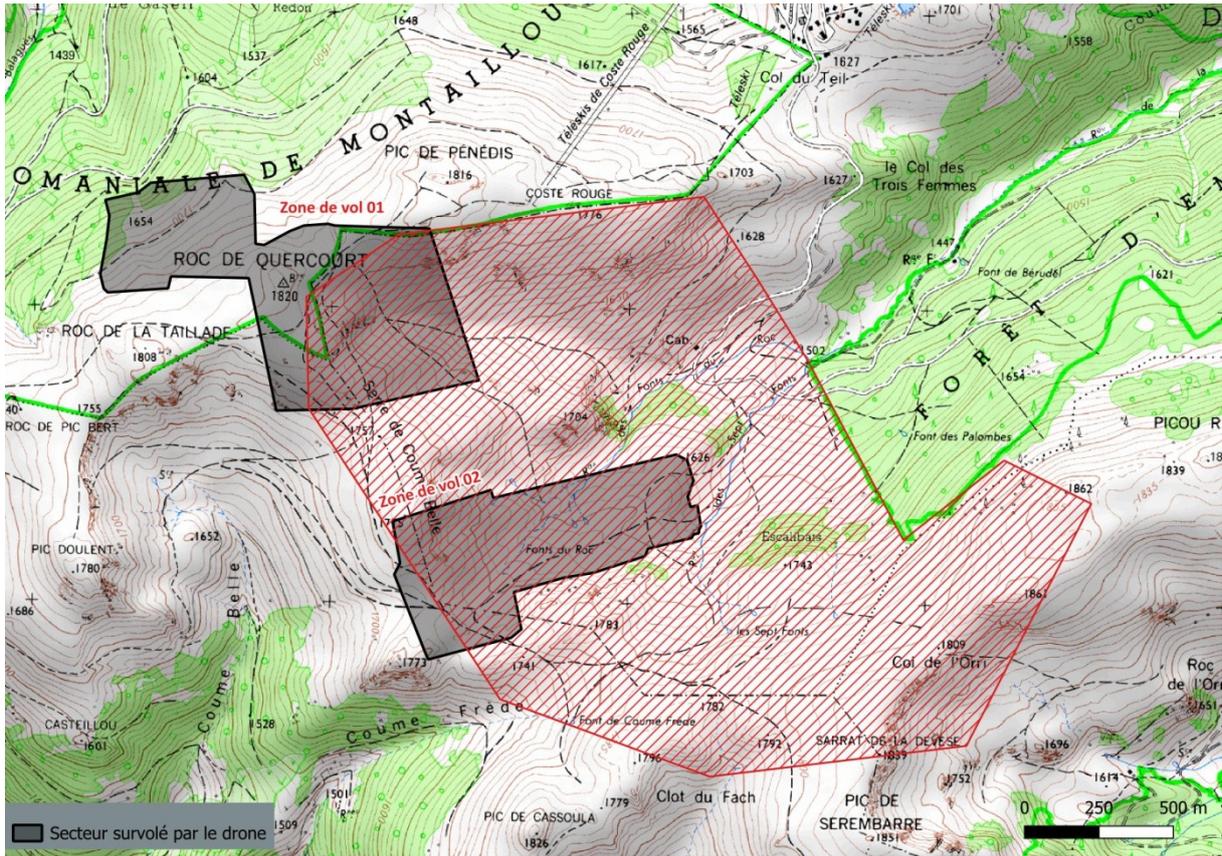


Figure 10 : Zones de vol de drone à Montaillou

IV-2 Traitement des images :

IV-2-1 photogrammétrie :

Grâce à la photogrammétrie, il a été possible d'obtenir des orthophotos présentant différentes résolutions à divers endroits, en effectuant des survols à diverses hauteurs.

IV-2-1-1 Campsaure :

Le plateau a été survolé au cours de 2 années. L'année 2022 a été marquée par des températures plus élevées et une sécheresse, rendant la végétation moins élevée et permettant ainsi de mieux repérer la Gentiane. L'exemple ci-dessous (cf. figure 11) illustre une orthophoto du même lieu prise en 2022 et de 2023, montrant que la végétation en 2023 est plus fournie qu'en 2022.

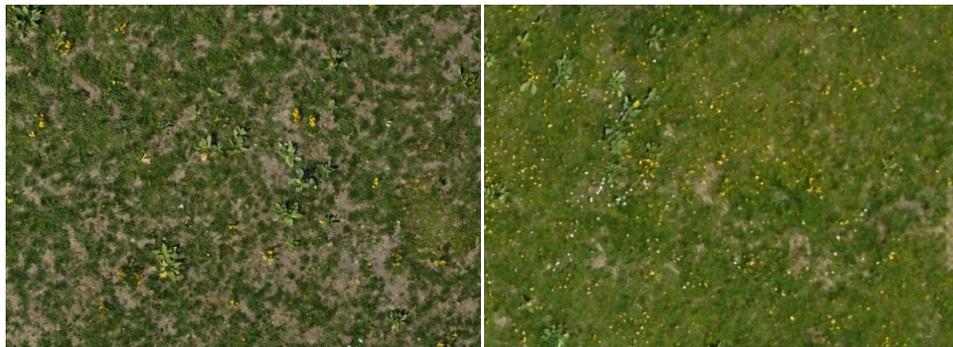


Figure 11 : Comparaison de la densité de végétation sur un même endroit (en 2022 image de gauche, en 2023 image de droite)

Sur les zones de vol Campsaure-1 et Campsaure-2, la pelouse n'a pas d'impact sur l'observation ou la classification de la Gentiane sur l'orthophoto.

En revanche, la végétation sur le secteur Campsaure-3 complique cette distinction à l'œil nu en raison de sa hauteur et de la présence de plusieurs inflorescences d'autres espèces (cf. points blancs sur la figure 12 ci-dessous) dues à des précipitations favorables en 2023.



Figure 12 : Densité importante de la végétation qui empêche de reconnaître facilement la gentiane à l'œil nu

Une autre problématique rencontrée dans ce secteur est la variation de la luminosité, comme l'illustre cet extrait de l'orthophoto en figure 13.



Figure 13 : Fluctuation de la luminosité observé le jour du vol qui influence sur la qualité de l'orthophoto sur le secteur du vol 03

Les caractéristiques spectrales variables sur toutes les photos peuvent engendrer des difficultés pour le traitement par télédétection.

La situation est compliquée par le fait que la photogrammétrie a révélé que la luminosité n'est pas homogène, le site ayant été survolé à différentes dates avec des conditions d'éclairage inégales. Par ailleurs, des survols effectués sur deux années différentes, avec des conditions climatiques non-similaires et une augmentation des précipitations en 2023, pourraient influencer les résultats obtenus de la télédétection.

IV-2-1-2 Superbagnères :

En 2023, le site a été survolé et les photos n'ont pas subi de fluctuations de luminosité. Les orthophotos sont d'une qualité appréciable, même avec la hauteur élevée du drone. La résolution des images varie de 1 à 2,45 cm, permettant d'identifier aisément la Gentiane, comme le montre cet extrait d'orthophoto ci-dessous (cf. figure 14).



Figure 14 : Extrait d'une orthophoto sur un des sites à Superbagnères

IV-2-1-3 Esquierry :

Malgré les contraintes dues au dénivelé le jour du vol ainsi qu'à son heure tardive, la qualité de l'orthophoto et la résolution de l'image permettent d'identifier la Gentiane, même si la végétation est élevée. On peut observer sur l'image les différentes textures et couleurs de la Gentiane, comme le montre la capture ci-dessous (cf. figure 15). Cependant, il convient de noter que la planification du vol n'a pas inclus le deuxième transect réalisé dans la zone, ce qui limitera la validation à un seul transect.



Figure 15 : Qualité de l'orthophoto sur le secteur d'Esquierry : les rosettes de gentiane présentent différentes textures ou niveaux de couleur

IV-2-1-4 Montailou :

À Montailou, la rosette de la Gentiane est facilement identifiable à l'œil nu, malgré la hauteur du drone et la résolution des orthophotos qui varie entre 2,7 cm et 3 cm, comme le montre la figure 16 ci-dessous.



Figure 16 : Rosettes des gentianes sur une orthophoto de 3 cm de résolution à Montailou

IV-2-2 Télédétection et cartographie de la répartition de la Gentiane :

Le traitement par télédétection a subi des modifications par rapport à ce qui avait été prévu dans la section méthode (partie III-4-2). La segmentation n'a pas pu être réalisée comme initialement voulu, en raison d'un temps de traitement assez long. Malgré la robustesse de la méthode, qui permet de mieux distinguer la Gentiane, cette étape était cruciale pour minimiser les erreurs de traitement et homogénéiser les zones aux caractéristiques similaires. Pour pallier ce problème, une autre méthode a été sélectionnée, afin de s'en rapprocher en termes de segmentation. La méthode retenue, moins longue en matière de temps de traitement, est celle du lissage « smoothing ».

En utilisant le « smoothing », on applique un filtre sur l'image qui diminue les détails, comme le montrent les captures d'écran présentées ci-dessous (cf. figure 17) :



Figure 17 : différence entre une orthophoto brute (à gauche) et après lissage « smoothing » à droite

Le temps de traitement était relativement long, même si certaines orthophotos ont été divisées en plusieurs sections pour optimiser ce temps. D'autres complications sont survenues dans les zones où les vols ont eu lieu sur deux années différentes, nécessitant la création d'un nouveau modèle à chaque fois avec de nouvelles données d'entraînement. En revanche, pour les vols réalisés le même jour dans le même secteur, le modèle a pu être réutilisé dans d'autres zones, comme c'est le cas sur le site de Superbagnères.

La présentation des résultats de la télédétection se fera par site.

IV-2-2-1 Campsaure :

Tableau 4 : Evaluation du résultat de l'analyse par télédétection sur le site de Campsaure

Secteur	Zone de survol	Superficie de la rosette télédétectée dans les transects	Superficie de la rosette en VP	Superficie de la rosette en FP	Superficie en FN	Precision	Recall	F1-Score
Campsaur	1	29,29	22,87	6,42	13,93	0,7808126	0,6215	0,6921
	2	3,49	2,88	0,61	2,3	0,8252149	0,556	0,6644
	3	14,09729881	9,769551782	4,328157775	4,901286177	0,6929886	0,6659	0,6792

Le tableau d'évaluation des résultats des traitements par télédétection dans les zones survolées révèle une proportion significative de faux négatifs. Cela correspond à des zones où les gentianes ne sont pas détectées, causant ainsi des valeurs de retour inférieures à 0.7, mais supérieures à 0.5, indiquant une présence modérée de faux négatifs. Ces résultats influent sur la valeur finale du F1-score, qui se situe entre 0.6 et 0.7, suggérant une modélisation de qualité moyenne. Cependant, l'avantage est qu'il y a moins de faux positifs pour les gentianes. Cette tendance est corroborée par le tableau comparatif entre le recouvrement évalué par photo-interprétation et celui obtenu par télédétection, le premier étant toujours supérieur.

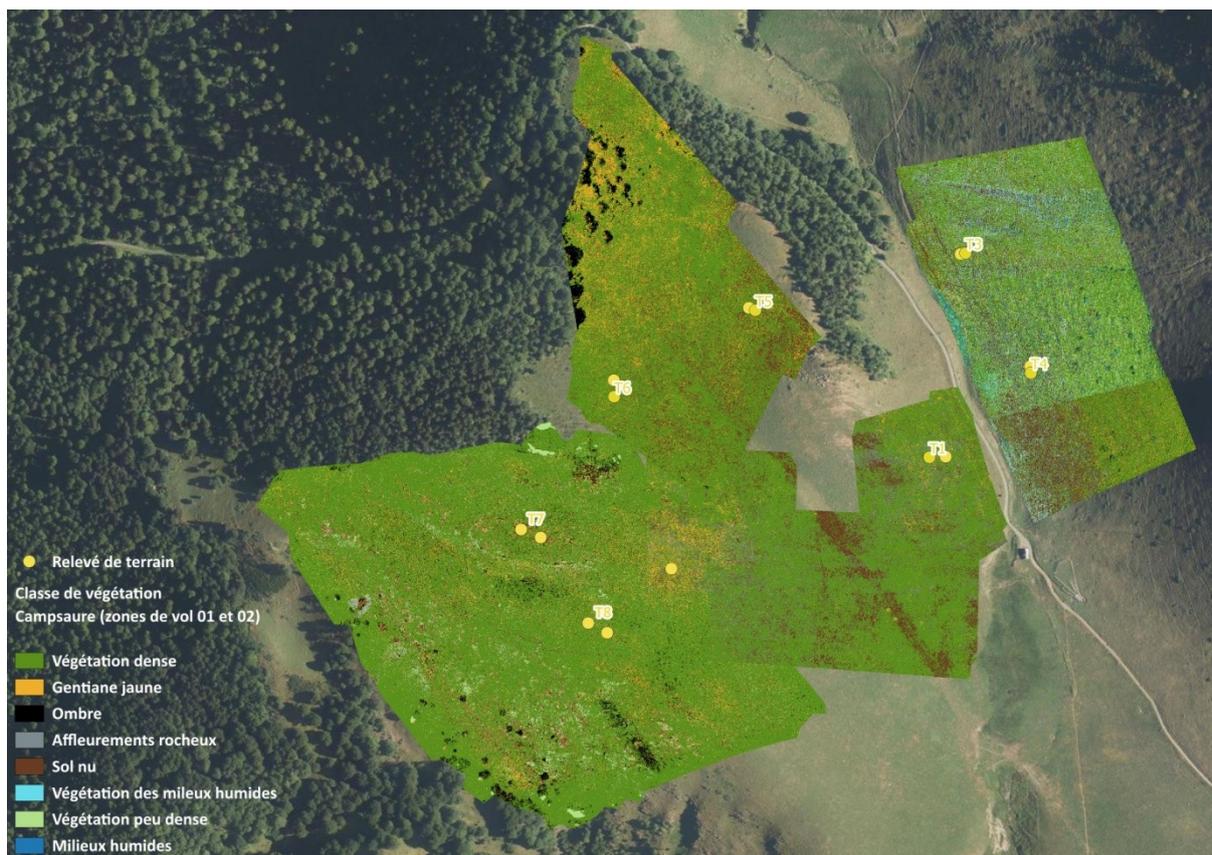


Figure 18 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Campsaure (Zone 01 et 02)

En procédant à une vérification visuelle des résultats, on constate des zones d'artefacts où la modélisation révèle ses insuffisances, surtout là où les conditions d'éclairage changent durant le vol. Dans la zone Campsaure-3, par exemple, des variations de luminosité survenues pendant le vol du drone ont entraîné des défauts dans la modélisation (cf figure 19)

Tableau 5 : Comparaison entre les relevés terrain et les résultats obtenus par modélisation

Identifiant transect	Secteur	Taux de recouvrement (%) estimé par photo-interprétation sur le transect	Taux de recouvrement (%) estimé par la télédétection sur le transect	Taux de recouvrement (%) estimé sur le terrain à l'œil nu
T1	Campsaura-1	21%	19%	35%
T2	Campsaura-1	34%	26%	65%
T3	Campsaura-2	21%	10%	25%
T4	Campsaura-2	11%	7%	10%
T5	Campsaura-1	19%	14%	35%
T6	Campsaura-1	9%	8%	7%
T7	Campsaura-1	69%	52%	40%
T8	Campsaura-1	33%	27%	22%
T9	Campsaura-3	73%	70%	35%

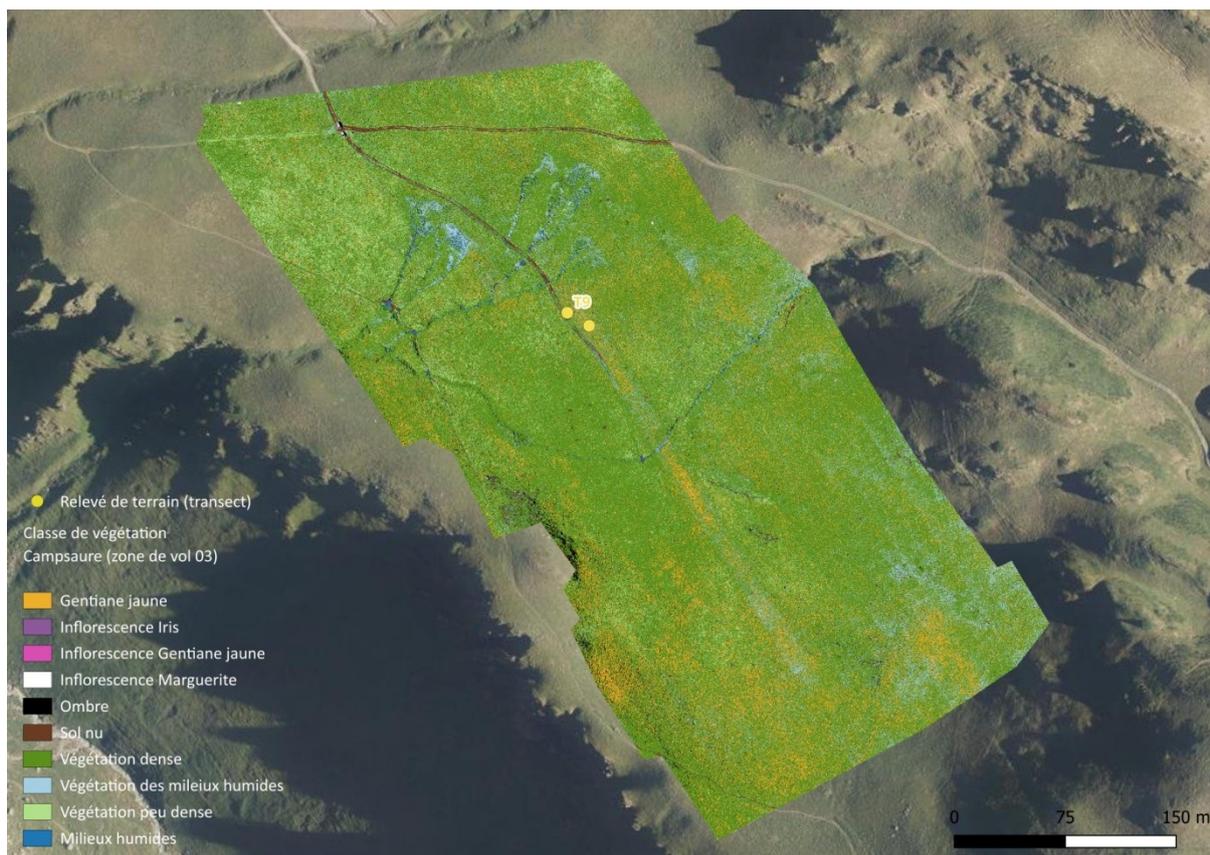


Figure 19 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Campsaure (Zone 03)

IV-2-2-2 Superbagnères :

Tableau 6 : Evaluation du résultat de l'analyse par télédétection sur le site de Superbagnères

Secteur	Zone de survol	Superficie de la rosette télédéteectée dans les transects (en m ²)	Superficie de la rosette en VP	Superficie de la rosette en FP	Superficie de la rosette en FN	Precision	Recall	F1-Score
Superbagnères	Super-B1	6,11	5,03	1,08	4,98	0,8232406	0,5025	0,6241
	Super-B2	35,08	23,02	12,05	10,82	0,6564015	0,6803	0,6681

À Superbagnères, les observations effectuées dans la première zone de survol Super-B1 ressemblent fortement à celles relevées à Campsaure, bien que la précision dépasse 0,8. Malheureusement, dans la deuxième zone Super-B2, on constate un nombre important de faux positifs, principalement à cause de la confusion entre la Gentiane et d'autres types de végétation, comme les landes à myrtille et à callune. Cette situation est due à une augmentation de la hauteur de vol, ce qui nuit à la résolution des images et entraîne davantage de confusions. Cela se reflète dans le tableau comparatif (tableau 7 ci-dessous), en effet le taux de recouvrement par photo-interprétation est inférieur pour les transects T3, T5 et T6, situés dans la deuxième zone de survol Super-B2.

Tableau 7 : Comparaison entre les relevés terrain et les résultats obtenus par modélisation

Identifiant transect	Secteur	Taux de recouvrement (%) estimé par photo-interprétation sur le transect	Taux de recouvrement (%) estimé par la télédétection sur le transect	Taux de recouvrement (%) estimé sur le terrain à l'œil nu
T1	Super-B1	6%	6%	3%
T2	Super-B1	44%	24%	25%
T3	Super-B2	38%	39%	20%
T4	Super-B2	55%	38%	30%
T5	Super-B2	40%	42%	20%
T6	Super-B2	37%	56%	20%



Figure 20 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Superbagnères (Zone 01 et 02)

IV-2-2-3 Esquierry :

Tableau 8 : Evaluation du résultat de l'analyse par télédétection sur le site d'Esquierry

Identifiant transect	Zone de survol	Superficie de la rosette télédétectée dans les transects (en m ²)	Superficie de la rosette en VP	Superficie de la rosette en FP	Superficie de la rosette en FN	Precision	Recall	F1-Score
T1	Esquierry	3,46756651	3,249026503	0,218761759	3,042052	0,9369161	0,5164	0,6659

Pour ce qui est d'Esquierry, même si la précision affichée excède 0.9 (cf. tableau 8), le retour est environ 0.5, ce qui indique que de nombreuses gentianes ont échappé à la modélisation et que leurs effectifs peuvent être sous-estimés. Il convient toutefois de rappeler que cette analyse n'est fondée

que sur les relevés d'un seul transect. Les résultats de l'évaluation montrent des tendances similaires à celles observées à Campsaure, où certaines rosettes n'ont pas été détectées, ou seulement en partie. Cette observation est renforcée par le tableau suivant, dans lequel on peut voir que le recouvrement par photo-interprétation reste toujours supérieur à celui obtenu via la télédétection.

Tableau 9 : Comparaison entre les relevés terrain et les résultats obtenus par modélisation

Identifiant transect	Secteur	Taux de recouvrement (%) estimé par photo-interprétation sur le transect	Taux de recouvrement (%) estimé par la télédétection sur le transect
T1	Esquierry	31%	17%

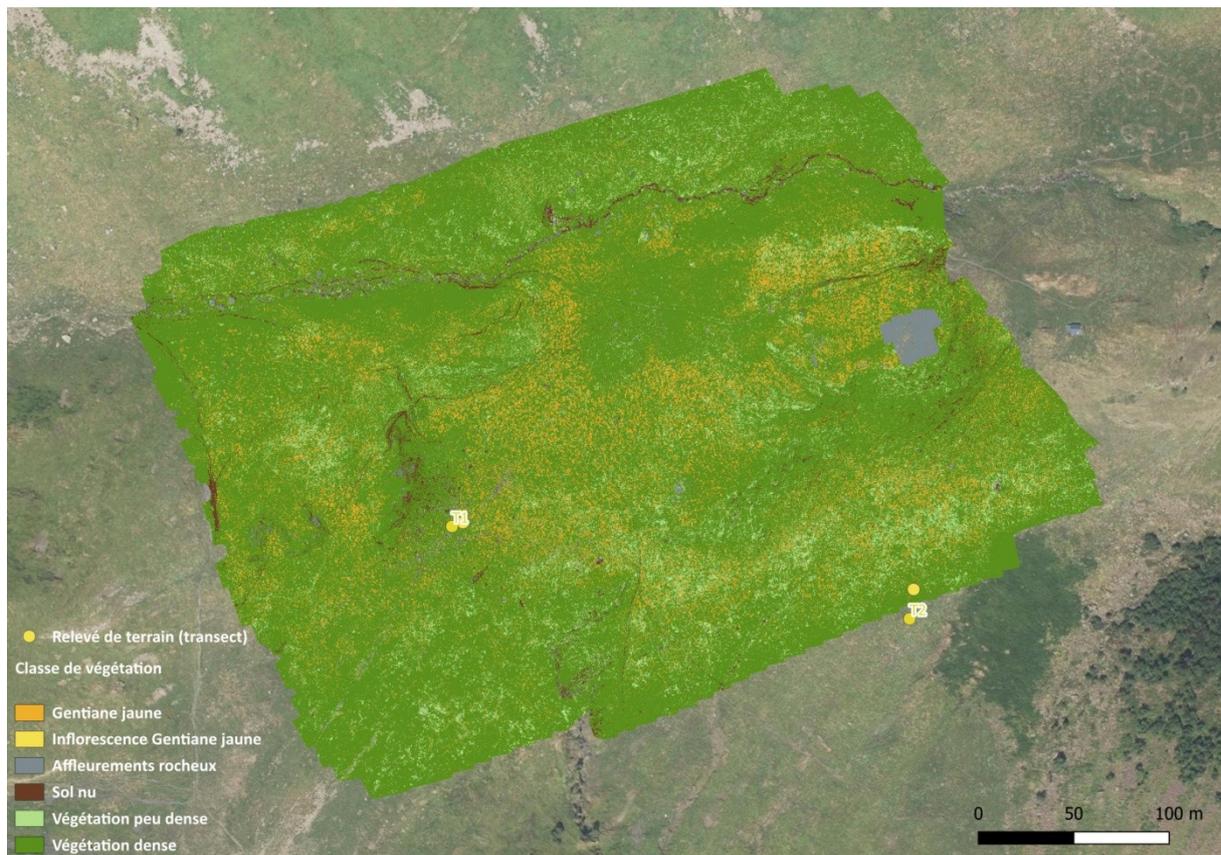


Figure 21 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur d'Esquierry

IV-2-2-4 Montailou :

À Montailou, il n'a pas été possible de réaliser un transect pour tester la validité du modèle. L'évaluation a été effectuée par une vérification visuelle des résultats de la modélisation (cf. figure 22), qui a révélé des confusions possibles entre les rosettes de gentianes et les landes. Cependant, de manière générale, les résultats restent satisfaisants.



Figure 22 : Résultat d'analyse par la télédétection sur le secteur de Montailou (Zone 01 et 02)

IV-3 Indicateurs :

Dans cette partie, nous allons présenter trois indicateurs :

- l'évaluation du taux de recouvrement des rosettes de gentianes, basée sur les résultats de la télédétection en mailles de 1 m². Cet indicateur offrira une vue cartographique de la distribution des rosettes, mettant en avant les zones les plus denses.
- l'estimation de la démographie à partir du classement des rosettes détectées en fonction de leur superficie, permettant ainsi d'observer la répartition des différentes classes de rosettes dans chaque zone de vol.
- le taux de recouvrement par zone de vol que nous comparerons avec celui de 2017, ce qui nous donnera une indication sur l'état actuel de la population et l'intérêt de l'utilisation d'images prises par drone pour la précision des observations.

IV-3-1 Estimation du taux de recouvrement par maille de 1m² :

IV-3-1-1 Campsaure :

La figure 23 présentée ci-dessous met en évidence une disparité dans la répartition des mailles entre les zones de vols Campsaure-1 et Campsaure-2. Dans cette dernière, on note plusieurs secteurs où la Gentiane est absente, surtout dans les milieux humides. De plus, la densité des rosettes semble

augmenter en se dirigeant vers le sud. Quant à Campsaure-1, l'analyse spatiale indique la présence d'îlots où la Gentiane est abondante, le premier étant localisée au nord du site, à la lisière de la forêt, tandis que le second se situe au centre de la zone, avec un recouvrement supérieur à 25%. Dans cette même zone, la Gentiane tend à disparaître progressivement en direction du sud, coïncidant avec la présence de milieux humides.

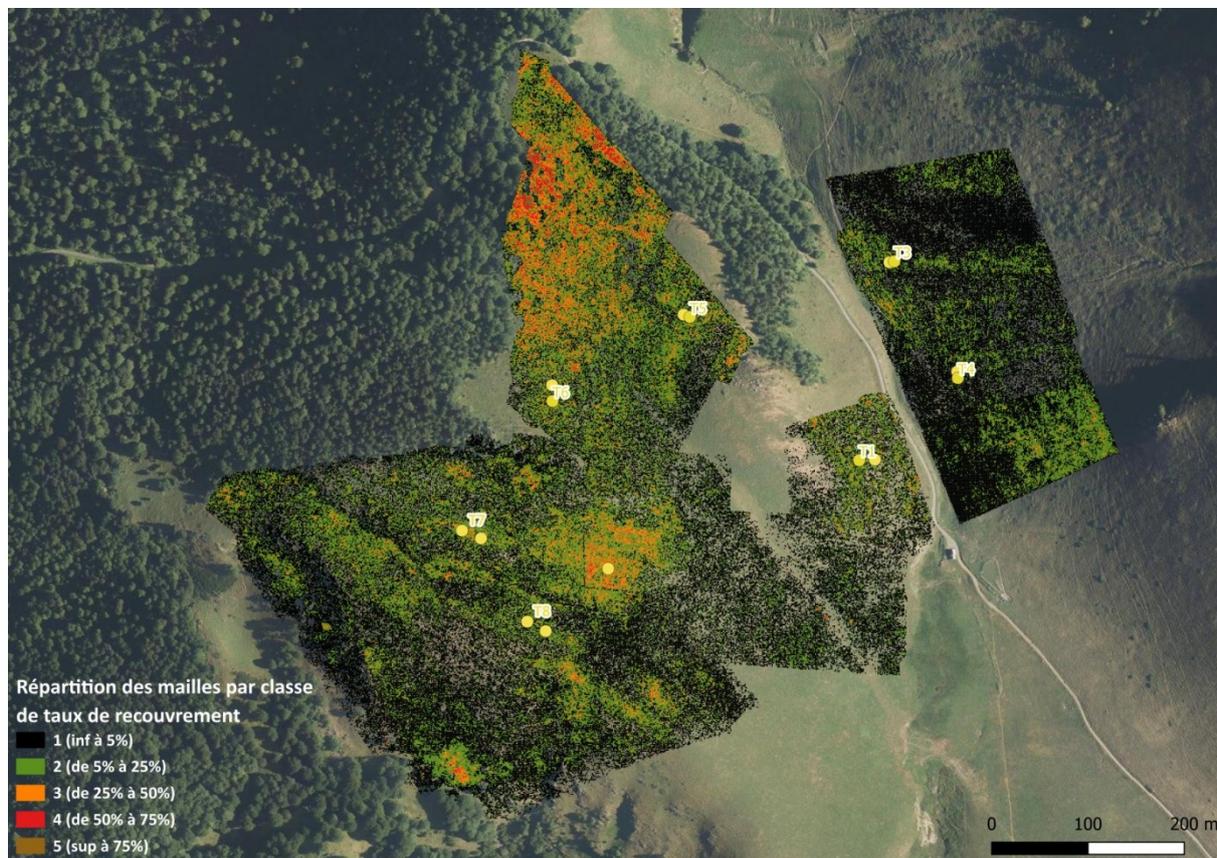


Figure 23 : Répartition spatiale des mailles sur les zones du vol Campsaure-1 et Campsaure-2



Figure 24 : Répartition spatiale des mailles sur la zone du vol Campsaure-3

La carte ci-dessus illustre la présence d'îlots à forte densité, principalement situés au sud de la zone de vol Campsaure-3, ce qui corrobore les explorations réalisées sur le terrain ainsi que les observations effectuées par drone. Les autres îlots, de forme longitudinale, représentent des zones d'artefacts où la modélisation a exagéré la présence de rosettes en raison de variations d'éclairage.

Le digramme ci-dessous (cf. figure 25) confirme que dans la zone Campsaure-2, les rosettes sont moins présentes que dans les autres zones. La première classe y est plus représentée et constitue la majorité des mailles. Dans Campsaure-1 et Campsaure-3, la moitié des mailles présentent un taux de recouvrement supérieur à 5%, avec une forte concentration dans Campsaure-3 pour les classes 2 (de 5% à 25%) et 3 (de 50% à 75%).

Ces observations offrent des pistes pour la gestion de ces sites. Les premières données indiquent que la zone Campsaure-2 ne semble pas avoir une population propice à l'exploitation, contrairement aux autres zones.

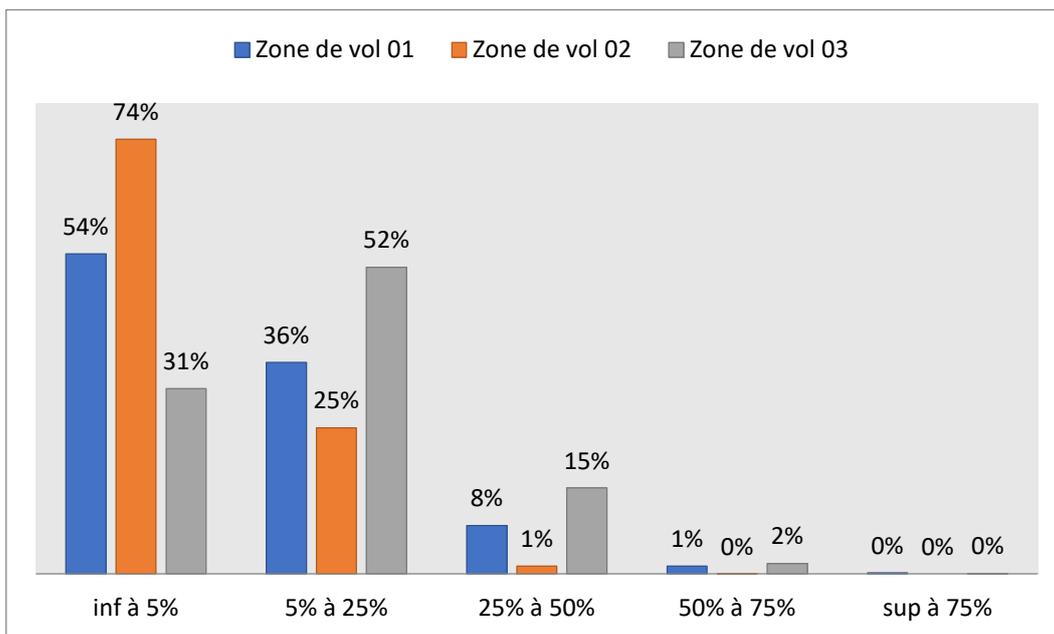


Figure 25 : Proportion de mailles par classe de taux de recouvrement sur les 3 secteurs de Campsaure

IV-3-1-2 Superbagnères :

La carte présentée ci-dessous (cf. figure 26) montre que dans les deux zones de vol Super-B1 et Super-B2, il existe des îlots où la rosette de la gentiane atteint un recouvrement supérieur à 25 %. Dans le premier secteur Super-B1, la zone de fort recouvrement est située au nord du « télésiège du lac », alors que la partie au sud de ce télésiège présente un taux de recouvrement moins élevé.

Dans le second secteur Super-B2, plusieurs zones affichent un recouvrement notable, la première étant au nord de la zone et au nord des « téléskis des Crabioules », tandis qu'une autre zone est adjacente à la route départementale 46. Le dernier secteur se situe au sud, à la lisière de la forêt, et le reste de la zone présente un taux de recouvrement assez faible avec des rosettes dispersées. Les deux secteurs montrent une certaine similitude dans la distribution des mailles, comme l'indique le graphique des histogrammes (cf. figure 27). Ce dernier met en évidence que le deuxième secteur possède un nombre de mailles dépassant de 5 % celui du premier secteur, suggérant que le second secteur a davantage de possibilités d'exploitation que le premier.



Figure 26 : Répartition spatiale des mailles par classe de taux de recouvrement sur 2 secteurs à Super-Bagnères

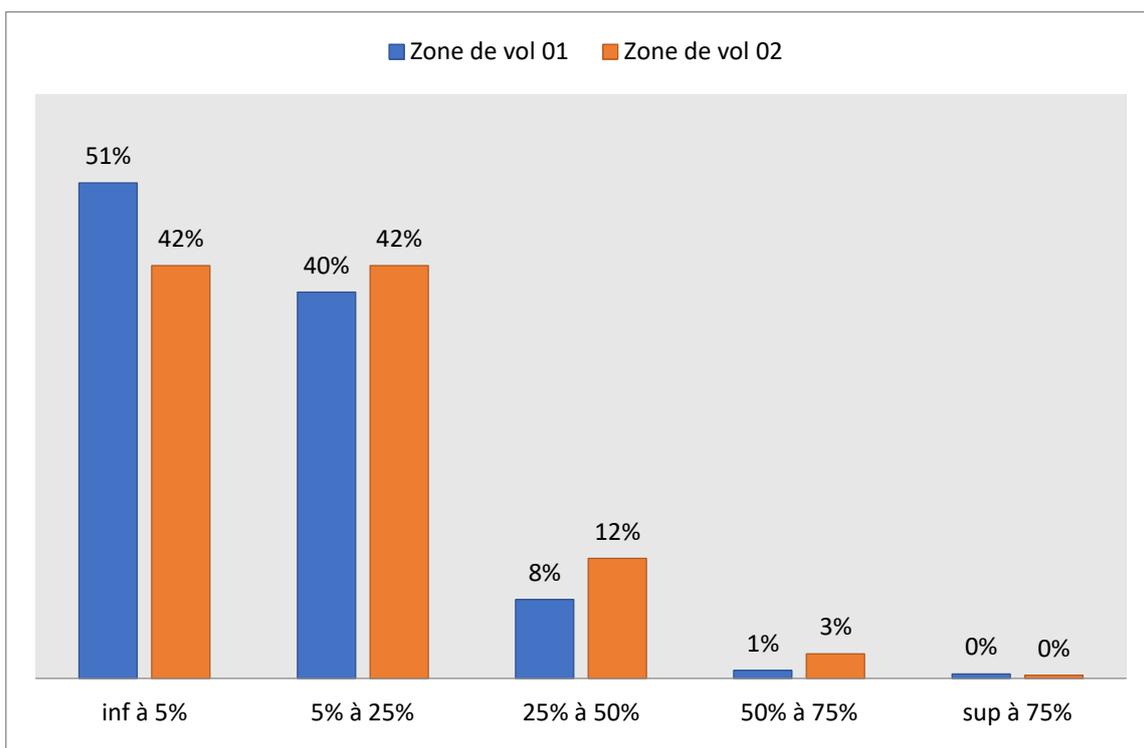


Figure 27 : Répartition des mailles par classe de taux de recouvrement sur 2 secteurs à Super-Bagnères

IV-3-1-3 Esquierry :

La figure 28 ci-après présente une carte de répartition des mailles, montrant qu'au cœur du secteur survolé, le taux de recouvrement est significatif, supérieur à 25 %. En revanche, cette valeur décroît

en direction du nord et de l'ouest de la zone survolée. De plus, le digramme ci-dessous (cf. figure 29) révèle que 50 % des mailles affichent un taux de recouvrement qui dépasse les 5 %.

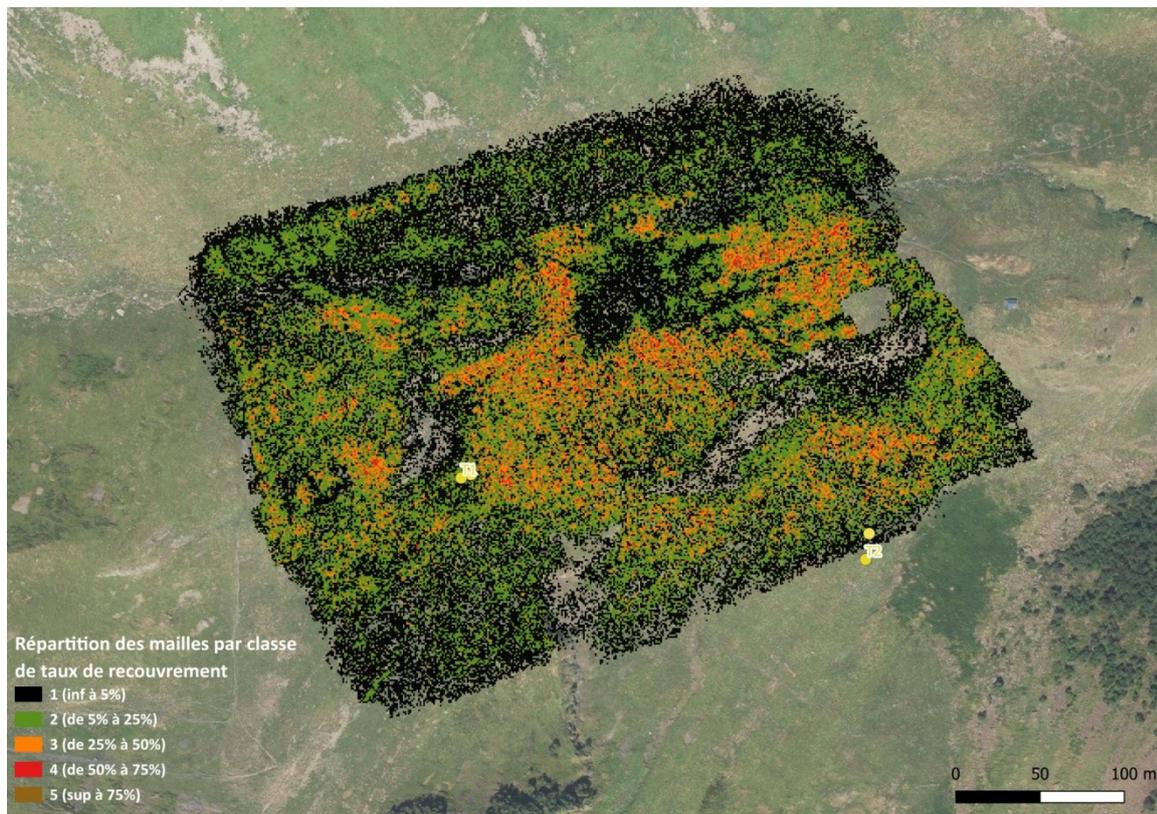


Figure 28 : Répartition spatiale des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry

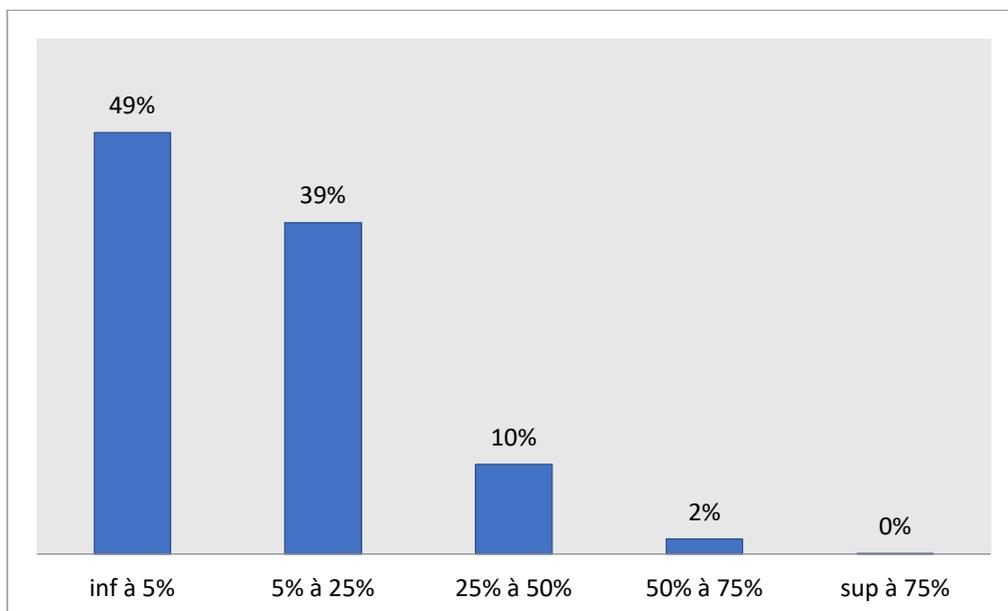


Figure 29 : Répartition des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry

IV-3-1-4 Montaillou :

L'analyse du site de Montaillou révèle une différence claire entre les deux secteurs étudiés (cf. figure 30). Les graphiques indiquent que la première zone présente des enclaves de Gentiane avec un taux de recouvrement significatif, mais sans rosette en dehors de ces enclaves. En revanche, la deuxième zone montre que les rosettes de Gentiane sont dispersées dans toute la zone survolée, avec une homogénéité appréciable, comme le prouve le graphique ci-dessous (cf. figure 31) qui montre que plus de 79 % des mailles affichent un taux de recouvrement inférieur à 5 %. À la lumière de ces observations, la deuxième zone semblait offrir une population plus conséquente, justifiant ainsi son exploitation.

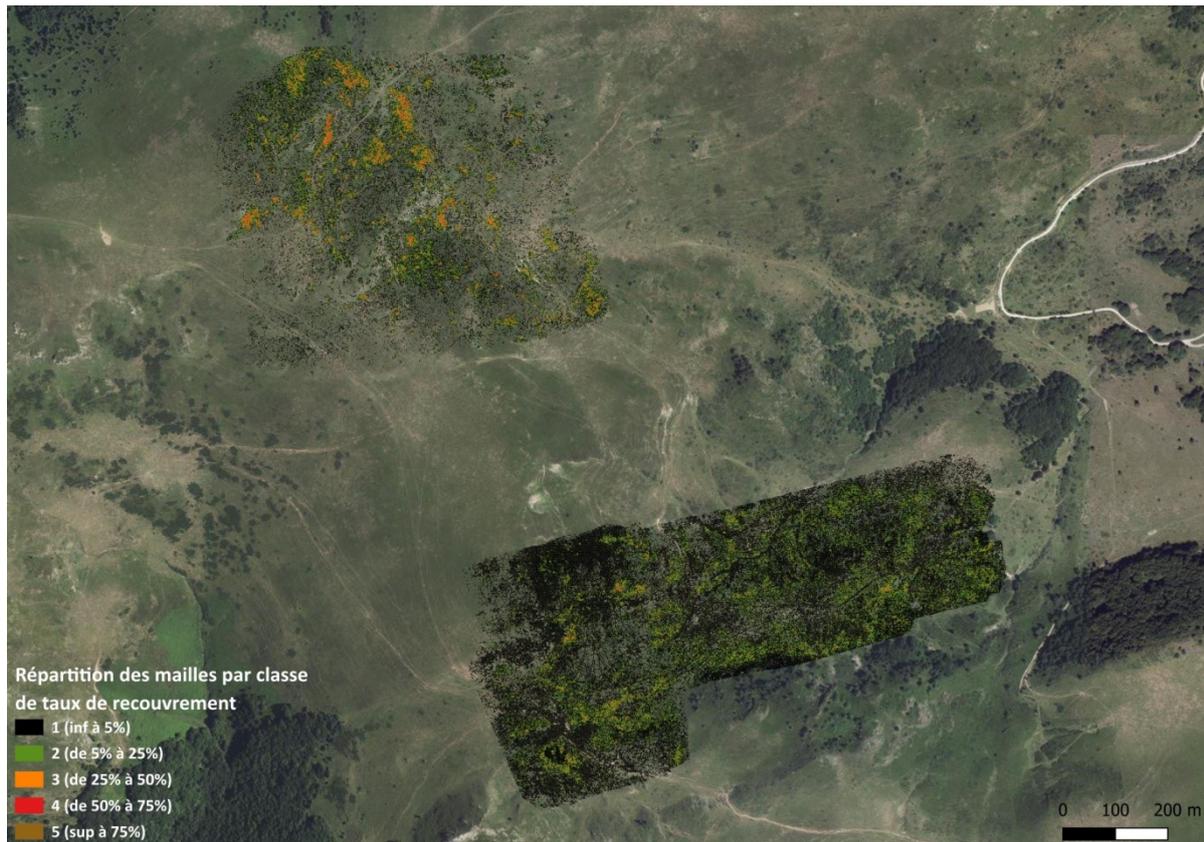


Figure 30 : Répartition spatiale des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry

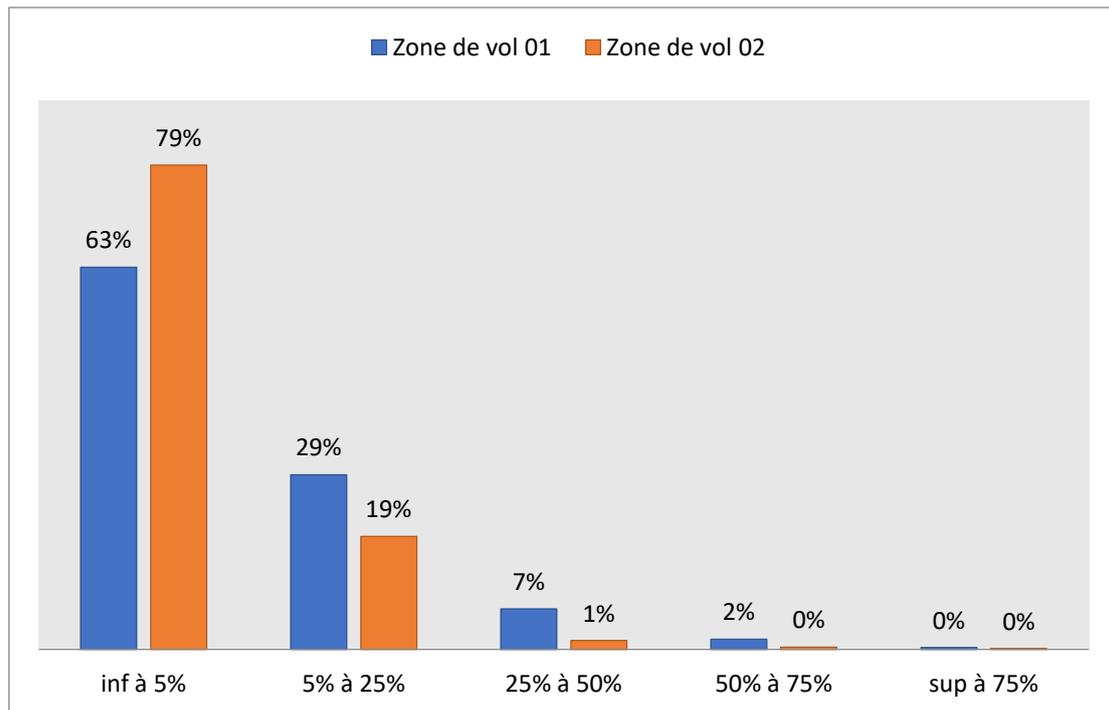


Figure 31 : Répartition des mailles par classe de taux de recouvrement sur Esquierry

IV-3-2 Estimation de la démographie :

L'analyse des relevés montre qu'il est complexe d'établir une corrélation entre la superficie et les différents types de rosettes de gentianes. Le tableau 10 présenté ci-dessous, met en évidence certaines difficultés :

- un nombre insuffisant d'échantillons empêche d'évaluer une superficie moyenne pour les classes a, c, A et D. L'absence d'échantillons pour la classe a est attribuée à la résolution limitée des orthophotos, qui ne permettent pas leur différenciation. En ce qui concerne les classes A et D, cela est dû à leur faible occurrence dans les transects.
- Par ailleurs, le déséquilibre du nombre d'échantillons parmi les transects montre que la classe C est la plus représentée, ce qui pourrait biaiser l'estimation des superficies.

Tableau 10 : statistiques descriptive des classes de démographie basée sur la superficie

Type de rosette	Nombre	Max superficie	Min superficie	Ecartype	Moyenne superficie	Mediane superficie
(b)	24	0,047	0,007	0,010918672	0,021	0,0175
(c)	25	0,099	0,02	0,017375749	0,05	0,046
A	1	0,007	0,007		0,007	0,007
B	43	0,107	0,015	0,01825475	0,041953488	0,04
C	98	0,573	0,053	0,081727311	0,157132653	0,137
D	1	0,34	0,34		0,34	0,34

En se basant sur le tableau ci-dessus et sur l'histogramme en figure 32, nous avons déterminé de manière approximative les surfaces associées à chaque catégorie (cf. tableau 11). Cette analyse n'est pas fondée sur une étude statistique approfondie, mais plutôt sur une comparaison directe entre les surfaces des relevés et leurs emplacements.

Tableau 11 : Classes de démographie basée sur les superficies des rosettes

Classe de démographie	Remarques	Superficie (m ²)
a, b	Renouvelable	<0.03
c ou d ou A ou B	Renouvelable	de 0.03 à 0.08
C ou D	Exploitable	sup 0.08

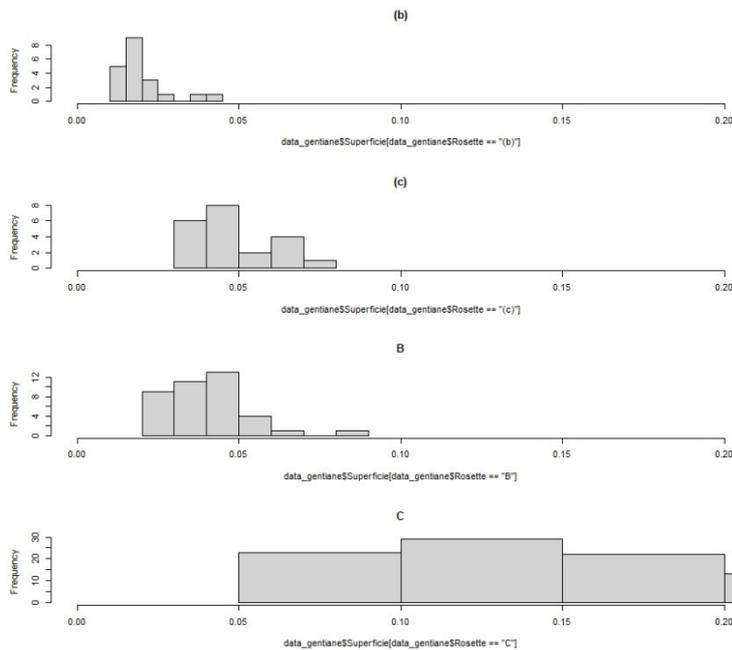


Figure 32 : Histogramme des superficies de chacune de classe de démographie

IV-3-2-1 Campsaure :

Le tableau ci-dessous met en évidence une différence marquée entre les observations sur le terrain et celles issues des résultats de télédétection dans les trois secteurs de Campsaure. Dans ces zones, la proportion de rosettes exploitables (classes démographiques C et D) est nettement supérieure aux relevés effectués sur l'ensemble du site comparés aux données dérivées de la télédétection. Cette variation peut s'expliquer par deux facteurs : d'une part, les relevés ont été réalisés dans des zones où le recouvrement d'espèces exploitables est conséquent et où leurs taux de recouvrement sont élevés. D'autre part, la modélisation engendre un grand nombre de polygones de grande taille, englobant un nombre important de rosettes des classes démographiques C ou D. Malgré cette différence, on peut souligner que l'évaluation des résultats de modélisation à Campsaure indique que ces résultats surpassent la moyenne, ce qui suggère que cette estimation pourrait refléter la réalité et offrir des informations utiles pour la gestion du site.

Tableau 12 : Répartition des rosettes par classes de démographie à Campsaure

Secteur	Zone du vol	Classement par la ressource	Classement par la démographie	Répartition calculée à partir de la télédétection	Répartition calculée à partir des relevés terrains
Campsature	Campsature-1	Renouvellement	a, b	50%	18%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	26%	38%
		Exploitable	C ou D	23%	45%
	Campsature-2	Renouvellement	a, b	54%	9%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	33%	32%
		Exploitable	C ou D	13%	59%
	Campsature-3	Renouvellement	a, b	48%	12%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	32%	33%
		Exploitable	C ou D	20%	54%

IV-3-2-2 Superbagnères :

L'examen du tableau ci-dessous à Superbagnères indique que le secteur Super-B2 présente des observations similaires à celles du site de Campsaure. En revanche, dans le secteur Super-B1, les résultats issus de la télédétection correspondent presque parfaitement à ceux relevés sur le terrain. Il est important de préciser que seulement deux transects ont été effectués dans une région où le taux de recouvrement est faible. Ceci amène à se demander s'il existe une justification pour cette similitude dans les résultats. En comparaison, dans le deuxième secteur, quatre transects ont été choisis dans des zones à fort taux de recouvrement, impliquant que la sélection n'était pas faite au hasard.

Tableau 13 : Répartition de nombre de rosette par classes de démographie à Superbagnères

Secteur	Zone du vol	Classement par la ressource	Classement par la démographie	Répartition calculée à partir de la télédétection	Répartition calculée à partir des relevés terrains
Super-Bagnères	Super-B1	Renouvellement	a, b	43%	43%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	30%	34%
		Exploitable	C ou D	27%	23%
	Super-B2	Renouvellement	a, b	49%	25%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	31%	33%
		Exploitable	C ou D	20%	43%

IV-3-2-3 Esquierry :

À Esquierry, seulement deux transects ont été effectués, et la comparaison révèle que la classe exploitable affiche une différence de 5 %, mais qu'il y a une grande disparité avec les autres classes, probablement en raison d'une sous-estimation de la superficie des rosettes.

Tableau 14 : Répartition de nombre de rosette par classes de demographie à Esquierry

Secteur	Zone du vol	Classement par la ressource	Classement par la démographie	Répartition calculée à partir de la télédétection	Répartition calculée à partir des relevés terrains
Esquierry	1	Renouvellement	a, b	57%	36%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	25%	52%
		Exploitable	C ou D	18%	13%

IV-3-2-4 Montailou :

À Montailou, même sans élément de comparaison avec le terrain, les calculs peuvent donner une indication sur la répartition de la population.

Tableau 15 : Répartition de nombre de rosette par classes de demographie à Montailou

Secteur	Zone du vol	Classement par la ressource	Classement par la démographie	Répartition calculée à partir de la télédétection
Montailou	Montailou-1	Renouvellement	a, b	43%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	30%
		Exploitable	C ou D	27%
	Montailou-2	Renouvellement	a, b	41%
		Renouvellement	c ou d ou A ou B	29%
		Exploitable	C ou D	30%

IV-3-2-5 Récapitulatif :

Le diagramme en figure 33 présente une comparaison entre les différents secteurs survolés par le drone, en séparant les rosettes exploitables de celles destinées au renouvellement. Il apparaît que seul le Campsaure-2 et le secteur d'Esquierry présentent une partie exploitable en dessous de 20 %. Cette situation peut s'expliquer par la fermeture du site d'exploitation, qui a favorisé le développement des classes pour le renouvellement et diminué les classes exploitables en raison de la sur-cueillette. Cela nécessite une étude plus poussée et des recherches sur les qualités des produits récoltés.

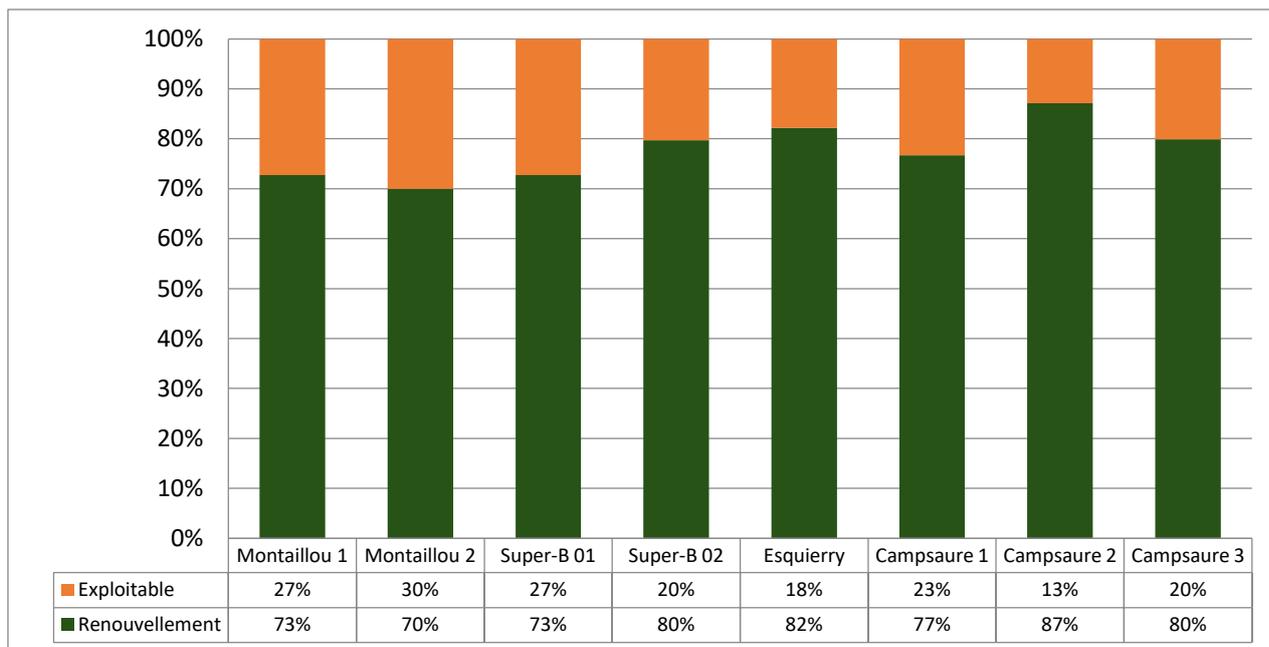


Figure 33 : Proportion des rosettes exploitables ou non sur tous les sites

IV-3-3 Calcul du taux de recouvrement par zone de vol et comparaison avec la cartographie de 2017 :

Le tableau ci-dessous illustre la variation entre le taux de recouvrement estimé et celui enregistré en 2017. Cette variation est significative sur presque tous les sites, à l'exception de celui d'Esquierry. Cela met en évidence l'efficacité du drone pour fournir une évaluation précise du taux de recouvrement dans un secteur donné. Ce taux a été déterminé sur l'ensemble de la zone couverte par le drone, qui s'étend sur plusieurs hectares.

Tableau 16 : Comparaison entre les taux de recouvrement de 2017 et ceux calculés par la télédétection

Secteur	Zone de vol	Superficie de la zone de vol (m ²)	Superficie de la rosette de gentiane télédétectée	Taux de recouvrement par télédétection	Taux de recouvrement estimé en 2017
Campsaure	Campsaure-1	273085,2578	18900,17537	7%	40%
	Campsaure-2	69161,78961	2450,197509	4%	40%
	Campsaure-3	147231,828	15868,2553	11%	10%
Super-Bagnères	Super-B1	154471,9311	11949,01068	8%	30%
	Super-B2	373971,6985	32220,84882	9%	30%
Esquierry	1	127535,8112	11241,67832	9%	0,2 à 0,25%
Montaillou	Montaillou-1	384311,2109	9077,451074	2%	
	Montaillou-2	378543,9623	30585,10454	8%	

V Conclusion :

L'utilisation d'images prises par drone pour la surveillance de la Gentiane jaune a franchi une nouvelle étape dans le cadre de PyCup+. Au cours de ce programme, le drone a survolé 190 hectares, et 13 hectares de rosettes de gentianes ont été cartographiés sur 4 sites. Les indicateurs produits pourraient être utilisés par les gestionnaires pour éclairer leurs décisions concernant l'exploitation et la préservation de la Gentiane jaune.

Ces deux années 2022 et 2023 ont permis d'atteindre un stade opérationnel après une année d'expérimentation durant PyCup en 2021.

Ces deux années ont également permis d'évaluer le temps nécessaire pour étudier un site : il faut prévoir une journée pour survoler environ 20 ha avec une résolution de 1 cm. Pour chaque journée de vol, il faut ajouter une demi-journée pour générer une orthophoto et au moins 3 jours pour analyser les données par télédétection, suivis de deux jours pour produire des indicateurs. Tout cela en supposant qu'il n'y ait pas de contraintes pendant les jours de vol qui pourraient retarder l'opération.

Un autre apport de cette étude est le choix de la résolution pour survoler la Gentiane. Diverses résolutions ont été utilisées durant le programme. Ces résolutions ont montré que les analyses ne produisent pas les mêmes précisions. Ces précisions dépendent également du type d'habitat où se trouve la Gentiane jaune. Pour mener une étude précise de la démographie de la Gentiane, il est préférable de survoler avec une résolution comprise entre 0,8 et 1 cm. L'objectif est de suivre la répartition spatiale et de produire le taux de recouvrement ; il est possible de survoler la Gentiane avec une résolution de 2,5 cm, ce qui permet de couvrir une superficie d'environ 30 ha en une journée avec 2 heures d'autonomie. En revanche, si la Gentiane est située dans un environnement où la végétation est relativement haute et couvre partiellement ou totalement sa rosette, il est impératif de réaliser un survol à une résolution inférieure à 1 cm, quel que soit l'objectif du vol.

PyCup+ a permis de faire évoluer la méthode des relevés de terrain en intégrant une schématisation de la localisation des rosettes, dans le but de réaliser une cartographie démographique des populations, en se basant sur la superficie occupée par chaque rosette et le nombre de rosettes pour estimer la part exploitable. Ce type de relevé, bien que précieux, reste insuffisant pour fournir suffisamment d'informations afin d'établir une relation entre la superficie et la classe de la rosette. Pour obtenir plus de renseignements, il serait recommandé, lors des prochaines campagnes, d'augmenter la superficie du relevé de 20 m² à 40 m² afin d'inclure un maximum de types de rosettes, en particulier les plus rares des classes A et D. De plus, il serait judicieux de schématiser tout le transect afin d'augmenter le nombre d'échantillons. En dépit de la population insuffisante, les informations collectées ont permis de mieux comprendre la classe C, qui présente une trop grande hétérogénéité au niveau de la superficie, rendant difficile l'estimation de la part exploitable.

Ces relevés ont permis de faire des comparaisons entre les estimations réalisées sur le terrain et celles fournies par le drone concernant le taux de recouvrement. De plus, ils ont permis de poser les bases d'une première expérimentation pour classifier la démographie et d'obtenir une idée de la part exploitable.

PyCup+ a renforcé les acquis du programme PyCup en fournissant une vision sur la répartition spatiale de la Gentiane, cette fois sur plusieurs hectares. Cette contribution, lorsqu'elle est comparée à d'autres cartographies, démontre la précision que peut offrir l'utilisation de drone pour cartographier les zones de répartition de la Gentiane jaune. Avec ces informations sur la répartition,

ajoutées au taux de recouvrement et à la démographie, on obtient des éléments essentiels pour la gestion d'un site.

Les perspectives, avec plus de temps, seraient d'améliorer les techniques d'analyse par télédétection, explorer d'autres méthodes, et réussir à créer un modèle qui pourrait être reproduit sur d'autres sites.

SIEGE & CORRESPONDANCE :

Vallon de Salut • BP 70315 • 65203 Bagnères-de-Bigorre Cedex

Tél : 05 62 95 85 30 • Mél : contact@cbnmp.fr

www.cbnmp.fr

