RAPPORT DE PRODUCTION

- Processus érosifs en Nouvelle-Calédonie-
Rapport de prétraitement (SPOT6-7)

- Classification niveaux 1, 2 et 3-

Référence : **19D0102_SP7_OEIL_Erosion_vf**

Date	Version	Auteurs	Commentaires
30/06/2020	1.0	INSIGHT	-

INSIGHT SAS, 7 rue Fleming ZI Ducos 98800 Nouméa - Contact : geo-contact@insight.nc

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Table des matières

1. INTRODUCTION 6
2. METHODOLOGIE 7
3. BIBLIOGRAPHIE 8
4. LIVRABLES 9
5. SECTEUR D'INTERET 10
6. DONNEES SOURCES 11
7. PRETRAITEMENTS 12
7.1. Ombres topographiques 13
8. Classification semi-automatisée aux niveaux N1 14
8.1. Sols nus à partir d'imagerie spatiale 14
8.2. Détection des sols nus ou peu végétalisés (N1) 16
8.2.1. Masque « Ombres » 18
8.2.2. Masque « Nuages » 19
8.2.3. Détection des sols nus et peu végétalisés 19
8.2.4. Analyse surfacique (N1) 22
9. Classification N2 23
9.1. Analyse surfacique (N2) 24
10. Classification N3 : 25
10.1. Sols nus cartographiés sur les zones test et limites identifiées 25
10.2. Classification du niveau 3 (N3) : Règles de décision & connaissances expertes 26
10.2.1. Zones Aménagées 28
10.2.2. Les aménagements indifférenciés 29
10.2.3. Sols peu végétalisés : 30
10.2.4. Zones significativement brûlées 31
10.2.5. « Sédiment & colluvion » et « Fond de vallée indifférencié »: 32
10.2.6. Zones de ravinement et ravine isolée 33
10.2.7. Les classes réalisées par photo-interprétation 34

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.8. Cuirasse à nu 35
10.3. Analyse surfacique N3 36
10.4. Affectation des attributs « Type » et « Origine » 37
10.4.1. L'attribut « Type » : 37
10.4.2. L'attribut « Origine » 39
10.4.3. Attribution par arbre décisionnel 40
Verses Contrôlée, chantier, carrière 40
Pistes 42
Sédiments, colluvions 44
Ravine isolée 44
11. Détection et classification des sols nus de 1976 46
11.1. Rehaussement de contraste : 48
11.2. Ouverture morphologique 48
11.3. Seuillage : 49
11.4. Carte d'évolution : 50
12. Contrôle qualité 52
12.1. Le contrôle qualité par l'expert thématique 53
12.2. Contrôle qualité du Niveau 1 2018 54
12.3. Contrôle qualité du Niveau 2 2018 56
12.4. Contrôle qualité du Niveau 3 2018 56

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Liste des figures

Figure 1 : Zone d'intérêt de l'étude proposée par INSIGHT. 10
Figure 2 : Graphique des taux de CN et angles d'incidences. 11
Figure 3 : Chaîne de prétraitements générique INSIGHT. 12
Figure 4 : Contrôle du couvert nuageux. 12
Figure 5 : Zoom sur les seuillages d'ombres topographiques. 13
Figure 6 : protocole méthodologique pour la classification des Niveaux 1 & 2 des sols nus ou peu végétalisés à partir d'images SPOT 6/7 20
Figure 7:Répartition des surfaces au niveau 1. 22
Figure 8:Répartition des surfaces N2 de la catégorie sols nus 24
Figure 9 : schéma simplifié de la méthodologie suivie pour la classification du niveau 3 des sols nus ou peu végétalisés à partir d'images SPOT 6/7 27
Figure 10 : Illustration représentant les aménagements divers : à gauche : « Carrière/Chantier/Verse Contrôlée », « Bâti & surface imperméabilisée » et « Pistes » ; à droite la classe « Décharge non contrôlée/Arasement » 28
Figure 11 : Illustration de secteurs classés en « Aménagements indifférencié » 29
Figure 12 : illustration représentant les « Aménagement indifférencié », en orange, autour des zones d'extraction « Carrière/Chantier/verse contrôlée » en jaune. 29
Figure 13 : Zone brûlée dans le secteur de la montagne des sources 31
Figure 14 : Illustration de zones de « Sédiment & colluvion » en jaune et de « Fond de vallée indifférencié » en rouge 32
Figure 15 : illustration des zones de « Falaise / Escarpement rocheux », en jaune, sur la zone littorale 34
Figure 16:Répartition des surfaces N3 pour les catégories aménagement et indifférencié. 36
Figure 17 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Verse contrôle, chantier, carrière » 41
Figure 18 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Piste » 43
Figure 19 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Sédiments & colluvions » 44
Figure 20 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Ravine isolée » 45
Figure 21:Centroïdes de photos de la campagne IGN-1976 (1/20 000 source DITTT). 46
Figure 22 : Exemple de la mine de Thio : gauche la mosaïque, à droite l'ortho photo unitaire de 1976 47
Figure 23:Diagramme méthodologique de traitement (1976). 47
Figure 23 : Illustration du rehaussement de contraste sur le secteur de Thio : à gauche l'image brut, à droite l'image rehaussée. 48

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Figure 24 : Illustration de l'ouverture morphologique sur le secteur de Thio : à gauche l'image rehaussée, à droite l'ouverture morphologique appliquée à la zone 49
Figure 25 : carte de répartition des zones de contrôle tous niveaux confondus (source : Rouet, I ; 2020)..... 54
Figure 26 : carte de répartition des zones de contrôle pour les Niveau N1 et N2 (source : Rouet, I ; 2020)..... 55
Figure 27 : Répartition des zones de contrôle intermédiaire (source : Rouet, I ; 2020).... 57
Figure 28 : Répartition des zones de contrôle final (source : Rouet, I ; 2020)..... 58

Liste des tableaux et équations

Tableau 1 : Récapitulatifs des caractéristiques des acquisitions. 11
Tableau 2: Surfaces d'ombres topographiques. 13
Tableau 3 : Typologie des formes érosives en 3 niveaux 15
Tableau 4 : Récapitulatif des seuils appliqués pour la détection du N1 21
Tableau 5: Récapitulatif des surface par type (N1). 22
Tableau 6:Récapitulatif des surface par type (N2). 24
Tableau 7:Récapitulatif des surface par type (N3, sols nus uniquement)..... 36
Tableau 8 : Description et valeurs pour l'attribut « Type » 37
Tableau 9: Attribution de la valeur de Type selon la classe N3 des formes 2018. 38
Tableau 10 : Description et valeurs proposées pour l'attribut « Origine »..... 39
Tableau 11 : Règle d'affectation directe de l'attribut « Origine » selon la classe 40
Tableau 12 : tableau récapitulatif des seuils appliqués en fonction des classes 49
Tableau 13 : Récapitulatif des surfaces contrôlées quantitativement aux trois niveaux de classification (les superficies sont exprimées en km²) source Rouet, I., 2020 53
Tableau 14 : quantification de la qualité du Niveau N1 effectué sur les objets supérieurs à 100 m² (source : Rouet, I ; 2020) 55
Tableau 15 : Tableau quantitatif des précisions de classification du niveau N2 (source : Rouet, I ; 2020 modifié)..... 56
Tableau 16 : quantification du contrôle qualité sur les catégories de sol nus ou peu végétalisés (source : Rouet, I ; 2020 modifié) 59
Tableau 17 : tableau des correspondances des objets avec les classes issues de la typologie post atelier 1 61

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

1. INTRODUCTION

Le présent document, entièrement réalisé par l'équipe INSIGHT, consiste en un rapport présentant les aspects techniques et thématiques de l'étude la cartographie des sols nus et dégradés, participants ans le phénomène de l'érosion, dans la Province Sud. La demande, établie par **l'Observatoire de l'Environnement en Nouvelle-Calédonie** (ci-après l'OEIL), porte plus spécifiquement sur l'identification et la cartographie des formes érosives, leurs origines ainsi que leur évolution diachronique entre 1976 et 2018.

Le travail présenté dans ce rapport répond aux objectifs suivants :

- Acquérir un fond d'imagerie adaptée à la thématique des formes d'érosion sur le territoire calédonien.

- A partir de ces images, produire la première cartographie de référence des objets participant au processus d'érosion physique et d'associer aux différents objets des informations (origine de la forme, dynamique spatiotemporelle…).

L'imagerie satellitaire, combinée à des techniques de traitement de données, permet de produire rapidement des cartographies thématiques de manière fréquente permettant l'étude des évolutions des surfaces observées. Le recours à ce type de données permet un gain de temps, un travail incrémental (le fait de disposer de cartes des états précédents facilite la production de nouvelles cartes) et assure la qualité et la continuité des résultats. Enfin, cela permet l'analyse des changements détectés voire leur simulation.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

2. METHODOLOGIE

La présente étude se base sur une mise en application de méthodologies validées et une confrontation des résultats basés sur de l'utilisation d'imagerie spatiale et de relevés terrain. Elle se focalise dans ce cadre présent sur une approche par télédétection à partir d'imagerie HR SPOT 6/7 (Airbus D&S) associée à la connaissance d'experts thématiques pour la cartographie des sols nus et dégradés.

Il convient donc de commencer par définir ce qu'on entend par la cartographie par imagerie de télédétection :

> *Il s'agit d'une représentation concise (donc simplifiée) tout en restituant les éléments essentiels dans le respect des règles de sémiologie. L'imagerie satellite permet d'appréhender les objets physiques, biologiques et morphologiques de la surface des terres émergées et pouvant être décrit en termes de types d'occupation des sol*[1]*.*
>
> *L'enjeu principal des cartes d'occupation des sols est de* ***délimiter, d'inventorier et de comprendre les évolutions et les tendances des typologies au cours du temps afin d'en expliquer les déterminismes et d'en prévenir le devenir****.*[2]

Les processus de production de carte d'occupation des sols à partir d'images satellites sont souvent basés sur des méthodes de classification d'image.

Cette classification d'image peut être :

- **Supervisée** : on utilise des zones de réalités terrain (dont on connait l'affectation) pour procéder à l'apprentissage et par la suite à la généralisation des modèles appris.
- **Non supervisée** : les pixels sont regroupés par similarité, l'analyse thématique (les classes) intervient à posteriori.

La classification supervisée fournit souvent de meilleurs résultats, mais elle nécessite des données de référence pour l'apprentissage qui peuvent-être longues et coûteuses à obtenir (campagnes sur le terrain, photo-interprétation, etc.).

Pour répondre aux exigences de qualité et d'échelle d'exploitation, une classification dirigée a été privilégiée dans ce travail. Les bases de connaissances (issues entre autres

[1] *Il est entendu ici une « occupation du sol » au sens large.*
Nous soulignons également qu'aucune distinction ne sera faite ici entre l'occupation et l'usage des sols qui sous-entend de faire le lien avec des facteurs d'influence naturels ou humains
[2] **Baghdadi, N., et Zribi, M., 2016 :** Observation des surfaces continentales par télédétection I, Vol.3.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

du travail de l'expert thématique sur des zones tests) ont permis de mettre en place un protocole de classification semi-automatique robuste et fiable.

3. BIBLIOGRAPHIE

Afin de mener au mieux ce travail, l'équipe d'INSIGHT s'est appuyée sur les études de références, ainsi qu'une revue bibliographique enrichie au fil du temps sur les approches de classification d'imagerie de télédétection. De plus, dans le cadre du présent projet, il nous apparait nécessaire de citer certaines références incontournables ayant déjà traité le sujet de l'érosion en Nouvelle-Calédonie et dont INSIGHT relève un intérêt majeur (*liste non exhaustive*) :

- Les travaux menés par Pascal DUMAS

DUMAS P. 2010. Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta – Boulouparis (Nouvelle-Calédonie).

LUNEAU G., DUMAS P. 2006. Projet GERSA – Spatialisation de l'aléa érosion en Nouvelle-Calédonie. Nouméa, New Caledonia : Coral Reef Initiatives for the Pacific (CRISP). 79 p.

- Les travaux dirigés par l'OEIL

ROUET I., 2012. Cartographie de l'érosion en province Sud – Inventaire des données existantes dans la perspective d'un suivi cartographique de l'érosion. *Rouetis R&D 201206-01V, 16 p. pour l'OEIL.*

OEIL-BERTAUD A., 2013. Suivi des pressions associées à l'érosion dans les milieux naturels : panorama des principales méthodes de suivi.

ASCONIT Consultants. 2016. Surveillance de la pression érosion dans les milieux naturels situés dans la zone d'influence du site industriel et minier de Vale NC.

- Autres

PRINTEMPS J. 2007. Estimation et spatialisation de l'érosion hydrique des sols en Nouvelle-Calédonie : utilisation de l'équation universelle de perte de sol assistée d'un SIG sur les communes de Voh, Koné et Pouembout.

ROUET I., 2009. Thèse : Caractérisation et éléments de quantification d'aléas naturels liés à l'évolution des versants dans les massifs ultrabasiques de Nouvelle-Calédonie.

ESPIGAT M. 2010. Etude des sites dégradés du Grand Sud de la Nouvelle-Calédonie.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

4. LIVRABLES

Les livrables cette phase de traitements sont les suivants :

- **LE RAPPORT DE PRODUCTION TECHNIQUE**
  Format PDF (Version 1.7 sans compression, ISO32000) ce présent document.

- **DONNEES BRUTES DE DETECTION DES SOLS NUS DE 2018 AU NIVEAU 1**
  Format raster GeoTiff 8 bits, EPSG3163.
  UMC = 0.01Ha

- **RASTERS DE CLASSIFICATION BRUTS DES FORMES EROSIVES DE 2018 (N1, N2, N3)**
  Format raster GeoTiff 8 bits, EPSG3163.
  UMC = 0.25Ha

- **LES DONNEES VECTORIELLES DE CLASSIFICATION DES SOLS NUS ET DEGRADES DE 2018 (N1, N2, N3) *(UMC : 0.25ha)***
  Format vectoriel Shapefile, EPSG3163, métadonnées ISO19115.

- **DONNEES BRUTES DE DETECTION DES SOLS NUS DE 1976 AU NIVEAU 1**
  Format raster GeoTiff 8 bits, EPSG3163.
  UMC = 0.01Ha

- **RASTERS DE CLASSIFICATION BRUTS DES FORMES EROSIVES DE 1976 (N1, N2)**
  Format raster GeoTiff 8 bits, EPSG3163.
  UMC = 0.25Ha

- **DONNEES VECTORIELLES DES FORMES D'EROSION DE 1976 CLASSIFIEES (N1, N2)**
  Format vectoriel Shapefile, EPSG3163, métadonnées ISO19139.
  UMC = 0.25Ha

- **LES EVOLUTIONS DES FORMES EROSIVES ENTRE 1976 ET 2018**
  Format vectoriel Shapefile, EPSG3163, métadonnées ISO19139.

- **LES VISUELS CARTOGRAPHIQUES SEPARES 2018**
  Format image A4 (PNG 32bits, 800dpi et PDF).

Nota Bene : *La prestation inclut la sauvegarde par INSIGHT des livrables pendant 4 mois à compter du jour de livraison. Ainsi, compte tenu des volumes, ces derniers peuvent être réceptionnés directement dans nos locaux via un matériel de stockage externe NTFS.*

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

5. SECTEUR D'INTERET

L'étude porte sur la Province Sud incluant les terres émergées (Grande Terre et îlots terrestres) ainsi que l'Ile des Pins. Soit en tout **7.235 km²** (en rouge sur la Figure 1).

Figure 1 : Zone d'intérêt de l'étude proposée par INSIGHT.

Nota Bene : *L'intégralité des calculs de surfaces effectuées dans le cadre de ce projet seront rapportés à la surface de l'AOI mentionnée ici (i.e. Les taux de couverture nuageuse). De plus, les surfaces annoncées correspondent à des surfaces projetées et non topographiques.*

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

6. DONNEES SOURCES

Dans le cadre de cette étude, 12 images SPOT 6/7 ont été sélectionnées afin d'obtenir une couverture optimum et garantir un taux de couverture nuageuse **inférieur à 5%** (CDC).

Tableau 1 : Récapitulatifs des caractéristiques des acquisitions.

ID segment	Date Acquisition	CN	Angle d'incidence
DS_SPOT6_201805282239435_FR1_FR1_SV1_SV1_E165S21_03251	28/05/2018	5	18,35843918
DS_SPOT6_201807242250086_FR1_FR1_SV1_SV1_E166S22_03251	24/07/2018	4	13,07052617
DS_SPOT6_201804112251216_FR1_FR1_SV1_SV1_E166S22_01790	11/04/2018	10	16,29855127
DS_SPOT6_201807242250332_FR1_FR1_SV1_SV1_E166S22_02277	24/07/2018	1,3	18,00024915
DS_SPOT6_201806022250442_FR1_FR1_SV1_SV1_E166S22_03251	02/06/2018	2	18,31003562
DS_SPOT7_201812022242577_FR1_FR1_SV1_SV1_E167S22_01871	02/12/2018	1,5	6,942545042
DS_SPOT7_201808202243349_FR1_FR1_SV1_SV1_E167S22_02358	20/08/2018	16,7	7,288447628
DS_SPOT6_201807192239140_FR1_FR1_SV1_SV1_E167S22_02358	19/07/2018	52,2	2,515343223
DS_SPOT7_201806032243514_FR1_FR1_SV1_SV1_E167S22_01871	03/06/2018	4,5	6,949769704
DS_SPOT7_201811252246470_FR1_FR1_SV1_SV1_E167S22_01871	25/11/2018	10,9	15,1730479
DS_SPOT6_201804062240030_FR1_FR1_SV1_SV1_E166S22_03332	06/04/2018	16	11,7541542
DS_SPOT7_201811272231519_FR1_FR1_SV1_SV1_E167S23_01222	27/11/2018	0	11,83195496

La plage temporelle des acquisitions s'étale du **5 Avril 2018 au 2 Décembre 2018**.

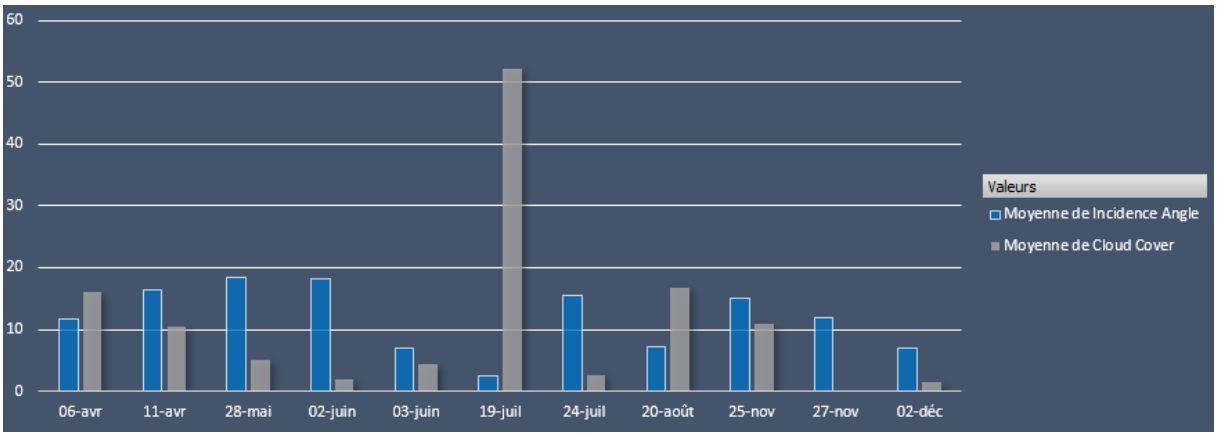


Figure 2 : Graphique des taux de CN et angles d'incidences.

Il est à noter que le lancement d'acquisitions spéculatives par INSIGHT a permis :

- D'obtenir une couverture complète sur une **plage temporelle réduite**
- De **réduire les couts** de la donnée source

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

7. PRETRAITEMENTS

Ce point a fait l'objet d'un rapport de production indépendant envoyé précédemment. Nous invitons les intéressés à le consulter pour une vue détaillée de l'ensemble des prétraitements dont ont fait l'objet les images SPOT 6/7 de 2018.
Le schéma ci-dessous repend les principales opérations réalisées sur les données de 2018.

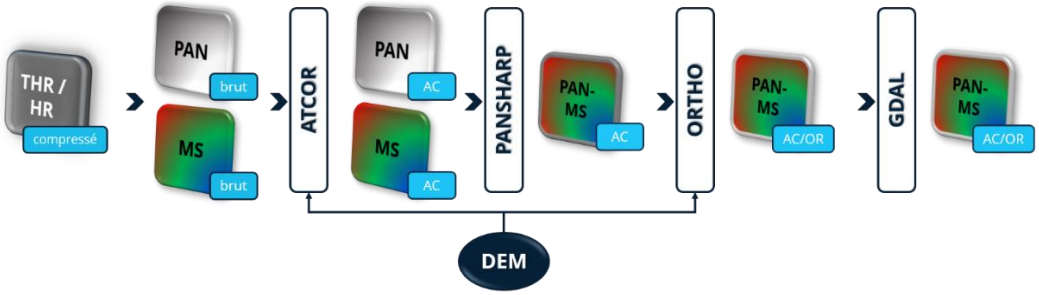


Figure 3 : Chaîne de prétraitements générique INSIGHT.

A l'issue des prétraitements, INSIGHT a fourni une Mosaïque finale présentant un taux de couverture nuageuse de **moins de 2 %** (taux calculé par digitalisation exhaustive des nuages et ombres portées) conforme aux spécifications du cahier des charges de l'OEIL. La figure ci-dessous en est l'illustration.

Figure 4 : Contrôle du couvert nuageux.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

7.1. Ombres topographiques

Le relief de la Nouvelle-Calédonie est particulièrement accidenté, est à l'origine d'ombres topographiques plus ou moins importantes en fonction des dates et conditions d'acquisition. C'est pourquoi une attention particulière a été apportée sur ce point afin d'identifier et de quantifier les secteurs impactés et inexploitables pour la suite des opérations de classification. Cet élément a également fait l'objet d'une présentation détaillée sur le rapport de production spécifiques aux prétraitements envoyés précédemment.
En résumé, plusieurs seuillages ont été effectués sur les images avec une analyse des surfaces (comptage du nombre de pixels satisfaisant la condition de seuillage) correspondantes nous permet d'estimer les surfaces suivantes :

Tableau 2: Surfaces d'ombres topographiques.

Seuils d'illumination	**Surface (Km2)**	**% AOI**
-0,67	135,267831	**1,851969209**
-0,5	703,083556	**9,626007065**

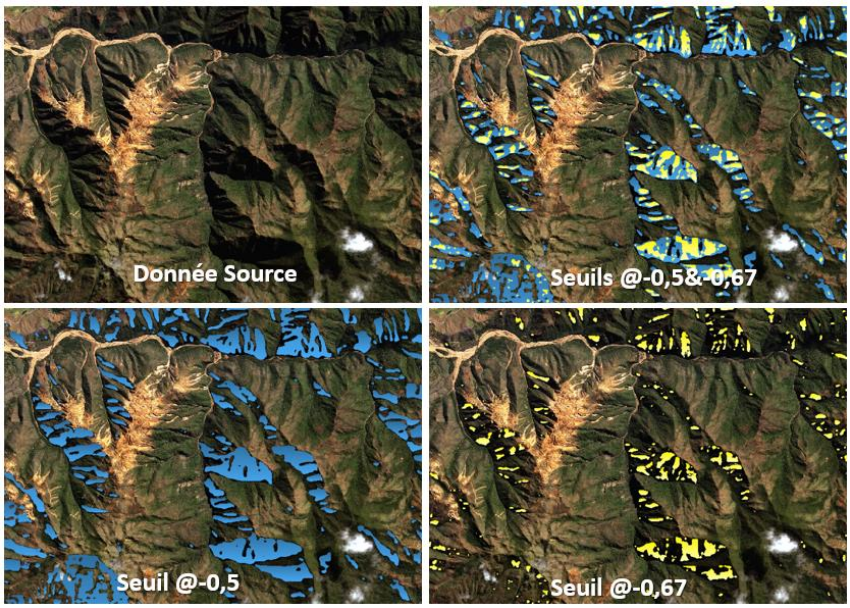


Figure 5 : Zoom sur les seuillages d'ombres topographiques.

Rappelons que la répartition des zones d'ombre se concentrent sur les acquisitions hivernales (angle zénithal bas) et qui contrastent avec les acquisitions du grand Sud (Novembre 2018). Les chiffres annoncés ici sont moyennées sur l'ensemble de la surface de l'AOI.

Après examen des seuils et discussion lors de l'atelier 1, le seuil retenu est le plus conservatoire **(-0.67 soit 2% de la zone**) pour limiter les zones inexploitables au minimum.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

8. CLASSIFICATION SEMI-AUTOMATISEE AUX NIVEAUX N1

8.1. Sols nus à partir d'imagerie spatiale

L'étude des sols nus est une thématique bien étudiée dans le domaine de la télédétection depuis plusieurs dizaines d'années et plus particulièrement à partir d'imagerie optique.

En effet, les signatures spectrales d'un sol dépourvu de végétation sont bien spécifiques et facilement détectables à partir de différents indices scientifiquement éprouvés.

La typologie retenue pour ce travail a fait l'objet de discussion lors d'un Atelier thématique réunissant les principaux acteurs du domaine en Nouvelle-Calédonie. L'atelier, organisé conjointement par l'OEIL et INSIGHT/ROUETIS, s'est tenu en début de projet afin notamment d'aboutir à un consensus autour de la typologie retenue.

Il a ainsi été conclu lors de cet atelier une classification à trois niveaux de détails :

- **Niveau 1 :** 3 classes
- **Niveau 2 :** 5 classes
- **Niveau 3 :** 17 classes

À l'issue du second atelier de travail, la typologie des formes érosives retenues a été réajustée en incluant les conclusions de la phase de test réalisé afin de lever les différents biais et limites liés à la thématique et aux données utilisées. Le Tableau ci-dessous reprend la typologie finale retenue et validée par l'ensemble des utilisateurs impliqués.

Un N0 représente un masque de données valides. Un résiduel de nuages et des ombres topographiques subsistent sur les images et ne peuvent être exploitée pour l'étude en cours. C'est pourquoi ces secteurs seront exclus de la suite des traitements.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Tableau 3 : Typologie des formes érosives en 3 niveaux

Typologie 2018			
N0	**N1**	**N2**	**N3**
Données non exploitables	**Nuages**	**Nuages**	**Nuages**
	Ombres topographiques	**Ombres topographiques**	**Ombres topographiques**
Données exploitables	Autre	Autre	Autre
	Eau	Eau	Eau statique
			Eau dynamique
	Sol non ou peu végétalisé	Aménagement	Carrière, zone de chantier, verse contrôlée
			Décharge non contrôlée & arasement
			Piste
			Bâti et autres surfaces imperméabilisées
			Aménagement indifférencié
		Sol nu ou peu végétalisé indifférencié	Sol nu faiblement végétalisé
			Surface significativement brûlée
			Ravine
			Zone de ravinement
			Falaise, escarpement rocheux actif
			Mouvement de terrain & Éboulis
			Cuirasse
			Sédiments et colluvions
			Fond de vallée indifférencié
			Sol nu indifférencié

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Afin d'aboutir à la classification recherchée, nous avons procédé par étapes successives en fonction du niveau visé et des caractéristiques des classes à déterminer. Les principales phases sont résumées ci-dessous :

- Détection des sols nus ou peu végétalisés à partir des néocanaux :
- NDVI, Water Index, Indice de Brillance (BI).
- Classification supervisée des sous-ensembles de sols nus et dégradés
- Contrôle opérateur de la classification produite basé sur la connaissance experte.

Plusieurs campagnes de contrôle terrain par l'Expert local ont eu lieu durant la phase de classification des zones test afin d'accompagner au mieux le processus de traitement de ces zones.

8.2. Détection des sols nus ou peu végétalisés (N1)

Une liste d'indices biophysiques et d'activités de la végétation ont été testés dans ce travail, seul les indices les plus pertinents ont été retenus pour la classification N1.

La classification se base sur ces différents indices traitant tour à tour le potentiel des bandes spectrales du capteur utilisé :

- **NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et Haas 1973)

C'est l'indice de végétation le plus largement utilisé pour l'extraction des propriétés biophysiques du couvert végétal.
Cet indice est sensible à la vigueur et l'activité photosynthétique de la canopée. Cet indice minimise l'effet topographique et a l'avantage d'être borné entre [-1 et 1].

$$NDVI = \frac{(\rho nir - \rho red)}{(\rho nir + \rho red)}$$

$$avec$$

$$\rho red : Valeursdans \leq rouge$$

$$\rho nir : Valeurdans \leq procheinfra - rouge$$

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

- **NDWI**: Normalized Difference Water Index de (McFeeters, 1996)

Cet indice est sensible à la présence d'eau et l'humidité des sols.

$$NDWI = \frac{(\rho green - \rho nir)}{(\rho green + \rho nir)}$$

$$avec$$

$$\rho green : Valeursdans \leq vert$$

$$\rho nir : Valeurdans \leq procheinfra - rouge$$

- **SARVI**: Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (Kaufman 1992)[3]

Cet indice traduit l'activité de la végétation en minimisant les effets atmosphériques et les effets du sol, intéressant notamment pour des végétations basses et ouvertes. Le SARVI est en moyenne quatre fois moins sensible aux effets atmosphériques que le NDVI. Sa résistance aux effets atmosphériques est obtenue par un processus d'auto-correction de l'effet atmosphérique sur le canal rouge, en utilisant la différence de luminance énergétique entre les canaux bleu et rouge pour corriger celle-ci dans le canal rouge.

$$SARVI = \frac{(\rho nir - RB) \times (1 + L)}{(\rho nir + RB + L)}$$

$$avec$$

$$RB = \rho red - Gamma \times (\rho blue - \rho red) Gamma = Aerosolcontentstabilizationfactor : 1L = VegetationCoverCorrectionfactor : 0.5$$

3 Kaufman, Y.J., Tanre, D., 1992 : Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, Issue :2, p : 261-270.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

- **BI** : Brightness Index

C'est l'indice de brillance le plus utilisé, il s'agit d'un indicateur de teinte des sols nus et des roches, sa formule est la suivante :

$$BI = \sqrt{(\rho red^2 + \rho nir^2)}$$

$$avec$$

$$\rho red : Valeurs dans \leq rouge avec$$

$$\rho nir : Valeur dans \leq proche infra - rouge$$

Le BI met en évidence :

- L'humidité des sols ;
- Les rugosités de surface ;
- La couleur des sols ;

Dans le cadre de ce projet en plus de son utilisation pour la détection des sols nus, il a été utilisé pour la détection des zones d'ombres.

8.2.1. *Masque « Ombres »*

Les ombres topographiques peuvent être à l'origine d'erreurs de classification. C'est pourquoi, des cartes d'illumination ont été produites au début de ce travail, afin d'avoir une estimation des zones inexploitables.

Lors du premier atelier, nous avions présenté notre méthodologie de détection des ombres topographiques qui faisait intervenir les éléments topographiques tels que les pentes et leur orientation en fonction de l'azimut et de l'élévation solaire. Des cartes d'illuminations ont alors été produites pour chaque image, ce qui a permis d'aboutir à une carte d'illumination globale sur l'ensemble de la zone d'étude.

Cette carte présentait en outre localement des défauts liés au MNT à l'origine des calculs de pente et de l'orientation. C'est pourquoi nous avons choisi de l'utiliser comme donnée de référence, en excluant les zones de défauts évidents, afin de valider un masque d'ombre capable de traiter autant les ombres topographiques, les ombres projetées comme celles des nuages et des bâtiments.

Un protocole de masquage a été élaboré grâce à l'utilisation des pentes et de l'indice de brillance, qui en plus d'être utilisé pour la détection des sols nus, a permis de réaliser un masquage des ombres de manière optimale.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Après évaluation de l'expert, des ajustements manuels ont pu être effectués afin de limiter toute confusion avec les surfaces en eau.

8.2.2. *Masque « Nuages »*

Un premier masque a été effectué sur les zones les plus ennuagées et, bien que ne représentant que 2 % de la surface totale de la zone concernée par l'étude, ces secteurs (ainsi que les ombres portées des nuages) apparaissent encore comme trop étendus. Ceci est vrai pour la zone de la Dumbea par exemple, secteur fortement concerné par le phénomène d'érosion.
C'est pourquoi une stratégie de masquage plus fine a été élaborée, permettant ainsi de limiter le masque uniquement aux secteurs inexploitables.
Le masquage a fait appel à une transformation des bandes du visible vers des valeurs de saturation, luminosité et teinte. Un seuillage a par la suite permis de détecter les nuages les plus épais. Ce masque a également été corrigé manuellement pour éliminer les voiles nuageux qui détériorent l'information spectrale utilisée pour la suite des traitements.
Ainsi, grâce à cette stratégie conservatoire, nous avons pu réduire les zones de nuages au strict minimum et de ce fait optimiser les données à exploiter.

8.2.3. *Détection des sols nus et peu végétalisés*

Le point le plus délicat à ce niveau de la typologie est de déterminer des limites claires entre les « sols nus ou faiblement végétalisés » et les autres classes (eau, autres).
Une classification emboitée par seuillage des indices a été opérée pour chaque image. Les seuils ont été fixés par examen des histogrammes et ajustés par la suite de manière empirique jusqu'à obtention des résultats optimaux. Ci-après le protocole de classification avec les principales étapes de traitements

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

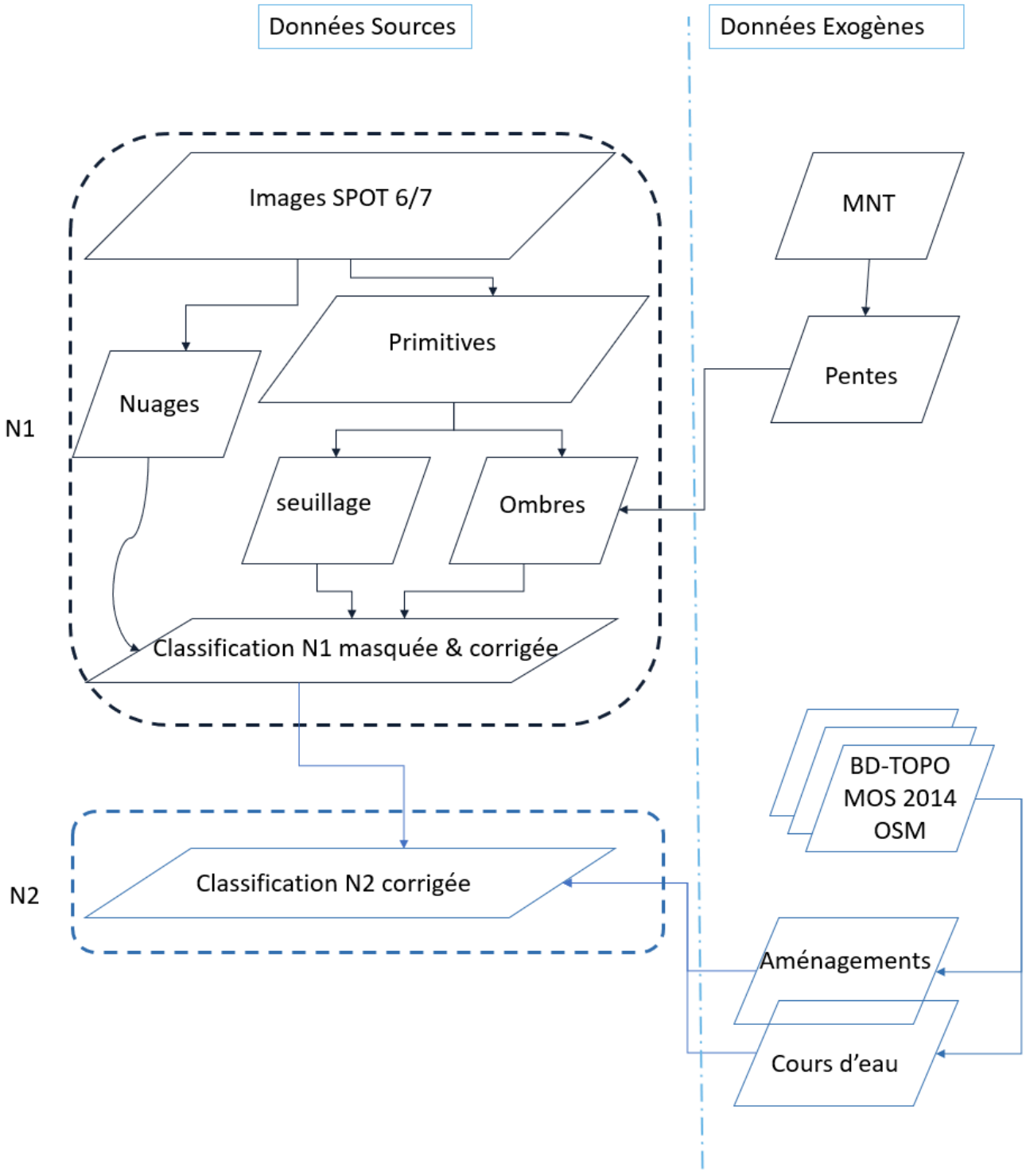


Figure 6 : protocole méthodologique pour la classification des Niveaux 1 & 2 des sols nus ou peu végétalisés à partir d'images SPOT 6/7

La couverture de la zone de travail est composée de 11 images SPOT avec des dates et des conditions de prise de vue diverses, aussi la recherche de seuils optimaux a été

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

réalisée pour chaque image. Ci-dessous le tableau récapitulatif des seuils appliqués à cette étude.

Tableau 4 : Récapitulatif des seuils appliqués pour la détection du N1

Date de prise de vue	NDVI		NDWI	BI	
	Seuil 1	Seuil 2	Seuil	Seuil 1	Seuil 2
20180604	**0,35**	0,45	-0,5	60	35
20180411	**0,4**	0,5	-0,6	80	60
20180528	**0,35**	0,46	-0,55	110	80
20180602	**0,41**	0,5	-0,5	100	70
20180603	**0,41**	0,5	-0,55	100	60
20180719	**0,41**	0,5	-0,5	120	60
20180724-1	**0,38**	0,48	-0,5	120	66
20180724-2	**0,41**	0,5	-0,55	120	50
20181125	**0,41**	0,5	-0,5	100	80
20181127	**0,41**	0,5	-0,55	80	80
20181202	**0,41**	0,5	-0,55	80	80

Avec :

NDVI seuil 1	Limite supérieure des sols nus
NDVI seuil 2	Limite supérieure des sols peu végétalisés
BI seuil1	Limite supérieure des ombres
BI seuil2	Limite supérieure des ombres sur secteurs en eau

Enfin, Conformément à la Proposition technique d'INSIGHT, l'unité minimale de collecte (UMC) est fixée à 100 m² pour le N1. Un lissage des objets détectés a donc été opéré pour parvenir à l'UMC retenue et les objets de surface inférieure à l'UMC ont été éliminés.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

8.2.4. *Analyse surfacique (N1)*

Les résultats de la classification de niveau 1 en termes de répartition de surface sont présentés ici.

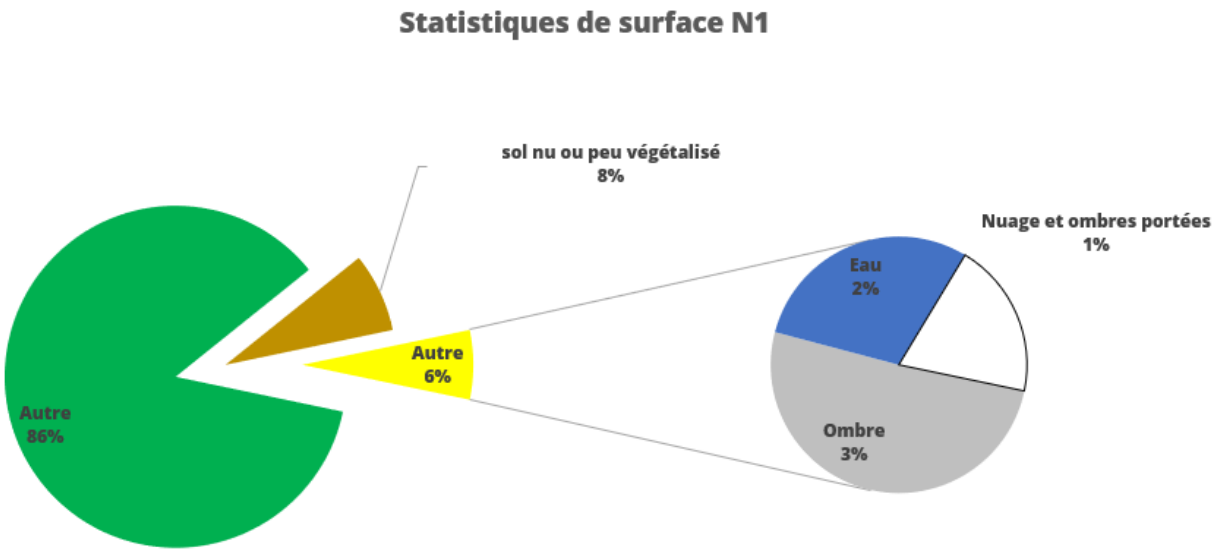


Figure 7:Répartition des surfaces au niveau 1.

Tableau 5: Récapitulatif des surface par type (N1).

Catégories (N1)	Surface (Km2)
Autre	6225
Sol nu ou peu végétalisé	542
Ombre	241
Eau	140
Nuage et ombres portées	93
Total général	**7241**

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

9. CLASSIFICATION N2

La classification au niveau 2 est basée sur le croisement des résultats du N1 avec les données exogènes disponibles pour aboutir aux cinq classes visées.
Un travail en amont a été réalisé pour compiler, corriger et compléter les données disponibles (MOS 2014, BD-Topo). Un croisement a par la suite permis de créer le N2 avec les classes suivantes :

- Nuage
- Ombre
- Autre
- Eau
- Aménagements
- Sols nus indifférenciés

Une phase de vérification et de correction par photo-interprétation a également été conduite pour aboutir au N2 final.
A ce stade l'UMC retenue dans le CDC est de 0.25 ha soit 2500 m² ; seuls les objets supérieurs à cette limite ont ainsi été conservés pour ce niveau de nomenclature.
L'algorithme appliqué suppose l'intégration des objets de petite taille dans les objets voisins plus grands. Le passage d'une UMC de 100 m² à 2500 m² génère ainsi une perte, qui peut-être selon les thèmes considérés, parfois significative des objets inférieurs à 2500 m² et ce par des processus de réaffectation entre classes.
Cet élément a été souligné lors de l'Atelier 2 et a été significatif pour la classe « Aménagements » dont les objets sont de petite taille comme les voies de communication (objets linéaires) ou encore le bâti.

À la suite des discussions de l'Atelier 2 autour des pertes et basculements d'objets inférieurs à l'UMC de 2500 m², INSIGHT a proposé de ne pas appliquer de filtre spatial sur la classification du niveau 3, ainsi , **le niveau 3 de la classification a été réalisé à 100 m² d'UMC**.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

9.1. Analyse surfacique (N2)

Les résultats de la classification de niveau 2 en termes de répartition de surface sont présentés ici.

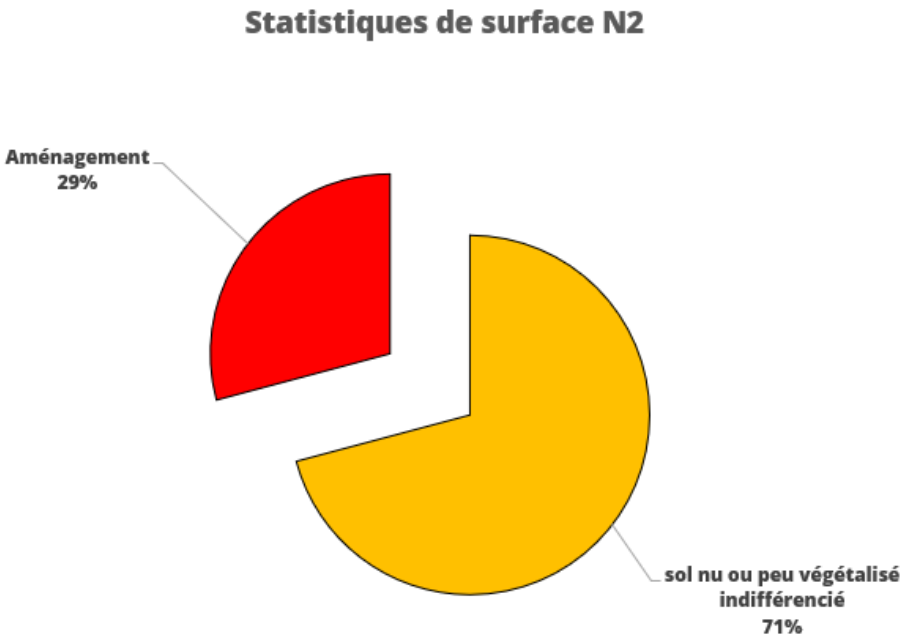


Figure 8:Répartition des surfaces N2 de la catégorie sols nus .

Tableau 6:Récapitulatif des surface par type (N2).

Catégories (N2)	Surface (Km2)
Autre	6225
Sol nu ou peu végétalisé indifférencié	**384**
Ombre	241
Aménagement	**158**
Eau	140
Nuage et ombres portées	93
Total général	**7241**

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10. CLASSIFICATION N3 :

10.1. Sols nus cartographiés sur les zones test et limites identifiées

La cartographie N3 sur les zones test a été basée sur des traitements d'image semi-automatisés complétés par photo-interprétation sur les images de 2018 (N1 brut non filtré, non lissé). Lorsqu'il n'a pas été possible d'effectuer un contrôle terrain pour lever une incertitude, c'est la classe la moins précise de la typologie qui est retenue au bénéfice du doute. Du fait de l'objectif de cartographie initiale, les données d'imagerie exogènes (à d'autres dates) ont été utilisées pour faciliter l'interprétation sans malgré tout perdre de vue l'objectif de conserver la limite de détection en autonomie sur les images de 2018 (certains objets sont par ailleurs différents d'une date à l'autre).

Rappel : dans ce projet, on entend par érosion tout phénomène ou processus perceptible à l'échelle humaine qui mobilise de la matière solide à la surface, essentiellement sous l'action du ruissellement et de la gravité– sont par conséquent exclues l'érosion chimique, souterraine et littorale. L'érosion conduit à des zones de départ, de transit et de dépôt des matières mobilisées.

Les classes initialement discutées et définies lors de l'atelier 1 ont fait l'objet d'une définition détaillée par les experts thématiques. Une liste des objets inclus pour chaque classe est également détaillée dans le tableau fourni en annexe.

Les limites et possibles imprécisions/confusions suite à la cartographie N3 sur les zones test sont également relevées et détaillées dans le guide technico-méthodologique présenté en Atelier 2 et remis avec le présent rapport. Ci-après les conclusions de la phase de tests et de développement méthodologique en rappel des principaux enseignements tirés de cette phase.

« …D'une importance capitale, la phase de tests et de développements méthodologiques a permis de mieux cerner les possibilités et les limites liées à la donnée source et à la thématique de l'érosion. En effet, elle aura permis de mettre en relation d'une part les attendus thématiques, en termes de typologie et de formes érosives à distinguer notamment, et d'autre part les possibilités techniques pour répondre à ces attendus tout en considérant les données utilisables pour ce faire.

En ce sens, il ressort que certaines classes apparaissent comme assez facilement discernables par photo-interprétation, bien que nécessitant tout de même pour base un guide méthodologique relativement fourni généré par l'expert thématique. A contrario, d'autres classes s'avèrent beaucoup plus sujettes à la subjectivité de l'opérateur, et donc à interprétation et discussions.

De la détection à la classification, il apparait en outre que les classes majoritaires retenues, représentant une majeure partie des formes érosives, s'avère pouvoir faire

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

l'objet d'un traitement semi-automatisé voire automatisé, avec des résultats prometteurs et reproductibles, garantissant de réduire au minimum les biais d'erreur induits par une approche exclusivement basée sur la photo-interprétation.

Par ailleurs, considérant les images satellites utilisées avec notamment une richesse spectrale limitée, une résolution de 1,5 m et des dates de prise de vue étalées dans l'année, ainsi que la qualité et la complétude des données exogènes disponibles ou encore la nature des objets à discerner, la cartographie des formes érosives par photo-interprétation reste un travail inéluctable.

Aussi, malgré quelques limites rencontrées dans ce travail préliminaire, les approches méthodologiques explorées sont encourageantes et laissent entrevoir une part importante d'automatisation des procédés.

Ces résultats préliminaires resteront à confirmer en phase de généralisation avec davantage de recul sur l'ensemble de la zone dans sa variabilité spatiale … »

10.2. Classification du niveau 3 (N3) : Règles de décision & connaissances expertes

L'approche heuristique par système d'expert est une approche qui consiste en un processus de classification basé sur la formulation d'un certain nombre de règles de connaissance définies par l'utilisateur pour chaque type d'objets à classer. Plusieurs règles de décision peuvent ainsi être combinées pour définir une classe d'objets donnée. Aussi pour transcrire la complexité des objets à extraire de l'image et leurs relations, un réseau hiérarchique d'objet/classe est construit et la connaissance est structurée en différents niveaux, permettant ainsi les notions d'héritage et de regroupement sémantique.

Aussi seront présentés ci-dessous les principales règles et systèmes mis en place pour aboutir à la cartographie des sols nus à l'échelle de la province Sud. Afin de paramétrer le système de décision, ont été principalement utilisées comme données auxiliaires les informations relatives à l'usage des sols nus pour les zones aménagées ainsi que la configuration du terrain pour les formes naturelles.

Une phase de contrôle et de correction par photo-interprétation a été nécessaire pour l'ensemble des classes pour éliminer les confusions persistantes et pour cartographier les classes difficilement identifiables même par système expert.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

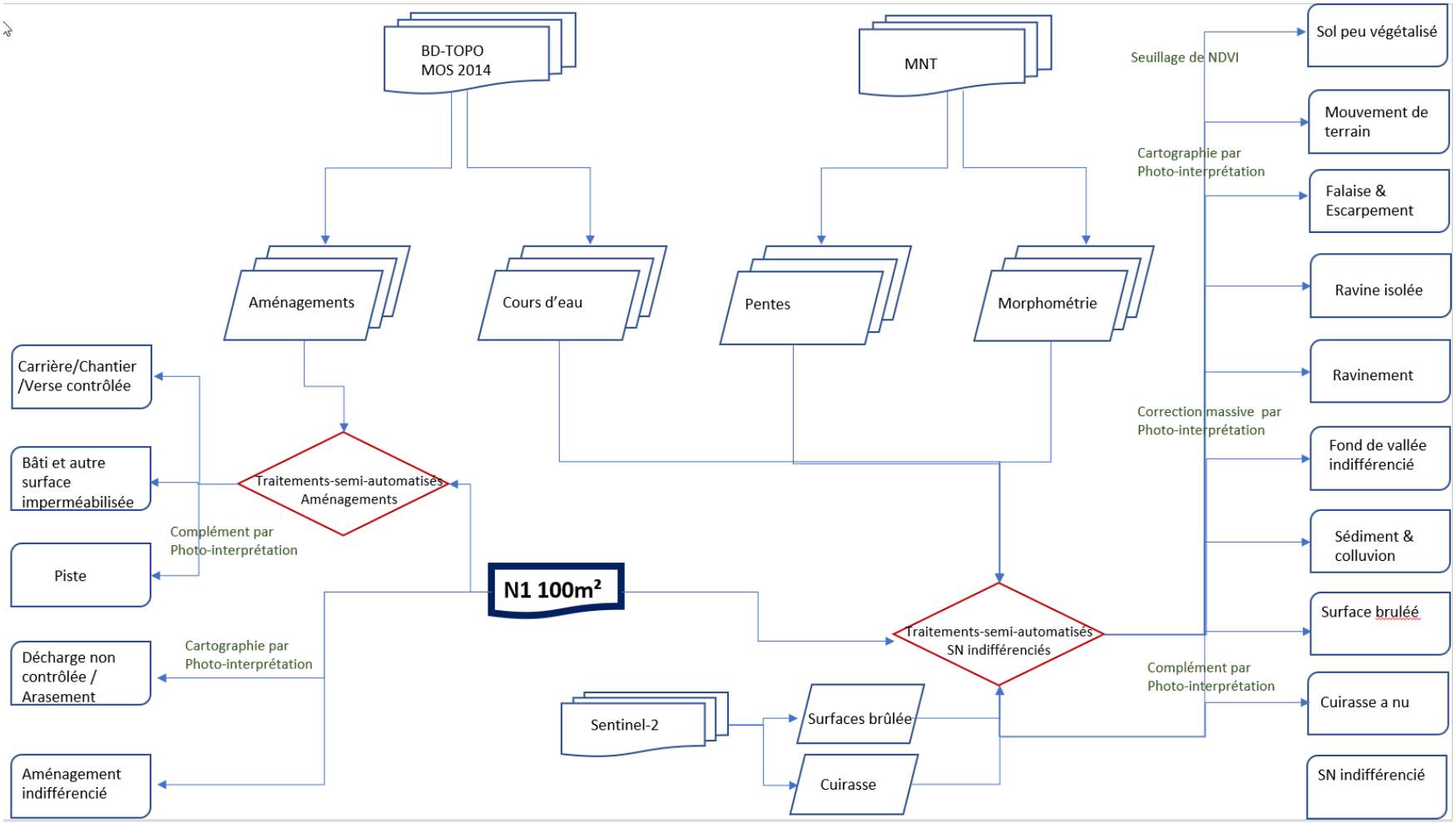


Figure 9 : schéma simplifié de la méthodologie suivie pour la classification du niveau 3 des sols nus ou peu végétalisés à partir d'images SPOT 6/7

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.1. *Zones Aménagées*

La cartographie des classes des aménagements a été effectué en deux étapes : les classes « **Carrière/chantier/verse contrôlée** », « **Bati et autre surface imperméabilisée** » et « **Piste** » ont fait l'objet d'un processus semi-automatisé mobilisant des données exogènes complétées et corrigées suivi d'une phase de contrôle et de correction par photo-interprétation.

La classe « **Décharge non contrôlée/arasement** » a quant à elle été entièrement photo-interprétée. En effet, il s'agit d'une classe difficile à automatisé du fait de sa nature, c'est également une classe qui peut accueillir d'autres formes érosives notamment les ravinements et les ravines isolées, aussi la distinction ne pourra se faire que par l'œil d'un opérateur. Cet élément reste par ailleurs le principal défaut de la classe. En effet, il s'avère parfois difficile de bien discerner les zones d'arasement/décharges des ravinements dont ils sont le théâtre.

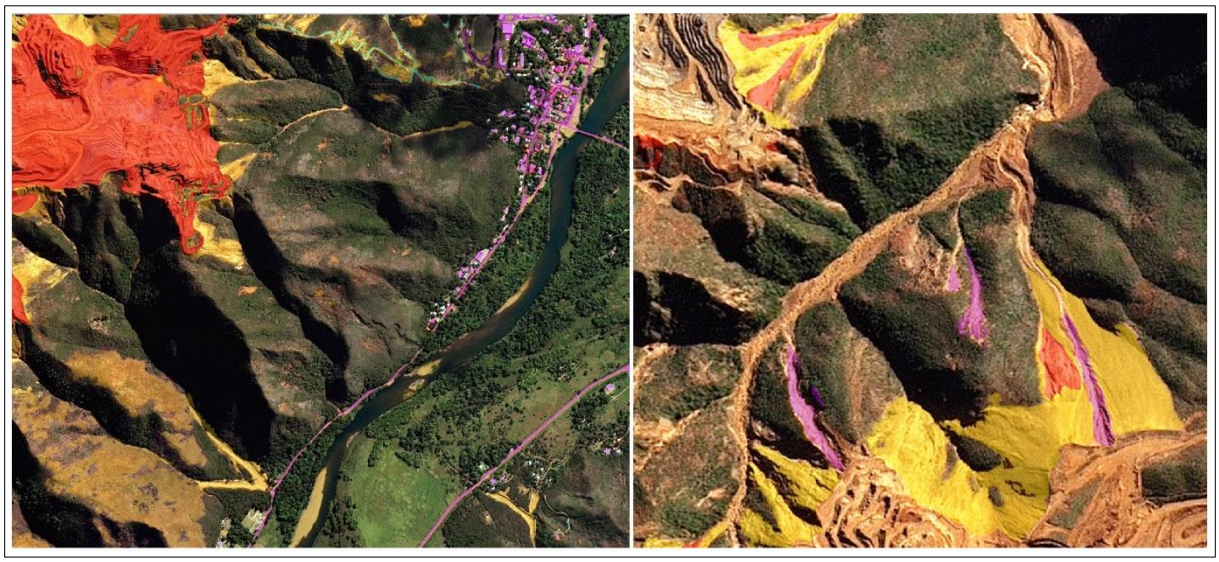


Figure 10 : Illustration représentant les aménagements divers : à gauche : « Carrière/Chantier/Verse Contrôlée », « Bâti & surface imperméabilisée » et « Pistes » ; à droite la classe « Décharge non contrôlée/Arasement »

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.2. *Les aménagements indifférenciés*

Les **aménagements indifférenciés** comme définit dans le dictionnaire des classes regroupent les aménagements autre que ceux cartographiés dans les classes « Carrière/Chantier/verse », « Bati et autre surface imperméabilisées » et « Pistes », il s'agit donc d'une classe hétérogène.

Figure 11 : Illustration de secteurs classés en « Aménagements indifférencié »

La classe peut également être composée d'aménagements dont l'identification par photo-interprétation n'a pas pu être formelle. En effet, lorsque l'identification d'un aménagement est imprécise, c'est la classe la moins précise, ici les aménagements indifférenciés, qui est retenue au bénéfice du doute. Cette règle de décision ne sera pas sans conséquence sur la précision et la qualité de la classe. C'est pourquoi, l'accent est mis ici sur le mode de production de cette classe afin que l'utilisateur puisse l'exploiter en considérant son caractère hétérogène et relativement imprécis.

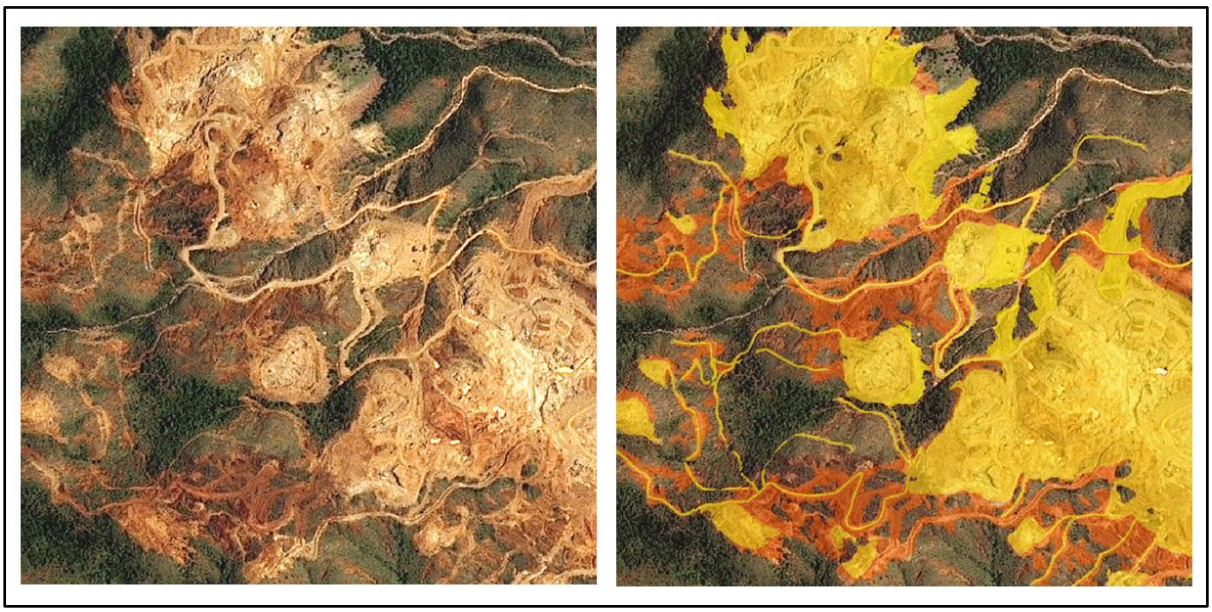


Figure 12 : illustration représentant les « Aménagement indifférencié », en orange, autour des zones d'extraction « Carrière/Chantier/verse contrôlée » en jaune.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.3. *Sols peu végétalisés :*

Les sols faiblement végétalisés sont difficilement discernables à l'œil humain (expérimenté ou non), c'est pourquoi une stratégie de seuillage a été réalisée sur les indices issus des images brutes. Les conditions environnementales de prise de vue étant différentes (saison, inclinaison, précipitations…) les seuils sont impactés. La recherche des seuils optimaux a été réalisée suivant la même méthodologie que pour le N1 (rupture d'histogramme suivi de phase de sélection empirique). Les seuils appliqués pour chaque image sont détaillés dans le tableau 4.

Tous les sols faiblement végétalisés sont classés dans cette catégorie sans distinction entre les aménagements et les sols peu végétalisés indifférenciés. Cette classe regroupe des objets divers et hétérogènes, c'est donc une caractéristique à prendre en compte pour tout exploitation de la donnée. De nature hétérogène et évolutive, la catégorie des « sols peu végétalisés » est à utiliser avec beaucoup de précaution et de réserve.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.4. *Zones significativement brûlées*

Une zone brûlée est considérée dans ce travail comme une zone ayant subi un incendie avant l'acquisition de l'image et dont la végétation est presque exclusivement morte.
Les zones brûlées possèdent des tailles très variées, s'étalant parfois sur des kilomètres. Elles sont souvent discontinues (îlots de végétation préservés, sauts liés au vent, etc....). La plupart du temps, elles se situent à proximité des zones habitées ou des voies de circulation.

En Nouvelle-Calédonie, la particularité de ces zones réside dans leur revégétalisation plus ou moins rapide selon le substrat. En effet, le climat de l'île est particulièrement propice à cela avec un taux d'humidité élevé et une végétation présente ici telle que les fougères qui sont très réactives aux précipitations (Massard, G. ; 2019).
Afin de délimiter au mieux cette classe nous avons eu recours aux données Sentinel-2 du programme européen COPERNICUS.

Un protocole basé sur l'indice NBR (Normalized Burned Ratio) utilisant les bandes spectrales NIR (Near Infra-Red) et SWIR (Short-Wave Infra-Red) et calculé pour les images pré et post incendie a été proposé en phase de test.
La détection est robuste, mais se heurte toutefois aux limites de la donnée utilisée. Seuls les secteurs hors nuages aux dates considérées ont pu être traités. Le protocole a dû être complété par un croisement post classificatoire avec la sortie de la chaine de détection des surfaces brûlées développée par INSIGHT pour le compte de l'OEIL toujours sur la base de données sentinel-2.

La couche de zones incendiées produite ainsi a été croisée avec la classe de sols nus ou peu végétalisés issus du N1 de classification pour affecter les labels uniquement aux secteurs qui nous intéressent pour cette étude. Enfin une ultime phase de photo interprétation a permis de compléter les détections automatiques.

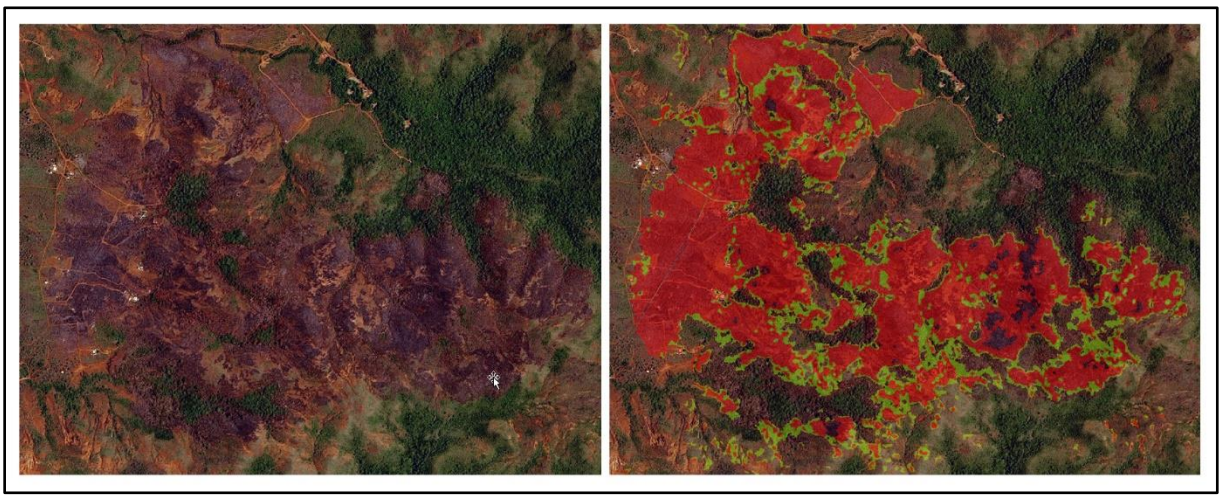


Figure 13 : Zone brûlée dans le secteur de la montagne des sources

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.5. *« Sédiment & colluvion » et « Fond de vallée indifférencié »:*

Les colluvions représentent une faible part des surfaces de dépôt détectées dans les zones test. Le protocole mis en place porte par conséquent plus spécifiquement sur les sédiments.
Le protocole suivi est détaillé dans le guide technico-méthodologique et repose sur la connaissance experte des caractéristiques et du comportement des dépôts sédimentaires : contexte morphologique autour des cours d'eau et distance à ces derniers. Selon Rouet & all., 2008, les sédiments vont se concentrer sur des pentes inférieures à 6° (potentiellement jusqu'à 8° pour les matériaux les plus grossiers).
Une carte des pentes a été réalisée à partir du MNT à 10 m mis à disposition par l'OEIL afin de limiter les zones concernées ici. Une zone tampon de 30 m a été également réalisée à partir de la BDTOPO autour des cours d'eau pour faciliter la classification des sédiments et des fonds de vallée.
Au vu de la résolution et de la précision des données exogènes utilisées, une phase de photo-interprétation a été nécessaire afin de compléter les zones mal détectées et de séparer les objets de « sédiment & colluvion » de ceux classés en « fond de vallées indifférencié ».

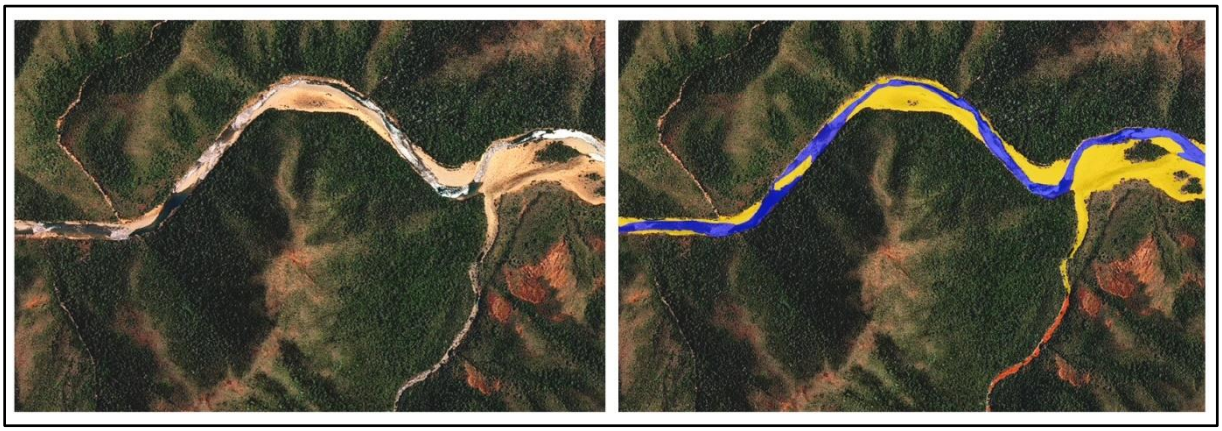


Figure 14 : Illustration de zones de « Sédiment & colluvion » en jaune et de « Fond de vallée indifférencié » en rouge

Cette dernière classe « Fond de vallée indifférencié », au même titre que les classes de « sol nu indifférencié » et « d'aménagement indifférencié » regroupe des objets dont l'identification n'est pas toujours évidente et comporte une part importante d'incertitude. Cet état de fait a par ailleurs été déjà signalé, discuté et approuvé par les participants à l'atelier2.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.6. *Zones de ravinement et ravine isolée*

Un protocole a été développé en phase de test pour cartographier ces deux catégories sur la base d'une classification orientée objet et qui repose sur les caractéristiques morphométriques de terrain.
Bien que les premiers tests sur des zones réduites aient été prometteurs, la mise en application en phase de généralisation a souffert de la grande hétérogénéité des objets appartenant aux deux classes. En effet, la classe « Zone de ravinement » regroupe les lavaka, des badlands et du ravinement classique, autant de forme dont les caractéristiques sont diverses et aucun caractère commun n'a pu être identifier pour leur cartographie. Aussi vu le temps du projet, une classification guidée par photo-interprétation a été privilégiée pour les deux classes.
La classes « Ravine isolé » a de plus fait l'objet d'effort supplémentaire afin de cartographier les objets inférieurs à la MMU et d'inclure les zones d'ombres caractéristique de ces objets.
Cette règle d'intégrer les zones d'ombres photo-interprétable par opérateur peut-être à l'origine de légère imprécision d'autant plus que les objets concernés sont de petite taille et les ombres peuvent y constituer une portion importante.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.7. *Les classes réalisées par photo-interprétation*

Les classes « **Mouvement de terrain** », « **Falaise et escarpement rocheux** » ont été entièrement photo interprétée car leur nature, leur localisation, leur taille et leur nombre ne permettent pas d'automatiser leur cartographie.

Un point important est à signaler concernant la classe de « **Falaise et escarpement rocheux** » très peu d'objet ont été retrouvés sur le secteur du projet. Conscient de complexité de la classe, les secteurs connus pour abriter les falaise et escarpement de la zone d'étude ont fait l'objet d'une prospection poussée, cependant, malgré les efforts de recherche, les rares zones identifiables se concentrent autour des escarpements sur la façade est de l'Île des pins.
Considérant le caractère vertical de ce type d'objet, la règle retenue pour leur cartographie repose sur les préconisations de la cartographie du trait-de côte. Dans ce cas, la ligne de première végétation est retenue comme limite terrestre de la zone de falaise et escarpement. Enfin, les caractéristiques des données sources utilisés et des particularités de la classe, rendent leur cartographie difficile ne reflétant pas complètement la répartition des falaises et escarpement en Province sud.

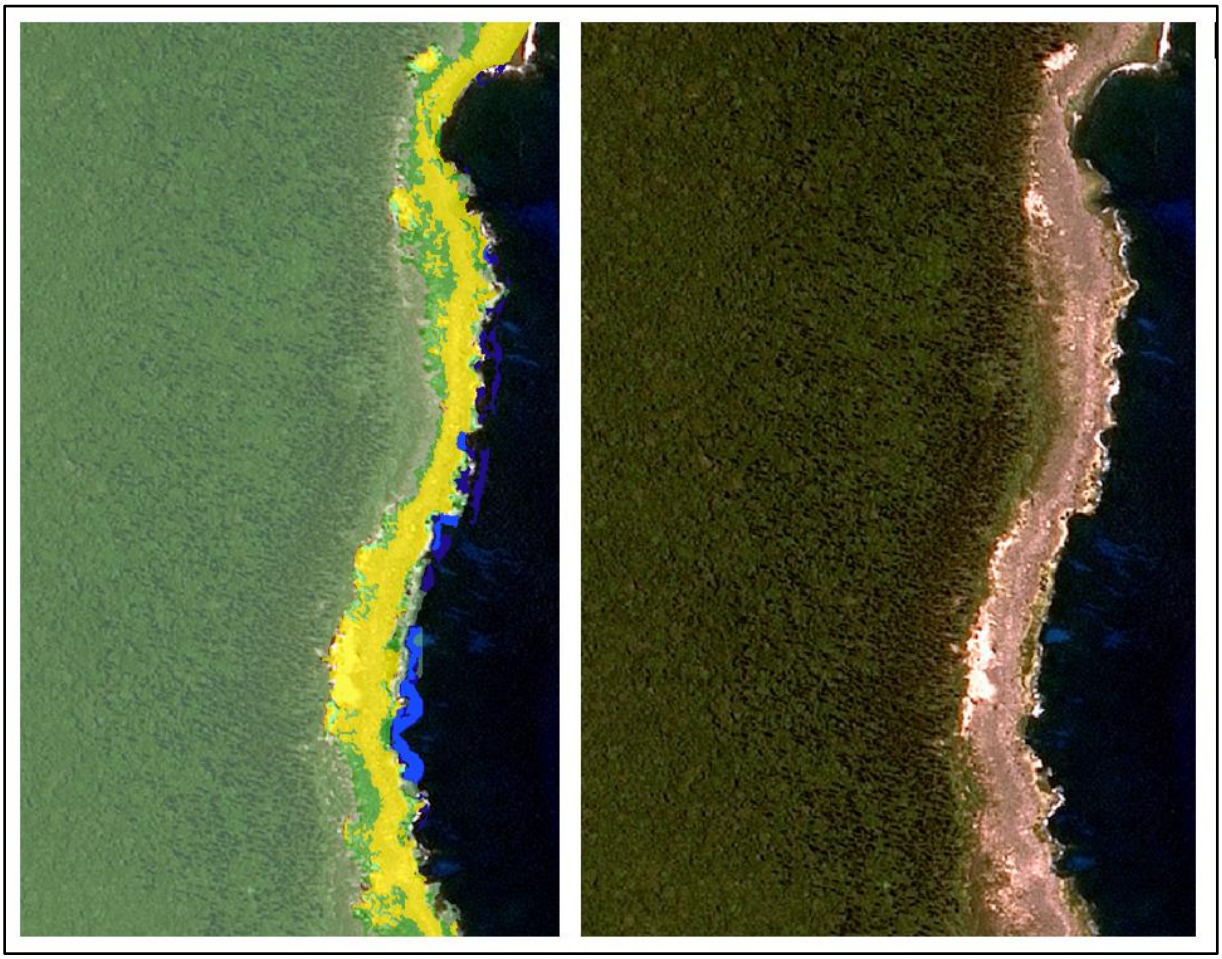


Figure 15 : illustration des zones de « Falaise / Escarpement rocheux », en jaune, sur la zone littorale

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.2.8. *Cuirasse à nu*

Cette dénomination englobe des affleurements de certaines formations d'altération : surfaces cuirassées (en place ou non) ou à très forte teneur en oxydes et hydroxydes de fer. Celles-ci présentent des caractéristiques mécaniques vis à vis de l'érosion hydrique qui en font des matériaux plutôt peu sensibles au ruissellement.

Théoriquement, la cuirasse nue devrait donc intégrer une classe qui regroupe les affleurements peu sensibles à l'érosion comme les falaises et les escarpements. Cependant, les caractéristiques spectrales de ces matériaux riches en fer ont imposé de les traiter à part pour pouvoir les détecter. La classe ensuite été conservée par souci d'exhaustivité.

L'analyse des images de 2018 conduit souvent à détecter indifféremment cuirasse et zone brûlée. Priorité a été donnée à la détection des surfaces brûlées par croisement avec les données Sentinel-2. Cela a permis d'exclure de la classe « Cuirasse nue » des zones identifiées comme brûlées par ailleurs.

Les cuirasses ont été principalement cartographiées de manière automatique à partir de données complémentaires. Il s'agit d'un processus de classification supervisée sur une série temporelle de données optiques Sentinel-2, rééchantillonnées à 1,5 m de résolution afin de pouvoir l'intégrer au présent projet.

Compte tenu du mode de production, de la résolution et de la précision de cette classe, son intégration dans le présent projet s'est établie sur les sols nus détectés après classement de tous les autres thèmes

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.3. Analyse surfacique N3

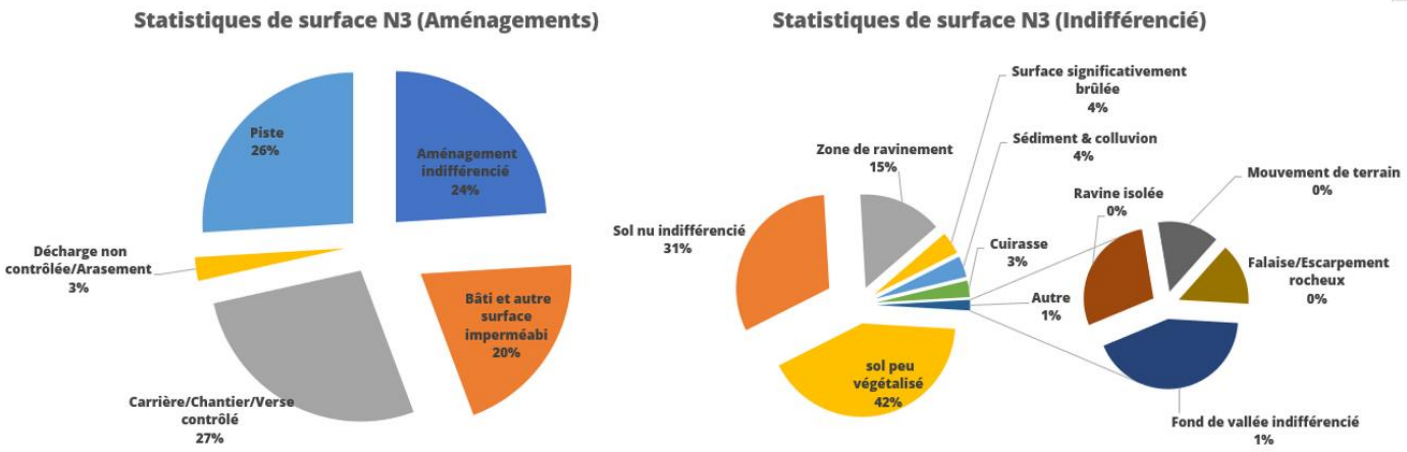


Figure 16:Répartition des surfaces N3 pour les catégories aménagement et indifférencié.

Tableau 7 : Récapitulatif des surfaces par type (N3, sols nus uniquement).

Étiquettes de lignes	Surface (Km2)	Surface (%)
Sol peu végétalisé	160	29,52%
Sol nu indifférencié	121	22,32%
Zone de ravinement	56	10,33%
Carrière/Chantier/Verse contrôlé	43	7,93%
Piste	41	7,56%
Aménagement indifférencié	38	7,01%
Bâti et autre surface imperméabilisé	32	5,90%
Surface significativement brûlée	15	2,77%
Sédiment & colluvion	14	2,58%
Cuirasse	11	2,03%
Décharge non contrôlée/Arasement	4	0,74%
Fond de vallée indifférencié	3	0,55%
Ravine isolée	2	0,37%
Falaise/Escarpement rocheux	1	0,18%
Mouvement de terrain	1	0,18%
Total général	**542**	**100,00%**

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.4. Affectation des attributs « Type » et « Origine »

Un groupe de travail a été réuni afin de trancher de manière concertée sur les règles d'affectation des attributs « Type » et « Origine ». Un document de proposition a été produit pat INSIGHT/ROUET à l'ensemble des participants comme base de discussion. Le principe et les règles de décision sont détaillés dans le document dédié. Ici ne sont présenté qu'un récapitulatif des décisions discuté et retenues à l'issue de la réunion.

10.4.1. *L'attribut « Type » :*

Cet attribut est un indicateur approximatif de l'implication d'une forme dans les processus érosifs. Il informe sur le processus dominant supposé s'exercer dans la forme 2018.

Les valeurs que peut prendre l'attribut Type sont présentées dans le tableau 2

Tableau 8 : Description et valeurs pour l'attribut « Type »

Valeur	**Description succincte**
Départ potentiel	Le départ de matériaux par érosion est dominant.
Transit et dépôt	Le dépôt de matériaux par érosion est dominant.
Imperméable	L'infiltration des eaux est gênée, déviée ou interdite sans qu'un processus d'érosion domine dans la forme elle-même.
Neutre	Il n'y a pas de processus dominant évident.
Indéterminé	Trop complexe, mixité importante des types dans la forme.

L'attribution automatisée de la valeur de Type selon les classes N3 des formes 2018 est présentée dans le tableau suivant.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Tableau 9: Attribution de la valeur de Type selon la classe N3 des formes 2018.

Classe	Valeur de l'attribut « Type »
Eau statique	Transit et dépôt
Eau courante	Transit et dépôt
Carrière, chantier, verse	Indéterminé
Verse seule (s'il y a)	Neutre
Décharge non contrôlée, arasement	Départ potentiel
Piste	Indéterminé
Bâti et autres surfaces imperméabilisées	Imperméable
Aménagement indifférencié	Indéterminé
Sol nu faiblement végétalisé	Indéterminé
Surface significativement brûlée	Indéterminé
Ravine	Départ potentiel
Zone de ravinement	Départ potentiel
Falaise, escarpement rocheux actif	Départ potentiel
Mouvement de terrain, éboulis	Départ potentiel
Fond de rivière indifférencié	Indéterminé
Cuirasse nue	Neutre
Sédiments, colluvions	Transit et dépôt
Sol nu indifférencié	Indéterminé

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

10.4.2. *L'attribut « Origine »*

Attribut évaluant l'origine dominante de chaque forme détectée sur les images de 2018.

Les valeurs qu'il peut prendre sont résumées dans le tableau 4.

Tableau 10 : Description et valeurs proposées pour l'attribut « Origine »

Valeur	Description succincte
Anthropique minier	Forme d'origine principalement liée à l'activité minière
Anthropique minier probable	Forme d'origine principalement liée à l'activité minière probable
Anthropique non minier	Forme d'origine principalement anthropique hors activité minière.
Anthropique indifférencié	Forme d'origine principalement anthropique.
Anthropique probable	Forme dont l'origine anthropique est suspectée (zone brûlée, ravine/ravinement récent connectée à aménagement, etc)
Naturel	Forme d'origine principalement naturelle.
Indéterminé	Forme dont l'origine principale est difficile à déterminer.

Les règles d'attribution de la valeur d'Origine ont été construites de manière à garantir une objectivité optimale. Elles s'appuient sur des données exogènes considérées fiables et intègrent l'avis du groupe de travail de l'OEIL autour de ce projet.

Les données exogènes mobilisées à ce stade sont :

- BDTOPO
- Cadastre minier
- Titres miniers échus

Selon les cas, les attributions d'origine peuvent être effectuées de manière directe, d'autres, sont plus ambiguës et demandent un recoupement entre plusieurs sources. Enfin, l'origine de certaines formes ne pourra être établie à partir des données existantes, conduisant à une indétermination.

La valeur d'Origine est attribuée aux aménagements sans ambigüité ou pour lesquels il est trop difficile de décider dans le cadre de ce projet :

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Tableau 11 : Règle d'affectation directe de l'attribut « Origine » selon la classe

Origine	Classe
Anthropique minier	Décharge non contrôlée/arasement
Anthropique non minier	Bâti et autre surfaces imperméabilisées hors zone minière Aménagement indifférencié
Naturel	Falaise, escarpement rocheux actif
Indéterminé	Sol nu indifférencié Sol nu faiblement végétalisé, Mouvement de terrain/Eboulis Cuirasse nue indifférenciée Fond de rivière indifférencié Eau statique
Anthropique probable	Surface significativement brûlée*

Bien qu'il semble que la plupart des incendies soient d'origine anthropique, nous ne disposons pas de donnée indiquant l'origine et l'étendue des incendies. Il est donc impossible de garantir l'origine anthropique d'une zone significativement brûlée. De plus la persistance des zones significativement brûlées sur plusieurs mois au minimum voire plusieurs années rend l'origine encore plus délicate à établir.

Pour toutes les autres formes 2018, on passe procède par règles de décision.

10.4.3. *Attribution par arbre décisionnel*

Verses Contrôlée, chantier, carrière

A l'unanimité, les participants à la réunion de travail ont soulevé que l'activité minière actuelle en Province sud se concentre exclusivement sur les sols ultramafiques, aussi ce point sera le principal élément discriminant pour l'attribut origine. Les objets sur sol ultramafique prendront par conséquent la valeur « **Anthropique minier** ». Pour les objets en dehors de l'emprise des sols ultramafiques l'attribut origine prendra la valeur « **Anthropique indifférencié** ».

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

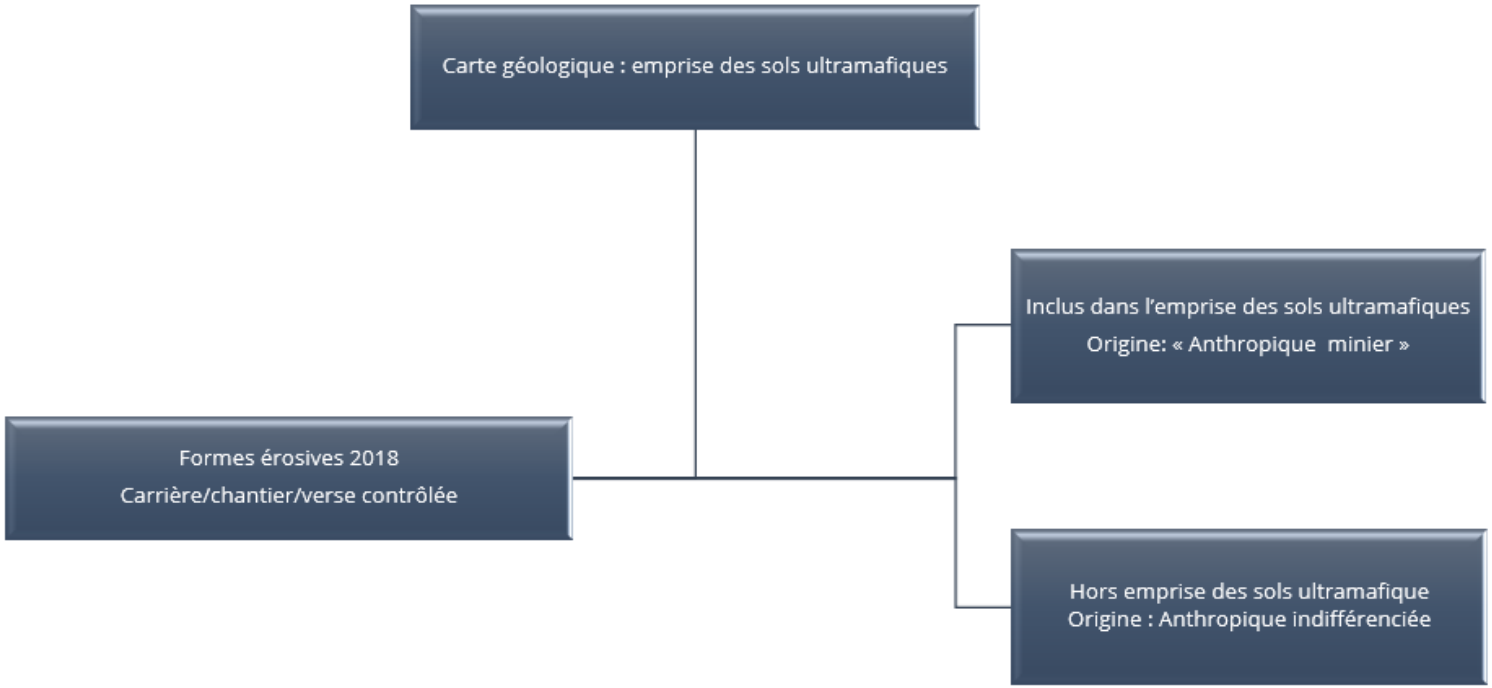


Figure 17 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Verse contrôle, chantier, carrière »

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Pistes

Toutes les formes de la classe Piste ont une origine anthropique. Pour distinguer l'origine minière ou non, il est proposé de se baser sur la BDTOPO à jour, le cadastre minier et les titres miniers échus.

La démarche se veut objective et considérant la multiplicité des situations pouvant être rencontrées sur la zone d'étude. L'attribut « Gestion » renseigne pour chaque tronçon des voies de circulation si la gestion est privée ou incombe à une collectivité. Cet attribut est accessible à partir de la couche d'information voierie de la BDTOPO.

Les règles de décision sont donc comme suit :

Pour les pistes dont la gestion n'est pas privée, l'attribut « Origine » prend la valeur « **Anthropique non minier** »

Pour les autres pistes, un croisement est alors opéré avec le cadastre minier et les titres miniers échus. Ainsi les pistes en dehors des périmètres miniers prennent la valeur « **Anthropique non minier** ».

Pour les pistes incluses à l'intérieur du parcellaire minier, trois cas de figures sont proposés :

Cas d'une Connexion directe à une mine : toute piste répondant à la condition de connexion directe et dans la distance fixée prendra la valeur « **Anthropique minier** ». Une distance de 250 m a été retenue par l'ensemble des participants.

Cas d'une connexion indirecte à une mine : soit en dehors de la distance précédemment fixée, Les pistes dans ce cas prendront la valeur « **Anthropique minier probable** »

Enfin, si aucune connexion directe ou indirecte n'existe, alors l'origine sera **« Anthropique non minier** »

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

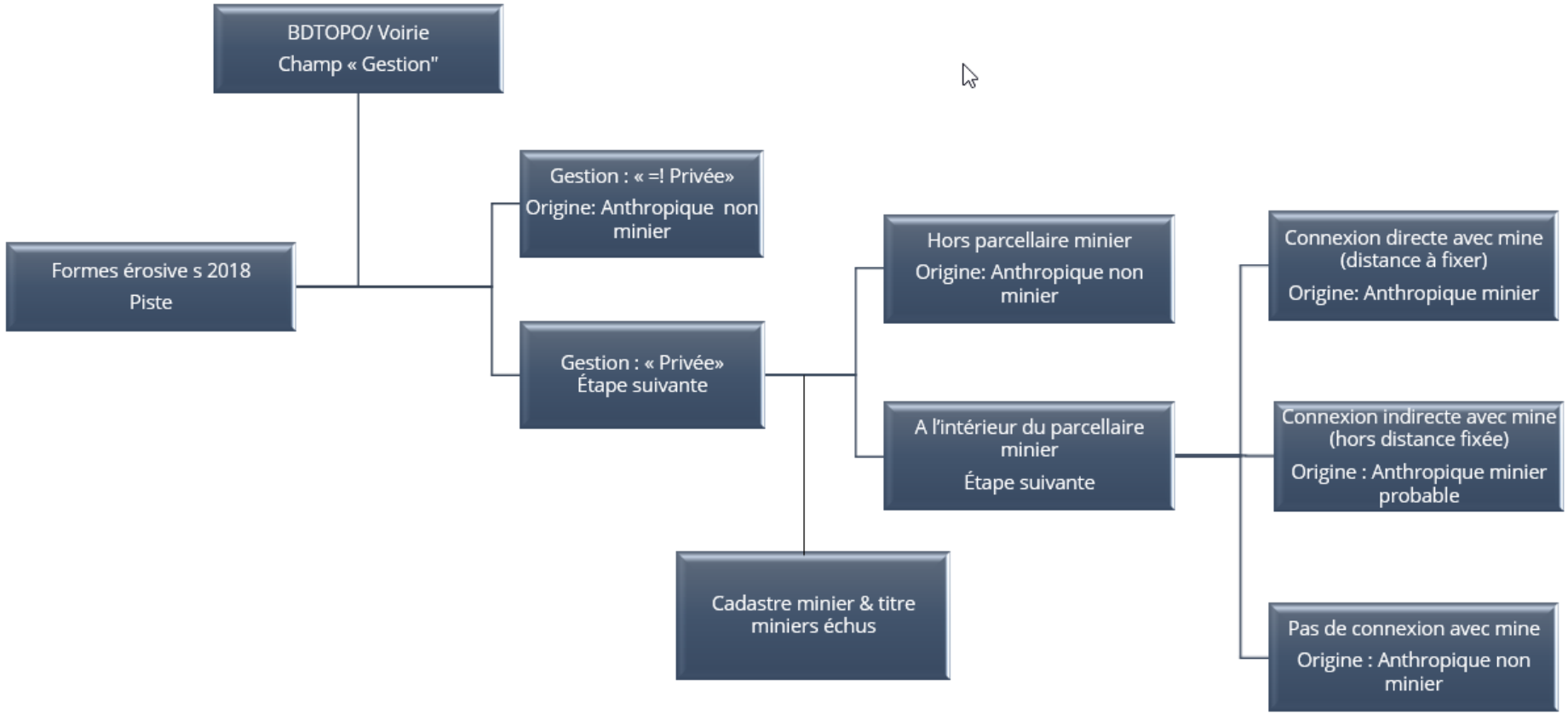


Figure 18 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Piste »

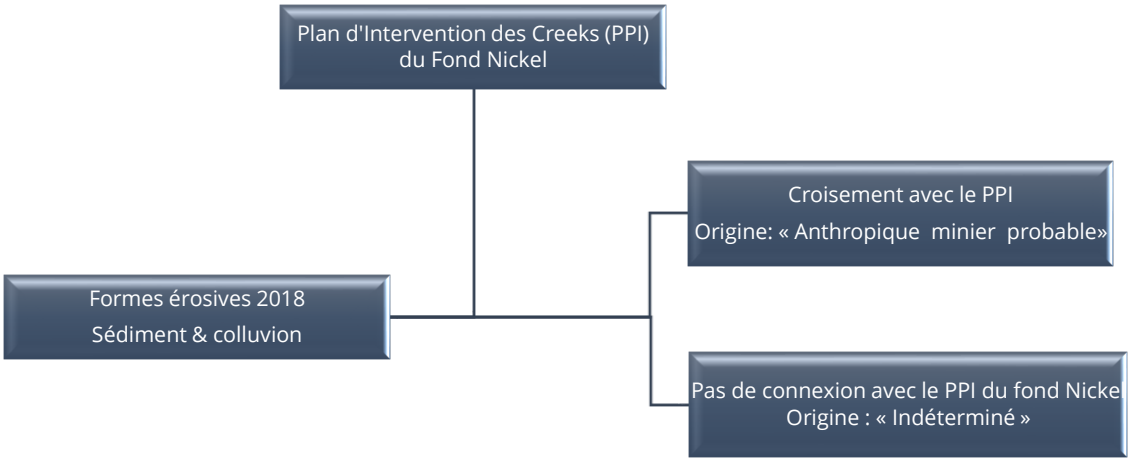
Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Sédiments, colluvions

Les sédiments terrigènes forment la très grande majorité des surfaces cartographiées dans cette classe. Après discussion avec le groupe de travail, la DIMENC a mis a disposition un fichier regroupant les zones de sur-engravement sur l'ensemble de la grande terre. Cette cartographie, ressence les secteurs présentant un sur-engravement avérées (ou à valider) lié à l'activité d'extraction minière.

Après examen de la donnée par l'expert, les tronçons d'engravement dont le statut est « à valider » ont été écartés afin d'éviter toute erreur suite à la non validation du statut.

Ainsi tous les objets « Sédiment & colluvion » qui croisent un tronçon sur-engravé prennent la valeur « Anthropique minier probable » pour les autre l'attribut origine prend la valeur « Indéterminée »



* on ne peut pas choisir entre Anthropique non minier et Naturel sans information supplémentaire

Figure 19 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Sédiments & colluvions »

Ravine isolée

Pour ces formes 2018, il est complexe de déterminer l'origine de manière formelle. Aussi après discussion avec l'ensemble des participants, le principe d'attribution sera similaire que pour les pistes avec une notion de connexion direct aux aménagements.

Pour les ravines isolées à proximité immédiate d'un aménagement minier (une distance de 250 m similaire à la distance fixée pour les pistes) prendront la valeur « **Anthropique minier probable** »

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Les objets à proximité d'autres aménagements non miniers, prendront la valeur « **Anthropique probable** ». Enfin, toutes les autres ravines isolées prendront la valeur « **Indéterminée** ».

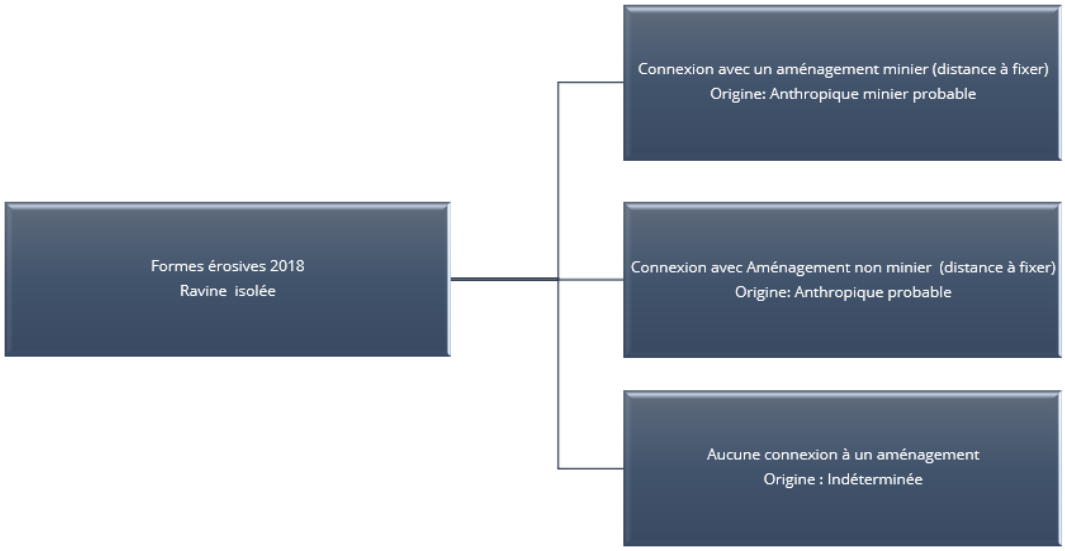


Figure 20 : Schéma général de décision pour l'attribution de l'origine en fonction des données exogènes pour la classe « Ravine isolée »

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

11. DETECTION ET CLASSIFICATION DES SOLS NUS DE 1976

L'étude de la dynamique spatio-temporelle des surfaces d'érosion est basée sur la comparaison des images satellites acquises dans le cadre de ce projet et la mosaïque monochrome issue de la campagne aérienne de 1976 au 1/20 000ème (IGN).

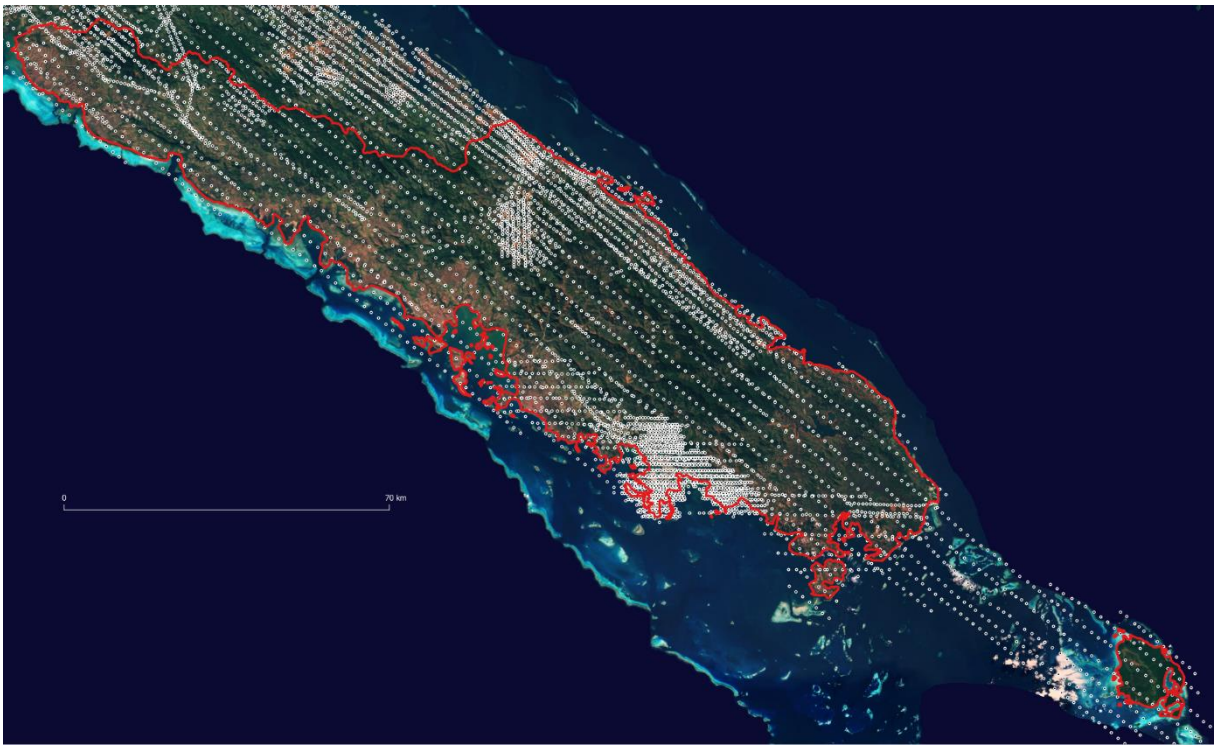


Figure 21:Centroïdes de photos de la campagne IGN-1976 (1/20 000 source DITTT).

Les données de 1976 fournis par la DITTT sont livrées sous format compressé « ecw ». Il s'agit d'une mosaïque panchromatique sur l'ensemble de la Province Sud. Afin de pouvoir exploiter pleinement la plage de valeurs disponibles, les développements méthodologiques ont été réalisés sur les ortho photos unitaires avant harmonisation radiométrique et compression. Les mêmes procédures ont été appliquées sur des zones tests issue de la décompression de la mosaïque lissée afin d'évaluer la pertinence du recours aux données brutes.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

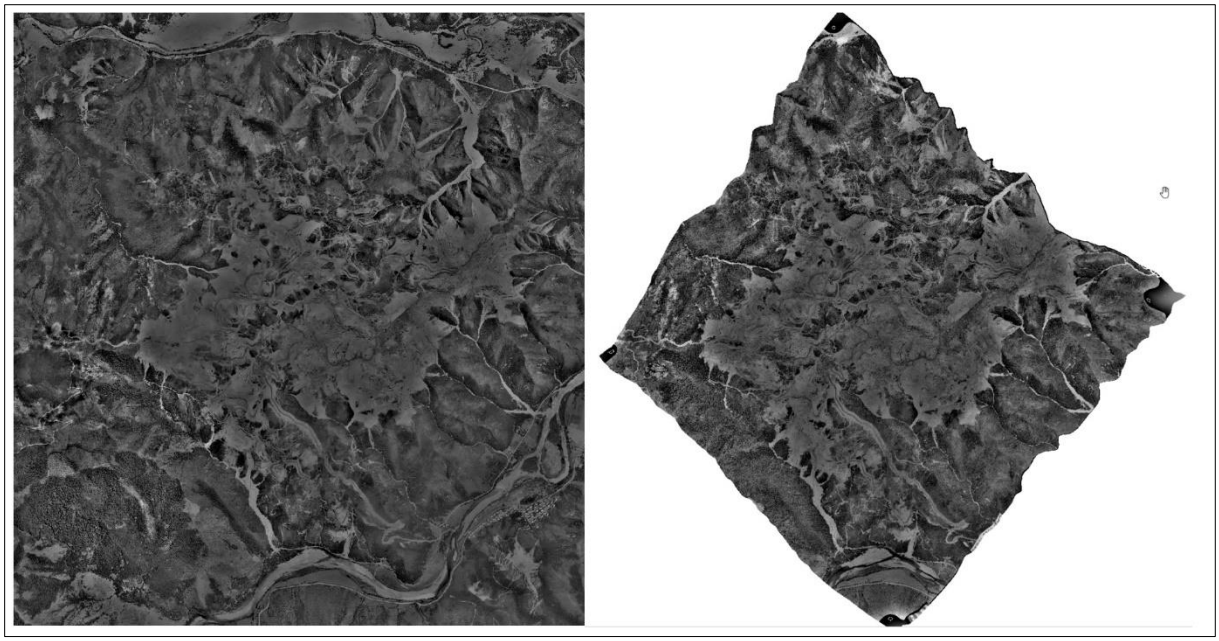


Figure 22 : Exemple de la mine de Thio : gauche la mosaïque, à droite l'ortho photo unitaire de 1976

L'apport des données brutes est limité en considérant les ressources en temps et en matériel pour effectuer le traitement, aussi l'ensemble de la procédure a été réalisé sur les données mosaïquées et lissées.

La procédure retenue pour traiter les données de 1976 se déroule en trois phases :

- Rehaussement de contraste
- Ouverture morphologique et
- Seuillage en fonction des catégories.

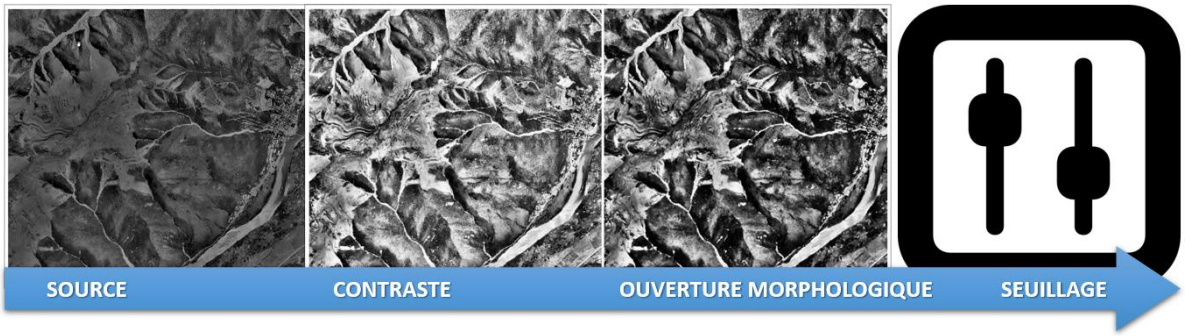


Figure 23:Diagramme méthodologique de traitement (1976).

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

11.1. Rehaussement de contraste :

Dans une image brute, les informations utiles sont souvent contenues dans un ensemble restreint de valeurs numériques parmi les valeurs possibles (256 dans le cas de données à 8 bits). Le rehaussement des contrastes se fait en changeant les valeurs initiales de façon à utiliser toutes les valeurs possibles, ce qui permet d'augmenter le contraste entre les cibles et leur environnement

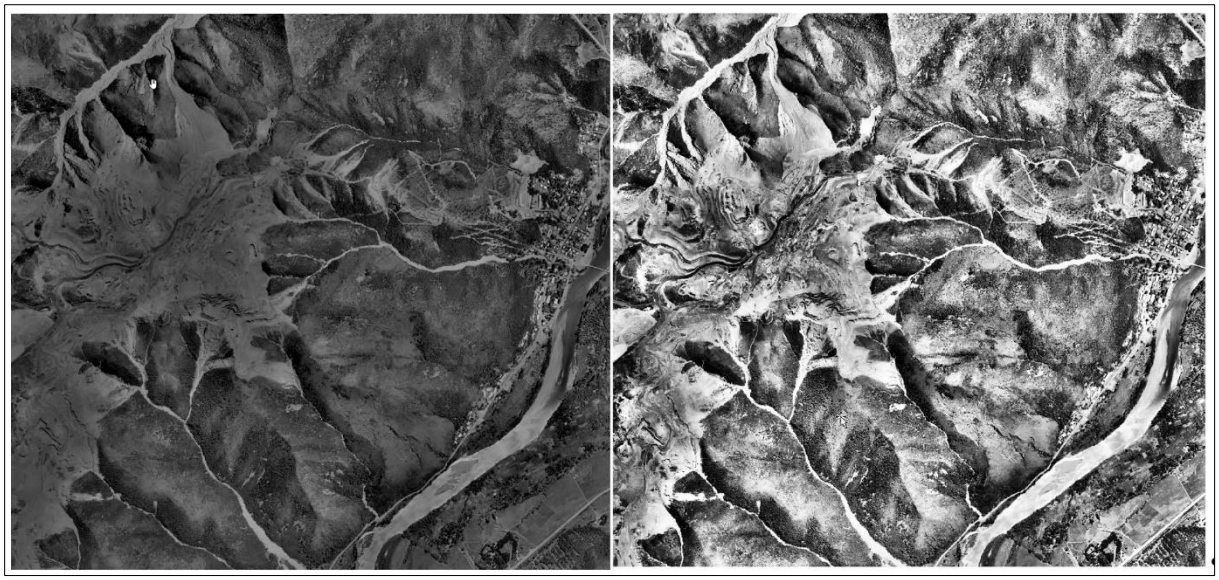


Figure 24 : Illustration du rehaussement de contraste sur le secteur de Thio : à gauche l'image brut, à droite l'image rehaussée.

Nous avons procédé ici à un rehaussement linéaire de l'image, il s'agit d'un étalement uniforme des valeurs utiles afin d'utiliser la totalité des valeurs possibles de 0 à 255 p. Ce procédé rehausse le contraste dans l'image en pâlissant davantage les régions claires de l'image et en assombrissant davantage les régions plus foncées. Ceci facilite l'interprétation visuelle. Comme l'illustre la figure 9 ci-dessus.

11.2. Ouverture morphologique

L'ouverture morphologique sur une image en niveau de gris permet de rehausser les valeurs de pixel les plus hautes, et d'écraser les valeurs moyenne ou faible. Cette ouverture s'effectue avec une fenêtre glissante de manière à éliminer les pixels isolés contribuant ainsi à la déconnexion des objets faiblement connectés. Ni la taille, ni la forme des objets n'est altérée. C'est particulièrement pertinent dans le cas des aménagements notamment le bâti

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

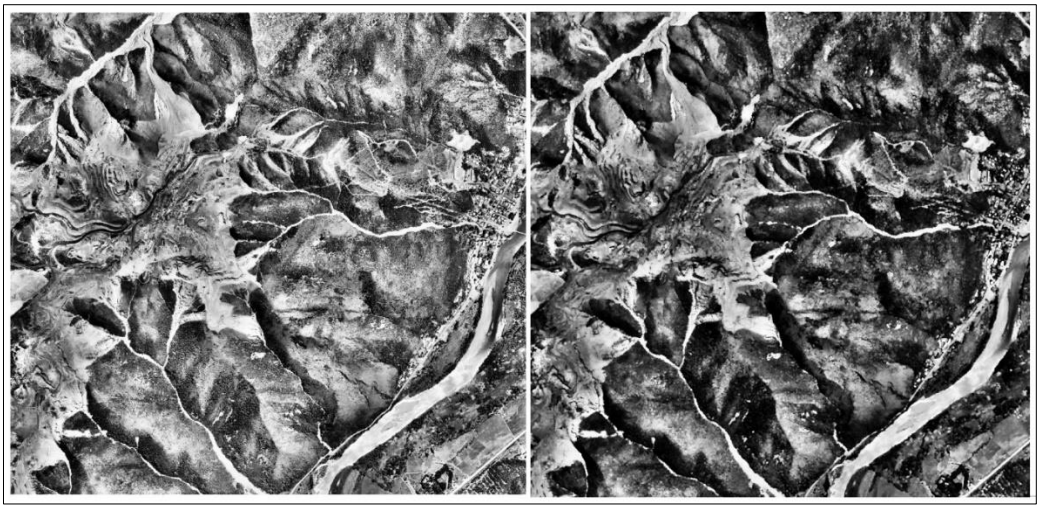


Figure 25 : Illustration de l'ouverture morphologique sur le secteur de Thio : à gauche l'image rehaussée, à droite l'ouverture morphologique appliquée à la zone

Dans le cadre du projet nous avons procédé à une ouverture morphologique de 2x2 pixel afin de conserver le maximum d'informations et d'objets utiles pour le présent travail.

Enfin la dernière étape consiste en un seuillage adapté à chaque catégorie visée dans ce travail.

11.3. Seuillage :

La phase de seuillage est une opération délicate au vu de l'extrême difficulté de différencier à partir d'une seule bande en niveau de gris des composants du paysage naturel.

Aussi cette phase s'est déroulé de manière empirique jusqu'à obtention des seuils jugés pertinents /optimaux pour chaque classe. Le travail de seuillage s'est également opéré avec un guidage par photo-interprétation permettant ainsi de limiter le bruit lié à la nature de la donnée traitée.

Tableau 12 : tableau récapitulatif des seuils appliqués en fonction des classes

Classe	Seuil
Sol nu indifférencié	**165**
Aménagement minier	**110**
Autre aménagement	**130**
Eau	**80**
Ombre	**5**
Nuage	-

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Pour finir une phase de photo-interprétation a permis de limiter les confusions liées à une méthode automatique en traitant au cas par cas les différentes configurations rencontrées et d'ajuster au mieux la classification. Cette phase a suivi une règle principale, qui est de ne classer en sols nus que les zones ne souffrant d'aucune interprétation. Pour tous les secteurs où l'opérateur n'a pas de certitude vis-à-vis de l'occupation, la zone était affectée à la classe la moins précise, dans ce travail, il s'agit de la classe « **Autre** ».

Le protocole détaillé ci-avant a été appliqué pour la cartographie du N2, le N1 résulte d'un regroupement des classes « Aménagement » et « sol nu indifférencié »

11.4. Carte d'évolution :

La caractérisation de l'évolution se basera sur l'état des sols nus en 1976. Le principe est ainsi de comparer les formes érosives entre les données aériennes historiques de 1976 et les données spatiales de 2018, de sorte à mettre en avant une évolution de ces formes.

Par « évolution », il est entendu ici la « dynamique spatio-temporelle de la forme », caractérisée par son apparition, sa disparition, son augmentation, sa diminution ou encore sa stabilité entre le T0 (1976) et le T1 (2018).

Une première proposition de croisement entre les données historiques et actuelles a été formulée et approuvée lors de l'atelier 1, il s'agit d'une comparaison post-classificatoire des cartographies au niveau 2 de la nomenclature entre les dates. Cette alternative a l'avantage d'être conservatrice, ainsi tous les changements peuvent être quantifiés et localisés.

Aussi la précision de cette carte est le produit des précisions des deux cartographies du N2 en 2018 et en 1976. Ainsi, la qualité de la carte d'évolution est relative à celles des classifications ayant servi à la produire.

La cartographie des sols nus ou peu végétalisés à partir de photographie historique en noir et blanc est très difficile. Aussi, sa qualité ne saura-t-être comparée objectivement à celle de 2018.
Il apparait ainsi important de préciser que le caractère « évolution » et la cartographie associée sont des indicateurs de **tendances** et ne devraient en aucun cas être interprété autrement qu'en y associant les contraintes et les limites techniques inhérents aux données utilisées pour les produire.

A partir de ces croisements spatiaux et d'études statistiques spatiales, il sera alors possible de définir la tendance d'évolution qu'on subit les sols nus actuels.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Les seuils entre augmentation, diminution et stabilité de la surface de sols nus sont complexes et délicat à fixer, ils doivent intégrer les erreurs liées à la qualité des classifications au deux dates, les erreurs liés à la résolution des données sources ainsi que les erreurs de calage.

La stratégie proposée ici se base sur les tests d'égalité d'empreinte spatiale, qui considère qu'une forme est égale à une autre si une proportion conséquente de leur surface est commune. Ici le seuil proposé pour le test d'égalité est de **70% (produit entre les deux précisions suite au QC réalisé sur les cartographies de 2500 m² de mmu),** ainsi une forme est considérée comme stable si une surface commune entre les deux dates représente au moins 70% de la surface totale.

En dessous de ce seuil, un pondérateur (0.7 sur le même principe que le seuil d'égalité) est proposé pour prendre en compte les biais précédemment cités et sera appliquée à toutes les zones non communes pour abouti à la tendance générale de la forme.

Le principe a été discuté et approuvé lors de dernière réunion lors de laquelle l'ensemble des règles de décision pour l'affectation des attributs ont été arrêtés.

Le document « Proposition autour des attributs : Arbre décisionnel et règles d'affectation des attributs »

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

12. CONTROLE QUALITE

Avant de détailler les résultats de l'étude, il est important de faire un point sur l'évaluation de la qualité des résultats. La précision d'une classification se caractérise par le degré de cohérence de la cartographie produite avec la « vérité terrain »

Deux validations ont été menées, une validation qualitative par photo-interprétation et une validation quantitative à partir de la matrice de confusion, faisant appel aux métriques de performance les plus utilisées que sont :

La concordance globale : (OA : Overall Accuracy) représente la qualité globale de la classification toutes classes confondues. C'est le rapport entre la surface totale bien classée et la surface totale traitée par la classification.

$$OA = \frac{n}{N}$$

Précision globale, où N est le nombre total d'observations et n le nombre d'observations correspondant à un bon classement.

La précision utilisateur (Précision) : (UA : User's Accuracy) correspond à la fraction des pixels correctement classés dans une classe (représenté par la diagonale de la matrice).

$$PU = \frac{x_{ii}}{x_{i+}}$$

précision utilisateur, où x_{ii} est le nombre de pixels correctement classés pour une catégorie (correspondant à la ligne i et à la colonne i) et x_{i+} est le total de pixels affectés à cette catégorie (total de la ligne i).

La précision producteur (rappel) : Correspond à la fraction de pixels de référence d'une classe correctement classés.

$$PP = \frac{x_{ii}}{x_{+i}}$$

précision producteur, où x_{ii} est le nombre de pixels correctement classés pour une catégorie (correspondant à la ligne i et à la colonne i) et x_{+i} est le total de pixels de cette catégorie dans la référence (total de la colonne i).

Ces deux dernières métriques sont complémentaires car permettent de détecter des sur-classements ou des sous-classements. La métrique qui permet de rendre compte de ce rapport est appelée le F-Score :

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

$$F - Score = \frac{2.PU.PP}{PP + PU}$$

F-Score, où PU est la précision utilisateur et PP la précision producteur.

Il est à noter que le contrôle opéré s'est sur la base d'une confrontation de la donnée produite avec la classification faite par l'expert thématique sur une sélection aléatoire de zones à évaluer réparties sur l'ensemble de la zone d'étude.

12.1. Le contrôle qualité par l'expert thématique

Le contrôle qualité s'est déroulé en plusieurs étapes et de manière itérative tout au long du projet de manière à assurer un produit final de bonne qualité et répondant aux exigences du projet.

Globalement, 567 secteurs répartis sur l'ensemble de la Province Sud ont été contrôlés dont 247 secteurs au niveau 3. Le contrôle a couvert au total 524,7 km² tout niveau confondus soit 7,3 % de la surface de la zone d'étude. 14,5 km² ont fais l'objet de contrôle au niveau 3 couvrant uniquement les classes utiles (hors ombre, nuage et autre).

Le tableau ci-dessous détaille la répartition des contrôles par niveau.

Tableau 13 : Récapitulatif des surfaces contrôlées quantitativement aux trois niveaux de classification (les superficies sont exprimées en km²) source Rouet, I., 2020

Niveau de classification	Version contrôlée	Nombre de secteurs contrôlés	Superficie de la zone d'étude couverte	% de la zone d'étude couverte	Superficie pixels contrôlés	% classes prioritaires contrôlées	Nombre de classes contrôlées
N1	N1_20191024	160	145,1	2,0	145,1	2,0	5
	Total N1	*160*	*145,1*	*2,0*	*145,1*	*2,0*	*5*
N2	N2_20191024	69	65,7	0,9	65,7	0,9	6
	N2_20191218	91	79,4	1,1	79,4	1,1	6
	Total N2	*160*	*145,1*	*2,0*	*145,1*	*2,0*	*6*
N3	N3_20200413	19	18,7	0,3	0,7	1,1	2
	N3_20200505	20	19,0	0,3	0,6	2,5	1
	N3_20200510	20	18,7	0,3	1,7	3,5	2
	N3_20200516	23	21,8	0,3	1,1	1,5	4
	N3_20200519	40	38,3	0,5	1,0	1,2	2
	N3_20200603	125	118,0	1,6	9,5	1,3	16
	Total N3	*247*	*234,5*	*3,2*	*14,5*	*2,0*	*16*
	Total tous niveaux	**567**	**524,7**	**7,3**	**304,7**	**2,0**	

La figure 22 illustre la répartition spatiale des 567 secteurs contrôlés, avec 7,2% de la zone d'études couverte par le contrôle, ce dernier dépasse largement les engagements initiale pris par le consortium INSIGHT/ROUET de l'odre de 2%.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

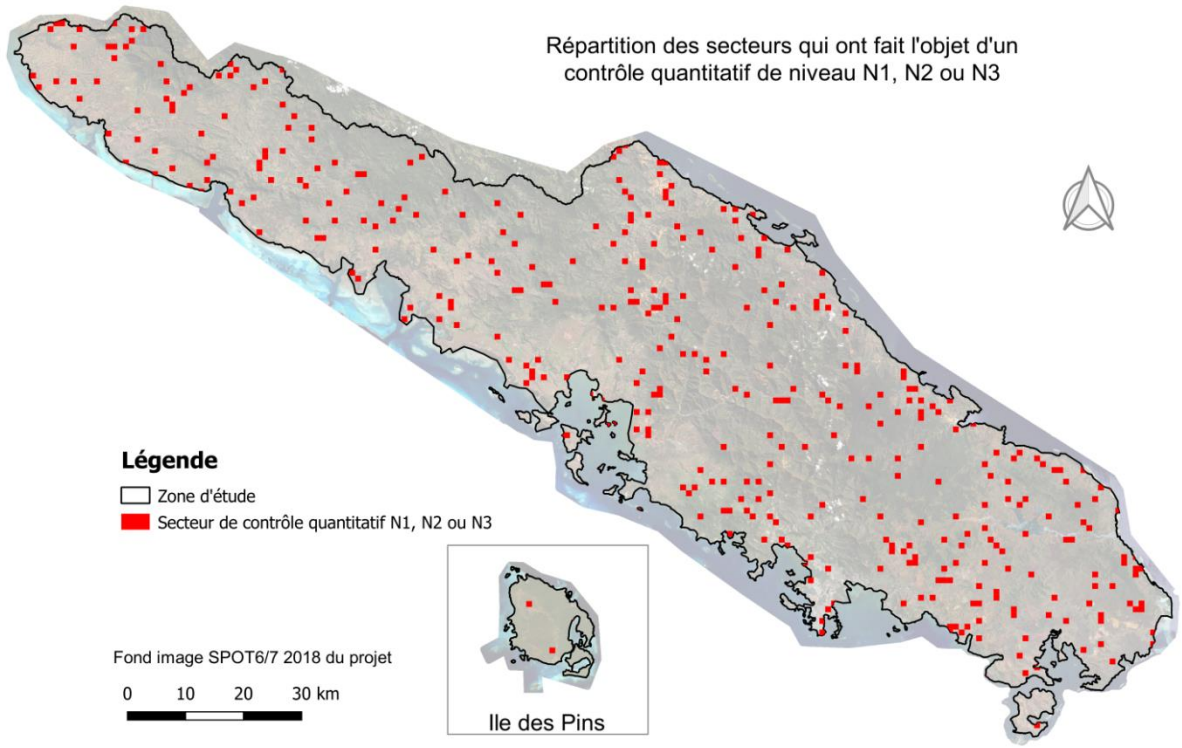


Figure 26 : carte de répartition des zones de contrôle tous niveaux confondus (source : Rouet, I ; 2020)

12.2. Contrôle qualité du Niveau 1 2018

Plusieurs aller/retour ont été opéré entre l'équipe technique et l'expert thématique afin de corriger les erreurs et les imperfections de la cartographie des images de 2018.

Un rapport détaillant le processus et les résultats des contrôles effectués tout au long du projet. Le rapport est remis par l'expert à l'OEIL. Seuls les résultats définitifs des contrôles et les conclusions sont présentés ci-dessous

Afin d'effectuer le contrôle qualité des niveau 1 et 2 un tirage aléatoire représentant 2 % de la surface totale de la zone de travail a été effectué, la figure 13 illustre la répartition spatiale des zones contrôlées.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

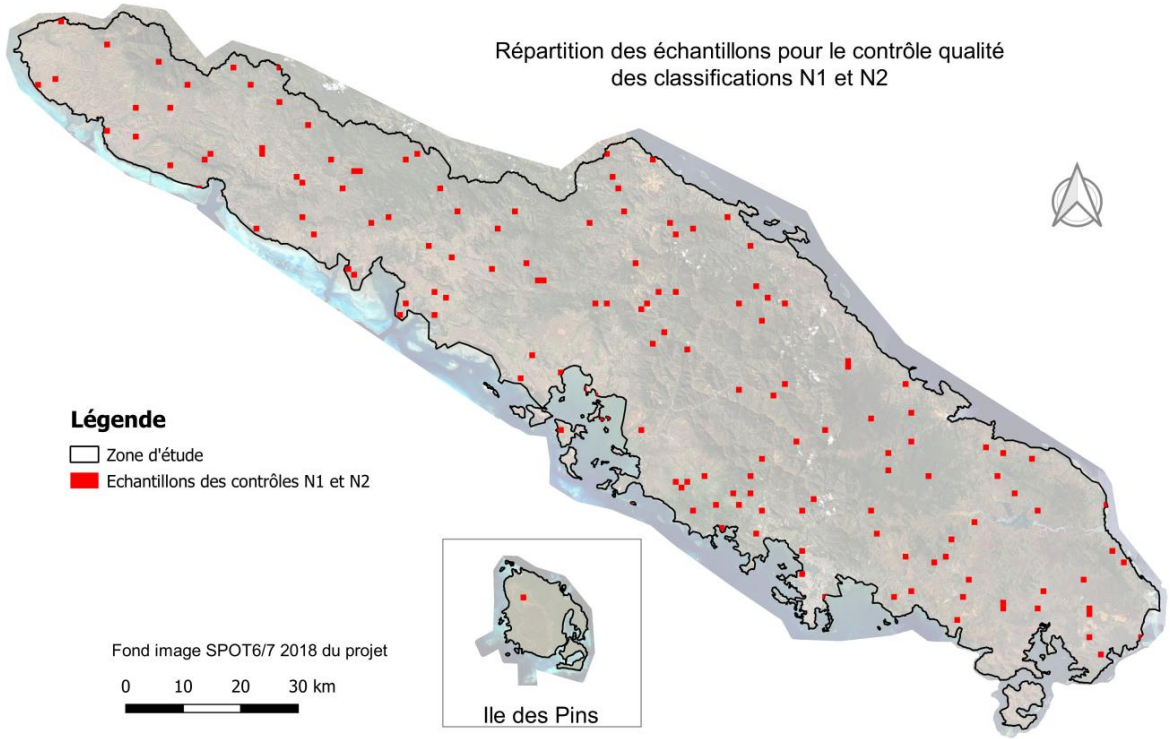


Figure 27 : carte de répartition des zones de contrôle pour les Niveau N1 et N2 (source : Rouet, I ; 2020)

Le résultat du contrôle sont présentées dans le tableau ci-dessous avec une précision globale de **97,87 %**, ce qui représente des résultats très satisfaisants au regard des limites inhérentes à la donnée.

Tableau 14 : quantification de la qualité du Niveau N1 effectué sur les objets supérieurs à 100 m² (source : Rouet, I ; 2020)

Classe	Nombre de pixels	Superficie (km²)	% pixels échantillon entier	% erreur par classe
Nuage	451 185	1,02	0,70	7,59
Ombre	1 772 398	3,99	2,75	2,69
Autre (végétation)	56 645 086	127,45	87,81	0,04
Eau	935 433	2,10	1,45	5,90
Sol nu ou peu végétalisé	**4 416 908**	**9,94**	**6,85**	**2,50**
Nuage mal classé	37 050	0,08	0,06	*sans objet*
Ombre mal classée	49 017	0,11	0,08	*sans objet*
Autre mal classé	20 310	0,05	0,03	*sans objet*
Eau mal classée	58 695	0,13	0,09	*sans objet*
Sol nu mal classé	110 626	0,25	0,17	*sans objet*
Raccords entre images	10 626	0,02	0,02	*sans objet*
Total pixels échantillon	**64 507 334**	**145,14**	**100**	
Total pixels en erreur	**286 324**	**0,64**	**0,4**	

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

12.3. Contrôle qualité du Niveau 2 2018

Le niveau 2 de classification doit répondre à une précision de 85 % par classe. Le tableau n°7 détaille les précisions par catégorie. Le contrôle s'est effectué sur 160 secteurs répartis aléatoirement sur toutes la zones d'étude et couvrant 146km² soit 2% de la zone totale.
L'examen des résultats souligne une classification très satisfaisante pour l'ensemble des classes évaluées. L'examen de la matrice de confusion fait apparaître que la classe des aménagements présente les précisions les plus faibles avec **91,1%.** Le processus de production est à l'origine de ces erreurs. En effet, les données exogènes mobilisées sont peu précises et cela se répercute sur les résultats.

Tableau 15 : Tableau quantitatif des précisions de classification du niveau N2 (source : Rouet, I ; 2020 modifié)

Classe	Nombre de pixels	Superficie (km²)	% pixels en erreur	% pixels bien classés
Ombre	1872464	4,213		
Ombre mal classée	40391	0,091	0,021	0,979
Autre	57490852	129,354		
Autre mal classé	30689	0,069	0,001	0,999
Eau	934962	2,104		
Eau mal classée	56583	0,127	0,057	0,943
Aménagement	1137717	2,560		
Aménagement mal classé	111424	0,251	0,089	0,911
Sol nu peu végétalisé	2224560	5,005		
Sol nu peu végétalisé mal classé	145655	0,328	0,061	0,939

Enfin, le contrôle du N2 a été effectué sur un N2 à 2500 m², tel que mentionné dans la section 6.3, le passage d'une UMC de 100 m² à 2500 m² génère la perte des objets inférieur à 2500 m² par des processus de réaffectation entre classes. Ainsi, le résultat de la classification a par conséquent été impacté et les précisions sont en légère baisse par rapport au niveau 1. Dans le détail, 8,92% des objets surfaces aménagées ont été mal classées, la part des sols nus indifférenciés mal classés atteint 6,15%. Cependant, en dépit de erreurs soulevées, la précision globale du N2 atteint **95 %** sur les zones contrôlées et confirme les performances très satisfaisantes du N2.

12.4. Contrôle qualité du Niveau 3 2018

Le niveau 3 de classification doit dans la mesure du possible atteindre 85 % de précision. L'objectif est bien plus ambitieux pour ce niveau qui comporte 17 classes de sols nus ou peu végétalisés auxquelles s'ajoutent les classes d'eaux et autre. Au total, vingt classes sont concernées.

La production du N3 et le contrôle ont suivi des cycles itératifs permettant une constante amélioration de la qualité des classes.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Le rapport du contrôle qualité détaille les résultats des phases de contrôle successifs. Seuls les résultats du contrôle final sont présentés et analysés dans le présent document.

Globalement le contrôle s'est déroulé en trois phases : un contrôle qualitatif rapide sur l'ensemble de la cartographie produite. Un contrôle intermédiaire sur 1% des zones en sols nus ou peu végétalisés avec 5,04 Km² répartis aléatoirement sur l'ensemble de la zone du projet.

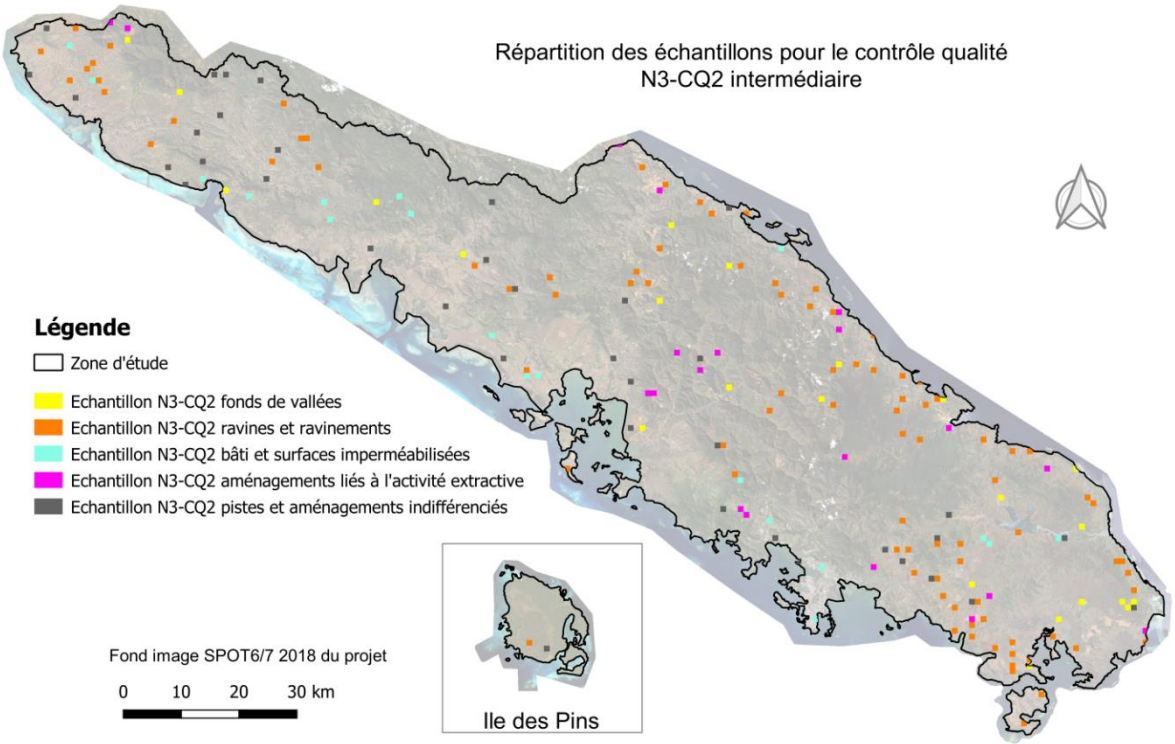


Figure 28 : Répartition des zones de contrôle intermédiaire (source : Rouet, I ; 2020)

Ce contrôle a été effectué par groupe thématique suivi d'une dernière phase de correction des défauts mis en lumière par ce Contrôle. Enfin un ultime contrôle quantitatif est réalisé sur approximativement 1%

Au total, ce sont 247 secteurs qui ont été contrôlés couvrant près de 235 km² de la zone d'étude soit 3,2% de la surface totale avec 14,5 km² de sols nus évalués toutes catégories confondues

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

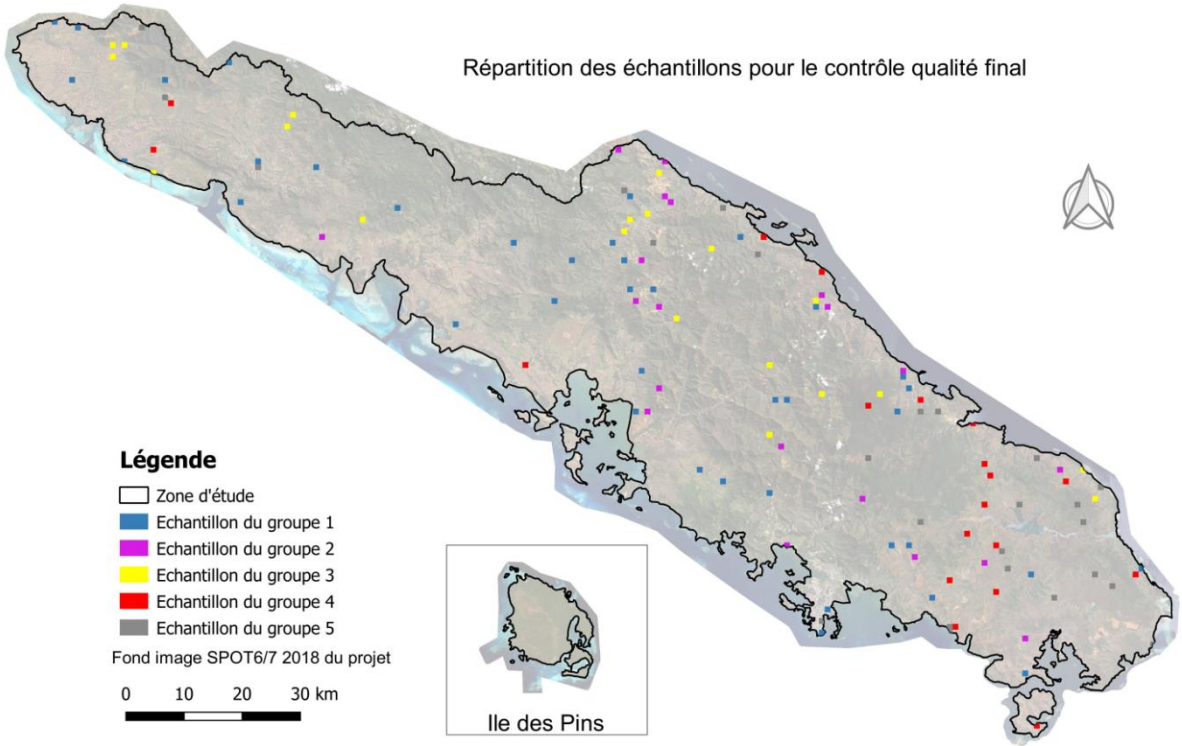


Figure 29 : Répartition des zones de contrôle final (source : Rouet, I ; 2020)

Le tableau 13 ci-dessous reprend la quantification des erreurs de classification pour les classes concernées par la thématique.

NB : Les classes « ombre », « nuage » et « autre » ne sont pas contrôlés au N3 de la classification.

Pour rappel des métriques de qualités utilisées :

La précision : représente la part de pixels d'une classe correctement classés, mesure la pertinence de la classification produite pour la classe considérée (la précision producteur)

Le rappel : part de pixels correctement classés sur l'ensemble des pixels à classer, mesure la capacité du système à donner toutes les solutions pertinentes (la précision utilisateur). Ça permet d'identifier les axes d'amélioration d'une classification.

F-Score : c'est la moyenne harmonique de la précision et du rappel. Mesure la capacité du système à donner toutes les solutions pertinentes et à refuser les autres

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

Tableau 16 : quantification du contrôle qualité sur les catégories de sol nus ou peu végétalisés (source : Rouet, I ; 2020 modifié)

	Eau dynamique	Eau statique	Aménagement indifférencié	Carrière/ Chantier/ Verse contrôlée	Bâti et autre surface imperméabilisée	Piste	Décharge non contrôlée / Arasement	Sol nu indifférencié	Zone brûlée	Ravienement	Ravine isolée	Sédiment & colluvion	Fond de vallée indifférencié	Mouvement de terrain	Cuirasse à nu	Précision
Eau dynamique	0,922	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,004	0,001	0,000	0,000	0,92
Eau statique	0,006	0,798	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,150	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,79
Aménagement indifférencié	0,000	0,000	0,682	0,104	0,059	0,000	0,017	0,028	0,000	0,097	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,68
Carrière/ Chantier/ Verse contrôlée	0,000	0,000	0,000	0,969	0,000	0,003	0,023	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,97
Bâti et autre surface imperméabilisée	0,000	0,000	0,021	0,000	0,976	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,98
Piste	0,000	0,000	0,003	0,002	0,001	0,986	0,000	0,006	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,99
Décharge non contrôlée / Arasement	0,000	0,000	0,008	0,056	0,000	0,000	0,544	0,139	0,000	0,238	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,54
Sol nu indifférencié	0,005	0,004	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0,922	0,001	0,026	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,92
Zone brûlée	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,997	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,00
Ravienement	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,002	0,986	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,99
Ravine isolée	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,000	0,000	0,089	0,864	0,000	0,000	0,000	0,000	0,86
Sédiment & colluvion	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,970	0,017	0,000	0,000	0,94
Fond de vallée indifférencié	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,000	0,000	0,000	0,152	0,802	0,000	0,000	0,80
Mouvement de terrain	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,132	0,000	0,000	0,000	0,868	0,000	0,87
Cuirasse à nu	0,000	0,001	0,048	0,000	0,000	0,013	0,000	0,261	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,672	0,67
Rappel	0,81	0,88	0,79	0,92	0,96	0,97	0,72	0,98	0,98	0,76	0,85	0,76	0,71	0,84	0,95	
F-score	0,87	0,84	0,73	0,95	0,97	0,98	0,62	0,95	0,99	0,86	0,86	0,85	0,75	0,85	0,79	

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

L'examen du tableau permet de constater que la précision globale de plus de 86%. La plus part des classe sont très satisfaisante avec entre 80 et 99% de précision.

Cependant, quelque classes présentent des performances moins bonnes avec 68, 54 et 67% repsectivement pour les classes : « Aménagement indifférencié », « Décharge non contrôlée /arasement » et « Cuirasse à nu ».

Ces résultats confirme les difficultés attendues et soulevés lors des différents ateliers quant à la cartographies des objets concernés par ces catégories.

Il est a noter que ces catégories présente un caractère hétérogène rendant le travail et l'identification déclicat, c'est le cas notamment pour les « aménagements indifférenciés » et les « fond de vallée indifférencié » avec 80% de précsion, ces deux catégories trouvent leur limites (données, définition et photo-interprétation).

Enfin, un dernier point de vigilance est à souligner et conserne la classe « Sédiment & colluvion », qui apparait par endroit débordée sur la classe des « Fond de vallée indifférencié » impactant cette dernière de manière parfois significative, d'autant plus que la classe des « fond fond de vallée indifférencié » est moins étendue que la classe « Sédiement & colluvion » et de fait, les erreurs d'affectation sont proportionnellement importantes.

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.

13. ANNEXE

Tableau 17 : tableau des correspondances des objets avec les classes issues de la typologie post atelier 1

x	Origine: naturel	Origine: anthropique minier	Type: départ
- non classé	Origine: indifférencié	Origine: anthropique non minier	Type: transit
! Confusion possible		Origine: anthropique indifférencié	Type: dépôt
			Type: neutre

Niveau d'analyse	N3																				
Classe typologique N3 →	Ombres topo-graphiques	Autre	Eau statique	Eau dynamique	Carrière, zone de chantier, verse contrôlée	Décharge non contrôlée	Piste	Bâti et autres surfaces imperméa-bilisées	Aména-gement indifférencié	Surface signicativement brûlée	Ravine	Zone de ravinement	Arasement	Falaise, escarpement rocheux	Mouvement de terrain	Affleurement peu sensible à l'érosion	Cuirasse	Eboulis	Colluvions et sédiments	Sol nu faiblement végétalisé	Sol nu indifférencié
Objet à classer ↓																					
Nuages																					
Ombres de nuages																					
Ombres topographiques	x																				
Ombres de végétation	-																				
Couverte végétale		x																			
Lac, étang, doline en eau			x																		
Eau courante (cours d'eau)				x																	
Carrière					x																
Zone de chantier					x																
Verse contrôlée					x																
Décharge non contrôlée						x															
Piste non entretenue							x														
Piste entretenue							x														
Roulage minier							x														
Bâtiments								x													
Parking								x													
Route revêtue								x													
Plateforme sur mine									x												
Pateforme de stockage minier									x												
Zone brûlée										x							!				
Ravine											x										
Lavaka												x									
Badlands												x									
Arasement													x								
Falaise														x							
Escarpement prononcé														x							
Arrachement															x						
Coulée															x						
Lave torrentielle															x						
Affleurement de lit vif																x					
Cuirasse										!							x				
Eboulis																		x			
Colluvions																			x		
Alluvions																			x		
Engravement																			x		
Envasement																			x		
Cône de déjection torrentielle																			x		
Terrasses alluviales stabilisées non végétalisées																			x		
Plage																			x		
Tanne nu																					x

Toute reproduction ou diffusion de l'ensemble ou partie du présent document est strictement interdite, sauf accord écrit des auteurs.