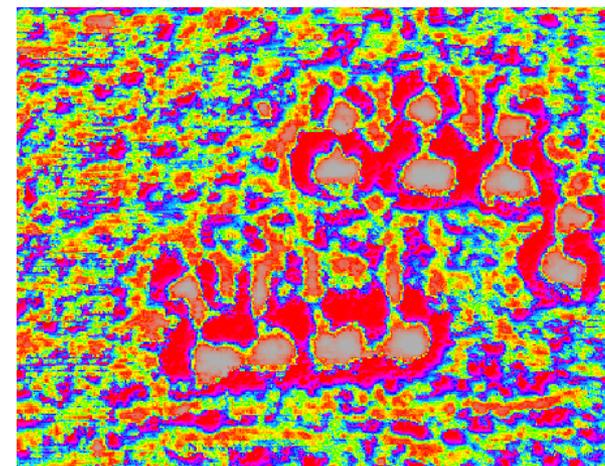
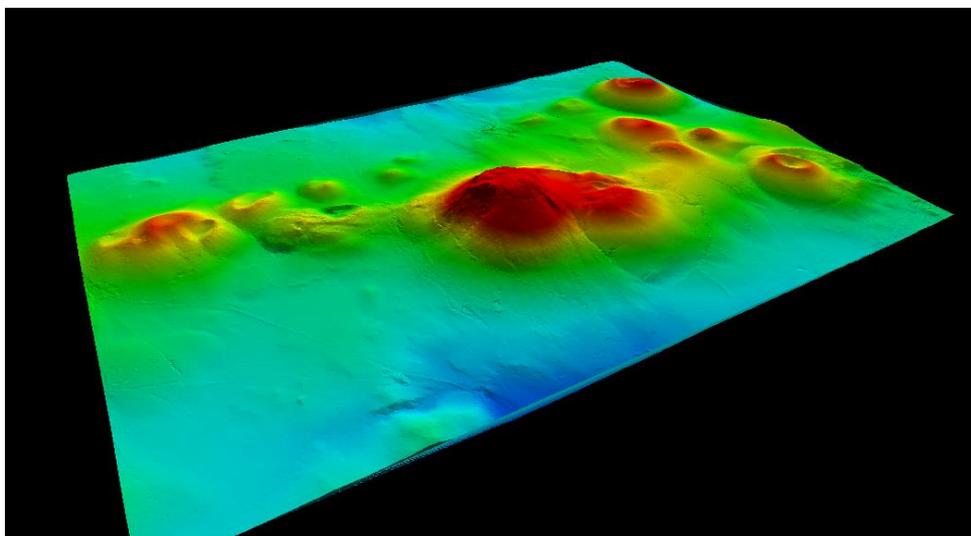
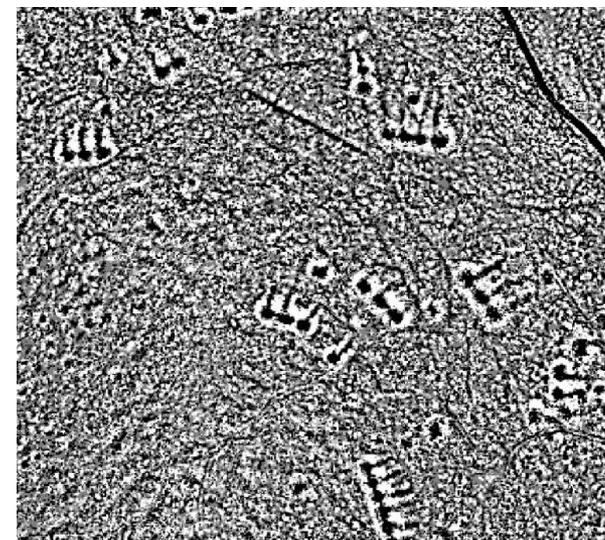
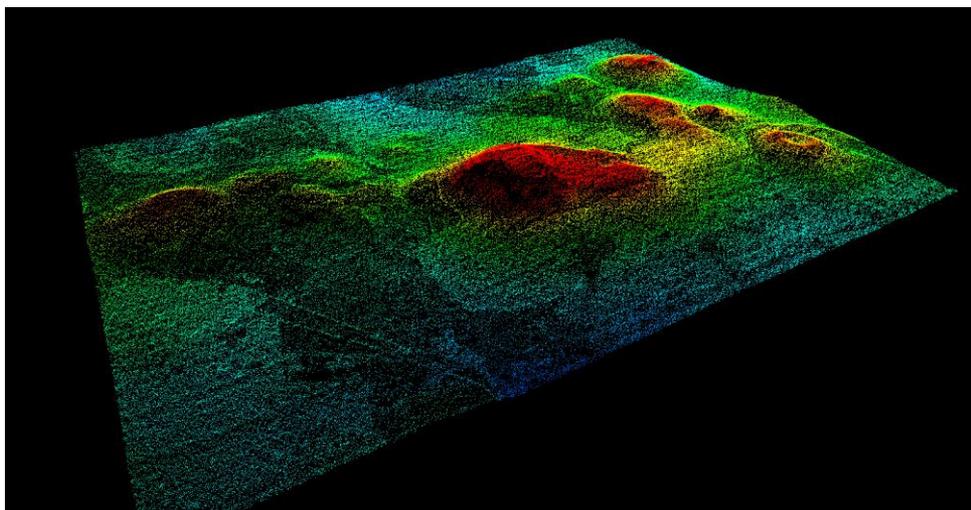


Utilisation d'images dérivées d'un jeu de données LIDAR pour la détection automatisée de vestiges archéologiques (*programme de recherche méthodologique LiDARCHEO*)

Franck VAUTIER, Jean-Pierre TOUMAZET, Erwan ROUSSEL, Marlène FAURE, Mohamed ABADI, Marta FLOREZ, Bertrand DOUSTEYSSIER

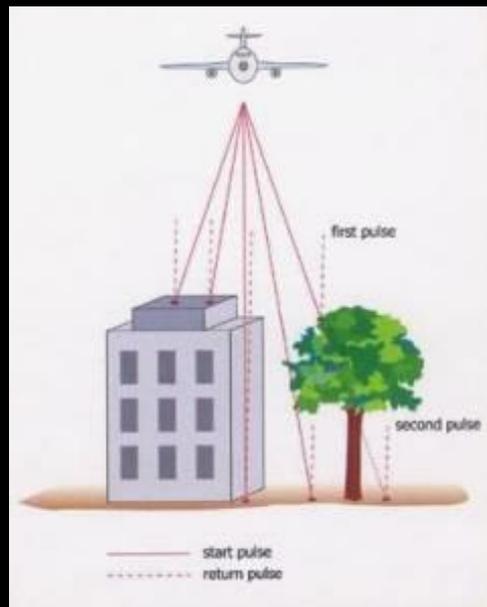


Le LiDAR aéroporté (Light Detection and Ranging ou altimétrie laser aéroportée) : **technologie de télédétection développée dans les années 1970 en même temps que le développement du laser (armée américaine), démocratisée depuis 2000 (développement des techniques GPS en vol et diminution du coût des systèmes d'acquisition).**

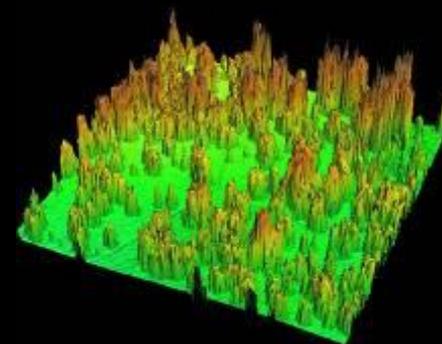
Embarqué à bord d'un avion, un laser émet des impulsions lumineuses à haute fréquence.

Le rayon lumineux balaie le sol et les obstacles.

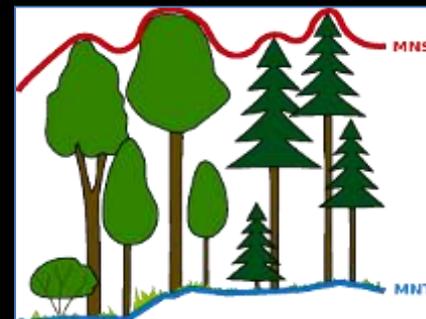
Le système enregistre le temps de retour.



Nuage de points XYZ



Classification des données



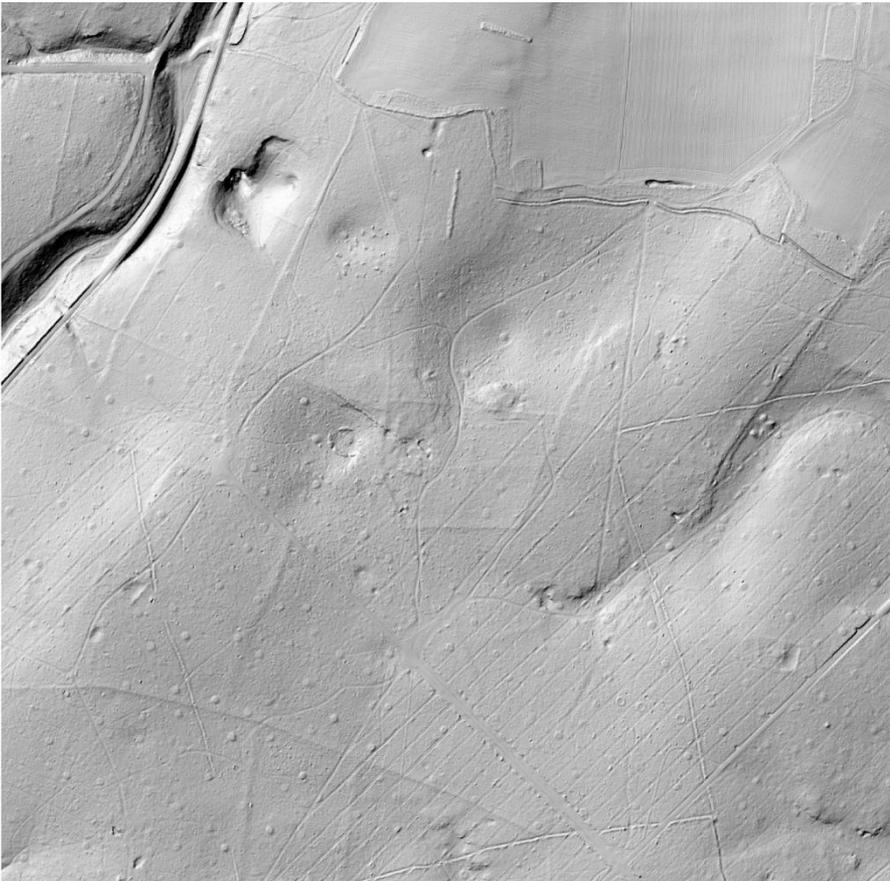
AVANTAGES :

- détecte la topographie sous couvert forestier
- densifie et comble les lacunes des secteurs inaccessibles au topographe
- couvre de grandes superficies ($> 10\text{pts/m}^2$, précision = 10 cm)
- économie en temps et en investissement financier.

En archéologie : premières expériences à la fin des années 90 (Royaume-Uni), démocratisation à partir de 2005 en particulier sous couvert forestier

Soutien technique aux archéologues par une approche géomatique

- CONSTAT** : Analyses classiques des données LiDAR en archéologie sont basées essentiellement sur :
- la réalisation d'images dérivées de MNT (ombrages, LRM, SKV)
 - l'interprétation visuelle des images et digitalisation des formes repérées à la main (fastidieuses, parfois subjectives, impossible dans certains cas)

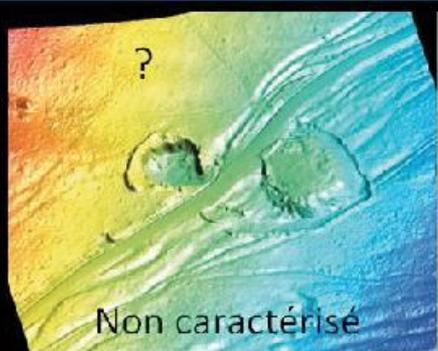


HYPOTHESE DE TRAVAIL : Les signatures morphologiques (creux, bosses, lignes, courbes...) des vestiges révélés par les images dérivées des données LiDAR peuvent être détectées par des algorithmes de reconnaissance automatique.

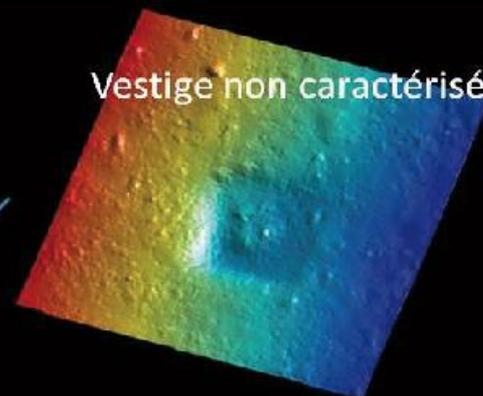
OBJECTIFS : 1/ conception d'une méthode de détection automatisé
2/ test de la méthode sur les données LiDARVERNE
3/ évaluer sa pertinence par une analyse comparative



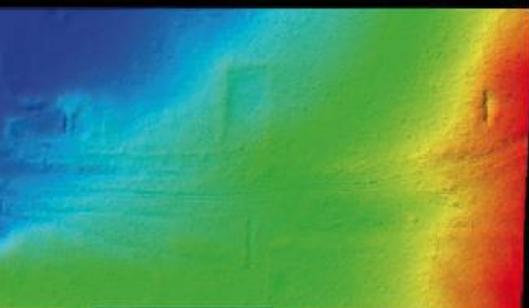
Structures en peigne (Tras)



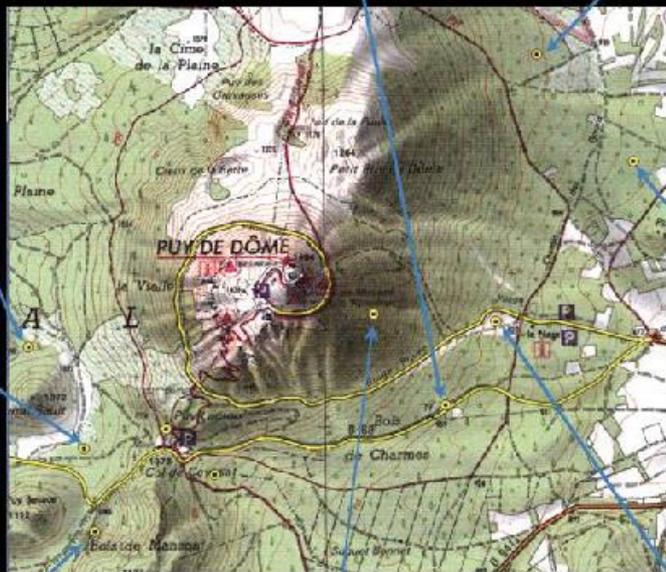
Non caractérisé



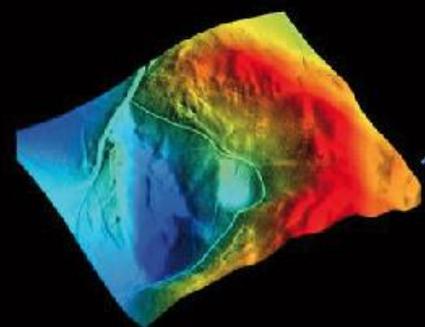
Vestige non caractérisé



Village gallo-romain de Ceysnat



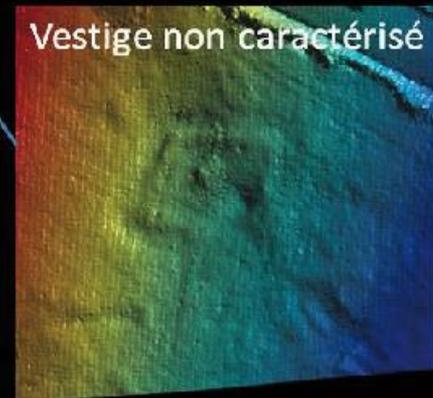
Vestige non caractérisé
+ limites de l'ancien
parcellaire (sous forêt)



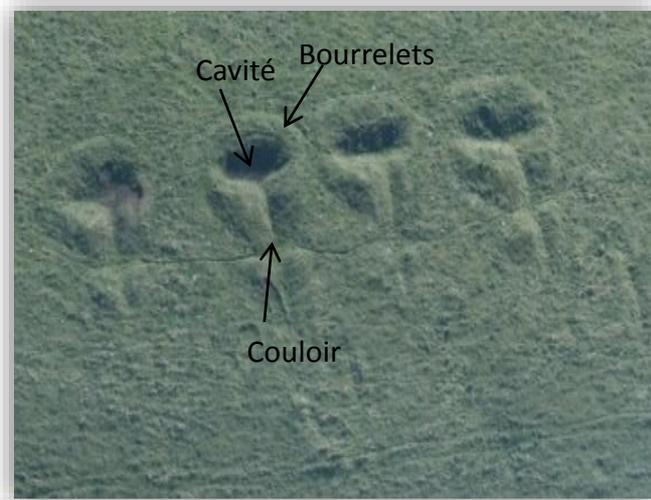
Carrière du Killian



Chemin gallo-romain
menant au temple de
Mercure

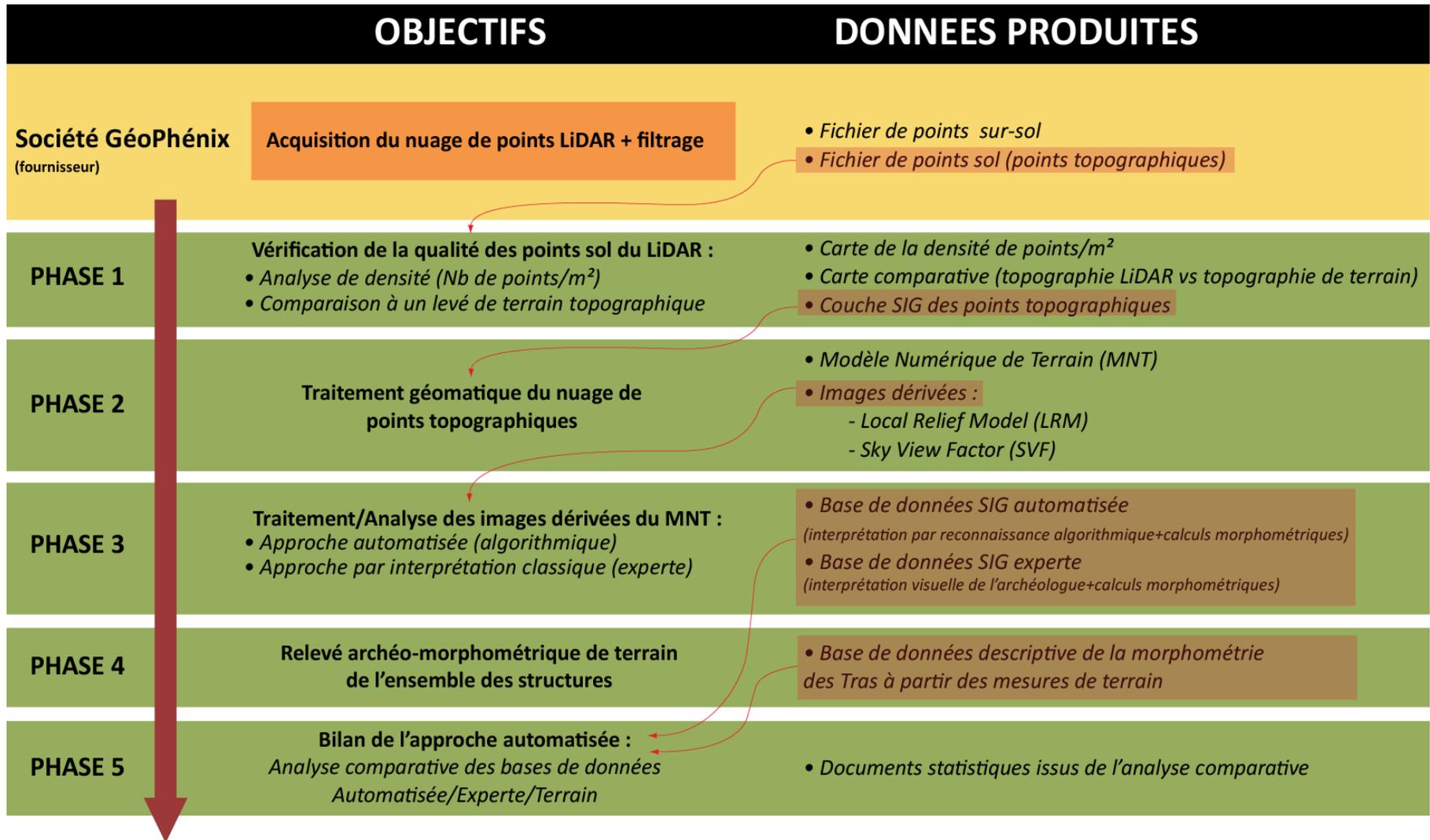


Vestige non caractérisé

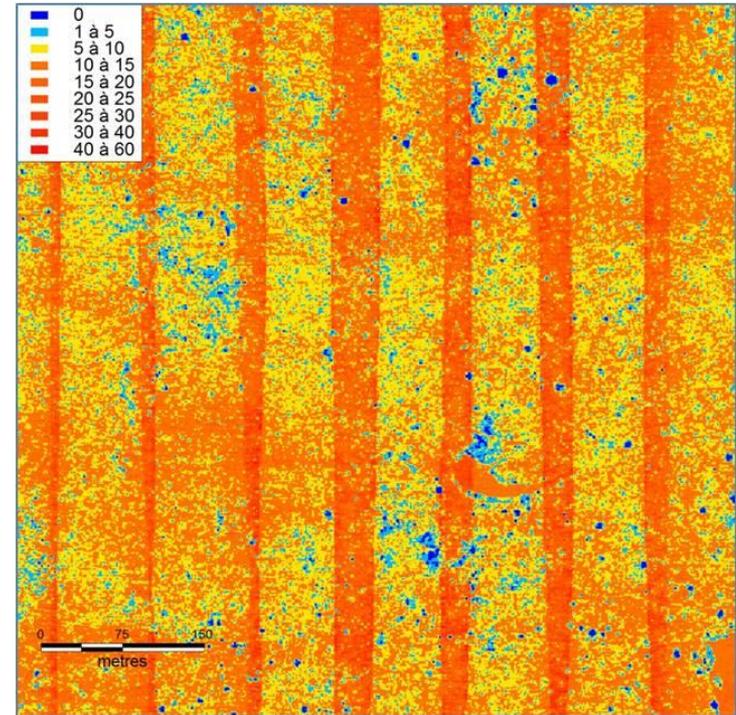




DEMARCHE METHODOLOGIQUE EN 5 PHASES



Phase 1 : vérification de la qualité des données sol

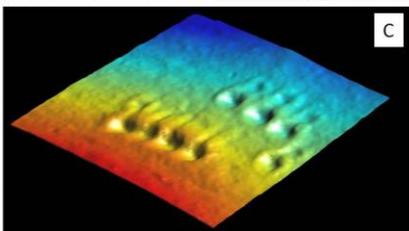
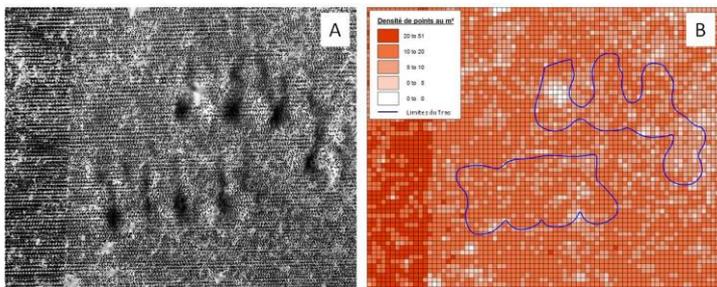


Densité (Pts/m ²)	Surface (m ²)	% de la surface totale
0	2890.47	0.65
1 à 5	29202.28	6.62
5 à 10	157920.97	35.79
10 à 15	172363.31	39.06
15 à 20	45025.29	10.20
20 à 25	23022.49	5.22
25 à 30	7803.83	1.77
30 à 40	2828.66	0.64
40 à 60	240.99	0.05

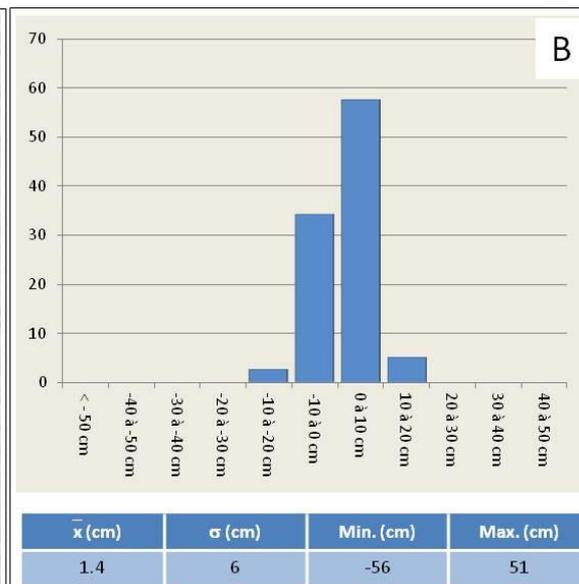
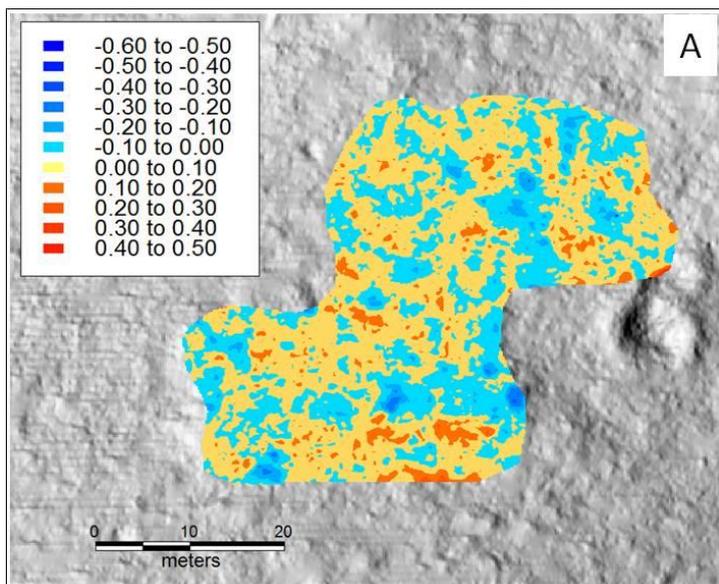
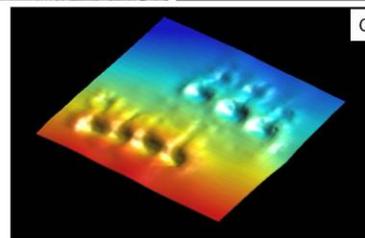
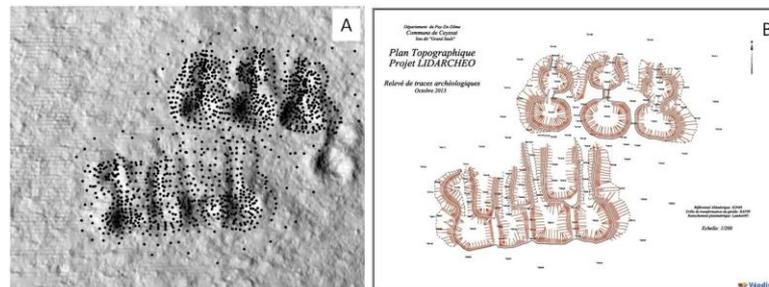
\bar{x}	σ	Min.	Max.
11.5	8.99	0	47

Phase 1 : vérification de la qualité des données sol

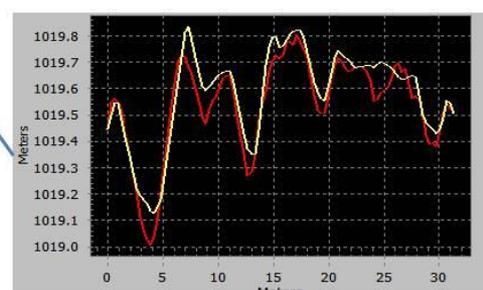
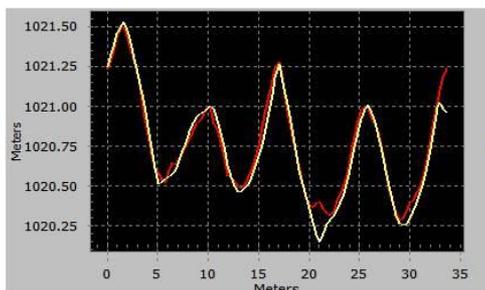
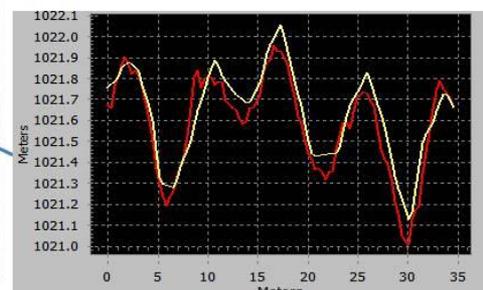
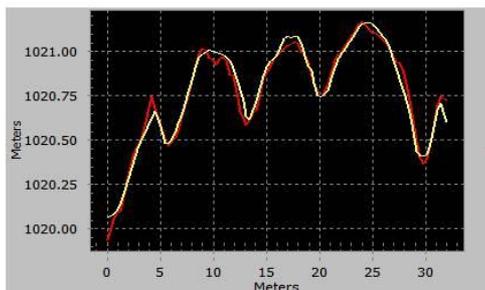
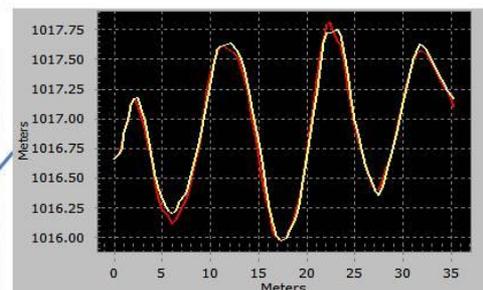
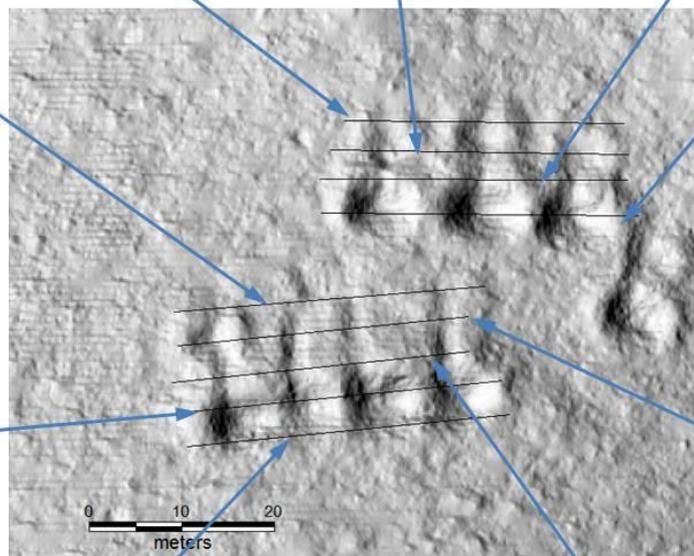
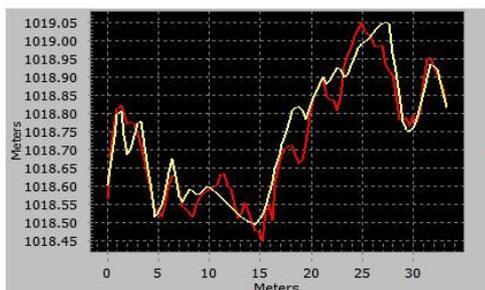
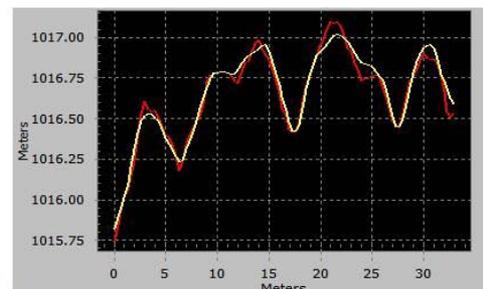
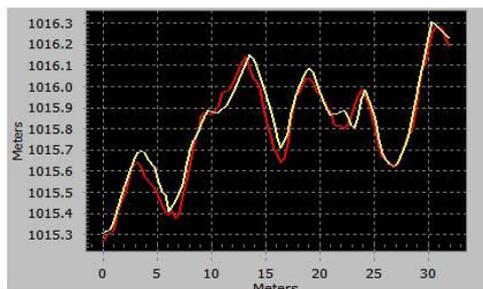
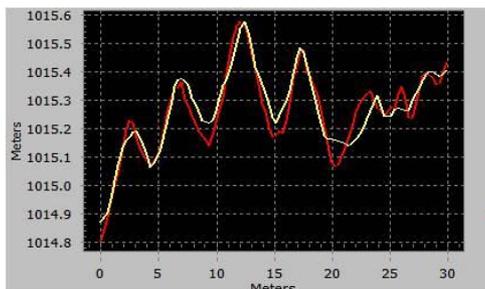
MNT issu du LiDAR



MNT issu d'un levé terrain

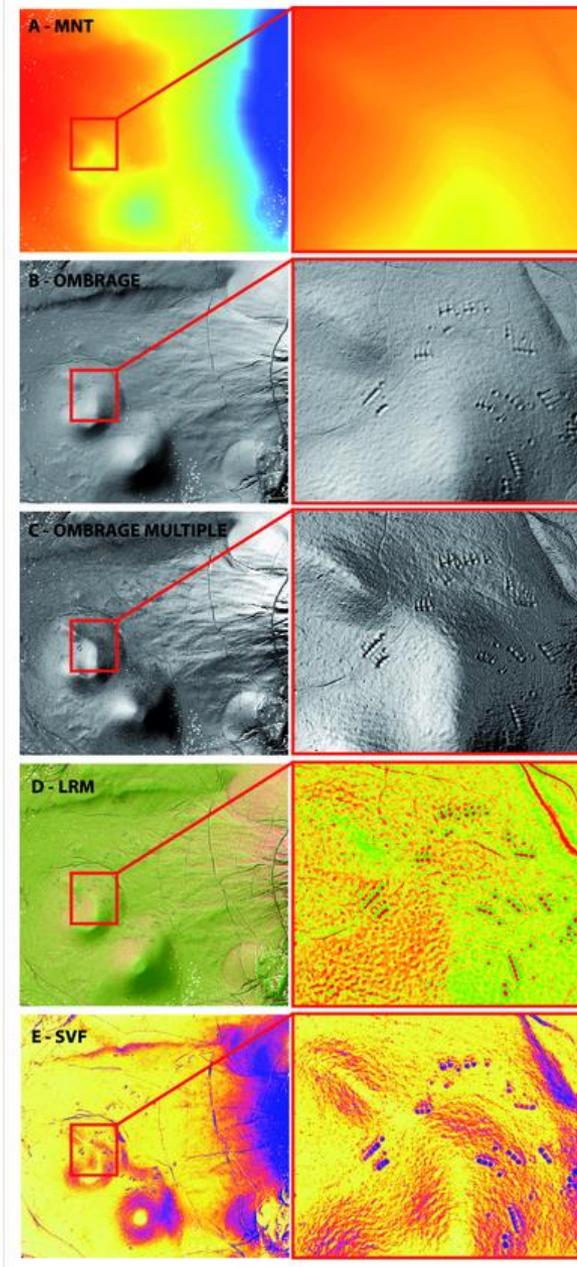


Phase 1 : vérification de la qualité des données sol



— Profils MNT LiDAR
— Profils MNT Topographie de terrain

Phase 2 : Production d'un MNT et d'images dérivées du MNT



MNT : Modèle Numérique de Terrain

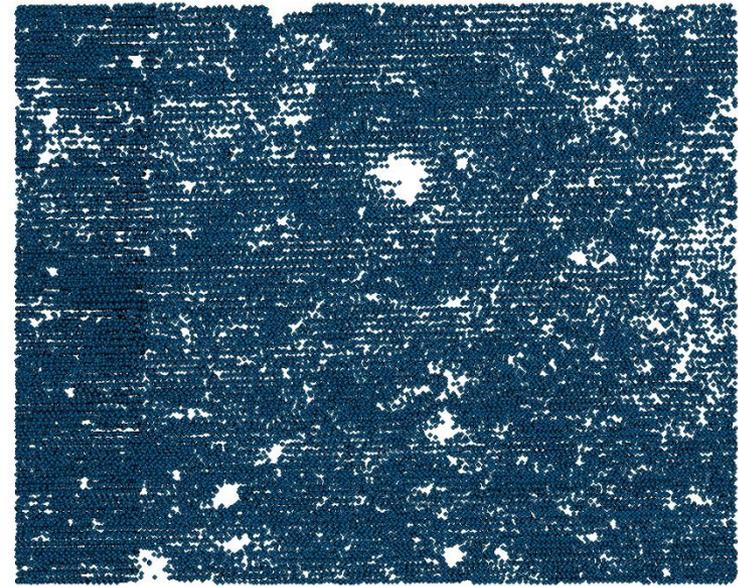
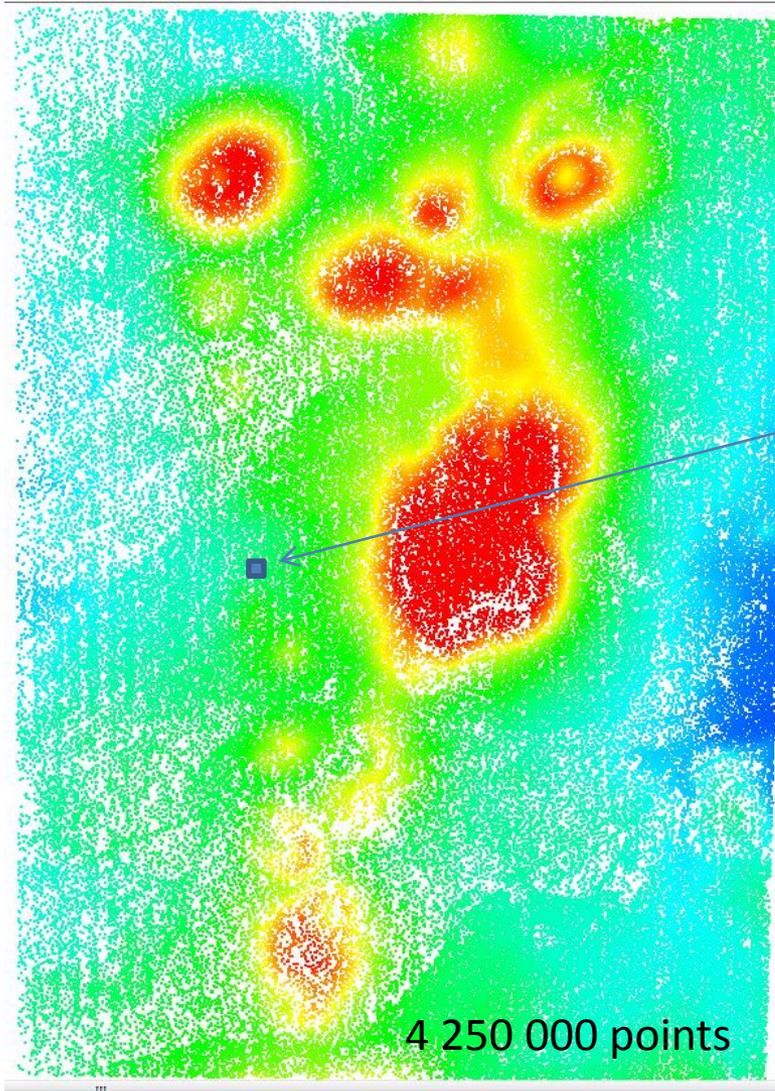
Modèle d'ombrage : cartographie des ombres portéee

Modèle d'ombrages multiples: cartographie des ombres portéee multidirectionnelles

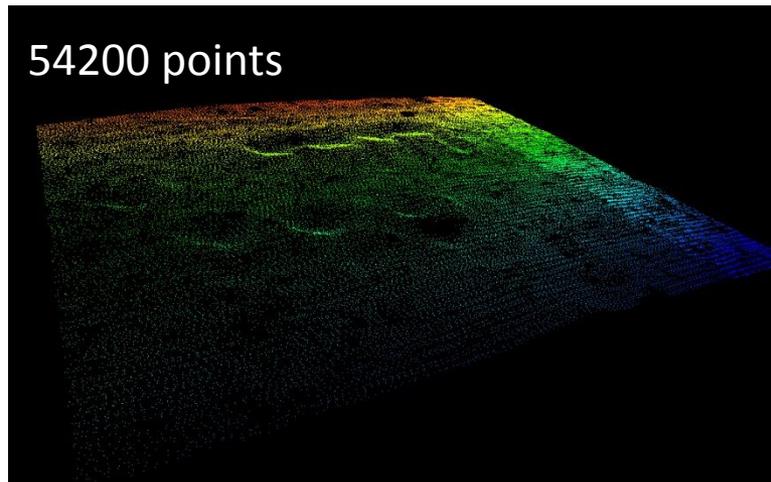
Modèle de relief local : soustraction du MNT à un MNT lissé pour faire apparaître les anomalies topographiques locales

Le facteur vue du ciel (Sky View Factor) : calcul la portion de ciel visible pour chaque pixel du MNT

Création d'un MNT



175 m



Fichier LiDAR contenant le nuage de points



Superposition d'une grille régulière au
nuage de points

Grille régulière où chaque cellule
représente une surface de 50 x 50 cm



Calcul de la valeur de chaque cellule
de la grille

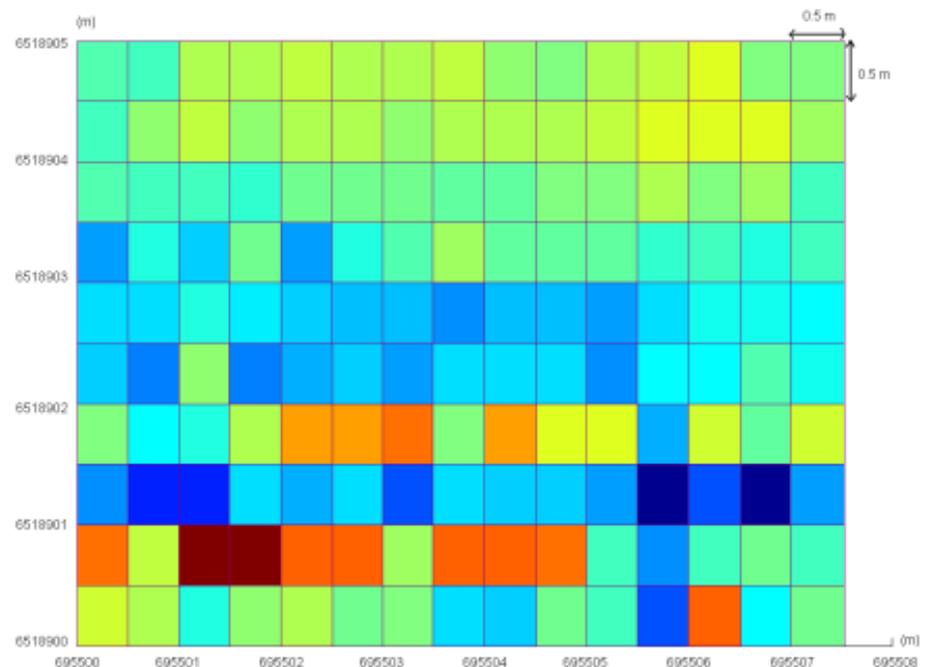
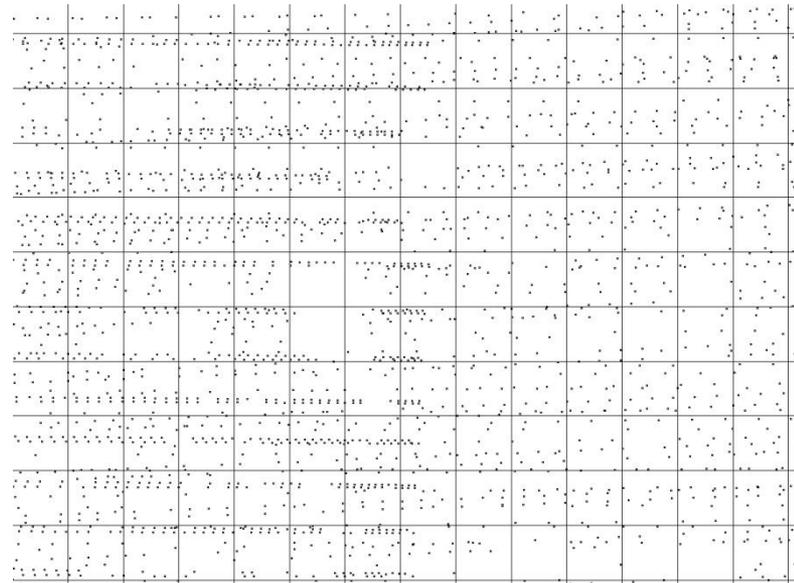
Calcul de l'altitude moyenne des points
LiDAR qui appartiennent à la cellule

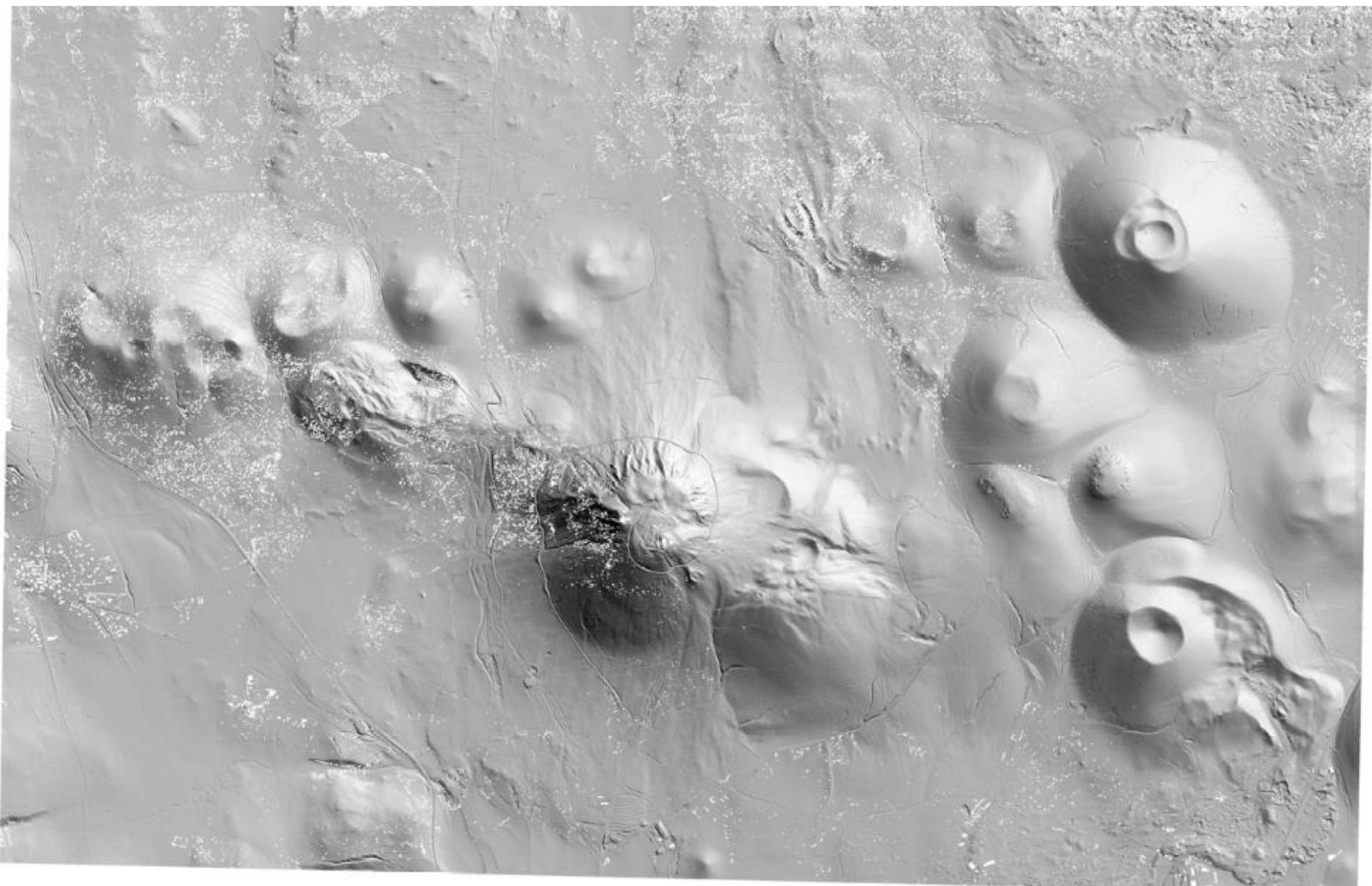


Interpolation et extrapolation

Interpolation linéaire

Extrapolation linéaire





Traitement du MNT : 1/ modèle d'ombrage simple (Hillshade Model)

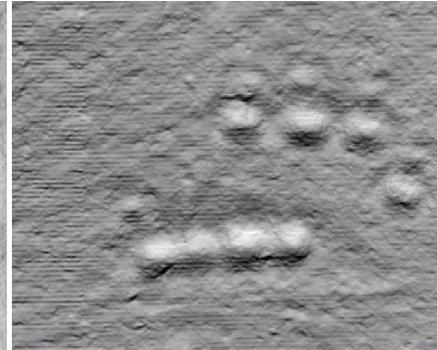
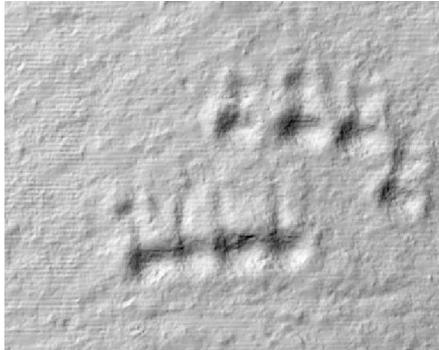
Cartographie des ombres portées selon une source lumineuse positionnée arbitrairement par l'opérateur

Azimut : 315 °
Incidence : 45 °

Azimut : 90 °
Incidence : 45 °

Azimut : 180 °
Incidence : 45 °

Azimut : 180 °
Incidence : 45 °

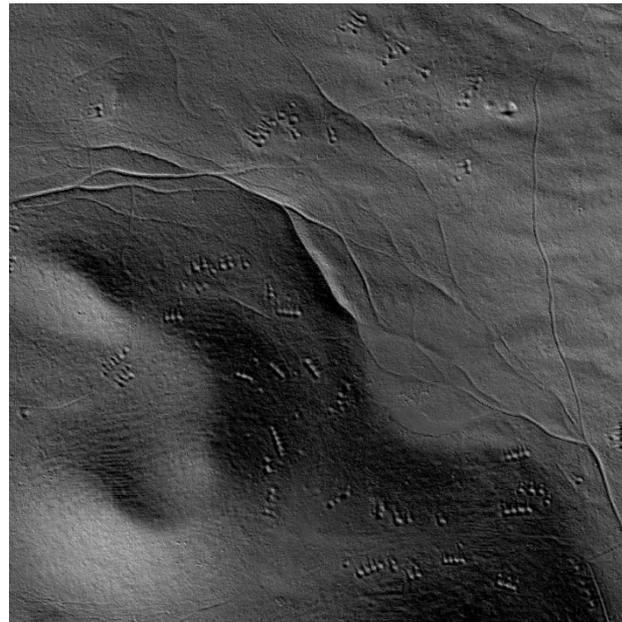


Images facilement interprétées par l'œil humain

Problème

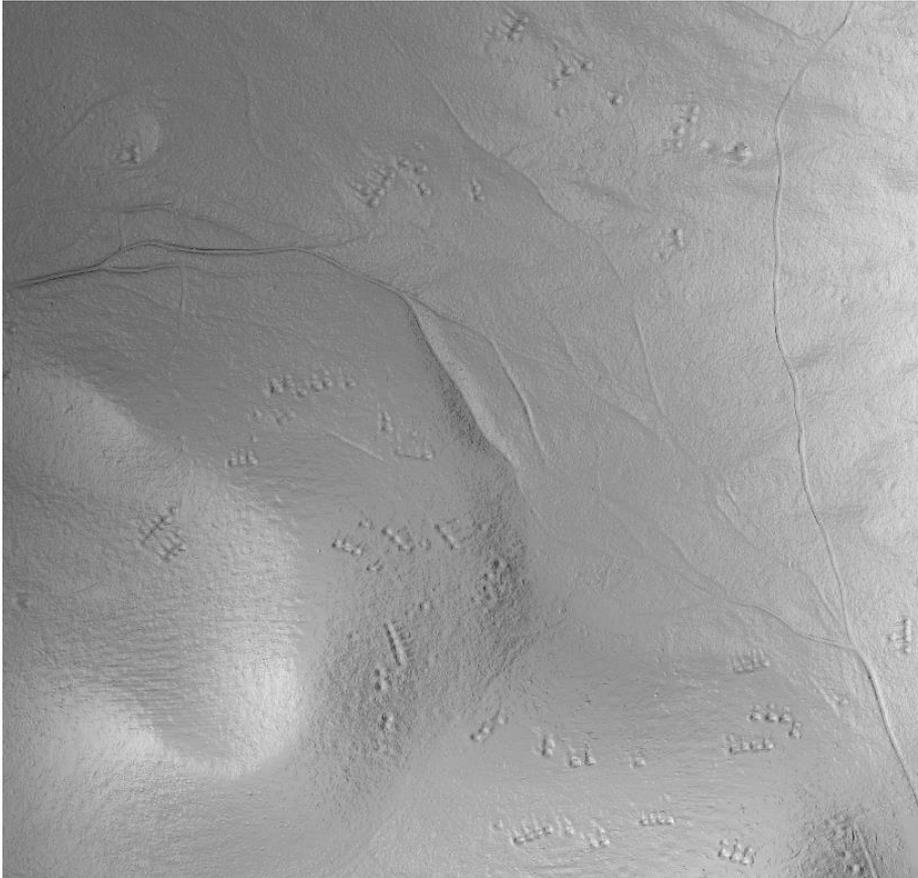
Dépendant de l'énergie du relief.

L'ombre portée d'un édifice volcanique peut masquer celles des petites structures anthropiques.



Traitement du MNT : 2/ modèle d'ombrages multiples (*MDOW pour Multi-Directional Oblique Weighting*)

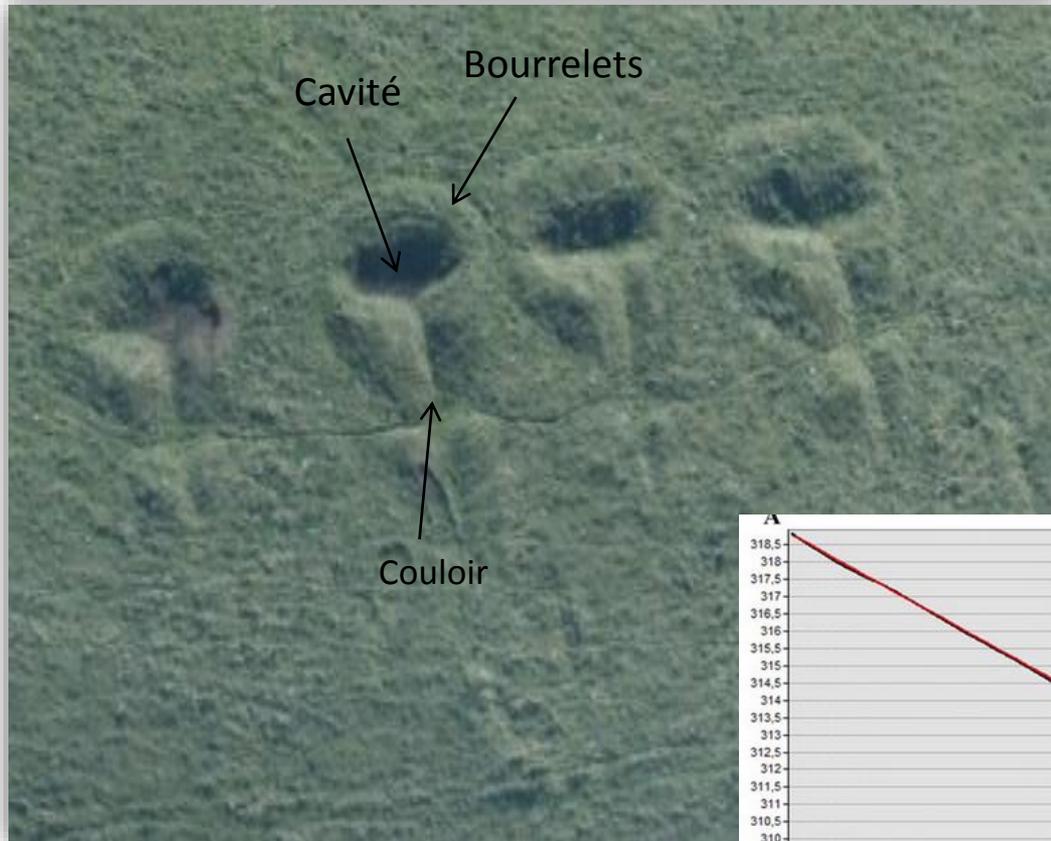
Cartographie des ombres portées mais selon une **combinaison de plusieurs sources lumineuses**



Les ombres portées des reliefs de petites dimensions sont davantage prises en compte et détectables par l'oeil humain mais pas de manière automatisée

Traitement du MNT : 3/ Local Relief Model (*Modèle de relief local*)

Cartographie des anomalies topographique locales



Principe :

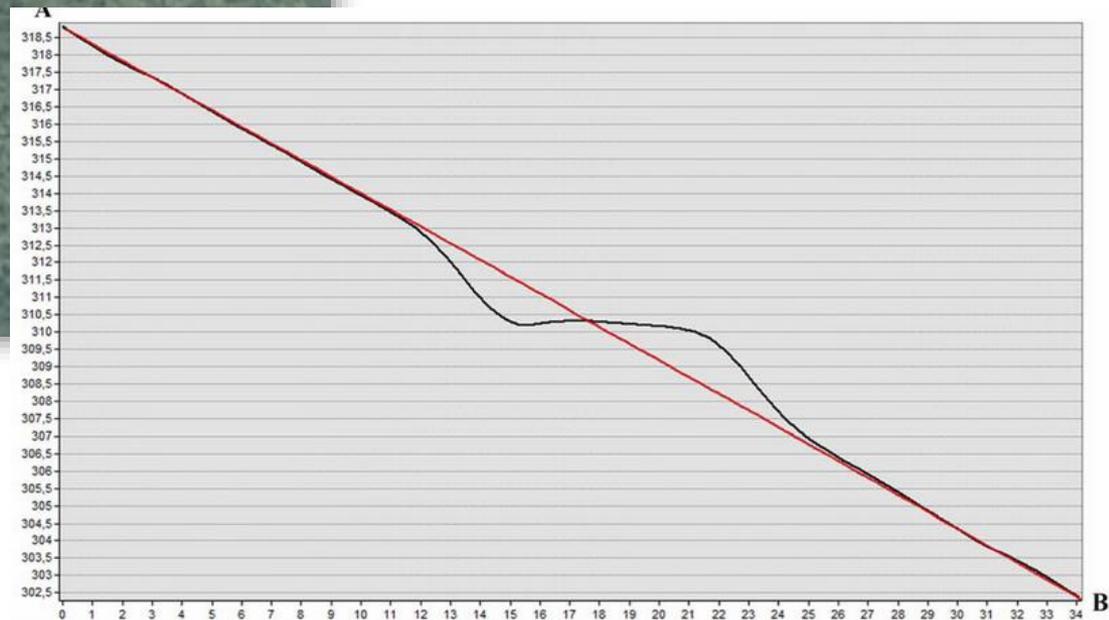
1/ lissage du MNT (filtre local)

La taille du noyau du filtre est déterminée selon la taille de l'objet étudié

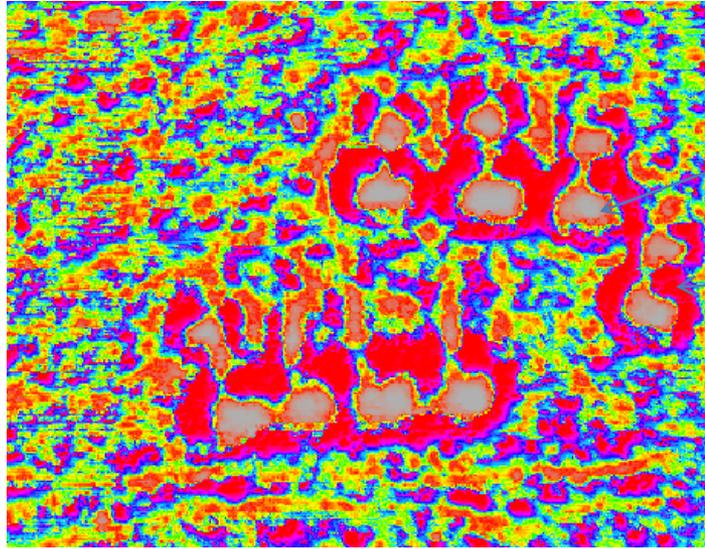
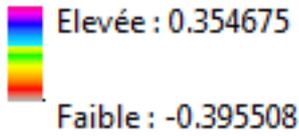
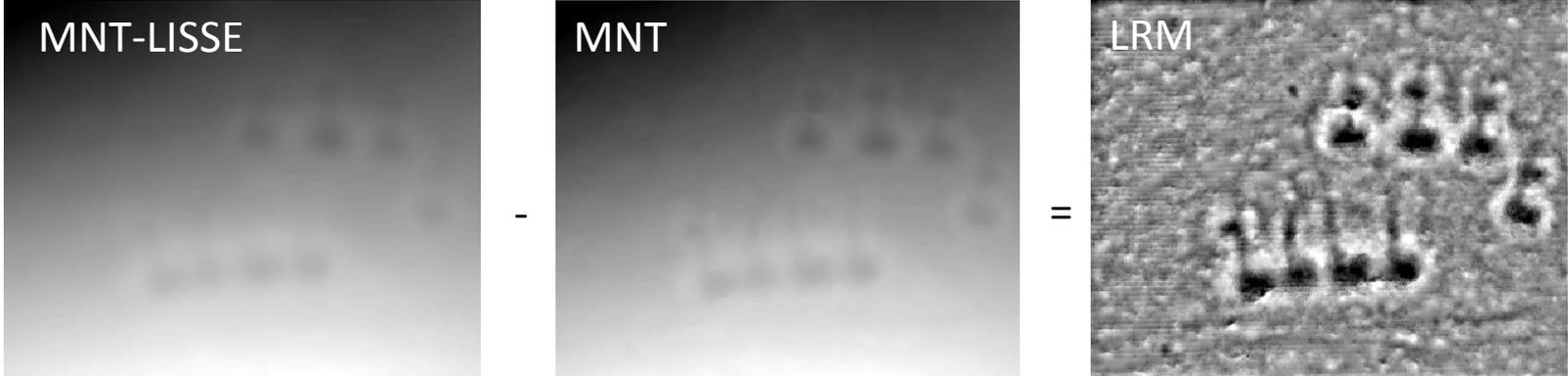
Il doit être au moins $>$ à la moitié de l'objet

2/ soustraction du MNT source au MNT lissé

RESULTAT : Carte des différences topographiques locales



Traitement du MNT : 3/ Local Relief Model (Modèle de relief local)

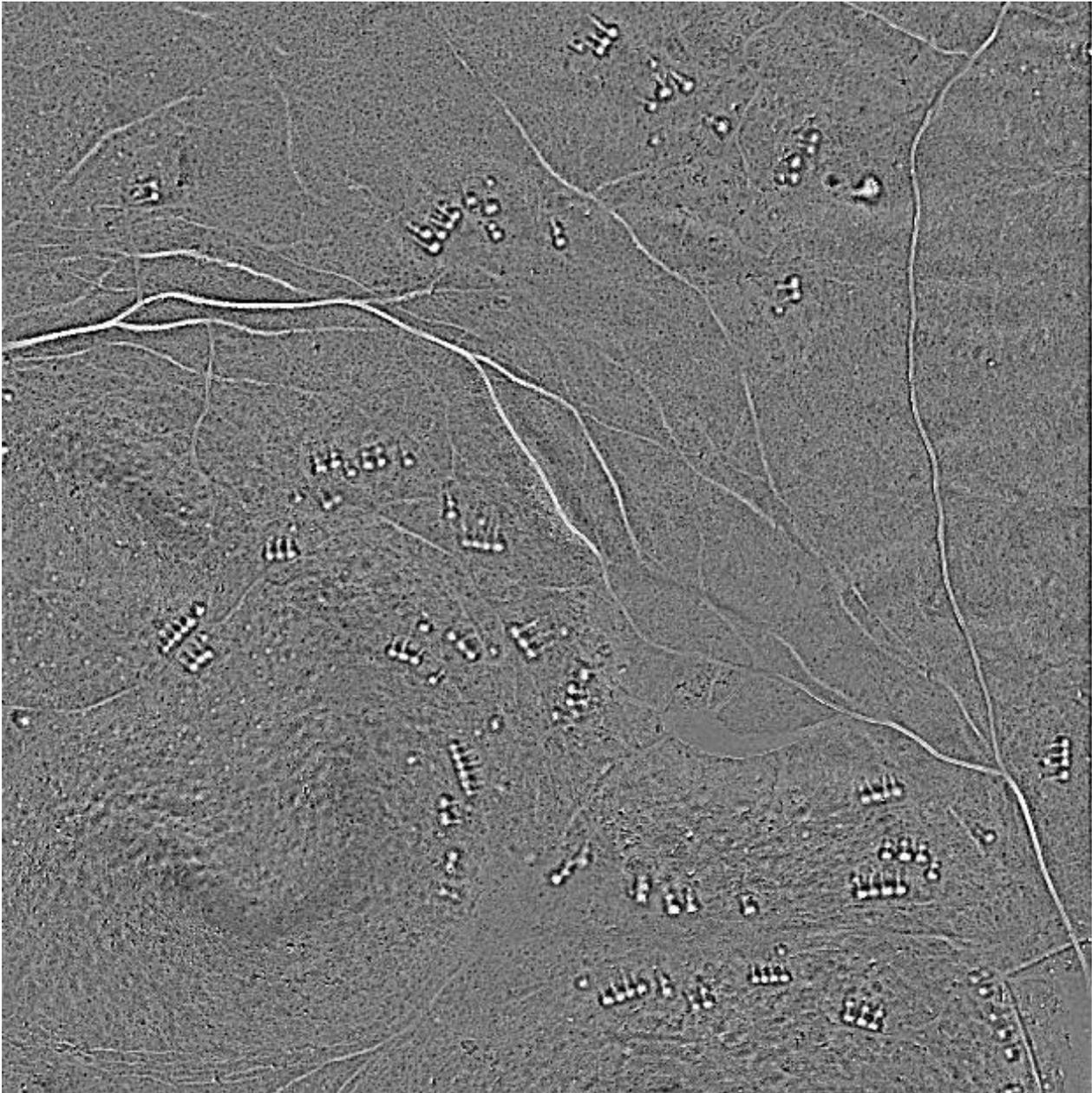


dépression

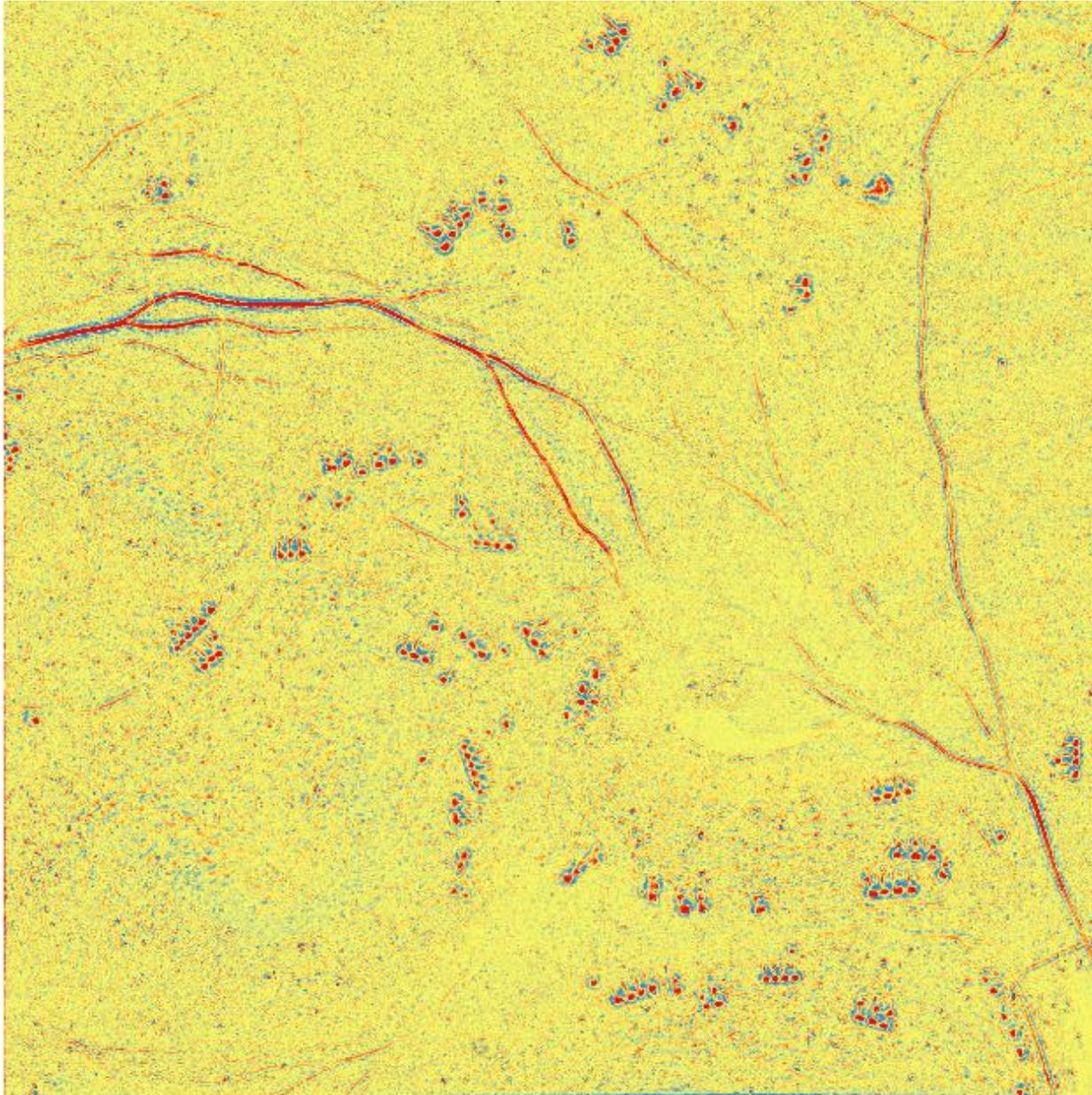
Bourellets

Résultat colorisé

Traitement du MNT : 3/ Local Relief Model (*Modèle de relief local*)



Traitement du MNT : 3/ Local Relief Model (*Modèle de relief local*)



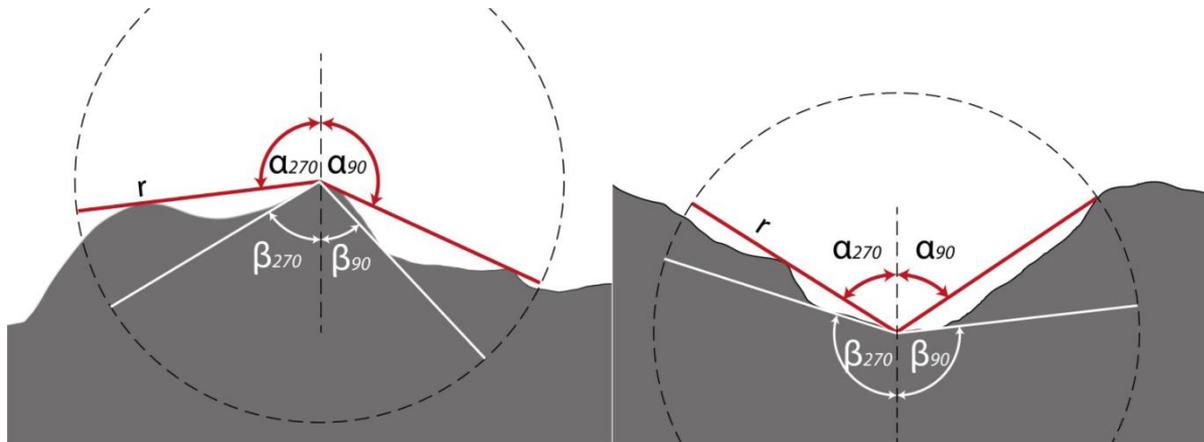
Cette approche met en évidence les éléments caractérisés par des variations de relief (anthropiques et naturels)

Traitement du MNT : 4/ Sky View Factor (*Modèle de relief local*)

Principe : Calcule la portion de ciel visible pour chaque pixel de l'image (MNT)

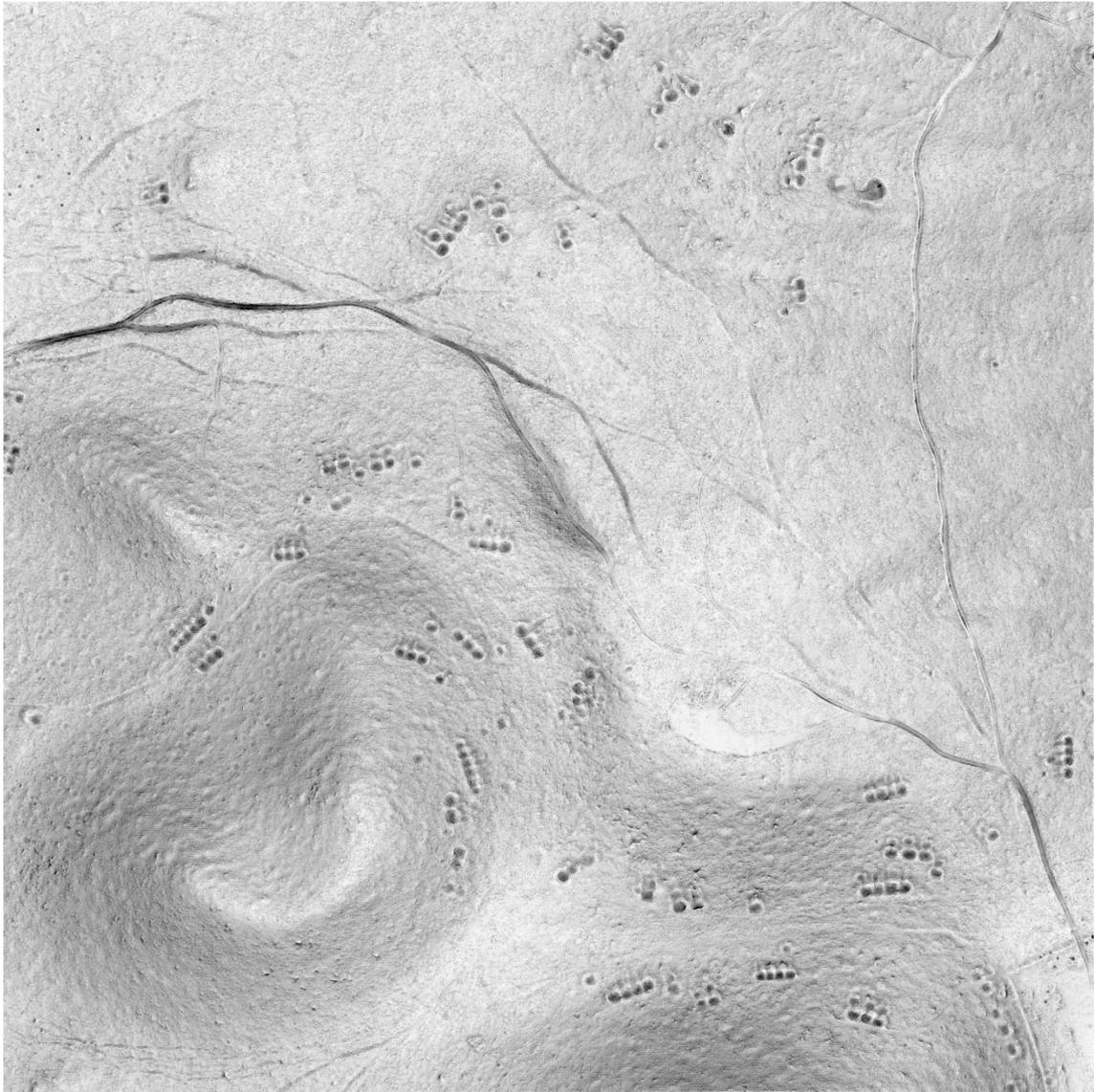
Sommet et terrain plat : angle de ciel visible important

Vallée ou creux : angle de ciel visible plus faible

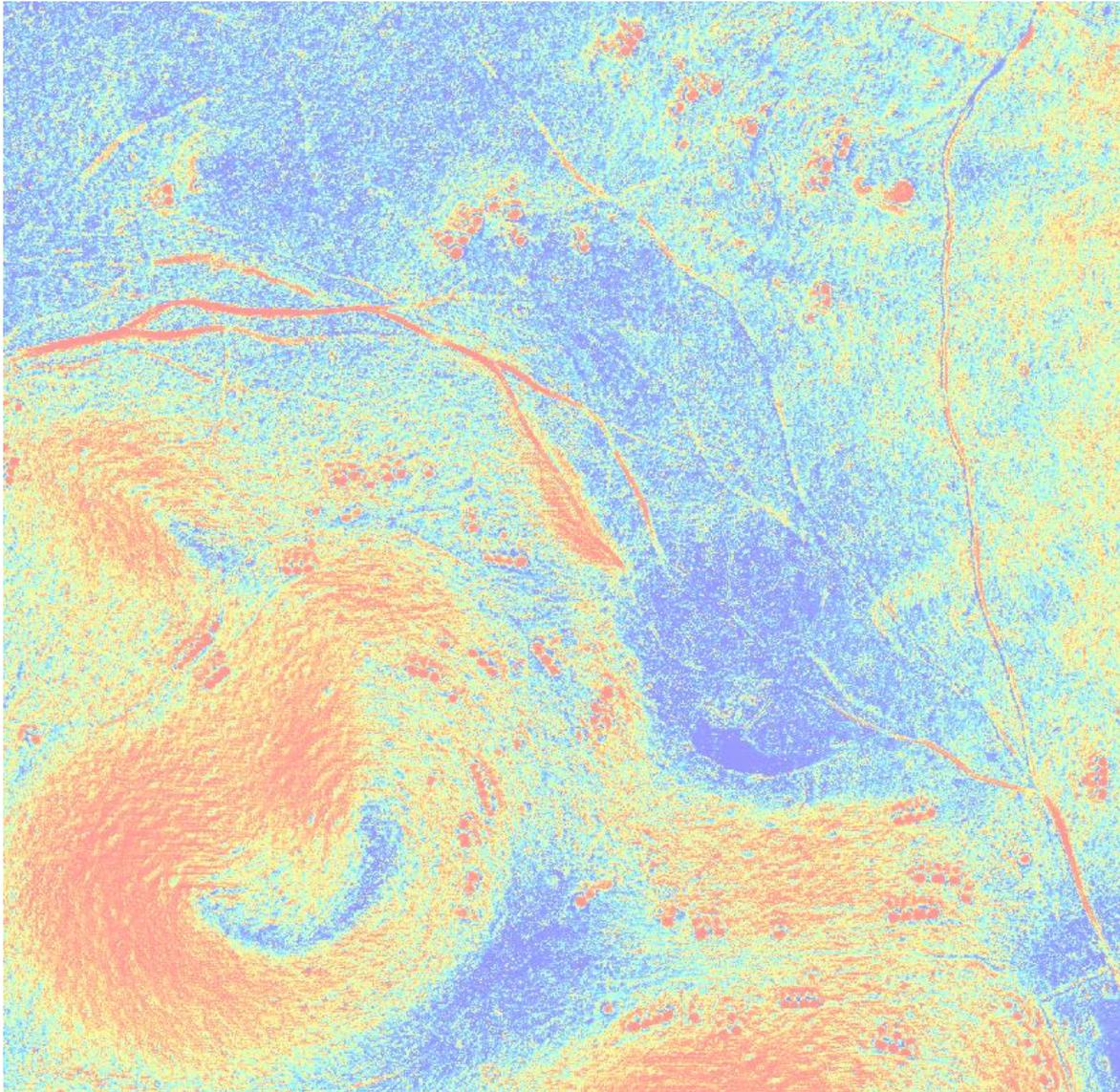


In Michael Doneus : Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models
Remote Sensing **2013**, 5(12), 6427-6442; doi:[10.3390/rs5126427](https://doi.org/10.3390/rs5126427)

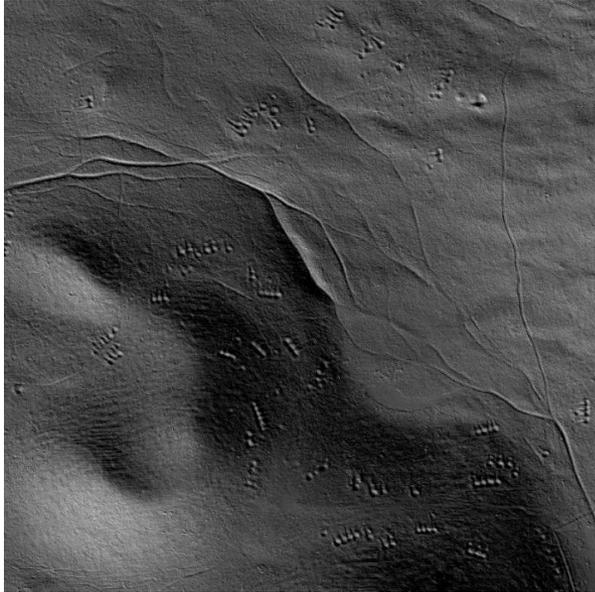
Traitement du MNT : 4/ Sky View Factor (*Modèle de relief local*)



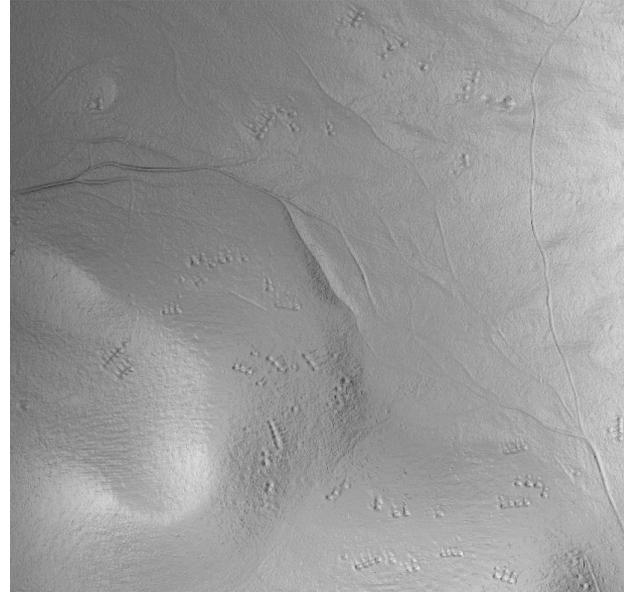
Traitement du MNT : 4/ Sky View Factor (*Modèle de relief local*)



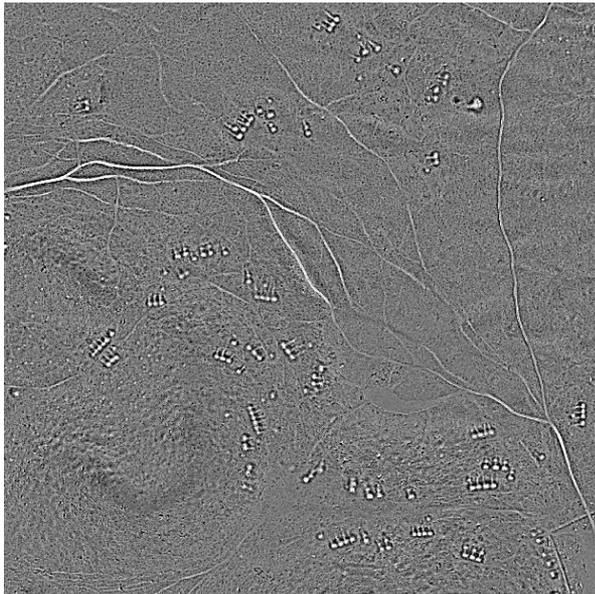
Hillshade



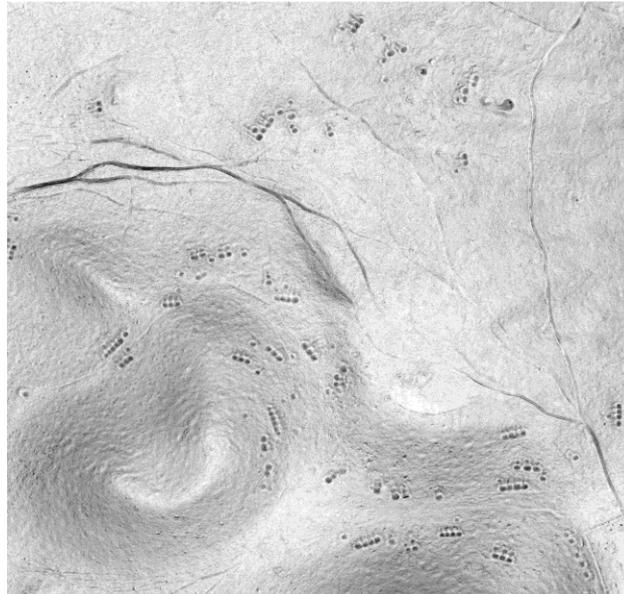
MDOW



LRM

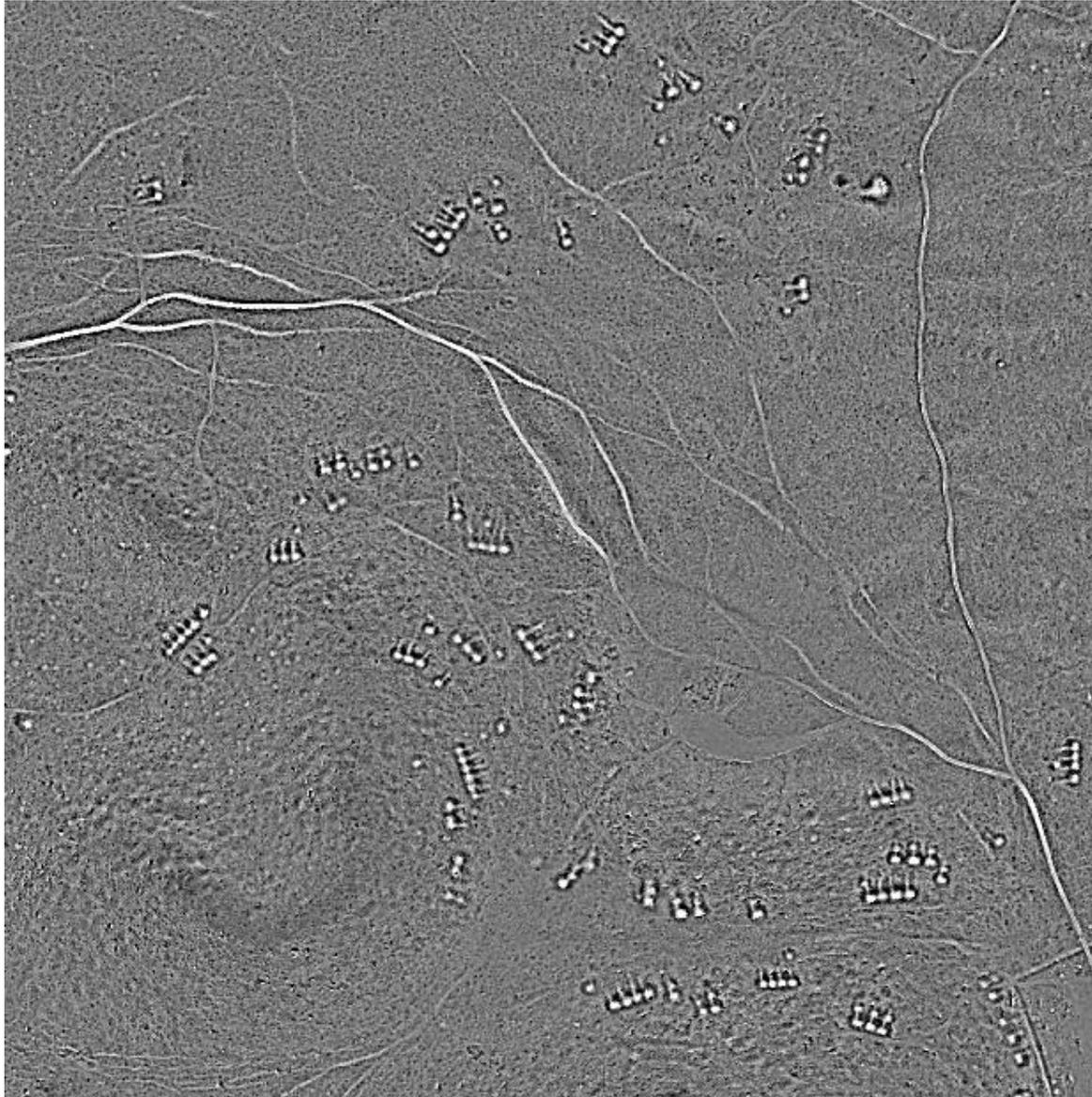


SVF



Phase 3 : Traitement du LRM

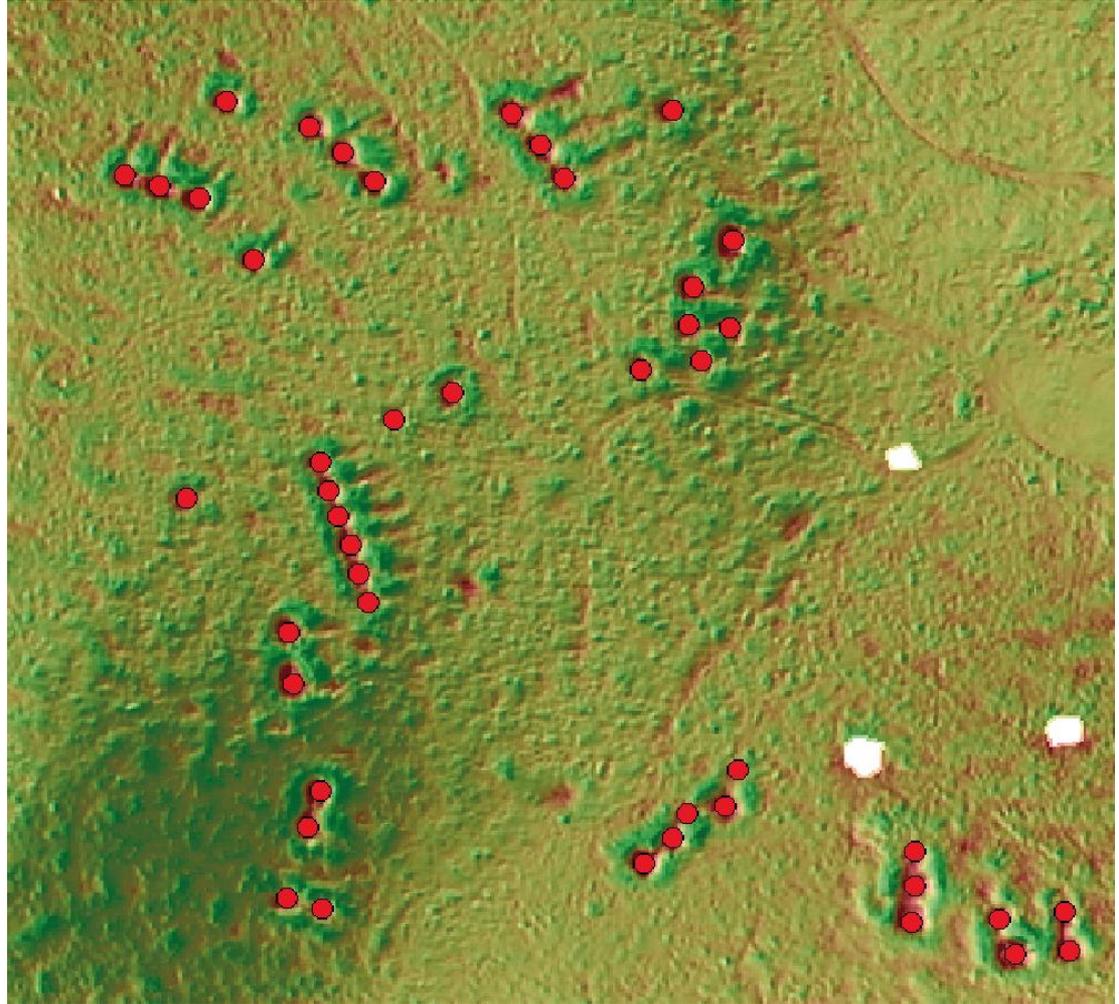
- Approche classique
- Approche automatisée



Phase 3 : Traitement du LRM

-**Approche classique** : interprétation visuelle des images. A chaque cellule, on crée un point

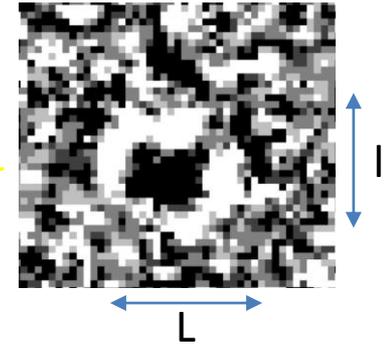
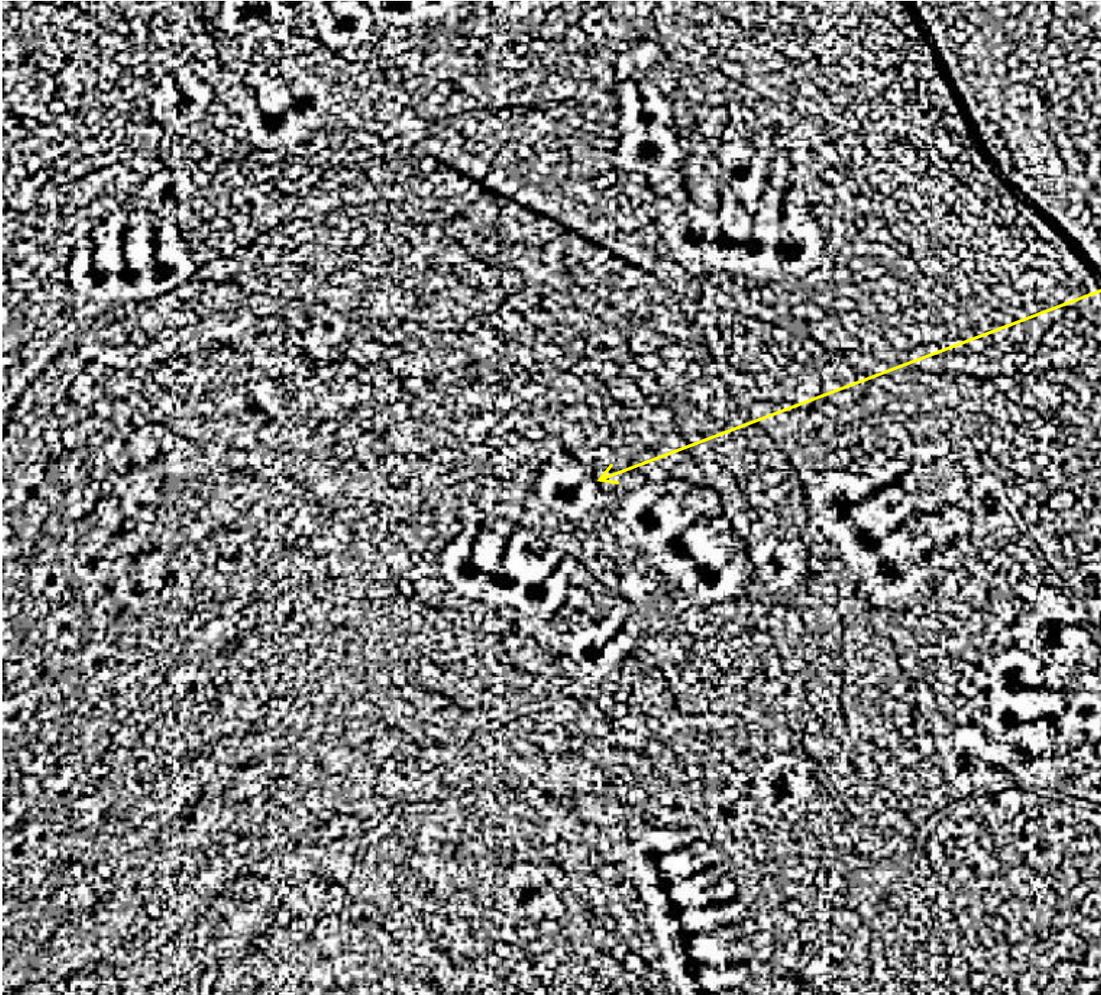
TOTAL : 225 cellules



Phase 3 : Traitement du LRM

- Approche automatisée : développement algorithmique avec Scilab

Etape 1 : définition par les archéologues d'une forme type représentative de l'ensemble des objets recherchés + **phase d'apprentissage algorithmique**



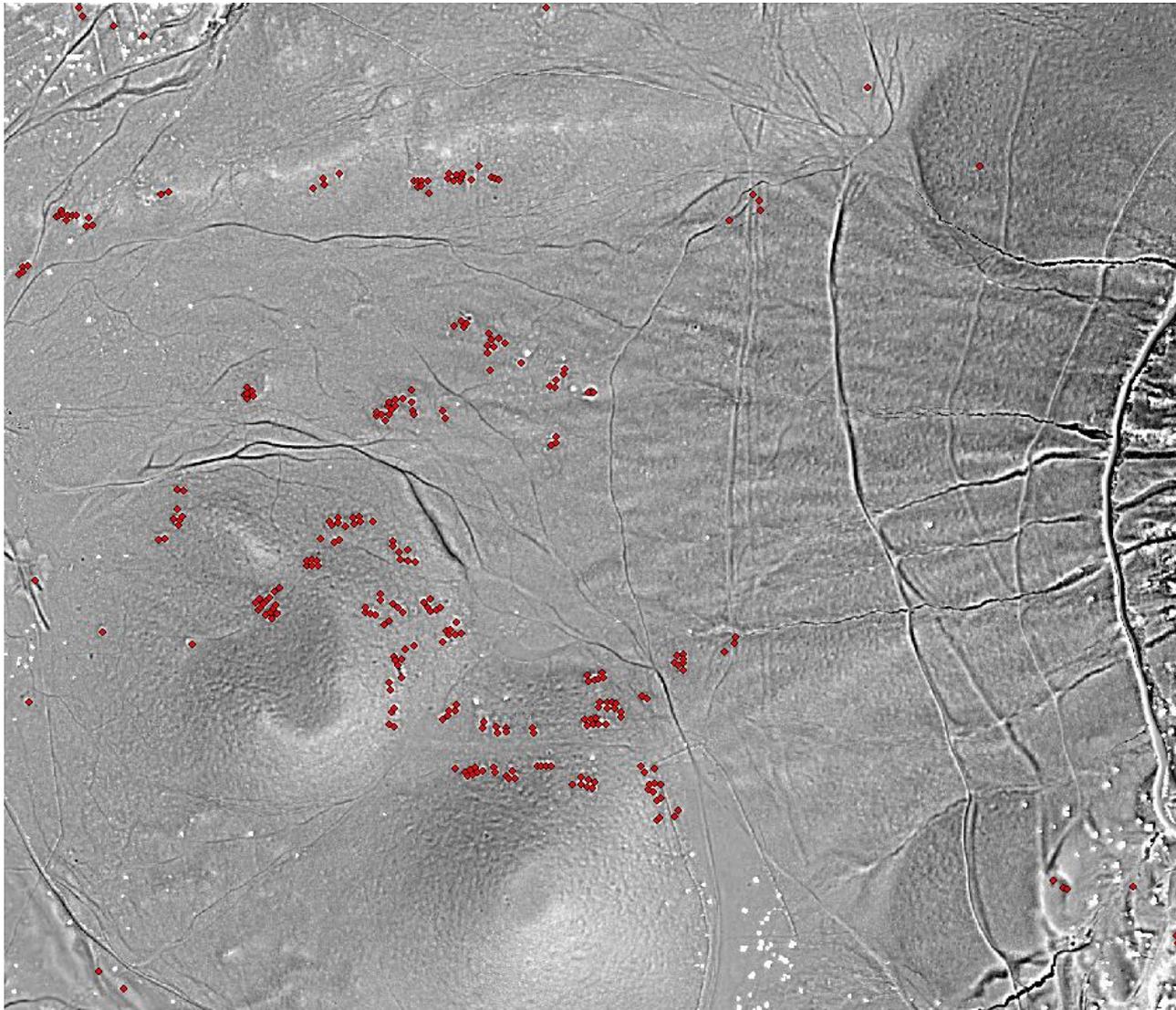
Isolement d'une structure type utilisée pour le paramétrage de la détection

Phase d'apprentissage du logiciel (recherche selon une analyse de forme) :

une zone en sous élévation entourée d'une zone en surélévation avec une dénivellation brutale et d'une taille d'environ 4*4 m

Phase 3 : Traitement du LRM

- Approche automatisée : résultat de la détection des structures



FID	Shape *	ID	X	Y
0	Point	1	695225.231	6519374.017
1	Point	2	695230.897667	6519382.967
2	Point	3	695231.206	6519375.792
3	Point	4	695236.291976	6519384.693829
4	Point	5	695238.245706	6518821.472882
5	Point	6	695246.221741	6518978.711444
6	Point	7	695272.948391	6519448.288739
7	Point	8	695276.731	6519449.945571
8	Point	9	695280.575828	6519456.404931
9	Point	10	695282.13725	6519450.98575
10	Point	11	695286.283632	6519442.933667
11	Point	12	695288.024103	6519450.292862
12	Point	13	695293.742905	6519450.314619
13	Point	14	695299.731	6519449.782385
14	Point	15	695302.008778	6519718.378111
15	Point	16	695306.342111	6519706.611444
16	Point	17	695311.451	6519434.787
17	Point	18	695314.739065	6519445.637968
18	Point	19	695320.182613	6519437.589581
19	Point	20	695327.981	6518473.767
20	Point	21	695332.984846	6518911.474692
21	Point	22	695346.318302	6519694.798746
22	Point	23	695358.638407	6518451.39663
23	Point	24	695385.00551	6519680.865039
24	Point	25	695406.639163	6519477.175163
25	Point	26	695403.008778	6519030.822556
26	Point	27	695411.856	6519032.589368
27	Point	28	695417.231	6519479.71782
28	Point	29	695423.256	6519056.742
29	Point	30	695427.625737	6519069.477526

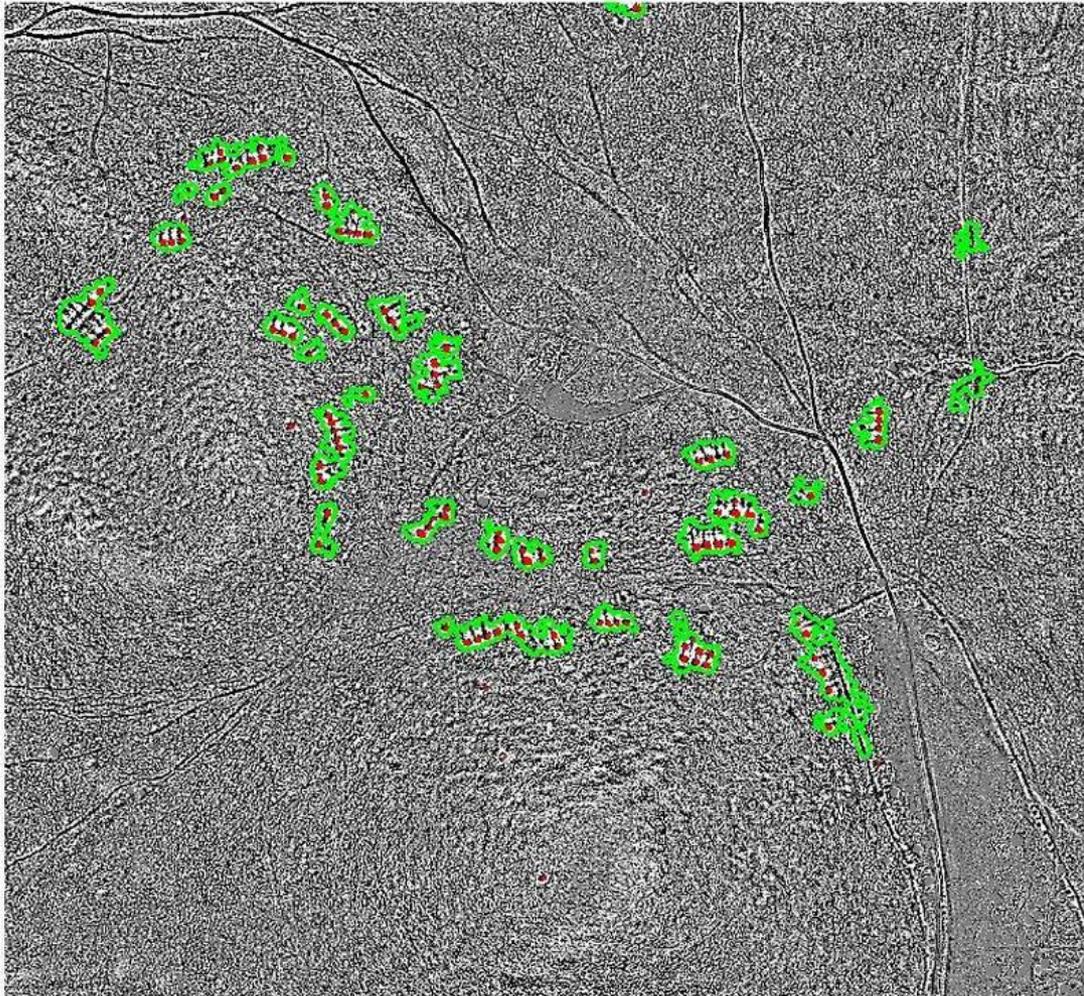
TOTAL : 285 cellules

Phase 3 : Traitement du LRM

Etape 2 : Détection des structures dans leur ensemble (regroupées ou non)

On apprend au logiciel à rechercher :

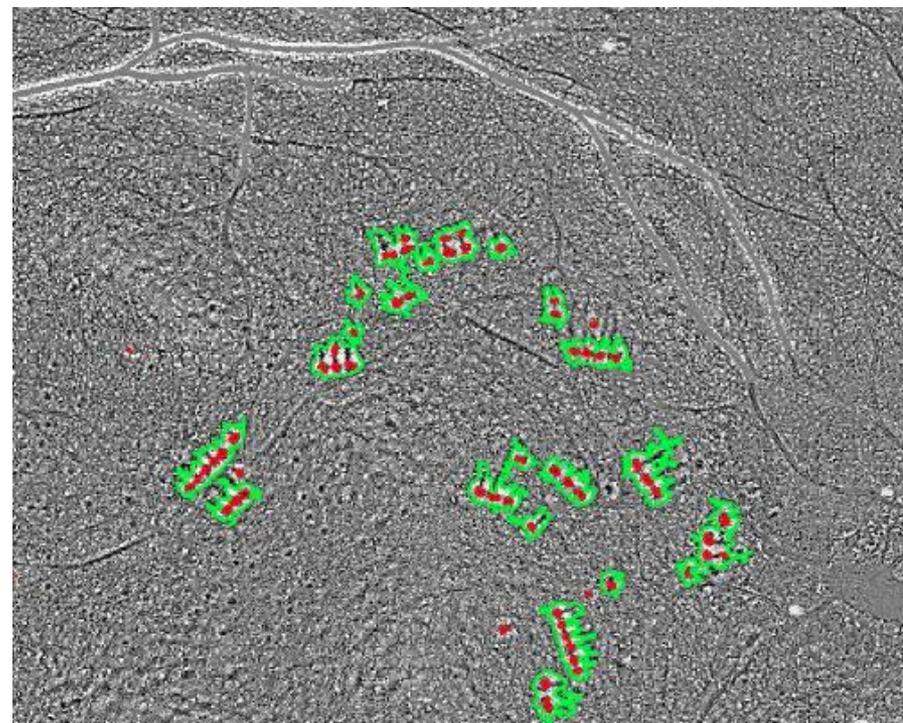
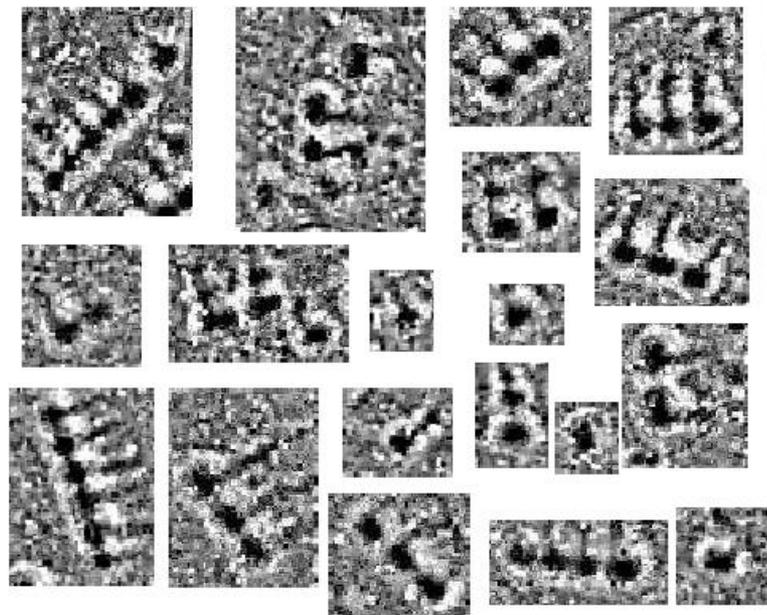
Les objets comportant **des zones en sous-élévation, entourées par des portions en surélévation et contenant au moins une des structures élémentaires détectée à l'étape précédente**



Détection des structures isolés et agrégées

Etape 3 : Construction d'une base de données automatisée

Extraction automatique de vignettes pour chaque structure



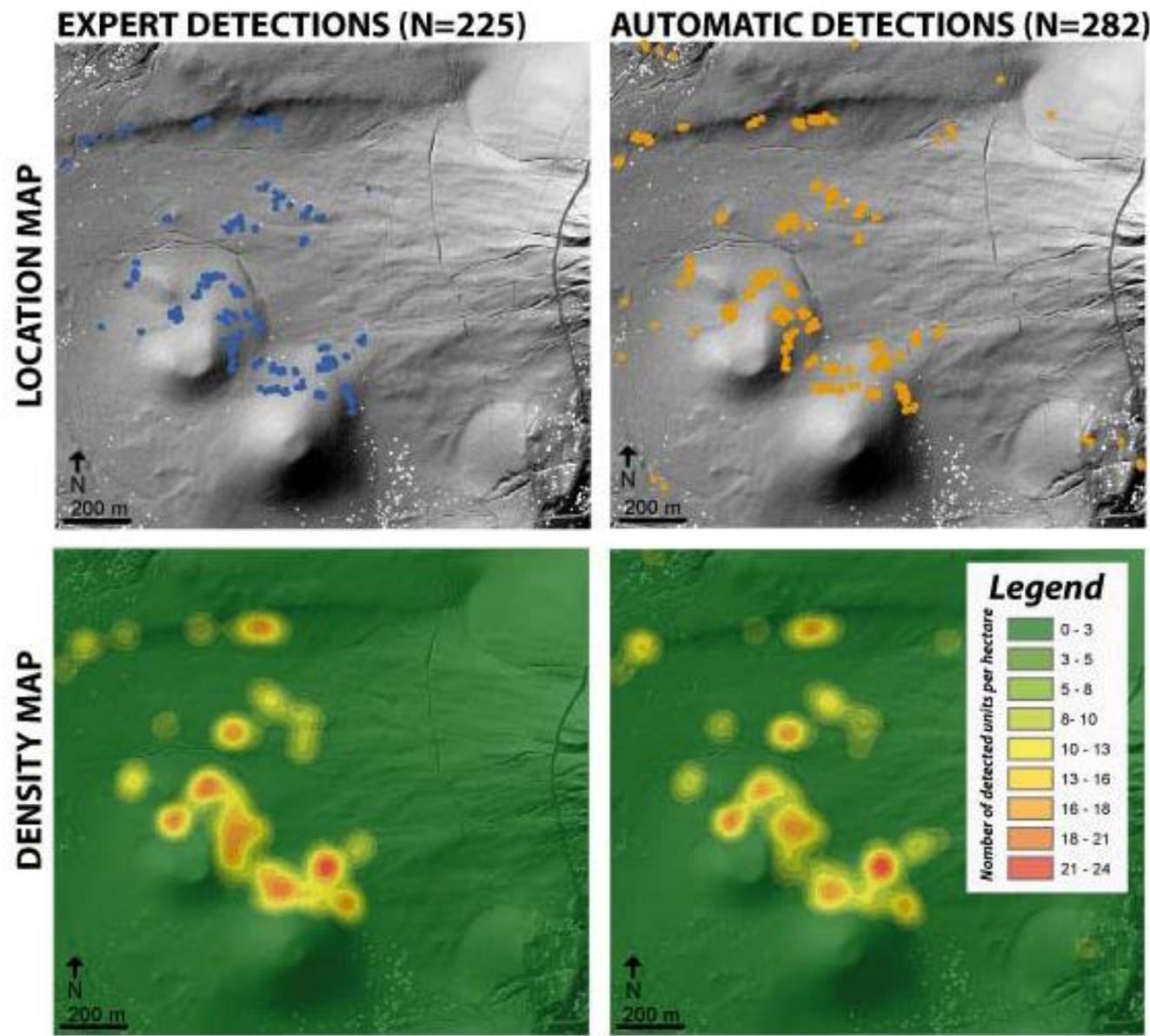
Création d'une base de données avec les caractéristiques géométriques des structures complexes et des sous-structures

Données issues de la détection automatique des structures archéologiques

Structure complexe N° 1			
Aire (m ²) :	906,75		
Coord du cen	287,995313	672,441136	
Longueur (m)	68,4643734		
Largeur (m)	18,8382305		
Périmètre (m)	261,977705		
Angle (°) :	49,0168318		
Sous structures appartenant à la structure complexe N° 1			
Structure élémentaire N° 3			
Aire (m ²) :	13,5		
Coord du cen	258,111111	710,518519	
Longueur (m)	4,99604602		
Largeur (m)	3,68026158		
Périmètre (m)	13,5355339		
Diamètre équi	4,14592979		
Structure élémentaire N° 4			
Aire (m ²) :	8,5		
Coord du cen	266,764706	699,617647	
Longueur (m)	5,07856065		
Largeur (m)	2,96561168		
Périmètre (m)	14,0710678		
Diamètre équi	3,28976232		

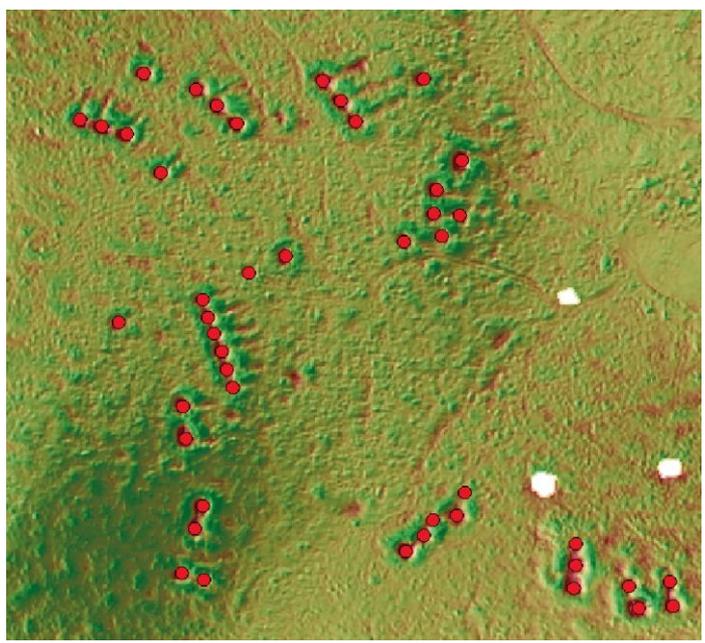
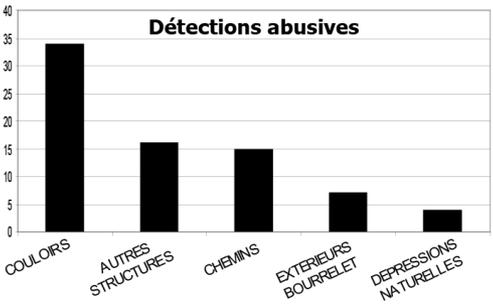
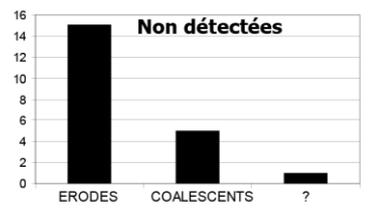
Phase 5 : Vérification de la pertinence des données

Détection et comptage des structures



Phase 5 : Vérification de la pertinence des données

Détection et comptage des structures



Détection experte : 225

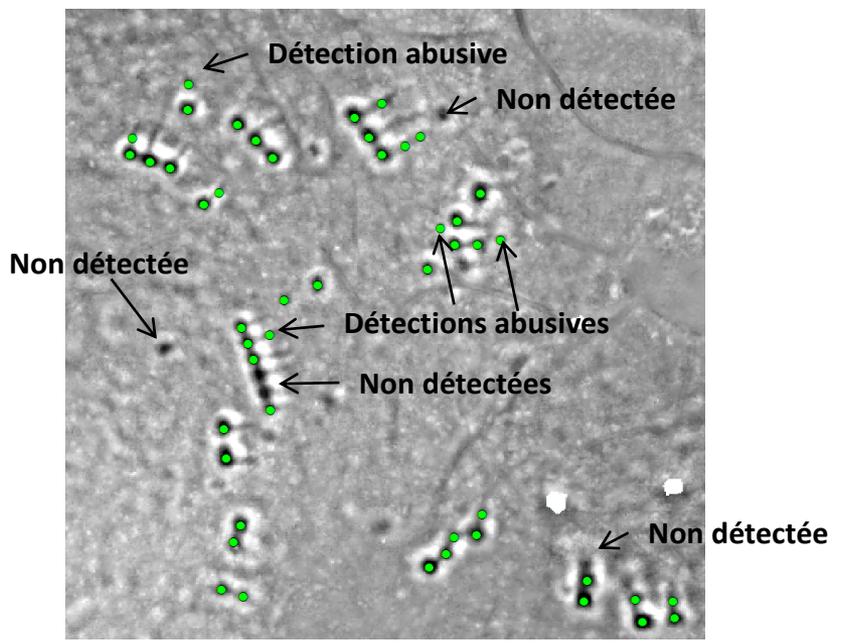
Détection automatique : 285

Parmi les 225 structures identifiées par expertise, **204 sont détectées automatiquement (Taux de succès : 91%)**

Les non-détectées (21) correspondent à des formes très érodées (15) ou coalescentes (5)

Les détections abusives (76) sont identifiées comme :

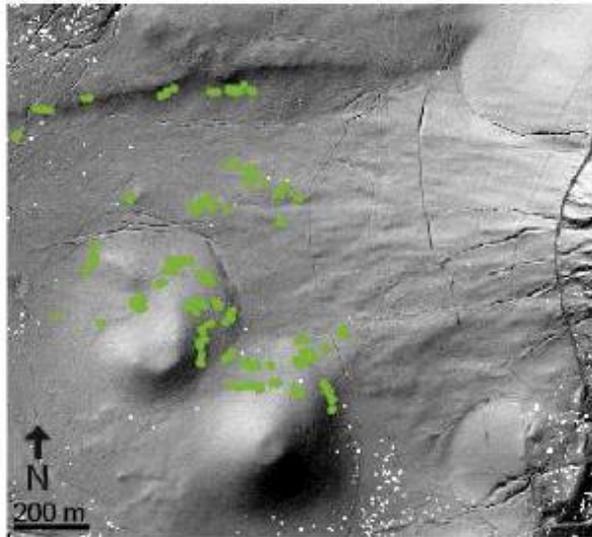
- des formes annexes aux cellules (couloirs d'accès : 34) ou dérivées (dépressions périphériques : 6)
- d'autres structures anthropiques non caractérisées (16), des tronçons de chemin (15)
- des dépressions naturelles (4)



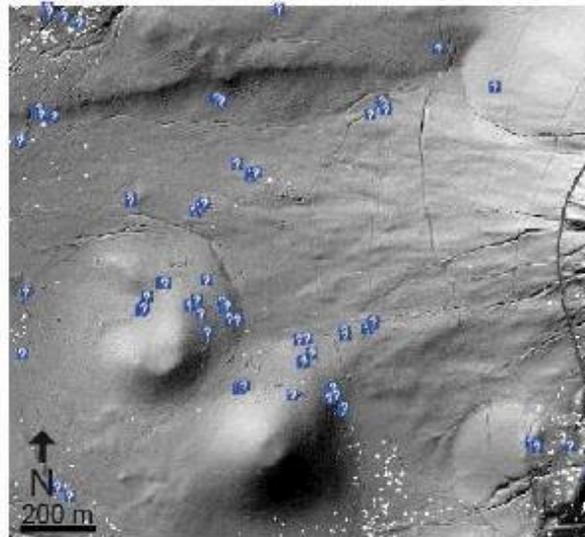
Phase 5 : Vérification de la pertinence des données

Détection et comptage des structures

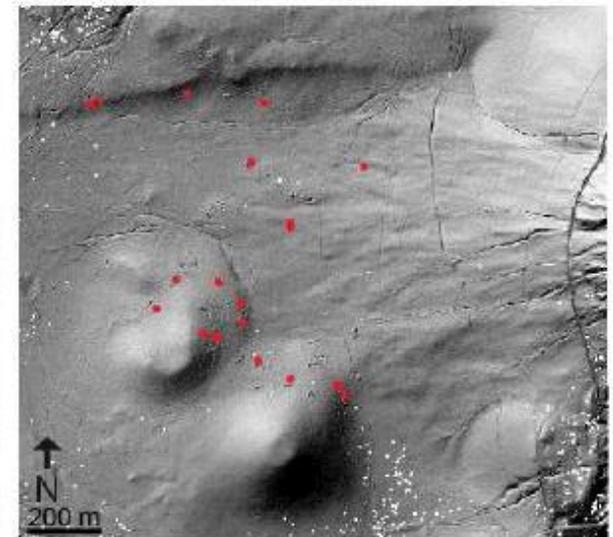
SUCCESSFUL DETECTIONS (N=204)



ERRONEOUS DETECTIONS (N=76)



UNDETECTED (N=21)



Phase 5 : Vérification de la pertinence des données

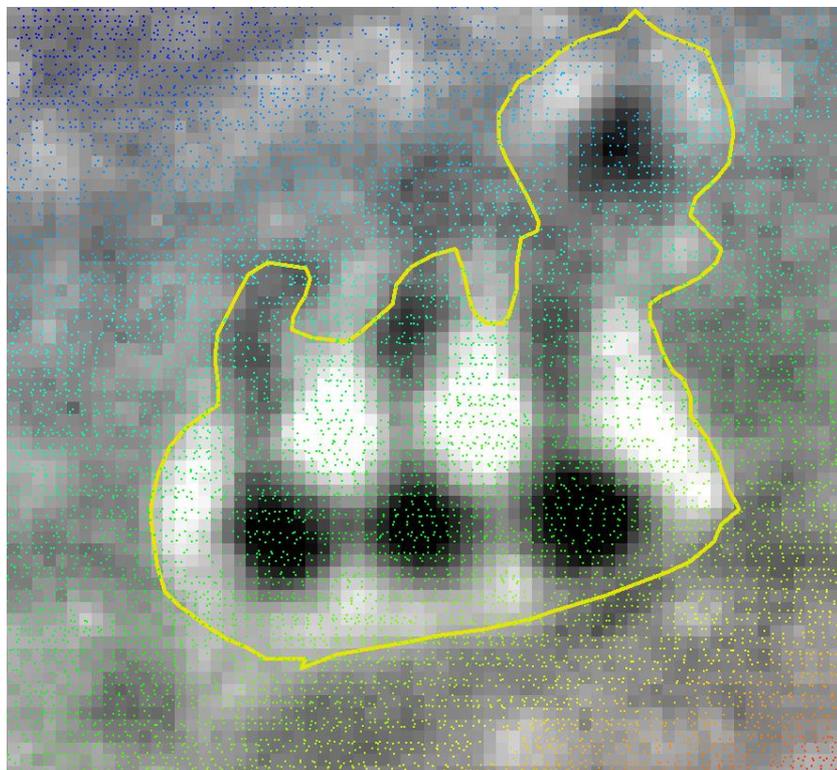
Détourage automatique des trassés et base de données automatisée

A FAIRE :

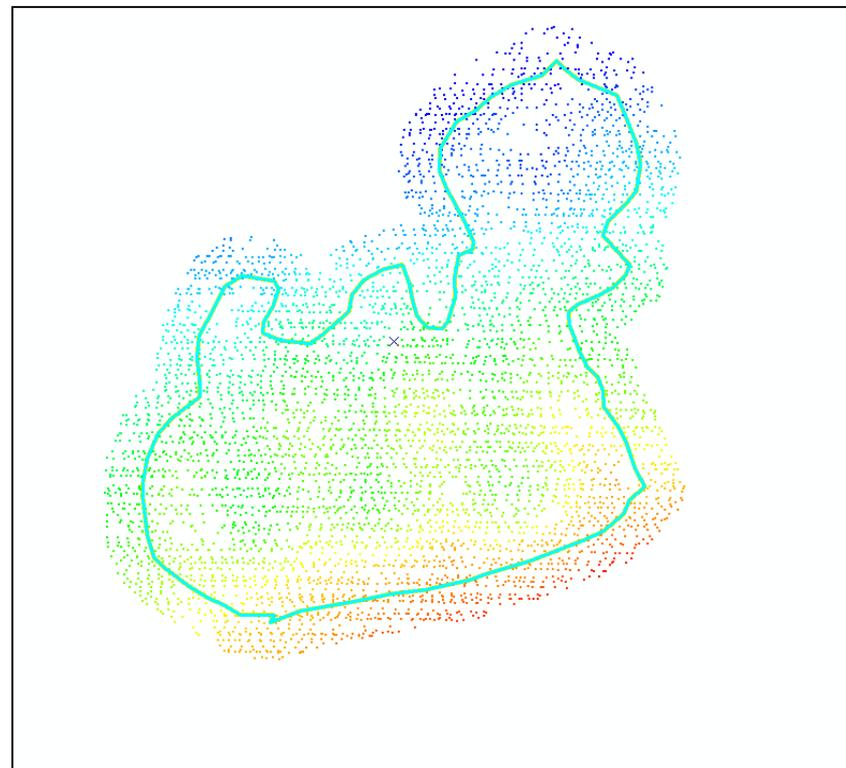
- Détourage manuel des formes par l'expert archéologue pour comparaison avec l'approche automatisée**
- Comparaison avec les données de terrain (M. Florez) Analyse morphométrique systématique (phase 4) .**

Utilisation des polygones de contour automatisé pour revenir aux données sources (nuage de points LiDAR)

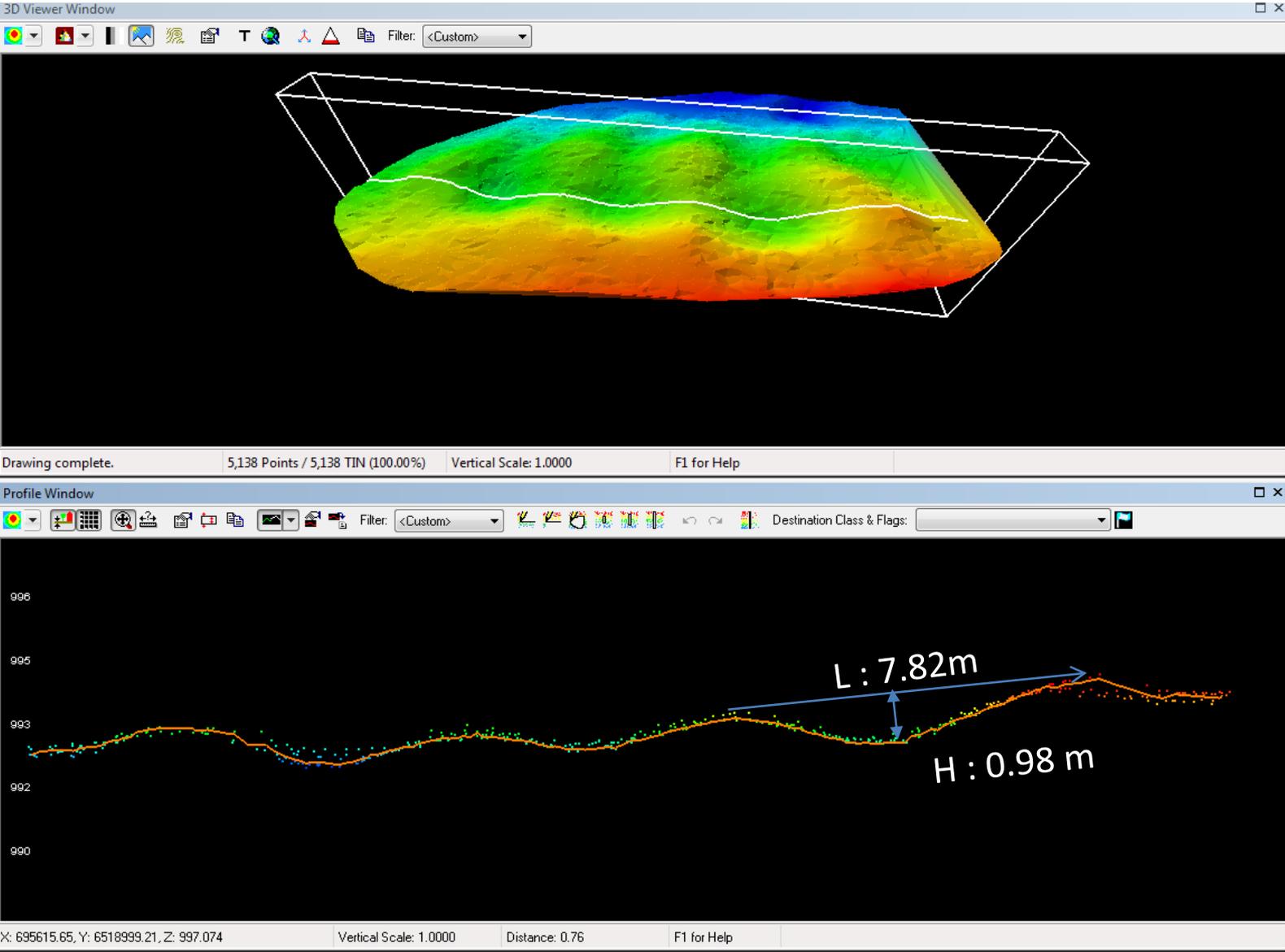
Superposition de la couche polygone automatisé sur le nuage de points Lidar



Sélection des points LiDAR à l'intérieur du polygone (zone tampon de 2 m)



Analyses morphométriques directement en 3D



CONCLUSION :

L'intérêt de la détection automatisée :

- Le taux de succès de la détection automatisée est bon (>90%)
- l'outil s'affranchit de la connaissance a priori de la forme : il détecte la plupart des anomalies topographiques
- Il y a des artefacts mais il est plus facile d'éliminer des artefacts (expertise de l'archéologue), c'est à dire de faire le tri dans des propositions existantes que de rechercher et digitaliser toutes les formes

A l'heure actuelle, l'algorithme permet :

- de détecter et de vectoriser automatiquement les structures élémentaires (parties en sous-élévation) et les ensembles des structures complexes auxquelles elles appartiennent
- de donner la position de ces structures, les dimensions (longueur, largeur, surface et périmètres)
- d'intégrer automatiquement toutes ces informations dans une base de données permettant leur exploitation statistique.

MAIS : des erreurs dans la détection (lacunes, détections abusives)

Liées à la complexité et à la diversité des formes anthropiques et naturelles dans un secteur au relief accusé

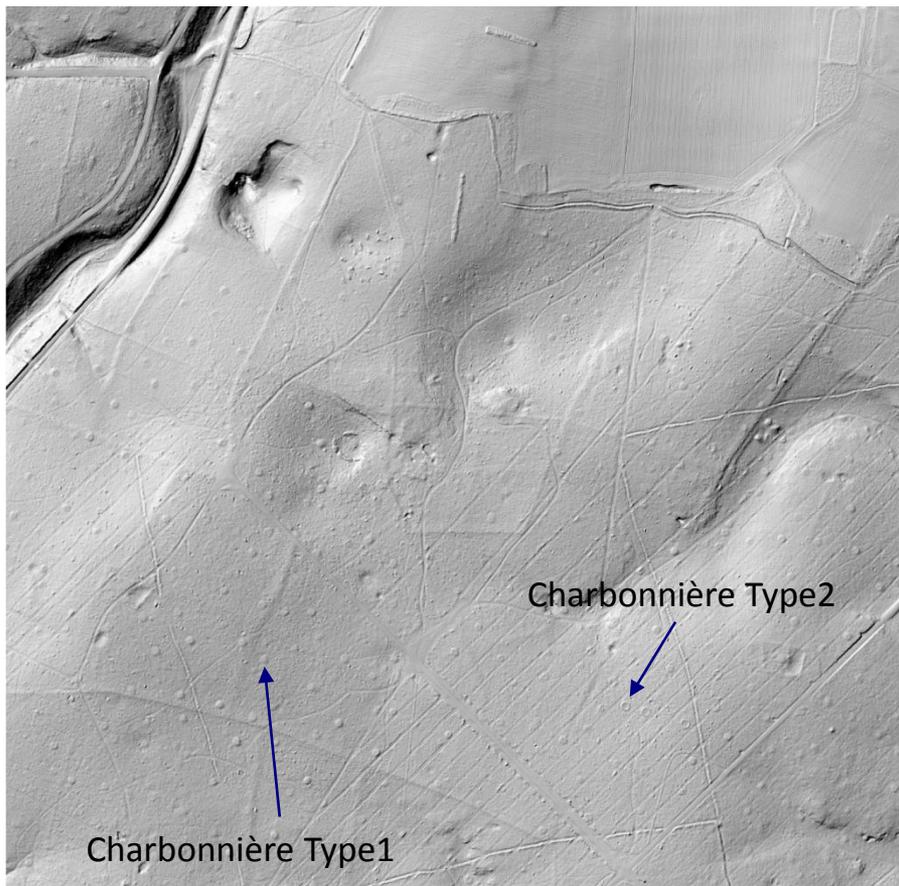
La poursuite du projet :

- amélioration des algorithmes de détection (limiter le nombre d'artefacts)
- création d'une interface utilisateur à destination des archéologues
- tester sur d'autres jeux de données et d'autres types de formes (linéaires)
- analyser directement le nuage de points en 3D plutôt que les images dérivées

Amélioration de l'image LRM (Véodis 3D)



Application à d'autres jeux de données : réseau de charbonnières de la forêt de la Braconne (Charente)



Modèle d'ombrage : 2 types de charbonnières sont présentes



Même vue, mais après avoir calculé un LRM et après avoir appliqué un seuillage sur les altitudes relatives obtenues

Localisation des structures

