



#connaître #partager #accompagner

Les rendez-vous du karst de Bourgogne Franche-Comté,
6^e édition – 9 décembre 2025

Programme

Matin

9h30-10h00 Accueil des participants

10h00-10h40. **Détection semi-automatique des dépressions karstiques** *Vincent Fister (EPTB Saône et Doubs)*

10h40-11h20 **Hydrogéologie du lac des Brenets / Chaillexon : point sur les connaissances actuelles** *Pierre-Yves Jeannin (ISSKA)*

11h20-12h00 **Approche physico-chimique multi-échelle pour quantifier l'origine de l'eau des crues dans la zone critique des aquifères karstiques.** *Lise Durand (BRGM)*

Après-midi :

14h00-14h40 **Héritage et évolution de la structure karstique et hydrogéologique des karsts de plateau. Application au bassin de la Haute Loue (Doubs).** *Margot Vivier (BRGM)*

14h40-15h20 **Le karst en milieu urbain** (Le cas de la rue de Vesoul - Besançon) *Pascal Reilé (Cabinet Reilé)*

15h20-16h00 **PREDHYCKT XXI : prédire les cycles de l'eau et du carbone dans le massif du Jura à l'horizon 2100.** *Noémie Poteaux*



Consignes

- Les créneaux pour chaque intervention sont de 20-50 minutes maximum et comprennent les parties présentations et questions. Au cas où une/des interventions seraient plus courtes(s), l'idée est d'enchaîner sur la présentation suivante.

Pour les personnes en visio

- Votre micro sera éteint pendant les présentations par l'administrateur afin d'éviter les bruits intempestifs.
 - Si vous souhaitez intervenir, merci d'envoyer votre question sur le tchat : nous nous efforcerons de la soumettre pendant le temps de « questions/réponses » imparti après chaque présentation. Si les conditions le justifient, certaines questions pourront être directement posées oralement, micro et caméra seront alors activés.
 - Nous prendrons d'abord les questions en salle puis celles du tchat.
- 

#connaître #partager #accompagner

Développement méthodologique de l'outil DEADKAT Détection Automatisée des Dépressions KArsTiques

Les dépressions karstiques : présentation

Caractérisation

- Dépressions fermées en terrain karstique
- Formes circulaires à elliptiques, diamètre et profondeur variable
- Origine : dissolution, suffosion, effondrement
- Marqueurs géomorphologiques essentiels du karst

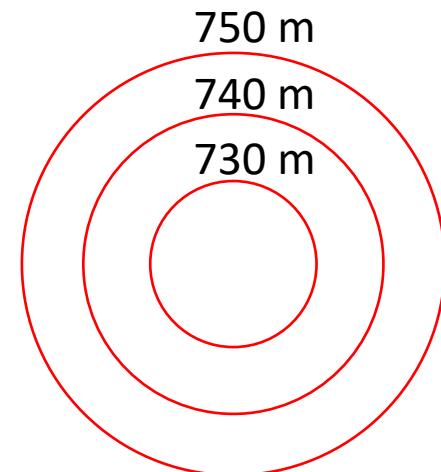


Importance hydrogéologique cruciale

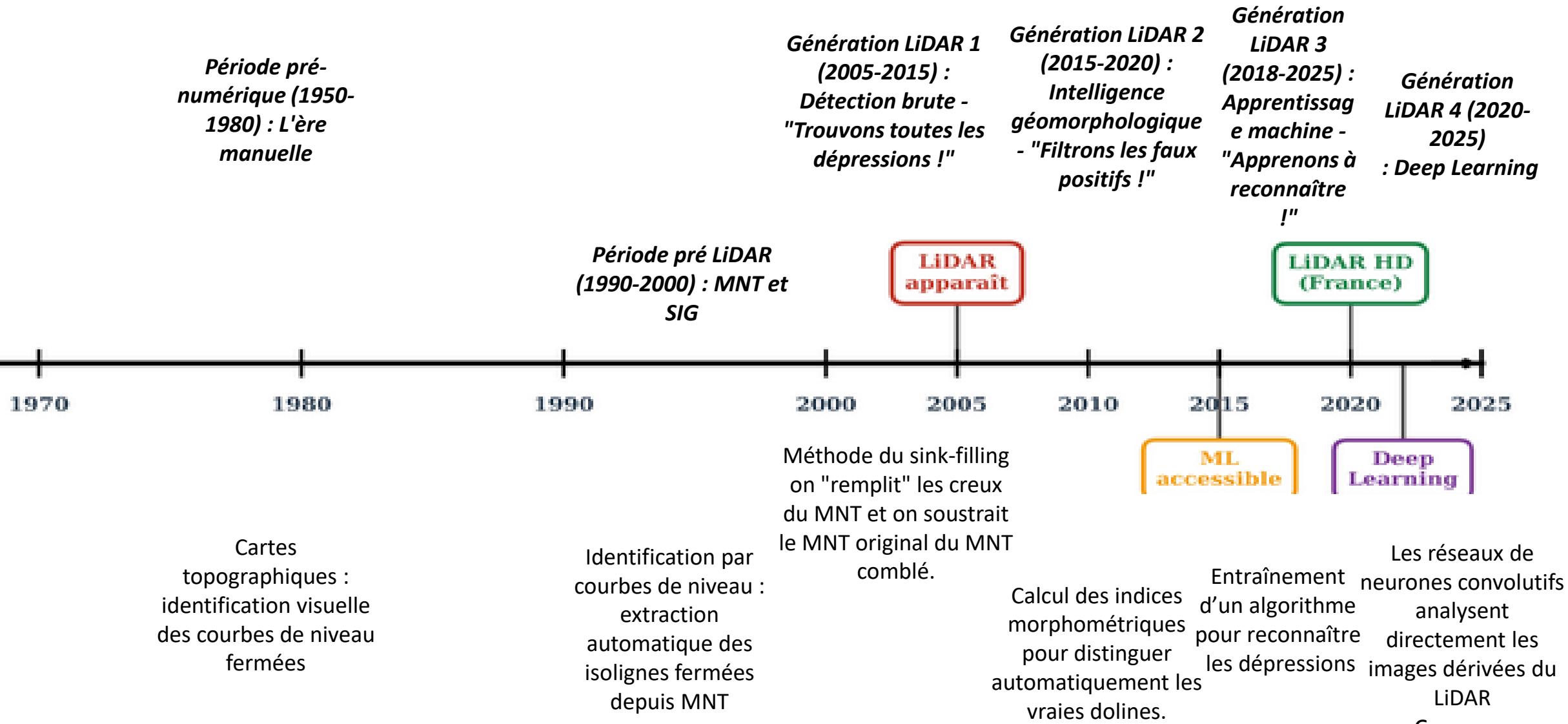
- Points d'infiltration préférentielle vers aquifères karstiques
- Zones de recharge directe
- Temps de transfert rapide
- Vulnérabilité importante à la pollution de surface

Enjeux de gestion et intérêt de cartographies pour :

- la protection des eaux souterraines
- la compréhension des dynamiques d'infiltration
- l'évaluation des risques géotechniques (effondrements, affaissements)
- la recherche fondamentale/appliquée
- l'exploration



Problématique – repérer ces phénomènes



Pourquoi DEADKAT ?

Pour le Pôle Karst de l'EPTB SD:

- ✗ Nombreuses sollicitations ces dernières années
- ✗ Fortes implications dans réflexions/propositions sur fonctionnement/ ESO à l'échelle régionale
- ✗ Volonté de développer des outils opérationnels

Pour les gestionnaires :

- ✗ Méthodes simples (génération 1-2) = trop de faux positifs
- ✗ Méthodes sophistiquées (génération 3-4) = peu ou pas accessibles aux gestionnaires (Python, GPU, data science)
- ✗ Pas d'outil clé-en-main adapté aux données françaises
- ✗ Pas de solution développée sous QGIS
- ✗ Les scripts Python isolés ne sont pas accessibles aux non-programmeurs

Pourquoi DEADKAT ?

4 objectifs principaux

1. Détection robuste automatisée

1. Extraction dépressions depuis MNT LiDAR
2. Discrimination dépressions réelles
3. Multi-résolutions : 0.5m → 25m (adaptabilité RGE Alti)

2. Classification sémantique 3 classes

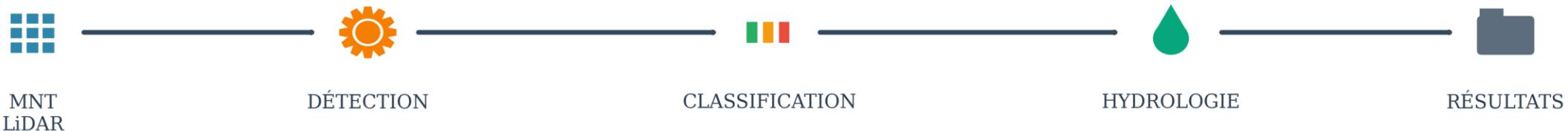
1.  Naturelle (karstique)
2.  Anthropique (bassins, carrières)
3.  Faux positif (artefacts, buttes)

3. Analyse hydrologique intégrée

1. Extraction exutoires dépressions
2. Délimitation bassins d'alimentation

4. Accessibilité opérationnelle

1. Pas besoin compétences programmation
2. Open source + documentation française
3. Plugin QGIS natif (interface graphique)



Le Workflow

Phase 1 : DÉTECTION GÉOMORPHOLOGIQUE

- ↓ Extraction isolignes + morphométrie
- ↓ Output : enveloppes candidates (400)

Phase 2 : TESTS DISCRIMINATION

- ↓ 5 tests dépressions vs buttes
- ↓ Output : dépressions vérifiées (150)

Phase 3 : MACHINE LEARNING

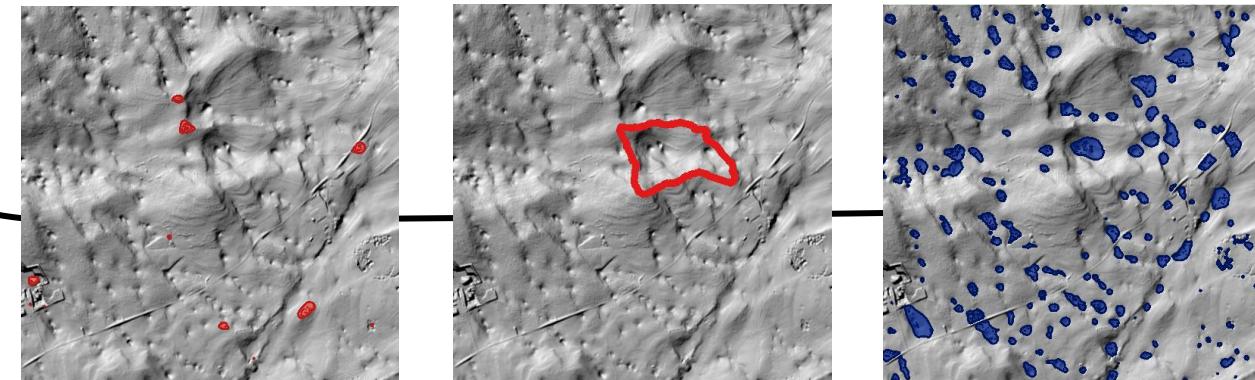
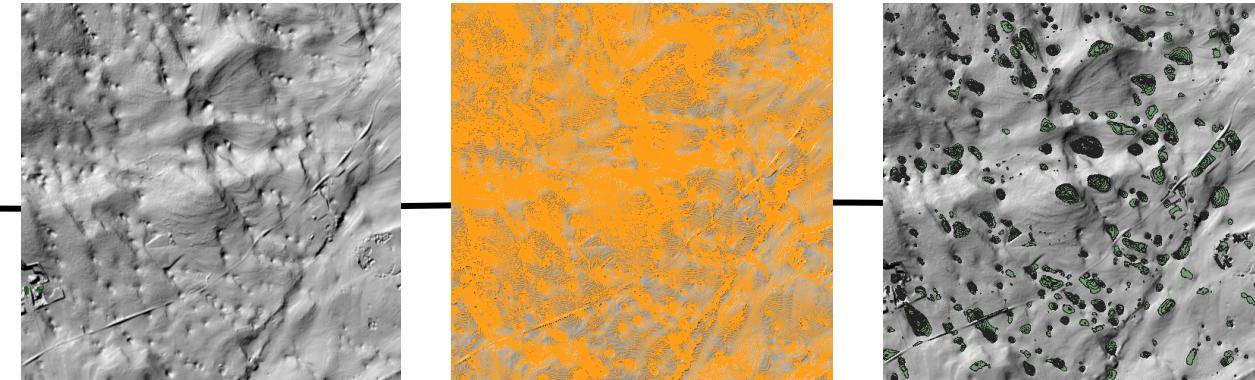
- ↓ Étiquetage 3 classes + ML
- ↓ Output : dépressions classifiées

Phase 4 : HYDROLOGIE

- ↓ Exutoires + bassins d'alimentation
- ↓ Output : bassins versants

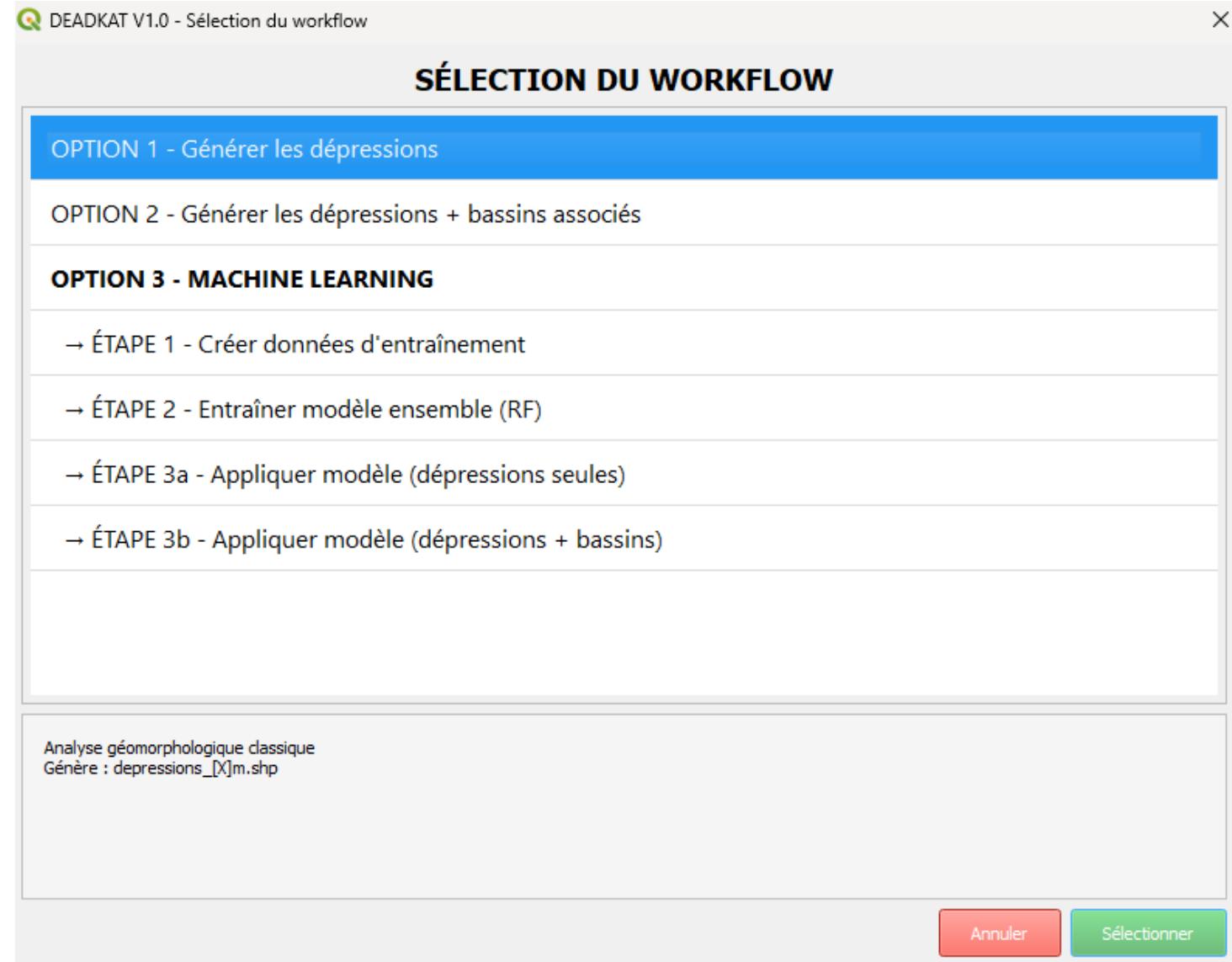
Phase 5 : EXPORTS & VALIDATION

- ↓ Shapefiles + CSV



Numero	Perimeter	Area	Altmax	Altmin	DiffAlt	Circ_Index
Envelop1	42,79	113,74	729,00	728,50	0,50	0,78
Envelop2	58,57	191,51	744,50	743,50	1,00	0,70
Envelop3	264,72	2164,13	747,00	744,50	2,50	0,39
Envelop5	55,60	155,94	733,00	732,50	0,50	0,63

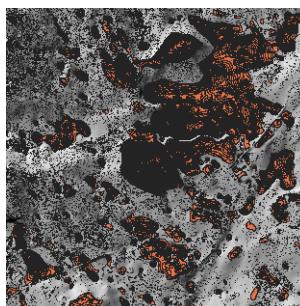
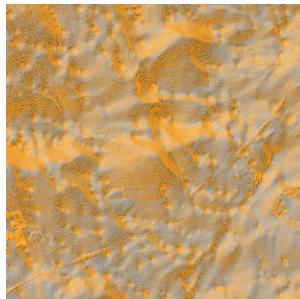
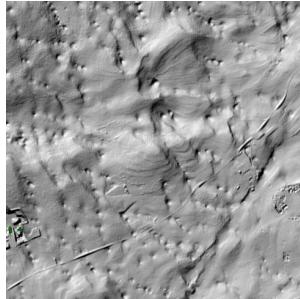
Le Workflow



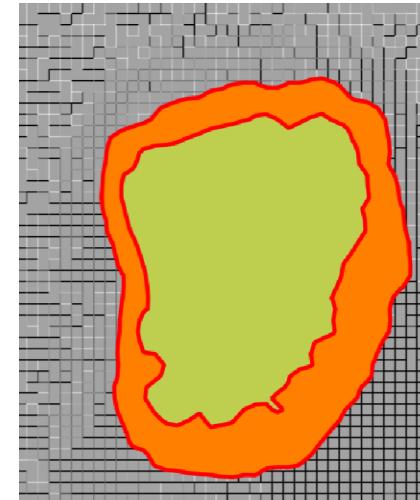
Le Workflow : Phase 1 (1/3) - Extraction isolignes et polygonisation

Étape 1 : Paramétrage (périmètre) + prétraitement

Étape 2 : Du raster aux polygones

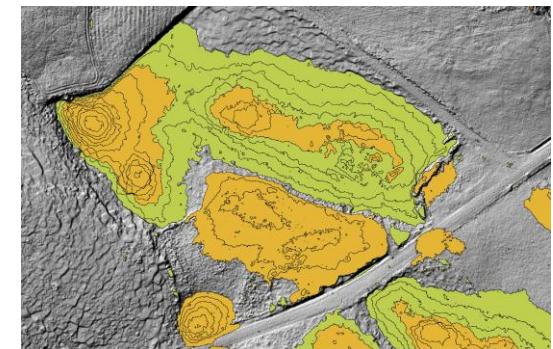
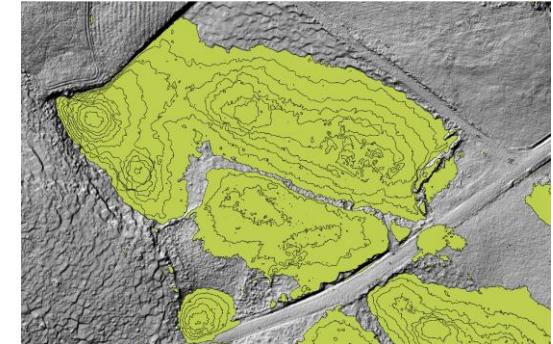


Étape 3 : Calculs morphométriques de base



Entité	Valeur
polypes_attributes_0_5m	
FID	24174
(Dérivé)	
(Actions)	
FID	24174
Perimeter	98,910149220241834
Area	83,572651566850254
Altitude	730,5000000000000000

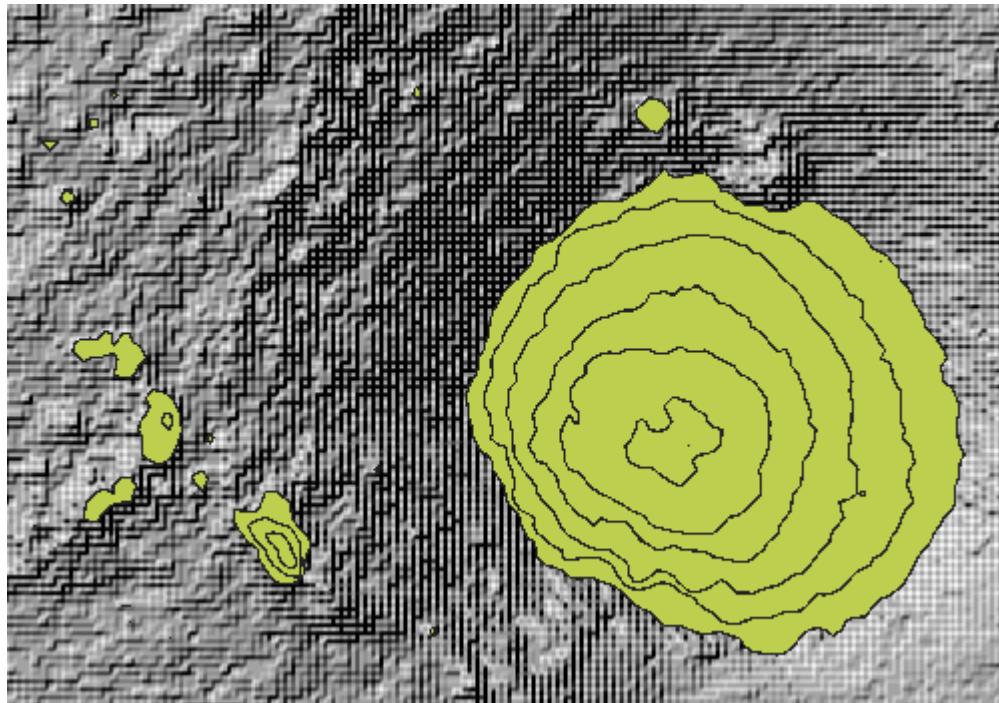
Étape 4 : Filtrage périmetrique



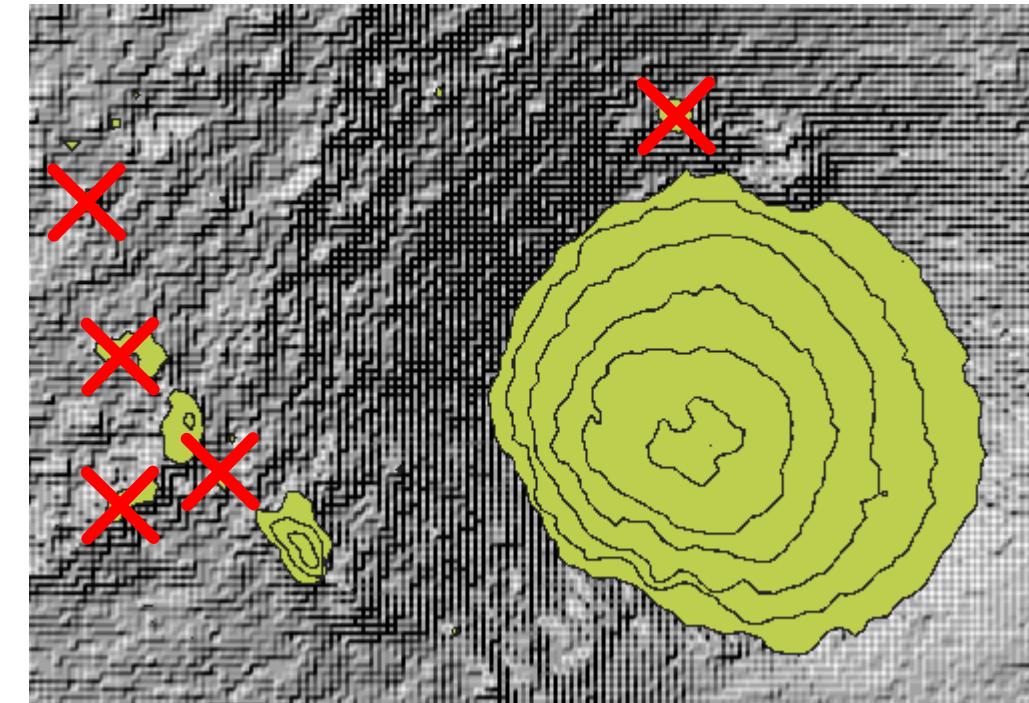
Le Workflow : Phase 1 (2/3) - Regroupement et identification enveloppes

Étape 5 : Regroupement par polygone unitaire

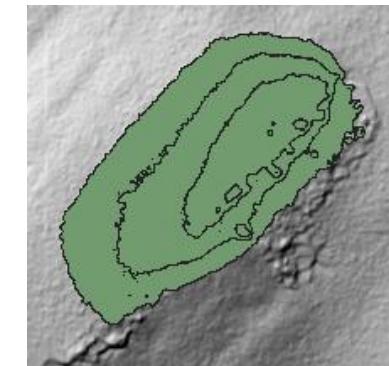
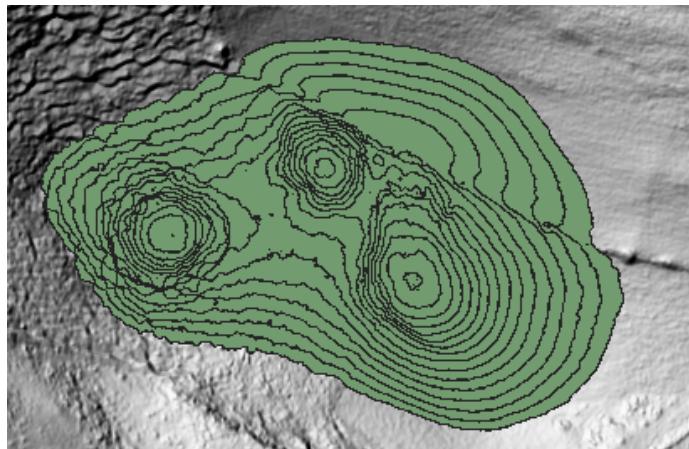
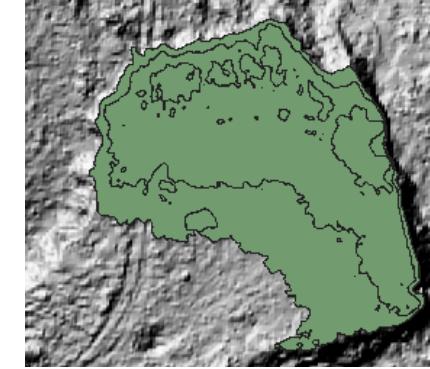
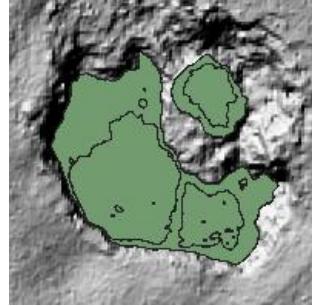
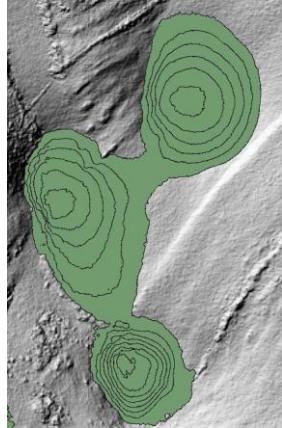
- Analyse topologique : identification polygones contenus les uns dans les autres
- Attribution numéro unique (Numéro) à chaque groupe de polygones
- Une vraie dépression fermée = plusieurs courbes de niveau concentriques = plusieurs polygones emboîtés
- Nombre polygones (>1, 2-4 pour structures simples, >50 pour complexes)



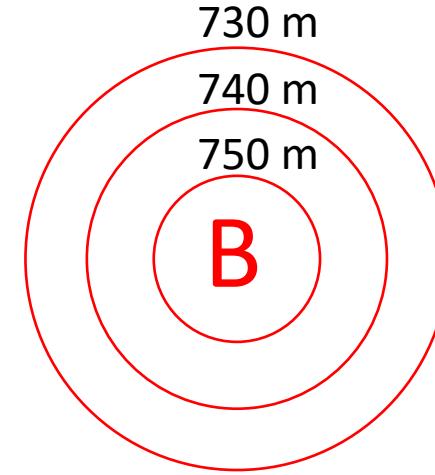
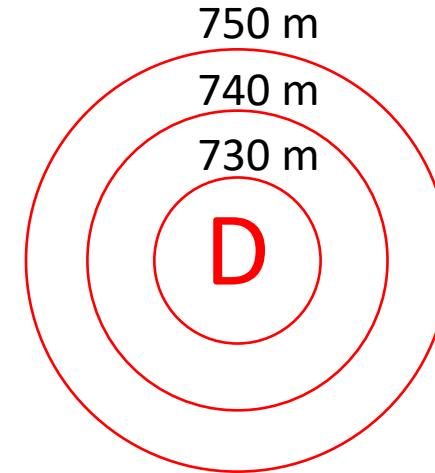
Étape 6 : Sélection des enveloppes



Le Workflow : Phase 1 (2/3) - Regroupement et identification enveloppes



reste à séparer le bon grain de l'ivraie...



- Le défi : isolignes fermées ≠ forcément dépressions
- Enveloppes détectées = creux (dépressions) OU sommets (buttes)
- Faux positifs documentés : 15-40% (Zhu et al. 2014, Doctor & Young 2013)

Le Workflow : Phase 2 -Tests de discrimination dépressions/buttes

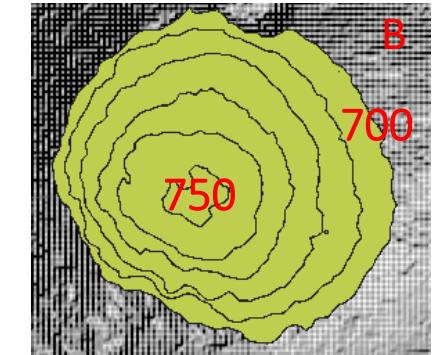
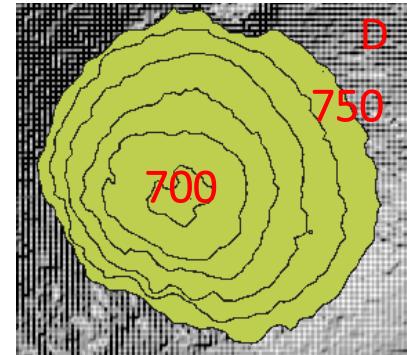
Phase 2 : TESTS DISCRIMINATION

↓ 5 tests dépressions vs buttes
↓ Output : dépressions vérifiées (150)

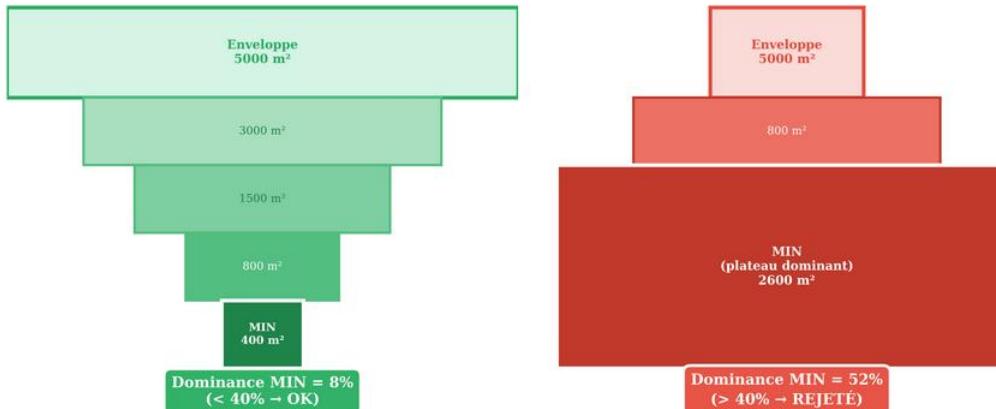
Étape 7 : Les 5 tests morphologiques

Principe général : analyser la progression altitudes/surfaces

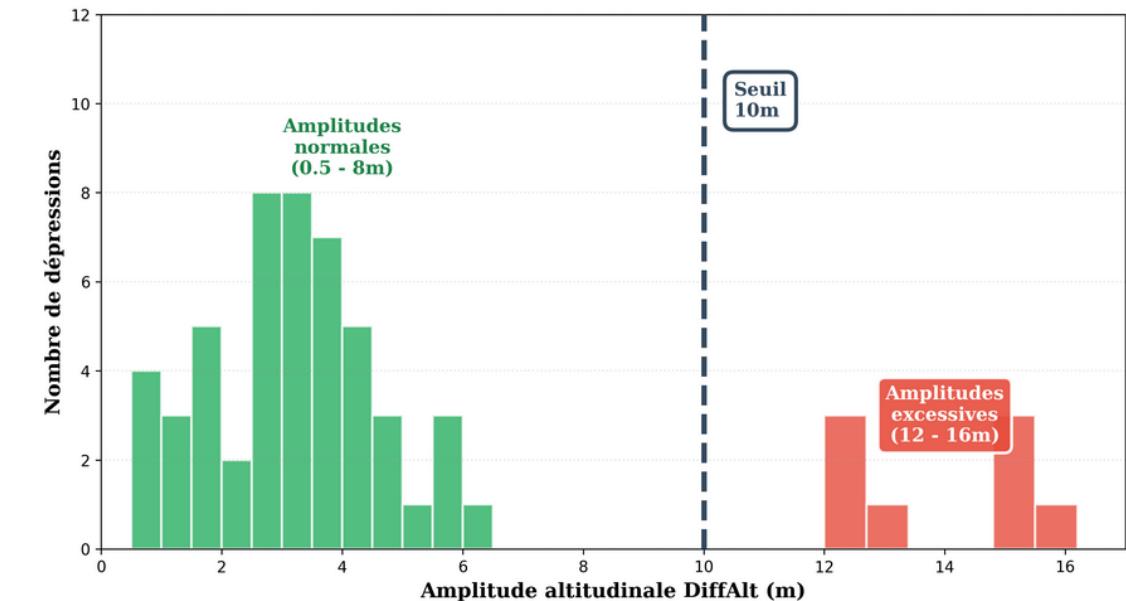
- Chaque dépression = ensemble polygones emboîtés (isolignes successives)
- DEP = En descendant du bord vers le fond, les polygones deviennent de plus en plus petits
- BUTTES = En montant de la base vers le sommet, les polygones deviennent de plus en plus petits



Test 1 et 2 : distribution des surfaces

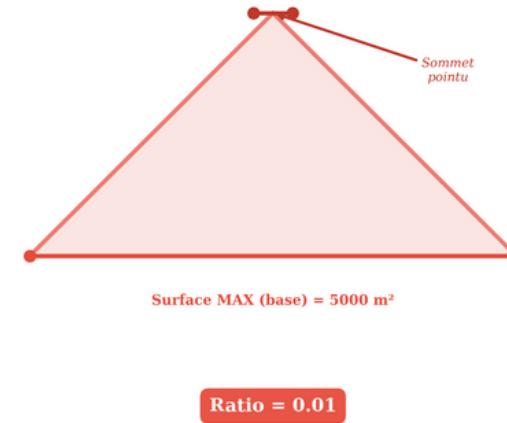
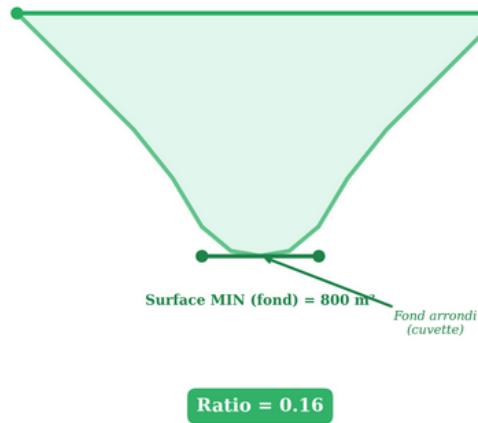


Test 3 : amplitude altitudinale

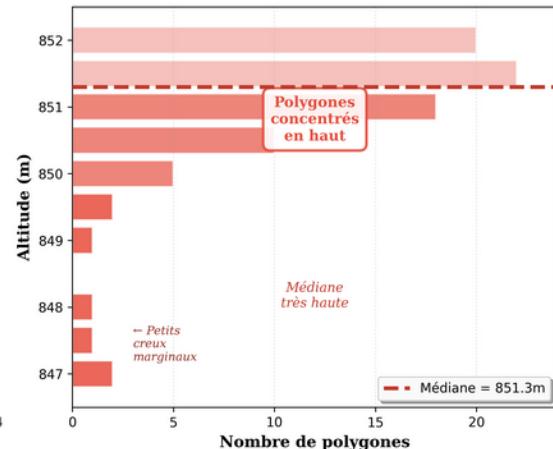
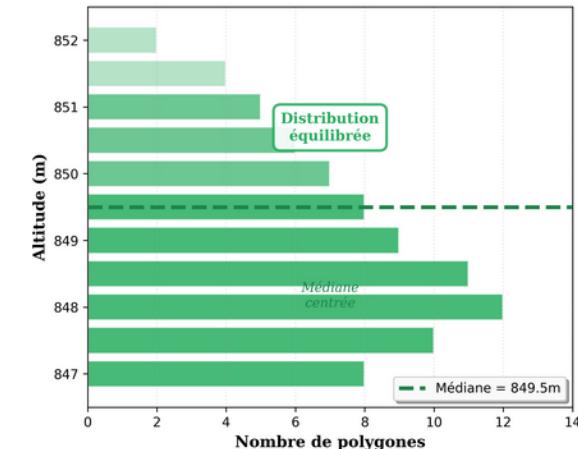


Le Workflow : Phase 2 -Tests de discrimination dépressions/buttes

Test 4 : ratio sommet/base



Test 5 : microreliefs



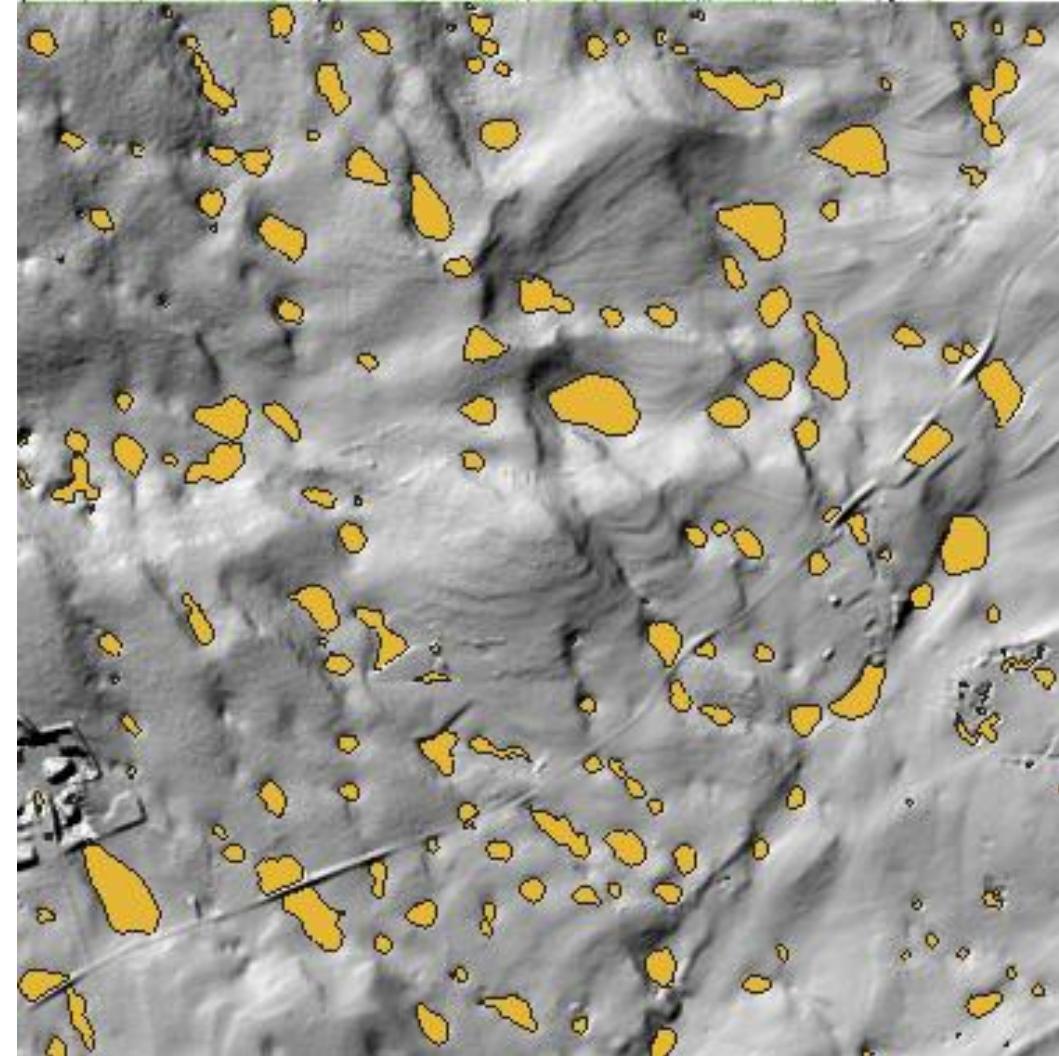
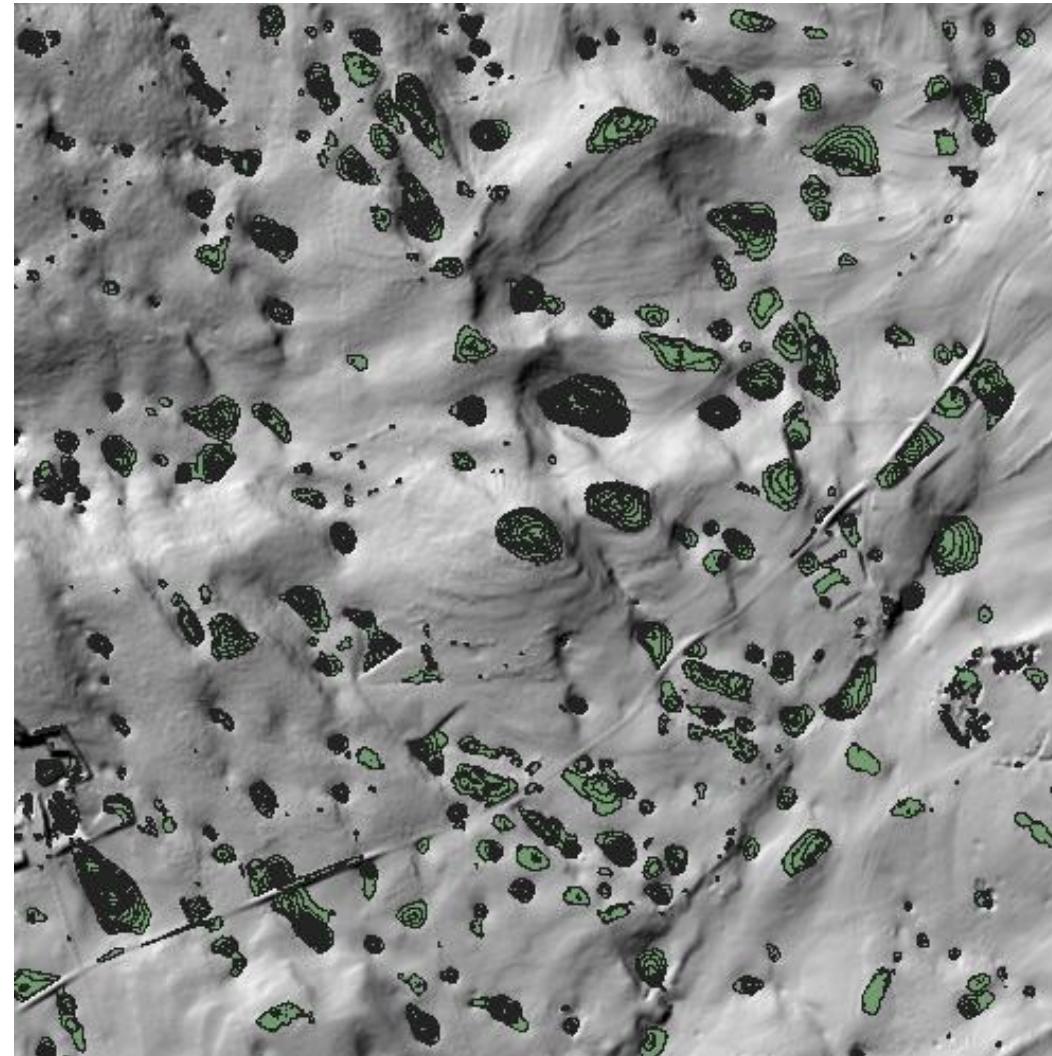
Logique stricte de filtrage

- Une dépression doit PASSER LES 5 TESTS pour être conservée
- Si UN SEUL TEST échoue → rejet automatique (butte/faux positif suspecté)
- Selon site, après tests > de 5 (secteur tabulaire) à 20 (secteur plissé) % de faux profils restants

↓ 5 tests dépressions vs buttes

↓ Output : dépressions vérifiées (150)

Le Workflow : Phase 2 -Tests de discrimination dépressions/buttes



Le Workflow : Phase 3 – Machine Learning (entraînement)

DEADKAT V1.0 - Étiquetage cartographique

Étape 8 CAS 1

Étiquetage cartographique des dépressions

Interface non-modale : vous pouvez utiliser toutes les fonctionnalités QGIS !
Naviguez entre les couches, changez la symbolisation, utilisez les outils...

Progression

1%

Dépression 2/194 | Étiquetées : 1/194

Dépression actuelle

• Dépression Envelop100

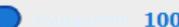
Polygones : 5 | Surface : 2611.0 m² | Périmètre : 879.4 m
Alt min : 737.0 m | Alt max : 738.0 m | Dénivelé : 1.0 m

[Recenter sur cette dépression](#)

Navigation

[Précédent](#) Aller à : 2 [Suivant](#)
 Zoom auto

Transparence de la couche

Opaque  Transparence 100%

Classification

- Dépression naturelle supposée (doline, gouffre, perte...)
- Dépression anthropique supposée (mare, carrière, marnières...)
- Faux positif (butte, artefact...)

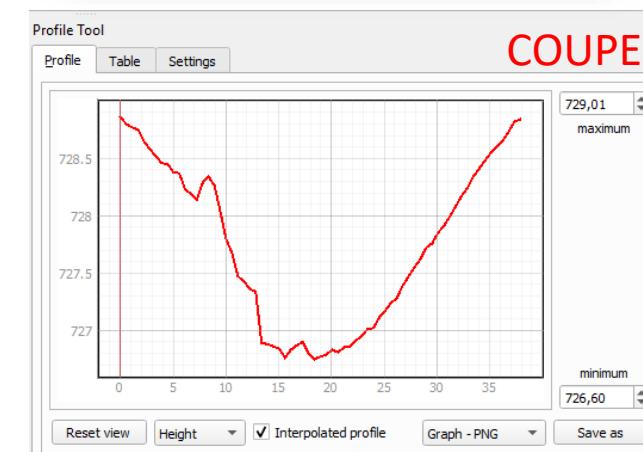
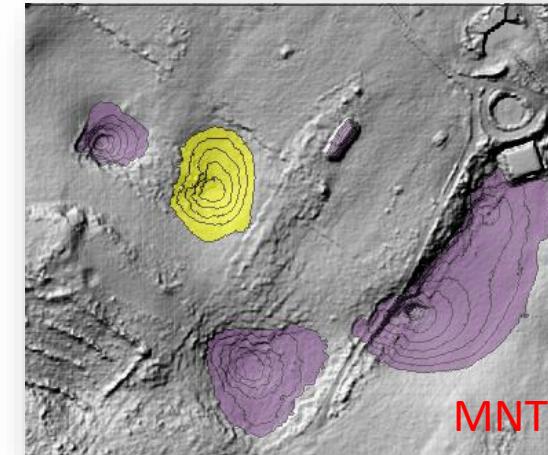
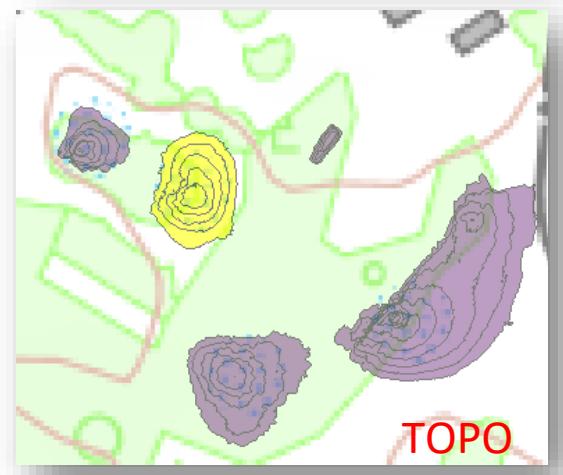
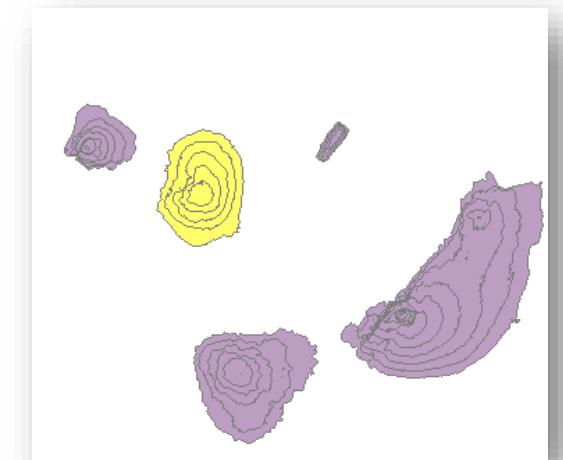
[Précédent](#)
[VALIDER →](#)
[PASSE](#)

Statistiques

● Dépressions naturelles : 1 | ● Dépressions anthropiques: 0 | ● Faux positifs: 0 | Passées: 193

[SAUVEGARDER ET FERMER](#)

Astuce : Ancrez ce panneau sur le côté pour libérer l'espace de travail



Le Workflow : Phase 3 – Machine Learning (entraînement)

Phase 3 : MACHINE LEARNING

↓ Étiquetage 3 classes + ML

↓ Output : dépressions classifiées

DEADKAT V1.0 - Étiquetage cartographique

Étape 8 CAS 2

Étiquetage cartographique des dépressions

Interface non-modale : vous pouvez utiliser toutes les fonctionnalités QGIS !
Naviguez entre les couches, changez la symbolisation, utilisez les outils...

Progression

1%

Dépression 2/194 | Étiquetées : 1/194

Dépression actuelle

• Dépression Envelop100

Polygones : 5 | Surface : 2611.0 m² | Périmètre : 879.4 m
Alt min : 737.0 m | Alt max : 738.0 m | Dénivelé : 1.0 m

Navigation

← Précédent Aller à : 2 Suivant →

Zoom auto

Transparence de la couche

Opaque Transparence 100%

Classification

- Dépression naturelle supposée (doline, gouffre, perte...)
- Dépression anthropique supposée (mare, carrière, marnières...)
- Faux positif (butte, artefact...)

← Précédent

VALIDER →

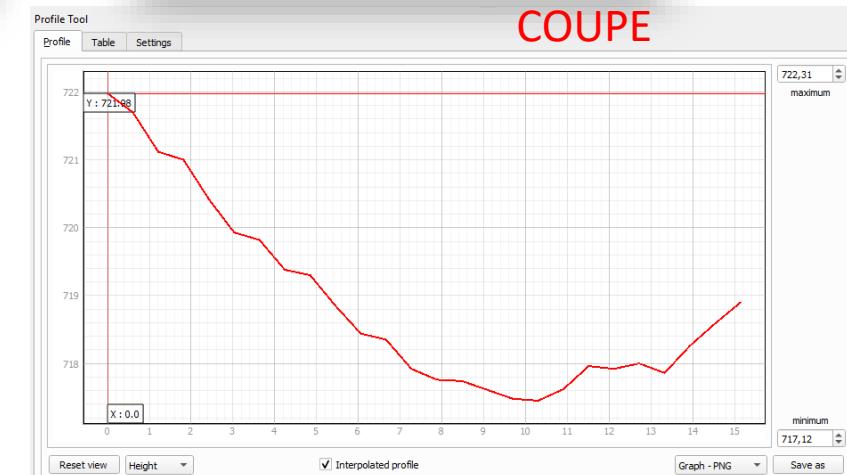
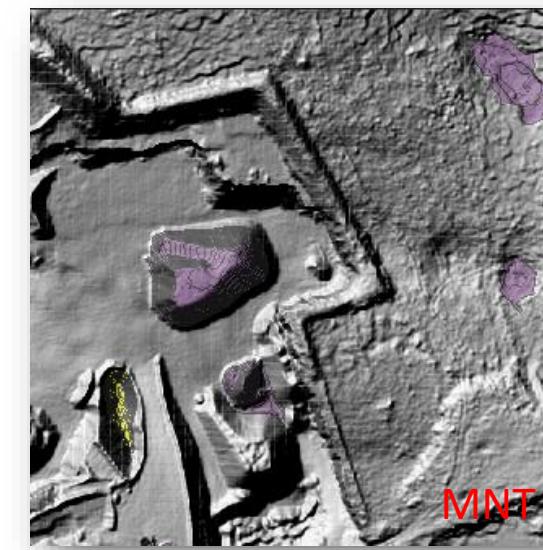
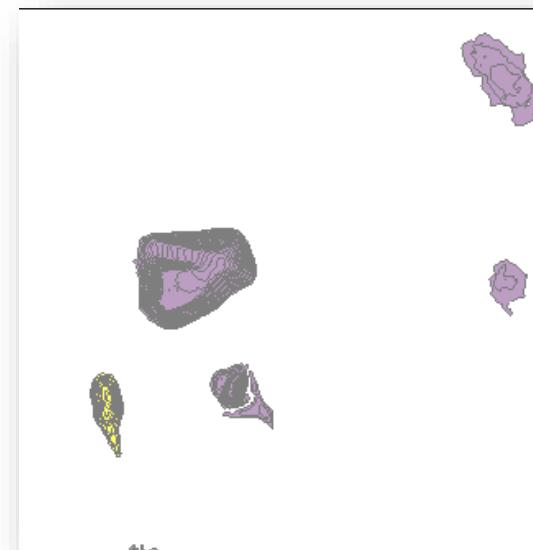
PASSER

Statistiques

• Dépressions naturelles : 1 | ● Dépressions anthropiques: 0 | ● Faux positifs: 0 | Passées: 193

SAUVEGARDER ET FERMER

Astuce : Ancrez ce panneau sur le côté pour libérer l'espace de travail



Le Workflow : Phase 3 – Machine Learning (entraînement)

Phase 3 : MACHINE LEARNING

↓ Étiquetage 3 classes + ML

↓ Output : dépressions classifiées

DEADKAT V1.0 - Étiquetage cartographique

Étape 8 CAS 3

Étiquetage cartographique des dépressions

Interface non-modale : vous pouvez utiliser toutes les fonctionnalités QGIS !
Naviguez entre les couches, changez la symbolisation, utilisez les outils...

Progression

1%

Dépression 2/194 | Étiquetées : 1/194

Dépression actuelle

• Dépression Envelop100

Polygones : 5 | Surface : 2611.0 m² | Périmètre : 879.4 m
Alt min : 737.0 m | Alt max : 738.0 m | Dénivelé : 1.0 m

Navigation

◀ Précédent Aller à : 2 ▶ Suivant

Zoom auto

Transparence de la couche

Opaque Transparence 100%

Classification

- Dépression naturelle supposée (doline, gouffre, perte...)
- Dépression anthropique supposée (mare, carrière, marnières...)
- Faux positif (butte, artefact...)

← Précédent

VALIDER →

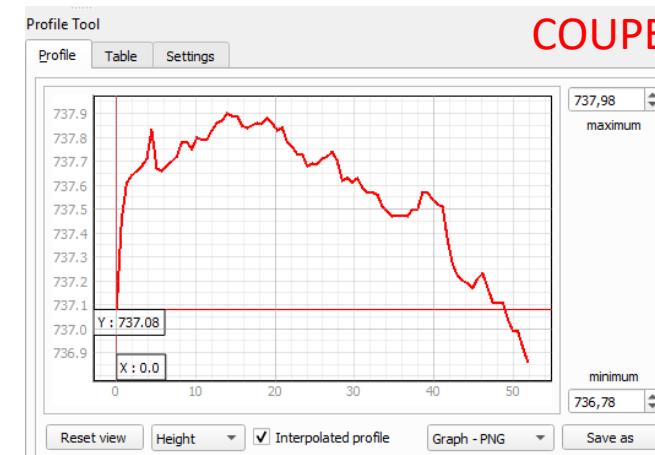
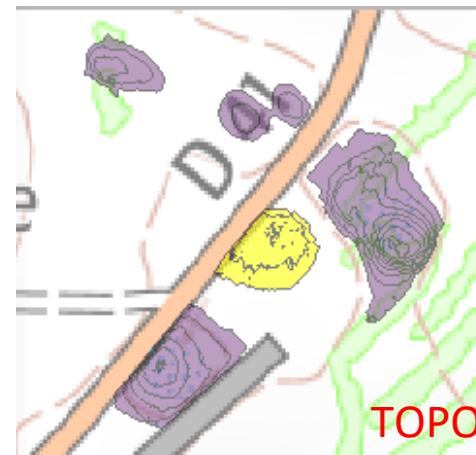
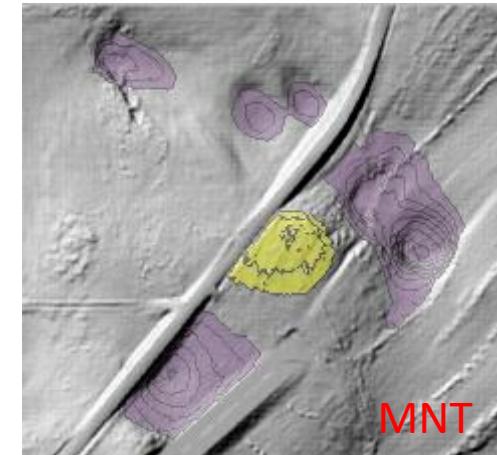
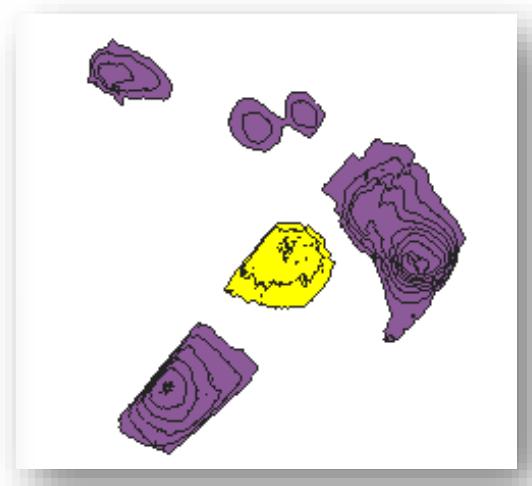
PASSER

Statistiques

● Dépressions naturelles : 1 | ● Dépressions anthropiques: 0 | ● Faux positifs: 0 | Passées: 193

SAUVEGARDER ET FERMER

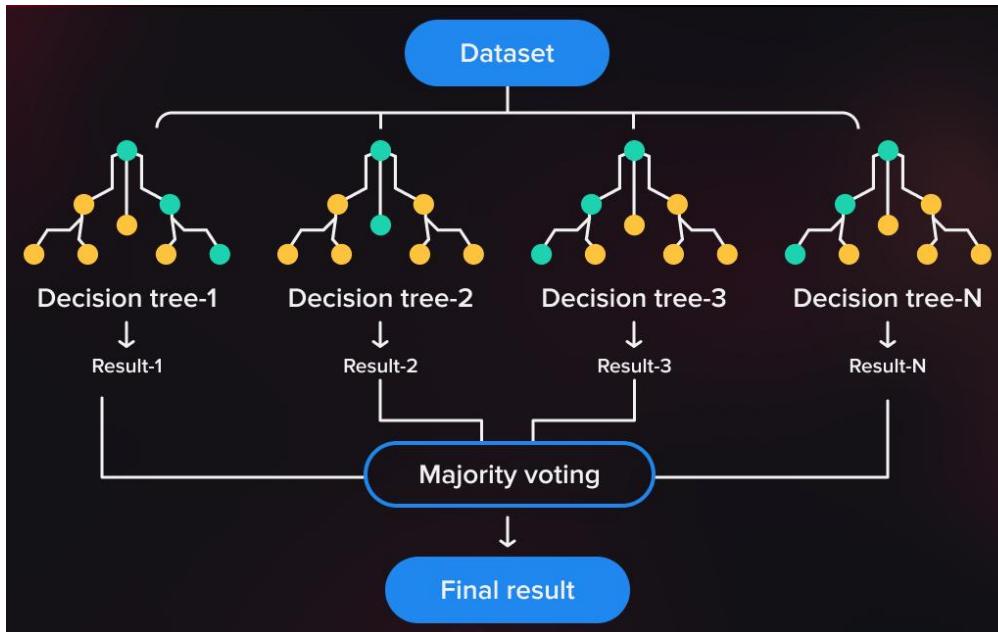
Astuce : Ancrez ce panneau sur le côté pour libérer l'espace de travail



Le Workflow : Phase 3 – Machine Learning (création et application modèle)

Étape 9 et 10 : Random Forest et classification

- 5 statistiques altitudes (min, max, range, mean, std)
- 5 statistiques surfaces (min, max, range, mean, std)
- 1 géométrique (périmètre enveloppe)
- 500 arbres décision (compromis précision/temps calcul)



ID	Alt_range	Area_max	Perimeter	CLASSE RÉELLE
D1	2.5m	3500m ²	250m	NATURELLE
D2	0.8m	800m ²	95m	FAUX POSITIF
D3	1.5m	5000m ²	180m	ANTHROPIQUE

1) ARBRE 1 s'entraîne

- Sous-ensemble aléatoire = Random Forest tire au sort 80 dépressions parmi les 120 + quelques features parmi les 11
- Exemple : Arbre 1 reçoit D1 et D3 (pas D2) + features (Alt_range, Area_max)
- Arbre 1 apprend Si Alt_range > 2m ET Area_max < 4000 → NATURELLE. Si Alt_range < 2m → ANTHROPIQUE

2) Nouvelle forme à classer : (Alt_range = 2.3m; Area_max = 3200m², Perimeter = 230m). Arbre 1 → NATURELLE.

3) Arbre 2 s'est entraîné sur D2 et D3 (pas D1) + autres features (Perimeter, Area_max). Arbre 2 dit : NATURELLE aussi etc...

4) VOTE sur 500 arbres pour Dépression X :

435 arbres disent : NATURELLE

50 arbres disent : ANTHROPIQUE

15 arbres disent : FAUX POSITIF

→ Majorité = NATURELLE (87%)

Le Workflow : Phase 3 – Machine Learning (création et application modèle)

Phase 3 : MACHINE LEARNING

↓ Étiquetage 3 classes + ML

↓ Output : dépressions classifiées

Performances attendues

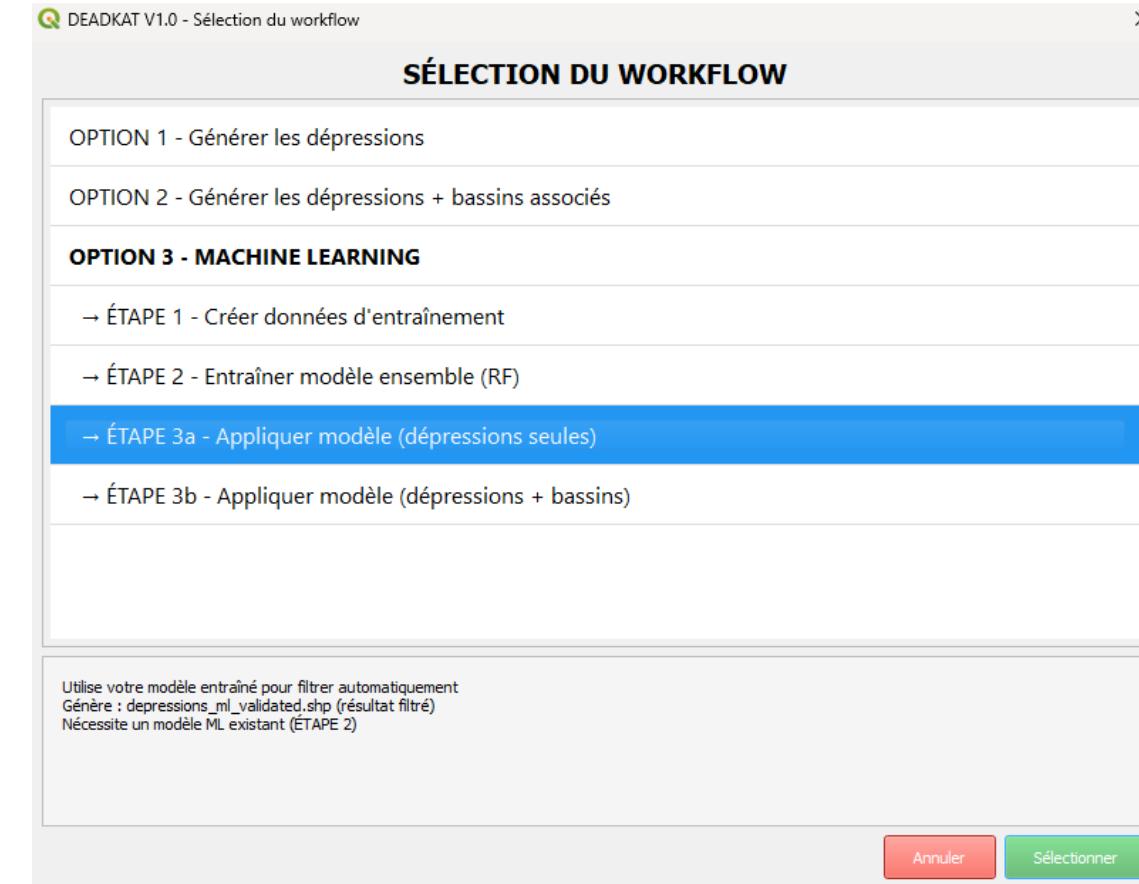
- Précision globale : 90-95%
- Importance features : Alt_range, Area_max, Alt_std typiquement top 3

Transférabilité géographique

- Modèle entraîné zone A applicable zone B voisine (même contexte géomorpho)
- Performances dégradées si contexte très différent (lithologie, morphologie)
- Recommandation : réentraînement 50-100 annotations locales pour calibration

Export et réutilisation

- Sauvegarde modèle .joblib (Python standard)
- Métadonnées incluses : features, classes, date, zone, performances
- Rechargement facile pour application nouvelles données



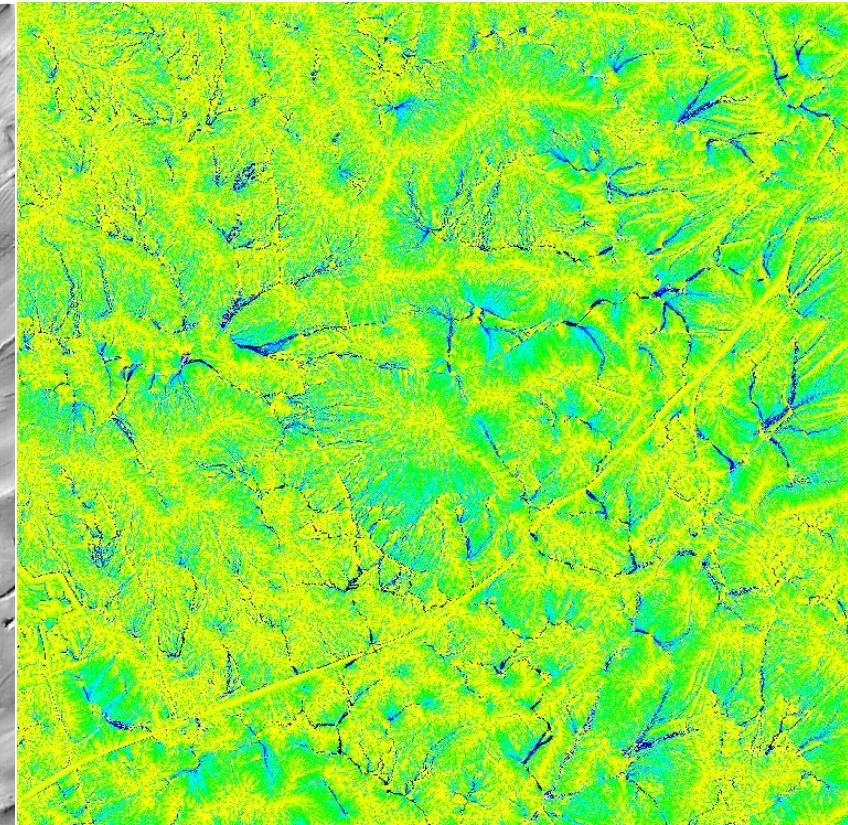
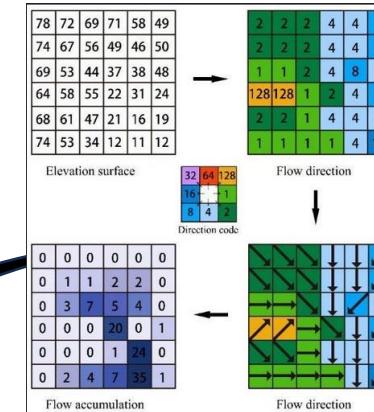
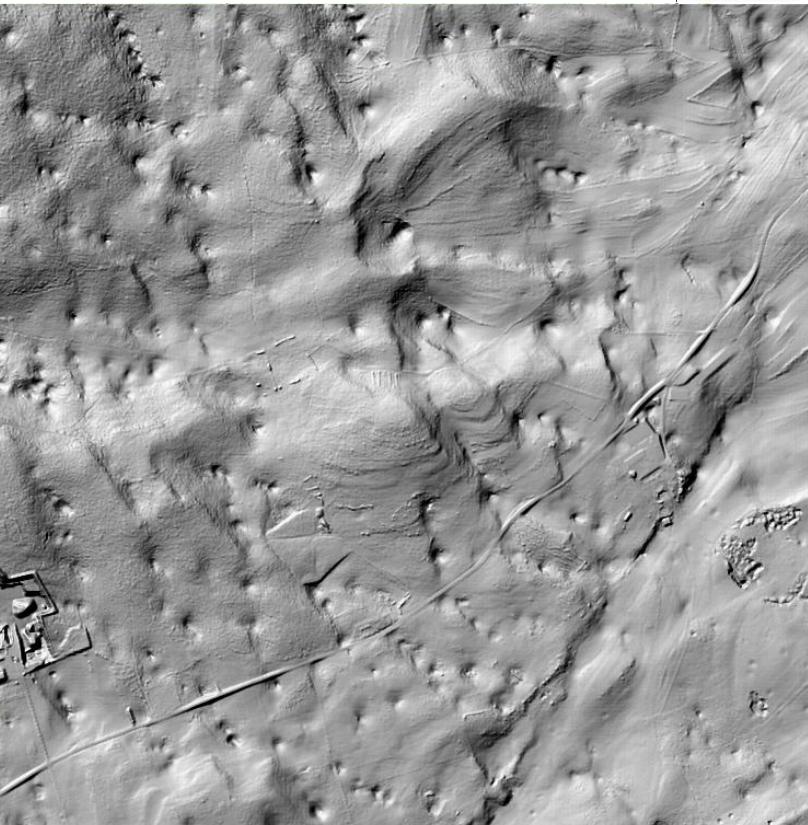
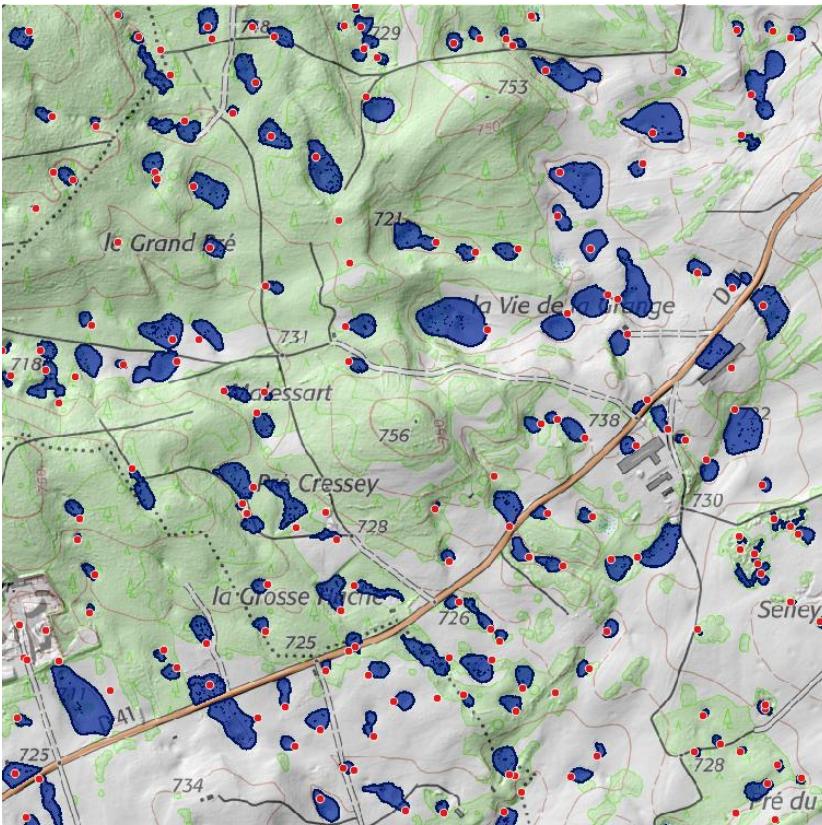
↓ Exutoires + bassins d'alimentation
↓ Output : bassins versants

Le Workflow : Phase 4 – Hydrologie

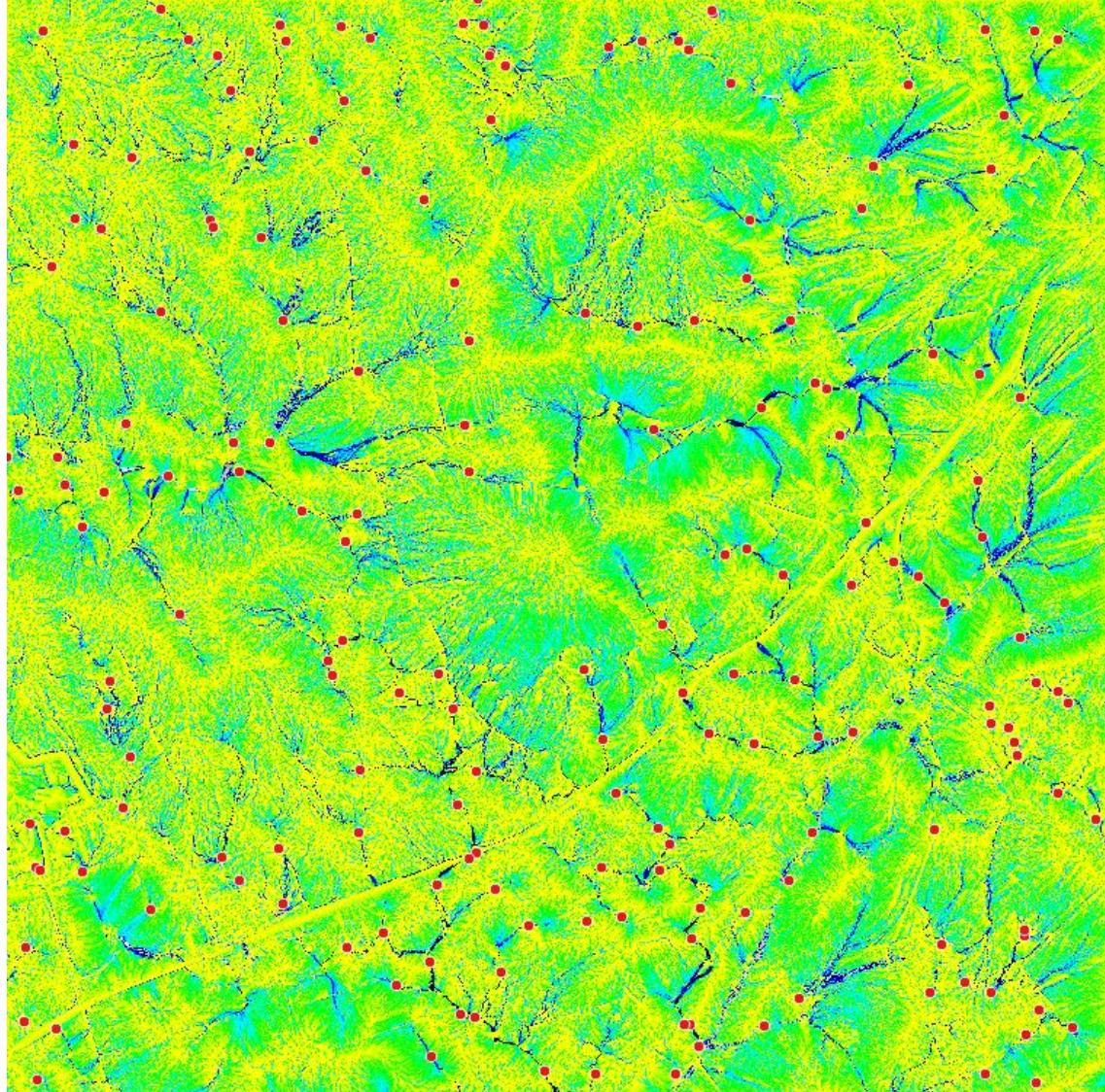
Objectif : caractériser rôle hydrologique de chaque dépression

- Identification exutoires (points infiltration préférentielle)
- Délimitation bassins d'alimentation topographiques
- Quantification surfaces contributives → évaluation vulnérabilité

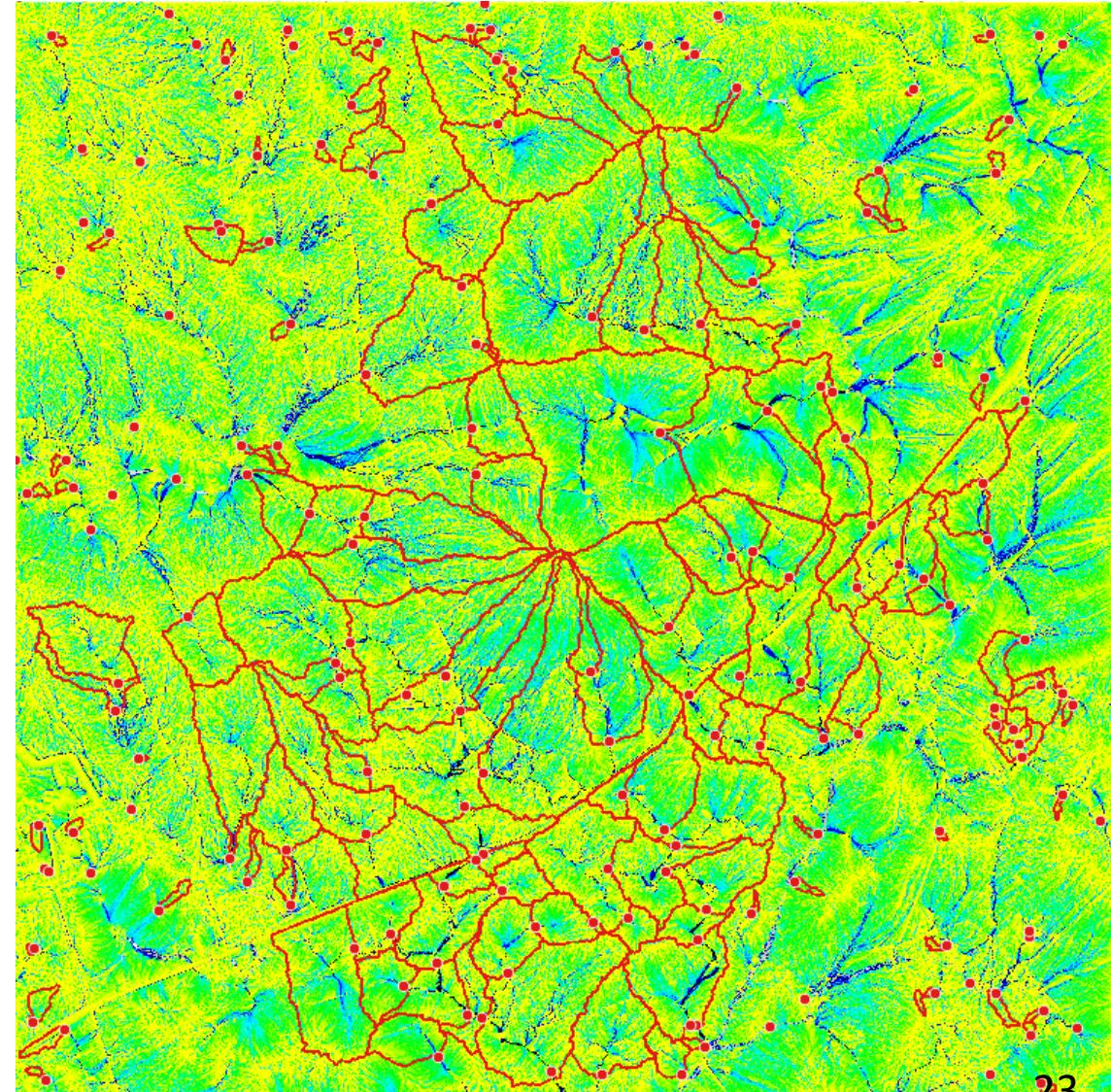
Étape 11 : Détection exutoires



Le Workflow : Phase 4 – Hydrologie



Étape 12 : Détection des BV des dépressions



Le Workflow : Phase 5 – Exports

Phase 5 : EXPORTS & VALIDATION
↓ Shapefiles + CSV

courbes_niveau_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	42 403 Ko
depressions_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	1 369 Ko
depressions_comblees_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	1 500 Ko
depressions_verifiees_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	8 166 Ko
enveloppes_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	11 748 Ko
formes_fermees_brutes_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	8 166 Ko
formes_rejetees_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	1 Ko
polygones_attributs_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	32 193 Ko
polygones_bruts_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	32 193 Ko
polygones_filtres_0_5m.shp	01/12/2025 16:41	Fichier SHP	11 748 Ko

```

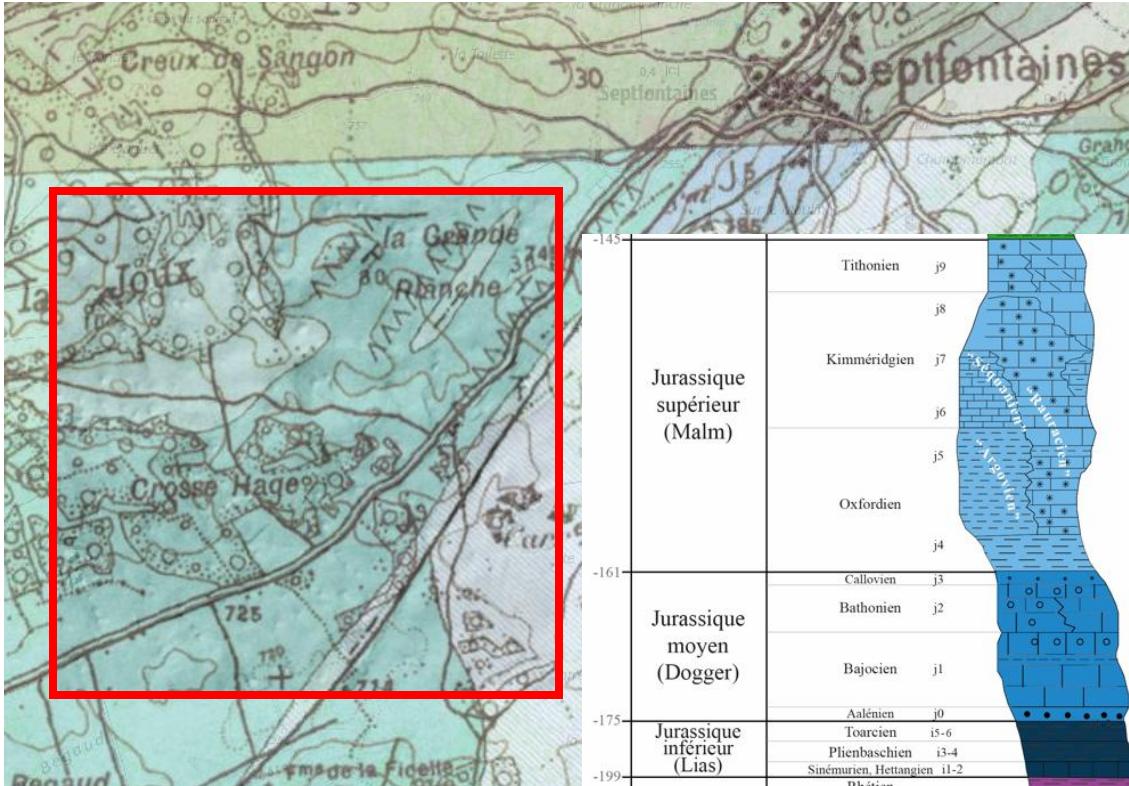
16:41:30 - [INFO] - Logging configuré - Fichier: D:/EPTB_SD/02_Outils/15_QGIS/DEPRESSION/CARTO/SITE/TOUS_SITES/SEPTFONTAINES/DK_VERSION1_2025/DEPRESSIONS/journal.log
16:41:30 - [INFO] - Mode : débogage - Dépressions seules
16:41:30 - [INFO] - Ml Mode : désactivé
16:41:30 - [INFO] - Mode : Dépressions seules
16:41:31 - [INFO] - Etape 1 : Extraction des courbes de niveau
16:41:31 - [INFO] - Courbes de niveau 0.5 m générées : D:/EPTB_SD/02_Outils/15_QGIS/DEPRESSION/CARTO/SITE/TOUS_SITES/SEPTFONTAINES/DK_VERSION1_2025/DEPRESSIONS/courbes_niveau_0_5m.shp
16:41:31 - [INFO] - Etape 1 validée.
16:41:31 - [INFO] - Etape 2 : Conversion des courbes de niveau en polygones
16:41:36 - [INFO] - Polygones 0.5 m générés : D:/EPTB_SD/02_Outils/15_QGIS/DEPRESSION/CARTO/SITE/TOUS_SITES/SEPTFONTAINES/DK_VERSION1_2025/DEPRESSIONS/polygones_bruts_0_5m.shp
16:41:36 - [INFO] - Etape 2 validée.
16:41:40 - [INFO] - Etape 3 : Ajout des champs et calcul des attributs
16:41:40 - [WARNING] - Aucune altitude pour feature 18788
16:41:43 - [INFO] - Attributs calculés pour couche polygons_0.5m (38967 entités)
16:41:45 - [INFO] - ✓ Couche enregistrée pour couche polygons_0.5m (38967 entités)
16:41:45 - [INFO] - ✓ Etape 3 validée.
16:41:45 - [INFO] - Etape 4 : Filtrage des polygones par périmètre
16:41:45 - [INFO] - Filtrage: 15420 features sur 38967
16:41:46 - [INFO] - ✓ Etape 4 validée: 15420 dépressions filtrées
16:41:46 - [INFO] - Etape 5 : Identification des enveloppes
16:41:53 - [INFO] - Nombre total d'enveloppes identifiées : 430
16:41:53 - [INFO] - ✓ Etape 5 validée.
16:41:53 - [INFO] - Etape 6 : Identification des formes fermées avec tests anti-butes
16:41:53 - [INFO] - Paramètres stratégie anti-butes :
16:41:53 - [INFO] - Seuil corrélation : -0.05
16:41:53 - [INFO] - Dominance max : 0.4
16:41:53 - [INFO] - Position max : 0.3
16:41:53 - [INFO] - Champs disponibles: ['FID', 'Perimeter', 'Area', 'Altitude', 'Numero']
16:41:53 - [INFO] - Enveloppes à analyser: 430
16:41:53 - [INFO] - =====
16:41:53 - [INFO] - RÉSULTATS ÉTAPE 6 - TESTS ANTI-BUTE
16:41:53 - [INFO] - Stratégie appliquée : corr < -0.05, share < 0.4, pos < 0.3
16:41:53 - [INFO] - Total enveloppes analysées: 430
16:41:53 - [INFO] - Formes acceptées: 185 (43.0%)
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - polygone unique: 0
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - altitude manquante: 0
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - dénivelé insuffisant: 89
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - TEST1 (corrélation): 93
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - TEST2 (amplitude excessive): 0
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - TEST3 (bute extrême): 0
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - TEST4 (dominance en bas): 59
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - TEST5 (micro-dépressions): 4
16:41:53 - [INFO] - Rejetées - TEST6 (micro-plateau): 0
16:41:53 - [INFO] - Total rejets: 246
16:41:53 - [INFO] - Efficacité filtrage: 57.0%
16:41:53 - [INFO] - =====
16:41:53 - [INFO] - ÉTAPE 7 - Vérification finale (fichier de sécurité)
16:41:53 - [INFO] - ✓ Couche ajoutée au projet : depressions_verifiees_0_5m.shp
16:41:53 - [INFO] -

```

3324420 function calls (3324163 primitive calls) in 22.446 seconds					
Ordered by: cumulative time					
ncalls	tottime	percall	cumtime	percall	filename:lineno(function)
1	0.050	0.050	9.275	9.275	<string>:1325(step3_add_fields_
1	1.751	1.751	7.596	7.596	<string>:1237(add_fields_and_ca
1	0.618	0.618	7.227	7.227	<string>:1478(step5_identify_en
3	0.001	0.000	6.167	2.056	C:\PROGRA~1/QGIS34~1.2/apps/qgi
3	0.000	0.000	6.166	2.055	C:\PROGRA~1/QGIS34~1.2/apps/qgi
3	0.000	0.000	6.122	2.041	C:\PROGRA~1/QGIS34~1.2/apps/qgi
27503	4.205	0.000	4.205	0.000	{built-in method getFeature}
1	0.000	0.000	4.046	4.046	<string>:1206(step2_polygonize_
6	2.401	0.400	2.410	0.402	writeAsVectorFormat}
38967	2.281	0.000	2.281	0.000	{built-in method nearestNeighbo
1	0.000	0.000	2.064	2.064	<string>:1178(step1_extract_con
1	0.000	0.000	2.056	2.056	C:\PROGRA~1/QGIS34~1.2/apps/qgi
1	0.001	0.001	2.054	2.054	C:\PROGRA~1/QGIS34~1.2/apps/qgi
1	0.010	0.010	2.050	2.050	<string>:1178(step1_extract_con

Classe	Nombre_Depressions	Perimeter_Moyenne	Area_Moyenne	DiffAlt_Moyenne	Circularite_Moyenne
Classe 1	59	59.54359512469708	192.78968013908212	0.8813559322033898	0.6222453569294782
Classe 2	49	136.00491988595263	868.8415333842828	1.6938775510204083	0.5771289937597088
Classe 3	37	224.13106830821556	1928.1608591544225	2.324324324324324	0.48334567074870466
Classe 4	18	330.5934001841487	3518.3452363214797	3.2222222222222223	0.401551853493191
Classe 5	22	472.71947215717904	6065.889559759535	4.61363636363636363	0.32971895441237326

Cas d'étude - Septfontaines



APPLICATION

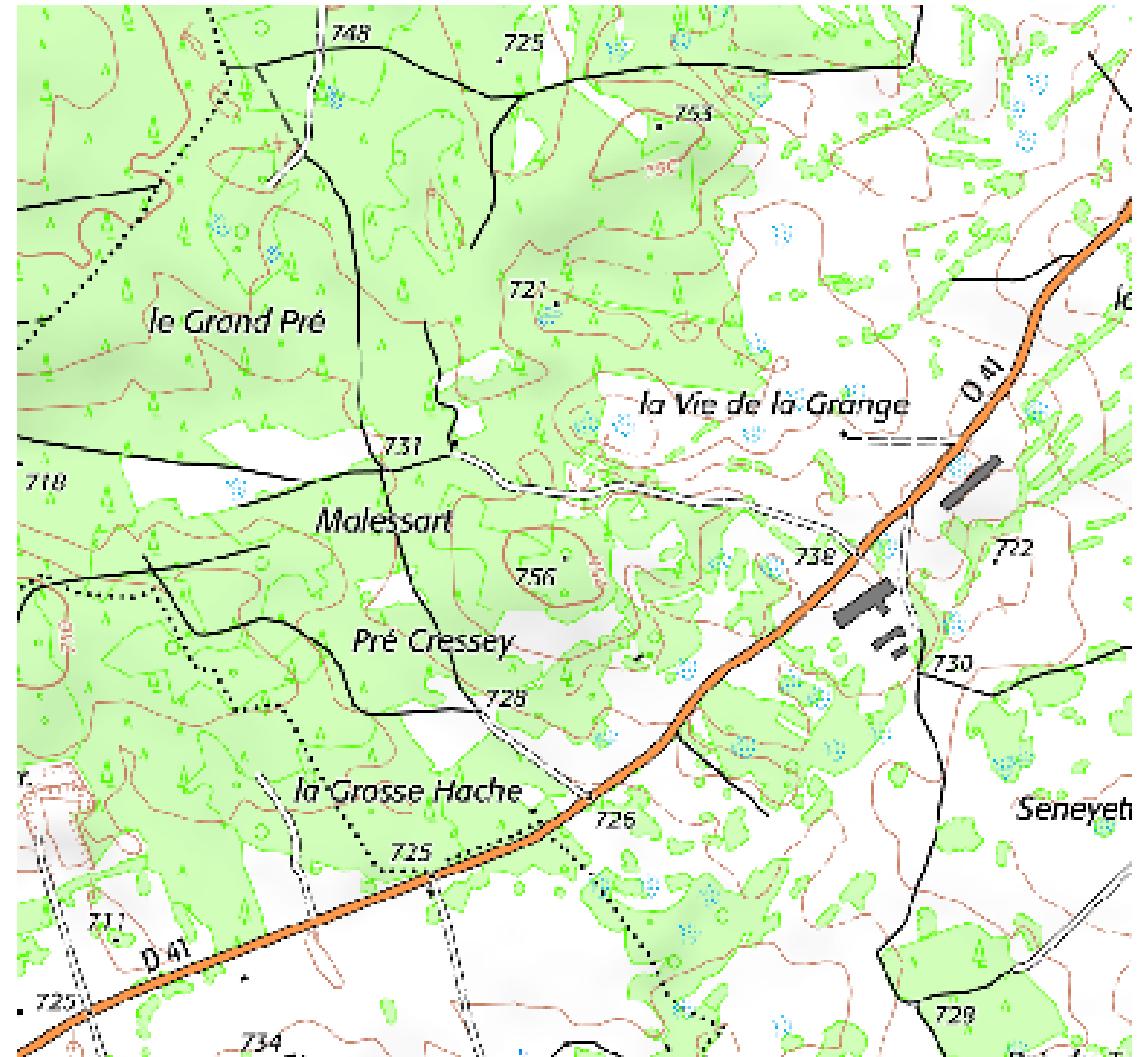
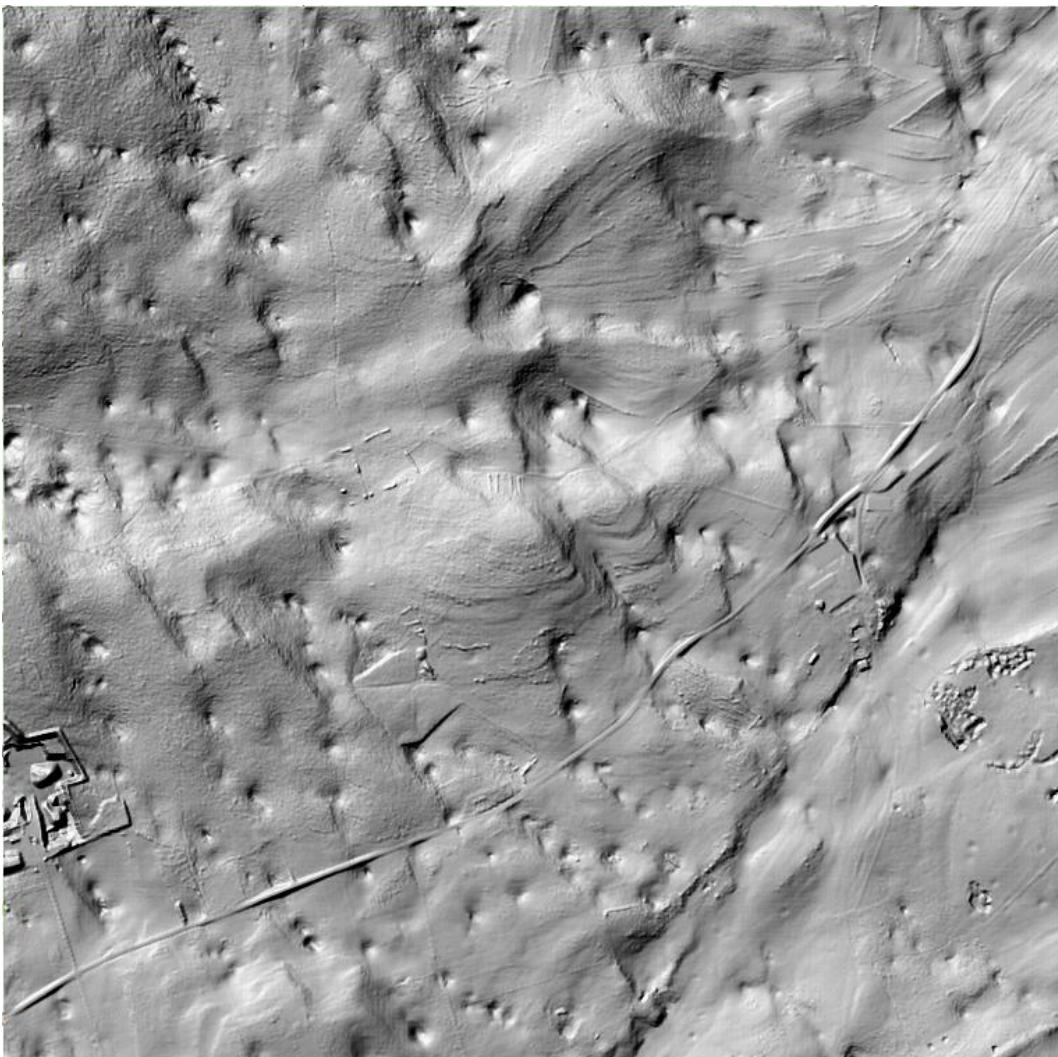
Contexte>

- Commune Septfontaines, Doubs (25)
- Massif du Jura
- Surface zone test : 4km²
- Géologie : Jurassique supérieur
- Contexte géomorphologique : 2^e plateau altitude 700-800m

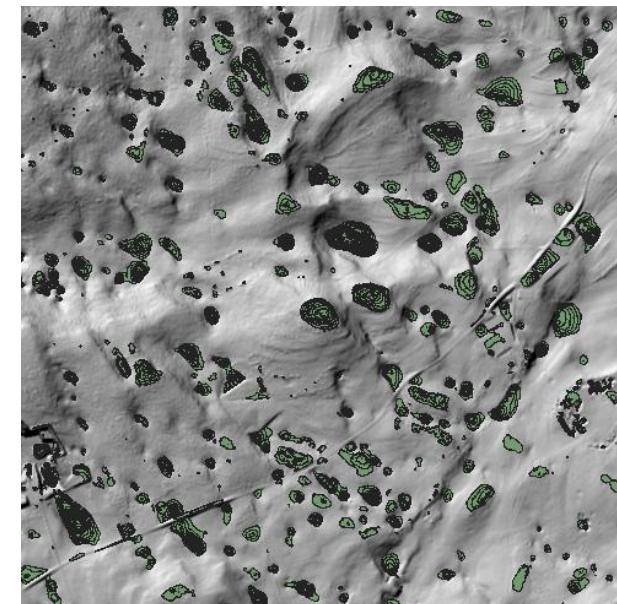
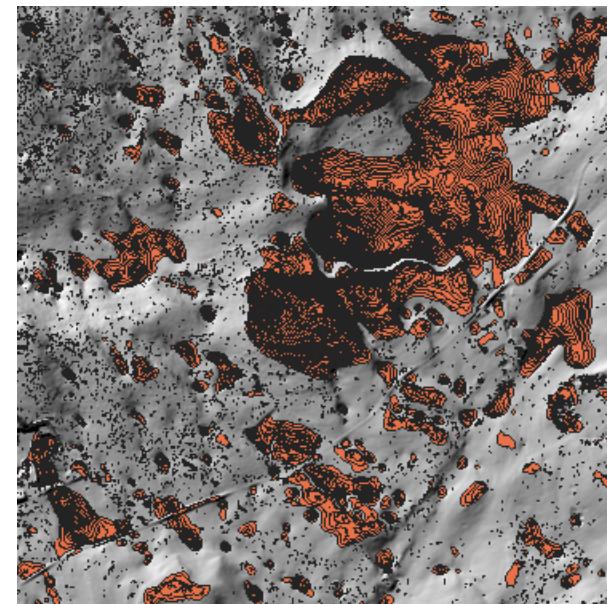
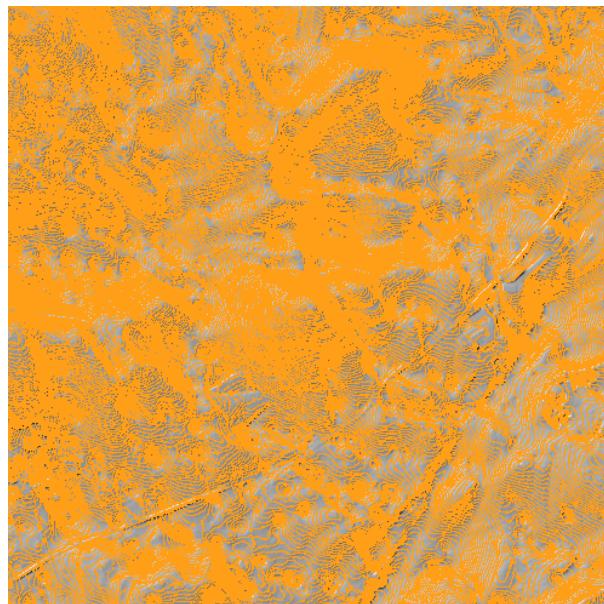
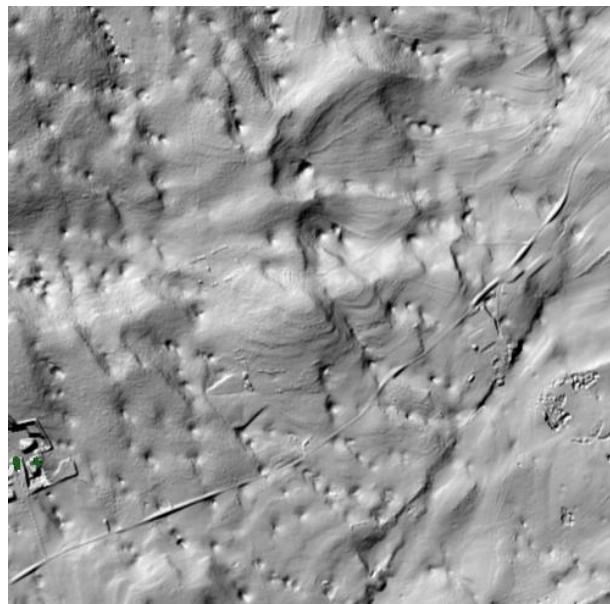
Données disponibles

- MNT LiDAR IGN RGE : résolution 0.5m
- Acquisition : 2021-2022
- Précision altimétrique : ±15 cm
- Densité nuage points : 8-10 pts/m²

Cas d'étude - Septfontaines



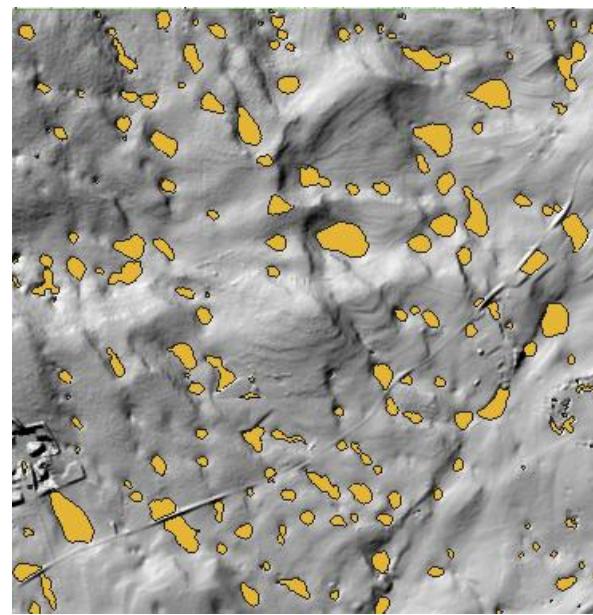
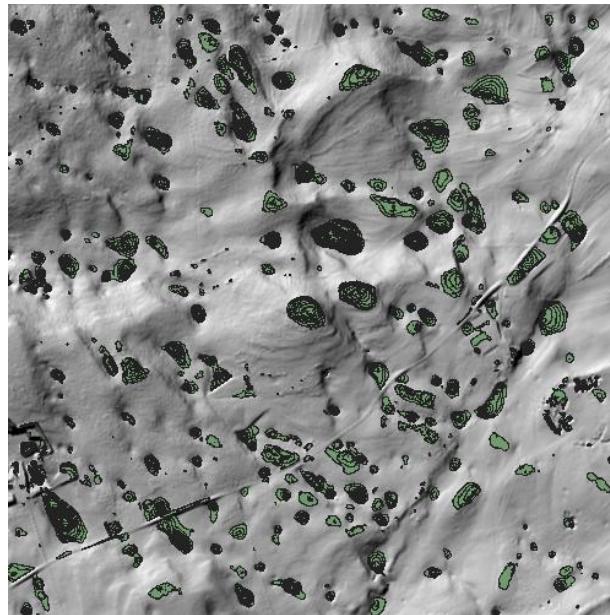
Cas d'étude - Septfontaines



Phase 1 : Détection géomorphologique

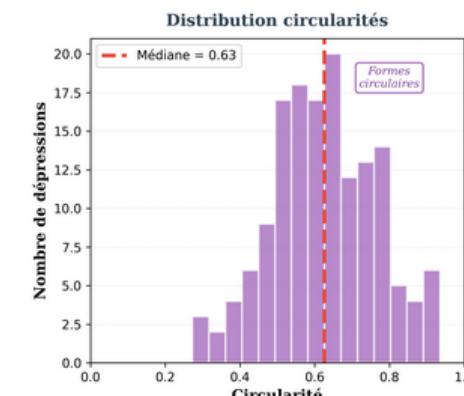
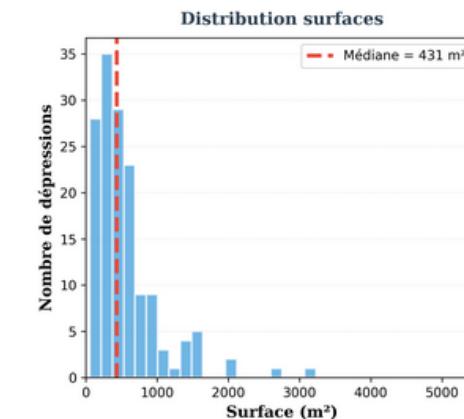
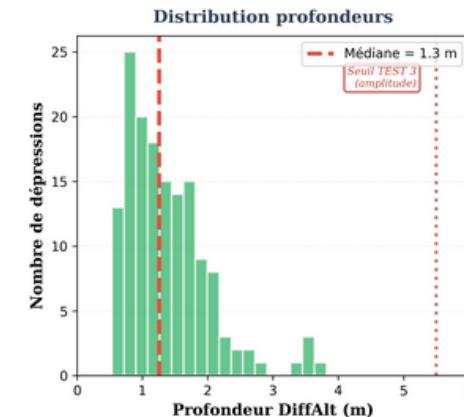
- Étape 1-2 : 38 967 isolignes extraites (équidistance 0.5m)
- Étape 3 : 25 143 polygones après polygonisation (64%)
- Étape 4 : 15 420 polygones après filtrage périmétrique (39% conservation)
- Étape 5-6 : 430 enveloppes candidates identifiées (réduction 97%)

Cas d'étude - Septfontaines

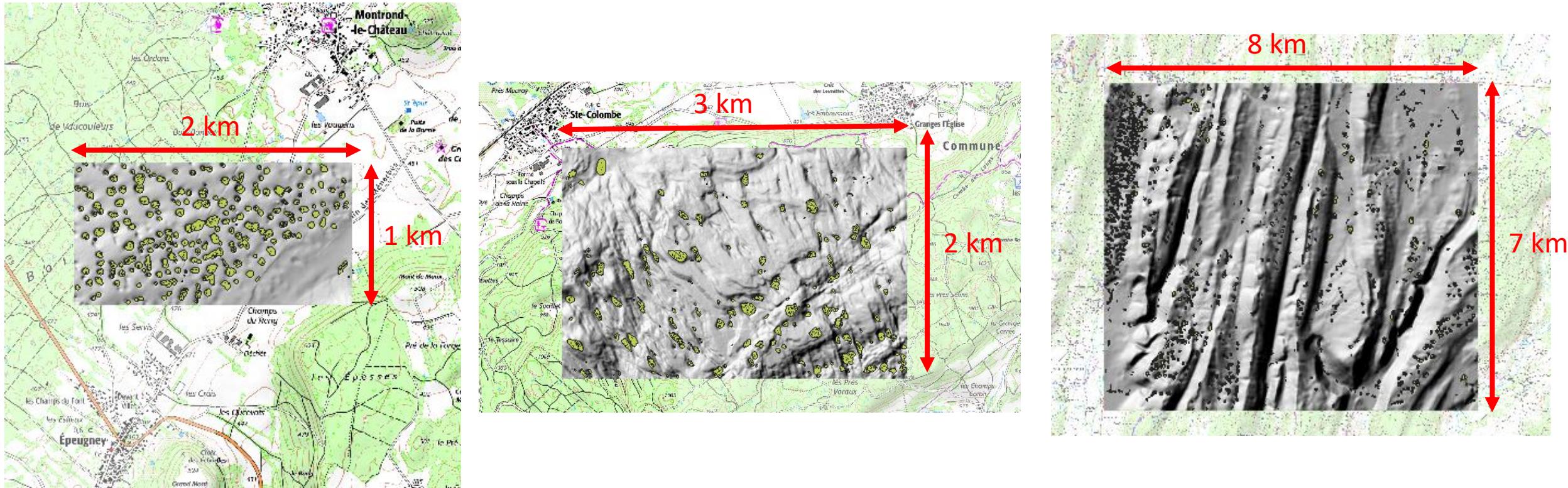


Phase 2 : Tests discrimination

- Tests appliqués : 430 enveloppes testées
- 185 dépressions conservées (43% taux conservation)
- 245 enveloppes rejetées (57%) > sans ML



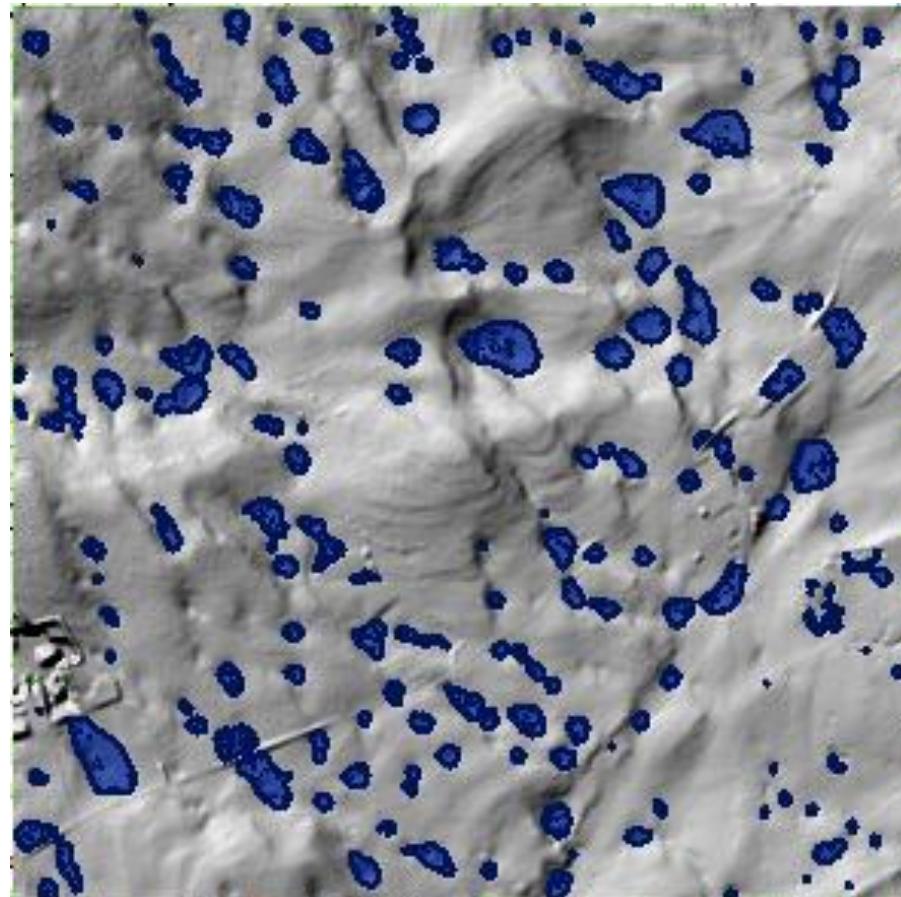
Cas d'étude – Septfontaines (avec ML)



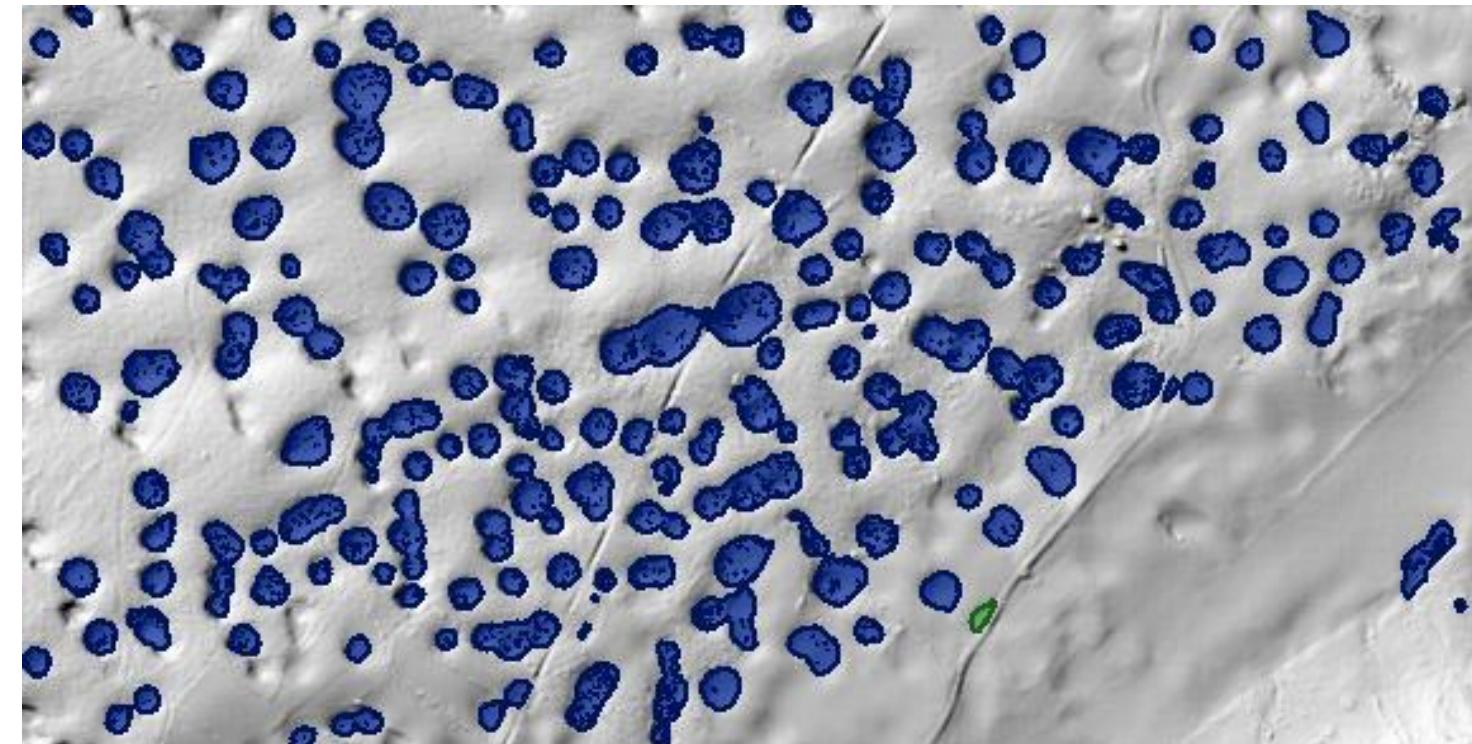
Entrainement du modèle

- 4 sites $> \approx 70 \text{ km}^2$
- contrastes géographique (1^{er} et 2^e plateau + Haute Chaine + Petite Montagne) > Jura tabulaire + plissé externe et interne
- ≈ 1650 formes pour entraînement modèle (dont environ 10 à 15 % de faux positifs et 1 à 2 % de dépressions atrophiques)

Cas d'étude – Septfontaines et Montrond (avec ML)



Résultat avec modèle entrainé
o 175 dépressions naturelles
o 1 dépressions anthropiques



Résultat avec modèle entrainé
o 176 dépressions naturelles
o 1 dépressions anthropiques

Cas d'étude – Septfontaines

Contexte validation

- Pas de campagne terrain exhaustive (coût/temps)
- Simulation validation réaliste basée sur contraintes GPS terrain
- 2 jeux complémentaires testant directions opposées
- JEU 1 : DEADKAT → Terrain (DK→TER)
- Question : les détections DEADKAT sont-elles confirmables visuellement terrain ?
- Teste : taux faux positifs DEADKAT (ce qu'il détecte existe-t-il ?)

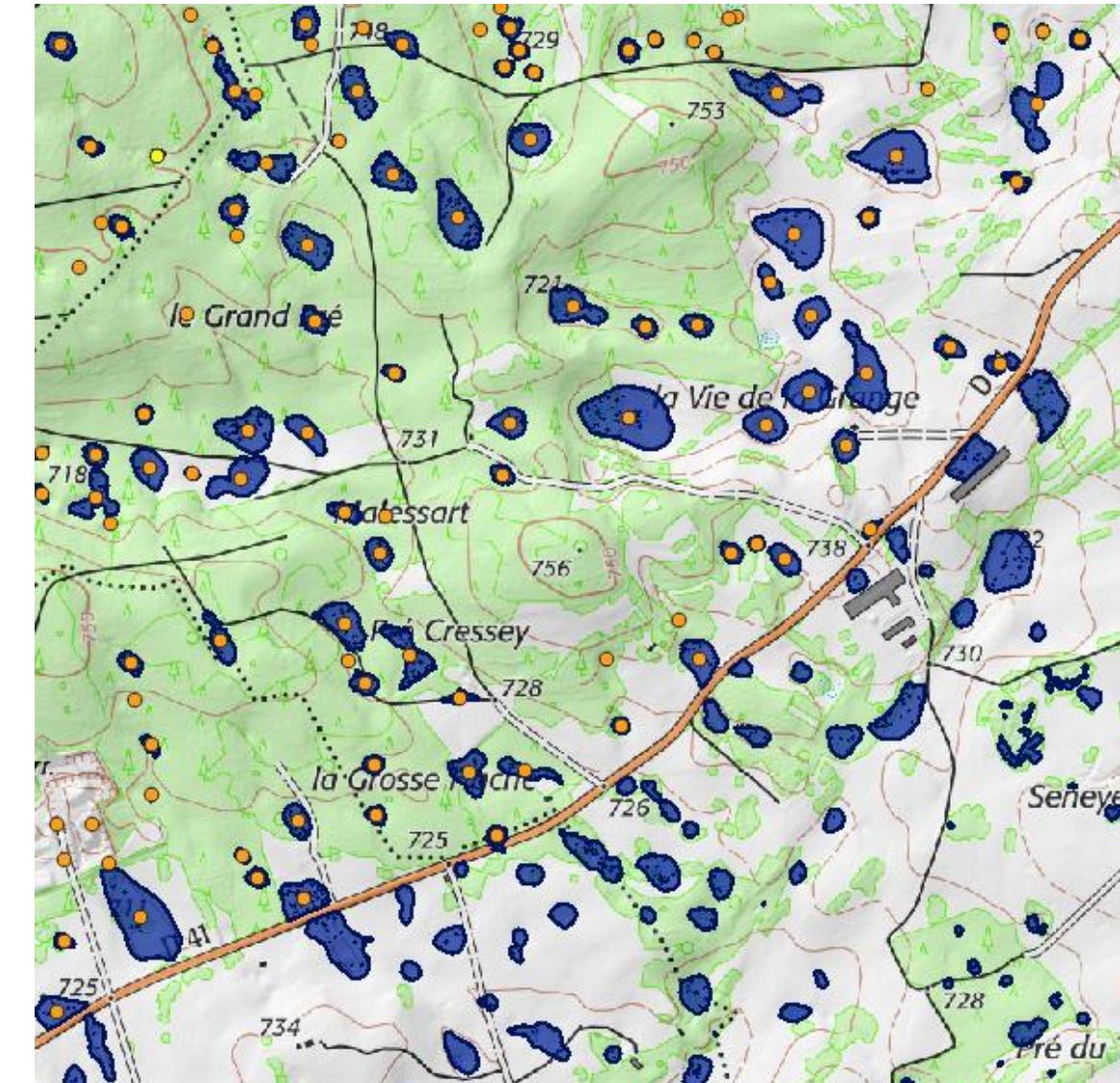
Protocole Jeu 1

- DEADKAT détecte 110 dépressions
- Opérateur terrain avec carte/GPS ±10m se rend sur chaque centroïde
- Rayon recherche : ~10m autour point GPS (compense imprécision)
- Décision binaire : dépression confirmée visuellement OUI/NON

Résultats quantitatifs

- ✓ Confirmées terrain : 98 (89%)
- ✗ Non confirmées : 12 (11%)

Raisons non-confirmation : Difficiles identifier visuellement (masquage végétation, faible profondeur, taille, coalescence)



Cas d'étude – Septfontaines

Contexte validation

- JEU 1 : Terrain → DEADKAT (TER→DK)
- DEADKAT appliqué en aveugle (sans connaissance observations terrain)
- Buffer 10m : dépression apparentée si distance <20m

Résultats quantitatifs (68 observations totales)

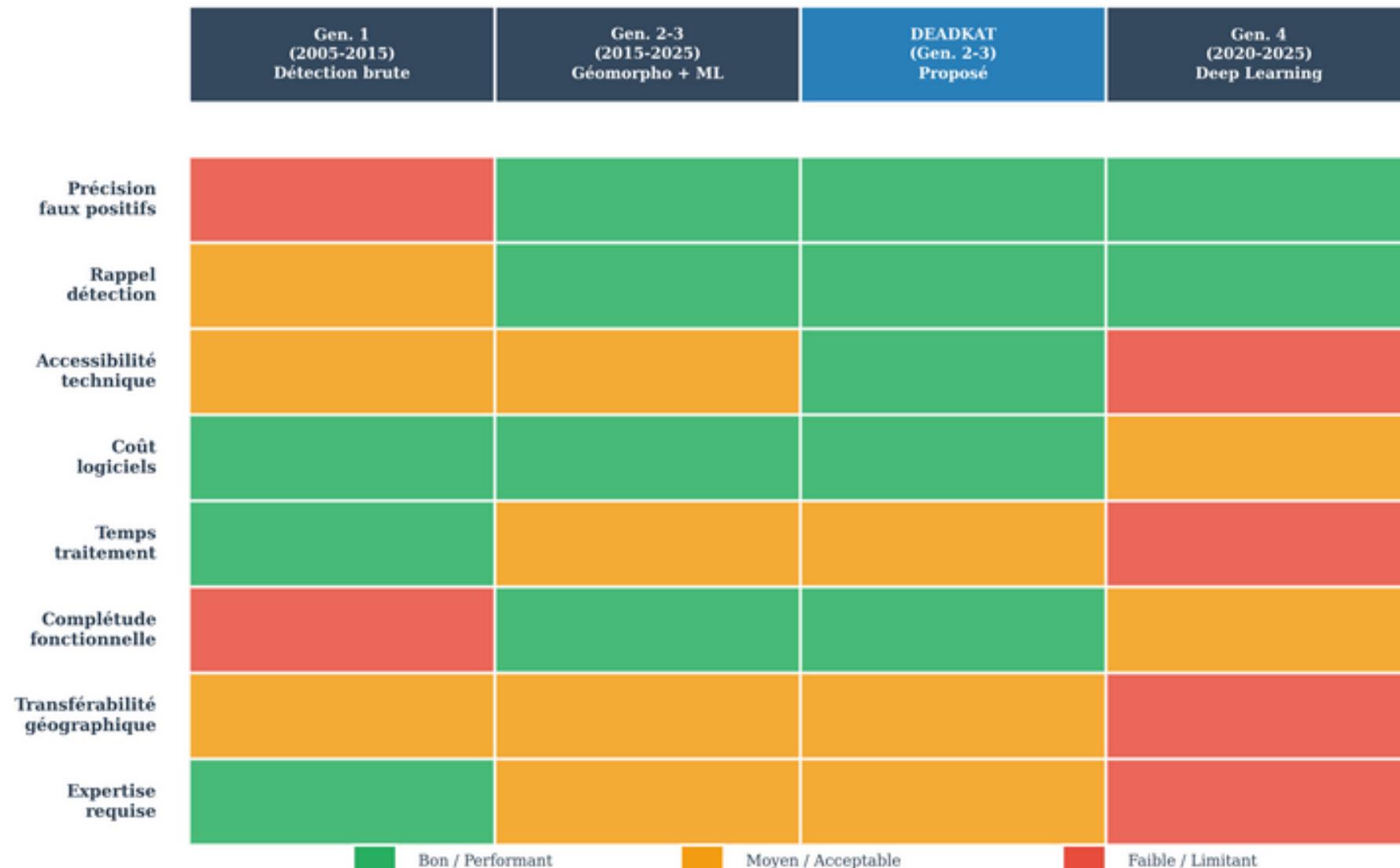
- ✓ Déetectées + GPS OK : 49 (72.1%) → DEADKAT détecte ET point dans buffer 10m
- ⚠ Déetectées + décalage GPS : 6 (8.8%) → DEADKAT détecte MAIS point >10m (artefact GPS)
- ✗ Non détectées : 13 (19.1%)

Raisons non-détection (13 cas)

- Dépressions ouvertes : 7 (53.8%) → forme non compatible avec méthode isolignes fermées
- Sous seuils : 6 (46.2%) → profondeur insuffisante

81% des dépressions observées terrain sont détectées par DEADKAT, les non-détections sont dues à des limites méthodologiques (dépressions ouvertes) ou des seuils de profondeur





Forces opérationnelles

- Développement QGIS et open source
- Pas de dépendance logiciels propriétaires
- Documentation associée
- Métadonnées complètes, logs détaillés, reproductibilité

Limites identifiées

- Dépendance à la qualité du MNT source
- Sensibilité aux artefacts anthropiques
- Performances variables selon contexte géomorphologique

Incertitudes et sources d'erreur

- Erreurs de commission (faux positifs)
- Erreurs d'omission (faux négatifs)
- Incertitudes sur les attributs morphométriques

Perspectives

- Renforcement modèle
- Intégration de données auxiliaires
- Diffusion (modalité)

DEADKAT V1.0

DÉtection Automatisée des Dépressions KArsTiques à partir de Modèles Numériques de Terrain

Développement méthodologique et guide d'utilisation

Vincent Fister
Pôle Karst
EPTB Saône et Doubs

Version 1.0 – 2026

Résumé

Les dépressions karstiques (dolines, ouvalas, poljés) constituent des éléments clés du fonctionnement hydrologique des aquifères carbonatés en tant que zones d'infiltration préférentielle. Leur identification exhaustive répond à des enjeux multiples de gestion quantitative des ressources en eau, d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères et de prévention des risques géologiques. Les méthodes traditionnelles de cartographie par photo-interprétation présentent des limitations importantes en termes d'exhaustivité, de reproductibilité et d'efficience économique pour les études à grande échelle.

Cette note présente DEADKAT (DÉtection Automatisée des Dépressions KArsTiques), une méthode géomatique innovante développée pour exploiter les Modèles Numériques de Terrain haute résolution (RGE ALTI V2® de l'IGN) dans le contexte français. L'approche combine une chaîne de traitement géomorphologique en 12 étapes basée sur l'analyse des isolignes vectorielles, avec une composante optionnelle d'apprentissage automatique (Random Forest) permettant le filtrage intelligent des détections. L'architecture modulaire permet une adaptabilité multi-échelle (résolutions 0,5 à 25 m) et offre cinq modes d'exécution selon les objectifs opérationnels.

Les innovations méthodologiques incluent une validation topologique intégrée assurant la cohérence altimétrique des dépressions détectées, des paramètres adaptatifs selon la résolution du MNT, et une optimisation algorithmique permettant le traitement efficace de vastes emprises territoriales. Les sorties standardisées (shapefiles géoréférencés, attributs morphométriques) facilitent l'intégration dans les workflows SIG existants. L'outil répond aux besoins opérationnels des échelles locale (diagnostics géotechniques), intermédiaire (cartographies départementales) et régionale (inventaires exhaustifs).

Applications opérationnelles

● Gestion ressource en eau

- Identification zones recharge prioritaires
- Périmètres AEP (Protection, zone de sauvegarde)
- Cartographie vulnérabilité pollution (méthode multicritères)

● Aménagement territorial

- Contraintes urbanisme : zones inconstructibles (risque effondrement)
- Planification infrastructures : évitement tracés dépressions

● Risques géotechniques

- Inventaire exhaustif dépressions anthropisées (stabilité)
- Surveillance effondrements actifs (comparaison MNT multi-temporels)

● Recherche fondamentale

- Morphométrie comparée massifs karstiques
- Modélisation spéléogenèse : relations dépressions ↔ réseaux souterrains
- Impacts changement climatique sur évolution morphologie

DEADKAT propose un **compromis optimal** entre robustesse méthodologique, accessibilité technique et complétude fonctionnelle. Positionné en "Génération 2.5" (entre méthodes simples et Deep Learning complexe), l'outil répond aux besoins opérationnels des gestionnaires territoriaux français tout en maintenant une rigueur scientifique.