

*#connaître #partager #accompagner*

Les rendez-vous du karst de Bourgogne Franche-Comté,  
6<sup>e</sup> 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 serai(en)t plus courte(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*

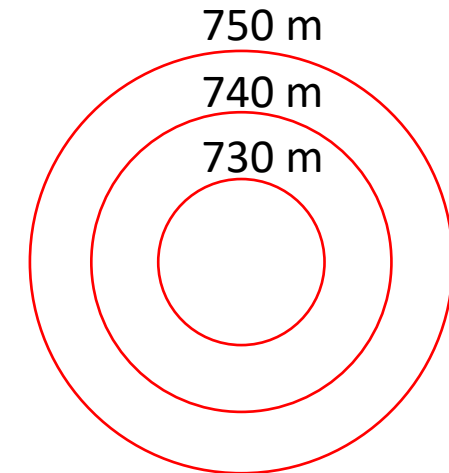
- Dépressions fermées en terrain karstique
- Formes circulaires à elliptiques, diamètre et profondeur variable
- Origine : dissolution, suffosion, effondrement
- Marqueurs géomorphologiques essentiels du karst

## *Importance hydrogéologique cruciale*

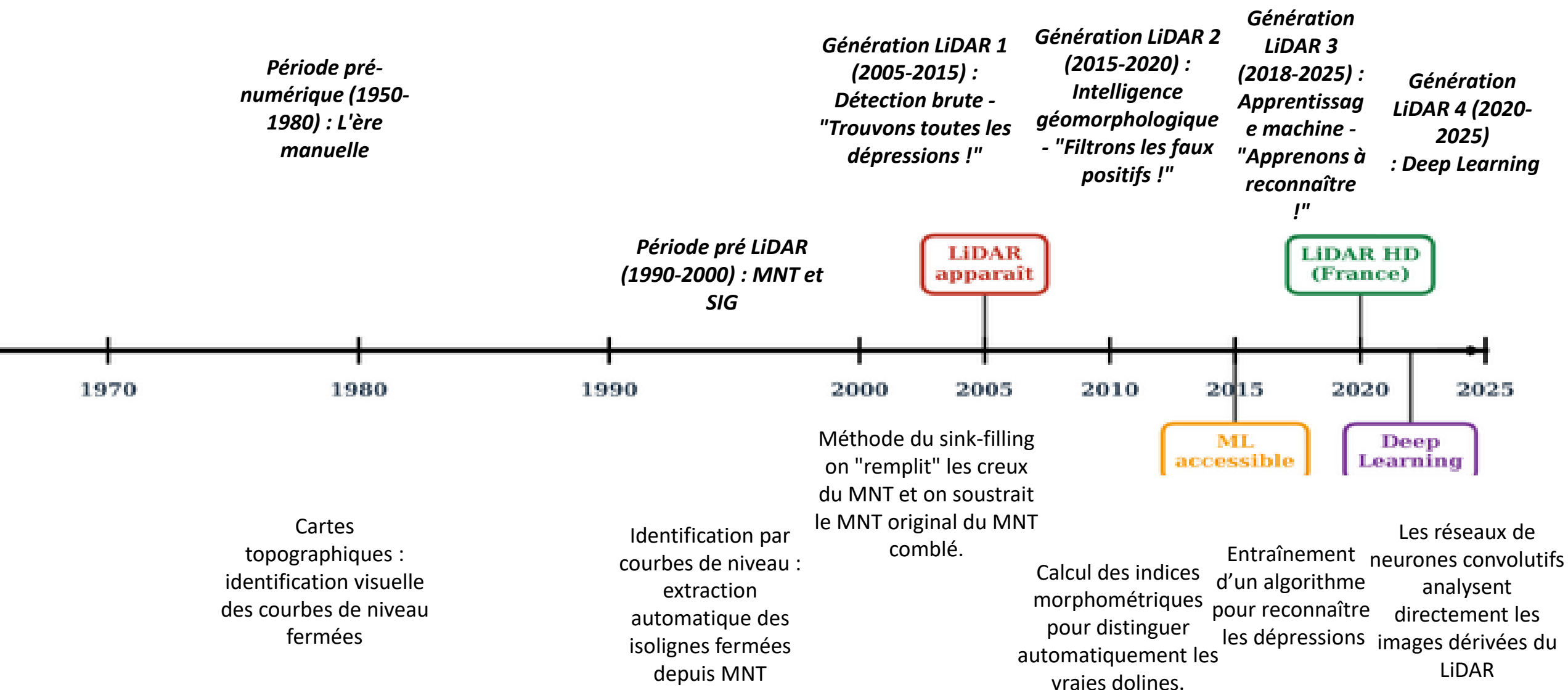
- Points d'infiltration préférentielle vers aquifères karstiques
- Zones de recharge directe
- Temps de transfert rapide
- Vulnérabilité importance à la pollution de surface

## *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)



MNT  
LiDAR



DÉTECTION



CLASSIFICATION



HYDROLOGIE



RÉSULTATS

## 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

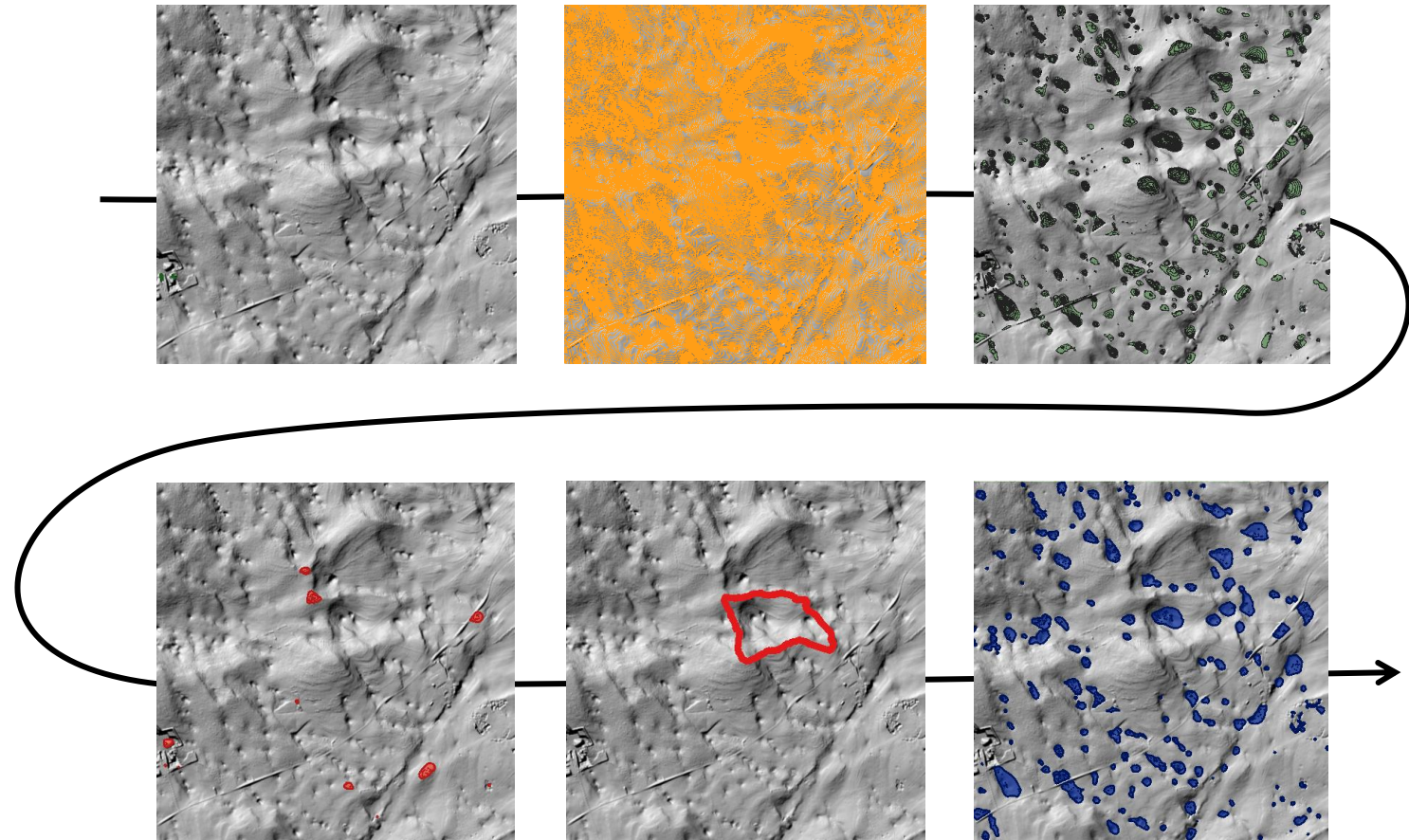
- ↓ Étiquetage 3 classes + ML
- ↓ Output : dépressions classifiées

### Phase 4 : HYDROLOGIE

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

### Phase 5 : EXPORTS & VALIDATION

- ↓ Shapefiles + CSV



Número	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

DEADKAT V1.0 - Sélection du workflow

### SÉLECTION DU WORKFLOW

OPTION 1 - Générer les dépressions

OPTION 2 - Générer les dépressions + bassins associés

**OPTION 3 - MACHINE LEARNING**

- ÉTAPE 1 - Créer données d'entraînement
- ÉTAPE 2 - Entraîner modèle ensemble (RF)
- ÉTAPE 3a - Appliquer modèle (dépressions seules)
- ÉTAPE 3b - Appliquer modèle (dépressions + bassins)

Analyse géomorphologique classique  
Génère : depressions\_[X]m.shp

Annuler Sélectionner

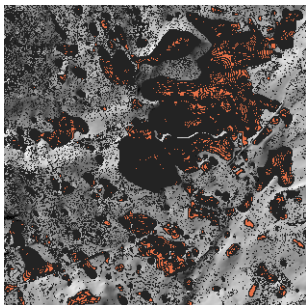
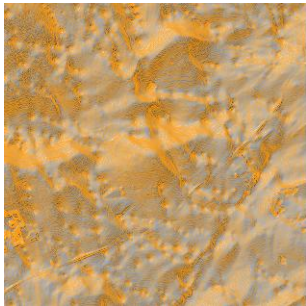
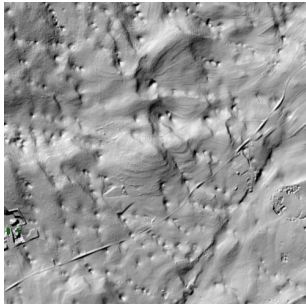
# Le Workflow : Phase 1 (1/3) - Extraction isolignes et polygonisation

Phase 1 : DÉTECTION GÉOMORPHOLOGIQUE

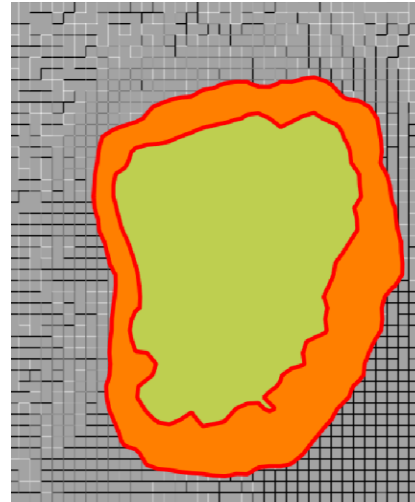
- ↓ Extraction isolignes + morphométrie
- ↓ Output : enveloppes candidates (400)

Étape 1 : Paramétrage (périmètre) + prétraitement

Étape 2 : Du raster aux polygones

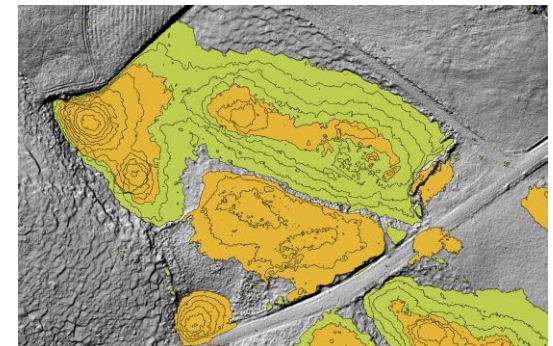
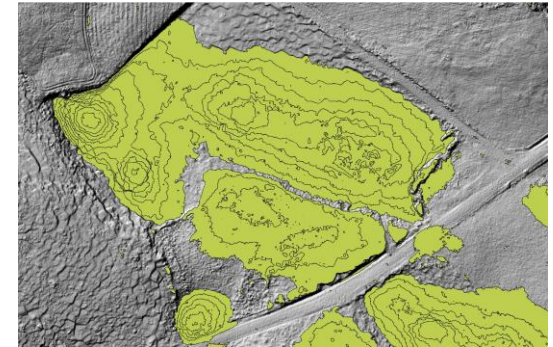


Étape 3 : Calculs morphométriques de base



Entité	Valeur
▼ <b>polygones_attributs_0_5m</b>	
▼ FID	24174
▶ (Dérivé)	
▶ (Actions)	
FID	24174
Perimeter	98,910149220241834
Area	83,572651566850254
Altitude	730,500000000000000

Étape 4 : Filtrage périmétrique



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

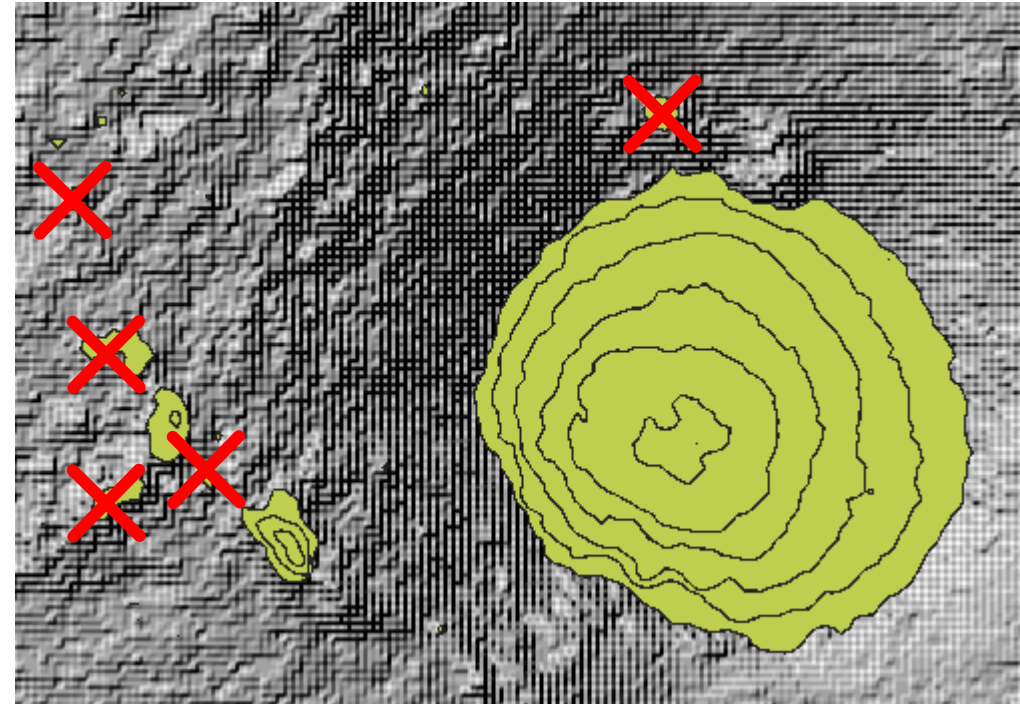
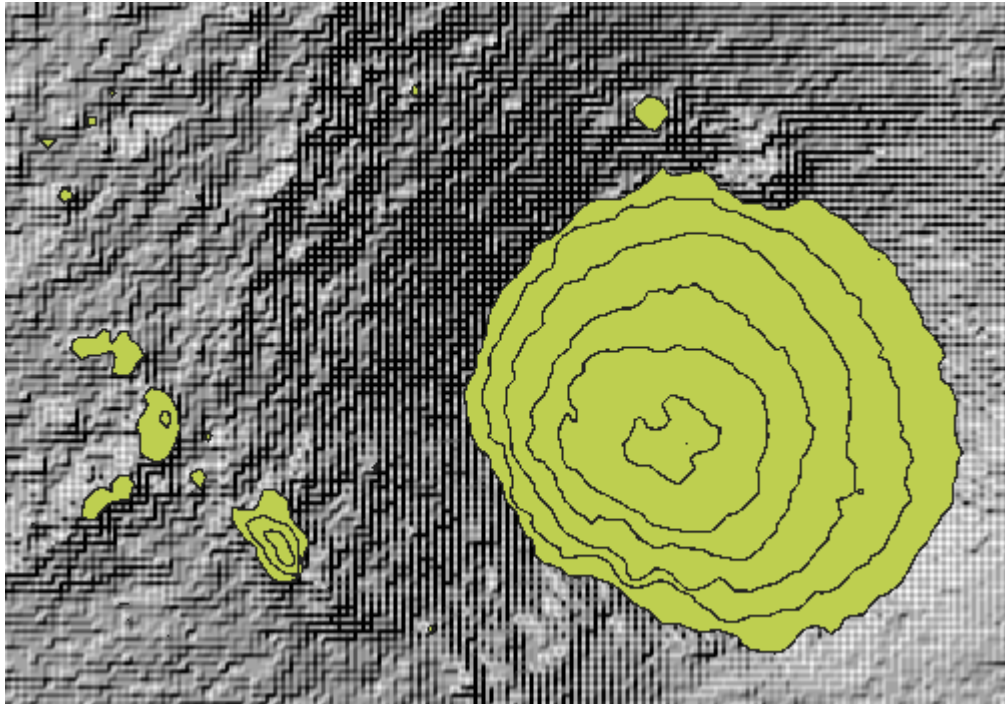
Phase 1 : DÉTECTION GÉOMORPHOLOGIQUE

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

## 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)

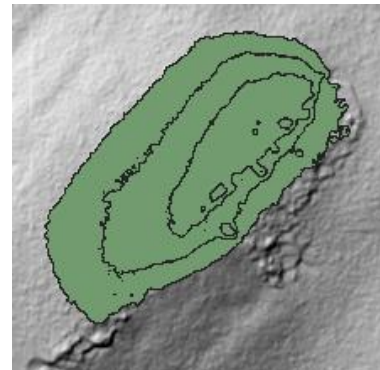
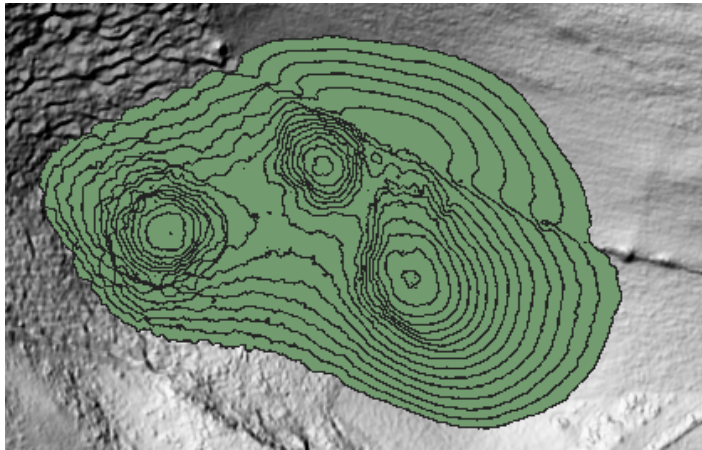
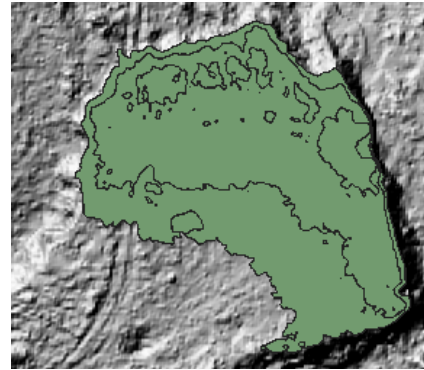
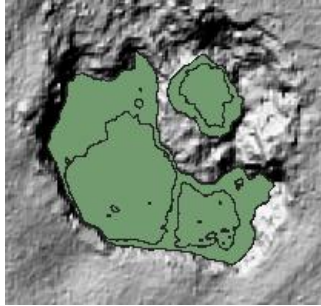
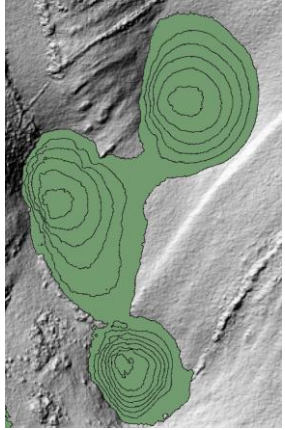
## Étape 6 : Sélection des enveloppes



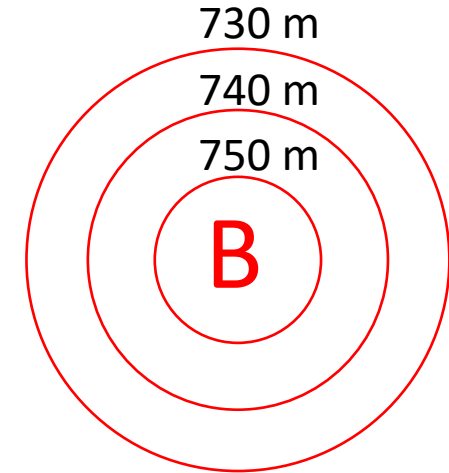
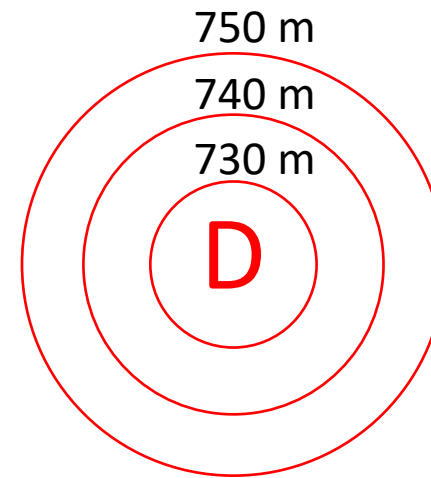
# Le Workflow : Phase 1 (2/3) - Regroupement et identification enveloppes

Phase 1 : DÉTECTION GÉOMORPHOLOGIQUE

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



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

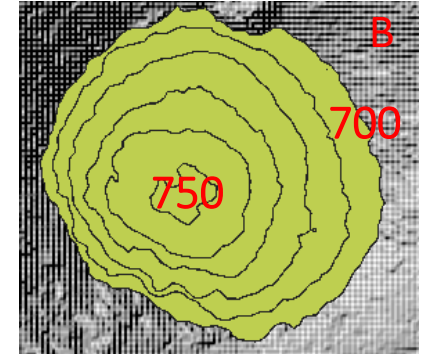
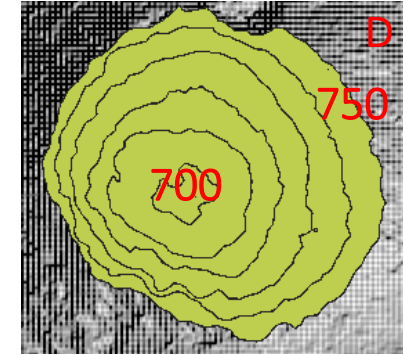
Phase 2 : TESTS DISCRIMINATION

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

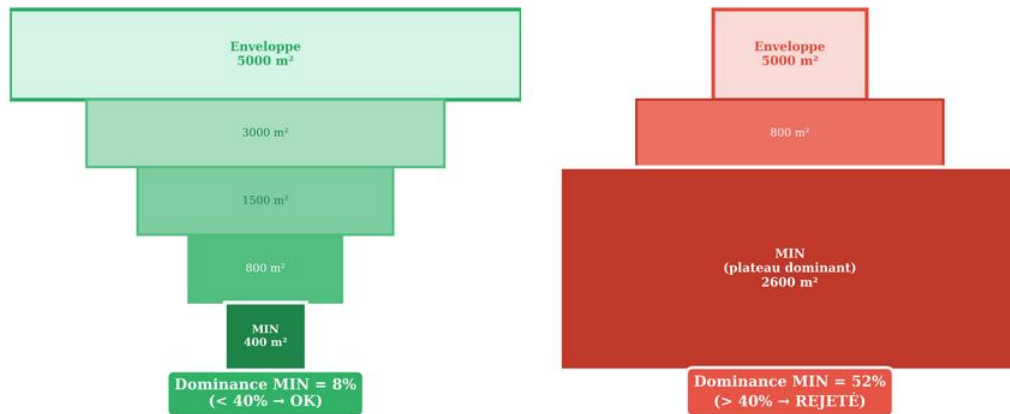
## Étape 7 : Les 5 tests morphologiques

Principe général : analyser la progression altitudes/surfaces

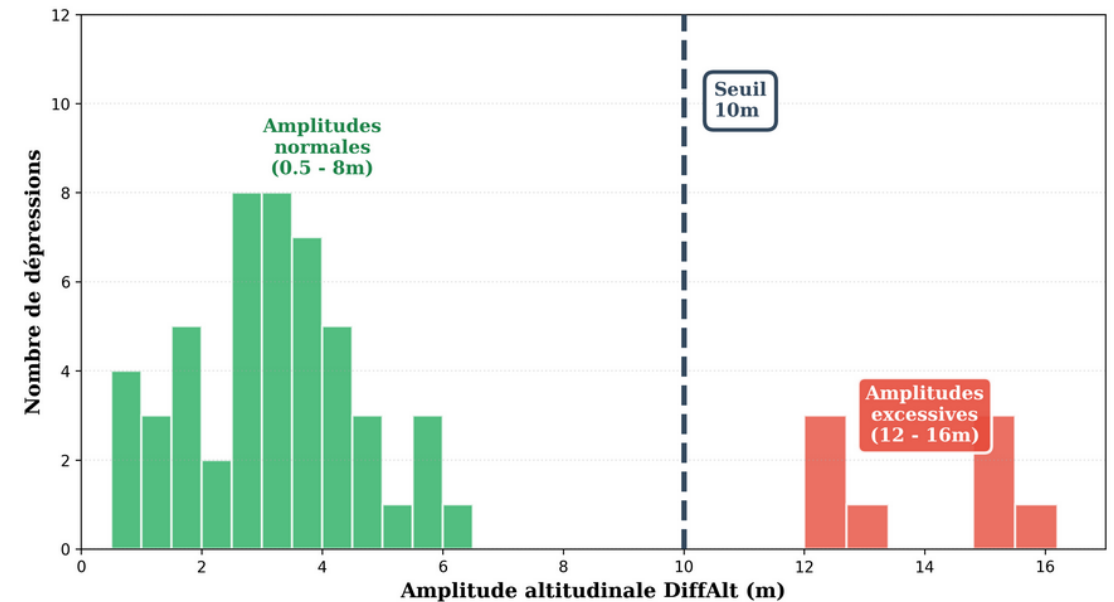
- Chaque dépression = ensemble polygones emboîtés (isolignes successives)
- DEP = En descendant du bord vers le fond, les polygones deviennent de plus en plus petits
- BUTTES = En montant de la base vers le sommet, les polygones deviennent de plus en plus petits



## Test 1 et 2 : distribution des surfaces



## Test 3 : amplitude altitudinale

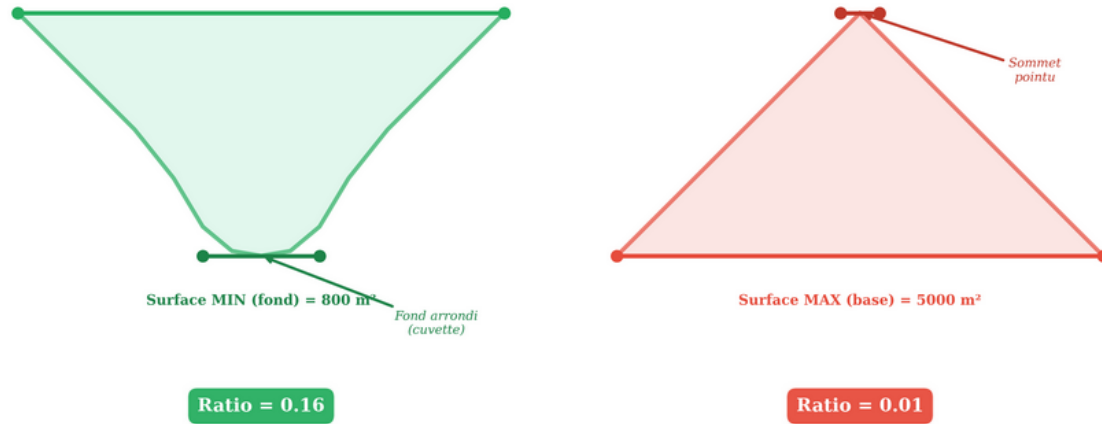


# Le Workflow : Phase 2 -Tests de discrimination dépressions/buttes

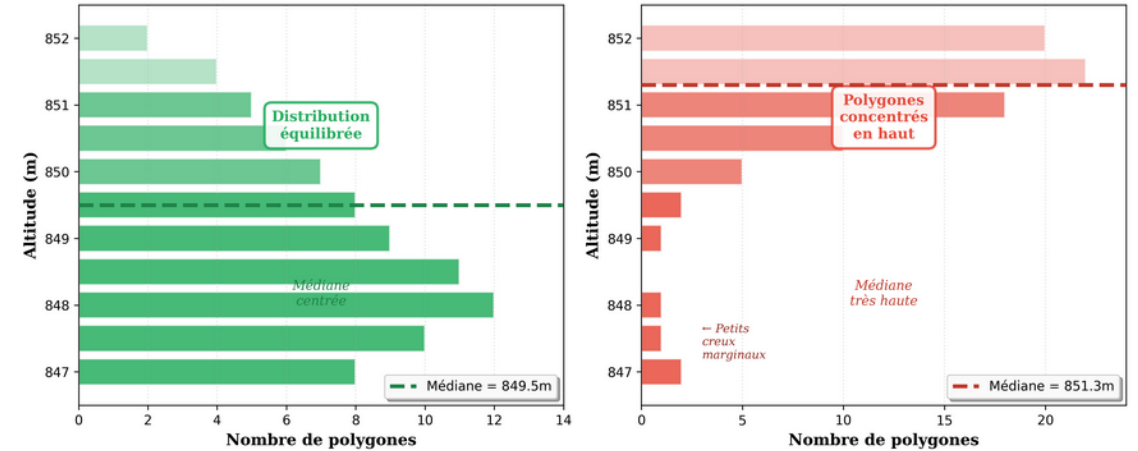
Phase 2 : TESTS DISCRIMINATION

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

Test 4 : ratio sommet/base



Test 5 : microreliefs



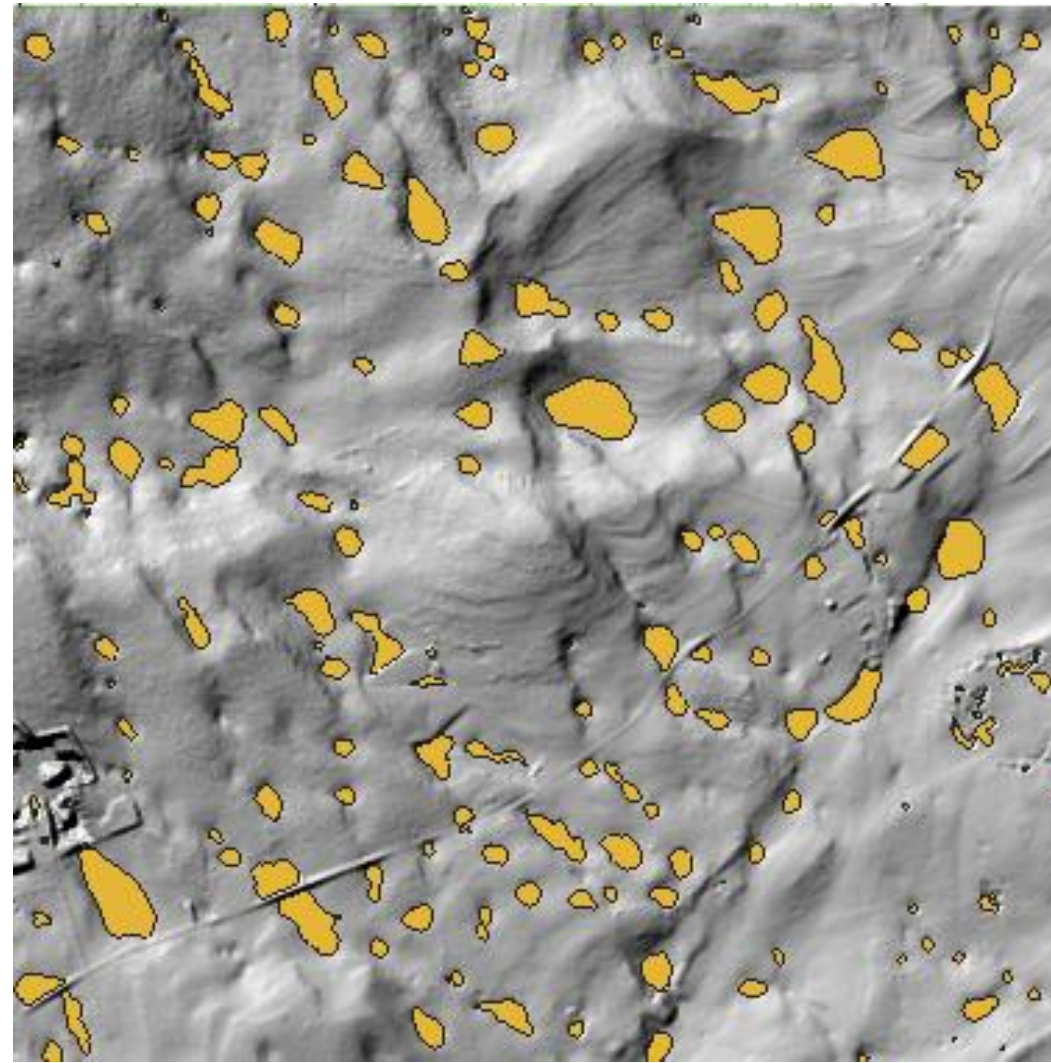
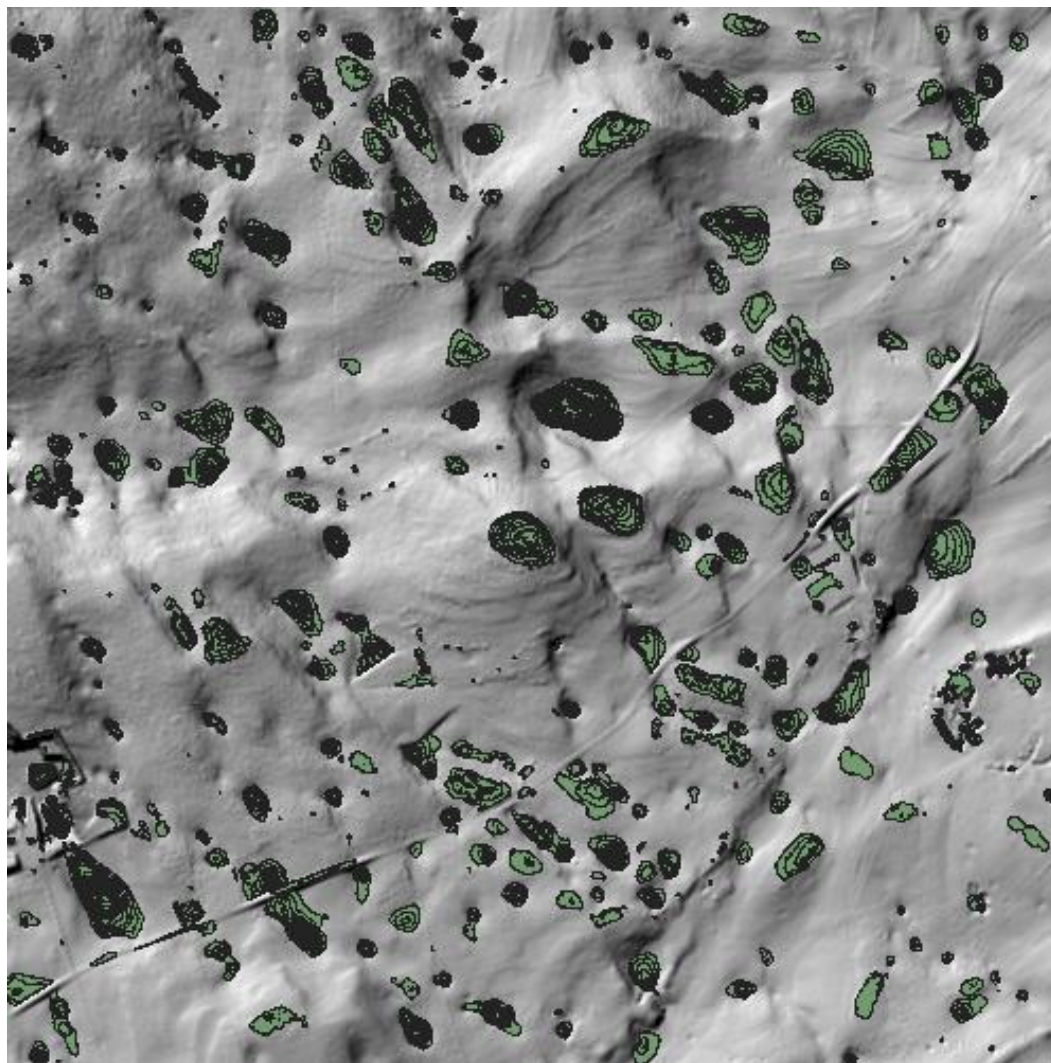
Logique stricte de filtrage

- 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

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

Phase 2 : TESTS DISCRIMINATION

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



# 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 1

## Étiquetage cartographique des dépressions

Interface non-modale : vous pouvez utiliser toutes les fonctionnalités QGIS !  
Naviguez entre les couches, changez la symbologie, 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

Revenir sur cette dépression

**Navigation**

← Précédent Aller à : 2 Suivant → Zoom auto

**Transparence de la couche**

Opaque 100%

**Classification**

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

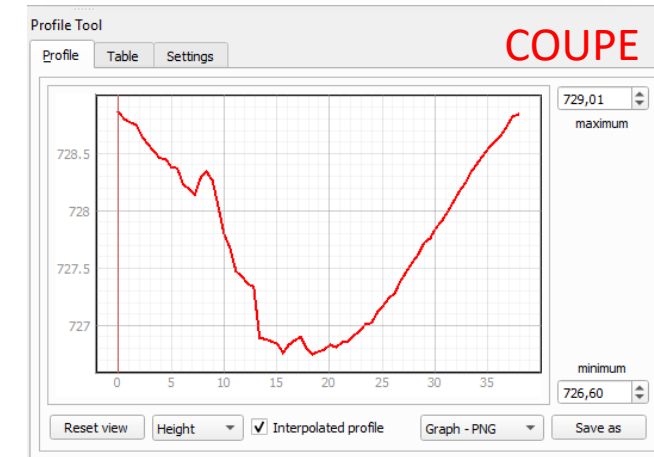
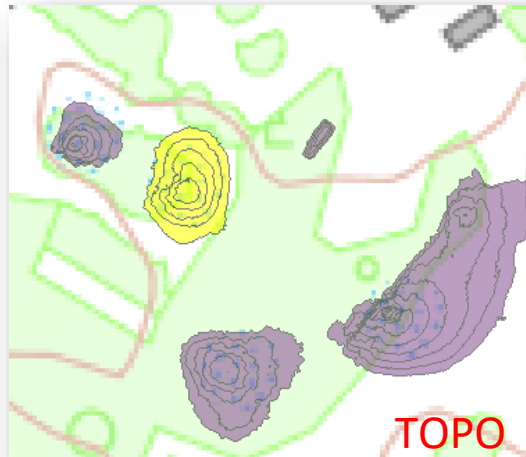
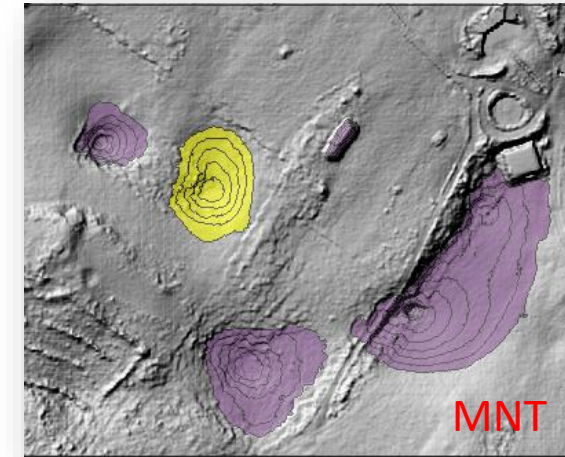
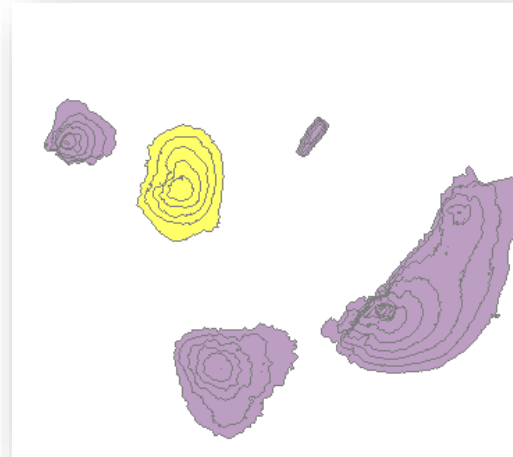
← Précédent VALIDER → PASSER

**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 (entrainement)

## 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 symbologie, utilisez les outils...

**Progression**

1%

Dépression 2/194 | Étiquetées : 1/194

**Dépression actuelle**

● Dépression Envelop100

Polygones : 5 | Surface : 2611.0 m<sup>2</sup> | 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  Transparent 100%

**Classification**

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

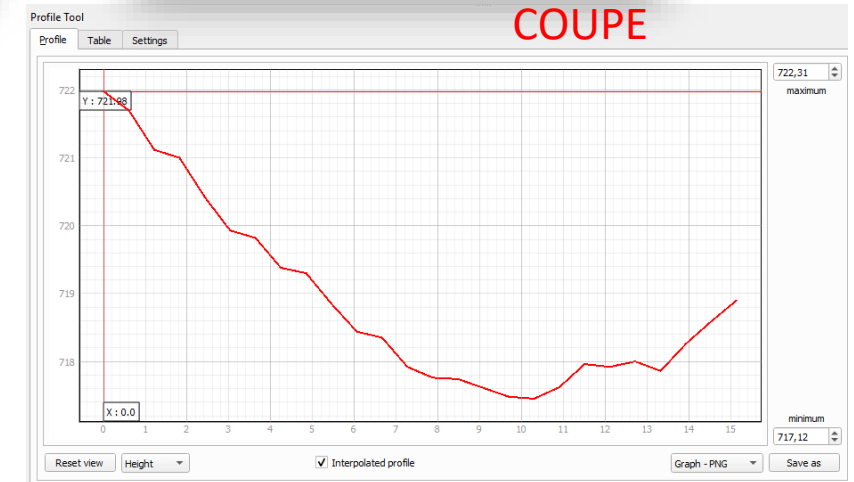
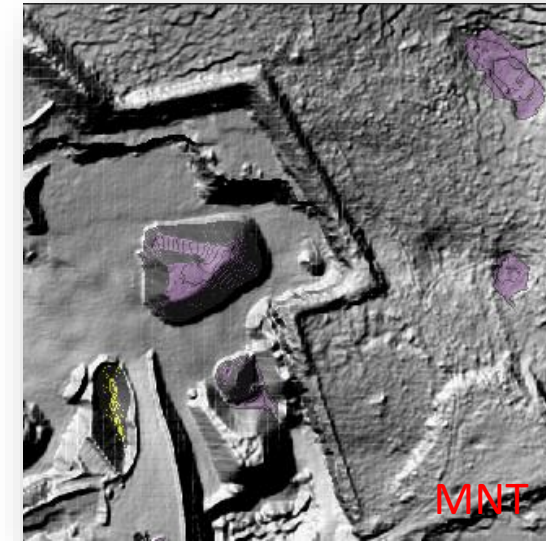
← Précédent VALIDER → PASSER

**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 symbologie, utilisez les outils...

**Progression**

1%

Dépression 2/194 | Étiquetées : 1/194

**Dépression actuelle**

• Dépression Envelop100

Polygones : 5 | Surface : 2611.0 m<sup>2</sup> | 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 100%

**Classification**

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

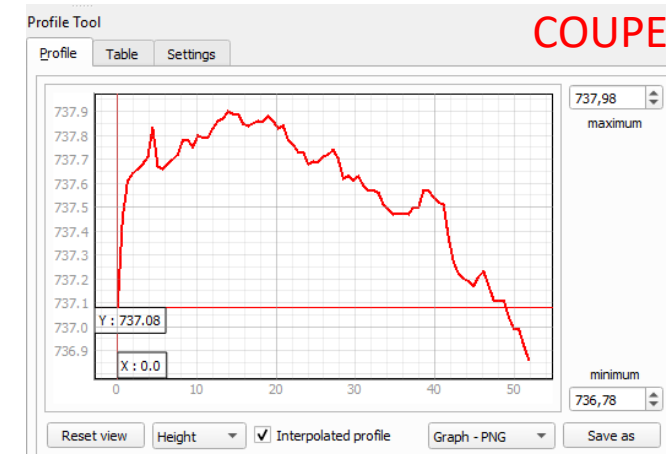
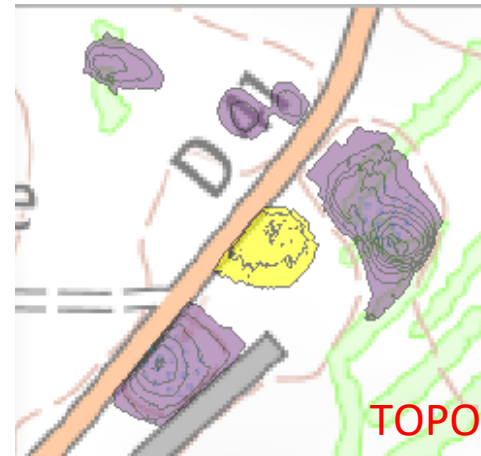
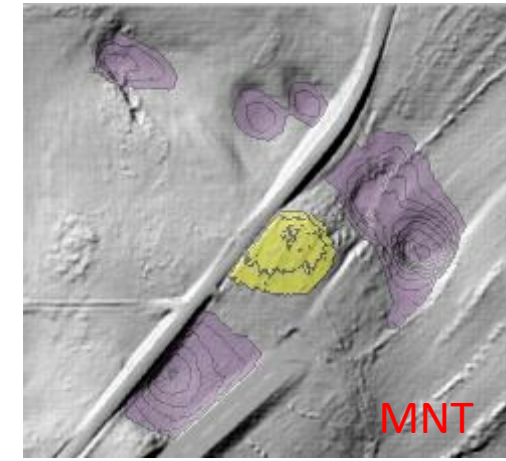
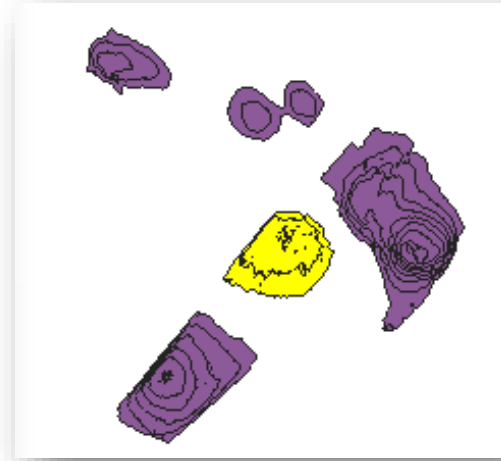
← Précédent VALIDER → PASSER

**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



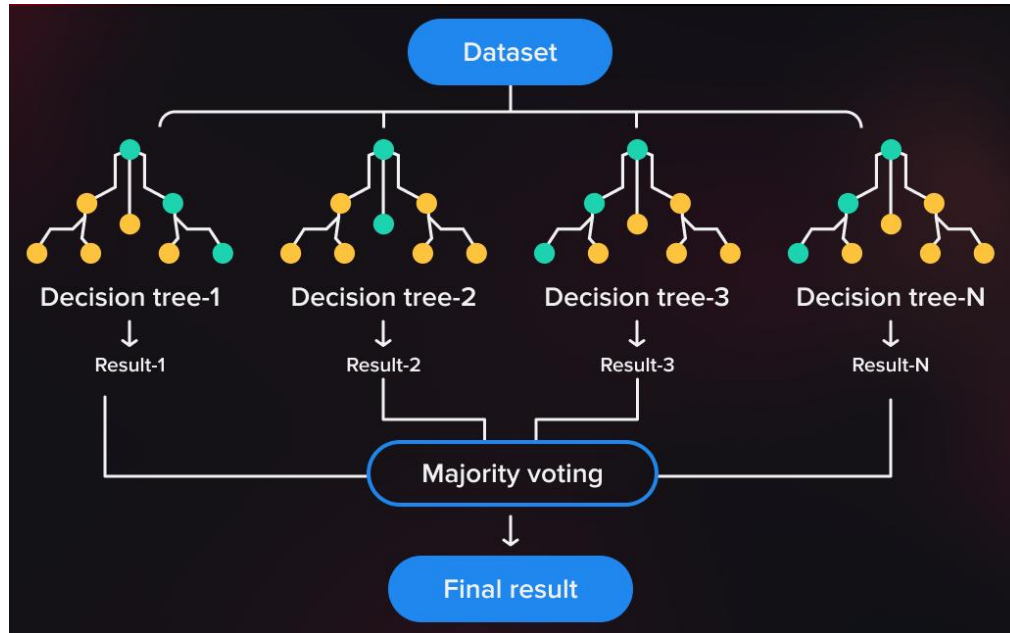
# Le Workflow : Phase 3 – Machine Learning (création et application modèle)

Phase 3 : MACHINE LEARNING

↓ Étiquetage 3 classes + ML  
↓ Output : dépressions classifiées

## 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 <sup>2</sup>	250m	NATURELLE
D2	0.8m	800m <sup>2</sup>	95m	FAUX POSITIF
D3	1.5m	5000m <sup>2</sup>	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 = 3200m<sup>2</sup>, 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

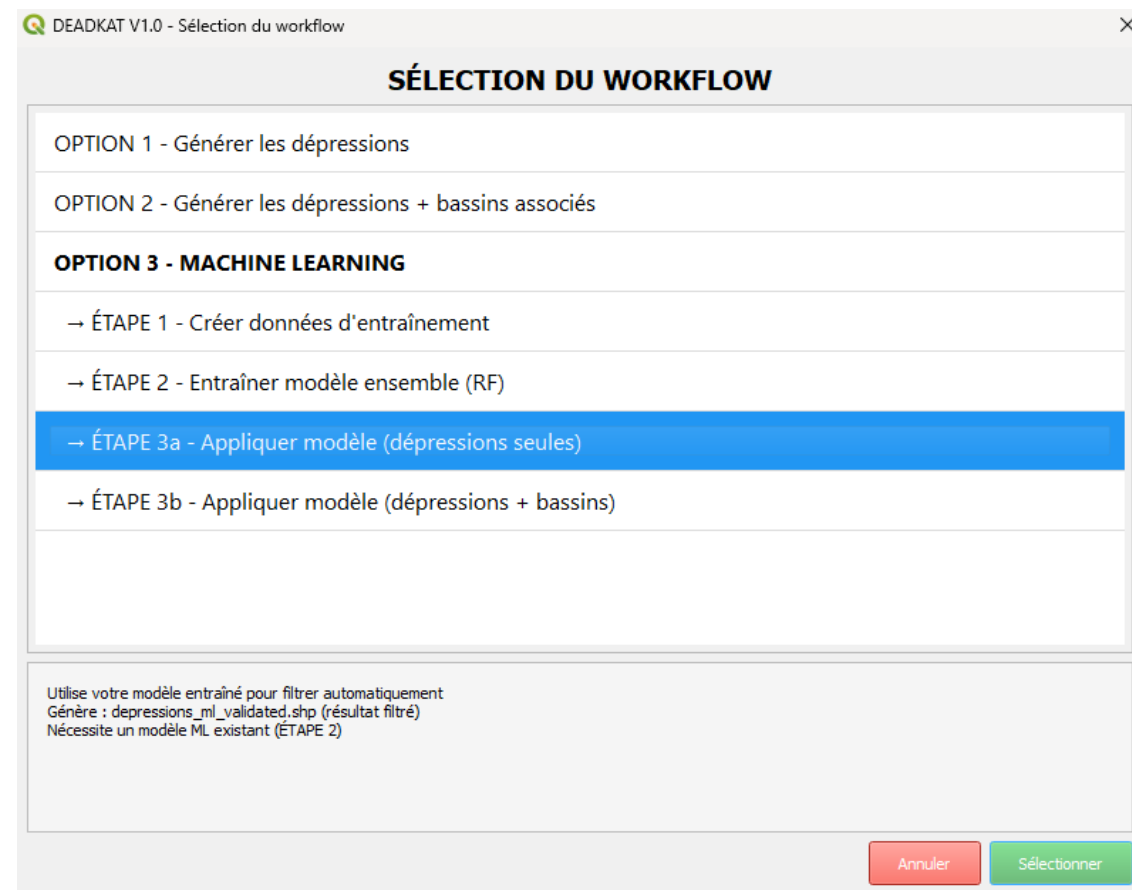
- Précision globale : 90-95%
- Importance features : Alt\_range, Area\_max, Alt\_std typiquement top 3

### 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



## Le Workflow : Phase 4 – Hydrologie

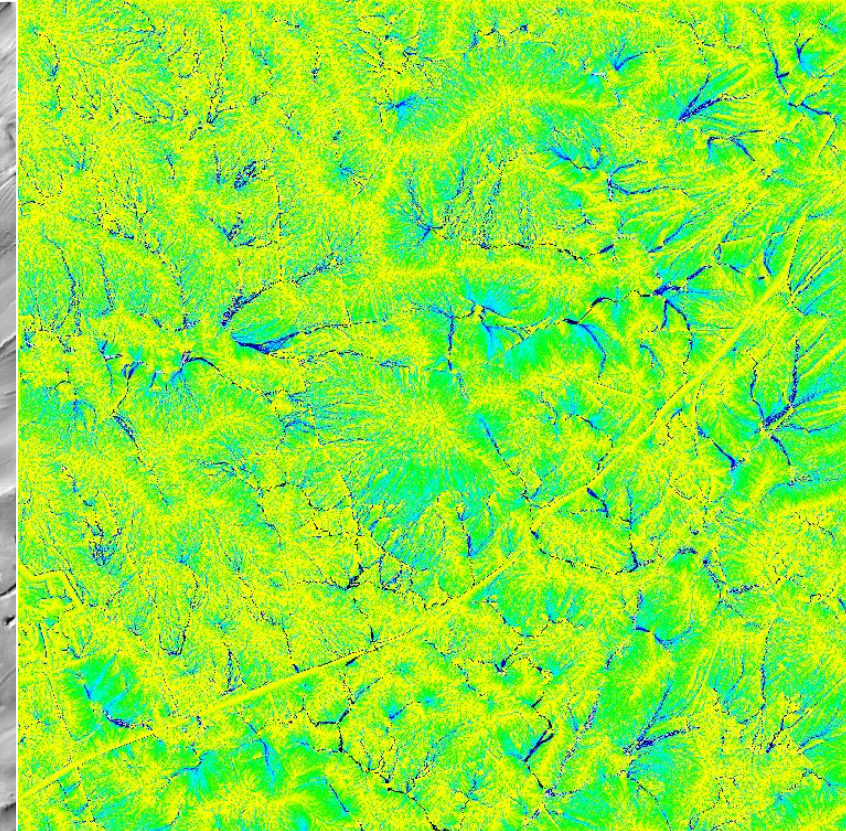
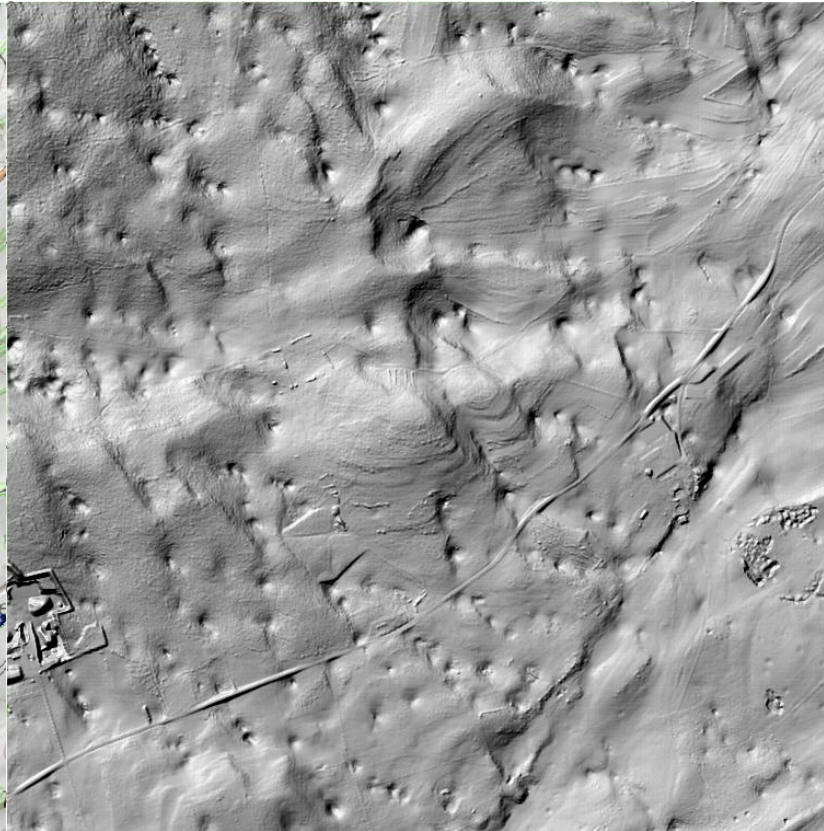
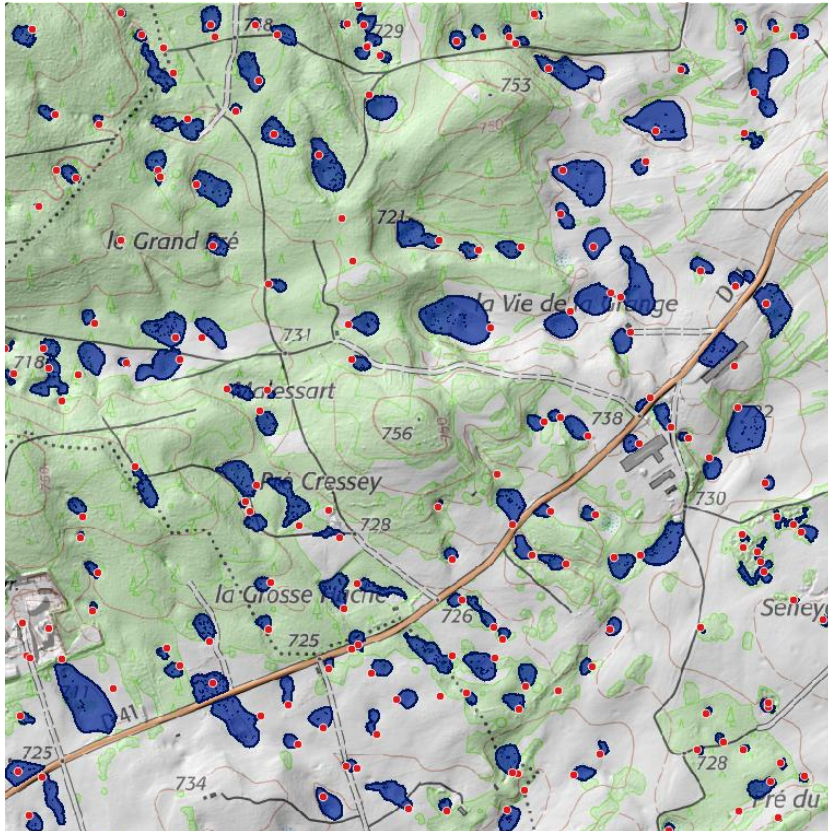
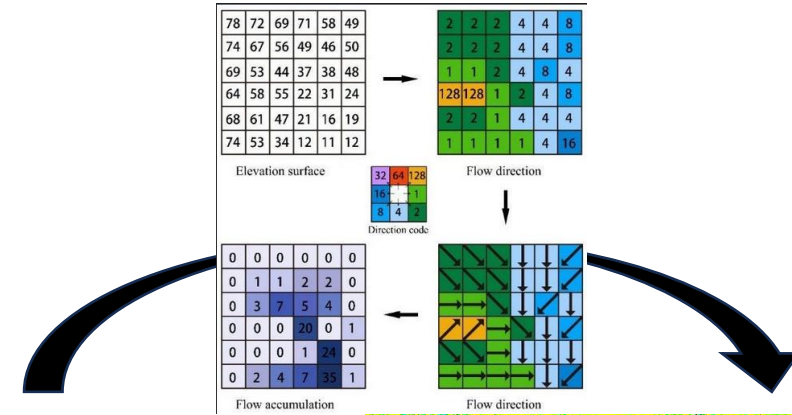
Objectif : caractériser rôle hydrologique de chaque dépression

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

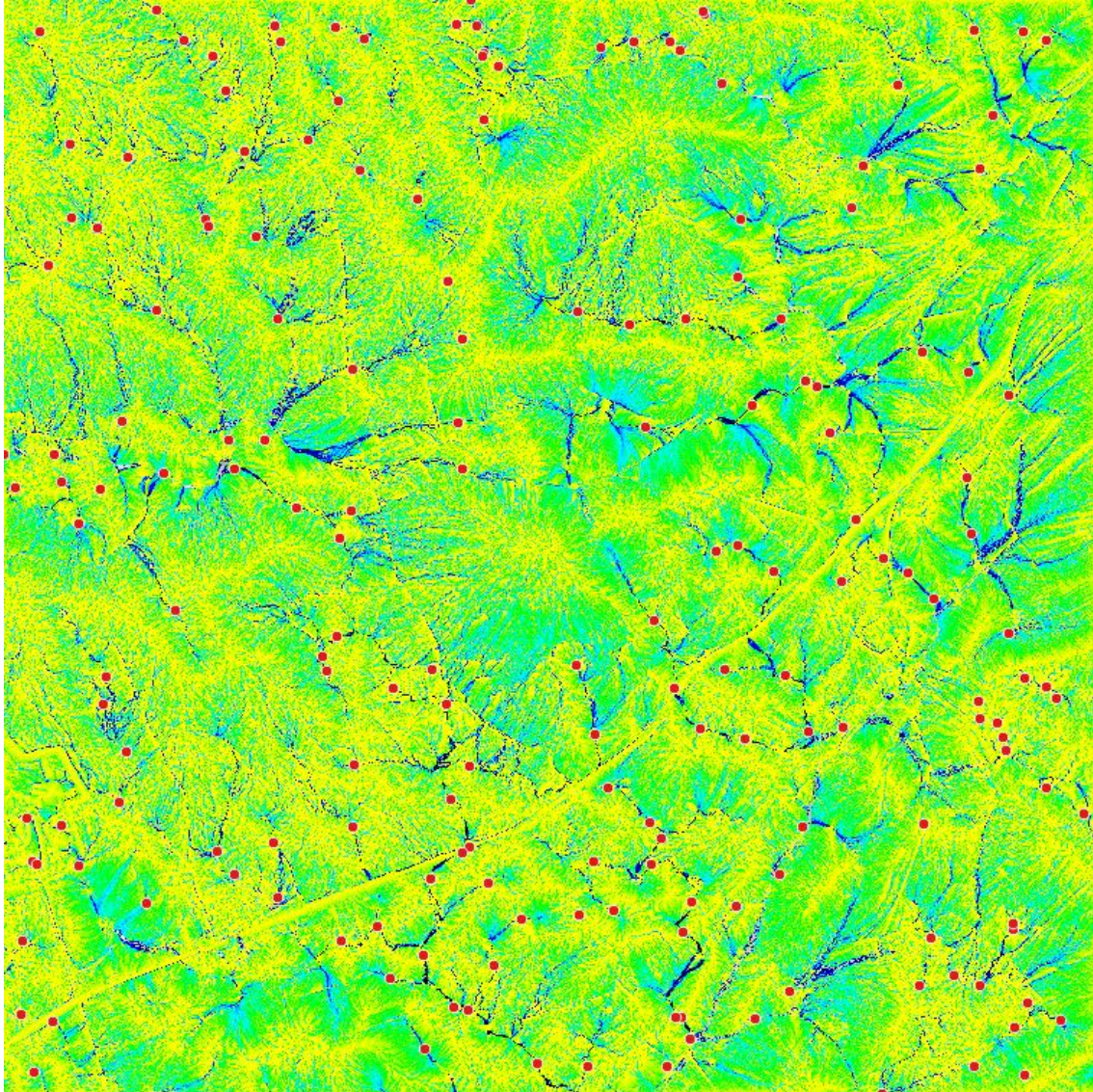
### Étape 11 : Détection exutoires

Phase 4 : HYDROLOGIE

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



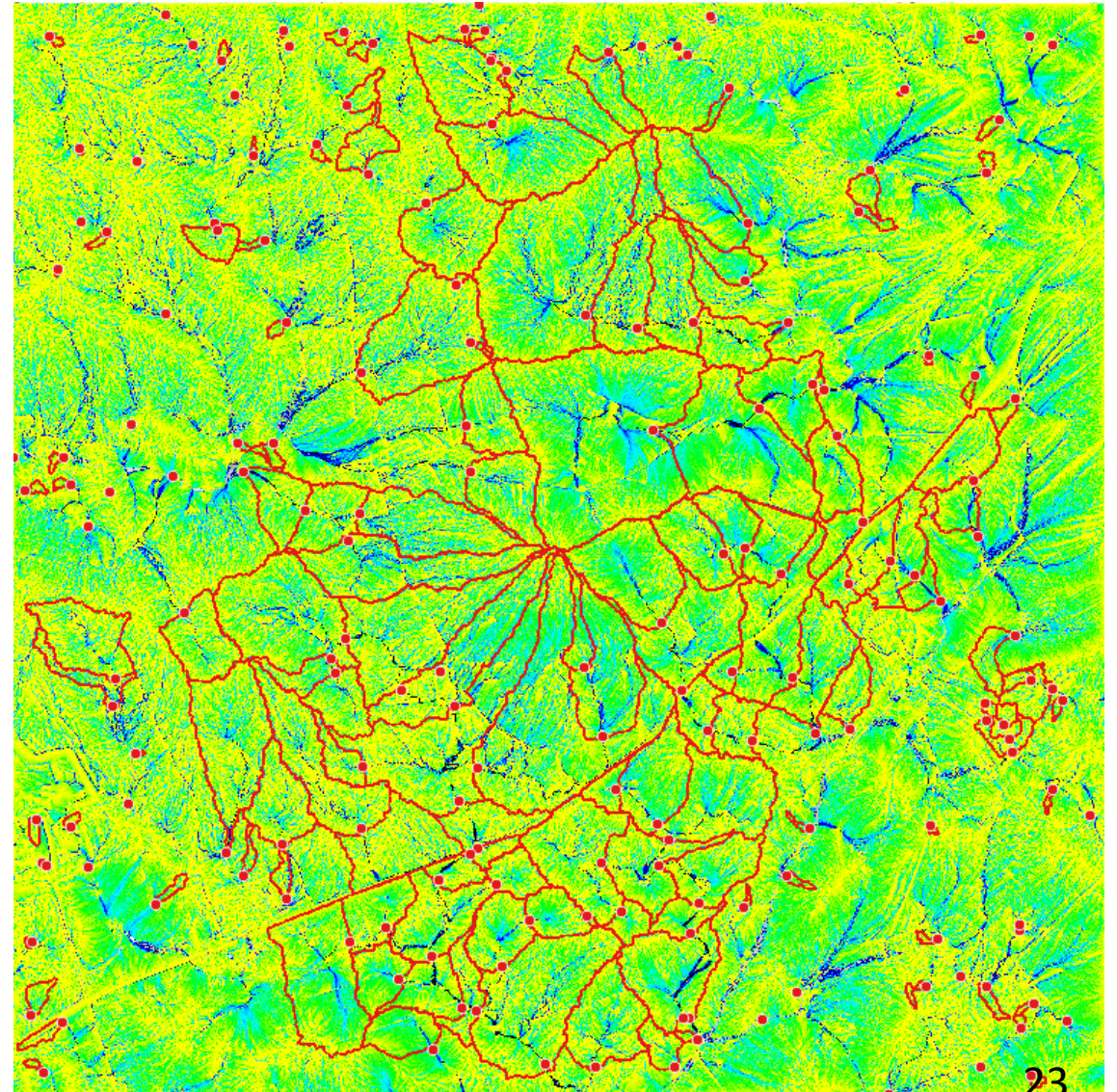
## Le Workflow : Phase 4 – Hydrologie



Phase 4 : HYDROLOGIE

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











### Étape 12 : Détection des BV des dépressions



## Le Workflow : Phase 5 – Exports

Phase 5 : EXPORTS &amp; 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

```

16:41:29 - [INFO] - Logging configuré - Fichier: D:/EPTB_SD/02_OUTILS/15_QGIS/DEPRESSION/CARTO/SITE/TOUS_SITES/SEPTFONTAINES/DK_VERSION1_2025/DEPRESSIONS\journal.log
16:41:29 - [INFO] - Mode sélectionné: Dépressions seules
16:41:29 - [INFO] - HC Mode: disabled
16:41:29 - [INFO] - Mode : Dépressions seules
16:41:29 - [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.
16:41:36 - [INFO] - Etape 3 : Ajout des champs et calcul des attributs
16:41:40 - [WARNING] - Aucune altitude pour feature 19789
16:41:45 - [INFO] - Attributs calculés pour couche polygones_0.5m (38967 entités)
16:41:46 - [INFO] - Couche enregistrée : D:/EPTB_SD/02_OUTILS/15_QGIS/DEPRESSION/CARTO/SITE/TOUS_SITES/SEPTFONTAINES/DK_VERSION1_2025/DEPRESSIONS\polygones_attributs_0_5m.shp
16:41:46 - [INFO] - Etape 3 validée.
16:41:46 - [INFO] - Etape 4 : Filtrage des polygones par périmètre
16:41:46 - [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-butte organisés
16:41:53 - [INFO] - Paramètres stratégie anti-buttes :
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 ETAPE 6 - TESTS ANTI-BUTTE
16:41:53 - [INFO] -
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 (43.04%)
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 (butte 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: 245
16:41:53 - [INFO] - Efficacité filtrage: 57.04%
16:41:53 - [INFO] - =====
16:41:53 - [INFO] - ETAPE 7 - Vérification finale (fichier de sécurité)
16:41:53 - [INFO] - Couche ajoutée au projet : depressions_verifiees_0_5m.shp
16:41:53 - [INFO] -

```

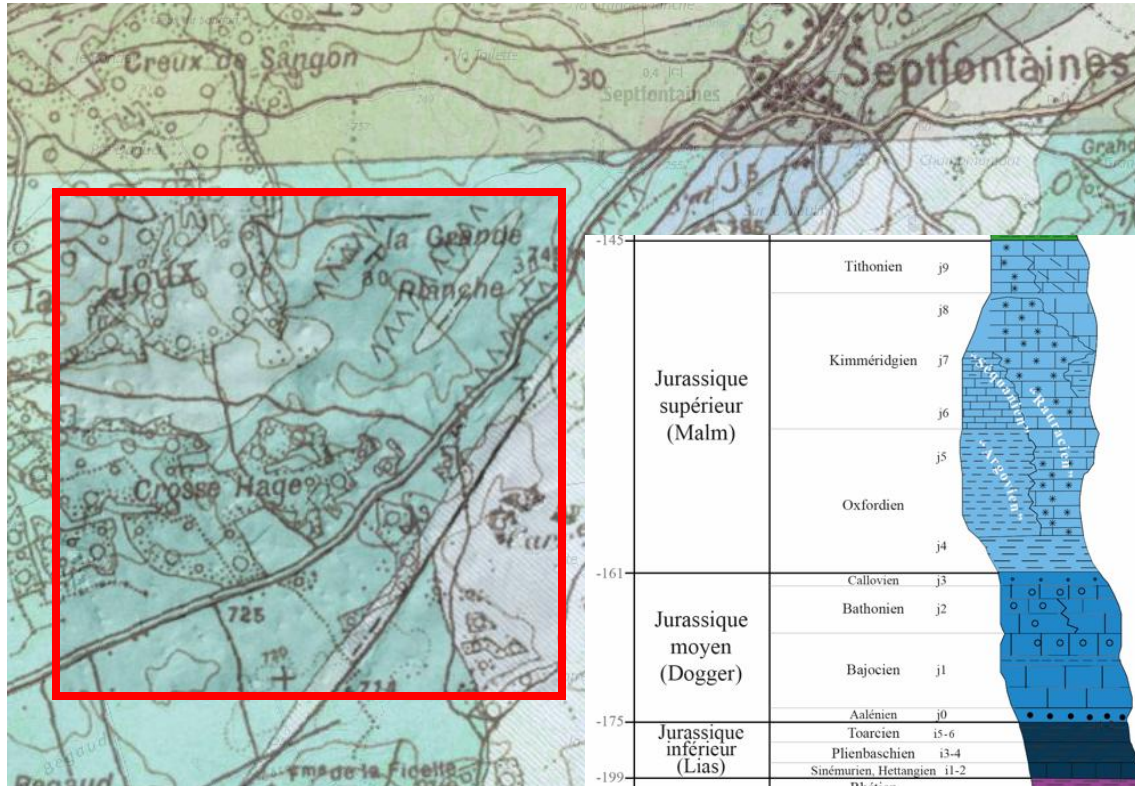
3324420 function calls (3324163 primitive calls) in 22.446 seconds

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 nearestNeighb
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

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	4.613636363636363	0.32971895441237326

## Cas d'étude - Septfontaines



## APPLICATION

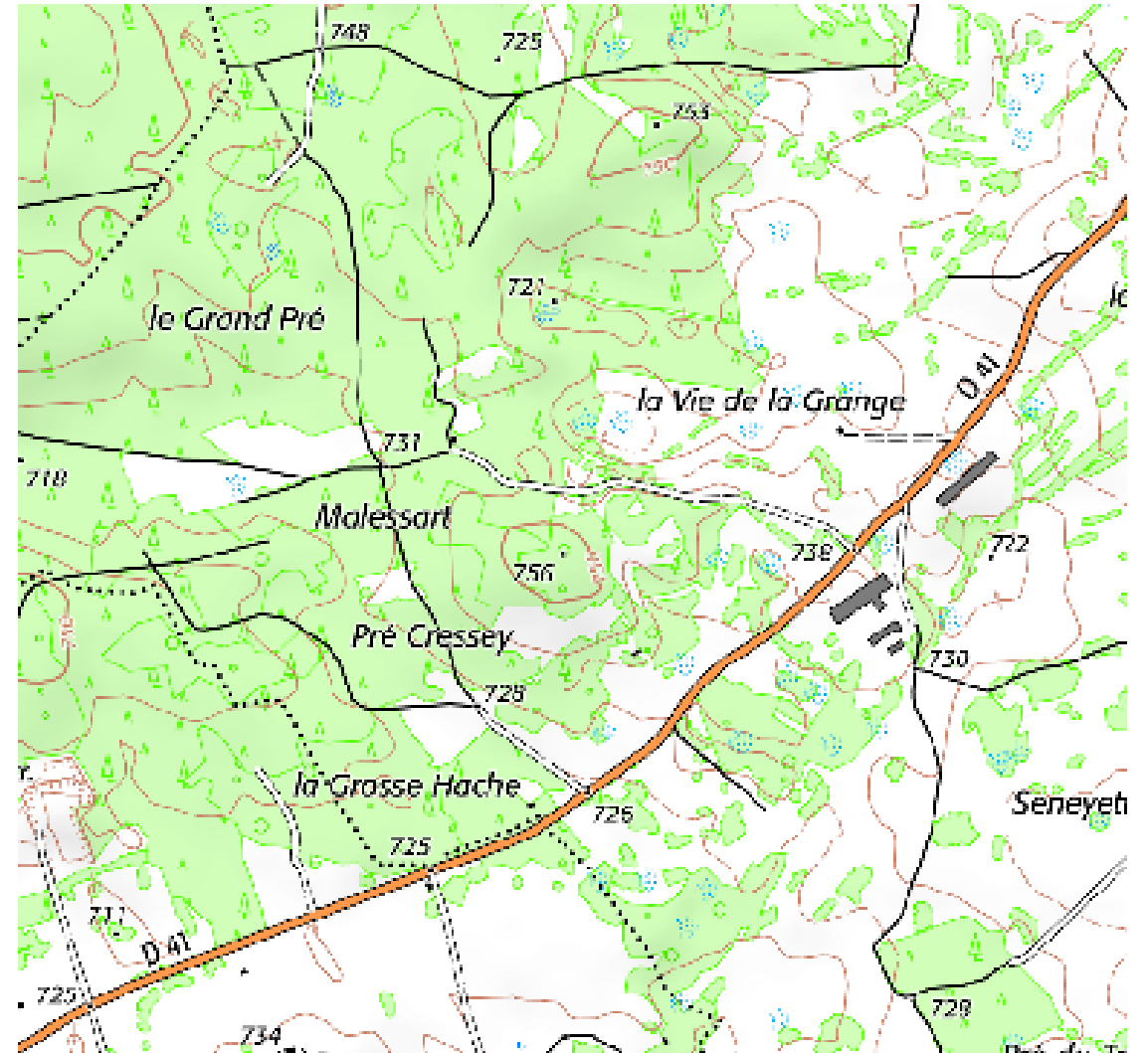
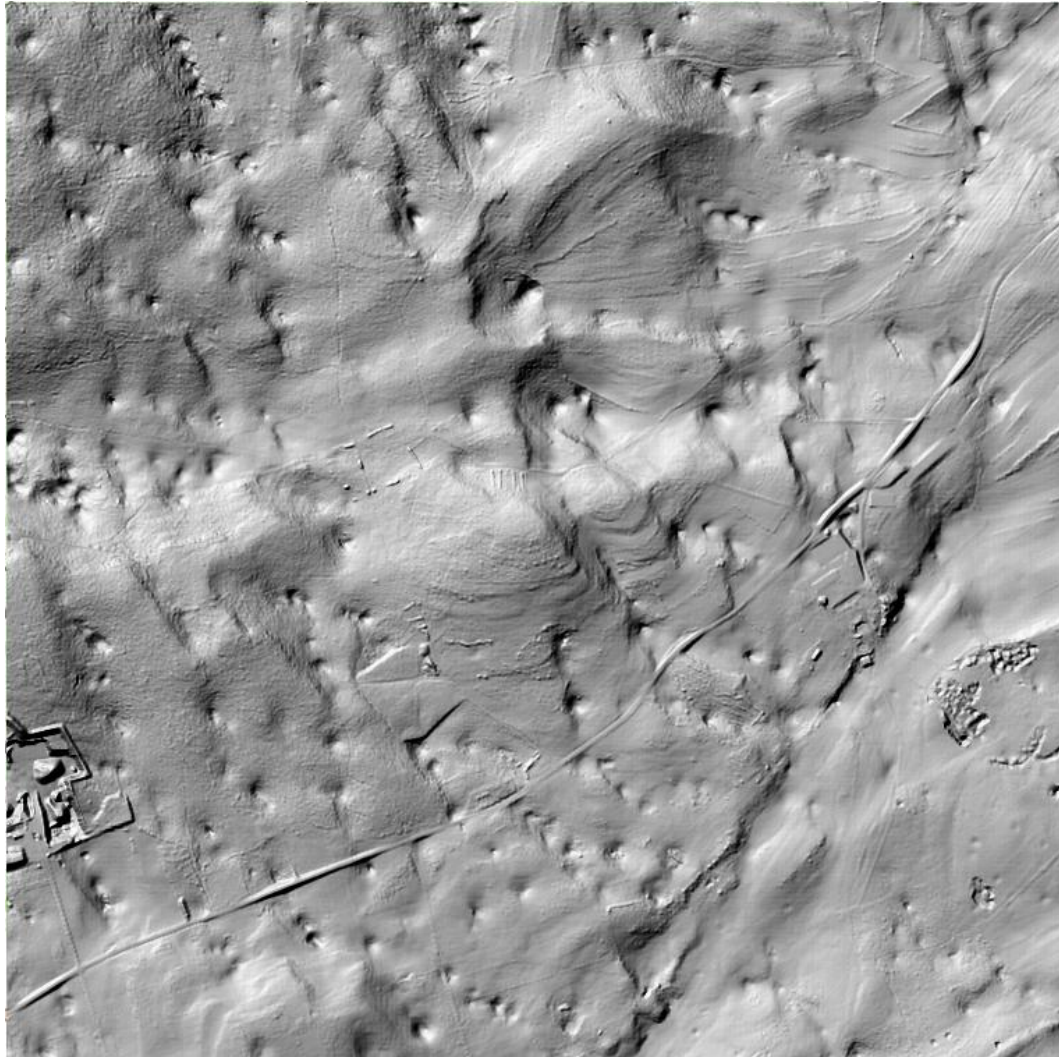
## Contexte&gt;

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

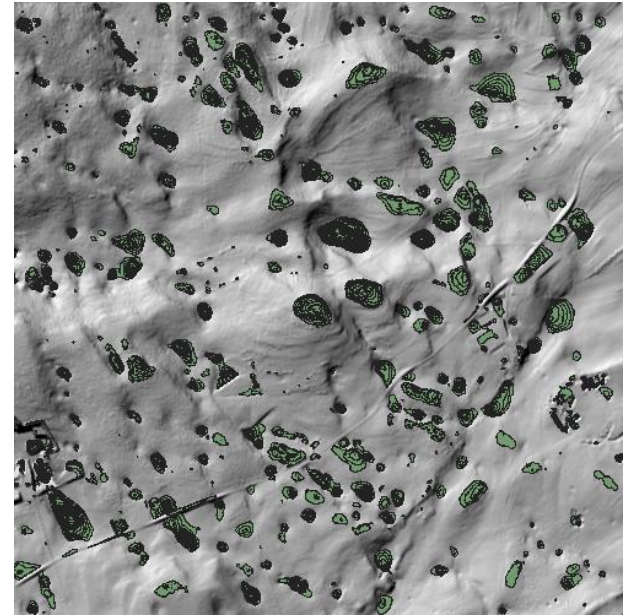
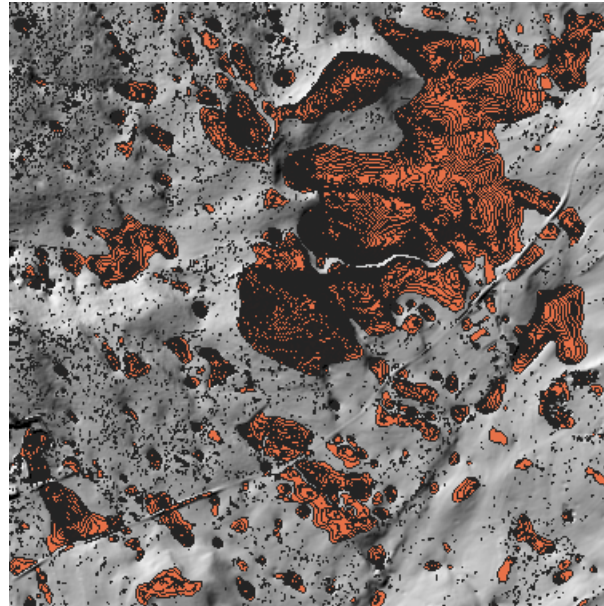
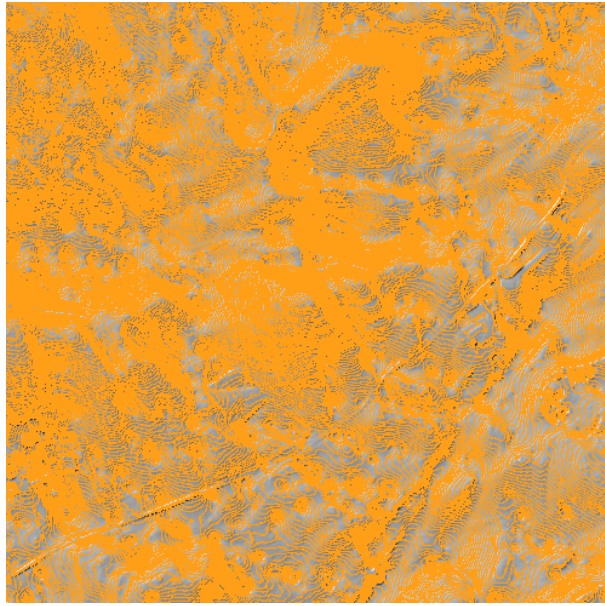
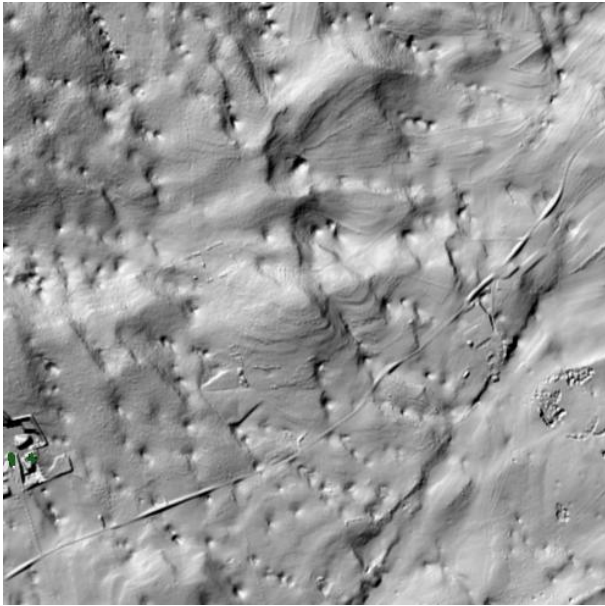
## Données disponibles

- MNT LiDAR IGN RGE : résolution 0.5m
- Acquisition : 2021-2022
- Précision altimétrique : ±15 cm
- Densité nuage points : 8-10 pts/m<sup>2</sup>

## Cas d'étude - Septfontaines



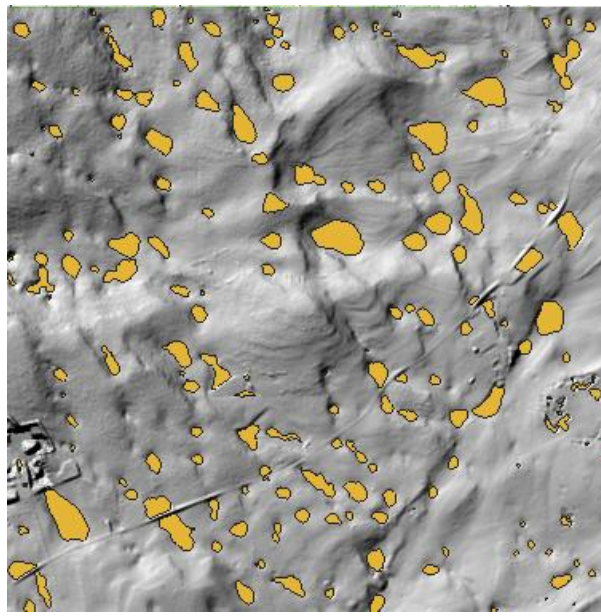
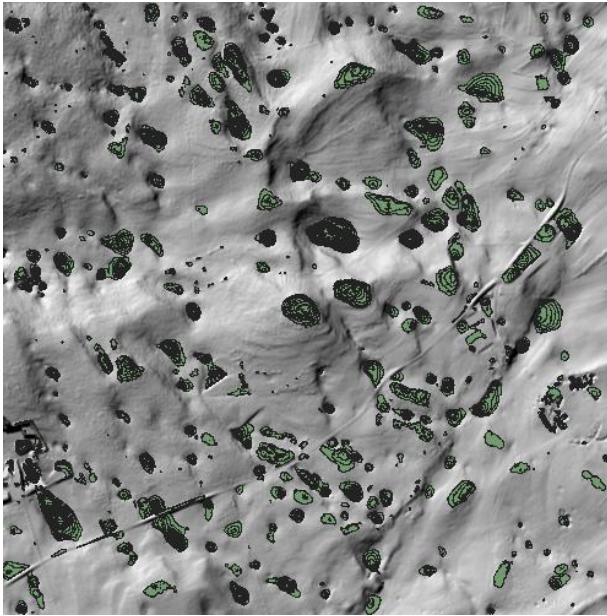
## Cas d'étude - Septfontaines



### Phase 1 : Détection géomorphologique

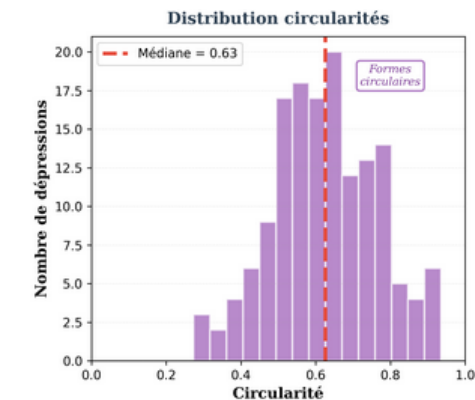
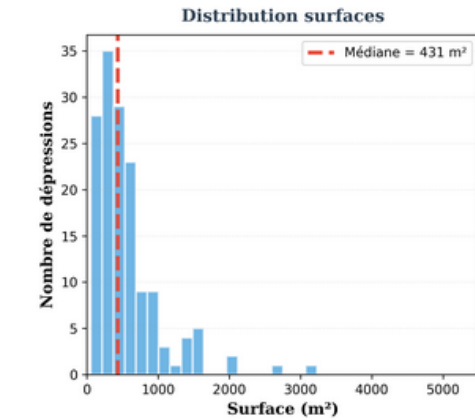
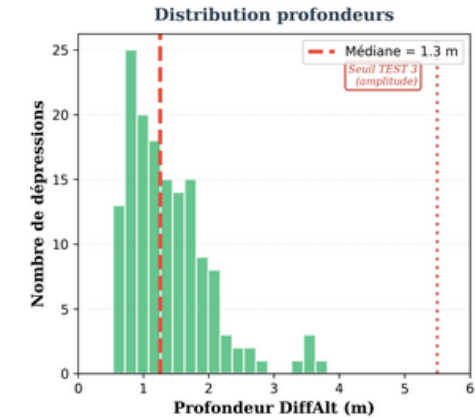
- Étape 1-2 : 38 967 isolignes extraites (équidistance 0.5m)
- Étape 3 : 25 143 polygones après polygonisation (64%)
- Étape 4 : 15 420 polygones après filtrage périmétrique (39% conservation)
- Étape 5-6 : 430 enveloppes candidates identifiées (réduction 97%)

## Cas d'étude - Septfontaines

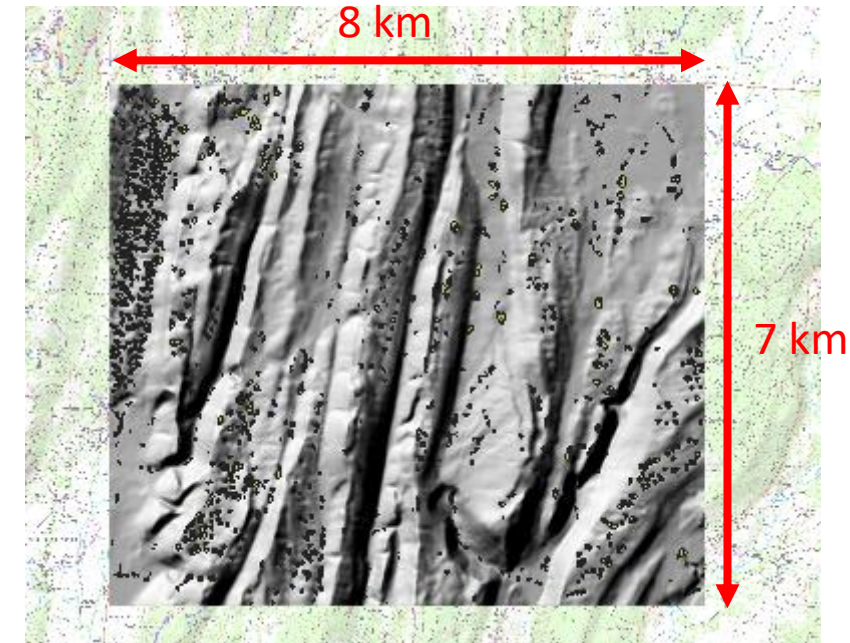
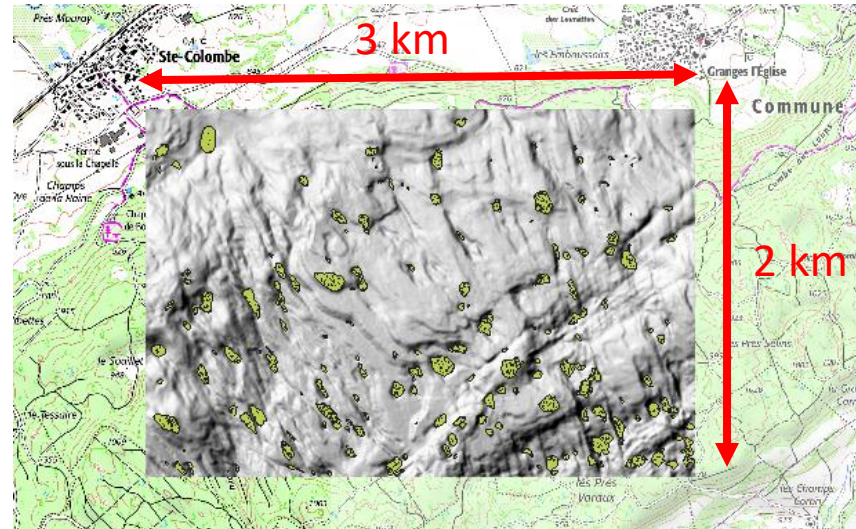
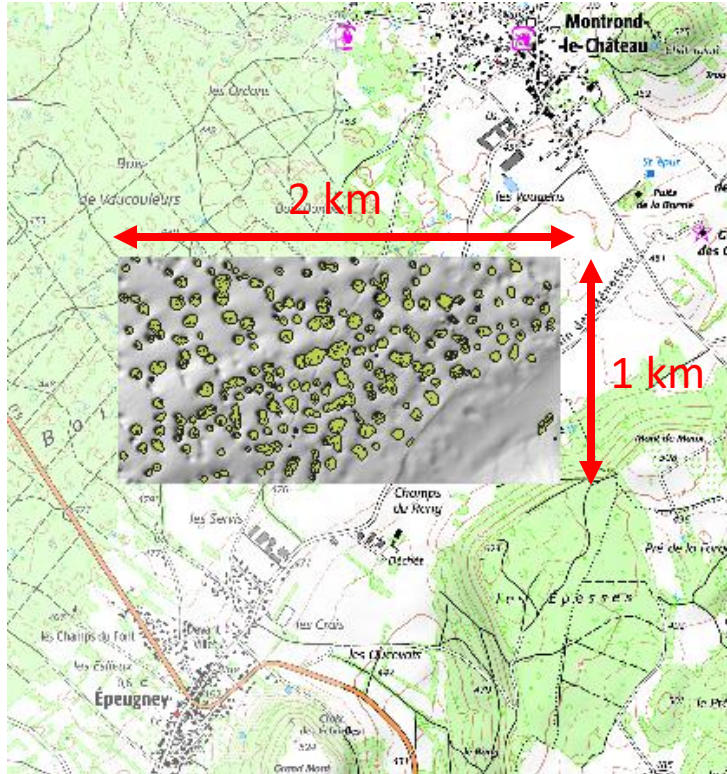


## Phase 2 : Tests discrimination

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



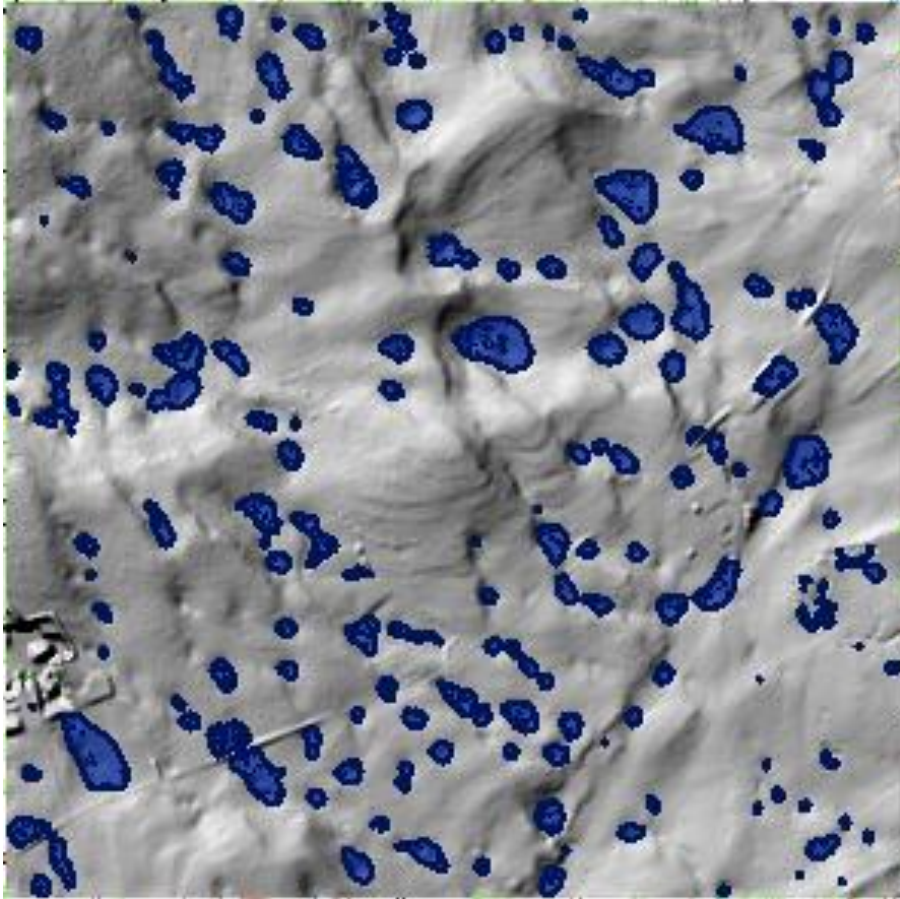
## Cas d'étude – Septfontaines (avec ML)



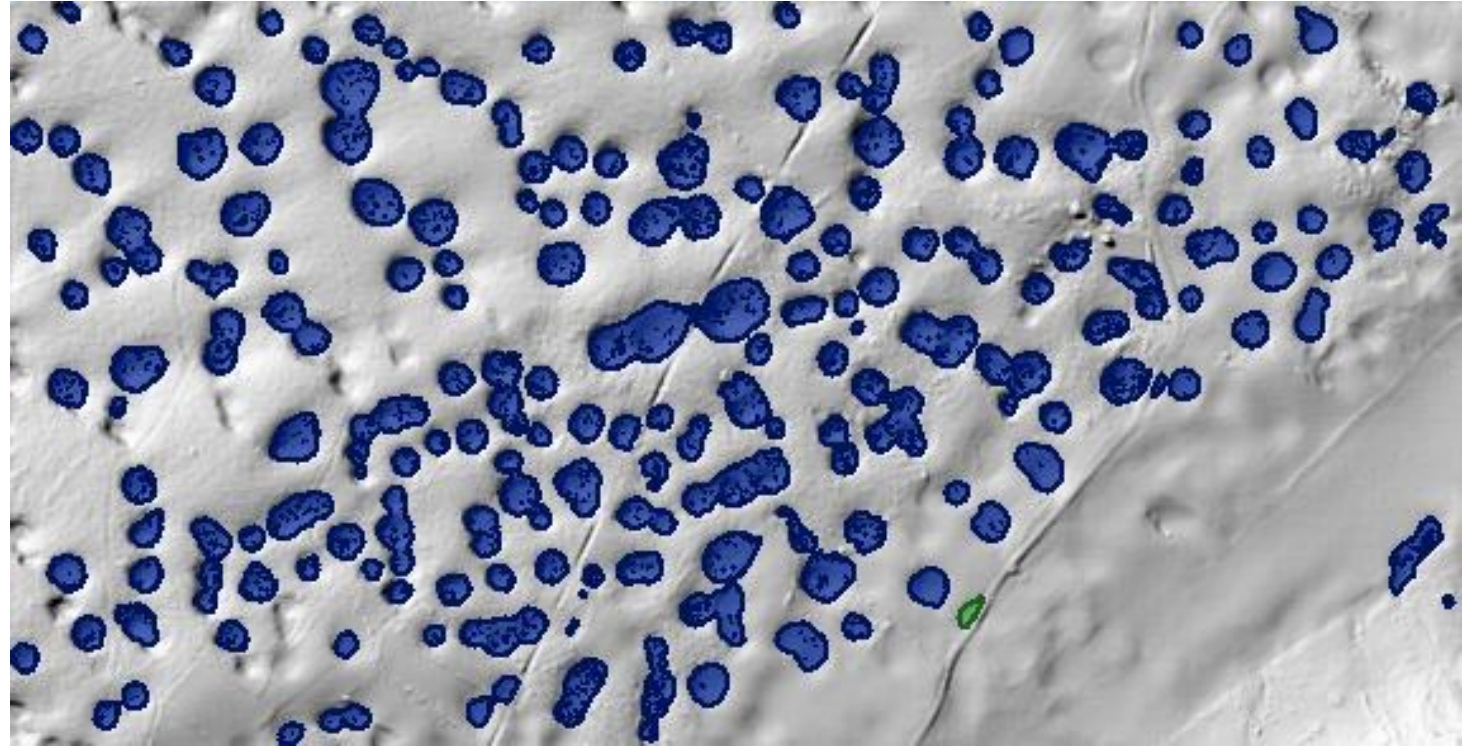
## Entrainement du modèle

- 4 sites >  $\approx 70 \text{ km}^2$
- contrastes géographique (1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> plateau + Haute Chaine + Petite Montagne > Jura tabulaire + plissé externe et interne)
- $\approx 1650$  formes pour entrainement 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 entraîné
- 175 dépressions naturelles
  - 1 dépressions anthropiques



- Résultat avec modèle entraîné
- 176 dépressions naturelles
  - 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 ?)

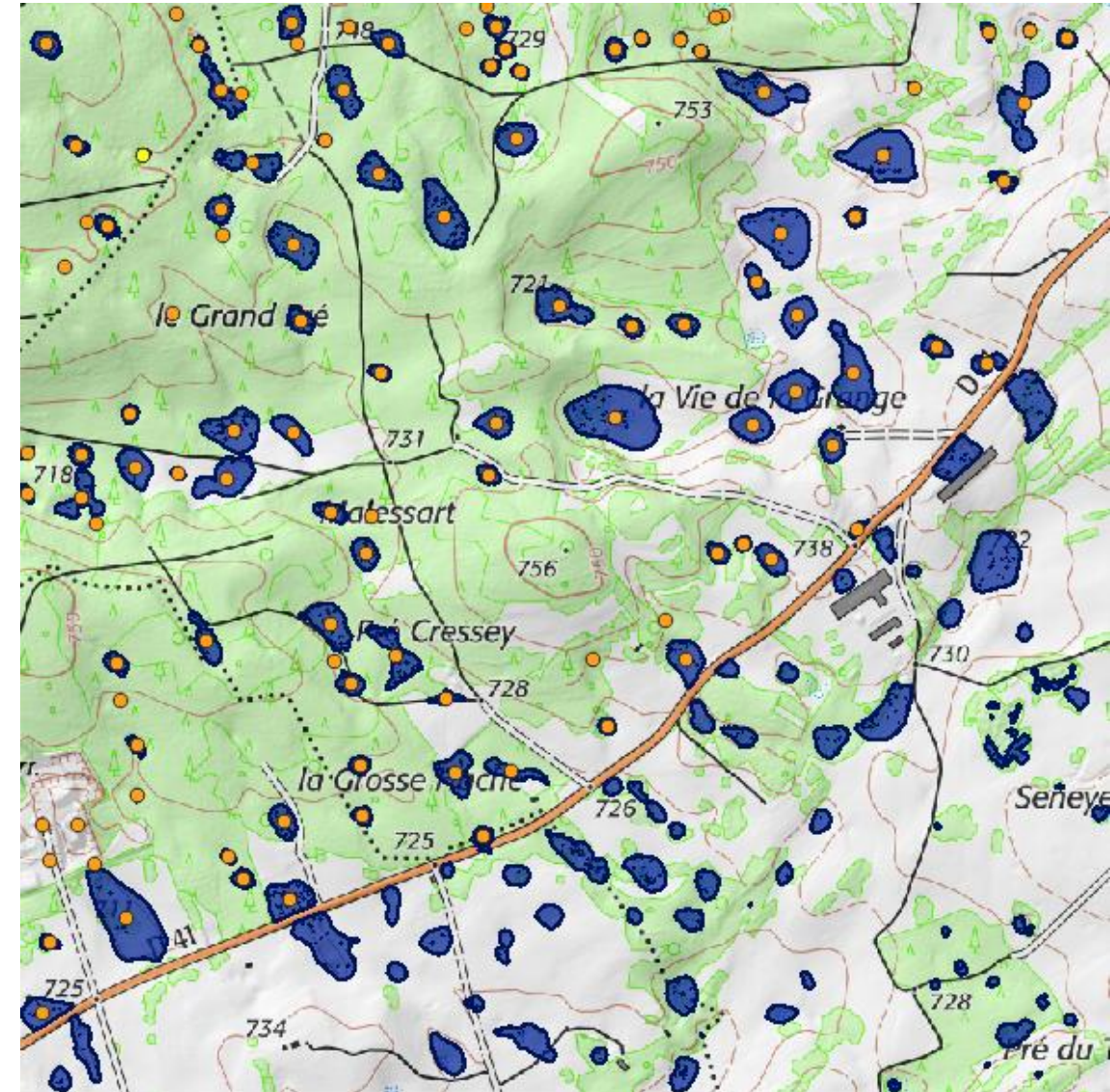
### Protocole Jeu 1

- DEADKAT détecte 110 dépressions
- Opérateur terrain avec carte/GPS  $\pm 10\text{m}$  se rend sur chaque centroïde
- Rayon recherche :  $\sim 10\text{m}$  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)

-  Détectées + GPS OK : 49 (72.1%) → DEADKAT détecte ET point dans buffer 10m
-  Détectées + 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



	Gen. 1 (2005-2015) Détection brute	Gen. 2-3 (2015-2025) Géomorpho + ML	DEADKAT (Gen. 2-3) Proposé	Gen. 4 (2020-2025) Deep Learning
Précision faux positifs				
Rappel détection				
Accessibilité technique				
Coût logiciels				
Temps traitement				
Complétude fonctionnelle				
Transférabilité géographique				
Expertise requis				
	Bon / Performant	Moyen / Acceptable		Faible / Limitant

## 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'efficacité 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 spéléogénèse : 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.