



## Chalain (39, FR)

# Carte Karst 1/50'000

## Note technique

25.01.2022

Auteur: Arnauld Malard

Distribution : Claire Renaud (CD39), Thierry Marguet (Agence de l'Eau RMC), Vincent Fister (EPTB Pôle Karst)

### 1. *Introduction*

Le Conseil Départemental du Jura (CD39) et le Pôle Karst mènent des études sur l'hydrogéologie du lac de Chalain et les sources karstiques du Moulin et de Fontenu (aspects quantité et qualité). Ces études sont suivies par l'Agence de l'Eau RMC car les ressources en eau souterraine de cette région sont classées comme ressources stratégiques pour l'alimentation en eau (eau potable, eau agricole, etc.) sous le code RMK37<sup>1</sup>.

Dans cette démarche, le CD39 (en collaboration avec le Pôle Karst et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, antenne de Besançon) ont mandaté l'ISSKA<sup>2</sup> pour réaliser une **carte du karst** sur l'emprise de la zone d'étude avec pour objectif d'apporter des informations significatives sur les conditions d'infiltrabilité des formations géologiques à l'affleurement et sous couverture. En effet, la carte du karst renseigne sur les propriétés d'infiltration karstique en **surface**, c.à.d. pour les formations rocheuses à l'affleurement (karstiques et non karstiques), les formations rocheuses sous couverture (sols + formations quaternaires de recouvrement), les principaux cours d'eau (temporaires/permanents) et les plans d'eau à l'échelle 1/50'000.

La carte indique aussi :

- Les zones de bassins endoréiques (à infiltration totale)
- Les zones non-karstiques alimentant les aquifères karstiques en aval (zones allogéniques)

---

<sup>1</sup> Ressource karstique majeure pour l'alimentation en eau potable (AEP), N°37 : sources de Fontenu et du Moulin (Jura)

<sup>2</sup> Une réunion entre le CD39 (Claire Renaud), le Pôle Karst (Vincent Fister), l'Agence de l'Eau RMC (Thierry Marguet) et l'ISSKA (Arnauld Malard) s'est tenue le 30/04/2021 afin de cerner les implications et les plus-values de l'élaboration de la carte du karst sur le secteur d'étude.

- Les zones non infiltrantes en raison de la présence de la nappe à proximité du sol (zone d'artésianisme ou de sub-artésianisme)

La carte du karst s'adresse aux gestionnaires des environnements karstiques (eau de surface, aménagements, agriculture, etc.). Elle un outil de décision aux autorités locales pour la planification des usages en milieu karstique. Les applications sont multiples :

- Evaluation de projets d'aménagements en milieux karstiques ;
- Protection des eaux souterraines ;
- Aide à la décision pour la réglementation des usages : épandage, construction, infiltration des eaux claires et des eaux usées, gestion forestière, etc.
- Pré-évaluation de la nature des dangers naturels en régions karstiques (crue, effondrement, etc.) ;
- Evaluation des sites ou morphologies nécessitant protection (patrimoine, ressources en eaux).

Sur le site de Chalain, cette approche s'intègre dans une démarche globale de préservation de la ressource en eau.

La méthodologie d'établissement de la carte du karst a été développée pour la Suisse. Elle requiert quelques adaptations dans le processus de réalisation en raison des différences dans les jeux de données entre la Suisse et la France (échelle des jeux de données, contenu, etc.). Les cartes résultantes doivent assurer :

- La cohérence avec les informations officielles nationales et/ou régionales (géologie, hydrologie, occupation des sols, etc.)
- La reproductibilité de l'approche sur d'autres secteurs afin de comparer les résultats.
- La possibilité d'élaboration des cartes par les agents hydrogéologues, géologues ou chargés de mission en environnement qui possèdent des compétences SIG.

Dans ce cadre, l'ISSKA rédige en parallèle un rapport technique orientée utilisateur pour permettre l'utilisation et la reproduction de la méthode adaptée de cartographie à d'autres cas sur le territoire français (cf. rapport ISSKA [2021]).

Les sections suivantes présentent les modalités d'application de la carte du karst sur la zone du lac de Chalain et les principaux résultats.

Les résultats de la carte du Karst sont comparés aux résultats d'application de la méthode RISK pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines (AE RMC [2013]) et à la carte IDPR 1/50'000.

Les résultats de la carte des épaisseurs des sols et formations de couverture sont comparés avec les sondages pédologiques réalisés par la chambre d'agriculture du Jura dans les parcelles agricoles.

## **2. Site d'application**

Le secteur d'application couvre le lac de Chalain (39) et les bassins d'alimentation supposés des principales sources qui alimentent le lac (sources karstiques du Moulin et de Fontenu). La Figure 1 donne l'extension du secteur.

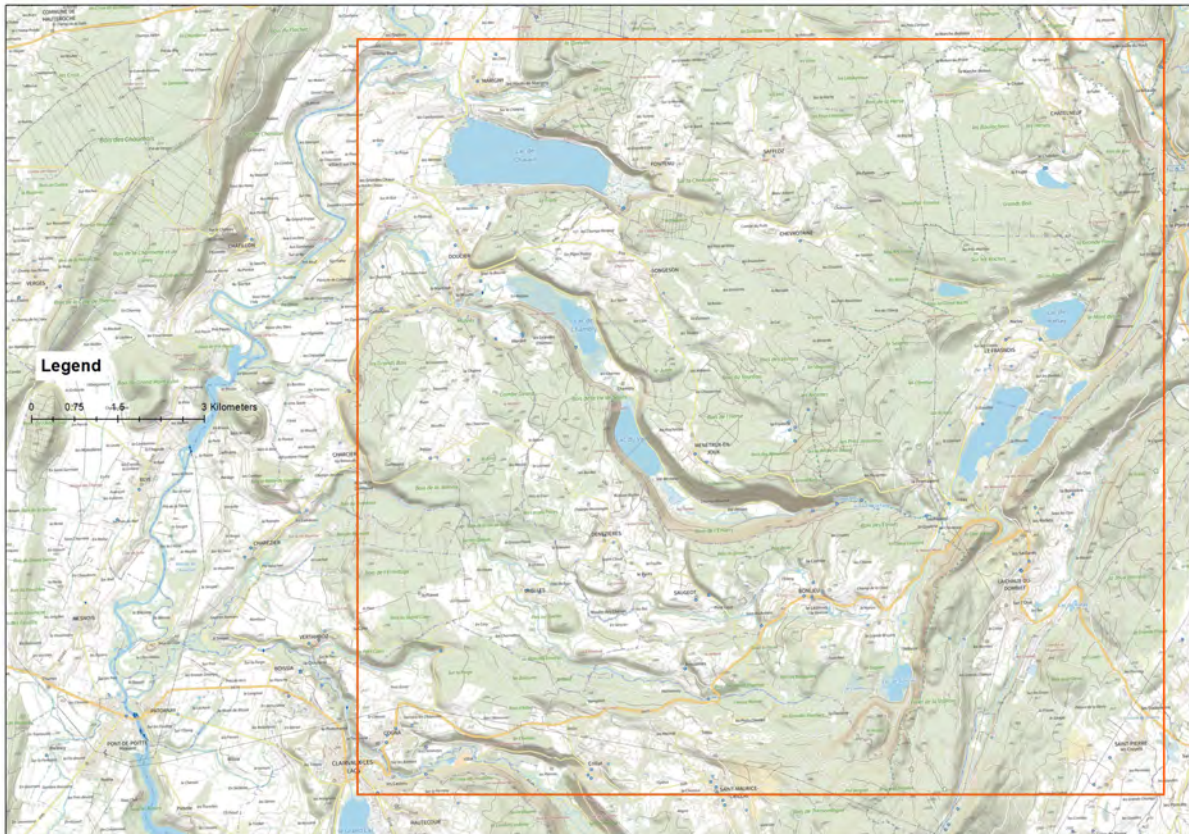


Figure 1. Secteur d'application de la carte du karst 1/50'000 Chalain

Le système d'information géographique utilisé est RGF93/Lambert 93 (EPSG 2154). Les coordonnées de l'emprise sont portées dans le tableau suivant.

X <sub>min</sub>	Y <sub>min</sub>	X <sub>max</sub>	Y <sub>max</sub>
910'550	6'624'760	924'547	6'611'666

Table 1. Coordonnées des limites du secteur d'application (EPSG 2154)

Les résultats sont remis au CD39 sous la forme de cartes numériques 1/50'000 au format .pdf et de produits ArcGIS :

- Projet (.mxd)
- Base de données (.gdb) des données vectorielles
- Fichiers de forme (.lyr) pour l'affichage des données vectorielles

L'architecture de la base de données est donnée en Annexe A.

### 3. Données utilisées

Les données utilisées pour l'établissement de la carte du karst sont les suivantes :

- Modèle numérique de terrain [MNT], résolution 1 m<sup>1</sup>
- Données géologiques vectorielles 1/50'000, source brgm<sup>2</sup>
- Zones hydrographiques, cours d'eau<sup>3</sup>

<sup>1</sup> <http://files.opendataarchives.fr/professionnels.ign.fr/rgealti/>

<sup>2</sup> <http://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>

<sup>3</sup> <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/r/9e29d80c-2148-4b7c-82e8-51874adba6ce>

- Données vectorielles du parcellaire agricole (mise à jour 2019)<sup>1</sup>
- Données vectorielles d'occupation du sol (source Corine Land Cover)<sup>2</sup>
- Bassins hydrologiques de surface (BD Carthage<sup>3</sup>).

## 4. Application Carte Karst

Les aspects méthodologiques d'établissement de la carte du karst sur le territoire français sont présentés dans le rapport ISSKA [2021].

Les détails de l'application sur Chalain sont présentés dans les sections suivantes.

Les index entre [ ] réfèrent au nom de l'entité dans la base de données ArcGIS.

### 4.1. Index karst des formations rocheuses à l'affleurement [A\_FORM\_AFF]

Les formations rocheuses portées à l'affleurement sur la carte géologique sont discrétisées en 4 catégories dans la colonne « PROP\_AFF » :

- **K = Karstiques** (formations calcaires et calcaires marneux)
- **SK = Semi-karstiques** (formations marneuses et marno-calcaires)
- **NK = Non karstiques** (formations non carbonatées)
- **Q = Quaternaire** (formations de recouvrement quaternaire)

Une quatrième catégorie « **Ke = évaporites karstiques** » regroupe les formations évaporitiques, non carbonatées, qui présentent néanmoins une aptitude à la karstification (gypse, sels, etc.). Ce type de formation n'est toutefois pas présent sur le secteur de Chalain, que ce soit à l'affleurement ou sous couverture des formations meubles (Quaternaire).

Une catégorie « **-999 = indéterminée** » rassemble les formations rocheuses non catégorisables parmi les classes définies.

La Table 16 en Annexe B présente les catégories affectées à chacune des formations géologiques. La distinction est faite sur le critère de description lithologique apportée par la notice géologique.

Les formations de recouvrement quaternaire (**Q**) sont isolées et traitées dans le §. 4.2. La carte en Figure 2 présente le résultat de cette étape.

A la lecture de la carte, les observations suivantes peuvent être faites :

- Plus de 50% des surfaces sont couvertes de formations karstiques à l'affleurement
- Le recouvrement par les formations quaternaires est relativement important (plus de 40 %)
- Le reste des surfaces est identifié comme semi-karstique (principalement des marnes et des marnes calcaires)
- Il n'existe pas de formations identifiées comme non-karstiques (i.e. non carbonatées)
- Il n'existe pas de formations identifiées comme évaporitiques karstiques (i.e. autres roches solubles mais non carbonatées : sel, gypse, etc.)

<sup>1</sup> <https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html#rpg>

<sup>2</sup> <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>

<sup>3</sup> <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/zones-hydrographiques-de-la-bd-carthage-en-bourgogne-franche-comte/>

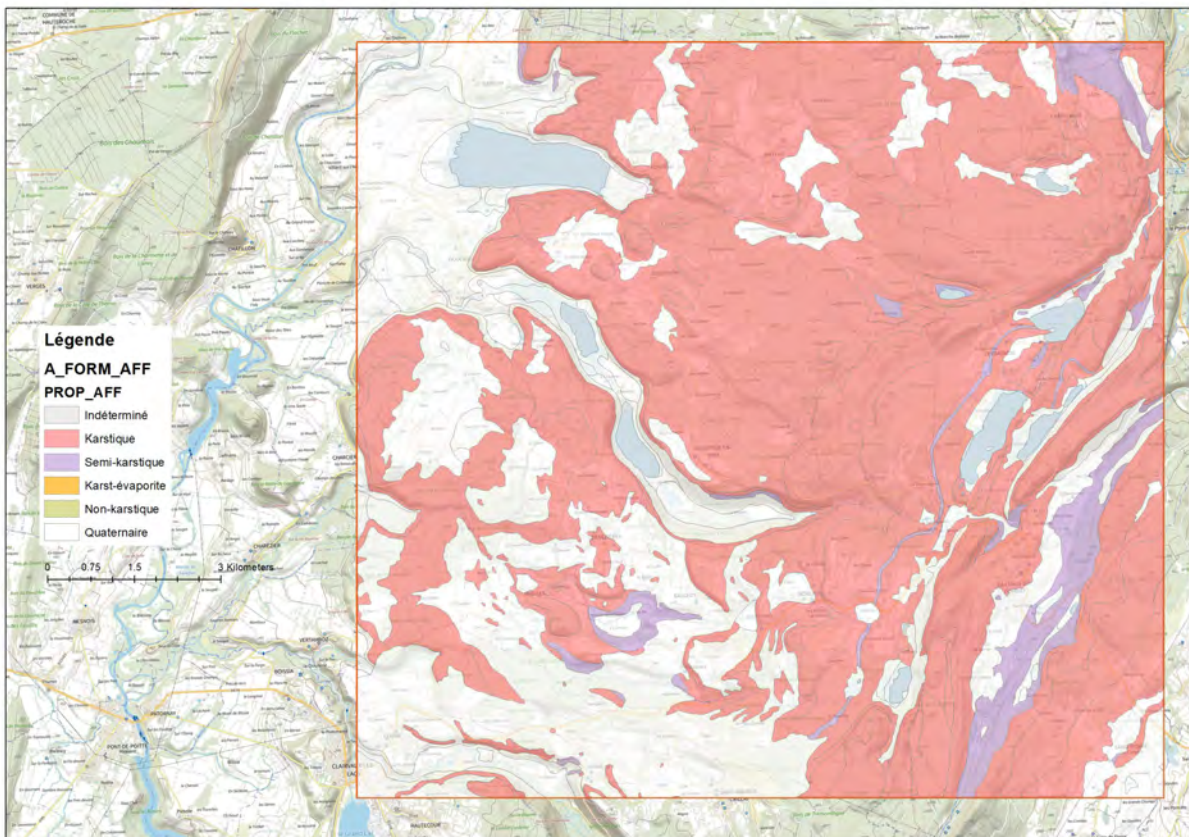


Figure 2. Index Karst des formations rocheuses à l'affleurement. La classe « indéterminée » se réfère objets hydrologiques seulement (plans d'eau et cours d'eau)

#### 4.2. Index karst des formations sous-couverture quaternaire [B\_FORM\_SC]

Les formations de recouvrement quaternaire (Q) font l'objet d'un redécoupage en fonction de l'index karst de la formation sous-jacente supposée. Les structures stratigraphiques et ou tectoniques visibles sont donc extrapolées sous les polygones [QUAT]. Les polygones découpés sont catégorisés comme suit dans la colonne « PROP\_SC » :

- **I\_K = Karstiques sous couverture** (formations calcaires et calcaires marneux)
- **I\_SK = Semi-karstiques sous-couverture** (formations marneuses et marno-calcaires)
- **I\_NK = Non karstiques sous-couverture** (formations non carbonatées)

Cette étape est certainement une des plus longues du processus d'établissement de la carte et implique une interprétation géologique de la part de l'exécutant. Les interprétations se basent sur :

- Le principe de continuité des structures
- Les indices observés sur [MNT]
- Les forages existants

Les résultats du découpage sont présentés en Figure 3.

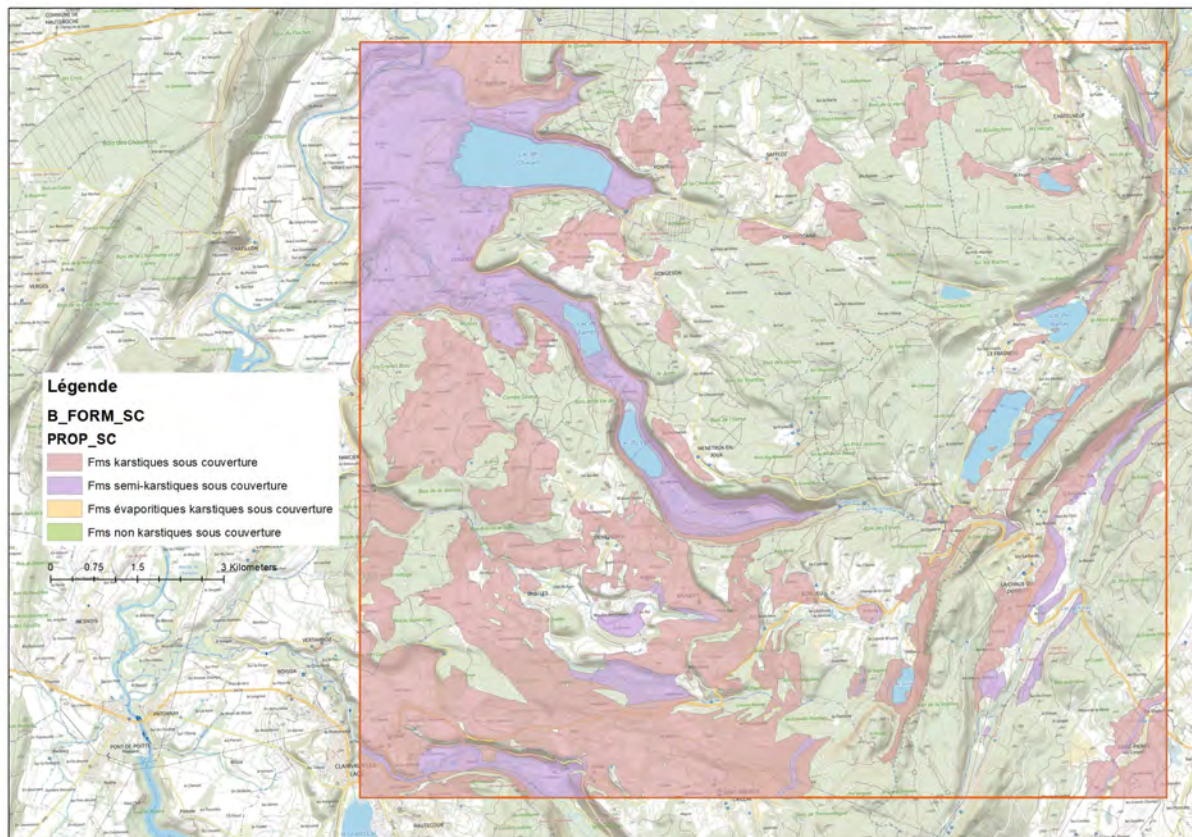


Figure 3. Index Karst des formations sous-couverture quaternaire (Fms = « formations »)

### 4.3. Infiltrabilité finale [D\_INFILTRABILITE]

La carte d'infiltrabilité finale est obtenue par croisement des index des cartes §. 4.1, §. 4.2 et de la carte d'épaisseur des formations de couverture [C\_COUVERTURE] §.5.

Lors du croisement, les classes de profondeur de la carte [EPAISSEUR] sont reclassées en trois catégories :

- Couverture < 0.5 m
- Couverture 0.5 m < C < 2 m
- Couverture > 2 m

Les critères d'attribution sont les suivants (Table 2).

A noter que les classes d'infiltrabilité ne sont pas hiérarchisées. Pour une même classe (K, SK), l'infiltrabilité est supposée diminuer avec l'épaisseur de couverture. En revanche, la correspondance entre les classes K et SK pour des épaisseurs de couverture différentes n'est pas directe. A ce stade des connaissances, même si des différences sont attendues, il n'est pas possible d'annoncer avec certitude que la classe d'infiltrabilité K, 0.5 – 2 m est plus infiltrante que la classe SK, < 0.5 m.

A noter aussi que seule l'épaisseur de la couverture est considérée dans la discrétisation de l'infiltrabilité (cf. §. 5). La lithologie des formations de couverture – et donc leur perméabilité respective – ne sont pas considérés. Il s'agit de développements qui pourront être entrepris ultérieurement.

PROP_AFF	PROP_SC	EPAISSEUR [CLASSES]	INFILTR
-9999	-	-	-9999 (indéterminé)
K	-	1, 2	1 (K, < 0.5 m)
K	-	3, 4	2 (K, 0.5 - 2 m)
K	-	5	3 (K, > 2 m)
SK	-	1, 2,	4 (SK, < 0.5 m)
SK	-	3, 4	5 (SK, 0.5 - 2 m)
SK	-	5	6 (SK, > 2 m)
NK	-	1, 2, 3, 4, 5	4 (NK)
Q	I_K	1, 2,	1 (K, < 0.5 m)
Q	I_K	3, 4	2 (K, 0.5 - 2 m)
Q	I_K	5	3 (K, > 2 m)
Q	I_SK	1, 2,	4 (SK, < 0.5 m)
Q	I_SK	3, 4	5 (SK, 0.5 - 2 m)
Q	I_SK	5	6 (SK, > 2 m)
Q	I_NK	1, 2, 3, 4, 5	7 (NK)

Table 2. Règle d'attribution des critères d'infiltrabilité (**INFILTR**) en fonction de la nature du rocher à l'affleurement (**PROP\_AFF**) ou sous couverture (**PROP\_SC**) et des classes d'épaisseur supposée de la couverture (**EPAISSEUR**). Les classes renvoient aux épaisseurs de la Table 5 et ne proposent pas de hiérarchisation du potentiel d'infiltration.

Cette simplification est faite pour ne pas surcharger l'affichage, les données conservent cependant leur classe d'origine pour tout requête.

La carte d'infiltrabilité finale est donnée en Figure 4.

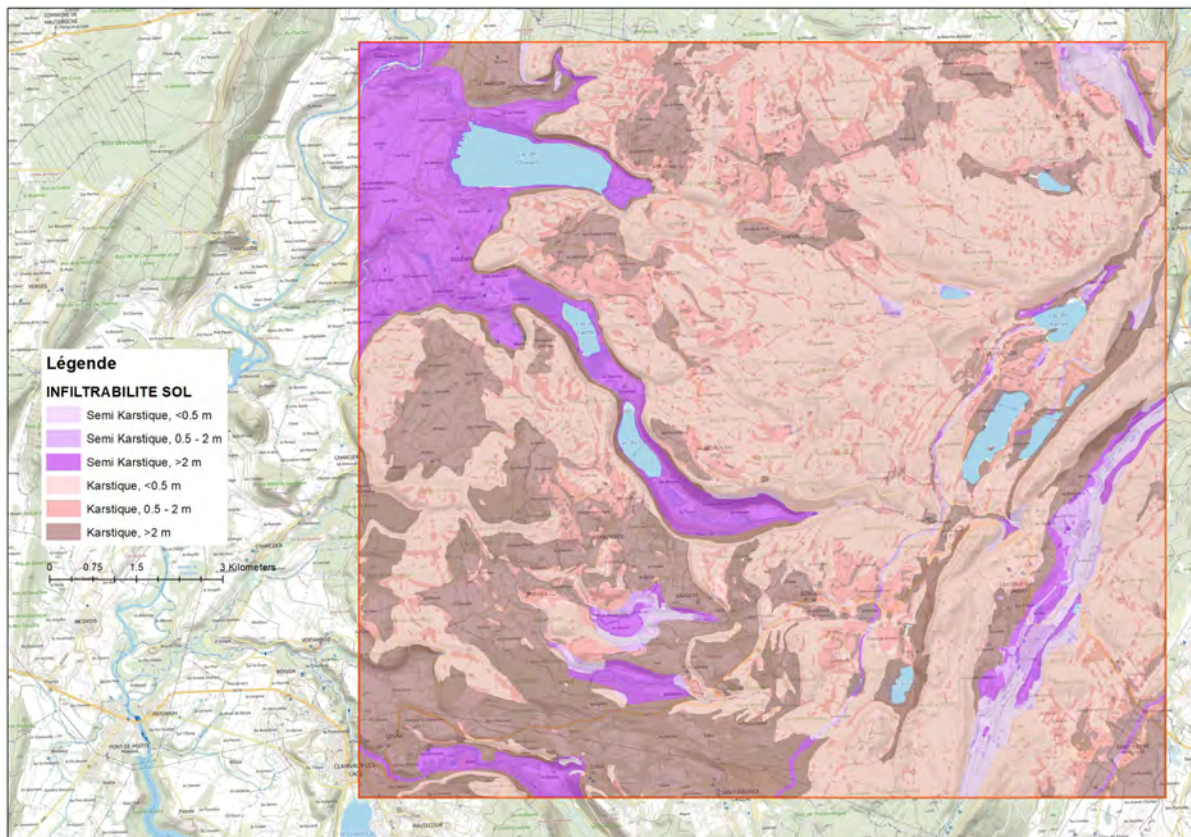


Figure 4. Carte d'infiltrabilité 1/50'000 Chalain (type d'infiltrabilité karstique à l'affleurement et sous couverture)

#### 4.4. Niveau de base hydrologique [E\_HYBASE]

L'index d'infiltrabilité des formations rocheuses à l'affleurement ou sous couverture n'est pas la seule condition pour infiltrer les eaux. En effet, celles-ci ne s'infiltrent que si une zone non saturée significative se développe sous la surface du sol. Il est donc essentiel d'identifier où se développent les niveaux de base hydrologiques (et par extension les zones d'artésianisme ou de sub-artésianisme).

Celles-ci sont identifiées sur la base de la position (altitude, topographie) des principales sources karstiques, plans d'eau, zones humides, etc. qui attestent de la présence de la nappe à l'altitude du sol (ou très proche) en conditions hydrologiques normales.

Il peut d'agir de niveaux de base régionaux, dans le cas de Chalain ceux-ci se développent à l'ouest de la zone d'étude, en aval des principaux lacs, mais aussi de niveaux locaux liés à la présence d'aquifères perchés.

La carte placée en Figure 5 propose une zonation des affleurements des niveaux de base hydrologiques.



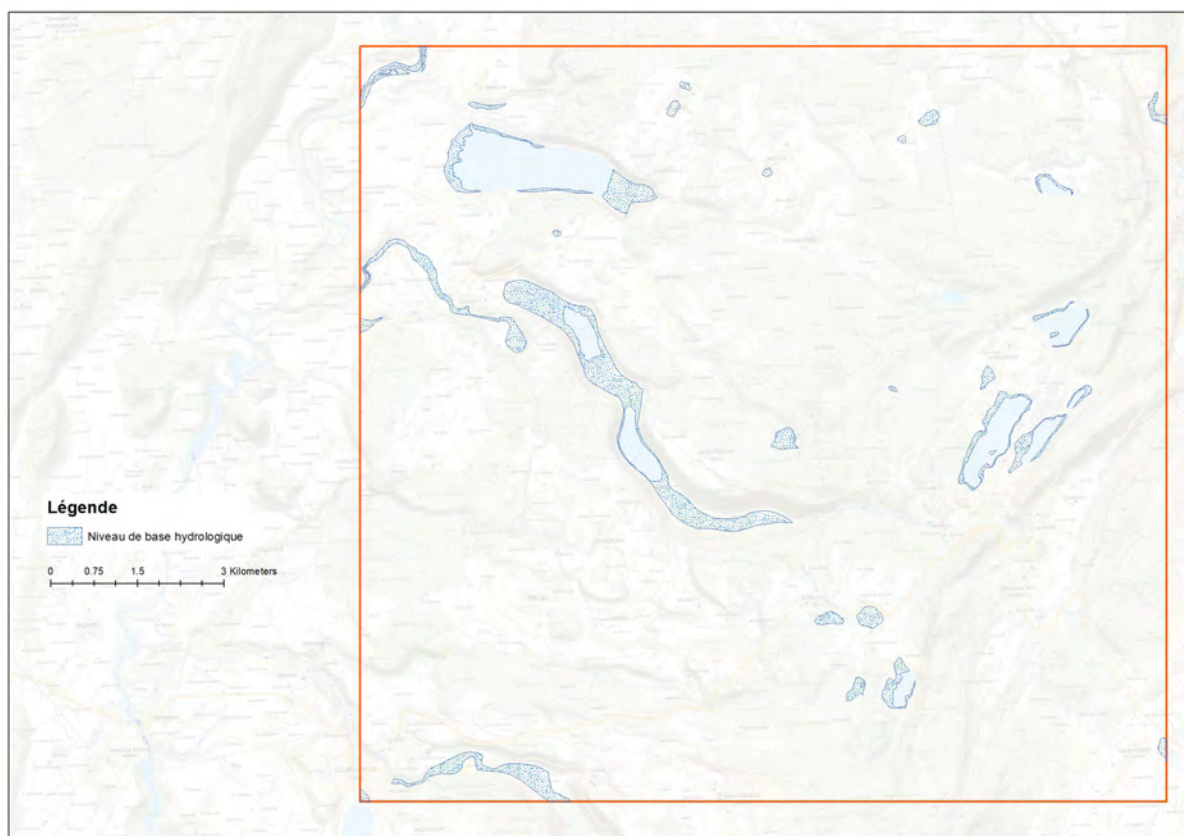


Figure 5. Carte des affleurements des niveaux de base hydrologiques

## 4.5. Traitement des cours d'eau et plans d'eau

### 4.5.1. Cours d'eau [F\_INFILTR\_COURS\_EAU]

Les cours d'eau utilisés pour l'établissement de la carte ont été complétés des cours d'eau notés comme temporaires et visibles sur la carte topographique 1/25'000.

A noter que les tronçons vectoriels présentent des écarts – souvent significatifs – avec les cours d'eau affichés sur le fond topographique.

Les tronçons de cours d'eau sont comparés à la couche d'infiltrabilité (§. 4.3) et à celle du niveau de base hydrologique (§. 4.4) pour savoir si le tronçon est supposé alimenter ou pas les aquifères karstiques (susceptibilité à l'alimentation des aquifères karstiques).

Quatre classes sont attribués aux tronçons en fonction des valeurs des paramètres « INFILTR » et « HYDROBASE » (cf. Table 3). Le tronçon prend la valeur « 0 » s'il est supposé topographiquement au-dessus du niveau de base et la valeur « 1 » s'il est topographiquement à altitude comparable ou en-dessous.

INFILTR	HYDROBASE [INDICE]	ALIM_KARST
1, 4	0	1 (infiltration supposée)
2, 3, 5, 6	0	2 (infiltration modérée)
7	0	3 (infiltration négligeable)
	1	3 (infiltration négligeable)
-9999	-	-9999 (indéterminé)

Table 3. Critères d'assignement des valeurs d'alimentation du karst pour les tronçons des cours d'eau [F\_INFILTR\_COURS\_EAU] du secteur d'étude. L'indice **INFILTR** renvoie à la Table 2.

La carte résultante est placée en Figure 6.

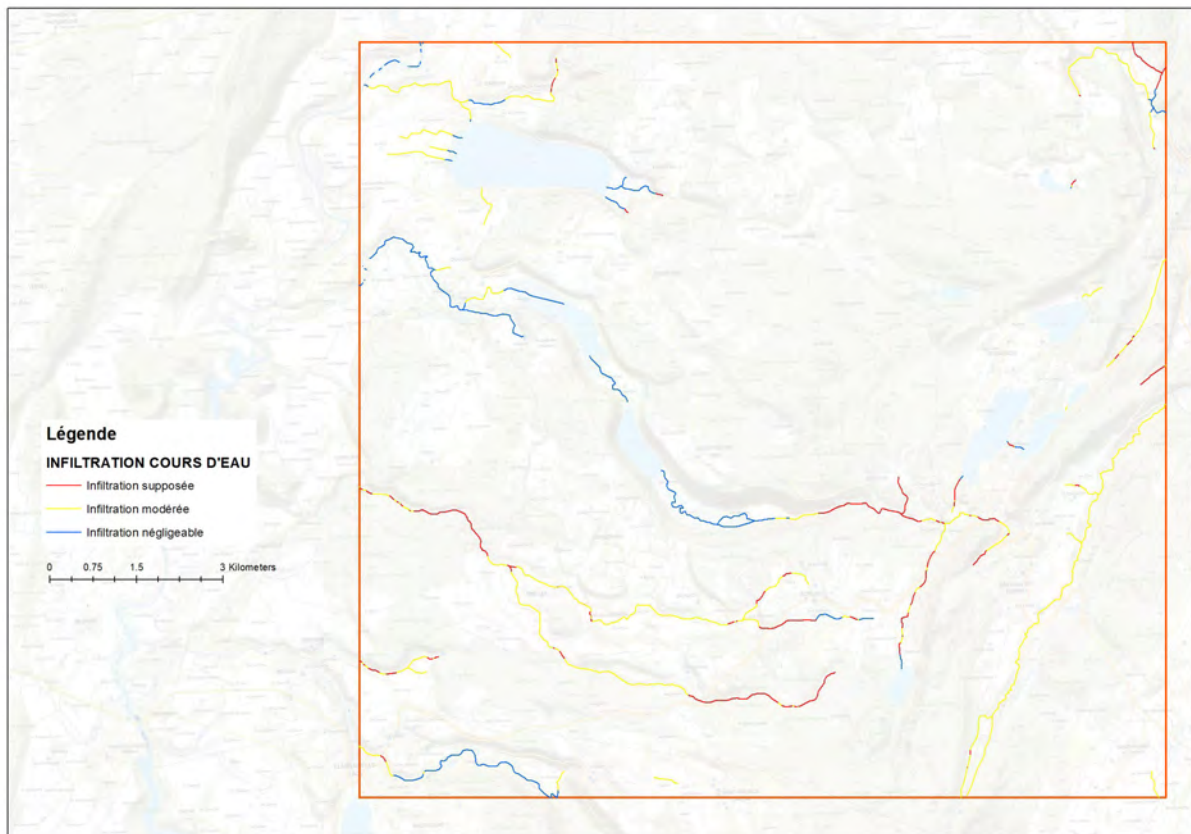


Figure 6. Carte de susceptibilité des cours d'eau à l'alimentation des aquifères karstiques.

Plus de la moitié des cours d'eau analysés sur le secteur d'étude présente une infiltration modérée à forte. Seuls les cours d'eau de fond de vallées (le Hérisson, le Drouvenant et l'Ain) sont majoritairement exfiltrants. En ce qui concerne le Rhonnay et le Dombief, l'analyse montre que ce sont des cours d'eau plutôt infiltrants qu'exfiltrants, ce qui n'empêche pas qu'ils puissent être permanents.

#### 4.5.2. Plans d'eau [PLAN\_EAU]

Les emprises des principaux plans d'eau sont extraites de la couche des données géologiques vectorielles 1/50'000. En effet, les emprises de la couche « **plans d'eau** »<sup>1</sup> ne correspondent pas exactement au découpage des unités géologiques. Ainsi, pour conserver une cohérence d'ensemble, les emprises de la couche géologique ont été préférées.

Les plans d'eau sont classés en deux catégories : (i) infiltrant ou (ii) exfiltrant en fonction des connaissances (Table 4). Les résultats sont placés en Figure 7.

Plans d'eau infiltrant	Plans d'eau permanents ou temporaires qui s'infiltrent au fond, via les berges ou par débordement via une perte karstique située en bordure du plan d'eau. Ces plans d'eau n'ont souvent pas d'exutoires aériens et sont situés au-dessus du niveau de base hydrologique.
Plans d'eau exfiltrant	Plans d'eau le plus souvent permanents, situés à l'altitude du niveau de base hydrologique, local ou régional. Ces plans d'eau sont alimentés par des sources karstiques, situées en bordure ou au fond.

Table 4. Distinction entre plans d'eau infiltrant vs exfiltrant

<sup>1</sup> <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/r/26078f2b-418f-43f8-a393-cfe0b8945bd8>

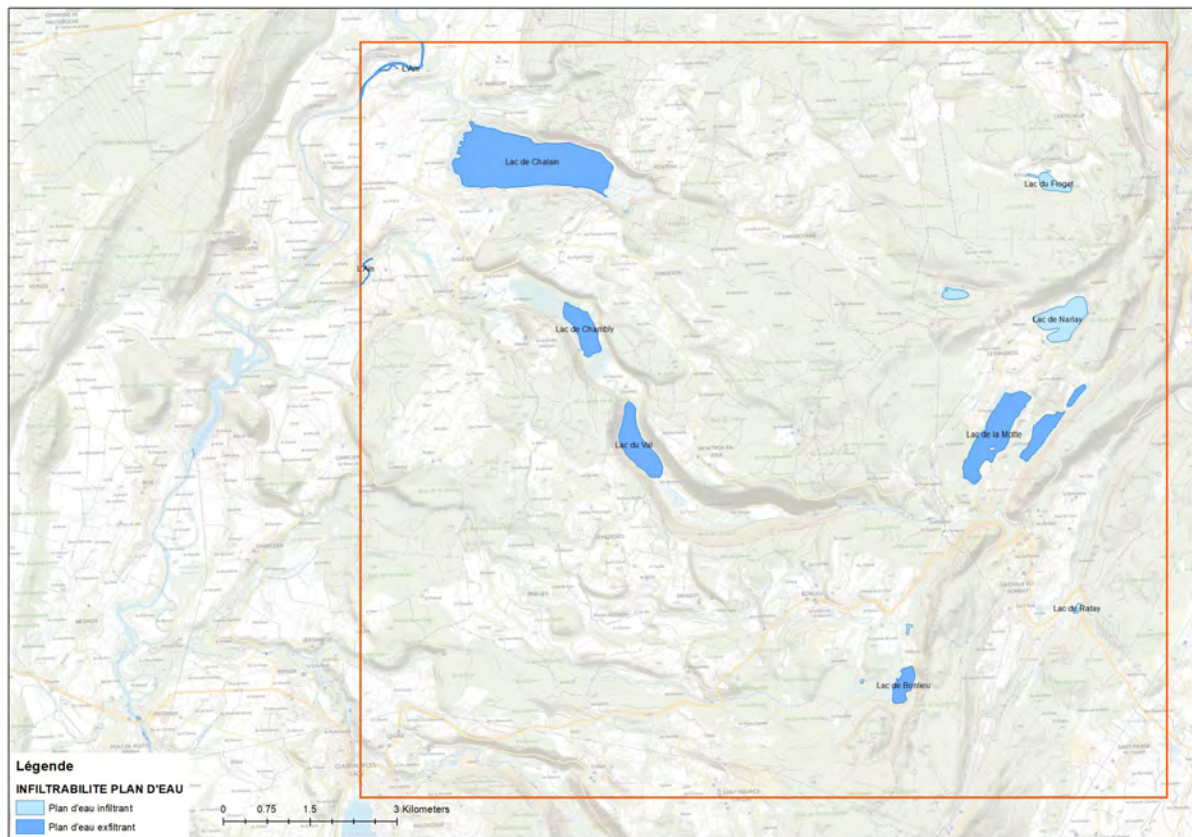


Figure 7. Carte des plans d'eau infiltrant / exfiltrant de Chalain.

## 4.6. Traitement des surfaces d'alimentation allochtones et des bassins fermés

### 4.6.1. Surfaces allochtones

Aucune surface strictement non-karstique n'a pu être observée sur le secteur d'étude. Par conséquent, il n'existe pas de surfaces d'alimentation allochtones<sup>1</sup>.

Les bassins versants de la BD Carthage n'ont donc pas été utilisés sur le secteur de Chalain pour la délimitation des surfaces allochtones en zones non karstiques.

En revanche, il faut noter que les bassins versants de la BD Carthage sont de grande dimension et regroupent plusieurs cours d'eau. Une discrétisation des bassins versants de plus petite dimension, par cours d'eau, serait beaucoup plus utile pour l'établissement de la carte du karst. En Suisse, le cadastre des bassins versants 2 km<sup>2</sup> est utilisé<sup>2</sup>.

### 4.6.2. Bassins fermés [DEPRESSIONS]

Les bassins fermés (ou plus largement « dépressions ») indiquent une infiltration complète et in situ des eaux de ruissellements (infiltrabilité de 100%).

13 bassins fermés ont pu être identifiés et cartographiés sur la base d'un critère de surface minimale de 0.1 km<sup>2</sup>. Le bassin fermé le plus étendu couvre 1.1 km<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Pour une description générale des surfaces allochtones et des propriétés associées, le lecteur est invité à se reporter au rapport méthodologique ISSKA 2021

<sup>2</sup> <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/einzugsgebietgliederung-schweiz.html>

## 4.7. Carte Karst finale

La carte karst finale rassemble les couches « Infiltrabilité finale » (§. 4.3), « Cours d'eau » et « Plans d'eau » (§. 4.4), « Surfaces allochtones et dépressions » (§. 4.6) et « Niveau de base hydrologique » (§. 4.4). La carte résultante est placée en Figure 8 et en Annexe C.

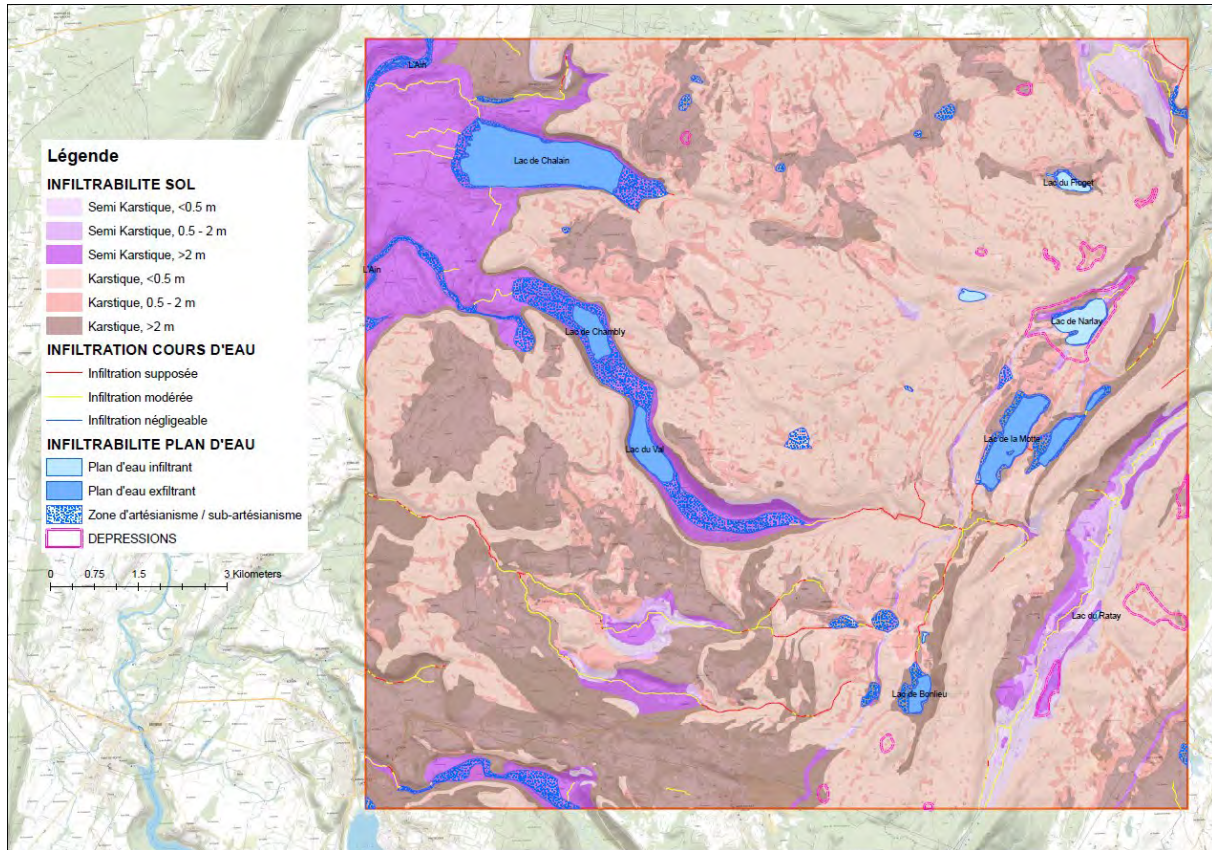


Figure 8. Aperçu de carte du karst 1/50'000 Chalain

Les résultats principaux de la carte du karst sont les suivants :

- Le secteur d'étude est essentiellement composé de formations karstiques et semi-karstiques à l'affleurement. Les formations semi-karstiques (marnes, marno-calcaires et calcaires marneux) occupent le fond des vallées alors que les calcaires composent les principaux reliefs
- Aucune formation strictement non-karstique n'a été relevée. Il n'existe donc pas de surfaces allochtones (non-karstiques alimentant le karst).
- Les formations de couverture sont relativement peu épaisses. En effet, la majorité des surfaces présentent une épaisseur de couverture inférieure à 0.5 m. La couverture a tendance à s'épaissir vers l'ouest pour dépasser 2 m (secteurs Uxelles, Denezières, Saugeot, Bonlieu, etc.).

## 5. Application Carte épaisseur couverture

La méthodologie relative à l'établissement de la carte d'épaisseur des formations de couverture (sols + recouvrement quaternaire) est présentée dans le rapport ISSKA [2021].

La Figure 9 synthétise le workflow d'évaluation d'épaisseur des formations de couverture. Il est important de noter que seule l'épaisseur de la couverture est considérée dans le

processus ; la lithologie des formations – et donc leurs perméabilités respectives ne sont pas prises en compte ici.

Le workflow se base sur l'analyse et la combinaison de couches d'informations différentes qui sont décrites dans les sections suivantes.

En fonction de la présence / absence / valeur des informations combinées, l'entité prend une la valeur d'épaisseur correspondante parmi les 5 gammes de valeurs définies (Table 5).

Par défaut, la valeur (1) « 0 - 0.2 m » est appliquée à toutes les surfaces. La valeur est ensuite susceptible de changer en fonction de la combinaison des paramètres du workflow (Figure 9).

ID	EPAISSEUR
1	0 à 0.2 m
2	0.2 à 0.5 m
3	0.5 à 1 m
4	1 à 2 m
5	> 2 m

Table 5. Classes d'épaisseur des formations de couverture

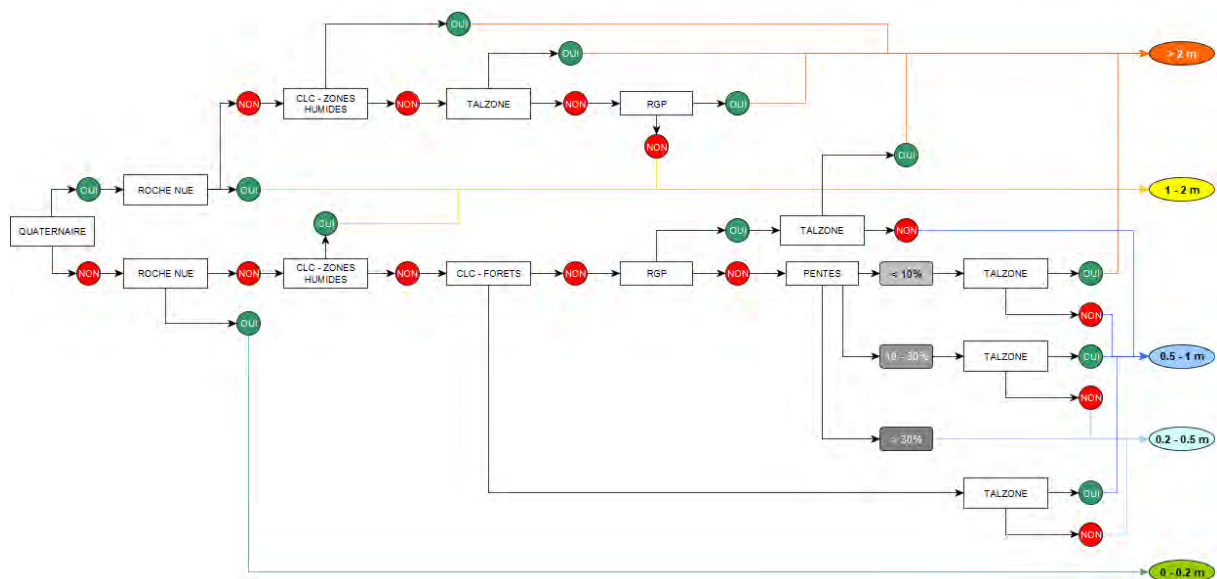


Figure 9. Workflow d'évaluation de l'épaisseur des formations de couverture

A l'exception du paramètre de pente qui possède 3 classes (1 = <10%, 2 = 10-30% et 3 = >30%), les autres paramètres ne possèdent que deux classes (1 = Présence, 2 = Absence). Les critères de combinaison des index sont placés dans la Table 6 suivante.

QUARTAR	ROCHE NUE	ZONES HUMIDES	FORETS	TALZONE	RGP	PENTES	EPAISSEUR
1	1						1 à 2 m
1	2	1					> 2 m
1	2	2		1			> 2 m
1	2	2		2	1		> 2 m
1	2	2		2	2		1 à 2 m
2	1						0 à 0.2 m
2	2	1					1 à 2 m
2	2	2	1	1			0.5 à 1 m
2	2	2	1	2			0.2 à 0.5 m
2	2	2	2	1	1		> 2 m
2	2	2	2	2	1		0.5 à 1 m
2	2	2	2	1	2	1	> 2 m
2	2	2	2	2	2	1	0.5 à 1 m
2	2	2	2	1	2	2	0.5 à 1 m
2	2	2	2	2	2	2	0.2 à 0.5 m
2	2	2	2		2	3	0.2 à 0.5 m

Table 6. Critères de combinaison des paramètres pour l'évaluation de l'épaisseur des formations de couverture.

Les détails de l'application sur Chalain sont présentés dans les sections suivantes. La carte « **Epaisseur des formations de couverture** » est placée en Figure 16 et en Annexe D au format 1/50'000.

## 5.1. Couverture quaternaire [QUATERNAIRE]

Les informations relatives aux zones de couverture quaternaire sont extraites de la carte géologique (cf. Figure 2).

Par principe, les zones cartographiées comme formation quaternaire sont considérées comme présentant une épaisseur de couverture supérieure à 1 m. Il s'agit de l'épaisseur limite à partir de laquelle le géologue ne peut correctement cartographier la roche sous-jacente.

## 5.2. Zones de roches nues [ROCHES\_NUES]

Les informations relatives aux zones de roches nues (c.à.d. lapiaz, pierriers, etc., soit des zones à sols et couverture négligeables) peuvent être extraites du jeu de données vectorielles d'occupation du sol (source Corine Land Cover, indices Code\_90 : 332 et éventuellement 333).

La carte résultante est placée en Figure 10. Une seule zone est identifiée, à l'ouest de la Chaux-du-Dombief.

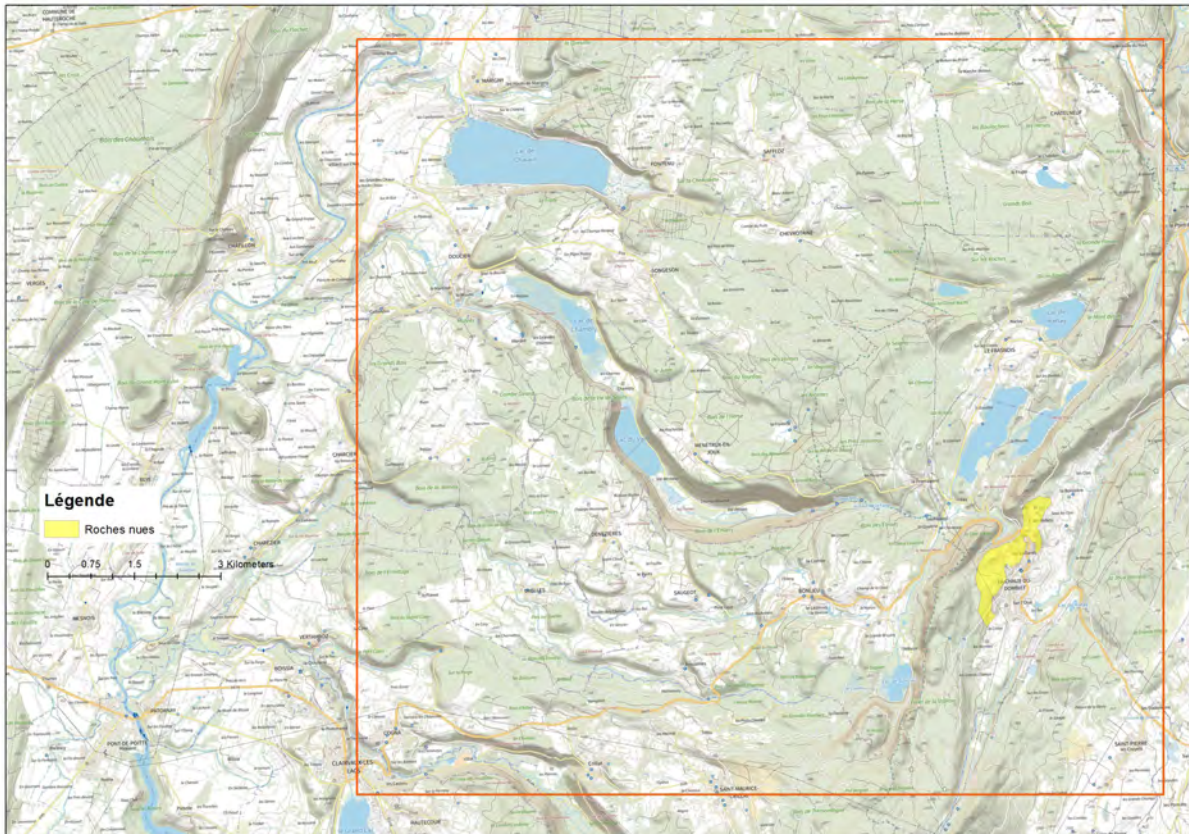


Figure 10. Carte des zones de roches nues

A la lecture des orthophotos, d'autres zones de roches nues - à priori des lapiaz ou des pierriers - apparaissent très visiblement dans des zones sous couvert forestier dense ou clairsemé. Ces zones sont classées sous « **Forêt** ». Les informations « **Roches Nues** » sont donc assez partielles et risquent de tendre dans certains cas à une surestimation de l'épaisseur des sols (notamment dans le cas des lapiaz sous couvert forestier).

Par principe les zones de roches nues sont considérées comme présentant une épaisseur de 0 à 0.2 m.

### 5.3. Zones de fonds vallées [TALZONE]

En principe les zones de fonds vallées, à morphologie plate, sont des zones préférentielles d'accumulations de sédiments / limons renforçant l'épaisseur des formations de couverture.

Elles sont calculées sur la base du modèle numérique de terrain (résolution 1 m) en utilisant l'algorithme MRVBF (« Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness ») développé par Gallant and Dowling [2003]. Les index obtenus sont lissés sur une matrice de 50 x 50 m pour éviter tout artefact (cf. Figure 11).

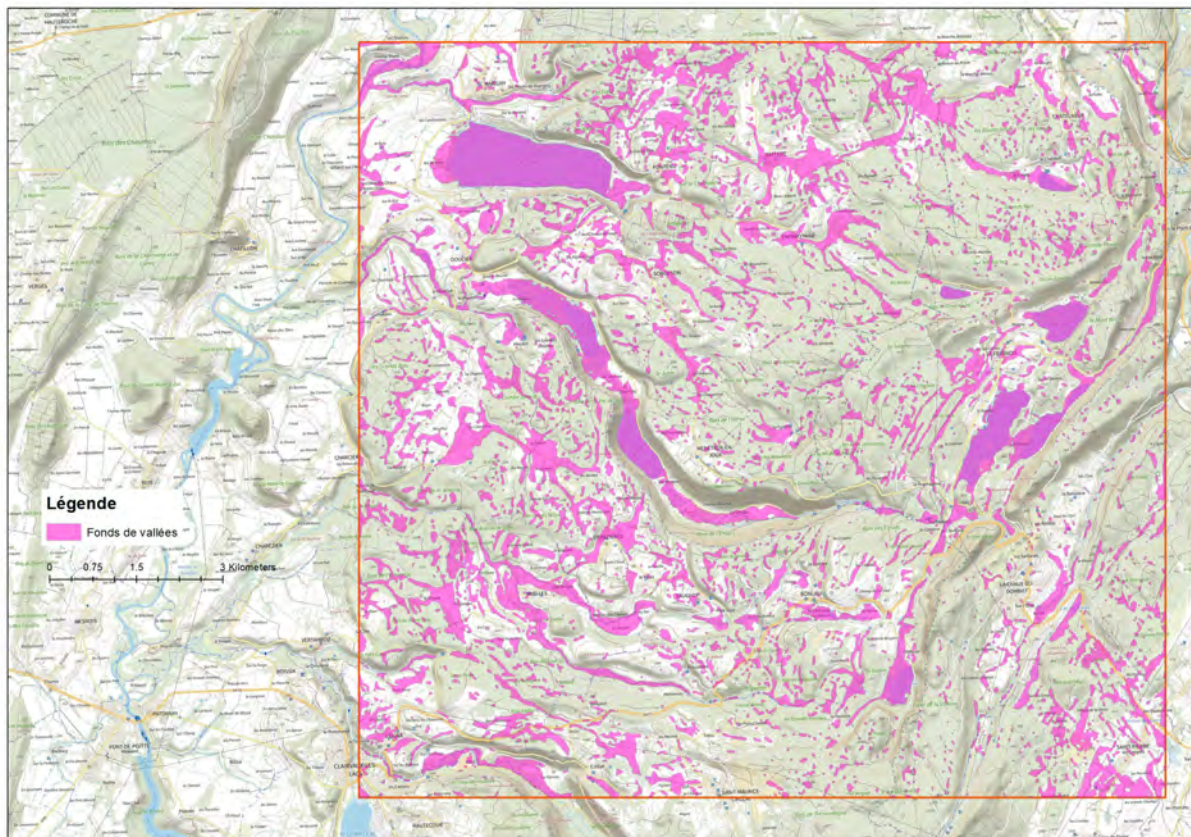


Figure 11. Zone de fonds de vallées (index MRVBF)

En fonction de la pente, les zones de fonds de vallées affichent une épaisseur minimale de 0.5 m et peuvent dépasser 2 m.

#### 5.4. Pentes [SLOPE]

Les indices de pente du relief sont utilisés pour évaluer l'épaisseur des formations de couverture selon le principe que les pentes élevées présentent souvent une couverture de faible épaisseur alors que les pentes faibles présentent des couvertures plus épaisses

Les pentes du relief sont calculées sur la base du MNT 1 m, puis lissées sur une matrice de 50 x 50 m pour éviter tout artefact. Elles sont ensuite reclassées en 3 catégories :

- Pentes < 10 %
- 10 % < pentes < 30 %
- Pentes > 30 %

La carte résultante est placée en Figure 12.



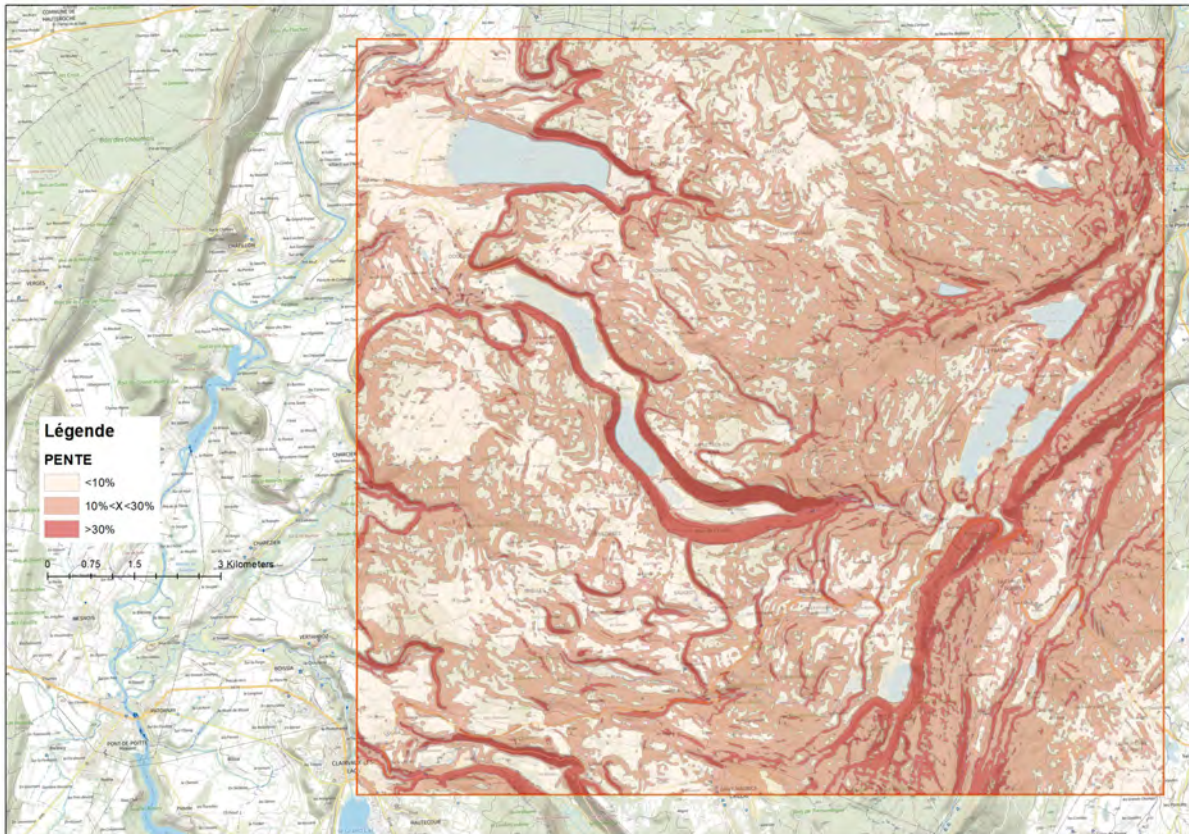


Figure 12. Carte des pentes reclassées en 3 catégories (<10%, 10%<X<30%, >30%)

## 5.5. Surfaces agricoles [CULTURE]

Les surfaces agricoles présentent des formations de couverture assez épaisses pour permettre la culture (c.à.d. supérieures à 0.5 m).

Les informations sont inférées du jeu de données RGP.

Les polygones sont fusionnés et simplifiés (enveloppe tampon 10 m) dans le but de supprimer les limites de champs et de rendre coalescentes les parcelles adjacentes. La carte résultante est affichée en Figure 13.

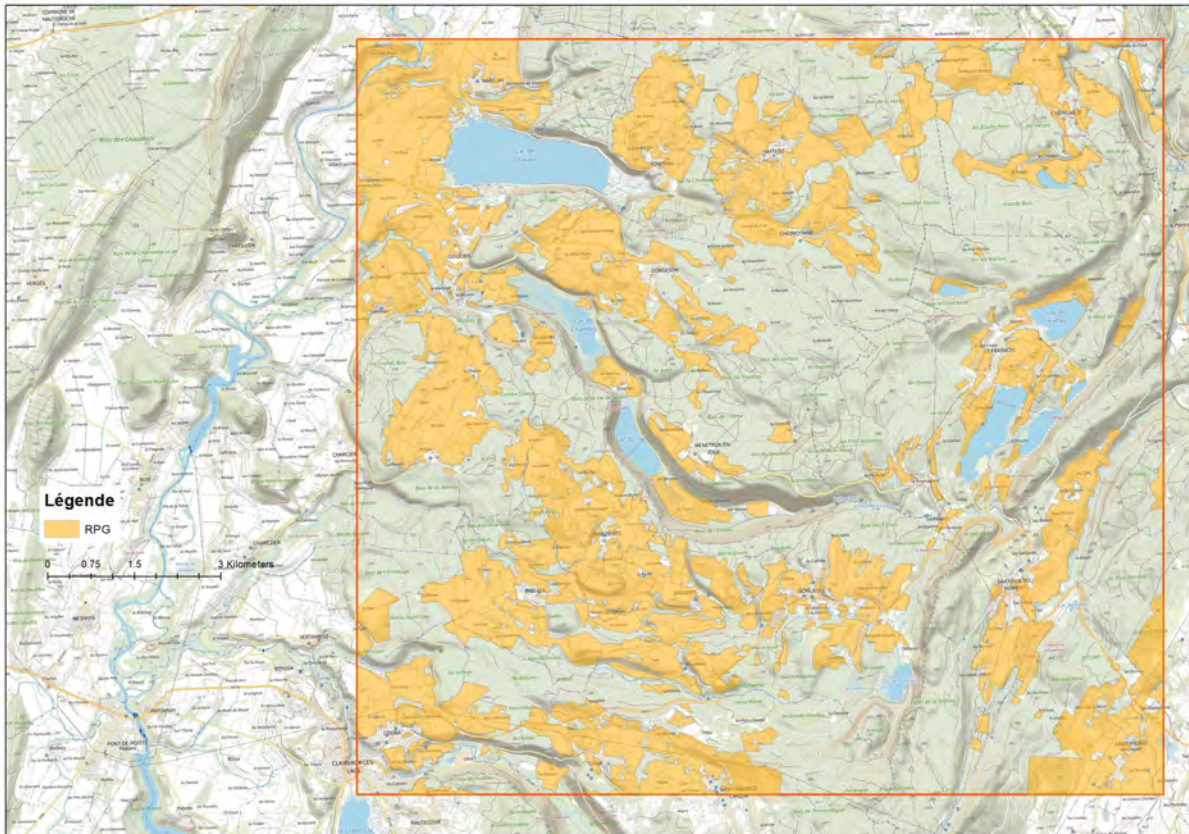


Figure 13. Carte des surfaces agricoles (RGP) du secteur de Chalain

Le découpage RGP est assez cohérent ; car, à quelques exceptions près, il correspond aux surfaces agricoles proposées par la carte topographique 1/25'000.

## 5.6. Forêts [FORETS]

En milieux karstiques, les zones de forêts denses présentent des épaisseurs de couverture assez faibles. Ce sont assez souvent des zones de lapiaz où la culture est impossible (cf. zones forestières au sud-est de Saffloz).

Les informations relatives aux zones de forêts peuvent être extraites du jeu de données vectorielles d'occupation du sol (source Corine Land Cover, indices Code\_90 : 311, 312, 313, 322 et 324). La carte des zones de forêts est placée en Figure 14.

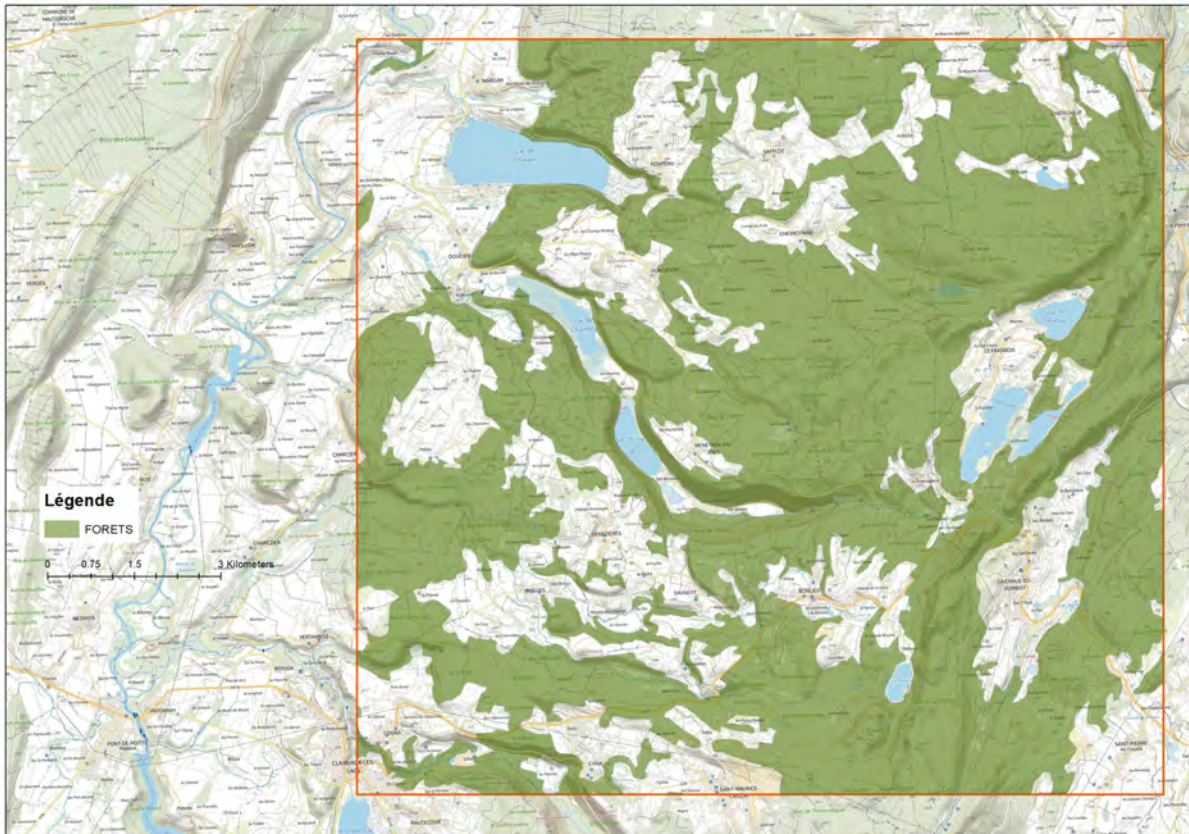


Figure 14. Carte des zones de forêts issues du jeu de données CLC (code 90)

A certaines exceptions près (petits îlots de forêts à l'ouest de Songeson, à l'ouest de la Chau-du-Dombief ou à l'est de Chevrotaine), l'emprise des zones de forêts fournie par le CLC correspond à l'emprise des zones forestières affichée sur la carte topographique 1/25'000.

## 5.7. Marais / zones humides [MARAIS]

Les zones humides ou marais en milieux karstiques présentent souvent des formations de couverture (sols et recouvrement quaternaire) épaisses, c.à.d. supérieures à 1 m sur surfaces de roches nues et supérieures à 2 m sur les surfaces cartographiées comme quaternaires.

Les emprises zones humides / marais sont extraites du jeu de données vectorielles d'occupation du sol (source Corine Land Cover, indices Code\_90 : 411 et 412). Elles sont présentées en Figure 15.

Dans certains cas, les zones humides se superposent avec les surfaces de niveau de base hydrologique (cf. Figure 5).

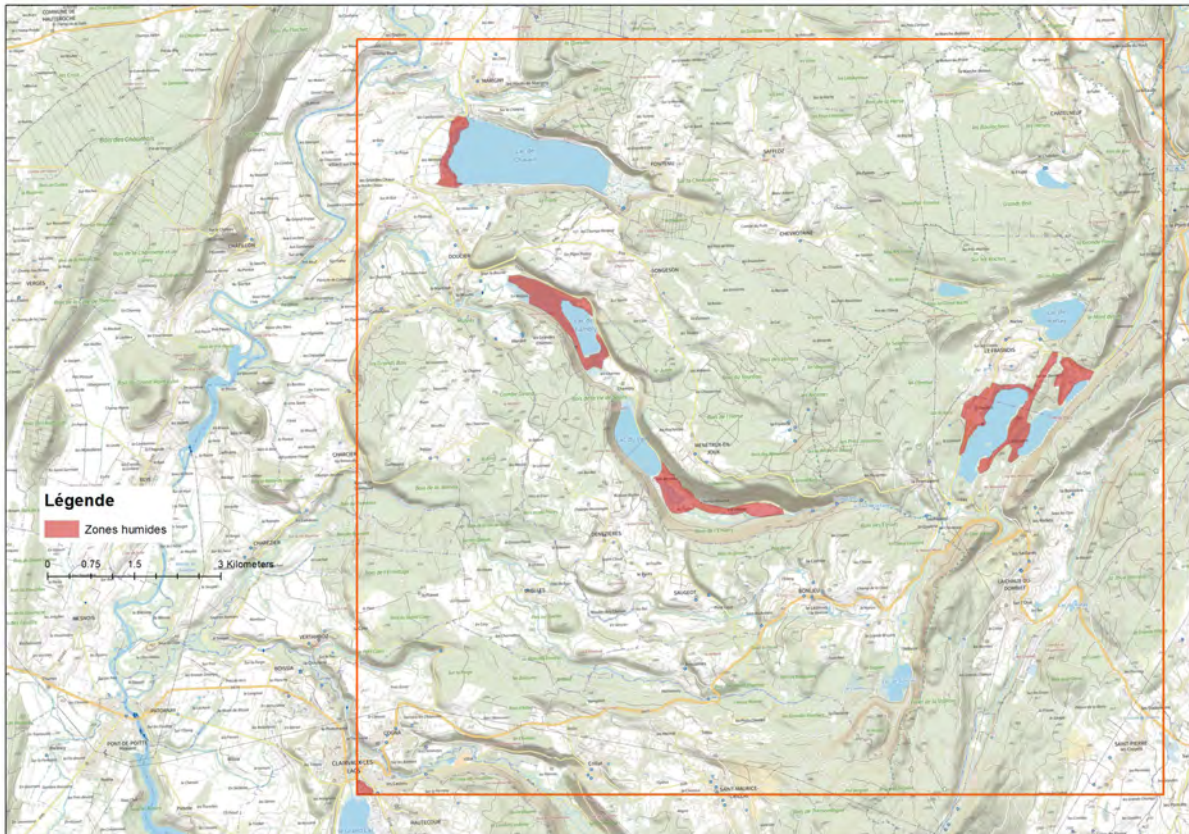


Figure 15. Carte des marais ou zones humides issues du jeu de données CLC (code 90)

## 5.8. Carte finale épaisseur couverture [C\_COUVERTURE]

La combinaison des jeux de données (cf. Table 6) permet d'établir la carte d'épaisseur de couverture (i.e. sols + formations de recouvrement quaternaire) présentée en Figure 16.

La carte montre que plus de la moitié des surfaces présente une couverture de faible épaisseur (< 0.5 m). Il s'agit notamment des zones de plateaux et des fortes pentes.

Les surfaces présentant une couverture plus épaisse se situent en fond de vallées, dans la plaine en aval des lacs et sur le plateau dans des zones en « creux », plus propices aux dépôts.

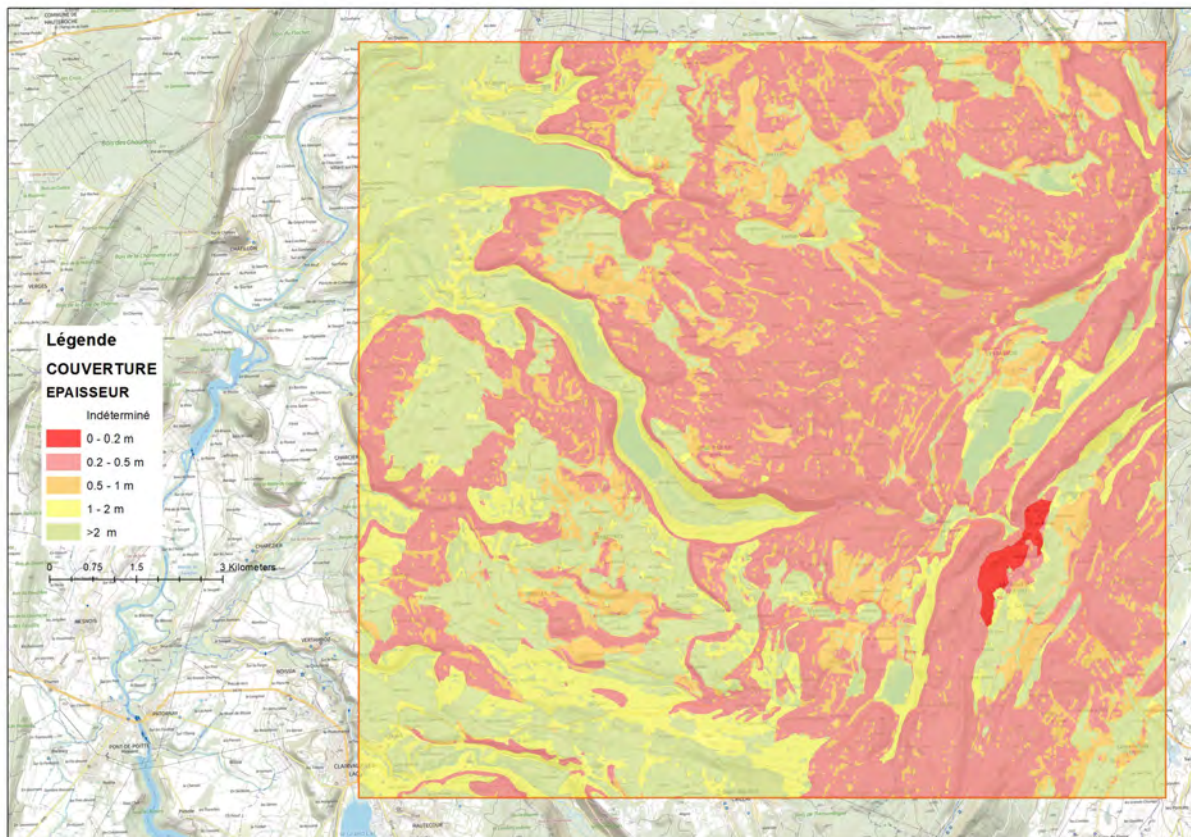


Figure 16. Carte d'épaisseur des sols + formations de couverture obtenue par combinaison des jeux des données.

La carte d'épaisseur de couverture est comparée avec un jeu de données de sondages pédologiques réalisés par la Chambre d'Agriculture du Jura<sup>1</sup>. Le travail de comparaison est présenté en Annexe E. Il montre que les informations de sondages ne contredisent pas les épaisseurs de sols et de formations quaternaires discrétisés au §. 5., mais ne permettent pas non plus de les valider complètement. Seule une validation partielle est possible en raison : (i) de la densité / localisation des sondages à la tarière et (ii) des limites de profondeur des sondages.

## 6. Comparaison informations Carte Karst et Carte de vulnérabilité (méthode RISK)

Dans le cadre de l'étude des ressources karstiques majeures pour l'alimentation en eau potable du massif du Jura (réf. AE RMC [2013]), la méthode RISK a été appliquée sur un certain nombre de bassins d'alimentation dont celui des sources de Fontenu et du Moulin<sup>2</sup> (réf. AE RMC [2013]).

Dans les sections suivantes, les couches des indices « I » (infiltration) et « S » (sols) utilisés pour le calcul de l'index de vulnérabilité RISK sont comparées aux résultats de la carte du karst, notamment l'infiltrabilité et l'épaisseur de la couverture.

La carte résultante de vulnérabilité RISK est de la même manière comparée avec la carte du karst et les observations font l'objet d'une discussion.

<sup>1</sup> M. JL Pavat, Agricultures & Territoires, 455 rue du Colonel de Casteljau, 39016 Lons-le-Saunier

<sup>2</sup> Feuillet RMK37 : Sources de Fontenu et du Moulin, Jura (n°37)

## 6.1. Comparaison Indice S (RISK) vs. Epaisseur Couverture (méthode Carte Karst)

L'indice « **S** » de la méthode RISK caractérise la nature du sol (matrice de classes fonction de la texture : argiles, limons, sables et la proportion de cailloux : 0-15%, 15-60%, >60%) et l'épaisseur de la couverture protectrice (4 classes : nulle, 0-20 cm, 20-100 cm, > 100 cm). Les détails méthodologiques sont présentés dans le rapport AE RMC [2013].

La superposition de la carte d'indice **S** (de « S0 » à « S4 », 4 étant l'indice de plus haute vulnérabilité, c.à.d. conjonction de sols / couverture de faible épaisseur et de « perméabilité » élevée) et des classes d'épaisseur de couverture proposées par la carte du karst (**EC**) est présentée en Figure 17.

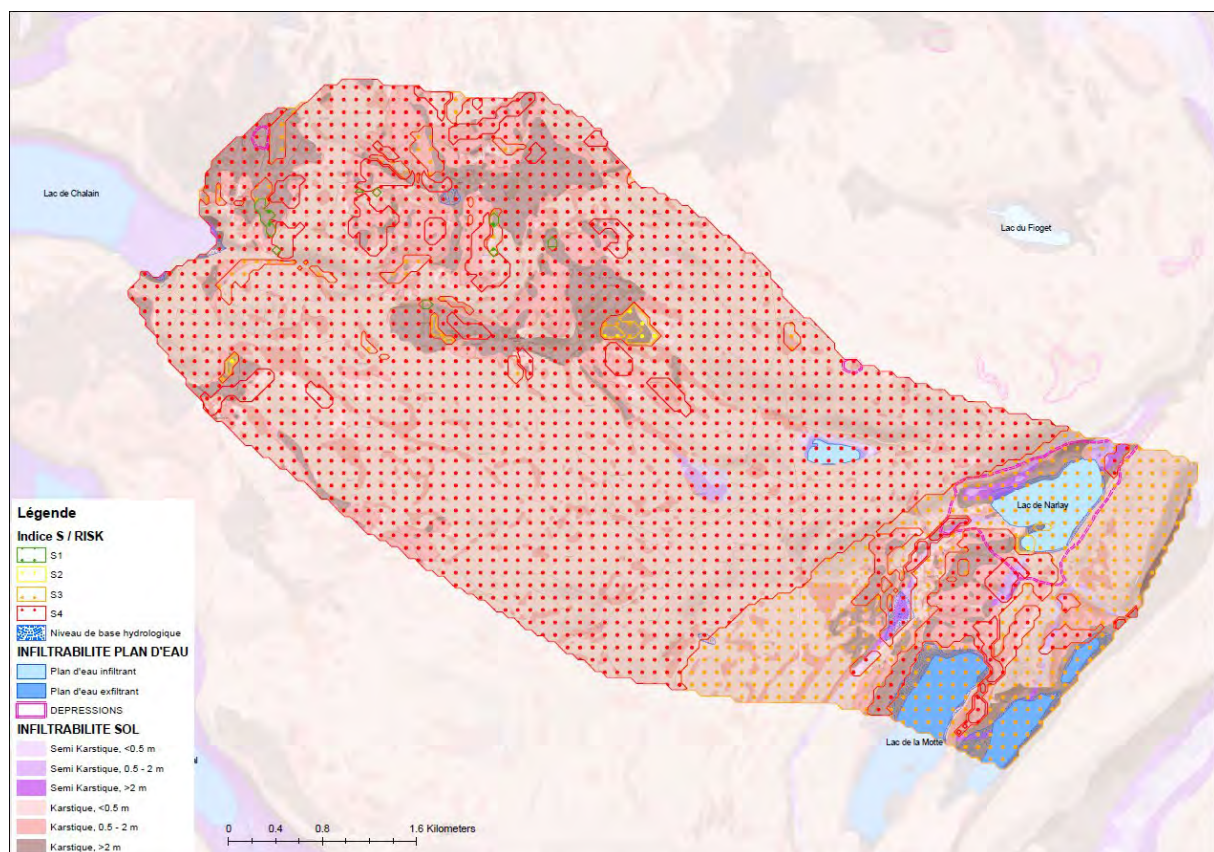


Figure 17. Superposition de la carte d'indice **S** (RISK) et de la carte du karst.

Les observations sont les suivantes :

- La discrétisation des classes d'indice **S** est plus grossière que celle de l'EC. En effet, les données sources utilisées pour l'établissement de l'indice S sont d'échelle plus large (1/110'000 par exemple pour le référentiel agronomique, 1/50'000 pour la carte géologique) alors que les classes d'EC sont établies sur la base de données d'échelle plus fine. Par ailleurs, les plans d'eau ne sont pas extraits de la classification de l'indice S...
- A première vue, la cohérence entre les classes d'indice S et les classes d'EC est respectée dans les 3/4 ouest du bassin. Les « patches » S1 et S2 correspondent à des secteurs EC cartographiés comme plus épais (couverture > 2 m) : région est et ouest de Chevrotaine, région est et nord de Fontenu, région nord et sud de Saffloz, région nord de Songésou, etc. Deux régions montrent des patches d'EC élevés : la région est de Saffloz et la région nord-est de Chevrotaine, qui n'apparaissent pas comme tel sur

la carte des indices S. Ces zones sont considérées comme S4, donc d'épaisseur très fine et certainement très perméable, ce qui est par ailleurs contradictoire avec la cartographie de l'indice « I » (cf. § 6.2) qui fait ressortir ces zones comme à fort potentiel d'infiltration en raison du replat topographique.

- Dans la région 1/4 est du bassin, la carte d'indices S affiche une majorité de classe S3 sur les flancs topographiques et S4 dans les zones basses topographiques, typiquement la zone est du Frasnois, à la jonction entre les lacs de Narlay et de la Motte. A l'inverse, la carte du karst affiche des classes EC de faible épaisseur sur les flancs topographiques et des indices plus épais dans la région entre les deux lacs. A cet endroit, bien que les découpages de classes se superposent assez bien, il y a une incohérence entre les deux jeux de données. En principe, on pourrait s'attendre à ce que la zone basse à l'est du Frasnois, entre les deux lacs, soit une zone à couverture plus épaisse - d'autant qu'il s'agit d'une zone de culture (RGP) aux reliefs morphologiquement très adoucis. Au regard de ces informations, les classes EC proposées par la carte du karst sembleraient plus appropriées - mais il reste souhaitable de vérifier sur site.

## 6.2. Comparaison Indice I (RISK) vs. Epaisseur Couverture (méthode Carte Karst)

L'indice « I » de la méthode RISK caractérise les conditions d'infiltration en terrain karstique en fonction de la pente topographique et de la présence de pertes. Les principes d'infiltration et les classes associées (« I0 » à « I4 », I4 étant la plus infiltrante et donc la plus vulnérable) sont les suivants :

- Plus la pente est faible et plus les conditions d'infiltration sont élevées. Les pentes « très fortes » (> 50%) ont un indice « I0 », les pentes « fortes (15-50%) un indice « I1 », les pentes modérées (5-15%) et les vallées sèches un indice « I2 » et les pentes faibles (<5%) ou les lapiez, un indice « I3 ».
- L'indice de vulnérabilité le plus élevé « I4 » est assigné aux bassins versants des pertes actives et autres discontinuités (tectoniques et/ou géomorphologiques) qui suggèrent une infiltration totale. A noter que ces zones ne sont pas explicitement distinguées.

La superposition des indices I et des classes d'épaisseur de couverture proposées par la carte du karst (**EC**) est présentée en Figure 18.

Les observations sont les suivantes :

- Les indices I4 épousent les zones de replat topographique, notamment autour des villages de Fontenu, Saffloz, Chevrotaine, Songéson et le Frasnois qui sont caractérisés par des épaisseurs importantes de couverture (> 0.5 voire > 2 m). L'attribution de cet indice I4 suppose qu'une majorité des écoulements de surface est infiltrée en aval à la faveur de pertes karstiques ou d'infiltration diffuse importante. Or, aucun indice géomorphologique sur le terrain ne permet d'attester la présence de pertes aussi importantes.
- Les indices I3 et I2 se superposent aux zones de pentes topographiques, qui sont caractérisées par des épaisseurs de sols / couverture souvent plus faibles
- Il n'existe pas de zones d'indice I1

En l'état, bien que les découpages se superposent correctement entre les deux jeux de données, les informations sont relativement contradictoires dans le sens où les indices RISK

« I » affichent les vulnérabilités les plus élevées dans les zones de replat topographique qui correspondent ici à des zones supposées de couverture épaisse.

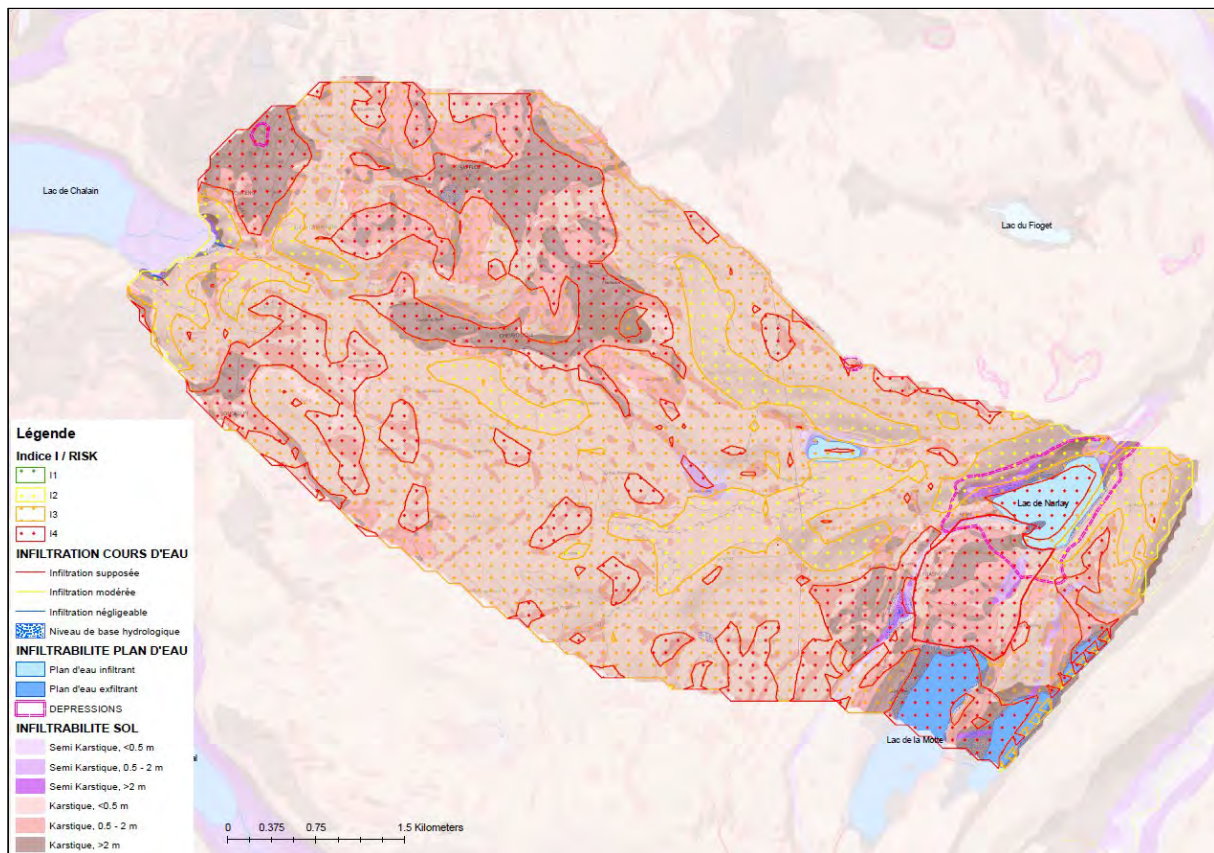


Figure 18. Superposition de la carte d'indice I (RISK) et de la carte du karst.

### 6.3. Comparaison Vulnérabilité (RISK) vs. Epaisseur Couverture (méthode Carte Karst)

La superposition des indices de vulnérabilité de la méthode RISK et des classes d'épaisseur de couverture EC proposées par la carte du karst est présentée en Figure 19.

Les observations sont les suivantes :

- Les découpages entre les indices de vulnérabilité RISK et les classes EC sont relativement cohérents
- En revanche, il apparaît que les indices de vulnérabilité les plus élevés (indices 2.4 à 3.2) se situent sur les zones de classes EC à couverture épaisse, et à l'inverse les indices de plus faible vulnérabilité (inférieurs à 2.4) sur les zones de faible couverture mais en pente (c.à.d. > 5%).

Ainsi, si les découpages semblent cohérents entre les deux jeux de données, les informations semblent s'opposer ! Là où la carte du karst affiche une épaisseur importante de couverture, la méthodologie RISK classe la zone en vulnérabilité élevée. A l'inverse, là où la carte du karst montre l'absence de couverture - et donc des conditions propices à l'infiltration - la méthodologie RISK classe ces zones en vulnérabilité faible.



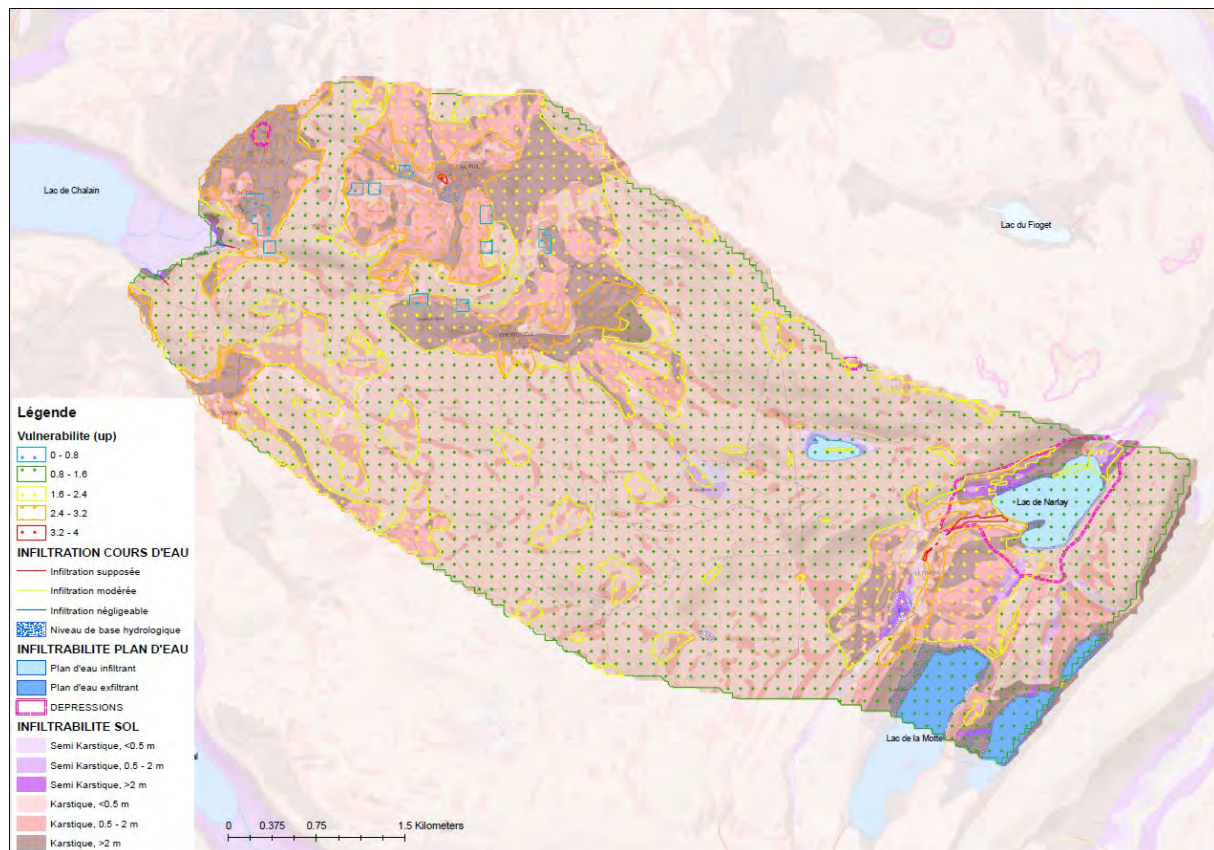


Figure 19. Superposition des indices de la carte de vulnérabilité (RISK) et de la carte du karst

## 7. Comparaison informations IDPR / Carte karst

Dans la même logique que la comparaison avec la carte de vulnérabilité RISK, la carte du karst est comparée avec la cartographie IDPR<sup>1</sup> (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux). Cet indice caractérise l'aptitude des formations du sous-sol à laisser **ruisseler ou s'infiltrer** les eaux de surface. Il se fonde sur l'analyse du modèle numérique de terrain et des réseaux hydrographiques naturels, conditionnés par la géologie (voir rapport BRGM/RP-55311-FR pour méthodologie). La couche cartographique est disponible dans le catalogue des couches et données du BRGM<sup>2</sup>. Elle est valide à l'échelle 1/50'000, soit une échelle comparable à celle de la carte du karst.

La carte IDPR du secteur de Chalain est placée en Figure 20.

Les zones à forte infiltration (indice < 400) couvrent les reliefs du plateau de Chalain. Les indices plus élevés (entre 600 et 1000), synonymes de zones à infiltration / ruissellement comparables couvrent les zones de replat du plateau et les versants au contact des principales vallées. Enfin, les zones à ruissellement important (indice > 1000) voire majoritaire (indice > 1600) se développent dans le fond des principales vallées.

<sup>1</sup> <https://infoterre.brgm.fr/actualites/territoires-favorables-linfiltration-eaux-infoterre-grace-lidpr>

<sup>2</sup> <https://infoterre.brgm.fr/actualites/mise-jour-couche-idpr-indice-developpement-persistance-reseaux>

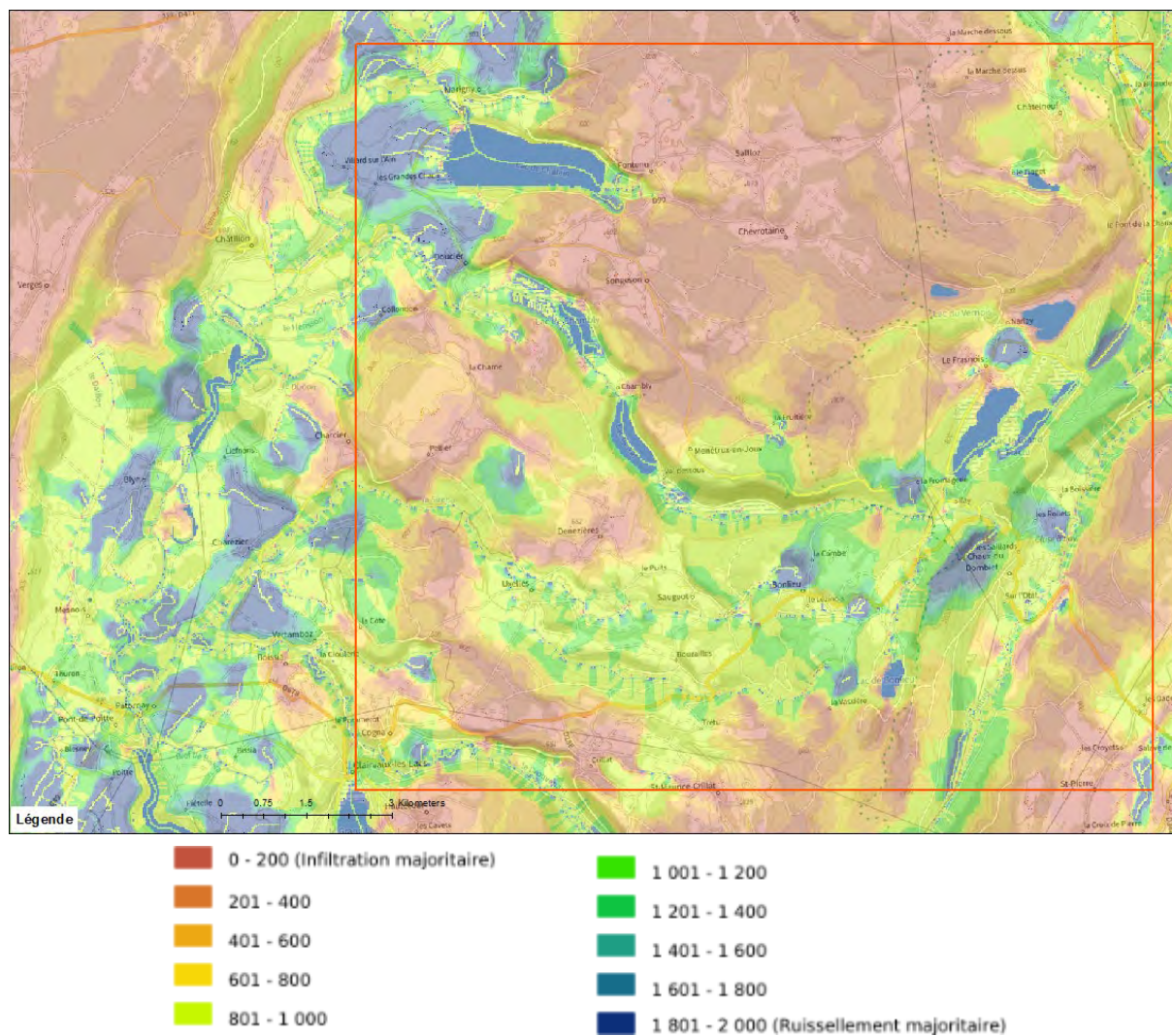


Figure 20. Carte IDPR du secteur de Chalain (échelle 1/50'000)

Pour faciliter la comparaison, le secteur Nord (Figure 21) et le secteur Sud (Figure 22) sont affichés en vis-à-vis avec la carte du karst.

Avant d'entrer dans le détail des comparaisons, quelques remarques générales peuvent être notées :

- L'indice IDPR compare de manière systématique les segments cartographiés de cours d'eau (BD Cours d'Eau ou TOPAGE) avec les fonds de vallées / ravines. La pertinence du calcul dépend de la manière dont les cours d'eau sont cartographiés, surtout en ce qui concerne les cours d'eau temporaires – ce qui est le cas de la majorité des cours d'eau sur le plateau.
- L'indice IDPR considère automatiquement les plans d'eau comme à fort ruissellement. Or, l'analyse de la carte du karst montre que certains plans d'eau sont infiltrants (lac de Narlay, Fioget, etc.) et d'autres exfiltrants. L'indice IDPR doit donc être nuancé sur les plans d'eau.

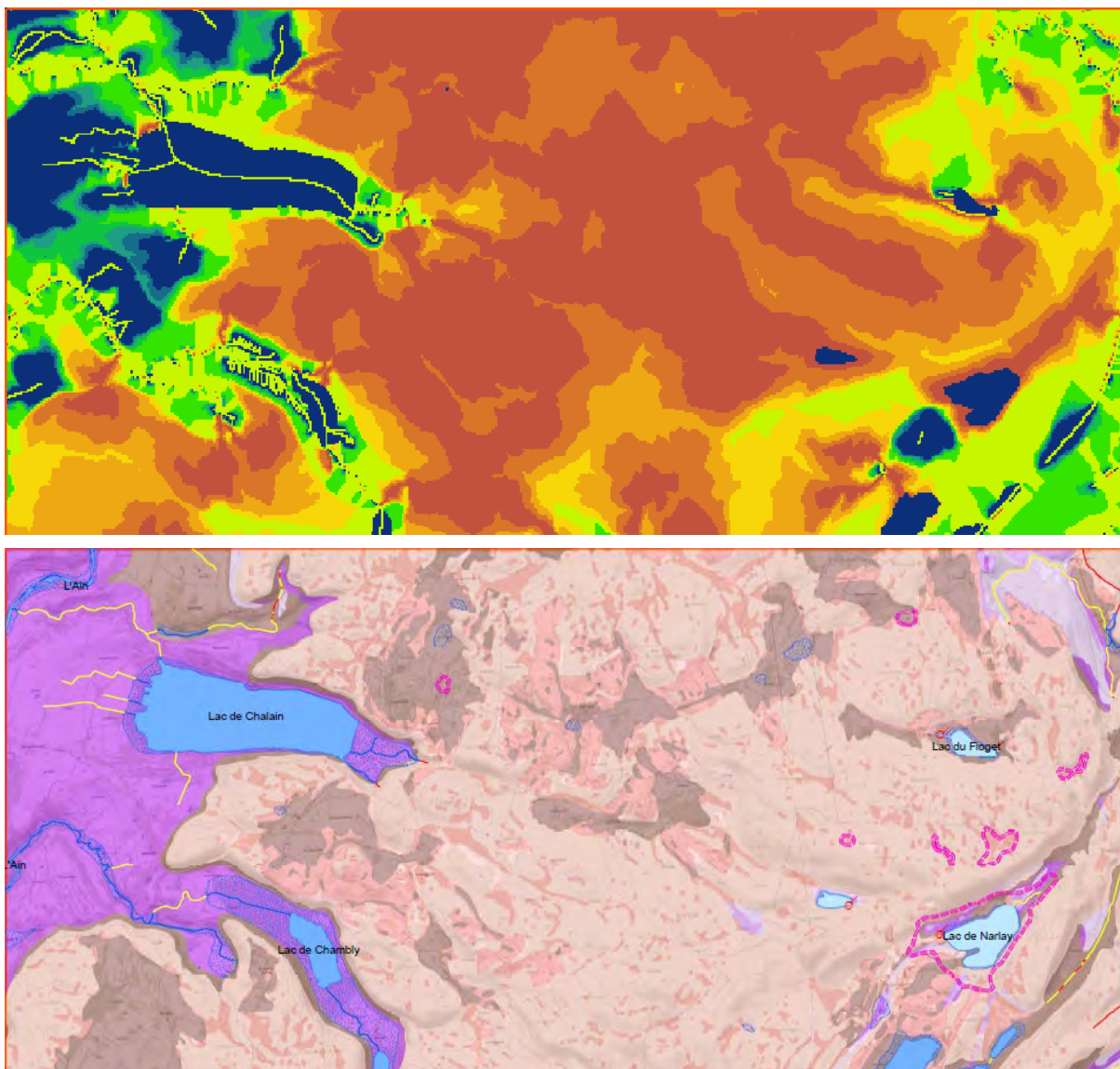


Figure 21. Comparaison carte IDPR et carte du Karst, secteur Nord du plateau de Chalain

La comparaison des informations sur le secteur Nord du plateau de Chalain apporte les informations suivantes :

- A l'ouest, les secteurs à fort indice IDPR (1600 à 1800) concordent avec les zones cartographiées comme semi karstique à couverture > 2 m, donc à ruissellement majoritaire.
- Au nord-est, les secteurs à indice IDPR modérés à forts (1000 à 1400) coïncident avec des zones cartographiées comme semi-karstiques à faible couverture à modérée, donc des zones sur lesquelles l'infiltration est du même ordre de grandeur que le ruissellement.
- Au centre, les indices IDPR sont faibles à très faibles, signes d'une infiltration majoritaire. Ces indices sont cohérents avec les informations de la carte du karst qui cartographie le plateau comme « karstique à faible couverture », donc à infiltration majoritaire.

Si les grands traits sont cohérents, dans le détail des petites différences peuvent apparaître. Ainsi, des zones du plateau sur lesquelles la couverture peut être plus épaisse (plus de 2 m dans les secteurs de Fontenu, Saffloz et Chevrotaine) ne ressortent pas différenciées à l'IDPR – certainement en raison de l'absence de cours d'eau.

La plus grande différence se situe plutôt dans le coin sud-est, entre le lac du grand Maclu et la Boissière. L'IDPR cartographie le secteur comme à ruissellement important (>50%) alors que la carte du karst indique des formations karstiques à l'affleurement, sans couverture significative, donc à infiltration majoritaire. Géologiquement et géomorphologiquement, il n'existe pas d'indices qui attestent à cet endroit d'un ruissellement différencié...

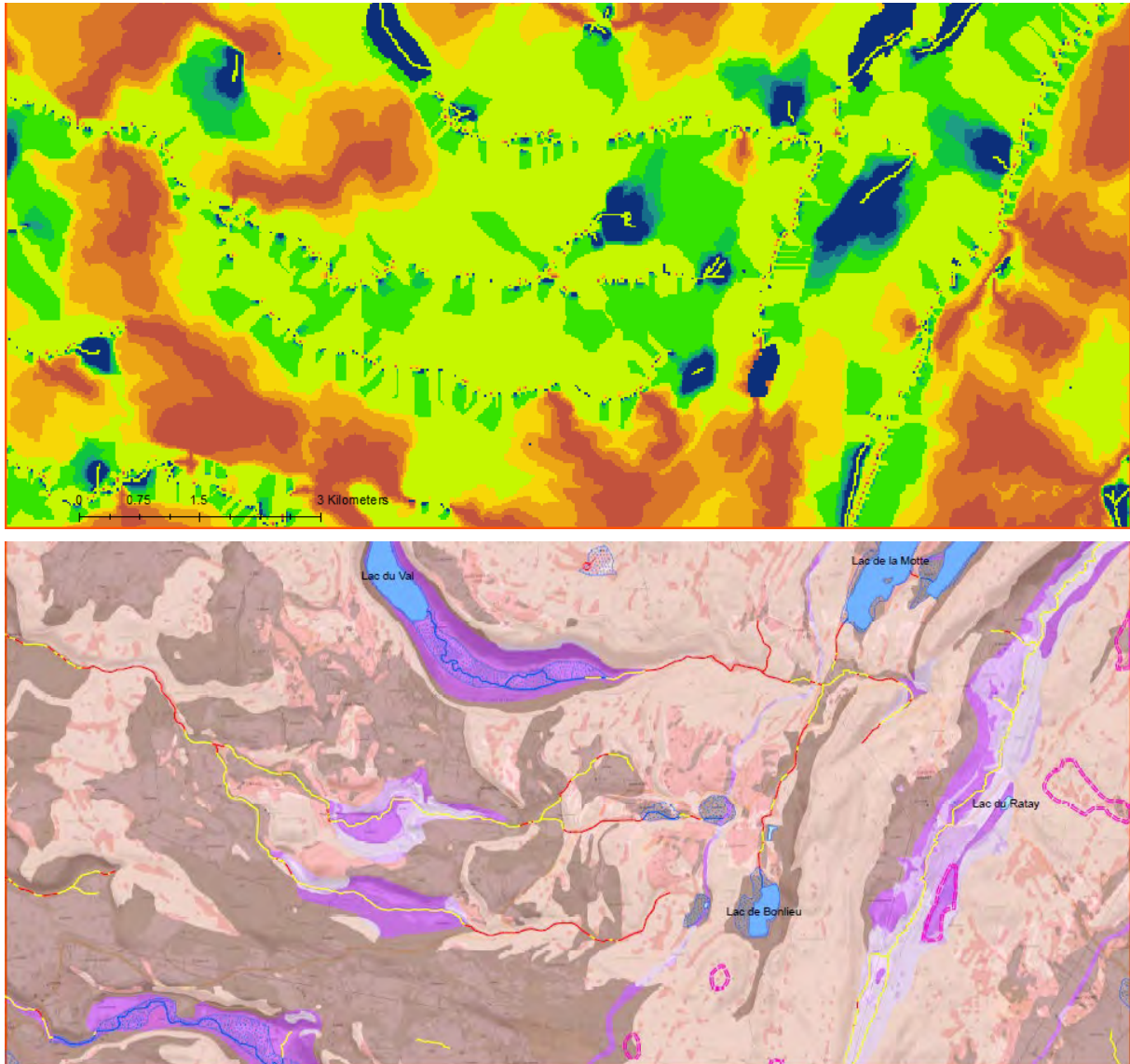


Figure 22. Comparaison carte IDPR et carte du Karst, secteur Sud du plateau de Chalain

La comparaison des informations sur le secteur Sud du plateau de Chalain apporte les informations suivantes :

- A l'ouest, les indices IDPR sont assez morcelés. La vallée du Drouvenant ressort comme à ruissellement majoritaire comme c'est le cas sur la carte du karst. En bordure de secteur, les indices IDPR sont modérés à forts (1000 à 1400) et coïncident avec des zones cartographiées comme karstiques à l'affleurement, sans couverture.
- A l'est, les versants en rive droite du Dombief montrent des indices IDPR très faibles (<400) signes d'une infiltration majoritaire. Ces indices sont cohérents avec les informations de la carte du karst qui cartographie la zone comme « karstique à faible couverture », donc à infiltration majoritaire. Dans le détail, la zone de replat

cartographiés en IDPR 800-1000 coïncide grossièrement avec la zone à formation de couverture plus épaisse (>2 m)

- Au centre, le secteur en amont de la Sirène, entre les deux affluents, montre des indices IDPR entre 800 et 1000, ce qui est plus ou moins cohérent avec les zones à couverture épaisse (> 2 m) cartographiées. Tout en amont, près du lac de Bonlieu, l'IDPR montre des patches à fort ruissellement qui coïncident avec des zones d'artésianisme notées sur la carte du karst.

En ce qui concerne les différences, l'écart principal se situe à l'extrême amont du cours d'eau Hérisson, où l'IDPR fait apparaître un patch à 1800 alors que la carte du karst ne cartographie pas de formations particulières et considère cette section comme majoritairement infiltrante. Cette différence ne peut être expliquée à l'état actuel des connaissances.

## 8. Discussion

A première vue, les informations portées par la carte du karst et la carte d'épaisseur des formations de couverture semblent cohérentes avec les connaissances de terrain.

Certains points doivent cependant être relevés :

- La **résolution** de la carte du karst est limitée par celle de la carte géologique (1/50'000). Cette dernière est le facteur limitant dans la précision. En effet, toutes les autres informations sont au 1/25'000. Une re-discrétisation de la carte géologique au 1/25'000 permettrait d'obtenir des informations considérablement plus détaillées. Il peut toutefois s'agir d'un travail considérable selon les régions !
- La carte des **épaisseurs de formations de couverture** (sols + formations quaternaires) a fait l'objet d'une **comparaison** avec des données d'épaisseurs de sols obtenues par campagne de sondages à la tarière (Chambre d'Agriculture du Jura) qui a permis de partiellement vérifier les épaisseurs discrétisées. Dans le futur, d'autres campagnes de vérification pourraient être menées à des endroits clefs du secteur d'étude pour lever certaines incertitudes. A noter que la méthodologie adaptée sur France ne propose pour l'instant pas de discrétisation pour les formations de couverture supérieures à 2 m. A voir s'il est nécessaire de compléter la méthodologie pour proposer des classes du type 2 – 5 m, 5 – 10 m, > 10 m, etc.
- **L'inventaire proposé par la BD cours d'eau** ne présente pas tous les cours d'eau visibles sur la carte topographique 1/25'000 - et notamment les tronçons notés comme temporaires) - ce qui enlève des informations intéressantes sur l'infiltrabilité. La couche « Cours d'eau » de la BD TOPAGE® est plus appropriée car elle inventorie tous les cours d'eau au 1/25'000 (permanents et temporaires). A noter que dans le cas de Chalain, en l'absence de BD TOPAGE® au début de l'étude, l'inventaire de la BD cours d'eau a été complété (à la main) des cours d'eau temporaires et ainsi être comparable à la BD TOPAGE®.
- En l'absence de zones non karstiques, aucune **surface allochtone** n'a été cartographiée. Il faut toutefois noter, dans le cadre d'applications futures sur d'autres secteurs, que la BD Carthage ne fournit des délimitations que pour de bassins versants de grandes dimensions (plusieurs dizaines de kilomètres carrés). Ici encore, il est préférable d'utiliser dans le futur la couche « Bassin Versant Topographique » du jeu de données de la BD TOPAGE® qui permet une discrétisation plus fine (quelques kilomètres carrés) pour la cartographie des surfaces allochtones.

En ce qui concerne la comparaison entre la **carte du karst** et la **carte de vulnérabilité** (méthode RISK) proposée sur le bassin d'alimentation des sources de Fontenu et du Moulin, les observations montrent que les indices de vulnérabilité les plus élevés coïncident avec les zones où les épaisseurs de couverture sont les plus élevées (aussi bien sur la carte du karst

que sur la couche d'indices « **S** » qui sont cohérentes entre elles). La différence vient surtout de la couche d'indices « **I** » qui considère les surfaces de faible pente comme beaucoup plus vulnérables que les surfaces de pentes élevées. Cette considération est discutable dans le sens où en milieux karstiques, même si le terrain montre des pentes assez, jusqu'à 50%, l'absence de cours d'eau et/ou de ravines érodées montre toujours des conditions d'infiltration élevées et donc une vulnérabilité potentiellement élevée. Ces observations doivent faire l'objet d'une discussion car en l'état les résultats sont partiellement contradictoires. **A noter que la méthode EPIK (Doerfliger and Zwahlen [1998]) a été récemment révisée pour justement corriger un biais similaire d'évaluation...**

En ce qui concerne la comparaison entre la **carte du karst** et la carte des **indices IDPR**, il faut noter que les informations sont globalement cohérentes. Les secteurs majoritairement infiltrant, et respectivement exfiltrant, sont cohérents sur les deux cartes. Des écarts apparaissent toutefois localement entre les deux informations. Une analyse plus détaillée des étapes d'établissement de l'indice IDPR permettrait de discuter ces écarts.

## 9. Conclusion

L'ISSKA a établi une carte du karst et une carte d'épaisseur des sols sur le secteur du lac de Chalain (39) à l'échelle 1/50'000 sur mandat du Conseil Départemental du Jura.

Ces cartes sont présentées en Annexe C et Annexe D. Elles ont été établies sur la base de données officielles et disponibles sur le territoire français. La carte d'épaisseur des formations de couverture permet de différencier l'infiltrabilité selon l'épaisseur supposée de la couverture (trois classes : 0-0.5 m, 0.5-2 m et > 2 m) et la nature des formations rocheuses à l'affleurement ou sous-jacentes (karstiques, semi-karstiques, non-karstiques).

Les informations portées sur ces cartes sont utiles pour la gestion du territoire (aménagement, patrimoine, etc.), la gestion des pratiques (agriculture, infiltration des eaux, etc.) et la protection des eaux souterraines.

Les étapes d'exécution sont décrites les unes après les autres ainsi que les résultats intermédiaires. Le rendu est discuté sur le plan de la cohérence et des limitations.

Une comparaison des résultats de la carte du karst avec la carte de vulnérabilité (RISK) établie en 2013 sur le bassin d'alimentation des sources de Fontenu et du Moulin a été réalisée. Les observations montrent des cohérences sur certaines couches (notamment la couche « **S** ») mais des divergences dans la zonation de la vulnérabilité, essentiellement du fait des indices de la couche « **I** » (infiltration) dont les principes de zonation doivent être discutés car à ce stade les résultats avancés sont partiellement contradictoires.

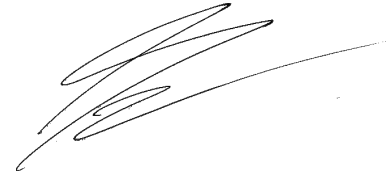
Une comparaison des résultats de la carte du karst avec la carte des indices IDPR montre une bonne cohérence entre les informations obtenues via deux méthodologies différentes mais avec sensiblement les mêmes données de base. Des écarts apparaissent toutefois localement et mériteraient d'être éclaircis en étudiant les étapes d'établissement des indices IDPR.

La carte des épaisseurs des formations de couverture (sols + formations quaternaires) a été comparée aux données de sondages à la tarière réalisés par la Chambre d'Agriculture du Jura ont permis une validation partielle de la méthodologie. En effet, les sondages à la tarière ont certaines limitations (localisation sur des parcelles agricoles seulement, profondeur d'investigation réduite, faible densité, etc.) qui impliquent que les résultats ne peuvent être considérés que comme des profondeurs (autrement dit des épaisseurs) minimales. Sur la base de ces observations (et d'autres données par les quelques sondages « profonds »), les données de sondages à la tarière ne contredisent par la méthodologie – mais ne la valident que partiellement.

En parallèle à cette note d'application, une note technique méthodologique est rédigée (ISSKA [2021]). Elle décrit en détail les aspects méthodologiques de l'établissement des cartes du karst sur le territoire français (sources de données, principes d'établissement, échelle d'exécution, rendus graphiques, etc.).

Les résultats sont transmis au CD 39 sous forme de cartes et de fichiers SIG. Les données SIG sont décrites en Annexe A.

Arnauld Malard, Dr. Hydrogéologue  
La Chaux-de-Fonds, le 25.01.2022



## 10. *Références bibliographiques*

AE RMC (2013) Identification des ressources karstiques majeures pour l'AEP en vue de leur protection sur une partie du massif du Jura, sept. 2013, unpubl. rep. Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, délégation de Besançon, 34 Rue de la Corvée, 25000 Besançon.

AE RMC (2013) Identification des ressources karstiques majeures pour l'AEP en vue de leur protection sur une partie du massif du Jura, sept. 2013. Volume n°4 : Méthodologie de la cartographie de la vulnérabilité RISK, unpubl. rep. Agence de l'Eau Rhone Méditerranée Corse, délégation de Besançon, 34 Rue de la Corvée, 25000 Besançon.

Doerfliger N, Zwahlen F (1998) Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique, unpubl. rep. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Berne, Suisse.

Gallant JC, Dowling TI (2003) A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12): 1347 p.

ISSKA (2021) Carte du karst | France. Méthodologie d'établissement. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse - rapport non publié - mandant: Conseil Départemental du Jura, 39000 Lons-le-Saunier. p.

## Annexe A. Architecture de la base de données GIS

La base de données initiale est construite sous ArcGIS. Elle est du type File Geodatabase .gdb. La structure de la base de données est présentée en Figure 20. Un projet ArcGIS .mxd est délivré avec les produits vectoriels (« \_Carte\_Karst\_Chalains\_DELIVRABLES.mxd »).

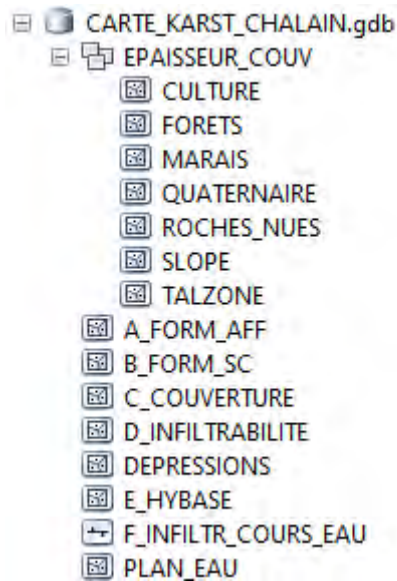


Figure 23. Structure de la base de données des informations / produits vectoriels de la carte du karst et d'épaisseur de la couverture.

Figure 21).

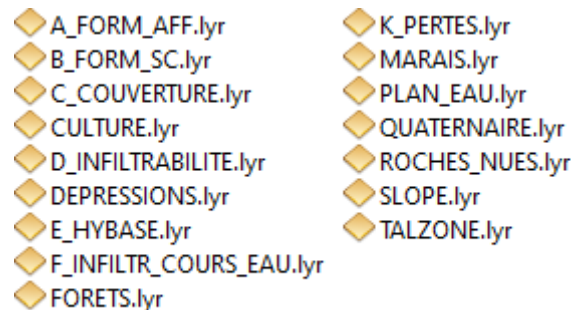


Figure 24. Fichiers .lyr utilisés pour le rendu graphique

La description des champs attributaires pour chaque fichier de forme est placée dans les tableaux suivants.

Champ	Description
NAME	Nom de la perte
X	Coordonnées X de la perte [RGF 1993 Lambert 93]
Y	Coordonnées Y de la perte [RGF 1993 Lambert 93]

Table 7. Champs attributaires du fichier de forme « K\_PERTES » [POINTS]



Champ	Description
ALIM_KARST	Infiltration du cours d'eau : -9999 = indéterminé 1 = Infiltration supposée 2 = Infiltration modérée 3 = Infiltration négligeable

Table 8. Champs attributaires du fichier de forme « F\_INFILTR\_COURS\_EAU » [POLYLINES]

Champ	Description
HYDROBASE	Affleurement du niveau de base hydrologique 1 = Affleurant 0 = Non affleurant

Table 9. Champs attributaires du fichier de forme « E\_HYBASE » [POLYGONS]

Champ	Description
INFILTRABILITE	Plan d'eau infiltrant / exfiltrant 1 = Plan d'eau infiltrant 0 = Plan d'eau exfiltrant
NOM	Nom du plan d'eau

Table 10. Champs attributaires du fichier de forme « PLAN\_EAU » [POLYGONS]

Champ	Description
DEPRESSION	Dépression karstique 1 = Dépression

Table 11. Champs attributaires du fichier de forme « DEPRESSIONS » [POLYGONS]

Champ	Description
PROP_AFF	Propriété du rocher à l'affleurement -9999 = indéterminé K = Karstique SK = Semi-karstique NK = non karstique Q = Quaternaire

Table 12. Champs attributaires du fichier de forme « A\_FORM\_AFF » [POLYGONS]

Champ	Description
PROP_SC	Propriété du rocher sous couverture -9999 = indéterminé I_K = Karstique sous couverture I_SK = Semi-karstique sous couverture

Table 13. Champs attributaires du fichier de forme « B\_FORM\_SC » [POLYGONS]

Champ	Description
INFILTR	Propriété d'infiltrabilité -9999 = indéterminé 1 = K, < 0.5 m 2 = K, 0.5 - 2 m 3 = K, > 2 m 4 = SK, < 0.5 m 5 = SK, 0.5 - 2 m 6 = SK, > 2 m 4 = NK 1 = K, < 0.5 m 2 = K, 0.5 - 2 m 3 = K, > 2 m 4 = SK, < 0.5 m 5 = SK, 0.5 - 2 m 6 = SK, > 2 m 7 = NK

Table 14. Champs attributaires du fichier de forme « D\_INFILTRABILITE » [POLYGONS]

Champ	Description
EPAISSEUR	Classes d'épaisseur des formations de couverture -9999 = indéterminé 1 = 0 – 0.2 m 2 = 0.2 – 0.5 m 3 = 0.5 – 1 m 4 = 1 – 2 m 5 = > 2 m

Table 15. Champs attributaires du fichier de forme « C\_COUVERTURE » [POLYGONS]

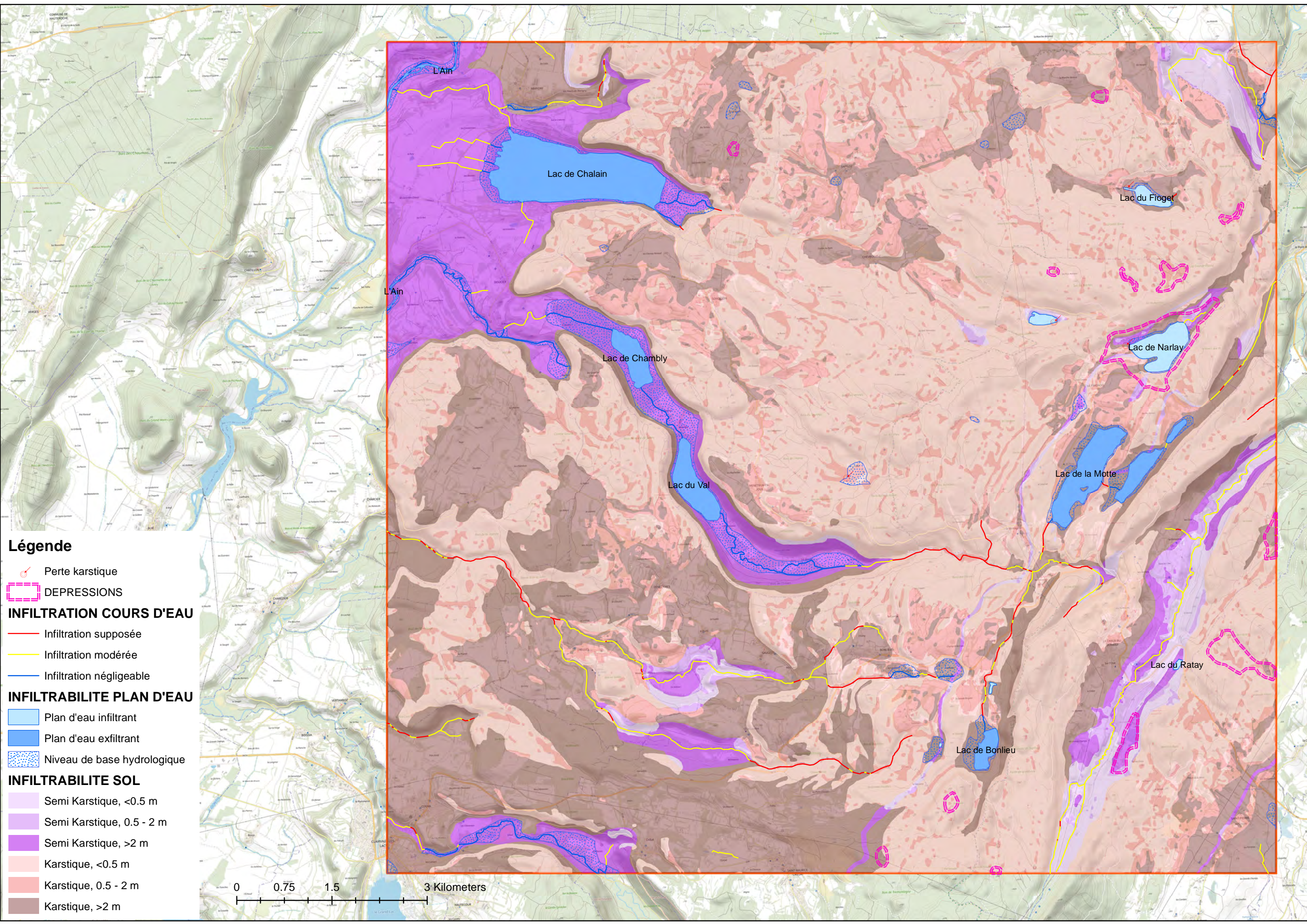
Un .shp file délimitant le périmètre du projet est fourni avec les informations SIG (« PERIMETRE\_CHALAIN.shp »).





**Annexe B. Formations karstiques à l'affleurement**

CODE	NOTATION	DESCRIPTION	PROP_AFF
2	E-S	Eboulis, groise	Q
19	Fz	Alluvions récentes (actives ou stabilisées) indifférenciées, graviers, sables, argiles	Q
23	FzT	Tourbes et alluvions lacustres associées	Q
25	Fx-y	Alluvions anciennes en terrasses non datées, graviers, sables, silts, argiles	Q
28	Fy1	Graviers, sables, silts, argiles (terrasse haute : +27/+32 m) (Würm),	Q
29	FG	Alluvions fluvio-glaciaire indifférenciées	Q
32	Py	Cône de déjection inactifs, graviers de pieds de monts, éboulis (Würm)	Q
36	GyJ	Moraines (à blocs) à éléments jurassiens (Würm)	Q
40	GLy2	Rythmites varvées glacio-lacustres (Würm)	Q
66	g-m	Conglomérats grossiers calcaires du Jura (Gompholites) et marnes (brèches de Narlay), (Oligocène-Miocène)	SK
70	g	Conglomérats polygéniques argileux à microcodium (Conglomérat de Dijon) avec marnes saumon, lacustre (Oligocène)	SK
73	c1-4	Calcaires blanchâtres crayeux et argileux, grés (25m), (Cénomaniens-Turonien-Sénonien inférieur)	SK
75	n5-6	Sables verts glauconieux, marnes foncées, calcaires clairs (Aptien-Albien)	SK
76	n4	Calcaires blancs à jaunâtres graveleux, oolithique, récifaux, parfois asphalté (faciès type "Urgonien")(Barrémien)	K
77	n3	Calcaires jaune clair en dalles (Pierre Jaune de Neuchâtel) et marnes gris bleu pâteuses à Exogyra couloni (Marnes d'Hauterive), (Hauterivien)	K
78	n2	Calcaires en dalle, roux à limonite (Complexe des calcaires roux, Limonite de Métabief), marnes grises à bleuâtres (Marnes d'Arzier, Marnes de Censeau), calcaires en barres épaisses avec marno-calcaires (Marbre bâtard) (15-30m) (Valanginien)	K
79	n1	Calcaires fétides, dolomitiques, brèches à cailloux noirs, argiles verdâtres, marnes claires, dolomies et gypse (Purbeckien, Berriasien)	SK
83	j7	Calcaires à tubulures café-au-lait flammés (à Gravesia) (couche de Chailley) à la base, calcaires dolomitiques lacustres au sommet (Tithonien)	K
87	j6a1	Calcaires noduleux glauconieux ou fins et marnes (à Ptéroceras) (Kimmeridgien sup., Ptérocérien)	K
90	j5c-6aS	Calcaires graveleux plus ou moins crayeux, gréseux et marnes (Pierre blanche de Risoux, marnes et calcaires de Besançon), (faciès Séquanien indifférencié, Oxfordien sup.-Kimmeridgien inf.)	K
99	j5bA	Marnes et marno-calcaires (couches d'Effingen et du Geissberg), Astarte, calcaires hydrauliques et couches à sphérites (de Champagnole) (faciès Argovien, Oxfordien moyen)	SK
103	j3-4	Calcaires (Callovien inférieur et Bathonien non différenciés)	K
104	j4	Marnes, calcaires argileux, "Dalle nacré", lumachelles, calcaire oolithique ferrugineux, phosphates, pseudo-brèche, lacune (Callovien)	SK
105	j4c	Marnes et calcaires argileux, oolithes ferrugineuses, niveaux à fossiles phosphatés, pseudo-brèche, lacunes (Callovien sup.)	SK
107	j3	Calcaires compacts "comblanchoïdes", ou bicolores, calcaires oolithiques spathiques, marnes, calcaires à Momies, calcaire à silex, (Choin)(Bathonien)	K
110	j2c-3	Calcaires (Bajocien supérieur-Bathonien indifférenciés)	K
112	j2b	Calcaires oolithiques (Grande oolithe, calcaires de Courbouzon) à entroques, petites huîtres, marnes à O. acuminata, (Vésulien), subfurcatum, garantiana, parkinsoni, lacunes (Bajocien sup.)	K
113	j2a	Calcaires à entroques au nord, polypiers, calcaires à silex (-de Messia), calcaires spathiques (à Sowerby) (Bajocien inf.)	K

Table 16. Index karst des formations rocheuses à l'affleurement (entités de la notice géologique 1439).

**Annexe C. Carte du karst 1/50'000**



- Légende**
-  Perte karstique
  -  DEPRESSIONS
  - INFILTRATION COURS D'EAU**
  -  Infiltration supposée
  -  Infiltration modérée
  -  Infiltration négligeable
  - INFILTRABILITE PLAN D'EAU**
  -  Plan d'eau infiltrant
  -  Plan d'eau exfiltrant
  -  Niveau de base hydrologique
  - INFILTRABILITE SOL**
  -  Semi Karstique, <0.5 m
  -  Semi Karstique, 0.5 - 2 m
  -  Semi Karstique, >2 m
  -  Karstique, <0.5 m
  -  Karstique, 0.5 - 2 m
  -  Karstique, >2 m

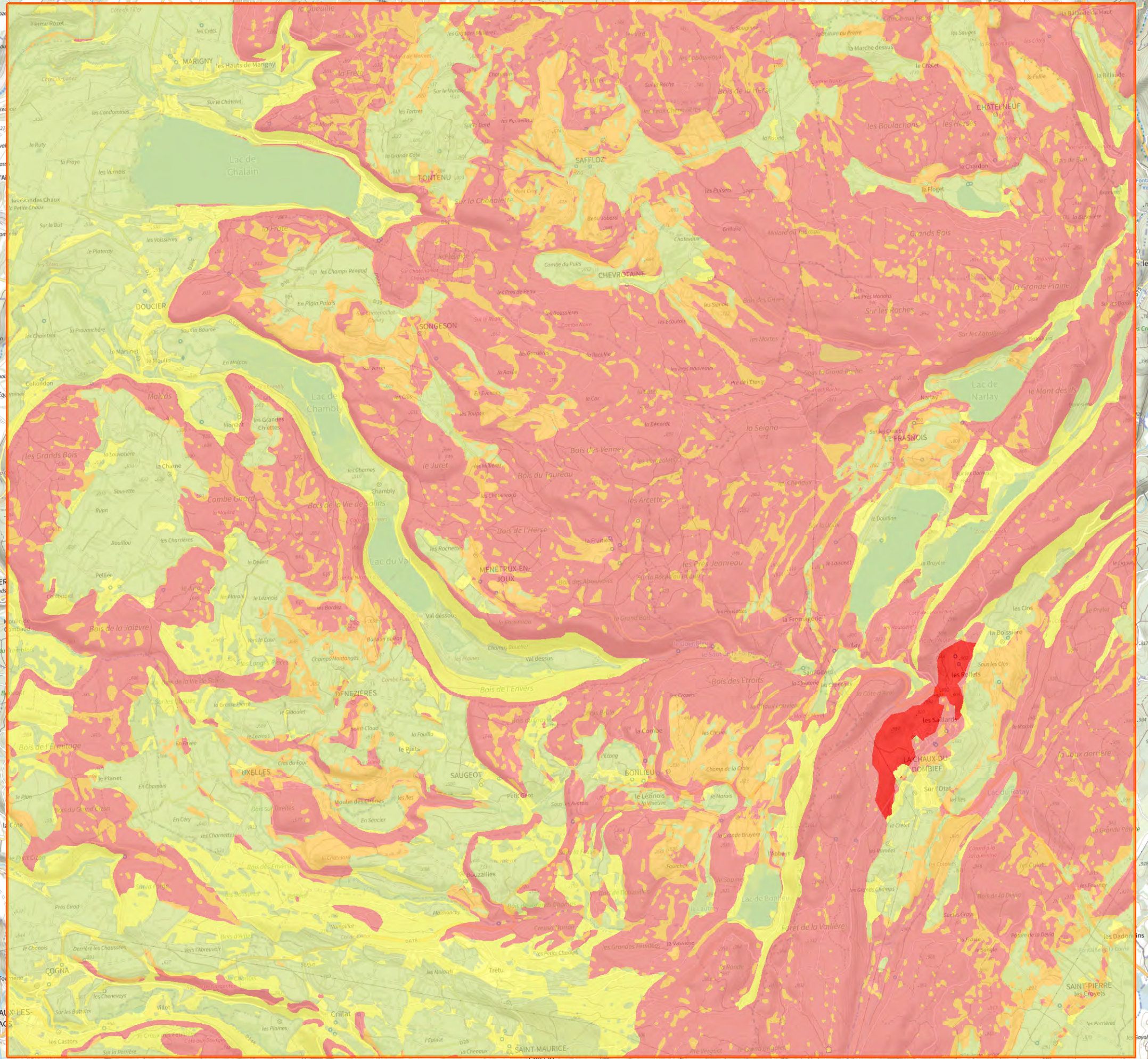


**Annexe D. Carte Epaisseur de couverture 1/50'000**

# Légende COUVERTURE EPAISSEUR



0 0.75 1.5 3 Kilometers



## Annexe E. Comparaison carte épaisseur couverture et sondages pédologiques

La Chambre d'Agriculture du Jura a fourni un jeu de données de 28 sondages réalisés à la tarière dans le périmètre de la zone d'étude.

Ces sondages sont réalisés à la tarière à main et ont pour but de documenter l'épaisseur des sols et leurs caractéristiques.

Au maximum, ces sondages pénètrent sur 60 cm. Ils s'arrêtent :

- Au contact de la roche en place
- Ou au contact des formations de couvertures (moraines, varves, etc.)
- Ou à la profondeur limite des possibilités offertes par la tarière (en l'occurrence 60 cm dans le cas présent)

A noter que les profondeurs indiquées par les sondages sont des profondeurs « minimales ». En effet, les sondages peuvent buter sur des blocs isolés à faible profondeur ou buter sur des sols trop cohésifs qui ne permettent plus à la tarière de descendre.

3 classes de profondeur sont assignées aux données de sondages : 0 - 0.2 m, 0.2 - 0.5 m, > 0.5 m. Les sondages sont présentés comme des points en surimposition des classes d'épaisseur de couverture (cf. Figure 22).

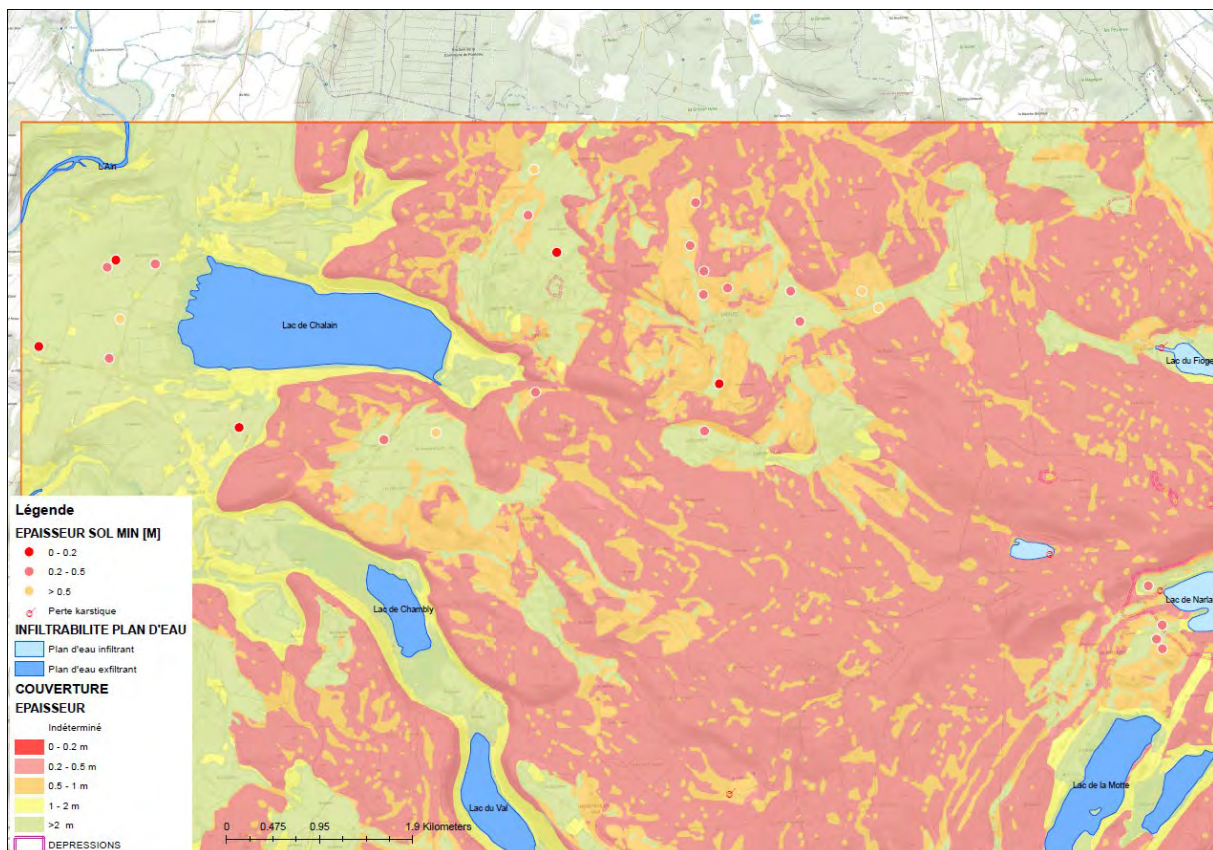


Figure 25. Comparaison carte épaisseurs des formations de couverture et sondages tarière.

A la lecture de la carte, les observations suivantes sont possibles :

- Les sondages à la tarière sont réalisés sur des parcelles agricoles seulement, c.à.d. là où les classes d'épaisseur de couverture discrétisées par l'ISSKA dépassent 0.5 m. Il n'existe pas de sondages dans les zones caractérisées par l'ISSKA comme à faible épaisseur de couverture (c.à.d. < 0.5 m).
- Aucun sondage à la tarière n'indique une épaisseur de sol supérieure à l'épaisseur discrétisée par l'ISSKA.



- A l'exception de 5 sondages qui indiquent des épaisseurs > 0.5 m, cohérentes avec la discrétisation ISSKA, les autres ont tendances à présenter des épaisseurs plus faibles. Une majorité des sondages indique une épaisseur de sols comprise entre 0.2 et 0.5 m, sur des terrains que l'ISSKA avait qualifié de plus épais (au moins supérieurs à 0.5 m, voir supérieurs à 2 m par endroit)
- 5 sondages indiquent des épaisseurs de sols très faibles (< 0.2 m) sur des terrains que l'ISSKA avait qualifié de plus épais. C'est notamment le cas dans la plaine à l'ouest et au sud-ouest du lac de Chalain où 3 sondages sur 6 montrent un sol quasi inexistant (< 0.15 m), ce qui semble relativement surprenant à cet endroit comme en atteste l'activité agricole et la cartographie des moraines quaternaire... Par ailleurs, des forages réalisés dans la plaine montrent des épaisseurs de sols et de formations quaternaires beaucoup plus importantes et composés de limons et d'alternances de galets / graviers (> 10 m pour un sondage à Marigny<sup>1</sup>, > 3 m pour un sondage à l'ouest de Marigny<sup>2</sup>). Au vu de ces observations Il est plus probable que les sondages à la tarière aient buté sur des galets à faible profondeur.

Ainsi, si les sondages à la tarière ne contredisent pas les estimations d'épaisseurs de sols de couverture quaternaire (aucun sondage n'indique une épaisseur plus épaisse que celle discrétisée), ils ne confirment que partiellement les épaisseurs discrétisées, d'autant que tous ces sondages ne sont réalisés que sur des parcelles agricoles où les épaisseurs de sols sont supposées importantes. Aucun sondage n'est réalisé dans les parcelles forestières ou sans occupation.

---

<sup>1</sup> Sondage BSS 05825X0015/T4

<sup>2</sup> Sondage BSS 05825X0030/S10