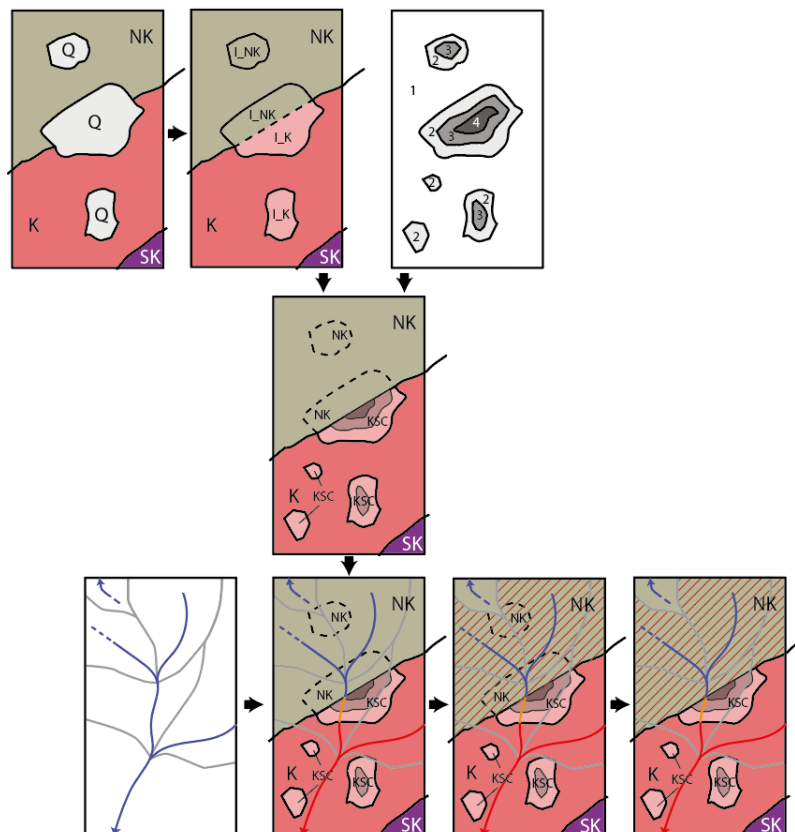


Carte du karst | France

Méthodologie d'établissement



La Chaux-de-Fonds, le 25.01.2022

Titre :	Carte du Karst France. Méthodologie d'établissement
Auteurs :	Arnauld Malard
1 ^{ère} de couverture :	Workflow des principes d'établissement de la carte du Karst
Mandant :	Conseil Départemental du Jura (CD 39), Service Agriculture et Environnement, 17 rue Rouget de Lisle, 39000 Lons-le-Saunier, contact : Claire Renaud
Mots clés :	Karst, carte, infiltration, vulnérabilité, couverture, quaternaire, sol

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

ISSKA (2022) – Carte du Karst | France. Méthodologie d'établissement. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié – Mandant : Conseil Départemental du Jura (CD 39), 39000 Lons-le-Saunier, 25 p.

Carte du karst | France

Méthodologie d'établissement

Table des matières

1.	Résumé.....	6
2.	Introduction	6
3.	Données utiles	7
4.	Carte du karst.....	8
4.1.	Etape A : Index karst des formations rocheuses à l'affleurement	9
4.2.	Etape B : Index karst des formations sous-couverture quaternaire	10
4.3.	Etape D : Carte d'infiltrabilité.....	11
4.4.	Etape E1 : Niveau de base hydrologique	12
4.5.	Etape E2 : Infiltrabilité des cours d'eau et plans d'eau	12
4.5.1.	Infiltrabilité des cours d'eau.....	12
4.5.2.	Infiltrabilité des plans d'eau	13
4.6.	Etape E3 : Bassins endoréiques et surfaces d'alimentation allogéniques	13
4.7.	Autres entités (objets géomorphologiques, points d'eau, etc.)	15
5.	Etape C : Carte épaisseur de la couverture.....	15
5.1.	Couverture quaternaire / QUATERNAIRE.....	16
5.2.	Zones de roches nues / ROCHES_NUES.....	16
5.3.	Zones de fonds de vallées / ZONE_VAL.....	17
5.4.	Pentes / SLOPE.....	17
5.5.	Surfaces agricoles / CULTURE.....	18
5.6.	Forêts / FORETS	18
5.7.	Zones humides / MARAIS.....	18
5.8.	Combinaison des indices, estimation des épaisseurs	19
6.	Layout	19
7.	Conclusion	22
8.	Bibliographie	23

Liste des Figures

Figure 1. Etapes d'établissement de la carte du karst : A. Index karst des formations rocheuses à l'affleurement (K = karstique, NK = non karstique, SK = semi karstique, Q = formations quaternaires de couverture), B. Index karst des formations sous-couverture quaternaire (I_K = karst sous-couverture, I_NK = formations non karstiques sous couverture, etc.), C. Carte d'épaisseur des formations de couverture, D. carte d'infiltrabilité, E. Infiltrabilité des cours d'eau et plans d'eau, F. Surfaces d'alimentation allochtones et carte karst finale.	9
Figure 2. Exemple de zone de sub-artésianisme. En raison de l'affleurement de la nappe karstique, les infiltrations d'eau de surface à travers les formations K, K_SC et Ke ne sont pas possibles.	12
Figure 3. Différences entre plans d'eau exfiltrant (droite), c.à.d. dont la surface libre est plus haute que le niveau de la nappe karstique et infiltrant (gauche), c.à.d. dont la surface libre est à la même altitude voire inférieure au niveau de la nappe karstique.	13
Figure 4. A : cas d'un bassin endoréique ; l'infiltration via le ruissellement des surfaces non karstiques est considérée comme totale , B : cas d'une surface allogénique alimentant des surfaces karstiques en aval ; l'infiltration via ruissellement est considérée comme partielle seulement.	14
Figure 5. Workflow d'évaluation de l'épaisseur des formations de couverture. « CLC » indique que la donnée est obtenue depuis le jeu de données d'occupation des sols (source Corine Land Cover)	16
Figure 6. Extraits de la carte du karst, secteur du lac de Chalain (39). 1 ; surface karstique à l'affleurement (couverture absente ou discontinue), 2 ; surface semi-karstique sous couverture > 2 m, infiltration probable des cours d'eau, 3 ; surface semi-karstique sous couverture > 2 m, en zone d'artésianisme / sub-artésianisme, infiltration négligeable des cours d'eau, 4 ; lac exfiltrant car situé au niveau de base hydrogéologique, 5 ; surface karstique sous couverture > 2 m, 6 ; dépression ou bassin endoréique	20

Liste des Tables

Table 1. Données et informations utiles à l'établissement de la carte du Karst	8
Table 2. Classes d'infiltrabilité des formations rocheuses à l'affleurement (étape A.) : +++ infiltrabilité élevée, ++ infiltrabilité modérée, + infiltrabilité faible, - infiltrabilité nulle.	10
Table 3. Classes d'infiltrabilité des formations sous couverture : ++ infiltrabilité modérée, + infiltrabilité faible, - infiltrabilité nulle.....	10
Table 4. Classes d'infiltrabilité des formations rocheuses à l'affleurement et sous couverture en fonction de la classe d'épaisseur de la couverture.....	11
Table 5. Critères d'assignement des valeurs d'alimentation du karst pour les tronçons des cours d'eau [ALIM_KARST]. L'indice INFILTR renvoie à la Table 4. L'indice HYDROBASE renvoie au §. 4.4.	13
Table 6. Définition des indices du champ [LAC_INFILTR] des entités LAC_K.....	13
Table 7. Valeurs de champs INF_KARST pour les bassins endoréiques et les surfaces allogéniques B_NK	15
Table 8. Classes d'épaisseur des formations de couverture.....	16
Table 9. Critères de combinaison des paramètres pour l'évaluation de l'épaisseur des formations de couverture.....	19
Table 10. Layout de la carte du karst : ordre des layers, symbologies et transparence.	21

Glossaire

Karstique : formation géologique sédimentaire présentant une susceptibilité à la dissolution par l'eau.

Infiltrabilité : caractérise la capacité d'une formation géologique à infiltrer les eaux de surface.

Bassin endoréique : bassin versant de surface formant une morphologie en « cuvette » dans laquelle la totalité des eaux s'infiltrer soit via des pertes diffuses sur l'ensemble du bassin, soit par l'intermédiaire de pertes concentrées qui absorbent un ou plusieurs cours d'eau. La terminologie s'applique ici aux bassins plus grands que 0.1 km². Les formes en cuvette de plus petites tailles sont assimilées à des dolines.

Surface allogénique : surfaces imperméables favorisant majoritairement le ruissellement, voire formant des cours d'eau, dont une part des eaux - voire la totalité – s'infiltrer dans l'aquifère via des pertes diffuses ou concentrées plus en aval. A l'inverse des bassins endoréiques, les surfaces allogéniques ne présentent pas de morphologie en « cuvette » et seulement une partie des eaux est supposée s'infiltrer (rarement la totalité).

Nomenclature SIG

Fichier de formes (.shp file) : [XXX](#)

Champ de la table attributaire : [XXX], ex : [INFILTR_KARST], [ALIM_KARST], etc.

Valeurs de champ : **XX**, ex : **NK**, **SK**, etc.

Carte du karst | France

Méthodologie d'établissement

1. *Résumé*

L'ISSKA a été mandaté par le Conseil Départemental du Jura (CD 39)¹ pour établir une **carte du Karst** au format 1/50'000 sur le secteur du lac du Chalain (ISSKA [2021]).

L'ISSKA a développé une méthodologie pour l'établissement des cartes du karst sur le territoire Suisse, sur la base de jeux de données officiels à l'échelle 1/25'000. Si les principes de cartographie sont applicables sur le territoire français, des adaptations sont nécessaires pour conformer l'approche aux jeux de données officiels en vigueur en France.

Le mandat d'établissement de la carte du karst sur le lac de Chalain est donc complété d'une notice méthodologique qui présente les données nécessaires et les étapes d'établissement de la carte.

2. *Introduction*

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)
- 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).

La méthodologie d'établissement de la carte du karst inclue l'établissement d'une **carte d'épaisseur des formations de couverture** (sols + formations quaternaires). Cette carte est établie sur l'ensemble du secteur d'étude, au format 1/50'000 via la combinaison d'un jeu de données (cf. §. 5)

¹ Contrat 202128-MREN-CR signé le 18 mai 2021, contact : Claire RENAUD

D'autres éléments peuvent être affichées sur la carte :

- Principales sources / pertes karstiques
- Eléments de morphologie karstiques (dolines, cavités), etc.

Les informations de la carte du Karst sont obtenues par traitement SIG de différentes sources de données (cf. §. 3).

La carte du karst renseigne uniquement les propriétés d'infiltration karstique en surface. Elle peut donc être utilisée pour la gestion des pratiques et des environnements de surface (infiltration des eaux, agriculture, épandages, géothermie, etc.). Elle peut par ailleurs être utilisée comme carte indicative de vulnérabilité vis-à-vis des eaux souterraines.

Elle se distingue des cartes hydrogéologiques « classiques » des aquifères karstiques (type Kiraly [1973], Grétilat [1992], etc.). A noter que des cartes d'hydrogéologie karstiques sont maintenant adressées par l'application de KARSYS (Jeannin *et al.* [2013], Malard *et al.* [2014]). Elle se distingue aussi des cartes de géomorphologie karstique (type Paloc [1969], Currens *et al.* [2003], etc.) qui renseigne principalement sur les morphologies karstiques et objets géomorphologiques (vallées sèches, lapiaz, etc.).

Elle se distingue aussi des cartes de vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques (Paprika, RISK, EPIK) dans le sens où elle ne résulte pas d'une pondération de critère (à l'exception des critères utilisés pour l'établissement de la carte d'épaisseur de la couverture) mais d'une interprétation explicite et systématique de la géologie et des éléments hydrologiques et géomorphologiques de surface. En revanche, les informations portées par la carte du karst sont complémentaires à celles des cartes de vulnérabilité et peuvent appuyer son établissement.

Elle se distingue aussi des cartes IPDR¹ dans le sens où elle considère explicitement les environnements karstiques – et notamment les indices hydrologiques de surfaces (plans d'eau infiltrant/exfiltrant, dépressions, niveau de base hydrologique) alors que l'IDPR couvre tous les types d'environnement sans distinctions. Toutefois, la comparaison réalisée sur le site de Chalain (ISSKA [2021]) montre que les informations entre les deux cartes sont globalement cohérentes.

Le temps d'établissement d'une carte du karst au 1/50'000 sur un secteur déterminé est de l'ordre d'une heure pour 3 km², soit un peu plus d'une semaine de travail pour une zone de 100 km². Cette estimation comprend la collecte et la mise en forme des données de base ainsi que la préparation des visuels.

3. Données utiles

Les données et informations utiles pour l'établissement de la **carte du Karst** sont indiquées dans en Table 1. Les principaux fournisseurs de données sont : l'IGN et le BRGM. La colonne de droite indique dans quel paragraphe la donnée est utilisée.

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

Type de données	Paragraphe
Données géologiques vectorielles 1/50'000 ¹	4.1, 4.2
BD TOPAGE® ² : Cours d'eau, Bassins versants topographiques	4.5, 4.5, 4.6
Modèle numérique de terrain [MNT], résolution 1 m ³	5
Données vectorielles du parcellaire agricole (RGP) ⁴	5
Données vectorielles d'occupation du sol (source Corine Land Cover) ⁵	5
Fond topographique IGN, WMS	-

Table 1. Données et informations utiles à l'établissement de la **carte du Karst**.

4. Carte du karst

Le principe d'établissement de la carte du karst repose sur la combinaison de jeux de données spatiales (SIG). Ces données sont mises à disposition par les fournisseurs de données.

La Figure 1 présente le workflow d'établissement à travers les étapes A. à F.

Techniquement, il est souhaitable de structurer les couches (feature layers) dans une base de données SIG de type « .gdb » pour ArcGIS⁶ afin notamment de définir les domaines pour la correspondance des valeurs de champs.

¹ <http://infoterre.brgm.fr/formulaire/telechargement-cartes-geologiques-departementales-150-000-bd-charm-50>

² <https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/237d2617f3377a6b74187a17adc83ee948619b9e>. Ce produit vise à produire le nouveau référentiel hydrographique français, en remplacement du référentiel actuel BD CARTHAGE®.

³ <http://files.opendatarchives.fr/professionnels.ign.fr/rgealti/>

⁴ <https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html#rpg>

⁵ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>

⁶ Les étapes suivantes sont décrites sur la base d'une utilisation ArcGIS (ArcMap). Des outils similaires sont disponibles sous QGIS ou MapInfo. Ils seront listés lorsqu'ils sont connus.

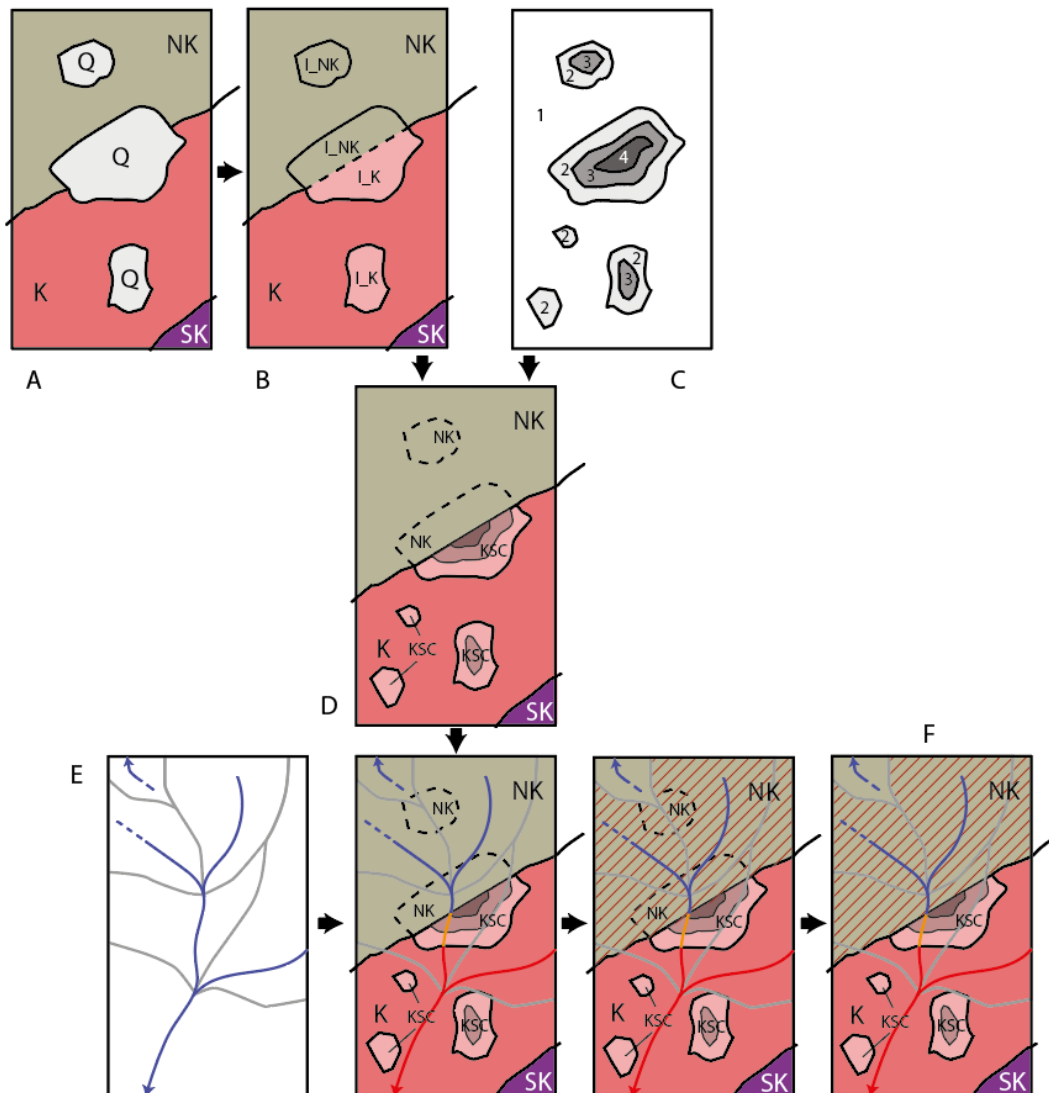


Figure 1. Etapes d'établissement de la carte du karst : A. Index karst des formations rocheuses à l'affleurement (K = karstique, NK = non karstique, SK = semi karstique, Q = formations quaternaires de couverture), B. Index karst des formations sous-couverture quaternaire (I_K = karst sous-couverture, I_NK = formations non karstiques sous couverture, etc.), C. Carte d'épaisseur des formations de couverture, D. carte d'infiltrabilité, E. Infiltrabilité des cours d'eau et plans d'eau, F. Surfaces d'alimentation allochtones et carte karst finale.

A noter que la carte d'épaisseur de la couverture peut être établie indépendamment de la carte du karst. Les étapes d'établissement sont donc présentées en §. 5.

4.1. Etape A : Index karst des formations rocheuses à l'affleurement

Les formations géologiques à l'affleurement (POLYGONS) sont extraites de la carte géologique 1/50'000 vers un nouveau fichier de forme (.shp file POLYGON) et sont complétées d'un champ attributaire qui caractérise l'infiltrabilité à l'affleurement [PROP_AFF].

Six classes d'infiltrabilité sont définies en fonction du type de lithologie (Table 2). Les entités quaternaires sont isolées à ce stade. Elles seront caractérisées à l'étape 2 (§. 4.2).

Infiltrabilité à l'affleurement [PROP_AFF]	Type de lithologie	Symbole	Degré d'infiltrabilité
Indéterminé (Ind.)		-9999 / Ind.	
Formations karstiques à l'affleurement (K)	Calcaires, dolomies, calcaires marneux, craies	1 / K	+++
Formations partiellement karstiques à l'affleurement (SK)	Marnes et marno-calcaires	2 / SK	++
Formations d'évaporites karstifiées à l'affleurement (Ke)	Formations évaporitiques ou salines : halite, anhydrite, sylvine, etc.	3 / Ke	+++
Formations non karstiques à l'affleurement (NK)	Formations non solubles : sédiments clastiques, roches cristallines, etc.	4 / NK	-
Formations de recouvrement quaternaire (Q)		5 / Q	?

Table 2. Classes d'infiltrabilité des formations rocheuses à l'affleurement (étape A.) : +++ infiltrabilité élevée, ++ infiltrabilité modérée, + infiltrabilité faible, - infiltrabilité nulle.

Il est envisageable d'automatiser l'assignement des classes d'infiltrabilité aux lithologies des lexiques et référentiels du RGF¹.

4.2. Etape B : Index karst des formations sous-couverture quaternaire

Les entités quaternaires (**Q**) sont copiées vers un nouveau fichier de forme (.shp file POLYgone) redécoupées et caractérisées en fonction de la nature supposée des formations géologiques sous-jacentes.

Les polygones (**Q**) sont donc redécoupés afin de prolonger les structures stratigraphiques et ou tectoniques visibles à l'affleurement (via le MNT par exemple). Les informations de forages sont utiles à ce stade afin d'identifier la nature des formations rocheuses sous couverture. Cinq classes d'infiltrabilité sous-couverture sont définies dans un nouveau champ attributaire [PROP_SC], cf. Table 3.

Infiltrabilité sous couverture [PROP_SC]	Symbole	Degré d'infiltrabilité
Indéterminé (Ind.)	-9999 / Ind.	
Infiltration Karst sous-couverture (I_K)	1 / I_K	++
Infiltration semi-karst sous couverture (I_SK)	2 / I_SK	+
Infiltration karst évaporitique sous couverture (I_Ke)	3 / I_Ke	++
Infiltration non-karstique sous couverture (I_NK)	4 / I_NK	-

Table 3. Classes d'infiltrabilité des formations sous couverture : ++ infiltrabilité modérée, + infiltrabilité faible, - infiltrabilité nulle.

¹ Référentiel Géologique de la France : <https://rgf.brgm.fr/page/lexiques-referentiels>

4.3. Etape D : Carte d'infiltrabilité

La carte d'infiltrabilité caractérise l'infiltrabilité des formations rocheuses à l'affleurement et sous couverture. Elle est obtenue par croisement des index des cartes des Etapes A., B. et de la carte d'épaisseur des formations de couverture, étape C. §. 5¹. Un nouveau champ est ajouté à la table attributaire de la couche de forme obtenue [INFILTR].

10 classes d'infiltrabilité sont définies en fonction de 3 classes d'épaisseur de couverture proposées sous les formations karstiques (**K**) et semi-karstiques (**SK**) et karst évaporitique (**Ke**) :

- 0-0.5 m,
- 0.5-2 m,
- > 2 m.

Les entités gardent toutefois leurs classes respectives d'épaisseur sous SIG, soit 5 classes (0-0.2 m, 0.2-0.5 m, 0.5-1 m, 1-2 m, >2 m, cf. Table 8). Les critères d'attribution sont donnés dans la Table 4. Seule l'épaisseur de la couverture est considérée, leur lithologie respective, et donc leur perméabilité associée n'est pas prise en compte.

[INFILTR] Indice	[EPAISSEUR] Indice	Valeurs	Légende FR
-9999		Indéterminé	Indéterminé
1	1, 2	K [0-0.5 m]	Formations karstifiées à l'affleurement ou sous couverture discontinue
2	3, 4	K_SC [0.5-2 m]	Formations karstifiées sous couverture (0.5-2 m)
3	5	K_SC [> 2 m]	Formations karstifiées sous couverture (> 2 m)
4	1, 2	SK [0-0.5 m]	Formations partiellement karstifiées à l'affleurement ou sous couverture discontinue
5	3, 4	SK_SC [0.5-2 m]	Formations partiellement karstifiées sous couverture (0.5-2 m)
6	5	SK_SC [> 2 m]	Formations partiellement karstifiées sous couverture (> 2 m)
7	1, 2	Ke [0-0.5 m]	Karst évaporitique à l'affleurement ou sous couverture discontinue
8	3, 4	Ke_SC [0.5-2 m]	Karst évaporitique sous couverture (0.5-2 m)
9	5	Ke_SC [> 2 m]	Karst évaporitique sous couverture (> 2 m)
10	1, 2, 3, 4, 5	NK	Non Karstique

Table 4. Classes d'infiltrabilité des formations rocheuses à l'affleurement et sous couverture en fonction de la classe d'épaisseur de la couverture.

A noter que les entités de type **NK** – à l'affleurement ou sous couverture ne sont pas discrétisées selon l'épaisseur de la couverture – car hors zones d'intérêt pour le karst.

A noter aussi que selon les zones, les formations de couverture peuvent couvrir une proportion importante de la carte géologique, ce qui peut éventuellement compliquer le travail de redécoupage des entités sur la base d'une continuité des structures géologiques / stratigraphiques. Ces cas sont toutefois assez rares – et peuvent être adressés en considérant des informations complémentaires (forages, ouvrages souterrains, profils géologiques, etc.)

¹ Utilisation des outils SIG:

ArcGIS: /toolbox/analysis-toolbox/overlay-toolset/union

QGIS: Union, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectoroverlay.html#union

4.4. Etape E1 : Niveau de base hydrologique

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**, cf. Figure 2).

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.

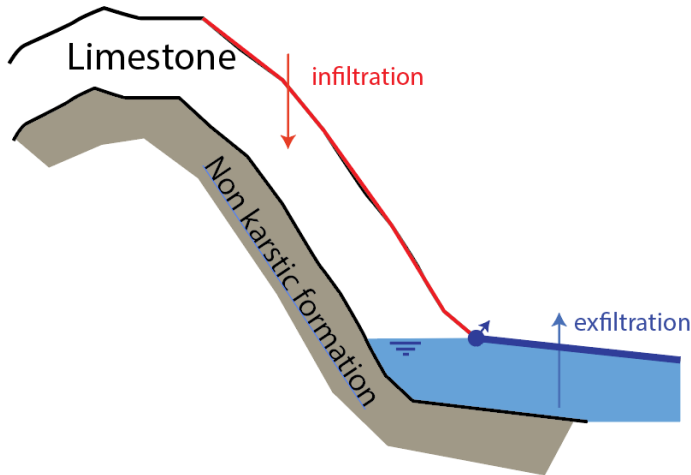


Figure 2. Exemple de zone de sub-artésianisme. En raison de l'affleurement de la nappe karstique, les infiltrations d'eau de surface à travers les formations K, K_SC et Ke ne sont pas possibles.

Ces zones sont cartographiées sur un nouveau fichier de forme (.shp file POLYGON) complété d'un champ attributaire [HYBASE]. Les polygones de zones d'artésianisme ou de sub-artésianisme prennent la valeur « 1 ».

4.5. Etape E2 : Infiltrabilité des cours d'eau et plans d'eau

4.5.1. Infiltrabilité des cours d'eau

En milieux karstiques, selon la nature des formations rocheuses à l'affleurement ou sous couverture et selon la position / extension du niveau de base hydrologique, les **cours d'eau** sont supposés se perdre partiellement voire intégralement et alimenter l'aquifère karstique (cf. Figure 2).

Les tronçons de cours d'eau sont extraits de la couche « Cours Eau » de la BD TOPAGE®. Les entités linéaires sont ensuite intersectées¹ en fonction des caractéristiques d'infiltrabilité des formations sous-jacentes (Étape D., §. 4.3) et de la position/extension du niveau de base hydrologique à l'affleurement (Étape E1, §. 4.4).

Un nouveau champ est ajouté à la table attributaire [ALIM_KARST] et quatre classes sont définies : (1) Infiltration supposée ou démontrée, (2) Infiltration partielle très probable, (3) Infiltration négligeable et (-9999) Indéterminé. Les critères d'assignement des valeurs sont portés dans la Table 3.

¹ Utilisation des outils SIG :

ArcGIS /toolbox/analysis-toolbox/overlay-toolset/intersect

QGIS: Intersection, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/ggis/vectoroverlay.html#intersection

[INFILTR]	[HYBASE]	[ALIM_KARST]
1, 4, 7	0	1 (infiltration supposée ou démontrée)
2, 3, 5, 6, 8, 9	0	2 (infiltration partielle très probable)
10	0	3 (infiltration négligeable)
	1	3 (infiltration négligeable)
-9999	-	-9999 (indéterminé)

Table 5. Critères d'assignement des valeurs d'alimentation du karst pour les tronçons des cours d'eau [ALIM_KARST]. L'indice **INFILTR** renvoie à la Table 4. L'indice **HYDROBASE** renvoie au §. 4.4.

4.5.2. Infiltrabilité des plans d'eau

Les principaux plans d'eau (lacs) sont discrétisés selon le caractère **infiltrant** ou **exfiltrant** (cf. Figure 3). Un plan d'eau alimenté par contribution des eaux souterraines sera noté comme **exfiltrant**, alors qu'un plan d'eau dont les eaux se perdent partiellement vers l'aquifère sera noté comme **infiltrant**. Dans ce dernier cas, il incarne localement ou régionalement le niveau de base hydrologique.

Idéalement les plans d'eau devraient être extraits de la couche « Plan d'Eau » de la BD TOPAGE®. Or leur délimitation peut ne pas être cohérente avec celle proposée par la carte géologique brgm 1/50'000 (facteur d'échelle et/ou délimitation différente). Dans ce cas, il est préférable d'utiliser les entités « lacs » du fichier de forme géologique 1/50'000.

Les entités sont copiées vers un nouveau fichier de forme LAC_K (.shp file POLYGON) et la table attributaire est complétée d'un champ qui caractérise la dynamique d'infiltration / exfiltration [LAC_INFILTR]. Les valeurs de champs sont définies dans la Table 6.

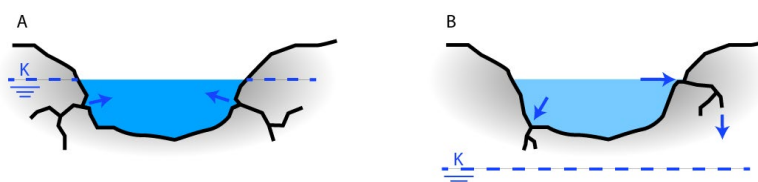


Figure 3. Différences entre plans d'eau **exfiltrant** (droite), c.à.d. dont la surface libre est plus haute que le niveau de la nappe karstique et **infiltrant** (gauche), c.à.d. dont la surface libre est à la même altitude voire inférieure au niveau de la nappe karstique.

[LAC_INFILTR]	TYPE	DESCRIPTION
1	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.
2	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 6. Définition des indices du champ [LAC_INFILTR] des entités LAC_K

4.6. Etape E3 : Bassins endoréiques et surfaces d'alimentation allogéniques

Les surfaces **non karstiques** à l'affleurement ou sous-couverture (« **NK** », cf. Etape D.) dont les eaux de ruissellement sont supposées alimenter **partiellement ou complètement** des aquifères karstiques sont notées comme « **surfaces allogéniques** ».

Les « **bassins endoréiques** » correspondent aux dépressions morphologiques qui ne présentent pas d'exutoires en surface mais le plus souvent des pertes karstiques (concentrées ou diffuses)

en fond de dépression. La **totalité** de eaux de ruissellement de ces bassins sont supposées alimenter les aquifères karstiques.

Une illustration est donnée en Figure 4.

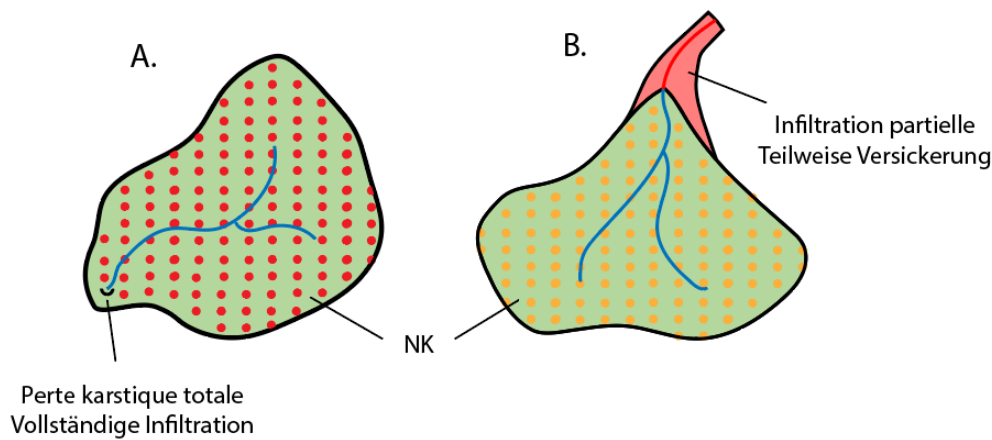


Figure 4. **A** : cas d'un bassin endoréique ; l'infiltration via le ruissellement des surfaces non karstiques est considérée comme **totale**, **B** : cas d'une surface allogénique alimentant des surfaces karstiques en aval ; l'infiltration via ruissellement est considérée comme **partielle** seulement.

Les **surfaces allogéniques** sont définies sur la base des bassins versants topographiques des cours d'eau de surface. Cette information est disponible via la couche « Bassin Versant Topographique » du jeu de données BD TOPAGE®.

Les bassins versants BV de la zone d'étude sont copiés vers un nouveau fichier de forme (.shp file POLYGON).

En l'absence de référentiels à l'échelle nationale, les **bassins endoréiques** peuvent être obtenus de plusieurs manières :

- Cartes géologiques 1/50'000 brgm pour les grandes entités
- Cartes géomorphologiques locales ou régionales (attention : ces informations ne sont pas disponibles sur l'ensemble du territoire)
- Digitalisation automatique sur la base du modèle numérique de terrain (attention, post-process important de validation)
- Digitalisation manuelle sur la base des cartes topographiques 1/25'000 IGN

Les bassins endoréiques obtenus B_ENDO sont copiés vers un nouveau fichier de forme (.shp file POLYGON).

Les bassins versants BV sont ensuite comparés avec les entités « **NK** » de la couche de forme de l'étape D. (infiltrabilité). La méthodologie est la suivante :

- i. Sélectionner les entités « **NK** » de la couche de l'étape D.
- ii. Faire un clip¹ des entités BV sur la base de la sélection « **NK** »
- iii. Faire un intersect² des entités BV post-clip avec les entités B_ENDO
- iv. Copier les entités obtenues dans un nouveau fichier de forme B_NK (.shp file POLYGON)

¹ Utilisation des outils SIG :

ArcGIS: /toolbox/analysis-toolbox/extraction-toolset/clip

QGIS: clip, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectoroverlay.html#clip

² Utilisation des outils SIG :

ArcGIS /toolbox/analysis-toolbox/overlay-toolset/intersect

QGIS: Intersection, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectoroverlay.html#intersection

- v. Ajouter un champ [INF_KARST] à la table attributaire (cf. Table 7)
- vi. Attribuer la valeur « 2 » aux entités de surface dont les ruissellements alimentent un cours d'eau dont une section en aval est supposée s'infiltrer partiellement – voire en totalité (section à « infiltration démontrée ou partielle »).
- vii. Attribuer la valeur « 1 » aux entités de surface inscrite dans le périmètre d'un bassin endoréique B_ENDO.

[INF_KARST]	TYPE
-9999	Indéterminé
1	Bassin endoréique
2	Surface allogénique

Table 7. Valeurs de champs INF_KARST pour les bassins endoréiques et les surfaces allogéniques B_NK

4.7. Autres entités (objets géomorphologiques, points d'eau, etc.)

Des entités supplémentaires peuvent être affichées sur la carte du karst en fonction des sollicitations et des données disponibles :

- Objets géomorphologiques : pertes karstiques, dolines, entrées de cavités, etc. Le contour des bassins endoréiques peut aussi être représenté à titre d'objet géomorphologique.
- Points d'eau : sources karstiques, estavelles, etc.
- Traçages hydrogéologiques. Les traçages sont davantage des informations renseignant sur la circulation des eaux souterraines que sur les propriétés d'infiltration de surface – elles ne figurent donc pas par défaut sur les cartes du karst.

5. Etape C : Carte épaisseur de la couverture

L'infiltrabilité des formations de couverture (y compris sols) est fonction de leur perméabilité et de leur épaisseur. L'épaisseur de ces formations peut être évaluée sur la base du croisement de jeux de données et d'informations. La méthodologie se base sur le travail de master de Hamedinger [2019].

La Figure 5 synthétise le workflow d'évaluation d'épaisseur des formations de couverture. Le workflow se base sur l'analyse et la combinaison des couches d'informations suivantes, chacune devant couvrir l'intégralité de la zone d'étude :

- Zones de couverture quaternaire
- Zones de roches nues

Elles sont décrites en détail dans les sections suivantes. La carte résultante est établie à l'échelle 1/50'000.

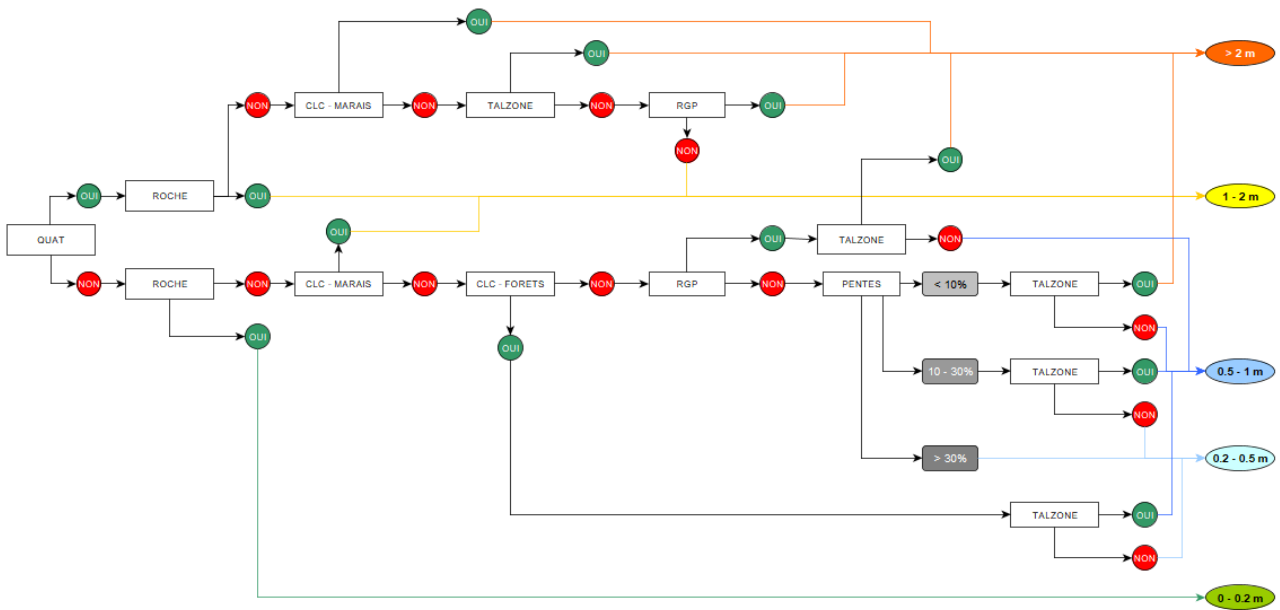


Figure 5. Workflow d'évaluation de l'épaisseur des formations de couverture. « CLC » indique que la donnée est obtenue depuis le jeu de données d'occupation des sols (source Corine Land Cover)

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 8).

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.

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 8. Classes d'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 9 suivante.

5.1. Couverture quaternaire / QUATERNAIRE

Les informations relatives aux zones de couverture quaternaire sont extraites de la carte géologique (cf. Etape B., § 4.2).

Les entités sont sélectionnées et copiées vers un autre fichier de forme QUATERNAIRE (.shp POLYGON) et fusionnées. Un champ [QUAT] est ajouté à la table attributaire. Les polygones de quaternaire prennent la valeur « 1 », les zones hors quaternaire la valeur « 2 ».

5.2. Zones de roches nues / ROCHES_NUES

Les informations relatives aux zones de roches nues (c.à.d. lapiaz, pierriers, carrières, 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). Par principe les zones de roches nues sont considérées comme présentant une épaisseur de couverture comprise entre 0 et 0.2 m.

Les entités sont sélectionnées et copiées vers un autre fichier de forme ROCHES_NUES (.shp POLYGON) et fusionnées. Un champ [ROCHE] est ajouté à la table attributaire. Les polygones identifiés comme tels prennent la valeur « 1 », le reste de la zone d'étude la valeur « 2 ».

5.3. Zones de fonds de vallées / ZONE_VAL

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

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]. Le calcul peut être réalisé avec le logiciel SAGA GIS¹ est les résultats exportés sous la forme d'une grille raster ASCII.

Les index obtenus sont ensuite lissés sous ArcGIS² / QGIS sur une matrice de 50 x 50 m pour éviter tout artefact. Les index sont reclassés³ selon les valeurs :

- Zone de fonds de vallées ($0 < \text{index} < 1.5$) prend la valeur « 1 »
- Zone hors fond de vallées ($\text{index} > 1.5$) prend la valeur « 2 »

Le raster est converti en fichier de forme⁴ ZONE_VAL (.shp POLYGON) et le champ [TALZONE] est ajouté à la table attributaire. Les zones de fonds de vallées conservent la valeur « 1 », les autres la valeur « 2 ».

5.4. Pentés / 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 modèle numérique de terrain (résolution 1 m)⁵, puis lissées sur une matrice de 50 x 50 m¹ pour éviter tout artefact. Elles sont ensuite reclassées en 3 catégories² :

¹ <http://www.saga-gis.org/>, outil Terrain Analysis / Morphometry / Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)

² Utilisation des outils SIG:
ArcGIS /tools/spatial-analyst-toolbox/focal-statistics
QGIS / GRASS: r.neighbor, <https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/r.neighbors.html>

³ Utilisation des outils SIG :
ArcGIS /tools/spatial-analyst-toolbox/reclassify
QGIS / GRASS: r.reclass <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.reclass.html>

⁴ Utilisation des outils SIG:
ArcGIS /tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon
QGIS: raster to vector conversion, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/training_manual/complete_analysis/raster_to_vector.html

⁵ Utilisation des outils SIG:
ArcGIS: /tools/spatial-analyst-toolbox/slope
QGIS: Slope, https://docs.qgis.org/2.8/en/docs/user_manual/processing_algs/gdalogr/gdal_analysis/slope.html

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

Le raster est converti en fichier de forme³ SLOPE (.shp POLYGON) et le champ [PENTES] est ajouté à la table attributaire. Les pentes < 10 % prennent la valeur « 1 », les 10 % < pentes < 30 % la valeur « 2 » et les pentes > 30 % la valeur « 3 ».

5.5. Surfaces agricoles / CULTURE

Les surfaces agricoles sont supposées présenter 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 copiés vers un nouveau fichier de forme CULTURE (.shp POLYGON), fusionnés et simplifiés (enveloppe tampon 10 m⁴). Le champ [RGP] est ajouté à la table attributaire. Les entités surface agricoles prennent la valeur « 1 », le reste des surfaces la valeur « 2 ».

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 ou d'éboulement (versants, pieds de pente) où la culture est impossible (cf. zones forestières au sud-est de Saffloz).

Les informations relatives aux zones de forêts sont extraites du jeu de données vectorielles d'occupation du sol (source Corine Land Cover, indices Code_90 : 311, 312, 313, 322 et 324) et copiées sur un nouveau fichier de forme FORETS (.shp POLYGON).

Un champ [FORETS] est ajouté à la table attributaire. Les zones de forêts prennent la valeur « 1 », les autres zones la valeur « 2 ».

5.7. 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) et copiées sur un nouveau fichier de forme MARAIS (.shp POLYGON).

¹ Utilisation des outils SIG:

ArcGIS /tools/spatial-analyst-toolbox/focal-statistics

QGIS / GRASS: r.neighbor, <https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/r.neighbors.html>

² Utilisation des outils SIG :

ArcGIS /tools/spatial-analyst-toolbox/reclassify

QGIS / GRASS: r.reclass <https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/r.reclass.html>

³ Utilisation des outils SIG:

ArcGIS /tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon

QGIS: raster to vector conversion, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/training_manual/complete_analysis/raster_to_vector.html

⁴ Utilisation des outils SIG :

ArcGIS : /tools/analysis-toolbox/buffer

#QGIS: Spatial Analysis Buffers, https://docs.qgis.org/2.8/fr/docs/gentle_qis_introduction/vector_spatial_analysis_buffers.html

Un champ [MARAIS] est ajouté à la table attributaire. Les zones humides prennent la valeur « 1 », les autres zones la valeur « 2 ».

5.8. Combinaison des indices, estimation des épaisseurs

Les 7 fichiers de forme (QUATERNAIRE, ROCHES_NUES, ZONE_VAL, SLOPE, CULTURE, FORETS, MARAIS) sont combinés dans un fichier de forme unique CARTE_EPAISS (.shp file POLYGON) qui conserve les champs et valeurs de chacun¹. Le champ [EPAISSEUR] est ajouté à la table attributaire. Les classes d'épaisseurs sont ensuite assignés selon la combinaison des indices de la Table 9. Un script pour QGIS est placé en Annexe A., il permet l'attribution des index d'épaisseur sur la base de la combinaison des indices.

[QUAT]	[ROCHE]	[MARAIS]	[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 9. Critères de combinaison des paramètres pour l'évaluation de l'épaisseur des formations de couverture.

Les entités peuvent être affichées avec un code couleur (cf. Table 8) sur une carte indépendante (« carte d'épaisseur des formations de couverture »). Les entités sont surtout nécessaires pour l'établissement de la carte d'infiltrabilité (étape D., § 4.3).

Les 5 classes d'épaisseur sont réduites à 3 classes (<0.5 m, 0.5 < X < 2 m, > 2 m) pour la carte d'infiltrabilité (cf. Table 4).

6. Layout

Par principe, les cartes du karst et d'épaisseur de la couverture sont imprimées à l'échelle 1/50'000.

Le layout de la carte du karst, combiné aux épaisseurs de couverture, se compose de la manière suivante (Table 10). Un exemple est donné en Figure 6.

¹ Utilisation des outils SIG:

ArcGIS: /toolbox/analysis-toolbox/overlay-toolset/union

QGIS: Union, https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectoroverlay.html#union

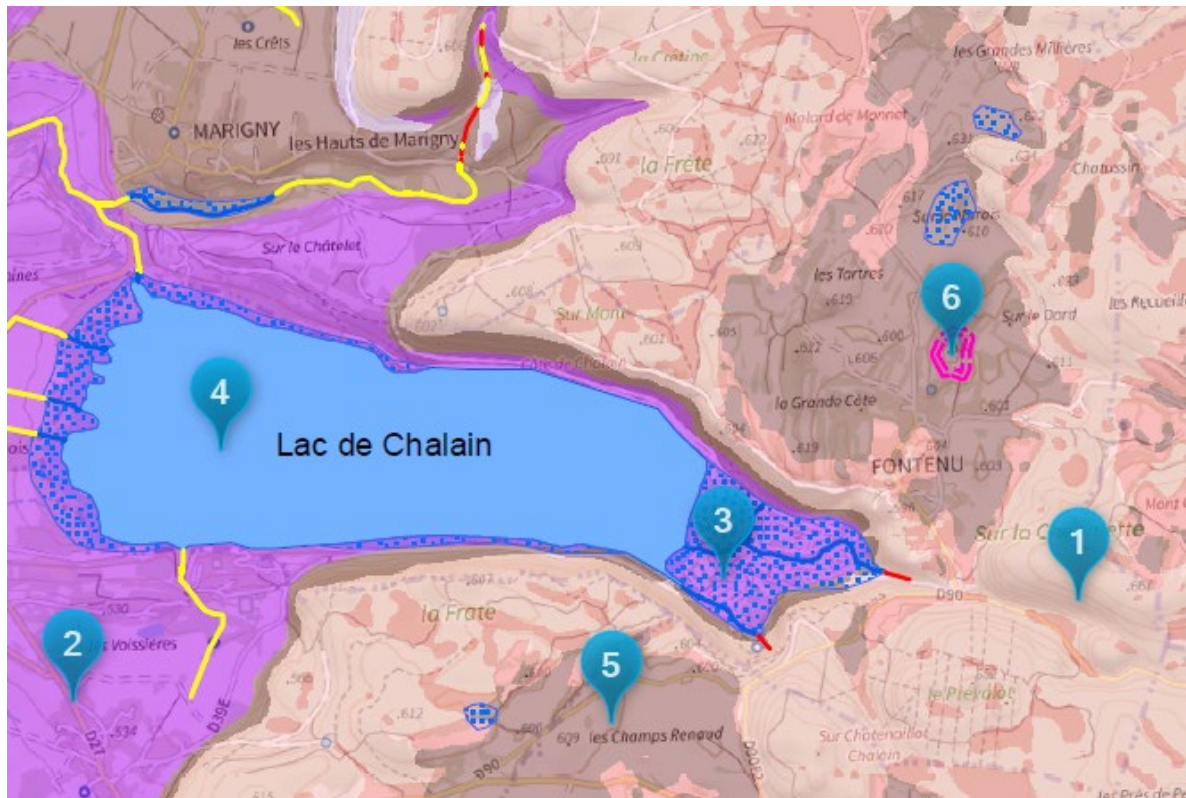


Figure 6. Extraits de la carte du karst, secteur du lac de Chalain (39). **1** ; surface karstique à l'affleurement (couverture absente ou discontinue), **2** ; surface semi-karstique sous couverture > 2 m, infiltration probable des cours d'eau, **3** ; surface semi-karstique sous couverture > 2 m, en zone d'artesianisme / sub-artesianisme, infiltration négligeable des cours d'eau, **4** ; lac exfiltrant car situé au niveau de base hydrogéologique, **5** ; surface karstique sous couverture > 2 m, **6** ; dépression ou bassin endoréique


















Ordre d'affichage	Couche de forme	Symbologie	Transparence
1	Autres entités	Libre	Aucune
2	Cours d'eau	[ALIM_KARST] 1 : 1 pt, rouge 2 : 1 pt, jaune orangé 3 : 1 pt, bleu	Aucune
3	Plans d'eau	[LAC_INFILTR] 1 :  remplissage 190 / 232 / 255 2 :  remplissage 115 / 178 / 255 Contours : 0 / 92 / 230	Aucune
4	Zones d'artésianisme, sub-artésianisme	 Trame à points 0 / 112 / 255, sans contours.	Aucune
5	Bassins endoréiques, surfaces allogéniques	[INF_KARST] 1 :   trame à points rouges, sans contour 2 :   trame à points jaunes, sans contours NB : les contours entiers des bassins endoréiques peuvent aussi figurer comme objets géomorphologiques	Aucune
6	Infiltrabilité formations rocheuses / sous-couverture	[INFILTR] 1 :  255 / 190 / 190 2 :  245 / 122 / 122 3 :  137 / 68 / 68 4 :  232 / 190 / 255 5 :  202 / 122 / 245 6 :  169 / 0 / 230 7 :  41 / 38 / 97 8 :  41 / 70 / 99 9 :  41 / 92 / 89 10 :  70 / 42 / 79	50%
7	Fond topographique 1/25'000 IGN	N & B	Aucune

Table 10. Layout de la carte du karst : ordre des layers, symbologies et transparence.

7. Conclusion

Ce document est un guide méthodologique qui décrit les étapes d'établissement de la carte du Karst sur le territoire français en utilisant les jeux de données cartographiques (géographie, géologie, hydrologie) officiels pour un rendu à l'échelle 1/50'000.

La méthodologie initiale ayant été développée en Suisse avec des jeux de données spécifiques, une adaptation des principes était nécessaire pour garantir une application sur le territoire français. L'adaptation des principes a été développée et testée sur le site du plateau de Chalain, 39 (ISSKA [2021]). L'application sur le site de Chalain a démontré la faisabilité de la méthode, avec considération explicite et systématique de jeux des données officiels qui couvrent tout le territoire français. L'application a donné des résultats très cohérents qui ont pu être comparés avec d'autres produits / informations existants sur site (carte de vulnérabilité, campagnes de sondages pédologiques, carte IDPR, etc.). La limite d'application semble être la précision et la résolution de la carte géologique actuellement au 1/50'000 alors que les autres jeux de données sont au 1/25'000.

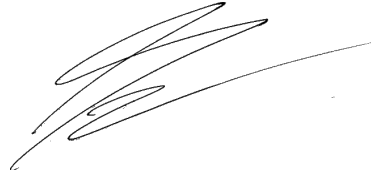
Les étapes sont décrites du point de vue SIG : sélection des jeux de données, structuration de informations, matrices de traitement des informations, etc. dans le but d'établir une documentation qui peut être répliqué sur d'autres sites de manière systématique afin de permettre la comparaison d'un site à l'autre. Ce guide couvre tous les aspects jusqu'au « layout ».

Pour idée, l'établissement d'une carte du karst et d'une carte d'épaisseur des formations de couverture sur une zone de 100 km² (10 km de côté) requiert environ une semaine de travail.

Les concepts et principes de la carte du Karst sont certainement amenés à être développés coté Suisse notamment pour parfaire le lien vers les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité (EPIK en l'occurrence). Des pistes d'évolution sont donc possibles dans cette direction.

La Chaux de Fonds, Suisse, le 25/01/2022

Arnauld Malard
Phd. Hydrogéologue



8. *Bibliographie*

Currens CJ, Paylor LR, Ray AJ (2003) Mapped Karst Groundwater basins in the Harrodsburg 30x60 Minute Quadrangle. Scale 1/100 000. , : p.

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

Grétilat PA (1992) Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie (JU, Suisse). *Eléments pour la carte hydrogéologique au 1:25'000 (vol I)*. Centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel, PhD dissertation. 219 p.

Hamedinger T (2019) Kartierung der Rückhaltezeit von Schadstoffen im bedeckten Karst. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Master's thesis. 150 p.

ISSKA (2021) Carte Karst 1/50'000 Chalain (39, Jura). Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds, Suisse - note technique - mandant: Conseil Départemental du Jura (CD 39). 25 p.

Jeannin PY, Eichenberger U, Sinreich M, Vouillamoz J, Malard A et al. (2013) KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland. *Environmental Earth Sciences*, 69(3): 999-1013 p.

Kiraly L (1973) Notice et carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. *Bulletin de la Société Neuchâteloise de Sciences Naturelles* 96: 20 p.

Malard A, Jeannin PY, Sinreich M, Weber E, Vouillamoz J et al. (2014) Praxisorientierter Ansatz zur Kartographischen Darstellung von Karst-Grundwasserressourcen - Erfahrungen aus dem SWISSKARST-Projekt. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 19(4): 237-249 p.

Paloc H (1969) Une carte hydrogéologique de la France: la région karstique nord-montpelliéraine. *Annales de Géographie*, 426: 221-224 p.

Annexe A. Script QGIS – Attribution des index d'épaisseur

```
# -*- coding: utf-8 -*-

"""
*****
*The script applies on the "CARTE_EPAISS" layer
*We assume the user has already created the "EPAISSEUR" field (integer)
*Index of "EPAISSEUR" fields
* 1 = 0 - 0.2 m
* 2 = 0.2 à 0.5 m
* 3 = 0.5 à 1 m
* 4 = 1 à 2 m
* 5 = > 2 m

The order of the field should be:
1= 'QUAT'
2= 'ROCHE'
3= 'MARAIS'
4= 'FORETS'
5= 'TALZONE'
6= 'RGP'
7= 'PENTES'
8= 'EPAISSEUR'
*****
"""

from qgis.PyQt.QtCore import QApplication
from qgis.core import (QgsProcessing,
                       QgsFeatureSink,
                       QgsProcessingException,
                       QgsProcessingAlgorithm,
                       QgsProcessingParameterFeatureSource,
                       QgsProcessingParameterFeatureSink)

import processing
from qgis.core import *
from qgis.core import QgsVectorLayer

# loop through selected features in the active layer
layer = QgsVectorLayer(r'CHEMIN DU FICHER')
for field in layer.fields():
    #print("fields: " + field.name())
    for feature in layer.getFeatures():
        #print (feature[8])
        if(feature[1]==1 and feature[2]==1):
            with edit(layer):
                feature[8]=4 # 1 - 2 m
                layer.updateFeature(feature)
        if(feature[1]==1 and feature[2]==2 and feature[3]==1):
            with edit(layer):
                feature[8]=5 # >2 m
                layer.updateFeature(feature)
        if(feature[1]==1 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and
feature[5]==1):
            with edit(layer):
                feature[8]=5 # >2 m
                layer.updateFeature(feature)
        if(feature[1]==1 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[5]==2
and feature[6]==1):
            with edit(layer):
                feature[8]=5 # >2 m
```



```

        layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==1 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[5]==2
and feature[6]==2):
        with edit(layer):
            feature[8]=4 # 1 - 2 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=1 #0 - 0.2 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=4 # 1 - 2 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==1
and feature[5]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=3 # 0.5 à 1 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==1
and feature[5]==2):
        with edit(layer):
            feature[8]=2 # 0.2 à 0.5 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[5]==1 and feature[6]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=5 # >2 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[5]==2 and feature[6]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=3 # 0.5 à 1 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[5]==1 and feature[6]==2 and feature[7]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=5 # >2 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[5]==2 and feature[6]==2 and feature[7]==1):
        with edit(layer):
            feature[8]=3 # 0.5 à 1 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[5]==1 and feature[6]==2 and feature[7]==2):
        with edit(layer):
            feature[8]=3 # 0.5 à 1 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[5]==2 and feature[6]==2 and feature[7]==2):
        with edit(layer):
            feature[8]=2 # 0.2 à 0.5 m
            layer.updateFeature(feature)
    if(feature[1]==2 and feature[2]==2 and feature[3]==2 and feature[4]==2
and feature[6]==2 and feature[7]==3):
        with edit(layer):
            feature[8]=2 # 0.2 à 0.5 m
            layer.updateFeature(feature)

```