

Rapport

Cartographie de l'aléa karstique

Commune de Saint Vit

mars 2016

Rapport établi par : Nejema Zergaoui et Sylvain Haussard

Vu et vérifié par M. Aubagnac
Directeur adjoint
Chef du groupe OAGR

Date	Version	Commentaires
' Juin 2014	V0	
' Juillet 2015	V1	
' Janvier 2016	V2	
' Février 2016	V3	
' Mars 2016	V4	
' Mars 2016	V5	

Récapitulatif de l'affaire

Client : Direction Départementale des Territoires du Doubs
Service Prévention des Risques Sécurité
Unité Prévention des Risques Naturels et Technologiques
6 rue Roussillon
25000 Besançon

Objet de l'étude : Cartographie de l'aléa karstique - Commune de Saint Vit

Résumé de la commande : Elaboration d'une méthodologie de cartographie de l'aléa karstique et mise en pratique de cette méthodologie sur la commune de Saint-Vit

Référence dossier : Affaire C13LA0047

Offre : Devis N° 71 2012 D 518 et proposition technique et financière envoyés le 06/02/2013

Chargé d'affaire : Sylvain Haussard –Département Laboratoire d'Autun
Tél. +33 (0)3 85 86 67 67 / Fax +33 (0)3 85 86 67 79
Courriel : sylvain.haussard@developpement-durable.gouv.fr

Constitution de l'équipe : Nejema Zergaoui et Sylvain Haussard

Mots Clés : Développement Durable, Risques Naturels, Effondrement, Affaissement, Karstique, Suffosion, Géologie

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre - Type
Direction Départementale des Territoires du Doubs	Service Prévention des Risques Sécurité Unité Prévention des Risques Naturels et Technologiques 6 rue Roussillon 25000 Besançon	1ex papier 1 CD-ROM

Conclusion – Résumé

Autun, le

Le Directeur du Département Laboratoire d'Autun

M. Aubagnac
Directeur adjoint
Chef du groupe OAGR

Table des matières

1 -Introduction.....	7
2 -Commune de Saint-Vit.....	8
2.1 -Description de la commune.....	8
2.2 -Actualité d'aménagement de la commune.....	8
2.2.1 -Documents d'urbanismes (Scot).....	8
2.2.2 -Contexte politique.....	9
3 -Mécanisme d'un karst et aléas associés.....	10
3.1 -Mise en place d'un paysage karstique.....	10
3.1.1 -L'histoire des terrains accueillant les réseaux karstiques.....	10
3.1.2 -Les mécanismes physico-chimiques à l'origine d'un karst.....	11
3.1.3 -Morphologie d'un réseau karstique.....	15
3.2 -Le patrimoine karstique et ses bienfaits.....	18
3.2.1 -Le karst ressource en eaux potables.....	18
3.2.2 -L'intérêt écologique.....	18
3.2.3 -Patrimoine paysagé et archéologique.....	19
3.3 -Les aléas associés à cette géomorphologie.....	19
4 -Le réseau karstique de Saint-Vit.....	20
4.1 -Contexte géologique.....	20
4.2 -Contexte tectonique.....	22
4.3 -Contexte hydrogéologique ou hydrographique ou hydrologique.....	23
5 -Méthodologie de hiérarchisation et de cartographie de l'aléa karstique.....	27
5.1 -Principe de détermination du niveau d'aléa karstique.....	27
5.2 -Prédisposition géologique.....	27
5.3 -Principe de détermination de la prédisposition karstique.....	30
5.3.1 -Les dolines.....	31
5.3.2 -Les zones d'alimentation des réseaux actifs.....	31
5.3.3 -Les exutoires des réseaux actifs.....	33
5.4 -Synthèse des informations géomorphologiques (carte des phénomènes).....	34
5.5 -Les niveaux d'aléa karstique.....	34

Des discussions ont eu lieu avec Monsieur Reillé et Monsieur Bianchi (B3G2). Nous tenons ici à les remercier pour leur fructueuse collaboration. Les éléments apportés ont été pris en compte et ont permis de rendre la présente étude moins bloquante pour le développement de la commune, tout en conservant une bonne prise en compte du risque karstique.

1 - Introduction

Les surfaces karstiques couvrent environ 30 % du territoire français. En incluant les terrains karstifiés non affleurants mais présents en profondeur, la moitié de la France est concernée par des phénomènes karstiques.

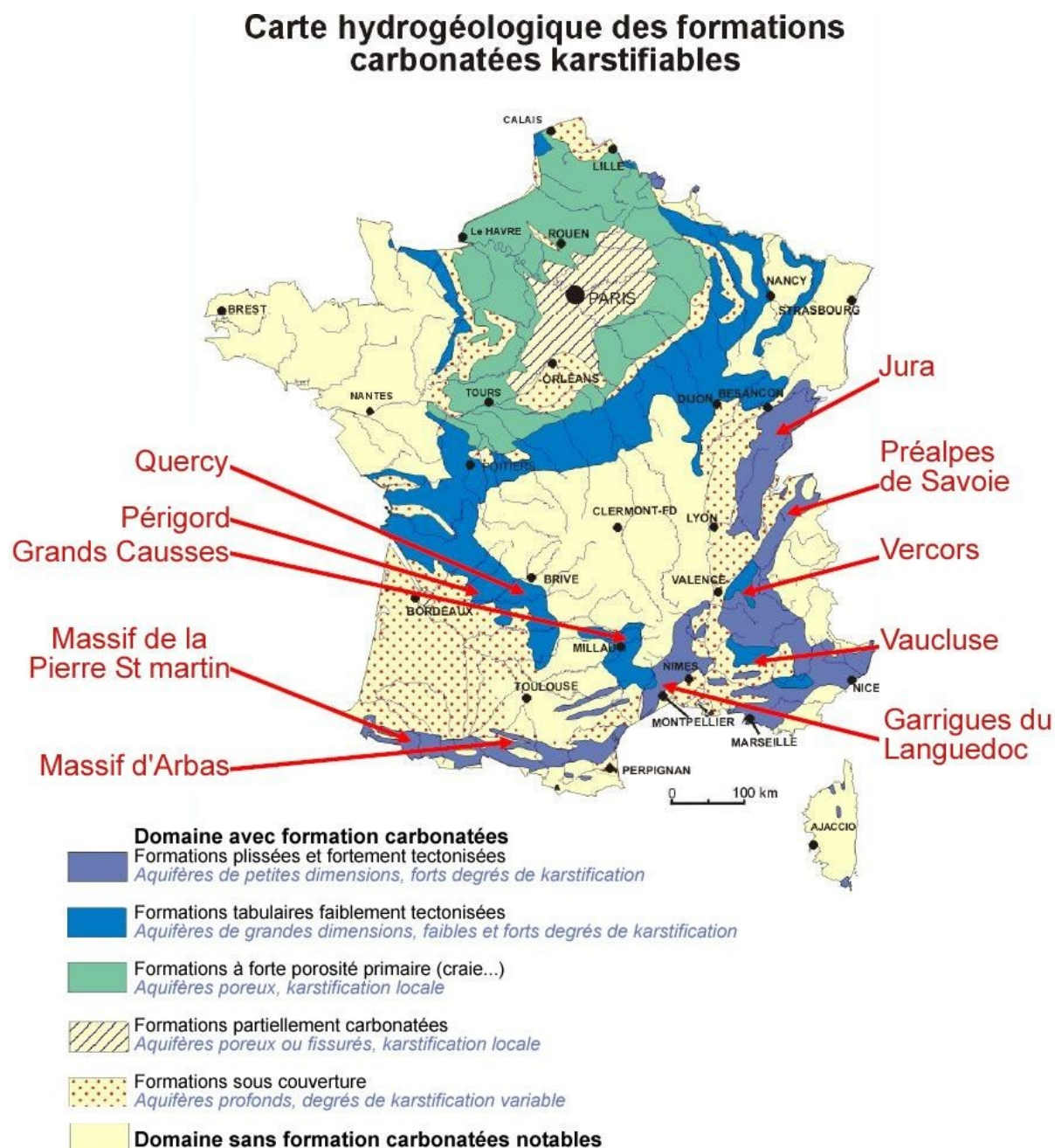


Illustration 2: les zones karstiques en France

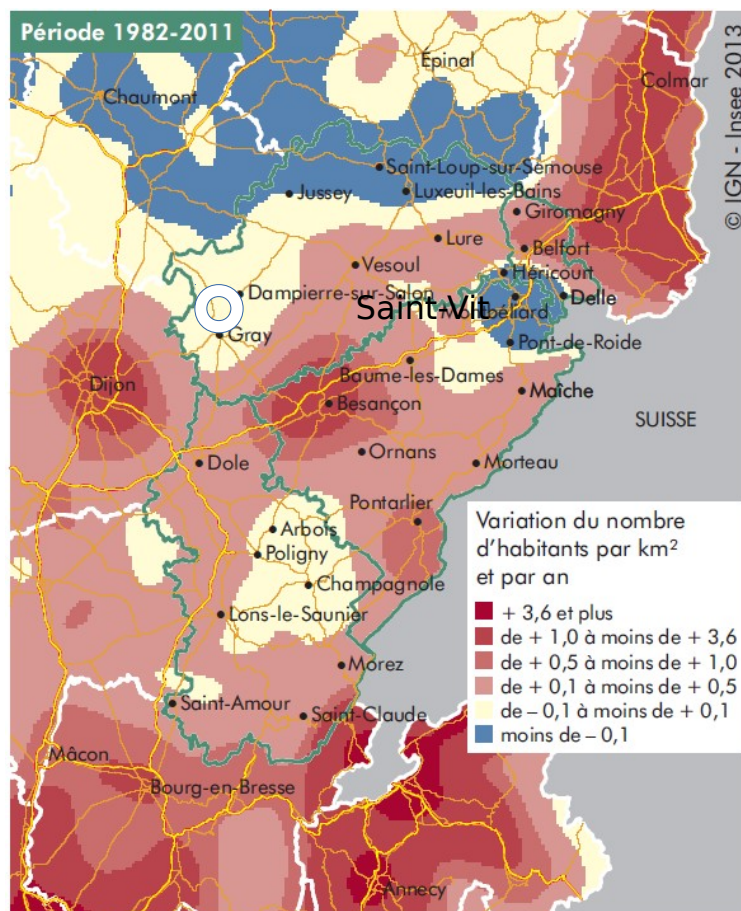
Ces zones karstiques renferment des ressources en eaux importantes, font parties d'un patrimoine paysagé magnifique mais sont aussi impactées de nombreux aléas non négligeables en termes d'aménagement territorial.

2 - Commune de Saint-Vit

2.1 - Description de la commune

Située en région Franche-Comté dans le département du Doubs (25), la commune de Saint-Vit se situe à la limite avec le département du Jura (39), entre Besançon et Dole.

Cette commune est localisée dans la zone d'influence de Besançon et connaît une constante augmentation du nombre d'habitants depuis la fin des années 60 (environ 3300 habitants de plus en 50 ans).



Source : Insee (Recensements de la population)

Illustration 3: Variation du nombre d'habitants par km² et par an entre 1982 et 2011

2.2 - Actualité d'aménagement de la commune

2.2.1 - Documents d'urbanismes (Scot)

D'après le Scot Bisontain, dont la commune de Saint-Vit fait partie, la gestion des risques naturels et technologiques doit suivre les directives suivantes :

« Dans les sites et espaces à enjeu, les stratégies de développement urbain devront prendre en compte le risque d'inondation tel qu'il est identifié dans les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRi), de mouvements de terrain et des risques technologiques. La

prise en compte de ce risque se traduira notamment par des choix appropriés en matière d'aménagements paysagers.

Les projets d'aménagement devront intégrer les mesures nécessaires à une bonne gestion des eaux pluviales, qu'il s'agisse du régime des écoulements ou de la charge polluante. »

2.2.2 - Contexte politique

En France, les lois générales sur le paysage sont la « loi relative à la protection des monuments naturels et des sites » (1930), la « loi relative au renforcement de la protection de l'environnement » (2 février 1995), la « loi d'orientation agricole » (9 juillet 1999) et la « loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains » (13 décembre 2000).

En France, la loi qui traite spécifiquement du paysage est celle « sur la protection et la mise en valeur des paysages et modifiant certaines dispositions législatives en matière d'enquêtes publiques » (8 janvier 1993).

Décret no 2006-1643 du 20 décembre 2006 portant publication de la convention européenne du paysage, signée à Florence le 20 octobre 2000 (1)

En ce qui concerne les pays les plus proches comme la Belgique et la Suisse, il est rigoureusement interdit de construire dans les dolines.

3 - Mécanisme d'un karst et aléas associés

3.1 - Mise en place d'un paysage karstique

Le paysage karstique est le résultat géo-morphologique de la mise en place d'un karst (nom issue de la région Slovène nommée Kras fortement impactée par les phénomènes karstiques).

À l'origine le karst était défini comme étant un modelé superficiel et souterrain issu de la dissolution, par l'eau, de roches carbonatées (calcaires et dolomies essentiellement).

Éric Gilli (Professeur au Département de Géographie de l'Université Paris 8) a élargie la définition à toutes les roches solubles (craie, marbre, travertin, gypse,...) au sein de laquelle l'eau peut s'infiltrer, poursuivre son action de dissolution en profondeur et dégager des vides durables.

Pour que les actions qui viennent d'être citées soient réunies, il faut :

- que la roche possède une résistance mécanique suffisante pour éviter le foisonnement immédiat des vides,
- que les produits de la dissolution puissent être entraînés en dehors du système.

Dans les trois parties suivantes, nous définirons la nature des terrains impactés, les mécanismes physico-chimiques et les morphologies d'un réseau karstique.

3.1.1 - L'histoire des terrains accueillant les réseaux karstiques

La karstification peut toucher toutes roches solubles. Cependant, en proportion sur la planète, la roche soluble la plus répandue est la roche calcaire.

Cette roche se met en place au fond des océans par accumulation des carbonates précipités à partir des éléments dissous dans l'eau. Cette précipitation se fait soit par les organismes dans la construction des tests ou coraux (calcaires à entroques ou bioclastiques, calcaires récifaux et falun), soit par variation des paramètres de l'eau engendrant une précipitation autour d'un nodule, qui peut être organique ou rocheux (calcaires oolithiques ou pisolithiques) ou non (dolomies).



Illustration 5: Calcaire à entroques

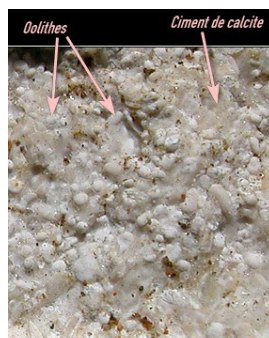


Illustration 6: Calcaire Oolithique



Illustration 7: Dolomie



Illustration 4: Calcaire récifaux

Il existe différents types de calcaires suivant :

- la composition chimique de base de l'eau,
- la profondeur du fond,
- les courants,
- le taux d'activité organique induisant une sédimentation plus ou moins massive,
- la température et la pression qui vont jouer un rôle important dans la concentration des carbonates disponibles dans l'eau.

Les variations du niveau marin (transgression, régression marine) vont avoir un impact sur les alternances sédimentaires. Dans un même lieu, il n'est pas rare de passer d'une sédimentation calcaire à une sédimentation marneuse, ce qui crée des massifs caractéristiques constitués de bancs calcaires intercalés entre des bancs plus ou moins importants de marnes. Ces alternances sédimentaires vont créer des zones de faiblesse dans le massif qui joueront un rôle important dans le développement du karst.



Illustration 8 : alternance de marne et de calcaire avec des proportions différentes, à droite les bancs de marne sont plus important que les bancs de calcaire

Avec le mouvement perpétuel des plaques tectoniques et du niveau marin, certaines de ces couches calcaires se retrouvent émergées et sont alors soumises aux phénomènes d'érosion tels que la dissolution, l'altération, le transport ou le dépôt.

3.1.2 - Les mécanismes physico-chimiques à l'origine d'un karst

À l'origine des réseaux karstiques, il y a deux mécanismes qui peuvent se produire. Un phénomène chimique, la karstification et un phénomène physique, la suffosion.

a) La karstification

La karstification est le phénomène de dissolution de roches carbonatées (carbonate de calcium, CaCO_3), de gypses ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ou de sels par des eaux chargées en dioxyde de carbone (CO_2).

Cette dissolution peut alors créer des vides souterrains que l'eau empruntera préférentiellement, c'est ce qu'on appelle le réseau karstique.

Pour les carbonates la réaction de dissolution qui se produit est la suivante :



L'intensité de ce phénomène de dissolution dépend :

- de la nature de la roche, car comme nous l'avons vu précédemment, il existe différents types de roches carbonatées possédants différentes caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques les rendant plus ou moins vulnérables au phénomène de dissolution ;
- de la teneur en CO₂ dans l'eau, car les eaux fortement chargées en CO₂ vont avoir un PH faible et vont plus facilement venir attaquer les carbonates de calcium ;
- de la température de l'eau, car plus une eau est froide plus elle est capable de contenir des éléments dissous (CO₂, CaCO₃, ...) ce qui jouera un rôle important dans le transport vers l'extérieur du système des carbonates ;
- de la pression, car elle joue également un rôle dans la dissolution des éléments, plus la pression est forte plus il est possible de dissoudre des éléments ;
- de l'abondance en eau, car elle va jouer sur la surface de contact et permettre le transport des éléments dissous ;
- du temps de contacts de l'eau, car il faut un minimum de temps de contact entre le soluté et le solvant pour que la dissolution se fasse de façon optimum.

L'emplacement de ces réseaux karstiques et leur développement sont fortement influencés par les caractéristiques suivantes.

- L'impluvium du point d'infiltration des eaux
Dans le cas d'un **système unaire**, le système karstique se limite à l'aquifère karstique alors que dans un **système binaire** le système karstique est composé de l'aquifère karstique mais aussi du bassin versant de surface drainé par le point d'infiltration (doline, perte, gouffre ou aven).
- La présence et la taille de ce bassin versant de surface aura un impact direct sur le développement du réseau variant en fonction du volume d'eau drainé. (illustration n°9).
- Le positionnement des résurgences (sources)
L'eau s'infiltrant dans les réseaux souterrains va rejoindre le niveau de base d'écoulement (ruisseau, rivière, fleuve,...). L'altitude de ce niveau de base va influencer la localisation de ces réseaux karstiques. C'est d'ailleurs ces variations du niveau de base qui vont déterminer la fonctionnalité du réseau karstique. On parle alors de **réseau karstique actif** lorsque ce réseau a toujours la fonction drainante et de **réseau karstique fossile** lorsque les eaux souterraines n'empruntent plus ce réseau quotidiennement. (Illustration n°10)
Les réseaux fossiles peuvent néanmoins être réactivés sous l'effet de modifications des conditions locales ou régionales d'écoulement (pompage, infiltration, drainage

minier, décolmatage, pluviométrie intense), faisant alors réapparaître des discontinuités locales et pouvant engendrer des coulées boueuses.

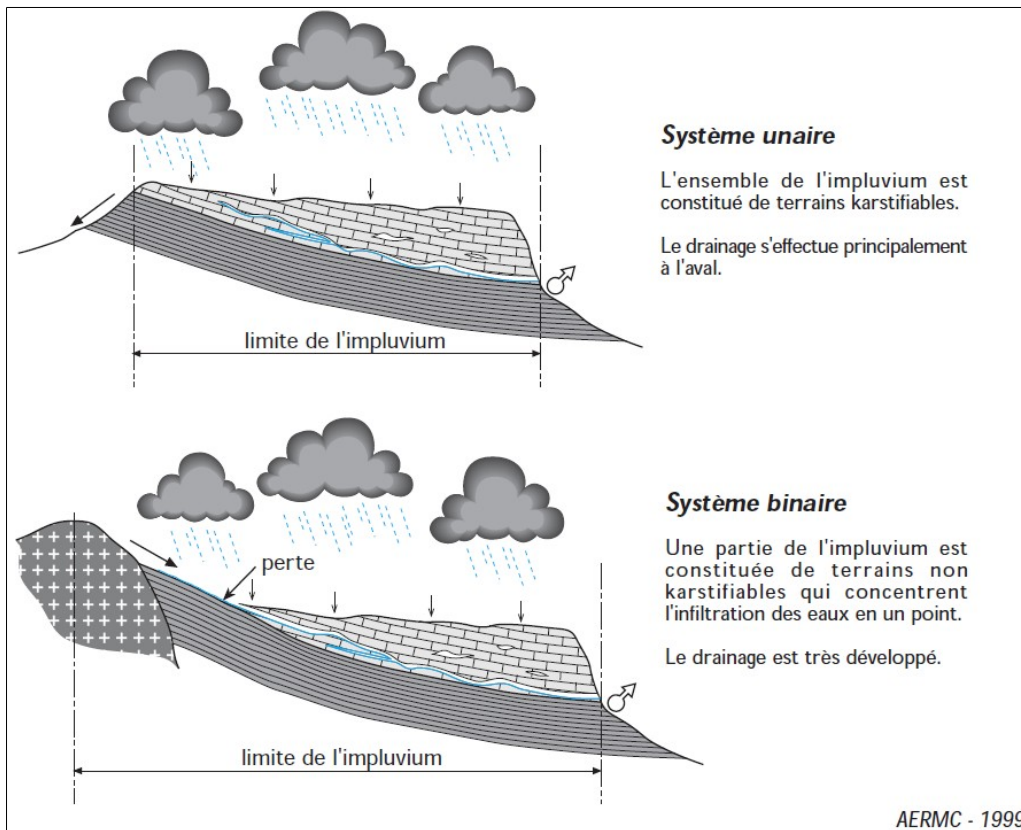


Illustration 9: Système karstique unaire ou binaire

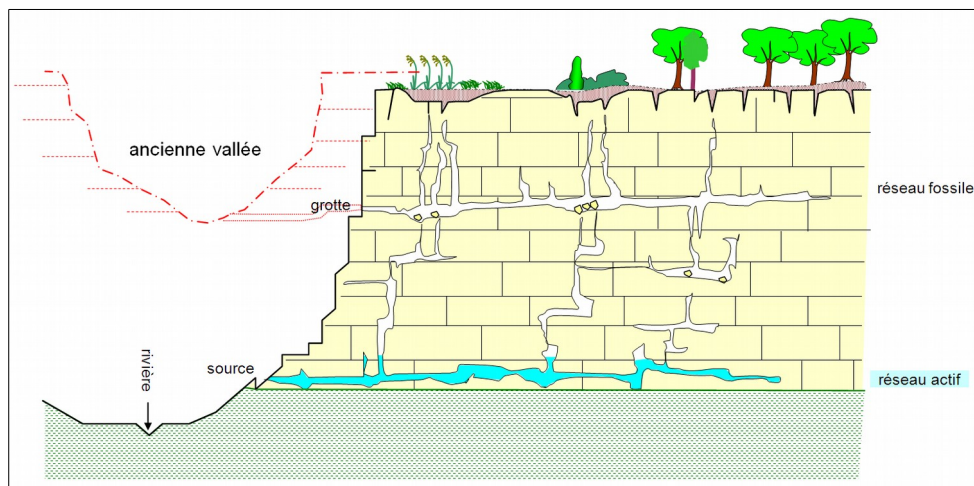


Illustration 10: Différenciation entre réseau actif et réseau fossile

- La stratification et la tectonique des terrains

Une phase tectonique précède souvent la formation des cavités puisque l'ouverture des discontinuités est un préalable nécessaire à l'infiltration des eaux. De plus, les alternances stratigraphiques et les failles sont des zones de faiblesses de la roche, car elles sont le siège de variations des caractéristiques physiques et chimiques.

Ces zones deviennent des orientations préférentielles pour les écoulements d'eau et pour la création de réseaux karstiques. Il est donc important d'estimer le pendage des couches ainsi que les orientations de fracturations afin d'estimer le cheminement des eaux.

- La nature des roches

La nature de la roche impacte, comme nous l'avons vu précédemment, le développement du réseau mais aussi son orientation. En effet la structure cristallographique ou l'agencement des vides de la roche vont la rendre plus ou moins résistante à la dissolution (ex : prédisposition à la dissolution lorsque la roche offre de grandes surfaces de contact à l'eau).

b) La suffosion

La suffosion est un phénomène mécanique, contrairement à la karstification qui est un processus chimique. Elle correspond à l'érosion interne générée par des circulations d'eaux souterraines. Dans les formations sédimentaires meubles, des écoulements d'eaux souterraines peuvent dans certains cas provoquer l'entraînement des particules les plus fines (marnes, schistes, sables fins, silts, ...), favorisant ainsi le développement des vides. Les matériaux entraînés sont évacués soit par les fissures ouvertes d'un horizon rocheux proche, soit dans une cavité voisine (vide karstique, cave, ouvrage d'assainissement, ...).

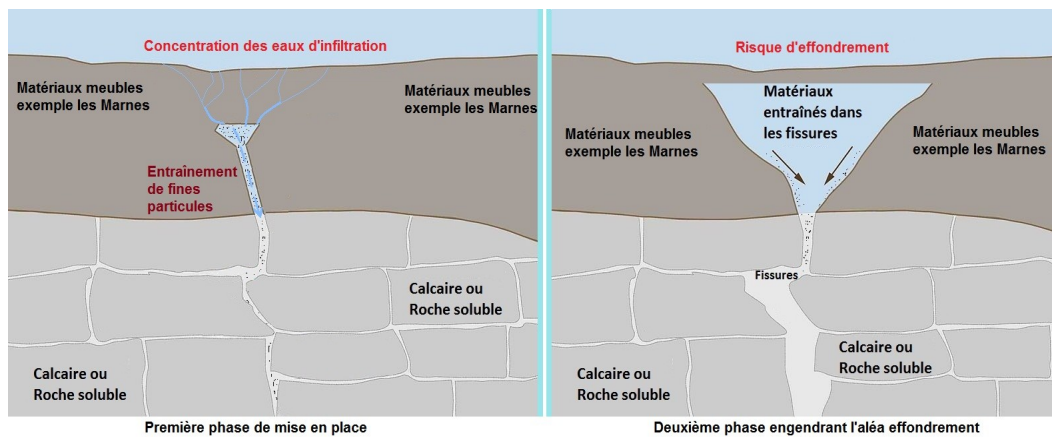


Illustration 11 : Schéma du principe d'entraînement de particules fines par suffosion

Les karstologues ont mis en évidence que certains vides souterrains de très grandes tailles, comme le gouffre de Poudrey dans le Doubs (Illustration n°12), s'étaient formés par **affouillement et soutirage**. En effet, leurs genèses ne seraient pas uniquement le résultat de dissolution et d'effondrements comme dans les grottes classiques mais également la conséquence de l'érosion et du transport dans le système karstique de matériaux tendres placés sous une masse calcaire formant un toit stable.

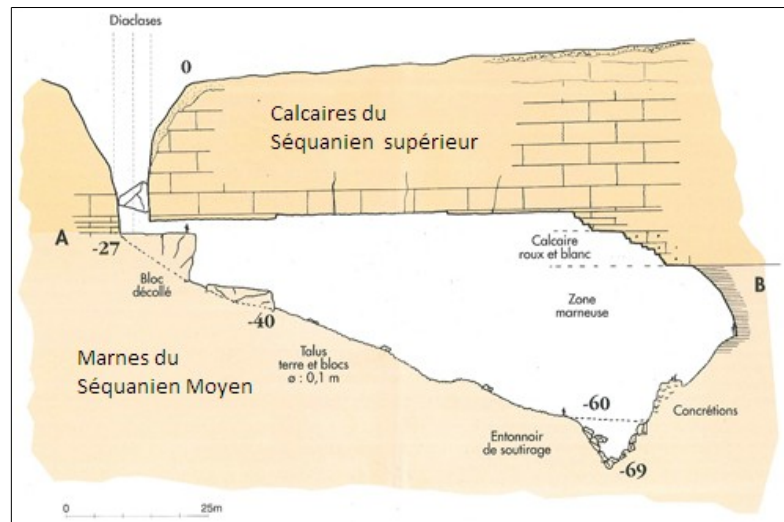


Illustration 12: Coupe du Gouffre de Poudrey (Doubs)

Ces variations de paramètres (pH, températures, pressions, fracturation, impluvium, nature de la roche, ...) vont permettre la mise en place de formes typiques des régions karstiques.

3.1.3 - Morphologie d'un réseau karstique

La karstification est un phénomène permettant la mise en place de faciès particuliers :

- en milieu souterrain (**endokarst**) sous forme de réseaux actifs (rivières souterraines, parois déchaquetés) et de réseaux fossiles (stalagmites..)
- en surface (**exokarst**) sous forme de dolines, avens, gouffres, pertes, épikarst, puits, lapiaz et autre (Illustration n°13).

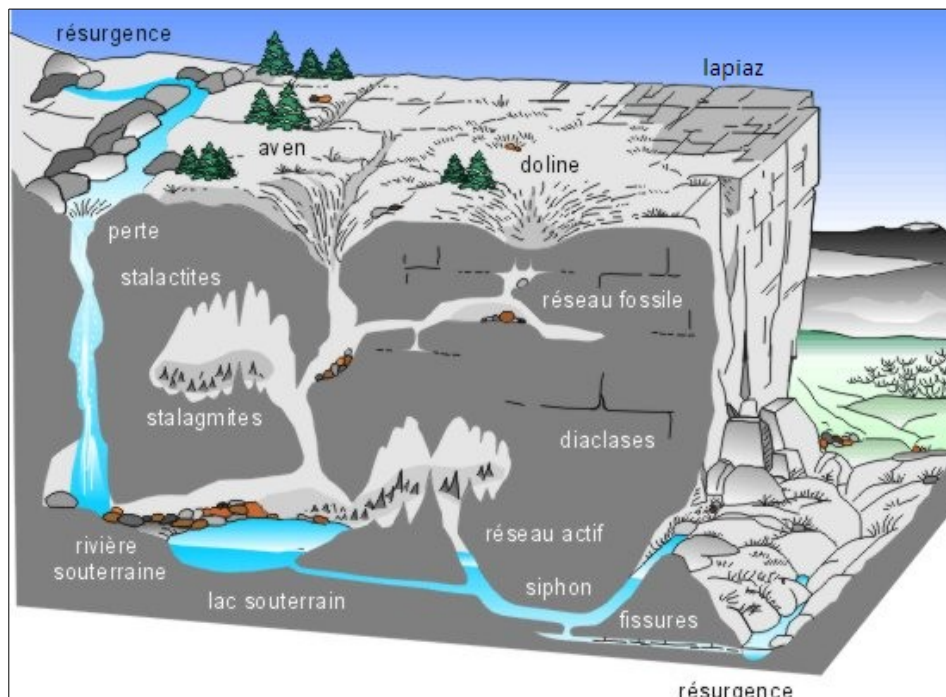


Illustration 13: Paysage karstique schématisé

L'endokarst est une partie qu'il est difficile d'apprécier qualitativement et quantitativement étant donné son accès souvent compliqué. Bien que les spéléologues fassent un travail remarquable, il reste des endroits où les techniques actuelles ne permettent pas d'accéder aisément et sont donc mal connus.

C'est dans ce contexte qu'il est important d'apporter une attention particulière au paysage en tant qu'exokarst, car il est le témoin du réseau souterrain.

Parmi les formes de l'exokarst, la **doline** est une des formes souvent rencontrées et ayant de nombreuses morphologies. Elle est définie comme étant une dépression topographique circulaire ou elliptique de surface dont les dimensions varient de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

Les dolines jouent un rôle important, en tant que point d'infiltration des eaux de surface, en apport d'oxygène et de nutriments pour la faune ou flore karstique. Elles témoignent d'un réseau souterrain développé. Les zones à fortes densités de dolines se comportent de la même façon qu'une rivière aérienne.

Il en ressort tout de même deux grands mécanismes de formation :

- **les dolines dites d'effondrement** : sont liées à la rupture du plafond d'une cavité lorsque la portée de la voûte dépasse sa résistance mécanique. Les bords y sont verticaux et le fond est occupé par de gros blocs de pierres et d'éboulis parfois raides provenant du toit effondré de la cavité ;
- **les dolines dites de dissolution et soutirage** : qui résultent du soutirage de matériaux meubles ou de la dissolution lente et diffuse des roches calcaires par les eaux qui stagnent quelque temps après les averses aux abords d'un point absorbant.

Une doline de dissolution ou de soutirage peut brutalement évoluer vers une doline d'effondrement faisant apparaître le substratum rocheux avec des bordures verticalisées.

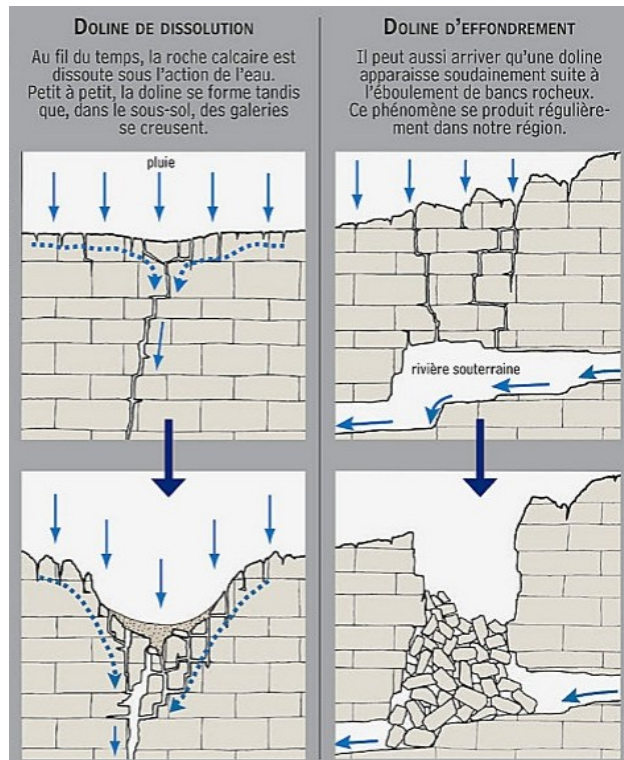


Illustration 14: Dolines de dissolution et d'effondrement

Quatre formes de dolines sont principalement identifiées et résultent des mécanismes décrits précédemment :

- **En cuvette ou en verre de montre** : Elles ont une forme en arc de cercle avec des bords à pentes faibles, un fond plat et une faible profondeur comparé à leur diamètre. Le comportement hydraulique de ces dolines (perméable ou peu perméable) varie suivant qu'elles aient :
 - un remplissage argileux ou non,
 - une couverture ou non et si oui son épaisseur.
 Cela aura pour conséquence des inondations plus ou moins fréquentes et longues.
- **En entonnoir** : Ces dolines ont des pentes assez raides, le fond souvent obstrué de gros blocs ou d'argile plus ou moins épais pouvant être soutiré par une cavité sous-jacente. Elle fait partie des karsts à évolution rapide et peut parfois présenter un embut ;
- **En baquet ou chaudron** : les bords de ces dolines sont constitués de parois rocheuses sub-verticales et le fond est horizontal. Elles peuvent résulter de l'évolution par colmatage d'une doline d'effondrement ;
- **Asymétrique** : l'un des versants est raide alors que l'autre a une pente plus douce et ce en raison du pendage des couches et de l'orientation. Son point bas d'absorption est souvent masqué par le remplissage ;

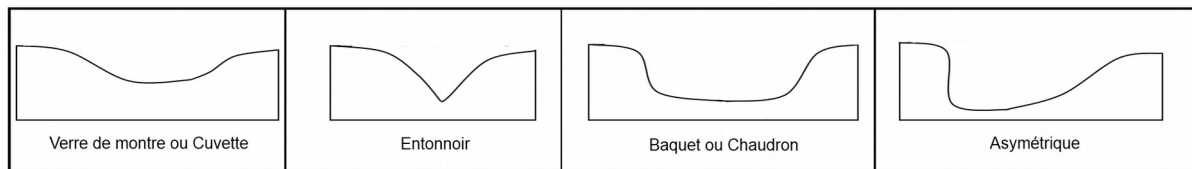


Illustration 15: Schéma des différentes morphologies de dolines

Une doline peut connaître plusieurs des morphologies que nous venons de décrire au cours de son évolution. Elle peut également présenter une perte, ce qui la met en relation directe avec un système karstique actif.

Pour la suite de la présente étude, du fait de l'importance du fond de doline, il est important d'en donner une définition précise. Le fond de la doline est la partie la plus basse de la dépression, plus ou moins plate, avec ou sans exutoire visible, couverte d'argile de décalcification et/ou sujette à la rétention des eaux de ruissellement.

3.2 - Le patrimoine karstique et ses bienfaits

3.2.1 - Le karst ressource en eaux potables

Une zone karstifiée constitue une ressource en eau potable, c'est pourquoi le karst est connu depuis longtemps pour être un aquifère. Ainsi, de nombreuses études existent sur l'hydrologie karstique définissant les ressources disponibles et les zones de protections.

Le comportement d'un karst s'apparente plus à celui d'un bassin-versant en hydrologie de surface qu'à celui d'une nappe phréatique, ce qui le rend plus vulnérable aux pollutions.

Cette vulnérabilité vient des caractéristiques suivantes :

- faible rôle filtrant de la zone d'infiltration,
- faible effet de la dispersion et de la dilution lié à l'organisation des écoulements,
- temps de séjour de l'eau trop court pour qu'un effet auto-épurateur intervienne au sein de l'aquifère,
- importante variabilité temporelle de la qualité de l'eau.

3.2.2 - L'intérêt écologique

La diversité géomorphologique du karst fait de ces lieux d'importants sites de biodiversité. Certaines formes karstiques comme les tsingys, les dolines et les lapiaz constituent des habitats spécifiques. Les cavités karstiques hébergent elles aussi une flore et une faune caractéristiques faisant l'objet de la biospéologie.

En ce qui concerne les dolines, elles constituent un apport vital d'oxygène et de nutriments par les dépôts de matières entraînés depuis la surface. L'apport d'air très perceptible par les spéléologues lorsqu'ils se trouvent dans un conduit sous une doline, permet le maintien du climat souterrain nécessaire à la vie animale et au patrimoine biologique pour les

organismes vivants (troglodytes) inféodés à ce milieu souterrain. C'est la raison pour laquelle certains spéléologues affirment que « **les dolines sont les poumons du karst** ».

Une partie de la cette faune karstique vivant dans le réseau est régulièrement évacuée lors des crues, elle constitue la ressource alimentaire de nombreuses espèces de poissons d'eau douce des rivières, déterminant ainsi un cycle biologique. Si cette faune disparaît, c'est un maillon de la chaîne alimentaire qui disparaît.

Cette richesse biologique a incité certains départements de France à récemment procéder à des inventaires de la faune souterraine grâce à des missions exercées par des spéléologues-biologistes.

3.2.3 - Patrimoine paysagé et archéologique

Les paysages karstiques font partie du patrimoine paysagé. La diversité de formes, en lien avec les climats et les terrains, fait que les sites karstiques présentent un intérêt pédagogique et touristique indéniable.

Ces paysages témoignent également de l'évolution géologique des terrains et permettent de retracer les variabilités tectoniques et climatiques des époques.

Une vingtaine de ces paysages karstiques sont d'ailleurs classés au patrimoine mondial de l'UNESCO comme les grottes du karst d'Aggtelek en Slovaquie, la réserve naturelle intégrale du Tsingy de Bemaraha à Madagascar, le Karst de Chine du Sud, les grottes ornées de la vallée de la Vézère (Lascaux et autre) et plus récemment la grotte Chauvet.

D'autres sites bénéficient de la protection des sites naturels classés tels que le massif karstique de Volp (décret du 21 juin 2013 publié au Journal Officiel du 23 juin 2013).

3.3 - Les aléas associés à cette géomorphologie

Les différentes morphologies des paysages karstiques induisent la présence de nombreux aléas tels que :

- les effondrements ;
- les affaissements ;
- les glissements (dolines en bordure de marnes) ;
- les inondations ;
- les coulées boueuses ;
- les chutes de blocs ;
- les pollutions ;
- le retrait-gonflement des argiles.

Le croisement de ces aléas sur les sites karstiques sera identifié comme étant l'aléa karstique. La méthodologie utilisée sur la commune pour déterminer cet aléa sera détaillée dans la suite de ce rapport.

4 - Le réseau karstique de Saint-Vit

4.1 - Contexte géologique

Les couches géologiques présentes en affleurement sur la commune de Saint-vit datent essentiellement du Jurassique (Mésozoïque) de -250 à -65 Ma.

Les couches karstifiables sont du Jurassique moyen et supérieur.

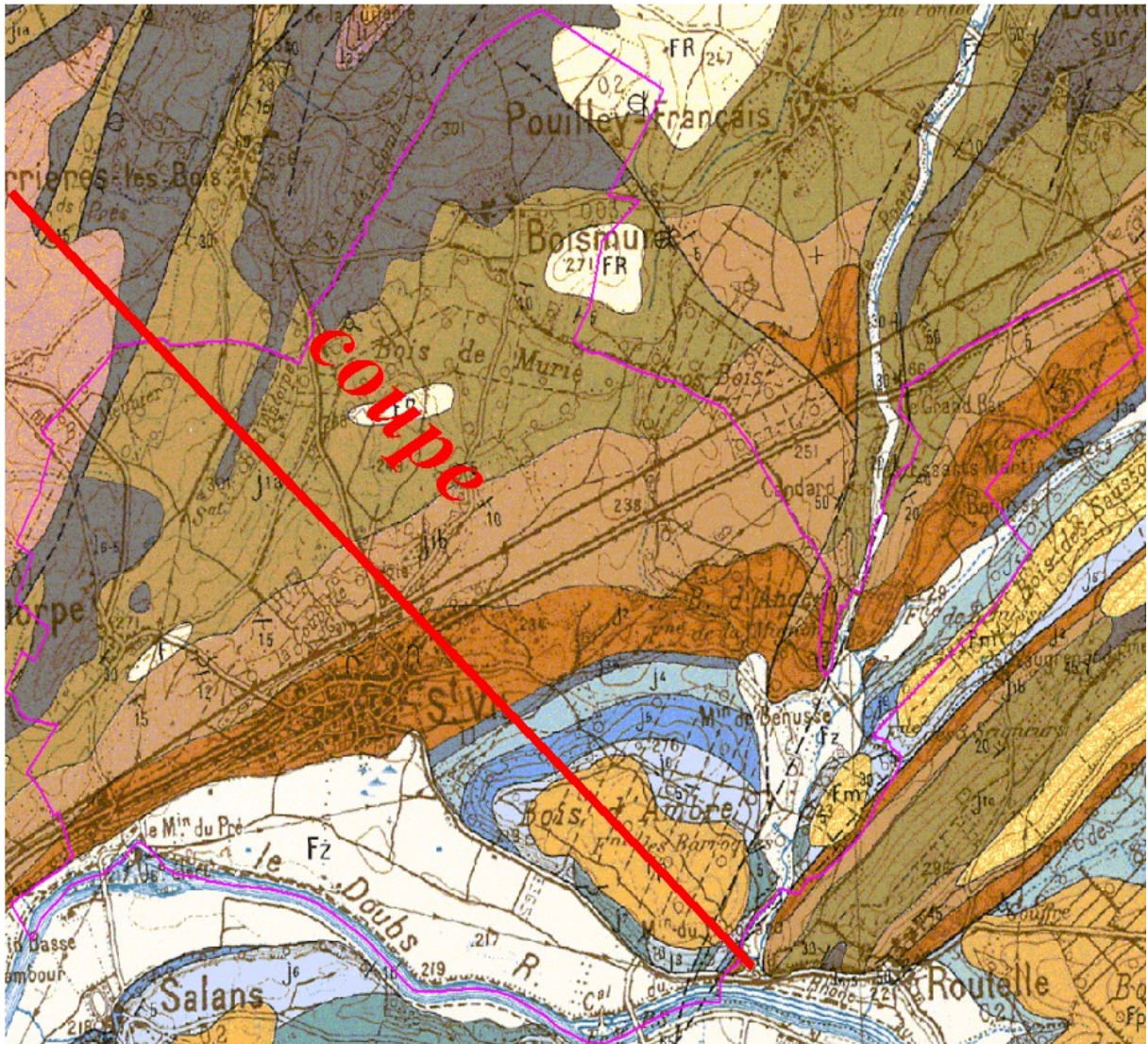


Illustration 16: Carte géologique de Saint vit avec emplacement de la coupe de l'illustration n°17 (fond : carte géologique BRGM 1/50000, n°502, Besançon)

Les étages de cette période présents sur la commune de Saint-Vit, du plus ancien au plus récent, sont :

- **Aalénien et Toarcien (I6-5)**, ensemble de 60 à 70 m d'épaisseur constitué essentiellement de marnes sombres. Ces couches sont affleurantes au nord de la commune et sont caractérisées par leur faible perméabilité mettant en évidence un

système d'aquifère karstique binaire avec des dolines pertes à la limite entre ces couches et les couches du Bajocien inférieur susjacentes.

- **Bajocien inférieur (J1a)**, cette couche de 30 à 40 m d'épaisseur comprend également l'Aalénien supérieur calcaire qui n'a pu être dissocié. Elle est constituée de calcaires à entroques dont le ciment est assez ferrugineux avec par endroits des calcaires à polypiers ou des oolithes grossières au sommet.
La base de cette couche est le siège de nombreuses dolines asymétriques avec perte ce qui la relie directement au réseau karstique actif.
- **Bajocien supérieur (J1b)**, est un ensemble homogène de calcaires oolithiques de 50 à 60 m d'épaisseur bien lités et à stratification entrecroisée nommé « grandes oolithes ».
- **Bathonien (J2)**, est un calcaire compact de 60 à 70 m d'épaisseur, massif le plus souvent sub-lithographique mais aussi graveleux où se situe le cœur de la ville. Cette couche est également connue sous le nom de Calcaires de la Citadelle. Les caractéristiques physiques de cette couche semblent la rendre moins sujet aux effondrements, car les dolines se trouvent essentiellement dans sa zone de faible épaisseur. Cette couche accueille la grotte de Saint-Vit qui est le témoin d'un ancien réseau karstique et fait actuellement partie d'un réseau fossile au moins dans sa partie supérieure.
- **Callovien inférieur (J3a)**, nommé Dalle nacrée, est un calcaire à oolithes et entroques de 6 à 15m d'épaisseur, auquel des stratifications entrecroisées et de nombreuses interruptions de sédimentation donnent son aspect caractéristique en dalles.
- **Oxfordien et Callovien supérieur (J4)**, sont des marnes bleues à ammonites pyriteuse allant de 30 à 50 m.
- **Argovien (J5)**, est une couche de 40 à 50 m d'épaisseur, marneuse à la base puis devenant marno-calcaires bien stratifiée, parfois feuilletée, dans lesquels s'intercalent des bancs de 15 à 30 cm, plus compacts, renfermant des chailles et des fossiles silicifiés. Le sommet devient quant à lui de plus en plus calcaire avec quelques polypiers et des fossiles silicifiés.
- **Rauracien (J6)**, cette couche de 40 à 45m d'épaisseur est un faciès coralligène en continuité avec l'Argovien terminal, que l'on peut subdiviser en deux parties de puissance à peu près égale :
 - au sommet, calcaires oolithiques ou pisolithiques, avec débris de fossiles plus ou moins roulés,
 - à la base, des dépôts récifaux à polypiers et algues (Solénopores).
- **Séquanien (J7)**, est une couche de 85 à 90 m d'épaisseur et est constituée de deux séries calcaires, séparées par des marnes. Le Séquanien supérieur est formé de calcaires le plus souvent oolithiques, cryptocristallins ou à pâte fine alors que le Séquanien inférieur est constitué de calcaires sublithographiques assez bien lités.

- **Kimméridgien (J8)**, d'une épaisseur de 60 à 70 m peut être subdivisé en deux ensembles :
 - Le Kimméridgien supérieur (30 m) formé d'une alternance de marnes et de calcaires à pâte fine ou lumachellique en petits bancs et débutant par un niveau riche en glauconie.
 - Le Kimméridgien inférieur, essentiellement constitué de calcaires compacts, débute lui aussi par un niveau glauconieux, un peu plus marneux.

Sur Saint-Vit, le **Séquanien** et le **Kimméridgien** sont très peu présents en affleurement.

Ces couches du Jurassique sont localement recouvertes par des alluvions de l'Ère tertiaire au Miocène et pliocène (**Fm, Fp, F, P et FR**) provenant de l'érosion des terrains déjà en place. Au niveau de la vallée du Doubs, on a les alluvions les plus récentes nommées alluvions modernes et notées **Fz**. Ces couches alluvionnaires sont constituées d'argile, de galets, graviers et/ou radiolarites.

4.2 - Contexte tectonique

Le sous-sol de la commune de Saint-Vit est affecté par un réseau de failles régionales orientées globalement N30°, traduisant l'influence de l'orogénèse alpine. Un intense réseau de diaclases suit cette même direction.

Ces failles et ces diaclases favorisent les circulations des eaux, donc la karstification.

L'illustration 17 présente une coupe géologique Nord-Ouest / Sud-Est réalisée au droit de la commune.

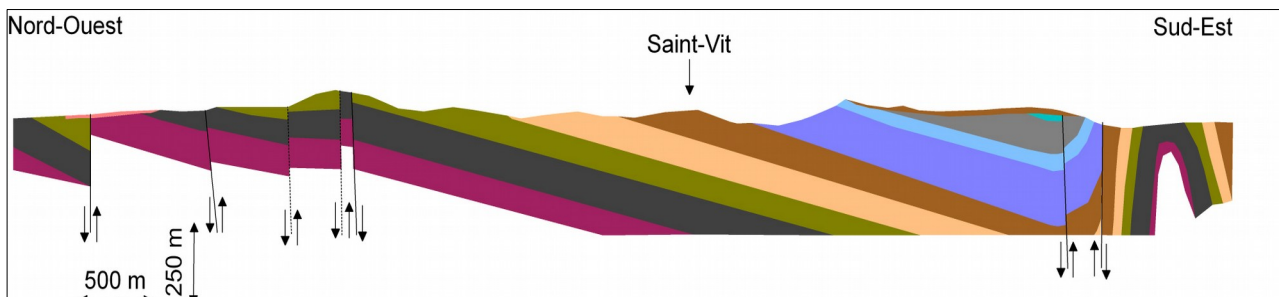


Illustration 17: coupe géologique au droit de la commune de Saint-Vit (25), la trace de la coupe est en illustration n°16



Illustration 18: légende de la coupe géologique en illustration 17

4.3 - Contexte hydrogéologique ou hydrographique ou hydrologique

Les nappes présentes dans les terrains sur la commune de Saint-Vit sont de trois types :

- nappes alluviales,
- nappes karstiques dans les calcaires,
- nappes très localisées dans les marnes.

Les calcaires sont des matériaux imperméables en petit ou en texture. L'absence de pores ne permet pas les circulations et le stockage de l'eau. Cependant, ils sont perméables en grand ou en structure, car l'eau est présente dans les discontinuités telles les diaclases et les failles (illustration 19).

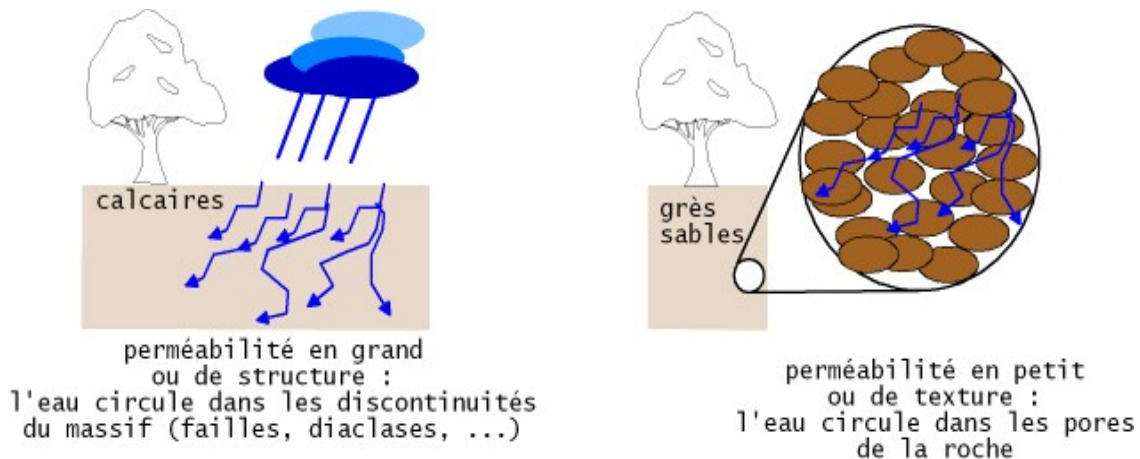


Illustration 19: perméabilité de structure et perméabilité de texture

Les nappes des calcaires sont exclusivement des nappes karstiques caractérisées par des écoulements rapides dans les fracturations de la roche et aucune filtration. Il est important de noter l'effet érosif par dissolution du calcaire qui provoque un élargissement des conduits de circulation, formant ainsi des grottes. Lorsque la couche de calcaire repose sur une couche de marnes, ce qui est le cas à Saint-Vit, il se forme une nappe, dont le mur (surface inférieure) correspond au toit (surface supérieure) de la couche de marne sous-jacente.

L'alimentation des nappes karstiques est principalement assurée par les eaux météoriques. Les infiltrations depuis les niveaux marneux sont anecdotiques.

Les marnes sont des matériaux imperméables en petit du fait de la proportion d'argile dans ceux-ci. Les nappes sont alors localisées dans les niveaux de perméabilité moindre.

Les marnes sont des matériaux très sensibles à l'eau dans lesquels les circulations sont généralement lentes à très lentes et où l'eau se met aisément en pression, provoquant une perte importante de cohésion des marnes. Ainsi se forment les glissements de terrains. L'alimentation des nappes dans les marnes s'effectue par vidange d'une petite partie de l'eau des nappes des calcaires sus-jacentes.

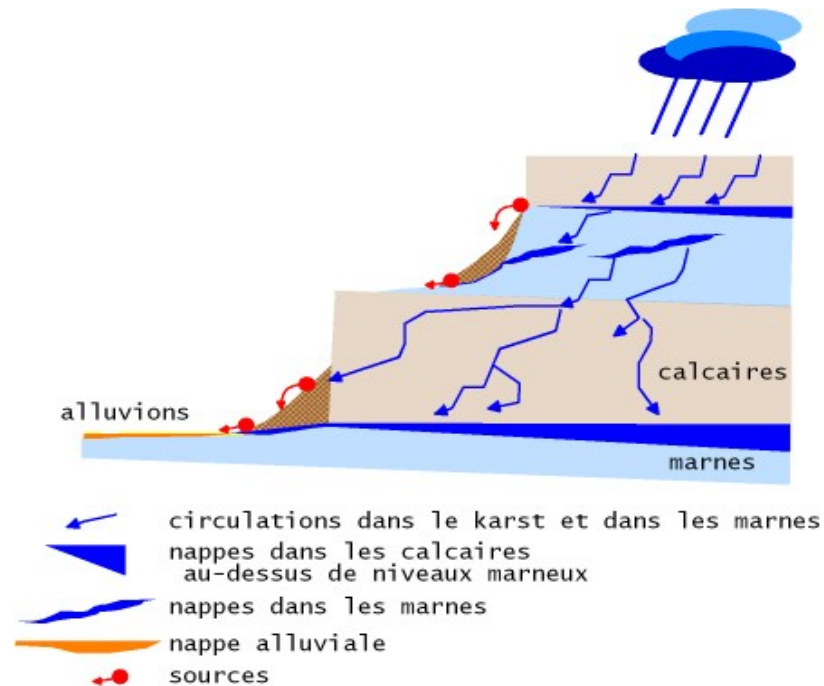


Illustration 20: schéma de principe des circulations d'eau dans les terrains marno-calcaires.

Bien que peu représentées sur la commune de Saint-Vit, les eaux météoriques peuvent aussi circuler dans les formations de pentes comme les éboulis (très perméables) et les groises (très peu perméables).

Du fait de la grande hétérogénéité de ces formations et en particulier de la forte variabilité de la teneur en argile, ces écoulements sont anarchiques et des sources peuvent apparaître et disparaître à n'importe quel endroit des formations de pentes. Cependant, l'apparition des sources à l'interface entre le toit d'une couche imperméable (groises par exemple) et le mur d'une couche perméable (éboulis) est, lorsqu'il y a circulation d'eau dans ces formations, une règle.

Dans la mesure où elles dépendent des précipitations, ces sources peuvent être caractérisées par leur intermittence.

De façon marginale, les circulations d'eau dans les terrains sont également d'origine anthropique. En effet, des fuites dans des réseaux enterrés endommagés ou des dispositifs de drainage abandonnés ou en mauvais état peuvent être la cause de circulations d'eau. Ces fuites, si elles sont situées à proximité des zones urbanisées, peuvent être à l'origine de désordres sur le bâti.

A Saint-Vit, le modèle géologique consiste en un imposant ensemble calcaire, donc perméable en structure, reposant sur des marnes imperméables (illustration 21). Cet ensemble calcaire étant sous la niveau du Doubs, il constitue un aquifère considérable de par son volume et pérenne.

Les terrains présentant une perméabilité de structure sont le siège des phénomènes de karstification. Ainsi, au droit de la commune de Saint-Vit, la karstification l'ensemble karstifiable est de très grande taille, raccordé à un drain naturel, la vallée du Doubs.

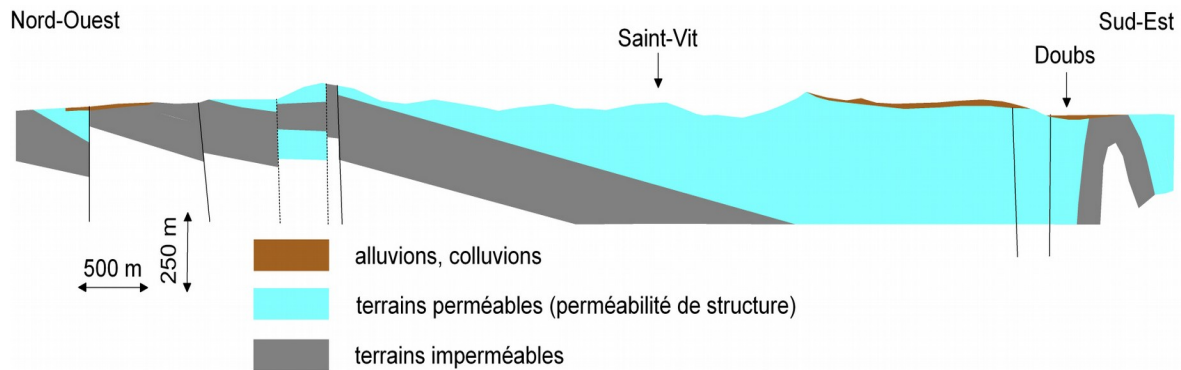


Illustration 21: coupe hydro-géologique, suivant la coupe en illustration 16.

Des traçages ont été réalisés (illustration 22). La direction des traçages suit globalement les deux directions principales des failles représentées sur la carte géologique (BRGM 1/50000, n°502, Besançon), à savoir N30° et N140°.

La tectonique a donc un rôle primordial dans les écoulements souterrains au droit de commune de Saint-Vit. Les failles seront donc un élément majeur de la définition des niveaux d'aléa.

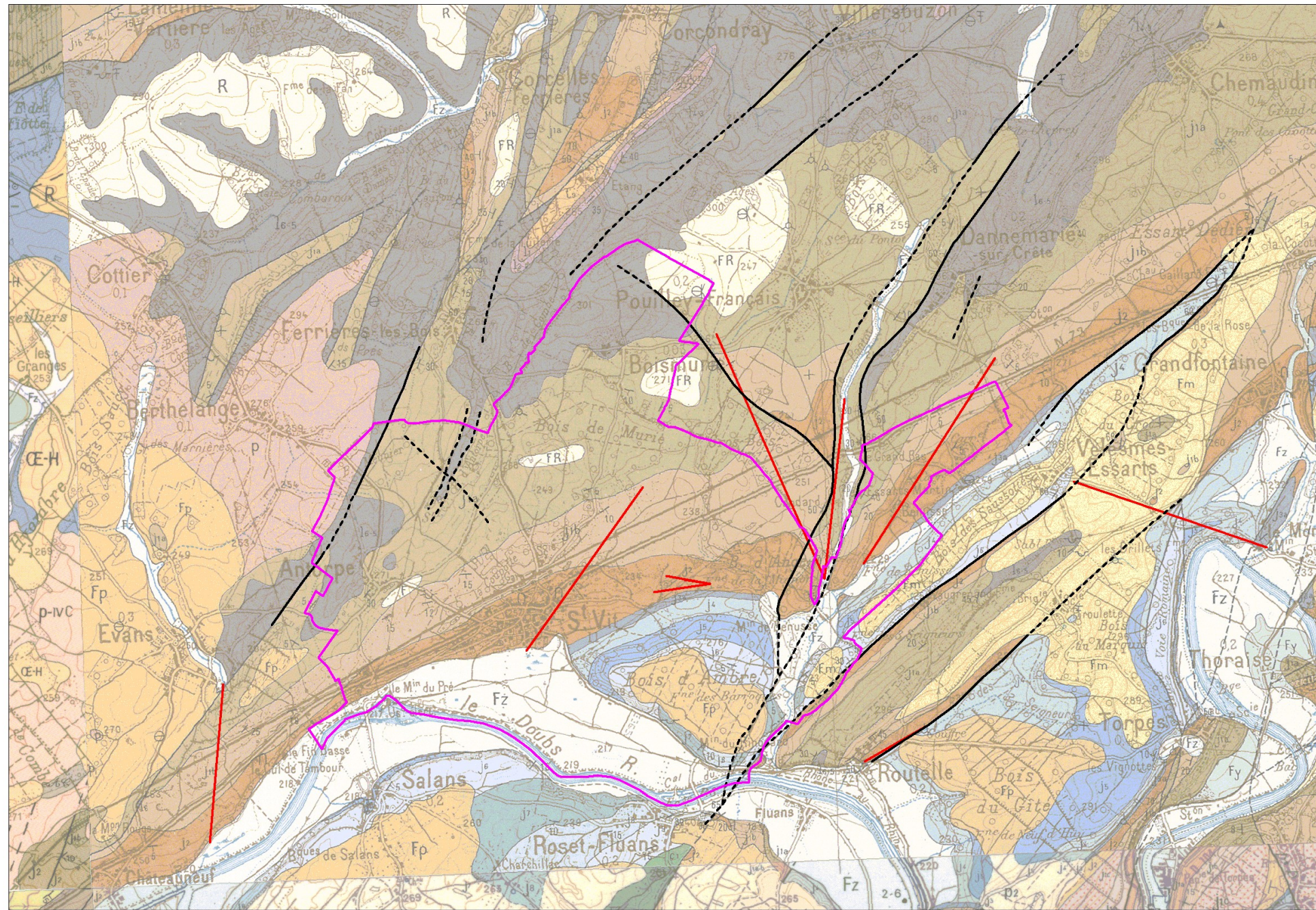


Illustration 22: corrélation entre les failles et la direction des traçages (fond : carte géologique BRGM 1/50000, n°502, Besançon) ; trait mauve, limite communale ; trait rouge, traçage ; trait noir, faille.

5 - Méthodologie de hiérarchisation et de cartographie de l'aléa karstique

5.1 - Principe de détermination du niveau d'aléa karstique

La détermination du niveau d'aléa se fait en 2 temps.

L'aptitude d'un terrain à être karstifié est basée sur une prédisposition géologique (roches solubles). Il est possible de déterminer des niveaux de prédisposition géologique, de forte à nulle (illustration n°23).

Dans un second temps, il est utile d'ajouter des considérations tectoniques et géomorphologique, ce qui sera nommé la prédisposition karstique et à laquelle un niveau d'aléa est associé (illustration n°23).

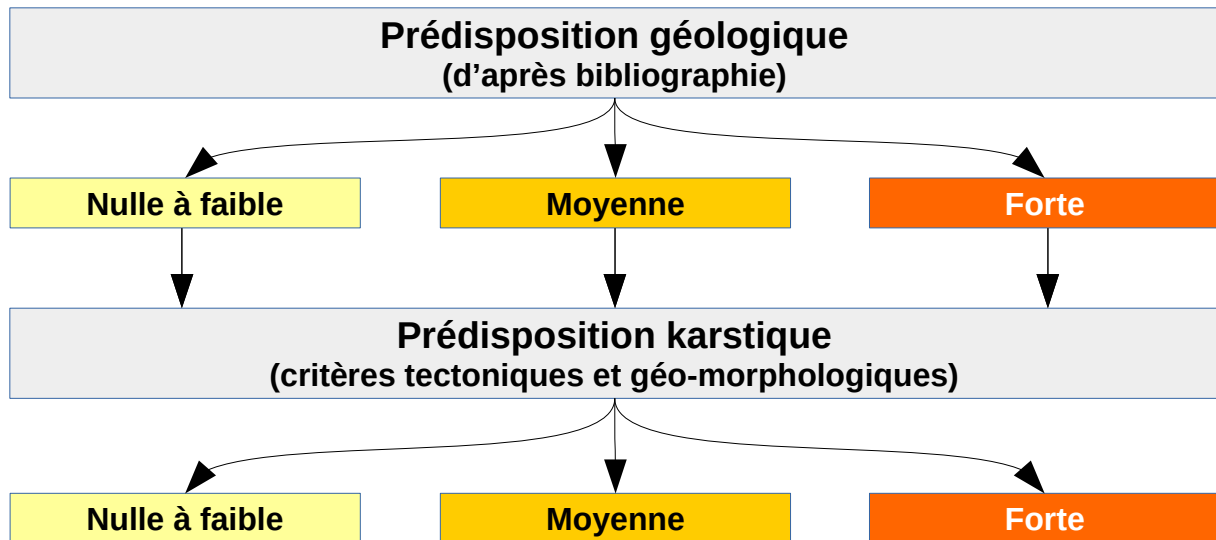


Illustration 23: principe de détermination du niveau d'aléa karstique.

5.2 - Prédisposition géologique

Pour chaque étage géologique (approche stratigraphique et non lithologique), ont été recensés les indices tels que les désordres (dolines), les grottes, les gouffres, les sources et les pertes. Une étude statistique non exhaustive a ainsi été réalisée afin d'identifier les niveaux lithologiques karstifiables. Les indices pris en compte ont été extraits des cartes géologique et topographiques, ainsi que des bases de données du BRGM (BD-MVT et BD-CAVITES).

Pour chaque étage et pour chaque type d'indice karstique (désordres, grottes, gouffres, sources et pertes), ont ensuite été calculés la proportion d'indice par rapport à la totalité des indices (colonne « relatif en % » du tableau n°1) ainsi que la densité de ces indices par kilomètre-carré des terrain attribué à l'étage géologique correspondant (tableau n°1). Concernant les transitions entre étages, la densité a été calculée pour une bande de 100 mètres de large au droit de la limite stratigraphique.

unité lithologique	surface (km²)	désordres			grottes			gouffres			sources			pertes		
		Absolu	Relatif (%)	Densité (/km²)	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km²)	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km²)	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km²)	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km²)
J ₈	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₇ / J ₈	0,15	1	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₇	0,88	5	3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₈ / J ₇	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₈	0,78	11	6	14	-	-	-	-	-	-	2	18	2,6	-	-	-
J ₆ / J ₈	0,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₆	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₄ / J ₃	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₄	0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₃ / J ₄	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₃	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J ₂ / J ₃	0,2	2	1	10	-	-	-	-	-	-	5	45	25	-	-	-
J ₂	2,41	18	10	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J _{1b} / J ₂	0,76	18	10	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J _{1b}	2,71	58	32	21	-	-	-	1	50	0,4	-	-	-	-	-	-
J _{1a} / J _{1b}	0,56	11	6	20	1	100	2	-	-	-	1	9	1,8	1	100	1,8
J _{1a}	4,09	55	30	13	-	-	-	1	50	0,2	-	-	-	-	-	-
I ₅₋₆ / J _{1a}	0,7	3	2	4	-	-	-	-	-	-	1	9	1,4	-	-	-
I ₅₋₆	1,29	5	3	4	-	-	-	-	-	-	2	18	1,6	-	-	-
total	15,3	181	100		1	100		2	100		11	100		1	100	

Tableau 1: étude statistique non exhaustive des indices karstiques par étage géologique ; l'intensité de la coloration des cases permet de visualiser l'importance de la karstification par niveau stratigraphique. L'intensité de la couleur attribuée aux case correspond au niveau d'importance relative et de densité de chaque type d'indice ; à savoir

Densité >= 20 % 20 % > Densité >= 10 % > 20 indices >= 10 indices

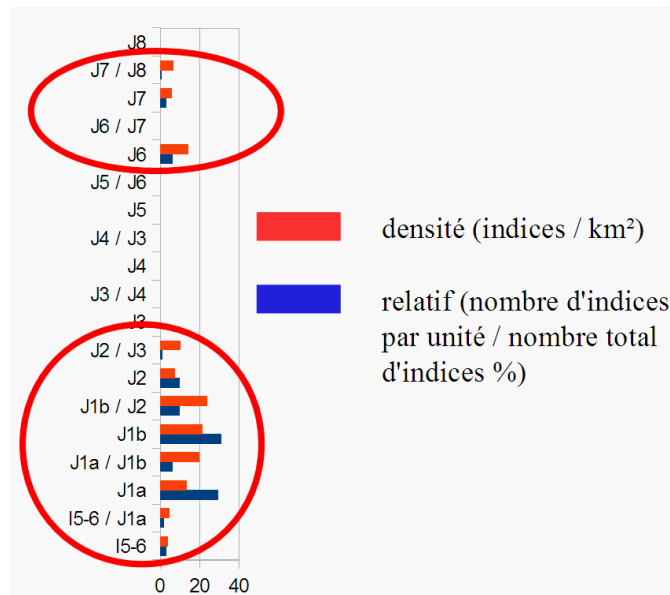


Illustration 24: traduction graphique du tableau n°1

Sur la commune de Saint-Vit, les terrains ayant la plus forte prédisposition géologique sont donc les roches de deux ensembles :

- du Bajocien inférieur (J1a) à la transition Bathonien / Callovien (J2/J3), soit une épaisseur d'environ 150 mètres ;
- du Rauracien (J6) à la limite Séquanien / Kimmeridgien (J7/J8), soit une épaisseur d'environ 140 mètres.

Il faut aussi noter la présence d'un nombre important de sources entre le Bathonien et le Callovien.

Enfin, les marnes du Lias semblent présenter une sensibilité aux phénomènes de suffosion.

Il a ainsi été possible de cartographier, sur la base de la carte géologique au 1 / 50000, des zones auxquelles ont été associés trois niveaux de prédisposition géologique (illustration n°29). Le niveau de prédisposition géologique est déterminé par rapport à la densité d'indices (tableau 2).

Densité d'indices	Prédisposition géologique
≥ 10	Forte
$0 < \leq 9$	Moyenne
0	Faible à nulle

Tableau 2: le critère de détermination du niveau de prédisposition géologique.

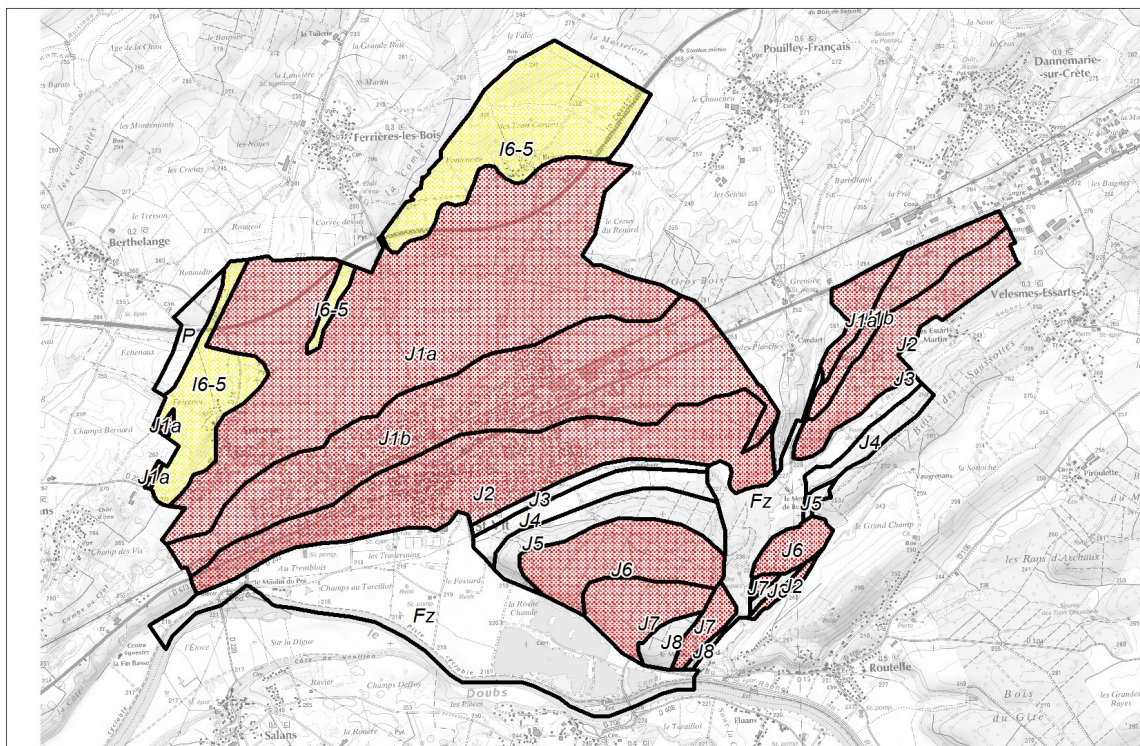


Illustration 25: Carte de prédisposition géologique (rouge : fort ; jaune : moyen ; blanc : faible et nulle)

La densité ici utilisée n'est pas comparable à celle calculée pour l'ATLAS MVT du Doubs, où la densité avait été calculée pour une surface tout terrains géologiques confondus, réduisant considérablement la densité calculée. A titre d'exemple, ici, avec un seul indice et sur une surface très réduite, la transition J7/J8 apparaît avec une densité de 7 indices par kilomètre-carré.

5.3 - Principe de détermination de la prédisposition karstique

Les critères tectoniques et géo-morphologiques utilisés pour la détermination de niveau d'aléa karstique sont les suivants :

- présence de failles (avérées ou supposées) : un couloir de faille est une zone linéaire, rectiligne ou présentant des courbes, fracturée et diaclasée, dont la perméabilité est localement très forte ;
- présence de dolines ;
- présence de sources ;
- présence de pertes ;
- surface en contact direct avec la partie active des réseaux karstiques.

Ainsi, les zones sensibles vis à vis de la prédisposition karstiques sont les zones de dolines, les zones d'alimentation et les exutoires des réseaux actifs.

5.3.1 - Les dolines

Les dolines sont des dépressions dont le bord est ici défini comme la rupture de pente (illustration 26).

Le bord de la doline est défini comme la ligne de changement de pente. Cette ligne est parfois difficile voire impossible à déterminer en raison des facteurs suivants :

- la ligne de rupture de pente n'est pas marquée (en particulier dans le cas de dolines anciennes, peu évolutives, ou au droit d'un réseau fossile)
- le comblement naturel ou anthropique de la doline,
- la végétation masque la vue (en photographies aériennes ou sur le terrain),
- l'urbanisation.

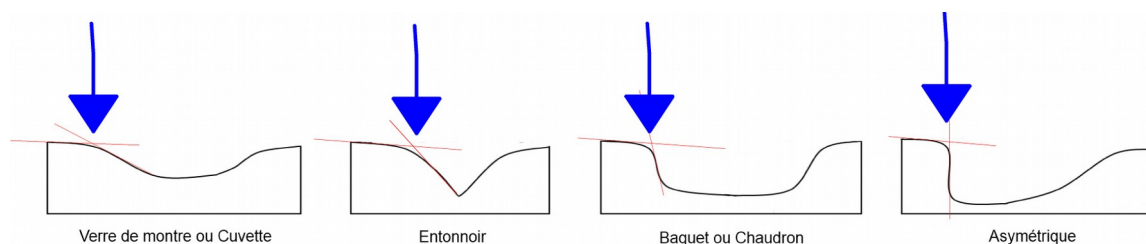


Illustration 26: détermination du bord d'une doline

5.3.2 - Les zones d'alimentation des réseaux actifs

Des zones d'alimentation du réseau correspondent à deux cas :

- les parties marneuses donc imperméables (réseau type binaire) ;
- les zones de concentration des eaux de ruissellement (réseau type unaire), à la limite entre des calcaires de nature différente, donc limite marquée par un creux topographique.

Cas du calcaire sur niveau imperméable

Faire la différence entre la partie active et la partie fossile d'un réseau karstique est très difficile, d'autant plus qu'un aménagement en surface (concentration des eaux de ruissellement par exemple) peut très aisément rendre active une portion de réseau rendue fossile par l'abaissement de la surface hydrostatique.

Pour la présente étude, nous considérerons que le réseau actif est la partie inférieure, au mur de la couche ou de l'ensemble de couches karstifiables, directement au toit d'un niveau imperméable.

Sur la commune de Saint-Vit, deux ensembles sont à considérer comme karstifiables, à savoir :

- du Bajocien inférieur (J_{1a}) à la limite Bathonien / Callovien (J_2/J_3), soit une puissance d'environ 150 mètres ;
- du Rauracien (J_6) à la limite Séquanien / Kimmeridgien (J_7/J_8), soit une puissance d'environ 140 mètres.

Ainsi, le mur du Bajocien inférieur (J_{1a}) et celui du Rauracien (J_6) sont à considérer comme la base des réseaux actifs. Bien qu'il soit possible (illustration n°12) que des phénomènes de suffosion puissent impacter les couches imperméables sous les ensembles karstifiables, cela ne modifie pas la géométrie générale de la base des réseaux actifs.

La puissance de la couche de roche considérée comme étant le siège de la partie active du réseau est basée sur la connaissance du niveau hydrostatique de la nappe karstique concernée. Hors ce niveau hydrostatique varie considérablement et est extrêmement difficile à connaître en tout point d'un territoire.

La variation saisonnière du niveau hydrostatique ne semble pas excéder 20 mètres (d'après les données recueillies dans divers publications, dont le rapport *Systemes karstiques et crues du Doubs*, BRGM/RP-53063-FR, avril 2004), sauf cas de mise en charge exceptionnelle lors d'un épisode orageux ou lors de pluie sur de la neige. Une marge de sécurité est ajoutée à cette hauteur maximale afin de prendre en considération les variations localisées de géométrie des réseaux (réduction de la section d'écoulement, siphon, ...) pouvant engendrer des mises en charges.

Du point de vue cartographique, il est donc nécessaire de déterminer une surface correspondant au réseau actif affleurant en amont (côté alimentation) et en aval (côté exutoires).

Les illustrations 27 et 28 expliquent la méthode de détermination de la partie affleurante des réseaux karstiques actifs.

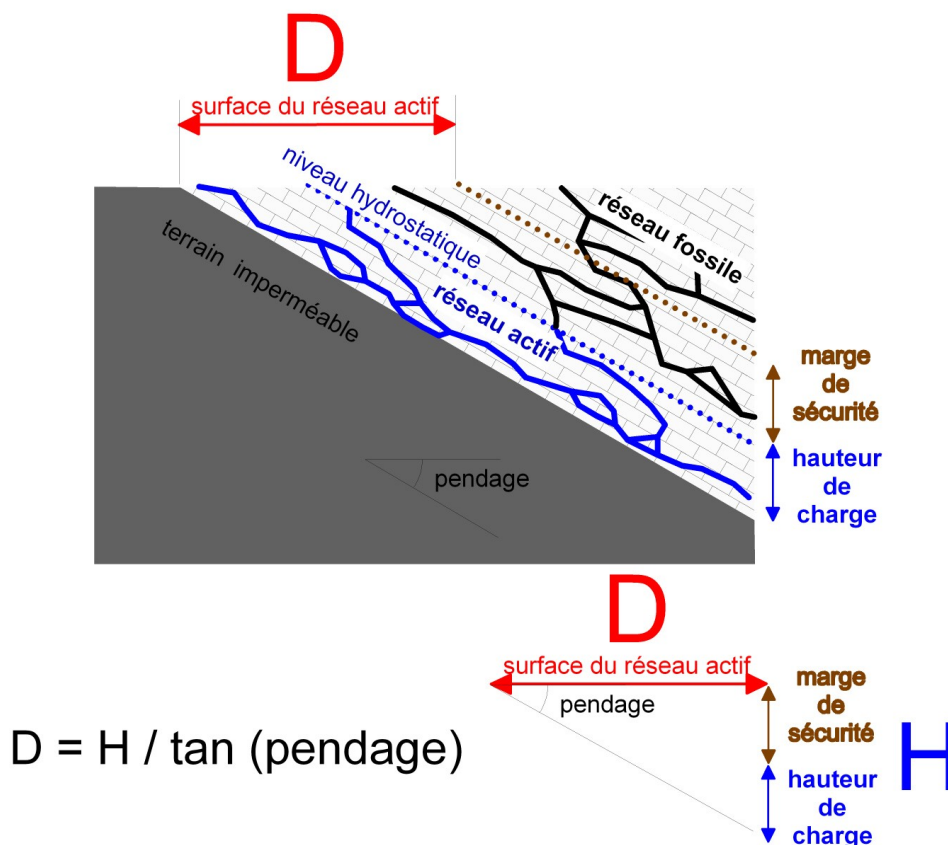


Illustration 27: coupe schématique réseau actif / réseau fossile

Cette distance horizontale entre le toit de la couche imperméable et celui du réseau karstique (D) dépend du pendage des couches géologiques. Le tableau 3 présente le rapport entre le pendage des couches et la distance D.

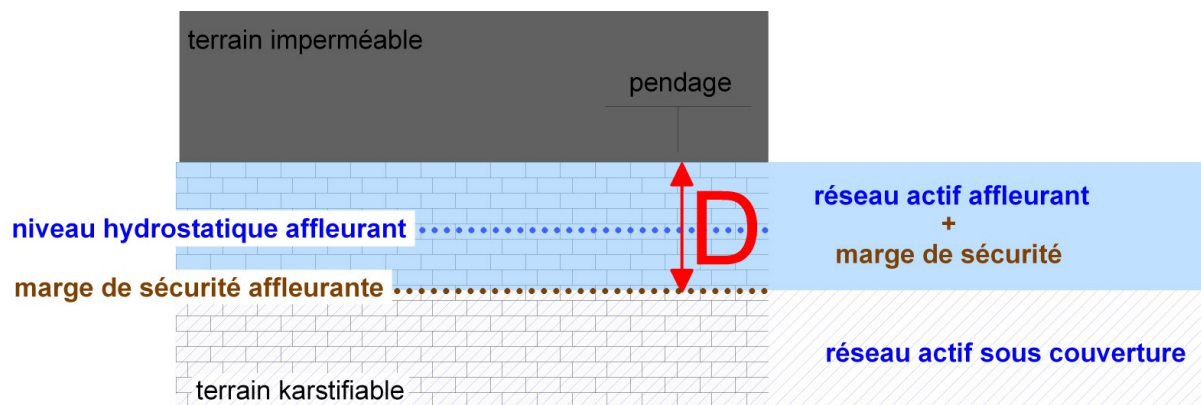


Illustration 28: représentation cartographie en plan de l'affleurement de la partie active du réseau karstique

Pendage (°)	D(m)
5	460
10	225
15	150
20	110
30	70
40	50
50	34
60	23

Tableau 3: rapport entre le pendage des couches et la surface du réseau actif
variation du niveau hydrostatique 20m, marge de sécurité 20m, puissance réseau actif 40m.

Cas du massif calcaire

Les eaux de ruissellement sont aussi concentrées à l'occasion de fortes précipitations sur des surfaces imperméabilisées (enrobée, argiles de surface). A la surface de massif calcaire, ces accumulations d'eau trouvent aisément un chemin possible vers les réseaux karstiques. Cette sollicitation hydraulique brutale des réseaux les rend comparables aux réseaux actifs.

5.3.3 - Les exutoires des réseaux actifs

La puissance de la partie exutoires des réseaux actifs a été déterminée directement en traçant les zones de sources au pied des talus calcaires.

5.4 - Synthèse des informations géomorphologiques (carte des phénomènes)

Les informations recueillies lors des étapes précédentes sont reportées sur un document unique (ANNEXE 1), la carte des phénomènes.

Ce document reprend :

- les bordures de dolines,
- les points singuliers (pertes, sources, etc),
- les ensembles stratigraphiques présentant des roches karstifiables (d'après la carte géologique),
- les limites entre ensembles stratigraphiques identifiées comme très karstifiables,
- les failles (d'après la carte géologique),
- la localisation des zones où la partie active des réseaux karstiques peut être qualifiés « d'affleurante »,
- le réseau hydrographique.

Ces informations géomorphologiques permettent de déterminer la prédisposition karstique, en particulier la proximité d'indices karstiques (dolines, failles, etc).

5.5 - Les niveaux d'aléa karstique

Le niveau d'aléa karstique est déterminé par croisement de la prédisposition géologique et de la prédisposition karstique.

Le zonage d'aléa karstique est déterminé par croisement graphique des prédispositions (illustration 29)

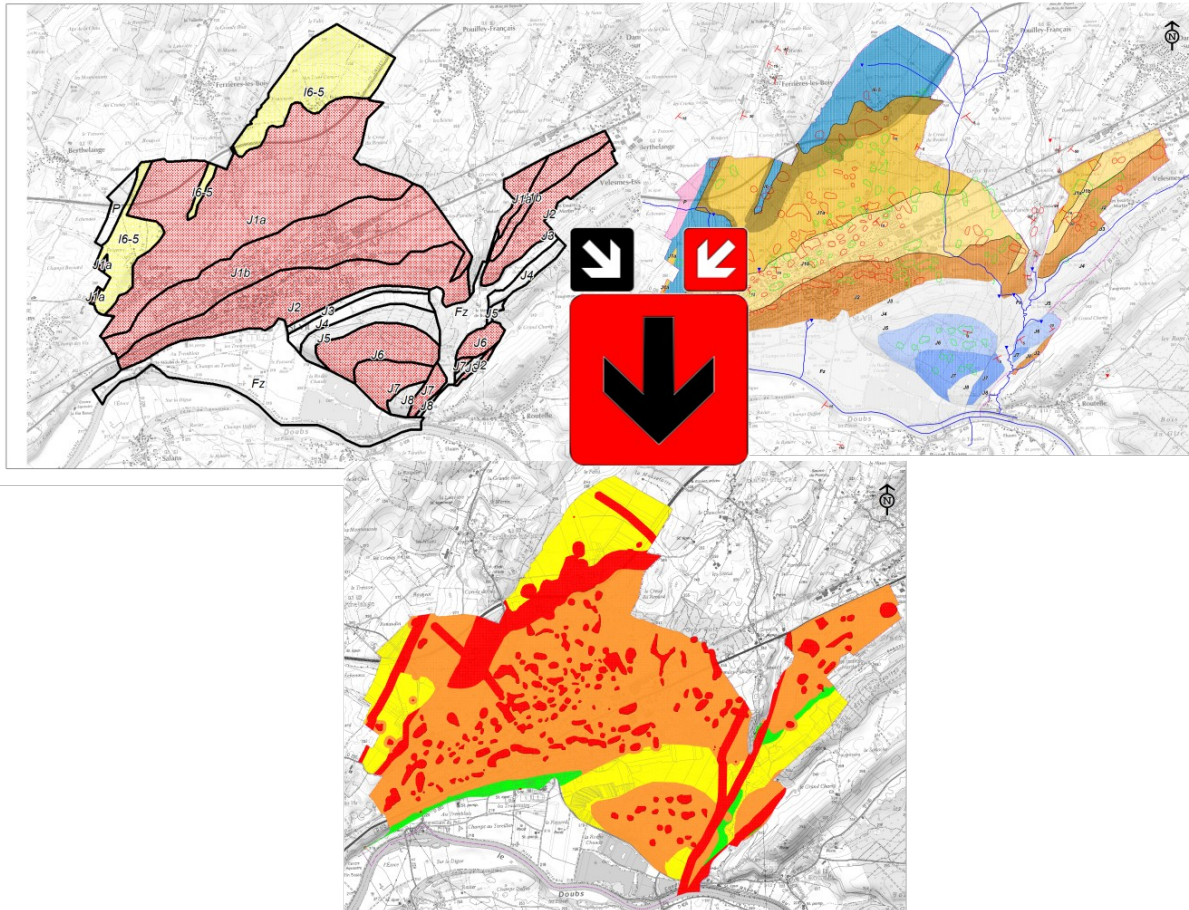


Illustration 29: principe du croisement graphique de la prédisposition géologique et de la prédisposition karstique

Ainsi, quatre niveaux d'aléa sont définies :

- les zones rouges, correspondant aux parties du territoire soumises à un aléa karstique fort ;
- les zones oranges, correspondant aux parties du territoire soumises à un aléa karstique moyen ;
- les zones jaunes, correspondant aux parties du territoire soumises à un aléa karstique faible ;
- les zones vertes, correspondant aux parties du territoire au droit des exutoires des réseaux actifs.

Ces niveaux (tableau 4) sont déterminés selon des critères géomorphologiques, en particulier la présence de dolines et d'indices ponctuels tels que les gouffres et les grottes.

Aléa affaissement / effondrement		Prédisposition géologique					
		Forte		Moyenne		Faible	
		réseau actif	réseau fossile (*)	réseau actif	réseau fossile (*)	réseau actif	réseau fossile (*)
Géomorphologie	A l'intérieur des dolines	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
	Périmètre autour des failles (50 m)	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
	Périmètre autour des indices ponctuels (50 m)	Fort	Moyen	Fort	Moyen	Moyen	Moyen
	Hors périmètres (au-delà de 50 m autour des indices ponctuels et des failles)	Fort	Moyen	Fort	Faible	Moyen	Faible
	Zone d'exutoires	Fort avec recommandations spéciales *					

* : zone à indices ponctuels témoin d'un réseau karstique, sans observation hydraulique permettant de confirmer le caractère actif.

Tableau 4: détermination du niveau d'aléa.

Enfin, lors de la réalisation des zonages, les limites ont localement été modifiées en tenant compte des orientations des fractures du massif rocheux (failles et diaclases), des traçages, des alignements d'indices et de toutes les observations laissant penser à l'existence d'un réseau karstique sous-jacent. Les limites ont aussi été adaptées afin d'aboutir à un zonage cohérent et homogène.

*** Recommandations spéciales :**

- proscrire les aménagements (remblais et bâtiments) susceptibles de bloquer les écoulements et sensibles aux aléas hydrauliques (inondations et coulées boueuses) ;
- réaliser régulièrement les relevés du niveau d'eau, permettant de prévenir une mise en charge importante du réseau karstique et des aléas qui en découlent (inondations, coulées boueuses, etc).