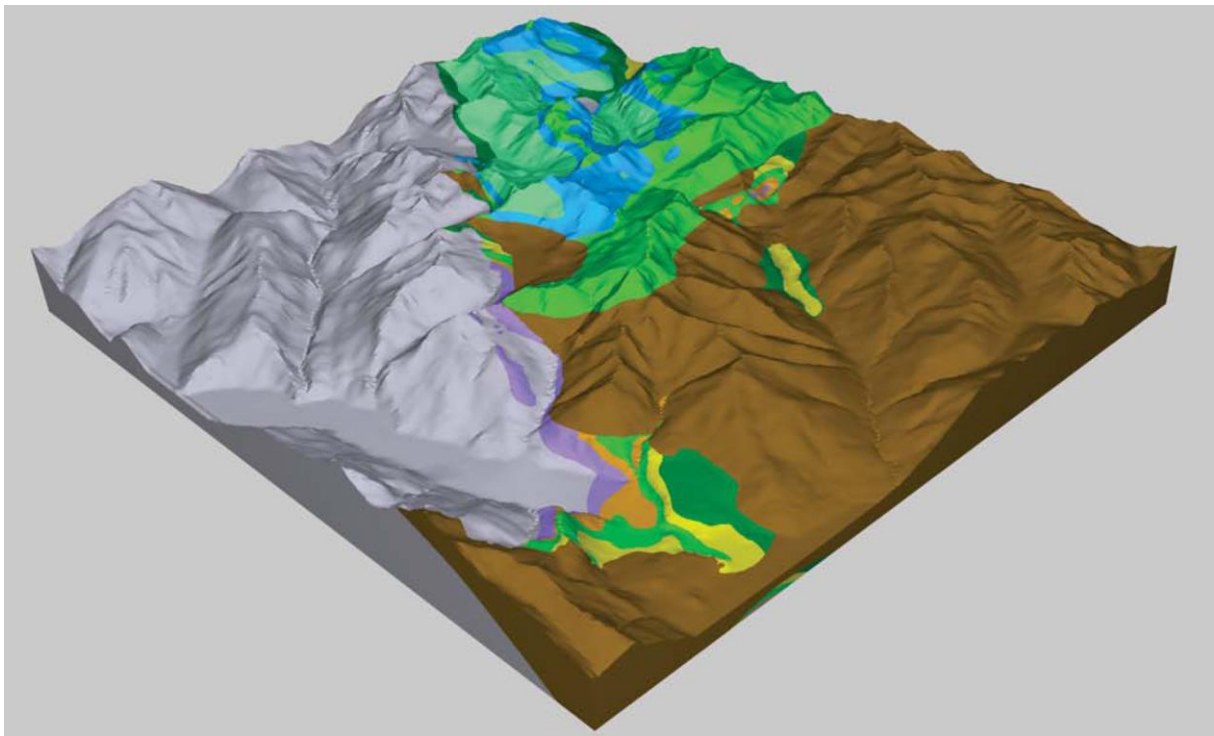


Mandant : Groupe eaux souterraines
Section protection des eaux
Service de l'Environnement
Rue des Creusets 5
CH – 1950 Sion

Application de l'approche KARSYS au Canton du Valais

Rapport méthodologique



Vue du modèle géologique 3D des Dents du Midi.

La Chaux-de-Fonds, le 29 janvier 2020

ISSKA
SISKA
ISSCA
SISKA



Institut suisse de spéléologie et de karstologie
Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung
Istituto svizzero di speleologia e carsologia
Swiss institute for speleology and karst studies

Titre : Application de l'approche KARSYS au Canton du Valais

Auteurs : Rickerl Demian, Vouillamoz Jonathan, Eric Weber, Marc Luetscher

Mandant : Service de l'Environnement (SEN),
Etat du Valais

Mots clés : Sources karstiques, Systèmes karstiques, Inventaire,
Documentation, Valais, KARSYS

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

ISSKA (2020) – Application de l'approche KARSYS au Canton du Valais. – Rapport non publié pour le Service de l'Environnement du canton du Valais, 26 p. + annexes

Application de l'approche KARSYS au Canton du Valais

Table des matières

1	Cadre général de l'étude	1
1.1	Projet KarstValais	1
1.2	Déroulement de l'étude	1
2	L'approche KARSYS	3
2.1	Bases scientifiques de l'approche	3
2.2	Applications en Suisse et à l'étranger	4
2.3	Méthodologie	5
2.3.1	Etape 1 – Documentation	6
2.3.2	Etape 2 – Géologie	7
2.3.3	Modèle hydrogéologique 3D des aquifères	8
2.3.4	Délimitation des systèmes d'écoulement	9
3	Structure de la documentation	10
3.1	Fiches « Modèle 3D » (Annexe A)	10
3.2	Fiches « Systèmes karstiques » (Annexe B)	11
3.2.1	Description du système	11
3.2.2	Fiches de synthèse KARSYS	11
3.2.3	Cartes des caractéristiques de surface	16
3.2.4	Cartes du fonctionnement hydrogéologique	19
4	Conclusions	19
5	Annexes	20
6	Bibliographie	20

Liste des figures

Figure 1	Répartition des roches carbonatées et potentiellement karstifiées sur le territoire valaisan et zones karstiques en découlant.	2
Figure 2	Situation des zones karstiques définies par le projet pilote (ISSKA 2015), étapes déjà réalisées et planification des étapes à venir.	3
Figure 3	Workflow de l'approche KARSYS en quatre étapes et données nécessaires.	6
Figure 4	Organisation des écoulements au sein d'un système karstique formalisé selon l'approche KARSYS : Fvv, écoulement vadose vertical ; Fvc, écoulement vadose contrôlé par la géométrie de l'aquiclude; Fplf, écoulement phréatique en régime de basses eaux et Fphf, écoulement phréatique en hautes eaux. imp. désigne ici les formations aquicludes c.à.d. non karstifiées.	9
Figure 5	Principes de délimitation des systèmes d'écoulement ; application à une région fictive. (a) En conditions de basses eaux, deux bassins d'alimentation sont identifiés en surface. (b) L'approche KARSYS permet d'identifier deux nappes karstiques séparées par un seuil et alimentant deux groupes de sources différents (vert et rouge). (c) En conditions de hautes eaux, l'élévation du gradient hydraulique provoque un transfert partiel des eaux du système vert vers le système rouge. (d) L'intégration de cette analyse met en évidence le caractère diffluent du bassin d'alimentation du système vert. (e) Sur cette base, les unités de bassin peuvent être définies et permettent d'interpréter le cheminement des eaux souterraines entre la surface et les sources, ce pour différentes conditions hydrodynamiques.	10
Figure 6	Module « Caractéristiques de surface » de la fiche de synthèse KARSYS	12
Figure 7	Module « Sources karstiques » de la fiche de synthèse KARSYS	13
Figure 8	Module « Données » de la fiche de synthèse KARSYS	14
Figure 9	Module « Modèle géologique 3D » de la fiche de synthèse KARSYS	15
Figure 10	Module « Modèle hydrogéologique 3D » de la fiche de synthèse KARSYS	15

Liste des tableaux

Tableau 1	Principales références scientifiques utilisées comme base pour l'établissement des principes appliqués dans l'approche KARSYS.	4
Tableau 2	Différentes applications de l'approche KARSYS en Suisse et à l'étranger (état mi-2017). Les copies des publications (en italique) sont jointes sur CD en annexe D.	5
Tableau 3	Liste des éléments documentés et de leurs propriétés respectives	6
Tableau 4	Liste des éléments résultants de l'étape 2 et leurs propriétés	8
Tableau 5	Liste des éléments résultant de l'étape 3 et de leurs propriétés	9

Application de l'approche KARSYS au Canton du Valais

1 Cadre général de l'étude

Avec un relief alpin prononcé et plus d'un tiers du territoire directement touché par des environnements karstiques, le canton du Valais dépend en plusieurs endroits de sources karstiques pour son approvisionnement en eau potable. Ces sources présentent également un potentiel hydroélectrique intéressant, valorisé en général conjointement à l'eau potable (mini-centrales).

Les environnements karstiques en Valais définissent des bassins d'alimentation de grandes dimensions qui peuvent impliquer plusieurs territoires communaux mais également déborder dans certains cas sur les cantons limitrophes (Vaud, Berne) voir sur le territoire transfrontalier (essentiellement vers la France).

De ce fait, la gestion des activités dans ces environnements particuliers constitue une problématique complexe, susceptible d'engendrer des conflits d'usage, pour laquelle il est important de disposer de données de bases et d'informations objectives ainsi que d'une bonne compréhension des régimes d'écoulements souterrains.

1.1 Projet KarstValais

Face à ces enjeux et tout en tenant compte du contexte de la révision de l'Ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux) pour les milieux karstiques et fissurés fortement hétérogènes, le Service valaisan de l'environnement (SEN) a entrepris la documentation harmonisée des karsts cantonaux. Dans ce contexte, un inventaire des différents systèmes identifiés est proposé afin d'en dégager une vision intégrée et d'offrir un état de connaissances consolidé tant aux autorités qu'aux praticiens.

Cette documentation doit permettre d'identifier et surtout de comparer facilement les paramètres et propriétés principales des différents systèmes karstiques étudiés. L'outil de documentation retenu est l'approche KARSYS, développée par l'ISSKA dans le cadre du projet Swisskarst « Vers une gestion durable de l'eau karstique en Suisse », part du programme national de recherche PNR61. Cette approche permet la réalisation d'un modèle hydrogéologique 3D conceptuel basé sur une synthèse des données existantes et l'implémentation de principes de base de l'hydrogéologie karstique.

1.2 Déroulement de l'étude

Le projet KarstValais a débuté en 2014 par une phase pilote comprenant deux tâches principales :

- Dresser un inventaire général, sur l'ensemble du Valais, des données relatives à la géologie et l'hydrogéologie des zones karstiques (Figure 1). Sur cette base, délimiter les différentes zones karstiques en présence ;
- Appliquer l'approche KARSYS sur une zone pilote, le nord du Chablais valaisan, afin de valider son applicabilité et sa pertinence dans le contexte des karsts alpins.

Cette première phase a mis en évidence quelques 27 zones karstiques distinctes (Figure 1 et Figure 2). L'application de l'approche KARSYS à la partie nord du Chablais valaisan a permis

de valider la procédure d'application de l'approche KARSYS la plus adaptée au contexte des karsts alpins. Cette procédure prévoit notamment :

- Une modélisation géologique 3D des structures principales, avec intégration des structures secondaires par itération ;
- La prise en compte des failles principales comme élément permettant aux circulations souterraines de traverser les formations considérées préalablement comme aquiclude (imperméable à la karstification).

Suite à cette étape initiale, le projet s'est poursuivi avec une deuxième phase de travail visant la généralisation de l'approche KARSYS aux différents systèmes identifiés sur le territoire cantonal. Cette couverture du territoire est planifiée par étapes successives, s'étalant entre 2014 (projet pilote) et 2020 (phase de finalisation).

En concertation avec le SEN, les éléments constituant les résultats du projet KarstValais ont été défini comme suit :

- Un rapport méthodologique présentant l'ensemble du projet, explicitant la méthode appliquée et détaillant la structure des éléments délivrés (le présent rapport) ;
- Un catalogue de fiches de documentation (voir chapitre 3), incluant notamment une série d'indicateurs permettant de juger de l'état de connaissance des différents systèmes et de les comparer. Ces fiches documentaires offrent en premier lieu une plus-value dans le cadre de la réalisation des études de délimitation de zones de protection des eaux souterraines mandatées par les communes mais peuvent également être valorisées pour tout autre type d'étude ;
- Un catalogue des géodonnées générées dans le cadre des travaux et intégralement mises à disposition du SEN pour leur intégration à la base de données hydrogéologiques cantonale REGIS.

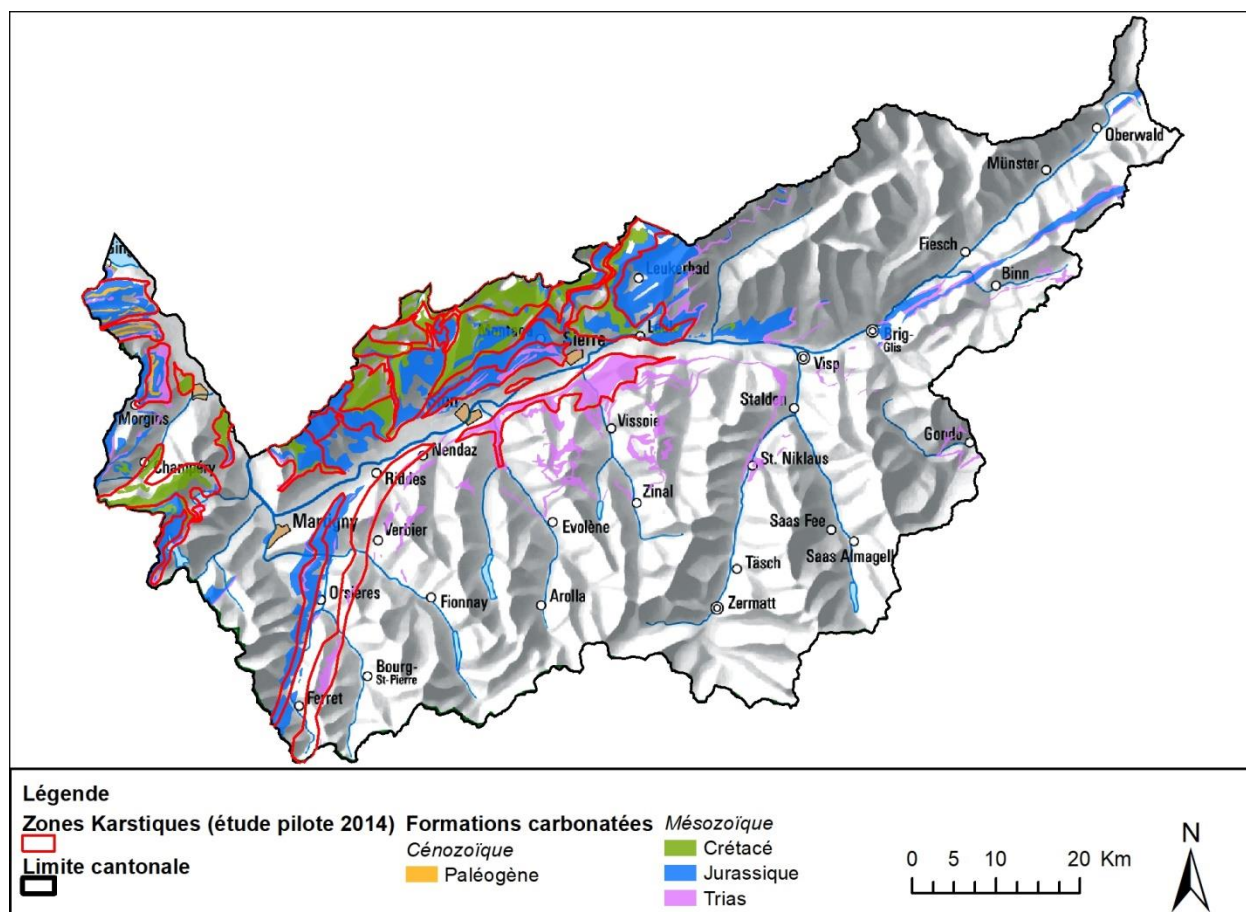


Figure 1 Répartition des roches carbonatées et potentiellement karstifiées sur le territoire valaisan et zones karstiques en découlant.

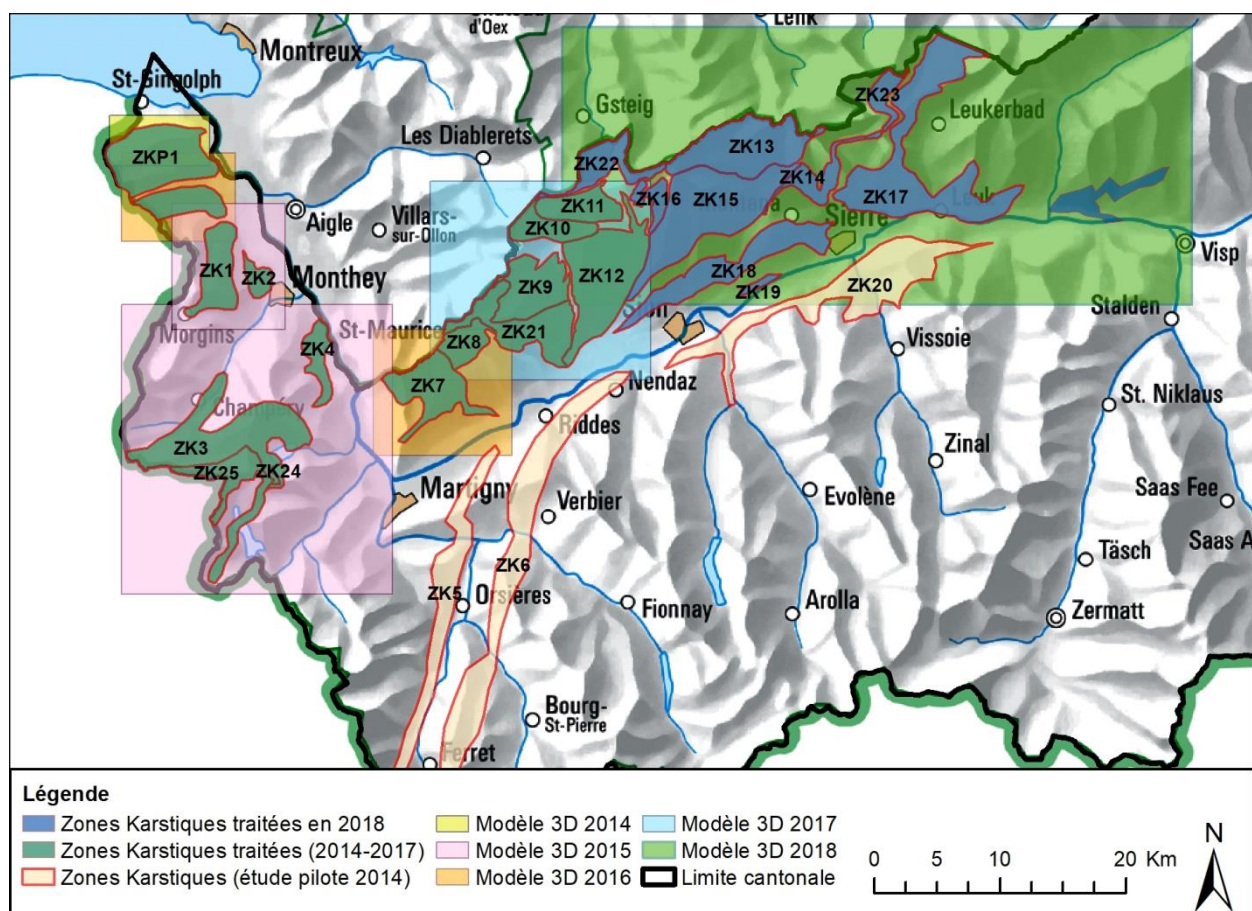


Figure 2 Situation des zones karstiques définies par le projet pilote (ISSKA 2015), étapes déjà réalisées et planification des étapes à venir.

2 L'approche KARSYS

KARSYS est une approche pragmatique et systématique de caractérisation et de documentation des aquifères karstiques, mise au point par l'ISSKA dans le cadre du projet Swisskarst 2010-2013¹. Appliquée à l'échelle d'un aquifère régional ou d'un système karstique local, KARSYS fournit un modèle conceptuel explicite du réservoir aquifère, de la circulation des eaux souterraines et des zones d'alimentation en surface. En pratique, 3 formules KARSYS sont proposées en fonction des enjeux de la documentation : KARSYS Express, KARSYS Original 3D et KARSYS Extended.

2.1 Bases scientifiques de l'approche

L'approche KARSYS résulte des développements méthodologiques réalisés par l'ISSKA dans le cadre du projet Swisskarst. Ce projet a été l'occasion d'appliquer à grande échelle et méthodiquement les travaux scientifiques initiés par Jeannin (1996); Kiraly (1973); Palmer (1986) et plus récemment Butscher et Huggenberger (2007). Jeannin et al. (2013) donnent une description complète de l'approche et des principes qui la sous-tendent. Cet article est présenté intégralement en **Annexe C**. La thèse de doctorat d'Arnaud Malard (2018) approfondit le cadre scientifique de référence ainsi que les applications qui peuvent être faites des résultats de l'approche.

¹ Projet soutenu par le Fond National Suisse pour la Recherche Scientifique (Programme National de Recherche PNR61)

L'ensemble des principes utilisés dans l'approche KARSYS constitue une synthèse des conclusions présentées dans la littérature scientifique en général. En plus de celles présentées ci-dessus, les principales références pour les différentes étapes de l'approche sont données en Tableau 1.

Principe	Référence
Etablissement de la pile hydrostratigraphique	Bakalowicz (2008); Jeannin et al. (1995); Kovács et Jeannin (2003); Marsaud (1996); Quinlan et al. (1992)
Définition de l'aquifère karstique	Ford et Williams (1989); Shuster et White (1971)
Systèmes d'écoulements	Ford et Williams (2007); Marsaud (1996); Palmer (1991); White (2003); Worthington (1991)
Fonctionnement hydraulique	Klimchouk et al. (2000); Shennan et al. (2014); Worthington 1991

Tableau 1 Principales références scientifiques utilisées comme base pour l'établissement des principes appliqués dans l'approche KARSYS.

2.2 Applications en Suisse et à l'étranger

Afin de développer et de tester l'approche KARSYS dans différents contextes karstiques, une application est menée à large échelle en Suisse et à l'étranger. Une sélection de ces applications est présentée dans le Tableau 2 et les publications associées jointes sur le CD de l'annexe D. Ces résultats montrent que l'approche KARSYS permet de traiter de problématiques très variées en regard de la particularité de l'environnement karstique, notamment : 1) l'évaluation des ressources en eaux souterraines, 2) estimation des dangers de crues en régions karstiques, 3) évaluation du potentiel en énergie renouvelables du karst, 4) identification des risques pour les travaux d'ingénierie civile. Les résultats obtenus à travers ces nombreuses applications et le caractère novateur des cartes issues de l'approche ont amené l'OFEV à reconnaître cette approche et à en publier les résultats sur la géo-plateforme fédérale² comme données de références pour les eaux souterraines karstiques.

D'autres demandes d'application de la méthode nous parviennent du monde entier et c'est dans l'optique de pouvoir y répondre qu'une application web est développée actuellement (Visual KARSYS).

² <https://s.geo.admin.ch/702c58005b>

Objectif	Sites tests	References
Ressources et protection des eaux souterraines	Jura bernois	<i>Ballesteros et al. (2013); ISSKA (2010a); ISSKA (2013a); Malard et al. (2012); Turk et al. (2013)</i>
	Plaine-Morte (BE-VS)	
	Picos de Europa (Espagne)	
	Plateau Trovsko-Banjška (Slovenia)	<i>Turk et al. (2014)</i>
		Massif du Kanin (Julian Alps, Slovenia)
	Plateau de Burren & région de Cork (Irlande)	
	Pyrénées françaises	<i>ISSKA (2012)</i>
	Nappes helvétiques, Hoch-Ybrig, (SZ, CH)	
	La Chaux-de-Fonds	
Danger de crue	Haute-Ajoie (JU)	<i>BG & ISSKA (2015); ISSKA (2016); Vouillamoz et al. (2013)</i>
	Mortruz (NE)	
	Baumine (VD)	
Potentiel en énergie renouvelables	Canton de Vaud	<i>ISSKA (2010b); ISSKA (2013a);</i>
	Canton de St-Gall et Canton d'Appenzell	
	Canton de Fribourg	<i>ISSKA and GeoAzimut (2014); Jeannin et al. (2010)</i>
	Commune de Flims	
Dangers pour les travaux d'ingénierie civile	Kerenzerberg tunnel	<i>ISSKA (2011); ISSKA (2013c); ISSKA (2014)</i>
	Axenstrasse tunnel	
	Twann tunnel	

Tableau 2 Différentes applications de l'approche KARSYS en Suisse et à l'étranger (état mi-2017). Les copies des publications (en italique) sont jointes sur CD en annexe D.

2.3 Méthodologie

KARSYS est une approche déductive en 3D ; elle propose un modèle explicite sur la base des caractéristiques géologiques du site et de principes gouvernant l'organisation de la karstification et par extension l'hydrogéologie karstique. Sur un site défini, l'approche se déploie en 4 étapes : (i) documentation géologique et hydrogéologique, (ii) identification des propriétés karstiques des aquifères et établissement d'un modèle géologique 3D des unités aquifères, (iii) établissement d'un modèle hydrogéologique 3D des aquifères par intégration des données hydrologiques et (iv) identification et délimitation des systèmes d'écoulement. Les 4 étapes sont détaillées ci-dessous. Elles sont illustrées dans le workflow de la Figure 3 et décrites dans les chapitres ci-après.

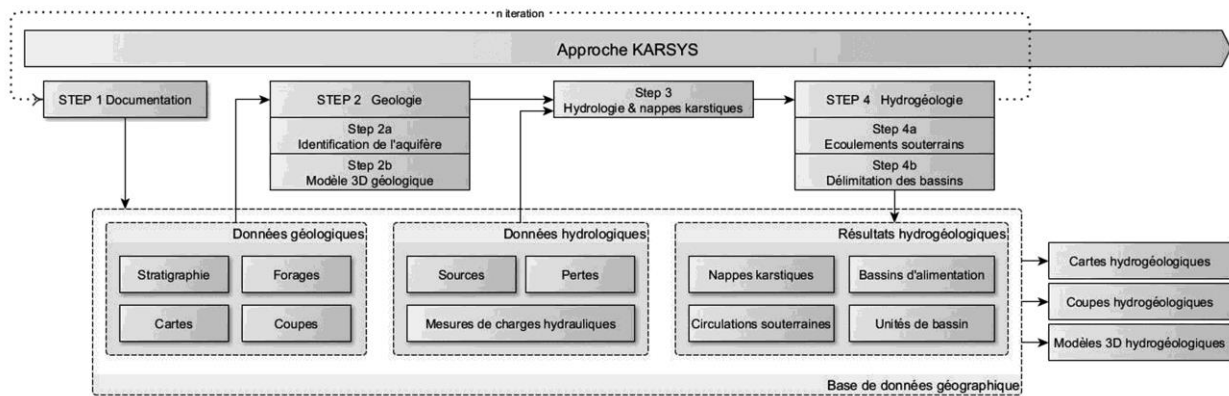


Figure 3 Workflow de l'approche KARSYS en quatre étapes et données nécessaires.

2.3.1 Etape 1 – Documentation

La documentation est organisée dans une base de données géographique. Les éléments intégrés à ce processus sont présentés dans le Tableau 3. Chaque objet ajouté à la base de données reçoit un code identifiant unique qui permet de le mettre en relation avec d'autres éléments de la base de données au travers de tables de relations.

Tableau 3 Liste des éléments documentés et de leurs propriétés respectives

Eléments	Propriétés	Utilisation	Accès à l'information
Bibliographie (polygones)	<ul style="list-style-type: none"> - Etendue concernée - Nom du document 	Etape 1	Fiches systèmes (§ 4.2)
Cartes (polygones)	<ul style="list-style-type: none"> - Nature de la carte - Echelle de la carte - Nom du document 	Etape 1 à 4	Fiches synthèse (§ 4.2)
Cavités (points)	<ul style="list-style-type: none"> - Nom de la cavité - Coordonnées (X, Y, Z) de la cavité - Développement [m] de la cavité - Dénivellation [m] de la cavité - Nature de la cavité (karstique, non-karstique, artificielle) - Activité hydrologique (perte, rivière souterraine, source) 	Etape 2 à 4	-
Profils géologiques (lignes)	<ul style="list-style-type: none"> - Nom du fichier image - Longueur réelle du profil [m] - Hauteur réelle du profil [m] - Coordonnées de départ du profil (X, Y, Z) - Coordonnées de fin du profil (X, Y, Z) - Auteur - Année de publication - Référence bibliographique 	Etape 2	Fiches synthèse – Module données (§ 4.3.3)
Forages (points)	<ul style="list-style-type: none"> - Nom du fichier image - Coordonnées du forage (X, Y, Z) - Altitude de la roche en place [m] - Orientation du forage [° par rapport au Nord] - Pendage du forage [° par rapport à l'horizontal] - Profondeur atteinte [m] - Hydrologie (Toujours artésien, jamais artésien, temporairement artésien) - Exploitation (Capté, non-capté, abandonné) - Date du forage 	Etape 2	Fiches synthèse – Module données (§ 4.3.3)

Eléments	Propriétés	Utilisation	Accès à l'information
Sources (points)	<ul style="list-style-type: none"> - Nom de la source - Classe de débit (<1 L/s, 1-10 L/s, 10-100 L/s, 100-1000 L/s, >1000 L/s) - Régime (Pérenne, temporaire) - Exploitation (Capté, non-capté, abandonné) 	Etape 2 à 4	Fiches synthèse – Module source (§ 4.3.2)
Point d'injection (points)	<ul style="list-style-type: none"> - Commune - Lieu-dit - Environnement - Coordonnées (X, Y, Z) 	Validation	Fiches système (§ 4.2) Fiches synthèse – Module données (§ 4.3.3)
Opération d'injection (table)	<ul style="list-style-type: none"> - Code du point d'injection - Date d'injection - Etat hydrodynamique lors de l'injection (Basses eaux, Hautes eaux, Permanent) - Numéro d'injection (OFEV) - Numéro d'avis (OFEV) - Type de traceur (selon la liste de l'OFEV) - Quantité injectée - Unité de la quantité injectée (L, kg) - Auteur - Mandataire - Mandant 	Validation	Fiches système (§ 4.2) Fiches synthèse – Module données (§ 4.3.3)
Points d'observation (points)	<ul style="list-style-type: none"> - Nom du point d'observation - Type (estavelle, source pérenne, source temporaire, forage, rivière, rivière souterraine, lac) - Coordonnées (X, Y, Z) 	Validation	Fiches système (§ 4.2) Fiches synthèse – Module données (§ 4.3.3)
Essais de traçage (lignes)	<ul style="list-style-type: none"> - Code de l'essai d'injection - Code du point d'observation - Fiabilité (Très fiable, moyennement fiable, peu fiable) - Première détection (date) - Concentration maximale (date) - Dernière détection (date) - Restitution (%) - Débit moyen observé [L/s] - Vitesse [m/h] 	Validation	Fiches système (§ 4.2) Fiches synthèse – Module données

L'ensemble de cette documentation sert de données de base pour les trois étapes suivantes de l'approche KARSYS.

2.3.2 Etape 2 – Géologie

La deuxième étape consiste tout d'abord à caractériser, sur la base des données existantes et des observations de terrain, la nature aquifère des formations géologiques en présence. Trois catégories sont établies :

- Karstique : Formation géologique constituée principalement de minéraux solubles à l'eau, présentant des éléments typiques liés à la karstification telles que cavités, dolines, sources, lapiés, vallées sèches.
- Semi-karstique : Formation géologique constituée en partie seulement de minéraux solubles à l'eau, mais présentant tout de même des éléments typiques liés à la karstification localisée telles que cavités de faible développement ou alignements marqués de dolines.
- Non-karstique : Formation géologique constitué principalement de minéraux non-solubles à l'eau et ne présentant pas d'éléments pouvant être associés à un environnement karstique.

Cette caractérisation est réalisée tout d'abord sur la base des descriptions lithostratigraphiques issues de la bibliographie. Selon les données géographiques disponibles, divers tests de validation des caractéristiques retenues peuvent-être menés, tels que :

- Une densité élevée de cavités naturelles inventoriées dans la formation géologique témoigne de son caractère karstique ;
- La présence de dolines, de lapiés, de vallées sèches témoigne également de la nature karstique d'une formation géologique ;
- La présence d'alignements marqués de dolines au sein d'une formation géologique aquiclude à l'échelle régionale témoigne néanmoins de forts contrastes de perméabilité, donc d'une formation semi-karstique ;
- La présence d'alignements marqués de dolines à l'interface entre deux formations géologiques témoigne du même contraste et indique que l'une joue le rôle d'aquifère et l'autre d'aquiclude.
- Une discontinuité des cours d'eau superficiels indique la présence de pertes, donc indirectement la nature karstique du sous-bassement ;
- L'absence de cours d'eau de surface, ou du moins une faible densité de drainage est également un critère confirmant la nature karstique du rocher ;
- Présence de sources aux points d'affleurement les plus bas.

La pile hydrostratigraphique est déterminée en fonction de ces caractéristiques lithostratigraphiques. Elle attribue à chacune des formations en présence une propriété karstique, semi-karstique ou non-karstique. C'est cette pile hydrostratigraphique qui est retenue pour la modélisation géologique 3D.

Sur la base des données géologiques inventoriées (profils et forages) et de la pile hydrostratigraphique déterminée, un modèle géologique 3D est réalisé. Sa résolution est un compromis entre la taille de la zone étudiée, la qualité et la densité des données géologiques et l'enjeu de la documentation.

Le résultat de cette étape est présenté dans le Tableau 4

Tableau 4 Liste des éléments résultants de l'étape 2 et leurs propriétés

Eléments	Propriétés
Modèles géologiques 3D (polygones)	<ul style="list-style-type: none"> - Nom - Coordonnées du centre (X, Y, Z) - Largeur [m] (extension E-O) - Hauteur [m] (extension N-S) - Epaisseur [m] (extension Z)
Modèles géologiques 3D (3Dshape)	- Code de la formation géologique selon le log hydrostratigraphique

2.3.3 Etape 3 - Modèle hydrogéologique 3D des aquifères

Les données hydrologiques karstiques sont intégrées au modèle géologique 3D réalisé—principalement les sources permanentes, les indications de charge hydraulique des forages recoupant des drains karstiques et les indications de charge hydraulique relevés dans les cavités. L'extrapolation d'un plan horizontal passant par les sources permanentes permet d'obtenir l'extension à minima des zones phréatiques selon l'hypothèse d'un gradient hydraulique quasi nul en condition d'étiage prononcé. Ce gradient peut être localement modifié sur la base des indications de forage ou de cavités. Dans la zone vadose des aquifères, les circulations des eaux souterraines sont modélisées comme verticales ou contrôlées par la topographie des aquicludes. La Figure 4 illustre les principes hydrauliques des circulations d'eaux souterraines dans les aquifères karstiques.

Le résultat de l'application de ces principes aux modèles géologiques 3D établis à l'étape 2 permet de construire la géométrie des nappes karstiques et des écoulements souterrains interprétés avec les propriétés présentées dans le Tableau 5.

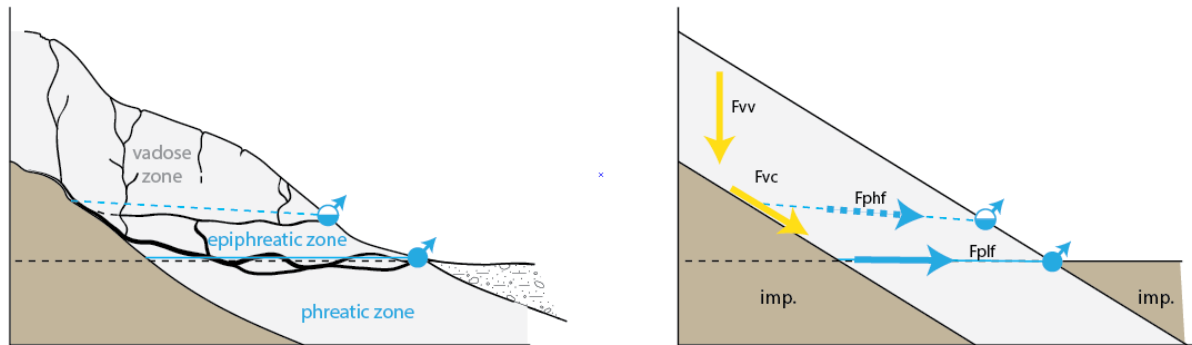


Figure 4 Organisation des écoulements au sein d'un système karstique formalisé selon l'approche KARSYS : F_{vv} , écoulement vadose vertical ; F_{vc} , écoulement vadose contrôlé par la géométrie de l'aquiclude ; F_{plf} , écoulement phréatique en régime de basses eaux et F_{phf} , écoulement phréatique en hautes eaux. *imp.* désigne ici les formations aquicludes c.à.d. non karstifiées.

Tableau 5 Liste des éléments résultant de l'étape 3 et de leurs propriétés

Eléments	Propriétés
Nappes karstiques (polygones)	<ul style="list-style-type: none"> - Type (libre, captive) - Etat hydrodynamique (basses eaux, hautes eaux) - Niveau aquifère (indique la position de la nappe par rapport à la surface, la première nappe karstique portant le numéro 1, la seconde le numéro 2 et ainsi de suite)
Écoulements souterrains interprétés (lignes)	<ul style="list-style-type: none"> - Milieu d'écoulement (surface, vadose, phréatique) - Etat hydrodynamique (basses eaux, hautes eaux)

2.3.4 Etape 4 - Délimitation des systèmes d'écoulement

Sur la base du modèle hydrogéologique 3D et des modalités hydrauliques en conditions de basses et de hautes eaux, les différents systèmes d'écoulement des aquifères peuvent être identifiés et leurs échanges évalués selon les conditions hydrologiques.

L'ensemble de la surface de la zone d'étude est découpé en 1) zones karstiques, 2) zones partiellement karstiques et 3) zones non-karstiques sur la base de la pile hydrostratigraphique et des cartes géologiques. Pour chacun des polygones ainsi déterminés, le cheminement des écoulements souterrains est évalué à l'aide des résultats de l'étape 3. Ceci permet d'attribuer à chaque polygone un ou plusieurs systèmes karstiques selon que les écoulements pointent de manière uniforme vers un seul exutoire ou de manière diffluente vers différents exutoires. Pour chaque système identifié, les unités de bassin pouvant contribuer à son alimentation sont fusionnées en un seul bassin d'alimentation karstique.

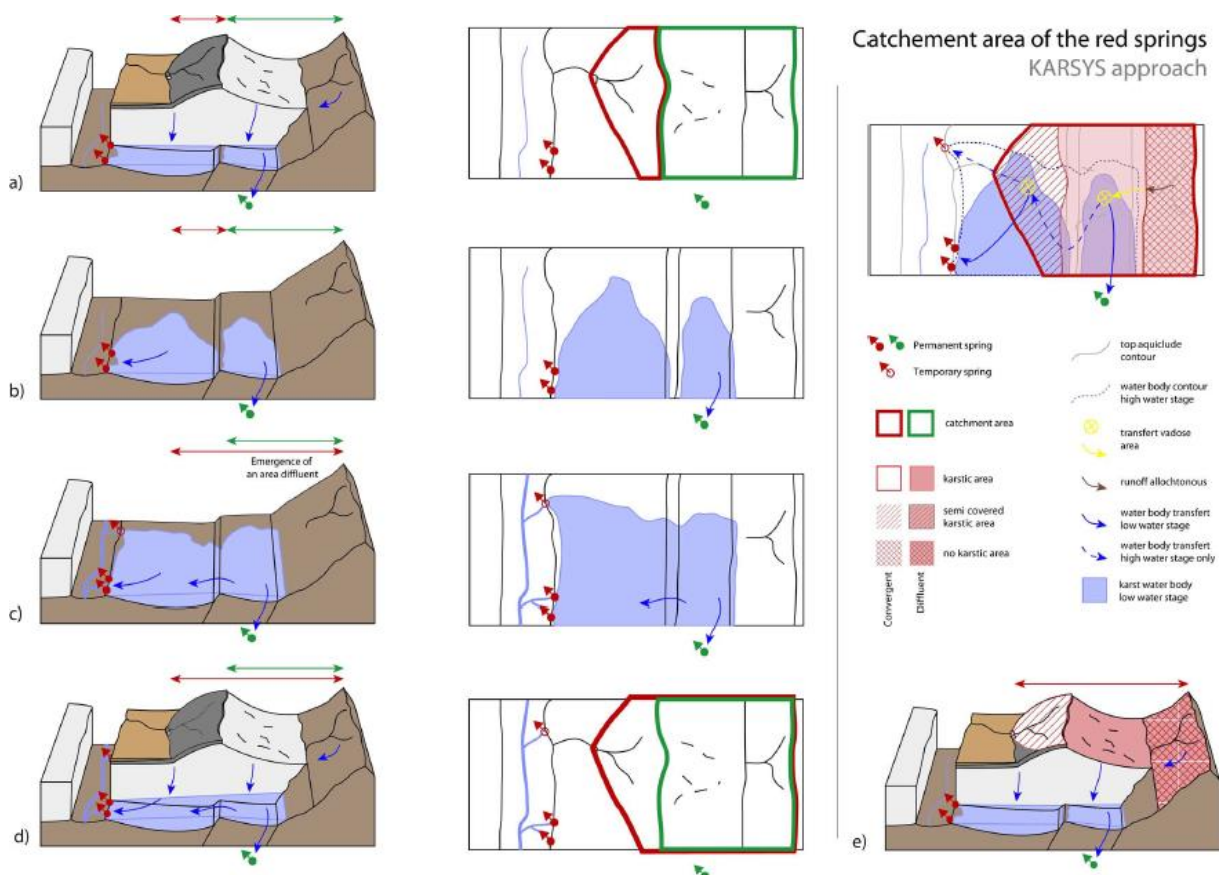


Figure 5 Principes de délimitation des systèmes d'écoulement ; application à une région fictive. (a) En conditions de basses eaux, deux bassins d'alimentation sont identifiés en surface. (b) L'approche KARSYS permet d'identifier deux nappes karstiques séparées par un seuil et alimentant deux groupes de sources différents (vert et rouge). (c) En conditions de hautes eaux, l'élévation du gradient hydraulique provoque un transfert partiel des eaux du système vert vers le système rouge. (d) L'intégration de cette analyse met en évidence le caractère diffluent du bassin d'alimentation du système vert. (e) Sur cette base, les unités de bassin peuvent être définies et permettent d'interpréter le cheminement des eaux souterraines entre la surface et les sources, ce pour différentes conditions hydrodynamiques.

3 Structure de la documentation

A l'issue de chacune des phases de projet, les résultats de l'application de l'approche KARSYS aux systèmes karstiques valaisans sont transmis sous la forme de fiches documentaires et de données SIG. Ces documents sont présentés aux annexes A et B. Les chapitres ci-après explicitent ces différents documents.

3.1 Fiches « Modèle 3D » (Annexe A)

Une fiche de description est réalisée pour chacun des modèles géologiques 3D. Cette fiche est accessible à travers un lien hypertexte depuis la couche SIG « Model ». Elle reprend les éléments du rapport sous la forme d'un document pdf présentant la structure suivante :

- Emprise du modèle géologique 3D, représenté sous forme de carte et de tableau de coordonnées ;
- Pile hydrostratigraphique implémentée, référençant les horizons géologiques, les indices correspondant sur les cartes de l'Atlas géologique de la Suisse au 1/25'000, le nom de

la couche correspondante dans le modèle 3D et la fonction hydrogéologique. Ce chapitre décrit également les unités structurales du modèle s'il y en a plusieurs.

- Données utilisées :
 - Cartes géologiques raster
 - Cartes géologiques vectorielles
 - Références bibliographiques des coupes géologiques
 - Tableau de référence des forages utilisés
- Modèle résultant :
 - Incertitudes / Fiabilités / difficultés du modèle
 - Résultat du modèle en 3D

3.2 Fiches « Systèmes karstiques » (Annexe B)

3.2.1 Description du système

Une fiche de description est réalisée pour chacun des systèmes karstiques identifiés. Cette fiche est accessible à travers un lien hypertexte depuis la couche SIG « Bassin d'alimentation ». Elle reprend les éléments du rapport sous la forme d'un document pdf présentant la structure suivante :

- Localisation du système karstique, représenté sous forme de carte
- Description hydrogéologique du système karstique :
 - Sources principales
 - Nappes karstiques
 - Fonctionnement hydrogéologique du système karstique

3.2.2 Fiches de synthèse KARSYS

Une fiche de synthèse résume l'ensemble des caractéristiques du système sur une page A4. Les éléments sont présentés sous forme d'indicateurs. La fiche présente les modules décrits ci-après.

3.2.2.1 Module des caractéristiques de surface (2014-2018)

Le module « caractéristiques de surface » présente les unités de bassins qui composent le bassin d'alimentation en fonction de ses caractéristiques aquifères distinguées en trois catégories :

- Karstique : la surface karstique qui alimente directement l'aquifère ;
- Karstique sous couverture : la surface karstique est recouverte d'une couverture tertiaire ou quaternaire d'une épaisseur indéfinie et participe à l'alimentation de l'aquifère directement ou indirectement ;
- Non-karstique : la surface d'alimentation indirecte, par ruissellement sur les surfaces non-karstiques et infiltration dans le karst à la faveur de pertes diffuses ou concentrées.

Ces trois catégories de surface sont également distinguées en fonction de leur appartenance à un seul ou plusieurs systèmes. En effet, certaines surfaces karstiques alimentent plusieurs systèmes karstiques différents en fonction des conditions hydrogéologiques. Ainsi, seule une partie des débits produits par ces surfaces participent à l'alimentation des sources du système. Les surfaces n'alimentant que le système sont présentées dans la colonne « Univoque » alors que celles alimentant plusieurs systèmes le sont dans la colonne « Diffluent »

Ce module présente ensuite une analyse des débits spécifiques moyens basée sur une étude à l'échelle de la Suisse réalisée par l'ISSKA en 2015 pour le compte de l'OFEV. Il présente également les altitudes minimales, moyennes et maximales du bassin d'alimentation sur la base d'une analyse de statistique spatiale.

Finalement, ce module précise les formations aquifères principales du système.

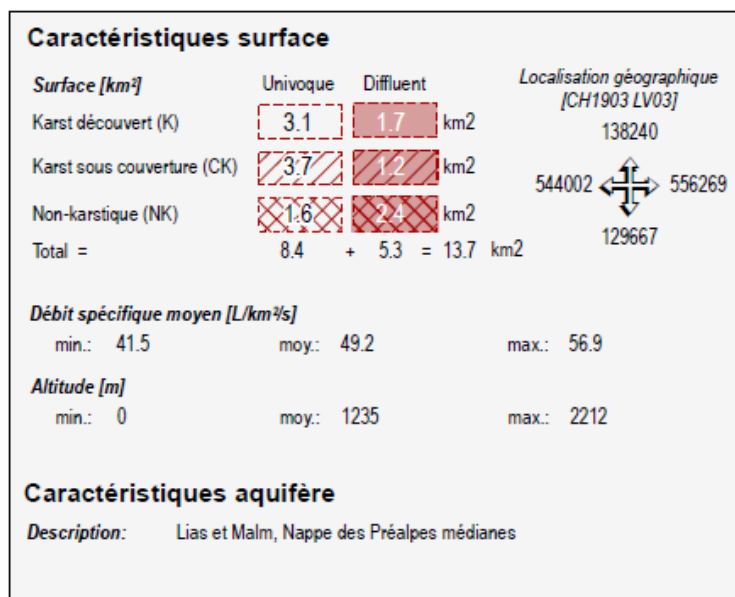


Figure 6 Module « Caractéristiques de surface » de la fiche de synthèse KARSYS

3.2.2.2 Module des caractéristiques de surface (2019)

Afin de correspondre aux nouvelles exigences de la « Carte du Karst », la fiche de synthèse KARSYS a fait l'objet d'adaptations en 2019 (Figure 7). Il convient de se reporter au chapitre 3.2.4 relatif à la Carte du Karst pour comprendre la nouvelle subdivision.

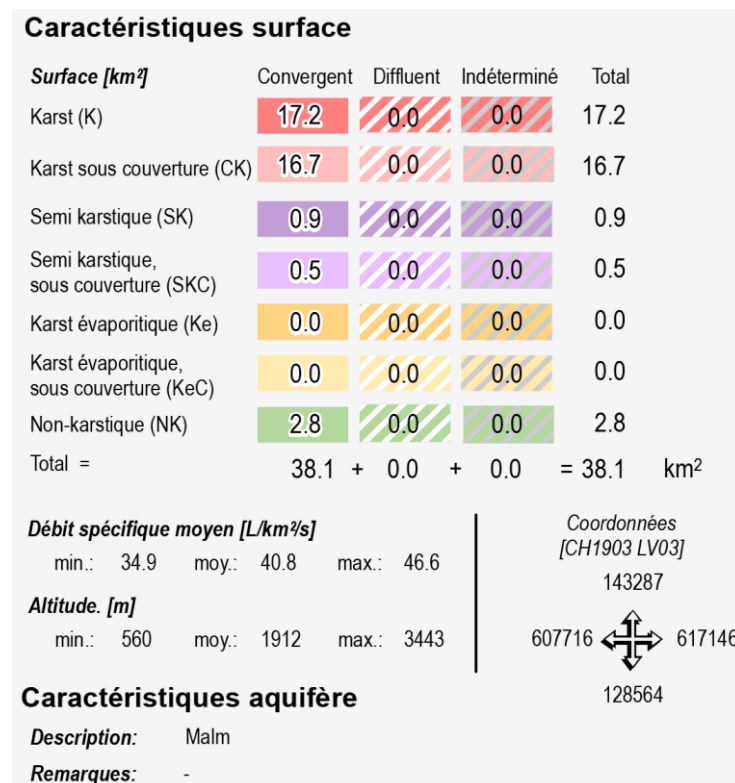


Figure 7: Les caractéristiques de surface sont d'avantage détaillées avec l'ajout des catégories semi-karstique, karst évaporitique ainsi que la propriété "sous-couverture" pour chaque type.

3.2.2.3 Module sources karstiques

Le module « sources karstiques » présente la liste des sources du système karstique (au maximum 10 sources), classées par ordre décroissant de classe de débit. Sont décrits :

l'identifiant de la source, son nom, son régime, ses coordonnées (dans le système de référence CH1903_LV03), sa classe de débit, son utilisation et les données physico-chimiques disponibles à son sujet.

Sources								
ID	Nom	Régime	X[m] / Y[m] / Z[m]	Classe régime	Utilisation	Données disponibles	Période	
141264VS0002	Grand pré (GIN 004)	2	550111 135104 897.0	4	2	Q	(2014, '...')	
141263VS0001	Tine aval (GIN 301)	1	549815 135210 950.0	3	1	Q	(2014, '...')	
141264VS0001	Clarive (GIN 101)	1	550595 135652 835.0	3	1	Q	(2014, '...')	
141263VS0007	Tine amont f et g	1	549759 135216 953.0	3	2	Q	(2009, 2010)	
141263VS0006	Tine amont e	2	549757 135186 967.0	2	2	Q	(2009, 2010)	
141263VS0004	Tine amont a, b et c	1	549737 135216 954.0	2	2	Q	(2009, 2010)	
141263VS0005	Tine amont d	2	549746 135204 956.0	1	2	Q	(2009, 2010)	
141264VS0004	Clarive amont 2 (GIN 002)	2	550527 135543 852.0	-9999	2	- - -	(2009, 2010)	
141264VS0003	Clarive amont 1 (GIN 002)	2	550514 135572 842.0	-9999	2	- - -	(2009, 2010)	

Légende

Régime: 1 = Pérenne; 2 = Temporaire; -9999 = Indéterminé
 Classe régime: 1 = <1 L/s; 2 = 1-10 L/s; 3 = 10-100 L/s; 4 = 100-1000 L/s; 5 = >1000 L/s; -9999 = Indéterminé
 Utilisation: 1 = Capté; 2 = Non-capté; 3 = Abandonné; -9999 = Indéterminé
 Données disponibles: Q = débit, T = Température, C = Conductivité électrique

Figure 8 Module « Sources karstiques » de la fiche de synthèse KARSYS

3.2.2.4 Module données

Le module « données » présente les types de données utilisées et propose un indicateur pour l'évaluation de leur qualité et de leur quantité :

Données géologiques

Pour les cartes géologiques, le module « Données » propose trois classes :

- Disponible : les cartes de l'atlas géologique de la Suisse au 1/25'000 sont présentes sur toute l'étendue du bassin d'alimentation,
- En partie disponible : les cartes de l'atlas géologique de la Suisse au 1/25'000 ne sont disponibles que sur une partie du bassin d'alimentation,
- Indisponible : les cartes de l'atlas géologique de la Suisse n'existent pas encore sur l'ensemble de la surface du bassin d'alimentation.

Dans tous les cas, les données GeoCover sont disponibles sur l'ensemble du territoire suisse. Cependant, en l'absence de carte géologique de l'Atlas, les données GeoCover proviennent de la digitalisation des matériaux pour la carte géologique de la Suisse levés au 1/50'000, soit à une résolution inférieure. C'est cette différence qui est identifiée à travers ce critère.

Pour les profils géologiques, le module « Données » précise :

- le nombre de profils qui traversent le bassin,
- leur densité en km/km². Ce critère prend un code couleur qui témoigne de la bonne, moyenne ou mauvaise densité des profils géologiques disponibles. Les limites sont fixées à :
 - Mauvaise (rouge) : <0.1 km/km²
 - Moyenne (orange) : entre 0.1 et 1 km/km²
 - Bonne (vert) : >1 km/km²
- le nombre d'auteurs différents qui les ont réalisées afin de donner une idée de la diversité des interprétations en présence.

Pour les forages profonds, le module « Données » précise :

- le nombre de forages de plus de 100 m de profondeur utilisés pour la modélisation

- leur densité en m/km^2 . Ce critère prend un code couleur qui témoigne de la bonne, moyenne ou mauvaise densité. Les limites sont fixées à :
 - Mauvaise (rouge) : $<10 m/km^2$
 - Moyenne (orange) : entre 10 et $100 m/km^2$
 - Bonne (vert) : $>100 m/km^2$

Données hydrologiques

Pour les données de charge hydraulique, le module « Données » précise s'il en existe, si elles sont mesurées dans des forages ou des cavités. Les données de charge hydraulique mesurées aux sources ne sont pas prises en compte.

Pour les connexions hydrogéologiques (essais de traçages), le module « Données » précise :

- le nombre de connections positives enregistrées au sein du système karstique
- la densité de connections en nombre de connections par km^2 . Ce critère prend un code couleur qui témoigne de la bonne, moyenne ou mauvaise densité. Les limites sont fixées à :
 - Mauvaise (rouge) : $<0.1/km^2$
 - Moyenne (orange) : entre 0.1 et $1/km^2$
 - Bonne (vert) : $>1/km^2$

Données karst

Pour les données karst, le module « Données » précise :

- Le nombre de cavités documentées au sein du système karstique,
- La densité de conduit karstique documenté en m/km^2 . Ce critère prend un code couleur qui témoigne de la bonne, moyenne ou mauvaise densité. Les limites sont fixées à :
 - Mauvaise (rouge) : $<10 m/km^2$
 - Moyenne (orange) : entre 10 et $100 m/km^2$
 - Bonne (vert) : $>100 m/km^2$

STEP 1: Données		
Géologique		
Carte géologique 1/25'000:		En-partie disponible
Profils géologiques:	10 3.0 2	
	Nombre Densité [km/km^2] Nb auteurs	
Forages profonds (>100m):	0 0.0	
	Nombre Densité [m/km^2]	
Hydrologique		
Indications charge hydro:		Non
Connexions hydrogéologiques:	47 3.4	
	Nombre connexions positives Densité connexions positives [nb/km^2]	
Karst		
Cavités documentées:	12 34.9	
	Nombre Densité conduits [m/km^2]	

Figure 9 Module « Données » de la fiche de synthèse KARSYS

3.2.2.5 **Module « Modèle géologique 3D »**

Le module « Modèle géologique 3D » présente une appréciation de la fiabilité du modèle 3D résultant de l'intégration des données géologiques présentées dans le module « Données ». Ces appréciations prennent les valeurs « Faible », « Moyen » ou « Fort » pour les aspects :

- Cohérence du modèle par rapport aux données : Appréciation de la qualité du rendu du modèleur géologique en regard des données en entrée. Selon la complexité des structures en présence, le logiciel de modelage géologique parvient plus ou moins bien à intégrer les données et à produire un modèle qui les respecte ;
- Cohérence du modèle par rapport aux interprétations : Dans le module « Données », le nombre d'auteurs ayant produit des profils géologiques est présenté. Selon le cas, les interprétations divergent les unes des autres. C'est cette divergence d'interprétation qui est mise en évidence par cette appréciation ;
- Fiabilité du modèle en profondeur : Les données en entrée peuvent intégrer plus ou moins en détail les structures géologiques profondes. L'appréciation de la fiabilité du modèle en profondeur rend compte de cette caractéristique.

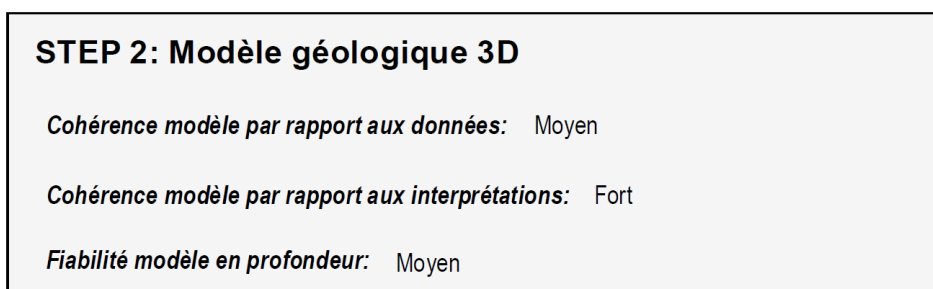


Figure 10 Module « Modèle géologique 3D » de la fiche de synthèse KARSYS

3.2.2.6 **Module « Modèle hydrogéologique 3D »**

Le module « Modèle hydrogéologique 3D » présente une appréciation de la fiabilité du modèle hydrogéologique conceptuel réalisé. Deux critères sont détaillés :

- Confiance niveau de base : Selon les principes de l'approche KARSYS, le niveau de base hydrogéologique est donné par l'altitude de la source pérenne principale. Selon la situation, ce niveau peut présenter des incertitudes, notamment en présence de plusieurs sources pérennes à différentes altitudes, ou lorsque la source principale du système n'est pas clairement identifiée. L'appréciation de la confiance dans le niveau de base traduit cet aspect.
- Cohérence par rapport au modèle 3D : Les principes de l'approche KARSYS permettent en principe de déterminer la géométrie des écoulements souterrains et des nappes karstiques de façon automatique. Selon la complexité des structures en présence, cette analyse doit être menée de façon semi-automatique, afin de prendre en compte les structures secondaires pouvant jouer un rôle dans ces géométries. Le critère « Cohérence par rapport au modèle 3D » donne une appréciation du degré d'intervention nécessaire à concilier le modèle géologique 3D avec les relations hydrogéologiques démontrées par essai de traçage.

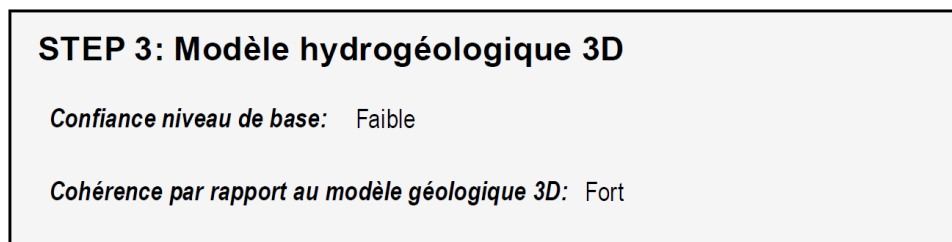


Figure 11 Module « Modèle hydrogéologique 3D » de la fiche de synthèse KARSYS

3.2.2.7 **Module « Etat des connaissances post-KARSYS »**

Le module « Etat des connaissances post-KARSYS » décrit tout d'abord le degré d'investigation KARSYS appliqué au système selon les classes suivantes :

- KARSYSExpress : Seule une interprétation en 2D a été menée sur la base des données à disposition ;
- KARSYSOriginal3D : L'approche KARSYS a été appliquée sur la base des modèles 3D géologiques et hydrogéologiques ;
- KARSYSExtended : Les résultats de l'approche KARSYS3D ont été utilisés comme base pour l'application d'au moins une des extensions existantes.

Les extensions existantes à l'heure actuelle qui exploitent les résultats de l'approche KARSYS sont les suivantes³ :

- KarstINDIC : carte indicative du karst, caractérisation des propriétés karstiques des surfaces
- KarstALEA : évaluation des dangers karst dans les ouvrages souterrains
- KarstNETGEN : génération de conduits et réseaux karstiques
- KarstFLOWSWIM : simulation de la charge et débits des systèmes, champs 3D des flux, application dans l'évaluation des risques d'inondation
- KarstVULN : carte de vulnérabilité et zones de protection
- KarstCOLLAPSE : Evaluation du danger d'effondrement lié au karst
- KarstTHERM : Délimitation des zones propices à l'exploitation géothermique

3.2.3 **Cartes des caractéristiques de surface (2014-2018)**

Une carte des caractéristiques de surface est réalisée pour chaque système karstique. Elle représente deux propriétés de la surface en regard de l'hydrogéologie karstique :

- La nature karstique, semi-karstique et non-karstique de la roche en place permettant d'identifier les régions pour lesquelles le fonctionnement hydrogéologique est gouverné par le karst,
- Le caractère convergeant ou diffluent des unités de bassin d'alimentation (cf. § 2.3.4), permettant d'identifier les zones alimentant exclusivement le système présentés et les zones alimentant d'autres systèmes connexes.

3.2.4 **Carte des caractéristiques de surface ou Carte du Karst 2019**

Jusqu'à fin 2018, les cartes de surface de l'annexe B ont été traitées selon les trois catégories définies au chapitre 3.2.2.1. A partir de 2019, l'ISSKA a développé un produit spécifique nommé « Carte du Karst » basé sur une méthodologie adaptée de Hamedinger (2019). Les étapes suivantes sont nécessaires pour obtenir une Carte du Karst complète :

- A) Propriétés d'infiltration à l'affleurement (Geocover MOD)
- B) Propriétés d'infiltration sous-couverture (ISC)
- C) Epaisseur des formations de couverture
- D) Infiltrabilité finale
- E) Zones de sub-artésiennisme des eaux karstiques
- F) Infiltrabilité des cours d'eau
- G) infiltrabilité bassin versant topographique

Afin de maintenir une certaine cohérence avec les cartes précédentes, la méthodologie a été appliquée jusqu'à l'étape D sur les cartes 1:25'000 Lenk, Gemmi, St-Léonard et Sierre.

³ Jeannin P, Malard A (2018) A way to predict natural hazards in karst. Proceedings of the 15th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst and the 3rd Appalachian Karst Symposium, April 2-6, Shepherdstown, West Virginia. 417-425

Les différences principales par rapport aux anciennes cartes sont les suivantes :

- Traitement beaucoup plus détaillé de la couverture meuble (catégories d'épaisseur)
- Meilleure traçabilité dans la base de données SIG
- Evolution possible des cartes jusqu'à l'étape G
- Compatibilité avec les réflexions menées dans le cadre de la révision EPIK pour les zones de protection des eaux souterraines.

La Carte du Karst 1/25'000 renseigne sur les **propriétés d'infiltration karstique** en surface, c.à.d. pour les formations rocheuses à l'affleurement, les formations rocheuses sous couverture, les cours d'eau et les plans d'eau.

La carte indique aussi la présence des principales sources karstiques et si disponible, elle indique la position des principales dolines et cavités karstiques.

La Carte du Karst est obtenue par combinaison de différentes informations géographiques, notamment :

- L'épaisseur de la couverture (Felsüberdeckungskarte)
- La géologie de surface (GeoCover 25)
- Les éléments de surface : réseau hydrographique (GWN25) et bassins versants de surface (EZG) qui font partie du jeu de données Vector25©swisstopo.

3.2.4.1 Epaisseurs de la couverture / Felsüberdeckungskarte

La carte 1/25'000 « Felsüberdeckungskarte » informe sur l'épaisseur de la couverture (sols et formations quaternaire). Les indications d'épaisseur sont obtenues par le traitement de différentes informations géographiques selon une méthodologie reprise et adaptée du travail de T. Hamedinger (2019) :

- Le modèle digital d'altitude **SwissAlti3D** (résolution 2 m). Sur la base du SwissAlti3D, les informations « **Neigung** » (pente) et « **Talzone** » (fonds de vallée) sont calculées
- Le layer **GeoCover** des entités géologiques du GA25 (Geologischer Atlas der Schweiz). Les entités « **Quartär** » sont extraites du layer
- Le layer **Primärflächen** du jeu de données Vector25©swisstopo (ID 38.2). Les entités de type « Gestein » (roche), « Moor » (zones humides), « Wald » (couverture forestière) sont extraites du layer
- Le layer **Fruchtfolgeflächen**, « FFF ».
- Le layer ETM « **Modèle d'épaisseur des terrains meubles** » 1/25'000, source Swisstopo (ID 47.18)⁴

Neuf classes d'épaisseur de couverture ont été définies (Table 1).

EPAISSEUR	
	Indéterminé
■	0 - 0.2 m
■	0.2 - 0.5 m
■	0.5 - 1 m
■	1 - 2 m
■	2 - 5 m
■	5 - 20 m
■	20 - 50 m
■	> 50 m

Table 1. Classes des épaisseurs des formations de couverture. Elles sont définies par feuille de l'Atlas 1/25'000

⁴ https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/99eb4571-4c34-48cc-bd6a-32fd9decc2a7

La classe -9999 rassemble les épaisseurs « indéterminées ».

La classe 1 [0 - 0.2 m] est appliquée par défaut à toutes les surfaces.

Les classes 2 à 5 [0.2 à 5 m] sont obtenues par le traitement présenté en Figure 12, en fonction de la présence (yes) ou de l'absence (No) des différentes informations.

Les classes 6 à 8 [> 5 m] sont attribuées en fonction des valeurs du jeu de données ETM afin de garantir une cohérence avec les informations de la Confédération.

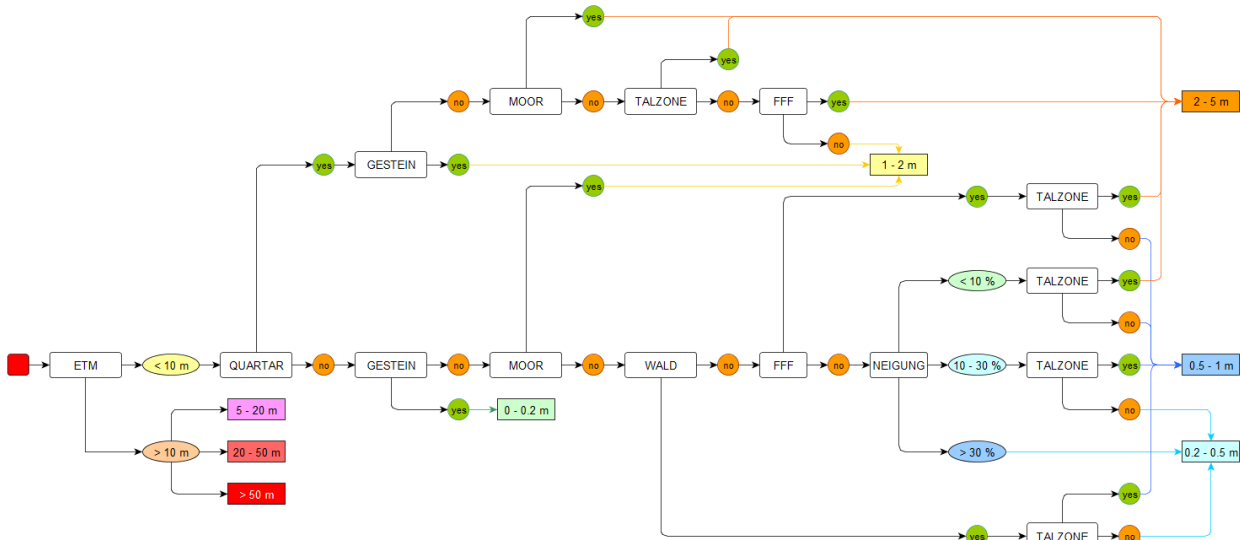


Figure 12. Règles d'assignement des classes d'épaisseur

3.2.4.2 Paramètres de surface

Infiltration (Infiltrabilität) des formations de surface

Les unités géologiques de surface (GeoCover GA25) sont discrétisées selon leur propriété de karstification :

- Les formations majoritairement calcaires sont considérées comme karstifiées (K) : l'infiltration domine largement le ruissellement de surface.
- Les formations de type calcaires marneux à marno-calcaires sont considérées comme semi-karstiques (SK) : à l'échelle régionale, ces formations agissent typiquement comme aquiclude, mais l'infiltration est néanmoins possible localement. Le volume infiltré est comparable au ruissellement.
- Les formations de type gypse, sels, etc. sont définies comme karst évaporitique (Ke) : L'infiltration est considérée dominante.
- Les autres formations non carbonatées sont considérées comme non-karstiques (NK) : l'infiltration est considérée comme faible – inférieure à la part de ruissellement.

Les unités sont ensuite combinées avec les informations d'épaisseur de la couverture (Felsüberdeckung). La propriété « sous couverture » (_SC) est fixée pour une épaisseur de 2 m (<2 m ou >2 m). Sept classes d'infiltration sont alors définies (Table 2).

	Affleurant (<2 m)	Sous-couverture / bedeckt (>2 m), (_SC)
Karstique / verkarstet (K)	+++	++
Semi-Karstique / teilweise verkarstet (SK)	++	+
Karst évaporitique / evaporitischer Karst (Ke)	+++	++
Non Karstique / nicht verkarstet (NK)		-

Table 2. Symboles et degré d'infiltration des entités d'infiltration karstique : +++ infiltration élevée, ++ infiltration modérée, + infiltration faible, - pas d'infiltration.

L'épaisseur de la couverture n'est pas déterminée pour les formations non karstiques (NK).

Les surfaces non karstiques (NK) dont les eaux de ruissellement sont supposées alimenter partiellement des aquifères karstiques sont définies comme « allogéniques ».

Les bassins fermés documentés dans la classe d'entités EZGG sont reportés sur la carte comme « bassins endoréiques ». Les eaux de surface de ces bassins sont supposées en majeure partie vers les aquifères karstiques.

3.2.5 Cartes du fonctionnement hydrogéologique (2014-2018)

Une carte du fonctionnement hydrogéologique est réalisée par système karstique. A l'inverse de la carte de surface, la carte du fonctionnement hydrogéologique se penche sur les éléments souterrains du système. Elle représente :

- La nature et la direction des écoulements souterrains, permettant de suivre le chemin de l'eau dans les zones vadoses et phréatiques du système depuis chacun des compartiments majeurs de l'aquifère karstique ;
- La nature et la géométrie des nappes karstiques, permettant d'identifier la géométrie de la zone phréatique de l'aquifère et de ses parties libres.

3.2.6 Carte du fonctionnement hydrogéologique, évolution 2019

Dès 2019, la géométrie des aquifères karstiques est traitée complètement en 3D ce qui permet d'ajouter, dans les cartes, la partie captive de l'aquifère. Les nouvelles cartes comportent également des courbes de niveau de la nappe captive ainsi que des points avec cote d'altitude permettant de mieux connaître le niveau des nappes libres ou captives.

Par ailleurs, la méthode a été améliorée afin de visualiser les aquifères superposés. Lorsque deux aquifères se superposent, par exemple l'Urgonien et le Kieselkalk, une carte par aquifère a été dressée. Ces adaptations ont été implémentées dans la base données pour une meilleure visualisation des superpositions d'aquifère et des directions d'écoulement.

4 Conclusions

L'approche KARSYS a été appliquée à l'échelle du canton de Valais, par phase, en remontant le cours du Rhône, sur la base d'une planification étalant les travaux entre 2014 et 2019. L'objectif était de constituer une base documentaire commune à l'ensemble des systèmes karstiques, permettant d'identifier rapidement leur degré de documentation et le fonctionnement hydrogéologique modélisé (bassin d'alimentation, système d'écoulement, nappe(s) phréatique(s) et exutoires principaux).

L'approche KARSYS, largement appliquée en Suisse et à l'étranger, fournit des résultats sous la forme d'un modèle conceptuel explicite en 3D des systèmes karstiques. Ils peuvent être utilisés à différentes fins, notamment à l'évaluation et la protection des ressources en eaux. L'objectif du SEN est de fournir à travers ce projet une documentation générale couvrant tout le canton afin de soutenir les communes et les bureaux d'études dans le cadre des études de délimitation des zones de protection des eaux souterraines. Un des objectifs est d'identifier les incertitudes en présence afin de pouvoir orienter au mieux les investigations hydrogéologiques encore à réaliser dans le cadre d'études futures. De manière générale, la documentation du sous-sol karstique valaisan telle que réalisée dans le cadre de cette étude est une étape indispensable pour la mise en œuvre de stratégies de gestion durable des ressources en eau du Canton. Elle permet d'adresser de manière plus objective les possibilités de valorisation des eaux souterraines à l'échelle des bassins versants hydrogéologiques.

La Chaux-de-Fonds, le 29 janvier 2020

Demian Rickerl, Jonathan Vouillamoz, Eric Weber et Marc Luetscher
Géologues Hydrogéologues

5 Annexes

- Annexe A. Fiches modèles 3D et modèles PDF3D (CD uniquement)
- Annexe B. Fiches systèmes karstiques des projets 2014-2017
- Annexe C. Publication de référence pour la méthode KARSYS (Jeannin et al 2013).
- Annexe D. CD contenant les principales publications liées à la méthode KARSYS

6 Bibliographie

- BG & ISSKA (2015) : Commune de Cressier, Expertise hydrogéologique du Mortruz. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié . 23 p.
- BAKALOWICZ M (2008) : Le milieu karstique: études et perspectives, identification et caractérisation de la ressource. CFH - Colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller 17 mai 2008.
- BALLESTEROS D, MALARD A, JEANNIN PY, JIMENEZ-SANCHEZ M, GARCIA-SANSEGUNDO J, MELENDEZ M, SENDRA G (2013) : Geometría y direcciones de flujo de agua subterránea preliminares de acuíferos kársticos mediante el método karsys. picos de europa, norte de españa. pp. 51-60.
- BUTSCHER C, HUGGENBERGER P (2007) : Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. Journal of Hydrology, 342: 184-198.
- FORD D, WILLIAMS PW (1989) : Karst geomorphology and hydrology. 601p.
- FORD D, WILLIAMS PW (2007) : Karst hydrogeology and geomorphology.562p.
- HAMEDINGER T, (2019) : Kartierung der Rückhaltezeit von Schadstoffen im bedeckten Karst. Universität für BodenkulturWien, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Master's thesis. 150 p.

- ISSKA (2010a) : PNR61 projet MontanAqua. Bassins versants karstiques et modèles 3D autour de Montana. Gestion des eaux dans la région de Montana. Version Provisoire. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié. 18 p.
- ISSKA (2010b) : Gemeinde Flims - Karte der Zulässigkeit für Erdwärmesonden. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié. 12 p.
- ISSKA (2011) : Sicherheitsstollen Kerenzerbergtunnel, Karstprognose, KarstALEA-Untersuchungen zu Handen des ASTRA. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, unveröffentlicher Bericht - Auftraggeber: ASTRA. 28 p.
- ISSKA (2012) : Etude hydrogéologique (approche KARSYS) en vue du suivi des décharges de La Chaux-de-Fonds. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié - mandant: SENE - Service de l'énergie et de l'environnement, Neuchâtel. 48 p.
- ISSKA (2013a) : Kanton St. Gallen - Beurteilung der Karstgebiete im Hinblick auf Erdwärmesondenprojekte - Region Churfürsten-Alpstein-Alvier. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, unveröffentlicher Bericht - Auftraggeber: Baudepartement, Amt für Umwelt und Energie, Kanton St-Gallen. 58 p.
- ISSKA (2013b) : Anwendung des KARSYS-Ansatzes zur Injektionsstandortbestimmung Ybrig - SZ. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, technische Notiz - Auftraggeber: Ostschweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung. 28 p.
- ISSKA (2013c) : Neue Axenstrasse N4 – Abschnitt Ingenbohl (SZ) – Gumpisch (UR), KarstALEA – Axentunnel. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, unveröffentlicher Bericht - Auftraggeber: CSD Ingenieure, Alessio Menegatti, Antonio Greco, Rynächtstrasse 13, 6460 Altdorf / UR. 68 p.
- ISSKA (2014) : Evaluation de la problématique liée au karst - percement du Sicherheitstollen - tunnel de Ligerz. Application de la méthode KarstALEA et modélisation hydraulique. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié - mandant: Office fédéral des routes (OFROU), Place de la gare 7, 1470 Estavayer-le-Lac. 35 p.
- ISSKA (2015) : Application de l'approche KARSYS aux systèmes karstiques du Valais (CH) - Phase pilote. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié - mandant: Service de la protection des eaux (SPE) du canton du Valais. 24 p.
- ISSKA (2016) : Débit de crue de la Baumine, Analyse critique du "rapport final - Dangers d'inondation (Stucky-Geotest). Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, rapport non publié. 17 p.
- ISSKA, GEOAZIMUT (2014) : KARST Fribourg - Carte d'admissibilité pour l'implantation de sondes géothermiques en milieu karstique.. .
- JEANNIN PY (1996) : Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. Centre d'hydrogéologie de l'université de Neuchâtel, 237.
- 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.
- JEANNIN PY, HELLER P, JORDAN F, TISSOT N (2010) : Hydropower potential of karst groundwater in Vaud Canton (Switzerland). International Congress and Exhibition on Small Hydropower - Hydroenergia. 16-19 June 2010.
- JEANNIN PY, WILDBERGER A, ROSSI P (1995) : Multitracing-Versuche 1992 und 1993 im Karstgebiet der Silberen (Muotatal und Klöntal, Zentralschweiz). Beiträge zur Hydrogeologie, 46, 43-88.
- KIRALY L (1973) : Notice explicative de la carte Hydrogéologique du Canton de Neuchâtel. Supplément du Bulletin de la Société neuchâteloise des sciences naturelles, 96, 1-15.
- KLIMCHOUK AB, FORD DC, PALMER AN, DREYBRODT W (2000) : Speleogenesis. evolution of karst aquifers. 527.
- KOVÁCS A, JEANNIN PY (2003) : Hydrogeological overview of the Bure plateau, Ajoie, Switzerland. Eclogae geol. Helv., 96, 367-379.
- MALARD A, VOUILLAMOZ J, WEBER E, JEANNIN PY (2012) : Swisskarst Project – toward a sustainable management of karst water in Switzerland. Application to the Bernese Jura. Actes du 13e Congrès National de Spéléologie, Muotathal, Suisse. 29 sept au 01 oct 2012, 215-219.

- MARSAUD B (1996) : Structure et Fonctionnement de la Zone Noyée des Karsts à Partir des Résultats Expérimentaux. Documents BRGM 268, 324p.
- MONOD B, ALLANIC C, BAILLY-COMTE V, JACOB T, MARECHAL JC (2016) : Evaluation des ressources en eaux souterraines du Plateau de Sault - étude structurale, modèle géologique 3D, acquisition gravimétrique et analyse de la karstification - Rapport final BRGM/RP-65888-FR. 201p.
- PALMER AN (1986) : Prediction of contaminants paths in karst aquifers. Proceedings of the Environmental Problems in Karst Terranes and Their Solutions Conference, October 28-30 1986, Bowling Green, Kentucky, 32-53.
- PALMER AN (1991) : Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, 103, 1-21.
- QUINLAN JF, SMART PL, SCHINDEL GM, ALEXANDER JEC, EDWARD SAJ ET AL. (1992) : Recommended administrative/regulatory definition of carbonate aquifers, principles for classification of carbonate aquifers, practical evaluation of vulnerability of karst aquifers, and determination of optimum sampling frequency at springs. Proceedings of the third conference on hydrogeology, ecology, monitoring, and management of groundwater in karst terrains: Dublin, Ohio, 573-635.
- SHENNAN I, LONG AJ, HORTON BP (2014) : Handbook of sea-level research. 634p.
- SHUSTER ET, WHITE WB (1971) : Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. Journal of Hydrology, 14, 93-128.
- TURK J, MALARD A, JEANNIN P, GABROVŠEK F, PETRIČ M ET AL. (2014) : Hydrogeological interpretation of the alpine karst massif by application of a Karsys approach (Kanin case study, Julian Alps). Hydrological Processes, Published online in Wiley Online Library: DOI: 10.1002/hyp.10313.
- TURK J, MALARD A, JEANNIN PY, VOUILLAMOZ J, PETRIC M ET AL. (2013) : Interpretation of hydrogeological functioning of a high karst plateau using the KARSYS approach: the case of Trovsko-Banjška planota (Slovenia). Acta Carsologica, 42(1), 61-74.
- VOUILLAMOZ J, MALARD A, SCHWAB-ROUGE G, WEBER E, JEANNIN PY (2013) : Mapping flood related hazards in karst using KARSYS approach. Application to the Beuchire-Creugenat karst system (JU, Switzerland). Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, held in Carlsbad, New Mexico, May 06-10, 2013, 333-342.
- VOUILLAMOZ J, MCCORMACK T (2015) : KARSYS approach - an explicit conceptual 3D model for karst hydrogeology. Integrated Hydrogeology: Contemporary Principles, Policy & Practice. IAHR, Irish Group. Proceedings of the 35th Annual Groundwater Conference - Tullamore Co. Offaly, Ireland, 21th and 22th April 2015, Session V, 11-18.
- WHITE WB (2003) : Conceptual models for karstic aquifers. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1, 1-6.
- WORTHINGTON SRH (1991) : Karst Hydrogeology of the Canadian Rocky Mountain. Mc Master University, Hamilton, Ontario, Canada, 370.