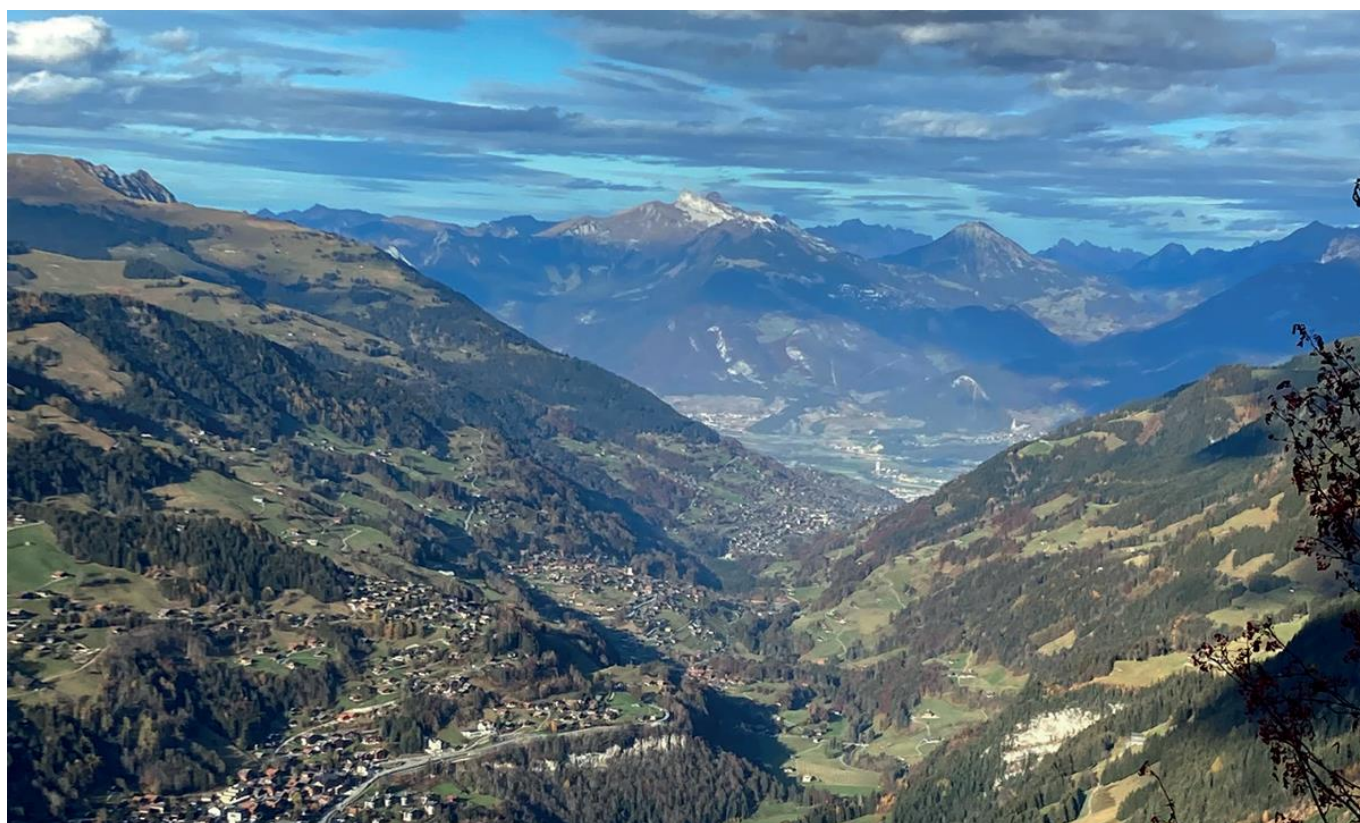


Mémoire de Géomatique

Cartographie des aquifères fissurés

Evaluation du potentiel aquifère des flyschs du Val d'Iliez en s'appuyant sur une analyse spatiale.



(Région Dents du Midi, s.d)

Nadine Frossard

Service de l'environnement - groupe Eaux souterraines



**CANTON DU VALAIS
KANTON WALLIS**

Table des matières :

INTRODUCTION _____	4
Présentation du Service de l'environnement : _____	4
Projet Au fissuré : _____	5
Mon intérêt pour ce projet : _____	5
HYDROGÉOLOGIE : _____	6
Aquifères : _____	6
Aquicludes et aquitards : _____	6
Nappes : _____	7
Typologie des aquifères : _____	8
GÉOLOGIE : _____	10
Contexte géologique : la géologie alpine _____	10
ZONE D'ÉTUDE : _____	11
Les flyschs du Val d'Iliez _____	11
Flyschs : caractéristiques et origine géologique _____	11
Géologie régionale : _____	13
MÉTHODOLOGIE : _____	14
Subdivision de la zone d'étude : _____	14
Acquisition et traitement des données : _____	15
Logiciels utilisés : _____	15
Données utilisées : _____	15
Données géologiques : _____	16
Extraction et traitement des flyschs: _____	17

Données hydrologiques :	18
Sources :	20
Forages :	21
Données auxiliaires :	23
Données pluviométriques :	25
RÉSULTATS :	27
Indice n°1 : Les résurgences	27
Indice n°2 : Les accumulations de flux	28
Indice n°3 : Les indicateurs hydrogéologiques	29
Indice n°4 : Indice multicritère	31
Les précipitations :	32
DISCUSSION :	34
Indice n°1 : Les résurgences	34
Indice n°2 : Les accumulations de flux	35
Indice n°3 : Les indicateurs hydrogéologiques	36
Indice n°4 : Indice multicritère	38
Les précipitations :	39
Catégorisation des polygones :	40
CONCLUSION :	41
BIBLIOGRAPHIE :	43

INTRODUCTION

Présentation du Service de l'environnement :

Le Service de l'environnement (SEN) du canton du Valais, établi en 1962, a pour mission principale la protection de l'humain ainsi que son environnement. Pour les protéger contre les diverses atteintes possibles, il utilise les dispositions fédérales et cantonales relatives à la protection de l'air, des sols et des eaux (*LPE, LEaux, OEaux, etc.*). L'élimination des déchets et l'assainissement des sites pollués font également partie de son mandat. Le SEN a aussi comme objectif de protéger l'environnement contre le bruit et les rayonnements non ionisants.

Si le rôle de protection est au cœur de ses activités, le service mène également des actions de prévention, notamment avec la surveillance des eaux, la gestion circulaire des ressources ou encore la gestion des polluants atmosphériques. Il s'engage à promouvoir une conscience environnementale et pour ce faire, il recherche activement des solutions constructives.

Au sein du Service de l'environnement, le groupe Eaux Souterraines joue un rôle essentiel. En effet, il assure la protection, la gestion et la surveillance des eaux souterraines du canton du Valais. Les eaux souterraines représentent 90% de l'approvisionnement en eau potable du canton. Par conséquent, il est crucial de les protéger face aux risques de pollution découlant de projets de construction ou diverses activités anthropiques.

Pour réaliser cette mission, le canton délimite les secteurs où l'eau est exploitable, que l'on nomme secteur A_u de protection des eaux. Lorsque les eaux souterraines sont exploitées pour l'eau potable ou prévues pour une future exploitation, des zones et des périmètres de protection sont respectivement délimités autour des puits et des sources. Ces zones et périmètres sont à respecter dans le but d'éviter une pollution par des projets de constructions. Les zones de protection délimitées impliquent des restrictions d'utilisation du sol, notamment pour le bâti existant et les futures constructions. Une interdiction générale de construire s'applique à la zone S2, sauf s'il existe un motif important justifiant une dérogation (OFEFP, 2004).

Projet A_u fissuré :

Le projet pilote qui m'a été confié, lors de mon stage de cinq mois, au sein du groupe Eaux souterraines porte sur le secteur A_u fissuré et les critères d'attribution. Le secteur A_u est le secteur où les eaux souterraines peuvent être exploitées, tandis que le secteur $\bar{u}B$ correspond à des territoires dépourvus de ressources exploitables meubles, karstiques, fissurées ou mixtes. Les secteurs A_u de protection des eaux constituent un outil essentiel pour garantir la qualité et la quantité des eaux souterraines. Ils couvrent l'ensemble des eaux souterraines exploitables pour l'approvisionnement en eau potable, ainsi que les zones environnantes nécessaires à leur protection (OFEV, s.d). Les cantons doivent délimiter ces secteurs. Les détenteurs de captages, quant à eux, doivent faire délimiter les zones et périmètres de protection associés : zones S1, S2, S3 dans les aquifères en roches meubles et faiblement hétérogènes ; zones S1, S2, Sh et Sm dans les aquifères karstiques et fissurés fortement hétérogènes (SEN, s.d).

En secteur A_u fissuré, l'eau souterraine circule et s'accumule principalement au sein des zones fracturées de la roche, tels que des schistes ou des flyschs.

L'objectif de ce projet pilote est d'identifier des critères régionaux permettant de localiser les aquifères fissurés en Valais et d'en produire un rendu cartographique utile pour déterminer des zones productives (A_u fissuré) et des zones sèches ($\bar{u}B$). À terme, le SEN pourra utiliser ces cartes pour connaître avec plus de précision la localisation et la superficie des aquifères fissurés et par conséquent des secteurs de protection des eaux A_u fissuré.

Mon intérêt pour ce projet :

Diplômée d'un Bachelor en Sciences de la Terre et de l'Environnement, ce stage au sein du groupe Eaux souterraines représente une occasion exceptionnelle de prendre connaissance des enjeux primordiaux en hydrogéologie, un domaine passionnant de la géologie.

L'importance de la protection des eaux souterraines me semble évidente et le projet A_u fissuré me permet de contribuer activement à cette mission en combinant mes compétences en géologie, en hydrogéologie et en géomatique. Grâce à ce projet, je peux approfondir mes connaissances en géomatique tout en mettant en pratique les acquis de ma formation universitaire en géologie. Ce projet permet de lier la géologie et la géomatique, ce qui m'ouvre des perspectives professionnelles passionnantes.

HYDROGÉOLOGIE :

Aquifères :

Une formation géologique est qualifiée d'aquifère lorsqu'elle a la capacité d'emmagasinier l'eau issue de l'infiltration et de permettre son écoulement dans le sous-sol. Les aquifères jouent un rôle fondamental dans le cycle hydrologique en assurant le stockage temporaire ou permanent de l'eau souterraine. La productivité d'un aquifère dépend principalement de deux propriétés physiques fondamentales de la roche : la porosité et la perméabilité.

La porosité correspond à la proportion du volume de la roche occupée par des cavités vides (pores ou fissures), dans lesquelles l'eau peut s'accumuler. La perméabilité, quant à elle, désigne le degré d'interconnexion entre ces cavités, condition nécessaire à la circulation de l'eau (Darcy, 1856; Castany, 1979). Une formation peut présenter une porosité élevée, mais si les vides ne sont pas interconnectés, la perméabilité sera faible, ce qui limitera fortement la mobilité de l'eau.

En résumé, la combinaison de ces deux propriétés détermine la capacité de l'aquifère à stocker et à transmettre l'eau souterraine.

Aquicludes et aquitards :

À l'inverse d'un aquifère, un aquiclude est une formation rocheuse pratiquement imperméable qui ne permet pas le stockage significatif ni le passage de l'eau souterraine (Singhal and Gupta, 2010). Un aquitard, quant à lui, désigne une formation dont la perméabilité est insuffisante pour contenir une quantité importante d'eau, mais qui permet néanmoins des échanges d'eau souterraine entre aquifères adjacents, notamment par le biais de fuites verticales lentes (Singhal and Gupta, 2010).

Ces unités influencent le confinement des nappes et modulent, selon leur perméabilité, les échanges verticaux entre les aquifères.

Nappes :

Une nappe désigne l'ensemble des eaux contenues dans la zone saturée d'un aquifère (Castany, 1979). Par ailleurs, il existe plusieurs configurations de nappes, selon le contexte hydrogéologique [Fig. 1].

Une nappe libre (ou phréatique) est en contact direct avec l'atmosphère via la zone non saturée ; sa surface supérieure correspond au niveau piézométrique et sa variation au battement. À l'inverse, une nappe captive est confinée entre deux formations peu perméables (aquitards ou aquicludes). Cela induit une pression supérieure à la pression atmosphérique dans la nappe et donc un niveau d'eau supérieur à celui du toit de l'aquifère. Il existe également des nappes perchées, qui correspondent à des accumulations locales d'eau situées au-dessus d'une lentille imperméable, dans la zone non saturée. Cette disposition crée une petite nappe isolée, disjointe du niveau phréatique principal (Singhal and Gupta, 2010).

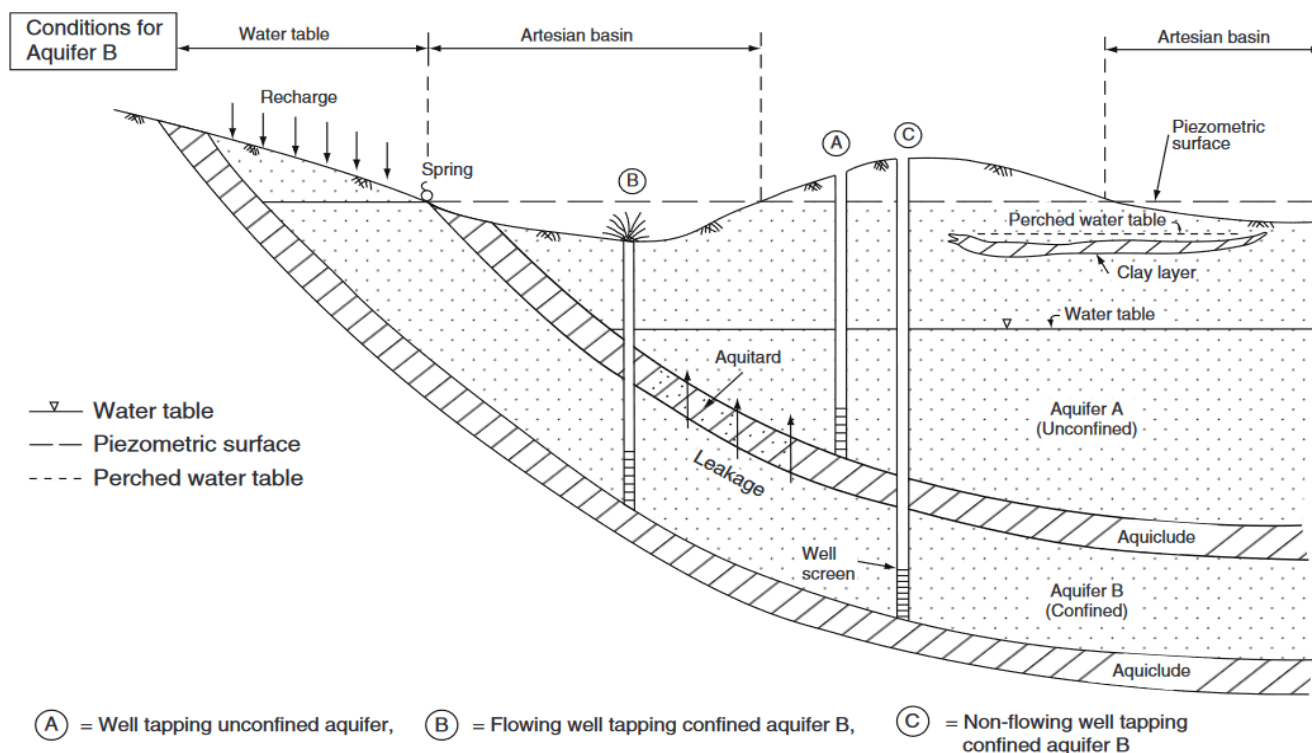


Figure 1: Représentation schématique des différents types de nappes (modifiée d'après Singhal and Gupta, 2010)

Typologie des aquifères :

En fonction de la nature des formations géologiques et des mécanismes d'écoulement, les aquifères peuvent être classés en plusieurs catégories : les aquifères poreux, karstiques, fissurés ou mixtes.

Les aquifères poreux se développent dans des formations meubles, généralement non consolidées, telles que les sables ou graviers [Fig.2]. Ces matériaux présentent une porosité primaire élevée, c'est-à-dire une porosité directement héritée du dépôt sédimentaire (Choquette and Pray, 1970) . L'eau s'y infiltre et circule librement entre les grains, en fonction de la perméabilité du matériau. Dans les plaines alluviales, ces aquifères sont souvent étendus et hautement productifs en raison de leur forte capacité de rétention et de transmission de l'eau souterraine (Fetter, 2014).

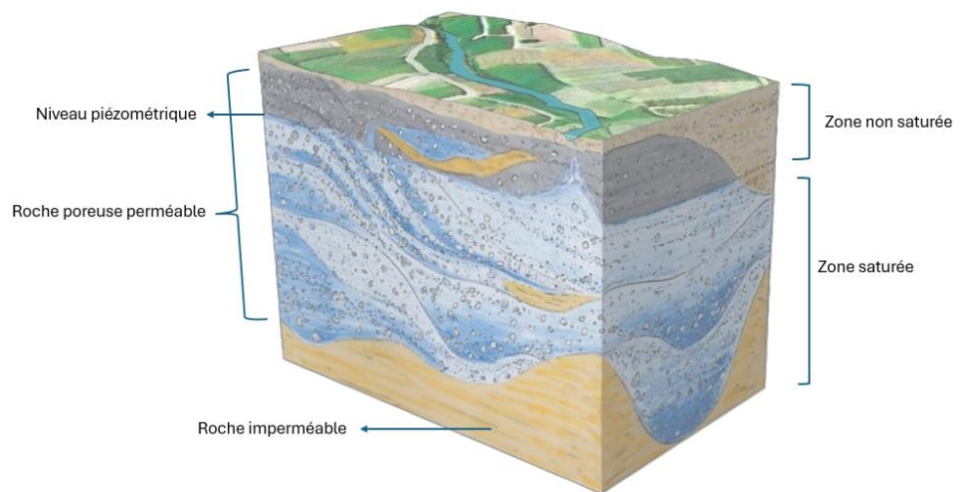


Figure 2: bloc 3D schématique d'un aquifère poreux (modifiée d'après l'OFEV)

Les aquifères karstiques se développent dans les roches carbonatées, principalement des calcaires, des dolomies ou du gypse, qui présentent une solubilité naturelle au contact de l'eau météorique [Fig.3]. Un processus de dissolution progressive conduit au développement de karsts, avec des dolines, lapiés, gouffres et autres cavités (Ford and Williams, 2007).

La porosité de ces aquifères est essentiellement secondaire, résultant de la dissolution de la roche.

Le développement du réseau karstique, très hétérogène, favorise un écoulement concentré et turbulent au sein des conduits principaux, contrastant avec les écoulements diffus des milieux poreux (Ford and Williams, 2007).

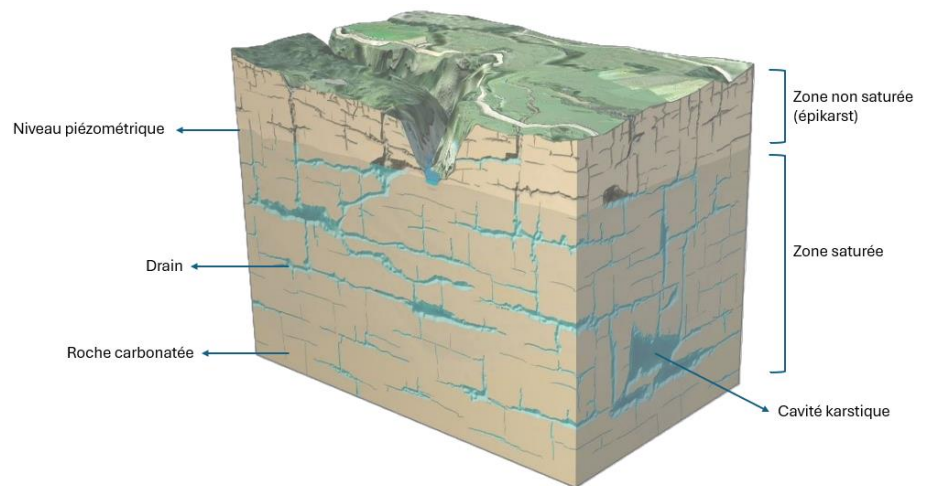


Figure 3: bloc 3D schématique d'un aquifère karstique (modifiée d'après l'OFEV)

Enfin, les aquifères fissurés se développent dans des roches plutôt dures, initialement peu perméables, comme les granites, basaltes ou schistes [Fig.4]. Ces roches acquièrent une porosité secondaire à la suite de processus géologiques tels que la fracturation, puis leur altération (Leblanc, 1986; Singhal and Gupta, 2010). L'eau souterraine y circule à travers un réseau de fractures, de joints et de microfissures interconnectés, condition nécessaire pour assurer un écoulement hydraulique efficace (Singhal and Gupta, 2010).

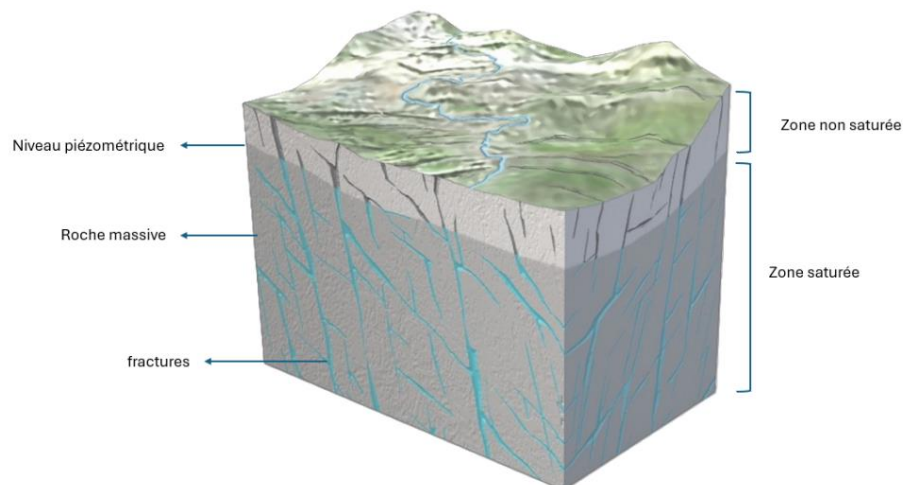


Figure 4: Bloc 3D schématique d'un aquifère fissuré (modifiée d'après l'OFEV)

Contrairement aux aquifères poreux ou karstiques, les aquifères fissurés sont plus difficiles à localiser et à exploiter, car leur productivité dépend fortement de la densité, de la connectivité et de l'ouverture des discontinuités. Ainsi, des roches initialement compactes et peu favorables au stockage de l'eau peuvent, par endroit, devenir de bons réservoirs souterrains, si le réseau fissural est bien développé.

GÉOLOGIE :

Contexte géologique : la géologie alpine

Comme expliqué au chapitre précédent, les différents types d'aquifères dépendent de la nature de la roche. En Valais, la géologie alpine se caractérise par une grande hétérogénéité, traduite par une diversité importante de formations rocheuses à travers les Alpes.

L'orogénèse alpine, débutant au Mésozoïque, est liée à la subduction continentale entre la plaque européenne et la plaque adriatique (Channell and Horváth, 1976). Avant cette convergence, un grand cycle tectonique s'est produit : la fragmentation du supercontinent Pangée. À la fin du Paléozoïque, la chaîne hercynienne disparaît à la suite d'un amincissement crustal, entraînant une phase de rifting au Jurassique moyen qui permet l'ouverture de l'océan Téthys. Au Crétacé, une nouvelle ouverture océanique permet l'apparition de l'océan valaisan. Le microcontinent Briançonnais se trouve, alors, entre ces deux océans (Handy et al., 2010). Avec l'ouverture de l'Atlantique Nord, dès le Crétacé supérieur, l'expansion de l'océan Téthys s'interrompt et la convergence entre les deux plaques commence. Lors de l'Oligocène, une collision continentale se produit et provoque d'importantes déformations ductiles, telles que plis, schistosité, chevauchements (Herwegh et al., 2020). Par la suite, des déformations cassantes ont généré de nombreuses failles et réseaux de fractures dans les roches présentant une rhéologie appropriée.

Cette histoire tectonique complexe explique la grande hétérogénéité géologique du domaine alpin. Les Alpes comprennent :

- Des roches magmatiques, présentes dans les massifs cristallins comme le granit ;
- Des roches sédimentaires, formées dans les anciens océans Téthys ou valaisan (Handy et al., 2010) telles que les calcaires, gypses et flyschs ;
- Des roches métamorphiques, comme le gneiss, marbres ou schistes, résultant des augmentations de pression et de température liées à la subduction et à la collision continentale.

ZONE D'ÉTUDE :

Les flyschs du Val d'Iliez

La zone d'étude de ce projet pilote est le Val d'Iliez et sa formation de flyschs. Le potentiel aquifère de cette formation est incertain, ou du moins, très hétérogène selon le SEN. La carte cantonale de protection des eaux indiquerait que la formation est un réservoir potentiel d'eau souterraines (SEN, s.d). Au Val d'Iliez, de nombreuses sources sont captées pour l'approvisionnement en eau potable, mais à divers endroits, il n'y a pas de sources documentées.

Par conséquent, l'objectif de ce projet pilote est de trouver une recette pour attribuer spatialement les territoires avec des sources d'eaux souterraines au secteur A_u et de, ainsi, leur conférer une protection accrue.

Flyschs : caractéristiques et origine géologique

Le flysch est une formation géologique constituée d'une alternance entre une roche dure, comme le grès, ou le calcaire, et de l'argile, une roche beaucoup plus tendre (Trümpy, 1960; Mutti et al., 2009). Le flysch résulte de l'accumulation de dépôts sédimentaires syn-orogénique dans un bassin océanique (Homewood and Lateltin, 1988). Les flyschs sont des roches typiques des milieux marins profonds qui se forment en bordure de plaque tectonique convergente lors de la formation de montagnes (Eardley and White, 1947; Trümpy, 1960). Les argiles se sont déposées pendant des phases calmes, alors que les roches dures, elles, se déposent lors de divers épisodes d'avalanches sous-marines, dites turbidites, qui sont provoquées par le soulèvement tectonique des montagnes et l'érosion de celles-ci (Jinghua Hsu, 1960).

Dans la zone d'étude, différentes formations de flyschs ont été cartographiées en fonction de leur âge [Fig.5]. Celles-ci ont une minéralogie (faciès calcaire ou siliceux) et une composition en fossiles différente de l'une à l'autre. Comme elles couvrent une grande partie du Val d'Iliez, le Service de l'environnement considère qu'il est important d'analyser plus précisément ces formations ainsi que leur potentiel aquifère.

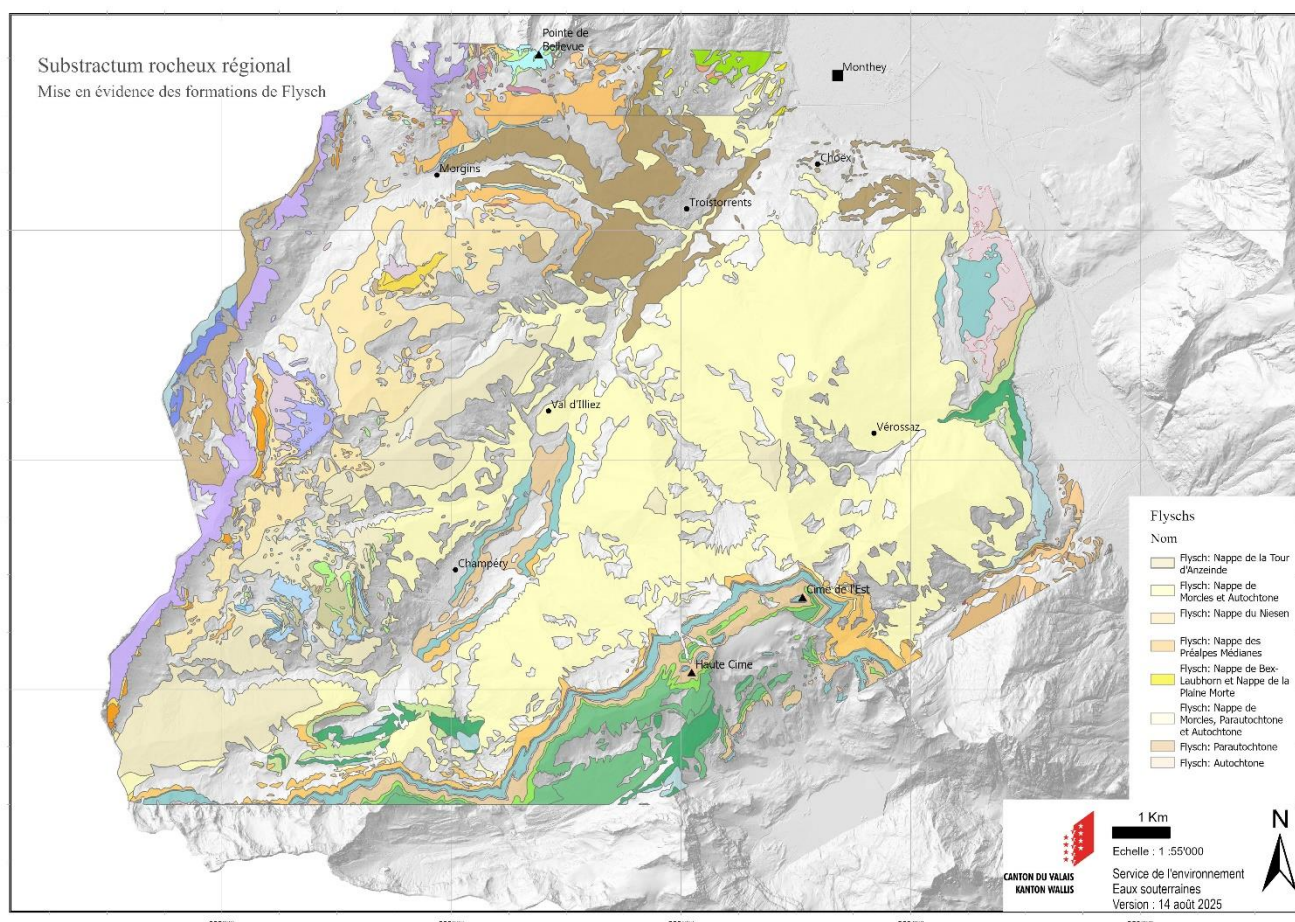


Figure 5: Répartition des Flyschs dans le substratum rocheux régional

Remarque : La carte représente l'ensemble des formations du soubassement rocheux à titre de contexte. La légende n'inclut que les formations de type Flysch qui constituent l'objet principal de ce travail.

Les flyschs ont une faible porosité primaire, en raison de la granulométrie très fine des argiles. Toutefois, leur forte litage (alternance grès/argile) et les fractures localisées, héritées de l'orogénèse alpine, ont généré une porosité secondaire.

Seules les formations de flyschs les plus répandues au Val d'Illeiz sont décrites ci-dessous [Table.1]. D'autres nappes présentes dans la légende de la figure 5 sont minoritaires et ne sont pas détaillées ici (swisstopo, s.d).

Nappe	Lithologie	Chronologie	Fossiles
Nappe de Morcles et Autochtones	Grès argileux, argilite	Priabonien - Rupélien	Végétaux
Nappe de la Tour d'Anzeinde	Grès, marne, calcaire	Eocène	Globigérines, helminthoïdes
Nappe du Niesen	Conglomérats, grès, argilite schisteux	Maastrichtien – Lutétien	-
Nappe des Préalpes médianes	Grès, marne	Lutétien	-

Tableau 1: Description des Flyschs majoritairement présents au Val d'Illeiz

Géologie régionale :

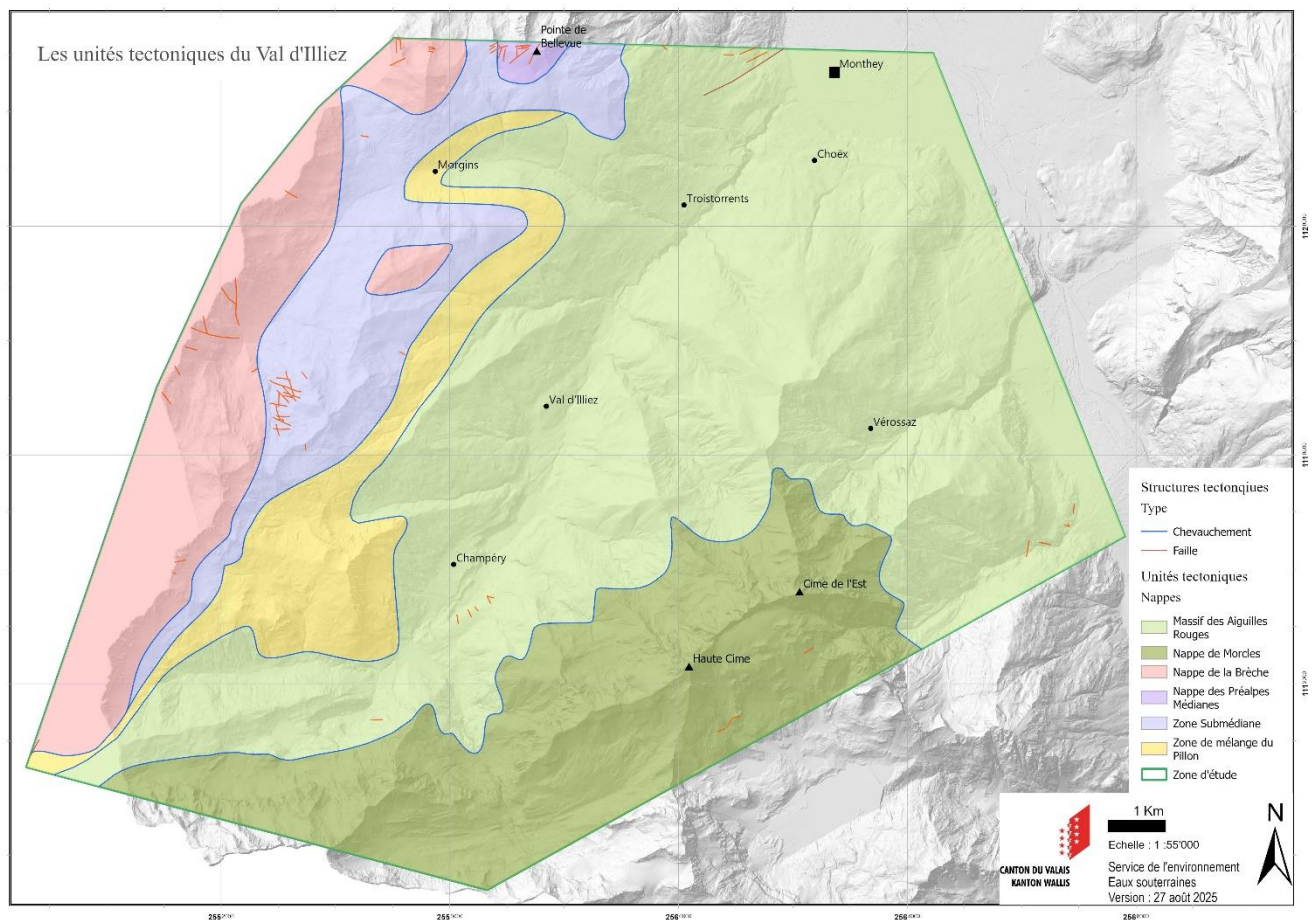


Figure 6: Les différentes unités tectoniques du Val d'Illeiz

Le Val d'Illeiz est partagé entre deux domaines tectoniques : le Pennique et l'Helvétique [Fig.6]. La région est caractérisée par un chevauchement de nappes, dont la nappe de Morcles, le massif des Aiguilles Rouges et la zone de mélange du Pilon appartenant au domaine helvétique. Le domaine pennique moyen est représenté par la zone submédiane, la nappe de la Brèche et la nappe des Préalpes Médiannes (strati.ch, 2025).

Ces unités présentent des lithologies contrastées. Les roches sédimentaires sont largement représentées telles que calcaires, flyschs, ou schistes. Les roches métamorphiques apparaissent principalement dans le massif des Aiguilles Rouges où affleurent gneiss et cornéennes (strati.ch, 2025). Dans la région, les roches magmatiques sont très peu présentes, la majorité des formations résultant de dépôts sédimentaires liés à l'océan Téthys (Handy et al., 2010).

MÉTHODOLOGIE :

Subdivision de la zone d'étude :

La zone d'étude a été divisée en 13 unités spatiales, afin d'analyser pour chaque subdivision son potentiel aquifère et son appartenance à un secteur A_u ou au contraire $\bar{u}B$. Des polygones représentant ces subdivisions ont été créés à l'aide de l'outil *Créer des entités* [Fig.14]. Les crêtes de montagne ainsi que le cours de la Vièze ont servi de repères naturels pour délimiter ces polygones en tenant compte de la direction générale de l'écoulement des eaux. Cette approche vise à rapprocher autant que possible la division de la zone d'étude des limites orographiques réelles, en s'inspirant de la logique des bassins versants.

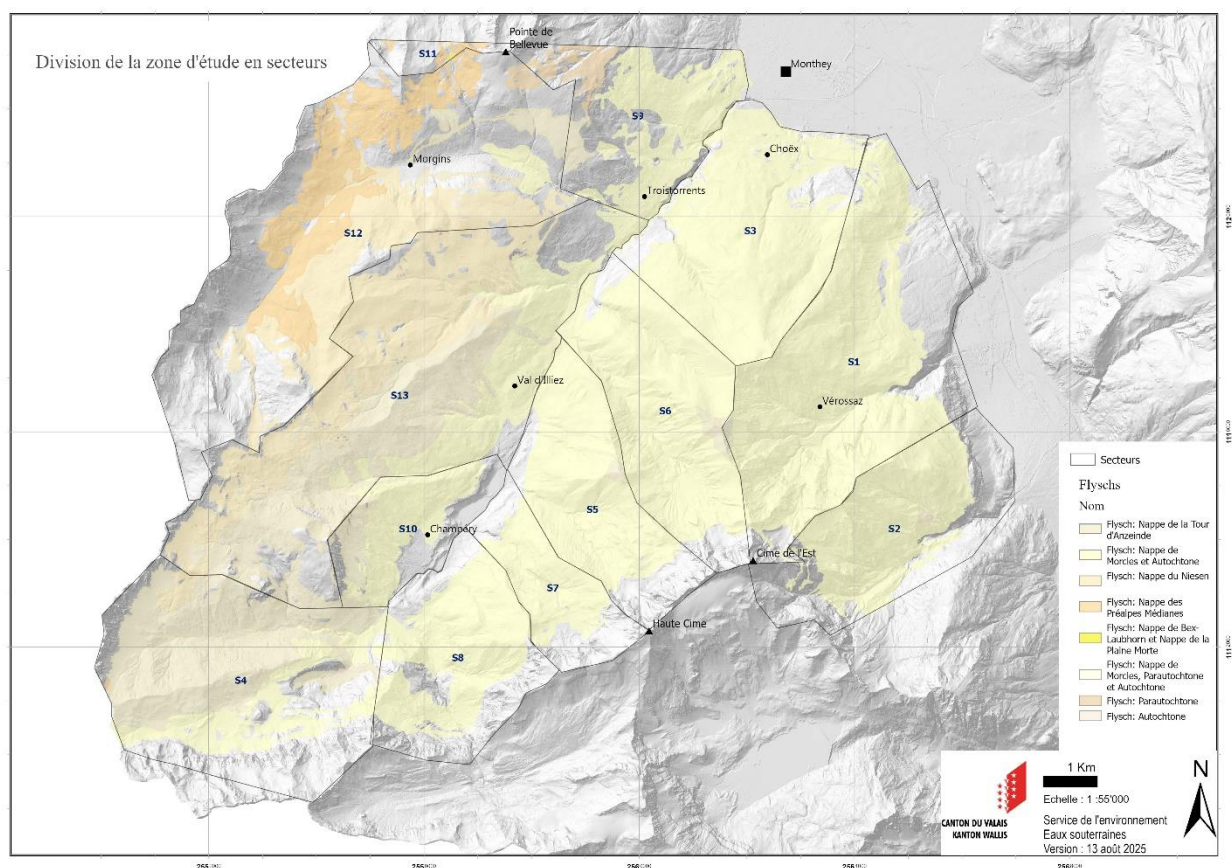


Figure 7: Subdivision de la zone d'étude en 13 unités spatiales

Acquisition et traitement des données :

Logiciels utilisés :

Les analyses spatiales et la production cartographique ont été réalisées principalement au sein du logiciel ArcGIS Pro (ESRI), utilisé pour le traitement des données, la création des entités ainsi que le géotraitement. QGIS a été employé comme outil complémentaire afin de réaliser un modèle de réseau hydrographique hiérarchisé à partir d'un MNT, permettant l'extraction des résurgences.

Données utilisées :

Les analyses développées reposent sur un ensemble de données géologiques et hydrogéologiques provenant de différentes sources. Le tableau suivant synthétise ces données, en indiquant pour chacune leur source, leur résolution, leur utilité dans l'étude et les biais associés [Table.2].

Donnée	Source	Résolution	Utilité	Biais
GeoCover	swisstopo	1 :25'000	Base pour extrapolation des flyschs	Pas de 3D - Interpolation des formations sous le quaternaire
Tecto500	swisstopo	1 :50'000	Représentation géologique de la zone d'étude (unités tectoniques, chevauchements, failles)	-
MNT	SEN	23.725 x 23.725	Calculer l'accumulation de flux	-
Réseau hydrologique	swisstopo	Vectorielle – linéaire	Extraction des résurgences	-

Sources	SEN	Vectorielle – points	Classification des aquifères	Relevés incomplets, informations variables selon les captages
Forages	CREALP	Vectorielle – points	Identifier la présence d’eau dans les flyschs	Présence d’eau parfois non indiquée, données concentrées en zones habitées
Marais, alpages	swisstopo	1 :25’000	Indice de la présence d’aquifère	Indicateur indirect d’eau souterraine
Glissements permanents	SDANA	Vectorielle – polygone	Indice d’eau souterraine via instabilités de terrain	Hétérogène : élaboré pour les zones habitables
InSAR	SEN	Vectorielle – polygone	Indice d’eau souterraine via instabilités de terrain	-
Pluviométrie	MétéoSuisse, CREALP	Journalières / mensuelles	Étude de la recharge potentielle	Nombre de stations limité dans la zone d’étude

Tableau 2: Descriptions des données utilisées pour les analyses spatiales

Données géologiques :

L’office fédéral de la topographie, swisstopo, met à disposition des géodonnées dans divers domaines, dont l’eau et la géologie ([swisstopo, s.d.](#)). Parmi celles-ci, les unités tectoniques permettent l’identification des différentes nappes, failles et chevauchement de la zone d’étude. Les informations sur la lithologie de la Suisse à l’échelle 1 :25'000 sont contenues dans la couche « GeoCover » sous forme vectorielle.

Les formations du quaternaire et les roches (bedrock) y sont représentées sous forme de polygones. La 3^e dimension n’est pas considérée dans cette couche, dans le sens que les roches ne sont pas définies sous les formations quaternaires. Par conséquent, une interpolation simple a été faite pour attribuer une formation sous le quaternaire. Les étapes pour combler les données manquantes des roches sous les formations quaternaires sont contenues dans l’extraction et traitement des flyschs.

Extraction et traitement des flyschs:

Afin de cibler les flyschs du Val d'Illeiez, une extraction a été effectuée à partir de la couche « bedrock » dans le but de générer une nouvelle couche : « flyschs ». Cette opération permet de concentrer l'analyse spatiale sur les formations géologiques pertinentes.

Les étapes sont les suivantes :

- Sélection de tout type de flyschs dans la table attributaire de la couche « bedrock » à l'aide de la commande « *sélectionner par attribut* ».
- Exportation des entités sélectionnées pour générer une nouvelle couche intitulée « flysch »
- Sélection des objets de la couche « quaternaire » en contact avec les flyschs par la commande « *sélectionner par emplacement* » avec la relation limite touche.
- Création d'une nouvelle couche nommée « Quaternaire touche flysch » à partir des entités sélectionnées.
- Combinaison spatiale des couches « flysch » et « quaternaire touche flysch » avec la commande « *Différence Symétrique* ».
- Jonction des attributs résultant de l'union des couches « flysch » et « quaternaire touche flysch » par l'outil « *Jointure spatiale* ».
- Combinaison des couches « flysch » et « quaternaire touche flysch » avec l'attribut flyschs par la commande « *Combiner* ».

Ces opérations ont permis d'obtenir une carte présentant la distribution des différents types de flyschs du Val d'Illeiez [Fig. 8].

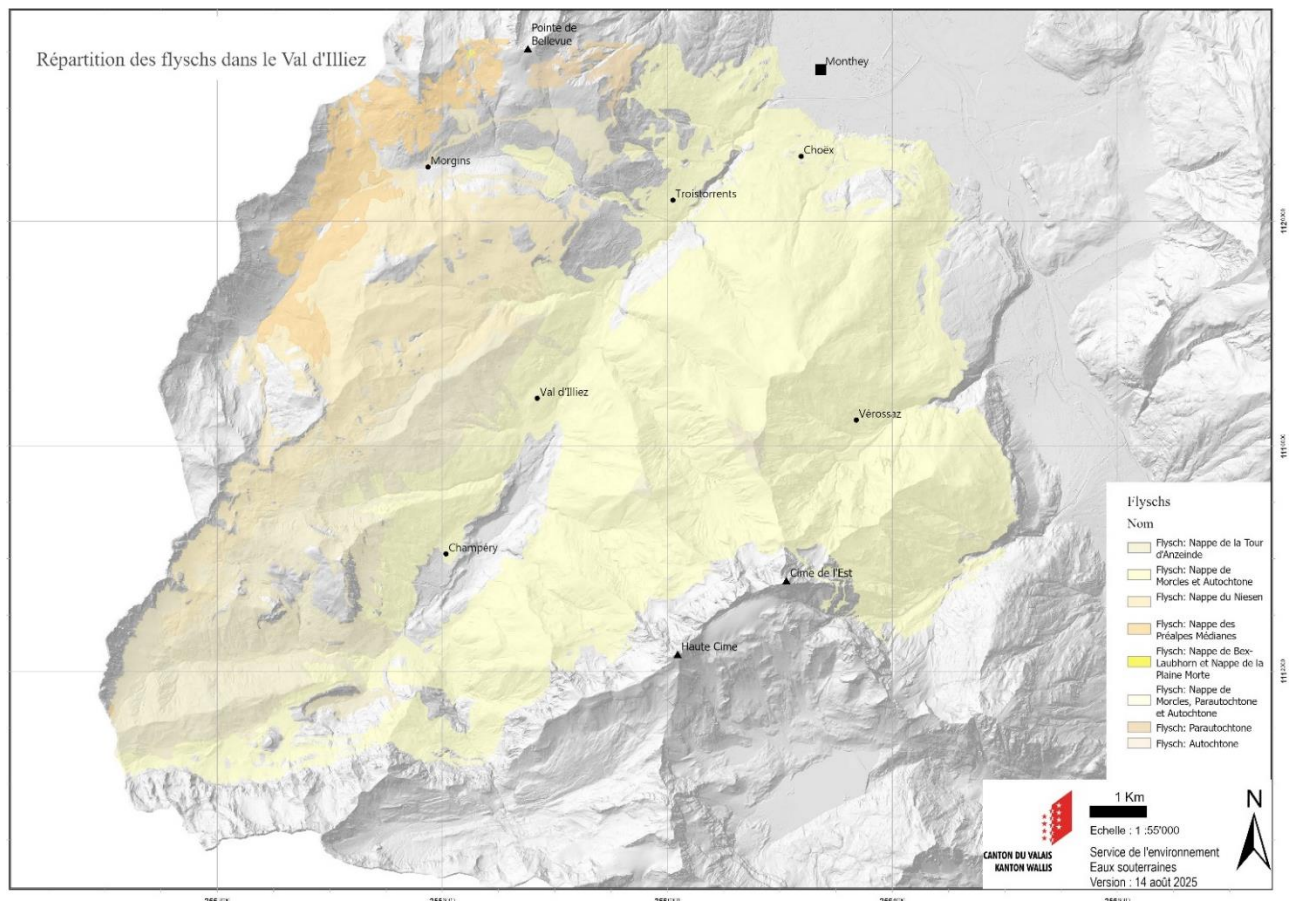


Figure 8: Répartition des flyschs au Val d'Illeiz.

Données hydrologiques :

Le réseau hydrographique est un indicateur clé pour mieux comprendre les résurgences, notamment à travers sa ramification et les points initiaux. Cela reflète la présence d'un aquifère meuble ou fissuré. Une hiérarchisation du réseau permet d'extraire cette information. Le bassin versant, situé en amont de la résurgence, peut ensuite être estimé, autrement dit la surface du bassin potentiel d'alimentation d'une source.

Pour créer ce réseau hydrographique hiérarchisé, le réseau de swisstopo a été importé dans QGIS.

Les étapes sont les suivantes :

- Création d'une couche de point avec l'outil « *Extraire les extrémités* » des entités qui possèdent l'attribut *vertex_p* indiquant 0 ou -1.
 - Vertex_p = 0 : début de tronçon
 - Vertex_p = -1 : fin de tronçon

- Sélectionner les entités dont $\text{vertex_p} = 0$ avec la commande « *Sélectionner par expression* »
- Création d'une nouvelle couche contenant les entités sélectionnées.
- Génération d'un tampon autour de ces points à l'aide de l'outil « *Buffer* » pour identifier les points associés à un unique tronçon.
- Jointure spatiale entre la couche tampon et la couche linéaire du réseau hydrographique via « *Joindre les attributs par localisation (résumé)* ».
- Sélection des points présentant l'attribut $\text{UUID_count} = 1$ et création d'une nouvelle couche dédiée.
 - o $\text{UUID_count} = 1$: résurgence
 - o $\text{UUID_count} \neq 1$: intersection de cours d'eau

Une fois ces opérations finies, une couche de point représentant les résurgences est créée [Fig.9].

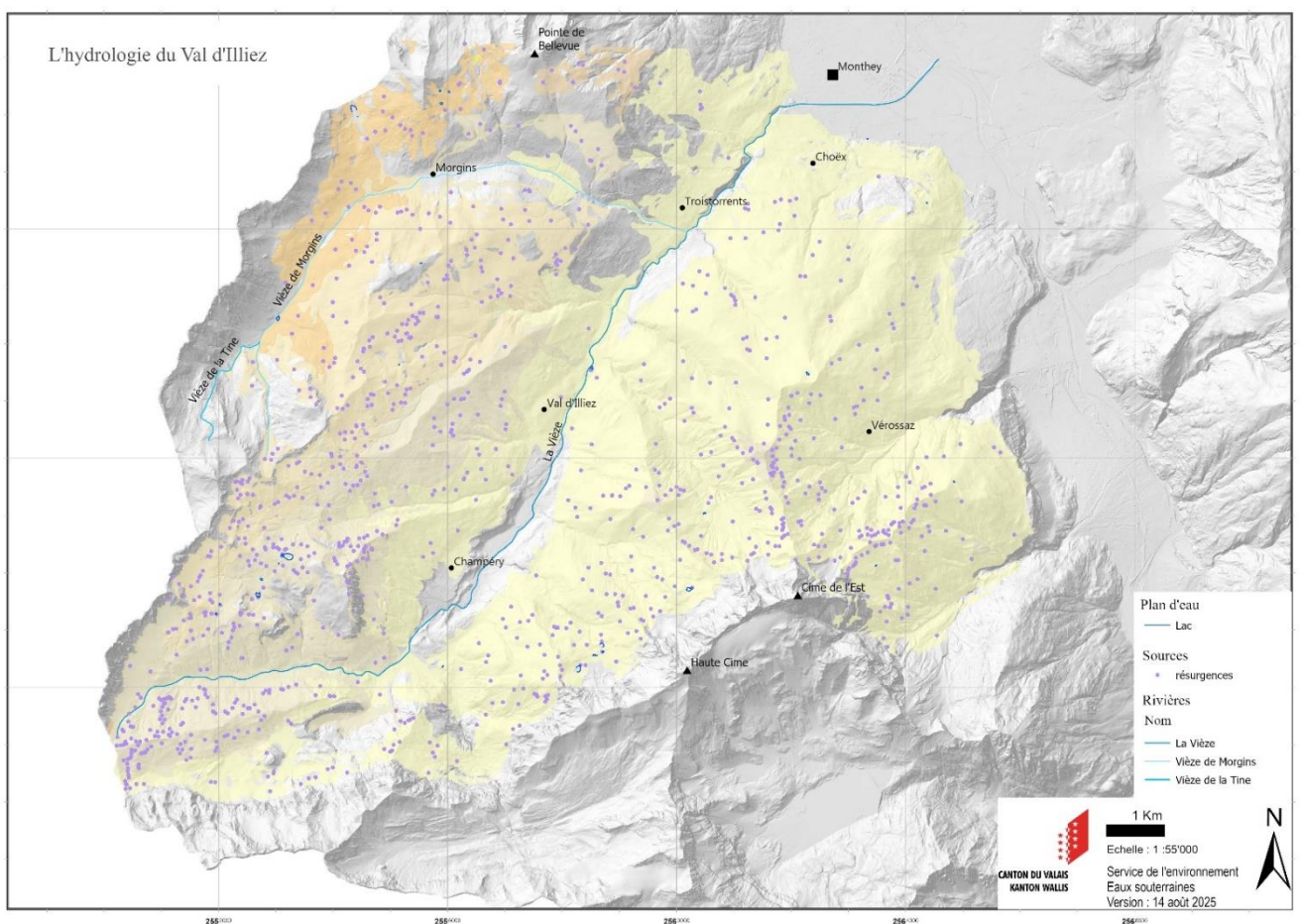


Figure 9: Répartition des éléments hydrologiques au Val d'Illeiz

Il est également pertinent d'évaluer le bassin versant associé à chaque point de résurgence. Pour ce faire, l'accumulation des flux a été calculée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).

Les étapes sont les suivantes :

- Génération d'un raster de direction des flux avec l'outil « *Direction des flux* », qui détermine la direction d'écoulement en fonction des pentes issues du MNT.
- Création d'un raster d'accumulation des flux à l'aide de l'outil « *Accumulation de flux* », permettant de quantifier, pour chaque pixel, le nombre total de cellules amont qui s'y déversent.
- Extraction des valeurs de ce raster aux emplacements des points de résurgence afin de connaître le nombre de pixels drainés vers chaque résurgence.

Chaque pixel ayant une résolution spatiale connue (23.725 x 23.725 m), la surface du bassin versant potentiel peut être estimée en multipliant le nombre de pixels drainés par sa surface. Cette méthode permet ainsi d'obtenir une approximation de l'aire d'alimentation théorique de chaque résurgence.

Sources :

Le Service de l'environnement gère le cadastre des sources du canton, une base de données mise à jour en s'appuyant sur les rapports de différents bureaux d'études. Cette base fournit, pour chaque source, sa position, la nature du captage, la géologie du soubassement et de la couverture quaternaire, le milieu aquifère supposé ainsi que le débit.

Afin de réaliser une symbologie en fonction du type d'aquifère, un nouvel attribut « Aquifère » doté d'un domaine a été créé. Le domaine distingue trois catégories : aquifère meuble, fissuré ou mixte. Cette classification permet de représenter spatialement les aquifères potentiels des sources du Val d'Illiez [Fig.10].

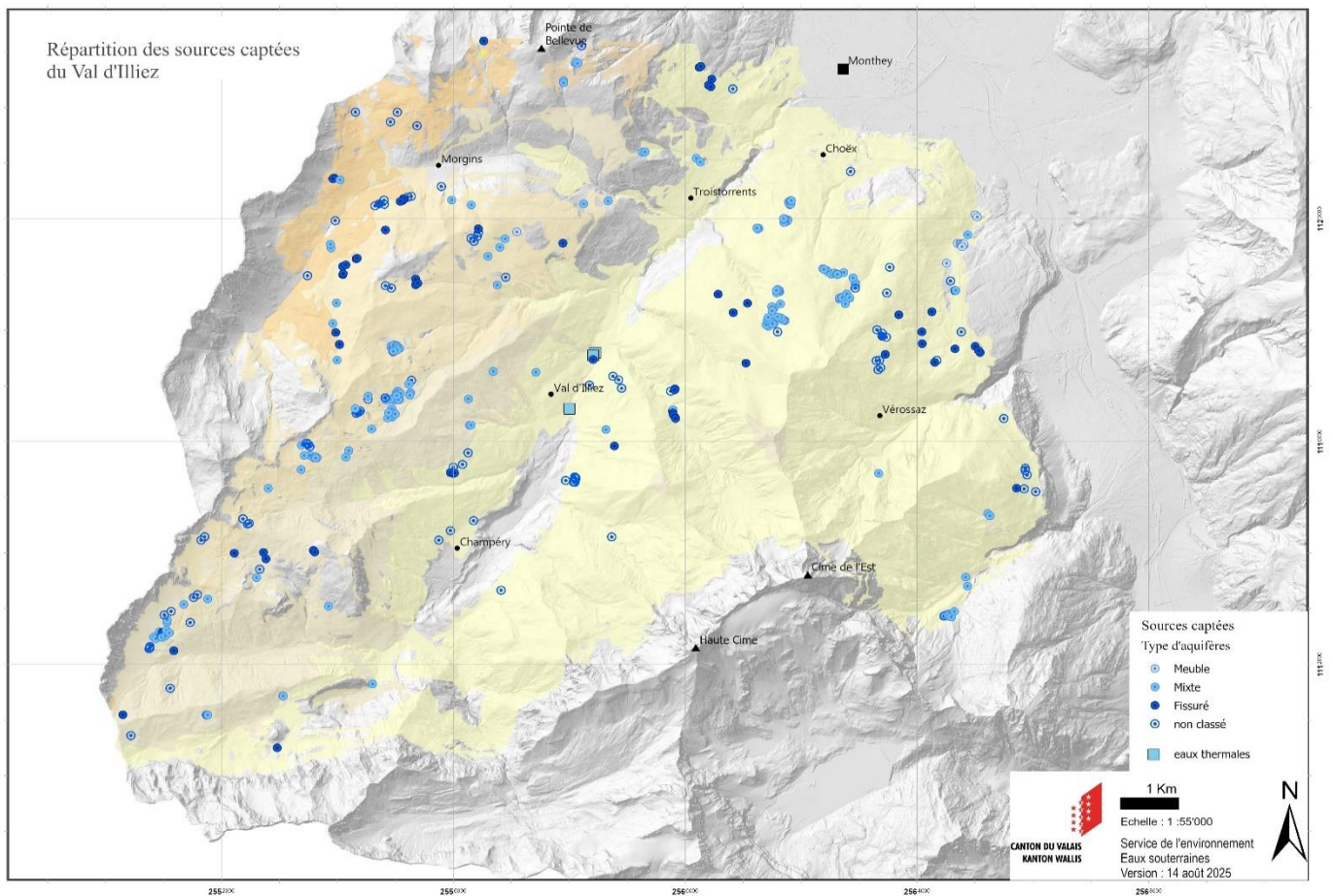


Figure 10: Répartition des sources captées au Val d'Illiez

Forages :

Le Centre de recherche sur l'environnement alpin, CREALP, gère une base de données géospatiale des forages (sondes, investigations, puits, etc.) réalisés dans le canton du Valais appelée géocadastre. Après importation, la couche des forages a été découpée selon l'emprise de la zone d'étude.

Afin de réinterpréter l'information présente sous forme graphique (logs de forage), de nouveaux champs ont été créés pour indiquer : si le forage est sec ou contient de l'eau, l'intervalle de profondeur de l'eau rencontrée, et le débit. Un domaine a été créé pour le débit permettant de le classer comme faible, fort, très fort ou exceptionnel.

Une fois ces attributs mis à jour, un aperçu visuel permet de mettre en évidence des zones potentiellement sèches dans les flyschs du Val d'Illiez [Fig.11].

Cependant, ces données comportent des biais, l'eau n'est pas toujours indiquée sur les relevés et les forages ne sont, pour la plupart, que sur des lieux habités.

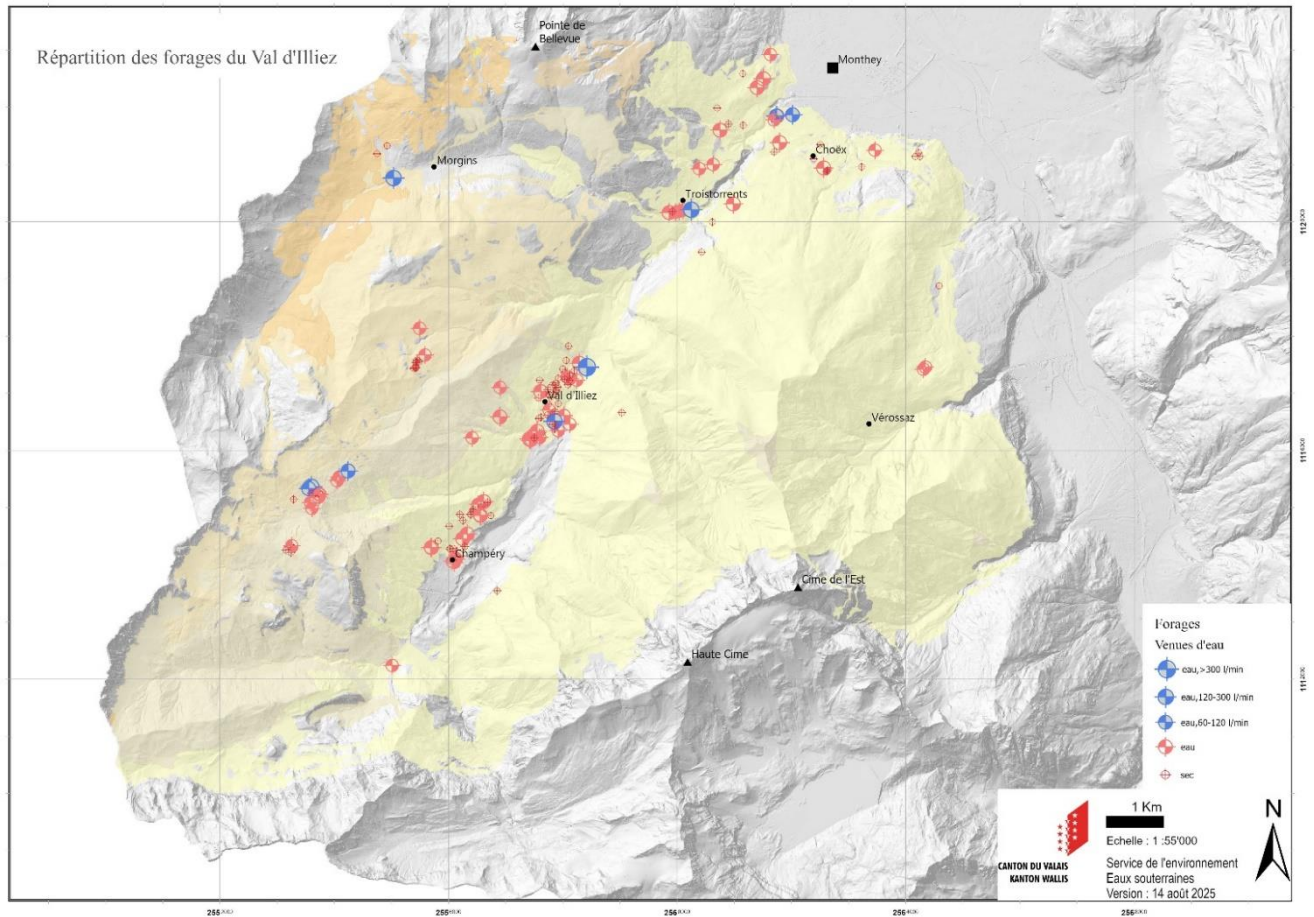


Figure 11: Répartition des forages au Val d'Illiez

Données auxiliaires :

Les marais ou les alpages, indicateurs d'eau, aident à la compréhension du sous-sol et potentiellement des aquifères [Fig.12]. La présence d'un milieu humide indique une saturation du sol en eau, révélant un aquifère proche de la surface. Dans ces conditions, l'eau ne s'infiltre plus et reste en surface, formant des zones humides comme les marais. Les alpages signalent également la présence possible d'eau en sous-sol. Le bétail s'y abreuve et des résurgences alimentant des points d'eau s'y trouvent fréquemment (SEN, s.d).

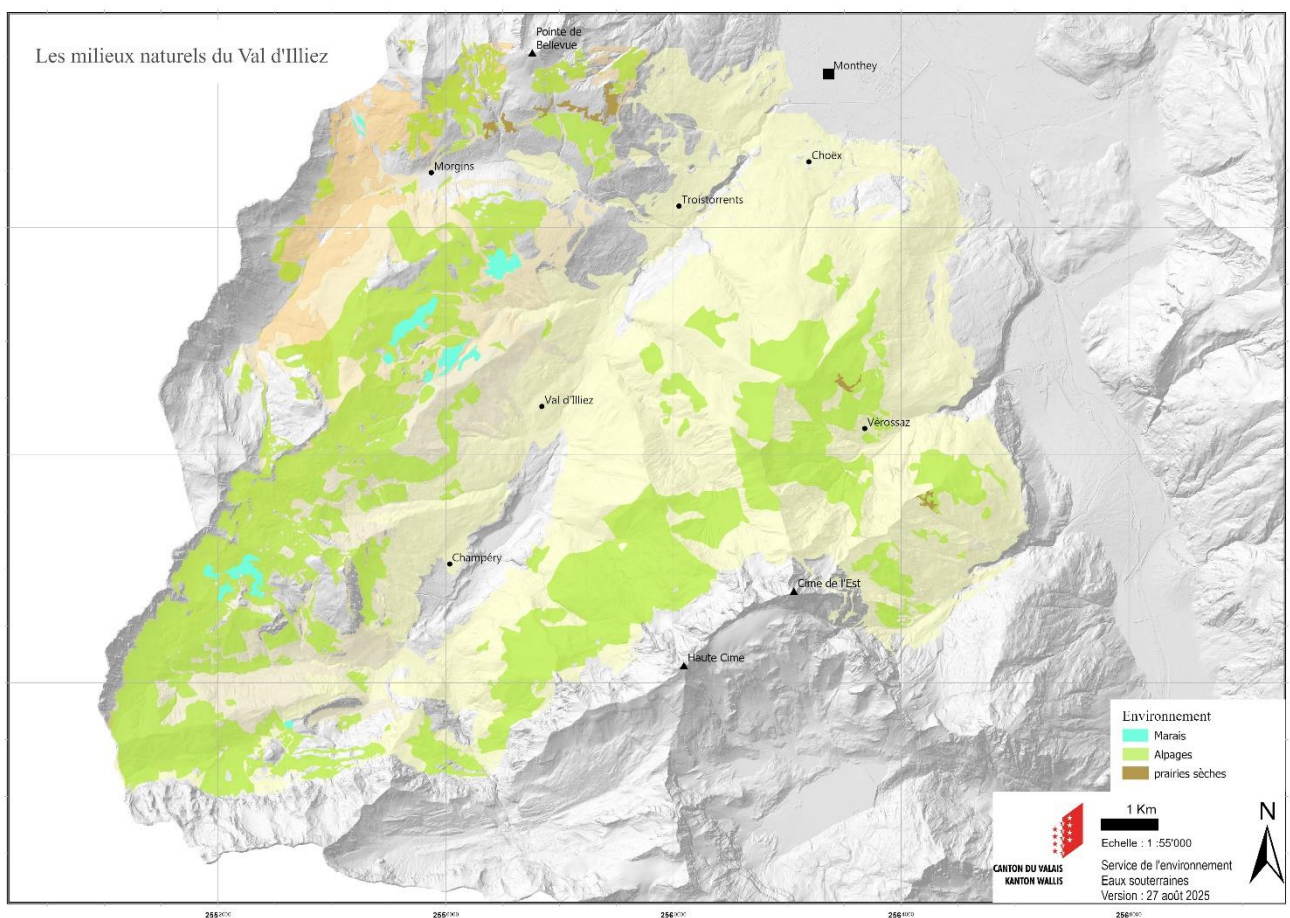


Figure 12: Répartition des milieux naturels au Val d'Illiez

Le service des dangers naturels (SDANA) gère la base de données des instabilités géologiques, comprenant les glissements de terrain permanents du canton (SDANA, s.d). Cette couche, issue des relevés de terrain, est principalement disponible pour les zones habitées. Ces glissements impliquent la présence d'eau souterraine à l'origine des mouvements [Fig. 13].

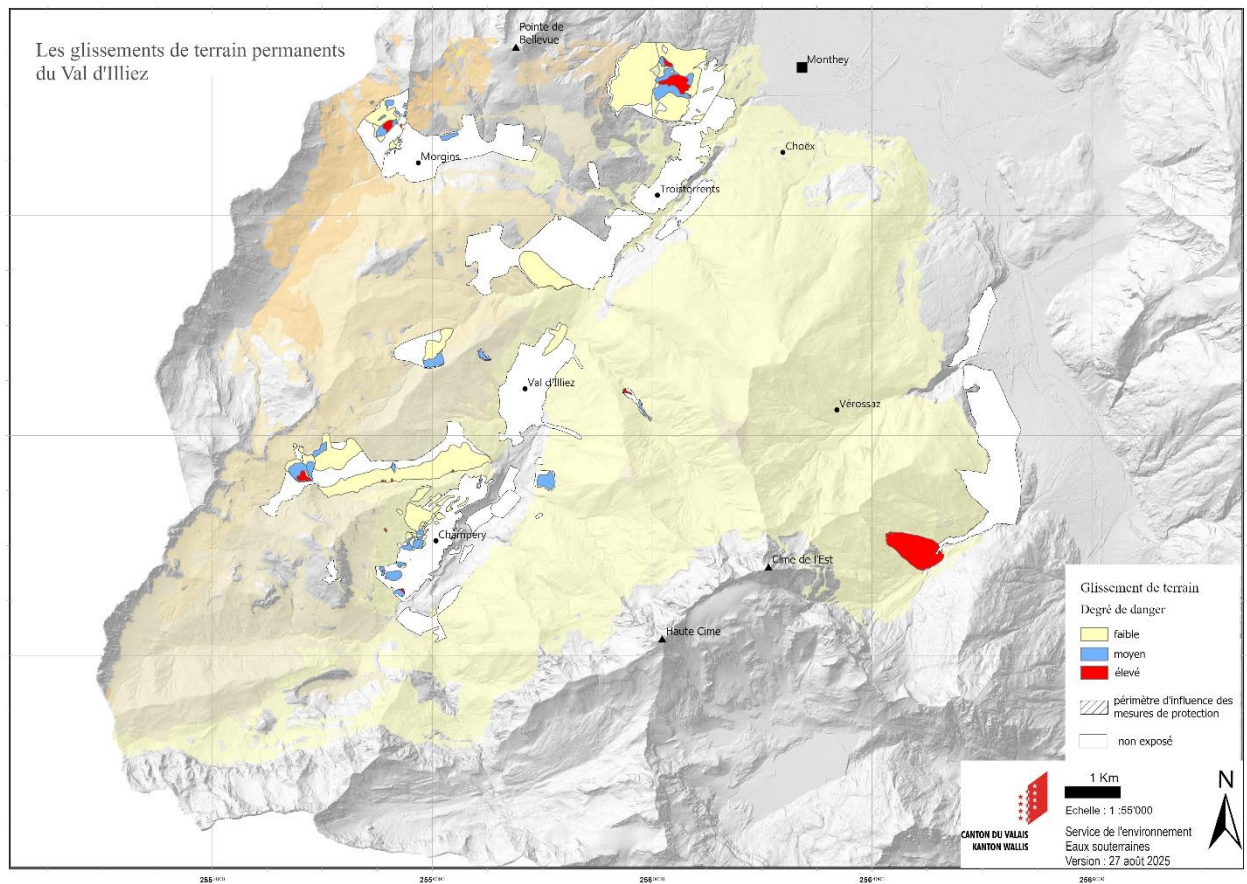


Figure 13: Distribution des glissements de terrains permanents au Val d'Illiez

Une seconde couche, basée sur les mesures interférométriques InSAR, évalue les déformations du sol et les vitesses de déplacement [Fig. 14]. Là encore, ces mouvements sont liés à la présence d'eau et potentiellement d'aquifères.

La couche InSAR présente l'avantage d'offrir une couverture homogène à l'échelle régionale, contrairement à la couche des glissements permanents [Fig. 13], qui n'est élaborée que pour les zones habitables et est donc plus hétérogène.

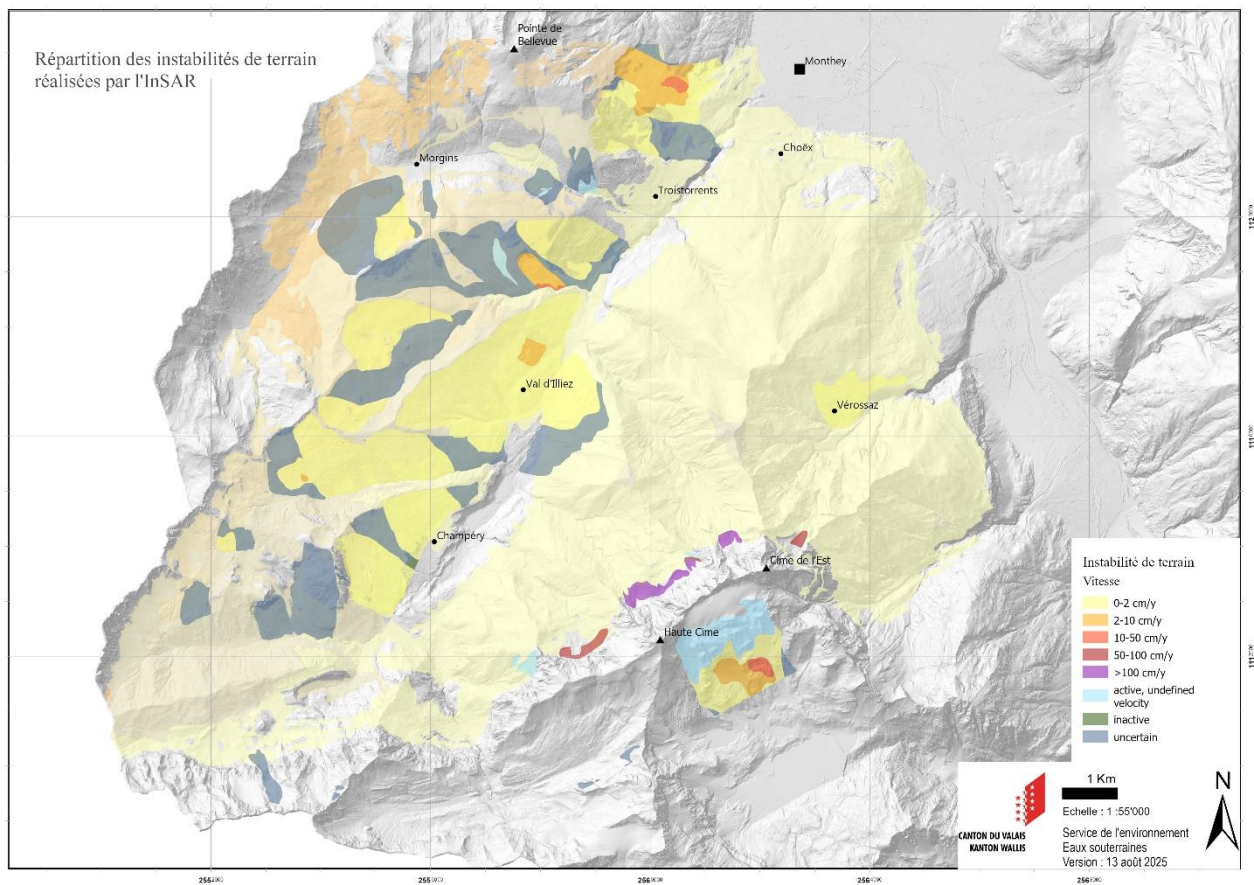


Figure 14: Répartition des instabilités de terrain InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

Données pluviométriques :

Les données pluviométriques proviennent de MétéoSuisse, qui met à disposition les mesures issues de différentes stations ([MétéoSuisse, 2025](#)). Des mesures sont disponibles pour les stations de Champéry, Choëx et Evionnaz, situées à l'intérieur ou à proximité de la zone d'étude. Elles se distinguent par leur altitude et par leur distance à la vallée du Rhône.

À celles-ci s'ajoute la station *Cime de l'Est*, une station qui provient du système de surveillance GUARDAVAL, créé par le CREALP¹ ([CREALP, 2024](#)) [Fig.15].

¹ Le GUARDAVAL est un système de télésurveillance automatique permettant la surveillance de sites jugés à risque. Ce système intègre plus de 70 sources de données provenant de divers fournisseurs.

Pour la station *Cime de l'Est*, les données de précipitations étaient enregistrées quotidiennement. Elles ont donc été regroupées pour obtenir des totaux mensuels et annuels, afin de les rendre comparables aux séries mensuelles des stations de *Champéry*, *Choëx* et *Evionnaz*.

Deux types d'analyses ont, ensuite, été réalisés (présentées dans le chapitre *Résultats*) :

- Un histogramme représentant la précipitation moyenne pour chaque mois d'une année hydrologique (octobre à septembre), calculée sur la période 2015-2024, afin de visualiser la distribution intra-annuelle des précipitations et d'identifier les périodes et les zones les plus humides.
- Un histogramme annuel représentant la pluviométrie totale pour chaque année de 2015 à 2024, afin d'observer l'évolution interannuelle des précipitations.

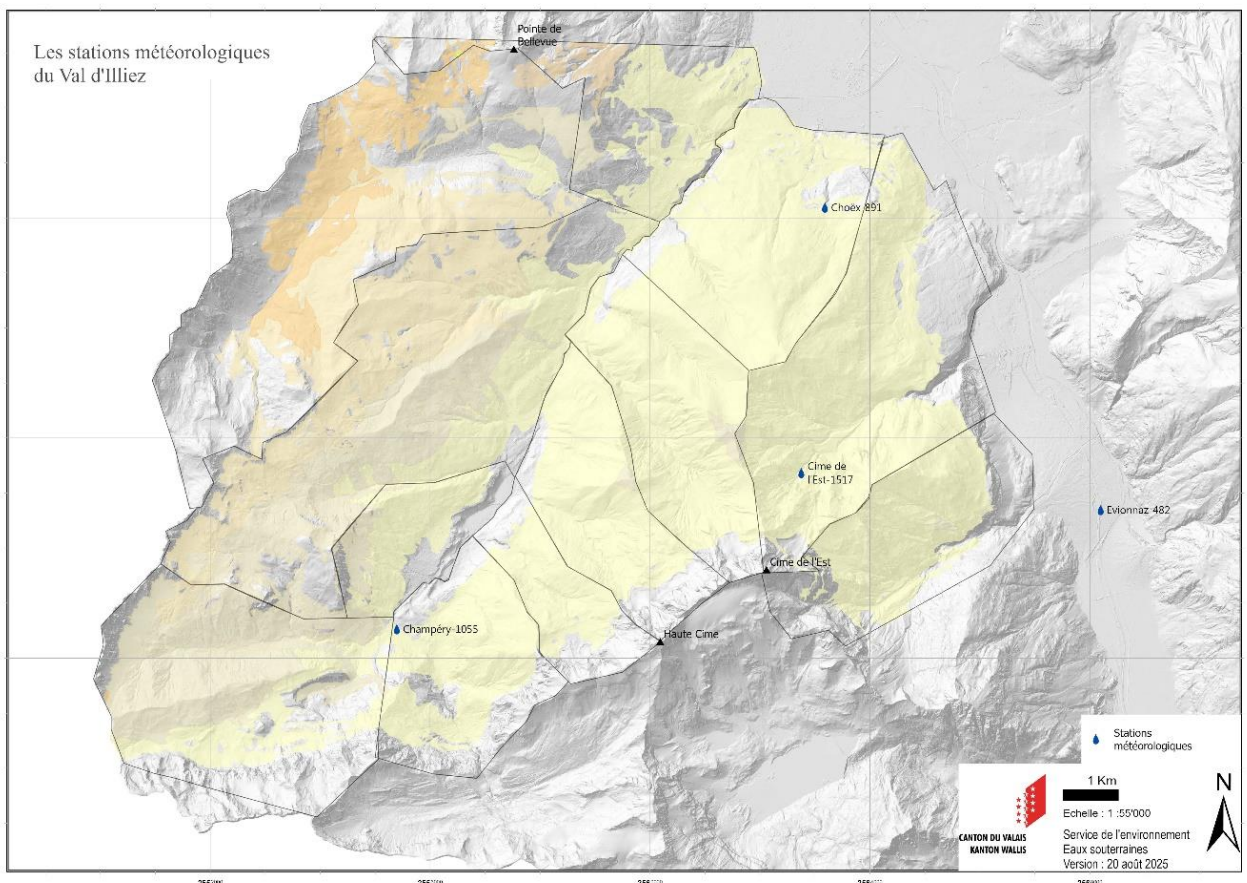


Figure 15: Localisation des différentes stations météorologiques avec leur altitude respective

RÉSULTATS :

Indice n°1 : Les résurgences

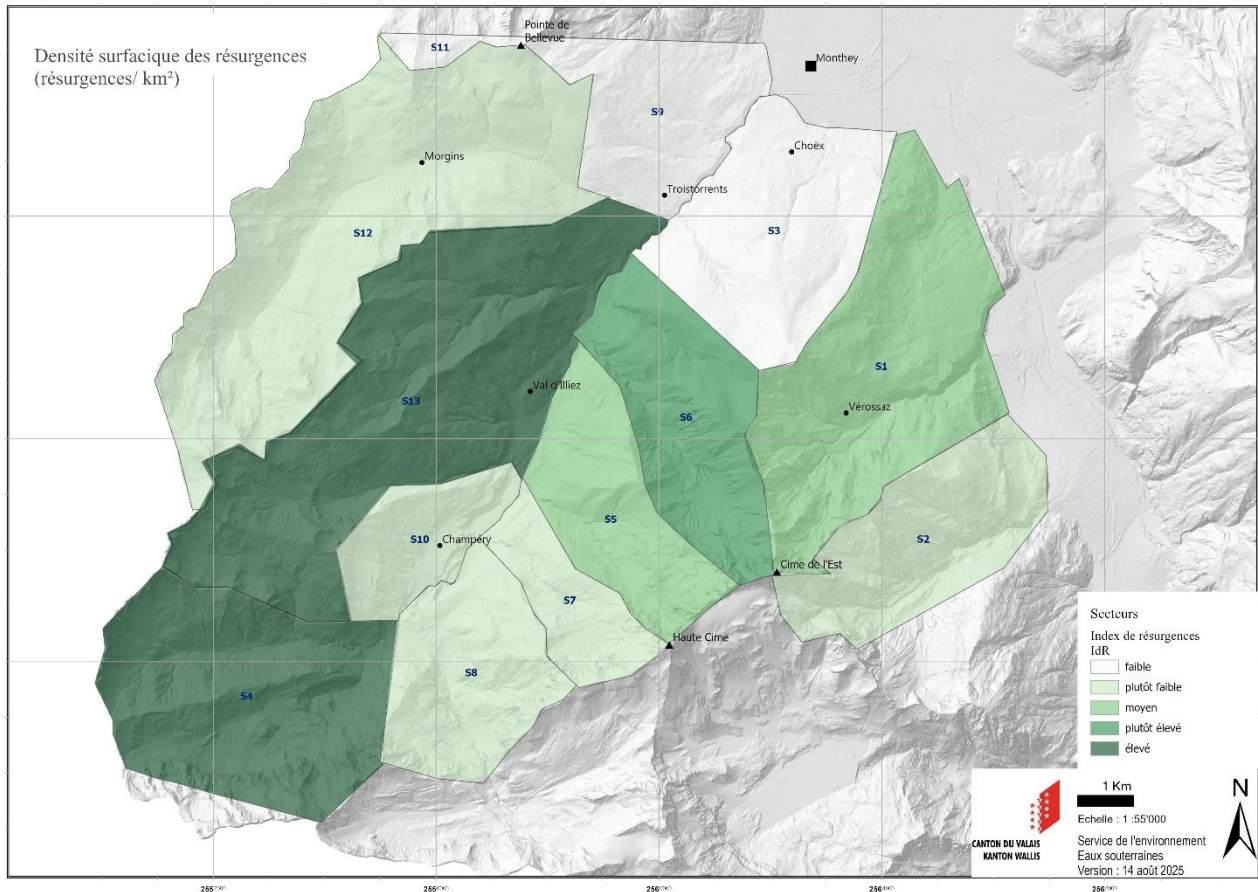


Figure 16: Les polygones classés selon leur index de résurgences (IdR)

Le premier indice est celui du nombre de résurgences par km² calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$IdR = \frac{\text{nombre de résurgences}}{\text{surface du polygone}}$$

Cette mesure permet d'obtenir une densité surfacique comparable entre les polygones, indépendamment de leur superficie. Les polygones en vert foncé présentent une forte concentration de résurgences, tandis que ceux en blanc en comptent peu [Fig.16].

Indice n°2 : Les accumulations de flux

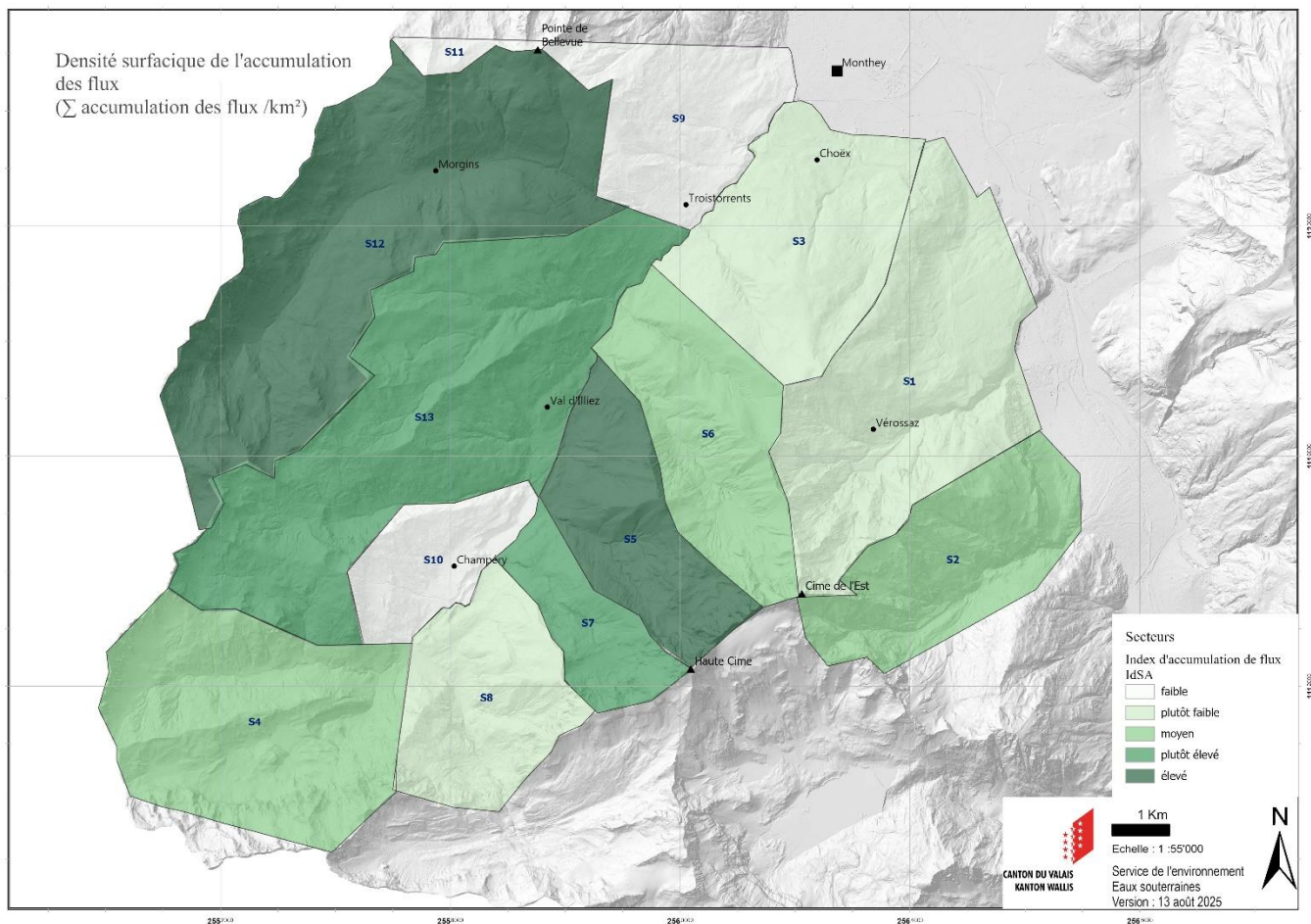


Figure 17: Les polygones classés selon l'index d'accumulation de flux (IdSA)

Le second indice (IdSA) correspond à la somme pondérée de l'accumulation des flux, c'est-à-dire au nombre de cellules amont dont l'écoulement converge vers chaque résurgence. Chaque polygone pouvant contenir plusieurs résurgences, et chacune recevant l'apport de nombreuses cellules amont, la somme pondérée des valeurs d'accumulation de flux a été calculée pour l'ensemble des résurgences présentes sur chaque polygone comme suit :

$$IdSA = \frac{\Sigma (\text{accumulation des cellules par résurgences})}{\text{surface du polygone}}$$

Les polygones, présentant une accumulation élevée, sont représentés en vert foncé, tandis que ceux avec une densité faible sont illustrés en blanc [Fig.17].

Indice n°3 : Les indicateurs hydrogéologiques

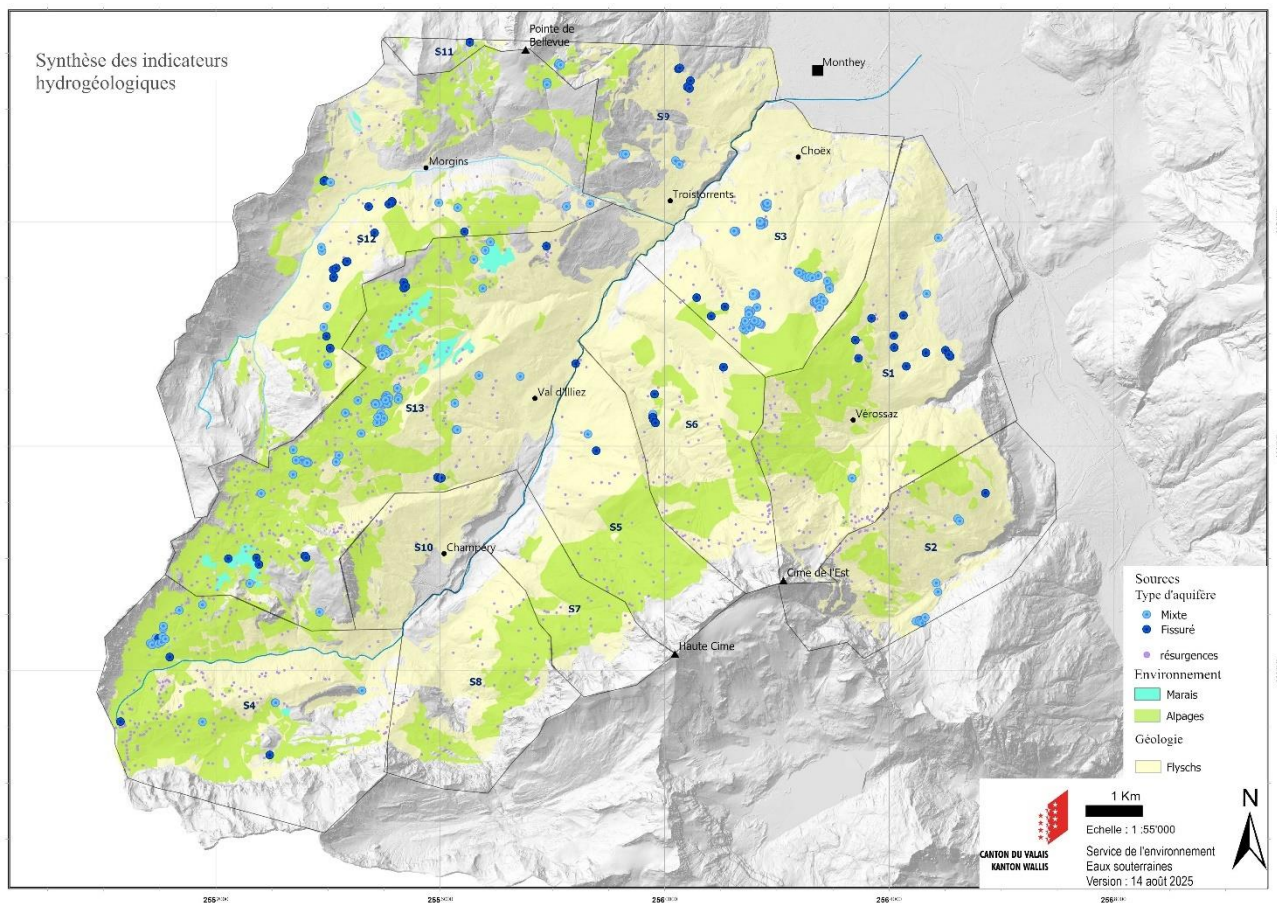


Figure 18: Répartition des indicateurs hydrogéologiques de surface

La carte [Fig. 18] présente plusieurs critères indiquant la présence d'eau souterraine, notamment les alpages, les marais, les résurgences ainsi que les sources captées de type fissuré et mixtes.

Les polygones les plus propices correspondent à une concentration de ces différents critères.

Les forages peuvent y être superposés, pour fournir un indicateur direct de la présence ou non d'eau souterraine. Les logs des forages ont été analysés pour identifier les flyschs secs [Fig.19] ou avec de l'eau [Fig.20].

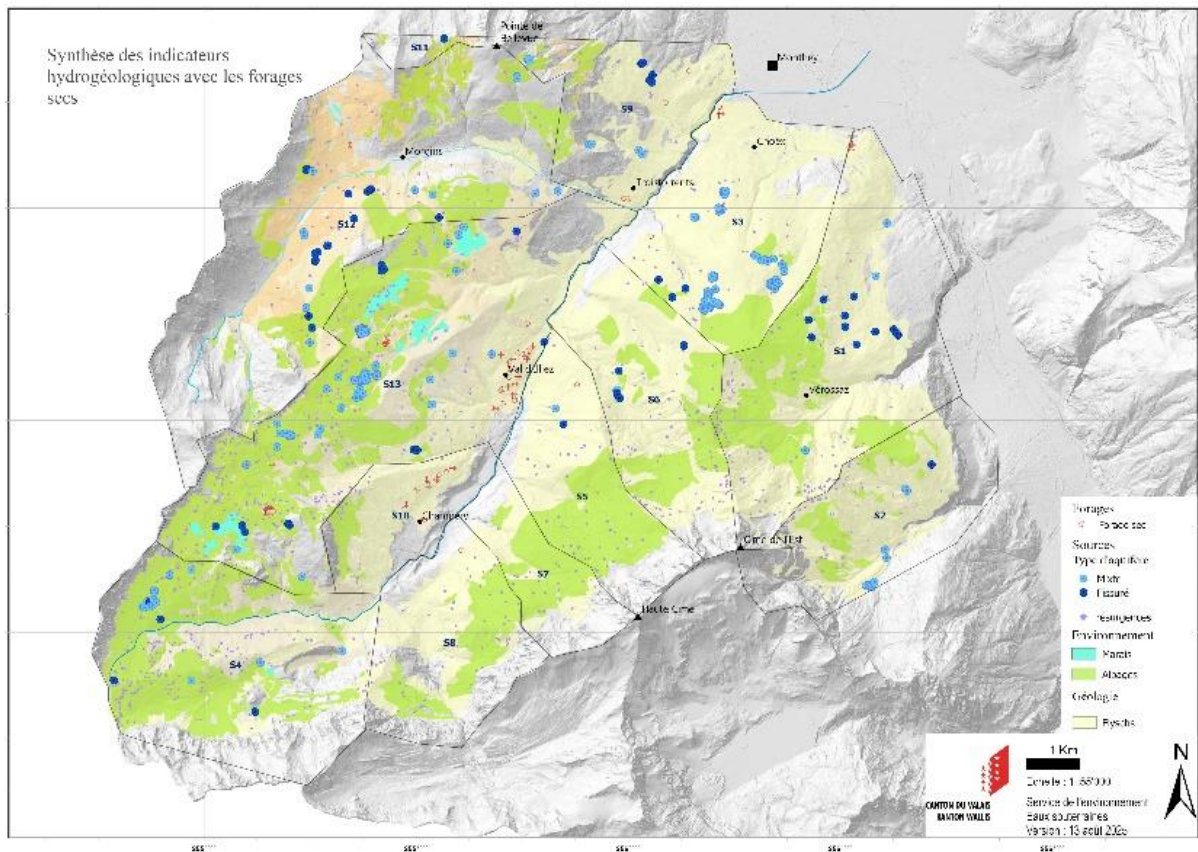


Figure 19: Répartition des indicateurs hydrogéologiques et forages secs supposés

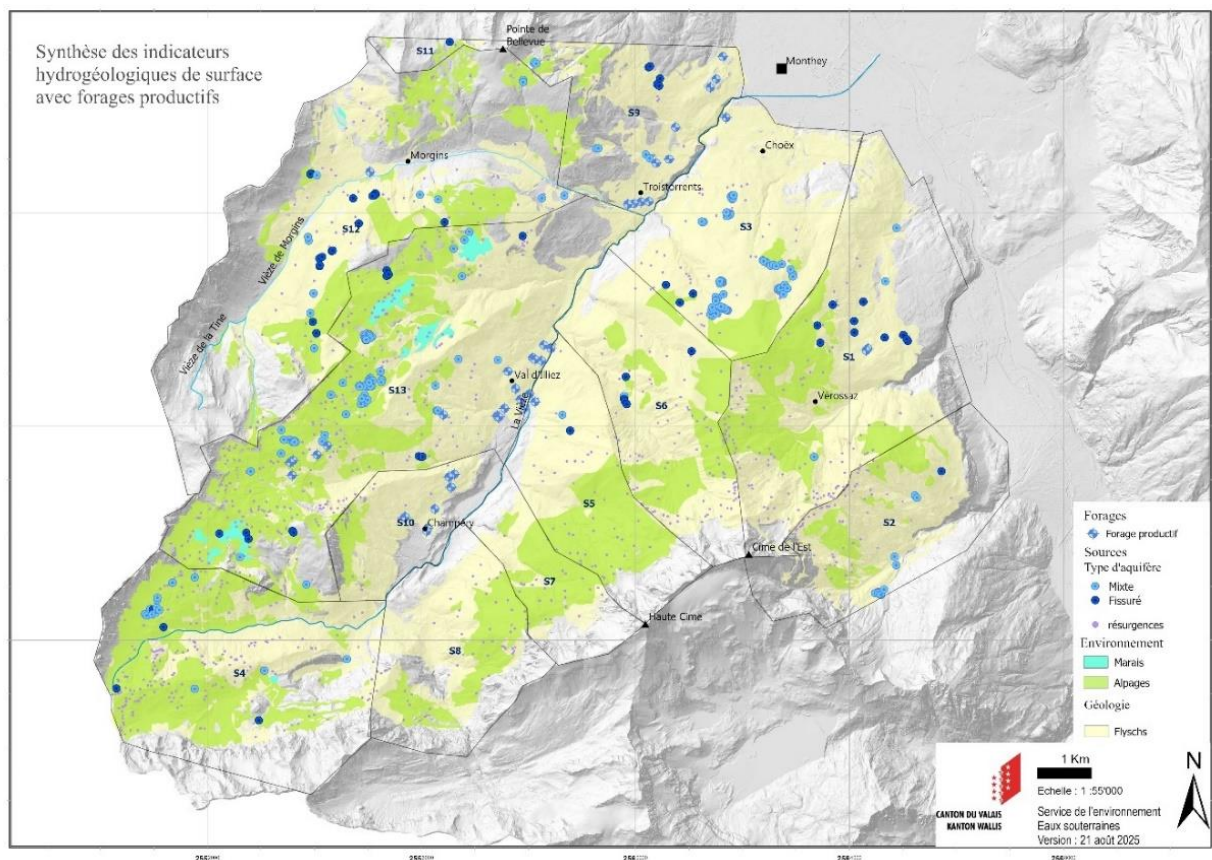


Figure 20: Répartition des indicateurs hydrogéologiques et forages productifs

Indice n°4 : Indice multicritère

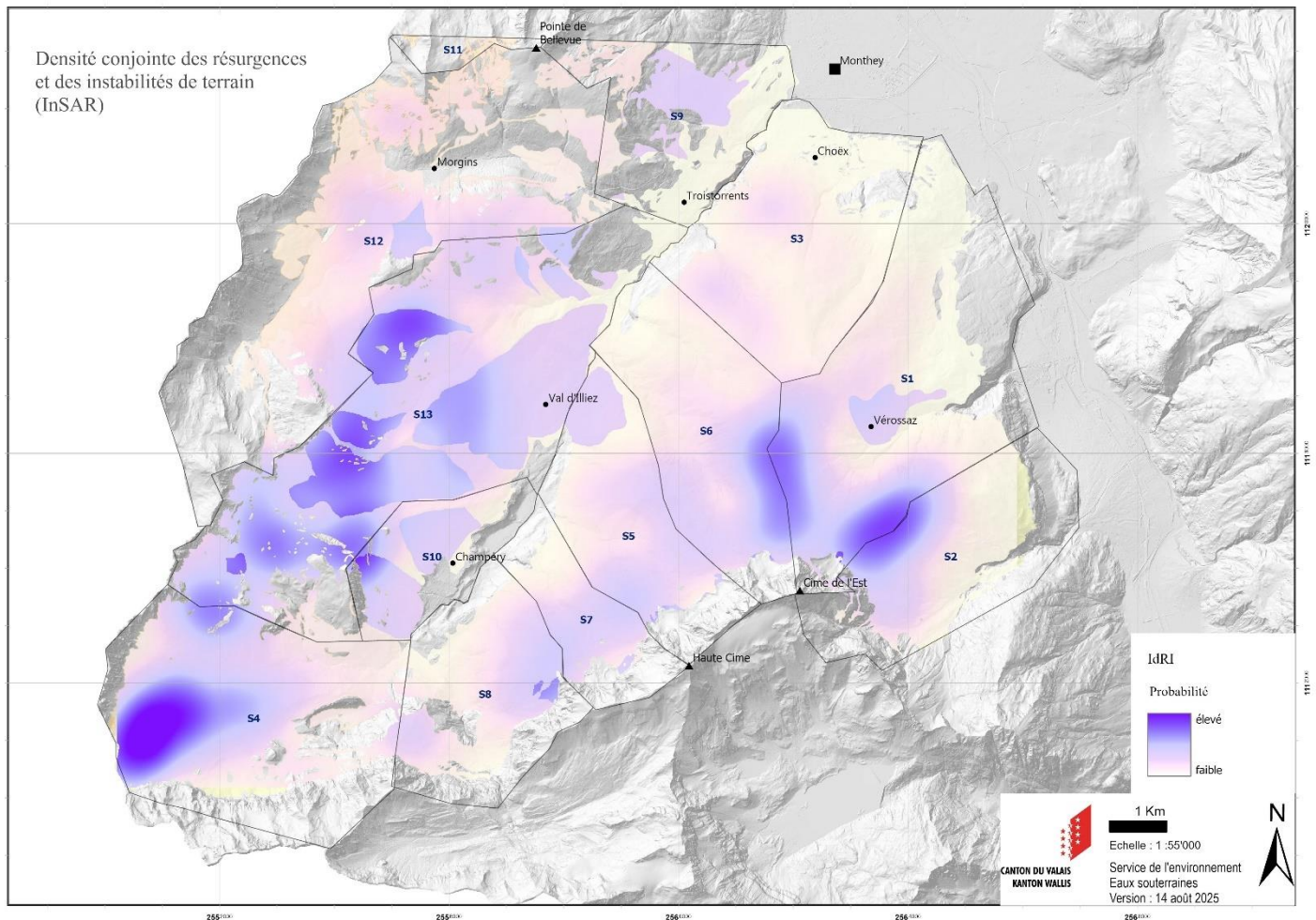


Figure 21: Indice multicritère entre les résurgences et les instabilités de terrain (InSAR)

Une approche multicritère est présentée sur la figure ci-dessus [Fig.21] basée sur les résurgences et les instabilités de terrain, qui constituent les seules données homogènes sur le territoire du Val d'Iliez.

L'outil *Kernel Density* a été utilisé pour générer un raster représentant des zones de densité autour des résurgences dans un rayon de recherche de 1 km, dont l'intensité varie en fonction du nombre de résurgences présentes (résolution : 10 m).

La couche des instabilités de terrain (InSAR) a été rastérisée avec l'outil *Polygone to Raster* (résolution : 10 m) puis reclassée en deux catégories :

- 0 lorsqu'aucune instabilité n'est détectée,
- 1 lorsqu'un mouvement de terrain est présent.

Les vitesses de déplacement ne sont pas prises en compte, car même les glissements lents constituent une information pertinente pour la localisation des potentiels aquifères.

Les deux couches ont été combinées à l'aide de la *calculatrice raster* selon la formule suivante :

$$\text{IdRI} = \left(\frac{\text{couche raster InSAR}}{1} * 70 \right) + \left(\frac{\text{couche raster résurgences}}{4} * 30 \right)$$

Une pondération 70/30 a été retenue, afin de renforcer l'influence des instabilités de terrain.

Une pondération 50/50 ne permettait pas de mettre suffisamment en avant cette variable.

Les zones les plus propices sont représentées en violet foncé.

Les précipitations :

L'analyse des précipitations annuelles [Fig.22] montre une forte hétérogénéité entre les quatre stations météorologiques. Champéry est la station qui enregistre les plus fortes précipitations sur la période étudiée. En effet, elle reçoit des cumuls annuels qui dépassent régulièrement 1400 mm/an. À l'inverse, Evionnaz est la station la plus sèche avec des valeurs qui descendent régulièrement sous 900 mm/an. La Cime de l'Est et Choëx présentent des valeurs intermédiaires relativement proches l'une de l'autre. L'ordre relatif des stations reste, par ailleurs, stable d'une année à l'autre. Certaines années apparaissent plus humides (2016, 2024) ou plus sèches (2015, 2022).

La distribution mensuelle des précipitations [Fig. 23] confirme cette hiérarchisation entre les stations. Ainsi, Champéry reste systématiquement plus humide et Evionnaz demeure la plus sèche.

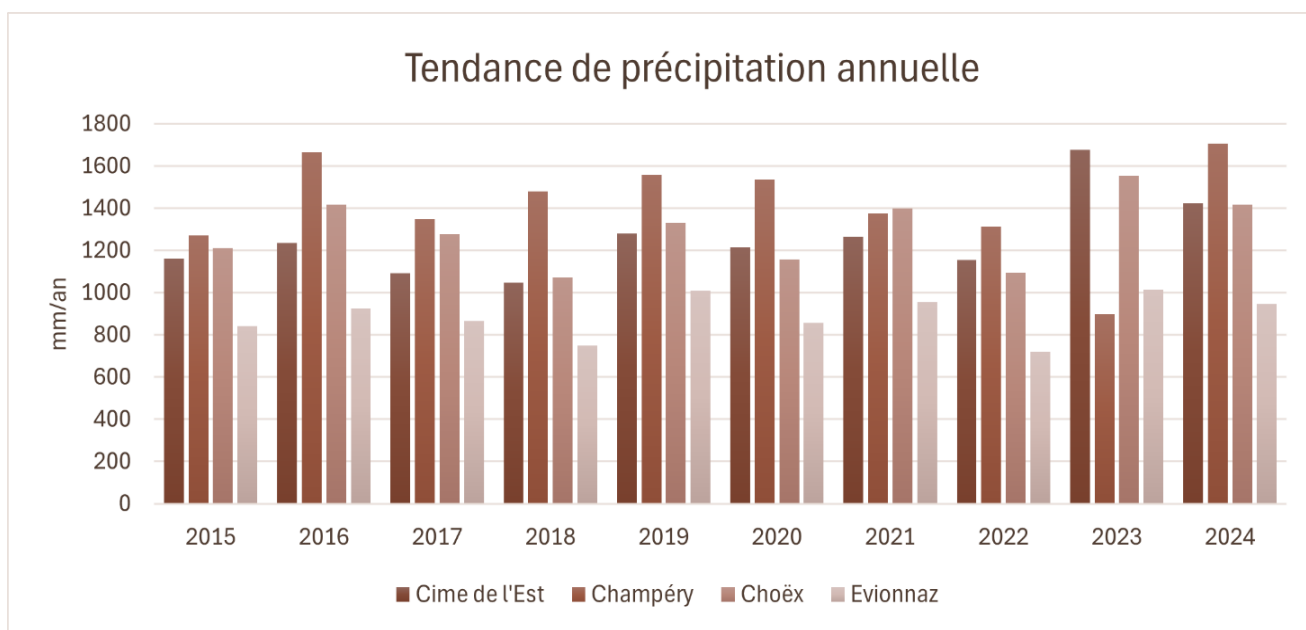


Figure 22: Histogramme de la pluviométrie annuelle sur quatre stations (MétéoSuisse, CREALP)

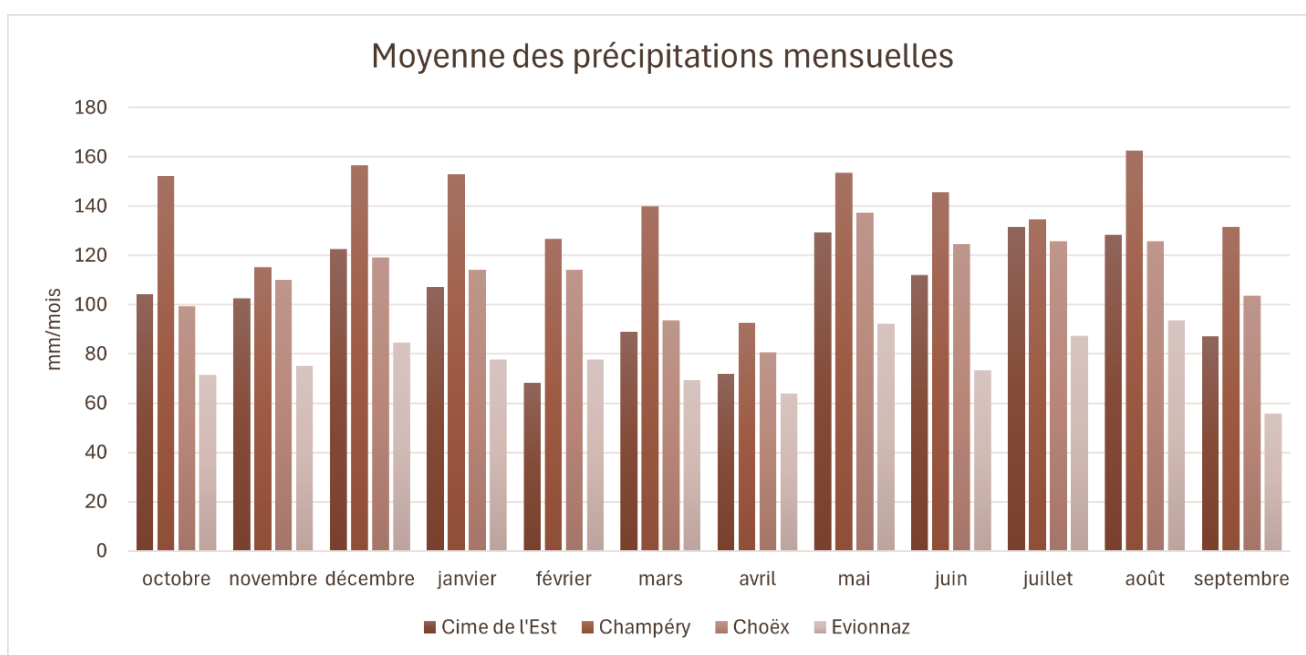


Figure 23: Histogramme de la pluviométrie mensuelle sur quatre stations (MétéoSuisse, CREALP)

DISCUSSION :

Indice n°1 : Les résurgences

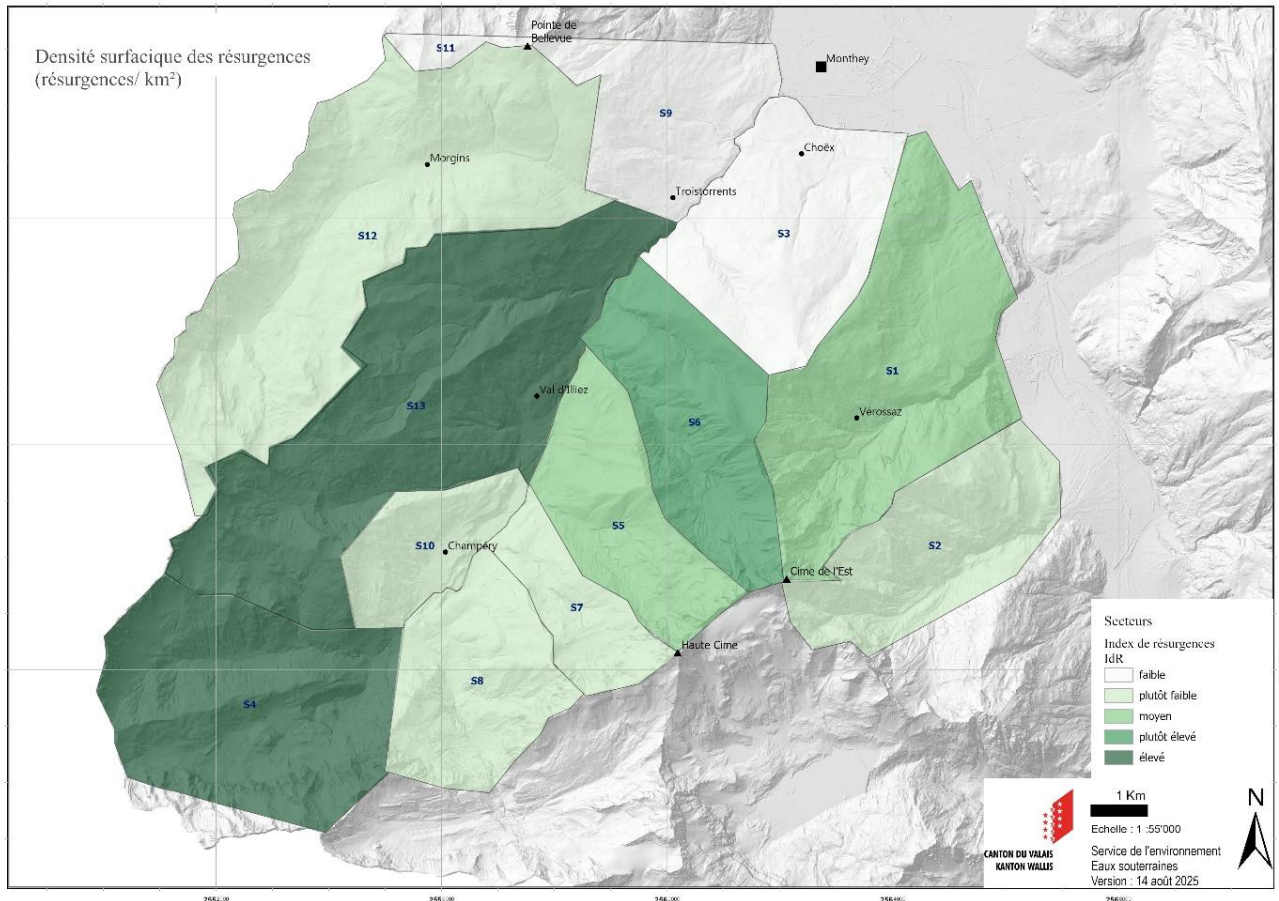


Figure 24: Carte de densité de résurgence (IdR) [Fig. 16]

La carte de densité de résurgence [Fig.24] illustre la variation du potentiel aquifère des flyschs du Val d'Illeze. Une concentration élevée de résurgence (zone vert foncé) pourrait suggérer une ressource en eau significative et potentiellement un aquifère fissuré en profondeur.

Les polygones S4 et S13 présentent les indices de résurgence (IdR) les plus élevés, ce qui indiquerait un potentiel aquifère fort. Le polygone S6 présente également un indice plutôt élevé, traduisant un potentiel aquifère intéressant, bien que non maximal. En revanche, les polygones S11, S9 et S3 se caractérisent par un IdR faible, peu propice à un aquifère significatif.

Bien que la figure 24 donne une idée du potentiel aquifère, l'indice de résurgences reste une mesure indirecte. Elle pourrait aussi bien indiquer la présence d'aquifères meubles superficiels que fissurés plus profond. L'hétérogénéité des polygones s'explique peut-être par la nature litée

des flyschs, avec des grès perméables et des argiles peu perméables, ainsi que la fracturation, dont la connectivité contrôle la circulation et l'émergence des eaux souterraines.

Indice n°2 : Les accumulations de flux

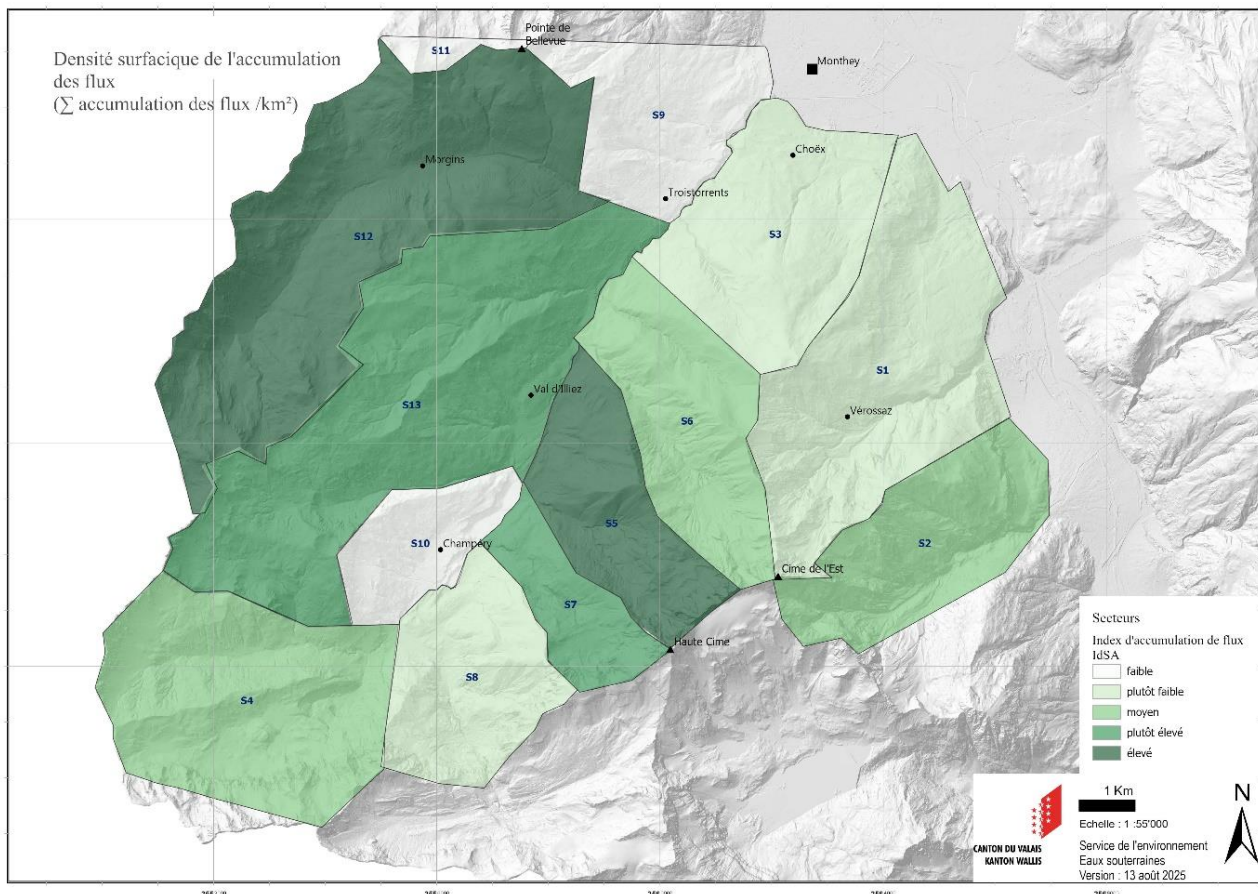


Figure 25: Carte de densité d'accumulation de flux (IdSA) [Fig.17]

La figure 25 illustre la distribution de l'IdSA, soit la somme d'accumulation des flux d'écoulement en amont des résurgences. Les polygones S11, S10 et S9 présentent des valeurs d'IdSA faibles (zones blanches), ce qui suggère des zones d'alimentation d'extension réduites et donc un potentiel aquifère limité.

À l'inverse, les polygones S5 et S12 présentent des valeurs d'IdSA élevées, indiquant que les résurgences sont alimentées par un plus grand nombre de cellules contributives. Les polygones S13 et S7 possèdent également un IdSA plutôt élevé. Lors d'épisode de précipitations ou de fonte nivale, ces polygones sont donc susceptibles de concentrer de plus importants volumes d'eau, traduisant un potentiel aquifère plus significatif.

Comme pour l'IdR, l'IdSA est un indicateur indirect, qui met en évidence un potentiel de stockage et de circulation d'eau souterraine en amont des résurgences. Cependant, l'eau peut avoir circulé aussi bien en milieu meuble que fissuré et rien ne permet d'indiquer si l'aquifère est exploitable ou pas.

Indice n° 3 : Les indicateurs hydrogéologiques

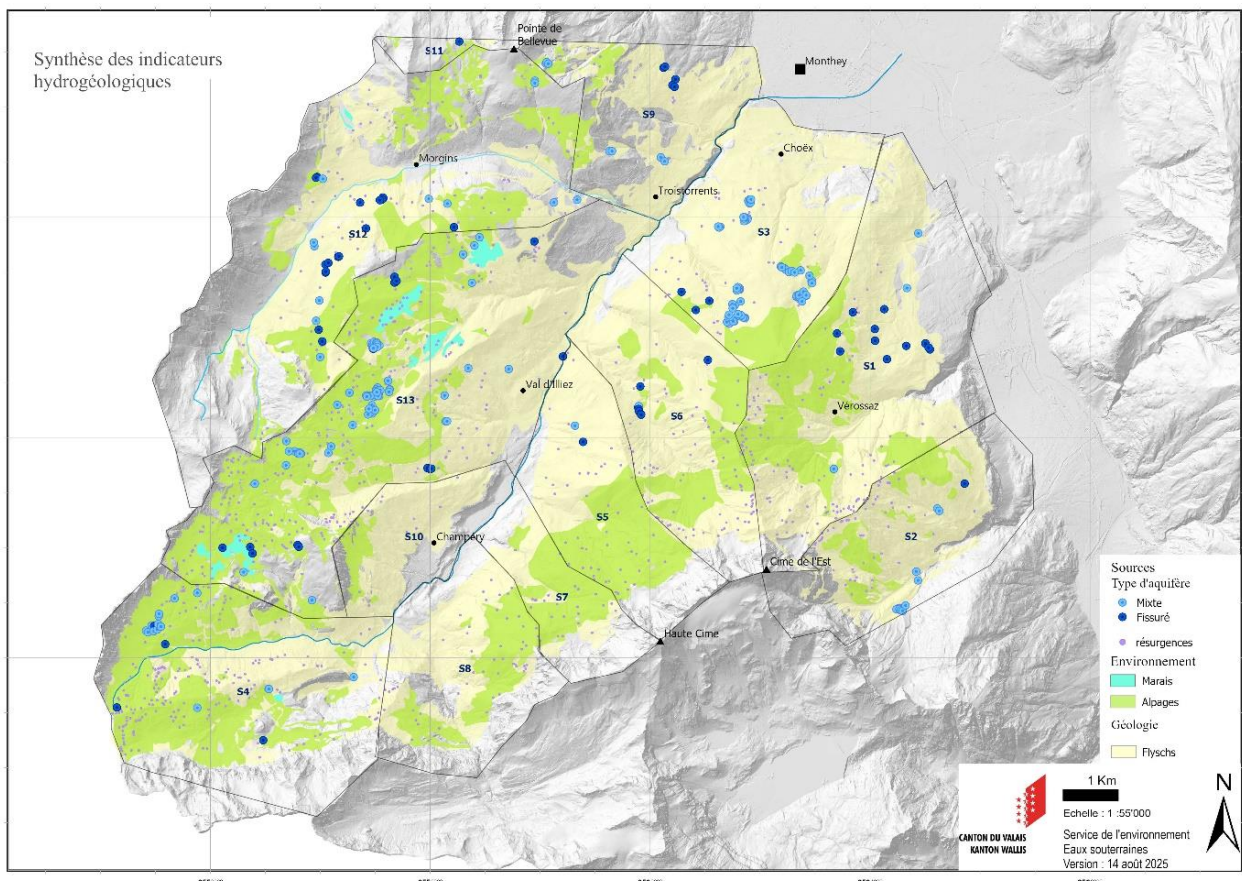


Figure 26: Carte de superposition des indicateurs hydrogéologiques [Fig.18]

La superposition des indicateurs hydrogéologiques constitue un outil pertinent pour identifier les zones préférentielles de stockage et de circulation des eaux souterraines dans les flyschs du Val d'Ille. Les principaux indicateurs utilisés sont les sources captées pour l'eau potable, les résurgences, les marais et les alpages, [Fig.26]. Les polygones S12 et S13 se caractérisent par une très forte densité de ces indicateurs, avec beaucoup de sources (aquifères mixtes ou fissurés).

Le polygone S1 est lui aussi d'un intérêt en raison d'une forte concentration de sources, la plupart décrite comme d'origine fissurée.

D'autres polygones sont pauvres en indicateurs, comme les polygones S7 et S8 sans sources captées d'origine fissurée. Cette absence ne doit, toutefois, pas être surinterprétée. En effet, la cartographie des sources n'est pas homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, car elles sont mieux décrites non loin des zones habitées ou dans des secteurs facilement accessibles.

La distribution spatiale des forages secs et productifs [Fig.27 ; 28] met en lumière une caractéristique importante et complexe des flyschs : leur hétérogénéité aussi bien lithologique qu'hydrogéologique. Des faciès productifs côtoient des faciès secs, ce qui est commun pour les milieux fissurés, comme les flyschs. Dans les polygones S10, S9 ou le bas du polygone S13, les forages secs sont localisés très proche des forages productifs, ce qui montre le caractère discontinu des aquifères fissurés.

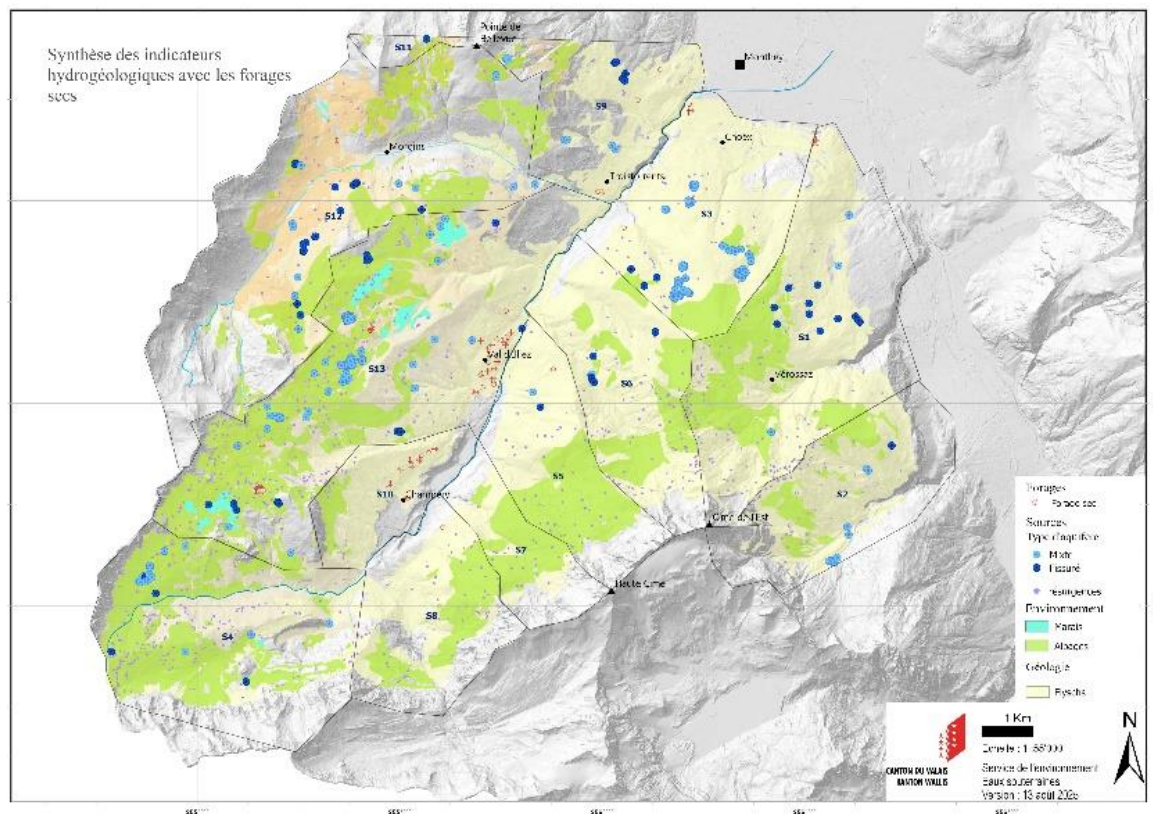


Figure 27: Carte d'indices hydrogéologiques avec les forages secs [Fig.19]

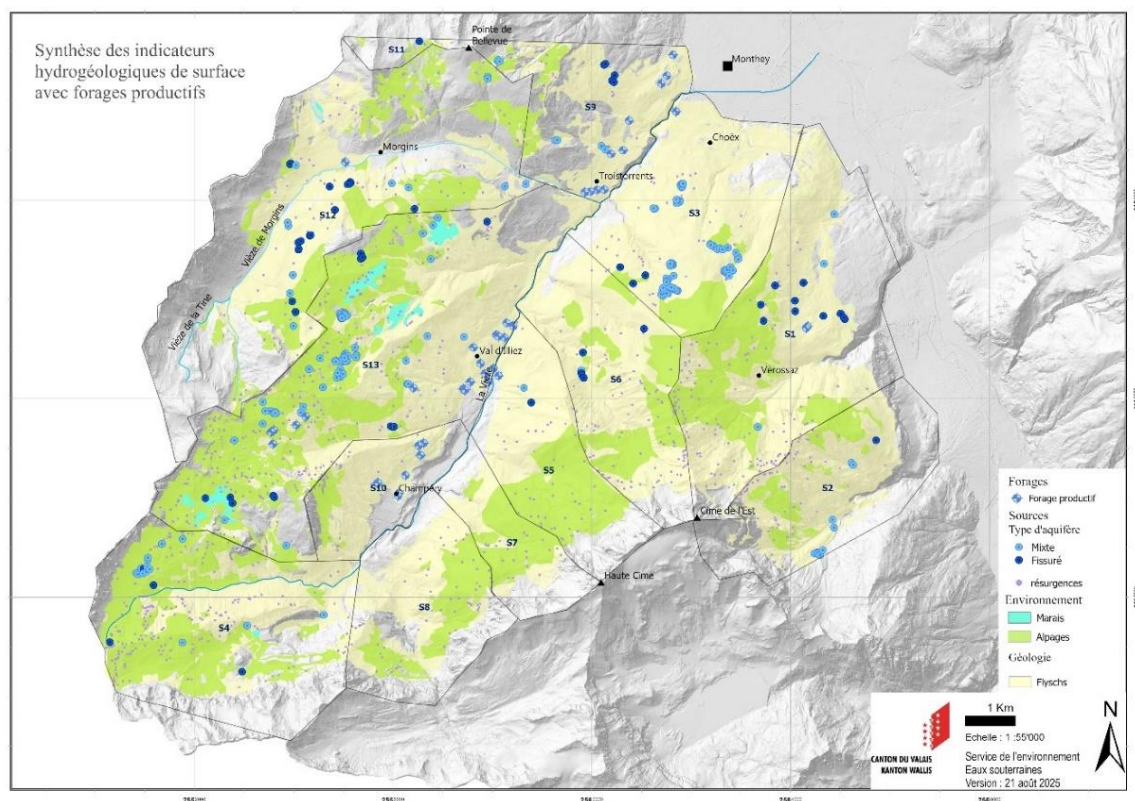


Figure 28: Carte des indices hydrogéologiques avec les forages productifs [Fig.20]

Indice n°4 : Indice multicritère

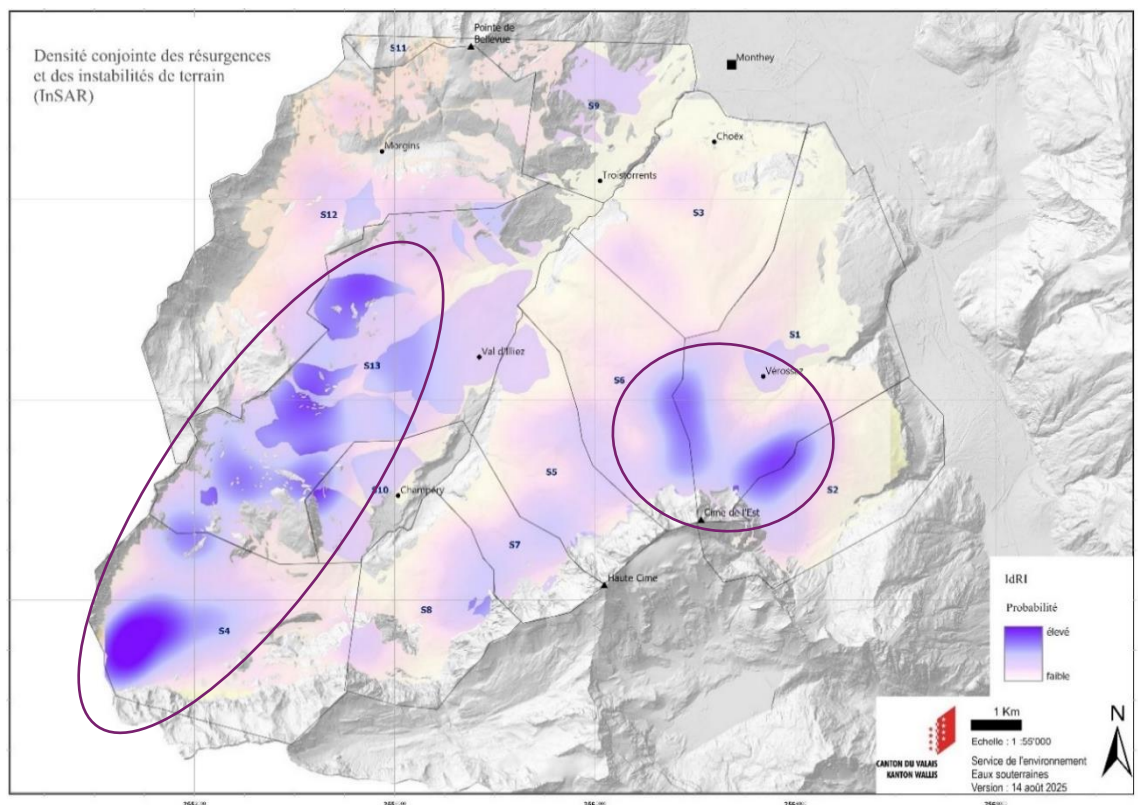


Figure 29: Indice multicritère – mise en évidence des zones propices [Fig.21]

Deux zones sont susceptibles d'être particulièrement favorables à la présence d'aquifères fissurés dans les flyschs. Ces deux zones, représentées en violet foncé, se caractérisent par une forte densité conjointe de résurgences et d'instabilités de terrain (InSAR) [Fig.29]. La première se situe entre les polygones S6, S1 et S2, tandis que la seconde correspond aux polygones S13 et S4.

La combinaison des deux paramètres retenus, c'est-à-dire les résurgences et les instabilités de terrain, constitue un indice pertinent, car elle permet d'évaluer l'ensemble du territoire du Val d'Ille avec des géodonnées spatialement homogène et sans biais. Ces deux paramètres ne sont pas limités aux zones habitées, agricoles et leurs alentours contrairement aux forages et aux sources d'eau potable.

Les précipitations :

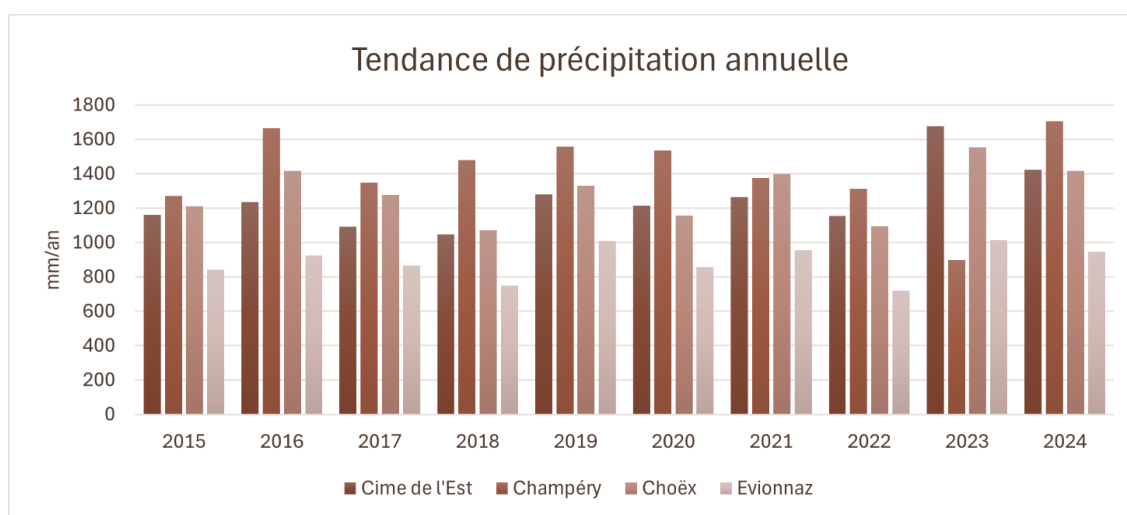


Figure 30: Histogramme de la pluviométrie annuelle sur quatre stations [Fig.22]

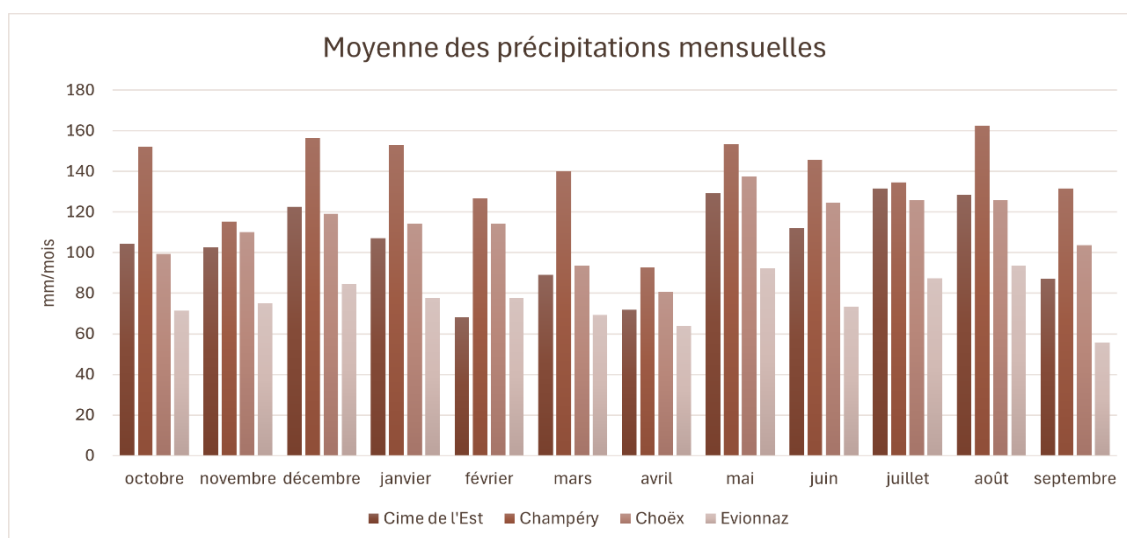


Figure 31: Histogramme de la pluviométrie mensuelle sur quatre stations [Fig.23]

Les histogrammes de précipitation [Fig.30 ; 31] mettent en évidence la quantité d'eau reçue dans différentes parties du Val d'Ille. Champéry enregistre, tant sur une année hydrologique que sur la période 2015-2024, des précipitations supérieures à celles des autres stations (Cime de l'Est, Choëx et Evionnaz). Située sur un versant exposé aux vents humides, Champéry est directement soumise à l'effet orographique, ce qui entraîne des précipitations plus élevées, (MétéoSuisse, 2025). Les polygones autour de Champéry bénéficient donc d'un apport en eau et en neige plus important, favorisant l'infiltration puis la recharge des aquifères.

Catégorisation des polygones :

Faible potentiel :

Les polygones S11, S8 et S7 apparaissent comme les moins favorables. Leur situation au pied des Dents du Midi (S8 et S7) ou en retrait (S11), zones peu accessibles et peu habitées, expliquerait l'absence d'indicateurs directs (forages et sources captées). Cette tendance est confirmée par une faible densité de résurgences [Fig.16] et une accumulation des flux plutôt limitée [Fig.17]. Leur potentiel est donc jugé faible à plutôt faible. Ces polygones pourraient être catégorisés en secteur üB.

Potentiel moyen :

Les polygones S5 et S6 présentent davantage de résurgences et une accumulation plus marquée des flux, mais leur position géographique similaire aux polygones à faible potentiel limite leur importance. L'existence d'aquifères localisés, comme le suggère de rares forages productifs et quelques sources fissurées, reste possible.

Les polygones S2 et S3, avec une densité plus importante de sources (souvent mixtes) et des résurgences liées à des instabilités, présentent un meilleur potentiel.

Enfin, les polygones S1, S9 et S10 se placeraient en potentiel moyen à plutôt élevé avec davantage d'indicateurs directs, mais les indices IdR [Fig.16] et IdSA [Fig.17] sont plutôt bas.

Fort potentiel :

Les polygones S13, S4 et S12 se caractérisent par une convergence d'indices favorables, soit une densité élevée de résurgences, une forte accumulation de flux, de nombreux marais et alpages (indicateurs indirects), ainsi que des terrains instables. À leur aval, la présence de

forages productifs et de multiples sources corrobore ces constats. Ces trois polygones se distinguent comme les zones les plus propices à contenir un aquifère fissuré dans les flyschs du Val d'Illiez, potentiellement exploitables. Ces polygones pourraient, par conséquent, être classées en secteur A_u fissuré.

Les polygones S13 et S4 sont les plus arrosés selon les relevés de précipitations. Cela signifie que la recharge des aquifères y est meilleure, [Fig. 21 ; 22]. Ces zones combinent à la fois un fort potentiel aquifère et un potentiel de recharge important.

CONCLUSION :

L'objectif de ce travail était d'évaluer le potentiel aquifère des flyschs du Val d'Illiez à l'aide d'une analyse spatiale et d'établir une méthodologie pour distinguer les zones à fort potentiel, futur secteur A_u fissuré, de celles à faible potentiel, futur $üB$. Pour ce faire, des géodonnées provenant du Service de l'environnement, du CREALP et de swisstopo ont été réunies. À partir de ces informations, des indices ont été élaborés afin de représenter les polygones les plus propices à receler des aquifères dans les flyschs.

L'analyse et combinaison de différents indices ont permis de catégoriser le potentiel aquifère de chaque polygone. De manière résumée, plus le nombre de paramètres favorables est élevé, plus le polygone est propice et peut renfermer des aquifères. La subdivision du Val d'Illiez a permis de réduire le nombre de zones potentiellement favorables à quelques polygones prioritaires. Ce sont ces derniers qui devraient faire l'objet d'investigations complémentaires, d'une protection accrue et d'une gestion durable des ressources en eau. Les autres polygones ne peuvent, toutefois, pas être mis à l'écart, même si la présence d'un aquifère y est moins probable, elle n'est pas impossible. La nature hétérogène des flyschs et de leurs aquifères en est la raison.

Divers biais ont été observés dans les données utilisées. Les relevés de terrain sont parfois lacunaires et/ou présentent des disparités d'une étude ou d'un bureau à l'autre. Ainsi, le débit et le type d'aquifère ne sont pas systématiquement mentionnés dans les rapports liés à la délimitation des zones de protection des eaux captées. Les forages et les sources sont des indicateurs spatialement hétérogènes. Leur répartition inégale induit un biais d'interprétation,

en particulier à l'écart des zones habitées, où l'absence de données rend l'évaluation du potentiel aquifère plus incertaine.

Malgré ces limites, l'étude et la méthodologie utilisée mettent en évidence des polygones prioritaires dans l'analyse du potentiel aquifère des flyschs. Ces polygones présentent une convergence d'indices directs et indirects suggérant la présence d'aquifères fissurés. Par conséquent, ils devraient constituer des ressources potentielles pour une exploitation de l'eau potable, in fine un secteur A_u. Des investigations de débit, notamment par sondages et relevés de terrain, restent nécessaires afin de mieux délimiter ce potentiel aquifère et de cartographier plus précisément les zones exploitables.

Enfin, la géodatabase ainsi que les cartes produites dans le cadre de ce travail serviront de socle de connaissances pour des études futures au sein du Service de l'environnement du canton du Valais.

BIBLIOGRAPHIE :

Site internet :

Service de l'Environnement (SEN), canton du Valais. *Protection de l'environnement- informations officielles* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.vs.ch/web/sen> (consulté en mai 2025)

Swisstopo, Office fédéral de topographie. *Cartes topographiques de la Suisse* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://map.geo.admin.ch> (consulté en mai 2025)

Strati.ch. *Lexique lithostratigraphique de la Suisse* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.strati.ch> (consulté en mai 2025)

Météosuisse - Office fédéral de météorologie et climatologie *Open Data, Service et publications* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.meteosuisse.admin.ch/services-et-publications/service/open-data.html> (consulté en juillet 2025)

SDANA – Service des dangers naturels *La carte de dangers géologiques* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.vs.ch/web/sdana/chutes-de-pierres-et-de-blocs-éboulements> (consulté en juillet 2025)

OFEV - Office fédéral de l'environnement *Informations officielles* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home.html/> (consulté en août 2025)

Région Dents du Midi *Informations officielles* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.regiondentsdumidi.ch/de/5831027-val-d-illiez-tour-42622/> (consulté en août 2025)

CREALP - Centre de recherche sur l'environnement alpin *Guardaval* [En ligne]. 2025. Disponible sur : <https://www.crealp.ch/guardaval/> (consulté en octobre 2025)

Documentations :

Castany G. (1979) Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Université de Dunond.

Channell J. E. T. and Horváth F. (1976) The African/Adriatic promontory as a palaeogeographical premise for alpine orogeny and plate movements in the Carpatho-Balkan region. *Tectonophysics* **35**, 71–101.

Darcy H. (1856) Les fontaines publiques de la ville de Dijon : Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau : Ouvrage terminé

par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume. .

- Eardley A. J. and White M. G. (1947) FLYSCH AND MOLASSE. *Geol. Soc. Am. Bull.* **58**, 979.
- Fetter C. W. (2014) Applied Hydrogeology. .
- Ford D. and Williams P. (2007) Karst hydrogeology and geomorphology. *Choice Rev. Online* **45**, 45-3808-45–3808.
- Handy M. R., M. Schmid S., Bousquet R., Kissling E. and Bernoulli D. (2010) Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological–geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *Earth-Sci. Rev.* **102**, 121–158.
- Herwegh M., Berger A., Glotzbach C., Wangenheim C., Mock S., Wehrens P., Baumberger R., Egli D. and Kissling E. (2020) Late stages of continent-continent collision: Timing, kinematic evolution, and exhumation of the Northern rim (Aar Massif) of the Alps. *Earth-Sci. Rev.* **200**, 102959.
- Homewood P. and Lateltin O. (1988) Classic swiss clastics (flysch and molasse) The alpine connection. *Geodin. Acta* **2**, 1–11.
- Jinghwa Hsu K. (1960) PALEOCURRENT STRUCTURES AND PALEOGEOGRAPHY OF THE ULTRAHELVETIC FLYSCH BASINS, SWITZERLAND. *Geol. Soc. Am. Bull.* **71**, 577.
- Leblanc P. (1986) Structure et hydrodynamique des milieux fissurés aquifères : Synthèse bibliographique / Ph. Leblanc ; Bureau de recherches géologiques et minières, Service Géologique National, Département Eau.
- Mutti E., Bernoulli D., Lucchi F. R. and Tinterri R. (2009) Turbidites and turbidity currents from Alpine 'flysch' to the exploration of continental margins. *Sedimentology* **56**, 267–318.
- OFEFP (2004) Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines.
- Philip W. Choquette (2), Lloyd C. P (1970) Geologic Nomenclature and Classification of Porosity in Sedimentary Carbonates. *AAPG Bull.* **54**.
- Singhal B. B. S. and Gupta R. P. (2010) *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks.*, Springer Netherlands, Dordrecht.
- Trümpy R. (1960) PALEOTECTONIC EVOLUTION OF THE CENTRAL AND WESTERN ALPS. *Geol. Soc. Am. Bull.* **71**, 843.

