

PROJET MIROIR :

Note synthétique sur les actions du volet hydrogéologique



Note synthétique sur la partie Hydrogéologie du projet MIROIR

Préambule

Le projet MIROIR ne prévoyait pas un examen approfondi de la thématique hydrogéologique en raison des nombreuses incertitudes existantes initialement, tant en amont (géologie) qu'en aval (déformation et cinématique), et des actions menées en parallèle par d'autres acteurs (OMIV¹ sur le site du Pas de l'Ours). Cette note constitue donc un éclairage préliminaire, engageant des moyens et actions limités, à partir desquels il restera possible, par la suite, d'engager des actions plus ciblées si jugées nécessaires au regard des résultats et interrogations apportées par le projet MIROIR.

Il s'agissait avant tout de faire quelques campagnes saisonnières de mesures physico-chimiques des eaux (Hautes Eaux et Basses Eaux) dans les versants à proximité voire directement au sein des zones de glissement.

En début de projet, compte tenu du contexte hydrogéologique du glissement du Pas de l'Ours et surtout de la découverte de nombreuses pertes (matérialisées par de nets entonnoirs de sous tirage), certaines récentes, en tête du glissement, il y a été engagé en sus et de manière impromptue un essai de multi traçage hydrogéologique. Sur le même site, une sonde multi-paramètres a été déployée sur un an sur une des rares sources quasi pérennes et située +/- proche en amont du glissement. Enfin, un sondage piézométrique est venu s'ajouter durant l'été 2022, avec les premiers résultats de fluctuations piézométriques relevées en fin 2022.

À noter aussi sur l'Arly, les investigations géophysiques menées par l'ADRGT sur le glissement de Montgombert dans le cadre du projet MIROIR en vue de caractériser la saturation relative des terrains à l'origine des départs de coulées de boue arrivant en fond de gorges au niveau de la RD1212.

L'ensemble de ces résultats est présenté par site.

¹ Pour cette note spécifique hydrogéologique, l'OMIV est représenté, sur ce site du Queyras, par Catherine Bertrand de l'Université de Franche-Comté à Besançon.

Guil

Après l'annulation de la visite prévue à l'automne 2020 liée au COVID19, le site du glissement du Pas de l'Ours a été finalement découvert début mai 2021 dans un état de saturation du versant en surface déjà très bas alors que les parties hautes de versant restaient encore enneigées et en cours de fonte.

Campagnes physicochimiques et mesures complémentaires associées

Dans le périmètre même du glissement de terrain, aucun point d'émergence d'eau de surface n'a été repéré. On notera par ailleurs que même avant, l'OMIV n'avait pas davantage repéré en période d'immédiate post-fonte nivale de points de sources même temporaires dans le glissement, ni en 2017 et ni en 2019. L'ensemble des points d'eau accessibles sont tous situés en périphérie du glissement.

Par contre, dans le périmètre du glissement (figure 1), ce sont de très nombreux entonnoirs de soutirage, présents en tête de glissement, qui témoignent d'entrées préférentielles d'eaux de ruissellement, s'infiltrant directement dans le versant et contribuant à la saturation des terrains et sans doute à la lubrification +/- directe des surfaces de glissements (rupture de cisaillement). Plus bas, dans différents pans basculés en légère contrepente, avec stagnation des eaux dans des linéaments endoréiques, une longue fissuration +/- ouverte témoigne de l'infiltration préférentielle des eaux piégées.

La plupart de ces pertes (entonnoirs ou fissures) sont anciennes et ont été en partie sinon en totalité recouvertes de branchages +/- entrecroisés pour réduire le risque de chute des animaux sauvages de passage dans le versant. Quelques défauts ici ou là dans la protection par branchages (bascules dans le cratère, ou ouverture) laissent penser à une possible dégradation, aggravation plus récente (liées aux événements de 2017- 2018 ou survenues plus tard) de ces entonnoirs ou fissures (écartement accru ou évasement latéral). Deux entonnoirs, au moins, semblent plus récents, l'un dans des formations possiblement morainiques au-dessus du paléo-glissement (apparition entre les photo-aériennes de l'IGN 2013 et 2018), l'autre en bordure d'un secteur sommital en cours d'évolution manifeste, récente et constatée entre avril 2021 et novembre 2022.

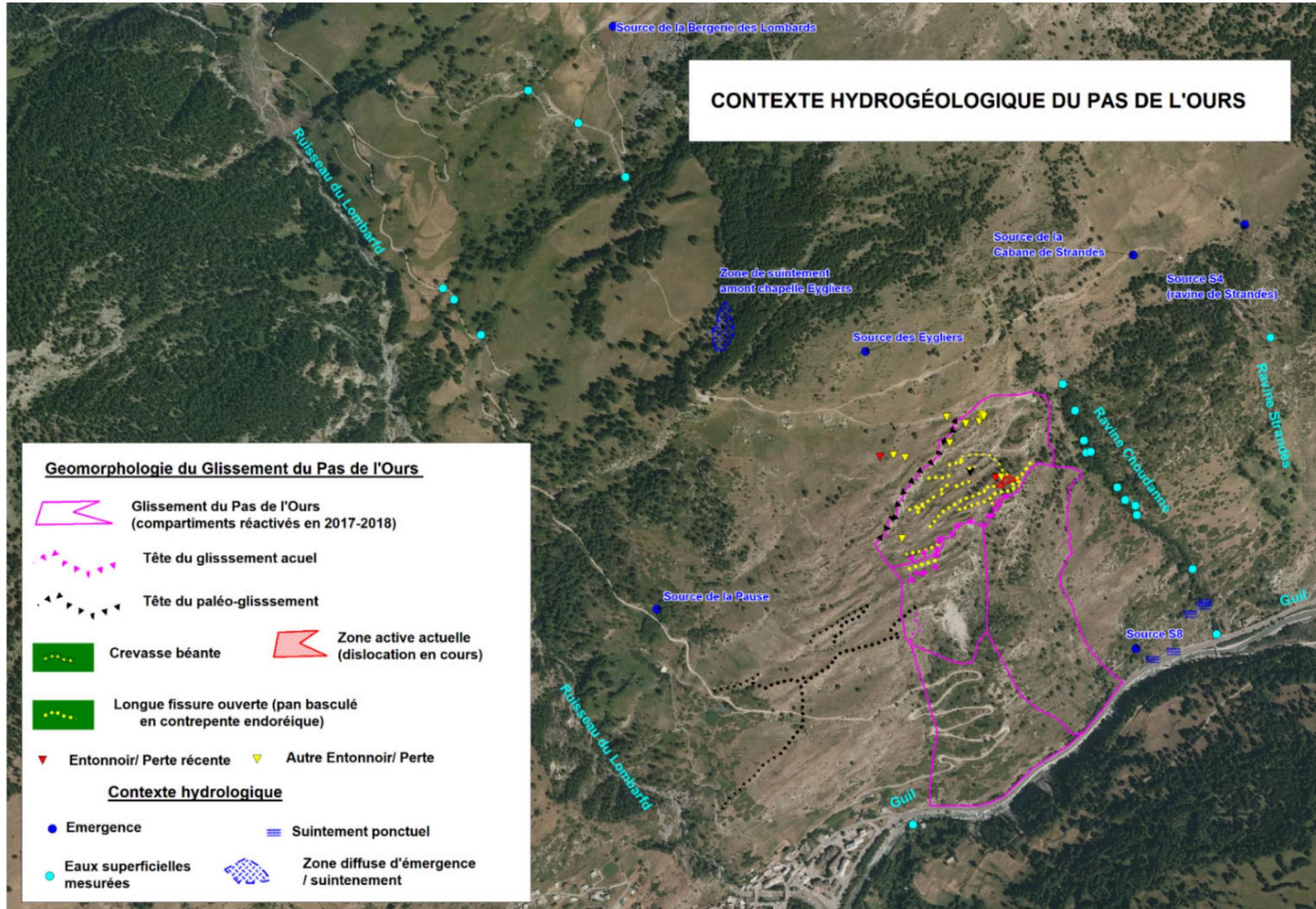


FIGURE 1 : contexte hydrogéologique général du glissement du Pas de l'Ours

Pour la première campagne de prélèvement d'eaux pour mesures physicochimiques (figure 2), il a d'abord été fait une visite de terrain préparatoire, cette dernière ayant elle-même bénéficiée des résultats de campagnes réalisées en sortie d'hiver par l'OMIV en 2017 et 2019.

La visite de terrain préparatoire a eu lieu en début mai 2021. Elle a permis notamment d'identifier, par rapport aux précédentes campagnes de l'OMIV, quelques nouvelles sources périphériques (Eyglies, Bergerie des Lombards, La Pause...).

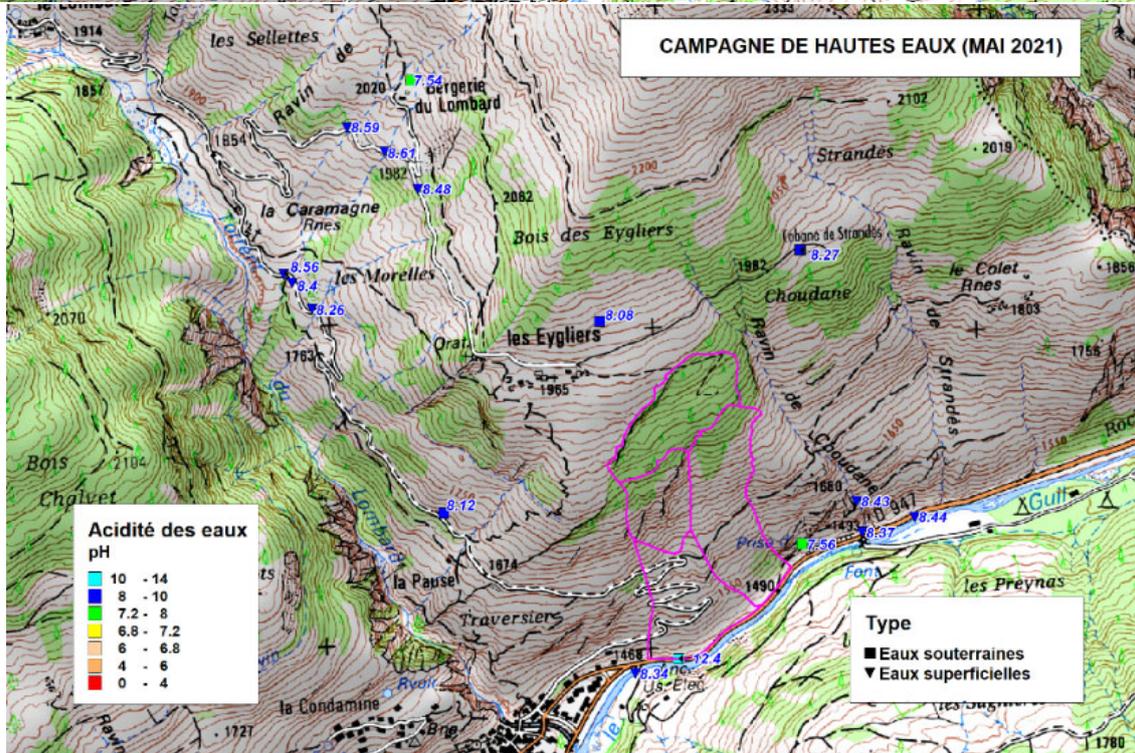
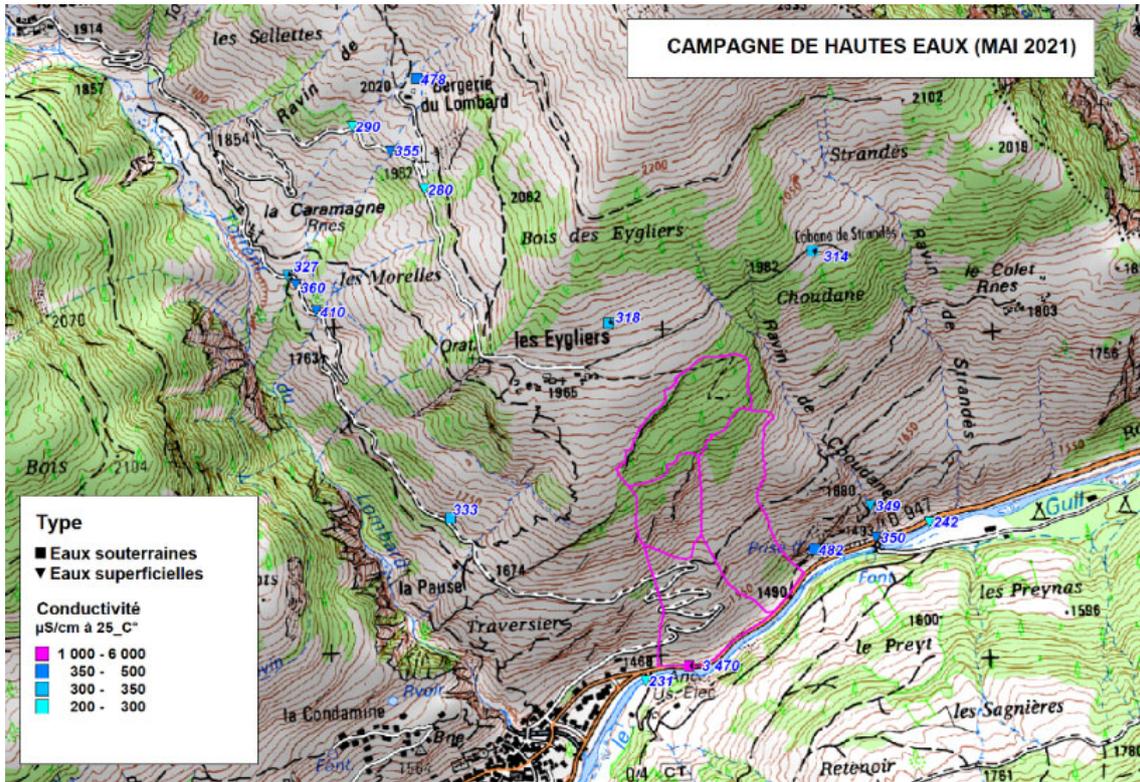
Des mesures physicochimiques de terrain et en laboratoire ont été réalisées sur les différentes zones d'écoulements d'eaux souterraines (les 5 sources + 1 forage inclinomètre situé en fond de vallée du Guil) ainsi que sur plusieurs cours d'eaux de surface (ravines, ruisseaux et rivière comme le Guil), pour 10 points en tout.

À l'exception du forage inclinométrique², les mesures physicochimiques de terrain sont peu contrastées et montrent des eaux relativement homogènes, légèrement basiques (pH de 7,54 à 8,6), et des valeurs de conductivité entre 280 et 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tout à fait normales pour des eaux de montagne. Dans une période de fonte nivale toujours en cours, les températures étaient relativement chaudes, entre 5,5 et 8,9 °C.

Entre eaux souterraines et eaux superficielles en contexte de tête de bassin versant, on note quelques décalages, mais de moindre ampleur que ceux observés ailleurs : eaux souterraines plus conductrices, moins basiques, et de potentiel Redox semblables.

Ces résultats restent très proches (Figure 3) des valeurs déjà mesurées à la même période de fonte nivale en 2019 par l'OMIV pour les sources comparables ainsi que pour les eaux superficielles mesurées en 2017, et où aucune hétérogénéité marquée n'avait été particulièrement relevée.

² Une conductivité de 3 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et au pH bien basique de 12 témoignent d'eaux anthropisées, *a priori* piégées (une telle dégradation de la qualité des eaux reste d'origine inconnue : lors de la foration ? après ?).



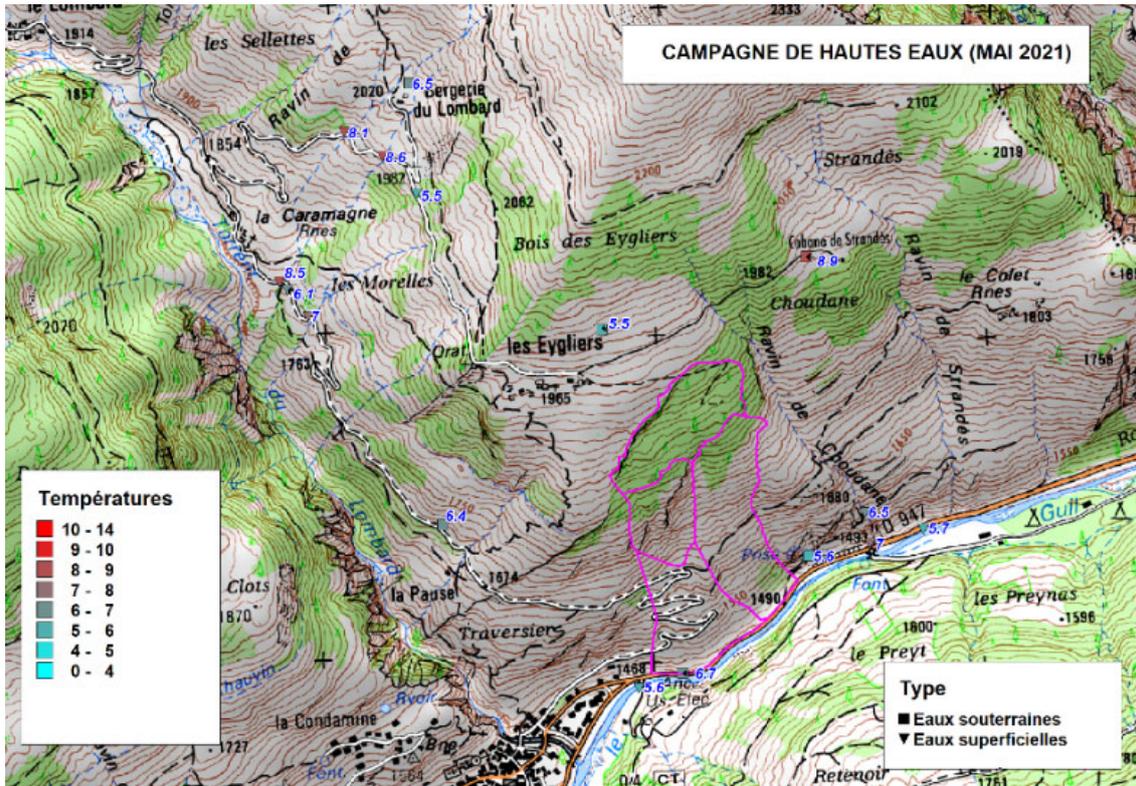


FIGURE 2 : Mesures physicochimiques en mai 2021, en contexte annuel dit de Hautes Eaux

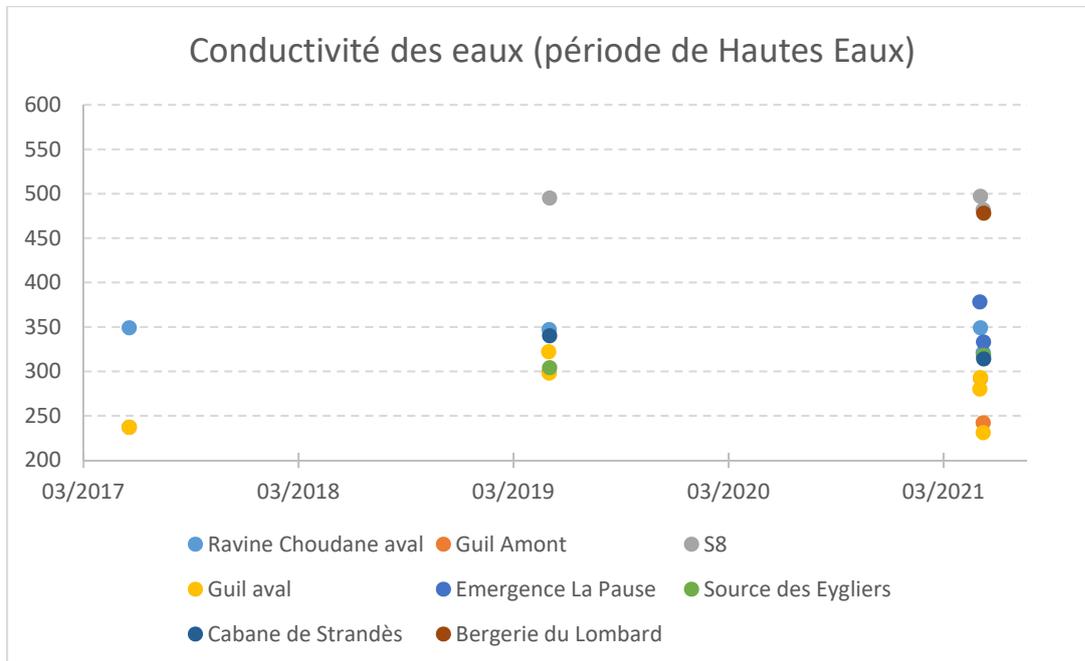


FIGURE 3 : mesures de conductivité des eaux (sources et superficielles), en période de Hautes Eaux, juste après la fonte nivale en 2017, 2019 (résultats OMIV) et 2021 (ce projet)

Les mesures ont été ensuite réalisées lors de la campagne, dite de Basses Eaux, réalisée à la mi-octobre 2021 dans des conditions d'étiage bien plus sévères, mesures faites uniquement (Figure 4) sur les seuls points de prélèvements (Figure 5) pour analyses des eaux (à savoir 5 sources et 3 mesures en rivière/ravine). On ne note cependant, guère de changements, à part une hausse attendue mais généralement limitée de la conductivité.

Il n'y a guère que la Source des Eyglies, alors sans doute proche de son assèchement où la hausse est sensible (elle rebaissera bientôt assez significativement lors des premières neiges 2022 comme cela est observé lors d'une nouvelle mesure de début Novembre, cf. Figure 4).

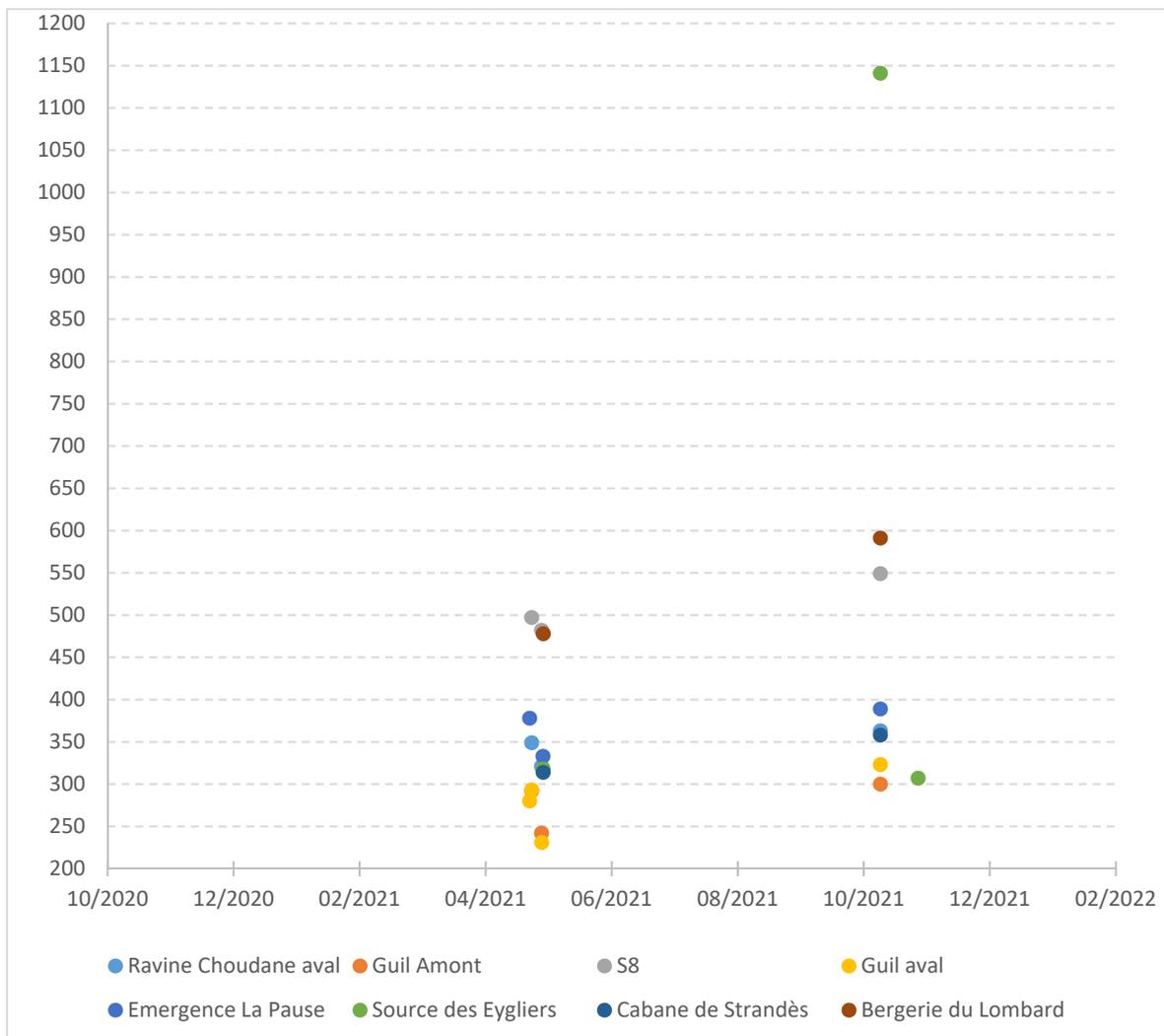
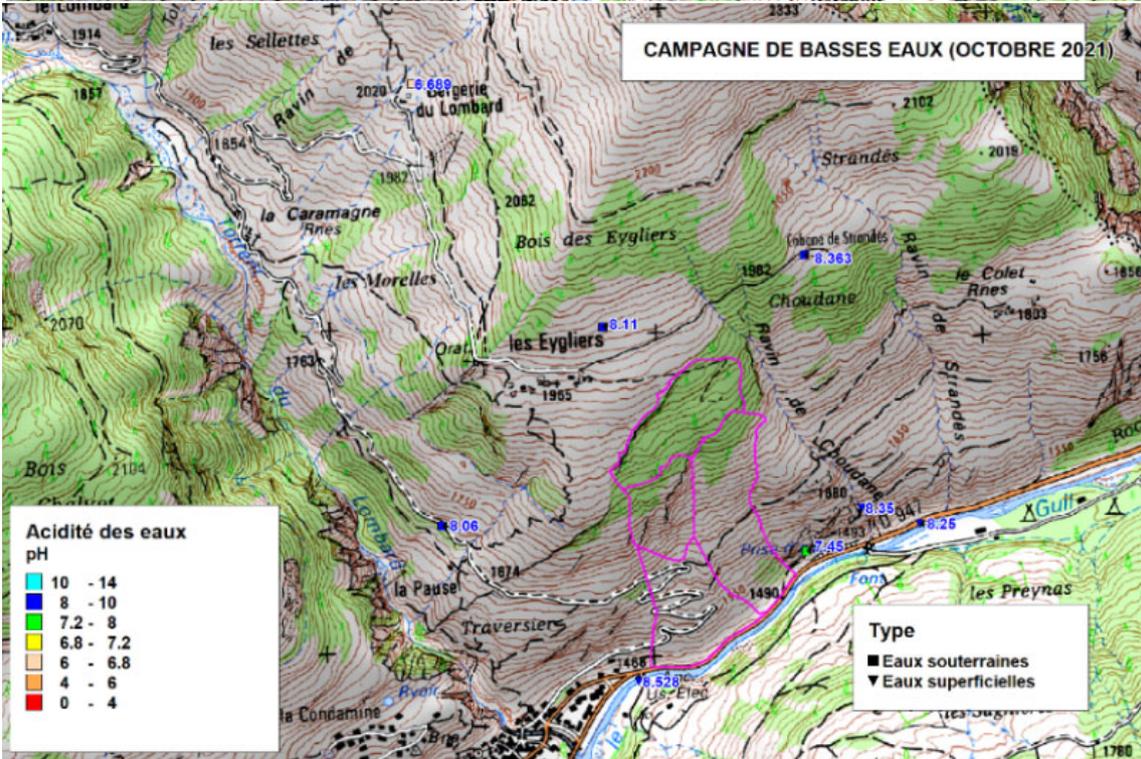
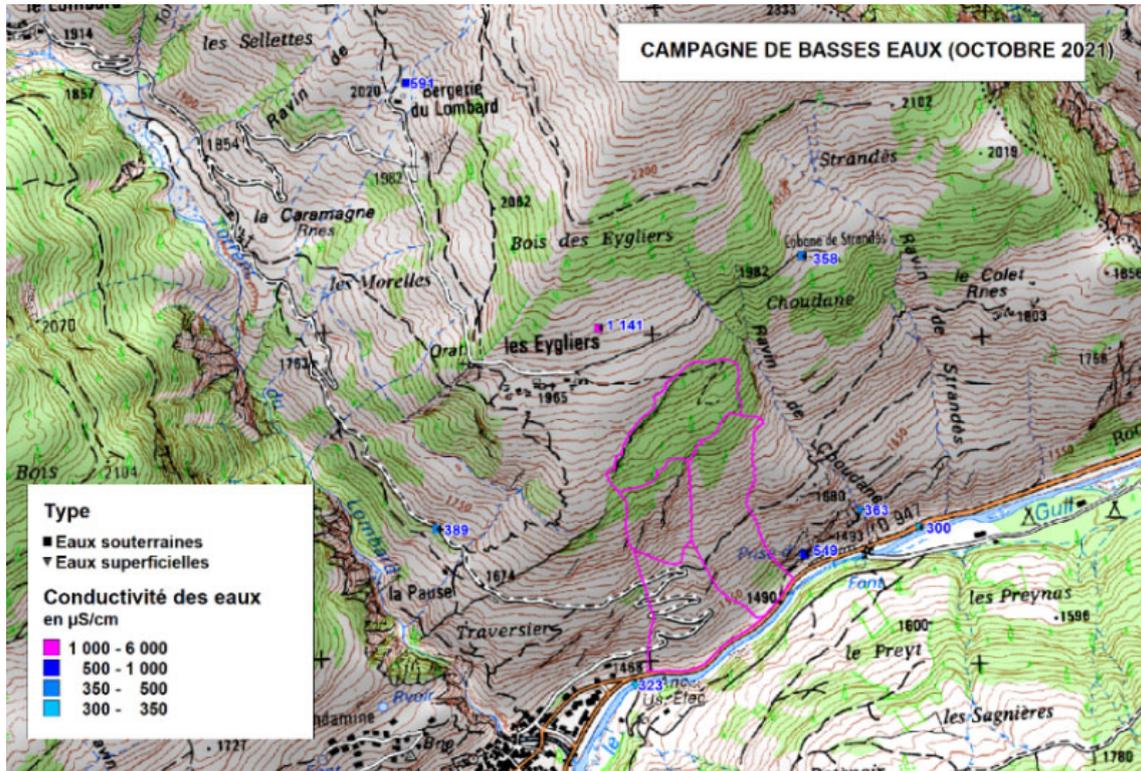


FIGURE 4 : mesures de conductivité des eaux (sources et superficielles) en période de HE (mai 2021), BE (octobre 2021) et juste après les premières neiges (pour la source des Eyglies) en novembre.



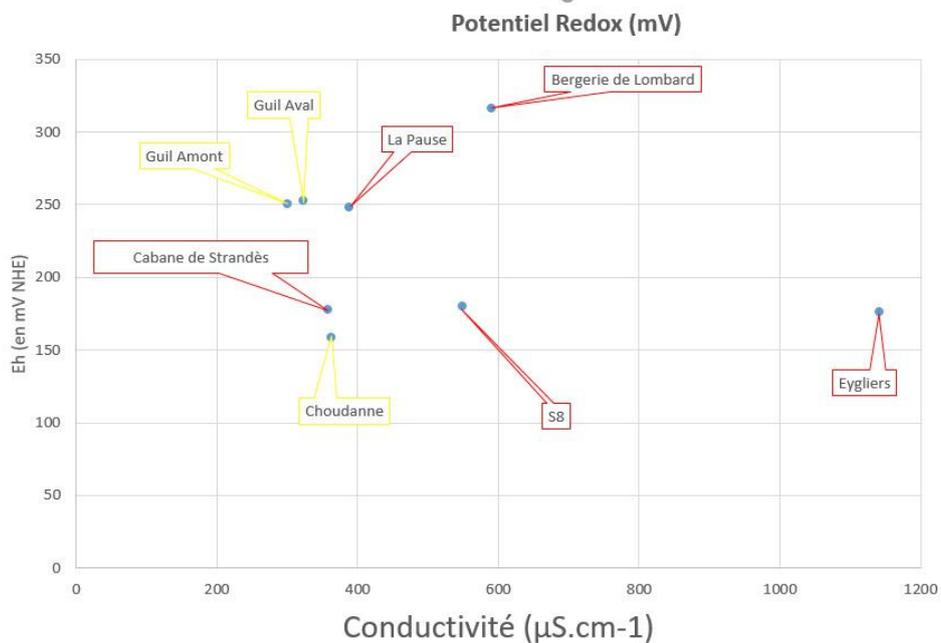
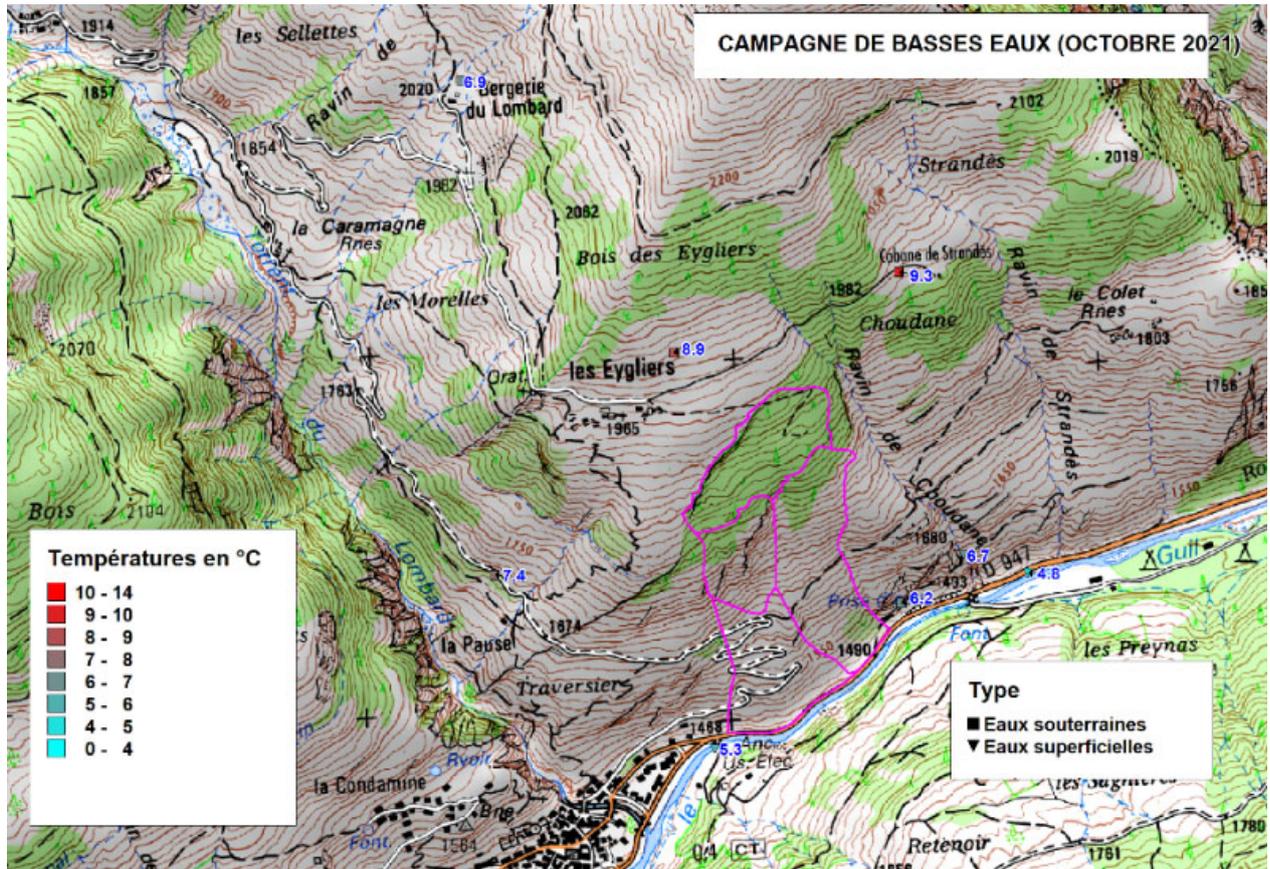


FIGURE 5 : Mesures physicochimiques en octobre 2021, en contexte annuel dit de Basses Eaux

Campagne de prélèvements pour détermination du chimisme des eaux

Les mesures faites en 2017 et 2019 par l'OMIV ont concerné principalement les ions majeurs (y compris, en sus, les ions phosphates, bromures et fluorures), la silice, et quelques éléments chimiques moins courants, le strontium et le lithium.

Les points échantillonnés tout autour du glissement proprement dit concernaient autant des sources (S2, S3, S4, S8) que des eaux superficielles des ravines ou du Guil.

Les analyses faites (figure 6) montraient des eaux peu contrastées chimiquement entre elles, de type bicarbonaté calcique, avec des teneurs particulièrement pauvres en Na, K, NO₃ et Cl.

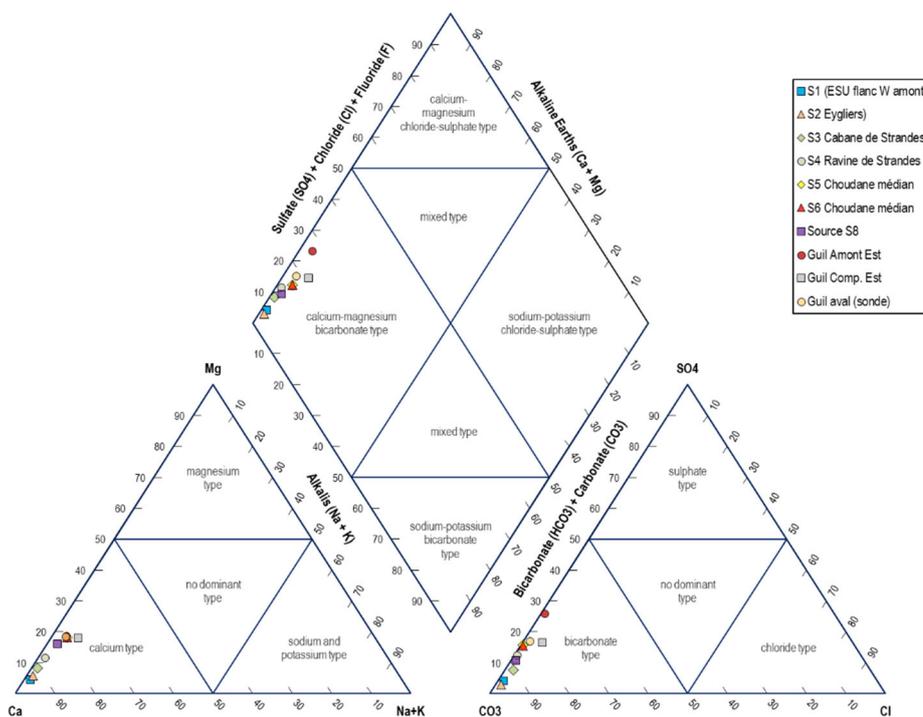


FIGURE 6 : Diagramme de Piper pour les mesures 2019 faites précédemment par l'OMIV

L'OMIV observe également que la teneur en strontium est très corrélée à la teneur en silice (pôle complémentaire au pôle calcaire) et la teneur en lithium est très corrélée aux ions chlorures et hydrogencarbonates.

Pour les analyses faites dans le cadre du projet MIROIR, il a été proposé de faire les mêmes mesures, et en ajoutant les teneurs en fer et aluminium. Il a été conservé les mesures en lithium et en strontium quoique pas systématiquement sur tous les points (mesures optionnelles).

Notons que ces analyses ont été menées sur des eaux brutes (non filtrées).

Pour les 8 points de la première campagne, campagne Hautes Eaux de mai 2021, il a été obtenu des résultats très similaires à ceux faits par l'OMIV en mai 2019 (Figure 7).

Nom du Prélèvement	Type	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO3	SO4	Al	Fe (Fer)	Li	Silicium	Sr
		(Bicarbonate)	(Calcium)	(Magnésium)	(Sodium)	(Potassium)	(Chlore)	(nitrates)	(Sulfates)	(Aluminium)		(Lithium)		(Strontium)
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l
GUIL Amont	ESUP	152.7	45	4.8	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	17	217	360	2.9	1.52	271
Ruisseau Ravine Choudane	ESUP	183.1	57	8.1	2.2	1.7	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	24	171	301	5.7	2.854	686
Source S8	ESOU	268.4	88	11	1.9	1.6	1	< 0.5 (LQ)	40	22	15	5.2	2.347	560
GUIL Aval	ESUP	132.7	44	4.7	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	17	482	640	3.3	1.867	275
Source La Pause	ESOU	160.1	62	7.7	1.1	1.7	< 1 (LQ)	0.85	50	3	3	4.2	1.881	456
Source des Eyglies	ESOU	205.8	67	2.2	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.86	3	6	5	1.4	1.453	311
Source Cabane de Strandès	ESOU	206.1	70	3.5	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.75	12	9	7	1	1.195	270
Source Bergerie du Lombard	ESOU	260.8	90	10	< 1 (LQ)	1.4	< 1 (LQ)	1.6	44	< 2 (LQ)	< 1 (LQ)	4.7	1.685	459

FIGURE 7 : Teneurs chimiques mesurées sur les eaux échantillonnées lors de la campagne de mai - 2021 en contexte annuel dit de Hautes Eaux

Parmi les rares éléments nouveaux mesurés, le fer et l'aluminium ne sont significativement présents que dans les eaux de surface à cette campagne de Hautes Eaux et ils sont corrélés entre eux.

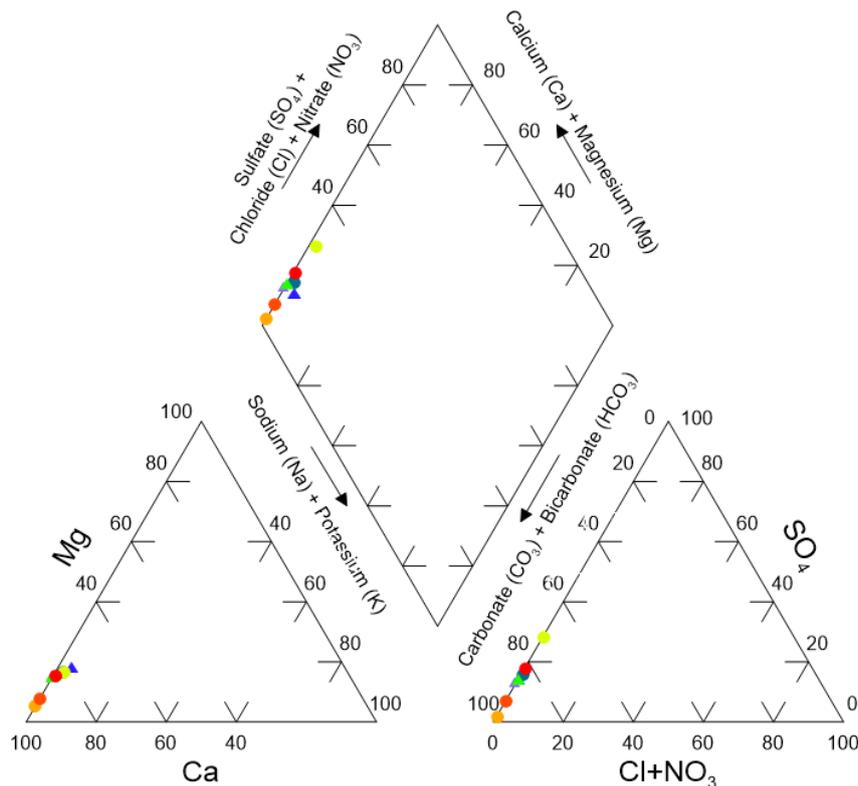
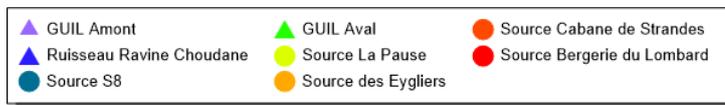


FIGURE 8 : Diagramme de Piper pour les mesures faites en Hautes Eaux en mai 2021

L'analyse ACP (Analyse en Composantes Principales) réalisée sur les analyses de Hautes Eaux montre (Figure 9) une discrimination entre eaux de surface et eaux souterraines suivant l'axe F2 (pôle relativement corrélé aux carbonates), et par contre une répartition égale suivant l'axe F1 (pôle relativement corrélé à la silice). Les eaux souterraines étant plus riches en anions bicarbonates, sulfates et les eaux superficielles se caractérisant par des teneurs en Fe, Al significatives.

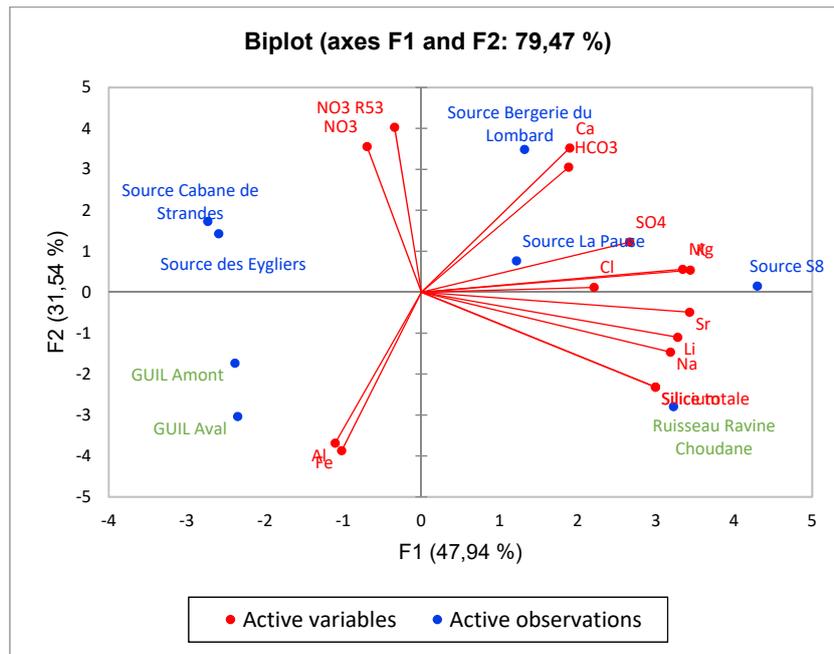


FIGURE 9 : Analyse en Composantes Principales de la campagne Hautes Eaux de mai 2021

A la seconde campagne d'octobre 2021 dite de Basses Eaux (Figure 10 et Figure 11), la première du genre en dehors de la période post nivale, les teneurs n'ont cependant pas évolué significativement et elles n'amènent guère d'éclairage nouveau sur le chimisme des eaux et leurs fluctuations saisonnières (avec une recharge hivernale restée bien en dessous de l'amplitude normale).

Nom du Prélèvement	Type	HCO3 (Bicarbonate)	Ca (Calcium)	Mg (Magnésium)	Na (Sodium)	K (Potassium)	Cl (Chlore)	NO3 (nitrates)	SO4 (Sulfates)	Al (Aluminium)	Fe (Fer)	Li (Lithium)	Silicium	Sr (Strontium)
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l
Ruisseau Ravine Choudane	ESUP	197.6	60	8.3	3.4	1.1	<1,0	< 0.5 (LQ)	32	2	1	NA	0.025	NA
Source S8	ESOU	270.6	90	9.4	2.2	1.3	<1,0	< 0.5 (LQ)	41	33	43	6.2	2.067	527
GUIL Amont	ESUP	169.3	55	7	1.3	< 1 (LQ)	<1,0	< 0.5 (LQ)	28	< 2 (LQ)	1	NA	1.097	NA
GUIL Aval	ESUP	167.5	57	7.1	1.4	< 1 (LQ)	<1,0	< 0.5 (LQ)	28	54	40	NA	1.17	NA
Source La Pause	ESOU	181.9	65	7	1.3	1.6	<1,0	< 0.5 (LQ)	51	120	193	5.1	1.811	486
Source Cabane de Strandès	ESOU	204.5	70	3.4	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	<1,0	1.5	12	7	6	1.5	1.331	282
Source des Eyglies	ESOU	204.5	66	2	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	<1,0	< 0.5 (LQ)	3.6	11	11	1.6	1.438	307
Source Bergerie du Lombard	ESOU	305.4	103	11	< 1 (LQ)	1.6	<1,0	< 0.5 (LQ)	64	12	12	NA	1.703	NA

FIGURE 10 : Teneurs chimiques mesurées sur les eaux échantillonnées lors de la campagne d'octobre 2021 en contexte annuel dit de Basses Eaux

On retrouve les eaux superficielles à nouveau discriminées à part dans le même quadrant (Figure 12).

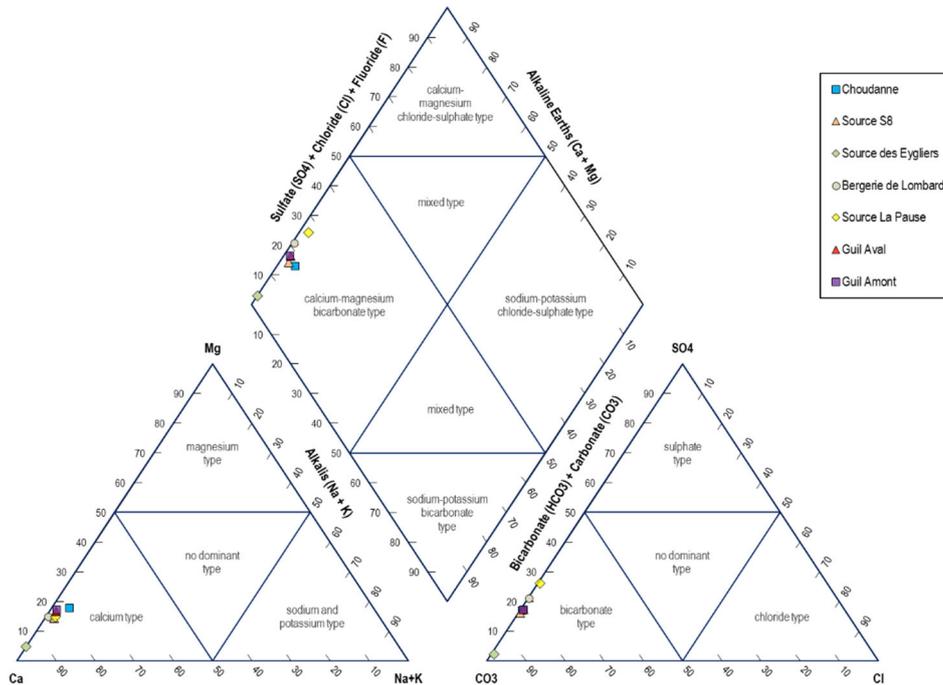


FIGURE 11 : Diagramme de Piper pour les mesures faites en Basses Eaux en octobre 2021

Parmi les rares changements observés d'importance, les teneurs en fer et aluminium, toujours très corrélées entre elles, deviennent négligeables dans les eaux superficielles amont (Guil Amont, ravine Choudane) mais elles restent présentes dans les sources S8 et de la Pause.

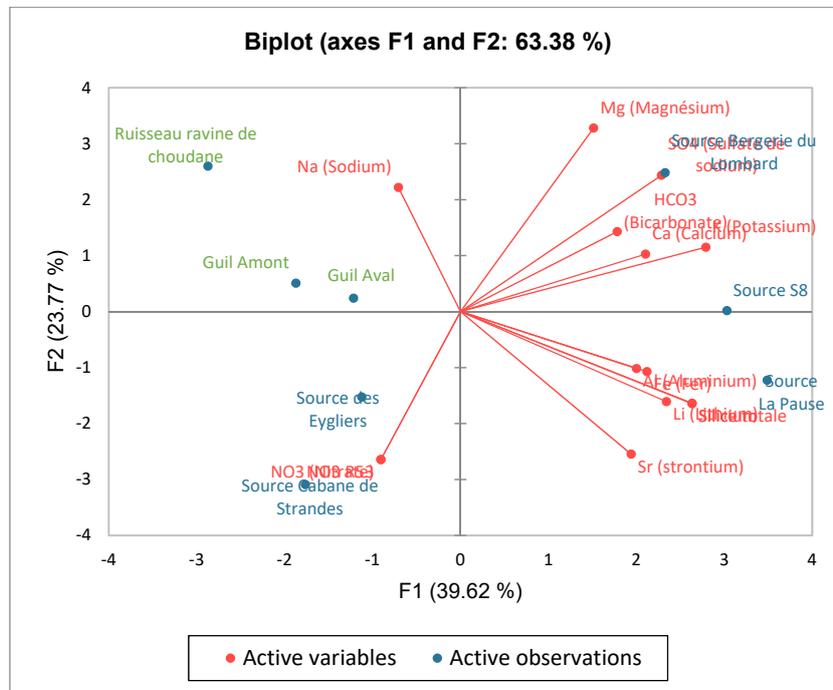


FIGURE 12 : Analyse en Composantes Principales de la campagne Basses Eaux d'octobre 2021

L'importance de ces changements, alors que le reste des mesures chimiques reste peu modifié, suggère que ces éléments restent peu représentatifs du chimisme des eaux et liés surtout à des changements externes ponctuels (ce qui resterait néanmoins à confirmer par la suite).

Suivi d'une source par sonde (en amont latéral du glissement)

Sur la Source des Eyglies, une sonde multi-paramètres (Température, Pression, Conductivité)³ avec acquisition de mesures en continu a été laissée immergée dans la vasque de la source du 11 mai 2021 au 13 juin 2022 (soit pendant 13 mois). La source nous avait été signalée avoir un écoulement quasi pérenne, même si en été le débit devenait proche du nul (Figure 13).

Pendant cet intervalle, le propriétaire de la source a fait des travaux durant le début d'été 2021, avec ajout en aval de la première chambre de réception des eaux (bidon PVC) d'une seconde chambre de capacité bien plus grande (bidon PVC de volume au moins doublée). Après travaux, la sonde a été déplacée le 5 juillet 2021 dans cette seconde chambre de réception située plus en aval. Lors de la récupération de la sonde le 9 Juin 2022, la sonde y a été retrouvée suspendue dans l'air dans une chambre de réception totalement à sec (le premier bac de captage étant lui resté en eau). Elle a été très ponctuellement remise dans l'émergence initiale amont pendant plus d'une heure, permettant d'obtenir une dernière mesure horaire. D'après les enregistrements de paramètres, l'assec de la source au niveau de cette seconde chambre de réception était relativement récent (conductivité baissant à zéro), depuis le 02 Juin 2022 (soit une émergence de la sonde hors des eaux de la source sur une durée de 11 jours).

Il avait déjà été enregistré auparavant un premier et courte période d'assec, du 06 au 11 octobre 2021⁴. Les quelques épisodes pluvieux successifs depuis le mois de septembre (respectivement de 16, 29 et 28 mm à Abriès) semblent avoir suffi cependant à mettre fin à cet assec.

Le capteur de pression semble un peu "atone", avec un comportement marqué surtout en on/off sur deux valeurs fourchettes distinctes, comportement en rien très surprenant sur une vasque de source.

³ Prêt gracieux de matériel du BRGM de Lyon-Villeurbanne

⁴ Déjà le 5 septembre 2021, une chute ponctuelle de la conductivité survenue pendant 7 à 8 heures interroge (dysfonctionnement temporaire du capteur conductivité, sortie de la sonde de l'eau ?? amorce d'un assec ??)

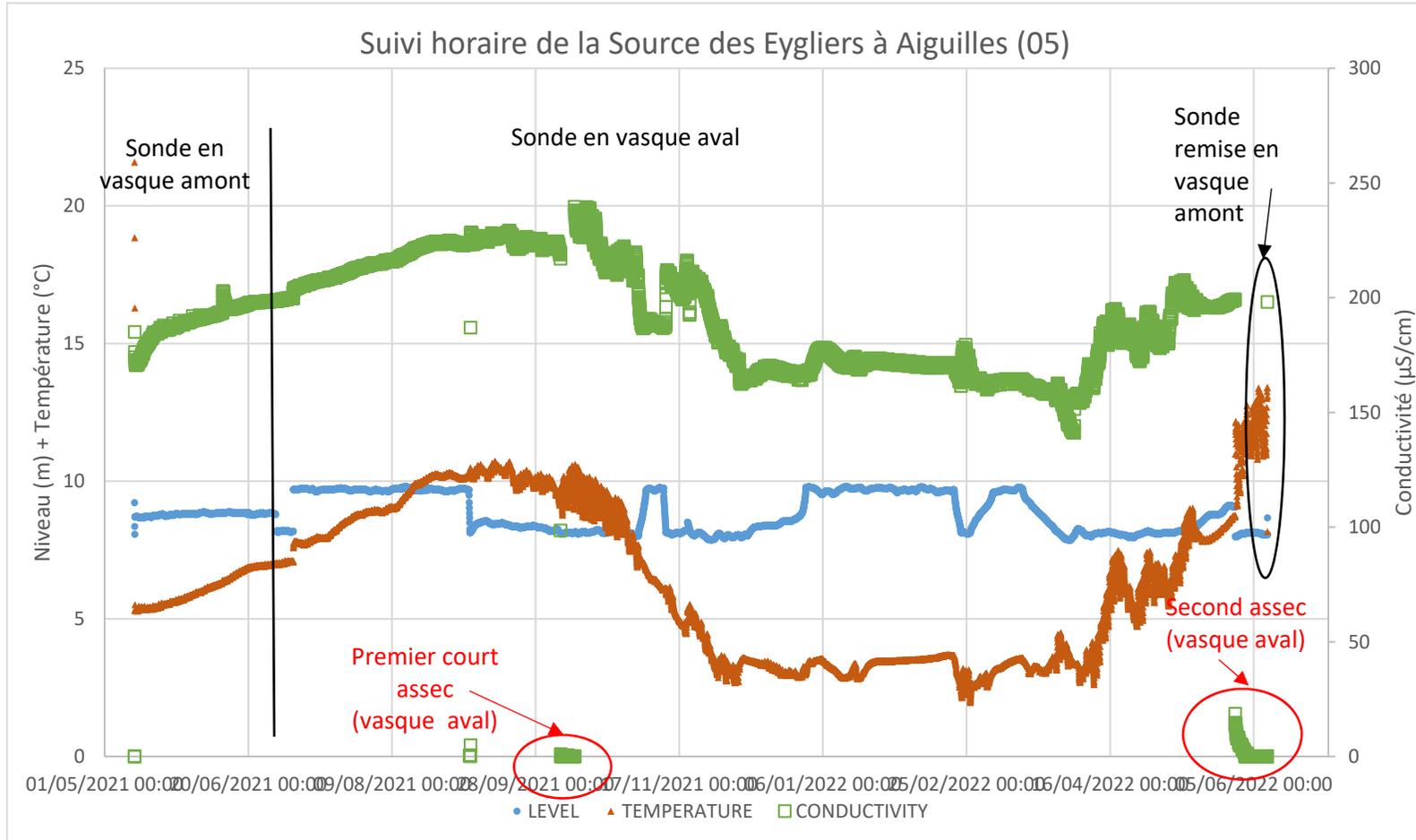


FIGURE 13 : Suivi horaire multi paramètres de la source des Eyglies

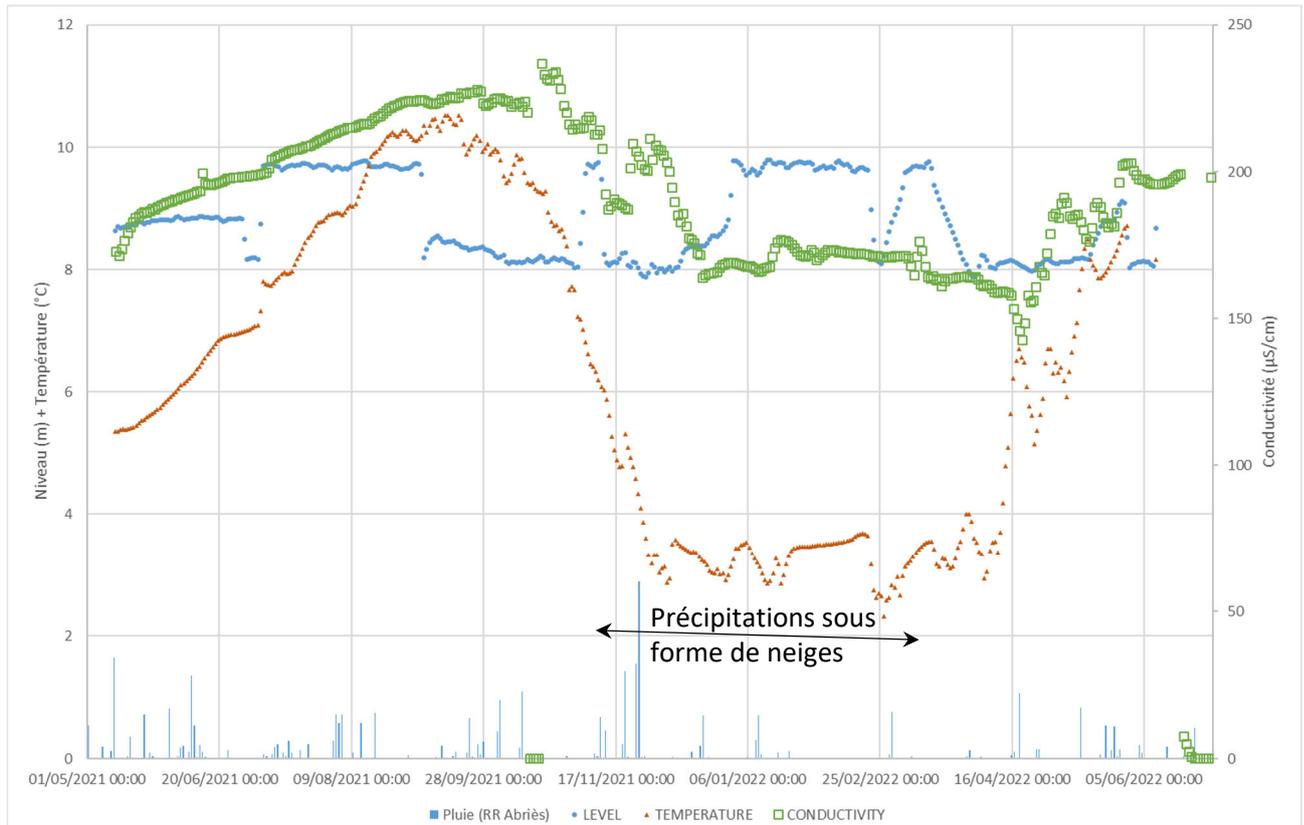


FIGURE 14 : Mise en relation des mesures physiques journalières des eaux et des épisodes climatiques

On note une bonne cohérence d'ensemble de l'évolution des paramètres de la sonde avec les fluctuations climatiques de saison (Figure 14), en termes de refroidissement rapide des venues d'eaux associées à une chute de conductivité pendant la fin d'automne. Une bonne partie de l'alimentation viendrait donc des fontes des premières neiges d'automne (à partir de début novembre 2021) puis de celles du printemps 2022 et une certaine fixité/stagnation/pause hivernale liée à la couverture des neiges précipitées qui se sont accumulées.

Multi traçage hydrogéologique sur le glissement du Pas de l'Ours

Dès que la présence de cratères de sous-tirage et autres effondrements associés à des pertes a été détecté en amont du glissement moderne dans la partie sommitale du glissement, et en absence de tout caractérisation aisée des eaux souterraines, l'idée d'une opération de traçage par injection et suivi de restitution de traceurs colorimétriques est née, même si, au moins à deux titres, cette opération de traçage pouvait sembler aléatoire en termes de rendus :

- Dans un glissement où les écoulements et transferts de colorants vont se faire, pour bonne partie du moins en milieu poreux, dans la masse glissée et les éboulis, on peut s'attendre pour partie à des écoulements parfois limités en vitesse dans les faciès les plus argileux, ces derniers ayant, en plus, une capacité élevée à pouvoir fixer les colorants (soit des taux de restitution



Avec le soutien de



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

assez faibles, une grosse partie des colorants ayant été fixé pendant leur propagation). On est loin des conditions rencontrées dans des contextes d'aquifères fissuraux ou karstiques, où d'une part les vitesses peuvent être parfois très importantes et d'autre part où la fixation des colorants reste plutôt limitée sur les parois le long des voies d'écoulements préférentiels.

- Dans un versant très sec, les écoulements sont nettement freinés, avec des pertes certaines surtout en milieux poreux. Et dans ce contexte déjà défavorable, il apparaît difficile de compenser par un volume d'eau de chasse du produit injectée plus grande, car monter de l'eau sur les points d'injection isolés au bout d'une piste forestière pose des difficultés logistiques certaines, surtout pour une opération initialement pas prévue et notamment pas budgétée. Dans les faits, loin au final d'avoir pu arriver à disposer d'une chasse significative d'eau, il fallut se contenter d'une chasse d'eau réduite (1 m³ seulement par traceur utilisé).

Malgré ces deux handicaps certains, et faute aussi de pouvoir reporter l'essai de traçage à l'année suivante (compte tenu des échéances du projet), cet essai de multi-traçages a été tenté et réalisé comme suit :

- Durant l'été, une fois le choix de réalisation pris (BRGM et OMIV Eau en soutien/partenaire), il a d'abord été collecté les équipements de mesure gracieusement prêtés par le BRGM (1 fluorimètre depuis l'Antenne de France Comté et 1 second depuis l'antenne de Marseille) et l'OMIV (1 fluorimètre + 1 préleveur/échantillonneur) puis ces équipements ont été calibrés. L'ensemble des consommables nécessaires (traceurs, fluocapteurs et flacons) a été commandé ;
- En fin d'été, les repérages terrain pour définir les points de suivi et organiser la logistique nécessaire ont été faits ;
- Les équipements ont été posés une semaine avant les injections (afin de s'assurer du bon fonctionnement des équipements). Pour les 3 fluorimètres posés dans le Guil, rivière avec des possibles épisodes de régime à charriage torrentiel, il a fallu protéger et sécuriser les appareils dans des contenants bétonnés. Du fait de travaux, survenant à la même période, de désencombrement dans le lit du Guil de tuyaux métalliques emportés par le glissement (tuyaux de conduite forcée pour production électrique privée locale), il a fallu à la dernière minute espacer tant côté amont qu'aval ces 3 appareils (notamment le point de suivi A en amont du glissement) ;
- Au final (figure 15), deux traceurs ont été utilisés⁵ et injectés: la sulfo-rhodamine B (fluotraceur de teinte rouge) injectée sur le point 1 et la fluorescéine (fluotraceur de teinte jaune) sur le point 2. Le point d'injection 1 correspond à un cratère de sous tirage relativement isolé et d'apparition très récente, apparu entre 2013 et 2018 en amont proche de la tête du paléoglissement (coté compartiment ouest, en amont). Au contraire, le point d'injection 2 correspond à un cratère de sous tirage semblant très ancien et dans un secteur très riche en tels cratères. Ce point 2 est situé sous la tête de paléoglissement en amont du compartiment est.

⁵ Un troisième traceur, l'Acide Amino G, était optionnellement prévu en cas de ruissellement observé lors du démarrage du traçage s'infiltrant dans les crevasses du plateau sommital. Dans des terrains de surface restés totalement secs, il a été renoncé à ce troisième traceur.



Géosciences pour une Terre durable

brgm



- L'injection a été faite le mardi 19 octobre vers 13 h sur le point 2 puis vers 14 H sur le point 1, pour une masse de traceur de 1,3 Kg, poussée par un volume de chasse de 1 m3 d'eau ;
- 6 points de suivi ont été utilisés, 3 équipés d'un fluorimètre dans le Guil (A, B et C), 1 équipé d'un échantillonneur (point F sur la Source de la Pause) et les deux derniers sans équipement mais juste des fluocapteurs en double grappe ;

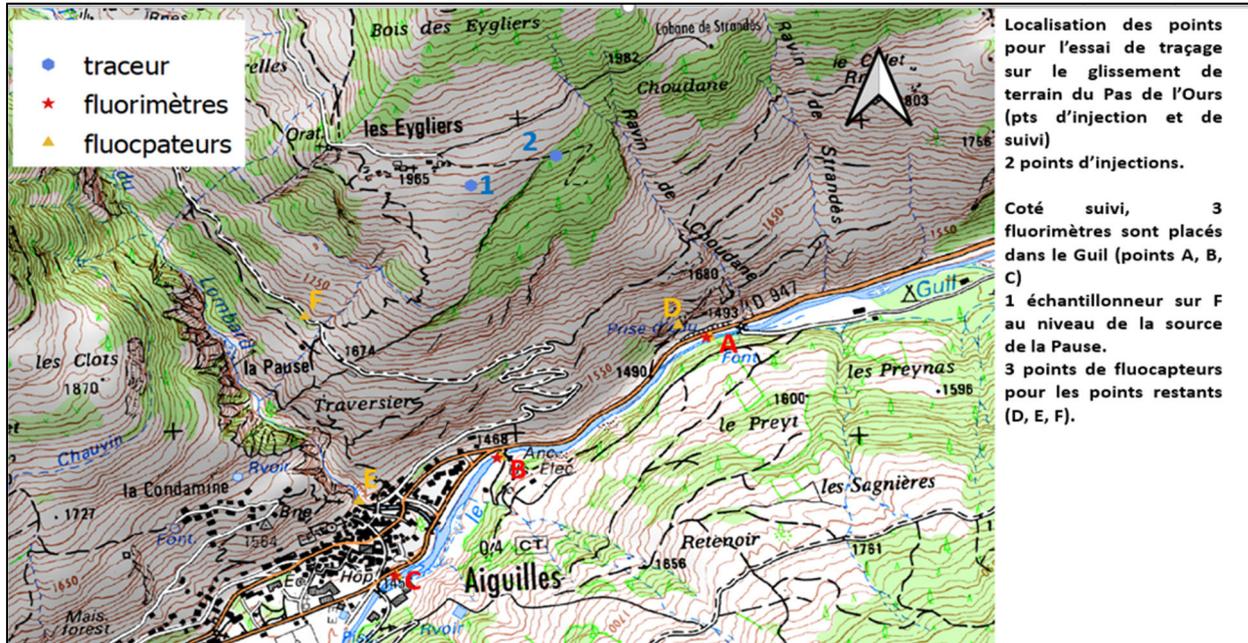


FIGURE 15 : dispositif déployé pour l'opération de multi-traçages. Les points 1 et 2 sur le plan présentent les points d'injection des traceurs photographiés ci-dessous.

- Pour le suivi des fluocapteurs mais aussi afin de recueillir les prélèvements d'eau de l'échantillonneur, changer les batteries du fluorimètre et récupérer les données numériques des appareils, des visites régulières ont été nécessaires (autour de 3 puis 2 visites par semaine). On remercie ici grandement la RTM des Hautes Alpes (Agence d'Embruns) pour avoir donné un coup de main sur les tournées de suivi et nous épargner ainsi les longs temps de trajet A/R entre Lyon et Aiguilles ;
- Compte tenu des distances entre points d'injection et points de suivi, il était attendu une possible restitution plutôt dans les jours ou quelques semaines après injection. Sans restitution franche constatée, le dispositif de suivi (échantillonneur) a été conservé tel que jusqu'au 15

novembre 2021, puis une partie des équipements a été retirée pour être restituée à leurs propriétaires, et remplacée par des fluocapteurs (maintien du dispositif de suivi mais de manière allégée). En terme d'équipement, il n'avait été maintenu qu'un seul fluorimètre sur le point de suivi aval C, jusqu'à l'arrêt du suivi le 18 décembre 2021. Des fluocapteurs avaient été laissés ensuite tout l'hiver sur l'ensemble de 6 points de suivi (au cas où).

De ce suivi, on peut en tirer (Figure 16) les informations suivantes :

- Le fluorimètre A (Guil Amont) n'a enregistré que du bruit de fond naturel en termes de fluctuations de teneurs de fluorescence mesurées. Il a été encrassé par la turbidité dès le 3 novembre, rendant les fluctuations en fluotraceurs mesurées ensuite moins fiables. Il a pu être réinstallé en position plus avantageuse le 8 novembre en aval des points A et D, au droit du glissement de Pas de l'Ours (dans le compartiment ouest) ;
- Le fluorimètre B (Guil Centre) dans des eaux un peu plus turbides (mais en baisse tout le long du suivi) n'a enregistré aussi que du bruit de fond naturels avec des fluctuations beaucoup plus sourdes que sur le fluorimètre A, et de plus avec des allures de courbe tout à fait différentes pour les 3 traceurs suivis ;

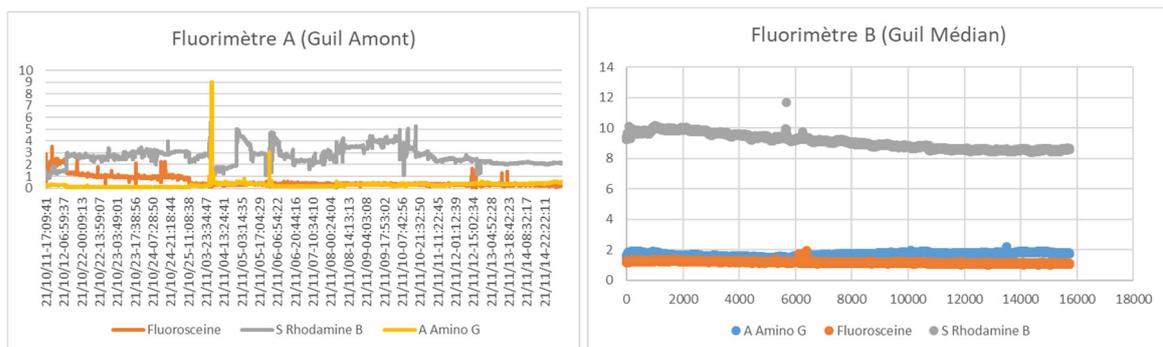


FIGURE 16 : courbes de restitution obtenues sur les fluorimètres A et B (mesures limitées, au final, au bruit de fond)⁶

- Le fluorimètre C (Guil aval) a peut-être enregistré une possible micro-restitution (Figure 17) du traceur fluorescéine venant du point d'injection 2 avec deux voire trois micro pics comme suit :
 - Le premier micro pic atteint 25 fois le bruit de fonds naturel le 27 octobre dans la soirée (201 heures après l'injection) soit une vitesse moyenne de restitution de 6,5 m/h ;
 - Le second micro pic atteint 19 fois le bruit de fonds naturel le 29 octobre en fin de matinée (283 heures après l'injection) soit une vitesse moyenne de restitution de 5,5 m/h ;
 - Le troisième (éventuel micro pic n'atteint que 3 à 4 fois le bruit de fonds naturel le 1 novembre dans la matinée (309 heures après l'injection) soit une vitesse moyenne de restitution de 4,2 m/h.

⁶ A noter que bien que finalement non utilisé (non injectée), des fluctuations des teneurs en acide Amino G sont observées (bruit de fonds naturel ou interférence sur la mesure lié à ce dernier).

On note aussi que l'appareil s'était peu à peu encrassé entre le 19 et le 25 octobre 2021 avant ces possibles micro-restitutions (car mesure de la turbidité faite en même temps par ce type d'appareil).

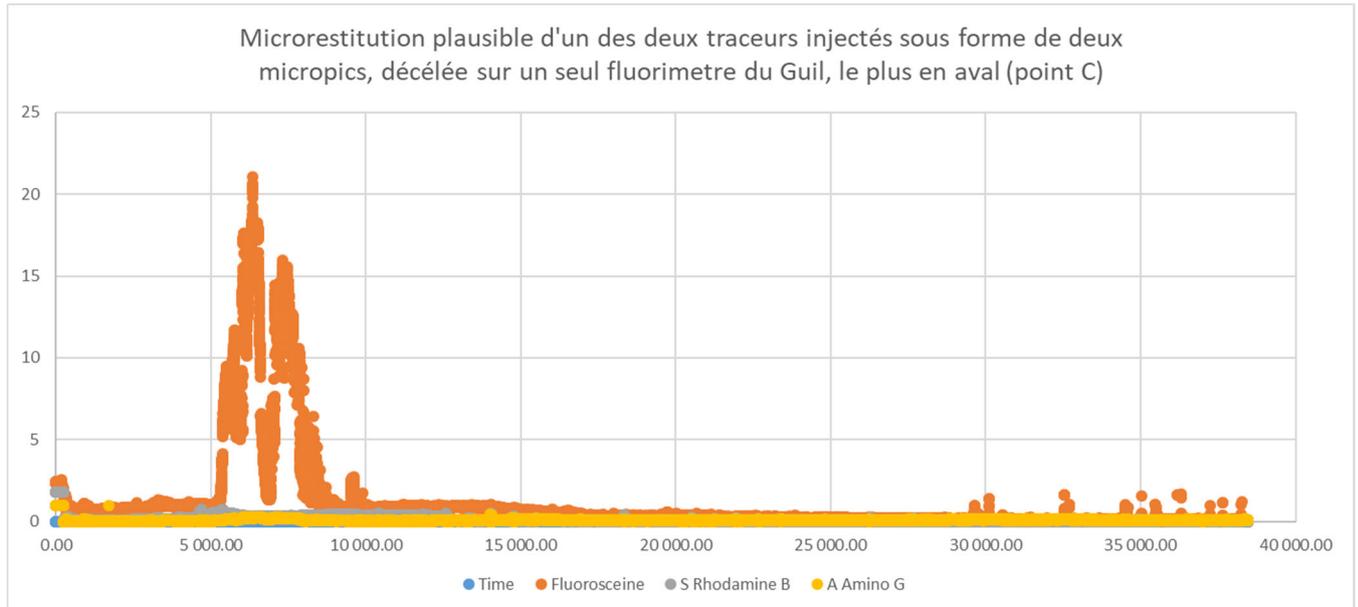


FIGURE 17 : début de la courbe de restitution obtenue sur le fluorimètre C (Guil aval avec petits pics ponctuels en sus du bruit de fond)

- Pour les points de suivis D et E, à chaque visite un fluocapteur isolé était remplacé tandis qu'on prélevait un second fluocapteur d'une grappe de fluocapteurs immergés en début de suivi (méthode du suivi par fluocapteur dite de la double grappe). Un tableau (Figure 18) permet de se rendre compte du rythme des tournées de suivi ;
- Pour l'échantillonneur préleveur (point F), l'appareil a fonctionné sans rencontrer de difficulté avec 3 prélèvements par jour (tous les 8 heures jusqu'au 25 octobre puis 2 par jour jusqu'au 15 novembre (à part une pause entre le 03 et le 08 novembre suite à une reprogrammation au final pas lancée). Tous les échantillons ont été conservés (flacons en verre fumé) pour éventuelle analyse, si besoin.
- Si restitution il y a eu, le cheminement ne semble avoir atteint le fond de vallée qu'en aval du fluorimètre B pour le Guil, et/ou via la ravine Lombard (passage alors du traceur sans doute à hauteur du point de suivi E) avant confluence ensuite de la ravine Lombard dans le Guil, en amont du point C.



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTÉ D'AZUR



l'Europe
s'engage
sur
le Massif Alpin

Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
DU MASSIF DES ALPES

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Source S8				Aiguilles				Fluorimètre Amont				La Pause			
Numéro	Localisation	Date	Heure	Numéro	Localisation	Date	Heure	Numéro	Localisation	Date	Heure	Numéro	Localisation	Date	Heure
D_0	Isolé	21/10/2021	14h05	E_0	Blanc	19/10/2021	15h00	A_0	Blanc_ amont	19/10/2021	13h30	F_0	Blanc_Pause	19/10/2021	11h20
D_1	Grappe	21/10/2021	13h15	E_1	Grappe	21/10/2021	12h55	A_1	1_ amont	25/10/2021	13h00	F_1	2_Pause	21/10/2021	12h25
D_2	Isolé	21/10/2021	13h15	E_2	Isolé	21/10/2021	12h55	A_2	2_ amont	23/11/2021	12h30	F_2	3_Pause	15/11/2021	12h00
D_3	Grappe	25/10/2021	12h45	E_3	Grappe	25/10/2021	13h40	A_3	3_ amont	09/12/2021	10h30	F_3	4_Pause	23/11/2021	11h15
D_4	Isolé	25/10/2021	12h45	E_4	Isolé	25/10/2021	13h40	A_4	4_ amont	17/12/2021	12h20				
D_5	Grappe	28/10/2021	9h00	E_5	Grappe	28/10/2021	9h30								
D_6	Isolé	28/10/2021	9h00	E_6	Isolé	28/10/2021	9h*0								
D_7	Grappe	03/11/2021	10h50	E_7	Grappe	03/11/2021	9h30								
D_8	Isolé	03/11/2021	10h30	E_8	Isolé	03/11/2021	9h30								
D_9	Grappe	04/11/2021	11h50	E_9	Grappe	04/11/2021	10h17								
D_10	Isolé	04/11/2021	11h50	E_10	Isolé	04/11/2021	10h17								
D_11	Grappe	08/11/2021	12h30	E_11	Grappe	08/11/2021	13h45								
D_12	Isolé	08/11/2021	12h30	E_12	Isolé	08/11/2021	13h45								
D_13	Grappe	12/11/2021	15h50	E_13	Grappe	12/11/2021	15h22								
D_14	Isolé	12/11/2021	15h50	E_14	Isolé	12/11/2021	15h22								
D_15	Grappe	19/11/2021	10h15	E_15	Grappe	19/11/2021	10h36								
D_16	Isolé	19/11/2021	10h15	E_16	Isolé	19/11/2021	10h36								
D_17	Grappe	23/11/2021	13h00	E_17	Grappe	23/11/2021	13h30								
D_18	Isolé	23/11/2021	13h00	E_18	Isolé	23/11/2021	13h30								
D_19	Grappe	09/12/2021	10h20	E_19	Grappe	09/12/2021	11h10								
D_20	Isolé	09/12/2021	10h20	E_20	Isolé	09/12/2021	11h10								
D_21	Grappe	17/12/2021	12h05	E_21	Grappe	17/12/2021	13h10								
D_22	Isolé	17/12/2021	12h05	E_22	Isolé	17/12/2021	13h10								

FIGURE 18 : tableau de récupération des fluocapteurs sur les points D et F (et ailleurs en secours en cas de panne avérée)

Compte tenu d'une possibilité de restitution sur un unique appareil (fluorimètre C) à des seuils bas proches des limites de détection de cet appareil, le plus précis de tous, il a été recherché sur les fluocapteurs (bien qu'a priori les seuils de concentration en traceur aient été trop bas pour qu'on puisse les détecter) la trace éventuelle de fluorescéine restée fixée sur le charbon du fluocapteur. Après relèvement des fluocapteurs et mesures spectrométriques en laboratoire (16 fluocapteurs testés, plus particulièrement sur le point E avec 7 points mesurés), il n'a pas pu être confirmé la trace de passage de traceur sur aucun de ces fluocapteurs analysés (Figure 19).

Faute d'autre preuve formelle du possible passage que celle éventuellement détectée sur le fluorimètre C, encrassé, à très faible taux de la fluorescéine, on ne peut pas considérer ces traces de restitution comme valides et donc le traçage reste au final considéré comme négatif. Les informations collectées d'une possible restitution pourront servir en cas de nouvelle tentative de traçage dans de meilleures conditions de réalisation (meilleures conditions de saturation, chasse d'eau plus importante...).



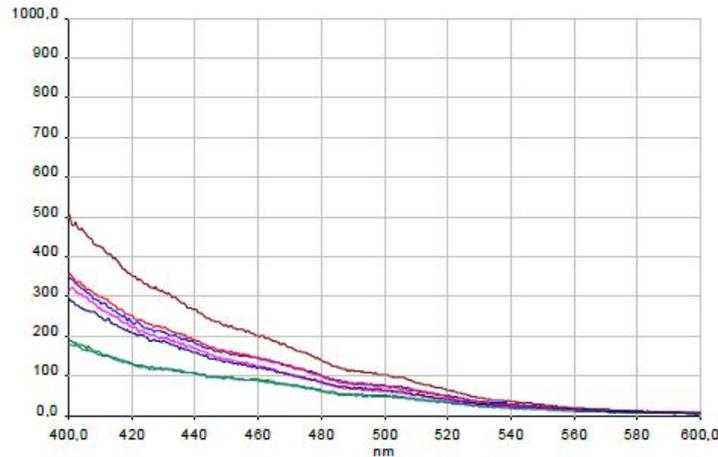
Géosciences pour une Terre durable



Analyse réalisée sur les fluocapteurs de « Aiguilles - E » du :

- 19/10/2021 15h
- 25/10/2021 13h40 (G)
- 25/10/2021 13h40
- 28/10/2021 09h30 (G)
- 28/10/2021 09h30
- 28/10/2021 09h30
- 03/11/2021 09h30 (G)
- 03/11/2021 09h30

A. RESULTAT DU SPECTRE DE FLUORESCENCE



B. OBSERVATION

Les fluocapteurs de Aiguilles - E, ne présentent aucun pic de colorant.

FIGURE 19 : absence de traceur fixé de manière significative sur les fluocapteurs (point E sur la ravine Lombard)

Piézomètre du Pas de l'Ours

Hors cadre strict du projet MIROIR, mais pour d'autres programmes de recherche (programme européen PITEM, programme français RGF (Référentiel Géologique Français), un piézomètre a finalement été foré dans le glissement du Pas de l'Ours, dans son compartiment ouest, au niveau du premier virage en épingle à cheveux de la piste forestière du Lombard, sur une plateforme aménagée (Figure 18). L'équipe MIROIR a largement participé à la localisation du forage piézométrique et a assuré le suivi géologique lors de la réalisation de celui-ci.

Le forage a été réalisé en début août 2022 et aussitôt équipé d'une sonde de suivi piézométrique. La foration s'est faite en mode carotté jusqu'à 36 m de profondeur, puis poursuivie en mode destructif jusqu'à 77 m de profondeur.



FIGURE 20 : Situation du piézomètre et foration en cours

Les 27,5 premiers mètres ont été forés dans des éboulis fins (sables fins rarement cimentés, avec fragments rocheux de tailles pluricentimétriques plus ou moins présents ; passées argileuses apparaissant à partir de 21,4 m et devenant le faciès prédominant à partir de 25,6 m jusqu'à atteindre le substratum rocheux schisteux à 27,5 m. Les terrains d'éboulis ont été retrouvés secs, sans venue repérée d'eaux et juste de rares et courts indices d'humidité passée.

Le substratum schisteux est directement rocheux en plein (sans gradient d'altération décroissant). Les zones de faiblesses (interfaces fissurales) persistent jusqu'à 43,5 m. Plus profond, on ne rencontre plus qu'une seule zone de faiblesse à 61,5 m, non loin de l'interface Zone Saturée – Zone Non Saturée.

Le suivi du niveau d'eau a démarré le 12 août 2022. Le niveau de l'eau (Figure 21) a d'abord poursuivi son étiage jusqu'à la mi-octobre 2022 (baisse de 25 cm environ) avant d'entamer un mouvement à la hausse (recharge hivernale) de 2,56 m de battance jusqu'à la fin mars 2023. Il distingue bien les phases de remontée rapide en lien avec les phases de fontes nivales marquées vers la fin février 2023 puis à partir de la mi-mars 2023 et des phases antérieures d'alimentation plus tenue en fin 2022 par fonte des premières neiges. L'étiage de printemps 2023 a suivi avec une baisse rapide de 2,4 m jusqu'au 10 juin 2023. Dans la dizaine de jours suivante, le niveau piézométrique est remonté de 30 cm, cette interruption de l'étiage traduisant une alimentation liée vraisemblablement aux pluies abondantes du printemps.

Un dernier passage sur le site du Pas de L'Ours à la fin mai 2023 a d'ailleurs permis d'observer un versant un peu moins sec et plus vert, avec un régime sur le Guil plus tonique et une zone d'activité apparente des versants plus importante en tête de plateau sommital.

A la visite de contrôle/calibrage à la mi-décembre 2022, les écarts du capteur de pression avec la mesure de niveau mesurée manuellement étaient très faibles et ils n'ont pas nécessité de corriger la courbe piézométrique obtenue. Par contre, la sonde piézométrique installée enregistre aussi en même temps les variations de conductivité et de température (Figure 22). L'écart important constaté sur la mesure de la température du capteur a été rectifié mais depuis le capteur de température n'a enregistré que des variations minimales et des valeurs quasi-constantes avec un écart plus réduit de 0,25°C constaté à la visite de début mai 2023 (dysfonctionnement ?). Quant au capteur de conductivité, il présente lui aussi un comportement atone et persistant depuis le début, avec d'abord une progression linéaire suspecte à la baisse de 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et avec un écart de 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la mesure de contrôle de mi-décembre 2022. Il n'enregistre ensuite plus que des mesures quasi constantes, autour de 627, 628 $\mu\text{S}/\text{cm}$, atteignant un écart de 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la visite de contrôle (dans l'autre sens par rapport à décembre 2022).

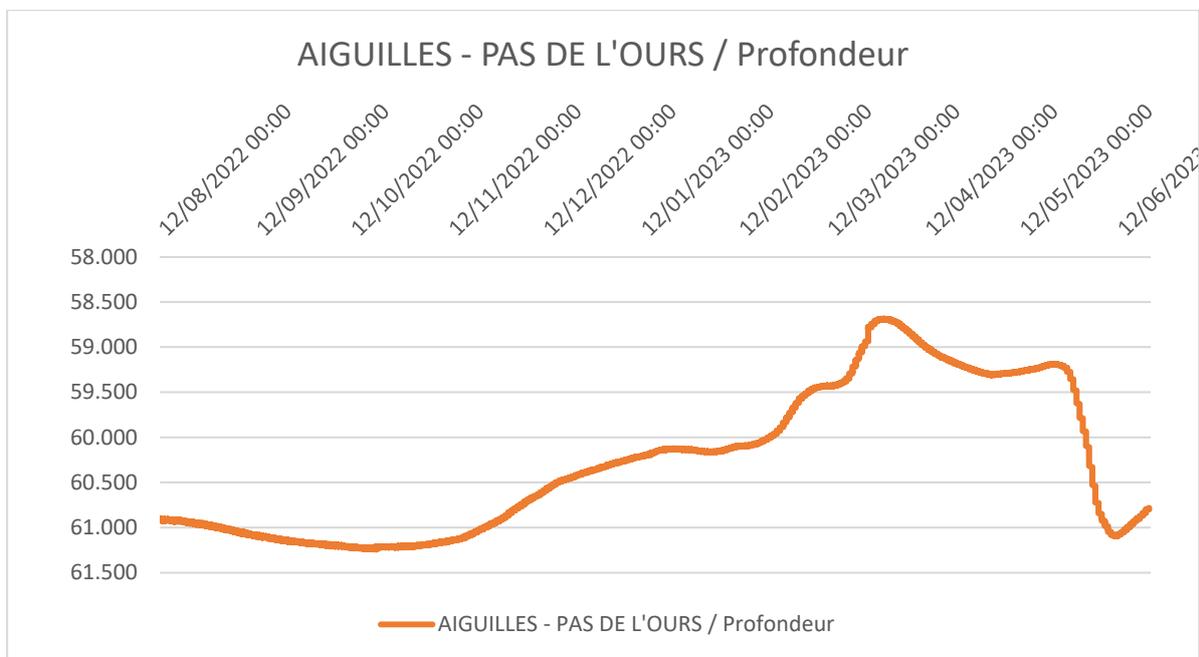


FIGURE 21 : Courbe piézométrique enregistrée au sein du glissement du Pas de l'Ours

Après avoir stagné encore un mois, la conductivité a fini par varier avec une baisse de près de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur les 4 dernières semaines d'enregistrement. Une conductivité finale au plus bas (613 $\mu\text{S}/\text{cm}$), semble confirmer la récente venue d'eaux de ré-alimentation à l'origine de la remontée du niveau piézométrique.

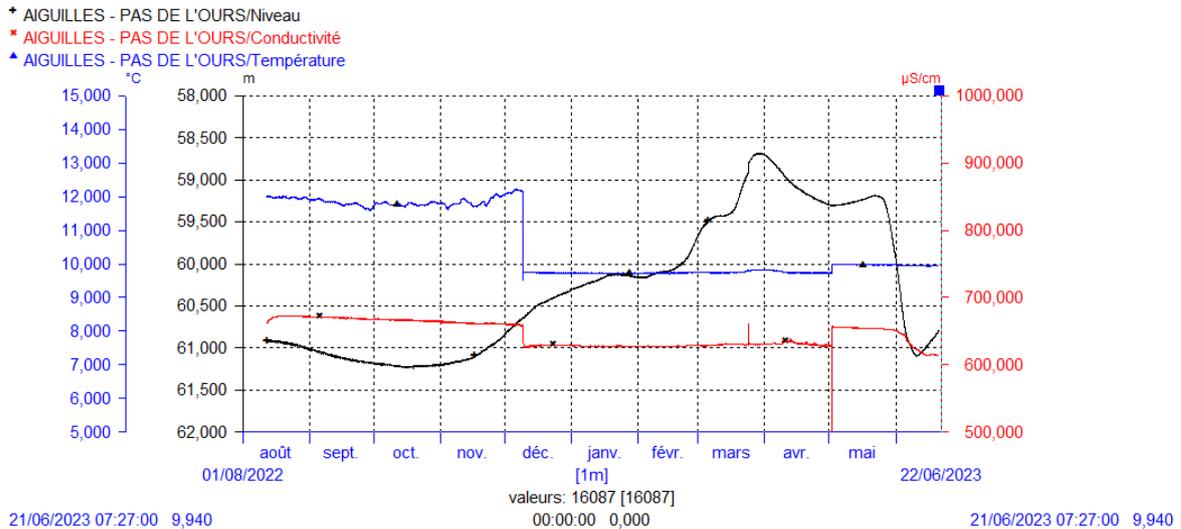


FIGURE 22 : autres paramètres mesurés sur le piézomètre du glissement du Pas de l'Ours

Bilan sur le Guil

L'essentiel de l'acquisition des données hydrogéologiques pendant le programme MIROIR en 2021 et 2022 s'est déroulé durant une poursuite de période climatique nettement et durablement déficitaire, tant d'un point de vue des valeurs annuelles que durant la période hivernale. Entre 2018 et 2021, les données climatiques étaient déjà plutôt normales après deux années consécutives de 2016 à 2018 nettement excédentaires (dont une valeur record de plus de 300 mm en novembre 2016).

Le niveau actuel des eaux souterraines se situe largement sous la zone de glissement dans le compartiment ouest, là où la surface de rupture serait pourtant profonde d'une quarantaine de mètres. Tout semble indiquer que dans le compartiment est, ce niveau est bien moins profond, vers 10 à 20 mètres sans doute, possiblement aussi plutôt sous la surface de glissement (profonde autour d'une quinzaine de mètres) et bien plus réactif (coulées de boues passées, traçage). Ce niveau d'eau remonterait plus ou moins dans les couches instables de surface, de manière provisoire et régulière à chaque période de fonte hivernale, et de manière plus durable après des années exceptionnellement arrosées : les entonnoirs de sous-tirage matérialisent une alimentation en eau du corps du glissement temporairement soutenu (fonte des neiges, et ruissellement orageux). Avant cette période de fonte hivernale, le maintien de la couverture neigeuse sous un gel hivernal durable constituerait généralement une période de pause hydrologique.

D'un point de vue chimique, les données montrent des eaux relativement homogènes et peu contrastées tant spatialement que temporellement (au moins sur la période comprise entre 2017 et 2021).

Arly

Compte tenu du linéaire important des gorges de L'Arly étudié (> 10 km), il était impensable de pouvoir appréhender l'hydrogéologie du secteur dans son intégralité.

Plusieurs éléments laissent néanmoins penser que l'hydrogéologie joue un rôle majeur dans les glissements de versant de la vallée :

- la forte dissymétrie d'activité en termes de glissements de terrain entre les deux rives est partiellement attribuée à la géologie différente (présence de terrains charriés sur la rive droite) qui implique une hydrogéologie différente (Figure 23), et qui se traduirait avant tout par une saturation poussée et relativement pérenne en rive gauche alors que les terrains en rive droite seraient beaucoup plus secs (notamment là où les schistes lustrés affleurent en pied de versant) ;
- la présence de deux buttes résiduelles triasiques aquifères sur le plateau des Saisies (butte de Bisanne et butte de Cernix) qui constituent de modestes mais avérés châteaux d'eau qui alimentent et entretiennent la saturation plus poussée de la rive gauche, ceci depuis le haut de vallée. On retrouve par ailleurs un secteur de zones humides (tourbières des Saisies) en bordure de plateaux autour de la Palette et plus au Nord, d'envergure plus limitée, mais qui joue un peu le même rôle.
- il apparaît en parties médiane –haute de la vallée sous les contreforts, à hauteur des premiers replats (zones d'éboulis accumulés, placages morainiques) la possibilité d'infiltration marquées des eaux de surface (eaux de fontes nivales, indices de pertes de cours d'eau sur les tracés IGN, diverses mentions dans les rapports existants).
- Comme pour le glissement du Pas de l'Ours, le comportement des glissements de versant resterait avant tout (comme dans toutes les vallées alpines en relative altitude) largement saisonnier, avec un pic d'activité corrélée avec la période de fonte nivale et un ralentissement estival d'autant plus net lorsque les dernières pluies auront été limitées.

On reviendra sur ces différents points avant de détailler ce qui a été mené comme investigations purement hydrogéologiques (campagnes physicochimiques) et autres acquisitions connexes (géophysique sur le Montgombert).

Et pour conclure ce préambule sur la partie Arly, il avait été constaté lors des premières reconnaissances de terrain en fin de printemps 2021 que les terrains de versant étaient alors particulièrement saturés (sur les deux rives et avant tout sur la rive gauche qui nous intéresse), ceci à peine une semaine après un épisode pluvieux, certes significatif, mais sans intensité majeure. Les reconnaissances suivantes, notamment durant le printemps-été 2022 suivant, feront état d'écoulements beaucoup moins généralisés dans les talwegs et hauts de versant.

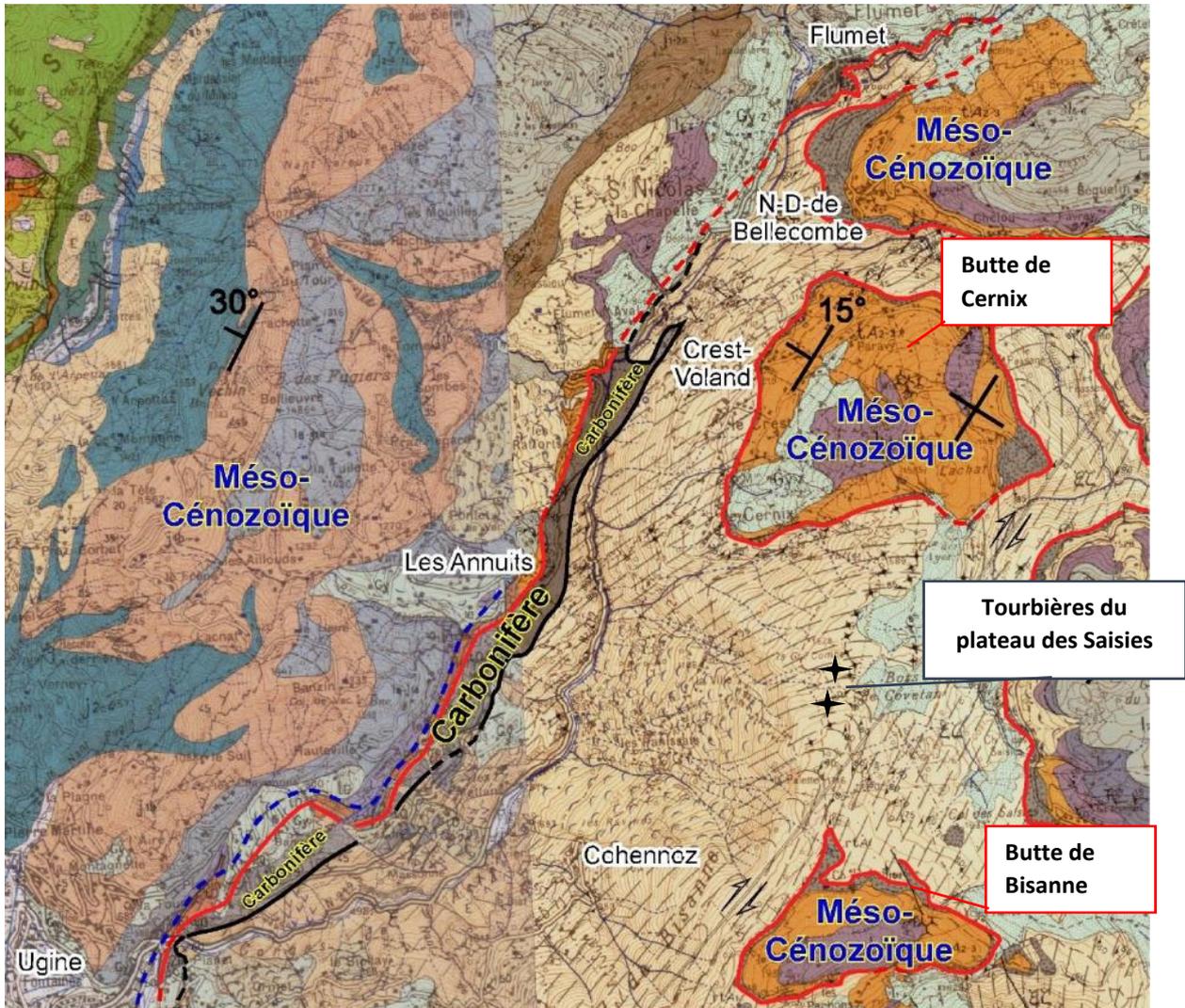


FIGURE 23 : Extrait des cartes géologiques à 1/50 000 publiées de Saint-Gervais et de Annecy-Ugine centrées sur la zone d'étude. La base des terrains du Carbonifère est surlignée avec un trait noir, La base de la série permo-triasique est surlignée avec un trait rouge. En tiret bleu est surligné le niveau de décollement principal interstratifié entre le Trias et le Lias. Les valeurs de pendage sont données à titre indicatif. Une surcharge hachurée bistre correspond aux trajectoires de schistosité affectant les micaschistes représentés en jaune orangée

Quelques éléments du contexte hydrogéologique

En partie médiane/basse du versant de l'Arly, en rive droite, une épaisse série discordante du Houiller stéphanien (principalement des conglomérats et grès silicifiés) sur les micaschistes de la série satinée fait écran à une alimentation en eau du pied de versant par les terrains de tête de versant. On retrouve au-dessus du Houiller stéphanien là encore en discordance, les mêmes terrains triasiques relativement bien aquifères que sur le plateau des Saisies, mais non pas sous forme de buttes résiduelles mais d'une couche continue (et même recouverte ensuite d'une alternance d'horizons calcaires et schisteux dans le Lias puis à la base du Malm).

Pour la rive gauche, l'absence d'horizons imperméables met en communication directe l'aquifère triasique et liasique en situation perchée et l'aquifère fissural au sein des micaschistes de la série satinée. Chacun de ces aquifères a sa propre signature chimique et il était espéré que les contrastes entre fonds hydrogéochimiques puissent être suffisamment marqués pour éventuellement percevoir l'alimentation de l'un par l'autre. La présence de sulfates en relative abondance liés à des reliquats gypseux au sein du Trias (par exemple) aurait pu éventuellement constituer un marqueur intéressant à analyser. Un autre chimisme des eaux est aussi présent sur la zone du plateau des Saisies avec les tourbières, même si en terme de volumes relatifs, elles restent marginales.

À la lecture des cartes IGN, on note sur plusieurs talwegs que certains écoulements temporaires cessent brutalement, laissant penser à des infiltrations ponctuelles marquées (pertes totales) au sein des masses glissées, pour parfois reprendre plus en aval. Ou, s'agit-il d'artefacts ?? On a déjà vu en tout cas que les écoulements temporaires dans les fonds de talwegs peuvent avoir un rôle majeur sur les instabilités de versant constatées, comme lors de l'épisode de l'aggravation du glissement de Cohennoz initié durant l'année 1931 par les cours d'eaux du Nant Eveltaz et de la Fontaine de Diat qui se sont entièrement infiltrés dans la zone du glissement, et ont cessé de s'écouler en surface jusqu'au fond de la vallée de l'Arly. On pourrait citer aussi la zone de Malatrait où un important drainage des terrains a été rendu nécessaire dans les années 1970-1975 pour stabiliser une portion de versant.

Préalablement aux campagnes d'échantillonnage, il avait été fait une reconnaissance de terrain fin juillet 2021 (reconnaitances poursuivies ensuite en parallèle des campagnes d'échantillonnage lors de l'ensemble des visites de terrain). Elle avait montré, que dans la très grande majorité des talwegs, un écoulement des eaux de surface était présent, d'autant plus important en débit que le talweg est prononcé mais il a été trouvé aussi des écoulements à flanc de versant suivant la pente entre deux talwegs, ou débordant de son lit (ceci en masse comme à Malatrait ou à Granges Neuves où il a dû être recanalisé pour éviter à la RD71 des ruissellements intempestifs).

Plusieurs de ces cours d'eau sont même accompagnés lors des forts débits d'un charriage fréquent de matériaux (Figure 24 et Figure 25) : 4 cours d'eaux sont ainsi signalés par la mairie de Cohennoz (Nant des Roches, cours d'eau entre Panissats et Nant Cortay, Nant Cortay et cours d'eau occasionnel à l'ouest des Grangettes et amont de la RD71).



FIGURE 24 : Chariage constaté des eaux d'écoulement, sur un cours d'eau pérenne (Nant de Roches en photo de gauche) ou provisoire comme à l'ouest des Grangettes (photo de droite)

On note, à l'opposé, plusieurs talwegs prononcés sans aucun écoulement pérenne observé de 2021 à 2023 (Figure 25) :

- l'un en amont de la RD71 à l'ouest de la zone instable de Benessin à Malatrait à proximité (moins de 30 m) d'une zone où la route est affectée par une nette marche de décrochement ;
- deux autres talwegs dans le secteur de Diat en amont proche de la zone d'extension du glissement de Cohennoz de 1931.

Dans les deux cas, on peut penser que ces anciens talwegs aient joué un rôle dans le déclenchement des instabilités de versant mais aussi que les instabilités de versant ont modifié les écoulements au sein du versant et rendus fossiles ces anciens talwegs.

Plusieurs autres talwegs secondaires signalés à écoulement temporaire sur la carte IGN ont été également reconnus sans y observer d'écoulements (Figure 25).

D'une année (2021) sur l'autre (2022), on est passé d'une situation de saturation très avancée et assez généralisée à une situation beaucoup plus tempérée, avec des ruissellements moindres et circonscrits aux axes de talweg. Sur deux secteurs distincts d'Ugine, les changements constatés sont radicaux :

- à Malatrait, le débordement généralisé des eaux hors de l'axe du talweg (en amont de la zone drainée, entre 800 et 1000 voire 1050 m NGF) a fait place à une quasi disparition des écoulements superficiels ;
- Sur le chemin de Biolay à mi-pente sous la RD71 à Ugine, un ruisseau à fort débit qui incisait fortement les terrains de surface et inondait en juillet 2021 les abords de versant à hauteur du chemin a fait place en 2022 à un talweg totalement sec.

De manière plus courante, nombre des zones humides largement épanouies en 2021 ont été retrouvées sèches en 2022 aux mêmes périodes de l'année (fin de printemps/ début d'été).

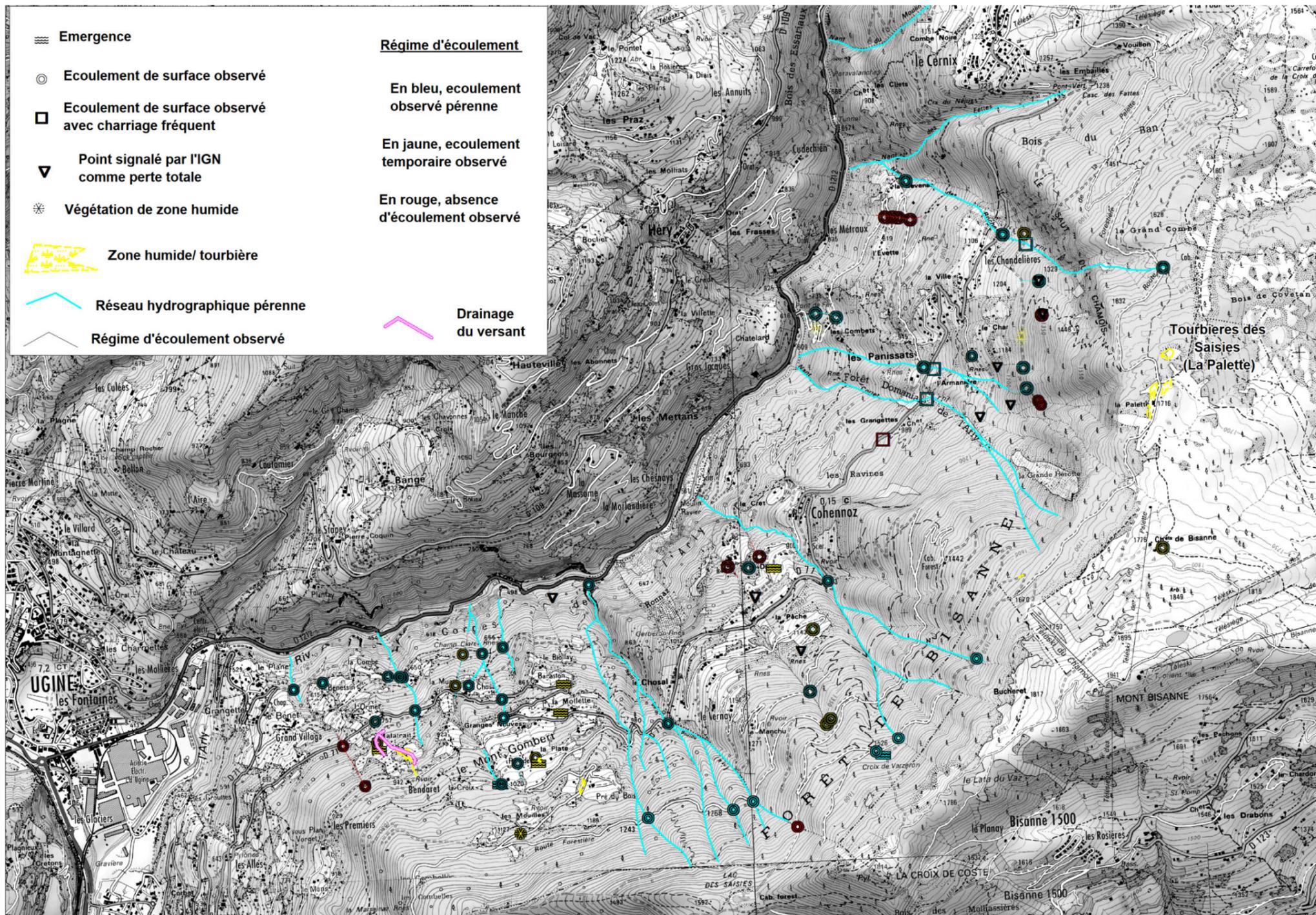


FIGURE 25 : Observation des écoulements de surface et de leurs variations au fil du temps

En ce qui concerne les apparentes pertes signalées sur les cartes IGN, aucune n'a été confirmée comme telle sur le terrain : pour la plupart, elles sont situées dans des zones de fortes pentes, souvent sans écoulement ni en amont, ni en aval, ou sans interruption de l'écoulement venant de l'amont qui se poursuit plus aval au même débit. Comme ces apparentes pertes changent en plus d'une version de scan25 à l'autre, il se confirme tant dans les documents que sur le terrain qu'il s'agit juste là d'erreurs de tracés du réseau hydrographique sur les cartes IGN.

Par contre, des pertes ponctuelles ont bien été observées sur les versants de Cohennoz par les chasseurs (information de la mairie de Cohennoz) mais il s'agirait de pertes non localisées de manière pérenne mais justes provisoires sur des écoulements +/- diffus.

On notera aussi plusieurs observations de murs déformés par la poussée des versants saturés tant en fond de vallée (fin juillet 2021), jamais observée à une telle intensité durant l'été, que sur des ouvrages en haut de versant (juin 2022) dans des conditions plus attendues (sortie de période nivale).

Campagnes physicochimiques et autres mesures complémentaires associées

Deux campagnes d'échantillonnages et d'analyses physico-chimiques ont été réalisées dans les gorges de l'Arly sur le versant en rive gauche, d'abord en situation dite de Basses Eaux à la mi-septembre 2021 puis en situation proche des Hautes Eaux en fin mai /début juin 2022⁷. Ce sont 12 points (Figure 26) qui ont été mesurés à chacune des deux campagnes (dont 8 communs aux deux campagnes) :

- 7 points de prélèvements en eaux souterraines et 5 en eaux superficielles à la mi-septembre 2021 pour la campagne de Basses Eaux ;
- 8 points de prélèvements en eaux souterraines et 4 en eaux superficielles en fin mai 2022 pour la campagne de Hautes Eaux.

⁷ Mission retardée du fait d'une contamination au Covid19



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

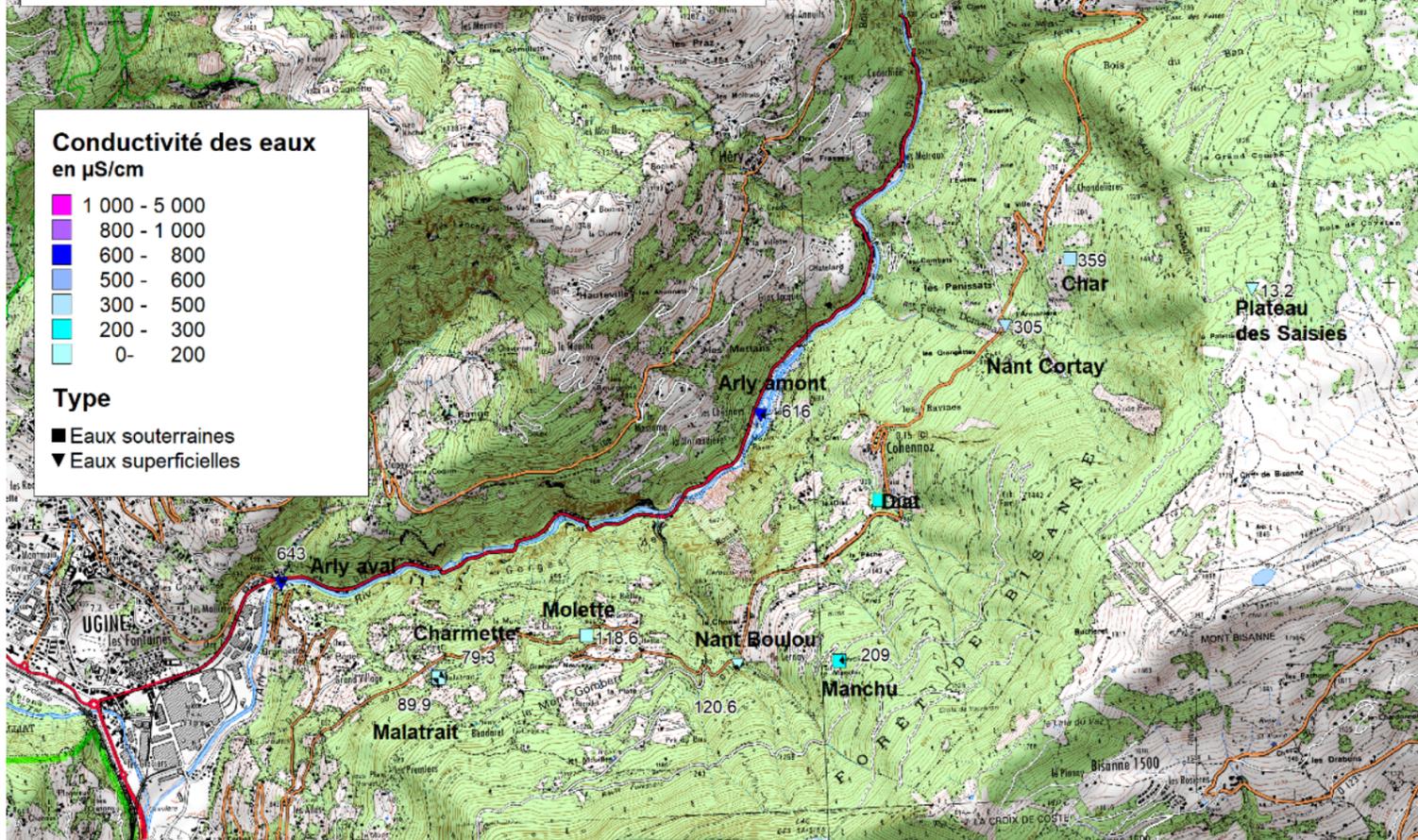


Avec le soutien de

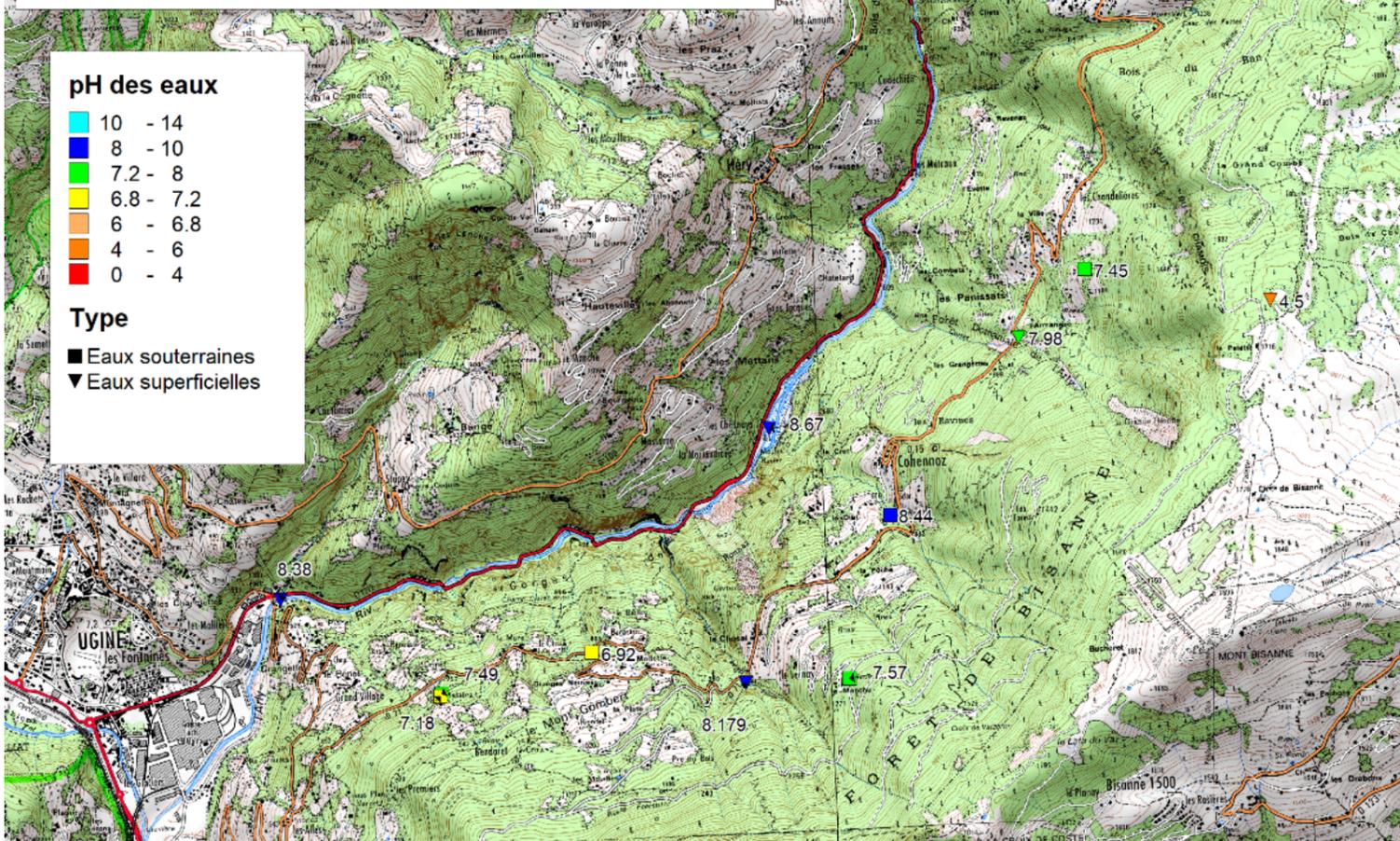


FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

CAMPAGNE DE BASSES EAUX (SEPTEMBRE 2021)



CAMPAGNE DE BASSES EAUX (SEPTEMBRE 2021)





UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de Développement Régional



RÉGION SUD
PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR



l'Europe s'engage
le Massif Alpin

Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL D'AMÉNAGEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

CAMPAGNE DE BASSES EAUX (SEPTEMBRE 2021)

Températures

- 14 - 16
- 12 - 14
- 10 - 11
- 9 - 10
- 7 - 9
- 5 - 7

Type

- Eaux souterraines
- ▼ Eaux superficielles

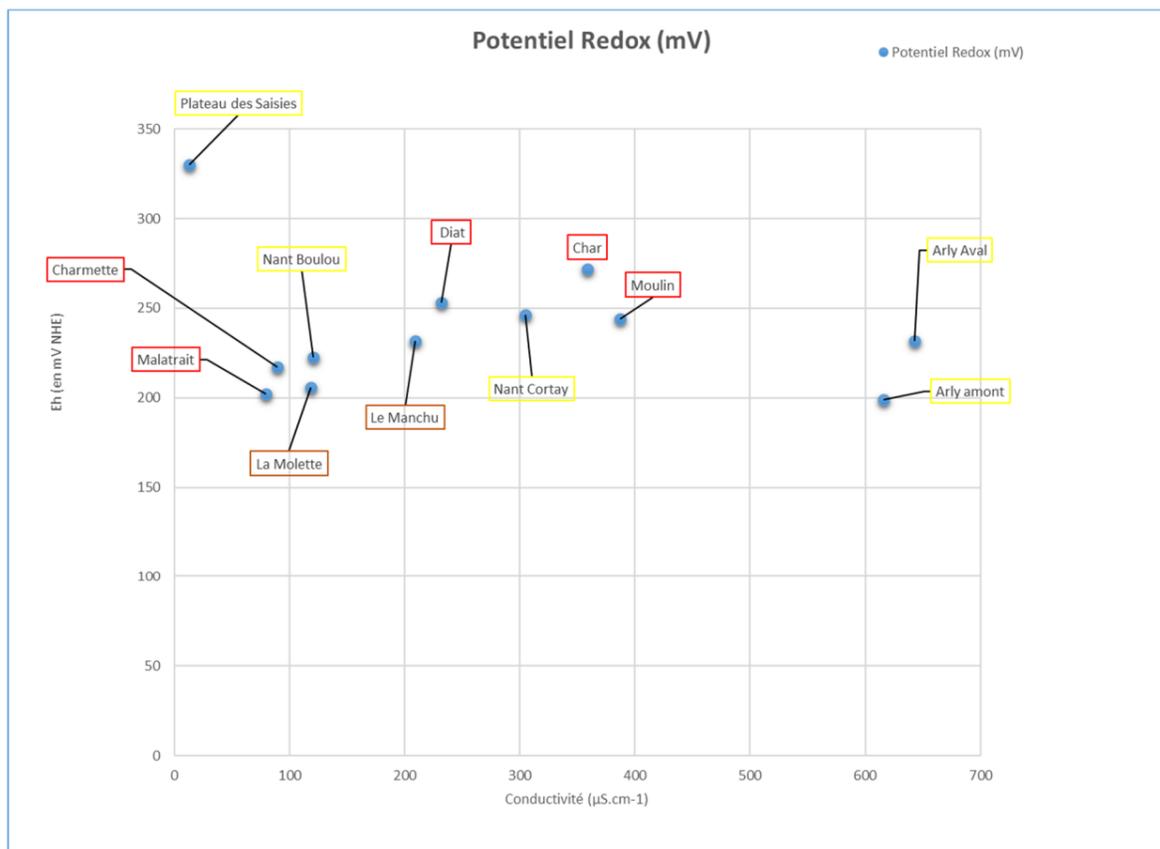
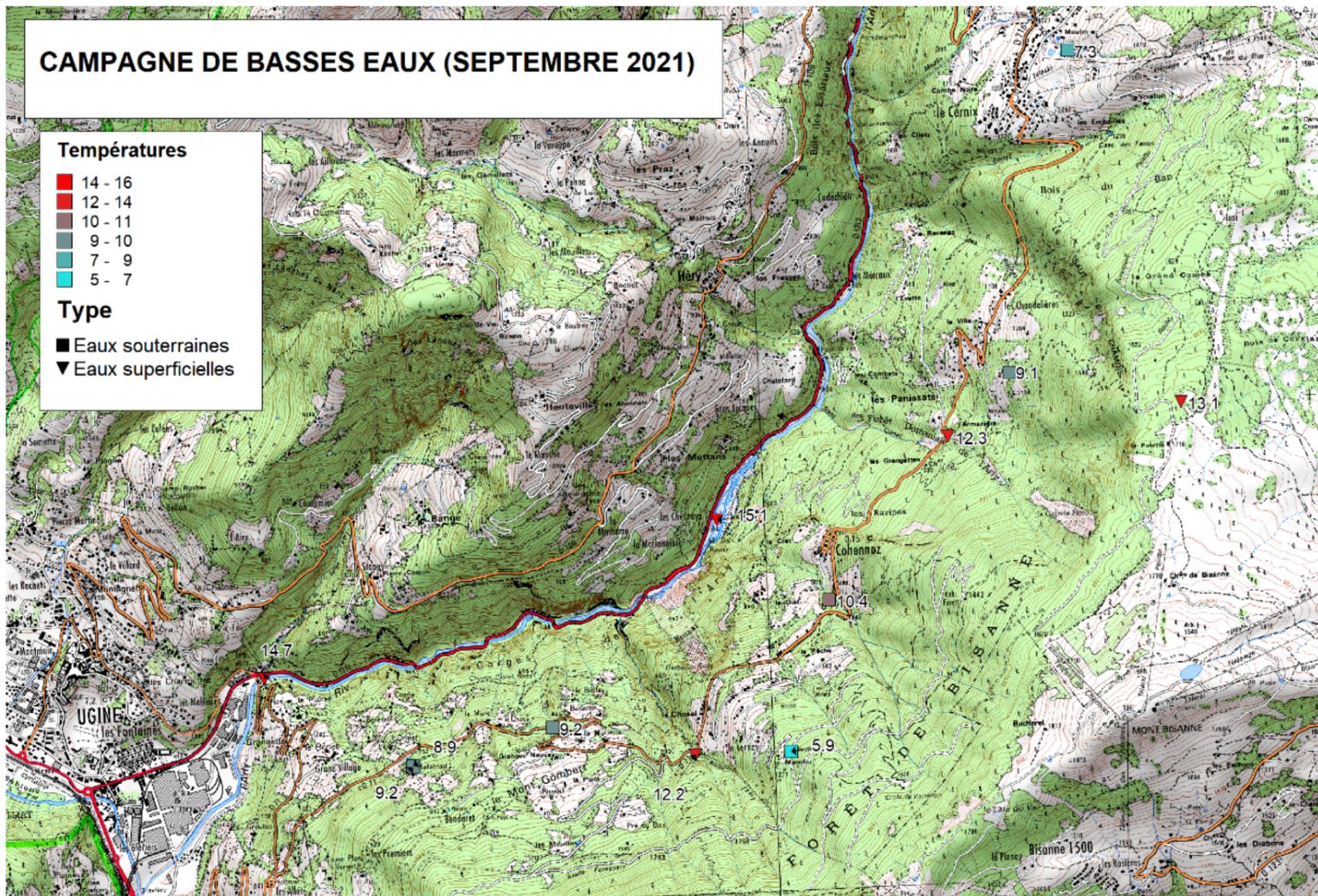


FIGURE 26 : Mesures physicochimiques à la mi-septembre 2021, en contexte annuel dit de Basses Eaux

À la mi-septembre 2021 (Figure 26), les températures des eaux sont plutôt chaudes à l'instar des températures extérieures de l'air, y compris pour les eaux souterraines, à l'exception de celle du captage du Manchu (5,9 °C).

Le pH des eaux est neutre, légèrement basique dans les eaux superficielles (et a contrario modérément acide sur la tourbière du plateau des Saisies, comme attendu).

La conductivité mesurée sur les eaux du versant de l'Arly entre 80 et 400 µS/cm est conforme à celles d'eaux de montagne à minéralisation +/- réduite. Compte tenu de l'importance du bassin versant en amont des gorges, la minéralisation en rivière Arly est significativement plus marquée (600 -650 µS/cm) que sur celle du Guil (moitié moins) plus proche de la tête amont de bassin versant.

Les résultats des analyses chimiques sont présentés⁸ dans le tableau suivant (Figure 27) :

Nom du prélèvement	HCO3	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO3	SO4	Al	Fe (Fer)	Li	Silicium	Sr
	(Bicarbonate)	(Calcium)	(Magnésium)	(Sodium)	(Potassium)	(Chlore)	(nitrate)	(Sulfate)	(Aluminium)	(µg/l)	(Lithium)	(mg/l)	(strontium)
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l
ARLY AMONT (ESU)	163.6	107	17	5.8	1	5.2	1.3	202	528	312	-	2.848	--
ARLY AVAL (ESU)	153.8	95	17	6.2	< 1 (LQ)	5.1	0	181	275	235	14.6	2.848	1212
NANT BOULOU (ESU)	51.6	14	5.7	1.7	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.96	12	205	214	-	2.844	-
DIAT (ESU)	116.3	28	12	1.8	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.7	23	49	56	5.5	3.119	130
NANT CORTAY (ESU)	146.3	35	18	1.2	1.5	1.2	0.99	35	582	397	-	3.02	-
SAISIES (ESU)	< 15 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	< 1 (LQ)	70	388	0.3	0.205	0
MOULIN (ESOU)	241.2	55	21	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	1.7	15	9	3	2.8	1.979	245
CHAR (ESOU)	135.5	37	24	2.7	2.3	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	76	3	< 1 (LQ)	-	4.89	-
MANCHU (ESOU)	98.2	25	10	1.7	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	25	2	< 1 (LQ)	-	3.105	-
CHARMETTE (ESOU)	22.9	8	4.2	2.1	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	22	< 2 (LQ)	2	1.4	4.289	30
MALATRAIT (ESOU)	21.4	7	3.7	2	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	17	< 2 (LQ)	< 1 (LQ)	2.1	4.394	26
LA MOLETTE (ESOU ^a)	45.1	10	5	3.6	< 1 (LQ)	2.6	1	11	< 2 (LQ)	1	-	3.536	-

FIGURE 27 : Teneurs chimiques mesurées sur les eaux échantillonnées lors de la campagne de mi septembre 2021 dans les gorges de l'Arly en contexte annuel dit de Basses Eaux

⁸ Les ions fluorures et (ortho)phosphates ont été également dosés mais aucun échantillon ne dépasse les limites de quantification, respectivement de 50 puis 5 µg/l.

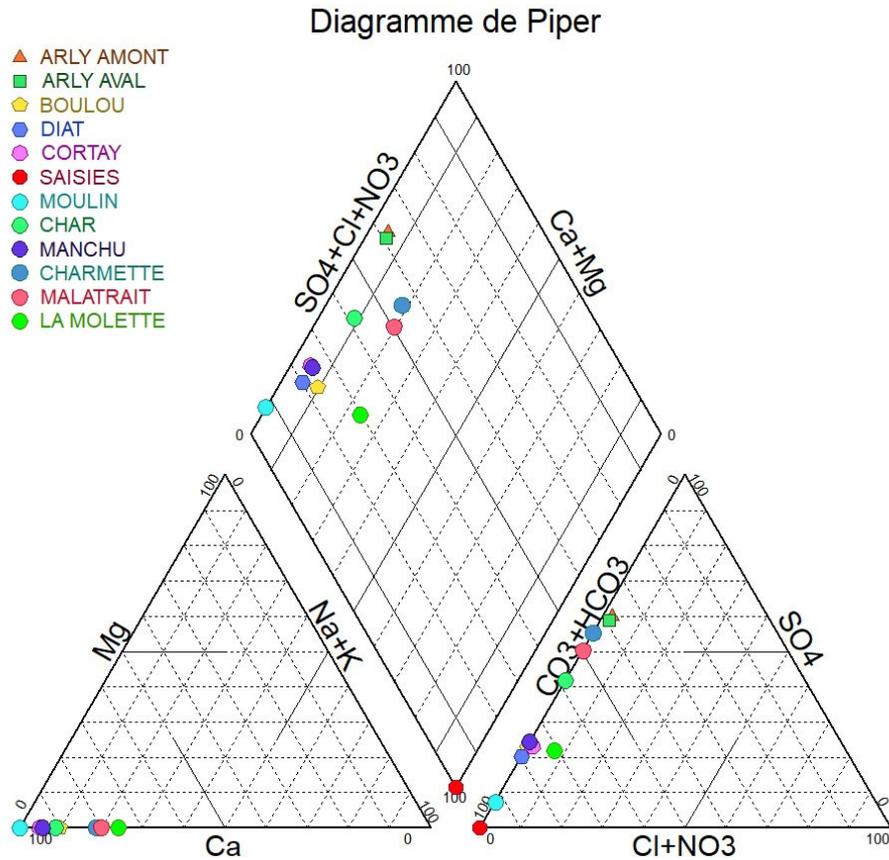


FIGURE 28 : Diagramme de Piper relatif à la campagne de mi-septembre 2021 dans les gorges de l'Arly en contexte annuel dit de Basses Eaux

À l'exception notable du point de plateau des Saisies peu minéralisé, acide et caractéristique d'un milieu de type tourbière, les analyses physicochimiques montrent des eaux peu contrastées de type bicarbonaté calcique (Ca-HCO₃) ou mixte, avec un peu de sulfate, assez proches au final de celles mesurées sur le secteur du Guil.

Aucune signature hydrogéochimique très particulière liée à l'aquifère triasique résiduel (captage de Moulin dans un contexte possiblement mixte alluvial –Trias) n'est observée. Quant à la signature hydrogéochimique très contrastée des eaux de tourbières, elle ne constituerait visiblement qu'un apport d'alimentation peu conséquent, en absence d'impact constaté en aval.

Schöeller-Berkaloff Arly

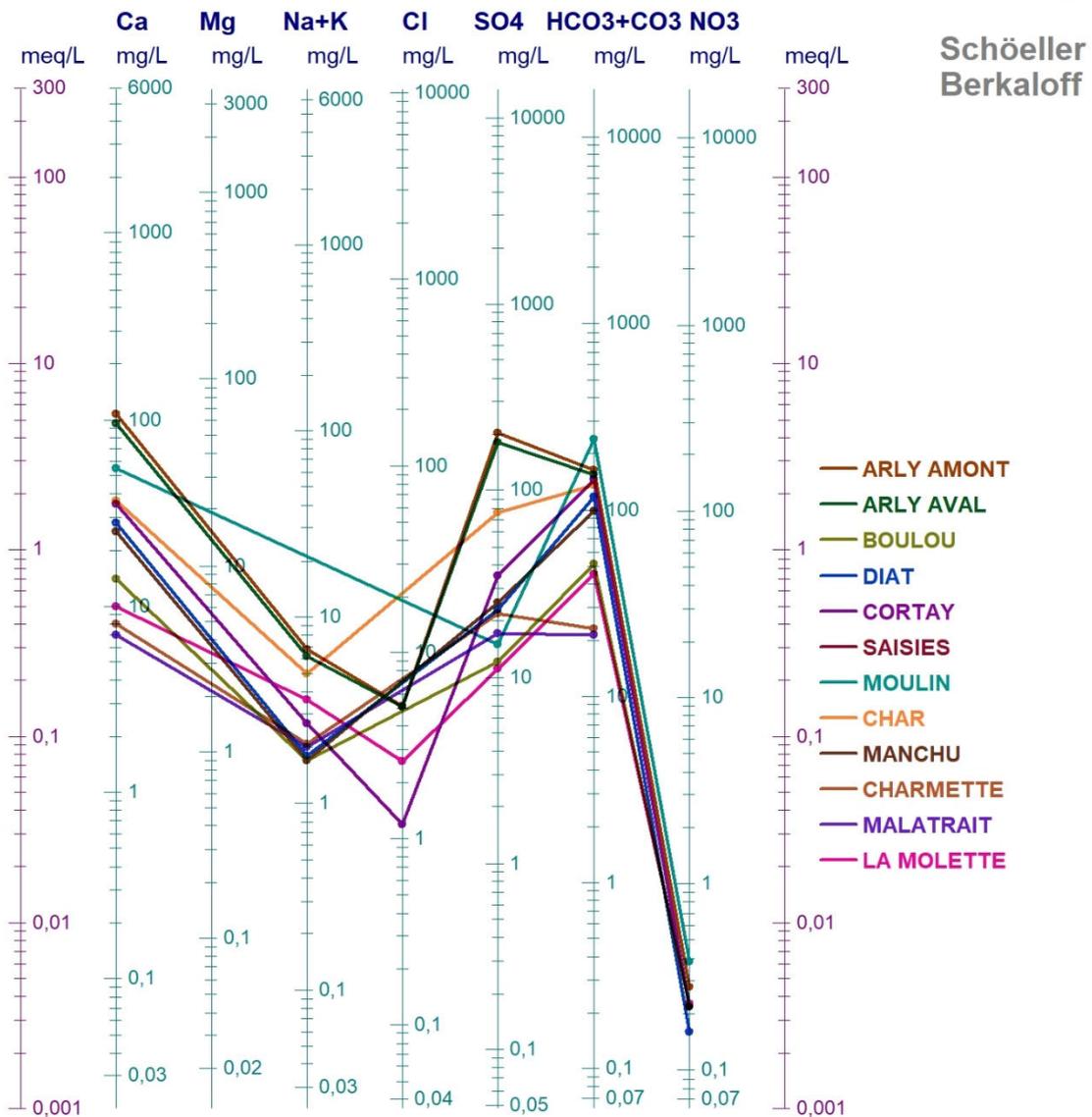


FIGURE 29 : Représentation Chöller-Berkalof relative à la campagne de mi-septembre 2021 dans les gorges de l'Arly en contexte annuel dit de Basses Eaux

L'examen des résultats (Figure 30) en analyse en composantes principales (ACP) montre une représentativité selon les pôles F1 (centré autour des variables Calcium et HCO₃) et F2 (centré autour de la silice) atteignant 58,5 %.

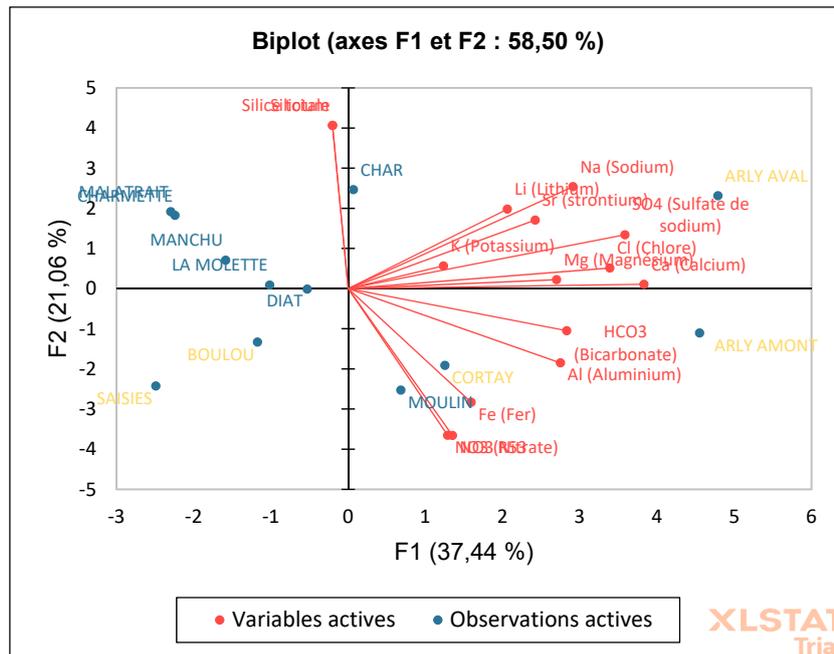


FIGURE 30 : Analyse en Composantes Principales de la campagne Basses Eaux d'octobre 2021

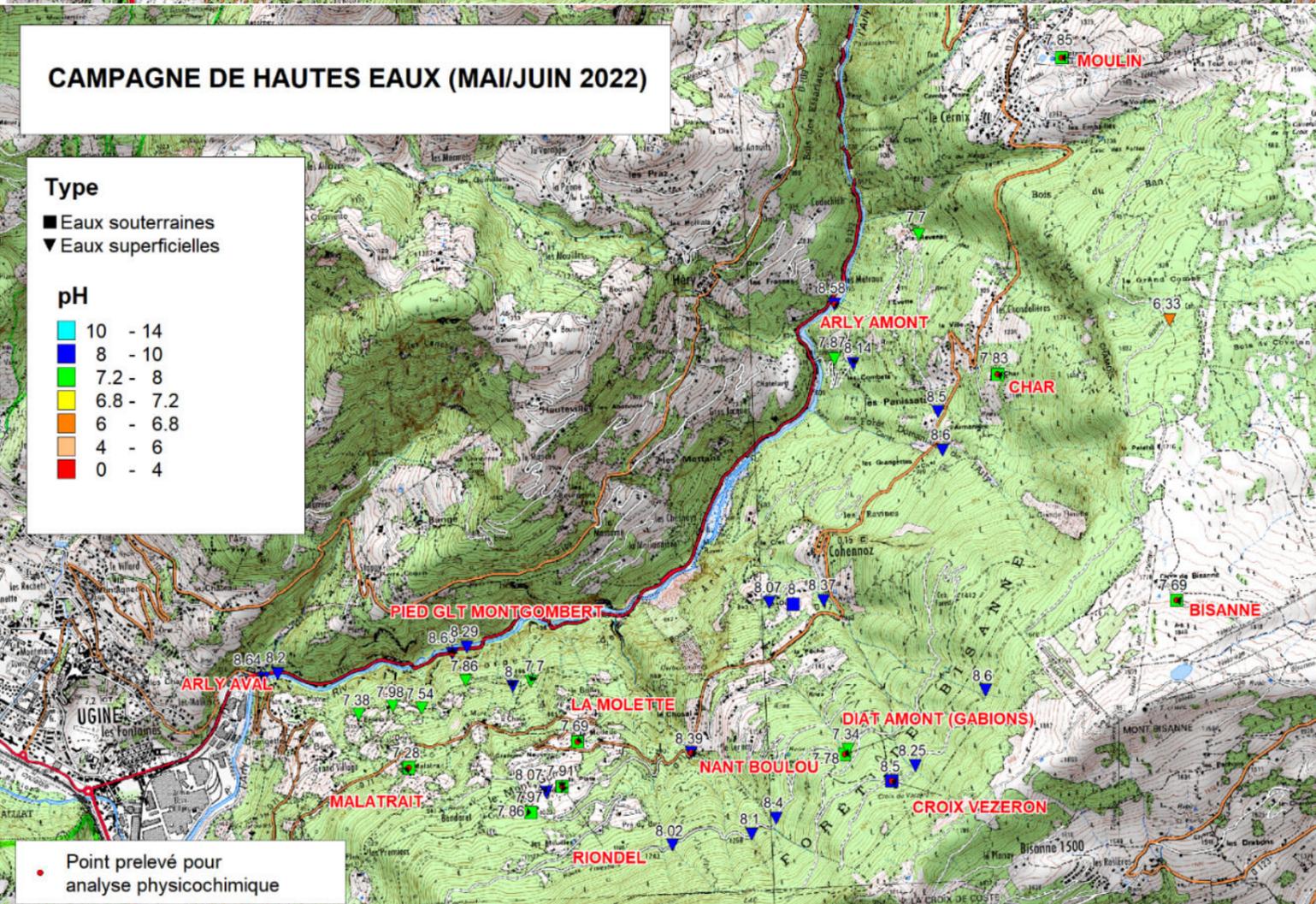
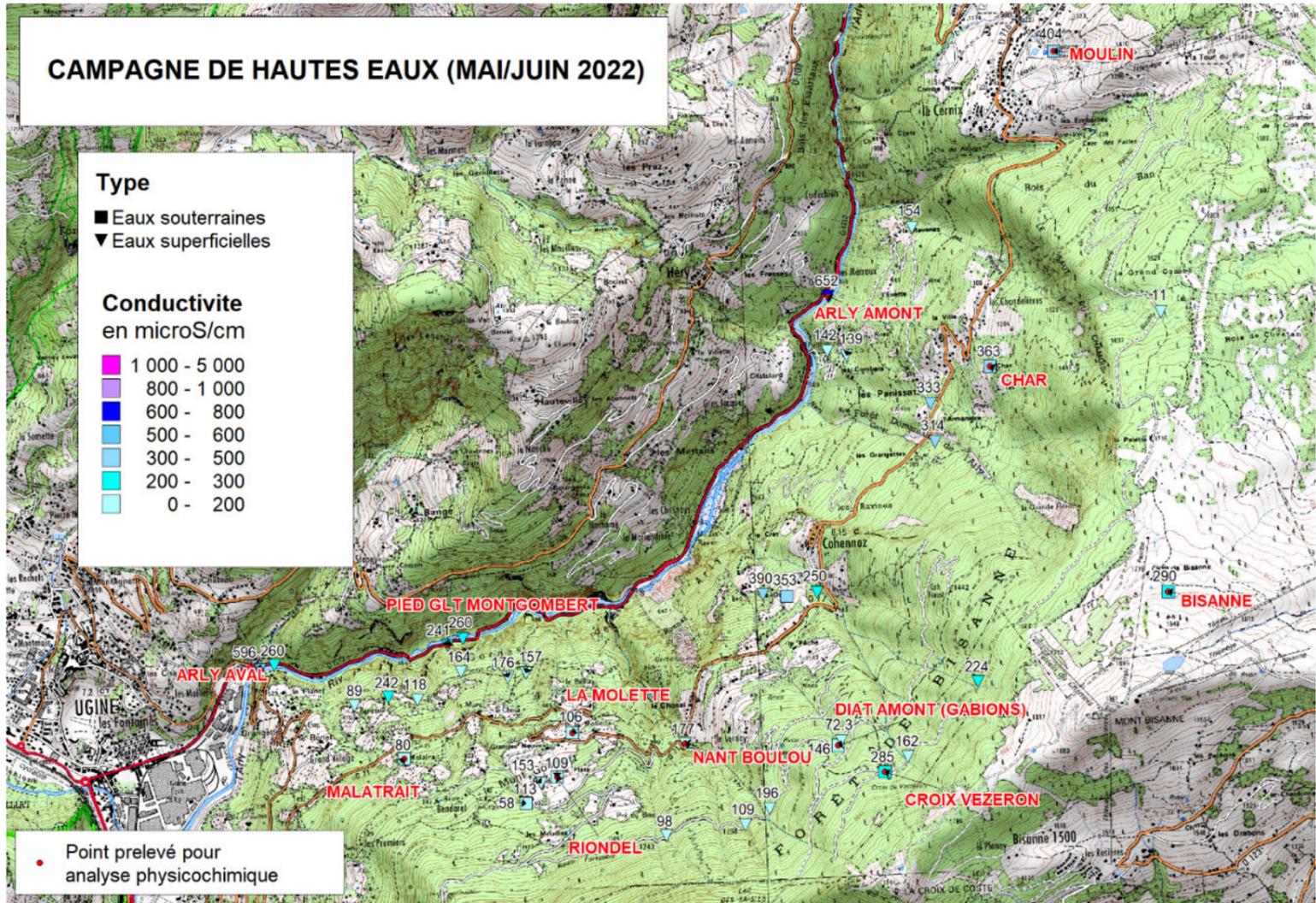
On note un relatif éparpillement (Figure 30) des points d'observation dans les eaux superficielles dans 3 des 4 quadrants et à l'opposé un regroupement des points d'observation dans les eaux souterraines dans le même quadrant (à l'exception de Moulin en lien avec l'aquifère triasique).

La campagne de Hautes Eaux de fin mai /début Juin 2022 a donné des résultats sensiblement équivalents. Les reconnaissances antérieures (Figure 31) ont permis une couverture élargie de mesures physicochimiques au-delà des seuls douze points de prélèvements.

Les températures (Figure 31) varient alors entre 5,6 et 16,8⁹° C. Les eaux les plus froides concernent surtout la partie haute du versant déneigée depuis au moins 1 bon mois en général (les dernières plaques résiduelles de neiges sur la butte de Bisance étant en train de disparaître), telle l'arrivée d'eaux souterraines froides constatée dans le secteur Manchu –Diat Amont.

Le pH varie entre 6,33 (réseau hydrographique en aval d'une zone de tourbière sur la bordure de plateau des Saisies) et 8,64 (eaux de l'Arly en aval).

⁹ Les eaux mesurées plus chaudes concernent, dans des lieux bien ensoleillés, une source quasiment tarie sur Diat et le pied du glissement de Montgombert (Benessin) en fond de gorges, le long de la RD1212.





UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
le Massif Alpin

Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

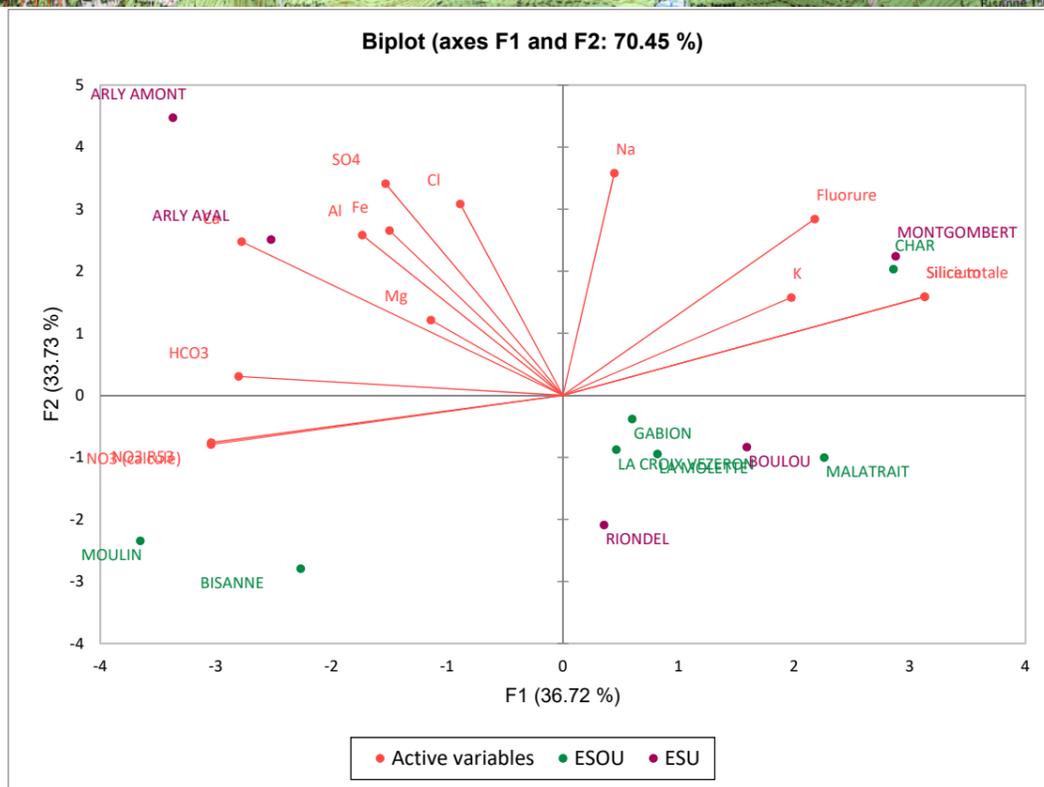
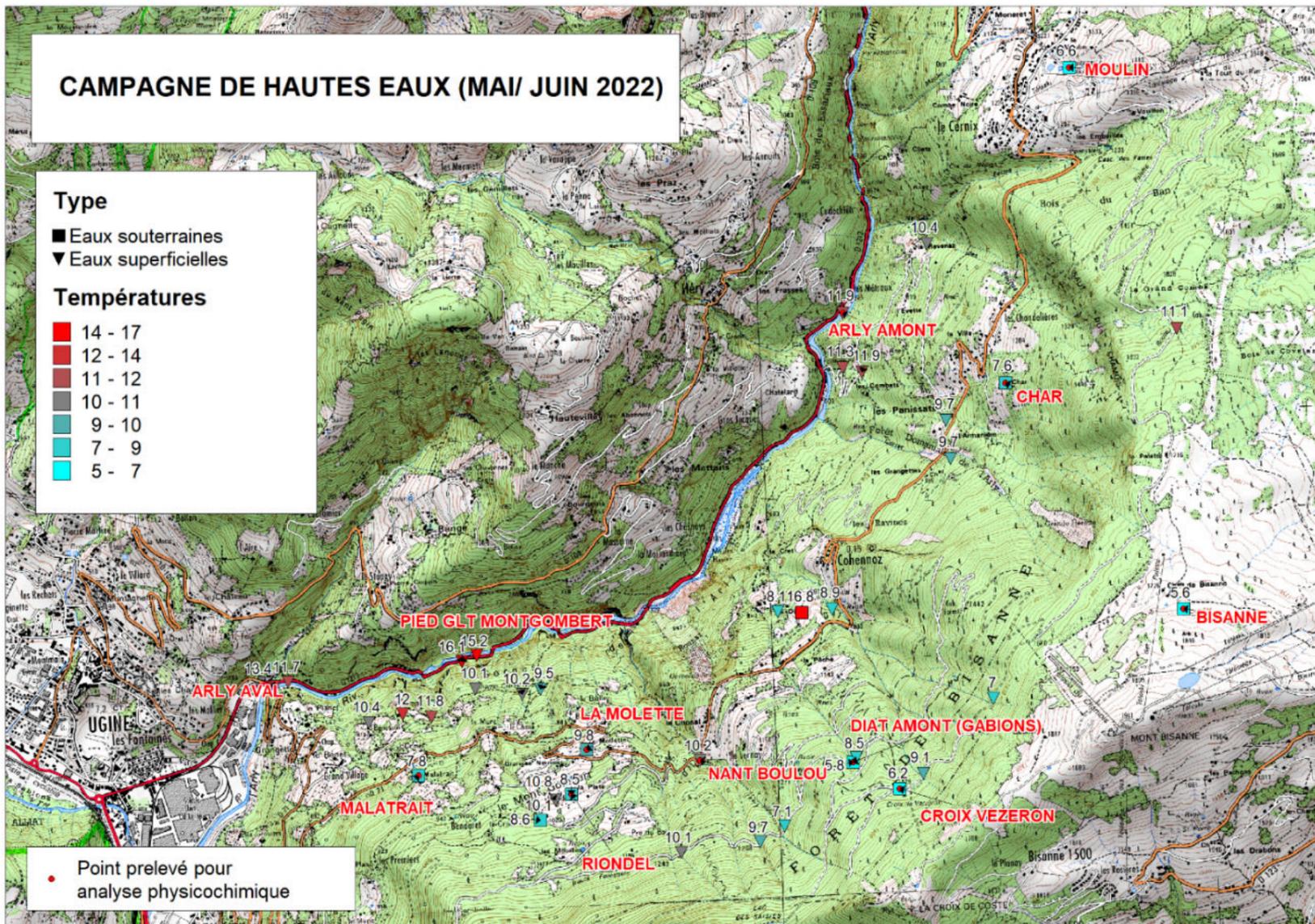


FIGURE 31 : Mesures physicochimique en mai-juin 2022, en contexte annuelle dit de Hautes Eaux et analyse en ACP

La conductivité mesurée (Figure 31) sur les eaux du versant de l'Arly varie entre 58 et 400 $\mu\text{S}/\text{cm}^{10}$; soit une minéralisation logiquement un peu moindre qu'en septembre 2021, ce qui est normalement attendue en période post fonte nivale. Les eaux de l'Arly (amont comme aval) restent à nouveau sensiblement plus minéralisées que sur le versant (600 à 650 $\mu\text{S}/\text{cm}^{11}$).

Nom du Prélèvement	Type	HCO ₃	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄	Fluorures	Al	Fe (Fer)	Li	Silicium	Sr
		(Bicarbonate) mg/l	(Calcium) mg/l	(Magnésium) mg/l	(Sodium) mg/l	(Potassium) mg/l	(Chlore) mg/l	(nitrates) mg/l	(Sulfates) mg/l	mg/l	(Aluminium) $\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$	(Lithium) $\mu\text{g}/\text{l}$	mg/l	(Strontium) $\mu\text{g}/\text{l}$
ARLY AMONT	ESU	169	105	14	4.3	< 1 (LQ)	4.3	1.5	200	0.098	629	225	2.997	1417	9.3
ARLY AVAL	ESU	164.8	92	15	4.1	< 1 (LQ)	4.7	1.5	173	0.096	109	84	2.49	1128	8.3
BOULOU	ESU	87.1	20	8.5	1.8	< 1 (LQ)	0	< 0.5 (LQ)	22	0.08	9	9	3.678		
LA CROIX VEZERON	ESOU	145.8	29	17	1.5	< 1 (LQ)	0	< 0.5 (LQ)	33	0.076	< 2 (LQ)	1	2.839	116	5.2
BENESSIN	ESU	86.5	29	8.8	3.9	1	4.4	< 0.5 (LQ)	44	0.19	22	21	5.058	131	6.9
BISANNE	ESOU	188.6	44	9.8	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	1.3	1.3	< 0.05 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.957	50	0.4
MOULIN	ESOU	248.6	52	20	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	3	15	< 0.05 (LQ)	6	3	2.047	241	2.6
CHAR	ESOU	137.5	34	23	2.5	2.1	< 1 (LQ)	< 0.5 (LQ)	78	0.22	< 2 (LQ)	22	5.002	181	10.4
GABION	ESOU	67.7	16	6.9	1.3	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.55	20	0.056	208	145	3.616		
RIONDEL	ESU	51.5	11	5.2	1.4	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.87	14	< 0.05 (LQ)	5	6	2.755		
MALATRAIT	ESOU	22.2	6	3.4	1.8	< 1 (LQ)	< 1 (LQ)	0.77	18	0.089	< 2 (LQ)	< 1 (LQ)	4.684	28	1.9
LA MOLETTE	ESOU	48.6	10	4.9	2.5	< 1 (LQ)	1.7	1.5	11	0.058	4	2	3.967	40	1.4

FIGURE 32 : Teneurs chimiques mesurées sur les eaux échantillonnées lors de la campagne de fin mai - début juin 2022 dans les gorges de l'Arly en contexte annuel dit de Hautes Eaux

Les analyses chimiques faites (Figure 32) sur les douze échantillons prélevés (dont 8 communs aux 2 campagnes) ne montrent pas davantage de variations prononcées (cf. diagramme de Piper en Figure 33), tant dans l'équilibre chimique général, que pour un point de prélèvement en particulier, voire juste sur un des paramètres en particulier.

Avec un second point échantillonné dans les buttes résiduelles (Bisanne en plus de Moulin), on note une certaine discrimination de l'aquifère triasique par rapport à l'aquifère des micascistes, tant sur le diagramme de Piper, que dans l'ACP faite (même quadrant spécifique aux 2 points) plus en lien avec les ions hydrogénocarbonates qu'avec les sulfates (comme initialement pressenti de manière erronée).

¹⁰ Sur le réseau hydrographique en aval d'une zone de tourbières sur la bordure de plateau des Saisies, la conductivité est limitée à 11 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soit encore moins que la valeur mesurée dans la tourbière lors de la précédente campagne.

¹¹ Le point Arly amont a bien été cette fois ci reporté en amont des gorges pour une minéralisation un peu élevée.

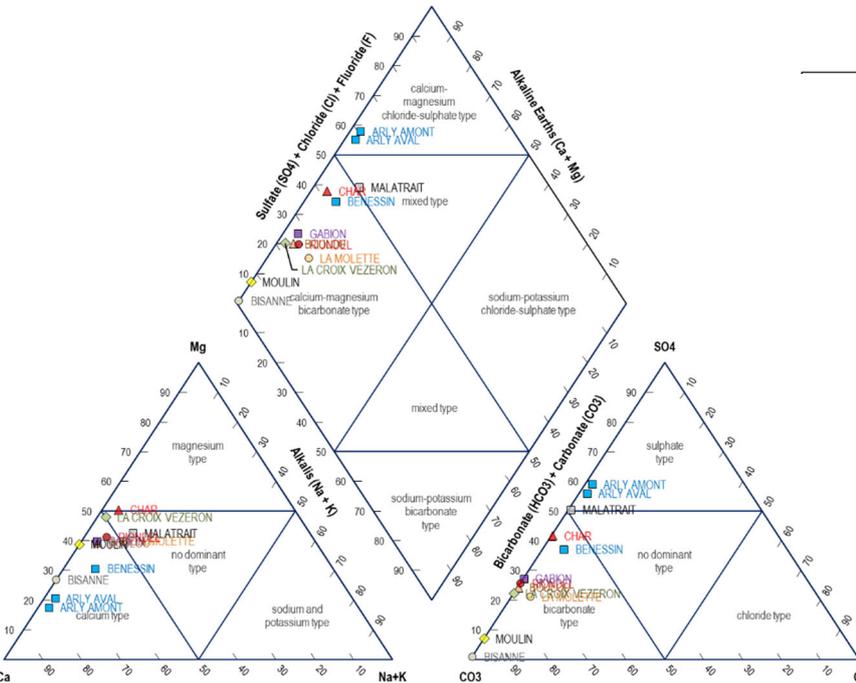


FIGURE 33 : Diagramme de Piper relatif à la campagne de mi septembre 2021 dans les Gorges de l'Arly en contexte annuelle dit de Basse Eau

Géophysique sur le site du glissement dit de Montgombert

Ce glissement est en situation perché par rapport au fond des gorges. Les apports d'eau contribuent à la fois à la déstabilisation du versant, au niveau de la tête de versant, et aussi, par imbibition des masses glissées, sous une forme davantage fluide (glissement-coulée), et à l'origine d'une propagation accrue (en terme de vitesses comme de distances) du versant instable en situation perchée jusqu'en pied de versant, jusqu'à atteindre la chaussée de la RD1212, et la présence quasi continue d'écoulements de surface dans le couloir de propagation.

Le glissement a fait l'objet dans son corps principal d'auscultations géophysiques par polarisation provoquée suivant 4 profils de mesure (3 profils // et un quatrième perpendiculaire et dans le sens de la pente), mesures faites à trois reprises en mars 2021, septembre 2021 et enfin mai 2022.

Ces mesures géophysiques permettent de détecter dans le sol des zones davantage saturées en eau et de localiser les secteurs d'écoulements préférentiels dans les sols (figure 31). Les résultats obtenus ont été ensuite comparés aux déplacements du versant détectés par imagerie.

L'approche qui a été fructueuse, reste encore expérimentale, et à confirmer dans sa pertinence sur d'autres sites. Elle a permis d'aboutir à un article scientifique en cours d'examen avant publication¹².

¹² Carrier A., Meric O., Bottelin P. (2023) Characterizing Landslide dynamics from time-lapse time domain induced polarization and ground based imaging, case study of the Montgombert landslide (French Alps), submitted to Landslides Review.



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



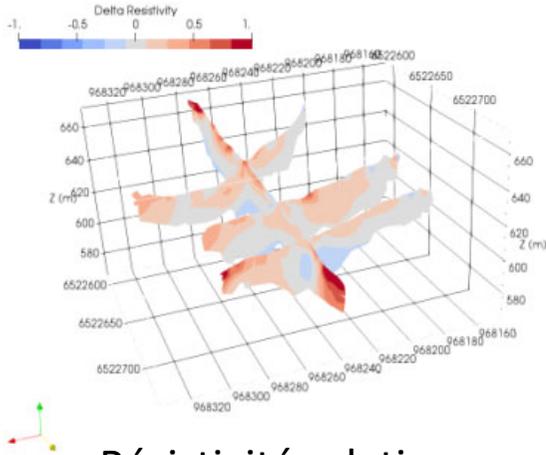
Avec le soutien de



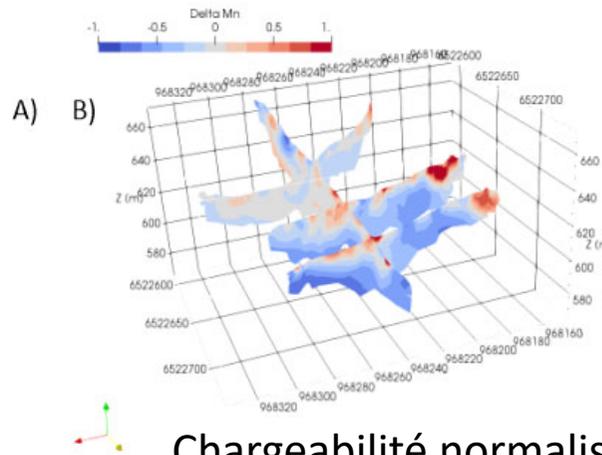
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

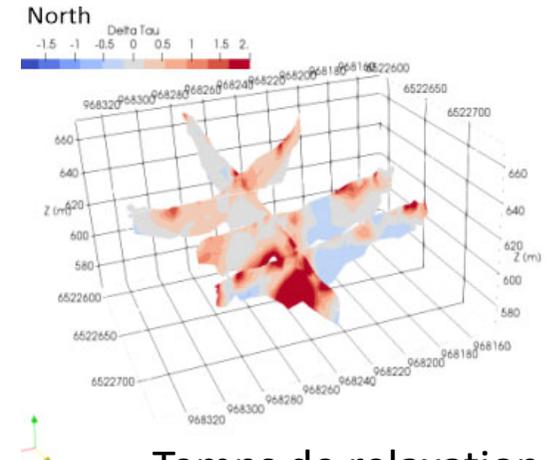
EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES



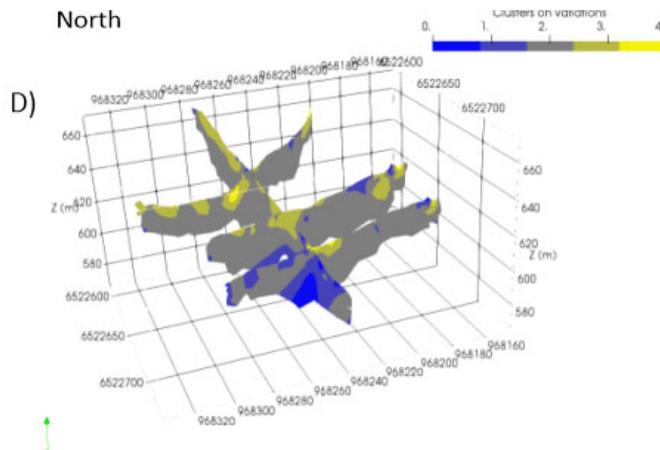
Résistivité relative



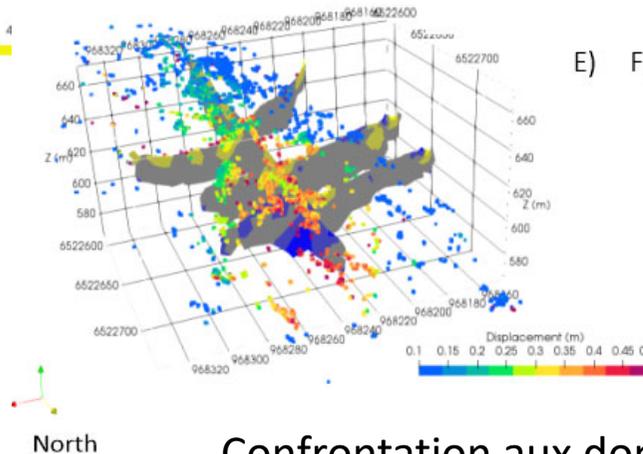
Chargeabilité normalisée



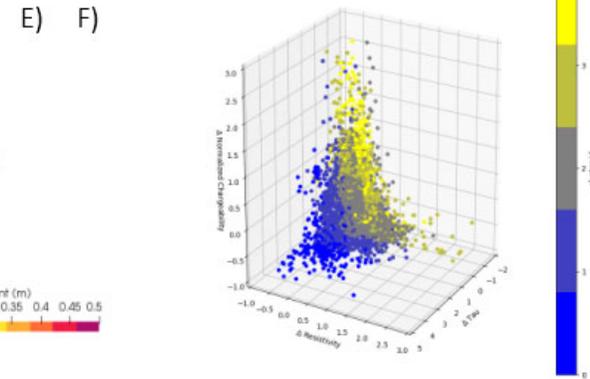
Temps de relaxation moyen



Résultat du clustering



Confrontation aux données de déplacement



Géosciences pour une Terre durable

brgm





UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



Avec le soutien de



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Seuils hydroclimatiques

Il a été essayé d'établir des seuils hydroclimatiques en inventariant les mouvements de terrains passés et en mettant en lien ces événements avec les données climatiques disponibles avec les dates d'activité des mouvements de terrain.

Il a été recensé 173 événements (mouvements de terrain ou épisodes de crue) sur 273 ans, dont près de 53 événements (dont 28 glissements de terrain) sur les gorges de l'Arly entre 1959 et 2022. Plus il s'agit d'événement ancien, moins on dispose en général d'informations sur le mouvement de terrain (intensité, dates précises d'activité). Pour un grand nombre d'entre eux, l'intensité et les dates d'activité sont bien plus, au final, une évaluation qu'une donnée avérée. La recherche de seuils hydroclimatiques sur ce nombre plutôt élevé d'événements mais au final insuffisamment bien caractérisé en termes de périodes d'activités n'a pas été concluante.

Par contre, sur les suivis des déformations de versant à hauteur du site de Montgombert, il a été relativement aisé de déterminer des seuils hydroclimatiques représentatifs de l'activité du site. On notera toutefois que ces seuils hydroclimatiques perdent un peu de fiabilité au fur et à mesure que la dégradation du versant progresse au fil des années (rapport BRGM\RP-72995-FR¹³ dédié, fourni dans les livrables du projet MIROIR).

Bilan pour l'Arly

Contrairement au Guil, où le prisme de réflexion a été centré autour d'un seul site (glissement du Pas de l'Ours et abords sur à peine 2 km linéaire d'un flanc de vallée), sur l'Arly les compartiments instables dans la zone des gorges de l'Arly étendue sur 14 km, sont multiples, dont certains plus ou moins emboîtés, et au comportement spécifique à chacun.

Les quelques données et résultats hydrochimiques obtenus restent globalement peu concluants, du fait notamment d'un contexte climatique contrasté entre 2020 et 2022 : une pluviométrie double sur le cycle hydrologique 2020-2021 par rapport à celui du cycle hydrologique 2021-2022, suffit déjà à expliquer les écarts observés entre les campagnes de mesure, pour l'essentiel du moins.

Au-delà de ces aspects très conjoncturels, il est observé sur Ugine, une zone où l'eau souterraine semble présente en abondance jusqu'à déborder en surface au moins temporairement sur le flanc de versant de Montgombert entre 800 et 1000 voire 1050 m NGF. Plus en amont, sans doute du fait d'un réseau hydrographique moins développé jusqu'en bordure du plateau des Saisies, cette abondance des eaux en surface disparaît, malgré la butte aquifère de Bisanne.

¹³ Peruzzetto M., Vallet A. et avec le concours d'Equibey E. (2023). Étude de seuils statistiques de précipitations déclenchant ou aggravant la stabilité des versants du val d'Arly (Projet MIROIR).



Géosciences pour une Terre durable

brgm





Avec le soutien de



FONDS NATIONAL D'AMÉNAGEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Alors que cette dernière domine en situation perchée, à la fois la ligne de crête vers l'ouest (Croix de Coste, lac des Saisies et au-delà), la tête de versant au-dessus du glissement de Cohennoz et toute la bordure du plateau des Saisies au-dessus du flanc de versant instable des Panissats.

Comme dans le Guil, on retrouve sinon une saisonnalité marquée des écoulements qui influe directement sur l'activité des glissements, avec un pic d'accélération lors des phases de fonte nivale (ce point étant une constante observée dans toutes les vallées alpines de moyenne et haute altitude soumises à enneigement) et un ralentissement en période estivale.

Bilan général

Les deux sites (Arly et Guil) du projet MIROIR montrent à la fois un certain degré de similitude global en termes de contexte géologique (substrat relativement homogène, avec tout au plus quelques placages morainique), géotechnique (glissement de versant avec activité récurrente surtout en sortie d'hiver), géomorphologique (paléoglissement, vallée encaissée) mais aussi d'importantes différences en terme de lithologie, de cinématique variée d'un glissement de versant à l'autre et de variations climatiques plus ou moins marquées.

Dans les deux cas, il a été observé un fonds hydrogéochimique qui semble ne varier que peu et reste même assez proche d'un site à l'autre. En termes de quantité, les données acquises restent trop partielles et liées de plus aux effets conjoncturels du moment pour pouvoir en tirer à ce stade des conclusions sur les dynamiques d'écoulement et leurs évolutions au fil du temps.

Pour avancer dans cet objectif de compréhension à plus long terme des dynamiques hydrogéologiques et de ces liens avec l'activité des glissements de versant, il pourrait être intéressant sur les gorges de l'Arly, à l'instar de ce qui a été fait récemment sur le glissement du Pas de l'Ours, de réaliser un piézomètre dans le secteur de Montgombert sur Ugine mais également sur le secteur de Panissats pour un suivi sur au moins sur quelques années consécutives. Quant au glissement du Pas de l'Ours, si une phase de réactivation, attendue, devait être suffisamment importante pour que des actions de suivi soient à engager (observations et/ou instrumentation), c'est clairement dans le compartiment est du glissement en amont immédiat de la tête de glissement, dans le secteur le plus actif ces dernières années, que les efforts devraient y être consacrés, malgré la faible accessibilité de la zone (surtout lors de la fonte hivernale, période a priori la plus intéressante à suivre).



Géosciences pour une Terre durable

brgm

