UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG

Université de Fribourg
Faculté des Sciences
Département des Géosciences
Unité de Géographie

Détermination des taux d'ablation karstique dans le Jura et les Préalpes Suisses à l'aide de mesures aux micromètres. Quelles sont les causes des variations observées ?



THESE DE BACHELOR

Août 2018

Rédigé par :
Adeline Alizé Marro
Route de Mourfrey 19
1724 Le Mouret
adeline.marro@unifr.ch

Superviseur :
Dr. Luc Braillard

Photo de couverture : micromètre sur une des stations de mesure des Morteys
(Luc Braillard, 2017)

Toutes les photos de ce travail sont de l'auteur, sauf indications contraires.

Résumé

Ce travail de recherche reprend une étude sur l'ablation karstique initiée en 1998 par M. Monbaron et L. Perritaz de l'Université de Fribourg. Les premières mesures de cette étude, mise en suspens pendant 17 ans, ont permis d'obtenir des taux d'ablation karstique entre 1998 et 2001 grâce à l'installation de 46 stations de mesures pour micromètres. Ces données initiales sont reprises dans le présent travail et sont complétées par de nouvelles mesures effectuées avec les mêmes micromètres sur 31 des 46 stations installées en 1998. Les sites d'étude abordés dans ce travail se situent dans la région du Jura Suisse (Chasseral, Reuchenette, Cirque des Chenevières) et dans les Préalpes Fribourgeoises (Les Morteys). Les taux d'ablation karstique moyens calculés pour ces régions varient entre 0.005 mm/an et 0.023 mm/an avec une moyenne de 0.013 mm/an. Ce résultat est similaire aux moyennes présentées dans d'autres études sur l'ablation karstique.

En plus d'établir les taux d'ablation karstique sur une longue période de temps, l'objectif de ce travail est également de chercher à déterminer les causes des variations observées dans les taux d'ablation karstique. L'analyse se base sur quatre facteurs principaux influençant la vitesse d'ablation, inspirés de la littérature karstique de Aubert (1969), de Ford et Williams (1996) et Trudgill (1985) : la quantité de précipitations, la lithologie, la présence de végétation et l'exposition de chaque station de mesure. L'interprétation est effectuée à différentes échelles : une interprétation par région et une interprétation globale de tous les taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 2017/18. Cette analyse permet de faire ressortir les causes des variations observées entre les différentes régions et stations de mesures. Les résultats ressortent plusieurs causes principales des variations du taux d'ablation karstique telles que l'orientation de la couche calcaire (dalle ou front de couche), le pendage des couches, la rugosité de la surface, la présence de lapiez et la présence de végétation.

Mots clés : calcaire, karst, taux d'ablation karstique, micromètre, dissolution, variations

Remerciements

J'aimerais remercier tout particulièrement le Dr. Luc Braillard pour sa supervision, ses nombreux conseils et sa disponibilité lors de la réalisation de ce travail ainsi que le Dr. Luc Perritaz pour avoir apporté des précisions sur son étude de 1998 et Florian Lachat pour son aide sur le terrain sans qui il aurait été difficile de trouver toutes les stations de mesure présentes dans ces résultats.

Contenu

Table des figures **5**
Table des tableaux **6**
1. Introduction **7**
1.1. Intérêt de l'étude 7
1.2. Contexte de l'étude 7
1.3. Problématique 8
1.4. Structure du travail 8
2. Théories, matériel et méthodes **9**
2.1. Définition et variations du taux d'ablation karstique 9
2.1.1. Les précipitations 9
2.1.2. La lithologie 10
2.1.3. L'exposition 11
2.1.4. La présence de végétation 11
2.2. Notions de base : site d'étude, groupe et stations de mesures 11
2.3. Mesures sur le terrain 12
2.4. Base de données 14
2.5. Description des sites d'étude 15
2.5.1. Les Morteys 15
2.5.2. Le Chasseral 22
2.5.3. Cirque des Chenevières – Mont-Soleil 26
2.5.4. Reuchenette 30
2.6. Données météorologiques 31
2.6.1. Les Morteys 31
2.6.2. Chasseral 32
2.6.3. Le Cirque des Chenevières 32
2.6.4. Reuchenette 33
2.6.5. Synthèse des données météorologiques 34
2.7. Tableaux récapitulatifs des stations de mesure 35
2.8. Méthodes 37
2.8.1. Evaluation des données 37
2.8.2. Calcul des taux d'ablation karstique 38
2.8.3. Analyse des taux d'ablation karstique 38
3. Résultats **39**
3.1. Les Morteys 39
3.1.1. Evaluation des données 39
3.1.2. Taux d'ablation karstique 42
3.2. Chasseral 43

3.2.1. Evaluation des mesures 44
3.2.2. Taux d'ablation karstique 44
3.3. Cirque des Chenevières – Mont-Soleil 45
3.3.1. Evaluation des mesures 45
3.3.2. Taux d'ablation karstique 46
3.4. Reuchenette 47
3.4.1. Evaluation des mesures 47
3.4.2. Taux d'ablation karstique 47
3.5. Synthèse des résultats 48
4. Interprétation des Résultats 50
4.1. Analyse des stations de mesure par site d'étude 50
4.1.1. Les Morteys 50
4.1.2. Chasseral 52
4.1.3. Cirque des Chenevières – Mont-Soleil 54
4.1.4. Reuchenette 54
4.2. Analyse des taux d'ablation karstique entre tous les sites d'étude 55
5. Discussion 57
6. Conclusion et perspectives 59
7. Références 62

Table des figures

Figure 1 : Schéma explicatif sur les notions de sites d'étude, de groupe et de station de mesure 11
Figure 2 : Micromètre Mitutoyo sur une station de mesure. La vis au centre de l'appareil indique une valeur de 12.895 mm..... 13
Figure 3 : Exemple d'une station de mesure pour micromètre constituée de trois clous : deux à tête sphérique et un à tête plate..... 13
Figure 4 : Situations géographiques et géologiques des sites d'étude. Les sites pour lesquels des mesures ont été réalisées en 2017 et 2018 sont indiqués en bleu, les autres sites en noir. MOR : Les Morteys, REU : Reuchenette, CHA : Chasseral, CHE : Cirque des Chenevières, AMB : Sèche des Amburnex, TEN : Mont Tendre, HOL : Hölloch (fond de carte : swisstopo, 2018) 15
Figure 5 : Situation géographique et géologique des stations de mesures A, B, C, D et E positionnées dans la partie amont du vallon des Morteys (Fond topographique 1 :25'000 Swisstopo 2018 ; données géologiques GeoCover V22014). Seules les deux formations géologiques importantes sont légendées..... 16
Figure 6 : Vue d'ensemble vers le NW de la station A1 avec indication de la station A2 des Morteys 17
Figure 7 : Station de mesure A2 des Morteys..... 17
Figure 8 : Vue d'ensemble vers le SE de la station A3 des Morteys..... 17
Figure 9 : vue d'ensemble vers le N-W des stations B1, B2, B3 et B4 avec indication de la position de la station B5 18
Figure 10 : station B5, prise de vue vers le S-E..... 18
Figure 11 : vue d'ensemble vers le S-E de la station C1 des Morteys..... 19
Figure 12 : vue d'ensemble vers le N-W des stations C2 et C3 des Morteys 19
Figure 13 : Vue d'ensemble des stations D1, D2 et D3, prise de vue vers le S-E (photo : Luc Braillard, 2017) 20
Figure 14 : Prise de vue rapprochée vers le S-E des stations D1, D2 et D3 (photo : Luc Braillard, 2017) 20
Figure 15 : Vue d'ensemble de la station D4, prise de vue vers le Sud (photo : Luc Braillard, 2017)..... 20
Figure 16 : vue d'ensemble de la station E, prise de vue vers le SE (photo : Luc Braillard, 2017) 21
Figure 17 : Situation géographique et géologique des stations A, B, C, D, E et F du Chasseral. Fond de carte géologique : Aufranc et Burkhalter, 2017. Les principales formations géologiques sont légendées..... 22
Figure 18 : Vue d'ensemble vers le N-W du groupe A du Chasseral..... 23
Figure 19 : Vue rapprochée des stations A2 et A3 du Chasseral en direction de l'Est 23
Figure 20 : A gauche, vue d'ensemble de la station B1 du Chasseral en direction de l'Ouest. A droite, vue détaillée de la station B2 en direction du S-E. 24
Figure 21 : Vue d'ensemble de la station C1 du Chasseral en direction du N. 24
Figure 22 : Vue détaillée de la station C1 du Chasseral..... 24
Figure 23 : Vue d'ensemble et vue rapprochée de la station D1 du Chasseral en direction du Nord 25
Figure 24 : Vue d'ensemble en direction du Nord et vue rapprochée de la station E1 du Chasseral 25
Figure 25 : Vue d'ensemble en direction du Nord et vue rapprochée de la station F1 du Chasseral 26
Figure 26 : Situation géographique et géologique des stations A, B, C et D du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil. Fond de carte géologique : Bourquin et al. (1946) et Aufranc et Burkhalter (2017). Les principales formations géologiques sont légendées. 27
Figure 27 : Vue d'ensemble en direction de l'Est et vue rapprochée de la station A1 des Chenevières..... 28
Figure 28 : Vue d'ensemble et vue rapprochée de la station B1 des Chenevières..... 28
Figure 29 : Photo du haut : vue d'ensemble du groupe C en direction du N-W; photo du bas à gauche : vue rapprochée de la station C1 ; photo du bas à droite : vue rapprochée de la station C2 29
Figure 30 : Situation géographique et géologique des stations A, B et C de Reuchenette. Fond de carte géologique : Antenen et al., 2004 ; Aufranc et Burkhalter, 2017. Seule la principale formation géologique est légendée..... 30
Figure 31 : Vue d'ensemble de la station A1 de Reuchenette en direction de l'Ouest..... 30
Figure 32 : Vue d'ensemble de la station C1 de Reuchenette en direction de l'Ouest 31
Figure 33 : Somme des précipitations pour les années de 1998 à 2017 à la station Château-d'Oex..... 32
Figure 34 : Somme des précipitations pour les années de 1998 à 2017 à la station du Chasseral..... 32
Figure 35 : Somme des précipitations pour les stations météorologiques du Chasseral et de Courtelary entre 1998 et 2017..... 33
Figure 36 : Somme des précipitations pour les stations météorologiques de Macolin entre 1998 et 2017..... 33
Figure 37 : Graphique des différences en [mm] pour chaque visite entre les mesures du micromètre CO1 et les mesures du micromètre CO2 pour les stations des Morteys. Les valeurs aberrantes, A1 (2017), C1 (2001) et C2 (1998), sont mises en évidence. Pour la station C2, la valeur de la différence pour 1998 est située en dehors du graphe (-0.24 mm).. 40

Figure 38 : Graphique des différences CO1-CO2 en [mm] pour chaque visite pour les stations du Chasseral..... 44
Figure 39: Graphique des différences en [mm] pour chaque visite entre les mesures du micromètre CO1 et les mesures du micromètre CO2 pour les stations du Cirque des Chenevières 46
Figure 40 : Graphiques des taux d'ablation karstique moyens des sites d'étude des Morteys, du Chasseral et du Cirque des Chenevières – Mt-Soleil. 49
Figure 41 : Vue rapprochée des stations D1, D2 et D3, la veine de calcite passe à travers la station D1 à la verticale et la ligne de stylolithes à travers la station D2 et D1 à l'horizontal. 51
Figure 42 : taux d'ablation karstique [mm/an] entre 1998 et 2017 pour les stations des Morteys..... 52
Figure 43 : Taux d'ablation karstique moyens [mm/an] entre 1998 et 2017 pour les stations du Chasseral 53
Figure 44 : Taux d'ablation karstique moyens [mm/an] entre 1998 et 2017 pour les stations du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil..... 54
Figure 45 : Graphique des taux d'ablation karstique moyens pour toutes les stations de l'étude classés par ordre croissant. MOR- : Morteys, CHA- : Chasseral, CHE- : Cirque des Chenevières – Mont-Soleil, REU- : Reuchenette 55
Figure 46 : Graphique récapitulatif de toutes les caractéristiques des statons de mesure: Taux d'ablation karstique moyen, type de surface, orientation, lithologie, présence de végétation, quantité de précipitations par année..... 56

Table des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des 5 stations météorologiques avec les sommes des précipitations [mm] par année et moyenne de la somme des précipitations par année entre 1998 et 2017 34

Tableau 2 : Caractéristiques des stations de mesure des Morteys (MOR). 35

Tableau 3 : Caractéristiques des stations de mesure au Chasseral (CHA). 36

Tableau 4 : Caractéristiques des stations de mesure aux Chenevières (CHE). 36

Tableau 5 : Caractéristiques des stations de mesure à Reuchenette (REU). 37

Tableau 6 : Moyennes des trois mesures en [mm] des micromètres CO1 et CO2 pour les stations des Morteys. 39

Tableau 7 : Moyennes corrigées en rouge et gras des mesures aux micromètres CO1 et CO2 pour les stations des Morteys. 42

Tableau 8 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017 pour chaque station des Morteys..... 43

Tableau 9 : Moyennes des trois mesures en [mm] des micromètres CO1 et CO2 pour les stations du Chasseral : la valeur aberrante est mise en évidence. 43

Tableau 10 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017 pour chaque station du Chasseral 45

Tableau 11: Moyennes des trois mesures aux micromètres CO1 et CO2 pour les stations du Cirque des Chenevières. La valeur considérée comme aberrante est mise en évidence. 45

Tableau 12 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-2001, 2001-2018 et 1998-2018 pour chaque station du Cirque des Chenevières. 46

Tableau 13 : Moyennes des mesures aux micromètres CO1 et CO2 pour les stations de Reuchenette 47

Tableau 14 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-2001, 2001-2018 et 1998-2018 pour chaque station de Reuchenette..... 47

Tableau 15 : Taux d'ablation karstique moyen de toutes les stations de mesure..... 48

Tableau 16 : Taux d'ablation karstique de différentes études comparables à ce travail de recherche. 58

1. Introduction

1.1. Intérêt de l'étude

Le taux d'ablation karstique est un sujet bien répandu dans la recherche géomorphologique afin de comprendre la morphologie karstique. Différentes méthodes existent pour calculer l'érosion des calcaires telles que la méthode des tablettes de carbonates, les calculs hydrogéochimiques ou encore la méthode de mesure au micromètre développée dans les années 60 par High et Hanna (1970) (Trenhaile et Lakhan, 2011 ; White, 2000). Une grande majorité de chercheurs ont utilisé la méthode des tablettes (e.g. Plan, 2005) et très peu ont suivi la méthode au micromètre (e.g. High et Hanna, 1970 ; Spate et al., 1985 ; Cucchi et al. 1987 ; Häuselmann, 2008) qui nécessite un intervalle de temps conséquent pour obtenir des résultats probants (Häuselmann, 2008). En effet, la vitesse de dissolution est très lente et ne dépasse en aucun cas le millimètre par an (Häuselmann, 2008). Le temps est un problème majeur dans l'utilisation de cette méthode. Cette dernière est pourtant la seule à pouvoir donner des observations directes de l'ablation de surface.

Il existe peu de données récoltées à partir de la méthode au micromètre. Il est donc fort intéressant d'en obtenir de nouvelles. Grâce à la reprise d'une étude de l'Université de Fribourg sur l'ablation karstique débutée en 1998 par M. Monbaron et L. Perritaz, ce travail de recherche permet d'apporter de nouveaux résultats précis sur la vitesse d'érosion des calcaires grâce au fait que l'intervalle de temps s'étale sur 20 ans entre les premières et les dernières campagnes de mesures au micromètre. En effet, dans le présent travail, l'ablation des calcaires produite entre 1998 et 2018 se chiffre en moyenne à 0.255 mm. Cette grande valeur, à l'échelle géologique, permet d'éviter l'influence trop importante des marges d'erreur sur de si petits nombres lors des calculs du taux d'ablation karstique. De plus, la différence entre les taux calculés pour chaque site d'étude de ce travail est claire et permet alors d'obtenir une analyse approfondie sur les causes de ces variations.

1.2. Contexte de l'étude

Le but premier de l'étude de M. Monbaron et L. Perritaz était de mesurer à l'aide de la méthode au micromètre les taux d'ablation karstique dans le Jura suisse (Chasseral, Reuchenette, les Chenevières, Mont-Tendre et Sèche des Amburnex), dans les Préalpes fribourgeoises (Les Morteys) et en Suisse centrale (grotte du Hölloch) puis d'expliquer les variations obtenues à l'aide de différents paramètres tels que la lithologie, l'exposition, la végétation et la quantité de précipitations. Un objectif secondaire était de suivre sur plusieurs années l'ablation des calcaires afin de pouvoir faire ressortir des variations annuelles. Les données initiales de 1998 ont été suivies par des campagnes de mesures réalisées en 1999 et en 2001, puis ont été abandonnées. Ces données ont été reprises dans ce travail de recherche et une nouvelle série de mesures a été poursuivie entre 2017 et 2018.

1.3. Problématique

Ce travail consiste à déterminer les taux d'ablation karstique dans le Jura et les Préalpes suisses à l'aide de mesures aux micromètres et à chercher les causes des variations observées.

L'objectif de ce travail est de premièrement calculer le taux d'ablation karstique dans les régions des Morteys, du Chasseral, du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil et de Reuchenette à partir des données de la précédente étude et des nouvelles mesures prises entre 2017 et 2018. Le second objectif consiste à analyser et à chercher à déterminer les variations du taux d'ablation karstique. Cette analyse est réalisée selon plusieurs paramètres influençant la dissolution de la surface des calcaires comme la quantité de précipitations, la lithologie (type de calcaire, rugosité de la surface, pendage, présence de lapiez), l'exposition (versant exposé au Nord ou au Sud) ainsi que la présence de végétation.

1.4. Structure du travail

Afin de répondre à cette problématique, le chapitre 2 présente les théories sur l'ablation karstique et les facteurs principaux influençant sa vitesse puis décrit le matériel et les sites de mesure en détail. Une partie mentionne les critères du choix des stations météorologiques pour obtenir la quantité de précipitations par année de chaque région. Ce chapitre 2 traite également des méthodes utilisées pour évaluer les mesures de terrain, pour calculer le taux d'ablation karstique et pour interpréter ses variations.

Le chapitre 3 présente les mesures de 1998, de 1999, de 2001 et de 2017/18 par site d'étude (Les Morteys, Le Chasseral, Le Cirque des Chenevières – Mont-Soleil, Reuchenette) et les taux d'ablation karstique correspondants. Les mesures sont évaluées, vérifiées et modifiées si nécessaire avant le calcul du taux d'ablation karstique. Après le calcul de tous les taux d'ablation karstique, ceux-ci font aussi l'objet d'une dernière vérification avant l'interprétation de ces résultats.

Le chapitre 4 porte sur l'interprétation des taux d'ablation karstique calculés au chapitre précédent. Les taux sont comparés entre eux selon deux niveaux. Une première analyse est réalisée en comparant les variations des taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 2017/18 sur un site d'étude. Chaque site comporte plusieurs stations de mesure (une installation de trois clous pour la mesure au micromètre) rassemblées en groupe (par exemple : groupe A, groupe B,…) qui ont présentées certaines variations. Cette première analyse se concentre donc sur les variations observées dans les groupes d'un site d'étude puis une comparaison est réalisée entre tous les taux d'ablation karstique calculés sur le site en question. L'opération est réalisée pour tous les sites d'étude de ce travail. La deuxième analyse, plus large, compare tous les taux d'ablation karstique entre eux. Les sites d'étude sont alors analysés tous ensemble.

Les résultats, l'atteinte des objectifs, les difficultés rencontrées, les questions qui restent encore en suspens sont discutés au chapitre 5. Les résultats sont également comparés à des valeurs obtenues dans d'autres études du même domaine.

2. Théories, matériel et méthodes

La première partie de ce chapitre met en évidence les définitions et les théories importantes concernant le taux d'ablation karstique afin d'analyser correctement les résultats. Dans la deuxième partie, le matériel, son utilisation et les termes utilisés sont expliqués. La troisième partie localise les sites d'étude et décrit chaque station de mesure. Ce chapitre se termine par une présentation des méthodes utilisées pour l'analyse des résultats.

2.1. Définition et variations du taux d'ablation karstique

Le taux d'ablation karstique « est défini comme le rapport du volume rocheux dissous annuellement à la surface affleurante » (Salomon, 2006 : 205). Ce taux est exprimé soit en mm/1000 ans, soit en m^3/km^2/an soit en mm/an (Salomon, 2006 ; Häuselmann, 2008). Cette dernière unité sera utilisée pour les résultats du présent travail. Les variations du taux d'ablation karstique peuvent être grandes d'un endroit à un autre. La plus petite valeur trouvée dans la littérature vaut 0.001 mm/an au Nullarbor en Australie et la valeur maximale vaut 0.52 mm/an aux Monts Nakanaï en Nouvelle-Guinée (Salomon, 2006). D'après les données indiquées dans l'étude de Häuselmann (2008), la valeur moyenne calculée dans les régions alpines se trouve entre 0.01 mm/an et 0.08 mm/an. Ces variations dépendent de nombreux facteurs tels que le climat, l'agressivité de l'eau et la lithologie de la roche (Salomon, 2006) ou encore l'exposition aux rayons solaires et au vent ainsi que la présence de végétation (Trudgill, 1985). Ce travail s'intéresse à quatre facteurs principaux influençant les taux d'ablation karstique : La quantité de précipitations, la lithologie, l'exposition des versants et la présence de végétation. Afin de comprendre leur action, il est important de mentionner la réaction chimique de la dissolution du carbonate de calcium qui se produit à la surface de la roche calcaire. La réaction est la suivante :

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$$

Le carbonate de calcium ($CaCO_3$), composant principal de la roche calcaire, en contact avec le gaz carbonique de l'atmosphère et l'eau de pluie, se transforme en ion de calcium et en acide carbonique qui sont tous deux solubles dans l'eau (Ford et Williams, 1996). L'ablation karstique est donc le résultat de la dissolution du carbonate de calcium.

2.1.1. Les précipitations

Selon Aubert (1967), le facteur le plus important dans l'ablation calcaire est le climat et plus précisément la quantité de précipitations annuelles qui éliminent les carbonates sur la surface de la roche. Selon plusieurs études, la température joue un rôle moins important que le taux de précipitations (Ford et Williams, 1996). Par conséquent, plus les précipitations sont abondantes, plus l'ablation karstique est importante (Aubert, 1969). Pourtant, Cucchi et al. (1987) qui ont étudié l'ablation karstique à l'aide la méthode au micromètre sur 8 stations de mesure situées dans le Karst de Trieste en Italie, concluent que la somme des précipitations ne corrèle pas avec la variation du taux d'ablation karstique. Häuselmann (2008) formule une hypothèse intéressante afin d'expliquer les

résultats obtenus par certains chercheurs. La durée des précipitations influencerait plus le taux d'ablation karstique que la quantité de précipitations.

2.1.2. La lithologie

Le facteur lithologie est abordé sous deux aspects : la nature de la roche (pureté, taille du grain, type de matrice, présence de fossiles, rugosité, porosité) et sa tectonisation (diaclases, joint de stratification, fractures, pendage).

En général, plus le pourcentage de carbonate de calcium est élevé dans la roche calcaire, plus celle-ci est soluble (Salomon, 1999 ; Ford et Williams, 1996). Mais la pureté de la roche n'est pas le seul facteur qui influence la dissolution. La taille des grains, le type de matrice, la rugosité et la porosité de la roche agissent aussi sur la vitesse de dissolution. Ainsi, plus le grain est fin, plus la roche se dissout rapidement car la surface d'exposition entre l'eau et le grain augmente. Ford et Williams (1996) précisent aussi que plus la taille des grains est hétérogène, plus la roche est rugueuse et donc plus la dissolution est importante. Un calcaire biomicritique (matrice de boue de micro-cristaux calcitique avec présence de bioclastes) est par exemple plus soluble qu'un calcaire micritique car les bioclastes forment des aspérités sur la surface de la roche (Ford et Williams, 1996). Selon Sweeting et Sweeting (1969), un calcaire biomicritique est plus soluble qu'un calcaire sparitique (matrice composée de ciment de cristaux grossiers calcitique) du fait de sa porosité plus élevée. Finalement, il faut relever que les constituants du calcaire tels que la calcite, l'aragonite ou les bioclastes n'ont pas une solubilité identique. Des dissolutions inégales peuvent donc être produites sur la surface de la roche (Trudgill, 1985).

L'influence du type de matrice, de la taille et de l'hétérogénéité des grains peut être modifiée par la tectonisation de la roche. En effet, Sweeting (1974) a montré qu'un calcaire micritique pouvait être moins soluble qu'un calcaire sparitique, non pas à cause du type de matrice et de grains mais parce que la roche micritique était fortement fracturée (Trudgill, 1985). La tectonisation de la roche a donc une influence importante dans la dissolution du calcaire. Les diaclases et les joints de stratifications influencent la dissolution du calcaire en jouant le rôle de drains. En effet, la concentration de l'eau dans ces fractures provoque une dissolution plus intense à certains endroits pour finalement former des lapiez sur la surface de la roche (Aubert, 1969). Trudgill (1985) rajoute qu'une roche peu poreuse concentre plus facilement le ruissellement dans les joints et les fissures. Les roches plus résistantes à l'ablation karstique sont donc les calcaires bien cimentées avec peu de joints et peu de fractures (Trudgill, 1985).

Le pendage des couches, lorsqu'il est fortement incliné, ralentit le processus de dissolution et le rend uniforme sur tout le banc calcaire (Aubert, 1969). Un banc subvertical sera plus résistant à la dissolution qu'un banc à l'horizontal (Aubert, 1969).

La morphologie karstique influence aussi fortement la vitesse de dissolution des calcaires. Les résultats de l'étude de Plan (2005) démontre, par exemple, que la dissolution est plus rapide dans les dolines par le fait que le ruissellement se concentre dans ces dépressions.

2.1.3. L'exposition

Le facteur de l'exposition prend en compte deux aspects : l'exposition au vent et l'exposition aux rayons solaires. Si un affleurement rocheux est à l'abri du vent, il reçoit plus de quantité de précipitations car la vitesse du vent diminue après un obstacle topographique et donc les accumulations de pluie et de neige sont plus importantes à cet endroit (Barry, 1992). L'exposition aux rayons solaires peut aussi jouer un rôle dans la fonte de la neige et l'humidité du versant. Comme les rayons solaires n'atteignent pas autant les versants exposés au Nord que les versants exposés au Sud, la température est plus basse et les plaques de neige fondent plus lentement. Selon Aubert (1969), l'accumulation de la neige augmente la dissolution dans les dépressions comme les dolines. Il faut préciser aussi que l'eau froide peut contenir plus de dioxyde de carbone dissous et donc attaquer plus facilement le calcaire (Salomon, 2006). Cependant, selon Trudgill (1985) et Salomon (2006), la concentration de dioxyde de carbone en haute altitude diminue dans les sols à cause du manque de végétation et dans l'air ambiant à cause de la baisse de pression atmosphérique. L'eau serait donc moins agressive en altitude même si elle est plus froide (Salomon, 2006).

2.1.4. La présence de végétation

La décomposition des composés organiques et la végétation corrodent le calcaire car elles produisent du dioxyde de carbone qui attaque le carbonate de calcium (Trudgill, 1985). Comme la végétation apporte de l'acidité à l'eau, le taux d'ablation karstique devrait être plus rapide sur la surface calcaire. Aubert (1969) a constaté dans ces résultats que les lichens et la mousse avait un pouvoir corrosif.

2.2. Notions de base : site d'étude, groupe et stations de mesures

Il est important de mentionner quelques notions de base avant de présenter toutes les données de ce travail. M. Monbaron et L. Perritaz ont étudié plusieurs régions en Suisse. Ces régions sont nommées « sites d'étude » dans les chapitres suivants. Sur chaque site d'étude, les mesures ont été prises sur des « stations de mesure » formées de trois clous scellés dans la roche. Ces stations de mesure ont été rassemblées en « groupes ». Les stations sont alors nommées par une lettre qui correspond au groupe et par un chiffre. Le schéma à la figure 1 ci-dessous illustre ces notions de base.

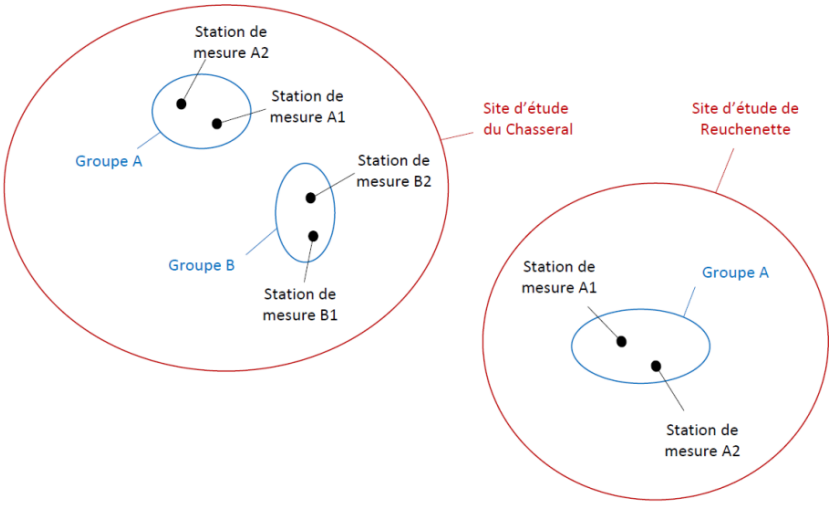


Figure 1 : Schéma explicatif sur les notions de sites d'étude, de groupe et de station de mesure

2.3. Mesures sur le terrain

Ce travail de recherche reprend les mesures de l'ablation karstique réalisées par M. Monbaron et L. Perritaz en 1998, en 1999 et en 2001 et les complètent par de nouvelles mesures prises aux mêmes endroits entre 2017 et 2018.

Les dernières mesures ont été effectuées aux Morteys, au Chasseral, à Reuchenette et au Cirque des Chenevières – Mont-Soleil. Sur les 46 stations de mesure au total, 31 stations ont été retrouvées sur le terrain. Ceci est dû à un manque de temps, à la présence de neige ou à une localisation imprécise de la station. Les stations manquantes sont toutes les stations des sites d'étude de La Sèche des Amburnex, du Mont Tendre et de la grotte Hölloch ainsi que la station D1 des Chenevières et les stations B1 et B2 de Reuchenette.

Toutes les stations de mesure abordées dans le présent travail ont été installées en 1998. Les premières mesures ont été effectuées le même jour de l'installation des stations ou à quelques mois d'intervalle. Les deuxièmes mesures ont été exécutées en 1999, les troisièmes mesures en 2001 et les dernières mesures entre 2017 et 2018. Certaines stations n'ont pas eu droit au même nombre de visite comme à Reuchenette ou au Cirque des Chenevières où les mesures de 1999 manquent.

Les mesures de l'ablation karstique ont été exécutées à l'aide de deux micromètres à trois pieds d'une précision de 0.01 mm de la marque *Mitutoyo* (figure 2). Les pieds du micromètre sont de forme différente (base ronde, base creuse, base triangulaire). Pour obtenir une mesure de l'ablation karstique, les pieds de l'instrument sont placés sur des stations de mesure constituées de trois clous inoxydables scellés dans la roche. La station est constituée de deux sortes de clous, deux clous à tête sphérique et un à tête plate (voir figure 3). Ces structures permettent d'éviter tout mouvement lors de la mesure. Chaque pied du micromètre correspond à une forme de clou. Lorsque les pieds du micromètre sont fixés sur la station, la mesure est effectuée à l'aide d'une vis au centre de l'instrument comportant une échelle millimétrique qui descend jusqu'à ce qu'elle atteigne la roche. Un exemple de lecture est illustré à la figure 1. Sur cette photo, le micromètre indique une valeur de 12.895 mm. Les millimètres sont premièrement lus sur l'échelle verticale (de 0 à 25 mm) séparée par tranche de 0.5 mm. Sur l'exemple, la valeur mesurée est à 12.5 mm. Les micromètres sont ensuite lus sur l'échelle horizontale (de 0 à 0.5 mm). Ici, la valeur vaut 0.39 mm. La troisième décimale est estimée à l'œil nu afin d'avoir des résultats plus précis (5 µm). En additionnant les trois lectures, la valeur 12.895 mm est obtenue.



Figure 2 : Micromètre Mitutoyo sur une station de mesure. La vis au centre de l'appareil indique une valeur de 12.895 mm.



Figure 3 : Exemple d'une station de mesure pour micromètre constituée de trois clous : deux à tête sphérique et un à tête plate

L'utilisation systématique de deux appareils ainsi qu'une répétition de trois mesures par micromètre sur chaque station permettent de calculer une moyenne. Cette dernière diminue l'importance des erreurs de mesures.

L'état des stations de mesure après plus de 20 ans est resté intact selon les observations sur le terrain sauf pour la station C du Chasseral et la station A au Cirque des Chenevières, où la roche s'est fracturée sur un de leurs clous. Cependant, ils sont restés stables et une mesure a tout de même pu être obtenue. Il est difficile de savoir si les clous de toutes les stations sont restés immobiles. Pour le savoir, les valeurs de l'ablation entre les mesures prises en 1998, en 1999, en 2001 et en 2017(8) ont été évaluées au chapitre 3.

2.4. Base de données

Les données de 1998, 1999 et 2001 ont été enregistrées dans des fichiers du logiciel *File Maker*. Chaque station possède deux fiches, une fiche qui décrit et localise la station et une autre fiche présentant les mesures aux micromètres ainsi que les moyenne et la variation moyenne annuelle de l'ablation karstique. Classées par site d'étude, la première fiche de chaque station de mesure contient la date de la première installation de la station, les coordonnées GPS, l'altitude, la lithologie et le pendage du banc calcaire où se situent les clous. Afin de localiser au mieux la station de mesure, elle est parfois illustrée par un croquis ou une photo prise en 1998 suivis d'indications ou de remarques pour l'interprétation des données. La première fiche précise également si des échantillons de roches ont été pris. Malheureusement ces échantillons n'ont pas été retrouvés en 2017. Tous ces documents ont été imprimés et classés pour les campagnes de mesures en 1998. Les photos ont également été développées. Les photos de 1998 ont été complétées par de nouvelles datant de 2017-2018 illustrant toutes les stations utilisées mais ces photos sont restées à l'état numérique. Les nouvelles mesures n'ont pas été rajoutées sur le logiciel *File Maker*. Il existe désormais un document *Excel* avec toutes les mesures utilisées pour ce travail. Certaines modifications ont été exécutées sur des données de 1998 telles que les coordonnées GPS de toutes les stations des Morteys (sauf les stations B4, B5 et D4) ainsi que les coordonnées GPS de la station E1 du Chasseral. Le chapitre 3 fait également mention de l'évaluation de toutes les données et des modifications réalisées si cela était nécessaire.

2.5. Description des sites d'étude

Sept sites d'étude ont été choisis en 1998 pour installer 46 stations pour micromètre (figure 4). Un des sites se trouve aux Morteys, dans les Préalpes Fribourgeoises. Cinq autres se situent dans le Jura suisse, à Reuchenette, au Chasseral, au Cirque des Chenevières, au Mont-Tendre et à La Sèche des Amburnex. Le septième site a été installé en Suisse centrale dans la grotte du Hölloch. Seuls les quatre premiers sites ont été traités dans le cadre du présent travail (en bleu sur la figure 4).

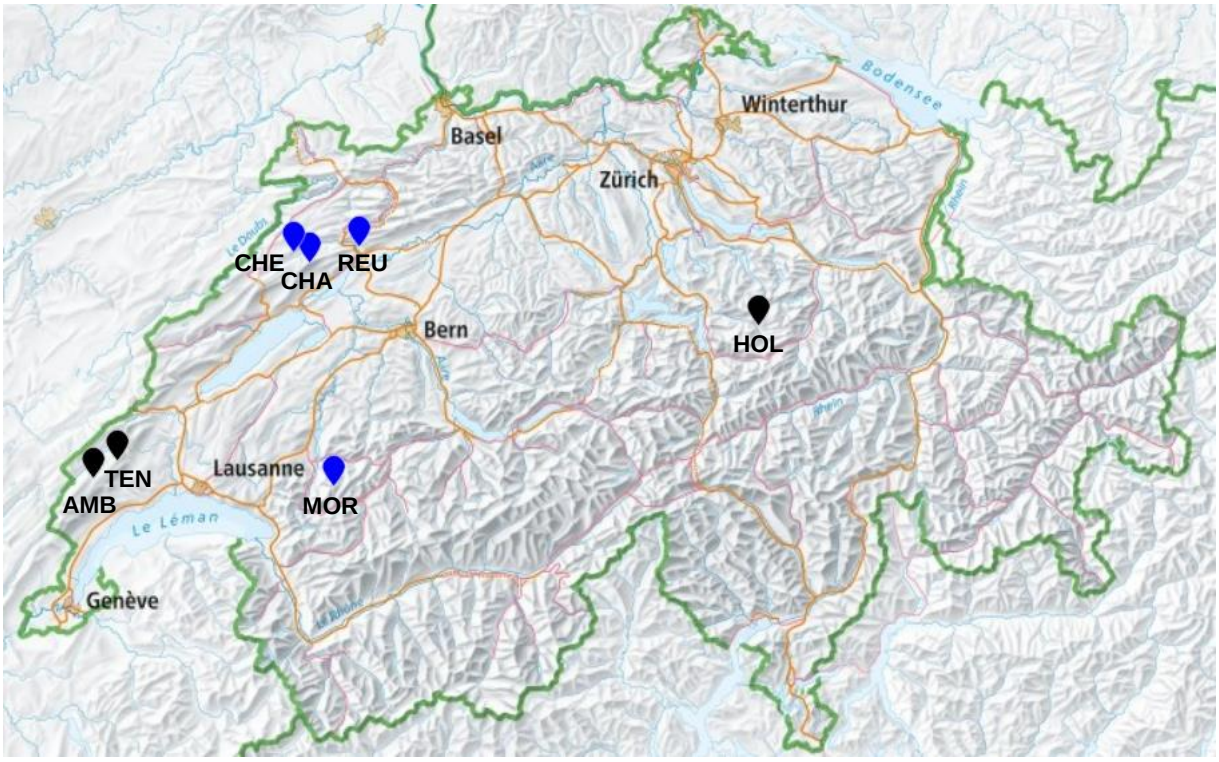
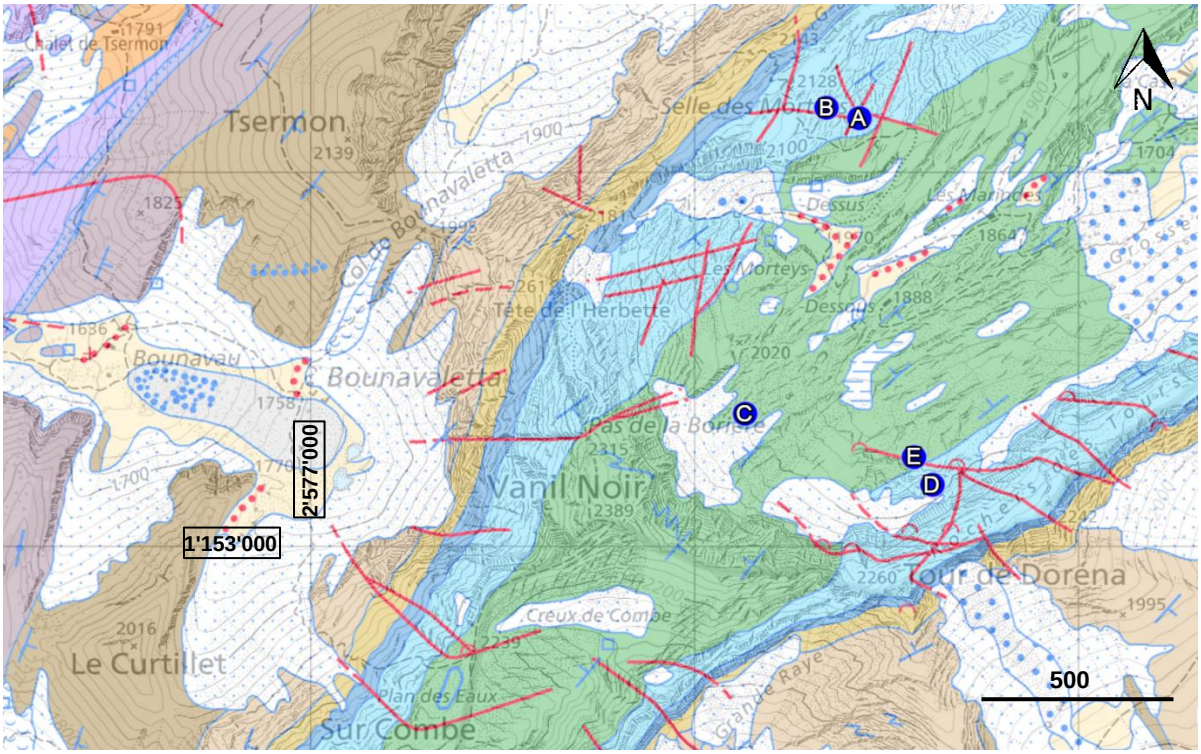


Figure 4 : Situations géographiques et géologiques des sites d'étude. Les sites pour lesquels des mesures ont été réalisées en 2017 et 2018 sont indiqués en bleu, les autres sites en noir. MOR : Les Morteys, REU : Reuchenette, CHA : Chasseral, CHE : Cirque des Chenevières, AMB : Sèche des Amburnex, TEN : Mont Tendre, HOL : Hölloch (fond de carte : swisstopo, 2018)

La localisation précise des stations de mesure pour chaque site d'étude ainsi que leur altitude, leur orientation, leur lithologie et la présence de végétation sont présentés dans les paragraphes suivants.

2.5.1. Les Morteys

Les stations de mesure des Morteys se situent dans la dépression au Nord-Est du sommet du Vanil Noir dans les Préalpes fribourgeoises, entre Charmey (FR) et Château-D'Oex (VD). Ce vallon correspond à un synclinal de direction NW-SE. Le site des Morteys comporte 16 stations divisées en 5 groupes : A1-2-3, B1-2-3-4-5, C1-2-3, D1-2-3-4 et E1. Les groupes sont localisés sur la carte géologique à la figure 5. Les stations sont réparties entre 1972 m (groupe E) et 2090 m d'altitude (groupe B).



Lithologie

$c_{1\text{-}4}$ Formation des Sciernes d'Albeuve

$i_{7\text{-}8}$ Formation du Moléson

Figure 5 : Situation géographique et géologique des stations de mesures A, B, C, D et E positionnées dans la partie amont du vallon des Morteys (Fond topographique 1 :25'000 Swisstopo 2018 ; données géologiques GeoCover V22014). Seules les deux formations géologiques importantes sont légendées.

Description et localisation des stations de mesure

Le groupe A est positionné sur le versant exposé au S-E des Morteys sur les calcaires de la Formation du Moléson. Ce calcaire compact formant de gros bancs datant du Kimméridgien-Berriasien est l'armature principale des Préalpes fribourgeoises (Braillard, 2015). Les stations de ce groupe sont installées à 5-10 m de distance entre eux (figures 6, 7, 8). La station A1 à 2064 m d'altitude est positionnée sur une dalle subverticale. La surface de la roche est rugueuse et présente des fractures millimétriques et des plis centimétriques. La station A2, 5 m plus haut, est installée sur une dalle horizontale qui présente le même type de surface que la station A1. La station A3 est par contre sur un front de couche 10 m plus bas que la station A1.



Figure 6 : Vue d'ensemble vers le NW de la station A1 avec indication de la station A2 des Morteys



Figure 7 : Station de mesure A2 des Morteys



Figure 8 : Vue d'ensemble vers le SE de la station A3 des Morteys

Les 5 stations de mesure du groupe B sont également situées sur les calcaires de la Formation du Moléson. Les stations B1, B2 et B3 se partagent les mêmes clous sur une dalle subverticale lapiézée à 2092 m d'altitude (figure 9). La surface de cette dalle lapiézée comporte des aspérités. Les stations ont été implantées entre deux bombements de la surface de la roche. La station B4 est placée 2 m en-dessous des autres stations sur un bloc un peu tassé avec des fractures qui passent à travers la station. La station comporte une tache d'altération plus claire en son centre. La station B5, proche de la station B4, se trouve sur un front de couche avec une présence importante de lichens (figure 10).



Figure 9 : vue d'ensemble vers le N-W des stations B1, B2, B3 et B4 avec indication de la position de la station B5



Figure 10 : station B5, prise de vue vers le S-E

Le groupe C est positionné à environ 2010 m d'altitude sur les calcaires plaquetés de la Formation des Sciernes d'Albeuve, sur le versant exposé au N-E du vallon des Morteys. Ce calcaire est décrit comme fin et compact et date du Berriasien-Barrémien (Braillard, 2015). La station C1 est implantée sur un front de couche incliné (figure 11). Sa surface est lisse avec des fractures horizontales et des taches claires d'altération. La station C2 est posée à 15 m en-dessous de la C1 sur une dalle subverticale qui comprend une ligne de silex au-dessus des clous et la station C3, à côté, est implantée sur un front de couche à l'horizontale avec de nombreuses microfissures et une surface gondolée (figure 12).

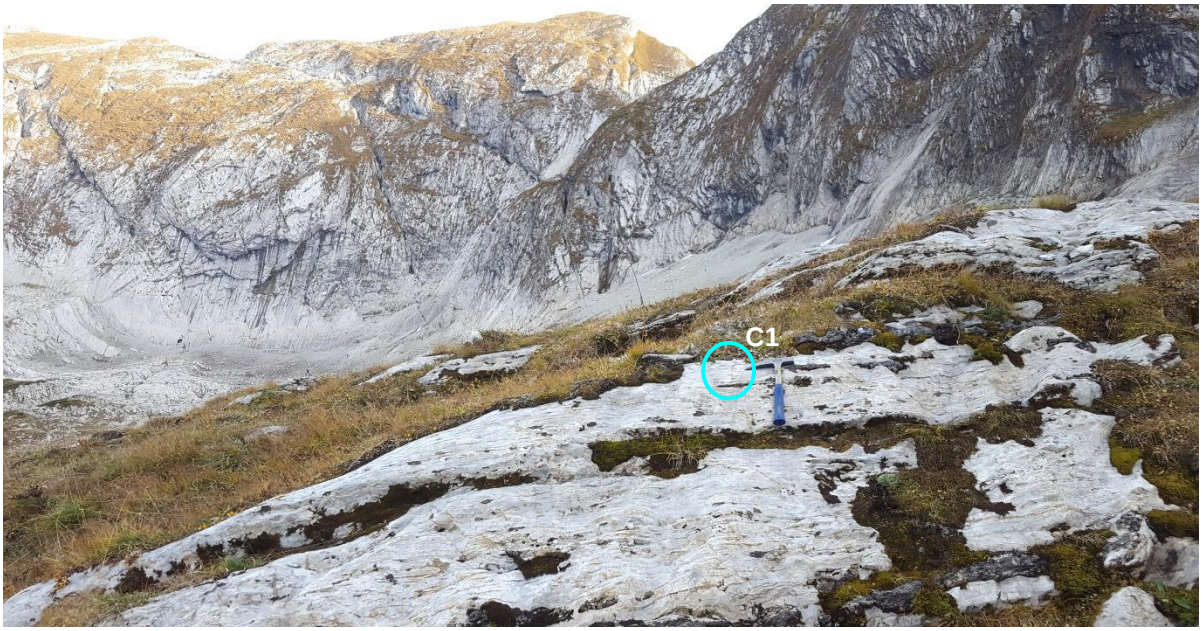


Figure 11 : vue d'ensemble vers le S-E de la station C1 des Morteys



Figure 12 : vue d'ensemble vers le N-W des stations C2 et C3 des Morteys

Le groupe D se trouve sur le versant exposé au N-W des Morteys à environ 1980 m d'altitude. Le substrat rocheux est constitué de la Formation du Moléson. Les stations D1, D2 et D3 se partagent les mêmes clous sur un front de couche horizontal (voir figure 13 et 14). La surface du banc est rugueuse avec de nombreuses aspérités millimétriques. La station est traversée par une fine veine de calcite et par des stylolithes. La station D4, à quelques mètres des autres points, est installée sur une dalle verticale avec de nombreux lichens.



Figure 13 : Vue d'ensemble des stations D1, D2 et D3, prise de vue vers le S-E (photo : Luc Braillard, 2017)



Figure 14 : Prise de vue rapprochée vers le S-E des stations D1, D2 et D3 (photo : Luc Braillard, 2017)

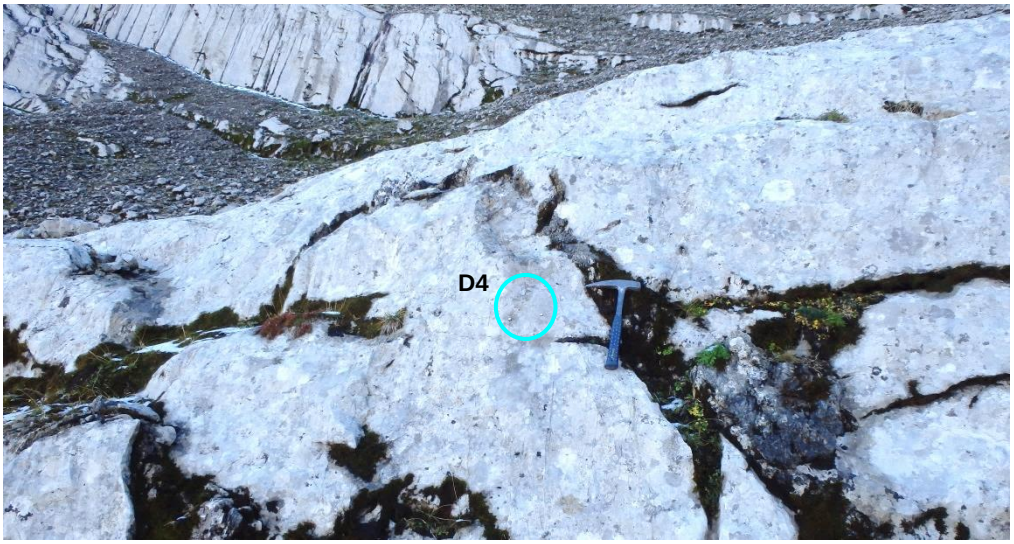


Figure 15 : Vue d'ensemble de la station D4, prise de vue vers le Sud (photo : Luc Braillard, 2017)

Le groupe E se situe à nouveau sur des calcaires de la Formation des Sciernes d'Albeuve, 50 m plus bas que le groupe D, sur une dalle subverticale (figure 16). Son sommet est couvert de végétaux et de nombreux lichens ont poussé au centre de la station.



Figure 16 : vue d'ensemble de la station E, prise de vue vers le SE (photo : Luc Braillard, 2017)

2.5.2. Le Chasseral

Le Chasseral, un sommet du Jura Suisse, situé au N-E de la région des Trois Lacs, s'élève à une altitude de 1606 m. 9 stations de mesure divisées en 6 groupes (A1-2-3, B1-2, C1, D1, E1, F1) ont été installées sur un grand anticlinal qui forme le sommet du Chasseral et dont l'axe du pli se situe au N-E du sommet au niveau du petit Chasseral. L'altitude des stations est entre 1270 m (groupe F) et 1590 m (groupe A). Les groupes sont localisés sur la carte géologique de la figure 17.

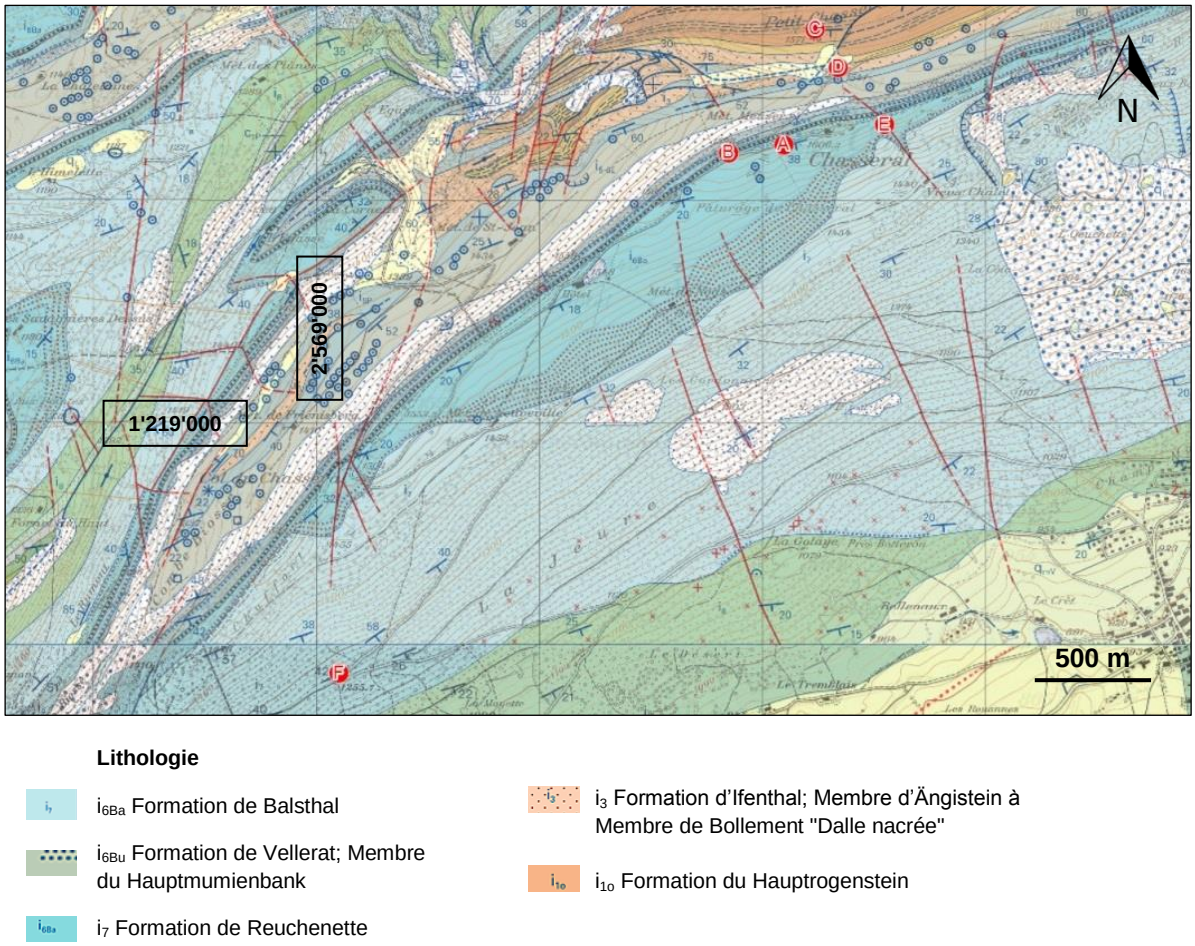


Figure 17 : Situation géographique et géologique des stations A, B, C, D, E et F du Chasseral. Fond de carte géologique : Aufranc et Burkhalter, 2017. Les principales formations géologiques sont légendées.

Description et localisation des stations de mesure

Les stations A1, A2 et A3, constituées d'un calcaire de la Formation de Balsthal datant du Kimméridgien à l'Oxfordien Tardif (Aufranc et Burkhalter, 2017), sont situées à 2 m de distance entre elles sur le versant Sud du Chasseral à environ 1590 m d'altitude (figure 18). La station A1 est positionnée sur une dalle faiblement inclinée où une touffe d'herbe pousse juste au-dessus des clous (figure 18). Sa surface est gondolée et parsemée de lichens. La station A2 est aussi installée sur une dalle peu inclinée où des lichens ont poussé entre les clous mais ne présente aucune touffe d'herbe. La station A3, à 50 cm de la station A2, se trouve sur une dalle presque verticale et comporte aussi des lichens (figure 19).

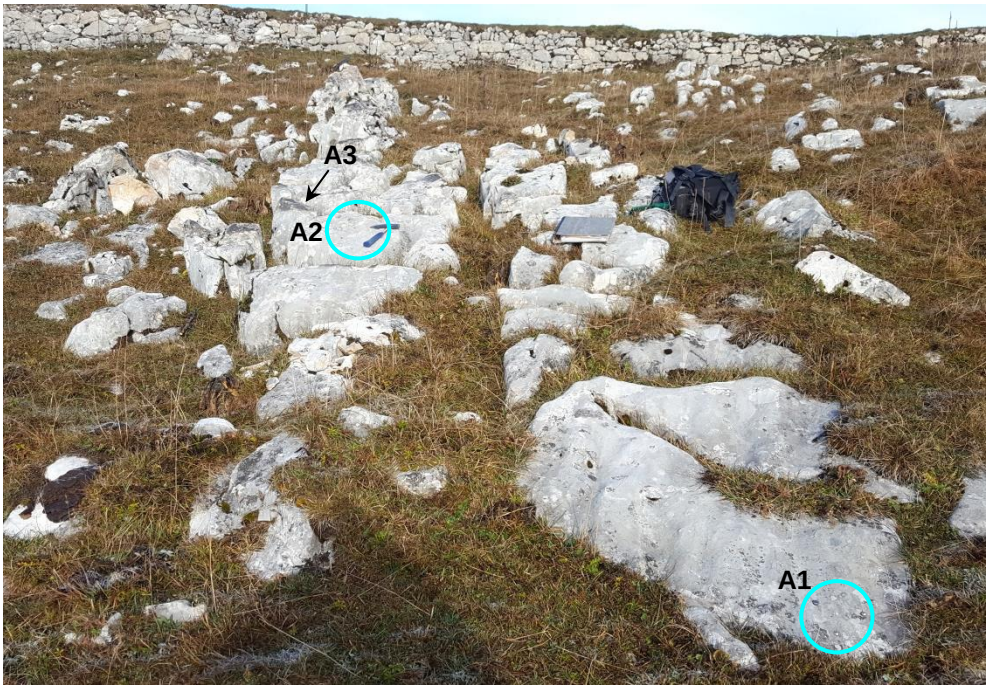


Figure 18 : Vue d'ensemble vers le N-W du groupe A du Chasseral

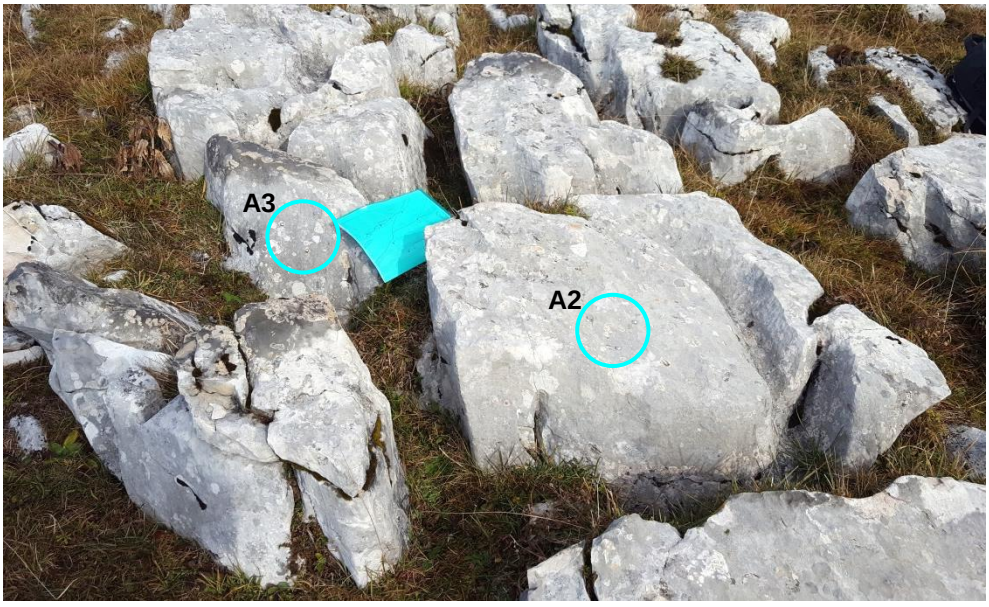


Figure 19 : Vue rapprochée des stations A2 et A3 du Chasseral en direction de l'Est

Les stations B1 et B2, sont positionnées sur le membre du Hauptmumienbank (Formation de Vellerat), un calcaire oolithique, situé stratigraphiquement sous la Formation de Balsthal) (Aufranc et Burkhalter, 2017). Ils se situent de l'autre côté de la crête, sur le versant Nord, à 1597 m (figure 20). La station B1 est fixée sur une dalle inclinée légèrement tassée, exposée au Sud sous le vent. Des touffes d'herbes et une fissure centimétrique se situent au-dessus des clous. La station B2 est quant à elle sur un front de couche lapiézé presque vertical, exposé au Nord sous le vent avec aussi une présence d'herbe. Sa surface comprend des aspérités, des microfissures et un lapiez vertical au-dessus de la station qui peut concentrer l'eau vers les clous.



Figure 20 : A gauche, vue d'ensemble de la station B1 du Chasseral en direction de l'Ouest. A droite, vue détaillée de la station B2 en direction du S-E.

Le groupe C se trouve sur le versant exposé au Sud-Est du Petit Chasseral à 1565 m d'altitude (figure 21). Les clous sont fixés dans une dalle inclinée des calcaires oolithiques de la Formation du Hauptrogenstein. La dalle est fortement fracturée et sa surface granuleuse présente une quantité importante de mousses et de lichens. La roche a éclatée entre 1999 et 2001 sur un clou de la station (figure 22).



Figure 21 : Vue d'ensemble de la station C1 du Chasseral en direction du N.



Figure 22 : Vue détaillée de la station C1 du Chasseral

La station de mesure D1 est installée sur une dalle inclinée composée d'un calcaire biodétritique spathique de la Formation d'Ifenthal datant du Bathonien Supérieur à l'Oxfordien Inférieur (Aufranc et Burkhalter, 2017). Elle se trouve dans le vallon entre le Petit Chasseral et le Chasseral à 1542 m d'altitude (figure 23). Sa surface est granuleuse avec une présence importante de mousse et de lichens.



Figure 23 : Vue d'ensemble et vue rapprochée de la station D1 du Chasseral en direction du Nord

La station E1 se situe à 1570 m d'altitude dans une combe à neige sur le versant du Chasseral exposé au Sud (figure 24). La station positionnée sur une dalle inclinée, se trouve 500 m plus à l'Est que le groupe A. La lithologie de la station E1 est identique au groupe A. La roche est lapiézée et une quantité importante de végétation a poussé tout autour de la station. En 2017, la station se trouvait en partie sous la mousse.



Figure 24 : Vue d'ensemble en direction du Nord et vue rapprochée de la station E1 du Chasseral

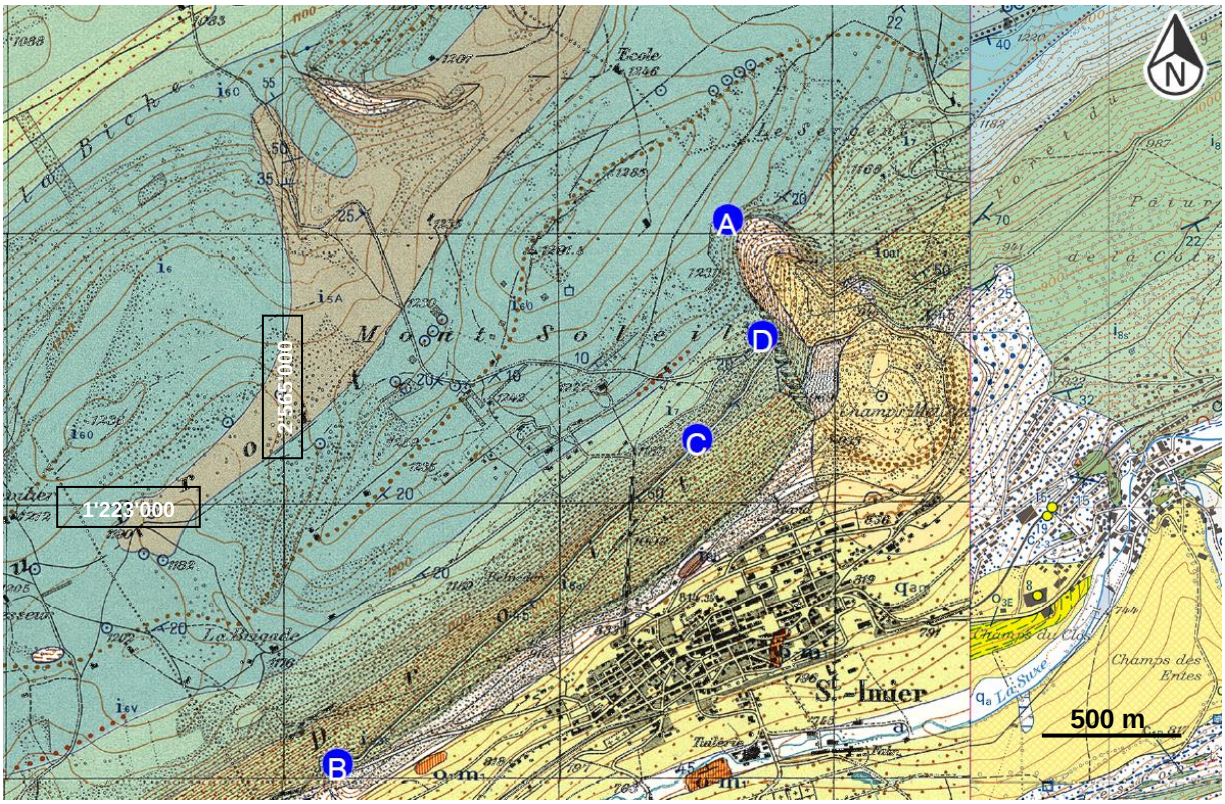
La station de mesure F1 se situe sur le versant du Chasseral exposé au Sud à 1270 m d'altitude. Elle a été installée en-haut d'une grande dalle inclinée au bord de la route menant au sommet du Chasseral (figure 25). Cette dalle à la surface granuleuse est composée d'un calcaire appartenant à la Formation de Reuchenette (Schär et al., 1971). Ce calcaire micritique date du Kimméridgien. La station se trouve dans la forêt et était couverte de feuilles en 2017.



Figure 25 : Vue d'ensemble en direction du Nord et vue rapprochée de la station F1 du Chasseral

2.5.3. Cirque des Chenevières – Mont-Soleil

Le cirque des Chenevières, proche du Mont-Soleil, est un creux qui se situe au-dessus de St-Imier dans le Jura Bernois en face du Chasseral. Cinq stations divisées en quatre groupes (A1, B1, C1-2 et D1) ont été installées entre 920 m et 1230 m d'altitude. La carte géologique ci-dessous indique la position des groupes (figure 26). D'après la carte tectonique de la Suisse au 1 :500'000, les stations de mesure se situent sur un anticlinal dont l'axe passe au sommet du Mont-Soleil (OFEG et al., 2005).



Lithologie

- i_{8ai} Membre du Chailley de la Formation du Twannbach
- i_7 Formation de Reuchenette
- i_6 Séquanien (Formation indifférenciée de Günsberg, Vellerat, Villigen, Balsthal et Courgenay)

Figure 26 : Situation géographique et géologique des stations A, B, C et D du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil. Fond de carte géologique : Bourquin et al. (1946) et Aufranc et Burkhalter (2017). Les principales formations géologiques sont légendées.

Description et localisation des stations de mesure

Le groupe A se trouve dans la forêt sur la bordure N-W du Cirque des Chenevières (figure 27). La dalle sur laquelle les clous ont été plantés est constituée d'un calcaire appartenant à la série du Séquanien, datant de l'Oxfordien au Kimméridgien qui comprend les Formations de Günsberg, Vellerat, Villigen, Balsthal et Courgenay (Bourquin et al., 1946). Ces formations n'ont pas été différenciées sur la carte géologique existante. Cette série peut contenir des niveaux compacts, des calcaires oolithiques ou des niveaux marneux (Bourquin et al., 1946). Les observations sur le terrain indiquent que la station A1 est sur un calcaire compact micritique. Elle est positionnée sur un dos de couche horizontale à une altitude de 1230 m. Lors de la dernière visite, la station était couverte de mousse et un bout de roche est parti à côté d'un clou.



Figure 27 : Vue d'ensemble en direction de l'Est et vue rapprochée de la station A1 des Chenevières

La station B1, à 920m, a été installée sur une dalle subverticale composée d'un calcaire du membre de Chailley (Formation du Twannbach). Ce calcaire bioclastique ou dolomitique date du Kimméridgien au Tithonien (Bernier, 1984). La station se situe dans la forêt du versant du Mont-Soleil exposé au Sud. Elle est à proximité de la route qui monte au sommet au niveau du premier virage. La surface de la dalle présente des aspérités et plusieurs fissures millimétriques et centimétriques qui passent à travers la station (figure 28). Au-dessus des clous, la mousse a poussé en abondance.



Figure 28 : Vue d'ensemble et vue rapprochée de la station B1 des Chenevières

Le groupe C se situe sur le versant du Mont-Soleil exposé au Sud-Est à 1090 m d'altitude. Les stations se trouvent au bord de la route qui monte au sommet après le passage du funiculaire. Les deux stations sont installées sur du calcaire biomicritique de la Formation de Reuchenette. La station de mesure C1 est positionnée sur une dalle subverticale exposée au Sud-Est et la station C2 sur un front de couche 2 m plus haut. La surface de la station C2 présente plus d'aspérités que la station C1 (figure 29).

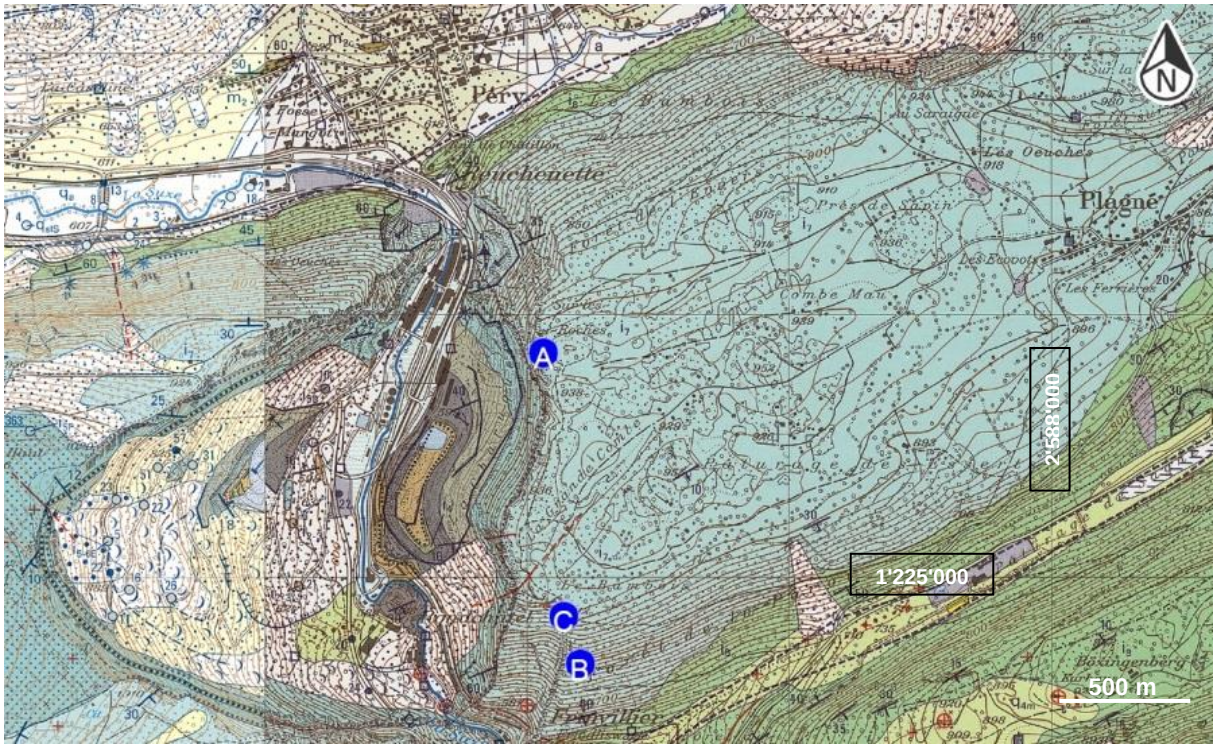


Figure 29 : Photo du haut : vue d'ensemble du groupe C en direction du N-W; photo du bas à gauche : vue rapprochée de la station C1 ; photo du bas à droite : vue rapprochée de la station C2

La station D1 du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil est fixée sur une dalle peu inclinée de la Formation de Reuchenette au bord de la route dans un grand virage après le groupe C en montant le col du Mont-Soleil. La couverture arbusive, la présence de mousse et de feuilles y est importante. Cette station n'a pas été retrouvée en 2018 en raison de présence de neige.

2.5.4. Reuchenette

Reuchenette est un lieu-dit au-dessus de Bienne dans le Jura Bernois. Quatre stations (A1, B1, B2, C1) réparties en trois groupes (A, B, C) ont été installées entre 720 m et 930 m d'altitude dans la forêt au Nord de Frinvillier. Les stations sont localisées sur la carte géologique ci-dessous (figure 30). Toutes les stations sont positionnées sur le calcaire de la Formation de Reuchenette. Ce sont des bancs massifs de calcaires micritiques clairs datant du Kimméridgien (Antenen et al., 2004). La région est un anticlinal dont l'axe du pli se situe entre le groupe A et le groupe B et C (OFEG et al., 2005).



Lithologie

i_7 Formation de Reuchenette

Figure 30 : Situation géographique et géologique des stations A, B et C de Reuchenette. Fond de carte géologique : Antenen et al., 2004 ; Aufranc et Burkhalter, 2017. Seule la principale formation géologique est légendée.

Description et localisation des stations de mesure

La station A1 se trouve à 923 m d'altitude à côté d'un chemin pédestre au bord de la falaise en face d'une industrie de ciment. Elle est installée sur une dalle peu inclinée en direction du Nord. La surface de la roche est rugueuse avec de nombreuses aspérités et est couverte de lichens (figure 31).



Figure 31 : Vue d'ensemble de la station A1 de Reuchenette en direction de l'Ouest

Les deux stations du groupe B se situent dans la forêt sur le versant exposé au Sud de Reuchenette à environ 720 m d'altitude. La station B1 se trouve au-dessus d'un petit replat d'une barre rocheuse fortement inclinée. Tout proche, la station B2 est installée sous ce replat. Le groupe B n'a malheureusement pas été retrouvé en 2018 et il n'existe qu'une seule mesure au micromètre, celle de 1998. Le groupe B est donc exclu de l'analyse car le calcul du taux d'ablation karstique est impossible.

La station C1 est positionnée à 912 m d'altitude au bord de la falaise en direction du Sud-Est (figure 32). Un chemin pédestre passe à côté de la station qui se trouve à environ 1 km du groupe A vers le Sud. La surface de la dalle est lisse mais présente de nombreux lichens.



Figure 32 : Vue d'ensemble de la station C1 de Reuchenette en direction de l'Ouest

2.6. Données météorologiques

La quantité des précipitations par année entre 1998 et 2018 pour chaque site d'étude sont données par les stations météorologiques du réseau *MétéoSuisse* les plus proches. Les données de ces stations ont été obtenues par le logiciel *Climap*.

La quantité de précipitations varie entre les régions. Cette variation dépend de plusieurs facteurs comme la topographie, l'altitude, l'exposition au vent et la présence de végétation (Arrigo, 2012 ; Joly et al., 2009). Si possible, ces critères doivent être pris en compte lors du choix de la station météorologique. Pour ce travail, l'altitude et la distance entre le site d'étude et la station météorologique sont les critères dominants.

2.6.1. Les Morteys

Les stations météorologiques les plus proches pour le site des Morteys sont Château-d'Oex à 6.3 km de distance à 1028 m d'altitude et le Moléson à 11.3 km de distance à 1974 m d'altitude. La moyenne des quantités de précipitations par année entre 1998 et 2017 est de 1281 mm pour Château-d'Oex et de 950 mm pour le Moléson. La différence entre ces deux stations est grande. En comparant avec d'autres stations météorologiques préalpines, il semblerait que la station du Moléson présente un déficit en précipitations. Il est donc plus judicieux d'utiliser les données de Château-d'Oex plutôt que celles du Moléson pour le site d'étude des Morteys. Les quantités de précipitations pour les années

entre 1998 et 2018 à Château-d'Oex sont présentées sur le graphique ci-dessous (figure 33). Les quantités varient entre 1071 mm (en 2010) et 1622 mm (en 2007).

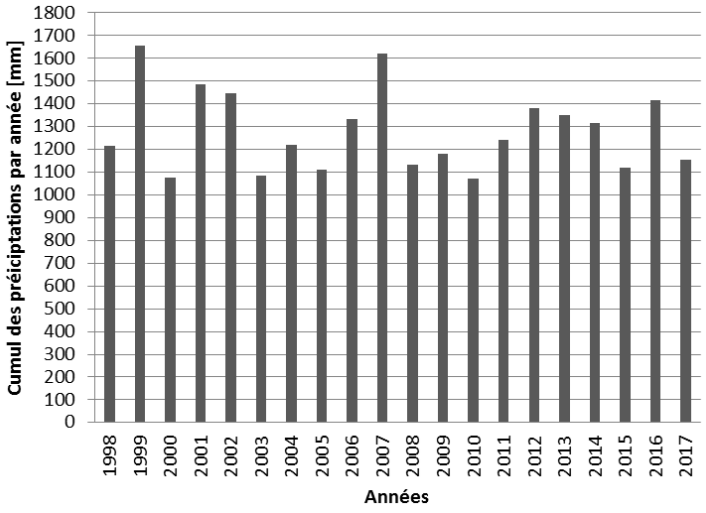


Figure 33 : Somme des précipitations pour les années de 1998 à 2017 à la station Château-d'Oex.

2.6.2. Chasseral

Le Chasseral possède sa propre station météorologique proche du sommet à 1599 m sur le versant exposé au Sud-Est. La moyenne des quantités de précipitations par année entre 1998 et 2017 est de 1309 mm. Les sommes des précipitations pour le Chasseral sont illustrées sur le graphique ci-dessous (figure 34). La somme varie entre 809 mm (2003) et 1862 mm (2012).

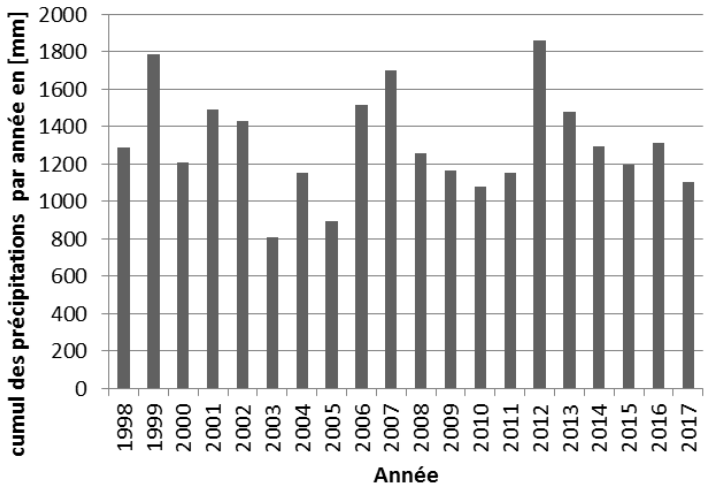


Figure 34 : Somme des précipitations pour les années de 1998 à 2017 à la station du Chasseral.

2.6.3. Le Cirque des Chenevières

Le Cirque des Chenevières est à proximité de deux stations météorologiques : le Chasseral à 5.3 km de distance et Courtelary à 7.8 km de distance avec une altitude de 695 m. La moyenne des quantités de précipitations pour le Chasseral est de 1309 mm et Courtelary de 1291 m. Les altitudes des stations météorologiques ne correspondent pas aux altitudes des stations de mesure des Chenevières mais les quantités de précipitations varient peu entre le Chasseral et Courtelary. L'analyse statistique démontre une relation significative (R^2=0.787) entre les années 1998 et 2017

pour ces deux stations. Par conséquent, la moyenne des quantités de précipitation des deux stations météorologiques est utilisée dans l'analyse. Cette moyenne équivaut à 1300 mm. Les sommes des précipitations pour la station du Chasseral et la station de Courtelary sont représentées sur le graphique ci-dessous (figure 35). Les cumuls les plus bas sont rencontrés en 2003 avec une valeur de 809 mm pour le Chasseral et 874 mm pour Courtelary. Les cumuls les plus hauts se trouvent en 2012 pour le Chasseral avec une valeur de 1862 mm et en 2007 pour Courtelary avec une valeur de 1800 mm.

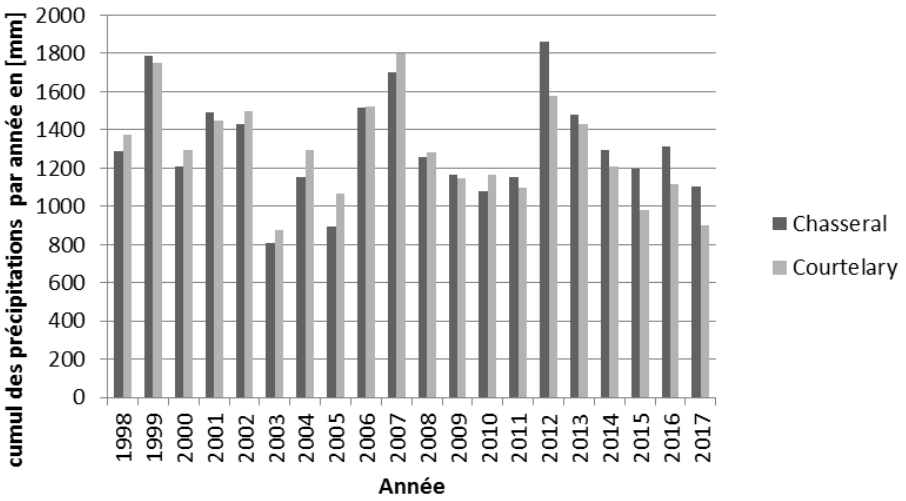


Figure 35 : Somme des précipitations pour les stations météorologiques du Chasseral et de Courtelary entre 1998 et 2017

2.6.4. Reuchenette

La station météorologique la plus proche du site d'étude de Reuchenette est celle de Macolin à une distance de 4.9 km avec une altitude de 883 m. La moyenne des quantités de précipitations entre 1998 et 2017 est de 1344 mm. Les sommes des précipitations pour la station météorologique de Macolin entre 1998 et 2017 sont représentées sur le graphique ci-dessous (figure 36). La somme des précipitations la plus basse est rencontrée pendant l'année 2005 avec une valeur de 908 mm et le cumul le plus haut en 1999 et en 2001, avec des valeurs de 1747 et 1744 mm.

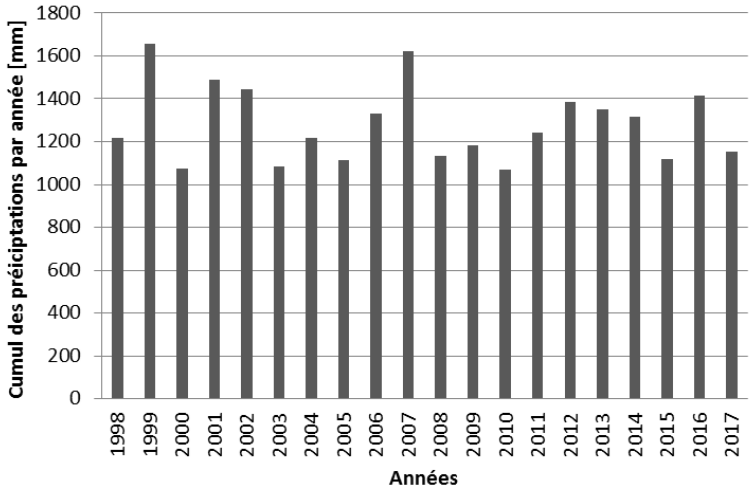


Figure 36 : Somme des précipitations pour les stations météorologiques de Macolin entre 1998 et 2017

2.6.5. Synthèse des données météorologiques

Le tableau 1 décrit les stations météorologiques utilisées dans ce travail (l'altitude, les coordonnées GPS et la distance avec le site d'étude). Toutes les sommes des précipitations depuis 1998 jusqu'à 2017 ainsi que la moyenne de ces cumuls sont également présentées ci-dessous.

Les quantités de précipitations les plus basses en une année ont été mesurées en 2003 pour le Chasseral et Courtelary, en 2010 pour Château-d'Oex et en 2005 pour Macolin. Les valeurs les plus hautes ont été mesurées en 2012 pour le Chasseral, en 2007 pour Courtelary et en 1999 pour Château-d'Oex et Macolin.

Les valeurs des moyennes n'indiquent pas de différence importante entre les stations météorologiques sauf pour la station du Moléson. Comme indiqué plus haut, la station a probablement un déficit en précipitations et les données sont donc erronées. En écartant le Moléson, la différence entre la moyenne la plus haute et la moyenne la plus basse est de seulement 63.4 mm. Comme cette différence est minime, les variations du taux d'ablation karstique ne peuvent pas seulement être expliquées par le facteur des précipitations.

Nom de la station météo	**Chasseral**	**Courtelary**	**Le Moléson**	**Château-d'Oex**	**Macolin**
Altitude de la station	1599 m	695 m	1974 m	1028 m	883 m
Coordonnées x/y	2'570'847/1'220'158	2'573'623/1'225'597	2'567'723/1'155'072	2'577'040/1'147'655	2'583'037/1'221'115
Distance avec le site d'étude	Chasseral : 0 km Chenevières : 5.3 km	Chenevières : 5.8 km	Les Morteys : 11.3 km	Les Morteys : 6.3 km	Reuchenette : 4.9 km
1998	1291.5	1375.4	757.8	1216.1	1362.6
1999	1790.4	1748.5	911.5	**1655**	**1747.1**
2000	1208.3	1292.8	**443**	1075.4	1313.9
2001	1491.2	1451.3	626.9	1487.8	1744.1
2002	1430.8	1497.6	978.1	1445.1	1718.5
2003	**809.3**	**874.3**	717.3	1082.8	972.9
2004	1153.2	1293.9	867.6	1219.1	1367.9
2005	894.1	1068.3	961.9	1112.8	**907.5**
2006	1518	1523.9	877.6	1333.1	1466.6
2007	1701.9	**1799.5**	1129.6	1621.6	1728
2008	1255.7	1281.5	798	1132	1347.5
2009	1164.7	1147.4	818.5	1182.1	1130.8
2010	1080	1165	896	**1070.6**	1141.4
2011	1153.7	1096.2	956.8	1242.3	1120.1
2012	**1862.1**	1576.6	1332.2	1382.9	1623.7
2013	1480.4	1429.7	1233.9	1352.6	1520.1
2014	1292.4	1207.1	**1346.3**	1314.2	1025.1
2015	1195	979.3	1060.1	1118.1	1084.9
2016	1313.7	1118.6	1213.5	1416.9	1426.6
2017	1105.6	900	1074	1153.1	1132.2
Moyenne 1998-2017 [mm]	*1309.6*	*1291.3*	*950.0*	*1280.7*	*1344.1*

Tableau 1 : Récapitulatif des 5 stations météorologiques avec les sommes des précipitations [mm] par année et moyenne de la somme des précipitations par année entre 1998 et 2017

2.7. Tableaux récapitulatifs des stations de mesure

Les paramètres de l'altitude, de la lithologie, de l'exposition et de la présence de végétation de chaque station de mesure sont décrits dans les tableaux suivants. Le tableau 2 contient les stations des Morteys, le tableau 3, les stations du Chasseral, le tableau 4, les stations des Chenevières et le tableau 5, celles de Reuchenette. Toutes ces caractéristiques sont utilisées pour l'interprétation des variations des taux d'ablation karstique au chapitre 4.

MOR	coordonnées x/y	Alt. [m]	Lithologie	Exposition	Végétation
A1	578'432/154'142	2065	Formation du Moléson, calcaire micritique surface rugueuse en lapiez, fractures millimétriques et plis centimétriques, dalle subverticale (56/N132)	S-E	
A2	578'433/154'142	2060	Formation du Moléson, calcaire micritique surface rugueuse, petites fracturations, taches blanches d'altération dalle horizontale (15/N298)	S-E	
A3	578'441/154'138	2060	Formation du Moléson, calcaire micritique surface rugueuse en lapiez front de couche incliné (58/N147)	S-E	présence de lichen, mousse
B1 B2 B3	578'342/154'171	2092	Formation du Moléson, calcaire micritique surface plus lisse avec joint de stratification au milieu du B3, ligne en relief à droite des clous dalle subverticale (60/N152)	S-E	
B4	pas de données	2090	Formation du Moléson, calcaire micritique surface rugueuse avec taches noires et blanches et microfissures entre les clous, dalle subverticale	S-E	
B5	pas de données	2090	Formation du Moléson, calcaire micritique surface rugueuse, taches blanches front de couche, à la verticale en contre-pente (60/N150)	S-E	lichens
C1	478'116/153'337	2010	Formation des Sciernes d'Albeuve, calcaire plaqueté fin et compact surface lisse, fractures horizontales et taches d'altération front de couche incliné (62/N124)	N-E	mousse et herbes au-dessus
C2	578'129/153'352	2010	Formation des Sciernes d'Albeuve, calcaire plaquetés fins et compacts avec présence d'une ligne de silex au-dessus de la station, surface lisse dalle subverticale (62/N124)	N-E	
C3	578'134/153'346	2010	Formation des Sciernes d'Albeuve, calcaire plaquetés fins et compacts nombreuses microfissures front de couche horizontal (62/N124)	N-E	
D1 D2 D3	578'617/153'162	1980	Formation du Moléson, calcaire massif micritique, surface rugueuse avec de nombreuses micro-aspérités stylolithe au milieu des clous, veine de calcite front de couche horizontal (60/N315)	N-NW présence de plaque de neige	
D4	578'608/153'150	2005	Formation du Moléson, calcaire massif micritique surface lisse dalle verticale (60/N315)	N-NW	nombreux lichens
E1	578'576/153'232	1972	Formation du Moléson, calcaire micritique dalle subverticale 66/N340	N	

Tableau 2 : Caractéristiques des stations de mesure des Morteys (MOR).

CHA	coordonnées x/y	Alt. [m]	Lithologie	Exposition	Végétation
A1	571’096/220’243	1590	Formation du Balsthal, calcaire micritique ou oolithique surface gondolée dalle faiblement inclinée (25/N152)	S-E	touffe d’herbe au-dessus
A2	pas de données	1590	Formation du Balsthal, calcaire micritique ou oolithique dalle faiblement inclinée (22/N150)	S-E	lichens
A3	pas de données	1590	Formation du Balsthal, dalle subverticale (63°/N180)	S	lichens
B1	570’847/220’208	1597	membre Hauptmumienbank de la Formation de Vellerat, calcaire oolithique, fracture au-dessus des clous dalle inclinée légèrement tassée (35°/N170)	S sous le vent	lichens, touffe d’herbe
B2	pas de données	1597	membre Hauptmumienbank de la Formation de Vellerat, calcaire oolithique, aspérités, microfissures et canal d’eau vertical au-dessus de la station front de couche subvertical (65°/N330)	N sous le vent	touffe d’herbe au-dessus
C1	571’237/220’764	1565	formation du Hauptrogenstein, calcaire oolithique granuleux, dalle en pente assez fracturée, roche éclatée sur un des clous (45°/N196)	S au vent	
D1	571’342/220’593	1542	Formation d’Ifenthal, calcaire oolithique et biodétritique granuleux, dalle inclinée (56/N184)	S	lichens
E1	571’536/220’342	1570	Formation de Balsthal, calcaire micritique ou oolithique beige dalle inclinée bien lapiézée (45°/N165)	S-E dans une combe à neige	lichens, végétation, sous la mousse en 2017
F1	pas de données	1270	formation de Reuchenette, calcaire micritique clair, surface granuleuse, grande dalle inclinée découverte artificiellement (47°/N175)	S	au bord de la forêt

Tableau 3 : Caractéristiques des stations de mesure au Chasseral (CHA).

CHE	coordonnées x/y	Alt. [m]	Lithologie	Exposition	Végétation
A1	566’615/224’039	1590	séquanien, sur un dos de couche horizontal très fracturé avec éclatement de roche sur un clou (08°/118)	S	dans la forêt mousse par-dessus en 2018
B1	565’203/222’062	1590	membre de Chailley de la Formation du Twannbach, calcaire bioclastique, dolomite, dalle subverticale à surface granuleuse et présence d’aspérités au milieu de la station (56°/N158)	S-E	au bord de la forêt, mousse au-dessus (apport possible d’humidité)
C1	566’504/223’241	1590	Formation de Reuchenette, calcaire micritique, bioclastique, dalle subverticale (60°/N148)	S-E	au bord de la forêt, végétation au-dessus de la station
C2	pas de données	1597	Formation de Reuchenette, calcaire micritique, sur le front de couche de la dalle subverticale à surface granuleuse, nombreuses aspérités (60°/N148)	E	au bord de la forêt, végétation au-dessus de la station
D1	pas de données	1597	Formation de Reuchenette, calcaire micritique, bioclastique, dalle peu inclinée (30°/N138)	S-E	forêt, mousse, feuilles

Tableau 4 : Caractéristiques des stations de mesure aux Chenevières (CHE).

REU	coordonnées x/y	Alt. [m]	Lithologie	Exposition	Végétation
A1	586’066/225’852	930	Formation de Reuchenette, dalle faiblement inclinée (18/N021)	N	lichens
B1	586’205/224’662	720	Formation de Reuchenette, dalle en pente (36°/N165)		dans la forêt
B2	pas de données	720	Formation de Reuchenette sur le replat d’une barre rocheuse (42°/N159)		dans la forêt
C1	586’142/224’848	912	Formation de Reuchenette, sur une dalle au début de la plongée des pendages (26/N158)	S-E	lichens

Tableau 5 : Caractéristiques des stations de mesure à Reuchenette (REU).

2.8. Méthodes

La démarche de l’analyse et les méthodes utilisées pour interpréter les résultats sont présentées dans cette partie. La première étape de l’analyse consiste à évaluer si les données ne sont pas aberrantes afin d’obtenir des taux d’ablation karstique corrects. Pour la plupart des stations, trois taux sont calculés : le taux d’ablation entre 1998 et 1999, entre 1999 et 2001 et entre 1998 et 2017/18. Ces taux sont évalués et écartés si les valeurs ne sont pas considérées comme significatives.

2.8.1. Evaluation des données

Après avoir obtenu toutes les mesures pour une station, deux moyennes sont obtenues par visite. La première moyenne est calculée à partir des trois mesures du micromètre CO1 et la deuxième à partir des trois mesures du micromètre CO2.

Pour évaluer ces moyennes, il faut premièrement observer si les valeurs diminuent avec le temps. En cas contraire, les données sont aberrantes. La cause d’une augmentation de la valeur avec le temps provient soit d’une erreur de mesure soit d’un déplacement d’un clou de la station.

Deuxièmement, une comparaison entre les moyennes du micromètre CO1 et les moyennes du micromètre CO2 est nécessaire afin de mettre en évidence des valeurs aberrantes causées par des erreurs de mesure ou des problèmes mécaniques (différence de géométrie des micromètres, usure des micromètres, déplacement de clous). Normalement, le micromètre CO1 indique des valeurs plus basses que le micromètre CO2. Si la différence est trop importante par rapport à la moyenne, les valeurs sont considérées comme aberrantes. Si possible, celles-ci sont modifiées en se basant sur le taux d’ablation karstique moyen de la station ou en se basant sur les valeurs d’un seul micromètre.

Les moyennes évaluées et corrigées sont ensuite utilisées pour calculer les taux d’ablation karstique en [mm/an] pour chaque station. Comme la plupart des stations ont eu quatre visites, trois taux d’ablation en [mm/an] par micromètre sont possibles pour ce travail : les taux d’ablation entre 1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017/18.

Le taux d’ablation karstique entre 1998-2017/18, qui possède le plus grand intervalle de temps, permet d’observer plus précisément les variations entre chaque station ou chaque site d’étude. En

effet, l'ablation entre la mesure de 1998 et la mesure de 2017/18 est grande. Par conséquent, lors des calculs de moyenne, la marge d'erreur prend moins d'importance dans les résultats.

Les taux d'ablation entre 1998-1999 et 1999-2001 permettraient d'observer des variations annuelles de vitesse d'ablation et par conséquent, d'examiner si la quantité de précipitations par année joue un rôle important dans l'ablation karstique. En effet, si la quantité de précipitations varie d'année en année, l'érosion du calcaire doit aussi varier. Ces valeurs devront tout d'abord être évaluées si elles sont significatives ou non pour pouvoir les corréler à la quantité de précipitations.

2.8.2. Calcul des taux d'ablation karstique

La formule utilisée pour obtenir les taux d'ablation karstique est la suivante :

$$\frac{(Moyenne\ des\ mesures_{date1} - Moyenne\ des\ mesures_{date\ 2})}{(nombre\ de\ mois\ écoulés\ entre\ la\ date\ 1\ et\ 2) * 12}$$

La différence de la moyenne des mesures de la date la plus éloignée et de la moyenne de la date la plus récente donne une ablation en [mm]. Pour obtenir une vitesse, cette ablation doit être divisée par le temps qui s'est déroulé entre les deux dates. Afin d'être plus précis, la durée est comptée en mois puis modifiée en année en multipliant le nombre de mois par 12. Le taux d'ablation karstique est alors donné en [mm/an].

Les taux calculés sont encore séparés par micromètre afin de vérifier encore une fois si les données ne sont pas aberrantes. Théoriquement, le taux d'ablation karstique calculé avec le micromètre CO1 et le taux calculé avec le micromètre CO2 devraient être identiques si aucune erreur de mesure n'a été commise. Dans le cas où la différence entre les deux taux est trop grande (de plus de 0.002 mm/an), soit les valeurs d'un micromètre sont écartées si l'observation d'une erreur de mesure est certaine soit une moyenne est effectuée entre le taux du micromètre CO1 et le taux du micromètre CO2.

2.8.3. Analyse des taux d'ablation karstique

Après avoir calculé tous les taux d'ablation karstique (1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017/18), ces taux sont comparés entre eux graphiquement. L'évaluation des taux de 1998-1999 et 1999-2001 est réalisée au chapitre 3.5.

L'analyse se concentre principalement sur le taux d'ablation karstique calculé avec les mesures de 1998 et de 2017/18. Une première comparaison est réalisée entre les paramètres des stations de mesure au sein du même groupe (par exemple : analyse des stations A1, A2 et A3 du groupe A des Morteys). Une deuxième comparaison est réalisée entre toutes les stations de mesure d'un site d'étude (Par exemple : analyse de toutes les stations des Morteys). Finalement, une comparaison des stations de tous les sites d'étude est réalisée en mettant en évidence leurs similitudes. Ces comparaisons permettent de mettre en évidence les paramètres qui modifient la vitesse d'ablation des calcaires. Souvent, à l'intérieur des groupes de stations, seul un ou deux paramètres varient (dalle ou

front de couche, pendage, fracturations, surface rugueuse ou lisse, végétation ou non). Ce peu de variation permet d'interpréter quel est le facteur principal qui modifie la vitesse d'ablation. Les deux autres comparaisons, quant à elles, permettent de vérifier les hypothèses proposées lors de la première comparaison en observant les phénomènes à plus grande échelle.

3. Résultats

3.1. Les Morteys

Le site des Morteys possède 16 stations réparties en 5 groupes (A, B, C, D, E) qui ont connu quatre campagnes de mesure : le 18 juin 1998, le 25 août 1999, le 13 août 2001 et le 4 octobre 2017 (groupes A, B, C) ou le 6 octobre 2017 (groupes D et E) (tableau 6). Les moyennes des mesures de l'ablation karstique en [mm] des deux micromètres (CO1, CO2) pour ces quatre dates sont présentées dans le tableau 5.

stations	**A1**	**A2**	**A3**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**
micromètre	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**
18.06.1998	9.642	9.496	7.101	9.353	10.190	10.622	9.058	7.790
25.08.1999	9.620	9.478	7.079	9.320	10.147	10.602	9.029	7.747
13.08.2001	9.582	9.433	7.059	9.293	10.121	10.582	8.999	7.735
04.10.2017	9.267	9.219	6.891	9.103	9.927	10.372	8.861	7.550
micromètre	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**
18.06.1998	9.899	9.737	7.324	9.618	10.408	10.930	9.282	8.047
25.08.1999	9.870	9.713	7.292	9.589	10.376	10.901	9.249	8.015
13.08.2001	9.836	9.680	7.272	9.566	10.359	10.848	9.215	7.995
04.10.2017	9.618	9.471	7.118	9.376	10.179	10.675	9.089	7.822
stations	**C1**	**C2**	**C3**	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**E1**
micromètre	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**
18.06.1998	10.085	9.878	12.704	12.915	12.271	13.029	9.203	11.450
25.08.1999	10.060	9.358	12.783	12.877	12.242	13.008	9.185	11.422
13.08.2001	10.038	9.312	12.724	12.847	12.241	12.997	9.148	11.382
04-06.10.2017	9.880	9.249	12.505	12.620	12.053	12.892	8.913	11.238
micromètre	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**
18.06.1998	10.342	9.638	12.957	13.188	12.558	13.285	9.450	11.693
25.08.1999	10.321	9.624	13.033	13.159	12.526	13.268	9.434	11.679
13.08.2001	10.212	9.595	12.988	13.130	12.519	13.260	9.398	11.656
04-06.10.2017	10.165	9.532	12.790	12.908	12.338	13.170	9.176	11.522

Tableau 6 : Moyennes des trois mesures en [mm] des micromètres CO1 et CO2 pour les stations des Morteys

3.1.1. Evaluation des données

La plupart des données récoltées répondent aux critères d'évaluation présentés au chapitre 2.8.1 et sont donc considérées comme valides. Seules les stations A1, C1, C2, C3 et D2 présentent des mesures incohérentes qui sont discutées ci-dessous.

Évaluation de la diminution des valeurs avec le temps

Les mesures de la station C3 ne baissent pas entre 1998 et 1999, ceci pour les deux micromètres. Un commentaire de 1999 sur les fiches de terrain indique que la station serait peut-être montée de 80 µm. Cette montée est probablement due à un mouvement d'un clou qui était instable lors de l'installation. Les valeurs aberrantes de la station C3 de 1998 pour les deux micromètres ne sont pas retenues pour l'analyse. Le taux d'ablation karstique sera alors calculé à partir de 1999.

Évaluation de la différence de mesures entre les deux micromètres pour la même date de visite

La moyenne des différences entre les mesures du micromètre CO1 et les mesures du micromètre CO2 vaut 0.259 ±0.028 mm. Le graphique de la figure 37 illustre ces différences en [mm] pour chaque station des Morteys avec la moyenne plus ou moins les écart-types par station. En observant le graphique, les différences entre les mesures CO1 et les mesures CO2 réalisées en 2017 sont systématiquement plus grande que les autres années. Cette augmentation pourrait être expliquée par le fait que les micromètres ont été usés avec le temps. Trois valeurs aberrantes sont mises en évidence : la valeur de la station A1 en 2017, la valeur de la station C1 en 2001 et la valeur de la station C2 en 1998. Ces valeurs sont discutées au paragraphe suivant.

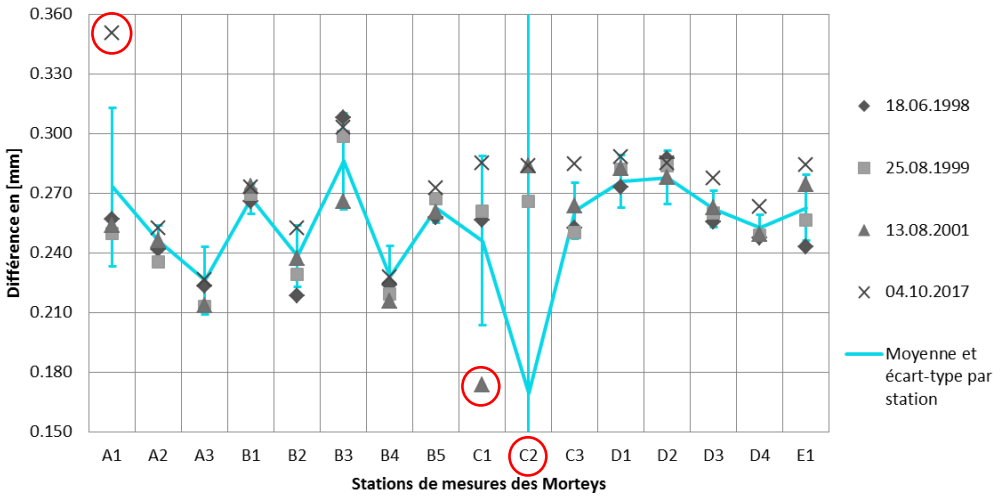


Figure 37 : Graphique des différences en [mm] pour chaque visite entre les mesures du micromètre CO1 et les mesures du micromètre CO2 pour les stations des Morteys. Les valeurs aberrantes, A1 (2017), C1 (2001) et C2 (1998), sont mises en évidence. Pour la station C2, la valeur de la différence pour 1998 est située en dehors du graphe (-0.24 mm).

Évaluation de la différence des valeurs des deux micromètres pour des dates différentes

Au tableau 6, les moyennes des mesures de la station A1 en 2017 et de la station C1 en 2001 ont été évaluées comme incohérentes. Ces erreurs de lecture ont été mises en évidence à l'aide de la différence des moyennes de mesures entre des dates différentes.

En prenant la station A1, la différence entre la moyenne des mesures CO1 de 2001 et la moyenne des mesures CO1 de 2017 équivaut à 0.315 mm (9.582 mm - 9.267 mm) (tableau 6). La différence entre la moyenne CO2 des mesures de 2001 et la moyenne CO2 des mesures de 2017 équivaut à 0.218 mm. La différence de ces valeurs est de 0.097 mm entre les micromètres. D'après le graphique

de la figure 37, l'année 2017 est le problème. En observant l'ablation des autres stations de mesures du groupe A (A2 et A3) des Morteys pour les mêmes dates, l'ablation moyenne est égale à 0.186 mm. Il a été conclu que la valeur CO1 de 2017 était aberrante car l'ablation calculée entre 2001 et 2017 avec les valeurs du micromètre CO1 dépasse largement cette moyenne. La valeur de la station A1 CO1 de 2017 a été modifiée à 9.364 mm à l'aide de l'ablation calculée entre 2001 et 2017 avec le micromètre CO2.

En prenant la station C1, la différence entre la moyenne des mesures CO1 de 2001 et la moyenne des mesures CO1 de 2017 équivaut à 0.158 mm (10.038 mm – 9.880 mm) La différence entre la moyenne CO2 des mesures de 2001 et la moyenne CO2 des mesures de 2017 équivaut à 0.047 mm (10.212 - 10.165 mm). La différence de ces valeurs est de plus de 0.1 mm entre les micromètres. D'après le graphique de la figure 37, l'année 2001 est cette fois le problème. En observant les ablations des autres stations du groupe C (C2, C3) des Morteys calculés entre 1999 et 2001, la moyenne est égale à 0.045 mm. L'ablation calculée entre 1999 et 2001 avec le micromètre CO2 sur la station C1 équivaut à 0.109 mm tandis que l'ablation calculée avec le micromètre CO1 est égale à 0.022 mm. Comme cette dernière valeur est plus proche de la moyenne, les valeurs du micromètre CO1 sont retenues pour l'année 1999 et les valeurs du micromètre CO2 de la station C1 pour 1999 sont modifiées à 10.299 mm (10.321-0.22) (voir tableau 6).

La station C2 possède une différence négative en 1998 entre les mesures du micromètre CO1 et les mesures du micromètre CO2 qui est égale à -0.240 mm (figure 37). Une première hypothèse serait que les micromètres ont été inversés mais les valeurs sont tout de même aberrantes. L'ablation entre 1998 et 1999 est bien trop grande avec les mesures du micromètre CO1 (plus de 0.5 mm) (tableau 6). Il est évident que les mesures de 1998 prise avec le micromètre CO1 sont fausses. La moyenne des mesures de 1998 du micromètre CO1 a été modifiée à partir de la quantité d'ablation obtenue pour le micromètre CO2 entre 1998 et 1999. La valeur de 9.878 mm est changée à 9.372 mm (tableau 7). La différence entre les micromètres redevient cohérente (0.026 mm de différence pour 1998).

Un autre soupçon de valeur aberrante se présente pour les valeurs de la station D2 entre 1999 et 2001. En effet, l'ablation est très minime entre 1999 et 2001, de 0.001 mm pour le CO1. La valeur CO1 de la station D2 a donc été modifiée en se basant sur l'ablation produite entre 1999 et 2001 calculée à partir des mesures CO2 (tableau 7).

stations	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5
micromètre	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**
18.06.1998	9.642	9.496	7.101	9.353	10.190	10.622	9.058	7.790
25.08.1999	9.620	9.478	7.079	9.320	10.147	10.602	9.029	7.747
13.08.2001	9.582	9.433	7.059	9.293	10.121	10.582	8.999	7.735
04.10.2017	**9.364**	9.219	6.891	9.103	9.927	10.372	8.861	7.550
micromètre	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**
18.06.1998	9.899	9.737	7.324	9.618	10.408	10.930	9.282	8.047
25.08.1999	9.870	9.713	7.292	9.589	10.376	10.901	9.249	8.015
13.08.2001	9.836	9.680	7.272	9.566	10.359	10.848	9.215	7.995
04-06.10.2017	9.618	9.471	7.118	9.376	10.179	10.675	9.089	7.822
stations	**C1**	**C2**	**C3**	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**E1**
micromètre	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**
18.06.1998	10.085	**9.372**		12.915	12.271	13.029	9.203	11.450
25.08.1999	10.060	9.358	12.783	12.877	**12.258**	13.008	9.185	11.422
13.08.2001	10.038	9.312	12.724	12.847	12.241	12.997	9.148	11.382
04-06.10.2017	9.880	9.249	12.505	12.620	12.053	12.892	8.913	11.238
micromètre	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**
18.06.1998	10.342	**9.638**		13.188	12.558	13.285	9.450	11.693
25.08.1999	10.321	9.624	13.033	13.159	12.526	13.268	9.434	11.679
13.08.2001	**10.299**	9.595	12.988	13.130	12.519	13.260	9.398	11.656
04-06.10.2017	10.165	9.532	12.790	12.908	12.338	13.170	9.176	11.522

Tableau 7 : Moyennes corrigées en rouge et gras des mesures aux micromètres CO1 et CO2 pour les stations des Morteys.

3.1.2. Taux d'ablation karstique

Présentés dans le tableau 8, les taux d'ablation karstique en [mm/an] entre 1998 et 1999, 1999 et 2001 et 1998 et 2017 de chaque station des Morteys ont été calculés à partir des moyennes corrigées (tableau 7). Puisque les mesures de 1998 de la station C3 sont considérées comme aberrantes, les calculs du taux sont effectués à partir de l'année 1999.

stations	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5
micromètre	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1
1998-1999	0.019	0.015	0.019	0.028	0.037	0.017	0.025	0.037
1999-2001	0.020	0.023	0.010	0.014	0.014	0.010	0.016	0.006
1998-2017	**0.014**	**0.014**	**0.011**	**0.013**	**0.014**	**0.013**	**0.010**	**0.012**
micromètre	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2
1998-1999	0.025	0.021	0.027	0.025	0.027	0.025	0.028	0.027
1999-2001	0.018	0.017	0.010	0.012	0.009	0.028	0.018	0.010
1998-2017	**0.015**	**0.014**	**0.011**	**0.013**	**0.012**	**0.013**	**0.010**	**0.012**
stations	C1	C2	C3	D1	D2	D3	D4	E1
micromètre	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1
1998-1999	0.021	0.012		0.033	0.011	0.018	0.015	0.024
1999-2001	0.011	0.024	0.031	0.016	0.009	0.006	0.019	0.021
1998-2017 1999-2017 (C3)	**0.011**	**0.006**	**0.015**	**0.015**	**0.011**	**0.007**	**0.015**	**0.011**
micromètre	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2
1998-1999	0.018	0.012		0.025	0.011	0.015	0.014	0.012
1999-2001	0.011	0.015	0.023	0.015	0.014	0.004	0.019	0.012
1998-2017 1999-2017 (C3)	**0.009**	**0.006**	**0.013**	**0.015**	**0.011**	**0.006**	**0.014**	**0.009**

Tableau 8 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017 pour chaque station des Morteys

Les taux d'ablation karstique calculés entre 1998/99 et 2017 entre les micromètres CO1 et CO2 varient très peu, de ± 0.002 mm/an. Le taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 1999 varie très fortement sur toutes les stations de mesures. Les taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 1999 varient entre 0.011 mm/an et 0.032 mm/an. La variation diminue drastiquement pour les taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 2017, de 0.006 mm/an à 0.015 mm/an.

3.2. Chasseral

Les mesures ont été réalisées à quatre dates différentes sur les 9 stations du Chasseral : le 31 juillet 1998, le 20 août 1999, le 20 août 2001 et le 28 octobre 2017 (tableau 9).

stations	A1	A2	A3	B1	B2	C1	D1	E1	F1
micromètre	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1
31.07.1998	11.373	8.947	9.352	6.939	7.981	11.169	9.846	10.180	10.249
20.08.1999	11.355	8.919	9.335	6.913	7.944	11.129	9.832	10.136	10.216
20.08.2001	11.332	8.892	9.321	6.891	7.898	11.101	9.823	10.119	10.191
28.10.2017	10.978	8.497	9.096	6.670	7.724	10.859	9.763	9.960	9.906
micromètre	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2
31.07.1998	11.566	9.197	9.561	7.188	8.212	11.435	10.111	10.441	10.535
20.08.1999	11.552	9.171	9.532	7.154	8.162	11.396	10.088	10.385	10.511
20.08.2001	**11.544**	9.148	9.517	7.131	8.126	11.359	10.077	10.365	10.480
28.10.2017	11.223	8.769	9.317	6.941	7.939	11.111	10.011	10.236	10.209

Tableau 9 : Moyennes des trois mesures en [mm] des micromètres CO1 et CO2 pour les stations du Chasseral : la valeur aberrante est mise en évidence.

3.2.1. Evaluation des mesures

Évaluation de la diminution des valeurs avec le temps

Toutes les moyennes diminuent avec le temps. Aucune remontée de clous n'est donc à signaler pour le site du Chasseral.

Évaluation de la différence de mesures entre les deux micromètres pour la même date de visite

Le graphique à la figure 38 montre la différence calculées entre les mesures prises avec le micromètre CO1 et les mesures prises au micromètre CO2 pour la même date. La moyenne totale de cette différence équivaut à 0.246 ± 0.029 mm. Aucune valeur aberrante n'est à signaler. La valeur 2017 de la station A1 pourrait être évaluée mais cette variation est minime et a sûrement été causée par la géométrie des instruments. Comme pour le site d'étude des Morteys, la différence est systématiquement plus élevée pour 2017.

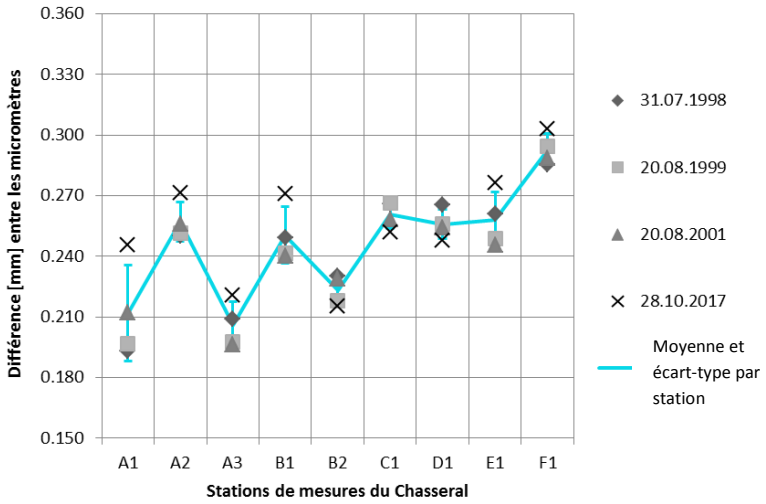


Figure 38 : Graphique des différences CO1-CO2 en [mm] pour chaque visite pour les stations du Chasseral

Évaluation de la différence des valeurs des deux micromètres pour des dates différentes

L'ablation de la station A1 entre 1999 et 2001 est faible, de 0.008 mm avec le micromètre CO2 tandis que l'ablation mesurée avec le micromètre CO1 équivaut à 0.023 mm. Puisque aucune différence majeure n'est présente entre 1998 et 1999, une erreur de mesure a dû se produire avec le micromètre CO2 en 2001. Il est donc nécessaire de modifier la valeur A1 du micromètre CO2 en 2001 en se basant sur la valeur de l'ablation des mesures du CO1. La valeur devient 11.521 mm au lieu de 11.544 mm.

3.2.2. Taux d'ablation karstique

Les taux d'ablation karstique en [mm/an] entre 1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017 de chaque station du Chasseral dans le tableau 10 ont été calculés à partir des moyennes évaluées et corrigées. Comme les Morteys, la variation des taux d'ablation karstique augmente entre les micromètres et entre les stations si l'intervalle de temps diminue. Les taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 1999 varient entre 0.050 mm/an et 0.016 mm/an tandis que les taux calculés entre 1998 et 2017

varient entre 0.005 mm/an et 0.022 mm/an. Ce taux varie très peu entre les micromètres CO1 et CO2, de ± 0.001 mm/an au maximum sauf pour la station A1 (de ± 0.003 mm/an). En effet, la différence entre les micromètres était plus importante en 2017 que lors des autres années (voir figure 38).

stations	A1	A2	A3	B1	B2	C1	D1	E1	F1
micromètre	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1
1998-1999	0.018	0.027	0.017	0.026	0.037	0.040	0.014	0.044	0.033
1999-2001	0.012	0.014	0.007	0.011	0.023	0.014	0.004	0.009	0.013
1998-2017	**0.021**	**0.023**	**0.013**	**0.014**	**0.013**	**0.016**	**0.004**	**0.012**	**0.018**
micromètre	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2
1998-1999	0.015	0.026	0.028	0.034	0.049	0.039	0.024	0.056	0.024
1999-2001	0.015	0.011	0.007	0.012	0.018	0.018	0.005	0.010	0.015
1998-2017	**0.018**	**0.022**	**0.013**	**0.013**	**0.014**	**0.017**	**0.005**	**0.011**	**0.017**

Tableau 10 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-1999, 1999-2001 et 1998-2017 pour chaque station du Chasseral

3.3. Cirque des Chenevières – Mont-Soleil

Les moyennes des valeurs mesurées du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil le 15 octobre 1998, le 20 août 2001 et le 9 janvier 2018 sont présentées dans le tableau 10. Aucune mesure n'existe pour la station D1 en 2018 car elle n'a pas été retrouvée sur le terrain.

stations:	**A1**	**B1**	**C1**	**C2**	**D1**
micromètre	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1
15.10.1998	11.088	**11.812**	10.978	10.861	14.900
20.08.2001	11.043	11.686	10.918	10.761	14.848
09.01.2018	10.857	11.429	10.722	10.597	
micromètre	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2
15.10.1998	11.351	12.044	11.243	11.081	15.154
20.08.2001	11.298	11.962	11.192	10.986	15.116
09.01.2018	11.150	11.693	10.993	10.881	

Tableau 11: Moyennes des trois mesures aux micromètres CO1 et CO2 pour les stations du Cirque des Chenevières. La valeur considérée comme aberrante est mise en évidence.

3.3.1. Evaluation des mesures

Évaluation de la diminution des valeurs avec le temps

Toutes les moyennes diminuent avec le temps. De ce fait, aucun problème d'installation n'est à reporter.

Évaluation de la différence de mesures des deux micromètres pour la même date de visite

Les différences entre les micromètres pour toutes les stations sont présentées sur le graphique de la figure 40. La moyenne des différences est de 0.260 ± 0.021 mm pour toutes les stations. La différence en 2018 pour la station A1 est plus grande que les différences des autres années. Mais dans ce cas, les valeurs sont laissées dans cet état car la variation n'est pas significative. Deux autres différences sont à noter à la station B1 pour l'année 1998 et C2 pour les années 1998 et 2001. L'année 1998 de

la station B1 est en dehors de la dispersion de la moyenne de tous les stations contrairement à la station C2. La valeur de la station B1 est discutée au prochain paragraphe.

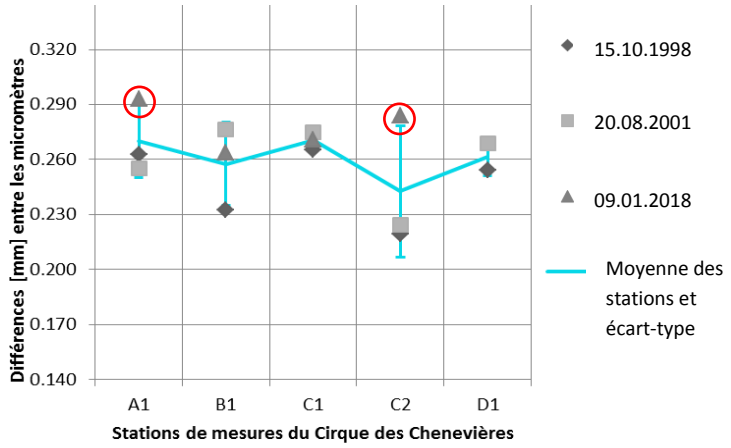


Figure 39: Graphique des différences en [mm] pour chaque visite entre les mesures du micromètre CO1 et les mesures du micromètre CO2 pour les stations du Cirque des Chenevières

Évaluation de la différence des valeurs des deux micromètres pour des dates différentes

Aucune variation importante n'est observée sauf pour la station B1 qui possède une ablation plus grande entre 1998 et 2001 avec le micromètre CO1 (0.126 mm) qu'avec le micromètre CO2 (0,86 mm). L'influence d'une erreur de mesure en 1998 est fort possible. La moyenne de 1998 à 11.812 mm, pour le micromètre CO1, est donc modifiée par rapport à l'ablation du micromètre CO2 de 0.082 mm entre 1998 et 2001, ce qui revient à 11.768 mm.

3.3.2. Taux d'ablation karstique

Les taux d'ablation karstique en [mm/an] entre 1998-2001, 2001-2018 et 1998-2018 de chaque station du Cirque des Chenevières ont été calculés à partir des moyennes corrigées (tableau 12). Les taux d'ablation de 1998-2018 ne varient pas pour les stations B1 et C1, varie de ±0.002 mm pour la station A1 et de ± 0.004 pour la station C2. Cette dernière variation est expliquée par la différence des mesures entre le micromètre CO1 et CO2 en 2018 (figure 41), qui se répercute dans le calcul du taux d'ablation entre 2001 et 2018. Il a été convenu ici de faire la moyenne des taux d'ablation karstique des deux micromètres. Le taux d'ablation CO2 de la station C2 revient à 0.012 mm/an.

stations:	A1	B1	C1	C2	D1
micromètre	CO1	CO1	CO1	CO1	CO1
1998-2001	0.016	0.029	0.021	0.035	0.018
2001-2018	0.011	0.016	0.012	0.010	
1998-2018	0.012	0.018	0.013	0.014	
micromètre	CO2	CO2	CO2	CO2	CO2
1998-2001	0.016	0.029	0.021	0.035	0.018
2001-2018	0.009	0.016	0.012	0.006	
1998-2018	0.010	0.018	0.013	**0.012**	

Tableau 12 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-2001, 2001-2018 et 1998-2018 pour chaque station du Cirque des Chenevières.

La variation des taux d'ablation karstique augmente également entre les stations si l'intervalle de temps diminue (figure 42). Les taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 2001 varient entre 0.016 mm/an et 0.035 mm/an tandis que les taux calculés entre 1998 et 2017 varient entre 0.011 mm/an et 0.018 mm/an.

3.4. Reuchenette

3.4.1. Evaluation des mesures

Le site de Reuchenette comprend quatre stations qui ont été visitées trois fois : le 13 mai 1998, le 20 août 2001 (seulement pour la station A1) et le 25 mars 2018 (seulement pour les postes A1 et C1) (tableau 13).

stations:	**A1**	**B1**	**B2**	**C1**
micromètre	**CO1**	**CO1**	**CO1**	**CO1**
13.05.1998	8.744	12.098	10.171	9.550
20.08.2001	8.677			
25.03.2018	8.532			9.310
micromètre	**CO2**	**CO2**	**CO2**	**CO2**
13.05.1998	8.988	12.336	10.391	9.779
20.08.2001	8.928			
25.03.2018	8.814			9.517

Tableau 13 : Moyennes des mesures aux micromètres CO1 et CO2 pour les stations de Reuchenette

La moyenne des différences entre les micromètres est de 0.243 ± 0.028 mm pour les stations A1 et C1. La différence des micromètres pour l'année 2018 sur les deux stations est en dehors des écart-types. La différence est trop haute pour la station A1 (Δ=0.282 mm) et trop basse pour la station C1 (Δ=0.207 mm). Mais ces valeurs sont laissées telles quelle car les données à disposition ne permettent pas de les modifier.

3.4.2. Taux d'ablation karstique

Les taux d'ablation karstique en [mm/an] entre 1998-2001, 2001-2018 et 1998-2018 pour les postes de Reuchenette sont présentés dans le tableau 14. La variation du taux d'ablation entre les micromètres vaut ± 0.002 mm pour toutes les dates.

stations:	**A1**	**C1**
micromètre	CO1	CO1
1998-2001	0.021	
2001-2018	0.009	
1998-2018	0.011	0.014
micromètre	CO2	CO2
1998-2001	0.019	
2001-2018	0.007	
1998-2018	0.009	0.016

Tableau 14 : Taux d'ablation karstique en [mm/an] entre les années 1998-2001, 2001-2018 et 1998-2018 pour chaque station de Reuchenette

3.5. Synthèse des résultats

Les taux d'ablation karstique moyens de toutes les stations de mesure de l'étude sont présentés dans le tableau 15 ci-dessous. Ces valeurs ont été calculées à partir de la moyenne entre les données du micromètre CO1 et les données du micromètre CO2. Les taux d'ablation karstique de 1998 à 1999 varient entre 0.011 mm/an et 0.050 mm/an. Les taux d'ablation karstique entre 1999 et 2001 ont des valeurs comprises entre 0.005 mm/an et 0.027 mm/an et finalement, les taux d'ablation karstique entre 1998/99 et 2017/18 entre 0.005 mm/an et 0.023 mm/an. Les taux d'ablation karstique de 1998 à 1999, de 1998 à 2001 ou de 1999 à 2001 sont toujours plus élevés et varient plus fortement que les taux de 1998/99 à 2017/18. Plus l'intervalle de temps entre les mesures est court, plus la variation du taux d'ablation augmente. Ces observations sont illustrées dans les graphiques de la figure 40. Ces résultats montrent que l'erreur significative lors du calcul de la moyenne devient trop importante pour les taux de 1998-1999, 1998-2001 et 1999-2001. L'instrument de mesure n'est précis qu'à 0.01 mm. Les erreurs de mesure influencent considérablement les taux d'ablation karstique lorsque la différence entre les mesures est dans le même ordre de grandeur. Après ces constatations, l'analyse se base désormais uniquement sur le taux d'ablation karstique calculés entre 1998 et 2017/18.

Morteys	**A1**	**A2**	**A3**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**	**B5**	**C1**
1998-1999	0.022	0.018	0.023	0.027	0.032	0.021	0.027	0.032	0.020
1999-2001	0.019	0.020	0.010	0.013	0.011	0.019	0.017	0.008	0.011
1998-2017	0.015	0.014	0.011	0.013	0.013	0.013	0.010	0.012	0.010
	C2	**C3**	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**E1**		
1998-1999	0.012		0.029	0.011	0.016	0.015	0.018		
1999-2001	0.020	0.027	0.015	0.011	0.005	0.019	0.016		
1998-2017	0.006		0.015	0.011	0.007	0.015	0.010		
1999-2017		0.014							
Chasseral	**A1**	**A2**	**A3**	**B1**	**B2**	**C1**	**D1**	**E1**	**F1**
1998-1999	0.016	0.027	0.023	0.030	0.043	0.040	0.019	0.050	0.029
1999-2001	0.014	0.012	0.007	0.011	0.021	0.016	0.005	0.009	0.014
2001-2017	0.019	0.023	0.013	0.013	0.014	0.017	0.005	0.011	0.017
Chenevières	**A1**	**B1**	**C1**	**C2**	**D1**				
1998-2001	0.016	0.029	0.021	0.035	0.018				
2001-2018	0.010	0.016	0.012	0.008					
1998-2018	0.011	0.018	0.013	0.012					
Reuchenette	**A1**	**B1**	**B2**	**C1**					
1998-2001	0.020								
2001-2018	0.008								
1998-2018	0.010			0.015					

Tableau 15: Taux d'ablation karstique moyens de toutes les stations de mesure

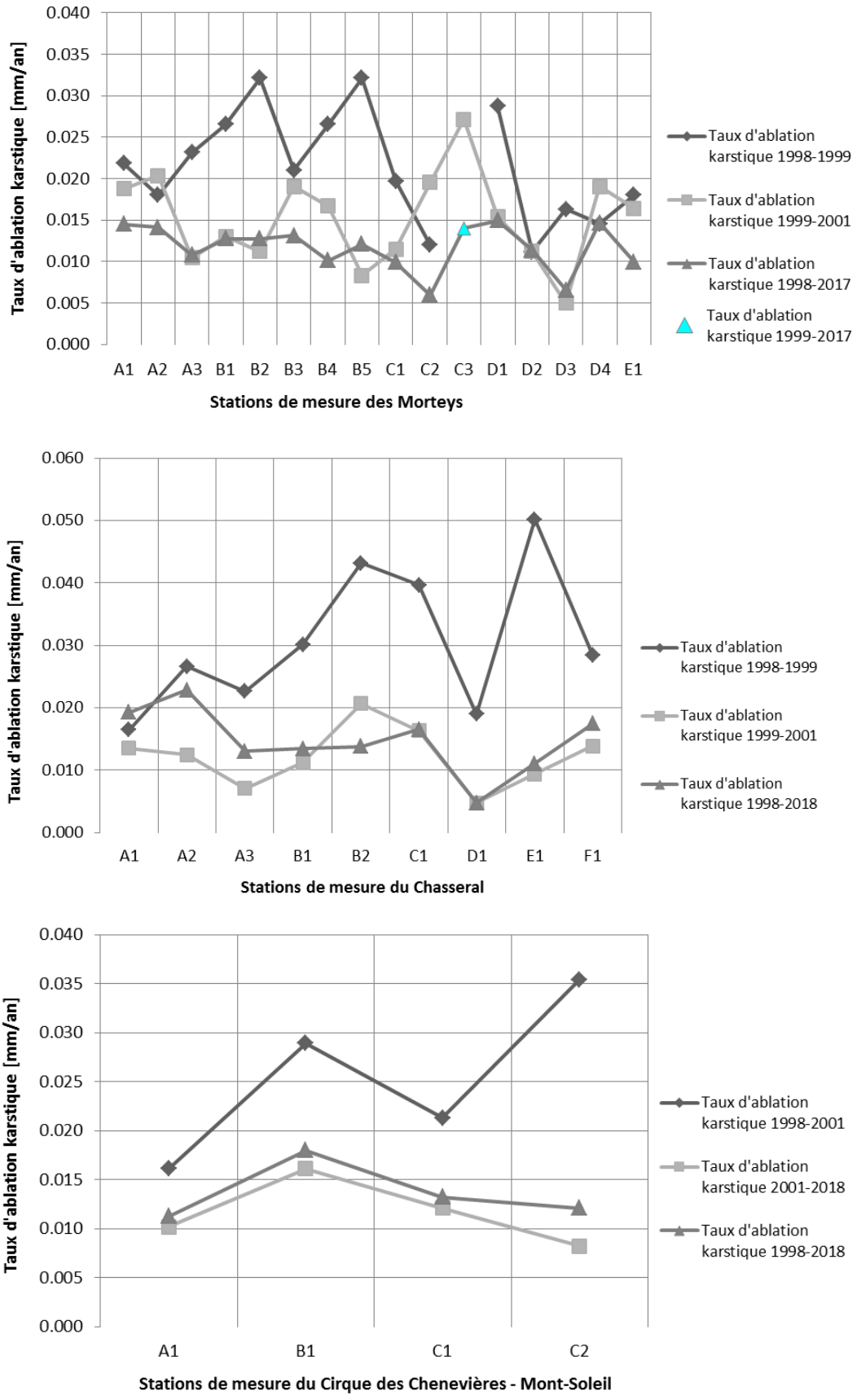


Figure 40 : Graphiques des taux d'ablation karstique moyens des sites d'étude des Morteys, du Chasseral et du Cirque des Chenevières – Mt-Soleil.

4. Interprétation des Résultats

Après avoir vérifié toutes les données à disposition et calculé les taux d'ablation karstique, l'objectif de ce chapitre est de tenter d'expliquer les différents paramètres mis en évidence dans la théorie : le facteur lithologique, le taux de précipitation, la présence de végétation et l'exposition de la station.

L'analyse des facteurs influençant le taux d'ablation karstique est réalisée à plusieurs échelles. Ces facteurs, décrits au chapitre 2.1, sont mis en évidence à l'aide d'une comparaison des caractéristiques des stations de mesures avec leur taux d'ablation karstique correspondant. Ces caractéristiques sont décrites au tableau 2 du chapitre 2.7. Au chapitre 4.1, Les caractéristiques de la station de mesure sont comparées premièrement à celles des stations appartenant au même site d'étude. Au chapitre 4.2, Les caractéristiques de la station sont ensuite comparées avec celles des stations de tous les sites d'étude.

Le chapitre 4.1 est constitué de deux parties : une analyse rapprochée qui se penche premièrement sur les stations appartenant au même groupe (stations du groupe A, stations du groupe B, etc.) puis une analyse générale du site d'étude.

Le chapitre 4.2 discute des caractéristiques de toutes les stations de mesure de l'étude à l'aide d'un tableau récapitulatif. Un classement de tous les taux d'ablation karstique de 1998-2017/18 par station est ensuite réalisé.

4.1. Analyse des stations de mesure par site d'étude

4.1.1. Les Morteys

Analyse rapprochée : comparaison des stations de même groupe

Les stations du groupe A présentent des variations allant de 0.015 mm/an (A1) de 0.014 mm/an (A2) à 0.011 mm/an (A3) (tableau 15). Les stations sont positionnées respectivement sur une dalle subverticale, sur une dalle horizontale et sur une surface subhorizontale correspondant à un front de couche. Comme les facteurs lithologie, précipitations et exposition sont identiques, le taux d'ablation serait plus rapide sur le dos des couches calcaires que sur les fronts. En observant la morphologie des stations (figures 6-7-8), les taux les plus élevés correspondent aux stations les plus exposées au ruissellement.

Les stations B1, B2 et B3 situées sur la même dalle subverticale lapiézée et lisse, obtiennent des taux identiques (0.013 mm/an), légèrement supérieur à ceux des stations B5 (0.012mm/an, front de couche rugueux) et B4 (0.010 mm/an dalle subverticale rugueuse) (tableau 15). Ce groupe met en évidence que les surfaces lisses présentes des taux d'ablation plus élevées que les surfaces rugueuses, ce qui est contraire à la théorie de Ford et Williams (1996). La faible variation entre les stations du groupe B n'est pas suffisamment significative pour tenter de la corréler avec d'autres facteurs

Les stations de groupe C présentent également des grandes variations : 0.014 mm/an (C3), 0.010 mm/an (C1) et 0.006 mm/an (C2) (tableau 15). Contrairement au groupe A, l'influence de la position

des stations sur le dos ou le front d'une couche calcaire n'est pas observable car d'autres facteurs sont en jeu. Pour la station C1 (front de couche), le facteur le plus important est la présence de végétation au-dessus des clous. La mousse et l'herbe acidifient l'eau de ruissellement qui coule en direction de C1 et par conséquent le taux d'ablation est plus élevé. Les facteurs qui ralentissent probablement l'ablation sur la station C2 (dalle subverticale) sont des lignes de silex et une fracture centimétrique situées au-dessus des clous qui jouerait le rôle de drains et dévieraient le ruissellement hors de la station (figure 12). La surface du front de la station C3 est lapiézée à droite de la station sur la figure 13. Cette formation indique une concentration du ruissellement à cet endroit et par conséquent le taux d'ablation karstique y est plus haut.

Bien que les stations D1, D2 et D3 sont sur le même front de couche horizontal et qu'elles se partagent des clous, les taux d'ablation karstique varient entre 0.007 mm/an et 0.015 mm/an, soit une différence de plus de 0.008 mm/an. Ceci est expliqué par les nombreuses aspérités présentes sur la surface de la roche ainsi qu'une ligne de stylolithes et une veine de calcite qui traversent les clous (figure 41). D'après Trudgill (1985), la dissolution n'est pas égale sur toute la surface du calcaire à cause des différentes solubilités des constituants de la roche. La station D4 sur une dalle subverticale à surface lisse comportant de nombreux lichens possède un taux d'ablation karstique égal au taux maximal du front de couche (D1).

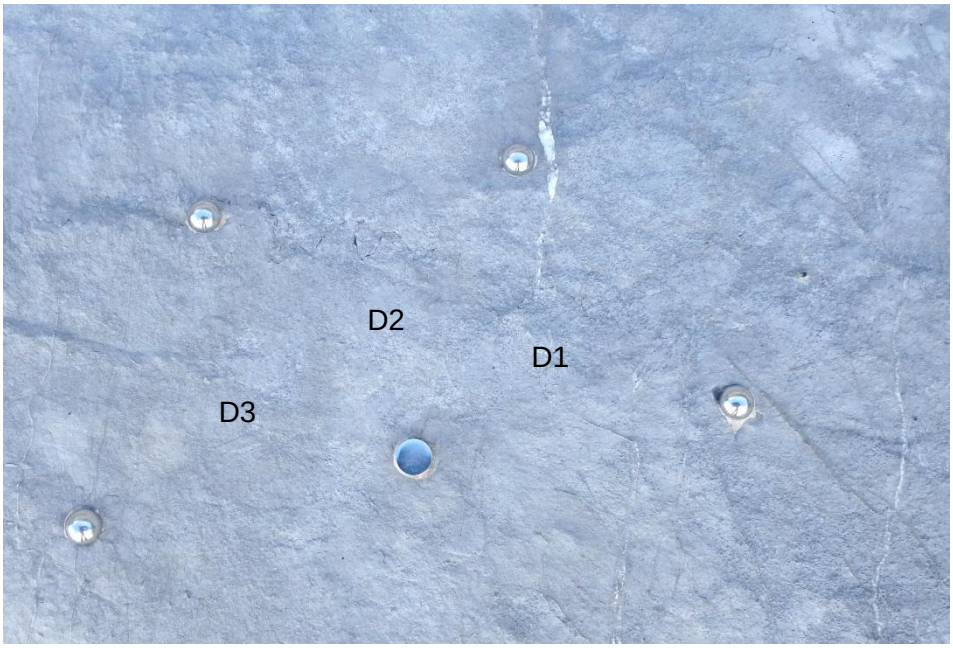


Figure 41 : Vue rapprochée des stations D1, D2 et D3, la veine de calcite passe à travers la station D1 à la verticale et la ligne de stylolithes à travers la station D2 et D1 à l'horizontal.

Analyse générale du site d'étude des Morteys

Le graphique à la figure 42 représente les taux d'ablation karstique moyens [mm/an] de 1998 et 2017, classés du plus petit au plus grand pour toutes les stations des Morteys. Pour cette région, le taux d'ablation karstique varie entre 0.006 mm/an et 0.015 mm/an. La valeur la plus élevée a été calculée aux stations A1, D1 et D4 et les plus basses à la station D3 (0.007 mm/an) et C2 (0.006 mm/an).

Le type de calcaire n'est pas le facteur le plus important dans les variations du taux d'ablation karstique. La Formation des Sciernes d'Albeuve et la Formation du Moléson sont dispersées sur tout l'intervalle. Les dalles sont plus solubles que les fronts de couche pour les groupes A, B et D (2

stations sur 3 pour le groupe D) et moins solubles pour le groupe C. Le groupe D qui présentait une grande variation due aux nombreuses aspérités sur la surface du front de couche pourrait avoir influencé ce résultat. Les variations du groupe C sont expliquées par la présence de végétation assez dense sur la station C1 qui augmenterait la dissolution du calcaire (Trudgill, 1985 ; Aubert 1969) et par la présence d'éléments drainant l'eau de pluie en dehors de la station C2.

Il n'existe aucune différence entre les versants exposés au Nord (groupes C, D, E) ou au Sud (groupes A, B). Les taux d'ablation karstique des versants exposé au Sud varient entre 0.010 mm/an et 0.015 mm/an et les versants Nord entre 0.006 mm/an et 0.015 mm/an.

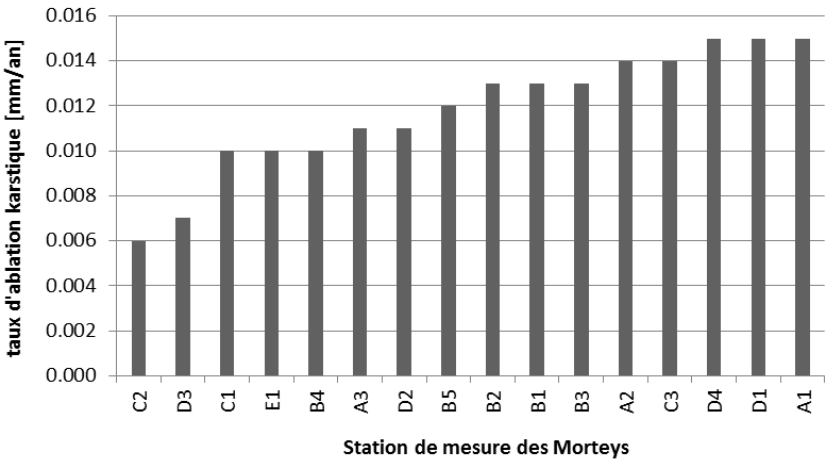


Figure 42 : taux d'ablation karstique [mm/an] entre 1998 et 2017 pour les stations des Morteys

4.1.2. Chasseral

Analyse rapprochée : comparaison des stations de même groupe

Une variation importante du taux d'ablation karstique s'observe dans le groupe A : de 0.023 mm/an (A2), 0.019 mm/an (A1) à 0.013 mm/an (A3). Les dalles faiblement inclinées et lapiézées (A1 et A2) résistent moins à l'ablation que les dalles subverticales (A3). Aubert (1969) mentionne qu'une dalle horizontale résiste moins à l'ablation car l'eau s'écoule plus lentement à sa surface et le temps à disposition pour la réaction de dissolution est plus long (Trudgill, 1985). De plus, les lapiez concentrent le ruissellement vers le centre des stations A2 et A1. Les résultats du groupe A contredisent l'hypothèse mentionnée en 1998 qui stipule que la station A1 doit posséder un taux d'ablation karstique plus élevée que la station A2 à cause de la présence de végétation sur la première station. La présence de végétation n'est ici pas la cause principale des variations du taux d'ablation karstique.

Bien que la station B1 soit sur dalle inclinée et la station B2 sur un front de couche, aucune variation du taux d'ablation karstique n'est à indiquer (0.013 mm/an pour la station B1 et 0.014 mm/an pour la B2). Le taux d'ablation de B2 est probablement influencé par la présence de végétation qui acidifie l'eau de ruissellement et par sa surface gondolée qui peut concentrer l'eau vers la station. Une grande fracture au-dessus de la station B1 aurait aussi pu jouer le rôle de drain.

Analyse générale du site d'étude du Chasseral

Les taux d'ablation karstique moyens entre 1998 et 2017 sont illustrés dans le graphique de la figure 43. Les taux varient entre 0.005 (D1) et 0.023 mm/an (A2).

La station A2 se situe sur une dalle faiblement inclinée et lapiézée constituée de calcaire de la formation de Balsthal. La station D1 est sur une dalle bien inclinée, presque subverticale de la formation d'Ifenthal (la dalle nacrée). Le paramètre lithologique semble être un facteur important. Selon les observations du terrain, le calcaire du groupe A est plus fin que le calcaire du groupe D. Ford et Williams (1996) stipule qu'un calcaire à grains fins est plus soluble qu'un calcaire à gros grains.

La station E possède la deuxième valeur la plus basse du Chasseral (0.011 mm/an). De la même formation que le groupe A et sur le même versant, elle est installée dans une combe à neige et a été retrouvée sous de la mousse en 2017. Il est surprenant d'observer un taux si faible. En effet, la neige qui s'accumule à cet endroit offre une grande quantité d'eau lors de la fonte et la mousse au-dessus de la station devrait apporter plus d'acidité à l'eau de ruissellement, mais ici, aucun de ces facteurs n'a permis l'augmentation de la vitesse d'ablation.

Les stations C1 et F1 possèdent des taux d'ablation élevés de 0.017 mm/an. Ces vitesses importantes seraient causées par la fracturation de la roche pour la station C1 et par la présence de végétation pour la station F1. Plus une roche est fracturée et possède des joints de stratifications, plus elle est soluble (Trudgill, 1985). L'acidité apportée par la végétation et autres organismes aurait augmenté l'ablation karstique sur la station F1.

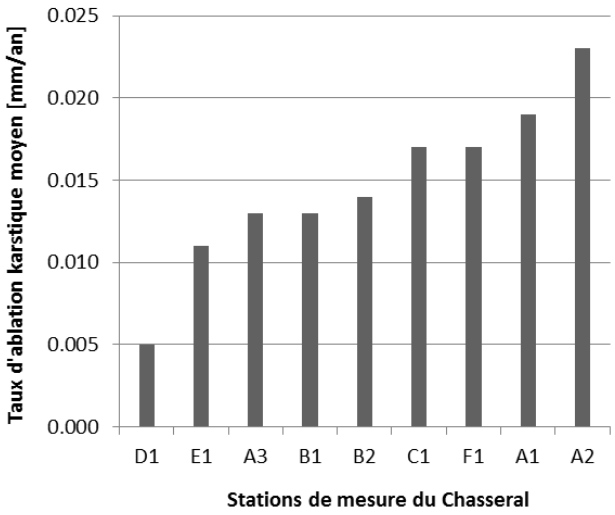


Figure 43 : Taux d'ablation karstique moyens [mm/an] entre 1998 et 2017 pour les stations du Chasseral

4.1.3. Cirque des Chenevières – Mont-Soleil

Analyse rapprochée : comparaison des stations de même groupe

Les taux d'ablation karstique du groupe C ne présentent pas de variation significative : 0.013 mm/an pour C1 et 0.014 mm/an pour C2. La dalle inclinée à surface lisse (C1) n'obtient pas un taux d'ablation plus élevé que le front de couche à surface rugueuse (C2). L'influence du type de surface et l'influence de la position de la station sur une dalle ou un front s'égaliseraient.

Analyse générale du site d'étude du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil

En observant le graphique à la figure 44, Le taux d'ablation le plus élevé a été calculé à la station B1 et le taux le plus bas à la station A1. Le taux d'ablation karstique de la station B1 est influencé par une eau de ruissellement acidifiée par la mousse qui se situe en abondance au-dessus de la station. La station A1 qui est à la plus haute en altitude, est installée sur une dalle horizontale dans la forêt. Une hypothèse serait que les précipitations sont probablement stoppées par les arbres et ne tombent pas directement sur la surface de la roche. Il est intéressant aussi de préciser que la station était couverte de mousse en 2017 mais aucun effet d'acidification n'a été constaté. Les dalles de cette région (A1, B1, C1) ont un taux plus élevé que le front de couche (C2).

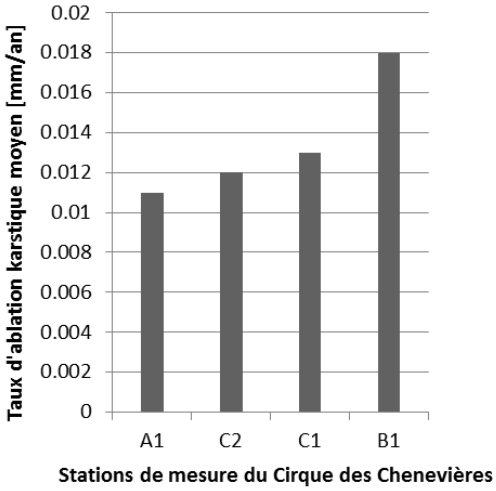


Figure 44 : Taux d'ablation karstique moyens [mm/an] entre 1998 et 2017 pour les stations du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil

4.1.4. Reuchenette

Le taux d'ablation karstique de la station A1 (0.010 mm/an) est plus bas que la station C1 (0.015 mm/an). Les deux stations sont situées sur des dalles de la même formation lithologique. Les paramètres influençant la vitesse de dissolution sont la surface de la roche et l'exposition. Il faut aussi préciser la présence d'un lapiez au-dessus de la station A1 qui pourrait drainer l'eau de ruissellement en dehors des clous. Selon ces observations, une dalle lapiézée à surface rugueuse exposée au Nord et comportant des lichens (A1) possède un taux plus bas qu'une dalle à surface lisse exposée au S-E sans lichens (C1). Il est difficile d'interpréter cette variation car de nombreux paramètres sont en jeu.

4.2. Analyse des taux d'ablation karstique entre tous les sites d'étude

Les taux d'ablation karstique moyens de toutes les stations de mesure de l'étude sont classés par ordre croissant dans le graphe de la figure 45. Il varie entre 0.005 mm/an (station D1 du Chasseral) et 0.023 mm/an (station A2 du Chasseral) et la moyenne vaut 0.013 ±0.004 mm/an. Tous les sites d'étude obtiennent des taux variés. De ce fait, l'influence des quantités de précipitations n'est pas le facteur principal de la variation du taux d'ablation karstique.

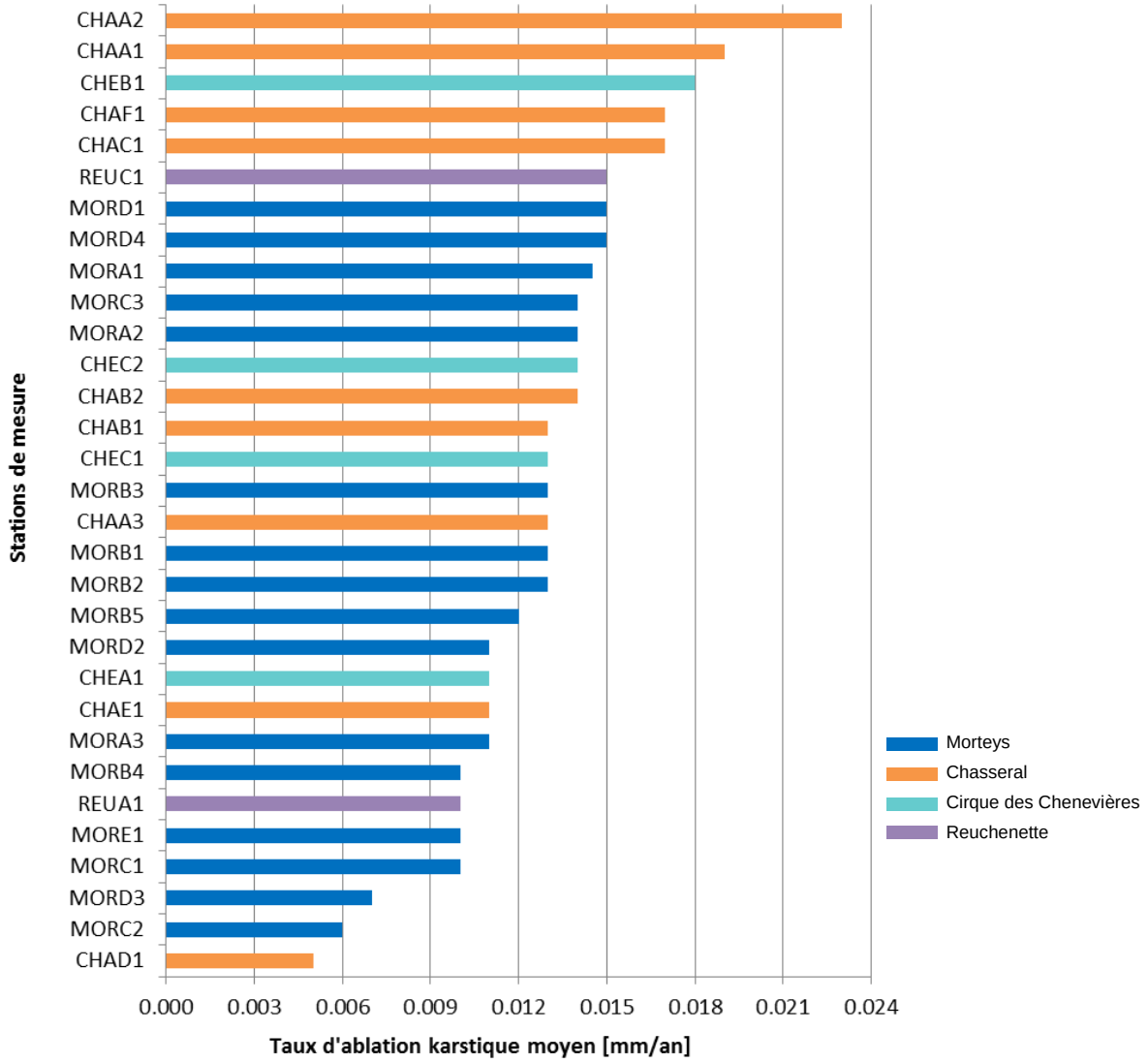


Figure 45 : Graphique des taux d'ablation karstique moyens pour toutes les stations de l'étude classés par ordre croissant. MOR- : Morteys, CHA- : Chasseral, CHE- : Cirque des Chenevières – Mont-Soleil, REU- : Reuchenette

Le graphique à la figure 46 récapitule toutes les caractéristiques des stations de mesure afin d'identifier les facteurs principaux qui influencent le taux d'ablation karstique.

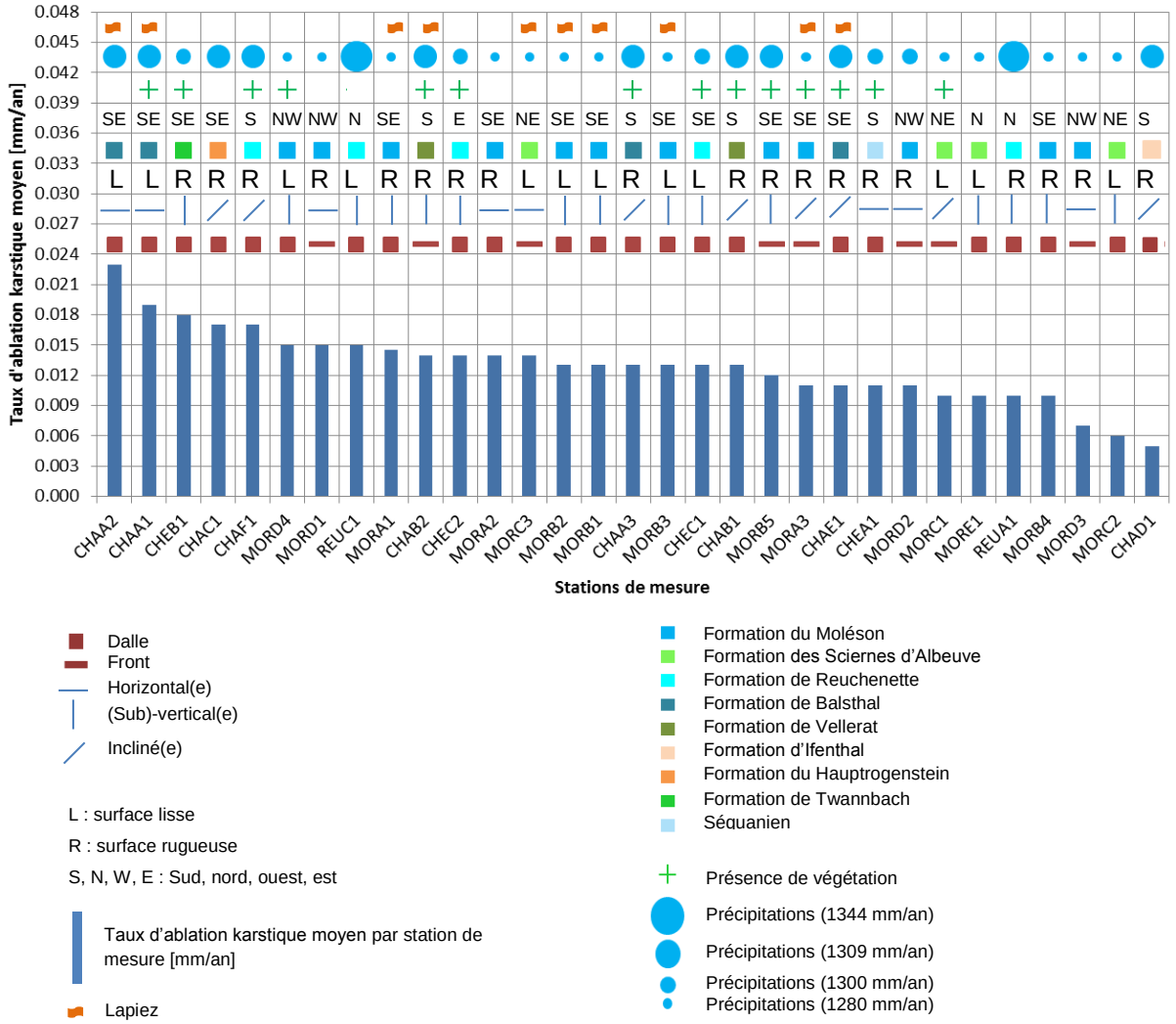


Figure 46 : Graphique récapitulatif de toutes les caractéristiques des statons de mesure: Taux d'ablation karstique moyen, type de surface, orientation, lithologie, présence de végétation, quantité de précipitations par année.

Les valeurs les plus hautes, se situent au Chasseral (CHAA2 : 0.023 mm/an et CHAA1 : 0.019 mm/an). Tous les paramètres sont identiques sauf le paramètre végétation (dalle horizontale lapiézée à surface lisse, de la formation de Balsthal, exposée au S-E et avec une quantité de précipitations de 1309 mm/an).

La troisième valeur la plus importante a été calculée à la station CHEB1. Comme expliqué au chapitre 4.1.3, l'influence de la mousse au-dessus de la station augmente le taux d'ablation karstique. Les effets de la végétation se remarquent aussi pour la station CHAF1 (en 5ème position sur le graphique de la figure 46). Cette station constituée de la même lithologie que les deux stations de Reuchenette (REUA1, REUC1) possède le taux le plus élevé des trois. Par contre, les stations CHEA1 et la station CHAE1 qui ont été retrouvées sous de la mousse, ont un taux d'ablation faible égal à 0.011 mm/an. Si ces stations sont comparées avec les stations de leur région, la mousse n'a pas provoqué une

augmentation de la vitesse d'ablation. CHEA1 possède même le taux le plus bas des Cirque des Chenevières.

L'exposition ne joue pas forcément un rôle important pour la vitesse d'ablation karstique. Dans les résultats, la différence entre l'exposition au Sud et au Nord n'est pas évidente. Sur le graphique de la figure 46, ce sont bien les versant exposés au Sud qui possèdent les taux d'ablation les plus élevés mais ils sont tout de même présents sur tout l'intervalle du taux d'ablation karstique.

Les stations D et E des Morteys qui se trouvent la plupart de l'année sous de la neige possèdent des faibles taux d'ablation karstique (sauf pour les stations D4 et D1). La station CHAE1 qui se situe dans une combe à neige donne le deuxième taux le plus bas du Chasseral. Selon ces observations, la présence de neige protégerait la roche de l'ablation karstique.

Le taux d'ablation karstique le plus faible, à 0.005 mm/an, a été calculé à la station CHAD1 (dalle inclinée à la surface rugueuse de la Formation d'Ifenthal exposé vers le Sud avec une quantité de précipitation de 1309 mm/an). Comme expliqué au chapitre 4.1.2, le paramètre lithologie est ici le facteur le plus important. Le taux d'ablation très bas de la station MOR-C2 aurait été influencé par les aspérités de la surface de la roche (ligne de silex et fractures au-dessus de la station).

5. Discussion

Le calcul du taux d'ablation karstique

L'objectif premier de ce travail qui consistait à calculer les taux d'ablation karstique des Morteys, du Chasseral, du Cirque des Chenevières – Mont-Soleil et de Reuchenette a été atteint. Sur les 34 stations de mesure sélectionnées, trois n'ont pas été retrouvées sur le terrain (CHED1, REUB1 et REUB2). En tout, 15 stations de mesure installées en 1998 sur le 46 ont été abandonnées dans ce travail (les trois stations mentionnées, toutes les stations de La Sèche des Amburnex, du Mont-Tendre et de la grotte du Hölloch).

Afin d'obtenir des taux d'ablation karstique corrects, les données de 1998, 1999, 2001 et 2017/18 ont dû être évaluées. L'utilisation de deux micromètres sur chaque station, une répétition de trois mesures par instrument ainsi que les 3 à 4 visites sur des années différentes ont permis de mettre en évidence les valeurs aberrantes causées par des erreurs de mesure ou par des déplacements d'un clou de la station de mesure et de les corriger si nécessaire. La correction des valeurs aberrantes en comparant avec les autres valeurs existantes a été difficile car la base de données est restreinte. Les corrections ont donc été exécutées soit en remplaçant les valeurs aberrantes d'un micromètre par les valeurs de l'autre instrument, soit en calculant la valeur probable à l'aide de l'ablation mesurée entre les différentes années. Si les taux d'ablation karstique pour une station présentaient encore une différence importante entre les deux micromètres, une moyenne a été exécutée. Ces corrections ont pu influencer fortement les résultats de ce travail.

Comparaison avec d'autres études

La moyenne du taux d'ablation karstique de ce travail de recherche vaut 0.013±0.004 mm/an et varie entre 0.005 et 0.023 mm/an pour les régions du Jura et des Préalpes suisses. Le tableau 16 contient les résultats de différentes études pour les régions alpines présentées dans les articles de Häuselmann (2008) et Stephenson et Finlayson (2009). Häuselmann (2008), qui a utilisé les mêmes micromètres que ceux du présent travail, a obtenu une moyenne quasiment identique (0.014±0.007 mm/an) pour la région du Innerbergli en Suisse. Bögli (1971) a calculé un taux d'ablation karstique de 0.01 mm/an à Silberen en Suisse par la méthode hydrogéochimique. Cette valeur un peu plus basse est tout de même proche des résultats obtenus dans ce travail. La même réflexion peut être faite avec les résultats de Plan (2005) qui a obtenu la même valeur dans le massif du Hochschwab en Autriche. Les valeurs les plus basses de Forti (1984) et de Kunaver (1979) correspondent également aux résultats. Tandis que Cuchi et al. (1987) ont obtenu des valeurs plus élevées dans le Karst de Trieste en Italie. Gams (1985) obtient un taux d'ablation karstique égal aux valeurs les plus élevées de ce travail de recherche. La moyenne de 0.013±0.004 mm/an correspond aux valeurs trouvées dans la littérature et peut être considérée comme correcte.

Etudes	Lieux	Taux d'ablation karstique moyen
Cette étude	Jura et Préalpes suisses	0.013±0.004 mm/an
Bögli (1971)	Silberen, Suisse	0.010 mm/an
Cuchi et al. (1987)	Karst de Trieste, Italie	0.028 mm/an
Häuselmann (2008)	Innerbergli, Suisse	0.014±0.007 mm/an
Forti (1984)	Kanin, Italie	0.01-0.035 mm/an
Kunaver (1979)	Kanin, Slovénie	0.017 – 0.102 mm/an
Plan (2005)	Hochschwab, Autriche	0.013-0.04 mm/an
Gams (1985)	Vercors, France	0.02 mm/an

Tableau 16 : Taux d'ablation karstique de différentes études comparables à ce travail de recherche.

Analyse du taux d'ablation karstique

Le second objectif consistait à analyser et à tenter d'expliquer les variations du taux d'ablation karstique. Les paramètres analysés sont la lithologie, le pendage, l'exposition, la quantité de précipitation et la présence de végétation.

Pour le paramètre lithologie, la description du type de calcaire a été réalisée à l'aide des cartes géologiques existantes puis complétée par des observations sur le terrain comme la rugosité de la surface, la présence de lapiez et la position de la station par rapport à l'orientation des couches calcaires (dalle ou front de couche). Les cartes géologiques et les notices explicatives correspondantes n'indiquent pas de manière précise la composition du calcaire. Il a été difficile, même impossible, de discuter de l'influence du type de calcaire sur l'ablation karstique.

Pour le paramètre du pendage, celui-ci a été simplifié en indiquant uniquement si la station était à l'horizontal, inclinée ou à la verticale afin d'obtenir une comparaison entre les stations de mesure moins complexe et plus significative.

Les données des précipitations proviennent des stations météorologiques du réseau *MeteoSuisse* les plus proches des sites d'étude. La quantité de précipitations mesurée à la station météorologique a été extrapolée pour toute la zone de chaque site d'étude et n'est en réalité pas la valeur réelle. Il est difficile de pouvoir mesurer précisément la quantité de précipitations réellement tombées à un endroit précis. Pour cette raison, l'analyse n'a rien donnée concernant ce paramètre.

La présence de lichens sur la surface du calcaire a été omise. Pourtant, les lichens qui ont poussé au milieu des stations de mesure auraient pu fortement influencer les résultats à cause de leur épaisseur. Mais il a été impossible de savoir si les lichens étaient déjà présents lors des mesures en 1998, 1999 et en 2001.

L'analyse des paramètres influençant le taux d'ablation karstique a pu être possible et a donné des résultats intéressants mais elle pourrait être plus approfondie et vérifiée par d'autres observations ou tests en laboratoire.

6. Conclusion et perspectives

L'ablation karstique est un phénomène difficile à observer à cause de sa lenteur. La seule méthode permettant d'observer l'ablation directe de la surface des calcaires est la méthode aux micromètres mais celle-ci demande énormément de temps pour obtenir de bons résultats. Dans ce travail, Grâce à la reprise d'une étude de l'Université de Fribourg sur l'ablation karstique débutée en 1998 par M. Monbaron et L. Perritaz, l'intervalle de temps entre les premières mesures de l'ablation karstique (1998) et les dernières mesures (2017-18) s'étale sur 20 ans. Cette nouvelle campagne de mesure réalisée en 2017-18 a permis d'obtenir des résultats précis sur le taux d'ablation karstique dans la région du Jura et des Préalpes Suisses. Les valeurs obtenues varient entre 0.005 mm/an et 0.023 mm/an avec une moyenne totale de 0.013 mm/an pour les sites des Morteys, du Chasseral, du Cirque des Chenevières et de Reuchenette.

Les observations réalisées dans l'analyse sur les variations des taux d'ablation karstique sont présentées ci-dessous.

- Le taux d'ablation karstique est plus rapide sur les dalles que sur les fronts de couche sauf dans le cas du groupe C des Morteys et du groupe B du Chasseral.
- Les dalles verticales résistent plus à l'ablation que les dalles horizontales (CHAA1-A2-A3)
- Les surfaces lisses présentent des taux d'ablation plus élevés que les surfaces rugueuses (MORB1-B2-B3-B4, MORC1-C2-C3, REUA1-C1).

- Les lapiez qui concentrent le ruissellement vers le centre des stations de mesure augmentent le taux d'ablation karstique (CHAA1-A2, CHAB2, MORA1).

- Les fractures centimétriques et les lignes de silex peuvent jouer le rôle de drain et diminuer l'apport d'eau sur la surface de la roche si elles se situent au-dessus de la station et donc diminuer le taux d'ablation karstique (station MOR-C2, REU-A1, CHA-B1)

- Les aspérités sur la surface de la roche (bioclastes, veines de calcite, stylolithes,…) peuvent varier fortement le taux d'ablation karstique à petite échelle (stations MORD1-D2-D3).

- Le type de calcaire joue un rôle important dans la variation du taux d'ablation karstique (CHAD1).

- La végétation qui acidifie l'eau de ruissellement au-dessus des stations provoque l'augmentation du taux d'ablation karstique (stations MORC1, CHAB2, CHAF1, CHEB1).

- La mousse qui a poussé sur les stations a ralenti la réaction de dissolution du calcaire (stations CHAE1 et CHEA1). Il faut préciser ici que CHEA1 se trouve dans la forêt et est aussi protégée des précipitations par les arbres.

- Les lichens qui ont poussé au milieu des stations de mesure ont pu influencer les mesures par leur épaisseur.

- Les stations de mesures se trouvant plus longtemps sous la neige possèdent des taux d'ablation karstique bas (MORD2-D3, MORE1 et CHAE1).

- Les cinq premiers taux les plus élevés de ce travail appartiennent à des stations sur les versants exposés au Sud - Sud-Est (voir figure 46) mais l'influence de ce paramètre est difficile à observer car l'exposition au Sud est une caractéristique qui s'observe sur tout l'intervalle du taux d'ablation karstique.

Ces constatations contredisent parfois les théories karstiques dans la littérature. Elles mettent en évidence la complexité du phénomène de l'ablation karstique qui est influencé par de nombreux facteurs. Il est donc difficile d'interpréter quelle est la cause dominante d'une augmentation ou d'une diminution du taux d'ablation karstique. Les taux d'ablation karstique varient fortement à petite et grande échelle spatiale et c'est là, une des théories essentielles de la karstologie et de la géomorphologie en général : l'érosion différentielle, c'est-à-dire, une érosion qui n'est pas égale sur toutes les roches, permet de comprendre l'évolution du relief (Trudgill, 1985).

Il aurait été intéressant d'analyser plus en détail le paramètre lithologie en prélevant des échantillons pour des tests en laboratoire. En obtenant la composition exacte de la roche, la solubilité du calcaire aurait été un facteur en plus pour expliquer les variations du taux d'ablation karstique. Un autre aspect qui aurait pu être approfondi est le paramètre des précipitations qui est l'un des facteurs les plus importants de l'ablation karstique mais qui n'a pas donné de résultats probants. Les 15 stations de mesure qui n'ont pas été retrouvées peuvent encore faire l'objet de recherche et compléter

l’analyse. Les paramètres de ces stations permettraient de confirmer ou de contredire les interprétations faites dans ce travail. Grâce au bon état des stations datant de 1998 et des deux micromètres, d’autres campagnes de mesure pourront être organisées et la base de données pourra être complétée jusqu’à ce que le matériel ne soit plus utilisable.

7. Références

Antenen, M., Kellerhals, P., Tröhler, B. et Schürch R. (2004). Feuille 1126 Büren a. A., Atlas géologique de la Suisse 1:25‘000, carte 109.

Arrigo, S. (2012). Distribution spatiale des précipitations dans les environs du glacier du Findelen (VS). Master thesis, Department of Geosciences, Fribourg University.

Aubert, D. (1967). Estimation de la dissolution superficielle dans le Jura, *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 69 (8) : 365-376.

Aubert, D. (1969). Phénomènes et formes du Karst jurassien, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 62(2) : 325-399.

Aufranc, J., Burkhalter, R. (2017). Feuille 1125 Chasseral, Atlas géologique de la Suisse 1:25'000, carte 155.

Barry, R. G. (1992). Mountain Weather and Climate. 2d ed. Routledge. 402.

Bernier, P. (1984). Les formations carbonatées du Kimméridgien et du Portlandien dans le Jura méridional: stratigraphie, micropaléontologie, sédimentologie., *Doc. Lab. Géol*., Lyon, 92(1+2) : 802.

Braillard, L. (2015). Feuille 1226 Boltigen, Atlas géologique de la Suisse 1:25'000, carte 143.

Bögli, A. (1971). Karstdenudation – das Ausmass des korrosiven Kalkabtrages, *Regio Basiliensis*, 12(2) : 352-361.

Bourquin, Ph., Suter, H. et Fallot, P. (1946). Feuille 1124 Biaufond – Les Bois – La Ferriere – St Imier, Atlas Géologique de la Suisse 1:25'000, carte 15.

Cucchi, F., Forti, F. and Finocchiaro, F. (1987). Carbonate surface solution in the classical karst, *International Journal of Speleology*, 16 : 125-138.

Ford, D.C. and Williams, P.W. (1996) Karst Geomorphology and Hydrology. London, Chapman and Hall.

Forti, F. (1984) – Messungen des Karstabtrages in der Region Friul-Julisch-Venetien (Italien), *Die Höhle*, 35(3/4) : 135-139.

Gams, I. (1985), Comparative research of limestone solution by means of standard tablets, *8th Int. Congress of Speleology*, Huntsville (USA) : 273-275

Häuselmann, P. (2008), Surface corrosion of an Alpine karren field : recent measures at Innerbergli (Siebenhengste, Switzerland), International Journal of Speleology, 37(2) : 107-111.

High, C., and Hanna, G.K. (1970). A method for the direct measurement of erosion of rock surfaces, British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, 5 : 1-25.

Joly, D., Brossard T., Gardot H. et Cavailhès, J. (2009). Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France, *L'Espace Géographique*, 38(2) : 157-170.

Kunaver, J. (1979) Some experiences in measuring the surface karst denudation in high alpine environment, *Acte du Symposium international sur l'érosion karstique*, Aix en Provence : 75-85

Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) ; Université de Berne : institut de géologie (2005). Carte tectonique de la Suisse au 1:500'000, ed. Bern-Ittigen : Office fédéral des eaux et de la géologie ; Wabern : swisstopo.

Office fédéral de topographie (Swisstopo) (2018). www.map.geo.admin.ch, [consulté le 25 août 2018]

Plan, L. (2005). Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps, *Geomorphology*, 68(3) : 201-202.

Salomon J.-N. (1999). Le facteur temps dans la karstification, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 5 (3) : 195-213.

Salomon, J.-N. (2006). Précis de karstologie. Bordeaux, Presses Universitaires de Bordeaux

Schär, U., Ryniker K., Schmid, K., Haefeli, Ch. et Rutsch, R. F. (1971). Feuille 1145 Bieler See, Atlas géologique de la Suisse 1 :25'000, carte 60.

Spate, A.P, Jennings, J.N, Smith, D.I. and Greenaway, M.A. (1985). The micro-erosion meter : use and limitations, *Earth Surface Processes and Landforms*, 10 : 427-440.

Stephenson, W.J., Finlayson, B.L. (2009), Measuring erosion with the micro-erosion meter - Contributions to understanding landform evolution, *Earth-Science Reviews*, 95 : 53-62.

Sweeting, M.M. and Sweeting, G.S. (1969). Some aspects of the carboniferous Limestone in relation to its Landforms (with particular reference to N.W. Yorkshire and Co. Clare), *Revue Géographique des pays méditerranéens*, 7 : 201-209.

Sweeting, M.M. (1974). Karst geomorphology in North-West England *in* Walhtam, A. C. (ed) *Limestones and Caves of North-West England*. David and Charles.

Trenhaile, A. S., Lakhan V. C., (2011). Transverse micro-erosion meter measurements; determining minimum sample size, *Geomorphology*, 134(3-4) : 431-439.

Trudgill, S. (1985). Limestone Geomorphology, Geomorphology texts (8), London; New York, Longman.

White, W.B., 2000: Dissolution of limestone from field observations *in* Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer A.N. and Dreybrodt, W. (eds) *Speleogenesis,* Huntsville (USA), National Speleological Society :149-155.