Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences des écosystèmes et des océans | Ecosystems and Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques
Région du Pacifique **Réponse des Sciences 2026/030**

ÉVALUATION DES RÉPERCUSSIONS, SUR LE POISSON ET SON HABITAT, DES DÉPÔTS DE CALCITE PROVENANT DES MINES DE CHARBON EN COLOMBIE-BRITANNIQUE, AU CANADA

CONTEXTE

Le bassin versant de la rivière Elk, en amont de Sparwood, a une superficie de 2 809 km^2 et fournit un habitat à divers salmonidés, dont le ménomini des montagnes (*Prosopium williamsoni*), la truite fardée versant de l'ouest (*Oncorhynchus clarkii lewisi*) et l'omble à tête plate (*Salvelinus confluentus*), qui peuvent tous être touchés par des changements dans la qualité de l'eau et de l'habitat du poisson. La truite fardée versant de l'ouest (populations du Pacifique) est inscrite comme espèce préoccupante en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* (MPO 2017). L'omble à tête plate (population du Pacifique) est désigné « espèce préoccupante » par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) et figure sur la liste bleue du Centre de données sur la conservation de la Colombie-Britannique.

Les eaux de drainage provenant des déblais de stériles des mines de charbon présentent des niveaux élevés de calcium et de carbonate qui créent des conditions propices à la précipitation ou à l'accumulation de calcite dans les zones en aval (EVWQP 2014). La calcite peut cimenter les roches du lit d'un cours d'eau et modifier diverses fonctions écologiques naturelles nécessaires au maintien de l'habitat du poisson; il pourrait donc s'agir d'une menace pour la santé du poisson et de son habitat. Pour s'attaquer aux tendances à la hausse des contaminants et à la formation de calcite pouvant nuire à la santé des écosystèmes en raison de l'exploitation du charbon, la province de la Colombie-Britannique a émis un arrêté ministériel concernant un plan de gestion axé sur la région de la vallée de l'Elk, lequel a été achevé en 2014 (EVWQP 2014) et révisé en 2025 (EVWQP 2025). Ce plan fixe notamment des objectifs accompagnés de cibles visant à améliorer la qualité de l'eau et à réduire la formation de calcite.

Les responsables du Programme de protection du poisson et de son habitat (PPPH) de Pêches et Océans Canada (MPO) craignent que les dépôts de calcite nuisent au poisson et à son habitat en aval des mines de charbon. Pour évaluer les répercussions, les responsables du PPPH ont besoin de méthodes scientifiques de terrain robustes afin de déterminer si les dépôts de calcite causés par l'exploitation du charbon ont altéré les fonctions écologiques naturelles de cours d'eau dans de vastes zones géographiques.

Le PPPH demande aux Sciences du MPO d'effectuer un examen de la documentation afin de déterminer les principales fonctions écologiques qui sont menacées par les dépôts de calcite dans les cours d'eau et d'évaluer l'efficacité de protocoles de suivi servant à évaluer les répercussions de la calcite sur les fonctions écologiques naturelles. L'avis découlant de la présente réponse des Sciences du Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS) vise à recenser les lacunes potentielles et à fournir d'autres méthodes à l'appui d'une évaluation pratique sur le terrain des répercussions des dépôts de calcite sur l'habitat du poisson.

Objectifs

Les objectifs précis de cet examen sont les suivants :

1. effectuer une analyse documentaire exhaustive des répercussions des dépôts de calcite sur les fonctions écologiques dans l'habitat des salmonidés;
2. examiner les méthodes de mesure et de suivi de la calcite présentées dans le plan de la qualité de l'eau de la vallée de l'Elk (EVWQP 2014, annexe J.1; EVWQP 2025) pour
    a. déterminer quels composants conviennent à l'évaluation des répercussions de la calcite sur les fonctions écologiques;
    b. recenser les lacunes ou les limites nécessitant des techniques de terrain supplémentaires, en fonction des résultats de l'analyse documentaire;
3. recommander des procédures associées à des méthodes pratiques d'évaluation sur le terrain aux fins du suivi et de la détermination des répercussions des dépôts de calcite sur l'habitat du poisson.

La présente réponse des Sciences découle de l'examen par les pairs régional du 15 avril 2026 sur l'évaluation des répercussions, sur le poisson et son habitat, des dépôts de calcite provenant des mines de charbon en Colombie-Britannique, au Canada.

RENSEIGNEMENTS DE BASE

Le calcaire, la dolomie et d'autres sédiments riches en calcium sont abondants dans les formations géologiques de l'Ouest canadien et de l'Amérique du Nord. Celles-ci comprennent les substrats rocheux bien connus des montagnes Rocheuses et des chaînes de montagnes connexes, mais également d'autres zones d'accrétion de la Cordillère de l'Amérique du Nord (Fischl 1985). Le domaine de l'avant-pays, la plus orientale de ces zones en Colombie-Britannique, renferme des unités sédimentaires calcaires de grande qualité qui sont utilisées dans la production commerciale de ciment à la frontière entre la Colombie-Britannique et l'Alberta (p. ex. l'usine LaFarge à Exshaw, en Alberta). Dans le domaine de l'avant-pays, la formation de Palliser renferme également des veines de charbon de grande qualité qui sont recherchées par l'industrie métallurgique et exploitées dans la région du Kootenay-East. Parmi les autres activités minières importantes menées dans le domaine de l'avant-pays figurent l'exploitation du charbon thermique et métallurgique près de Hinton, en Alberta, et l'exploitation du charbon métallurgique dans la formation de Gates près de Tumbler Ridge, en Colombie-Britannique. Des sites d'exploitation de charbon thermique aujourd'hui inactifs sont également présents sur l'île de Vancouver, près de Quinsam, en Colombie-Britannique. Matheson et ses collaborateurs (1994) décrivent plusieurs grands terrains houillers de la Colombie-Britannique, qui sont répartis sur un vaste territoire et dont les occurrences se retrouvent dans l'ensemble des zones d'accrétion tectonique constituant la géologie de la province. Les veines de charbon sont souvent surmontées de dépôts calcaires.

Sous l'effet de l'altération par les eaux de surface et des processus géochimiques connexes, les sédiments calcaires peuvent former des solutions carbonatées aqueuses susceptibles de produire des précipités d'accrétion en aval lorsque les conditions s'y prêtent. Puisque l'exploitation du charbon et d'autres opérations minières donnent lieu à des amas de stériles présentant une grande surface exposée et à des voies d'écoulement hydrologique modifiées, par lesquelles les eaux de surface peuvent circuler selon des trajectoires altérées, le risque de formation de ces solutions aqueuses est inhérent aux activités minières. Des quantités importantes de précipités ont été observées en conséquence d'activités minières tant dans le secteur du Kootenay, en Colombie-Britannique, que dans le secteur de la rivière McLeod, en

Alberta. Dans certains cas, l'établissement d'un plan de suivi et de remise en état fait partie des obligations prévues dans les autorisations provinciales. Dans la présente réponse des Sciences, nous abordons des conséquences que ce phénomène peut avoir sur le poisson et son habitat et formulons des recommandations en vue de combler les lacunes dans les connaissances ainsi que d'orienter le suivi et l'évaluation sur le terrain des répercussions. Bien que l'accent soit mis sur l'exploitation du charbon dans l'est de la Colombie-Britannique, la présence généralisée de substrats rocheux riches en calcium dans l'ensemble de l'ouest de l'Amérique du Nord signifie que d'autres exploitations minières pourraient présenter un risque de formation de précipités.

ANALYSE ET RÉPONSE

Objectif 1 : Contexte relatif à différents éléments associés aux effets de la calcite

Les salmonidés sont une composante importante et diversifiée de la faune aquatique de la Cordillère de l'Ouest (Roberge *et al*. 2002). Celle-ci comprend plusieurs espèces anadromes qui peuvent atteindre de très grandes tailles (p. ex. les saumons rose, rouge, coho, kéta et chinook), des espèces potamodromes qui sont généralement plus petites, mais qui figurent néanmoins parmi les plus gros poissons des milieux qu'elles occupent (p. ex. la truite fardée versant de l'ouest et l'omble à tête plate), ainsi que des espèces qui présentent à la fois des formes anadrome et potamodrome (p. ex. le saumon arc-en-ciel [aussi appelé truite arc-en-ciel anadrome], la truite fardée côtière anadrome et le kokani [saumon rouge potamodrome]). Les salmonidés se caractérisent par des cycles biologiques complexes et une remarquable plasticité comportementale tant entre les espèces qu'entre les populations. En raison de leur taille et de leur mode de vie, les salmonidés revêtent une importance culturelle, commerciale et récréative, et ils font souvent l'objet de mesures de gestion et de réglementation particulières. De nombreuses espèces de salmonidés de la Cordillère de l'Ouest et d'ailleurs dans le monde affichent un déclin marqué de leurs populations depuis la seconde moitié du vingtième siècle. Ce déclin a été associé à une variabilité climatique accrue et à son interaction avec une multitude d'autres facteurs dans un contexte d'effets cumulatifs (p. ex. Crozier and Siegel 2023).

Le cycle biologique des salmonidés est composé de cinq stades distincts : l'œuf, l'alevin vésiculé, l'alevin, le tacon et l'adulte. Les espèces anadromes et potamodromes ont besoin d'un habitat d'eau douce pour accomplir ces cinq stades. Les salmonidés sont des stratèges r, c'est-à-dire qu'ils pondent de nombreux œufs dont le taux de survie est faible, se développent rapidement et ont une durée de vie relativement courte. Ils frayent presque toujours dans des milieux d'eau douce en expulsant leurs produits sexuels dans la colonne d'eau (p. ex. le ménomini des montagnes) ou dans un substrat (ce que la plupart des autres espèces font). Pour les deux stratégies de fraie, un gravier ou un substrat aux caractéristiques précises est requis pour protéger les œufs et les alevins vésiculés, favoriser les échanges gazeux et maintenir une température adéquate. Les espaces interstitiels entre les particules de gravier où les œufs sont incubés constituent d'importants sites d'alevinage individuels; ils doivent être alimentés par une eau exempte de particules fines susceptibles de s'y accumuler et d'en compromettre les fonctions (Groot and Margolis 1991).

Chez les espèces qui frayent sur un substrat, des nids sont généralement creusés avant la ponte, à des emplacements soigneusement choisis. La plupart des espèces retournent à leur frayère natale pour profiter de conditions propices à la reproduction, notamment une profondeur (souvent faible) et une température précises, une bonne clarté de l'eau et une vitesse d'écoulement adaptée. Étant donné que les stades ultérieurs se déroulent en aval, la migration

et le franchissement des obstacles sont indispensables à l'achèvement du cycle biologique tant des espèces anadromes que des espèces potamodromes (Groot and Margolis 1991).

Les alevins vésiculés utilisent ces mêmes caractéristiques du substrat du lit du cours d'eau pour achever la résorption de leur sac vitellin, leur survie jusqu'au stade de l'alevin dépendant de la présence et de la stabilité des espaces interstitiels (Kennedy 2008).

Les alevins et les tacons nagent librement et s'alimentent de façon autonome, souvent comme prédateurs. Ils présentent une morphologie distincte, caractérisée notamment par une taille croissante et des rayures, ainsi que des habitudes alimentaires et des exigences d'habitat particulières. Les tacons et les juvéniles plus âgés (âge 1+) quittent progressivement leur frayère à la recherche de ressources dans d'autres milieux rendus accessibles et nécessaires en raison de leur croissance (Kennedy 2008).

Mésohabitats lotiques et leur utilisation aux différents stades du cycle biologique des salmonidés

Les eaux lotiques sont caractérisées selon les unités hydromorphologiques qui les composent, aussi appelées mésohabitats. Bien que plusieurs systèmes de classification aient été proposés (Wegscheider *et al*. 2020), une méthode simple, élaborée par le passé et tenant compte des salmonidés présents dans de petits cours d'eau, demeure pertinente dans le présent contexte (Bisson *et al*. 1982). Ce système distingue trois principaux types d'habitats : les fosses, les radiers et les plats. Chacun d'entre eux peut ensuite être subdivisé selon des caractéristiques hydrologiques plus précises. Par exemple, les radiers sont subdivisés en radiers à pente faible, en rapides et en cascades. Bisson et ses collaborateurs (1982) démontrent l'importance écologique de ces habitats pour les saumons cohos, les truites fardées et les saumons arc-en-ciel juvéniles (âges 0+ et 1+). Les fosses sont quant à elles subdivisées en six catégories distinctes en fonction de leurs structures complexes qui présentent souvent des surplombs et qui sont des zones d'alimentation et de refuge importantes pour les juvéniles en cours de développement. Les plats sont des habitats plus simples et plus uniformes, souvent situés dans les zones de transition entre les fosses et les radiers. Ils sont généralement longs et ininterrompus. La fréquence et la taille de ces différents types de mésohabitats varient selon l'importance du cours d'eau (ordre du cours d'eau), la pente du chenal, l'apport en sédiments et les éléments structuraux présents (p. ex. gros débris ligneux). Les berges en surplomb, qui peuvent être présentes dans plusieurs types d'habitats, jouent un rôle important pour la croissance des juvéniles en offrant un abri, en ralentissant le débit et en favorisant l'alimentation. La fraie et l'alevinage ont lieu dans des secteurs qui sont caractérisés par des profondeurs (souvent faibles) et des vitesses d'écoulement précises et qui se trouvent généralement à la fin des fosses et des radiers (p. ex. McPhail and Baxter 1996).

La taille et les déplacements des individus influencent la façon dont les salmonidés utilisent les différents habitats fluviaux. La complexité de la situation est accentuée par le polymorphisme du cycle biologique, certaines populations d'une même espèce pouvant adopter des comportements fluviaux, lacustres ou sédentaires (p. ex. Muhlfeld and Marotz 2005). De plus, il a été démontré que ces populations peuvent interagir là où leurs répartitions se chevauchent (Campbell *et al*. 2019). Comme les populations lacustres utilisent des habitats très variés, elles sont davantage exposées aux effets du stress migratoire et dépendent d'un plus grand nombre d'habitats successifs pour accomplir leur cycle biologique. Les populations sédentaires, quant à elles, occupent un habitat plus restreint et sont donc plus vulnérables aux événements catastrophiques.

Truite fardée versant de l'ouest (*Oncorhynchus clarkii lewisi* [Girard])

La truite fardée versant de l'ouest est l'une des quatorze sous-espèces allopatriques de truite fardée présentes dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Au Canada, la population de l'Alberta est inscrite comme espèce menacée et la population de la Colombie-Britannique est inscrite comme espèce préoccupante en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* (COSEPAC 2016). La taille moyenne des populations est considérée comme faible comparativement à celle d'autres espèces de salmonidés, et des données probantes documentées révèlent que de nombreuses populations sont en baisse ou disparues du pays (COSEPAC 2016). L'une des menaces principales qui pèsent sur cette espèce est l'introgression génétique attribuable à l'introduction de la truite arc-en-ciel anadrome. Les populations du Pacifique sont considérées comme les plus génétiquement intactes. Ces populations occupent les tronçons supérieurs de la rivière Kootenay (Taylor *et al*. 2003), où la présence d'obstacles à la migration et la qualité de l'habitat auraient limité l'introgression génétique (Muhlfeld *et al*. 2009, Rubidge and Taylor 2005; voir aussi Schmetterling 2001).

Les populations de truite fardée versant de l'ouest affichent des comportements fluviaux, lacustres et sédentaires. Les populations du Pacifique, qui présentent une grande intégrité génétique, occupent des eaux froides à des altitudes élevées et tendent à adopter un comportement sédentaire. Leur adaptation à ces conditions particulières les aurait protégées contre l'introgression génétique, un phénomène appelé refuge en altitude (Paul and Post 2001). La truite fardée versant de l'ouest est considérée comme étant relativement sensible aux perturbations de l'habitat, particulièrement à celles qui altèrent la qualité de l'eau. La perte d'habitat et sa dégradation sont reconnues comme des facteurs importants des baisses observées des populations, notamment parce qu'elles favorisent l'introgression génétique.

Omble à tête plate (*Salvelinus confluentus* [Suckley])

L'omble à tête plate est étroitement apparenté au Dolly Varden. Les adultes comptent parmi les plus gros poissons des communautés d'eau douce dans lesquelles ils se trouvent, et tant les adultes que les juvéniles y jouent un rôle important en tant que prédateurs. L'omble à tête plate est largement réparti dans les principaux bassins hydrographiques de l'ouest de l'Amérique du Nord, notamment ceux des fleuves Yukon, Mackenzie, Columbia et Fraser. Toutefois, l'espèce est généralement présente sous forme de petites populations distinctes. Contrairement à la truite fardée, aucune sous-espèce n'est reconnue, mais deux grandes lignées génétiques sont distinguées : celle des eaux intérieures et celle des eaux côtières. Aux fins de la conservation de l'espèce au Canada, le COSEPAC reconnaît cinq unités désignables distinctes, définies selon les zones biogéographiques nationales d'eau douce du COSEPAC. Parmi celles-ci, deux sont désignées comme des espèces préoccupantes en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* (LEP), celle du fleuve Yukon est jugée comme ayant des données insuffisantes et celle de la rivière Saskatchewan et du fleuve Nelson est désignée comme espèce menacée. Les populations du Pacifique, qui sont les plus pertinentes dans le contexte de la présente réponse des Sciences, ont été évaluées comme étant une espèce préoccupante par le COSEPAC et leur inscription en vertu de la LEP est à l'étude. Cette recommandation de statut repose sur la vulnérabilité reconnue de l'espèce à un large éventail de menaces anthropiques en augmentation, plutôt que sur une réduction de l'aire de répartition ou une baisse des populations (COSEPAC 2025).

Le statut d'espèce menacée attribué à l'unité désignable de la rivière Saskatchewan et du fleuve Nelson est dû à la fragmentation et à la réduction des habitats ainsi qu'à la diminution de leur qualité découlant de l'exploitation de ressources naturelles. Parmi les poissons d'eau douce comparables, cette espèce se distingue par sa dépendance à des habitats de croissance de grande qualité et à une connectivité entre les populations. Le maintien du passage des

poissons en vue d'éviter l'isolement des populations distinctes, ainsi que le maintien ou le rétablissement des habitats de fraie et de croissance sont des objectifs de rétablissement importants (COSEPAC 2025). Johnston et ses collaborateurs (2007) ont indiqué que le rétablissement des populations était limité par la survie des œufs et des juvéniles aux premiers stades biologiques, notant d'après d'autres observations que cette situation est influencée par la compétition intraspécifique pour l'accès aux refuges diurnes, lesquels offrent notamment un abri, des conditions hydrologiques favorables et des ressources alimentaires de qualité.

Ménomini des montagnes (*Prosopium williamsoni* [Girard])

Le ménomini des montagnes est largement réparti dans l'ouest de l'Amérique du Nord, depuis le sud du Yukon jusqu'à l'extrémité nord du Great Basin, et vers l'est jusqu'à la région de la frontière entre l'Alberta et la Saskatchewan (McPhail and Troffe 1998). Étant abondant presque partout dans son aire de répartition, le ménomini des montagnes n'est pas considéré par le COSEPAC comme une espèce préoccupante nécessitant une évaluation. Les adultes ont une durée de vie relativement longue (jusqu'à 15 ans) et ont pour habitude de retourner à leurs sites d'alimentation estivaux. Ils effectuent une migration de fraie chaque année, généralement vers l'aval depuis les sites d'alimentation. La longévité de l'espèce et le suivi répété des migrations ont rendu possible l'utilisation d'écailles, puis d'otolithes, comme archives environnementales de diverses conditions, notamment la présence de contaminants.

Bien que bon nombre de ses besoins en matière d'habitat ressemblent à ceux de la truite fardée versant de l'ouest et de l'omble à tête plate (eaux froides et propres, substrats graveleux pour la fraie, etc.), cette espèce semble mieux tolérer les variations environnementales et occuper une plus grande variété de milieux, tant en ce qui concerne le régime d'écoulement que l'altitude. Parmi les caractéristiques de son cycle biologique pouvant expliquer cette apparente robustesse figurent le grand nombre d'œufs par ponte, la fécondation à la volée des œufs se trouvant dans un substrat graveleux et une alimentation fondée sur des organismes benthiques plutôt que sur des organismes dérivants, bien que certaines populations comprennent des individus se nourrissant ainsi.

Après leur émergence, les alevins se déplacent vers des eaux plus rapides et se nourrissent d'insectes aquatiques, notamment de larves de chironomes (jusqu'à 57 % de leur régime alimentaire) ainsi que d'éphémères, dont l'importance augmente avec la croissance des poissons. Les adultes sont grégaires plutôt que solitaires, et ils sont souvent observés en groupes à l'aval de radiers ou à proximité de débris ligneux (McPhail and Troffe 1998). Comme pour la plupart des salmonidés, la mortalité est la plus élevée aux stades de l'embryon et de l'émergence. Peu d'études ont été publiées sur la vulnérabilité aux stades ultérieurs du cycle biologique.

Dynamique de la précipitation de la calcite

La précipitation du carbonate de calcium dans les milieux lotiques est essentiellement un processus physicochimique régi par la thermodynamique des carbonates et la cinétique des réactions. Elle se produit lorsque le calcium dissous (Ca^{2+}) et les espèces carbonatées (p. ex. CO_3^{2-}) se combinent pour former du carbonate de calcium solide ($CaCO_3$). La précipitation survient lorsque l'eau devient sursaturée en calcite, généralement à la suite de changements dans la composition chimique de la solution, le pH, la température, les conditions hydrodynamiques ou la force ionique, ou encore sous l'effet de facteurs biotiques. La précipitation de la calcite peut modifier la morphologie d'un cours d'eau, les caractéristiques du substrat et les propriétés chimiques de l'eau. Elle peut également influer sur la dynamique des sédiments, le cycle du carbone et les fonctions écologiques (Teng *et al*. 2000, Thomas 2007, Morse *et al*. 2007, Deocampo 2010). Pour comprendre la formation des minéraux carbonatés et leurs répercussions potentielles, il est essentiel d'examiner les conditions physicochimiques

favorisant la précipitation du carbonate de calcium à partir de solutions aqueuses, notamment les mécanismes thermodynamiques contrôlant l'état de saturation ainsi que les facteurs cinétiques et mécanistes qui régissent la nucléation et la croissance des cristaux.

La présente section résume les principaux mécanismes et facteurs responsables de la minéralisation du carbonate de calcium dans les systèmes d'eau douce, l'accent étant mis sur les milieux lotiques. L'accent est aussi mis sur les interactions entre la sursaturation thermodynamique, les échanges de CO_2, l'hydrodynamique, la température, la composition chimique de la solution, les influences biotiques et les contraintes cinétiques qui régulent la précipitation à différentes échelles spatiales et temporelles propres aux cours d'eau.

Propriétés physiques et chimiques du carbonate de calcium

Le carbonate de calcium est un minéral omniprésent dans les milieux naturels et influencés par des activités humaines. Ses propriétés physiques et chimiques influencent fortement son comportement dans les milieux aquatiques (Morse *et al*. 2007, Ford and Williams 2007, Deocampo 2010). Le carbonate de calcium ($CaCO_3$) existe sous trois principaux polymorphes anhydres : la calcite, l'aragonite et la vatérite (Kabalah-Amitai *et al*. 2013, Vereshchagin *et al*. 2023, Santos *et al*. 2023). Bien que ces polymorphes aient la même composition chimique, leur structure cristalline diffère, ce qui se traduit par des niveaux distincts de stabilité thermodynamique, de solubilité et de comportement de précipitation.

La calcite est le polymorphe du carbonate de calcium le plus répandu et le plus stable sur le plan thermodynamique (Deocampo 2010, Santos *et al*. 2023). Cette stabilité découle de l'organisation énergétiquement favorable des ions dans son réseau cristallin rhomboédrique (Santos *et al*. 2023). Par conséquent, la calcite est le polymorphe dominant dans la plupart des dépôts carbonatés en eau douce (Thomas 2007, Santos *et al*. 2023). L'aragonite cristallise dans le système orthorhombique et est métastable dans les conditions habituelles en eau douce. Bien qu'elle ne soit pas le polymorphe le plus stable thermodynamiquement, elle peut persister longtemps parce que sa transformation en calcite est limitée par des contraintes cinétiques. L'aragonite peut se former préférentiellement sous des pressions élevées, à des températures supérieures à 50 °C ou dans des eaux présentant des concentrations élevées de magnésium (Mejri *et al*. 2014). La vatérite est le polymorphe anhydre le moins stable et est relativement rare dans les milieux aquatiques naturels. Elle présente une structure cristalline hexagonale (Kabalah-Amitai *et al*. 2013) et se transforme généralement rapidement en calcite ou en aragonite (Thomas 2007).

Dans les systèmes lotiques, la calcite précipite à partir d'eaux sursaturées dans diverses conditions, donnant lieu à différentes formes physiques influencées par la dynamique d'écoulement, la température, la composition chimique de l'eau et l'activité biologique (Ford and Williams 2007, Balci *et al*. 2018). Avec le temps, une précipitation continue peut produire des dépôts de plus en plus épais par accumulation successive de couches. La morphologie qui en résulte dépend toutefois des conditions du milieu ainsi que des processus abiotiques et biotiques en jeu, qui entraînent la formation de textures et de structures distinctes.

Les couches minces ou croûtes sont fréquentes. Elles forment des revêtements lisses et durs, habituellement d'une épaisseur de un à dix millimètres, sur le lit des cours d'eau, les roches ou la végétation dans les zones turbulentes. Une accumulation prolongée peut transformer ces croûtes en concrétions constituées de couches laminées sur le substrat d'un cours d'eau (Herman and Lorah 1987, Dreybrodt *et al*. 1992, Ford and Williams 2007, Deocampo 2010).

Le tuf est une forme plus poreuse de calcite qui se développe généralement dans des eaux dont la température ambiante est fraîche. Il prend souvent la forme de monticules, de terrasses, de barrières ou d'accumulations stratifiées (Ford and Pedley 1996, Ford and Williams 2007,

Deocampo 2010). Sa formation est fortement influencée par des facteurs biologiques et intègre souvent des microorganismes, des algues, des macrophytes ou d'autres organismes qui favorisent la nucléation de la calcite par la photosynthèse ou d'autres processus métaboliques. L'accumulation progressive produit des structures irrégulières riches en matière organique et comportant des cavités laissées par la décomposition des organismes, ce qui leur confère une texture dure et poreuse distincte de celle des formes plus denses d'origine essentiellement abiotique.

Les dépôts de travertin sont des carbonates denses et cristallins qui se forment dans des cours d'eau chauds alimentés par des sources thermales ou influencés par l'activité géothermique. Ils se présentent souvent sous forme de terrasses étagées, de barrières ou de structures rappelant des grottes. Principalement d'origine abiotique, ils résultent d'une précipitation chimique où l'apport biologique est limité. Ils forment des couches uniformes et stratifiées qui s'épaississent avec le temps, mais qui sont moins poreuses que les dépôts de tuf (Ford and Pedley 1996, Dreybrodt *et al*. 1997, Deocampo 2010).

La morphologie de ces formes de calcite varie selon les conditions propres à chaque site et évolue au fil du temps. Les accumulations les plus épaisses résultent généralement d'une sursaturation soutenue pendant de nombreuses années (Herman and Lorah 1987, Dreybrodt *et al*. 1992, Deocampo 2010).

Thermodynamique et cinétique de la précipitation de la calcite

La précipitation de la calcite constitue un processus physicochimique fondamental dans les milieux d'eau douce, au cours duquel les ions calcium (Ca^{2+}) et carbonate (CO_3^{2-}) dissous se combinent pour former du carbonate de calcium solide ($CaCO_3$). La représentation stœchiométrique la plus simple de la précipitation est la réaction entre les ions calcium et carbonate : $Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightleftharpoons CaCO_3$ (s) (Dreybrodt *et al*. 1997).

La stabilité de la calcite en eau douce est déterminée par sa solubilité. Dans des eaux douces à faible force ionique, la calcite est thermodynamiquement stable, mais elle peut se dissoudre ou précipiter selon son indice de saturation, lequel est influencé par le pH, la température, le dégazage du CO_2 ainsi que par d'autres facteurs abiotiques et biotiques (Herman and Lorah 1987, Hodell *et al*. 1998, Dreybrodt *et al*. 1992, Deocampo 2010, Balci *et al*. 2018).

État de saturation

L'état de saturation d'un minéral décrit la tendance thermodynamique d'une solution aqueuse à dissoudre ou à précipiter ce minéral. Il permet de déterminer dans quelle mesure la solution s'écarte de l'équilibre chimique avec ce minéral. À l'équilibre, les taux de dissolution et de précipitation sont égaux, et la solution est dite saturée. Lorsque la solution est sous-saturée, la dissolution est favorisée, tandis que lorsqu'elle est sursaturée, la précipitation devient thermodynamiquement possible (Dreybrodt *et al*. 1997, Deocampo 2010).

Pour tout minéral, l'état de saturation est calculé comme le rapport entre les concentrations effectives des ions impliqués dans la réaction de dissolution du minéral et le produit de solubilité thermodynamique, qui correspond à la constante d'équilibre de cette réaction à une température et une pression données. Ce rapport est généralement exprimé sous la forme de l'état ou de l'indice de saturation Ω (oméga). Une valeur inférieure à 1 indique une sous-saturation (conditions favorisant la dissolution), une valeur égale à 1 indique l'équilibre et une valeur supérieure à 1 indique une sursaturation, condition dans laquelle la précipitation de la calcite est thermodynamiquement favorisée (Deocampo 2010).

Toutefois, même si l'état de saturation détermine si la précipitation est thermodynamiquement possible, il ne garantit pas qu'elle se produira. La sursaturation, à elle seule, ne permet ni de

prédire la survenue de la précipitation ni d'en déterminer le taux sur le plan cinétique (Dreybrodt *et al*. 1997, Deocampo 2010).

De nombreuses études menées en laboratoire et sur le terrain montrent que la précipitation de la calcite est souvent inhibée sur le plan cinétique lorsque la sursaturation est faible à modérée, particulièrement dans les systèmes d'eau douce diluée. Cette inhibition est attribuable à la présence d'obstacles à la nucléation, à une surface réactive limitée et à l'adsorption de substances inhibitrices comme le magnésium, le phosphate, le sulfate et la matière organique dissoute (Lebrón and Suárez 1996, Lebrón and Suárez 1998). De ce fait, les eaux naturelles peuvent rester sursaturées en calcite pendant de longues périodes sans qu'il y ait de précipitation mesurable, en particulier lorsque les temps de séjour sont courts ou que les surfaces de nucléation appropriées sont rares. La relation entre l'état de saturation et l'intensité de la précipitation est donc non linéaire et repose sur des mécanismes complexes.

Même lorsque la précipitation de la calcite est thermodynamiquement favorisée ($\Omega > 1$), son taux ne dépend pas uniquement de l'état de saturation. La cinétique de croissance de la calcite dépend également de la stœchiométrie de la solution, en particulier des activités relatives des ions carbonate et calcium (Gebrehiwet *et al*. 2012). Des travaux expérimentaux montrent que des variations du rapport d'activité entre les ions carbonate et calcium, à état de saturation constant, peuvent entraîner des différences importantes dans les taux de précipitation, indiquant que Ω ne définit pas à lui seul le comportement cinétique (Gebrehiwet *et al*. 2012). Cet effet est particulièrement important dans les systèmes lotiques, où le dégazage du CO_2, l'augmentation du pH, la dilution et le mélange peuvent modifier la spéciation des carbonates et l'activité ionique (c'est-à-dire accroître la disponibilité des ions CO_3^{2-} sans modifier les concentrations de Ca^{2+}), ce qui peut accélérer la cinétique de précipitation même lorsque les valeurs de Ω sont similaires (Herman and Lorah 1987, Lorah and Herman 1988, Dreybrodt *et al*. 1992). Ainsi, les modifications de la chimie des carbonates induites par les conditions hydrologiques peuvent favoriser ou inhiber la précipitation même lorsque la valeur de Ω varie peu, contribuant ainsi à la variabilité spatiale et temporelle des dépôts de calcite.

Dans les milieux lotiques, l'état de saturation (Ω) fournit donc le cadre thermodynamique fondamental de la précipitation de la calcite, mais il faut l'interpréter conjointement avec les obstacles cinétiques et les conditions hydrodynamiques pour bien comprendre les processus de nucléation et de croissance cristalline.

Nucléation et croissance cristalline

La nucléation est l'étape initiale de la précipitation de la calcite, au cours de laquelle les ions dissous dans une solution sursaturée ($\Omega > 1$) s'assemblent pour former des embryons cristallins stables. Ce processus est intrinsèquement cinétique et nécessite le franchissement d'une barrière énergétique associée à la création d'une nouvelle interface solide-liquide (Teng *et al*. 1999, Teng *et al*. 2000). Dans les systèmes d'eau douce, la nucléation homogène (c'est-à-dire se produisant uniformément dans la solution) est rare, car elle exige des niveaux de sursaturation beaucoup plus élevés que ceux généralement observés dans les eaux naturelles (Reddy and Nacollas 1971, Thomas 2007). Dans les milieux d'eau douce, la précipitation de la calcite est plutôt principalement dominée par la nucléation hétérogène, qui se produit sur des surfaces préexistantes, comme les grains de sédiment (y compris les sédiments fins en suspension), les substrats rocheux, les biofilms, les macrophytes et les substrats anthropiques (Amor *et al*. 2004). Ces surfaces réduisent la barrière énergétique à la nucléation en fournissant des structures de support, des défauts de surface ou des sites chimiquement favorables qui stabilisent les noyaux naissants et qui facilitent la croissance cristalline subséquente (Thomas 2007). Malgré plusieurs décennies de travaux expérimentaux et théoriques, les mécanismes moléculaires qui régissent la nucléation de la calcite et les premiers stades de sa croissance

demeurent mal compris, particulièrement dans des conditions représentatives des milieux naturels (Bergwerff and van Paassen 2021, Broad *et al*. 2022, Escoffier *et al*. 2023).

Les seuils de nucléation observés dans les systèmes naturels sont donc très variables et ne peuvent pas être définis par une valeur universelle unique de saturation. Ils dépendent fortement des propriétés du substrat, notamment de sa rugosité, de sa minéralogie, de son orientation cristallographique et de la présence de revêtements biologiques. De plus, diverses substances dissoutes peuvent inhiber la nucléation en s'adsorbant sur les sites réactifs des surfaces ou en perturbant la fixation des ions. Le magnésium (Mg^{2+}), le phosphate (PO_4^{3-}), le sulfate (SO_4^{2-}) et la matière organique dissoute sont des inhibiteurs particulièrement efficaces. Ils peuvent accroître les seuils de nucléation et permettre à des eaux sursaturées de demeurer dans un état métastable pendant de longues périodes sans précipitation mesurable (Lebrón and Suárez 1996, Lebrón and Suárez 1998). Ce phénomène est particulièrement marqué dans les systèmes d'eau douce diluée ou riches en matière organique, et il a été largement documenté tant dans les études expérimentales que sur le terrain (Reddy and Nacollas 1971, Zhang and Dawe 2000, Thomas 2007). Cette inhibition cinétique est une caractéristique fondamentale de la chimie des carbonates en eau douce et montre que la sursaturation ne suffit pas, à elle seule, à prédire la précipitation (Teng *et al*. 1999, Teng *et al*. 2000, Bergwerff and van Paassen 2021, Broad *et al*. 2022).

Une fois la nucléation amorcée, la croissance de la calcite se poursuit à l'interface cristal-eau par des processus contrôlés par les réactions de surface, lesquels comprennent l'adsorption des ions à partir de la solution, la déshydratation partielle des ions hydratés avant leur incorporation au réseau cristallin et la propagation des marches cristallines à des sites énergétiquement favorables. La croissance cristalline se produit principalement là où il y a des défauts, des décrochements et des coins, car l'incorporation des ions calcium et carbonate y est la plus favorisée (Broad *et al*. 2022). La densité et l'activité de ces sites exercent une forte influence sur le taux de croissance et la morphologie des cristaux. Des facteurs environnementaux, tels que le pH, la température, la composition de la solution et les processus biologiques, influencent également la croissance en modifiant la spéciation ionique, la réactivité des surfaces et l'efficacité des substances inhibitrices (Broad *et al*. 2022).

Dans les systèmes d'eau douce, les effets combinés des seuils de nucléation variables, des mécanismes de croissance régis par les surfaces et des inhibiteurs biotiques et abiotiques peuvent entraîner une précipitation de la calcite hétérogène dans l'espace et intermittente dans le temps. La sursaturation détermine le potentiel thermodynamique de précipitation, mais c'est l'interaction entre les mécanismes de nucléation, les processus de surface et l'inhibition cinétique qui détermine si la précipitation de la calcite se produira, ainsi que les endroits où elle se produira, dans les milieux lotiques (Teng *et al*. 1999, Teng *et al*. 2000, Balci *et al*. 2018, Bergwerff and van Paassen 2021, Broad *et al*. 2022).

Température

La précipitation de la calcite dans les systèmes d'eau douce est régie par une interaction complexe entre des facteurs biotiques et abiotiques qui influencent à la fois les équilibres thermodynamiques (p. ex. la solubilité et l'état de saturation) et les processus cinétiques (p. ex. les seuils de nucléation, les taux de croissance cristalline et les mécanismes d'inhibition; Sanjuan and Girard 1996, Deocampo 2010, Balci *et al*. 2018, Vereshchagin *et al*. 2023). Parmi ces facteurs, la température joue un rôle particulièrement important parce qu'elle agit simultanément sur plusieurs composantes du processus de précipitation. Plus précisément, elle influence la chimie d'équilibre qui détermine l'état de saturation de la calcite, modifie les taux intrinsèques de réaction de surface qui régissent la nucléation et la croissance cristalline, et agit sur les processus physiques de transport, notamment la diffusion et les échanges gazeux, qui

contrôlent la vitesse à laquelle la sursaturation se développe. Par conséquent, l'effet global de la température sur la précipitation de la calcite est multidimensionnel et dépend fortement du contexte environnemental (Stewart 1988, Balci *et al*. 2018, Liptak 2000, Ohlendorf and Sturm 2001, Mejri *et al*. 2014, Bergwerff and van Paassen 2021).

L'influence fondamentale de la température sur la précipitation de la calcite s'exerce par l'intermédiaire de la thermodynamique du système $CaCO_3$–CO_2–H_2O. La solubilité de la calcite et son état de saturation varient de façon systématique avec la température. Une évaluation exacte de la saturation requiert donc l'utilisation de constantes d'équilibre dépendantes de la température ainsi que des calculs de la spéciation aqueuse (Plummer *et al*. 1978, Plummer and Busenberg 1982). Dans les systèmes d'eau douce ouverts à l'atmosphère, la température exerce également un important contrôle indirect par son effet sur la solubilité du CO_2. Lorsque la température augmente, la solubilité du CO_2 dans l'eau diminue, ce qui favorise son dégazage vers l'atmosphère. Cette perte de CO_2 dissous entraîne une hausse du pH et déplace la spéciation des carbonates vers les ions carbonate (CO_3^{2-}), augmentant ainsi l'état de saturation de la calcite (Ω). Ainsi, un réchauffement peut accroître le potentiel thermodynamique de précipitation de la calcite même en l'absence de variations de la concentration en calcium (Strong and Eadie 1978, Herman and Lorah 1987, Stewart 1988, Hodell *et al*. 1998, Liptak 2000, Ohlendorf and Sturm 2001). Cet effet peut agir en synergie avec d'autres processus biotiques et abiotiques, favorisant conjointement une hausse du pH et de Ω dans des conditions chaudes et productives (Teng *et al*. 2000). Il importe également de reconnaître que les effets de la température sur la chimie des carbonates peuvent être influencés par les variations saisonnières de la composition des eaux sources, notamment par les processus régissant la dissolution des carbonates dans les matériaux d'origine. Par exemple, un manteau neigeux peut limiter les échanges gazeux de CO_2, augmenter sa concentration et favoriser la dissolution induite par l'acide carbonique.

En plus de ses effets thermodynamiques, la température influence directement la cinétique intrinsèque de la précipitation de la calcite. Les processus contrôlés par la surface qui régissent la nucléation et la croissance cristalline s'accélèrent généralement lorsque la température augmente, car les barrières d'énergie d'activation diminuent et la mobilité moléculaire augmente (Teng *et al*. 2000, Mejri *et al*. 2014). Des études expérimentales sur les processus de surface démontrent qu'à un état de saturation donné, le taux de croissance de la calcite augmente souvent avec la température. L'ampleur de cette réponse dépend toutefois du mécanisme de croissance dominant, de la structure de la surface et de la composition chimique de la solution (Teng *et al*. 2000, Mejri *et al*. 2014).

La température modifie également l'efficacité des inhibiteurs cinétiques et des impuretés, ce qui complique l'hypothèse voulant qu'une température élevée entraîne systématiquement une précipitation rapide (Wasylenki *et al*. 2005, Bergwerff and van Paassen 2021). Dans les systèmes naturels d'eau douce où ces inhibiteurs sont couramment présents, un réchauffement n'entraîne donc pas nécessairement une augmentation proportionnelle de la vitesse de précipitation. La température peut plutôt modifier les processus de surface qui limitent la vitesse, changer les régimes de croissance dominants ou influencer l'incorporation des impuretés, ce qui peut entraîner des réponses non linéaires, voire contre-intuitives (Balci *et al*. 2018).

Étant donné que la température peut agir simultanément sur la chimie d'équilibre, la cinétique de surface, les processus d'inhibition et le transport physique, les variations de la précipitation de la calcite ne peuvent pas être attribuées uniquement à la température. Pour parvenir à une interprétation rigoureuse des effets de la température sur la précipitation de la calcite, il faut donc tenir compte simultanément du pH, du carbone inorganique dissous, de la concentration

en calcium, des échanges de CO_2 et des conditions hydrodynamiques, plutôt que de considérer la température comme un facteur indépendant (Lebrón and Suárez 1998).

Les changements climatiques devraient accentuer cette complexité en raison du réchauffement régional attendu et des modifications prévues des régimes hydrologiques. Des températures de l'air et de l'eau en hausse, des crues printanières plus hâtives, des débits de base réduits en été ainsi que des périodes d'étiage plus fréquentes ou plus longues modifieront les régimes thermiques et hydrologiques des cours d'eau, ce qui influencera à la fois le moment et l'intensité de la précipitation de la calcite. L'influence nette des changements climatiques sur la dynamique de la calcite dépendra donc fortement du contexte local et résultera des interactions entre les processus liés à la température, au régime d'écoulement et aux échanges gazeux. Voilà pourquoi il est important d'interpréter les tendances à long terme de la calcite dans un cadre hydroclimatique intégré.

Mécanismes liés au pH

Le pH est l'un des facteurs qui influencent le plus la précipitation de la calcite, et il joue un rôle central dans la régulation de la dynamique du carbone dans les systèmes d'eau douce (Khan *et al*. 2020). Dans les milieux lotiques, le pH détermine la spéciation des carbonates (la répartition des formes de carbone dissous, comme le CO_2, le HCO_3^- et le CO_3^{2-}), l'état de saturation (Ω) ainsi que la cinétique de la nucléation et de la croissance des minéraux. Puisque le pH peut varier rapidement sous l'effet des échanges de CO_2, de l'activité biologique (p. ex. la photosynthèse ou la respiration) et des conditions hydrodynamiques (p. ex. la turbulence), il agit comme le facteur déterminant qui relie les processus physiques et biologiques à la précipitation de la calcite dans ces milieux dynamiques (Ruiz-Agudo *et al*. 2011, Gebrehiwet *et al*. 2012, Khan *et al*. 2020, Khan et al. 2021, Many *et al*. 2024).

L'effet principal du pH sur la précipitation de la calcite découle de son contrôle sur la spéciation du carbone inorganique dissous dans le système carbonaté des eaux douces. Lorsque le pH augmente, l'équilibre des carbonates se déplace du CO_2 dissous et du bicarbonate (HCO_3^-) vers les ions carbonate (CO_3^{2-}; Ruiz-Agudo *et al*. 2011, Khan *et al*. 2020). Puisque l'état de saturation (Ω) de la calcite dépend directement de l'activité des ions carbonate, même de faibles augmentations du pH (généralement de l'ordre de 0,2 à 0,5 unité environ) peuvent entraîner une forte hausse de Ω en raison de cette relation non linéaire (Neal *et al*. 2002). Bien que faibles en valeur absolue, ces légères variations peuvent modifier considérablement les équilibres carbonatés et entraîner des augmentations disproportionnées de Ω, favorisant ainsi la précipitation (Neal *et al*. 2002). C'est pourquoi la précipitation de la calcite est souvent associée à des élévations localisées ou temporaires du pH plutôt qu'à des variations graduelles de la concentration en calcium (Lorah and Herman 1988, Teng *et al*. 2000).

En plus d'influencer l'état de saturation, le pH agit sur la précipitation de la calcite en modifiant les seuils de nucléation et les taux de croissance cristalline. Même lorsque $\Omega > 1$, ce qui indique une sursaturation, la précipitation peut ne pas se produire si les obstacles cinétiques à la nucléation ne sont pas franchis. Un pH supérieur réduit ces obstacles en augmentant la disponibilité des ions carbonate, ce qui favorise les interactions entre ions à la surface des substrats (Gebrehiwet *et al*. 2012). Par conséquent, les seuils de nucléation sont souvent franchis lors de hausses rapides du pH, notamment pendant les périodes de photosynthèse diurne ou dans les secteurs caractérisés par un dégazage intense du CO_2 associé à la turbulence, ce qui peut provoquer des épisodes de précipitation (Dreybrodt *et al*. 1992).

Des études expérimentales montrent également que, pour un même état de saturation, le taux de précipitation de la calcite peut varier considérablement lorsque le pH est modifié, ce qui reflète les changements de l'activité des ions carbonate et des voies de réaction à la surface (Teng *et al*. 2000). Ces observations confirment que le pH est un facteur cinétique indépendant

qui influence le moment et l'emplacement du déclenchement de la précipitation de la calcite (Gebrehiwet *et al*. 2012).

Le pH module également l'efficacité des inhibiteurs cinétiques qui limitent la précipitation de la calcite (Lebrón and Suárez 1996). Par exemple, des études expérimentales montrent que l'inhibition de la précipitation de la calcite par le phosphate est plus efficace lorsque le pH est faible, car la disponibilité des ions carbonate est inférieure et l'adsorption compétitive aux sites de croissance est favorisée (Reddy and Hoch 2001, Hoch *et al*. 2000). De même, la matière organique dissoute peut modifier l'hydratation et la charge de surface en fonction du pH, ce qui complexifie davantage le comportement de précipitation dans les eaux naturelles. Ces interactions aident à comprendre pourquoi la précipitation de la calcite est souvent limitée dans les cours d'eau riches en matière organique, même lorsque ceux-ci semblent sursaturés (Lebrón and Suárez 1998).

Dans les systèmes d'eau douce, le pH varie de façon dynamique aux échelles journalière, saisonnière et spatiale, ce qui en fait une variable centrale de la précipitation de la calcite (Stewart 1988, Cicerone *et al*. 1999, Escoffier *et al*. 2023). La photosynthèse diurne augmente le pH en consommant le CO_2, tandis que la respiration nocturne le diminue en produisant du CO_2. Le dégazage du CO_2 provoqué par la turbulence peut également accroître le pH, entraînant ainsi des variations sur de courtes distances (Herman and Lorah 1987, Lorah and Herman 1988, Dreybrodt *et al*. 1992). Par conséquent, la précipitation de la calcite dans les milieux lotiques tend à être hétérogène dans l'espace et intermittente dans le temps. Elle se produit préférentiellement lorsque le pH augmente suffisamment pour accroître l'état de saturation et surmonter les contraintes cinétiques. Cette sensibilité explique notamment pourquoi la sursaturation et la précipitation de la calcite se développent fréquemment en aval, dans les secteurs turbulents des cours d'eau, les radiers et les cascades, où des échanges gazeux plus intenses favorisent la perte de CO_2 vers l'atmosphère (Lorah and Herman 1988).

Dans l'ensemble, les travaux publiés montrent que le pH exerce un contrôle tant thermodynamique que cinétique sur la précipitation de la calcite, puisqu'il régule la spéciation des carbonates, les seuils de nucléation, les mécanismes de croissance et l'efficacité des inhibiteurs. Pour interpréter la précipitation de la calcite dans les milieux lotiques, il faut donc tenir compte de la dynamique du pH ainsi que d'autres facteurs en interaction, notamment la température, les conditions hydrodynamiques et la composition chimique de la solution.

Productivité primaire

La productivité primaire, soit le processus biologique par lequel les algues, les macrophytes, le périphyton et les cyanobactéries transforment la lumière du soleil, le CO_2 et les nutriments en matière organique par photosynthèse, peut moduler la thermodynamique et la cinétique de la précipitation de la calcite en modifiant la composition chimique de l'eau (Rupp and Adams 1981, Dittrich and Obst 2004, Balci *et al*. 2018, Khan *et al*. 2021, Escoffier *et al*. 2023). Cette modulation est principalement attribuable à l'absorption du CO_2 dissous lors de la photosynthèse, qui augmente le pH et déplace la spéciation des carbonates vers une plus grande proportion d'ions CO_3^{2-}, ce qui accroît l'état de saturation (Ω) et favorise la précipitation. Dans les cours d'eau productifs, ce processus biologique peut agir en synergie avec des facteurs physiques comme la turbulence, qui favorise le dégazage du CO_2 à la surface de l'eau et accentue ainsi la sursaturation ainsi que le potentiel de précipitation de la calcite. À l'inverse, la respiration, le processus par lequel les organismes dégradent la matière organique pour produire de l'énergie, libère du CO_2 dans l'eau, ce qui abaisse le pH et réduit Ω, ce qui favorise la dissolution de la calcite ou limite sa précipitation (Liptak 2000, Deocampo 2010, Khan *et al*. 2020, Many *et al*. 2024).

L'équilibre entre la photosynthèse et la respiration entraîne souvent des cycles journaliers du pH et de l'état de saturation dans les cours d'eau productifs, les sommets de production diurnes favorisant la précipitation et la respiration nocturne pouvant occasionner une dissolution partielle (Cicerone *et al*. 1999, Escoffier *et al*. 2023). Ces cycles peuvent également se produire à une petite échelle spatiale, notamment dans les radiers ou les fosses, où les variations de la vitesse d'écoulement, de l'exposition à la lumière et de la disponibilité des nutriments influencent les gradients de productivité et la formation localisée de calcite.

Le réchauffement saisonnier, particulièrement durant les périodes d'étiage en été, coïncide souvent avec une activité photosynthétique accrue, une augmentation diurne du pH et une efficacité supérieure des échanges gazeux, ce qui favorise la hausse de l'état de saturation et augmente la probabilité de précipitation de la calcite (Cicerone *et al*. 1999, Escoffier *et al*. 2023). Le rôle du métabolisme aquatique dans la précipitation de la calcite fait en sorte que les changements dans la structure des communautés biologiques et les processus écosystémiques, qui influencent la productivité primaire, peuvent également modifier l'état de saturation et la précipitation de la calcite, en plus d'altérer la composition chimique de l'eau (Cicerone *et al*. 1999).

Le périphyton et les cyanobactéries jouent un rôle particulièrement important dans la précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques, puisqu'ils sont largement répandus et métaboliquement actifs, qu'ils fournissent de nombreux sites de nucléation hétérogène (surfaces propices à la formation initiale des cristaux) et qu'ils sont étroitement associés aux substrats minéraux (Balci *et al*. 2018, Dittrich and Obst 2004). Leur activité photosynthétique peut faire augmenter le pH à l'interface entre l'eau et le substrat, créant des conditions chimiques microscopiques propices à la nucléation et à la croissance de la calcite. Il en résulte souvent la formation de structures biominéralisées, telles que des dépôts de tuf ou des incrustations sur le lit des cours d'eau et les macrophytes (Dittrich and Obst 2004).

Ensemble, ces processus montrent que la productivité primaire influence la précipitation de la calcite principalement par des mécanismes géochimiques indirects plutôt que par une minéralisation biologique directe (Dreybrodt *et al*. 1997). En régulant la disponibilité du CO_2, le pH et la spéciation des carbonates ainsi qu'en fournissant des surfaces réactives pour la nucléation, les organismes photosynthétiques aident à déterminer quand et où se produit la précipitation de la calcite dans les eaux douces, particulièrement dans les milieux lotiques où les facteurs biologiques et physiques sont étroitement liés.

Rôle des impuretés dissoutes et des inhibiteurs cinétiques

La composition chimique des systèmes lotiques reflète l'influence combinée de nombreux processus naturels et anthropiques à l'œuvre dans les bassins versants qui les alimentent. La composition chimique des cours d'eau est façonnée par la dissolution et la précipitation de minéraux, les réactions d'oxydoréduction, les échanges ioniques et l'activité biologique, de même que par les apports terrestres (p. ex. les eaux souterraines et le ruissellement de surface provenant des zones d'alimentation en amont) et atmosphériques acheminés par le réseau hydrographique (Thomas 2007). Comme les systèmes lotiques sont ouverts, dynamiques et étroitement liés aux paysages environnants, leur signature chimique varie souvent dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions hydrologiques, de l'utilisation des terres et des facteurs climatiques (Stendera *et al*. 2012).

Dans ce contexte chimique, certains ions dissous et composés organiques peuvent agir comme des inhibiteurs cinétiques de la précipitation de la calcite et réduire considérablement les taux de nucléation et de croissance cristalline, même lorsque l'eau est sursaturée ($\Omega > 1$). La précipitation de la calcite peut également séquestrer et retirer ces ions de la solution, ce qui, dans le cas des nutriments, peut influer sur la productivité primaire (Vereshchagin *et al*. 2023).

Bien que le magnésium et le phosphate soient examinés plus en détail ci-après, une grande variété d'ions dissous et de composés organiques est reconnue pour influencer la cinétique de précipitation de la calcite (Vereshchagin *et al*. 2023). Les effets de ces impuretés sur les seuils de nucléation, les mécanismes de croissance et la morphologie des cristaux font l'objet de recherches soutenues depuis plusieurs décennies et demeurent essentiels à la compréhension de la minéralisation des carbonates dans les systèmes naturels d'eau douce (Vereshchagin *et al*. 2023).

Les ions magnésium (Mg^{2+}) comptent parmi les inhibiteurs de la précipitation de la calcite les plus puissants et les plus étudiés (Nyirő-Kósa *et al*. 2018, Davis *et al*. 2000, Wasylenki *et al*. 2005, Morse *et al*. 2007, Deocampo 2010, Xu and Higgins 2011, Vereshchagin *et al*. 2023, Santos *et al*. 2023). Ils agissent en s'adsorbant à la surface des cristaux, en bloquant les sites où de nouveaux ions pourraient se fixer et, dans certains cas, en s'incorporant à la structure de la calcite, ce qui rend le minéral moins stable et ralentit sa croissance. Même à de faibles concentrations, les ions magnésium peuvent réduire les taux de dissolution et de croissance. Cette inhibition est plus marquée lorsque le sulfate (SO_4^{2-}), un autre inhibiteur cinétique, est également présent et qu'ils forment des paires d'ions ($MgSO_4$) qui renforcent l'effet de blocage à la surface de la calcite (Nielsen *et al*. 2016). Dans les cours d'eau naturels, les fortes concentrations de Mg^{2+} provenant de roches riches en dolomie peuvent empêcher la formation rapide de calcite, ce qui explique pourquoi certaines eaux sursaturées produisent peu de précipitation de calcite.

Les ions phosphate (PO_4^{3-}), dérivés du phosphore, sont également des inhibiteurs cinétiques efficaces de la précipitation de la calcite. De nombreuses études expérimentales ont démontré que même de faibles concentrations de phosphate peuvent réduire considérablement les taux de nucléation et de croissance de la calcite en bloquant les sites réactifs à la surface des cristaux (Reddy and Nancollas 1971, Ishikawa and Ichikuni 1981, Giannimaras and Koutsoukos 1987, Lebrón and Suárez 1998, Lin and Singer 2006). Ce blocage des sites à la surface augmente la barrière cinétique tant pour la nucléation que pour la croissance cristalline subséquente, ce qui permet à l'eau de demeurer sursaturée par rapport à la calcite sans qu'il y ait de précipitation.

Le phosphore est un élément essentiel à tous les organismes vivants. Il entre dans la composition des acides nucléiques, des membranes phospholipidiques et des molécules de transfert d'énergie, comme l'adénosine triphosphate. Dans les écosystèmes aquatiques, sa disponibilité influence souvent la dynamique des écosystèmes (Cicerone *et al*. 1999, Elser *et al*. 2007, Corman 2025). Lorsqu'il est rare, le phosphore peut limiter la croissance biologique en restreignant la photosynthèse chez les producteurs primaires, ce qui réduit la productivité primaire globale (Elser *et al*. 2007, Corman 2025). À l'inverse, lorsqu'il est abondant, le phosphore peut favoriser l'eutrophisation, qui se caractérise par une prolifération excessive d'algues, une diminution de l'oxygène dissous et une dégradation de l'habitat (Lin and Singer 2006, Smith and Schindler 2009, Corman 2025). Compte tenu du rôle fondamental du phosphore dans les écosystèmes aquatiques, la dynamique de sa coprécipitation avec le carbonate de calcium ($CaCO_3$) revêt une importance particulière. Les effets de la précipitation de la calcite sur la dynamique du phosphore dans les eaux douces ont été abondamment étudiés (Ishikawa and Ichikuni 1981, Hodell *et al*. 1998, Liptak 2000, Corman 2025). La calcite et d'autres carbonates à l'état solide peuvent réduire la disponibilité de nutriments potentiellement limitatifs (phosphore, fer, etc.), de composés organiques biologiquement actifs (vitamines, acides aminés, acides gras, etc.) et de métaux traces potentiellement toxiques (Cicerone *et al*. 1999). La précipitation de la calcite peut influencer la dynamique des nutriments en séquestrant le phosphore biodisponible par adsorption à la surface des cristaux ou par coprécipitation avec des phases phosphatées contenant du calcium. Il peut en résulter une

diminution des concentrations de phosphore dissous et une influence négative sur la productivité primaire (Corman 2025). Toutefois, la rétention du phosphore associée à la calcite n'est pas nécessairement permanente. Le phosphate adsorbé ou coprécipité peut être remis en circulation lors de périodes de dissolution de la calcite, lesquelles peuvent être provoquées par une baisse du pH, une augmentation des concentrations de CO_2, des changements de solubilité dus à la température ou des modifications des conditions hydrologiques qui influencent l'état de saturation. Les interactions entre le phosphore et les carbonates dans les systèmes lotiques sont donc dynamiques, la séquestration et la libération se produisant selon différents régimes chimiques.

Parallèlement, un pH élevé en conditions alcalines peut stimuler la production primaire en augmentant la disponibilité du bicarbonate (HCO_3^-), qui peut servir de source de carbone inorganique pour la photosynthèse (Lay and Ward 1987, Lebrón and Suárez 1998, Almodóvar *et al*. 2006, Kaushal *et al*. 2013). Ces processus opposés illustrent le caractère fortement contextuel des interactions entre les carbonates et les nutriments dans les cours d'eau : la précipitation de la calcite peut temporairement réduire la disponibilité du phosphore, tandis que les changements concomitants de la chimie des carbonates peuvent stimuler la productivité autotrophe. Le résultat écologique net dépend donc de l'équilibre entre l'état de saturation des carbonates, les conditions hydrologiques, l'assimilation biologique et la dynamique de dissolution.

Dans les systèmes lotiques, le double rôle du phosphate, à la fois en tant que nutriment essentiel et qu'inhibiteur cinétique de la précipitation de la calcite, met en évidence l'interdépendance entre les cycles biogéochimiques et les processus de précipitation minérale. Le phosphate peut empêcher la précipitation de la calcite, même dans des conditions de sursaturation apparente, tandis que la précipitation de la calcite peut, en retour, réduire la disponibilité du phosphore pour les producteurs primaires. Cette interaction peut influencer la dynamique des nutriments, la structure des réseaux trophiques et l'état de santé des écosystèmes fluviaux. Il est donc essentiel de comprendre ces interactions pour interpréter les profils de précipitation de la calcite et évaluer les répercussions plus générales de la minéralisation des carbonates dans les systèmes lotiques, notamment sur le cycle des nutriments, les réseaux trophiques et la santé des écosystèmes (Jeziorski *et al*. 2008, Weyhenmeyer *et al*. 2019, Corman 2025).

Dans l'ensemble, la précipitation de la calcite dans les milieux lotiques est fortement influencée par les impuretés dissoutes. Les interactions entre les inhibiteurs, les surfaces minérales et les ions en solution peuvent réduire considérablement le taux de précipitation et favoriser une répartition spatiale hétérogène ou discontinue des dépôts. Il est donc essentiel de comprendre le rôle de ces inhibiteurs pour interpréter la variabilité de l'accumulation de calcite et évaluer dans quelle mesure la précipitation des carbonates peut modifier la structure du lit des cours d'eau et les conditions de l'habitat.

Contexte hydrologique

Les systèmes lotiques sont intrinsèquement dynamiques; leurs conditions hydrologiques et géomorphologiques varient dans le temps et dans l'espace. Les variations du débit, de la morphologie du chenal et du régime d'écoulement peuvent causer une modification rapide de la composition chimique d'un cours d'eau, le faisant passer de conditions favorables à la précipitation de la calcite à des conditions qui l'empêchent, parfois sur de courtes périodes.

Les conditions hydrodynamiques jouent un rôle déterminant dans ces réponses chimiques, principalement en raison de leur influence sur les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère. Dans de nombreux cours d'eau où se produit une précipitation de carbonates, le dégazage du CO_2 constitue le principal mécanisme physique responsable de l'augmentation du pH et de

l'état de saturation (Ω) de la calcite. Un écoulement turbulent accélère les échanges gazeux, ce qui favorise le dégazage rapide du CO_2 de la colonne d'eau, déplace la spéciation des carbonates vers CO_3^{2-}, augmente Ω et accroît ainsi le potentiel de précipitation de la calcite (Herman and Lorah 1987, Herman and Lorah 1988, Lorah and Herman 1988, Dreybrodt *et al*. 1992, Zhang *et al*. 2021).

L'efficacité des échanges de CO_2 est quantifiée par la vitesse de transfert gazeux (k), laquelle intègre les effets de la turbulence, du renouvellement de la surface et de la morphologie du chenal (Raymond *et al*. 2012, Marx *et al*. 2017, Rocher-Ros *et al*. 2019). La valeur de k varie considérablement entre les cours d'eau et à l'intérieur d'un même cours d'eau; elle augmente généralement avec le débit et la pente du chenal (Raymond *et al*. 2012, Marx *et al*. 2017, Zhang *et al*. 2021). Par conséquent, les périodes de débit élevé peuvent soit favoriser, soit inhiber la précipitation de la calcite, selon que l'augmentation du dégazage du CO_2 et du brassage l'emporte ou non sur les effets opposés de la dilution et de la réduction du temps de séjour (Herman and Lorah 1987, Dreybrodt *et al*. 1992).

Dans l'ensemble, le contexte hydrogéochimique des systèmes lotiques montre que la précipitation de la calcite est un processus très dynamique qui réagit au régime d'écoulement, à la saisonnalité et aux conditions hydrauliques. La turbulence et les échanges gazeux agissent comme d'importants facteurs d'amplification de la sursaturation et interagissent avec les processus biologiques, la température, le pH, l'inhibition cinétique et d'autres facteurs pour produire des profils de dépôt de carbonates spatialement hétérogènes.

Gradients de la précipitation de la calcite

La précipitation de la calcite en aval de sources anthropiques, telles que les amas de stériles miniers, est fortement tributaire des caractéristiques propres au site en raison des importantes variations de la composition chimique des eaux à la source, de l'évolution des conditions hydrogéochimiques le long du trajet d'écoulement et d'autres facteurs interactifs (Brierley 1994, Dreybrodt *et al*. 1997, Nordstrom *et al*. 2015, Gadikota 2021, Cravotta 2021). Les eaux de drainage provenant d'amas de stériles de plusieurs mines de la Colombie-Britannique présentent une grande variabilité attribuable à la géologie locale, au climat d'altération, à la minéralogie, à la géochimie, à l'hydrogéologie ainsi qu'aux variations journalières et saisonnières (Brierley 1994). La prévision de la quantité et de la qualité des eaux de drainage est donc complexe et dépend fortement du contexte local (Brierley 1994, Webb and Sasowsky 1994, Balci *et al*. 2018, Vriens *et al*. 2020). Plus généralement, les systèmes de drainage minier peuvent produire des eaux allant d'acides à neutres ou alcalines, avec des différences correspondantes dans les concentrations de calcium dissous (Ca^{2+}), d'espèces carbonatées et de CO_2 (Brierley 1994, Nordstrom *et al*. 2015, Balci *et al*. 2018). À mesure que l'eau s'écoule vers l'aval, les changements chimiques ou hydrologiques peuvent favoriser ou inhiber la précipitation de la calcite (Brierley 1994, Nordstrom *et al*. 2015, Balci *et al*. 2018).

Abongwa et ses collaborateurs (2016) ont étudié la précipitation des carbonates provenant d'eaux de mine neutres traversant une série de bassins de décantation sur une distance d'environ 562 mètres, durant leur interaction avec le CO_2 atmosphérique. Les conditions propres au site ont entraîné une augmentation progressive du pH le long du parcours en raison du dégazage du CO_2, favorisant ainsi la précipitation de la calcite et une diminution des concentrations de Ca^{2+}. Selon les estimations d'Abongwa et ses collaborateurs (2016), sur cette distance de 562 mètres, 20 % du carbone ont été perdus par dégazage du CO_2, 12 % ont été séquestrés sous forme de précipités de calcite et 68 % a été exporté en aval. Toutefois, les conditions hydrauliques et géochimiques des systèmes stagnants diffèrent de celles des chenaux à écoulement libre; les dynamiques de précipitation observées ne sont donc pas nécessairement représentatives des milieux lotiques.

Malgré ces observations, la documentation demeure limitée en ce qui concerne la caractérisation quantitative et fondée sur les processus des gradients de précipitation de la calcite, particulièrement dans les systèmes lotiques. Bien que les systèmes situés près d'une source puissent présenter des états de saturation de calcite supérieurs et un potentiel thermodynamique accru de précipitation, la sursaturation ne garantit pas à elle seule que la précipitation se produira. Les gradients de précipitation ne peuvent donc vraisemblablement pas être prédits de façon fiable uniquement en fonction de la distance par rapport à la source, cette dernière n'étant pas un mécanisme explicatif en soi, mais plutôt un indicateur indirect de nombreux processus dynamiques qui varient dans le temps et dans l'espace. L'état de saturation (Ω), le pH, les taux de dégazage du CO_2, la turbulence, la dilution, les inhibiteurs cinétiques, la température et la productivité primaire peuvent tous varier dans le temps et dans l'espace. Les effets cumulatifs de ces variables peuvent produire des gradients propres au tronçon et dépendants des processus, lesquels peuvent varier considérablement d'un cours d'eau ou d'un bassin versant à l'autre.

Une prédiction fiable exige donc une modélisation intégrée adaptée au site, qui tient compte à la fois des contrôles thermodynamiques et cinétiques de la dynamique des carbonates. Néanmoins, la capacité prédictive demeure limitée par le manque de données, les incertitudes inhérentes au système et les processus dépendants de l'échelle.

Répercussions de la calcite sur les salmonidés et leur habitat

Répercussions sur la qualité de l'eau, la composition chimique et les réseaux trophiques

Les conditions thermodynamiques favorisant la précipitation du carbonate de calcium se caractérisent par un pH légèrement élevé, mais relativement stable et tamponné, ainsi que par des concentrations variables d'acide carbonique, de CO_2 et de calcium. Une conséquence importante de cette dynamique est la coprécipitation de l'orthophosphate, qui peut limiter la production photosynthétique et, par conséquent, la production d'O_2 sous forme d'oxygène dissous. L'ampleur de ce phénomène peut être influencée par la température, le débit et l'aération de l'eau ainsi que l'état nutritif général du milieu, au-delà des effets propres à la calcite. Par exemple, les changements généraux dans la composition chimique de l'eau qui sont associés aux activités minières dans la vallée de l'Elk (p. ex. phosphate, nitrate, sulfate et autres constituants) pourraient interagir avec des processus liés à la calcite, comme la coprécipitation du phosphore, et ainsi modifier la dynamique globale des nutriments. De même, la formation de complexes périphyton-calcification dans les systèmes lotiques pourrait être influencée par les variations des concentrations de phosphate et d'autres nutriments, créant des dynamiques trophiques localisées susceptibles d'affecter à la fois la disponibilité de la nourriture et celle de l'oxygène. *Didymosphenia geminata* (Lyngbye; Schmidt) est une composante connue du périphyton et des croûtes biogéniques associées dans la région en question (Larratt and Self 2021). Cette espèce réagit de façon complexe à la diminution du phosphore : sa forme de croissance filamenteuse, et donc sa productivité photosynthétique, tend à augmenter, particulièrement lorsque les rapports stœchiométriques N:P sont élevés. Les proliférations de cette espèce peuvent produire des masses filamenteuses excessives et sont soupçonnées de nuire aux poissons en modifiant la composition des communautés d'invertébrés au profit des espèces de moucherons, en simplifiant l'hétérogénéité physique de l'habitat, en réduisant la disponibilité de l'oxygène libre lorsque des conditions d'eutrophisation s'installent et en encombrant les sites potentiels de fraie.

La présence généralisée de cyanobactéries laisse également supposer l'existence d'interactions complexes entre les producteurs et les consommateurs (Kleintech *et al*. 2017). La prolifération des cyanobactéries a été décrite comme un symptôme de l'appauvrissement en

phosphore et de la diminution connexe des macrophytes (Corman 2025). Des cyanobactéries sont présentes dans des tapis biogéniques au sein du bassin versant de l'Elk. Elles ont été étudiées en tant que facteurs de stress potentiels pour la truite fardée versant de l'ouest, mais aucune conclusion n'est venue étayer l'existence d'effets néfastes (Larratt and Self 2021).

Répercussions physiques

Les processus physiques soupçonnés d'avoir des effets sur les poissons découlent principalement de l'accumulation progressive de dépôts jusqu'à la formation de concrétions, soit sous forme de croûtes durcies entièrement minéralisées sur le lit des cours d'eau, soit sous forme de structures de type tuf dans les tronçons à forte pente.

La documentation portant explicitement sur les effets de la calcite sur les poissons et leur habitat demeure limitée et repose principalement sur des réflexions hypothétiques (utiles) présentées dans des rapports que des consultants ont préparés pour l'industrie minière (p. ex. Barret *et al*. 2016, Cope *et al*. 2016, 2018, 2020, Hocking *et al*. 2022, Larratt and Self 2021). Les données présentées dans ces études proviennent principalement d'observations de terrain, dont certaines sont liées à des poissons, mais sans dispositifs expérimentaux contrôlés. Elles constituent néanmoins un ensemble de réflexions élaborées qui s'appuient sur une vaste littérature portant sur les réponses de salmonidés à des contraintes physiques et biologiques analogues.

La forme de dépôt la plus subtile, et probablement aussi la plus répandue, est une mince pellicule de calcite recouvrant des galets et du gravier déjà présents sur le lit d'un cours d'eau. À l'échelle locale considérée ici (du mésohabitat au microhabitat dans le chenal), aucun effet négatif sur les poissons n'a été attribué à cette forme de dépôt, mais certaines préoccupations liées aux effets à l'échelle du paysage sur la dynamique des nutriments sont abordées plus loin. De même, aucune répercussion particulière n'a été attribuée à la formation de structures de calcite ressemblant à des galets (clastes, oolites, oncoïdes, etc.), sauf lorsqu'elles contribuent à une concrétion plus poussée résultant de l'équilibre entre la précipitation de la calcite et les processus physiques de remaniement, tels que l'abrasion et le transport des sédiments.

Lorsque les particules commencent à se lier les unes aux autres, la calcite agissant comme ciment, plusieurs effets potentiels ont été proposés.

Simplification de la structure existante du lit du cours d'eau

Les lits naturels des cours d'eau de la Cordillère de l'Ouest sont poreux, dynamiques et relativement variables dans le temps et dans l'espace. Ils sont composés de matériaux sédimentaires et organiques à divers degrés de décomposition, qui créent des espaces interstitiels entre les particules. Les échanges d'eau et de gaz dans la zone hyporhéique sont une caractéristique importante de cette structure; il est bien établi qu'ils fournissent aux poissons des éléments renouvelables qui contribuent à la qualité de l'eau, notamment un apport continu en oxygène dissous. La structure du cours d'eau favorise également les échanges verticaux de matières entre la zone hyporhéique et les autres composantes du chenal (p. ex. Montgomery and Buffington 1997). Les particules mobiles créent aussi des espaces interstitiels qui peuvent offrir une structure pour le bon développement des œufs de poissons grâce aux échanges gazeux et à la protection contre les contraintes hydrauliques, piéger la matière organique nécessaire à la production du réseau trophique, servir d'habitats d'alimentation et de croissance pour des macroinvertébrés et empêcher l'envasement généralisé grâce à la répartition des sédiments fins. La cimentation progressive causée par les dépôts de calcite altère cette structure en liant les particules entre elles, en réduisant les échanges gazeux (Wright *et al*. 2018), en favorisant l'accumulation de sédiments en surface et en limitant la capacité des poissons à déplacer les matériaux nécessaires à la construction des nids.

Modification de la rugosité de surface

La structure dans les habitats lotiques remplit diverses fonctions importantes. Bien que les sédiments grossiers, mais mobiles, forment une structure de chenal dans laquelle les poissons peuvent se déplacer et qu'ils peuvent modeler, le durcissement par calcification peut éliminer des éléments verticaux importants, comme il en a été question précédemment. Il s'agit d'une forme de simplification interstitielle qui fusionne des éléments auparavant mobiles et qui élimine des textures importantes. À l'inverse, une texture de surface plus fine résultant du dépôt de calcite pourrait avoir d'autres effets.

Lors d'une visite sur le terrain effectuée en 2025 dans la région du Kootenay, en Colombie-Britannique, des employés du MPO ont observé des concrétions de type tuf présentant des formations s'étendant horizontalement et des textures de surface distinctes et accidentées. Ces dépôts de tuf peuvent être décrits comme présentant une surface raboteuse caractérisée par des crêtes et des saillies anguleuses et acérées. Par endroits, ces concrétions occupaient toute la largeur de petits chenaux et se prolongeaient vers l'amont jusqu'à des concrétions verticales du même type situées au niveau de cascades. En général, et surtout en période de faible débit, de telles surfaces sont susceptibles d'entraver le passage des poissons de grande taille. Certaines formations présentaient des caractéristiques phytoclastiques. Toutefois, la morphologie de ces dépôts variait et reflétait probablement un équilibre entre la précipitation de la calcite et les processus de remaniement physique, tels que l'abrasion et le transport des sédiments.

Dans ses formes les plus extrêmes, la cimentation ou la concrétion de la calcite peut former des couches dures sur le fond des cours d'eau dont la forme est généralement simple, qui sont relativement non poreuses, qui favorisent la convection hydrologique et qui sont généralement non propices à la reproduction des poissons en raison de l'élimination des habitats nécessaires à l'achèvement de leur cycle biologique. De plus, les structures concrétées sont susceptibles de limiter le passage et la migration des poissons. Les concrétions de type tuf associées aux cascades à forte pente forment des structures verticales rigides pouvant faire obstacle au passage des poissons lorsque les niveaux d'eau sont faibles. Les structures d'écoulement qui existaient avant la calcification ainsi que leurs fonctions pour les poissons, notamment l'alternance entre les radiers, les plats et les fosses, sont susceptibles de se dégrader à mesure que la calcification progresse, particulièrement lorsque des concrétions se forment. Le tableau 1 présente les effets potentiels de la calcite sur les principaux stades du cycle biologique des salmonidés. Il met en évidence des cas particuliers où il pourrait y avoir des répercussions propres à l'une des espèces d'intérêt, soit l'omble à tête plate, le ménomini des montagnes et la truite fardée versant de l'ouest.

Tableau 1. Effets potentiels de la calcite sur les stades du cycle biologique des salmonidés, plus particulièrement l'omble à tête plate, le ménomini des montagnes et la truite fardée versant de l'ouest.

Stade du cycle biologique	Mécanisme primaire de la calcite	Répercussions physiques/chimiques	Conséquences biologiques	Considérations propres aux espèces
Œuf	Remplissage des espaces interstitiels	Conductivité hydraulique réduite; échange restreint dans la zone hyporhéique	Diminution de l'apport d'oxygène dissous; augmentation de la mortalité embryonnaire	-

Stade du cycle biologique	Mécanisme primaire de la calcite	Répercussions physiques/chimiques	Conséquences biologiques	Considérations propres aux espèces
Alevin vésiculé	Remplissage des espaces interstitiels	Scellement de la surface composée de gravier; restriction des déplacements	Confinement dans le substrat; accumulation de déchets métaboliques toxiques; émergence retardée	-
Alevin	Dégradation des microhabitats	Perte d'abris dans les eaux peu profondes et de refuges dans les espaces interstitiels; changement dans la communauté des proies	Vulnérabilité accrue à la prédation et au déplacement en cas de débit fort; survie réduite	La perte d'habitat peut aggraver la compétition interspécifique de l'omble à tête plate
Tacon	Simplification de l'habitat	Perte permanente de refuges d'hivernage; changement dans la communauté des proies	Réduction des taux de croissance en raison de la perte de proies (macroinvertébrés – éphéméroptères, plécoptères et trichoptères); obstacle aux déplacements	Le ménomini est sensible à la réduction de la disponibilité de nourriture dans le substrat
Adulte	Concrétion du substrat	Durcissement du gravier utilisé pour la fraie; perte de substrat mobile; augmentation de la conductivité hydrologique; obstacle aux déplacements; changement dans la répartition de la communauté de proies et de l'habitat	Réduction de la densité des nids; obstruction mécanique causée par l'excavation; déplacement vers un habitat marginal; obstacle à la migration; déplacement des œufs	Le ménomini est sensible à la réduction de la disponibilité de nourriture dans le substrat; fragmentation de l'habitat et des populations de l'omble à tête plate, et accès restreint aux petits affluents pendant les périodes de migration où le débit est faible à la fin de l'été et à l'automne

Effets potentiels de la précipitation de la calcite sur le transport des sédiments

Dans les cours d'eau alluviaux, la morphologie du chenal et l'habitat aquatique sont maintenus par des cycles continus d'érosion, de transport de sédiments et de dépôt. Ces processus régulent la mobilité des sédiments, la répartition granulométrique et la dynamique d'affouillement et de comblement, déterminant ainsi la formation et le maintien de caractéristiques essentielles de l'habitat (Harrison *et al*. 2011, Wohl *et al*. 2015). Pour les salmonidés et d'autres organismes aquatiques, la mobilité des sédiments est essentielle au maintien d'un gravier de fraie propre et bien oxygéné, à la limitation de l'accumulation de sédiments fins pendant l'incubation des œufs et à la création d'habitats dynamiques servant d'abris et d'aires d'alimentation à différents stades de leur cycle biologique (Lisle and Lewis 1992, Cienciala and Hassan 2013, Schindler Wildhaber *et al*. 2014). Une réduction durable de la mobilité des sédiments compromet donc les processus géomorphologiques qui sous-tendent les fonctions écologiques. Le transport des sédiments établit ainsi un lien direct entre la dynamique fluviale et la qualité de l'habitat; toute perturbation de cette mobilité peut modifier à la fois la morphologie du chenal et la qualité de l'habitat pour plusieurs stades du cycle biologique.

La précipitation de la calcite peut perturber ces processus en modifiant la surface des particules sédimentaires et en cimentant des grains adjacents, ce qui augmente la cohésion du substrat et sa résistance à l'entraînement. Bien que les données empiriques établissant un lien direct entre la précipitation de la calcite et la modification du transport des sédiments demeurent limitées, les mécanismes susceptibles de produire de tels effets sont bien établis. Lorsque la calcite forme des couches cimentées ou semi-cimentées qui persistent dans les conditions locales d'écoulement et de transport des sédiments, les processus d'érosion et de dépôt peuvent être réduits localement, ce qui diminue le renouvellement du substrat et limite l'apport de nouveaux sédiments mobiles. Cela peut entraîner l'apparition de zones hétérogènes caractérisées par une mobilité réduite des sédiments et une perte localisée d'habitats de fraie et d'alevinage, même lorsque les secteurs adjacents du chenal demeurent entièrement alluviaux. Toutefois, les répercussions écologiques de ces caractéristiques dépendent de leur étendue et de leur capacité à modifier la continuité de l'habitat ou le passage du poisson. Dans certains cas, une cohésion accrue du substrat et un durcissement localisé du lit peuvent également entraîner des ajustements à l'échelle du chenal, notamment la formation de seuils de stabilisation ou des changements dans la mobilité latérale du chenal, selon le régime d'écoulement et le contexte géomorphologique.

Séquences des effets

Les séquences des effets permettent de décrire de façon standardisée les relations entre les ouvrages, entreprises et activités (visés par les dispositions sur la protection de l'habitat de la *Loi sur les pêches*), les facteurs de stress qu'ils génèrent et les répercussions qui en découlent sur le poisson ou son habitat (paramètres ultimes). Le personnel du MPO utilise les diagrammes de séquences des effets à diverses étapes de l'examen réglementaire. Des diagrammes simplifiés sont actuellement utilisés (Brownscombe et Smokorowski 2021), mais des approches plus élaborées sont proposées dans DFO (2014). Les premiers diagrammes de séquences des effets ont été utilisés vers 2005 à l'appui d'un cadre de gestion fondée sur l'écosystème, d'un processus de planification de mesures réglementaires et d'un cadre de gestion des risques. Au total, 20 diagrammes différents ont été élaborés et approuvés pour une utilisation à l'échelle nationale afin de décrire un éventail d'ouvrages, d'entreprises et d'activités ainsi que les répercussions qui leur sont associées. Ceux-ci ont ensuite été regroupés en quatre diagrammes approuvés à l'échelle nationale (Brownscombe et Smokorowski 2021).

Parmi ces quatre diagrammes, c'est celui portant sur les effets en milieu terrestre qui est pertinent dans le présent contexte (figure 1). Les amas de stériles miniers traversés par des eaux créent un potentiel de calcification en aval, et ils peuvent être considérés de façon générale comme une modification des schémas de drainage des terres (cinquième facteur de stress à partir de la gauche dans la figure 1). Cette approche aide à illustrer le contexte général dans lequel une répercussion est évaluée, mais les modèles simplifiés tendent à sous-représenter la complexité réelle des systèmes. Brownscombe et Smokorowski (2021) affirment que des diagrammes représentant plus fidèlement les modèles écosystémiques avec un nombre accru de séquences opérant dans plusieurs directions pourraient être nécessaires en vue d'aborder correctement les problèmes de réglementation modernes, tels que les effets cumulatifs. De plus, des travaux antérieurs visant à utiliser des séquences des effets à des fins de planification et de gestion fondée sur l'écosystème (DFO 2014) révèlent l'intention initiale de les utiliser de manière générale et détaillée.

La figure 2 présente un diagramme proposé des séquences des effets de la calcification en milieu aquatique attribuable aux activités minières et montre l'utilité d'adapter un modèle national à un contexte particulier. Ce diagramme n'est pas une représentation exhaustive de l'écosystème visé, mais il illustre plusieurs séquences complexes et fait ressortir un ensemble de préoccupations réglementaires.

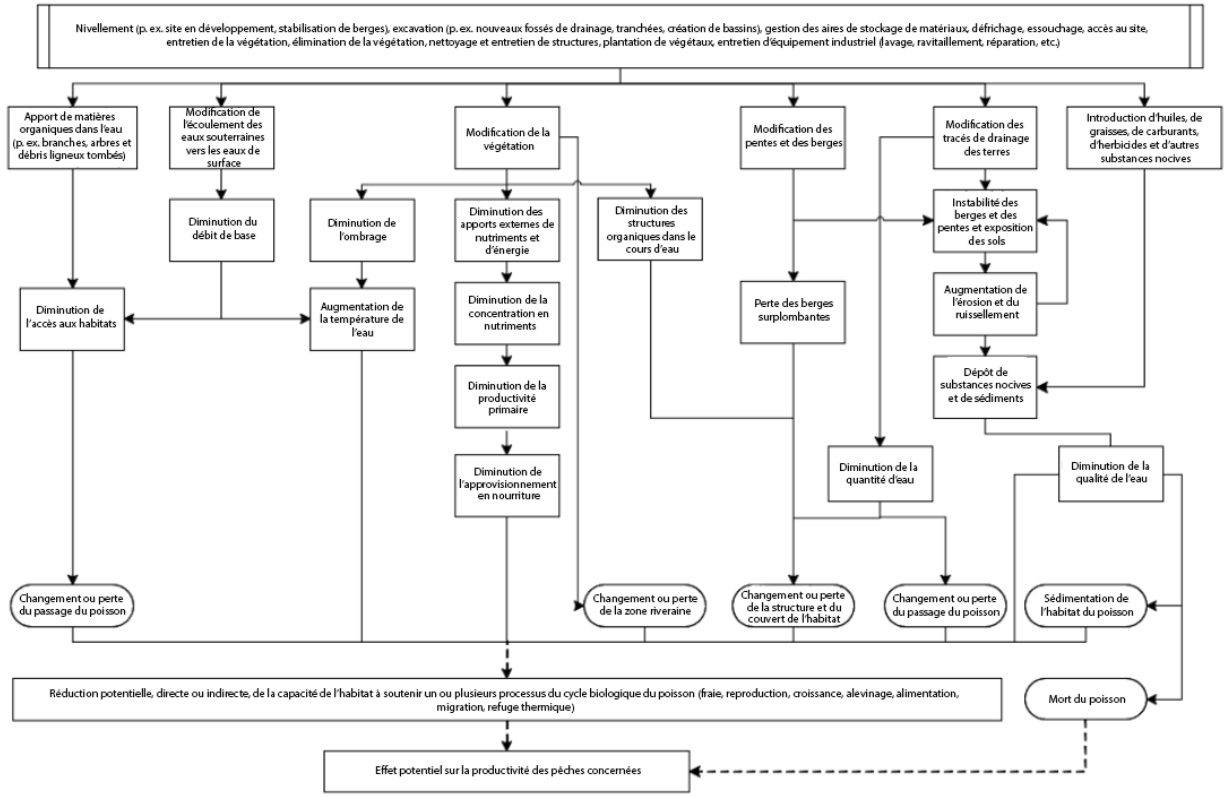


Figure 1. Diagramme national de séquences des effets pour les ouvrages, entreprises et activités en milieu terrestre (tiré de Brownscombe et Smokorowski 2021).

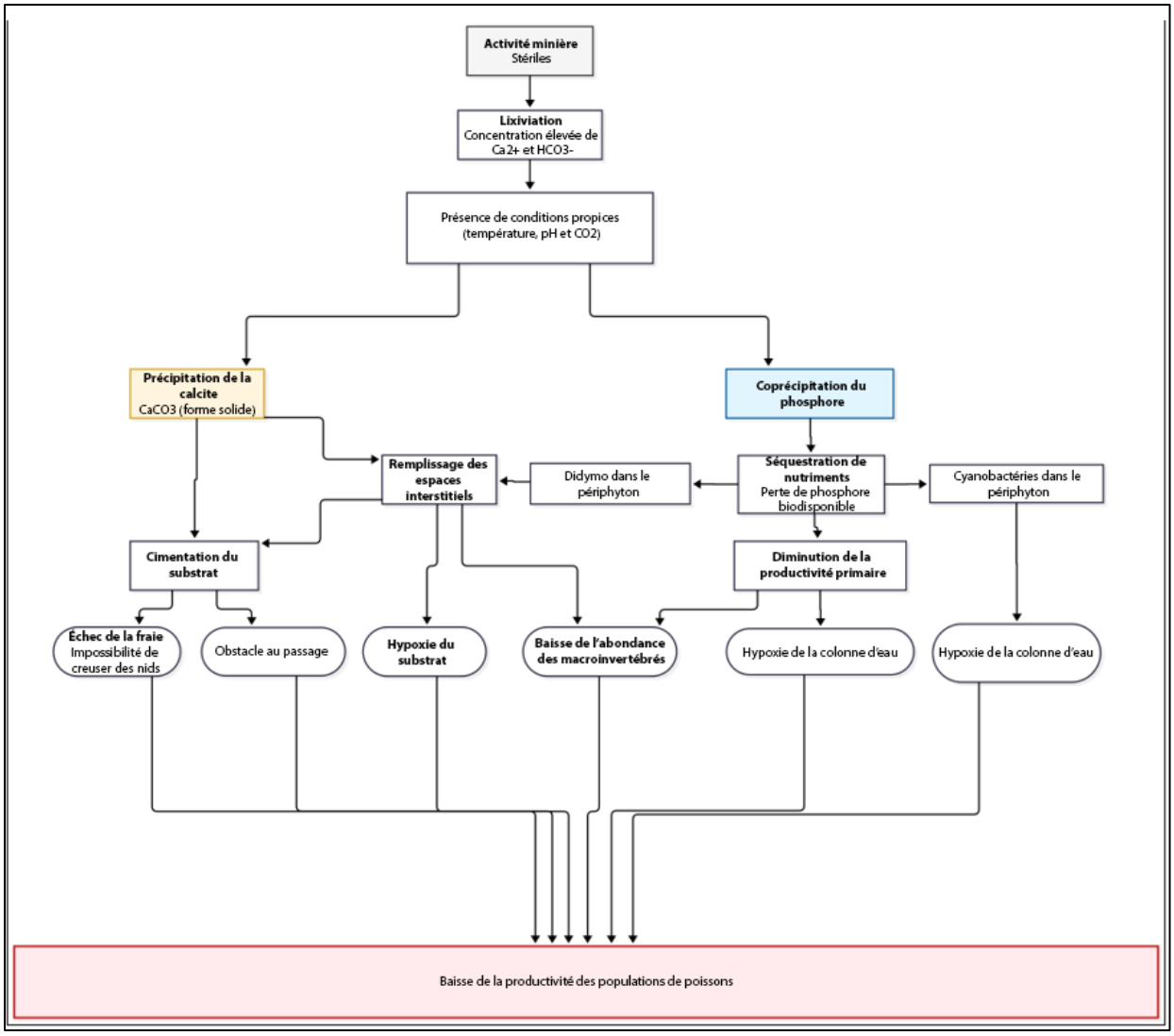


Figure 2. Diagramme proposé de séquences des effets illustrant les répercussions, sur l'habitat du poisson, de la précipitation de la calcite due aux activités minières. Les rectangles représentent les facteurs de stress, les bulles représentent les paramètres ultimes, les lignes individuelles représentent les relations de cause à effet entre les facteurs de stress, et les ensembles descendants de rectangles et de lignes constituent des séquences des effets (d'après Brownscombe et Smokorowski 2021).

Brownscombe et Smokorowski (2021) utilisent également les diagrammes pour communiquer le niveau d'appui associé aux différentes séquences des effets présentées dans les modèles nationaux qu'ils ont examinés. Il s'agit d'une considération importante dans les approches réglementaires, mais qui n'est pas souvent explicite. Les catégories de niveau d'appui qu'ils utilisent sont les suivantes : I. appuis directs et solides dans la documentation scientifique reliant la séquence de pression au paramètre ultime, parmi lesquels de nombreuses études et/ou synthèses ou méta-analyses rigoureuses; II. appui direct dans la documentation scientifique reliant la séquence de pression au paramètre ultime qui se base sur au moins une étude rigoureuse; III. appui théorique reliant la séquence de pression au paramètre ultime, mais aucune preuve scientifique directe; IV. aucun appui trouvé.

Les composantes de la figure 2 qui illustrent les processus de calcification menant à la concrétion et au remplissage des espaces interstitiels sont considérées comme étant bien

établies et correspondent donc à la catégorie de niveau d'appui I. Plusieurs études indépendantes corroborent les mécanismes de réaction et les effets de la précipitation en surface dans les eaux de surface. Les sections qui suivent portent sur les composantes des séquences des effets qui entraînent des répercussions sur le poisson et son habitat.

Précipitation de la calcite > Concrétion du substrat > Échec de la fraie (II)

Un ensemble de données a été recueilli et publié pour cette séquence des effets. Les résultats ont fait l'objet d'un examen interne par les pairs et ont été présentés dans un rapport de consultant (Hocking *et al*. 2022). Cette étude fondée sur des observations de terrain présente des données corrélationnelles, sous la forme d'observations et de réponses modélisées, qui indiquent une diminution importante des frayères de la truite fardée versant de l'ouest à mesure que le degré de concrétion du substrat attribuable aux activités minières augmente. En raison des similitudes entre les besoins liés à la fraie des salmonidés, ces résultats sont jugés très pertinents pour les autres espèces de ce groupe. Les espèces qui libèrent leurs produits sexuels dans la colonne d'eau, comme le ménomini des montagnes, ont besoin de ressources semblables. En revanche, leur sensibilité à la concrétion de surface durant la fraie est peu documentée comparativement à celle des espèces qui libèrent leurs produits sexuels dans le substrat.

Concrétion du substrat > Obstacle au passage du poisson (III)

Le rôle des concrétions de calcite comme obstacles au passage du poisson n'a pas été étudié directement, bien que certaines études sur des sujets analogues permettent de supposer des effets négatifs. Il est reconnu que les surfaces raboteuses de certaines structures en béton conçues pour permettre le passage du poisson peuvent nuire aux déplacements et provoquer des blessures ventrales (Cox *et al*. 2003). Dans ces mêmes environnements et dans les cours d'eau, la conductivité hydraulique (débits rapides) peut également nuire au passage du poisson, ce qui explique l'utilisation de déflecteurs et d'autres structures destinées à créer de la turbulence et à réduire la force du débit (Savoie *et al*. 2002). Enfin, la formation de concrétions est plus fréquente au niveau des cascades, où les conditions propices sont plus susceptibles d'être présentes (Lahrichi *et al*. 2026). Il est reconnu que des obstacles artificiels concrétés de tailles variées peuvent limiter le passage du poisson et que même de petites structures présentes dans le chenal peuvent influencer les déplacements et la structure d'une population dans certaines conditions (Wells *et al*. 2024). La mesure dans laquelle une structure agit comme un obstacle dépend des aptitudes de nage propres à l'espèce (p. ex. vitesse de pointe, hauteur de saut) et des conditions hydrauliques locales, notamment la profondeur des fosses, la vitesse d'approche et la géométrie de l'obstacle.

Précipitation de la calcite > Remplissage des espaces interstitiels > Hypoxie du substrat (II)

Le remplissage des espaces interstitiels découlant de la précipitation de la calcite dans le substrat (p. ex. remplissage et revêtement des espaces) peut être observé sur le terrain dans les endroits où celle-ci se produit (Kuchapski and Rasmusen 2015); il s'agit d'un précurseur logique de la formation de concrétions. Les effets de ce type de sédimentation sur les poissons ont été déduits par extrapolation à partir d'études établies portant sur les effets sur les poissons d'autres formes de sédimentation, particulièrement en ce qui concerne l'oxygène dissous, les sédiments pouvant limiter les échanges gazeux et l'apport en oxygène. Wright et ses collaborateurs (2018) ont étudié les concentrations d'oxygène dissous dans le cadre d'une étude de terrain portant sur différents niveaux d'accumulation de sédiments calcaires et à différentes profondeurs de la zone hyporhéique. Cette étude n'a pas non plus fait l'objet d'un examen externe par les pairs et présente des données corrélationnelles. Les auteurs concluent que la calcite et l'oxygène dissous pourraient être corrélés négativement. Toutefois, cette

relation reflète une diminution de l'oxygène dissous dans l'environnement interstitiel sous la surface du substrat plutôt que dans la colonne d'eau sus-jacente, ce qui pourrait réduire la disponibilité en oxygène dans les nids et d'autres habitats benthiques. Dans cette étude, les diminutions les plus marquées de l'oxygène dissous ont été observées à des profondeurs supérieures à celles que la truite fardée versant de l'ouest atteint habituellement lorsqu'elle construit un nid. Par conséquent, bien que les résultats laissent croire que le remplissage des espaces interstitiels dû à la calcite pourrait réduire la disponibilité de l'oxygène dans le substrat, leur pertinence directe pour les milieux d'incubation et d'alevinage de la truite fardée versant de l'ouest demeure incertaine.

Précipitation de la calcite > Remplissage des espaces interstitiels > Baisse de l'abondance des macroinvertébrés (I)

Le lien entre les macroinvertébrés et le remplissage des espaces interstitiels est l'élément le mieux étayé de la figure 2. Kuchapski et Rasmussen (2015) ont étudié directement cette question dans deux sites des Rocheuses canadiennes. Bien qu'ils n'aient pas examiné explicitement le remplissage des espaces interstitiels, ils avancent que celui-ci pourrait constituer l'un des mécanismes expliquant les effets de la calcite sur les macroinvertébrés aquatiques qui sont défavorables à l'alimentation des poissons, notamment en réduisant les comportements de fouissage. Des travaux semblables réalisés par Barrett et ses collaborateurs (2016) ont produit des résultats comparables et ont notamment montré que les concrétions pourraient être associées à une diminution de l'abondance de proies importantes, comme les éphémères, ainsi qu'à des modifications de la composition en espèces et en familles des communautés d'invertébrés pouvant nuire aux poissons insectivores. De nombreuses autres études ont examiné l'importance des espaces interstitiels pour l'abondance et la diversité des macroinvertébrés et ont abouti à des conclusions similaires (p. ex. Natsumeda and Iguchi 2019, Bylak and Kukula 2022). Ces changements localisés dans l'abondance et la composition des populations de macroinvertébrés pourraient également influencer la productivité en aval, puisque la diminution de la production d'invertébrés et la modification des conditions hydrauliques pourraient réduire la dérive et le transport vers l'aval de ressources alimentaires.

Coprécipitation du phosphore > Séquestration des nutriments > *Didymosphenia* > Remplissage des espaces interstitiels (III)

L'hypothèse selon laquelle cette séquence des effets pourrait être importante dans les paysages touchés par l'exploitation minière à ciel ouvert est relativement nouvelle. Bien que cette séquence propre à la calcite n'ait pas été étudiée directement, chacune de ses étapes est étayée par la documentation scientifique. La coprécipitation du phosphore avec la calcite est bien documentée, mais le devenir exact du phosphore, qu'il soit adsorbé puis rapidement libéré ou séquestré sous une forme minéralisée, dépend des conditions locales. Néanmoins, la formation de calcite alors qu'il y a une carence en phosphore a déjà été observée (Corman 2025). Pour la plupart des organismes aquatiques, le phosphore est un nutriment limitatif et sa rareté réduit la croissance. *Didymosphenia geminata* (Didymo), une espèce observée dans les croûtes biogéniques de calcite des montagnes Rocheuses (Larratt and Self 2021), réagit à cette situation en prenant une forme filamenteuse et en formant d'épais tapis sur le substrat des cours d'eau. Cette réaction peut notamment être induite par un rapport stœchiométrique azote-phosphore élevé. Sous sa forme filamenteuse, Didymo peut constituer une menace pour les espèces qui frayent dans le substrat en remplissant les espaces interstitiels; elle peut également toucher d'autres poissons en modifiant les communautés de macroinvertébrés (Root and O'Reilly 2012).

Coprécipitation du phosphore > Séquestration des nutriments > Réduction de la productivité primaire > Baisse de l'abondance des macroinvertébrés (III)

Corman (2016) présente des données expérimentales démontrant que la coprécipitation du phosphore et sa séquestration subséquente peuvent limiter la productivité primaire dans les petits cours d'eau. Les relations entre la productivité primaire et les indicateurs liés aux espèces et aux communautés de macroinvertébrés sont variables dans les cours d'eau, mais plusieurs études d'observation et d'expérimentation démontrent clairement l'existence d'une relation dans cette séquence des effets (p. ex. Ferreira *et al*. 2015, Rosemond 2015).

Coprécipitation du phosphore > Séquestration des nutriments > Réduction de la productivité primaire > Hypoxie de la colonne d'eau (III)

Bien que des conditions hypoxiques dans la zone hyporhéique aient été associées à la présence de calcite (Wright *et al*. 2018), aucune donnée n'indique que la colonne d'eau des systèmes étudiés soit hypoxique. Il s'agit néanmoins d'une séquence des effets plausible dont les praticiens devraient tenir compte. Dans la documentation, elle est décrite simplement comme un déficit d'oxygène produit par photosynthèse par rapport à la consommation attribuable à la respiration (p. ex. Diamond *et al*. 2023, Diamond *et al*. 2021).

Coprécipitation du phosphore > Séquestration des nutriments > Cyanobactéries > Toxicité (III)

Il s'agit d'une autre séquence des effets proposée et examinée sur le plan théorique (Larratt and Self 2021), fondée sur la présence connue de cyanobactéries dans les tapis biogéniques étudiés dans la vallée de l'Elk, mais pour laquelle aucun effet n'a été démontré. La limitation du phosphore en tant que nutriment (et l'éventuelle amplification stœchiométrique du rapport N:P) dans la formation de tapis biogéniques comprenant à la fois Didymo et des espèces de cyanobactéries est un phénomène qui est corroboré par la documentation scientifique et qui pourrait constituer une conséquence importante, à l'échelle du paysage, de la calcification en cours.

Remarque sur l'interruption des séquences des effets

Bien que cet aspect soit rarement mis en évidence dans la documentation portant sur les séquences des effets, les praticiens savent que ces dernières sont des chaînes de causes et d'effets qui peuvent être interrompues. Cette notion vise à illustrer les possibilités d'intervention permettant de modifier une séquence avant qu'elle n'aboutisse à un paramètre ultime néfaste. Ces interventions peuvent prendre la forme de mesures préventives ou de mesures d'atténuation réactives. L'utilisation de solutions antitartre pour prévenir la formation supplémentaire de calcite est une mesure d'intervention qui est prise entre la formation du lixiviat et l'établissement des conditions propices aux réactions (entre les deux facteurs de stress situés au sommet de la figure 2) et qui interrompt l'ensemble de la séquence des effets. Plus l'interruption survient tôt dans la séquence, plus ses répercussions seront importantes sur la cascade d'effets représentée dans les parties inférieures du diagramme.

Objectif 2 : Aperçu des méthodes de suivi de la calcite

La présente section a pour objectif de fournir un aperçu des méthodes de suivi de la calcite mises en œuvre dans le cadre des plans de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2014 et de 2025, dans la mesure nécessaire pour atteindre les objectifs de la présente étude. Des descriptions détaillées des protocoles de suivi et des aspects méthodologiques figurent dans le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2014 et son annexe J.1 (EVWQP 2014), dans le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025 (EVWQP 2025) ainsi que dans plusieurs

rapports techniques, notamment Hocking *et al*. (2020, 2021, 2022), McCabe and Robinson (2020), Zathey *et al*. (2021), Smit and Robinson (2023, 2024) et Smit *et al*. (2025).

Résumé de l'historique et du contexte réglementaire

La vallée de l'Elk, située dans le sud-est de la Colombie-Britannique, au Canada, possède une grande valeur économique, sociale, culturelle et écologique. L'exploitation du charbon est un pilier de l'économie régionale depuis 1898, les activités ayant pris une ampleur considérable au fil du temps de façon à répondre à la demande mondiale de charbon de qualité métallurgique (cokéfiable). Toutefois, l'expansion des activités minières a entraîné une augmentation du volume de stériles, qui constituent une source de contaminants, tels que le sélénium, le nitrate, le sulfate, le cadmium et la calcite. Malgré la mise en œuvre de mesures d'atténuation, les stériles demeurent une source persistante de ces substances dans les milieux aquatiques.

L'accumulation de calcite est devenue une préoccupation particulière à la suite de l'observation de précipitations minérales et de concrétions sur les lits de cours d'eau en aval des exploitations minières, lesquelles ont soulevé des inquiétudes quant aux effets potentiels à long terme sur la structure et les fonctions des habitats aquatiques. Bien que la calcite soit naturellement présente dans l'environnement, les activités minières peuvent modifier les conditions géochimiques de manière à accroître sa précipitation et son accumulation. Toutefois, à l'époque, les connaissances scientifiques relatives à la dynamique de précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques et à ses répercussions écologiques étaient limitées. Aucun cadre réglementaire ni aucune cible ou méthode standardisée de suivi n'avaient alors été établis afin d'évaluer la présence, l'accumulation ou les effets biologiques de la calcite à l'échelle locale ou à celle du bassin versant.

La reconnaissance de ces préoccupations a mené à la publication de l'arrêté ministériel M113-2013 (arrêté M113) par le ministre de l'Environnement de la Colombie-Britannique le 15 avril 2013. Cet arrêté exigeait l'élaboration d'un plan de gestion couvrant l'ensemble du bassin versant de la vallée de l'Elk afin d'améliorer la qualité de l'eau et d'orienter le développement des activités minières. Plus précisément, l'arrêté M113 désignait la calcite comme l'un des paramètres nécessitant une gestion à l'échelle régionale et exigeait la mise en œuvre de mesures visant à réduire son taux de formation.

En réponse à cette exigence, le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2014 (EVWQP 2014) a été élaboré à titre de plan de gestion régional et approuvé le 18 novembre 2014, ce qui a mené à la délivrance du permis 107517 en vertu de l'*Environmental Management Act*. Élaboré avec la participation de divers intervenants, le plan de 2014 établissait un cadre comportant notamment des cibles de qualité de l'eau visant plusieurs paramètres chimiques, dont la calcite. Ce plan reconnaissait également que la cible à long terme relative à la calcite était provisoire, compte tenu des importantes incertitudes entourant les mécanismes responsables de sa précipitation et la relation entre son accumulation observée et ses effets biologiques. Il prévoyait que cette cible serait réexaminée et précisée à mesure que des données de suivi, des expériences de traitement et des renseignements sur les effets aquatiques deviendraient disponibles.

Publié en juillet 2024, l'arrêté ministériel M232-2024 (arrêté M232) exigeait des modifications au plan de 2014 et donnait le coup d'envoi à l'élaboration du plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025 (EVWQP 2025). Dans le cadre de ces modifications, l'arrêté M232 exigeait la révision et la mise à jour de la cible relative à la calcite afin de tenir compte des nouvelles connaissances scientifiques et de l'expérience acquise depuis la mise en œuvre du plan de 2014.

Le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025, approuvé le 30 juillet 2025, modifie et remplace celui de 2014 à titre de plan de gestion régional mis à jour. Préparé par le ministère de l'Environnement et des Parcs de la Colombie-Britannique en réponse à l'arrêté M232, ce plan comprend une cible révisée relative à la calcite ainsi que des recommandations découlant de l'examen de cette dernière (EVWQP 2025).

Aperçu des méthodes de suivi prévues par le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2014

Les méthodes décrites dans le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2014 (EVWQP 2014) avaient pour but de quantifier l'étendue spatiale et le taux relatif de formation de la calcite en aval des exploitations minières, ainsi que d'appuyer l'évaluation de ses répercussions potentielles sur l'habitat aquatique.

Le programme de suivi visait tous les cours d'eau exposés aux activités minières situés dans la zone désignée (le bassin versant de la rivière Elk) et correspondant à la définition d'habitat du poisson au sens de la *Loi sur les pêches*. Afin d'offrir un point de comparaison, le plan de 2014 présentait également un ensemble de cours d'eau de référence choisis en fonction de leur persistance prévue à long terme et de leur éloignement suffisant par rapport aux exploitations minières existantes et raisonnablement prévisibles. Ces sites de référence devaient représenter les conditions naturelles de calcite auxquelles les cours d'eau influencés par les activités minières pouvaient être comparés.

Les cours d'eau ont été subdivisés en tronçons correspondant à des sections relativement homogènes sur le plan de la morphologie du chenal, du couvert riverain et des caractéristiques d'écoulement. Il a été présumé que la variabilité des dépôts de calcite était faible à l'intérieur d'un même tronçon (EVWQP 2014, annexe J.1). Les tronçons ont été définis en fonction de limites établies précédemment dans diverses sources (EVWQP 2014; annexe J.1). Pour les cours d'eau où aucune limite de tronçon n'avait été préalablement définie, une analyse fondée sur un système d'information géographique a été réalisée de manière à repérer les changements importants des variables morphologiques. Les limites ont ensuite été vérifiées ou ajustées au moyen d'observations sur le terrain (EVWQP 2014; annexe J.1). Afin de tenir compte de la variabilité intrinsèque des tronçons, plusieurs sites d'échantillonnage ont été établis dans chacun d'eux de façon à améliorer l'exactitude et la fiabilité des estimations relatives aux dépôts de calcite.

Le nombre de sites d'échantillonnage dépendait de la longueur du tronçon; il y en avait généralement jusqu'à trois. Dans les tronçons de 300 mètres ou plus, il y avait habituellement 3 sites d'échantillonnage systématiquement répartis de façon à correspondre approximativement à 25 %, 50 % et 75 % de la longueur totale. Les résultats obtenus à chacun des sites étaient ensuite moyennés afin de produire une seule valeur de l'indice de calcite par tronçon, fournissant un niveau de résolution spatiale jugé approprié à la prise de décisions de gestion. Un suivi à l'échelle de l'habitat ou du mésohabitat (les sites individuels à l'intérieur d'un tronçon) était considéré comme trop détaillé pour la mise en œuvre des mesures d'atténuation relatives à la calcite (EVWQP 2014).

Au moment de l'élaboration des méthodes de suivi, les connaissances scientifiques relatives aux mécanismes sous-tendant la précipitation de la calcite et à l'influence des facteurs biotiques et abiotiques en interaction étaient limitées. En l'absence de méthodes standardisées pour la mesure et le suivi de l'accumulation de calcite et la formation de concrétions sur les lits de cours d'eau, une version modifiée de la méthode de granulométrie de Wolman (Wolman 1954, EVWQP 2014) a été adoptée afin d'évaluer l'étendue de la calcite à chaque site. Dans le cadre de cette méthode, un observateur parcourait systématiquement la zone d'échantillonnage et sélectionnait aléatoirement des particules individuelles du substrat afin de les évaluer.

L'échantillonnage se poursuivait jusqu'à ce que 100 particules d'un diamètre supérieur à 2 millimètres (p. ex. des cailloux) aient été évaluées à l'aide de l'indice de calcite.

L'indice de calcite (IC) correspondait à la somme de deux composantes, c'est-à-dire la présence de calcite (pC) et les concrétions de calcite (cC); autrement dit, IC = pC + cC. La composante de la présence de calcite était cotée de manière binaire pour chaque particule (0 = calcite absente; 1 = calcite présente). La valeur de la composante pC à l'échelle d'un site était donc de 0 ou 1 selon la proportion de particules présentant de la calcite. La composante des concrétions de calcite, qui quantifiait la mesure dans laquelle les particules étaient cimentées dans le substrat, était cotée de la façon suivante : 0 (résistance négligeable), 1 (résistance notable, mais particules amovibles) ou 2 (particules immobiles ou complètement concrétées). À l'échelle d'un site, la valeur de la composante cC variait entre 0 et 2 et correspondait à la moyenne des cotes de concrétion attribuées à l'ensemble des particules échantillonnées.

L'indice de calcite était donc exprimé sur une échelle allant de 0 (aucune calcite observée) à 3 (lit du cours d'eau complètement concrété). Dans le cadre du plan de 2014, deux cibles de gestion ont été établies afin de faciliter la détermination et la priorisation des cours d'eau nécessitant une intervention dans les milieux récepteurs comportant un habitat du poisson ou assurant des fonctions écosystémiques connexes. La cible à long terme correspondait à un indice de calcite égal ou inférieur à 0,5 sur un horizon de réalisation de 15 ans. La cible à moyen terme reposait sur une cote de concrétions de calcite (cC) égale ou supérieure à 0,5. Elle servait à repérer les cours d'eau les plus touchés nécessitant des mesures de gestion plus immédiates et son horizon de réalisation était de dix ans.

Dans le cadre du plan de 2014, les variations interannuelles des conditions liées à la calcite devaient être quantifiées sous la forme d'un taux annuel de formation ou de dissolution de la calcite. Ce taux était calculé à partir des variations de l'indice de calcite observées entre deux années de surveillance consécutives.

En complément du plan de 2014, qui établissait le cadre général de surveillance, les objectifs et les principaux indicateurs, des programmes de surveillance sur le terrain ont permis de mettre en œuvre d'autres méthodes afin d'améliorer la surveillance de la calcite et la compréhension de ses effets biologiques. Ces méthodes sont décrites dans les sections suivantes (p. ex. Hocking *et al*. 2020, 2021, 2022, McCabe and Robinson 2020, Zathey *et al*. 2021, Smit and Robinson 2023, 2024, Smit *et al*. 2025).

Aperçu des méthodes de suivi prévues par le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025

Établi en réponse à l'arrêté M232, le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025 (EVWQP 2025) intégrait plusieurs modifications ainsi que les recommandations découlant de l'examen de la calcite réalisé en 2024 (EVWQP 2025). Cet examen était la première réévaluation officielle des objectifs de rendement relatifs à la calcite depuis leur établissement en 2014. Il reposait sur les nouvelles connaissances scientifiques, plus de dix années de données de suivi de la calcite, des études portant sur les effets dans les milieux aquatiques ainsi que des recherches connexes menées dans la vallée de l'Elk.

Les conclusions étaient que l'accumulation de calcite avait augmenté dans l'ensemble du bassin versant depuis 2014 et que l'indice de calcite et la composante de la présence de calcite présentaient des limites quant à leur capacité à caractériser de manière pertinente le risque écologique ou à orienter une gestion efficace (EVWQP 2025). Des incertitudes ont également été relevées quant à l'échelle spatiale et à l'approche statistique utilisées pour évaluer l'atteinte

des objectifs à moyen et long terme relatifs à la calcite (EVWQP 2025). Bien que les effets à l'échelle de la population pour la truite fardée versant de l'ouest et les invertébrés benthiques demeurent incertains, des études accessibles sur les effets biologiques indiquent que des niveaux de concrétion de calcite inférieurs à environ 0,3 sont susceptibles de protéger la vie aquatique (EVWQP 2025). L'examen a également permis de conclure qu'une évaluation de la calcite à l'échelle du tronçon, plutôt qu'à celle du cours d'eau, permettrait de mieux cerner les répercussions sur l'habitat (EVWQP 2025).

Ces conclusions ont éclairé la révision de l'approche de gestion de la calcite dans le plan de 2025. Le plan mis à jour met l'accent sur la formation de concrétions de calcite comme principal indicateur de l'évaluation des répercussions de la calcite, et il établit une cible unique pour la calcite, à savoir une valeur égale ou inférieure à 0,3 visant à protéger la vie aquatique. Cette approche élimine les cibles à moyen et long terme précédentes ainsi que les échéanciers précis pour leur atteinte, au profit d'un cadre de priorisation fondé sur le risque. Lorsque la cible pour les concrétions de calcite est dépassée, l'objectif consiste à limiter toute accumulation supplémentaire et à mettre en œuvre progressivement des mesures de gestion fondées sur le risque et la faisabilité propres au site.

Évaluation des méthodes de suivi de la calcite prévues par le plan de 2025

La présente section évalue les méthodes de suivi de la calcite décrites dans le plan de 2025 afin de déterminer quelles composantes conviennent à l'évaluation des répercussions sur les fonctions écologiques au sein des habitats lotiques et de cerner les lacunes et les limites. Dans l'ensemble, les objectifs, les cibles et les résultats précisés dans le plan de 2025 offrent un cadre approprié pour le suivi de l'accumulation de calcite, en mettant adéquatement l'accent sur la formation de concrétions de calcite en tant que principal mécanisme susceptible d'altérer la structure et les fonctions des habitats aquatiques.

L'examen de la calcite réalisé en 2024 (EVWQP 2025) a donné lieu à une série de recommandations fondées sur des données probantes qui ont été intégrées au plan mis à jour et qui représentent une amélioration substantielle par rapport au cadre de 2014. Les révisions apportées reflètent l'évolution des connaissances scientifiques découlant de plus de dix années de suivi et de travaux de recherche ciblés dans la vallée de l'Elk.

Il importe de reconnaître que les versions antérieure et actuelle du plan visent de nombreux objectifs liés à la qualité de l'eau et aux écosystèmes aquatiques dans l'ensemble de la région désignée, la calcite n'étant que l'une des composantes considérées. Par conséquent, bien que le plan fournisse un cadre adéquat, bon nombre des procédures de terrain détaillées, des plans d'échantillonnage et des méthodes d'analyse élaborés à l'appui de sa mise en œuvre sont décrits dans des rapports techniques de suivi connexes (p. ex. Hocking *et al*. 2020, 2021, 2022, Zathey *et al*. 2021, Smit and Robinson 2023, 2024, Smit *et al*. 2025). L'évaluation des méthodes de suivi de la calcite repose donc à la fois sur le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk et sur les rapports techniques associés, dans la mesure nécessaire à l'atteinte des objectifs du présent examen.

Compte tenu du caractère limité et évolutif de la documentation portant sur la précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques, de l'absence de méthodes de suivi standardisées et de la complexité des interactions entre les facteurs abiotiques et biotiques pouvant favoriser ou inhiber la formation de la calcite et ses effets écologiques, il demeure justifié de réaliser des activités de suivi et un examen périodique des méthodes. Il sera important de poursuivre l'évaluation des approches de suivi de la calcite pour améliorer l'interprétation de sa dynamique, renforcer les liens avec les fonctions écologiques et orienter une gestion adaptative dans la région désignée.

Il importe d'interpréter les méthodes au moyen d'un cadre à plusieurs niveaux. Le suivi de la calcite à grande échelle vise à repérer et à prioriser les tronçons où les niveaux de calcite justifient des études approfondies, plutôt qu'à orienter directement les mesures de gestion. Des évaluations détaillées propres à chaque site, réalisées en dehors du programme de suivi principal, sont nécessaires pour caractériser les conditions aux échelles spatiales appropriées et appuyer la conception ainsi que la mise en œuvre de mesures de gestion ou de restauration.

Composantes adéquates

Adoption de la formation de concrétions de calcite comme indicateur principal

L'un des principaux changements apportés dans le plan de 2025 consiste à abandonner l'indice de calcite composite au profit de l'utilisation de l'indicateur de la formation de concrétions de calcite comme principal paramètre d'évaluation. Ce changement concorde avec les conclusions de l'examen de la calcite réalisé en 2024, selon lesquelles l'indice de calcite et l'indicateur de la présence de calcite n'étaient pas les paramètres écologiques les plus appropriés pour interpréter les répercussions sur la vie aquatique et orienter la gestion de la calcite (EVWQP 2025). Aucun fondement mécaniste ou écologique clair ne justifie la combinaison d'indicateurs aux fins de l'établissement de l'indice de calcite. La présence de calcite et la formation de concrétions de calcite ne sont pas des indicateurs indépendants des répercussions; elles sont plutôt deux manifestations corrélées du processus de précipitation sous-jacent. Par conséquent, la combinaison de ces indicateurs introduit un chevauchement conceptuel et une redondance des variables. Lorsque l'indice de calcite est utilisé comme variable explicative dans des analyses statistiques, il peut également engendrer des problèmes d'interprétation dus à la colinéarité et ainsi masquer les relations entre les conditions liées à la calcite et les réponses biologiques.

La formation de concrétions de calcite cadre davantage avec les séquences des effets plausibles parce qu'elle est directement liée, sur le plan mécaniste, à la dégradation de l'habitat en représentant le degré de cimentation du substrat. Une augmentation de la cimentation peut obstruer les espaces interstitiels, réduire la disponibilité de refuges pour les organismes aquatiques, limiter les échanges dans la zone hyporhéique, nuire aux communautés d'invertébrés benthiques, entraver les déplacements des poissons et la construction de leurs nids, et modifier le transport des sédiments ainsi que la morphologie du chenal. À l'inverse, la présence de calcite reflète principalement la formation d'un dépôt de surface sur les particules du substrat, un phénomène pour lequel les données démontrant des effets négatifs mesurables et des liens mécanistes directs avec la dégradation de l'habitat demeurent limitées. Cela dit, nous recommandons de continuer à utiliser les deux indicateurs dans le cadre du suivi, car la présence de calcite peut signaler une nouvelle calcification, que des concrétions se soient formées ou non.

La formation de concrétions de calcite est donc actuellement l'indicateur le plus approprié et le plus réalisable pour l'évaluation des répercussions de la calcite sur l'habitat dans les systèmes lotiques. À l'heure actuelle, il n'existe aucun autre indicateur ni aucune autre méthode standardisée permettant de quantifier directement la dégradation de l'habitat attribuable à la calcite d'une manière à la fois pertinente sur le plan mécaniste et adaptée à une application courante sur le terrain. L'approche actuelle constitue donc un cadre pragmatique et nécessaire qui est fondé sur les meilleures connaissances scientifiques accessibles. L'élaboration de méthodes plus explicites sur le plan spatial ou fondées sur la zone pourrait améliorer la capacité à quantifier l'ampleur et la répartition des répercussions attribuables à la calcite.

Suivi des effets biologiques

L'un des principaux objectifs du plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk consiste à protéger les écosystèmes aquatiques et à mieux comprendre comment l'accumulation de calcite peut influencer la capacité des systèmes aquatiques à soutenir des communautés diversifiées de poissons et d'autres organismes aquatiques.

En plus des méthodes de suivi de la calcite décrites dans le plan de 2025, des efforts ont été consacrés à la collecte de données sur des paramètres physicochimiques complémentaires et sur les réponses biologiques observées (p. ex. Hocking *et al*. 2020, 2022). Ces études ciblées permettent de mieux comprendre comment l'accumulation de calcite pourrait influer sur la qualité des habitats de fraie et les fonctions écologiques à différentes échelles spatiales, tout en établissant des liens entre les mesures physiques des dépôts de calcite et des résultats biologiquement significatifs.

Les études sur les effets biologiques sont essentielles à l'amélioration des connaissances sur les répercussions de la calcite, puisqu'elles fournissent les données empiriques nécessaires à l'interprétation des indicateurs et des cibles de suivi, à l'évaluation des conséquences à l'échelle de l'habitat et à la réduction des incertitudes entourant les implications écologiques de la précipitation de la calcite au-delà de la seule concrétion du substrat.

Afin de renforcer les inférences, les études sur les effets biologiques devraient être conçues de manière à ce que la formation de concrétions de calcite soit quantifiée à la même échelle spatiale que les observations biologiques. Cette précaution est particulièrement importante compte tenu du caractère localisé et hétérogène de la précipitation de la calcite, les valeurs moyennes calculées à l'échelle d'un tronçon ne représentant pas toujours adéquatement les conditions réellement rencontrées par les organismes. L'échantillonnage biologique devrait donc être explicitement harmonisé avec les mesures de la calcite aux échelles spatiales appropriées afin que les réponses observées puissent être directement associées aux conditions de calcite propres au site.

Les plans d'étude devraient élargir le suivi des effets biologiques à un plus vaste éventail de taxons, de stades du cycle biologique et de groupes fonctionnels que ceux actuellement étudiés afin de mieux détecter les différences de sensibilité et de mieux caractériser les réponses, à l'échelle de la population et à celle de la communauté, aux modifications de l'habitat attribuables à la calcite. Il est aussi essentiel d'intégrer des sites touchés et des sites de référence appropriés pour tenir compte de la variabilité naturelle et d'isoler l'influence de la calcite de celle d'autres facteurs biotiques et abiotiques, tels que la température, le débit, la composition du substrat et la structure de l'habitat. Dans la mesure du possible, des plans d'échantillonnage appariés ou stratifiés permettant de couvrir des gradients de conditions de calcite dans des habitats comparables permettront d'améliorer la détection et l'interprétation des réponses biologiques.

La prise en compte de covariables biotiques et abiotiques pertinentes renforcera également les inférences en permettant de mieux distinguer les effets attribuables à la calcite des autres sources de variabilité écologique. Ces approches accroîtront la puissance statistique, réduiront les facteurs de confusion et permettront une évaluation plus robuste des effets liés à la calcite et des seuils associés, tout en renforçant la confiance dans l'interprétation des réponses écologiques et des cibles de gestion.

Lacunes et limites

Utilisation de la formation de concrétions de calcite comme indicateur

La formation de concrétions de calcite est un indicateur pertinent et défendable sur le plan mécaniste pour l'évaluation de la modification physique de l'habitat attribuable aux dépôts de calcite. Elle est généralement compatible avec les approches utilisées pour l'évaluation d'habitats fluviaux. Toutefois, bien qu'il n'existe aucune autre méthode standardisée pour évaluer la formation de concrétions de calcite dans les systèmes lotiques de manière aussi pratique et économique dans le cadre d'activités de suivi de routine sur le terrain, certaines limites importantes subsistent. La formation de concrétions de calcite est intrinsèquement une mesure semi-quantitative fondée sur l'observation. Elle est donc sujette à une variabilité et à de potentiels biais d'observation lors des évaluations sur le terrain. Bien que des protocoles standardisés et une formation pour les observateurs aient été mis en œuvre afin de réduire cette variabilité (p. ex. Smit and Robinson 2024), la subjectivité associée à l'évaluation du degré de cimentation ne peut être complètement éliminée. Cette nature semi-qualitative limite la puissance statistique nécessaire pour déceler des tendances subtiles, particulièrement dans les tronçons caractérisés par de faibles niveaux de concrétion, où de petites différences peuvent masquer ou exagérer les changements apparents au fil du temps.

De plus, les concrétions de calcite sont l'expression physique de l'accumulation de calcite, mais elles ne permettent pas, à elles seules, de rendre compte de l'ensemble des processus chimiques et biologiques qui influencent les réponses écologiques. L'interprétation des valeurs liées aux concrétions de calcite de façon isolée demeure donc limitée, et elle exige l'établissement de liens plus explicites entre les indicateurs physiques et les résultats biologiques. C'est pourquoi l'évaluation des répercussions associées à la calcite devrait comprendre une évaluation parallèle des conditions écologiques qui accompagnent les concrétions de calcite. Les indicateurs relatifs à la qualité de l'habitat et aux caractéristiques de l'écosystème, notamment ceux fondés sur les principes de l'état de bon fonctionnement, sont particulièrement utiles pour déterminer si les changements physiques attribuables aux dépôts de calcite se traduisent par des effets significatifs sur les communautés de poissons et d'autres organismes aquatiques. Le fait de se fier uniquement aux concrétions de calcite comporte le risque de ne pas saisir l'intégralité de la réponse écologique, particulièrement lorsque des processus biologiques (p. ex. la dynamique du réseau trophique ou la sélection de l'habitat) modulent ou amplifient les effets des modifications physiques de l'habitat. Il faut donc intégrer des indicateurs physiques et biologiques pour aboutir à une interprétation robuste des seuils associés à la calcite et de l'état de santé général des cours d'eau.

Bien que la formation de concrétions de calcite soit retenue comme indicateur principal pour l'évaluation des modifications physiques de l'habitat, il demeure utile de continuer à recueillir des données sur la présence de calcite à titre d'indicateur complémentaire. La présence de calcite peut servir de signal précoce de la formation de concrétions dans les cours d'eau et fournir des renseignements contextuels sur les tendances de la précipitation et les conditions environnementales susceptibles de précéder la cimentation du substrat. La pertinence biologique directe de la présence de calcite en ce qui concerne les effets néfastes est plus limitée que celle de la formation de concrétions de calcite, mais cet indicateur demeure utile pour caractériser l'étendue spatiale de la présence de calcite à l'échelle du paysage et pour interpréter les conditions géochimiques générales qui influencent les habitats aquatiques.

Cible relative à la calcite

Aux termes du plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025, la cible pour la formation de concrétions de calcite (cC) est une valeur égale ou inférieure à 0,3 de façon à assurer, de façon générale, la protection de la vie aquatique à l'échelle du tronçon. Ce seuil a été établi

principalement sur la base d'études portant sur les effets biologiques, lesquelles constituent les meilleures données empiriques actuellement accessibles, même si elles demeurent relativement limitées, pour étayer l'établissement d'une cible (Barret *et al*. 2016, Hocking *et al*. 2022, EVWQP 2025).

Barrett et ses collaborateurs (2016) ont observé des changements dans la composition de la communauté d'invertébrés benthiques sur un gradient de calcite, les réponses biologiques se produisant lorsque la valeur de cC se chiffrait approximativement entre 0,1 à 0,3. Ces résultats appuient l'utilisation de cC ≤ 0,3 comme valeur de référence de précaution pour la protection de l'habitat. Toutefois, cette étude est fondée sur l'observation et limitée à un site précis, soumise à des variables de la qualité de l'eau pouvant créer de la confusion et axée principalement sur les réactions d'invertébrés benthiques. Ainsi, elle fournit des données importantes sur la sensibilité biologique à la formation de concrétions de calcite, mais ne permet pas de déterminer clairement les mécanismes de causalité, les effets à l'échelle du réseau trophique ni les réponses observées chez d'autres taxons, dans différents types de cours d'eau, au fil des saisons ou dans divers contextes hydrologiques.

Dans le cas de la truite fardée versant de l'ouest, les travaux de Hocking et ses collaborateurs (2022) démontrent une association négative entre la formation de concrétions de calcite et la probabilité de présence de nids. Les cours d'eau dans lesquels des nids avaient été observés présentaient des valeurs moyennes de cC plus faibles (environ 0,08) que les cours d'eau dans lesquels aucun nid n'avait été observé (environ 0,3; Hocking *et al*. 2022). Toutefois, les probabilités modélisées de présence de nids selon différentes tranches de valeurs révèlent une incertitude importante dans cette relation, la probabilité prédite la plus élevée (environ 20 %) étant observée dans la plage de valeurs de cC comprises entre 0,25 et 0,5 (Hocking *et al*. 2022). Ces résultats indiquent que, bien que les cours d'eau contenant des nids présentent généralement des niveaux moyens de concrétions faibles, des nids de truite fardée versant de l'ouest sont observés dans une vaste gamme de valeurs liées aux concrétions de calcite, notamment à des niveaux modérés. Cette situation reflète à la fois l'incertitude entourant les effets à l'échelle de la population et la complexité inhérente à la sélection des habitats de fraie. De nombreux facteurs en interaction, notamment le comportement de retour au cours d'eau natal, la taille et la composition du substrat, la vitesse d'écoulement, la température de l'eau, la morphologie et la dimension du chenal, la disponibilité d'abris et l'état des berges, influencent vraisemblablement la sélection des sites de fraie et compliquent l'interprétation des relations simples entre la formation de concrétions de calcite et la présence de nids. De plus, certaines limites liées aux données accessibles, notamment l'absence d'évaluation directe de la qualité des nids ou de la survie du stade de l'œuf au stade de l'alevin, restreignent davantage les inférences relatives aux conséquences démographiques.

Les travaux de Barrett et ses collaborateurs (2016) et de Hocking et ses collaborateurs (2022) fournissent des éléments de preuve biologiques importants, mais leur capacité à définir un seuil d'effet précis demeure limitée. La cible de cC ≤ 0,3 repose donc sur une base empirique relativement restreinte. Les réponses biologiques à la formation de concrétions de calcite varient vraisemblablement selon le taxon, le stade du cycle biologique et le contexte environnemental. Or, aucune de ces études n'a été conçue de manière à tenir compte de cette variabilité à différentes échelles spatiales et temporelles. Par conséquent, aucune de ces études ne permet, à elle seule, d'établir un seuil définitif à partir duquel la formation de concrétions de calcite entraîne des effets à l'échelle de la population. Ces limites soulignent la nécessité de reproduire les études pour un plus grand nombre de taxons, de cours d'eau, de contextes hydrologiques, de types d'habitats, de saisons et de paramètres biologiques ultimes. Des travaux supplémentaires établissant des liens entre la formation de concrétions de calcite et la qualité de l'habitat, la productivité benthique, la dynamique du réseau trophique, le succès

de la fraie, la survie du stade de l'œuf et au stade de l'alevin ainsi que les réponses à l'échelle de la population permettraient de renforcer l'interprétation de cette cible. De plus, Barrett et ses collaborateurs (2016) soulignent la possibilité que certaines variables, notamment celles liées à la qualité de l'eau, agissent comme facteurs de confusion, ce qui met en évidence la nécessité de recourir à des plans expérimentaux adéquatement contrôlés lorsque l'établissement de liens mécanistes certains est recherché.

Dans l'ensemble, la cible de $cC \leq 0,3$ est raisonnable et scientifiquement défendable sur la base des meilleures données accessibles. Toutefois, des incertitudes importantes subsistent quant aux réponses au niveau de la population à des seuils de concrétions de calcite, et le degré de protection offert par cette cible variera probablement dans le temps et dans l'espace selon les conditions biotiques et abiotiques propres à chaque cours d'eau. Par conséquent, cette cible devrait être interprétée comme une valeur de référence de précaution fondée sur l'habitat plutôt que comme un seuil définitif d'effet à l'échelle de la population. Cette situation souligne la nécessité de poursuivre les recherches, d'assurer un suivi complémentaire des habitats et des réponses biologiques dans divers contextes environnementaux et de continuer à ajuster la cible de façon adaptative conformément au cadre établi dans le plan.

Considérations spatiales

Les systèmes lotiques sont intrinsèquement dynamiques; leurs conditions hydrologiques et géomorphologiques varient dans le temps et dans l'espace. Les variations du débit, de la morphologie du chenal et du régime d'écoulement ainsi que l'interaction des facteurs biotiques et abiotiques peuvent causer une modification rapide de la composition chimique d'un cours d'eau, le faisant passer de conditions favorables à la précipitation de la calcite à des conditions qui l'empêchent, parfois sur de courtes périodes. Par conséquent, l'échelle spatiale à laquelle les données de suivi de la calcite sont résumées, analysées et interprétées constitue un facteur déterminant dans l'évaluation des profils hétérogènes de dépôt de calcite dans les milieux lotiques.

Il est essentiel d'effectuer des mesures à petite échelle, au niveau du site ou du mésohabitat, pour déceler les effets localisés, caractériser l'hétérogénéité spatiale et comprendre les mécanismes qui régissent la précipitation de la calcite et qui peuvent ne pas être apparents lorsque les données sont regroupées à une échelle plus grossière. En calculant une valeur moyenne des concrétions pour l'ensemble des sites d'un tronçon, il existe un risque de sous-estimer l'importance de zones localisées fortement concrétionnées et d'estomper des signaux écologiquement pertinents, en particulier lorsque les sites couvrent des mésohabitats contrastés présentant des régimes de précipitation distincts (p. ex. fosses, plats, radiers, cascades ou chutes). Ce regroupement réduit la sensibilité à la détection de changements à petite échelle ou émergents qui peuvent être importants pour les conditions locales de l'habitat et les réponses biologiques.

Une autre considération concerne la représentation spatiale de l'échantillonnage à l'intérieur des sites. La méthode de granulométrie de Wolman modifiée fournit un moyen pratique et reproductible de quantifier la formation de concrétions de calcite; toutefois, l'approche standard (p. ex. 100 particules) ne définit pas explicitement la superficie à l'intérieur de laquelle les échantillons sont recueillis. En l'absence d'une mesure associée à la zone échantillonnée (p. ex. largeur du chenal, longueur du site échantillonné ou polygone défini), l'interprétation des résultats se limite à des estimations relatives plutôt qu'à une caractérisation spatiale explicite de l'étendue de la calcite. L'ajout d'un simple indicateur fondé sur la zone aux données provenant de la méthode de granulométrie améliorerait la capacité à caractériser l'étendue et la répartition de la calcite au sein d'un même site et entre différents sites, tout en favorisant des comparaisons plus robustes dans le temps et dans l'espace.

À une échelle plus grande, l'interprétation des données de suivi dépend de la validité de la délimitation des tronçons. Le cadre actuel repose sur l'hypothèse selon laquelle les tronçons représentent des sections relativement homogènes du cours d'eau sur le plan de la morphologie du chenal, du couvert riverain et des caractéristiques d'écoulement et qu'ils présentent donc une faible variabilité des dépôts de calcite à l'intérieur d'un même tronçon. Selon cette hypothèse, il est approprié d'effectuer un échantillonnage systématique à des emplacements stratifiés (p. ex. correspondant à environ 25 %, 50 % et 75 % de la longueur du tronçon). Les analyses existantes de la variabilité à l'intérieur des tronçons (Smit *et al*. 2025) indiquent que le plan d'échantillonnage standard axé sur trois sites par tronçon offre un compromis raisonnable entre la représentativité et l'efficacité dans des conditions typiques, mais que son rendement dépend de la faible variabilité présumée à l'intérieur des tronçons. Toutefois, lorsque les conditions géomorphologiques ou hydrologiques varient fortement à l'intérieur d'un même tronçon, cette hypothèse peut être invalide et les moyennes à l'échelle du tronçon peuvent masquer des profils spatiaux importants. Dans de tels cas, il peut s'avérer nécessaire d'affiner la délimitation des tronçons, d'augmenter la densité d'échantillonnage à l'intérieur de ces derniers ou de mettre l'accent sur l'échantillonnage à l'échelle du mésohabitat pour faire en sorte que les unités d'échantillonnage soient comparables et pertinentes sur le plan écologique.

L'interprétation des observations réalisées à petite échelle est renforcée lorsque ces dernières sont explicitement associées à des échelles spatiales plus larges, notamment celles du tronçon, du cours d'eau et du bassin versant. Il faut réaliser des analyses à ces différentes échelles pour évaluer les tendances cumulatives, repérer les zones à risque élevé et mesurer les progrès accomplis vers l'atteinte des objectifs de gestion. Dans l'ensemble, le suivi est réalisé à une résolution spatiale appropriée pour la documentation de tendances liées aux dépôts de calcite et à la concrétion du substrat qui sont pertinentes pour le poisson et son habitat. Les méthodes fondamentales utilisées sur le terrain ne nécessitent pas de modification, mais l'échelle spatiale à laquelle les données de suivi sont résumées, analysées et interprétées demeure essentielle à la formulation de conclusions robustes sur les plans de l'écologie et de la gestion.

La cohérence à long terme des lieux d'échantillonnage et des types de mésohabitats est une autre considération spatiale importante pour une détection fiable des tendances. L'échantillonnage répété des mêmes sites et des mêmes types de mésohabitats à l'intérieur de tronçons clairement délimités réduit le bruit attribuable à l'hétérogénéité spatiale et accroît la confiance selon laquelle les changements observés reflètent de véritables tendances temporelles plutôt que des différences liées aux lieux d'échantillonnage. Le programme de suivi de la calcite a largement tenu compte de cette exigence grâce à l'établissement de sites d'échantillonnage permanents à l'intérieur des tronçons et à la documentation détaillée des types de mésohabitats s'y trouvant (p. ex. Smit and Robinson 2024).

Une documentation spatiale et une cartographie plus explicites favoriseraient la transparence et l'interprétation des résultats du suivi de la calcite. Il faudrait notamment délimiter clairement les tronçons, établir des sites d'échantillonnage à l'intérieur de ceux-ci, classifier les mésohabitats et consigner la morphologie de la calcite (p. ex. algues calcifiées, stratifications calcaires, tuf/mousse calcifiée, barrage de tuf, croûtes de calcite et tuf sur des insectes). L'intégration de ces données et d'autres variables environnementales pertinentes dans des couches de cartographie spatiale améliorerait la capacité à définir les mécanismes en cause, à cerner les zones à risque élevé et à distinguer les endroits où la calcite demeure absente malgré des conditions physiques et géomorphologiques semblables. Cette approche améliorerait l'interprétation de la dynamique de la calcite et favoriserait une évaluation plus efficace des tendances à l'échelle du paysage.

Considérations statistiques

L'approche décrite dans le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2014 pour le suivi des variations interannuelles des niveaux de calcite au moyen du taux annuel de formation ou de dissolution à l'échelle d'un tronçon ne se prête pas bien à la détection de tendances fiables au fil du temps. Cette méthode peut confondre les véritables changements temporels avec la variabilité d'échantillonnage découlant des différences entre les mésohabitats échantillonnés, des effets liés à l'observateur et des conditions hydrologiques variables, sans quantifier explicitement l'incertitude ni fournir d'intervalles de confiance pour les tendances générales à l'échelle du tronçon, du cours d'eau ou du bassin versant. De petites différences interannuelles peuvent donc être interprétées à tort comme des changements importants lorsqu'elles se situent dans la plage d'incertitude attendue pour l'échantillonnage et l'observation qui est inhérente aux systèmes lotiques dynamiques, ce qui limite l'utilité de cette approche pour l'évaluation des progrès à long terme vers l'atteinte des cibles relatives à la calcite.

La composante portant sur l'examen de la calcite dans le plan de 2025 comprend une recommandation visant l'utilisation d'une moyenne mobile sur trois ans de la formation de concrétions de calcite par rapport à la cible comme paramètre d'évaluation. Il s'agit d'une nette amélioration par rapport à l'approche prévue par le plan précédent, car elle réduit la sensibilité aux fluctuations à court terme découlant de la variabilité interannuelle et de la variabilité liée à l'observateur qui est inhérente à un indicateur subjectif et semi-quantitatif tel que la formation de concrétions de calcite. En atténuant le bruit et les valeurs aberrantes, cette approche fournit une représentation plus stable des conditions générales à l'échelle du tronçon. Toutefois, l'effet de lissage entraîne une limite importante : un décalage temporel de la réactivité. Il est donc possible qu'une augmentation ou une diminution persistante des concrétions de calcite ne soit pas entièrement reflétée dans la moyenne mobile sur trois ans avant plusieurs années après que le changement sous-jacent se soit produit. De plus, cette approche ne quantifie pas explicitement l'incertitude statistique et ne fournit pas d'estimation de l'ampleur ou de la signification d'une tendance observée. Par conséquent, la moyenne mobile sur trois ans devrait être considérée comme un outil complémentaire de présentation des résultats plutôt que comme une méthode d'analyse principale. Des approches statistiques tenant explicitement compte de la variabilité entre les cailloux, les sites, les tronçons et les années fourniraient une base plus robuste pour l'évaluation des tendances temporelles, la quantification de l'incertitude et la mesure des progrès vers l'atteinte des cibles relatives à la calcite, d'une manière qui appuie plus directement la gestion adaptative.

Il importe de signaler que, même si le permis 107517 ne prescrit aucune méthode particulière pour l'évaluation des conditions associées à la calcite, le programme régional de suivi de la calcite a appliqué un ensemble d'analyses statistiques appropriées afin d'évaluer les tendances à l'échelle du tronçon, la variabilité interannuelle ainsi que les différences entre les tronçons exposés aux activités minières et les tronçons de référence (p. ex. Smit and Robinson 2024, Smit *et al*. 2025). Les méthodes principales utilisées comprenaient l'analyse non paramétrique des tendances de Mann-Kendall, l'analyse de la variance à un facteur accompagnée du test a posteriori de Tukey (HSD), l'analyse de la covariance et des régressions linéaires distinctes.

Le test de Mann-Kendall convient bien aux séries chronologiques de données environnementales, car il est robuste face à des distributions non normales et à des valeurs aberrantes. Cette analyse produit le coefficient de corrélation des rangs de Kendall (τ), une statistique fondée sur les rangs décrivant la direction et la force relative d'une relation monotone avec le temps, ainsi qu'une valeur *p* correspondante permettant d'évaluer la signification statistique. Toutefois, le test de Mann-Kendall ne fournit ni estimation de l'ampleur (taux) du changement ni intervalle de confiance associé à la pente d'une tendance. L'analyse de la variance à un facteur a été appliquée de façon appropriée de manière à vérifier s'il existait des

différences entre les valeurs moyennes des indicateurs de calcite d'une année à l'autre à l'intérieur des tronçons, ce qui est utile pour détecter la variabilité interannuelle. Néanmoins, les hypothèses paramétriques sous-jacentes à l'analyse de la variance (p. ex. normalité et homogénéité des variances) peuvent n'être que partiellement respectées dans le cas d'indicateurs délimités et semi-quantitatifs comme la formation de concrétions de calcite, ce qui peut influencer les inférences obtenues. Dans de tels cas, des solutions de rechange non paramétriques comme le test de Kruskal-Wallis seraient généralement plus robustes.

Dans l'ensemble, les méthodes statistiques appliquées sont appropriées et scientifiquement défendables pour la détection des tendances et des profils temporels ainsi que pour la comparaison entre les conditions observées dans les sites exposés et celles observées dans les sites de référence. Toutefois, le cadre analytique actuel possède une capacité limitée à quantifier l'incertitude, à estimer l'ampleur des tendances, à propager la variance dans l'ensemble de la structure hiérarchique d'échantillonnage ou à produire des intervalles de confiance ou de crédibilité propres aux tronçons pour les tendances à long terme. En particulier, la pratique consistant à calculer la moyenne des valeurs granulométriques individuelles afin d'obtenir une valeur à l'échelle d'un site, puis à calculer la moyenne des valeurs propres aux sites afin de produire une valeur à l'échelle du tronçon, élimine l'information relative à la variance présente à chacun des niveaux de la hiérarchie d'échantillonnage. Cette approche produit des indicateurs sommaires stables, mais elle élimine l'information relative à la variabilité à l'intérieur des sites et des tronçons, laquelle est essentielle à l'estimation rigoureuse de l'incertitude et à l'analyse robuste des tendances. Il en résulte une capacité réduite à distinguer les véritables changements temporels de la variabilité de l'échantillonnage ou de l'erreur d'observation, particulièrement dans les systèmes caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale. Des approches statistiques plus avancées offrent la possibilité de conserver et de modéliser explicitement la variabilité observée à différentes échelles spatiales et temporelles imbriquées, ce qui permet une estimation plus informative des tendances et de l'incertitude qui leur est associée.

Par exemple, les approches statistiques bayésiennes fournissent un cadre robuste pour l'analyse des données de suivi de la calcite dans les systèmes lotiques caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale et une variabilité temporelle importante. Ces méthodes conviennent particulièrement aux ensembles de données caractérisés par un échantillonnage limité ou déséquilibré, des variables de réponse bornées et non normales, une hétéroscédasticité et de multiples sources d'incertitude, notamment des erreurs d'observation, une hétérogénéité spatiale, une variabilité temporelle et une autocorrélation. Les modèles bayésiens hiérarchiques peuvent représenter explicitement une structure spatiale imbriquée (p. ex. des sites à l'intérieur de tronçons eux-mêmes situés dans des cours d'eau ou des bassins versants), ce qui permet d'estimer les tendances spatiales et temporelles tout en tenant adéquatement compte de la variabilité observée aux différentes échelles. En produisant des distributions de probabilité a posteriori pour les paramètres d'intérêt, les analyses bayésiennes permettent une évaluation probabiliste des changements et des dépassements de seuils. Elles fournissent également des intervalles de crédibilité qui permettent de quantifier directement l'incertitude et de distinguer plus efficacement les tendances significatives de la variabilité de l'échantillonnage et des fluctuations environnementales à court terme (Feelders and van der Gaag 2012, Gelman *et al*. 2013, van de Schoot 2015, McNiesh 2016, Smid *et al*. 2020). Les méthodes bayésiennes n'exigent pas de nombre précis d'années de données, mais plutôt une quantité suffisante d'information permettant d'estimer avec une précision utile les paramètres d'intérêt. Ainsi, même si ces approches peuvent être appliquées à des séries chronologiques relativement courtes ou déséquilibrées, le degré de certitude associé aux tendances déduites et aux dépassements de seuils dépendra du nombre de répétitions temporelles, de l'importance du signal par rapport à la variabilité de fond et de la complexité de la structure du modèle. Par

conséquent, l'examen d'approches analytiques bayésiennes pourrait offrir des possibilités supplémentaires de renforcer les analyses statistiques.

En complément des approches statistiques, la modélisation hydrogéochimique fournit des données fondées sur les processus qui contribuent à la compréhension de la précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques influencés par des activités minières. Lorsqu'elle est intégrée au contexte hydrologique, la modélisation hydrogéochimique peut contribuer à réduire des incertitudes clés concernant les endroits où la précipitation de la calcite se produit, les raisons de son occurrence et les conditions dans lesquelles elle survient. Ces modèles intègrent des données sur la composition chimique de l'eau (p. ex. calcium, alcalinité, carbone inorganique dissous, pH, température et principaux ions) de manière à estimer la spéciation des carbonates et l'état de saturation, ce qui permet d'évaluer le potentiel thermodynamique de précipitation de la calcite dans différentes conditions environnementales.

Toutefois, la modélisation hydrogéochimique ne devrait pas remplacer les observations de terrain ni les évaluations biologiques. Les résultats produits par ces modèles sont limités par la qualité des données accessibles et les hypothèses retenues. De plus, des incertitudes peuvent découler d'une couverture spatiale limitée, d'une variabilité temporelle (p. ex. du pH et des échanges de CO_2), d'une représentation incomplète des chemins d'écoulement des eaux souterraines et de contrôles cinétiques non quantifiés (p. ex. seuils de nucléation, inhibiteurs ou influences biologiques). Par conséquent, la modélisation hydrogéochimique devrait être considérée comme un outil complémentaire servant à l'élaboration d'hypothèses et à l'interprétation des données de suivi, plutôt que comme une méthode prédictive ou indépendante. Sa valeur réside dans sa capacité à déterminer les conditions dans lesquelles la précipitation de la calcite est possible, mais elle ne permet pas de quantifier directement la présence de calcite, son étendue ou ses répercussions écologiques.

Suivi de l'efficacité

Dans l'ensemble des programmes de conservation et d'atténuation des effets environnementaux, le suivi de l'efficacité est largement reconnu comme une lacune persistante en matière de connaissances qui limite la compréhension de la mesure dans laquelle les mesures de gestion atteignent les résultats escomptés. Des mesures d'atténuation sont souvent mises en œuvre en vue de remédier aux facteurs de stress recensés, mais le suivi limité par la suite restreint souvent la capacité d'évaluer leur rendement, de tirer des leçons des résultats obtenus et de distinguer les interventions efficaces de celles qui sont inefficaces ou fortement tributaires du contexte. Cette restriction réduit les possibilités de reproduire les approches d'atténuation fructueuses et d'améliorer ou d'adapter les mesures lorsque les résultats ne répondent pas aux attentes.

Dans le contexte de la précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques influencés par des activités minières, le suivi de l'efficacité est particulièrement important compte tenu de la complexité des processus physiques, chimiques et biologiques en interaction. Des mesures d'atténuation, notamment les traitements chimiques (p. ex. l'utilisation de solutions antitartre) ainsi que la modification physique ou l'enlèvement des substrats cimentés, peuvent entraîner des changements immédiats dans la composition chimique de l'eau, l'hydraulique du chenal, la mobilité des sédiments et les chemins d'écoulement; elles visent à ramener les systèmes vers des conditions plus naturelles ou moins perturbées. Toutefois, les améliorations de l'utilisation biologique de l'habitat et des fonctions écosystémiques peuvent accuser un retard par rapport à ces changements physiques, le temps que les habitats se stabilisent et que les communautés biologiques s'adaptent.

En l'absence d'un suivi systématique de l'efficacité couvrant des échelles spatiales et temporelles appropriées, il demeure difficile de déterminer si les réponses biologiques

observées reflètent un véritable rétablissement, une adaptation différée ou des conditions transitoires à la suite des interventions. Il est donc essentiel de reconnaître et de prendre explicitement en compte les décalages temporels potentiels entre les modifications physiques de l'habitat et les réponses biologiques afin d'évaluer le succès des mesures d'atténuation, d'orienter la gestion adaptative et de tirer des conclusions éclairées quant à l'efficacité des mesures mises en œuvre.

Objectif 3 : Évaluation pratique sur le terrain

L'évaluation de la robustesse des données probantes sur les séquences des effets (figure 2 et interprétation connexe) a mis en évidence trois domaines bien documentés concernant les effets de la calcite sur les salmonidés : les effets sur le passage du poisson, sur le recrutement – particulièrement la fraie – et sur les communautés de macroinvertébrés. En l'absence d'études supplémentaires ou de nouvelles données sur les milieux touchés par la calcite, il est impossible de quantifier l'ampleur de ces effets sur les populations de poissons. Toutefois, il y a assez de données probantes pour justifier l'adoption d'une approche de précaution en prévenant la poursuite de la calcification et en atténuant la calcification existante.

Une évaluation plus détaillée des répercussions locales sur l'habitat du poisson pourrait s'appuyer sur les approches d'évaluation de terrain déjà utilisées dans les processus réglementaires et d'autorisation au Canada, notamment les protocoles d'évaluation de l'habitat du poisson et les principes de l'état de bon fonctionnement. L'adaptation de telles approches à l'évaluation des répercussions de la calcite dépasse le cadre de la présente réponse des Sciences, mais il s'agit d'une solution prometteuse pour la caractérisation des effets, particulièrement si l'étendue de la calcification continue de croître et si la concrétion aux sites déjà touchés se poursuit. Les approches fondées sur les principes de l'état de bon fonctionnement sont généralement utilisées dans les évaluations des milieux humides et riverains, et elles comportent à la fois des composantes géomorphologiques et biologiques (p. ex. Swanson *et al*. 2017). Des approches comparables sont notamment utilisées lors des évaluations riveraines réalisées dans le cadre du Forest and Range Evaluation Program (FREP), en vertu de la *Forest and Range Practices Act* (FRPA) de la Colombie-Britannique (voir Tripp *et al*. 2025). Une évaluation fondée sur les principes de l'état de bon fonctionnement vise notamment à décrire ce qui suit :

- la **dissipation de l'énergie d'un cours d'eau** pendant les périodes de hautes eaux (résistance à l'érosion excessive);
- la filtration des **sédiments** et leur contribution au développement de plaines inondables;
- la **rétention des eaux de crue** et la recharge des eaux souterraines;
- le **maintien des caractéristiques du chenal** et le soutien des éléments biologiques, notamment les poissons et les réseaux trophiques auxquels ils appartiennent.

Les évaluations qualitatives fondées sur les principes de l'état de bon fonctionnement reposent sur les connaissances interdisciplinaires et le jugement professionnel d'experts issus des domaines biophysiques concernés. Dans le présent contexte, au moins quatre domaines d'expertise devraient être pris en compte : les poissons (particulièrement les espèces ou populations d'intérêt, donc la truite fardée versant de l'ouest ou l'omble à tête plate); les formes de calcite observées; les tendances concernant la concrétion à l'étude; les principes géomorphologiques du paysage en question. De plus, l'interprétation des processus qui influencent la précipitation de la calcite et sa répartition spatiale nécessite une expertise en hydrogéologie, notamment en ce qui concerne les systèmes d'écoulement des eaux souterraines et la géochimie réactive. Les petits cours d'eau d'amont présentent des

caractéristiques géomorphologiques différentes et peuvent réagir différemment à la dynamique de la précipitation de la calcite que les tronçons du cours principal. L'élaboration de méthodes d'évaluation sur le terrain devrait commencer par des opérations de terrain limitées visant à comparer ces approches à des cadres déjà bien établis, comme ceux qui ont été élaborés pour les systèmes riverains. En définitive, les protocoles devraient être conçus de manière à fournir une évaluation des répercussions, du risque de détérioration des fonctions et des solutions possibles de remise en état.

Peu importe la façon dont ils seront élaborés, ces protocoles devront tenir compte des sites prioritaires sélectionnés. Les considérations présentées ci-dessous aideront à classer les sites par ordre de priorité selon le risque que la calcification représente pour le poisson et les éléments importants associés à son habitat.

Dans quelle mesure les formations de calcite ont-elles été cartographiées et caractérisées?

L'établissement de l'ordre de priorité des sites à évaluer exige une connaissance approfondie de chaque site et de son degré de calcification. La gravité des répercussions comprend non seulement le degré de concrétion, mais aussi l'étendue latérale de la calcification dans le chenal et, lorsqu'il y a lieu, son étendue longitudinale dans un tronçon ou un segment de mésohabitat. Les sites présentant des concrétions avancées ou sur une grande étendue spatiale devraient être priorisés aux fins de l'évaluation.

Une cartographie et une caractérisation adéquates peuvent notamment reposer sur l'utilisation d'unités de découpage appropriées. Par exemple, la caractérisation d'un tronçon comprenant à la fois un plat situé en amont d'une cascade et la cascade elle-même pourrait entraîner des erreurs d'interprétation. Les cascades présentent un risque considérablement accru de formation de concrétions et devraient toujours être considérées comme des unités d'échantillonnage distinctes. Les plats, les radiers, les fosses et les autres types de mésohabitats devraient également être considérés séparément les uns des autres. D'autres méthodes de délimitation des tronçons pourraient ne pas correspondre à l'utilisation qu'en font les poissons au cours de leur cycle biologique, ce qui pourrait créer un décalage entre la caractérisation de la calcite et l'évaluation de l'état fonctionnel de l'habitat.

Dans quelle mesure les tendances associées à la calcite sont-elles comprises?

La calcite peut avoir des répercussions négatives sur les poissons dans tous les types de mésohabitats fluviaux, et les niveaux de calcification et de concrétion peuvent augmenter au fil du temps dans tout site touché. Les sites où la calcification augmente rapidement devraient être priorisés pour l'évaluation des fonctions écologiques, particulièrement lorsque les valeurs de concrétion continuent d'augmenter et approchent certains des seuils jugés importants pour la protection de la vie aquatique.

Dans quelle mesure les populations de poissons sont-elles comprises?

Dans la mesure du possible, il faudrait mettre à profit les connaissances existantes et les données accessibles sur les populations ainsi que sur l'utilisation de l'habitat selon l'espèce et le stade du cycle biologique. Il est aussi possible d'y parvenir grâce à des activités continues de cartographie et à l'utilisation de segments de mésohabitat comme unités d'organisation. Les espèces de poissons en péril ainsi que les stades du cycle biologique présentant une vulnérabilité accrue devraient être priorisés aux fins de l'évaluation. La superposition des priorités relatives à la calcite et à la conservation des poissons peut permettre de repérer les sites où la calcite représente un risque élevé pour des fonctions de l'habitat. Les cours d'eau dépourvus de poissons peuvent également contribuer à la productivité et à la disponibilité de

nourriture en aval et, par conséquent, influencer indirectement les populations de poissons. Lorsqu'ils sont associés à des aires de répartition connues de poissons, particulièrement d'espèces en péril, ils devraient également être considérés comme prioritaires.

Recommandations en matière de recherche

Prévision de la précipitation de la calcite

Malgré une bonne compréhension des conditions fondamentales nécessaires à la précipitation de la calcite, la documentation scientifique ne décrit aucun exemple de tentative de prévision des tendances de précipitation à l'intérieur d'un cours d'eau ou d'un bassin versant. Des échanges informels avec des praticiens de terrain laissent entendre que les premières tentatives à cet égard ont connu peu ou pas de succès. Il serait néanmoins très utile de pouvoir mieux comprendre quelles caractéristiques du paysage favorisent la précipitation et des concrétions avancées. L'importance de cette capacité est illustrée par l'étendue du risque de formation de calcite associé aux contextes géologiques calcaires de la Cordillère de l'Ouest et de la Colombie-Britannique. Malgré la reconnaissance croissante des répercussions de la calcite sur le poisson et son habitat depuis environ 2010, ainsi que l'intégration d'exigences de suivi de la calcite dans certains permis d'exploitation minière à ciel ouvert en Colombie-Britannique, la présence de calcite continue d'être signalée dans d'autres secteurs miniers. Par exemple, la présence de calcite a été signalée lors d'une inspection de routine dans la région de Tumbler Ridge, en Colombie-Britannique, en 2023, ce qui a mené à l'ajout, en 2024, d'une exigence de suivi de la calcite dans le cadre du permis provincial 17679. Cet exemple montre que des outils de prévision applicables à des échelles spatiales fines et grossières pourraient aider à prévoir le risque de formation de calcite et ses répercussions potentielles sur les poissons, particulièrement lorsque l'exploitation minière à ciel ouvert coïncide avec la présence de substrats rocheux calcaires.

L'intégration de données sur la composition chimique de l'eau (p. ex. Ca^{2+}, CO_3^{2-}, pH et température) aux calculs de l'indice de saturation des carbonates utilisés pour prévoir le potentiel de précipitation aiderait à mieux comprendre les mécanismes qui régissent la précipitation de la calcite dans des conditions abiotiques et biotiques dynamiques. De plus, l'intégration de modèles climatiques permettant d'évaluer les effets des modifications du régime thermique et du régime hydrologique pourrait contribuer à orienter les décisions de gestion adaptative.

Effets biologiques et indicateurs physicochimiques

La précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques souligne la nécessité de poursuivre un suivi ciblé des effets biologiques (p. ex. assemblages d'invertébrés benthiques, relevés de la fraie, état des nids et survie des œufs) en complément essentiel aux évaluations physiques de la formation de concrétions de calcite. Les données sur les réponses biologiques fournissent un contexte empirique permettant d'interpréter les cibles et les indicateurs relatifs à la calcite et de déterminer si les niveaux d'accumulation entraînent des répercussions écologiquement importantes sur les poissons et la vie aquatique, comme une diminution du succès de la fraie ou des modifications des réseaux trophiques.

Le défi consiste à traduire les mesures de la précipitation de la calcite et de la formation de concrétions en une évaluation de la dégradation fonctionnelle de l'habitat, plutôt que de s'appuyer uniquement sur des indicateurs physiques (p. ex. la mesure dans laquelle les concrétions de calcite modifient les processus ou les fonctions de l'habitat nécessaires au maintien du poisson ou de son habitat à différents stades du cycle biologique). Il serait particulièrement utile de mener des recherches portant directement sur les répercussions quantitatives de la calcite sur le poisson et son habitat et considérant explicitement la calcite

comme facteur de stress observé sur le terrain. Des travaux expérimentaux sur le terrain allant au-delà des études d'observation afin de démontrer l'ampleur des effets et les mécanismes causaux renforceraient le cadre de gestion et amélioreraient la capacité d'élaborer des outils d'évaluation comme ceux fondés sur les principes de l'état de bon fonctionnement ou les protocoles d'évaluation de l'habitat du poisson.

Élaboration d'évaluations fonctionnelles

L'élaboration d'une évaluation fondée sur les principes de l'état de bon fonctionnement ou sur une approche connexe, comme celles décrites précédemment, devrait être une priorité. Celle-ci permettra aux évaluateurs et aux autres praticiens de disposer d'un langage commun pour décrire les divers changements pouvant découler de la calcification en milieu aquatique et pour élaborer des solutions visant à atténuer leurs répercussions.

Par le passé, les évaluations fondées sur les principes de l'état de bon fonctionnement étaient une démarche multidisciplinaire qui intégrait les critères biologiques et physiques nécessaires au maintien d'un état écologique donné. Contrairement à ce que pourrait laisser croire la notion d'état, celui-ci n'est pas statique et comprend les composantes nécessaires au changement et à l'évolution des systèmes de manière à soutenir les valeurs biologiques, notamment les populations de poissons. Voici une liste non exhaustive de critères qui pourraient être intégrés à un protocole d'évaluation axé sur la calcite :

- La répartition générale des concrétions dans un segment de mésohabitat, notamment le degré de cimentation (cC), la superficie totale touchée et la profondeur de l'eau aux sites touchés.
- Les obstacles au passage du poisson, notamment les formations en marches présentes dans les cascades, les surfaces anormalement accidentées et la vitesse d'écoulement accrue sur les lits de cours d'eau concrétés.
- La perturbation de l'évolution naturelle d'un chenal. Les concrétions peuvent avoir des effets sur les fonctions d'un cours d'eau à court et à long terme, et les cas les plus graves peuvent modifier l'évolution de la morphologie du chenal. Ces modifications peuvent à leur tour influer sur des caractéristiques importantes, notamment la dissipation de l'énergie, le volume et la vitesse de l'écoulement, la recharge des eaux souterraines et le développement de plaines inondables (p. ex. voir Schumm *et al*. 1984).
- Les éléments de l'habitat qui sont importants pour le poisson prévus selon les critères physiques et biologiques établis dans la documentation relative à d'autres types d'évaluations de l'habitat du poisson. Cette composante repose sur une vaste documentation dans laquelle de nombreuses approches ont déjà été publiées. Par exemple, en Colombie-Britannique, la *Forest and Range Practices Act* est associée à un protocole de terrain conçu pour évaluer les conditions des milieux lotiques dans le contexte de la gestion des répercussions des activités forestières sur les éléments importants dans les milieux aquatiques. Cette approche met l'accent sur les conditions influencées par des perturbations en milieu sec, particulièrement les éléments importants dans les milieux fluviaux et riverains (Tripp *et al*. 2025). Une approche axée sur la calcite pourrait tirer parti de certains de ces éléments importants dans les milieux fluviaux, ainsi que de composantes géomorphologiques et d'autres effets qui ne sont pas pris en compte dans les protocoles existants.
- L'utilisation connue de l'habitat par les poissons selon l'espèce et le type de cycle biologique, d'après les données provenant de relevés, lorsque cela est possible. Les protocoles traditionnels fondés sur les principes de l'état de bon fonctionnement et les approches connexes ne tiennent généralement pas compte des observations concernant

les poissons, mais il faudrait envisager la possibilité d'utiliser une approche adaptée intégrant les données accessibles sur l'utilisation de l'habitat par les poissons.

Précipitation de la calcite et dynamique des nutriments

La précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques peut influencer la dynamique des nutriments par l'adsorption et la coprécipitation du phosphore, réduisant ainsi les concentrations de phosphore dissous et exerçant potentiellement une rétroaction négative sur la productivité primaire. De telles diminutions de la disponibilité du phosphore peuvent avoir des répercussions écologiques disproportionnées dans les cours d'eau oligotrophes ou autrement limités par des nutriments.

De faibles concentrations soutenues de phosphore biodisponible ont été associées à des modifications des assemblages d'algues benthiques et sont largement considérées comme favorisant la prolifération de *Didymosphenia geminata*, une espèce reconnue pour se développer dans des conditions de faibles concentrations de phosphore dissous. Des observations compatibles avec ce lien potentiel, notamment la présence concomitante de concrétions de calcite, de proliférations d'algues benthiques et d'une abondance réduite de macroinvertébrés, ont été signalées dans la rivière Fording (Heidt 2022), mais les mécanismes causaux demeurent incertains.

La détermination de la mesure dans laquelle la séquestration du phosphore associée à la calcite contribue à la limitation des nutriments et aux réponses biologiques qui en découlent dans les milieux lotiques constitue une importante lacune en matière de recherche. La réduction de cette incertitude nécessitera des évaluations intégrées de la précipitation de la calcite, de la spéciation du phosphore et de la structure des communautés biologiques afin de distinguer les effets associés à la calcite des autres facteurs responsables de la limitation du phosphore.

Méthodes de suivi et d'évaluation

Plusieurs approches méthodologiques pourraient permettre de mieux comprendre la dynamique de la précipitation de la calcite et contribuer à l'amélioration continue du suivi et de l'interprétation des résultats.

L'évaluation de la variabilité spatiale des dépôts de calcite à l'intérieur des tronçons et entre ceux-ci est un domaine clé pour les travaux futurs. Les approches actuelles reposent sur le calcul successif de moyennes à partir des cotes attribuées à des particules (cailloux) individuelles afin d'obtenir des estimations à l'échelle du site, puis sur le calcul d'une moyenne entre les sites pour produire des indicateurs à l'échelle du tronçon. Cette approche fournit des valeurs sommaires stables et comparables, mais elle peut réduire la capacité à quantifier explicitement la variabilité à l'intérieur des sites et entre les sites d'un même tronçon. Cette information est importante pour caractériser l'hétérogénéité spatiale, appuyer l'estimation rigoureuse de l'incertitude et renforcer l'analyse des tendances. Les ensembles de données existants pourraient permettre d'évaluer dans quelle mesure la variabilité observée à l'échelle du site influence les résultats résumés à l'échelle du tronçon, ainsi que de déterminer si la moyenne des valeurs liées aux concrétions de calcite calculée pour un tronçon représente adéquatement l'étendue et la gravité de la formation de calcite dans ce tronçon. De telles analyses pourraient aider à mieux comprendre la sensibilité et la représentativité des approches de suivi actuelles et à repérer les situations où une amélioration de la délimitation des tronçons ou du plan d'échantillonnage permettrait de mieux refléter les profils spatiaux écologiquement significatifs.

Intégration spatiale et cartographie

Une meilleure intégration spatiale des données de suivi améliorerait davantage l'interprétation des résultats. Il faudrait notamment une cartographie explicite des matériaux contribuant à la formation de calcite (déblais rocheux calcaires), de la répartition de la calcite par rapport aux limites des tronçons, des lieux d'échantillonnage, de la fréquence du suivi et des gradients environnementaux à l'échelle du bassin versant. L'intégration des données de suivi de la calcite avec les données biologiques, en particulier celles relatives à la répartition des espèces de poissons et des stades du cycle biologique, ainsi qu'avec des variables environnementales spatialement explicites, faciliterait la détection de tendances spatiales, l'évaluation du risque écologique et une meilleure interprétation des répercussions de la calcite à différentes échelles spatiales. Un élément important de cette intégration consisterait à comprendre le rôle fonctionnel de chaque tronçon au sein du bassin versant dans son ensemble (des fonctions clés comme la fraie, la croissance des juvéniles, l'hivernage ou la production de nourriture). L'intégration de ce contexte fonctionnel permettrait d'interpréter les résultats du suivi de la calcite en fonction de l'importance écologique des habitats touchés et favoriserait une approche plus globale et plus fondée sur le risque pour l'établissement des priorités en matière de gestion et de restauration. L'intégration d'information spatiale sur les lieux où des traitements sont appliqués (p. ex. zones d'application de solutions antitartre), combinée à la prise en compte des zones d'influence en aval, pourrait fournir un contexte utile à l'interprétation des tendances observées liées aux dépôts de calcite. De futurs travaux visant à modéliser le risque de précipitation de la calcite ou le risque pour le poisson pourraient être intégrés à ces approches.

Nouvelles approches de télédétection

Les relevés effectués à l'aide de drones (aéronefs sans pilote) combinés à l'imagerie multispectrale ou hyperspectrale se sont révélés prometteurs pour la cartographie des dépôts superficiels de calcite et des formations de tuf dans les milieux lentiques, où la clarté de l'eau et la stabilité des conditions de surface facilitent une interprétation visuelle et spectrale fiable (He *et al*. 2021, Zhang *et al*. 2024). Toutefois, leur application aux systèmes lotiques demeure en grande partie non validée. Dans les cours d'eau, plusieurs facteurs, notamment le couvert végétal, la réflectance de la surface de l'eau, la turbulence, la variabilité de la profondeur de l'eau et l'hétérogénéité du substrat, réduisent considérablement la précision de détection et compliquent la distinction entre les dépôts minces de calcite ou de tuf et les substrats calcaires naturels.

Les méthodes fondées sur l'utilisation de drones ne conviennent pas actuellement au suivi courant des dépôts de calcite et de la formation de concrétions dans les cours d'eau, mais elles méritent de faire l'objet de travaux de recherche et de mise au point supplémentaires à titre d'outils de reconnaissance complémentaire. Si elles sont validées, ces méthodes pourraient améliorer la couverture spatiale, réduire les efforts sur le terrain dans des zones éloignées ou dangereuses et aider à repérer les grandes tendances d'occurrence de la calcite, ce qui permettra de réaliser des relevés au sol plus ciblés.

CONCLUSIONS

La précipitation de la calcite dans les systèmes lotiques est un processus très dynamique qui est régi par l'interaction complexe de facteurs biotiques et abiotiques. Ces facteurs influencent la thermodynamique et la cinétique du processus, ce qui engendre des profils de dépôts de carbonates spatialement hétérogènes. Ils rendent difficile la prévision des endroits où la calcite se formera et de la manière dont elle se formera.

Le plan de qualité de l'eau de la vallée de l'Elk de 2025 offre un cadre approprié pour le suivi de l'accumulation de calcite, en mettant adéquatement l'accent sur la formation de concrétions de

calcite en tant que principal mécanisme susceptible d'altérer la structure et les fonctions des habitats aquatiques. Le suivi de la calcite est effectué à une résolution spatiale appropriée et, bien que les méthodes fondamentales utilisées sur le terrain ne nécessitent pas de modification, l'échelle spatiale à laquelle les données de suivi sont résumées, analysées et interprétées demeure essentielle à la formulation de conclusions robustes sur les plans de l'écologie et de la gestion.

Dans l'ensemble, la cible de cC ≤ 0,3 est raisonnable et scientifiquement défendable sur la base des meilleures données accessibles. Toutefois, une importante incertitude subsiste quant aux réponses des populations aux seuils de formation de concrétions de calcite. Par conséquent, cette cible devrait être interprétée comme une valeur de référence de précaution fondée sur l'habitat plutôt que comme un seuil définitif d'effet à l'échelle de la population. Cette situation souligne la nécessité de poursuivre les recherches, d'assurer un suivi complémentaire des habitats et des réponses biologiques et de continuer à ajuster la cible de façon adaptative conformément au cadre établi dans le plan.

Le niveau de formation de concrétions de calcite est le seul indicateur de terrain bien établi dont disposent les praticiens, mais son utilisation pour déterminer les tendances spatiales et temporelles est limitée par les approches analytiques actuelles. D'autres approches, notamment des méthodes bayésiennes, sont proposées; cela dit, leur valeur dépend de l'existence d'ensembles de données complets qui conservent la variabilité spatiale et temporelle des observations sous-jacentes. Cet aspect est important pour l'amélioration de la détection des tendances temporelles, le soutien d'une interprétation plus avancée de la dynamique de la précipitation de la calcite à différentes échelles de suivi ainsi que la caractérisation de l'incertitude entourant les changements observés.

Pour les salmonidés, la calcification due aux activités minières présente des risques variables, que les nouvelles données permettent de mieux caractériser, particulièrement le niveau de concrétion. Les répercussions sur le passage du poisson, la densité des nids et les macroinvertébrés aquatiques sont largement étayées dans la documentation scientifique, mais il n'est pas possible à l'heure actuelle de quantifier les répercussions sur les populations de poissons.

Il est recommandé d'utiliser l'unité du mésohabitat comme base de l'échantillonnage et de la présentation des résultats plutôt que d'autres méthodes de délimitation des tronçons. Le mésohabitat correspond davantage à l'habitat et au comportement du poisson ainsi qu'à l'occurrence de la précipitation de la calcite, contrairement à d'autres méthodes de délimitation des tronçons.

Les exploitations minières à ciel ouvert autorisées dans des paysages susceptibles de générer une précipitation de la calcite en milieu aquatique devraient être assujetties à des exigences rigoureuses de suivi conformes aux recommandations formulées dans la présente réponse des Sciences.

Les efforts de suivi déployés à l'avenir devraient viser à décrire l'étendue globale de la calcification dans les paysages touchés par les exploitations minières, plus particulièrement à déterminer si la formation de calcite se poursuit dans des sites situés en aval, que l'empreinte spatiale des secteurs touchés augmente ou non. Un programme de suivi devrait pouvoir décrire la répartition générale de la calcite dans les paysages touchés par les activités minières ainsi que les formes sous lesquelles elle se présente. Des indicateurs simples, tels que la superficie totale touchée, le nombre total de sites connus et les formes de calcite observées, seront utiles à la lumière des nouvelles connaissances à propos des répercussions sur le poisson. La mise au point d'outils de cartographie et de modélisation intégrant les matériaux sources (déblais rocheux), les formations de calcite connues, les mesures correctives prises (utilisation de

solutions antitartre) et la répartition du poisson pourrait servir à mettre en place un cadre de sélection des sites fondé sur le risque aux fins du suivi et de l'évaluation. Dans certains cas, cette démarche pourra s'appuyer sur des ensembles de données existants, mais l'utilisation exploratoire de la cartographie par drone et d'autres techniques de télédétection connexes devrait également être envisagée afin d'accroître l'efficacité de la collecte de données. Il faudrait accorder la priorité aux sites à risque élevé qui présentent à la fois des concrétions avancées et des éléments importants pour le poisson aux fins d'un suivi intensif et de la prise de mesures correctives. Des outils permettant de mieux cartographier les éléments importants pour le poisson et la formation de la calcite seront nécessaires pour atteindre cet objectif.

L'élaboration d'une évaluation fondée sur les principes de l'état de bon fonctionnement et axée sur la calcite favoriserait une analyse plus approfondie des répercussions dans les sites appropriés. Ces évaluations plus approfondies devront reposer sur des avis multidisciplinaires dans les situations où un risque élevé d'occurrence de calcite coïncide avec la présence d'éléments importants pour le poisson. Les efforts supplémentaires déployés pour réaliser ces évaluations permettront de mieux comprendre les répercussions de la calcite sur les éléments importants pour le poisson, au-delà de ce que le seul niveau de concrétion permet d'évaluer. Les évaluations fondées sur les principes de l'état de bon fonctionnement pourraient intégrer différents éléments, notamment l'étendue et la profondeur des formations de calcite ainsi que les risques pour l'évolution continue du chenal. Une compréhension globale de l'influence de la calcite sur les fonctions écologiques facilitera la détermination des mesures correctives ainsi que des considérations réglementaires, notamment en matière de restauration et de compensation.

La documentation existante met en évidence plusieurs lacunes en matière de connaissances. Parmi celles-ci figurent la capacité de prévoir la formation de calcite en aval de stériles calcaires, l'élaboration d'évaluations de l'état fonctionnel, la recherche fondamentale sur les principaux effets sur le poisson (fraie, passage du poisson et conséquences sur les réseaux trophiques) ainsi que les répercussions des changements dans les nutriments à l'échelle du paysage.

LISTE DES PARTICIPANTS DE LA RÉUNION

Nom	Organisme d'appartenance
Lemieux, Jeffrey (auteur)	MPO, Sciences
Grant, Paul (auteur)	MPO, Sciences
Rubidge, Emily	MPO, Sciences
Christensen, Lisa (présidente)	SCAS, Grands projets
Bannar-Martin, Katherine	SCAS, Grands projets
Tuite, Barrie	MPO, PPPH
Annable, William	Ktunaxa Nation Council
Davis, Tim	Gouvernement de la Colombie-Britannique

SOURCES DE RENSEIGNEMENTS

Abongwa, P.T., Atekwana, E.A. and Puckette, J. 2016. Dissolved inorganic carbon and stable carbon isotopic evolution of neutral mine drainage interacting with atmospheric CO2(g). Science of the Total Environment. 545–546: 57–66.

Almodóvar, A., Nicola, G.G. and Elvira, B. 2006. Spatial variation in brown trout production: the role of environmental factors. Transactions of the American Fisheries Society. 135(5): 1348–1360.

Amor, M.B., Zgolli D., Tlili, M.M. and Manzola, A.S. 2004. Influence of water hardness, substrate nature and temperature on heterogeneous calcium carbonate nucleation. Desalination. 166(1–3): 79–8.

Balci, N., Demirel, C., Akcer Ön, S., Gültekin, A.H. and Kurt, M.A. 2018. Evaluating abiotic and microbial factors on carbonate precipitation in Lake Acigöl, a hypersaline lake in southwestern Turkey. Quaternary International. 486: 116–128.

Barret, T., Weech, S. and Orr, P. 2016. Calcite effects on aquatic biota, 2014-2015 report. Internal report prepared for Teck Resources by Minnow Environmental (Georgetown, ON.). 44 pp.

Bergwerff, L. and van Paassen, L.A. 2021. Review and recalculation of growth and nucleation kinetics for calcite, vaterite and amorphous calcium carbonate. Crystals. 11(11):1318.

Bisson, P.A., Nielsen, J.L., Palmason, R.A. and Grove, L.E. 1982. A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low streamflow. pp. 62–73 in N. B. Armantrout (Ed.), Acquisition and utilization of aquatic habitat inventory information. Bethesda, MD: American Fisheries Society.

Brierley, C.L. 1994. U.S. Environmental Protection Agency 1994. Technical document: acid mine drainage prediction. EPA530-R-94-036. Office of Solid Waste, Washington, DC.

Broad, A., Darkins, R., Duffy, D.M. and Ford, I.J. 2022. Calcite kinks grow via a multistep mechanism. Journal of Physical Chemistry C. 126(37): 15980–15985.

Brownscombe, J.W., et Smokorowski, K.E. 2021. Examen des diagrammes de séquences des effets (SE) à l'appui de l'évaluation des risques du PPPH. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2021/079. iv + 61 p.

Bylak, A. and Kukuła, K. 2022. Impact of fine-grained sediment on mountain stream macroinvertebrate communities: Forestry activities and beaver-induced sediment management. Science of The Total Environment. 831: 154942.

Campbell, T., Simmons, J., Sáenz, J., Jerde, C. L., Cowan, W., Chandra, S. and Hogan, Z. 2019. Population connectivity of adfluvial and stream-resident Lahontan cutthroat trout: implications for resilience, management, and restoration. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 76(3): 426-437.

Cicerone, D.S., Stewart, A.J. and Roh, Y. 1999. Diel cycles in calcite production and dissolution in a eutrophic basin. Environmental Toxicology and Chemistry. 18(10): 2169–2177.

Cienciala, P. and Hassan, M.A. 2013. Linking spatial patterns of bed surface texture, bed mobility, and channel hydraulics in a mountain stream to potential spawning substrate for small resident trout. Geomorphology. 197: 96–107.

Cope, S. 2019. 2018 Field results update for Harmer and Grave Creek Westslope Cutthroat Trout (WCT) habitat and population assessment (Year 2 January 1 2018 to December 31 2019). Report prepared for Teck Coal limited, Sparwood, BC. Report prepared by Westslope Fisheries Ltd., Cranbrook, BC. 29 p. Upper Fording River Evaluation of Cause: Calcite.

Cope, S. 2020. Upper Fording River Westslope Cutthroat Trout Population Monitoring Project: 2019. Report Prepared for Teck Coal Limited, Sparwood, BC. Report Prepared by Westslope Fisheries Ltd., Cranbrook, BC. 48 pp. + 2 app.

Cope, S., Schwarz, C.J. , Prince A. and Bisset, J. 2016. Upper Fording River Westslope Cutthroat Trout Population Assessment and Telemetry Project: Final Report. Report Prepared for Teck Coal Limited, Sparwood, BC. Report Prepared by Westslope Fisheries Ltd., Cranbrook, BC. 266 p.

Corman, J.R. 2025. Calcium carbonate and phosphorus interactions in inland waters. Limnology and Oceanography Letters. 10(2): 158–178.

Corman, J.R., Moody, E.K. and Elser J.J.. 2016. Calcium carbonate deposition drives nutrient cycling in a calcareous headwater stream. Ecological Monographs. 86(4): 448–461.

COSEPAC. 2016. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur la truite fardée versant de l'ouest (*Oncorhynchus clarkii lewisi*), populations de la rivière Saskatchewan et du fleuve Nelson et populations du Pacifique, au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xvi + 102 p.

COSEPAC. 2025. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur l'ombre à tête plate (*Salvelinus confluentus*) au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada. Ottawa. xliii + 163 p.

Cox, R.X., Kingsford, R.T., Suthers, I. and Felder, S. 2023. Fish Injury from Movements across Hydraulic Structures: A Review. Water. 15(10): 1888.

Cravotta, C.A. 2021. Interactive PHREEQ-N-AMDTreat water-quality modeling tools to evaluate performance and design of treatment systems for acid mine drainage. Applied Geochemistry. 126: 104845.

Crozier, L. and Siegel, J. 2023. A Comprehensive review of the impacts of climate change on salmon: Strengths and weaknesses of the literature by life stage. Fishes. 8(6): 319.

Davis, K.J., Dove, P.M. and De Yoreo, J.J. 2000. The role of Mg2+ as an impurity in calcite growth. Science. 290(5494): 1134–1137.

Deocampo, D.M. 2010. Chapter 1 The geochemistry of continental carbonates. Developments in Sedimentology. 62: 1–59.

DFO. 2014. Pathways of Effects: National Guidelines. Illustrating the links between human activity and its potential impact on fish and fish habitat. Ottawa, ON: Ecosystems and Oceans Science. 44 pp.

Diamond, J.S., Bernal, S., Boukra, A., Cohen, M.J., Lewis, D., Masson, M., Moatar, F. and Pinay, G. 2021. Stream network variation in dissolved oxygen: Metabolism proxies and biogeochemical controls. Ecological Indicators. 131: 108233.

Diamond, J.S., Moatar, F., Recoura-Massaquant, R., Chaumot, A., Zarnetske, J., Valette, L. and Pinay, G. 2023. Hypoxia is common in temperate headwaters and driven by hydrological extremes. Ecological Indicators. 147: 109987.

Dittrich, M. and Obst, M. 2004. Are picoplankton responsible for calcite precipitation in lakes? Ambio. 33(8): 559–564.

Dreybrodt, W., Buhmann, D., Michaelis, J. and Usdowski, E. 1992. Geochemically controlled calcite precipitation by CO2 outgassing: field measurements of precipitation rates in comparison to theoretical predictions. Chemical Geology. 97(3–4): 285–294.

Dreybrodt, W., Eisenlohr, L., Madry, B. and Ringer, S. 1997. Precipitation kinetics of calcite in the system CaCO3 - H2O - CO2: the conversion to CO2 by the slow process H+ + HCO3- → CO2 + H2O as a rate limiting step. Geochimica et Cosmochimica Acta. 61(18): 3897–3904.

Elser, J.J., Bracken, M.E.S., Cleland, E.E., Gruner, D.S., Harpole, W.S., Hillebrand, H., Ngai, J.T., Seabloom, E.W., Shurin, J.B. and Smith, J.E. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters. 10(12): 1135–1142.

Escoffier, N., Perolo, P., Many, G., Tofield, Pasche, N. and Perga, M.E. 2023. Fine-scale dynamics of calcite precipitation in a large hardwater lake. Science of the Total Environment 864:160699.

[EVWQP Annex J.1] Teck Resources Limited. 2014. Elk Valley Water Quality Plan – Annex J.1 Approach and Methodology to Monitor and Assess Calcite Impact.

[EVWQP] British Columbia Ministry of Environment and Parks. 2025. 2025 Elk Valley Water Quality Plan. Environmental Protection Division, Southeast Coal Mining Team.

[EVWQP] Teck Resources Limited. 2014. Elk Valley Water Quality Plan.

Feelders, A.J. and van der Gaag, L.C. 2012. Learning Bayesian network parameters with prior knowledge about context-specific qualitative influences. arXiv:1207.1387.

Ferreira, V., Castagneyrol, B., Koricheva, J., Gulis, V., Chauvet, E. and Graça, M.A.S. 2015. A meta-analysis of the effects of nutrient enrichment on litter decomposition in streams. Biological Reviews. 90(3): 669–696.

Fischl, P. 1992. Limestone and dolomite resources in British Columbia. Government of British Columbia, Geological Survey. ISBN 0-7718-9202-0. 150 pp.

Ford, D.C. and Williams, P.W. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd. Xiii, 563 p.

Ford, T.D. and Pedley, H.M. 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world. Earth-Science Reviews. 41(3–4): 117–175.

Gadikota, G. 2021. Carbon mineralization pathways for carbon capture, storage and utilization. Communications Chemistry. 4: 23.

Gebrehiwet, T.A., Redden, G.D., Fujita, Y., Beig, M.S. and Smith, R.W. 2012. The effect of the CO32- to Ca2+ ion activity ratio on calcite precipitation kinetics and Sr2+ partitioning. Geochemical Transactions. 13: 1.

Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari, A. and Rubin D.B. 2013. Bayesian Data Analysis (3rd ed.) Chapman and Hall/ CRC. New York. 675 p.

Giannimaras, E.K. and Koutsoukos, P.G. 1987. The crystallization of calcite in the presence of orthophosphate. Journal of Colloid and Interface Science. 116(2): 423–430.

Groot, C., and Margolis, L. (Eds.). 1991. Pacific Salmon Life Histories. Vancouver, BC: UBC Press. 576 pp.

Harrison, L.R., Legleiter, C.J., Wydzga, M.A. and Dunne, T. 2011. Channel dynamics and habitat development in a meandering, gravel-bed river. Water Resources Research. 47(4):W04513.

He, J., Lin, J., Ma, M., and Liao, X. 2021. Mapping topo-bathymetry of transparent tufa lakes using UAV-based photogrammetry and RGB imagery. Geomorphology. 389: 107832.

Heidt, K.D. 2022. Lower Fording River Westslope Cutthroat Trout Population Assessment (2020-2021 two-year project summary). BC Ministry of Forests, Fisheries Section, June 2022. 28 pp.

Herman, J.S. and Lorah, M.M. 1987. CO_2 outgassing and calcite precipitation in Falling Spring Creek, Virginia, U.S.A. Chemical Geology. 62: 251–262.

Herman, J.S. and Lorah, M.M. 1988. Calcite precipitation rates in the field: measurement and prediction for a travertine-depositing stream. Geochimica et Cosmochimica Acta. 52(10): 2347–2355.

Hoch, A.R., Reddy, M.M. and Aiken, G.R. 2000. Calcite crystal growth inhibition by humic substances with emphasis on hydrophobic acids from the Florida Everglades. Geochimica et Cosmochimica Acta. 64: 61–72.

Hocking, M., Akaoka, K., Buren, A., Vogt, E., MacAdams, J. and Hatfield, T. 2020. 2019 Calcite Effects to Spawning Habitat Suitability of Westslope Cutthroat Trout. Consultant's report prepared for Teck Coal Ltd. by Ecofish Research Ltd. July 27, 2020.

Hocking, M., J. Braga, E. Vogt, J. Row, J. Ings, and T. Hatfield. 2022. Calcite Effects to Spawning Habitat Suitability of Westslope Cutthroat Trout – Summary Report. Consultant's report prepared for Teck Coal Ltd. by Ecofish Research Ltd. and Minnow Aquatic Environmental Services, December 29, 2022.

Hocking, M., Tamminga, A., Arnett, T., Robinson, M., Larratt, H. and Hatfield, T. 2021. Subject Matter Expert Report: Calcite. Evaluation of Cause – Decline in Upper Fording River Westslope Cutthroat Trout Population. Report prepared for Teck Coal Ltd. by Ecofish Research Ltd., Lotic Environmental Ltd., and Larratt Aquatic Consulting Ltd.

Hodell, D.A., Schelske, C.L,. Fahnenstiel, G.L, and. Robbins, L.L. 1998. Biologically induced calcite and its isotopic composition in Lake Ontario. Limnology and Oceanography. 43:187–199.

Ishikawa, M. and Ichikuni, M. 1981. Coprecipitation of phosphate with calcite. Geochemical Journal. 15(5): 283–288.

Jeziorski, A. et al. 2008. The Widespread Threat of Calcium Decline in Fresh Waters. Science. 322: 1374–1377.

Johnston, F.D., Post, J.R., Mushens, C.J., Stelfox, J.D., Paul, A.J. and Lajeunesse, B. 2007. The demography of recovery of an overexploited bull trout, *Salvelinus confluentus*, population. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 64(1): 113-126.

Kabalah-Amitai, L., Mayzel, B., Kauffmann, Y., Fitch, A.N., Bloch, L., Gilbert, P. and Pokroy, B. 2013. Vaterite Crystals Contain Two Interspersed Crystal Structures. Science. 340(6131): 454–457.

Kaushal, S.S., Likens, G.E., Utz, R.M., Pace, M.L., Grese, M. and Yepsen, M. 2013. Increased River Alkalinization in the Eastern U.S. Environmental Science and Technology. 47(18): 10302–10311.

Kennedy, B.P., Nislow, K.H. and Folt, C.L. 2008. Habitat-mediated foraging limitations drive survival bottlenecks for juvenile salmon. Ecology. 89(9): 2529–2541.

Khan, H., Laas, A., Marcé, R. and Obrador, B. 2020. Major effects of alkalinity on the relationship between metabolism and dissolved inorganic carbon dynamics in lakes. Ecosystems. 23(8): 1566–1580.

Khan, H., Laas, A., Marcé, R., Sepp, M. and Obrador, B. 2021. Eutrophication and geochemistry drive pelagic calcite precipitation in lakes. Water. 13(5): 597.

Kleinteich, J., Golubic, S., Pessi, I.S. and Wilmotte, A. 2017. Cyanobacterial contribution to travertine deposition in the Hoyoux River system, Belgium. Microbial Ecology. 74(1): 33–53.

Kuchapski, K.A. and Rasmussen, J.B. 2015. Surface coal mining influences on macroinvertebrate assemblages in streams of the Canadian Rocky Mountains. Environmental Toxicology and Chemistry. 34(9): 2138–2148.

Lahrichi, K., Fattasse, H., Laaraj, M., El Asmi, H., Okacha, A. and Makhchane, M. 2026. Evolution of fluvial tufas of valley type in the centre of Ras Elma Sud Region, Taza (Morocco): case of the Oued El Heddar Valley. Carbonates and Evaporites. 41(1): 5.

Larratt, H. and Self, J. 2021. Subject Matter Expert Report: Cyanobacteria, Periphyton and Aquatic Macrophytes. Evaluation of Cause – Decline in Upper Fording River Westslope Cutthroat Trout Population. Report prepared for Teck Coal Limited. Prepared by Larratt Aquatic Consulting Ltd. 128 pp.

Lay, J.A. and Ward, A.K. 1987. Algal community dynamics in two streams associated with different geological regions in the southeastern United States. Archiv für Hydrobiologie 108(3): 305–324.

Lebrón, I. and Suárez, D.L. 1996. Calcite nucleation and precipitation kinetics as affected by dissolved organic matter at 25°C and pH > 7.5. Geochimica et Cosmochimica Acta. 60(15): 2765–2776.

Lebrón, I. and Suárez, D.L. 1998. Kinetics and mechanisms of precipitation of calcite as affected by PCO2 and organic ligands at 25°C. Geochimica et Cosmochimica Acta. 62(3): 405–416.

Lin, Y.P. and Singer, P.C. 2006. Inhibition of calcite precipitation by orthophosphate: speciation and thermodynamic considerations. Geochimica et Cosmochimica Acta. 70(10): 2530–2539.

Liptak, M.A. 2000. Water column productivity, calcite precipitation, and phosphorus dynamics in freshwater marshes. PhD Dissertation, Ohio State University.

Lisle, T.E. and Lewis, J. 1992. Effects of Sediment Transport on Survival of Salmonid Embryos in a Natural Stream: A Simulation Approach. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 49(11): 2337–2344.

Lorah, M.M. and Herman, J.S. 1988. The chemical evolution of a travertine-depositing stream: geochemical processes and mass transfer reactions. Water Resources Research. 24: 1541–1552.

Many, G., Escoffier, N., Perolo, P., Bärenbold, F., Bouffard, D. and Perga, M.E. 2024. Calcite precipitation: the forgotten piece of lakes' carbon cycle. Science Advances. 10:eado5924.

Marx, A., Dusek, J., Jankovec, J., Sanda, M., Vogel, T., van Geldern, R., Hartmann, J. and Barth J.A.C. 2017. A review of CO_2 and associated carbon dynamics in headwater streams: a global perspective. Reviews of Geophysics. 55(2): 560–585.

Matheson, A., Grieve, D.A., Goodarzi, F. and Holuszko, M.E. 1994. Selected Thermal Coal Basins of British Columbia. British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. Paper 1994-3. 47 pp.

McCabe, M.M. and Robinson, M.D. 2020. Teck Coal Ltd – Elk Valley 2019 Calcite Monitoring Program Annual Report and Program Assessment. Prepared for Teck Coal Ltd. by Lotic Environmental Ltd. 24 pp + appendices

McNeish, D. 2016. On Using Bayesian Methods to Address Small Sample Problems. Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal. 23(5): 750–773.

McPhail, J.D. and Baxter J.S.. 1996. A review of bull trout (*Salvelinus confluentus*) life-history and habitat use in relation to compensation and improvement opportunities. University of British Coumbia Fisheries Management Report No. 104, 35 p. Vancouver, BC.

McPhail, J.D. and Troffe, P.M. 1998. The mountain whitefish (*Prosopium williamsoni*): A potential indicator species for the Fraser system. (Report No. DOE FRAP 1998-16). Prepared for Environment Canada, Aquatic and Atmospheric Sciences Division, Vancouver. 44 pp.

Mejri, W., Korchef, A., Tlili, M. and Amor, M.B. 2014. Effects of temperature on precipitation kinetics and microstructure of calcium carbonate in the presence of magnesium and sulphate ions. Desalination and Water Treatment 52(25–27): 4863–4870.

Montgomery, D.R. and Buffington J.M.. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin. 109(5): 596–611.

Morse, J.W., Arvidson, R.S. and Lüttge, A. 2007. Calcium Carbonate Formation and Dissolution. Chemical Reviews. 107(2): 342–381.

MPO. 2017. Plan de gestion de la truite fardée versant de l'ouest (*Oncorhynchus clarkii lewis*i), population de la Colombie-Britannique, au Canada. Série des plans de gestion de la *Loi sur les espèces en péril*. Pêches et Océans Canada, Ottawa. iv + 120 p.

Muhlfeld, C.C. and Marotz, B. 2005. Seasonal movement and habitat use by subadult bull trout in the Upper Flathead River system, Montana. North American Journal of Fisheries Management. 25(3): 797–810.

Muhlfeld, C.C., McMahon, T.E., Boyer, M.C. and Gresswell, R.E. 2009. Local habitat, watershed, and biotic factors influencing the spread of hybridization between native Westslope Cutthroat Trout and introduced rainbow trout. Transactions of the American Fisheries Society. 138: 1036–1051.

Natsumeda, T. and Iguchi, K. 2019. Habitat-specific effects of interstitial space between stream substrate particles on the colonization of aquatic organisms. International Aquatic Research. 11: 347–358.

Neal, C., Watts, C.D., Williams, R.J., Neal, M., Hill, L., and Wickham, H. 2002. Diurnal and longer term patterns in carbon dioxide and calcite saturation for the River Kennet, south-eastern England. Science of the Total Environment. 282–283: 205–231.

Nielsen, M.R., Sand, K.K., Rodriguez-Blanco, J.D., Bovet, N., Generosi, J., Dalby, K.N. and Stipp, S.L.S. 2016. Inhibition of Calcite Growth: Combined Effects of Mg^{2+} and SO_4^{2-}. Crystal Growth and Design. 16(11): 6199–6207.

Nordstrom, D.K., Blowes, D.W. and Ptacek, C.J. 2015. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update. Applied Geochemistry. 57: 3–16.

Nyirő-Kósa, I., Rostási, Á., Bereczk-Tompa, É., Cora, I., Koblar, M., Kovács, A. and Pósfai, M. 2018. Nucleation and growth of Mg-bearing calcite in a shallow, calcareous lake. Earth and Planetary Science Letters. 496: 20–28.

Ohlendorf, C. and Sturm, M. 2001. Precipitation and Dissolution of Calcite in a Swiss High Alpine Lake. Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 33(4): 410–417.

Paul, A.J. and Post, J.R. 2001. Spatial Distribution of Native and Nonnative Salmonids in Streams of the Eastern Slopes of the Canadian Rocky Mountains. Transactions of the American Fisheries Society. 130: 417–430.

Plummer, L.N. and Busenberg E. 1982. The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO2-H_2O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system $CaCO_3$-CO_2-H_2O. Geochimica et Cosmochimica Acta. 46(6): 1011–1040.

Plummer, L.N., Wigley, T.M.L. and Parkhurst, D.L. 1978. Kinetics of calcite dissolution in CO_2-water systems at 5° to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO2. American Journal of Science. 278(2): 179–216.

Raymond, P.A., Zappa, C.J., Butman, D., Bott, T.L., Potter, J., Mulholland, P., Laursen, A.E., McDowell, W.H. and Newbold, D. 2012. Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. Limnology and Oceanography: Fluids and Environments. 2(1): 41–53.

Reddy, M.M. and Hoch, A.R. 2001. Calcite Crystal Growth Rate Inhibition by Polycarboxylic Acids. Journal of Colloid and Interface Science. 235: 365–370.

Reddy, M.M. and Nancollas, G.H. 1971. The crystallization of calcium carbonate I. Isotopic exchange and kinetics. Journal of Colloid and Interface Science. 36: 166–172.

Roberge, M., Hume, J.M.B., Minns, C.K. and Slaney, T. 2002. Life history characteristics of freshwater Fishes occurring in British Columbia, with major emphasis on stream habitat characteristics. Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences. 2611: xiv + 248 p.

Rocher-Ros, G., Sponseller, R.A., Lidberg, W., Mörth, C.M. and Giesler, R. 2019. Landscape process domains drive patterns of CO2 evasion from river networks. Limnology and Oceanography Letters. 4(4): 87–95.

Root, S. and O'Reilly, C.M. 2012. Didymo: A review of its ecology, distribution, and impacts. Illinois State University Technical Report.14 pp.

Rosemond, A.D., Benstead, J.P., Bumpers, P.M., Gulis, V., Kominoski, J.S., Manning, D.W., Suberkropp, K. and Wallace, J.B. 2015. Experimental nutrient additions accelerate terrestrial carbon loss from stream ecosystems. Science. 347(6226): 1142–1145.

Rubidge, E.M. and Taylor, E.B. 2005. An analysis of spatial and environmental factors influencing hybridization between native Westslope Cutthroat Trout (*Oncorhynchus clarkii lewisi*) and introduced rainbow trout (*O. mykiss*) in the upper Kootenay River drainage, British Columbia. Conservation Genetics. 6: 369-384.

Ruiz-Agudo, E., Putnis, C.V., Rodriguez-Navarro, C. and Putnis, A. 2011. Effect of pH on calcite growth at constant aCa2+/aCO32– ratio and supersaturation. Geochimica et Cosmochimica Acta. 75(1): 284–296.

Rupp, G.L. and Adams, V.D. 1981. Calcium carbonate precipitation as influenced by stream primary production. Reports. Paper 116.

Sanjuan, B. and Girard, J. 1996. Review of kinetic data on carbonate mineral precipitation. BRGM Report R39062: 1–91.

Santos, H.S., Nguyen, H., Venâncio, F., Ramteke, D., Zevenhoven, R. and Kinnunen, P. 2023. Mechanisms of Mg carbonates precipitation and implications for CO2 capture and utilization/storage. Inorganic Chemistry Frontiers. 10(9): 2507–2546.

Savoie, R. and Haché, D. 2002. Design criteria for fish passage in new or retrofit culverts in the Maritime provinces, Canada. Gulf Region, iv + 38 pp. ISBN 0-662-66412-4. Catalogue No. Fs23-410/2002.

Schindler Wildhaber, Y., Michel, C., Epting, J., Wildhaber, R.A., Huber, E., Huggenberger, P. and Burkhardt-Holm, P. 2014. Effects of river morphology, hydraulic gradients, and sediment deposition on water exchange and oxygen dynamics in salmonid redds. Science of the Total Environment. 470–471: 488–500.

Schmetterling, D. 2001. Seasonal Movements of Fluvial Westslope Cutthroat Trout in the Blackfoot River Drainage, Montana. North American Journal of Fisheries Management. 21(3): 507–520.

Schumm, S.A., Harvey, M.D. and Watson, C.C. 1984. Incised channels: morphology, dynamics and control. Littleton, CO: Water Resources Publications. 208 pp.

Smid, S.C, McNeish, D., Miočević, M. and van de Schoot, R. 2020 Bayesian Versus Frequentist Estimation for Structural Equation Models in Small Sample Contexts: A Systematic Review. Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal. 27(1): 131–161.

Smit, R. and Robinson, M.D. 2023. Teck Coal Ltd. 2022. Calcite Monitoring Program Annual Report. Prepared for Teck Coal Ltd. by Lotic Environmental Ltd. 48 pp + appendices.

Smit, R. and Robinson, M.D. 2024. Teck Coal Ltd. 2023 Calcite Monitoring Program Annual Report. Prepared for Teck Coal Ltd. by Lotic Environmental Ltd. 50 pp + appendices.

Smit, R., Goss, M. and Robinson, M.D. 2025. Elk Valley Resources 2024 Calcite Monitoring Program Annual Report. Prepared for Elk Valley Resources (EVR) by Lotic Environmental Ltd. 58 pp + appendices.

Smith, V.H. and Schindler, D.W. 2009. Eutrophication science: Where do we go from here? Trends in Ecology and Evolution. 24(4): 201–207.

Stendera, S., Adrian, R., Bonada, N. Cañedo-Argüelles, M., Hugueny, B., Januschke, K., Pletterbauer, F. and Hering, D. 2012. Drivers and stressors of freshwater biodiversity patterns across different ecosystems and scales: a review. Hydrobiologia. 696: 1–28.

Stewart, A.J. 1988. Alkalinity dynamics in a hard-water prairie-margin stream. Archiv für Hydrobiologie. 112: 335–350.

Swanson, S., Kozlowski, D., Hall, R., Heggem, D. and Lin, J. 2017. Riparian proper functioning condition assessment to improve watershed management for water quality. Journal of Soil and Water Conservervation. 72(2): 168–182.

Taylor, E., Stamford, M. and Baxter, J. 2003. Population subdivision in Westslope Cutthroat Trout (*Oncorhynchus clarkii lewisi*) at the northern periphery of its range: evolutionary inferences and conservation implications. Molecular Ecology. 12: 2609–2622.

Teng, H.H., Dove, P.M. and De Yoreo, J.J. 2000. Kinetics of calcite growth: surface processes and relationships to macroscopic rate laws. Geochimica et Cosmochimica Acta. 64(13): 2255–2266.

Teng, H.H., Dove, P.M. and DeYoreo, J.J. 1999. Reversed calcite morphologies induced by microscopic growth kinetics: insight into biomineralization. Geochimica et Cosmochimica Acta. 63(17): 2507–2512.

Thomas, L. 2007. Karst hydrogeology, hydrogeochemistry and processes of tufa deposition in Carboniferous limestone springs of the Mells Valley, Somerset. PhD Dissertation, Bath Spa University.

Tripp, D.B., Tschaplinski, P.J., Bird, S.A., and Hogan, D.L. 2025. Field Supplement to Evaluating the Condition of Streams and Riparian Management Areas (Riparian Management Routine Effectiveness Evaluation). Forest and Range Evaluation Program, B.C. Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development, Victoria, B.C. 54 pgs.

van de Schoot, R., Broere, J.J., Perryck, K.H., Zondervan-Zwijnenburg, M. and van Loey, N.E. 2015. Analyzing small data sets using Bayesian estimation: the case of posttraumatic stress symptoms following mechanical ventilation in burn survivors. European Journal of Psychotraumatology. 6: 25216.

Vereshchagin, O.S., Chernyshova, I.A., Kuz'mina, M.A. and Frank-Kamenetskaya, O.V. 2023. Calcium carbonate precipitation behavior in the system Ca-Me2+-CO3-H2O (Me2+ = Co, Ni, Cu, Fe): ion incorporation, effect of temperature and aging. Minerals. 13(12): 1497.

Vriens, B., Plante, B. and Seigneur, N. 2020. Mine Waste Rock: Insights for Sustainable Hydrogeochemical Management. Minerals. 10(9): 728.

Wasylenki, L.E., Dove, P.M. and De Yoreo, J.J. 2005. Effects of temperature and transport conditions on calcite growth in the presence of Mg2+: implications for paleothermometry. Geochimica et Cosmochimica Acta. 69(17): 4227–4236.

Webb, J.A. and Sasowsky, I.D. 1994. The interaction of acid mine drainage with a carbonate terrane: evidence from the Obey River, north-central Tennessee. Journal of Hydrology. 161: 327–346.

Wegscheider, B., Linnansaari, T. and Curry, R. 2020. Mesohabitat modelling in fish ecology: A global synthesis. Fish and Fisheries. 21(5): 927–939.

Wells, C.D., Connor, J., Small, M.P. and Spruell, P. 2024. Population assignment of migratory Westslope Cutthroat Trout (WCT) in the Clark Fork–Pend Oreille River basin. Transactions of the American Fisheries Society. 153(3): 347–381.

Weyhenmeyer, G.A., Hartmann, J., Hessen, D.O. et al. 2019. Widespread diminishing anthropogenic effects on calcium in freshwaters. Scientific Reports. 9: 10450.

Wohl, E., Bledsoe, B.P., Jacobson, R.B., Poff, N.L., Rathburn, S.L., Walters, D.M. and Wilcox, A.C. 2015. The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. BioScience. 65(4): 358–371.

Wolman, M.G. 1954. A Method of Sampling Coarse River-Bed Material. Transactions of the American Geophysical Union. 35(6): 951–956.

Wright, N., Jensma, T., Wright, H., Akaoka, K., Hocking, M. and Hatfield, T. 2018. 2017 Calcite effects to fish spawning and incubation. Consultant's report. Prepared for Teck Coal Limited. Courtenay, BC: Ecofish Research Ltd., 18 June, 81 pp.

Xu, M. and Higgins, S.R. 2011. Effects of magnesium ions on near-equilibrium calcite dissolution: step kinetics and morphology. Geochimica et Cosmochimica Acta. 75(3): 719–733.

Zathey, N. Mitchell, S. and Robinson, M.D. 2021. Teck Coal Ltd. 2020 Calcite Monitoring Program Annual Report. Prepared for Teck Coal Ltd. by Lotic Environmental Ltd. 54 pp + appendices.

Zhang, Y. and Dawe, R.A. 2000. Influence of Mg^{2+} on the kinetics of calcite precipitation and calcite crystal morphology. Chemical Geology. 163: 129–138.

Zhang, T., Li, J., Pu, J. and Wu, F. 2021. Physical and chemical control on CO_2 gas transfer velocities from a low-gradient subtropical stream. Water Research. 204: 117564.

Zhang, X., Zhou, G., He., J., and Lin, J. 2024. 3D Modelling and Measuring Dam System of a Pellucid Tufa Lake Using UAV Digital Photogrammetry. Remote Sensing. 16(20): 3839.

CE RAPPORT EST DISPONIBLE AUPRÈS DU :

Centre des avis scientifiques (CAS)
Région du Pacifique
Pêches et Océans Canada
3190, chemin Hammond Bay
Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7

Courriel : DFO.PacificCSA-CASPacifique.MPO@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-3815
ISBN 978-1-100-00648-2 N° cat. Fs70-7/2026-030F-PDF
© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre du ministère des Pêches et des Océans, 2026

Ce rapport est publié sous la Licence du gouvernement ouvert – Canada



La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2026. Évaluation des répercussions, sur le poisson et son habitat, des dépôts de calcite provenant des mines de charbon en Colombie-Britannique, au Canada. Secr. can. des avis sci. du MPO. Rép. des Sci. 2026/030.

Also available in English:

DFO. 2026. Assessment of Calcite Deposition on Fish and Fish Habitat from Coal Mining in British Columbia, Canada. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Resp. 2026/030.