

Etat de la connaissance sur les systèmes tufeux

REZOH-tuf : Plan d'actions, connaissances, et REstauration des
ZOnes Humides associées aux tufières (Cratoneurion)



© Lecornu E.

Etat de la connaissance sur les systèmes tufeux

REZOH-tuf : Plan d'actions, connaissances, et REstauration des ZOnes Humides associées aux tufières (Cratoneurion)

Institut de Formation de Recherche et d'Expertise
En Milieux Souterrains
Boulevard de la Chaumette - BP 737
07000 Privas

Mail : contact@ifreemis.fr

Rédigé par :



Elodie Lecornu – Directrice scientifique

Raphael Torquebiau – Directeur de l'IFREEMIS



Benoît Pascual – Chargé de projet



Fabien Hobléa – Enseignant chercheur

Jean-Jacques Delannoy – Enseignant chercheur



Johan Berthet – Chercheur et consultant



Résumé

Les tufières, souvent confondues avec les travertins, sont générées par des dynamiques de formation bio-physico-chimique complexe liées à leur environnement (contexte hydrogéologique, géographique, climatique, biologique et anthropique). Ce type de fonctionnement, relevant de plusieurs champs disciplinaires, rend la définition de ces objets difficiles tant pour les gestionnaires d'espaces naturels que pour la communauté scientifique. Ce milieu, complexe et étroitement relié à son environnement, est ainsi vulnérable à de nombreuses pressions anthropiques tout en répondant à des fonctionnalités socio-écologiques majeures (réserve d'une biodiversité remarquable, améliore la qualité de l'eau, archive des données environnementales passées).

Bien qu'inscrites à l'inventaire des habitats d'intérêt communautaire, les tufières s'avèrent être des formations peu documentées, à l'échelle nationale notamment, en raison d'un manque de diffusion des données et de connaissances des acteurs locaux. Ce constat s'applique également à la zone d'étude du projet Rezoh-tuf qui couvre l'espace commun au bassin du Rhône et à la Région Auvergne-Rhône-Alpes, appelé dans ce travail « *bassin Rhône-RA* ». Ainsi, seules 547 tufières sont recensées à l'échelle du « *bassin Rhône-RA* », dont 1/3 ont un état de conservation défini. Ces chiffres, représentant peu l'état réel du territoire, révèlent un profond besoin d'acquérir de nouvelles connaissances par des phases prospectives et d'évaluation standardisée de l'état de conservation.

Pour mener à bien ces actions, le fonctionnement d'un système tufeux doit nécessairement être défini et classifié afin de faciliter sa compréhension, sa gestion et sa restauration. A ce titre, la typologie retenue cadre les différents contextes physiques environnant une tufière et caractérise les formations issues de ces contextes par une approche systémique multiscalaire et pluridisciplinaire. De cet essai, plusieurs typologies emboîtées ressortent et sont les reflets des contextes qu'intègre une tufière. Par ordre hiérarchique, sont définis, les contextes hydrogéologique, géographique, géométrique et végétale, les types de sources incrustantes, les différentes morphologies, et enfin, les faciès des dépôts. Leurs influences, variables selon leur évolution, forment une multitude de tufières aux fonctionnements et aux formes très différents.

Mots clés :

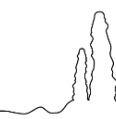
Rezoh-tuf - Tufière – Processus de fonctionnement – Fonctionnalités – Dysfonctionnements – Restauration – Typologie - France





Table des matières

Introduction – Rappel du projet Rezoh-tuf	1
1 Les tufières : des objets complexes à la croisée de la géodiversité et de la biodiversité	4
1.1 Définition : Tufière / Tuf / Travertin / Cratoneurion	4
1.2 Processus de fonctionnement généraux	7
Processus chimiques :	8
Processus physiques :	9
Processus biologiques :	10
2. ... aux enjeux de conservation variés	12
2.1 Les fonctionnalités	12
Archives environnementales :	12
Fonctionnalités biogéochimiques :	13
Fonctionnalités biologiques :	14
2.2 Les services rendus	15
2.3 Les pressions et menaces	16
Les modifications physiques de l'écoulement :	16
Les modifications de la qualité de l'eau :	22
Analyse critique des REX :	26
3. ... commençant à être considérés et cartographiés par les acteurs du territoire bassin Rhône-RA	28
3.1 Méthodologie de compilation des données cartographiques :	28
3.2 Etat de conservation des tufières recensées	29
3.3 Analyse critique des résultats obtenus	32
4. ... et dont la typologie structuro-fonctionnelle reste à définir.	34
4.1 Cadres physiques des tufières :	34
Contextes hydrogéologiques :	34
Contexte géographique :	37
Contexte induit par le profil et la pente du versant :	39
Contexte végétal :	41
4.2 Les formations tufeuses :	43
Typologie des sources :	43
Typologie hydro-structurale :	44
Typologie des faciès tufeux alguo-bryophytiques	49
Bibliographie	51



Introduction – Rappel du projet Rezoh-tuf

Le projet de **RE**stauration des **Z**ones **H**umides associées aux **TU**fières (Rezoh-tuf) s'inscrit dans l'espace commun au bassin du Rhône et à la Région Auvergne-Rhône-Alpes, qualifié dans ces travaux de « **bassin Rhône-RA** » (Figure 1). La zone d'étude concerne ainsi une grande partie du bassin Rhône-Méditerranée-Corse (RMC), territoire de gestion de la ressource en eau et des milieux aquatiques en application de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de 2006 (LEMA), et plus des deux-tiers de la Région Auvergne-Rhône-Alpes. Porté par l'IFREEMIS (Institut de Formation, de Recherche et d'Expertise en Milieux Souterrains) en partenariat avec le laboratoire EDYTEM et le Conservatoire d'espaces naturels Rhône-Alpes (CEN Rhône-Alpes), ce projet couvre une période de 3 ans (de novembre 2021 à décembre 2024) et se décline en 3 phases.

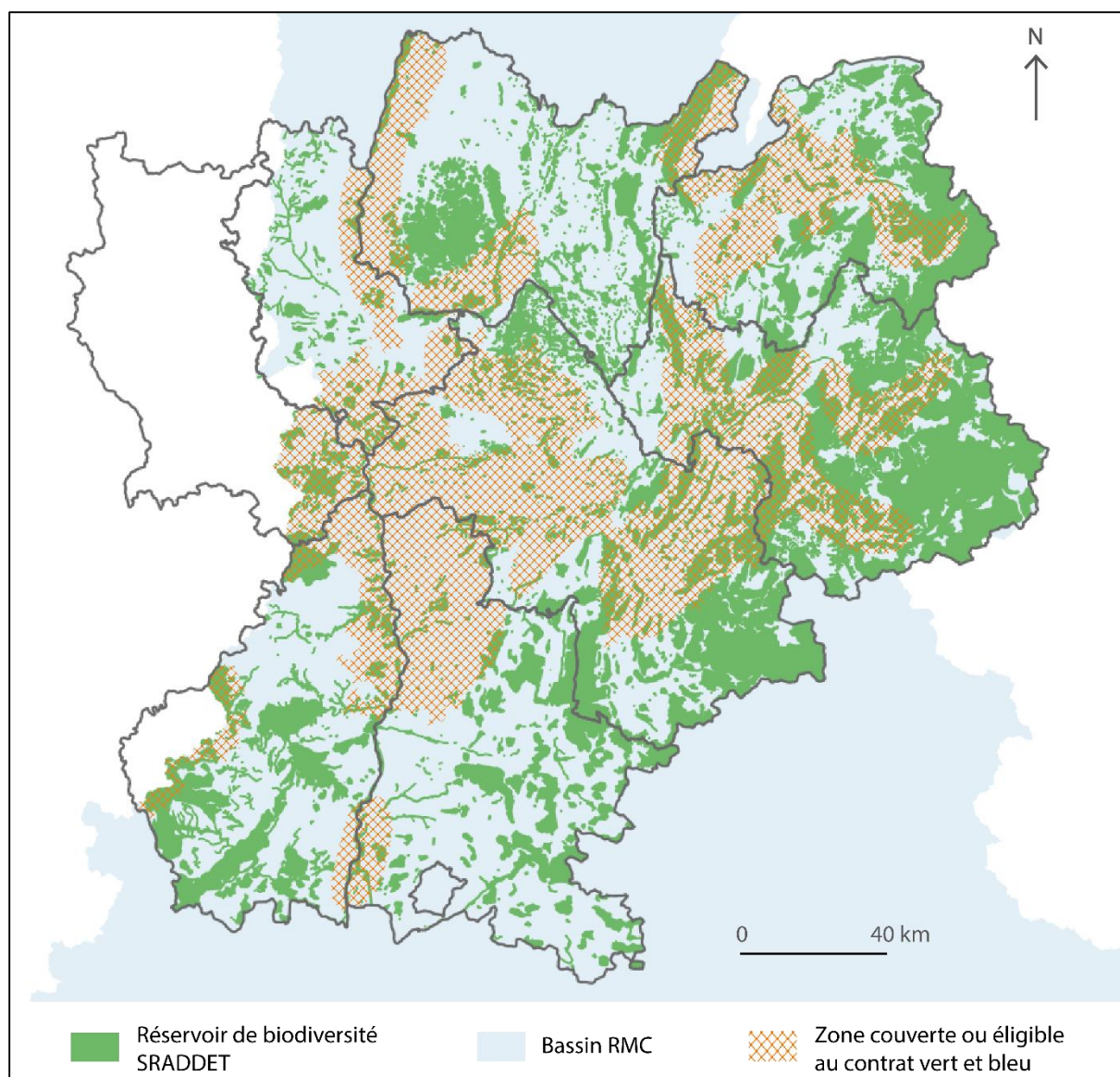


Figure 1 : Le bassin Rhône-RA représenté en bleu dans la région Auvergne Rhône-Alpes

En **phase 1 (novembre 2021 à décembre 2022)**, les actions s'articulent, dans un premier temps, autour d'un bilan des connaissances, dont le contenu repose sur un corpus bibliographique, une synthèse cartographique des inventaires réalisés dans le bassin Rhône-RA et des retours d'expériences multiscalaires. Dans un deuxième temps, la phase 1 sert à la production d'une typologie fonctionnelle des tufières et enfin à l'élaboration d'une étude de faisabilité sur 5 tufières pilotes préalablement sélectionnées. Ces tufières sont celles des Vauthières (Gruffy, 74), de la Touvière (Jarsy, 73), de Darne (Saint-Martin-de-Clelles, 38), de Choranche (Choranche, 38) et enfin de Révaou (Vallon-Pont-d'Arc, 07).

La **phase 2 (janvier 2023 à août 2024)** consiste à conduire sur des tufières pilotes des opérations expérimentales de suivi et de restauration adaptées aux différents contextes. A ce stade du projet, les « sites pilotes et référent » sont définis. Ces tufières ont fait l'objet de réunions de concertation, d'une part, avec les partenaires du projet (CEN RA, Laboratoire EDYTEM et Styx4D) pour leurs sélections, et d'autre part, avec les opérateurs locaux (EPTB, CEN, PNR, Syndicats, communes, propriétaires) pour la définition des actions expérimentales. Les sites pilotes se devaient d'être représentatifs des différents types de tufs, des systèmes hydro-géomorphologiques et des aires biogéographiques (contextes alpin, continental et méditerranéen) rencontrés dans le bassin Rhône-RA. Enfin, une attention est portée à ce que les sites retenus correspondent à des zones humides aux fonctionnalités dégradées selon les principes de l'orientation fondamentale n°6 du SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021. La compréhension des facteurs de dégradation et des différentes évolutions passées et récentes a également constitué un axe essentiel pour penser et proposer le plan de restauration.

Ce projet, financé conjointement par l'Agence de l'Eau RMC et la Région Auvergne-Rhône-Alpes dans le cadre de la stratégie Environnement/Energie adoptée en juin 2018 et les dispositifs « *Biodiversité ordinaire* » et « *Eau et Biodiversité* », invite à retenir des sites pilotes appartenant à un cadre administratif précis. Ainsi, les tufières pilotes retenues sont nécessairement localisées au sein de réservoirs de biodiversité du SRADDET tout en étant en dehors des secteurs éligibles ou couverts par l'outil « *contrat vert et bleu* » (Figure 1). Par ailleurs, certains de ces sites s'inscrivent au sein de périmètres Natura 2000, si ces derniers ne bénéficient pas de fiches actions ciblant la restauration des tufières dans les DOCOB.

Enfin, parallèlement à la phase 2, la **phase 3 (septembre 2023 à décembre 2024)** a pour ambition de diffuser et mettre en application les connaissances acquises au travers de 3 actions. Sur la base des retours d'expériences, des résultats obtenus et des volontés locales, un plan d'actions pluriannuel autour de la restauration de sites prioritaires du Cratoneurion va être construit conjointement avec les partenaires et acteurs territoriaux : le « *marathon du tuf* ». L'objectif de ce marathon novateur va être de restaurer et/ou préserver 42 secteurs tufeux du bassin Rhône-RA identifiés comme prioritaires par le projet Rezoh-tuf et les plans de gestion stratégique des zones humides définis par le SDAGE.

Les autres actions portent sur l'organisation d'une Journée d'Echanges Techniques (JET) à destination des collectivités et gestionnaires d'aires protégées et la rédaction d'un « *Guide de*

gestion et de restauration des tufières » publié dans la collection des « *Cahiers techniques d'Auvergne-Rhône-Alpes* » du Cen Rhône-Alpes.

Les objectifs de ce projet sont de :

- préciser et renouveler les connaissances sur ces milieux en les intégrant dans une approche globale tenant compte des spécificités hydrogéologiques, géomorphologiques, topographiques et biogéographiques ainsi que des usages passés et actuels de leur environnement (amont et proximal),
- questionner les enjeux et les menaces autour de la préservation de cet habitat en s'appuyant sur les dynamiques actuelles (observation) et sur les mémoires environnementales inscrites dans les tufs (rétro-observation),
- fédérer les acteurs et institutions impliqués dans la gestion, la préservation des milieux et des ressources associées aux tufs,
- conduire des expérimentations de restauration sur 5 tufières présentant des états et des enjeux de conservation distincts sur des zones biogéographiques différentes à l'échelle du bassin Rhône-RA,
- construire un plan d'actions « *Marathon du tuf* » sur 42 tufières avec une mise en œuvre ultérieure à cette première démarche (possiblement en 2024),
- et enfin diffuser la connaissance avec la publication d'un guide de gestion et de restauration des tufs (cahier technique) et l'organisation d'une journée d'échanges techniques.

Le projet se déroulera en trois phases complémentaires conduites conjointement sur certains axes notamment entre les phases 2 et 3. Il sera encadré par un comité de pilotage (CoPil) rassemblant les représentants des porteurs et des partenaires du projet (publics, privés, associatifs) ainsi que des personnes ressources expertes *ad hoc*.

1 Les tufières : des objets complexes à la croisée de la géodiversité et de la biodiversité ...

Les tufières sont des objets complexes, étroitement liées à leur environnement où les contextes hydrogéologique, géographique, climatique et anthropique déterminent leur développement. A la croisée de plusieurs disciplines (biologie, géographie, physique-chimie, etc.), ces systèmes arborent des morphologies diverses.

Sans une approche pluridisciplinaire et systémique, leur compréhension est difficile de par leurs fonctionnements, leurs temporalités et leurs fonctionnalités multiples. Leur complexité fait également de cet habitat un milieu remarquable et fragile, dont le moindre déséquilibre peut conduire à sa détérioration.

1.1 Définition : Tufière / Tuf / Travertin / Cratoneurion

Les termes « Tuf, Travertin, Cratoneurion et Tufière » sont loin d'être des termes synonymes. Pourtant dans la littérature, les deux premiers sont souvent utilisés indistinctement, bien qu'ils désignent des accumulations carbonatées différentes :

Tuf

Dépôt carbonaté **très poreux, vacuolaire, tendre, friable**, dans lequel se lie les bryophytes et les débris végétaux encrustés (Vaudour, 1981 ; Muxart, 1981 ; et Weisrock, 1981). Parfois des éléments extérieurs provenant du proche environnement (clastes, blocs, troncs d'arbres...) peuvent le composer.

Un tuf correspond à des **dépôts holocènes** (postérieurs à la dernière glaciation) exprimant les **dynamiques hydrogéologiques et hydrogéomorphologiques actuelles**.



©Lecornu E.

Travertin

Ancien tuf dont les vides ont été colmatés par des écoulements incrustants durant des **temporalités longues et plus anciennes (Mio-Pliocène et Quaternaire ancien)** (Pentecost, 1981 ; Vaudour, 1986 ; Delannoy et al., 1993, 1999). Le dépôt s'apparente à une **roche non poreuse et très indurée**.

Pour certains, le mot travertin désigne la roche produite en conditions d'hydrothermalisme, alors que le tuf calcaire désigne la roche produite dans une eau froide (Curie, 2013).



©Lecornu E.

Tufière

Zone de production de tuf, active ou héritée, dont l'accrétion génère des édifices tufeux. Ce terme, aussi bien utilisé par les géomorphologues pour désigner des morphologies exokarstiques que par les écologues pour identifier un milieu, rend compte de la nature hybride de cet habitat liés à des processus de dissolution/précipitation bio-physico-chimiques.



Cratoneurion

Le Cratoneurion correspond à l'une des alliances phytosociologiques rattachée à l'habitat d'intérêt communautaire "Sources pétrifiantes avec formation de travertins". Il s'agit d'un **terme relevant du registre de la phytosociologie** (renvoyant à un habitat), quand **tufs et travertins relèvent de la géographie physique** en désignant un dépôt sédimentaire.



Par souci de simplification, les différents termes ne sont pas distingués dans le document car ils s'appuient sur des travaux ayant des rigueurs terminologiques différentes. Néanmoins, durant le projet Rezoh-tuf, les termes tufs et tufières sont les appellations employées par les différents acteurs en réponse aux formations carbonatées rencontrées et étudiées.

Les tufs sont le siège de biotopes associés à des conditions environnementales spécifiques (Gaudillat et al., 2018). Un édifice tufeux est un système devant être considéré comme un habitat, même si certains espaces sont exempts de végétation visible (secteur en pied de cascade ou éloigné du point de source avec des écoulements moins incrustants).

A l'échelle Européenne, l'ensemble de ces édifices carbonatés s'inscrit dans l'annexe 1 de la Directive « *Habitat Faune, Flore* » comme habitat d'intérêt communautaire prioritaire « *Sources pétrifiantes avec formation de travertins (Cratoneurion)* ». Par leur caractère vulnérable et remarquable, les tufières s'inscrivent également dans des outils de gestion et de protection, tels que les sites Natura2000, les ENS ou encore des arrêtés préfectoraux.

L'habitat « **Sources pétrifiantes avec formation de travertins (Cratoneurion)** » (UE 7220* habitat d'intérêt communautaire prioritaire) correspond à des formations végétales développées au niveau des sources ou des suintements, sur matériaux carbonatés mouillés issus de dépôts actifs de calcaires donnant souvent des tufs (dépôts non consistants) ou des travertins (roche calcaire indurée). La composition floristique est assez variée et dominée souvent par des bryophytes très spécialisées. [...]

Leur fragilité est souvent liée à la petitesse des biotopes d'accueil et à la vulnérabilité des conditions écologiques requises pour leur développement. La gestion de cet habitat s'appuie sur l'exclusion de toute perturbation d'ordre physico-chimique, biologique et structural.

Cet habitat de zones humides est relativement peu documenté et peu étudié (origine des eaux des tufières, dynamiques d'encroûtement, fonctionnalités, évolution en lien avec l'anthropisation et le changement climatique, ...). Cependant les tufières constituent un véritable réservoir tant en matière de biodiversité pour la faune et la flore remarquables qu'elles accueillent qu'en terme d'archives environnementales.

Résultats du dernier rapportage (2013-2018) sur l'état de conservation des sources pétrifiantes au sein du domaine biogéographique **alpin**

Code UE	Aire de répartition	Surface	Structure et fonctions	Perspectives futures	État de conservation
7220*	Favorable	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnu

Résultats du dernier rapportage (2013-2018) sur l'état de conservation des sources pétrifiantes au sein du domaine biogéographique **continental**

Code UE	Aire de répartition	Surface	Structure et fonctions	Perspectives futures	État de conservation
7220*	Favorable	Défavorable inadéquat	Favorable	Favorable	Défavorable inadéquat

Résultats du dernier rapportage (2013-2018) sur l'état de conservation des sources pétrifiantes au sein du domaine biogéographique **atlantique**

Code UE	Aire de répartition	Surface	Structure et fonctions	Perspectives futures	État de conservation
7220*	Inconnu	Inconnu	Défavorable inadéquat	Défavorable mauvais	Défavorable mauvais

Résultats du dernier rapportage (2013-2018) sur l'état de conservation des sources pétrifiantes avec au sein du domaine biogéographique **méditerranéen**

Code UE	Aire de répartition	Surface	Structure et fonctions	Perspectives futures	État de conservation
7220*	Défavorable mauvais	Défavorable mauvais	Défavorable mauvais	Défavorable mauvais	Défavorable mauvais

Le dernier relevé d'état de conservation des espèces et des habitats d'intérêt communautaire associés au Cratoneurion (UMS PatriNat, 2019) fait mention pour la période 2013-2018 en France d'un état de conservation « *inconnu* » pour l'aire biogéographique alpine, d'un état « *défavorable inadéquat* » concernant le domaine continental et d'un état « *défavorable à*



mauvais » pour les domaines atlantique et méditerranéen. Ce rapport s'appuie sur les travaux menés par l'UMS PatriNat (MNHN et OFB). Cette étude de référence, réalisée dans le cadre du rapportage DHFF une évaluation de l'état de conservation des tufières tous les six ans à l'échelle des régions biogéographique, hors et en site Natura2000.

Actuellement la conservation de ce patrimoine et les stratégies de protection autour de celui-ci restent insuffisantes. Pour autant, ces dernières années les tufières font l'objet d'un regain d'intérêt de la part des communautés scientifiques et naturalistes. Des projets, réalisés par des gestionnaires d'espaces naturels soucieux de protéger et restaurer cet habitat, émergent progressivement à l'échelle locale. Les laboratoires universitaires, quant à eux, voient des sujets de recherche porteurs. En effet, la complexité de fonctionnement de ces objets leur accorde un rôle d'indicateur des changements environnementaux potentiellement associés à l'anthropisation et au dérèglement climatique.

1.2 Processus de fonctionnement généraux

Tout au long de leur parcours souterrain, notamment dans les zones épikarstique et supérieure du karst, les eaux se chargent en carbonates à mesure de la dissolution des assises calcaires.

Selon le contexte géologique et géomorphologique, les paramètres de minéralisation diffèrent entre des aquifères karstiques, poreux drainant des assises carbonatées ou hydrothermales. En système karstique, ce travail de dissolution est essentiellement conditionné par la présence de CO_2 dans la couverture bio-pédologique. En période biostatique (Gachon, 1957), un couvert végétal dense se forme et favorise la formation d'un sol. L'activité biologique, induite notamment par la respiration d'organismes vivants (racines, bactéries, champignons), produit d'importantes quantités de CO_2 dans les sols. Lors de leur percolation, les eaux météoriques se chargent en CO_2 biogénique. Devenues acide, les eaux d'infiltrations contribuent ainsi à la genèse d'un réseau de vides dans l'assise calcaire (Bottner, 1972 ; Nicod, 1984 ; Perrette, 1999) (Figure 2). Ainsi, les aquifères karstiques sont plus sensibles aux variations de la couverture bio-pédologique, résultants de l'anthropisation ou du changement climatique, que les aquifères hydrothermaux et les bassins molassiques potentiellement affectés par ces modifications sur des périodes plus longues.

En sortie d'exutoire, les écoulements deviennent, le plus souvent, sursaturés en carbonate de calcium (CaCO_3) (Bakalowicz, 1992 ; Couchoud, 2008). Les concentrations élevées en carbonates dissous évoluent relativement rapidement en fonction des environnements présents et des processus de dépôt prédominants. Ainsi, les eaux en mouvement modèlent perpétuellement les tufières par des phénomènes de dissolution et de précipitation du CaCO_3 , résultant de processus bio-physico-chimiques. Chacun de ces processus, décisifs dans le dépôt ou l'érosion des carbonates, est déterminé par les contextes hydrogéologique, géographique, climatique et anthropique du système tufeux. Selon les caractéristiques environnementales rencontrées par les eaux incrustantes, un ou plusieurs mécanismes de formation peuvent être prédominant dans la précipitation de la calcite.



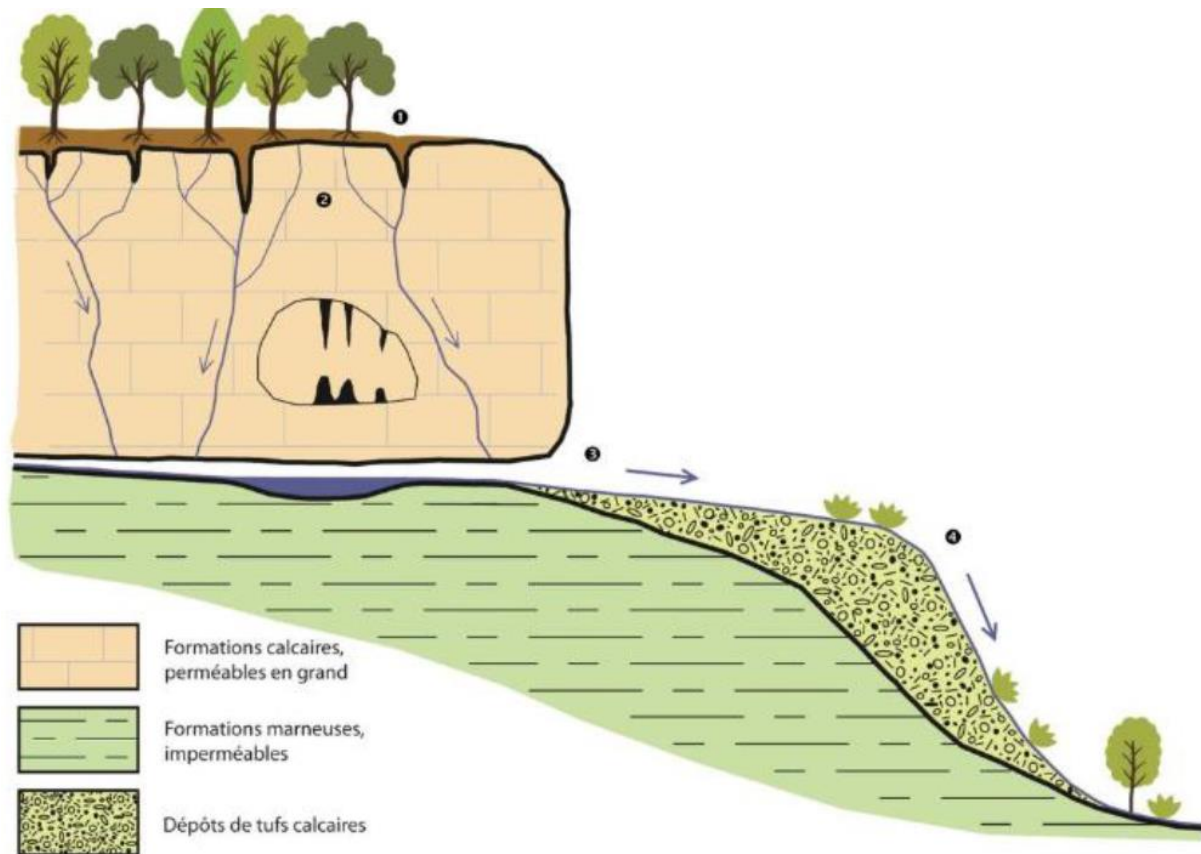


Figure 2 : Représentation schématisée, en coupe, d'un système tufeux de source issu du déplacement rapide des équilibres. Géoparc des Bauges.

Processus chimiques :

Les processus chimiques sont principalement conditionnés par des changements d'état de l'eau entraînant des rééquilibrages de sa pression partielle en CO_2 ($p\text{CO}_2$ est la pression exercée par un gaz tel que le CO_2 dans un mélange). Deux facteurs majeurs influencent plus ou moins rapidement ces changements : l'arrivée de l'eau dans un environnement moins confiné d'un point de vue aérologique (milieu extérieur) et la température de l'eau.

L'eau sous-saturée ou saturée en carbonates sourde au terme du système hydrogéologique par un exutoire. La $p\text{CO}_2$ de l'air en milieu exokarstique post-exurgence, plus faible que celle de l'eau issue du réseau de fissuration plus confiné, entraîne un rééquilibrage physico-chimique des eaux *via* le dégazage du CO_2 dissous. Plus la surface de contact entre les écoulements et l'air est élevée et plus la libération du CO_2 est rapide. La solution devient alors saturée ou sursaturée en carbonates et se traduit par la précipitation des carbonates en excès (Bakalowicz, 1992 ; Perrette, 1999 ; Couchoud, 2008).

La température des écoulements issus du karst se réajuste en sortie de source en se réchauffant. La solubilité du CO_2 décroît lorsque la température de l'eau augmente (Corbel, 1959 ; Muxart, 1981). Le dégazage du CO_2 s'opère tout en accentuant la sursaturation en carbonates de la solution et déclenche ainsi le dépôt de tuf. Ce phénomène est particulièrement marqué en adret du fait de l'ensoleillement qui réchauffe plus ou moins rapidement les écoulements.

Ajouté à cela, les températures externes, parfois élevées, peuvent occasionner des phénomènes d'évaporation de l'écoulement. La compétence de stockage de l'eau diminue et entraîne de nouveau la précipitation du carbonate de calcium (Zhang, 2001). Si l'évasion du CO_2 est généralement instantanée, le déplacement des équilibres demande en revanche quelques secondes à quelques minutes. Avec la circulation de l'eau, la précipitation des carbonates intervient très rarement à l'emplacement où se libère le CO_2 (Hoffmann, 2005). Cela est particulièrement perceptible à l'amont des tufières en sortie d'exutoire. Selon les contextes, la précipitation des carbonates peut dans un premier temps être essentiellement commandée par le réchauffement de l'eau. Le dépôt de tuf survient ainsi plusieurs mètres voire kilomètres à l'aval de la source si aucune confluence avec des eaux non saturées en CaCO_3 n'a lieu.

Processus physiques :

Les facteurs physiques résultent principalement d'un changement rapide de l'hydrodynamisme des écoulements (Mazet, 1988). Trois effets majeurs découlent de ces dynamiques et sont contrôlés, d'une part, par l'accélération des vitesses d'écoulement et d'autre part, par un relief accidenté avec des ruptures de pente (Zhang, 2001, Chen et al., 2004). Lorsque le relief est pentu, la vitesse d'un écoulement concentré accélère et les eaux deviennent turbulentes. L'air atmosphérique suit ce courant et est aspiré puis emprisonné dans l'eau. Une multitude de bulles d'air sont alors présentes au sein de l'écoulement et augmentent de façon significative la surface de contact entre l'eau et l'atmosphère (Chanson, 1995). Cet « effet d'aération » induit une accélération des échanges entre l'air et l'eau et se traduit par un dégazage du CO_2 (Figure 3).

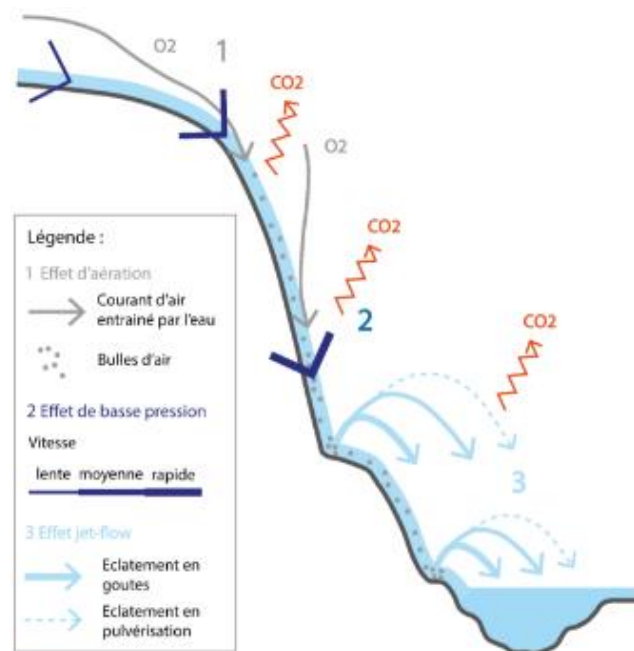


Figure 3 : La topographie en rupture de pente vecteur des mécanismes de précipitation des carbonates dissous. Lecornu, 2020.

De plus, la turbulence des écoulements entraîne parfois des collisions entre les ions dissous et accentue la vitesse des réactions chimiques telles que le rééquilibrage entre le CaCO_3 et le CO_2 dissous (Chen et al., 2004).

Par ailleurs, plus la vitesse d'un fluide est grande moins sa pression est importante. L'eau en mouvement a donc une plus faible pression qu'un écoulement lent ou qu'une masse d'eau statique. Par ailleurs, selon la loi de Henry, la solubilité d'un gaz est faible si la pression du fluide l'est aussi. Ainsi, lorsque la vitesse d'un écoulement augmente et que sa pression diminue la solubilité du CO_2 diminue et favorise son dégazage. Cet « effet de basse pression » se retrouve notamment sur les parcours cascadants (Chen et al., 2004 - Figure 3).

A l'approche d'une rupture de pente ou d'un obstacle (branche ou bloc), l'écoulement génère le plus souvent une cascade. La morphodynamique de l'eau se traduit, dans ce contexte, par une division de l'écoulement en une multitude de filaments, gouttes voire microgouttelettes, soit un ensemble de facteurs qui augmente considérablement l'interface eau-air et la libération du CO₂ dissous dans l'atmosphère (Weistock, 1981 ; Zhang et al., 2001). Ce phénomène est appelé « *l'effet jet-flow* » (Figure 3) (Zhang et al, 2001 ; Chen et al., 2004).

Ces trois effets, caractéristiques des écoulements cascadants, accélèrent par dégazage de CO₂ la précipitation des carbonates dissous et la formation de tuf. De nombreuses études ont démontré le rôle de la turbulence sur des sites *in-* et *ex-situ* (laboratoire) dans la précipitation des carbonates (Jacobson et al., 1975 ; Herman et al. 1987 ; Liu et al., 1994 ; Chen et al., 2004). Les reliefs cascadants, les fortes pentes et la présence de rugosités au sol (branches, blocs, etc.) sont donc déterminants dans les mécanismes de précipitation du tuf et interviennent aussi dans l'oxygénation abondante des écoulements. Ce dernier facteur est essentiel au développement d'organismes vivants (mousses, algues, bactéries).

Processus biologiques :

Les organismes vivants, tels que les bryophytes, les algues et les bactéries, jouent un rôle dans les mécanismes de précipitation et de dépôt de carbonate. Associés étroitement les uns aux autres, ils sont les principaux acteurs de la bio-carbonatogénèse. Parmi eux, deux grandes familles se distinguent, les chlorophylliens (bryophytes, algues, certaines bactéries) et non-chlorophylliens (bactéries).

Chaque acteur chlorophyllien contribue en journée à l'absorption du CO₂ dissous par le principe de la photosynthèse. Le rapport entre le CO₂ et le CaCO₃ dissous est de nouveau déséquilibré et déclenche la précipitation de la calcite en cas de sursaturation. A l'inverse, la nuit ces organismes assimilent l'O₂ contenu dans les écoulements, ce qui explique leur présence dans des milieux fortement oxygénés (cascade, succession de gradins en relief pentu). Leur répartition spatiale, tient également compte des niveaux et de la turbulence des eaux. Ainsi, les bryophytes sont davantage présentes à proximité d'écoulements turbulents tandis que certains organismes algobactériens colonisent des eaux plus calmes afin de bénéficier d'une luminosité plus importante (Hoffmann, 2005).

Le plus souvent, les mousses réalisent principalement la carbonatogénèse au niveau de leur système racinaire et servent de support à des bactéries ou micro-algues incrustantes (Adolphe, 1986, Adolphe et al., 1991). Leur développement dans les écoulements fournit aussi un substrat à la nucléation de la calcite en mouvement dans l'eau (Zhang et al., 2001). De plus, leur morphologie ramifiée accroît la surface de contact entre l'interface eau-air et participe au dégazage partiel du CO₂.

Pour certaines algues et bactéries, l'assimilation de CO₂ durant leur croissance enclenche un phénomène de carbonatogénèse à l'intérieur ou sur la membrane de l'organisme. Ces individus deviennent le support de la calcite qu'ils ont eux-mêmes synthétisée et participent aux processus de bio-cristallogenèse. (Adolphe et al., 1991 ; Castanier et al., 1998). De façon



plus passive, certaines bactéries subissent les déséquilibres chimiques déclenchés par leurs supports (bryophytes et algues) et sont intégrées aux dépôts précipités.

Les bactéries non-chlorophylliennes peuvent suivre ces mêmes principes d'absorption du CO₂ pour leurs développements et/ou la synthétisation de leurs nutriments. Celles-ci sont aussi bien présentes en milieu endo et exo-karstique et contribuent partiellement aux dynamiques incrustantes. (Le Metayer-Levrel et al., 1997 ; Castanier et al., 1998).

Conclusion de la 1^{ère} partie

La sensibilité des tufières, face à de multiples perturbations, déséquilibre leur fonctionnement et conduit à des états de conservation recensés comme « *défavorables* ».

Leurs dynamiques de formation bio-physico-chimique sont difficiles à appréhender en raison des multiples champs disciplinaires concernés, travaillant généralement de manière cloisonnée. Cette complexité limite la compréhension de cet habitat, ce qui amène à la définition d'état de conservation « *inconnus* ». Toutefois, cette même complexité de fonctionnement permet aux systèmes tufeux d'avoir de nombreuses fonctionnalités et aménités environnementales.



2. ... aux enjeux de conservation variés ...

Les tufières, souvent confondues avec les travertins, sont considérées comme des réservoirs d'une biodiversité remarquable par les écologues et comme des mémoires des environnements passés par la communauté scientifique.

Leur fonctionnement complexe, faisant appel à plusieurs champs disciplinaires, offre à ce milieu de multiples fonctionnalités répondant à des enjeux socio-écologiques majeurs dans un contexte de changement climatique. En parallèle, la complexité d'une tufière associée à son étroite relation avec son environnement, rend cet habitat vulnérable et sensible face à de nombreuses perturbations souvent d'origine anthropique.

2.1 Les fonctionnalités

[Archives environnementales :](#)

Les dépôts carbonatés, notamment issus des massifs karstiques, sont des systèmes sensibles aux évolutions de leur environnement, induites par des variations d'ordre géochimique, géomorphologique, climatique ou anthropique. Leurs réactions se traduisent par des modifications de faciès et des phases d'arrêt ou d'accélération de l'accumulation carbonatée (Ollivier, 2006).



*Figure 4 : Empreintes foliaires fossilisées.
Edytem, 2007.*

L'analyse des tufières ou des travertins, peut fournir des renseignements sur les paléoenvironnements et les dynamiques de fonctionnement de leur hydrosystème amont. Contrairement aux spéléothèmes, ces formations ont l'avantage d'être corrélables avec d'autres types de dépôts sédimentaires (colluvions, alluvions, sols, ...), avec des éléments morphologiques du paysage à différentes échelles (surface emboîtée, terrasses, ...) et des restes fossiles de leur biotope (Magnin et al., 1991). En effet, la présence de feuilles, bois, pollens, macrofaunes, charbons de bois, vestiges archéologiques incrustés, en abondance pour certains, sont les **témoins des environnements passés** et, dans une moindre mesure, des niveaux d'occupation anthropique (Figure 4).

Ainsi depuis les années 80, les formations carbonatées ont souvent conduit à des actions de recherche multidisciplinaire pour la richesse des enregistrements qu'elles renferment, comme

le démontrent ces nombreuses références : « *Les édifices travertineux et l'histoire de l'environnement dans le midi de la France* » (Vaudour, 1988) ; « *Milieus et anthropisation à l'Holocène en Méditerranée occidentale à partir des sites karstiques* » (Vernet et Vaudour, 1988-1990) ; « *Climate-induced changes in Holocene calcareous tufa formations, Bohemian Karst, Czech Republic* » (Zak et al., 2002) ; « *Freshwater tufa record from Spain supports evidence for the past interglacial being wetter than the Holocene in the Mediterranean region* » (Dominguez-Villar et al., 2011) « *Holocene palaeoenvironments from the Direndall tufa (Luxembourg) reconstructed from the molluscan succession and stable isotope records* » (Granai, 2020).

Fonctionnalités biogéochimiques :

Outre leurs rôles d'archives environnementales, les dépôts carbonatés et plus particulièrement les tufières arborent de nombreuses fonctionnalités d'ordre hydrogéologique, hydrogéochimique et biologique, dues à la complexité de leurs fonctionnements et de leurs morphologies. Ces milieux, qui s'insèrent souvent dans des contextes environnementaux anthropisés, jouent un **rôle tampon en modifiant les conditions d'écoulement, améliorant la qualité de l'eau et fournissant un écosystème refuge**.

Les édifices tufeux apparaissent en une diversité de morphologies, dont la majorité forme des écoulements en cascades de hauteur variable, souvent associés à des bassins. Lors de conditions climatiques extrêmes (crues ou sécheresses) leur morphologie et leur porosité ont tendance à **ralentir les vitesses d'écoulements** et à **maintenir un certain niveau d'eau** préservant ainsi les ressources anthropiques (pérennisation de la ressource en eau, réduction des risques d'inondation) et la biodiversité. Leur caractère incrustant et poreux, peut également **piéger des sédiments en suspension** et améliorer la qualité de l'eau en diminuant la charge totale présente.

Le développement d'organismes vivants incrustants, présents notamment à la surface des formations tufeuses, permet la biominéralisation de la calcite (Casanova, 1981). Ce processus, induit par les bryophytes, les algues et les bactéries, **limite l'eutrophisation du milieu en filtrant les dérivés de l'azote (nitrate et nitrite) et du phosphore (phosphate et ortho-phosphate)** issus principalement des activités humaines (engrais agricole, eaux usées, ...). Selon les taux présents, un effet de rétroaction positif peut se produire. Les écoulements enrichis en azote peuvent agir comme un engrais accélérant le développement des organismes incrustants et ainsi l'aggradation des édifices tufeux. En retour un processus de dénitrification se produit et améliore la qualité des eaux. Les écoulements incrustants de Fossil Creek (Arizona, USA), dont le débit d'origine a été restauré en 2005, en sont de bons exemples. Sur un parcours de 22,4 km la concentration de nitrates entrants, inchangée depuis la restauration et mesurée à 125 µg N/L, est dorénavant absorbée par la biomasse pour atteindre 2,7 µg N/L à l'aval du parcours.

La précipitation du tuf peut également être liée au cycle du phosphore par un phénomène de coprécipitation entre la calcite et le phosphate (Otsuki et Wetzel, 1972 ; Dittrich et al., 1997). Les microorganismes, représentés par les cyanobactéries, sont les principaux responsables de

ce mécanisme de biominéralisation (Souza-Egipsy et al, 2006). Leurs actions réduisent les concentrations de phosphores dissous et de ce fait les risques d'eutrophisation.

Fonctionnalités biologiques :

Concernant la fonctionnalité biologique, les tufières constituent des écosystèmes rares et remarquables. Reconnu comme habitat d'intérêt communautaire prioritaire au titre de la Directive Habitat, un système tufeux héberge de nombreuses espèces de faune et de flore, inféodées ou présentes de manière irrégulière.

Les formations tufeuses s'inscrivent également dans des contextes d'écosystèmes en mosaïque, parmi lesquels sont retrouvés des habitats associés ou en contacts. Ces milieux connexes constituent des lieux de vie temporaires ou permanents pour des espèces faunistiques ou floristiques. Ainsi, certaines espèces sont parfois indirectement associées aux tufières et mènent seulement une partie de leur cycle biologique en zone humide (reproduction, chasse, etc.).

D'un point de vue floristique, on retrouve plusieurs espèces très spécialisées, conditionnées par la permanence d'une humidité élevée, d'une ou plusieurs veines liquides courantes, en contexte carbonaté. La végétation est dominée par les bryophytes telles que *Brachythecium rivulare*, *Bryum pseudotriquetrum*, *Cratoneuron filicinum* et *Palustriella commutata*. Parfois une strate herbacée plus ou moins dense se développe comme des Saxifragacées (*Saxifraga aizoides*, *Micranthes stellaris*, etc.), des Brassicacées (*Arabis soyeri* subsp. *subcoriacea*, *Cochlearia pyrenaica*, etc.) et des Cypéracées. Dans ce milieu, la présence d'algues telles que *Calothrix* ou *Phormidium* est relativement variable.

Au niveau faunistique, les secteurs à tuf hébergent des espèces caractéristiques des zones humides, parfois rares et remarquables. La diversité et la richesse spécifique sont entièrement dépendantes du contexte biogéographique et de la physionomie du site (exposition, pente, vitesse du courant, morphodynamique de l'écoulement, présence de bassins, ...). Des amphibiens, des reptiles, des papillons, des libellules, mammifères, ... peuvent y être observés. Selon les contextes, les espèces remarquables suivantes peuvent par exemple être rencontrées : salamandre tachetée (*Salamandra salamandra*), écrevisse à pattes blanches (*Austropotamobius pallipes*), codulégastre annelé (*Cordulegaster boltoni*) et codulégastre bidenté (*C. bidentata*), ou encore de l'agrion de mercure (*Coenagrion mercuriale*) (Villaret, 2019) (Figure 5).

Les formations tufeuses représentent également des refuges pour des espèces partiellement inféodées à cet habitat et dérangées durant leur cycle biologique. Selon les contextes, le rôle de refuge peut être de plusieurs ordres. D'une part thermique, en offrant des îlots de fraîcheur permettant à certaines espèces de perdurer en période de sécheresse. D'autre part salubre, par son rôle tampon face aux pollutions anthropiques. Et enfin, de quiétude face aux activités anthropiques temporaires ou permanentes invasives.



Figure 5 : Salamandre tachetée (*Salamandra atra*) à proximité d'une tufière de Savoie et larve de *Cordulegaster bidentata* sur une tufière de l'Ain. Delcourt & Lecornu 2022.

2.2 Les services rendus

Les sites tufeux représentent pour l'Homme une multitude de ressources tant matérielles qu'immatérielles. Cette roche, définie comme légère et facile à travailler, a souvent servi dans la construction pour ses qualités thermique, phonique et d'induration (durcie avec le temps). Elle se retrouve dans les monuments d'art (cloché d'église, pont, ...), les fortifications comme celle de Vauban à Briançon (Hautes-Alpes, France) ou plus communément dans les cheminées des habitations. Quelques carrières, notamment de travertin fossile, sont encore actives pour la production de dallage. Cependant, l'inscription de ce milieu à l'annexe 1 de la Directive « *Habitat Faune Flore* » comme habitat d'intérêt communautaire prioritaire limite dorénavant les projets d'extraction.



Figure 6 : Cascade du lac du Double Dragon à Jiuzhaigou (Province du Sichuan, Chine) contemplée par les visiteurs. Xinhua, 2020.

Dans les paysages karstiques, les tufières font partie des morphologies les plus impressionnantes, attrayantes et accessibles, et dont les valeurs scientifiques et esthétiques sont universellement reconnues. Leurs attractivités, font de ces sites des lieux culturels, récréatifs, éducatifs et de quiétude pour un large public. Certaines tufières, alors considérées comme des géopatrimoines, sont des leviers pour le développement territorial par leur mise en tourisme comme les exemples des lacs de Plitvice (Croatie) inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO et accueillant chaque année environ 1,5 million de touristes ou encore les tufières de la réserve naturelle nationale de Jiuzhaigou (Chine) visitées par 5,1 millions de personnes par an (Figure 6). Plus localement, de nombreuses tufières font l'objet de valorisation et de promotion touristiques. Ces dernières sont les jardins pétrifiants de la Sône (Isère), avec pour objet central les cascades de tuf ; le cirque de Choranche (Isère) et le site de Rolampont sillonnés tout deux par un sentier dédié à la visite de tufières. (Megerle, 2021).

2.3 Les pressions et menaces

En présence d'un hydrosystème non perturbé et de conditions bio-physico-chimiques constantes, cet habitat intrinsèquement fragile peut rester stable. En revanche, de par sa complexité de fonctionnement, le moindre déséquilibre d'ordre physique par la modification des dynamiques d'écoulement ou chimique avec l'altération de la qualité des eaux peut générer des dysfonctionnements le détériorant.

Ajouté à cela, les caractéristiques d'un système karstique rendent difficile la définition du bassin d'alimentation d'une tufière, dont le périmètre est souvent différent de son bassin versant topographique. L'échelle d'analyse d'un système tufeux est ainsi relativement floue et génère la recherche de son Espace de Bon Fonctionnement (EBF). Cet espace est défini comme une étendue périphérique à la zone humide, au sein de laquelle se déroulent des processus écologiques qui garantissent la pérennisation de cette dernière. L'EBF s'avère déterminant pour la résilience écologique de la zone humide, c'est-à-dire sa capacité à conserver ou recouvrer un bon état de fonctionnement écologique à la suite de perturbations (événements naturels, effets du changement climatique, pressions d'origine humaine) (Chambaud et al., 2018).

Selon le degré atteint, la dégradation peut soit s'avérer irréversible ou alors être atténuée voire supprimée par des mesures de restauration.

Les modifications physiques de l'écoulement :

Dans les hydrosystèmes, l'un des principaux facteurs de dysfonctionnement est la modification des dynamiques d'écoulements, considérée comme une *variable maitresse* (Poff et al., 1997). Celle-ci perturbe les processus géomorphologiques, l'habitat, les températures et les régimes de l'écoulement qui, à leur tour, déterminent la distribution, l'abondance et l'activité des organismes d'eau douce (Gibson et al., 2017).

Nécessitant des apports en eau pérennes et constants, les systèmes tufeux peuvent évoluer vers des états dégradés en cas de modifications de l'alimentation et de l'écoulement de l'eau. Leur réactivité, très rapide face à ce type de perturbations, les rend d'autant plus sensibles et vulnérables notamment en contexte de changement climatique. Les principaux forçages

anthropiques, détériorant les dynamiques d'écoulement et l'état de conservation d'une tufière, sont le prélèvement, la canalisation et la dérivation de l'eau ainsi que la casse des formations tufeuses.

En France, les hydrosystèmes karstiques couvrent 40 % des besoins en eau potable. L'eau captée, généralement au niveau des sources, génère parfois des dépôts de tuf en sortie d'exutoire. Dans ce contexte, les tufières sont alimentées artificiellement par les trop-pleins aux écoulements concentrés construits à l'aval des captages. (Figure 7).

Ce type d'aménagement prend rarement en compte leurs dynamiques d'alimentation naturelles et perturbe leurs fonctionnements par divagation notamment et leurs fonctionnalités, comme pour les exemples des tufière de Darne (Saint-Martin-de-Clelles, 38) et de la Touvière (Jarsy, 73). Par leurs morphologies, ces deux systèmes avaient à l'origine des modes d'alimentation diffus par de multiples sources. La perte de débit, d'environ 60 % pour la tufière de la Touvière, associée à la modification de leur dynamique d'alimentation, génère un enchainement de dysfonctionnements. Ceci débute par l'assèchement temporaire ou permanent de plusieurs secteurs, tels que d'anciens parcours tufeux ou les abords des principaux écoulements. Une dynamique ligneuse peut alors s'installer tout en renforçant la diminution du débit, compte tenu des besoins en eau de la végétation, et en limitant le réchauffement de l'écoulement par la faible infiltration de la lumière (Figure 8).



Figure 7 : Trop-pleins alimentant la tufière de Darne (Isère, France). Lecornu, 2022.



Figure 8 : Parcours cascading de la tufière de Darne (Isère, France) envahi par une végétation ligneuse. Lecornu, 2022.

Toutefois, dans une moindre mesure, l'ombrage et le phénomène d'évapotranspiration, produit par la couverture forestière, apportent une certaine fraîcheur et humidité atmosphérique favorables au développement de bryophytes.

Qu'il s'agisse de résineux ou de feuillus, une végétation ligneuse dense apporte une grande quantité de matière organique (chute des feuilles ou d'aiguilles) relativement difficile à évacuer dans des systèmes en perte de débit. Le comblement des tufières de Darne et de la Touvière par accumulation de matière organique freine sinon bloque le processus de la photosynthèse en asphyxiant les organismes chlorophylliens (bryophytes, algues et bactéries). Dans ce contexte, la richesse biologique s'appauvrit et les processus favorables au dépôt se réduisent.

La dérivation permanente ou temporaire et la canalisation des écoulements entraîne également ce type d'évolution vers des stades climaciques sur les secteurs devenus inactifs. La tufière de la Touvière en est également un bon exemple, par la présence de deux chenaux contraignant l'écoulement. Les paléo-parcours tufeux, asséchés par la dérivation des eaux pour limiter l'inondation des parcelles agricoles à l'aval, laissent dorénavant place à une végétation spontanée de feuillus et de résineux.

En présence de ce type d'aménagement, le rétablissement des régimes et des dynamiques naturels d'écoulement est essentiel pour restaurer les écosystèmes d'eau douce (Palmer et al., 2014) et tufeux. Le cas de Fossil Creek en Arizona (USA) en est un exemple parfait. Fossil Creek est un cours d'eau formant des travertins et dont l'activité biologique et biogéochimique est relativement élevée sur les tronçons en terrasse (Malusa et al. 2003, Fuller et al. 2011). Issue de 7 sources, Fossil Creek s'écoule sur 22,4 km jusqu'à sa confluence avec la rivière Verde. De 1909 à 2005, un barrage de 8 m de haut a détourné la quasi-totalité de l'écoulement initial (1200 L/s) en dehors du lit du cours d'eau pour la production hydroélectrique. Cet aménagement relativement lourd, a réduit de façon significative le débit, la précipitation de travertin et la formation de barrages de travertin (Figure 9).

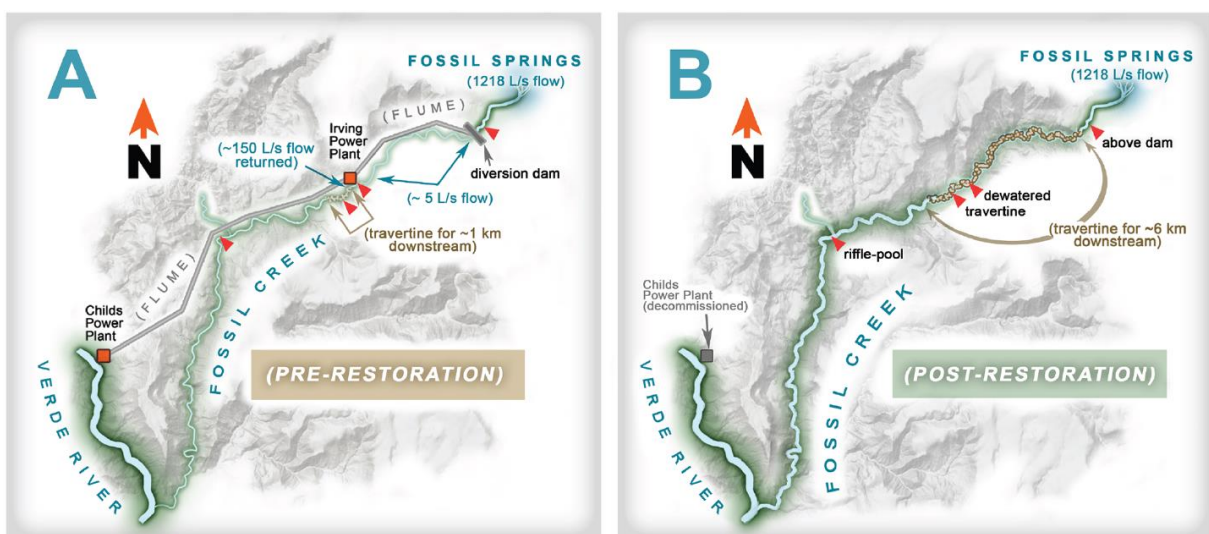


Figure 9 : Dynamique d'écoulement avant (carte A) et après la restauration du régime initial (carte B) de Fossil Creek (Arizona, USA). Gibson, 2017.

La mise hors service de la centrale hydroélectrique et le démantèlement du barrage en 2008 ont permis de rétablir le débit initial du cours d'eau et sa dynamique naturelle (Figure 9).

La restauration de l'écoulement initial a rétabli de multiples processus écosystémiques dans Fossil Creek. Les tronçons restaurés ont connu une augmentation de dépôt de travertin 10 à 100 fois supérieure depuis le démantèlement des aménagements hydroélectriques. Cette augmentation est probablement le résultat d'une plus grande quantité de CaCO_3 disponible associée à un dégazage plus élevé de CO_2 dû à l'amélioration des processus de dépôt (Fuller et al., 2011 & Florsheim et al. 2013).

Les barrages et les bassins de travertin génèrent une mosaïque d'habitats riches et augmentent significativement la production primaire brute (Gross Primary Productivity = GPP). Par définition, la GPP est la quantité d'énergie assimilée par les producteurs primaires (végétaux chlorophylliens et cyanobactéries capables d'effectuer la photosynthèse et de créer de la biomasse à partir de dioxyde de carbone et de lumière solaire) sur une unité de surface et par unité de temps. Malgré 100 ans d'absence presque totale d'eau, la GPP de l'ensemble du cours d'eau a en moins de 3 ans doublé (1,5-5,2 g O_2 m^{-2} d^{-1}) se rapprochant des valeurs types des conditions de références (Gibson et al, 2017).

Enfin, la restauration du débit a également eu des effets sur l'absorption de l'azote dissous pour les organismes chlorophylliens. Avant et après la restauration de Fossil Creek, les sources à l'amont continuent de fournir un taux en azote (N) constant, estimé à 125 $\mu\text{g N/L}$. L'augmentation de la production primaire brute occasionne une demande en azote par les organismes vivants plus importante. Ainsi, la majeure partie de N dissous est dorénavant éliminée par le principe de la dénitrification pour atteindre à l'aval de Fossil Creek seulement 2,7 $\mu\text{g N/L}$ (Gibson et al, 2017).

Ces données démontrent que la restauration des dynamiques d'écoulement initiales d'un écosystème incrustant peut parvenir à rétablir ses fonctionnalités. Toutefois, selon les enjeux présents sur un site, rétablir le débit initial est parfois impossible. L'objectif est alors de restaurer les dynamiques d'écoulement naturel ou bien les plus propices au dépôt de carbonate comme sur la tufière des sources du Bontey à Plancherine (Savoie, France). Situées en système karstique, les sources du Bontey sont depuis le début du XXème captées pour l'alimentation en eau potable de la commune de Plancherine. En 2011, la vétusté du captage a conduit à sa réfection et à une modification du dispositif d'évacuation de l'eau fournissant un débit moyen estimé à 5 L/s (mesure prise entre juin et novembre). L'écoulement, autrefois restitué à l'aval du parcours tufeux, alimente dorénavant la tufière mesurant 120 m de long pour une surface active de 650 m^2 en période



Figure 10 : Trop-plein du captage des sources du Bontey avant les travaux de restauration conduits en 2020. CEN Savoie, 2017.

d'étiage (CEN Savoie, 2017). Compte tenu de la morphologie du site, la restitution du trop-plein d'eau en un seul écoulement concentré a pour conséquence de limiter le dépôt des carbonates et la surface active de la tufière (Figure 10). En effet, d'après la géomorphologie de la formation tufeuse, les arrivées d'eau devaient être multiples et se poursuivre en plusieurs écoulements laminaires fins associés à quelques écoulements concentrés.

La restauration en 2020 des dynamiques d'écoulement de la tufière, par un réseau de tuyau en PVC souple, a permis de déconcentrer le trop-plein en plusieurs écoulements afin de reproduire les dynamiques naturelles et réalimenter des secteurs inactifs (Figure 11).

Pour l'instant, le temps écoulé depuis les travaux de restauration et les dispositifs de suivi mis en place (plaques témoins pour suivre le dépôt de tuf et inventaires naturalistes) ne permettent pas d'évaluer concrètement la réussite des aménagements.

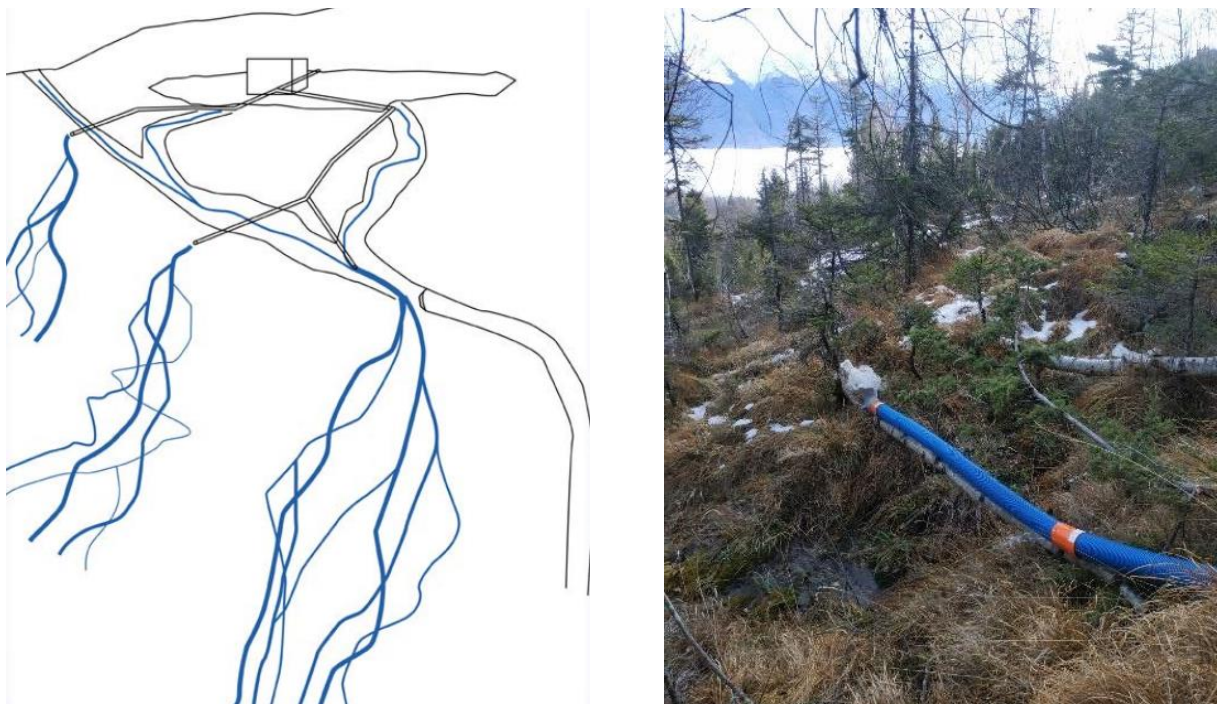


Figure 11 : Plan de la restauration des dynamiques naturelles des écoulements par l'installation de tuyaux en PVC. PNRMB, 2020.

Les morphologies construites progressivement par les processus de précipitation du tuf finissent par contrôler en partie la dynamique d'un écoulement (morphodynamique et direction).

La prévention des risques d'inondations et les pratiques agricoles ont généré une modification des systèmes aquatiques par recalibrage des zones actives. Surtout conduits dans les années 50 à 80, ces travaux ne considéraient pas les dynamiques naturelles des hydrosystèmes et ont profondément dégradé leurs fonctionnalités. Les conséquences en sont une homogénéisation des écoulements et des habitats, une dynamique d'incision des cours d'eau et une accentuation des étiages défavorables à la biodiversité comme peut en témoigner la rivière incrustante du Céou (Lot, France) (Le Gall, 2016). Le Céou est un cours d'eau en système fluvio-karstique recouvert sur certains tronçons de gours tufeux formant des seuils naturels (Figure 12). D'une longueur de 50 km, le fonctionnement de cet hydrosystème est sujet à plusieurs

dysfonctionnements induits par de lourds travaux de curage relativement anciens et la casse de barrages tufeux. La dynamique actuelle du cours d'eau révèle, d'une part, une nette incision de la rivière favorisant le transport de matériaux solides et de ce fait l'érosion des écosystèmes en fond de lit, et d'autre part, un assèchement estival complet ou partiel dû aux phénomènes d'incision et de perméabilité du lit.



Figure 12 : Barrage de tuf du Céou, Le Gall, 2014.

Pour améliorer l'état et le fonctionnement de ce cours d'eau incrustant, des travaux de restauration, conduits en 2014, ont reconstruit une topographie favorable à la formation de gours tufeux. En s'inspirant des processus de précipitation des carbonates, des amorces de gours, tels que des rondins et des blocs, ont été placées au fond du lit perpendiculairement au sens d'écoulement (Figure 13). Les objectifs sont d'inverser le processus d'enfoncement et de diversifier les fonctionnalités du milieu par la création de zone refuges pour la biodiversité en période estivale (bassin d'eau à l'amont des barrages tufeux) (Beline, 2006 ; Le Gall, 2016).



Figure 13 : Barrage artificiel composé de blocs et en cours d'encrouement. Le Gall, ap 2014.

D'après les observations de la Fédération de pêche du Lot, les aménagements répondent aux objectifs en formant des barrages encrouetés de tuf. Cependant, par faute de moyens humains, les suivis préalables prévus pour constater la réussite des travaux n'ont pu être réalisés.

Les modifications de la qualité de l'eau :

En système karstique, les variations physico-chimiques de l'eau sont dépendantes des conditions hydrogéologique, morphologique, bioclimatique, physique et anthropique (Vaudour, 1986 ; Nicod, 1986)

La singularité de l'état physico-chimique des eaux incrustantes génère des milieux tout autant uniques que vulnérables aux moindres déséquilibres chimiques d'origine anthropique. La modification de la qualité de l'eau, aux effets relativement difficiles à appréhender, est l'un des principaux dysfonctionnements dégradant les systèmes tufeux. Celle-ci inhibe la précipitation du tuf et appauvrit les écosystèmes et les fonctionnalités d'une tufière. Les principales actions anthropiques, altérant l'état physico-chimique des eaux incrustantes sont les pollutions, l'acidification des écoulements et des sols et enfin la surfréquentation.

L'environnement d'une tufière définit son fonctionnement et son état de conservation. Selon les activités anthropiques pratiquées dans son espace de bon fonctionnement (EBF), un système tufeux peut être confronté à plusieurs types de contamination détériorant l'état des eaux incrustantes. Ces contaminations peuvent être issues, d'une part, des pratiques agricoles par l'utilisation d'engrais (dérivés de l'azote et de phosphore) ou de matières organiques (déjection du bétail), et d'autre part, de l'urbanisation par le rejet des eaux usées (débordement des stations d'épuration, rejets sauvages) ou le salage hivernal des réseaux routiers notamment. En ce sens, les systèmes tufeux de grande envergure et/ou présents dans des zones géographiques favorables aux développements d'activités anthropiques sont davantage sensibles aux diverses pollutions.

Compte tenu des fonctionnalités d'une tufière, à partir d'un certain seuil ces intrants bloquent la formation de tuf et détériorent la richesse et la diversité spécifique, comme en témoigne l'exemple des travertins de l'Oued Aggaï (Sefrou, Maroc). La rivière de l'Oued Aggaï, longue de 26 km sur le piémont du Moyen Atlas, génère des cascades de travertin au niveau des ruptures de pente hautes de plusieurs mètres (Lahsaini, 2014). Des relevés réguliers ont démontré une nitrification des eaux et un enrichissement en orthophosphate issus d'engrais agricoles et des eaux usées. Les teneurs mesurées s'élèvent à 0,93 et 15,8 mg/L pour les nitrates, à 0,35 et 4,57 mg/L pour les orthophosphates et enfin à 0,77 et 13,7 mg/L pour le phosphore (Gourari, 2000). Ces concentrations inhibent la précipitation des carbonates par l'acidification des eaux et s'accompagnent d'une réduction importante des organismes vivants acteurs dans la coprécipitation de la calcite et des phosphates (Henrikson et Brakke, 1988 ; Gourari, 2000).

Les sites enrichis peuvent également être sujets à des phénomènes d'eutrophisation provoqués par la prolifération d'algues. Ces organismes recouvrent alors les communautés bryophytiques et les font dépérir par asphyxie (effets phytotoxiques algaux) (Figure 14).



Figure 14 : Eutrophisation de la tufière d'Imbours (Ardèche, France). Les bryophytes présentes sont asphyxiées par la prolifération excessive des algues. Lecornu, 2021.

Face à ce type de dysfonctionnement, la restauration des formations tufeuses s'appuie principalement sur le rétablissement du fonctionnement des systèmes hydrologiques qu'elles intègrent. En premier lieu, l'amélioration de la qualité physico-chimique des eaux par la réduction des polluants à l'échelle du bassin-versant est la mesure de gestion prioritaire. Viennent ensuite des mesures de gestion et de restauration plus « classiques » concentrées sur la tufière. Toutefois, le bassin d'alimentation d'une formation tufeuse est rarement connu, en raison de la difficulté à le définir. Les travaux de restauration des eaux incrustantes polluées sont ainsi rares voire inexistantes.

L'état physico-chimique des écoulements tufeux peut également être déséquilibré par les couvertures forestières au sein et à l'amont des formations carbonatées. Bien que les peuplements forestiers aient la capacité d'absorber certains polluants, leur présence acidifie inévitablement le sol et diminue les débits par l'absorption racinaire. Les résineux, ainsi que les hêtres et les chênes, renforcent ce processus d'acidification notamment lorsque leur croissance est rapide (Nilsson et al., 1982). En système tufeux la présence de ces essences entraîne l'assimilation de minéraux dissous (ions ammonium NH_4 , calcium Ca , magnésium Mg , ...) et la libération de CO_2 conduisant à l'inhibition de la précipitation des carbonates (Ponge, 2019). De plus, la litière des conifères est difficilement décomposable et tend à s'accumuler. Les écoulements ont alors tendance à s'acidifier au contact de l'humus composé majoritairement d'aiguilles et les macrophytes sont asphyxiés ou ne peuvent se développer (Bonneau, 1984).

De façon indirecte, les couvertures arborées et notamment celles des résineux persistants ont une influence sur les variations thermiques des eaux de surface. Leur présence, à proximité d'une zone humide, réduit dans un premier temps, l'ensoleillement et donc le mécanisme de

la photosynthèse, et dans un deuxième temps, diminue la température de l'eau (jusqu'à 4 °C, CSPNB, 2008) et le dégazage du CO₂.

Par la présence de conifères, les taux d'accumulation de tuf régressent et la biodiversité est relativement pauvre comme l'on démontré de premiers relevés naturalistes dans le cadre du projet Rezoh-tuf sur la tufière de la Touvière (Savoie, France) (Figure 15)

En présence de ce type de peuplement, reformer un couvert forestier clairsemé est primordiale pour restaurer, dans un premier temps, un état physico-chimique de l'eau favorable à la genèse du tuf, et dans un deuxième temps, une diversité d'habitats. Les tufières des sources du Bontey et de Termignon (Savoie, France) sont en cours d'expérimentation pour ce type de restauration. En parallèle de la restauration de la dynamique naturelle d'écoulement des sources du Bontey, des travaux de coupe et d'arrachage des résineux ont été menés en 2019 à l'amont de la tufière et sur les secteurs de nouveaux actifs (Figure 16). Depuis, la dynamique ligneuse s'est stabilisée et ne recolonise pas la tufière.



Figure 15 & 16 : Enrésinement de la tufière de la Touvière (Savoie, France) à gauche. Restauration de la tufière des sources du Bontey (Savoie, France) par la coupe des résineux à l'amont à droite. Lecornu, 2022.

La tufière de Termignon, d'une superficie de 0,58 ha et alimentée par 33 sources, subissait une fermeture progressive par les conifères sur 70 % de sa surface (39 % épicéa, 30 % sapin, 17 % de pin sylvestre, 14 % autres résineux). Leurs implantations se concentraient en périphérie de la zone active et également entre les ruissellements principaux (Ferreira et al, 2020). Tout comme la tufière des sources du Bontey, une première phase de travaux, conduite

en 2021, consistait à mener des actions d'arrache et de coupe des ligneux sans pour autant intervenir sur les dynamiques d'écoulement. Pour l'instant, le temps écoulé depuis les travaux de restauration et les dispositifs de suivi mis en place (suivi botanique tous les 5 ans) ne permettent pas d'évaluer la réussite des aménagements.

En raison de l'accroissement de l'activité touristique et d'extérieur (activités de sports et loisirs de nature) depuis plusieurs décennies, ces deux tufières et bien d'autres à travers le monde ont subi des dégradations induites par la surfréquentation. Pour exemple, le nombre de visiteurs sur les tufières de la réserve naturelle nationale de Jiuzhaigou (Chine) est passé de 27 000 en 1984 à 5,1 millions en 2015, soit une augmentation du nombre de visites multiplié par 189 en l'espace de 31 ans (Liu, 2017).

La fréquentation de masse ou même mineure est inadaptée à la fragilité des systèmes tufeux et à la vulnérabilité de leurs cortèges faunistiques et floristiques. Par leurs pratiques, les visiteurs, randonneurs, cyclistes, canyonistes ou pêcheurs érodent et cassent les dépôts de tuf et entraînent la mise en suspension de particules (Figure 17). Un écoulement turbide limite l'infiltration de la lumière dont dépendent les microorganismes incrustants pour la formation de tuf. Dans le parc national de Plitvice, la dégradation des barrages de tuf, due à un tourisme incontrôlé, a atteint un tel niveau que l'UNESCO a envisagé de retirer ce site à sa liste du patrimoine mondial (Golubic, 2008 ; Megerle, 2021).

En contexte de changement climatique, une pression accrue est attendue par les gestionnaires des sites en raison des aménités environnementales apportées par les tufières (ilot de fraîcheur et zone de baignade). La crise sanitaire a également amplifié ce phénomène sur des tufières locales et peu connues, sans réels aménagements touristiques contrôlant le flux de visiteurs. C'est le cas des cascades de tuf d'Urach et de Güterstein (Jura Souabe, Allemagne), qui ont également subi la présence excessive de visiteurs, randonneurs et cyclistes aux comportements inappropriés dus à un manque de connaissances autour des espaces naturels. La surfréquentation de ces sites a généré la création de nombreux sentiers en dehors des itinéraires officiels et l'érosion du système tufeux. Une enquête a démontré que 80 % des visiteurs ont conscience des effets négatifs de cette pratique sur la biodiversité (faune et flore) et seulement 60 % ont connaissance de leur impact sur les tufières (Megerle, 2021).



Figure 17 : Erosion de la tufière des Vauthières (Haute-Savoie, France) par la fréquentation du sentier du Chéran. Les aménagements installés (rondins de bois) sont inefficaces face à ce dysfonctionnement. Lecornu, 2022.

Pour gérer ces comportements inappropriés et restaurer indirectement les tufières, plusieurs opérations de gestion et d'aménagement se sont mis en place afin de trouver un équilibre entre protection et valorisation des sites. Les autorités locales des tufières d'Urach (Jura Souabe, Allemagne) et de Cuisance (Jura, France) ont mis en place un périmètre d'exclos temporaire pour la première et permanent par arrêté préfectoral pour la deuxième. L'office de tourisme Cœur du Jura a également associé au périmètre de protection une plaquette d'information sensibilisant les visiteurs aux bonnes pratiques à adopter.

Le site tufeux de Skradinski Buk dans le parc national de Krika (Croatie) a pour des raisons de sécurité et de protection des formations carbonatées limité le nombre de visiteurs à 10 000 personnes à la fois (Golubic, 2008).

Enfin sur de nombreuses tufières des aménagements, tels que des plateformes, des sentiers et des panneaux d'information, ont été construits afin de canaliser les flux touristiques et sensibiliser les visiteurs. C'est notamment le cas pour les sites des sources du Bontey (Savoie, France), de Termignon (Savoie, France), de Choranche (Isère, France) ou de Rolampont (Haute-Marne, France).

En prenant seulement le cas des sources du Bontey, la plateforme et les panneaux d'information construits en face de la tufière permettent de découvrir le fonctionnement et les vulnérabilités de cet habitat tout en préservant le site de l'érosion.

Analyse critique des REX :

La capacité des gestionnaires à établir les conditions dans lesquelles une restauration de l'état physico-chimique de l'eau et d'un régime d'écoulement fonctionnel conduit à la récupération fonctionnelle des milieux aquatiques est souvent entravée par une difficulté à comprendre le fonctionnement complexe des systèmes tufeux et un manque de suivi pour mesurer le succès de la restauration (Palmer et al., 2014).

Les quelques retours d'expériences trouvés à l'échelle internationale sont en faible nombre face aux nombreuses tufières dont l'état de conservation est défini « *dégradé* » par les gestionnaires. Les exemples trouvés et présentés sont également majoritairement récents sans publication de résultats. Ces points, dans un premier temps, soulignent une prise en compte récente de l'état de conservation des formations tufeuses et l'intérêt nouveau des gestionnaires dans la compréhension du fonctionnement complexe de cet habitat. Dans un deuxième temps, ces remarques et les échanges conduits avec les opérateurs locaux révèlent un manque de diffusion des études portant sur les tufières au sein des réseaux intéressés (scientifique, gestionnaire d'espace naturel, politique).

Pour l'instant, ce manque de connaissances des opérateurs locaux et de diffusion de la connaissance, notamment en France, limite le lancement de projets de restauration des tufières encore novateurs.

Conclusion de la 2^{ème} partie

Les tufières sont des objets complexes tant dans leurs fonctionnements que dans leurs fonctionnalités. Leur définition est ainsi difficile notamment lorsqu'elles sont abordées par

des approches mono ou bi-disciplinaires comme le montrent les nombreuses références dans la littérature.

Cette complexité de fonctionnement permet aux tufières d'avoir des fonctionnalités multiples, tout en étant des objets vulnérables et menacés par de nombreuses perturbations anthropiques (captage, canalisation, dérivation, extraction, pollution, acidification, surfréquentation, ...). Leur fragilité relève de leur étroite connexion entre leur environnement, pouvant entraîner des modifications de leurs dynamiques d'écoulement et de l'état physico-chimique de l'eau, et leur état de conservation.

Ajouté à cela, le manque de connaissances sur le fonctionnement d'un système tufeux par les gestionnaires et l'absence de diffusion à large échelle de retours d'expériences limitent le démarrage d'actions de restauration.



3. ... commençant à être considérés et cartographiés par les acteurs du territoire bassin Rhône-RA ...

Par leur définition et leur fonctionnement, les tufières sont des objets relativement difficiles à distinguer et à appréhender par les gestionnaires d'espaces naturels. Pour autant, leur inscription à la liste des habitats d'intérêts communautaire prioritaire de l'annexe I de la directive « *Habitat, Faune Flore* », génère la définition d'objectifs relatifs à l'amélioration de la connaissance, puis, à la préservation/restauration des sites référencés. Ces actions, bien avancées sur quelques territoires et au stade d'ébauche voire absentes sur d'autres, fournissent les données nécessaires à la construction d'un bilan cartographique.

3.1 Méthodologie de compilation des données cartographiques :

Le bilan cartographique s'appuie, dans un premier temps, sur une extraction des habitats comprenant le code Corine 54.12 « *Sources d'eaux dures* » et/ou le terme « *Tuf* » dans les Inventaires départementaux des Zones Humides (IZH) (surfaciques et ponctuelles). Ces informations, issues de données *open source*, peuvent toutefois présenter certains biais à considérer. Les zones humides référencées dans les IZH et identifiées par un code Zone Humide (ZH) s'apparentent à des mosaïques d'habitats supérieures à 1 ha (zh surfaciques) et pouvant contenir un système tufeux. Les surfaces des zones humides issues de cette base de données ne représentent donc pas forcément les envergures réelles des tufières inventoriées. Egalement, ces inventaires non exhaustifs peuvent être imprécis par l'absence de renseignements comme le code Corine. Pour cette raison, certaines tufières recensées par des associations naturalistes ou des syndicats de rivières ont un code ZH mais ne figurent pas dans l'IZH.

Enfin, dans un deuxième temps, le bilan cartographique repose sur une méthode dite de « l'opportunité ». Celle-ci consiste à se rapprocher par mail, appel téléphonique ou lors de rencontres des acteurs du territoire, concernés de près ou de loin par les tufières, afin de recueillir des données plus locales. Plusieurs avantages ressortent de ces échanges menés entre décembre 2021 et septembre 2022, le premier est l'obtention d'une vision globale des actions mise en place sur le territoire (inventaire des tufières, définition des enjeux, des pressions et/ou de l'état de conservation) et le deuxième de cibler les secteurs prioritaires pour des campagnes de prospections, la définition d'état de conservation ou la programmation d'actions de restauration.

Les acteurs contactés sont :

- L'agence de l'eau RMC
- L'Office Français de la Biodiversité (OFB)
- Les Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (EPTB)
- Les syndicats gestionnaires de rivières et d'espaces protégés



- Les Conservatoires des Espaces Naturels (CEN)
- Les Conservatoires Botaniques Nationaux (CBN)
- Le Muséum National d'Histoire Naturel (MNHN)
- Les Parcs Naturels Régionaux (PNR)
- Les Parcs Nationaux (PN)
- Les gestionnaires de Réserves Naturelles (RN)
- Des scientifiques et naturalistes
- Les fédérations et associations de pêche, de canyonisme et de spéléologie
- Les communautés de communes lorsque certains secteurs manquaient de données

Toutefois, cette méthode d'appel à participation repose exclusivement sur l'implication des opérateurs locaux et dont les retours sont relativement hétérogènes dans le cadre du projet Rezoh-tuf.

Par souci de lisibilité et d'homogénéisation des données, les tables attributaires de la base des données compilées (IZH et données collectées auprès des acteurs locaux) ont dans un premier temps été formatées en se référant au logiciel de bancarisation de données Gwern. Cet outil, développé par le Forum des Marais Atlantiques, facilite la saisie et la caractérisation des zones humides et permet également d'avoir une même structuration des données sur le territoire. Dans un deuxième temps, plusieurs champs ont été ajoutés aux tables attributaires comme le type d'encroulement (continu ou discontinu), l'état de conservation, les remarques (enjeux, pressions, environnements) et le niveau de priorité d'intervention (défini par les opérateurs locaux) afin d'harmoniser et conserver les informations transmises, et enfin, cibler les zones prioritaires (Fig. 18).

tuf_IZH_centroide_L93 — Total des entités: 171, Filtrées: 171, Sélectionnées: 1

	id	Hab	Nom_tuf	Code_ZH	Nom_ZH	Dpt	Encroumt	Etat	Remarque	Source_BD	Priorite
1	13	Tufiere	Cascades de Co...	01IZH1739	Ruisseau de la ...	1	NULL	Moyen	Regis K-J : Vaste ...	NULL	NULL
2	63	Tufiere	NULL	26CCVD0186	Sources tufeuse...	26	Continus	Moyen	Voie routiere cou...	CCVD	2
3	146	Tufiere	Tufiere de Traize	73CPNS3032	Tufiere de Traize	73	Continud	Moyen	MNHN : Au nord ...	CEN Savoie	2
4	59	Tufiere	Tufiere de Gue	26CCVD0155	Prairies humide...	26	Discontinus	Moyen	Chemin carrossa...	CCVD	3
5	64	Tufiere	NULL	26CCVD0187	Ruisseau de Lau...	26	Continus	Moyen	Selon les secteurs...	CCVD	2
6	29	Tufiere	Tioure	07ONFk0006	Ruisseau du Tio...	7	Continus	Mauvais	Secteur inactif, pi...	ONF	1
7	50	Tufiere	Les RiviÃ res	26CCVD0100	Tufiere les Rivie...	26	Continus	Mauvais	MNHN : Tufiere c...	CCVD	NULL
8	122	Tufiere	Tufiere de Darne	38TE0012	Tufiere de Darne	38	Continus	Mauvais	Captage AEP a la...	TE	1

Figure 18 : Table attributaire de la base de données Rezoh-tuf. Ifreemis, 2023

3.2 Etat de conservation des tufières recensées

Par la méthode précédemment définie, le bilan cartographique des tufières du bassin Rhône-RA repose sur la compilation des bases de données suivantes :

- Les Inventaires départementaux des Zones Humides (CEN et open source)
- Le Plan d'Action tufière du Massif des Bauges (PNRMB)
- L'inventaire du Syndicat Mixte Interdépartemental d'Aménagement du Chéran

- L'inventaire du Groupe de Recherche et de Protection des Libellules « *Sympetrum* »
- Les données de terrain de l'UMS Patrinat pour le guide d'évaluation de l'état de conservation des « *Sources pétrifiantes avec formation de travertins (Cratoneurion)* »

Lors de chaque acquisition d'une nouvelle base de données une juxtaposition avec les bases de données déjà obtenues est effectuée pour vérifier la présence ou non de tufières doublons. Ainsi le nombre total de tufières recensées est de 547 sites répartis de façon hétérogène. Parmi les données acquises, la définition de l'état de conservation s'applique à seulement 210 tufières, soit un peu moins 1/3 des tufières recensées. Au total sur le bassin Rhône-RA, 122 tufières sont évaluées en bon état de conservation, 53 en état intermédiaire/moyen et enfin 35 en mauvais état (Fig. 19, 20 & 21).

	Non défini	Bon	Moyen	Mauvais	Total
IZH	144	19	5	3	171
GRPLS	67	24	20	14	125
PNRMB	0	62	12	7	81
SMIAC	126	0	0	0	126
MNHN	0	8	9	6	23
Ifreemis	0	9	7	5	21
Total	337	122	53	35	547

Figure 19 : Nombre de tufières à l'état de conservation évalué. Ifreemis, 2023

Ces données sont définies par des opérateurs issus de champs disciplinaires et de structures différentes. Leurs niveaux de connaissance des dynamiques, des fonctionnements et des fonctionnalités d'un système tufeux peuvent être relativement éloignés et influencent les résultats obtenus. Ainsi, sans grille d'évaluation standardisée, ces résultats sont issus d'interprétation individuelle et sont à relativiser.

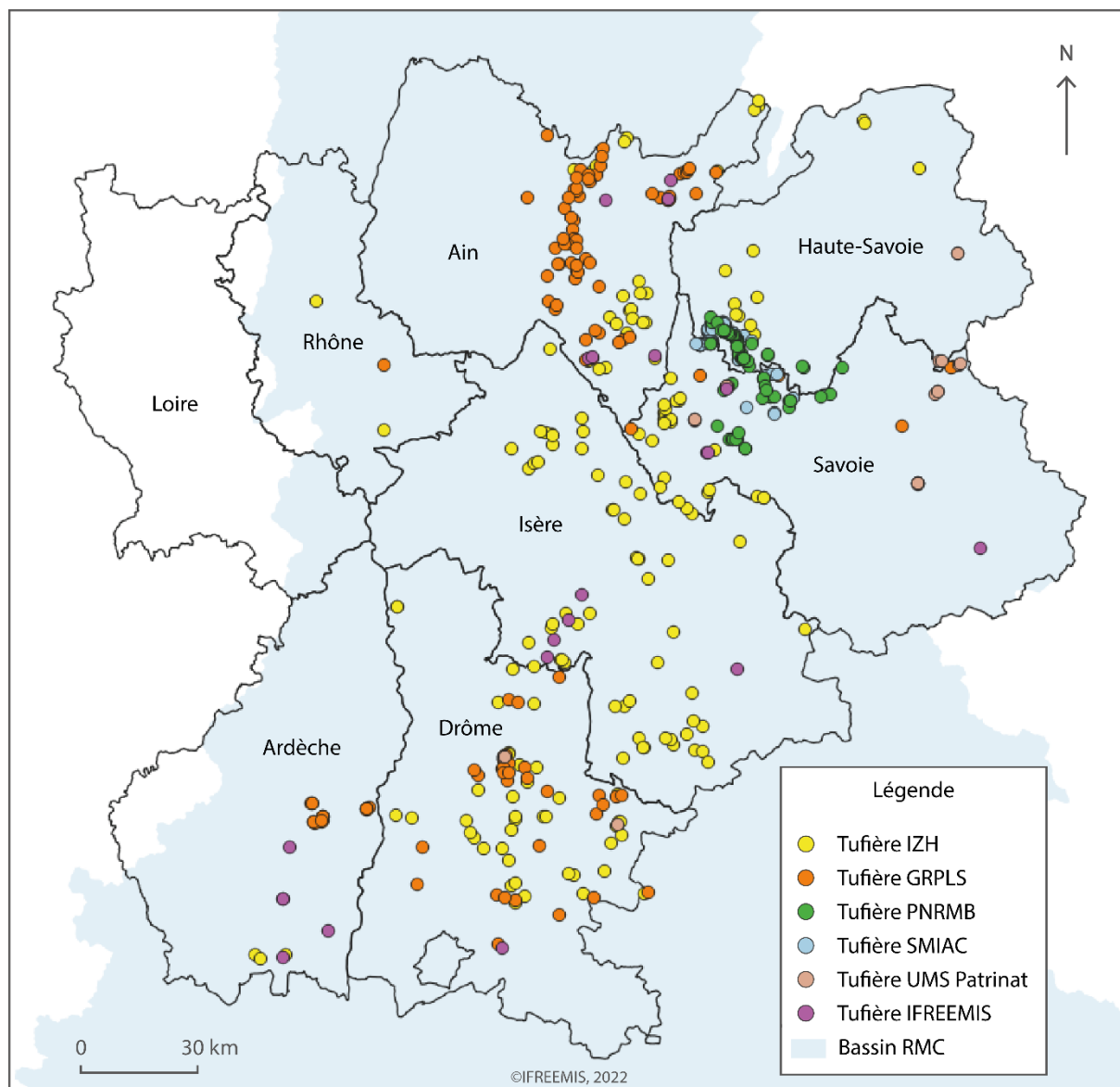


Figure 20 : Localisation des 547 tufières recensées dans le bassin Rhône-RA. Ifreemis, 2023

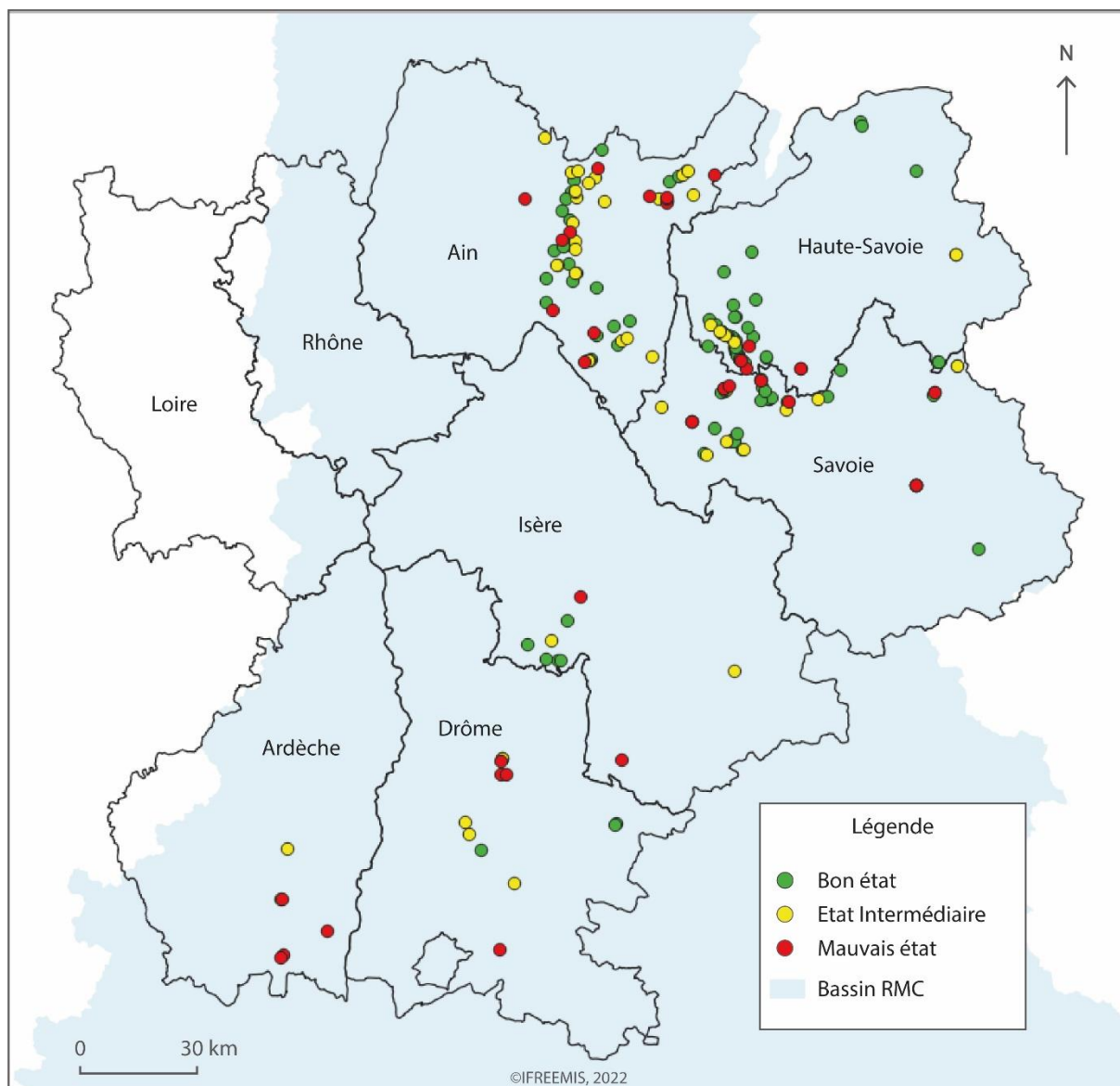


Figure 21 : Localisation des 210 tufières à l'état de conservation défini dans le bassin Rhône-

3.3 Analyse critique des résultats obtenus

En considérant les contextes (hydrogéologique, géomorphologique) présents dans le bassin Rhône-RA, le nombre de tufières recensées s'avère relativement restreint. Ce résultat reflète un manque de phases prospectives et de données locales (naturaliste, dynamique, enjeux, pressions, ...) sur cet habitat. Les chiffres obtenus peuvent également être rattachés à un taux de retours à l'appel à participation peu élevé.

Cette première analyse peut également être associée à un constat ressenti après plusieurs échanges auprès d'acteurs variés. Les opérateurs locaux ont une connaissance hétérogène, mono-disciplinaire et s'arrêtant souvent aux aspects biologiques de l'habitat. Les fonctionnements bio-physico-chimiques, les dynamiques hydromorphologiques, les fonctionnalités et les menaces relatives aux tufières sont à l'échelle de leur système souvent

méconnues. Le manque de rapportage notamment systémique et de diffusion des données, particulièrement à l'échelle nationale et régionale, limite l'acquisition de données par les gestionnaires d'espaces naturels et accentue la méconnaissance des systèmes tufeux.

Ainsi, la prise en considération des formations tufeuses dans les stratégies de gestion et d'action est relativement restreinte et parfois peu adaptée au type de tufières et d'échelle rencontrées. Egalement, l'évaluation de l'état de conservation d'une tufière se révèle difficile en l'absence de méthodologie normalisée et reproductible par les gestionnaires.

Conclusion de la 3^{ème} partie

Les tufières sont des objets difficiles à appréhender tant leur définition au sens large reste abstraite. Le manque de diffusion des données acquises et de connaissances des opérateurs locaux sur le sujet justifie le nombre relativement faible de tufières recensées et d'états de conservation définis. Ce bilan cartographique, issu en grande partie de la connaissance des opérateurs locaux, est donc illusoire par rapport à l'état réel du territoire étudié. Un besoin de compléter la connaissance par des phases de prospection et d'évaluation de l'état de conservation des tufières, ainsi que l'instauration d'inventaires participatifs visant les acteurs concernés (randonneurs, canyonistes, pêcheurs) s'avère prioritaire.



4. ... et dont la typologie structuro-fonctionnelle reste à définir.

La complexité d'un système tufeux, nécessite de définir son fonctionnement en le classant par type afin de faciliter sa compréhension, sa gestion et sa restauration. Sur un simple bilan de la connaissance, dont le contenu souligne des manques, il s'avère difficile d'établir une typologie structuro-fonctionnelle (au sens du fonctionnement) des tufières. Plusieurs études se sont essayées à ce travail descriptif en restant toujours relativement sommaires tant les possibilités sont variées : Fabre (1986), Pentecost (2005), Hoffmann (2006), Lyons & Kelly (2016), Lecornu (2020).

La construction d'une typologie exhaustive commence par la définition d'indicateurs descriptifs afin, d'une part, de cadrer les différents contextes physiques environnant une tufière, et d'autre part, de caractériser les formations issues de ces contextes. Ainsi, nous proposons d'élaborer une stratégie novatrice en analysant les tufières par une approche systémique. Celle-ci est particulièrement adaptée aux milieux complexes en privilégiant l'étude globale d'un système par la transdisciplinarité et en s'appuyant sur des visions multiscalaires et multitemporelles. De ce fait, le cadre physique des tufières sera tout d'abord décrit avant de définir les formations tufeuses en tant que telles.

4.1 Cadres physiques des tufières :

Les tufières sont des systèmes, dont l'édification et le fonctionnement sont incontestablement contrôlés par les cadres physiques qu'elles intègrent. Leurs contextes hydrogéologiques, géographiques, géométriques et végétal, relativement variés, multiplient les types de dynamiques de fonctionnement et ainsi les formes des systèmes tufeux.

Contextes hydrogéologiques :

Les eaux souterraines traversent par infiltration, le long de plans de fissures et/ou de lacunes intergranulaires interconnectées les couches sédimentaires. Selon le contexte géologique rencontré, les régimes des écoulements souterrains peuvent avoir une grande variabilité et générer plusieurs types d'hydrosystèmes propices à la carbonatogénèse. Parmi eux, les principaux sont les hydrosystèmes karstiques, molassiques drainant ou reposant sur des assises carbonatées, et hydrothermaux. Les tufières, définies comme un sous-ensemble de ces systèmes, voient leurs dynamiques largement influencées par ces trois régimes.

Les **hydrosystèmes karstiques** ont pour caractéristique une perméabilité en grand, bien que la masse rocheuse les composants ne soit autre que du calcaire, défini comme imperméable. Cette perméabilité résulte de deux faiblesses utilisées par les eaux météoriques ; les jeux de fractures et de joints de strates, et la solubilité du calcaire en présence d'eau chargée en CO₂. Les eaux vont parcourir ce réseau pour sortir au niveau d'une source, dès lors qu'une différence altimétrique est présente. Au fil du temps, les eaux chargées en CO₂ biogénique dissolvent et élargissent les fissures augmentant ainsi la perméabilité des massifs (Figure 22).



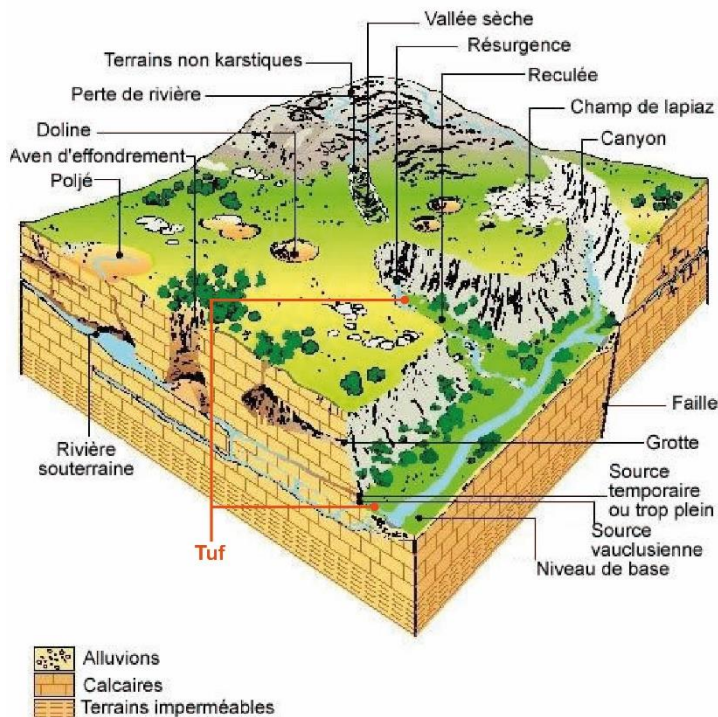


Figure 22 : Représentation schématisée d'un système karstique. D'après Bakalowicz (1999) modifié par Lecornu, 2022.

Le temps de séjour de l'eau est relativement court en comparaison aux autres aquifères et est généralement compris entre quelques heures à quelques jours. Cette temporalité dépend du niveau d'élargissement des vides karstiques (un réseau fortement élargi à une réponse plus rapide) et de la taille du bassin hydrographique souterrain.

Cette réponse relativement rapide face aux précipitations occasionne dans les tufières des régimes très variables en fonction de la saisonnalité. Les hauteurs d'eau peuvent ainsi évoluer brusquement lors d'intempéries ou à la fonte des neiges en générant des crues. A l'inverse, en période estivale les tufières ont un débit d'étiage relativement restreint et irrégulier

pouvant assécher la majorité ou la totalité de la surface active. Le contexte climatique actuel, accentue la durée et la fréquence de ces périodes de sécheresse et augmente ainsi la durée d'assèchement des systèmes tufeux.

Les **systèmes molassiques** drainant ou reposant sur des assises carbonatées correspondent souvent à des réseaux d'écoulement souterrain locaux recouverts de dépôts quaternaires d'épaisseur variable. Les eaux météoriques alimentent le système par infiltration gravitaire le long de plan de fissuration ou de stratification.

La perméabilité de ces hydrosystèmes est très variable et dépend des différents paléo-processus (sédimentation, déformation par la tectonique des plaques, compaction durant l'âge glaciaire, altération par les eaux superficielles) à l'origine des sédiments détritiques actuels. Le temps de transit jusqu'aux sources, généralement dispersées, peut-être de quelques jours à quelques années selon la perméabilité de l'aquifère (Balderer 1990).

Les sources molassiques sont le plus souvent en nombre important avec des débits plutôt faibles, de l'ordre de quelques dizaines de litres par minute (Hesske, 1995).

L'évolution de l'état physico-chimique de l'eau dans ces systèmes, dit amortis, souligne des fluctuations saisonnières et les effets du contexte anthropique (nitrates, phosphates, chlorures). Au cours de l'étiage, la minéralisation des eaux augmente légèrement et démontre l'influence des vitesses de circulation sur la physico-chimie des eaux (Hesske, 1995).

Par leur temps de séjour plus long que dans les systèmes karstiques, les eaux issues d'hydrosystèmes molassiques sont tamponnées lors d'épisodes climatiques extrêmes (crue ou sécheresse) et permettent de maintenir un niveau régulier et constant dans les tufières. En revanche un temps de séjour long accentue la concentration d'entrants dans les écoulements et amplifie ainsi les phénomènes d'eutrophisation souvent défavorables aux tufières.

Enfin **les hydrosystèmes hydrothermaux**, se manifestent par 3 étapes successives.

Dans un premier temps les eaux météoriques s'infiltrent à la surface du sol tout en se chargeant en CO₂ biogénique présent notamment dans l'humus.

Les eaux poursuivent très lentement leur parcours en profondeur par un réseau ou une colonne de percolation et atteignent des températures élevées en équilibre thermique avec l'encaissant. En milieu cristallin la colonne de percolation est un réseau de fissures et fractures et en contexte sédimentaire l'infiltration est assurée par la porosité ouverte et/ou la microfissuration des formations perméables (Blavoux, 2009).

La différence d'altitude entre l'aire d'alimentation et la zone d'émergence est l'élément moteur à la circulation thermique. La remontée se produit par un axe vertical de collecte entre la zone profonde et la surface. Les eaux remontent rapidement en conservant pour l'essentiel leur température et leur composition chimique acquises en profondeur (Figure 23) Blavoux 2009).

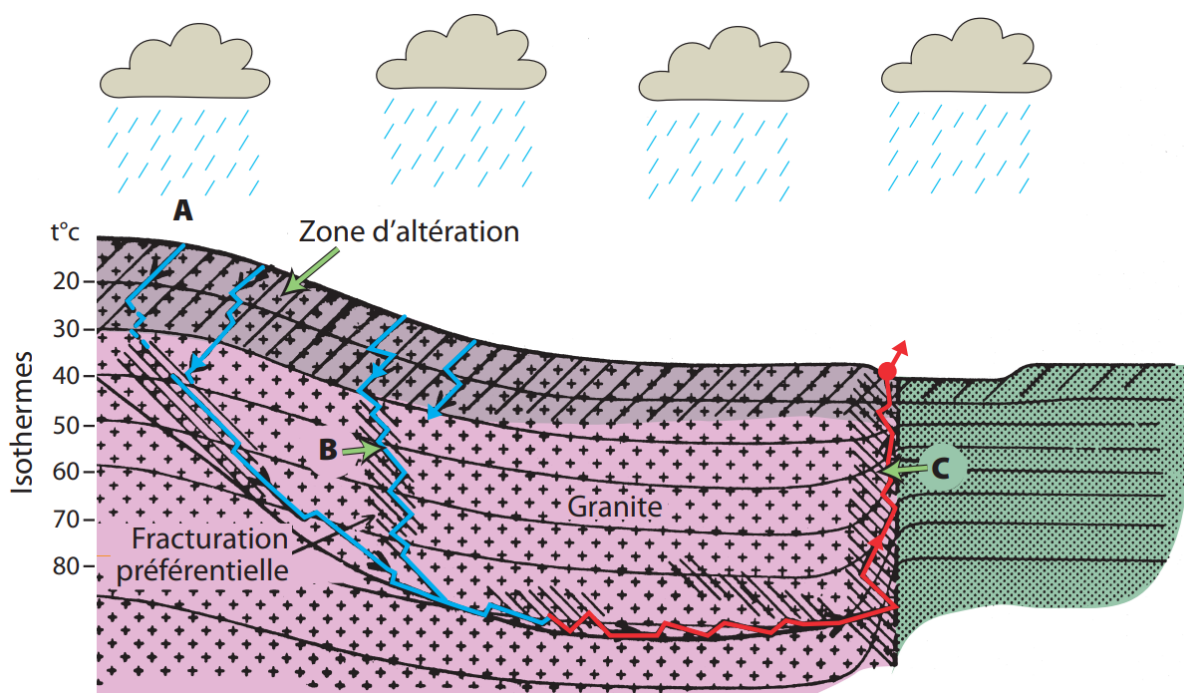


Figure 23 : Schéma type du circuit de l'eau thermique. A - Aire d'alimentation ; B - Réseau d'infiltration ; C - Drain de collecte et zone d'émergence. Blavoux, 2009.

Dans ces systèmes, deux types de sources se distinguent et influencent la dynamique d'écoulement et de dépôt d'une tufière.

La première est la source principale peu sujette aux fluctuations hydrodynamiques et caractérisée par un maximum de concentration chimique et/ou de température. Les tufières, issues de cette source, ont un débit régulier très minéralisé favorisant un important dégazage en sortie et ainsi des dépôts de tuf à proximité de l'exutoire.

Les deuxièmes sont de multiples sources secondaires plus sensibles aux fluctuations hydrodynamiques et mélangées avec des eaux de surface. Ces sources ont tendance à générer de systèmes tufeux moins important en volume et en nombre en raison de la minéralisation plus faible et des débits plus variables.

Contexte géographique :

Les tufières se forment dès lors qu'un écoulement est sursaturé en carbonate de calcium dissous. Leur fonctionnement et leur morphologie varient incontestablement en fonction du contexte topo-hydrogéographique qu'elles intègrent. G. Fabre et F. Hoffmann ont distingué ainsi, selon ce critère, plusieurs types de formations tufeuses tout en étant conscient des limites d'une telle synthétisation. Celles-ci sont les tufières de sources, de sources-talweg, de vallée et enfin les tufières mixtes (Figure 24).

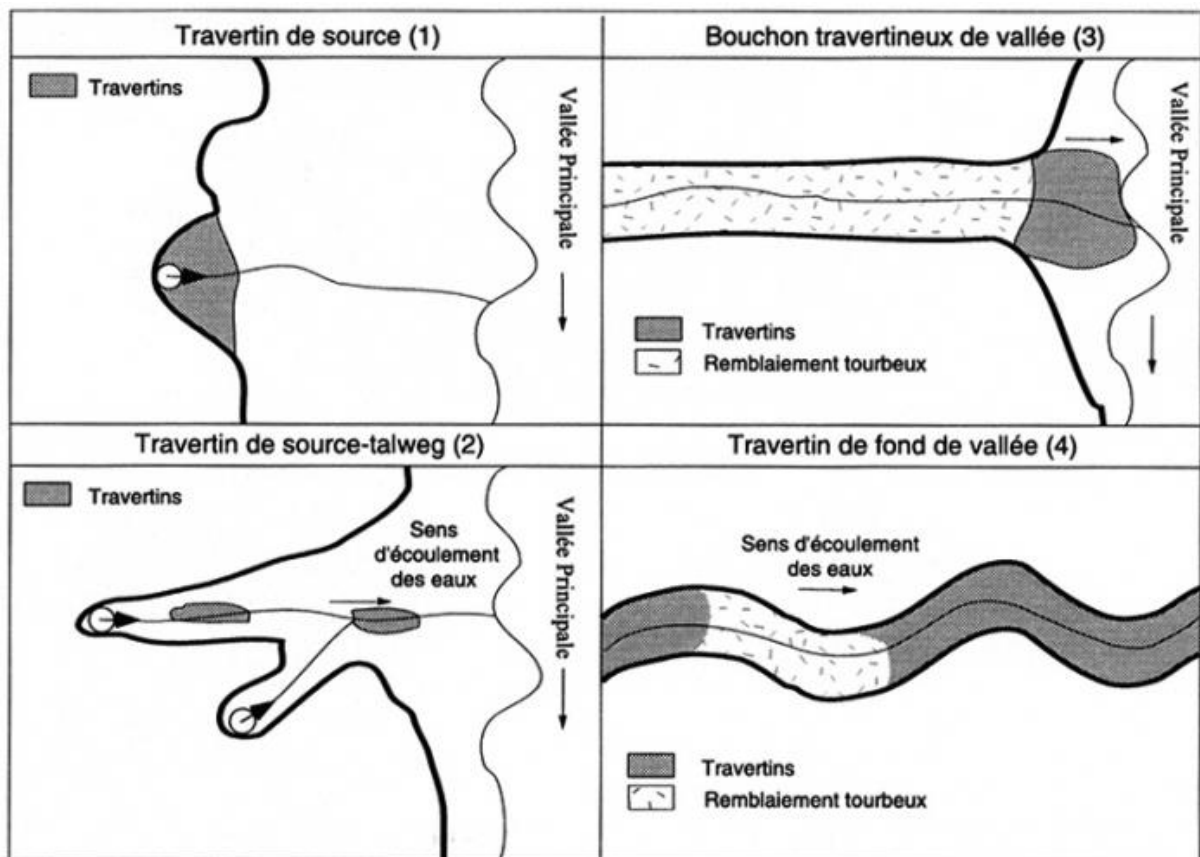


Figure 24 : Typologie spatiale des dépôts de tufs. Hoffmann, 2005 d'après FABRE, 1986.

Les dépôts de sources se forment au contact des exutoires qui les alimentent. Ces tufières peuvent émaner de contextes particuliers comme un écoulement dont la sursaturation en carbonate est survenue avant l'exurgence, une source exposée en adret favorisant le réchauffement rapide de l'eau ou encore un écoulement issu d'une source perchée associée à un parcours cascadant. Les eaux de Gournier à Choranche combinent ces particularités et forment des cascades de tufs directement en sortie d'exutoire (Figure 25).



Figure 25 : Cascade de tuf à la sortie de la grotte de Gournier (Choranche). Lecornu, 2020.

D'autres formations liées à cette première catégorie peuvent se former plus en aval. L'eau conserve son potentiel incrustant sur une distance plus importante grâce à sa confluence avec d'autres sources produisant du tuf, pérennes ou non, situées dans le talweg. Fabre (1986) leur donne le nom de tufière de « *source-talweg* ».

Enfin, il est possible d'y adjoindre un type mixte pour des formations plus complexes dans leur organisation et ainsi mal définissables, associant des dépôts de source et de source-talweg pour des tufières de plus grandes tailles (Hoffmann, 2005, 2006).

Les dépôts de vallée sont des formations bien plus variées et souvent de taille plus importante que les tufières de source. Leur réseau hydrographique peut également s'avérer plus vaste que les systèmes de source. Deux types majeurs se distinguent, d'une part, celui d'un « *bouchon travertineux* » formé à l'aval de la vallée et responsable d'un exhaussement du niveau de l'eau et d'un remblaiement tourbeux et/ou lacustre (Figure 26). D'autre part, cela peut être un dépôt ou un encroutement peu épais, notamment contrôlés par des processus biochimiques, se formant tout au long de la vallée dans les lits actifs.



Figure 26 : « Bouchon travertineux » formant les lacs de Plitvice (Croatie) dans un canyon de grande envergure. Photo de Wirestock sur Freepik.

Des formations d'organisation plus complexe peuvent être regroupées au sein d'un type mixte, associant dans l'espace les deux types précédents ainsi que des dépôts de source (Fabre, 1986 ; Hoffmann 2006).

Contexte induit par le profil et la pente du versant :

En fonction des contraintes topographiques et de la verticalité du relief l'édification d'une tufière peut majoritairement être conduite par trois types d'accumulations ; une dynamique progradante, d'aggradation et mixte.

Selon le type de pente que rencontre un écoulement, telle qu'une topographie convexe et/ou verticale, un phénomène d'accumulation par avancée frontale ou latérale peut former des tufières épaisses et de surface importante. Dans ce contexte, les écoulements peuvent être diffus en alimentant la tufière dans son entièreté ou à l'inverse être concentrés en délaissant des secteurs inactifs temporairement ou définitivement. Les avancées progradantes sont le résultat d'évolutions fonctionnelles de l'hydrosystème incrustant, telles qu'une hausse saisonnière ou définitive du débit, la migration de l'écoulement provenant d'embâcle, de la casse de barrage, de glissement de terrain ou d'actions anthropiques et enfin la migration de la source associée à l'enfoncement de la vallée (Figure 27) (Lecornu, 2019, 2020).

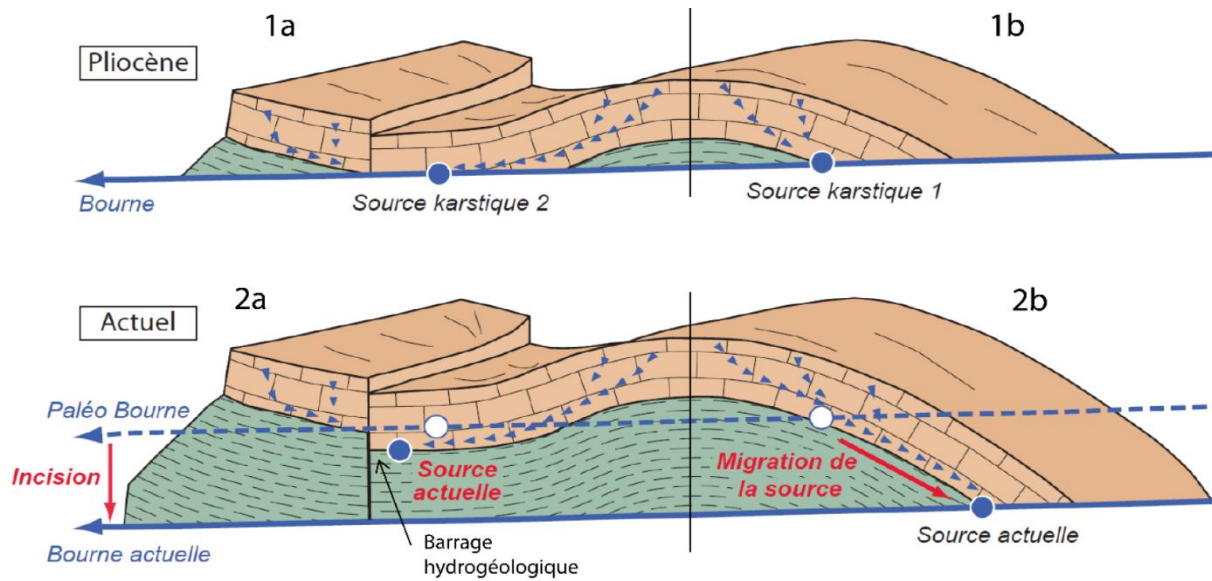


Figure 27 : Migrations des exutoires karstiques liées à l'incision du talweg. Edytem, 2007.

D'autres contraintes topographiques, comme les canyons, les terrasses ou les aménagements anthropiques limitent l'expansion d'un écoulement incrustant et contribuent à l'aggradation verticale d'une formation tufeuse. Selon le débit et l'espace de mobilité du cours d'eau, les écoulements peuvent tout autant être diffus que concentrés en générant des tufières d'épaisseur variable. Des écoulements temporaires, mobiles ou diffus associés à un faible débit ont tendance à générer des tufières pelliculaires.

En fonction de la sursaturation en carbonates dissous, c'est également dans ces contextes que se forment des dépôts tufeux discontinus. Le plus souvent, ces morphologies résultent d'eaux saturées en carbonate évoluant vers un stade sursaturé en présence de rupture de pente. Les dépôts sont ainsi des successions de cascades tufeuses semblables à des dômes ou des tabliers, intercalées de secteurs plans sans accumulation de tuf comme l'illustrent les tufières du Nant à Cognin les Gorges (Isère, France).

Enfin, dans certains cas ces deux dynamiques d'accumulations peuvent s'associer et construire des tufières massives comme la tufière de Choranche (Isère, France). Leur épaisseur et leur volume de grande envergure sont issus d'écoulements abondants, diffus ou concentrés et généralement pérennes sur un temps long.

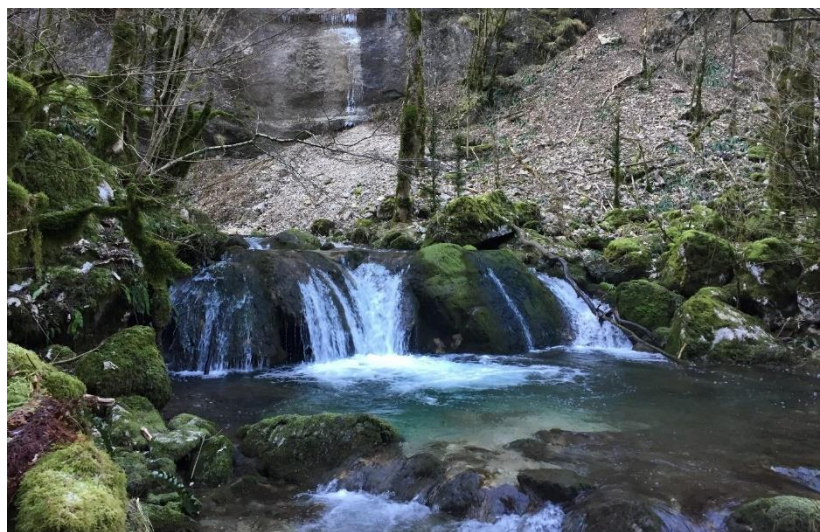


Figure 28 : Cascade de tuf au niveau d'une rupture de pente sur la rivière du Nant (Cognin les gorges, Isère). Lecornu, 2022.

Contexte végétal :

La formation d'une tufière est incontestablement influencée par son environnement abiotique et biotique. Les organismes vivants, et notamment la végétation autour et à l'amont d'une tufière, accentuent ou inhibent le dépôt de tuf. A l'échelle du système hydrologique d'une tufière, les végétaux ont des effets sur l'acidité de l'eau, le débit par l'absorption racinaire, le réchauffement d'un écoulement et la part de matière organique recouvrant un dépôt. En se focalisant sur un système tufeux et son environnement proche, deux grands types de tufières se dissocient en fonction de la densité de végétation : les tufières végétalisées et modérément végétalisées.

Selon la densité végétale présente, les processus de précipitation d'un système tufeux peuvent tout autant être freinés qu'accélérés.

Par la présence de feuillages, un ombrage peut recouvrir partiellement ou totalement une tufière active. Ce phénomène maintient une certaine fraîcheur et humidité favorable à la création de refuges thermiques pour la biodiversité et au développement d'espèces incrustantes (bryophytes, cyanobactéries) (Figure 29). Toutefois, selon les essences présentes et la densité de la végétation, la luminosité atteignant la tufière peut être insuffisante pour le développement des espèces photosynthétiques et le réchauffement de l'écoulement.



Figure 29 : Tufière de Coufin (Isère, France) recouverte par un peuplement de feuillus. Leur présence offre un îlot de fraîcheur tout en permettant le maintien d'une luminosité suffisante pour les espèces photosynthétiques incrustantes (8,5 g de CaCO_3 déposé par seconde) et le réchauffement de l'eau de l'ordre de $3,5^\circ$ sur un parcours cascade de 300 m de long. Lecornu, 15 juin 2020.

La nucléation des carbonates précipités s'accroît en présence de rugosités, telles que les bryophytes, les feuilles, les aiguilles ou les branches. Parfois, la charge de matière organique apportée peut être excessive et difficilement évacuée par les écoulements même en période de hautes eaux (Figure 30). La part des processus de précipitation biologique est alors réduite par l'asphyxie des organismes vivants incrustants présents à la surface de la tufière. De plus, à faible débit et/ou dans des eaux peu sursaturées, la matière organique s'accumule et se décompose également favorisant ainsi l'acidification de l'écoulement.



Figure 30 : Tufière de Fouelzan (Savoie, France) comblée par un excès de matières organiques composé de feuillages et aiguilles. Lecornu, 2022.

Les essences végétales, et notamment les conifères, influencent le pH d'un écoulement en l'acidifiant bien que l'activité photosynthétique au sein d'une tufière augmente son pH. Les eaux de surface, sursaturées en carbonate, se rééquilibrent avec le CO_2 dissous et peuvent atteindre un état chimique réducteur ou érodant le dépôt de tuf.

Enfin, la présence de peuplements forestiers en ripisylve ou au sein d'une tufière favorise la réduction du débit par l'absorption racinaire. Un arbre adulte peut pour les feuillus consommer plusieurs centaines de litres par jour et pour les résineux entre 50 à 100 L/j. Comme l'a démontré l'exemple de Fossil Creek (cf. partie 1.4), une perte du débit occasionne inévitablement une réduction du taux de tuf précipité. Toutefois, selon le volume d'eau prélevé, une diminution du débit produit également un réchauffement plus rapide de l'écoulement favorable à la précipitation des carbonates.

Ainsi, les effets de la végétation et plus particulièrement des ligneux sur le fonctionnement d'une tufière varient en fonction de la densité présente et peuvent tout autant être bénéfiques que défavorables à l'édification d'une tufière.

4.2 Les formations tufeuses :

A l'issue de ces différents cadres physiques servant de socles à la compréhension, les formations tufeuses peuvent dorénavant être caractérisées par des approches pluridisciplinaire et systémique. Selon l'échelle d'analyse, plusieurs typologies emboîtées apparaissent et structurent un système tufeux. Celles-ci sont hiérarchiquement les types de sources, de structures, de morphodynamiques de l'écoulement et de faciès alguobryophitiques.

Typologie des sources :

Les tufières sont issues, selon leur contexte hydrogéologique, de plusieurs types d'alimentation en eau.

La plus répandue se caractérise par des **sources multiples**, dont la répartition spatiale est relativement variable. Utilisant le réseau de fissuration, les arrivées d'eau multiples sont présentes en système karstique, molassique ou hydrothermal et alimentent tout autant les tufières de source, de source-talweg que de vallée. Ces sources alimentent les systèmes tufeux par des écoulements à faible débit relativement constant. Par leur confluence, le volume et la vitesse des eaux incrustantes s'intensifient progressivement afin de former des tufières de surface et d'épaisseur variables.

Dans des cas plus particuliers et non artificialisés, une tufière peut également être alimentée par **une seule arrivée d'eau**. Souvent, ce type d'alimentation se présente en système karstique à perméabilité importante et génère des tufières de sources ou de source-talwegs. Un drain collecteur regroupe les eaux s'infiltrant dans le système endo-karstique et les évacue par un exutoire (Figure 31). De l'amont à l'aval, cette forme de réseau souterrain transite des volumes d'eau en constante augmentation et offre en sortie de source des écoulements concentrés et généralement turbulents.

Enfin, plus rarement, des **bas-marais alcalins**, alimentés par plusieurs sources, intègrent le système d'une tufière à son amont. Cette imbrication d'habitats se produit notamment en contexte molassique et renforce le rôle tampon de l'hydrosystème. La tufière est ainsi alimentée par des arrivées d'eau lentes, régulières et généralement diffuses.

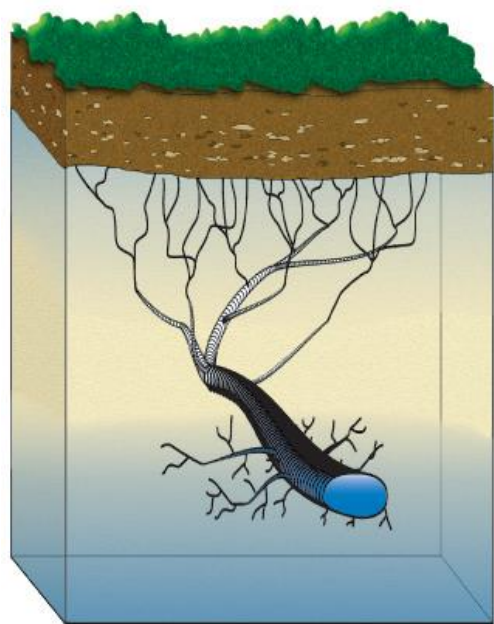


Figure 31 : Schématisation de la structuration d'un drainage collecteur souterrain. Edytem, 2007.

En fonction des bassins d'alimentation présents, de l'enfoncement ou de la remontée des niveaux de base et de la géologie locale, les sources sont généralement amenées à migrer sur des temporalités variables (sauf pour le cas d'une source perchée). Leur évolution spatio-temporelle conduit la tufière à se déplacer en produisant à la fois une dynamique de dépôt et d'assèchement. Les paléo-parcours tufeux, dorénavant fossiles, se recouvrent progressivement d'une végétation calcicole et enrichissent la mosaïque d'habitats déjà présente.

Typologie hydro-structurale :

Les morphologies d'une tufière et de ses écoulements sont les résultats d'une interdépendance entre la topographie, les organismes vivants incrustants et les processus de précipitation du carbonate dissous. Deux groupes peuvent ainsi se distinguer, les tufières de versant et les tufières de pente « douce », parmi lesquelles peuvent s'emboîter plusieurs morphologies au sein d'une même tufière.

Les formations tufeuses de versant reposent sur des terrains à déclivités importantes pouvant être de l'ordre de 90 % à 10 % et se rattachent aux systèmes tufeux de source et de sources talweg. De nombreuses morphologies, contrôlées en partie par les processus physico-

chimiques compte tenu de la pente, se forment dans ce sous-système (Lecornu, 2020). Parmi elles, on retrouve les tufières suspendues, en cascade, en parcours cascasant, en gradin et enfin en succession de gours étroits.



Figure 32 : Tufière suspendue au-dessus d'un canyon (France). Berthet

Tufière suspendue : Cette formation se développe au contact de parois verticales comme les canyons ou les escarpements. Elles forment des dômes de tailles modestes suspendus dans le vide (quelques dizaines de centimètres à mètres) et pouvant parfois rejoindre la paroi opposée en contexte de canyon étroit. Les morphologies de plus grandes ampleurs peuvent également générer des vides volumineux, comparables aux vides souterrains, offrant d'excellents refuges pour la faune principalement cavernicole ou aquatique (chiroptère, insecte, amphibien) (Figure 32 & 37).

Cascade de tuf : Au niveau d'une rupture de pente, de blocs détritiques ou d'embâcles les mécanismes physico-chimiques de précipitation du carbonate s'accroissent et accélèrent le dépôt de tuf. De nombreuses formes apparaissent alors en fonction du débit, de la morphodynamique de l'écoulement (généralement concentré et turbulent), de la hauteur de la chute (plusieurs mètres à plusieurs centaines de mètres) et de l'inclinaison de la rupture. Fréquemment, une cascade de tuf a une forme en tablier comprenant plusieurs caractéristiques : une partie sommitale plus épaisse, une marmite à l'aval issue d'un tourbillon érosif et un bassin au pied de la cascade. A terme, la masse de tuf formée peut s'effondrer sous l'effet de la gravité et s'accumuler à la base de la formation, complexifiant ainsi la topographie et la morphologie des accumulations (Pentecost, 2005) (Figure 33 & 37)



Figure 33 : Cascade de tuf de Sillans (Var, France). Esteve, 2022.

Parcours cascasant : Il s'agit de cascades, telles que décrit ci-dessus, se succédant sur une pente et une distance variables. Les écoulements sont souvent rapides, concentrés et turbulents accentuant des paramètres physico-chimiques de dépôt (Figure 37).

Succession de gours étroits : Ces dépôts carbonatés sont comparables à des barrages issus d'écoulements laminaires retenant pour chacun des bassins d'eau à l'amont. Leur formation résulte de la mise en relation de trois facteurs principaux faisant notamment intervenir les processus physico-chimiques : le débit de l'écoulement, la dénivellation du parcours et la rugosité du sol.

La rugosité, relativement élevée en présence de tufières densément végétalisées, amorce la formation des gours et peut également intervenir sur son orientation. L'objet rugueux, comme des feuilles, des branches ou des blocs, est par la suite masqué par la croissance progressive de la formation tufeuse.

L'écart entre chaque gour est le reflet du pourcentage de la pente. En présence d'une forte inclinaison, les bassins, parcourus par des eaux agitées, sont généralement plus étroits et de moindre dimension (quelques dizaines de centimètres à 1 m environ pour une pente à 45 %). En secteur de pente « douce », les gours ont tendance à être espacés entre eux quelle que soit la quantité d'amorce, souvent abondante en contexte végétalisé. Les dimensions des bassins

sont étroitement liées à la taille et la morphologie du cours d'eau mais restent toutefois plus longues et plus larges qu'en forte pente (Lecornu, 2019) (Figure 34 & 37).



Figure 34 : Succession de gours formant la tufière de Darne (Isère, France). Lecornu, 2022.

Les tufières se forment en pente « douce », c'est-à-dire inférieur à 10 %, composent les morphologies des formations de vallée. La part des paramètres bio-chimiques dans la précipitation du tuf contrôle davantage la croissance de ces édifices tufeux également nombreux. Parmi les principaux se retrouvent les encroutements pelliculaires, les parcours de cascates, les successions de gours espacés, et les bouchons tufeux.

Encroutement pelliculaire : Ce dépôt fait partie de ceux soulignant le mieux la topographie initiale. De quelques millimètres à centimètres, l'encroutement pelliculaire se forme sur des parcours généralement peu accidentés et surtout non végétalisés par la flore incrustante. Son absence peut être la cause d'un apport en matière organique trop important, de conditions d'écoulement et d'ensoleillement non favorables à leur développement ou encore de pollutions anthropiques. Les écoulements sont relativement calmes et de faibles hauteurs faisant notamment intervenir les processus de précipitation chimiques.

Parcours de cascates : Les cascates sont des cascades de petite envergure (moins d'1 m de haut) concrétionnant au niveau de seuils. Tout comme les parcours cascade, elles se succèdent en formant des paliers espacés par des secteurs plans de longueurs variables. A

l'échelle d'un système tufeux, les morphologies s'apparentent à des gradins ou bien des marches. En présence de cascates, les eaux s'agitent et s'accélèrent avant de revenir à un état plus calme et lent entre chaque seuil. Enfin en fonction de la largeur du cours d'eau, l'écoulement peut tout autant être concentré que diffus (Figure 35, 36 & 37).



Figure 35 & 36 : Parcours en cascates dans la tufière de Lausens (Drôme, France) à gauche et tufière de Tahiti en gradin (Drôme, France) à droite. Lecornu, 2022.

Bouchons tufeux : Ce type de dépôt se forme par l'accumulation de plusieurs séquences carbonatées ou non, en arrière de laquelle s'établit généralement un remblaiement tourbeux (de type palustre, dans le cadre d'une tourbière alcaline) ou lacustre (Hoffmann, 2005). Bien souvent, la mise en place d'un bouchon tufeux s'opère à la confluence de deux cours d'eau. Leur envergure varie de plusieurs mètres à hectomètres pour la largeur et de plusieurs mètres à kilomètres pour la longueur. Les écoulements sont lents ou pratiquement stagnants à l'amont du bouchon et deviennent turbulents à la hauteur de la chute d'eau présente à l'aval du système (Figure 6 ; 26 & 37).

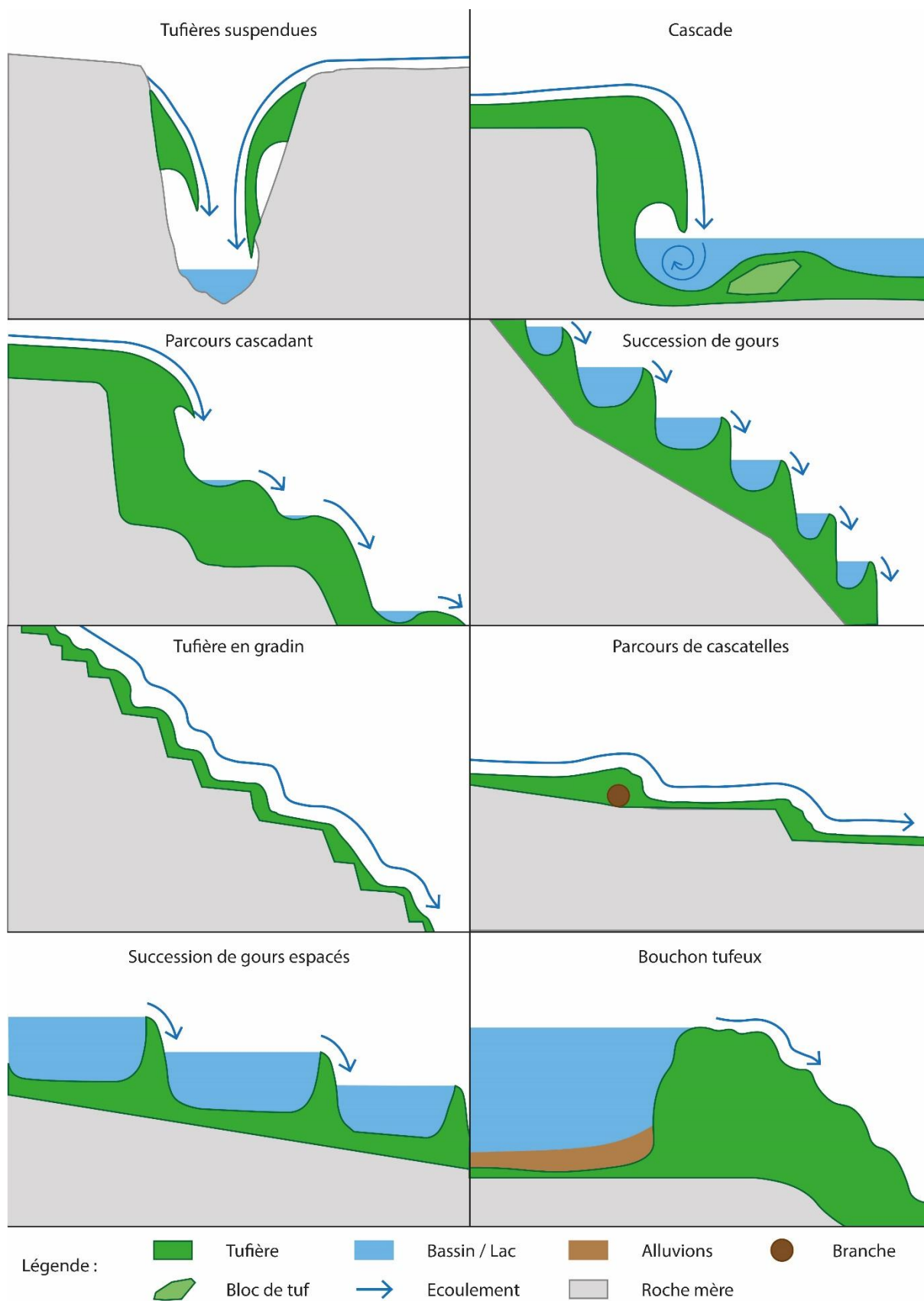


Figure 37 : Typologie structurale des principales morphologies d'une tufière. Lecornu, 2022.

Typologie des faciès tufeux alguo-bryophytiques

Les milieux tufeux ont, selon leur environnement et leur construction, des dynamiques de dépôt, d'écoulement, de végétation bien différentes. Majoritairement composés de bryophytes et d'algues, la richesse et la répartition de ces communautés végétales répondent à des modes d'alimentation en eau particuliers, aux variations d'écoulement saisonnières (Gruninger, 1965) et, dans une moindre mesure, à l'intensité de l'éclairement (Pavletic, 1955 ; Matonickin & Pavletic, 1962). La morphologie d'une tufière n'influence en rien la distribution de ces groupements et ces derniers peuvent donc reposer sur des formes très différentes.

Ces cortèges sont alimentés par trois types d'écoulements différents ; la capillarité, le ruissellement et le goutte à goutte. L'**effet capillaire** est la force d'un liquide à remonter le long de tubes fins, tels que des radicelles, en l'absence de force extérieure. Par définition, un **écoulement ruisselant** se caractérise par une fine lame d'eau avançant à la surface du sol. Enfin, le **goutte à goutte** est un écoulement lent par des gouttes se succédant régulièrement.

Les espèces tufigènes sont généralement associées à un ou deux modes d'alimentation en eau. Très rarement, certaines espèces peuvent se retrouver dans ces trois contextes à la fois. Par ordre hiérarchique, les alimentations prédominantes sont par capillarité et par ruissellement. Plusieurs mêmes espèces se retrouvent dans ces deux types d'écoulement, parfois au sein d'une même tufière. A l'inverse, le goutte à goutte est le mode le plus rare (Hugonnot, 2017).

La présence et la répartition des espèces varient également en fonction de la pérennité saisonnière d'alimentation en eau et de l'intensité lumineuse, bien que cette dernière variable ne semble avoir que peu d'influence sur la répartition de ces espèces.

Ainsi pour ne citer qu'un exemple, les deux espèces bryophytiques les plus répandues sur les tufières (*Palustriella commutata* et *Bryum pseudotriquetrum*) sont liées à des conditions de capillarité par une alimentation en eau continue tout au long de l'année et, comme l'indiquent de premières observations, dans des secteurs autant à l'ombre qu'en pleine lumière (Hugonnot, 2017).

Les faciès des tufs bryophytiques et alguaires sont relativement distincts à l'échelle macroscopique. Le premier révèle une structuration ramifiée irrégulière dont la taille des vides est plutôt hétérogène. A plus petite échelle, cette roche vacuolaire et très sensible à l'érosion de par sa forme, offre d'innombrable micro-habitats pour la faune aquatique et benthique (Figure 38).

A l'inverse, le faciès des tufs alguaires est semblable à une succession de couches en filaments maillées et serrées de manière homogène. Peu de vides subsistent dans ce type de construction. En revanche, à plus petite échelle, des poches de vides se forment par le concrétionnement d'une multitude de nodules vides offrant un aspect globulaire aux tufs composés d'algues (Figure 39).

Enfin, sans la présence de végétation incrustante et également de petites quantités de cyanobactéries (diatomées), la structure des dépôts est pratiquement totalement indurée à l'échelle macroscopique avec parfois la présence d'oncoïdes.



Figure 38 et 39 : Faciès tufeux algaire (à gauche) et bryophytique (à droite). Lecornu, 2022.

Conclusion de 4^{ème} partie

Du fait des nombreux champs disciplinaires qu'il intègre, le fonctionnement d'une tufière complexifie la définition d'une typologie exhaustive. Pour s'en rapprocher, l'essai proposé utilise une approche systémique multiscalaire et pluridisciplinaire.

Les dynamiques d'écoulement et de dépôt d'une tufière dépendent des nombreux contextes l'environnant. En ce sens, le contexte hydrogéologique définit les régimes des écoulements et le taux de sursaturation en carbonate dissous, les contextes géographique et géométrique interviennent dans l'emplacement et la forme du dépôt, enfin le contexte végétal a des effets sur l'état physico-chimique des écoulements. Leurs influences, variables selon leur évolution, forme une multitude de tufières aux fonctionnements et aux morphologies très différents. Ainsi, plusieurs typologies emboîtées ressortent et sont les reflets des contextes qu'intègre une tufière. Par ordre hiérarchique, on peut retrouver, d'une part, les types de source ayant des effets sur la dynamique des écoulements, l'emplacement et le volume des dépôts, d'autre part, les différentes morphologies divisées en deux catégories celles de versant et de pente « douce », et enfin, les faciès des dépôts largement contrôlés par le type de végétation présent.



Bibliographie

Adolphe J.P. 1981. *Exemples de contributions micro-organiques dans les constructions carbonatées continentales.* Actes du Colloques de l'A.G.F., Formations carbonatées externes, tufs et travertins, Paris, Mémoire de l'A.F.K. n°3, pp. 15-30.

Adolphe J.P. 1986. *Biocristallogénèse et écomorphologie des tufs, travertins. Enseignements tirés d'exemples naturels et expérimentaux.* Méditerranée. T. 57, n°1-2, pp. 11-20.

Bakalowicz M., 1992. *Géochimie des eaux et flux de matières dissoutes. L'approche objective du rôle du climat dans la karstogénèse.* Karst et évolutions climatiques, Presses Universitaire de Bordeaux. pp. 61-74.

Balderer W. 1990. *Paleoclimatic trends deduced in groundwaters with in Swiss molasse basin as evidence for the flow systems definition.* Mémoires du 22e congrès de l'AIH Lausanne (Suisse), Vol. 22/1, p. 731-740

Beline J. 2006. *Rapport sur une étude hydrogéologique d'un bassin versant karstique : le bassin du Céou.* EPIDOR - Université Joseph Fourier, Grenoble, 126 p.

Blavoux B. 2009. *Les structures à l'origine du patrimoine thermal français et leur fonctionnement. Indications pour la protection de la ressource.* Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, n°9, L'hydrothermalisme en domaine continental. Fonctionnement, ressource et patrimoine, pp. 11-20.

Bonneau M. 1984. *Les humus résineux : effets supposés et réels.* Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen, T.55, fascicule 2, pp. 190-193.

Bottner P. 1972. *Évolution des sols en milieu carbonaté. La pédogenèse sur roches calcaires dans une séquence bioclimatique méditerranéo-alpine du Sud de la France.* Sciences Géologiques, bulletins et mémoires. 156 p.

Casanova L. 1981. *Morphologie et biolithogénèse des barrages de travertins.* Actes du Colloques de l'A.G.F., Formations carbonatées externes, tufs et travertins, Paris, Mémoire de l'A.F.K. n°3, pp. 45-54.

Castanier S., Le Métayer-Levrel G., Perthuisot J.P. 1998. *La carbonatogénèse bactérienne.* Hydrologie et géochimie isotopique. pp. 197-218.

Chambaud F., Simonnot J.L. 2018. *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des zones humides.* Guide technique du SDAGE. 56 p.

Chanson H. 1995. *Air-water gas transfer at hydraulic jump with partially develop inflow.* Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia

Chen J., Zhang D.D., Wang S., Xiao T., Huang R. 2004. *Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites.* Sedimentary Geology. n°166, pp. 353-366

CEN (Conservatoire d'Espaces Naturels) de Savoie 2017. *Plan de Gestion de la tufière de Plancherine, source du Bontey.* 55 p.





Corbel J., 1959. *Érosion en terrain calcaire (vitesse d'érosion et morphologie)*. Annales de géographie. n° 366, pp. 97-120.

Couchoud I., 2008. *Les spéléothèmes, archives des variations paléoenvironnementales*. Quaternaire. vol. 19, n°4, pp 255-274.

Curie J., 2013. *Les travertins anthropiques, entre histoire, archéologie et environnement. Etude geoarchéologique du site antique de Jebel Oust (Tunisie) [archive]* ; Thèse de Doctorat, Dijon. 325 p.

Delannoy J.J., Guendon J.L., Quinif Y., Roiron P. 1993. *Formaciones travertínicas del piedemonte mediterráneo de la Serranía de Ronda (Málaga)*. Valencia, Cuad. De Geogr., n°54, pp. 189-222.

Delannoy J.J., Guendon J.L., Quinif Y., Roiron P., 1999. *Les formations travertineuses : des témoins paléoenvironnementaux et morphogéniques. Exemple du piémont méditerranéen de la Serranía de Ronda (Province de Malaga, Espagne)*. Bulletin de la société belge de Géologie, T. 106, pp. 79-96.

Dittrich M., Dittrich T., Sieber I., Koschel K. 1997. *A balance analysis of phosphorus elimination by artificial calcite precipitation in a stratified hardwater lake*. Water Research, Vol. 31, Issue 2, pp. 237-248.

Domínguez-Villar D., Vázquez-Navarro J.A., Cheng H., Lawrence Edwards R. 2011. *Freshwater tufa record from Spain supports evidence for the past interglacial being wetter than the Holocene in the Mediterranean region*. Global and planetary change, Vol. 77, Issues 3-4, pp. 129-141.

EDYTEM (Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne) 2007. *Grottes de Choranche et massif des Coulmes - Enjeux de protection*. Rapport scientifique et paysager. Fiches synthétiques. Edytem – UMR 5204 du CNRS / DIREN Rhône-Alpes, 201 p.

Fabre G. 1986. *Tufs et travertins du Languedoc méditerranéen et des Causses majeurs*. Méditerranée, Table ronde « Travertins l.s. et évolution des paysages holocènes dans le domaine méditerranéen », Aix-en-Provence, T.57, 1-2, pp. 66-91.

Ferreira A. et Brun A. 2020. *Zone humide de l'accro-parc de Termignon (Termignon, 73) – Notice de gestion 2020-2030*. ONF (Office National des Forêts), 38 p.

Florsheim J. L., Ustin S.L., Tang Y., Di B., Huang C., Qiao X., Peng H., Zhang M., Cai Y. 2013. *Basin-scale and travertine damscale controls on fluvial travertine, Jiuzhaigou, southwestern China*. Geomorphology, Vol. 180/181, pp. 267–280.

Fuller B. M., Sklar L.S., Compson Z.G., Adams K.J., Marks J.C., and Wilcox A.C. 2011. *Ecogeomorphic feedbacks in regrowth of travertine step-pool morphology after dam decommissioning, Fossil Creek, Arizona*. Geomorphology, Vol. 126, pp. 314–332.

Gachon L. 1957. *Les successions stratigraphiques éclairées par la genèse des sols. La biostasie et la rhexistasie : Principe de classification des sols*. Revue de géographie alpine. T. 45, n°2, pp. 381-386.





Gaudillat V., Argagnon O., Bensettiti, F., Bioret F., Boulet V., Causse G., Choynet G., Coignon B., de Foucault B., Delassus L., Duhamel F., Fernex Th., Herard K., Lafon P., Le Foulher A., Panaiotis C., Poncet R., Prud'homme F., Rouveyrol P. & Villaret J.C. 2018. *Habitats d'intérêt communautaire : actualisation des interprétations des Cahiers d'habitats*. Version 1, Rapport UMS PatriNat 2017-104. UMS PatriNat, FCBN, MTES, Paris, 62 p.

Gibson C.A., Koch B.J., Compson Z.G., Hungate B.A. et Marks J.C. 2018. *Ecosystem responses to restored flow in a travertine river*. *Freshwater Science*, Vol. 37, n°1, p. 10.

Golubić S., Violante C., Plenković-Moraj A., Grgasović T. 2008. *Travertines and calcareous tufa deposits : An insight into diagenesis*. *Geologia Croatica*, Vol. 61, pp. 363-378.

Gourari L. 1997. *Les causes environnementales du ralentissement de la genèse des travertins actuels dans la vallée de l'Oued Aggaj (Causse de Sefrou, Moyen Atlas Maroc)*. 14^{ème} colloque des bassins sédimentaires marocains, Université Ibn Tofail. Kenitra, 289p.

Granai S., Dabkowski J., Hájková P., Naton H.G, Brou L. 2020. *Holocene palaeoenvironments from the Direndall tufa (Luxembourg) reconstructed from the molluscan succession and stable isotope records*. *The Holocene*, 30 (7), pp.982-995.

Gruninger W. 1965. *Rezente Kalktufbildung im Bereich der Uracher Wasserfälle*. *Abh. Karst. Höhlenkunde*, E2, 113 p.

Henrikson, A., Brakke, D. 1988. *Increasing contributions of nitrogen to the acidity of surface waters in Norway*. *Water, Air Soil Pollution*, Vol. 42, pp. 183-201.

Hesske S. 1995. *Typologie des eaux souterraines de la molasse entre Chambéry et Linz (France, Suisse, Allemagne, Autriche)*. Thèse Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL. 375 p.

Hoffmann F. 2005. *Les tufs et travertins en Périgord-Quercy*. *Karstologia mémoires*, n°13, 260 p.

Hoffmann F. 2006. *Etude et chronologie des séquences travertineuses du Périgord-Quercy (France) : Principaux apports et hypothèses*. *Quaternaire*, Vol. 17, p. 351-360

Hugonnot V. 2017. *Approche morphologique, phytocœnotique et fonctionnelle des bryolithes de la basse vallée de l'Isère (de Saint-Marcellin à Romans), France*. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie, Société nationale de protection de la nature*, Vol.72 (2), pp.116-133.

Jacobson R.L., et Usdowski E. 1975. *Geochemical controls on a calcite precipitating spring*. *Contrib. Mineral. Petrol.* n°51, pp 65-74.

Lahsaini M., Tabyaoui H., El Hammichi F. 2014. *Modélisation et spatialisation des crues de l'oued Aggay (ville de Sefrou) à partir de Hecras*. Conférence : 2ème Colloque international des utilisateurs des SIG, poster.

Lecornu E. 2019. *Analyse morphogénique et morphochronologique de gours : le cas de la galerie des Boas dans la Grotte de St-Marcel (Ardèche, France)*. Mémoire de Master 1 Université de Savoie Mont-Blanc. 76 p.





Lecornu E. 2020. *Les dynamiques des écoulements incrustants endo- et exokarstiques. Le cas du site de Choranche (Vercors).* Mémoire de Master 2 Géosphères, Université Savoie Mont Blanc. 103 p.

Le Gall P., Fridrick L. et Pioch S. 2016. *Restauration écologique de barres de tufs en ruisseau karstique.* Technique de l'ingénieur, Génie écologique en milieu rural, pp. 57-60.

Le Métayer-Levrel G., Castanier S., Loubière J.F., Perthuisot J.P. 1997. *La carbonatogenèse bactérienne dans les grottes. Étude au MEB d'une hélictite de Clamouse, Hérault, France.* Comptes rendus de l'académie des sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science. Vol 325, Issue 3, pp. 179-184.

Liu, L. 2017. *Factors Affecting Tufa Degradation in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, China.* Water, Vol. 9, p. 702.

Liu Z., Svensson U., Dreybrodt W., Yuan D.X., Buhmann D. 1995. *Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China : field measurements and theoretical prediction of deposition rates.* Geochimica et Cosmochimica. Act 59, pp 3087-3097.

Lyons M.D. et Kelly D.L. 2016. *Monitoring guidelines for the assessment of petrifying springs in Ireland.* Irish Wildlife Manuals, n°94. National Parks and Wildlife Service, Department of Arts, Heritage, Regional, Rural and Gaeltacht Affairs, Ireland, 83 p.

Magnon F., Guebon J.L., Vaudour J., Martin Ph., 1991. *Les travertins : accumulations carbonatées associées aux systèmes karstiques, séquences sédimentaires et paléoenvironnements quaternaires.* Bulletin de la Société Géologique de France. T. 162, n° 3, pp. 585-594.

Malusa J., Overby S.T., et Parnell R.A. 2003. *Potential for travertine formation : Fossil Creek, Arizona.* Applied Geochemistry, Vol. 18, pp.1081–1093.

Matonickin I. et Pavletic Z. 1962. *Entwicklung der Lebensgemeinschaften und ihre Bedeutung für die Bildung und Ehrhaltung von Kalktuff-Wasserfällen.* Archive of hydrobiology, n°58, pp. 467-473.

Mazet J. 1988. *Contribution à l'étude des tufs-barrages de la haute vallée de l'Huveaune.* Les édifices travertineux et l'histoire de l'environnement dans le Midi de la France, Travaux de TUA 903 et ATP PIREN. n° 17, pp. 201-208

Megerle H.E. 2021. *Calcerous Tufa as Invaluable Geotopes Endangered by (over-) Tourism : A Case Study in the UNESCO Global Geopark Swabian Alb, Germany.* Geosciences, Vol. 11, p. 31.

Muxart T. 1981. *Thème II. Processus de précipitation et mesures (Process of precipitation and measures).* Bulletin de l'Association de Géographes Français. n° 479-480, pp. 189-196.

Nicod J. 1984. *Les massifs karstiques des Alpes occidentales : trame structurale et bioclimatique.* Karstologia, n° 3, pp. 3-11.

Nicod J. 1986. *Facteurs physico-chimiques de l'accumulation des formations travertineuses.* Méditerranée 1-2, pp. 161-164.

Nilsson S.I., Miller H.G. et Miller J.D. 1982. *Forest growth as a possible cause of soil and water acidification : an examination of the concepts.* Oikos, Vol 39, pp. 40-49.





Ollivier V., Guendon J.L., Ali A., Roiron P., Ambert P., 2006. *Evolution postglaciaire des environnements travertineux provençaux et alpins : nouveau cadre chronologique, faciès et dynamiques morphosédimentaires.* Quaternaire, Vol 17 (2), pp. 51-67.

Otsuki A. & Wetzel R. 1972. *Coprecipitation of phosphate with carbonates in a marl lake.* Limnology and Oceanography, Vol. 17, Issue 5, pp. 763–767.

Palmer M. A., Hondula K.L., and Koch B.J., 2014. *Ecological restoration of streams and rivers: shifting strategies and shifting goals.* Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, Vol. 45, pp. 247–269.

Pavletic Z. 1955. *Die Kalktufbildenden Bryophyten in den Gewässern Südkroatiens und Bosniens.* Revue bryologique et lichénologique, Vol.24, pp. 93-95.

Perrette Y. 1999. *Etude de la structure interne des stalagmites. Contribution à la connaissance géographique des évolutions environnementales du Vercors (France). Développement et application d'une approche multi paramètres des archives stalagmitiques.* Thèse de doctorat. 324 p.

Pentecost A. 1981. *The tufa (travertine) deposits of the Malham district, North Yorkshire.* Fld. Stud. 5, pp. 365-87.

Pentecost A. 2005. *Travertine.* Springer-Verlag, Berlin, p. 431.

Poff, N.L., Allan J.D., Bain M.B., J. R. Karr, Prestegard K.L., Richter B.D, Sparks R.E., et Stromberg J.C. 1997. *The natural flow regime.* BioScience, Vol. 47, n° 11, pp.769–784.

Ponge J.F 2019. *Quel avenir pour la forêt française ? Et qu'ont à nous dire les sols ? L'exemple du Morvan.* Muséum National d'Histoire Naturelle. p. 12.

Souza-Egipsy V., Garcia Del Cura M.A., Ascaso C., De Los Rios A., Wierzechos J., Gonzalez-Martin J.A. 2006. *Interaction between Calcite and Phosphorus in biomineralization processes in tufa carbonates.* Vol. 91, Issue 3, pp. 222-241.

Vaudour J. 1981. *Thème IV. Travertins et croûtes calcaires (Tufas and calcretes).* Bulletin de l'Association de Géographes Français. n° 479-480, pp. 203-210.

Vaudour J. 1986. *Introduction à l'étude des édifices travertineux holocènes.* Table Ronde « Travertins l. s. et évolution des paysages holocènes dans le domaine méditerranéen », Aix-en- Provence, 5-6 novembre 1985. Méditerranée, 1-2, pp. 3-10.

Vaudour J. 1988. *Les édifices travertineux et l'histoire de l'environnement dans le Midi de la France.* U.A. 903 CNRS, Travaux 13, Aix en Provence, 280 p.

Vernet J.L., Vaudour J. (dir.) 1988-1990. *Milieus et anthropisation à l'Holocène en Méditerranée occidentale à partir des sites karstiques.* Rapport final A.T.P. P.I.R.E.N., Montpellier-Aix en Provence, 215 p.

Weisrock A., 1981. *Morphogénèse des édifices tuffeux d'Imouzzar Ida ou Tanane (Maroc).* Actes du Colloques de l'A.G.F., Formations carbonatées externes, tufs et travertins, Paris, Mémoire de l'A.F.K. n°3, pp. 157-170.





Žák K., Ložek V., Kadlec J., Hladíková J., Cílek V. 2002. Climate-induced changes in Holocene calcareous tufa formations, Bohemian Karst, Czech Republic. *Quaternary International*, Vol 91, Issue 1, pp. 137-152.

Zhang D.D., Zhang Y., Zhu A., Chen X. 2001. *Physical mechanisms of river waterfall tufa (travertine) formation.* *Journal of Sedimentary Research*. n°71, pp 205–216.

