

Dynamiques fluviales en contexte travertineux. Exemples provençaux (France).

Fluvial dynamics in travertine context. Provençal examples (France).

DAVID S.1, DURIN V.1 & COLLANGE L.2

Abstract : Current fluvial dynamics in travertine context are little studied and known by river managers. Nevertheless, hydraulic or environmental problems exist on these sites. Travertine are also remarkable habitats from an ecological point of view. These fragile environments often need to be preserved or restored. The travertinization is expressed by a main dynamic of aggradation. After filling the channels, the rivers can continue to deposit on valley bottom or create new beds by incision of the plain. Human pressure has often slowed or stopped the travertinization. Some formations are now incised. This results in deep and low mobility channels. Measurements and observations made on certain sites show that the travertinization potential still exists. Appropriate actions such as conservation of driftwood could be favorable to the restoration of travertine environments.

Keywords: travertine, tufa, hydromorphology, monitoring

Résumé : Les dynamiques fluviales actuelles en contexte travertineux sont peu étudiées et connues des gestionnaires de cours d'eau qui sont pourtant confrontés à des problématiques hydrauliques ou environnementales sur ces sites. Les travertins qui peuvent localement poser problème constituent néanmoins souvent des habitats remarquables d'un point de vue écologique. À ce titre, ils méritent une attention particulière en vue d'être conservés ou restaurés. La travertinisation entraîne une dynamique majeure d'aggradation qui se traduit après remplissage des chenaux par un étalement en fond de vallée ou création de nouveaux lits par incision de la plaine. Elle génère des faciès d'écoulements variés associés à des dépôts spécifiques (dépôts fins dans les zones de retenue d'eau, dépôts calcaires indurés sur les zones de chutes d'eau). La pression anthropique a toutefois souvent ralenti, voire stoppé, la travertinisation, au point que ces formations sont maintenant souvent incisées et qu'elles ont du mal à se restaurer. Il en résulte des chenaux profonds et peu mobiles latéralement. Des mesures et constats réalisés sur certains sites montrent que le potentiel de travertinisation existe encore. Des actions appropriées telles que la conservation des embâcles de bois mort pourraient être favorables à leur restauration.

Mots-clés: travertins, tufs calcaires, hydromorphologie, suivi

INTRODUCTION

Les dynamiques fluviales actuelles associées aux cours d'eau formant, ou ayant formé, des tufs calcaires et travertins sont relativement peu étudiées et connues des gestionnaires de cours d'eau. Ces formations de tufs et travertins sont pourtant omniprésentes sur certains cours d'eau comme l'Argens (département du Var, France) et ne sont pas rares sur les cours d'eau d'origine karstique en général. Les implications des dynamiques fluviales associées à ces milieux intéressent néanmoins les gestionnaires qui sont généralement embarrassés quant aux mesures à prendre et au manque de données sur le sujet dans la littérature technique.

Concrètement, pour les gestionnaires, ces formations sont parfois considérées comme une gêne pour les écoulements, augmentant le risque d'inondation lorsque des sections d'ouvrages ou de lit

GÉORIVES SARL, 250 chemin de Vermenay, 38680 Saint-André-en-Royans, France. sebastiendavid@georives.com, veroniquedurin@georives.com

² Conseil Départemental du Var, Service Rivières et Milieux Aquatiques, Direction de l'Environnement, 390, Avenue des Lices CS 41303, 83076 Toulon Cedex, France. <u>lcollange@var.fr</u>

mineur diminuent sous l'effet des dépôts de travertins. Elles peuvent également être vues comme un facteur limitant la vie benthique (invertébrés, frai des salmonidés), par le colmatage des sédiments grossiers qu'elles provoquent, ou des obstacles aux continuités écologiques (seuils infranchissables par la faune piscicole). Mais c'est sans compter sur leur valeur écologique propre reconnue comme habitat prioritaire Natura 2000 (BENSETTITI et al., 2003) et le fait que certaines espèces y semblent inféodées, comme les diptères *Simulium xanthinum* et *S. marocanum* (GIUDICELLI et al., 2000). La beauté des sites à cascades de tufs, qui forment de véritables géomorphosites (NICOD, 2010), constitue également un potentiel touristique important. La cascade de Sillans, dans le département du Var, est fréquentée par 120 000 à 130 000 visiteurs/an (d'après estimations et comptages du Conseil Départemental du Var, gestionnaire de l'Espace Naturel Sensible).

Dans ce contexte, aux enjeux parfois antagonistes, une tentative de synthèse concernant l'influence des travertins sur la composante physique de l'hydrosystème fluvial (ROUX, 1982; AMOROS et al., 1987) à travers les dynamiques d'évolution observables, principalement sous contrôle de l'aggradation et de l'incision, ainsi que sur les conditions environnementales s'opposant à la travertinisation apparaît utile. Le présent article se propose d'établir cette synthèse, à destination plus spécifique des gestionnaires de cours d'eau et des techniciens concernés par l'étude de leur fonctionnement actuel, afin d'esquisser une première base pratique pour la gestion des cours d'eau à travertins. Elle tire parti des enseignements de la littérature scientifique sur les travertins, souvent paléo-environnementale, et d'observations personnelles. Des méthodes de suivi morphométrique utilisées de façon expérimentale sont également proposées en fonction de leur intérêt et limites, pour mieux appréhender les dynamiques actuelles de travertinisation et ainsi contribuer au diagnostic de l'état écologique des cours d'eau concernés.

DÉFINITION, RÉPARTITION, TYPOLOGIE DES FORMATIONS TRAVERTINEUSES ET NOTION DE SÉQUENCE TRAVERTINEUSE

Les travertins, ou tufs calcaires, peuvent être définis comme des dépôts carbonatés exokarstiques (HOFFMANN, 2005). Ils sont dus à la précipitation des carbonates, transportés en solution dans l'eau, sous l'effet de facteurs biologiques, hydrodynamiques et physico-chimiques. Les formations travertineuses et de tufs calcaires sont fréquemment observées sur les cours d'eau d'origine karstique. Elles ne sont pas liées à un contexte bioclimatique en particulier puisque l'on trouve des travertins actifs en Belgique (FRANCO, 2008), dans les parcs nationaux des lacs de Plitvice (ROGLIC, 1977) en Croatie, de Band-E-Amir (PIAS, 1976) en Afghanistan, à Ban Khouang Si au Laos (BENOIT, 1986) ainsi qu'en bordure du 60ème parallèle dans l'Ouest canadien (GEURTS *in* : WEISROCK, 2008). En France, on en observe également de nombreuses, notamment en Périgord-Quercy (HOFFMANN, 2005) et en Provence, dans le département du Var en particulier, où le bassin versant de l'Argens s'avère très riche en sites.

Trois types morphologiques de formations travertineuses ont été décrits (CASANOVA, 1981) : les formations de source, les barrages et les formations travertino-alluviales. Les barrages génèrent habituellement une chute d'eau et peuvent retenir un plan d'eau, si une dépression persiste en amont de la formation. La notion de barrage n'est pas rattachée à une forme de taille particulière. Il peut s'agir de simples seuils de quelques décimètres de haut barrant le lit mineur, comme de formations de plusieurs mètres de haut obstruant le fond de vallée. Les formations travertino-alluviales, quant à elles, présentent la particularité d'alterner en interstratification des couches travertineuses et des passées détritiques.

À partir des différents faciès et milieux associés aux travertins, la notion de séquence travertineuse a été décrite (MAGNIN et al., 1991, OLLIVIER, 2006) : elle est composée des travertins construits, associés préférentiellement à des milieux d'écoulements relativement rapides mais à faible lame d'eau, de dépôts lacustres et palustres (craies calcaires, tourbes, dépôts détritiques terrigènes fins comme les argiles ou limons) se produisant dans des zones faiblement hydrodynamiques comme en amont des barrages, de dépôts détritiques terrigènes plus grossiers tels que des sables, graviers et galets associés à des conditions d'écoulements dynamiques en capacité de transporter ces éléments. Cet ensemble de faciès et de milieux organisés forme le complexe ou système travertineux qui ne se limite donc pas aux seuls travertins construits.

DYNAMIQUES MAJEURES D'AGGRADATION ET D'INCISION : TENDANCES ACTUELLES ET INCIDENCES

La construction travertineuse entraîne une dynamique majeure d'aggradation qui est responsable d'irrégularités du profil en long. Le profil en long de la plaine inondable de l'Argens (Fig. 1) fait ainsi ressortir plusieurs ressauts liés à des barrages de travertins, dont certains, comme ceux du haut Argens, de Carcès, d'Entraigues ou de la Tournavelle, constituent des irrégularités majeures. Trois des barrages du haut Argens (Tombereau, Pont de Saint-Sumian, celui qui sert d'assise à la route départementale n°34 en amont des chutes de Montaud) ainsi que celui du Pont d'Argens ont dû retenir un plan d'eau avant d'être incisés car le niveau de la plaine en amont est plus bas que celui de la crête du barrage.

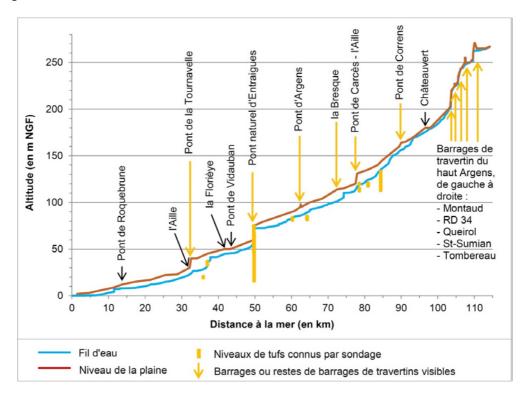


Figure 1 : Influence des formations travertineuses sur le profil en long de l'Argens

A l'époque actuelle, des formations travertineuses contrôlent encore plus ou moins le profil en long, malgré l'incision relative de l'Argens qui n'atteint pas la base des alluvions. Le pont naturel d'Entraigues, par exemple, où l'Argens s'encaisse rapidement, est relativement peu incisé comparé à l'épaisseur totale de la formation puisque les deux tiers ne le sont pas. Les travertins opposent donc une résistance non négligeable au processus d'incision. Le fil d'eau est influencé par de nombreuses chutes naturelles, liées à des seuils de tufs entre Carcès et Vidauban (GIUDICELLI *et al.*, 1980), par un radier de galets cimentés par des encroûtements en amont du Pont de la Tournavelle et probablement par des niveaux de tufs, reconnus par sondage (dossiers sur le sous-sol BSS du BRGM), qui sont peu ou pas incisés. Entre 1929 et 1983, sur la haute et la moyenne vallée, le profil en long serait resté stable et entre 1983 et 1989, des évolutions de l'ordre de + 0,7 m à -0,4 m sont ponctuellement documentées (BRLi / IARE, 1997). Il n'a pas été réalisé, à notre connaissance, de comparaisons diachroniques plus récentes. Si l'incision peut être responsable de quelques éboulements de berges escarpées, les formations travertineuses restent dans l'ensemble bien conservées et relativement stables dans la masse et donc très présentes visuellement, tant en fond de lit que sur les berges.

Le déclin massif du développement des travertins holocènes du Sud-Est de la France, souvent signalé dans la littérature, se serait amorcé après l'optimum bioclimatique holocène, entre le Néolithique et la *Pax Romana*. Des recherches récentes (Ollivier et al., 2006) rallongent toutefois la

période de travertinisation avec un démarrage plus précoce (Tardiglaciaire) et une interruption au Petit Âge Glaciaire sur certains sites. Ce déclin se traduit généralement par une incision des formations, des constructions de moindres ampleurs (micro-barrages) et au mieux une travertinisation lente. Sur certains sites, il convient toutefois de signaler un probable arrêt de la travertinisation suite à une intervention humaine radicale comme c'est le cas pour les barrages du pont de Saint-Sumian et celui de la route départementale n°34 sur le haut Argens qui portent très nettement des traces d'incision anthropique volontaire (chenaux creusés dans la masse de travertins). Jusque vers les années 1970, des extractions ont été réalisées sur la moyenne vallée de l'Argens (entre Carcès et Vidauban en particulier). A la fin des années 80 et au début des années 90, des travaux pour enlever des embâcles importants ont dégradé des seuils de travertin. Le début des interventions humaines à visée d'aménagement hydraulique remonte souvent à plusieurs siècles. D'autres sites ont donc pu connaître un déclin lié à une volonté, passant aujourd'hui inaperçue, de drainer des terres marécageuses, et/ou de réduire les débordements en fond de vallée. A partir de ces données, il est difficile de faire la part exacte des responsabilités humaines dans l'état d'incision actuel de l'Argens, bien qu'elle soit probablement très importante de façon directe comme indirecte. Des recherches systématiques dans les archives départementales seraient nécessaires pour tenter une meilleure esquisse documentaire avec les limites qu'elles comportent (actions humaines non retranscrites ou antérieures). La gestion séculaire des cours d'eau pour faciliter les écoulements et le drainage des terres, récupérer du bois de chauffage ou des matériaux de construction (le bâti ancien comporte entre autre souvent des éléments en travertin aisément taillable) est de nature à affecter, au moins temporairement, la dynamique d'évolution verticale. Certaines formations travertineuses du bassin versant de l'Argens, souvent sur des affluents, sont peu ou pas incisées et permettent d'observer une coexistence de systèmes travertineux ayant subi un déclin et d'autres encore relativement préservés.

Des rencontres liées à la gestion de problématiques actuelles sur les cours d'eau ont permis de récolter des témoignages quant à des interventions récentes visant à redonner à des portions de cours d'eau ou des ouvrages « leur » section d'écoulement, réduite par la travertinisation. Des observations de travertinisation active, apparemment rapide, ont également été réalisées sur plusieurs sites. Afin d'apprécier plus finement ces vitesses d'évolution sur un de ces sites, le vallon des Carmes à Barjols (département du Var), des mesures morphométriques, dont la méthode est détaillée ci-après, ont été réalisées. Les résultats de ces mesures (Tab. 1) montrent des vitesses de croissance actuelles largement comparables à celles des barrages de Plitvice (en Croatie) où la croissance verticale des travertins a été particulièrement active au cours de l'Holocène récent puisque de 0,8 mm/an, il y a 3 000 ans, elle est passée à 13,5 mm/an (NICOD, 1989). Dans le Vallon des Carmes, des vitesses de croissance verticale allant jusqu'à environ 27 mm/an ont pu être observées.

Tableau 1: Valeurs moyennes d'évolutions des dépôts de tuf (les valeurs entre crochets correspondent aux valeurs minimales et maximales, TCC = tronçon court-circuité par la microcentrale)

	Evolution du 22/08/2008 au 11/09/2009	Evolution du 11/09/2009 (27/09/2009 pour Sillans) au 30/04/2010	Evolution du 30/04/2010 au 04/08/2010
Progradation	+ 0.69 mm/mois	+ 0.74 mm/mois	+ 1.49 mm/mois
Les Carmes TCC	[+0.35 - +1.13]	[-0.31 - +1.21]	[+0.83 - +2.08]
Evolution verticale Les Carmes TCC	+ 1.51 mm/mois [0 - +2.28]	+ 1.01 mm/mois [+0.14 - +2.14]	-1.34 mm/mois [-7.05 - +1.93]
Evolution verticale	+ 0.12 mm/mois	+ 0.02 mm/mois	+ 1.94 mm/mois
Les Carmes aval TCC	[-0.18 - +0.61]	[-0.78 - +0.92]	[+0.68 - +2.62]
Evolution verticale Sillans		+ 0.63 mm/mois	

Sur ce site du vallon des Carmes, un tronçon du ruisseau du Fauvery, du fait d'une dérivation d'eau vers une microcentrale hydroélectrique, est court-circuité (Fig.2). Des stations de mesure ont été installées, et suivies durant près de deux années hydrologiques (du 22/08/2008 au 04/08/2010), sur le tronçon court-circuité et en aval de la restitution de la microcentrale. De façon plus ponctuelle, un suivi a également été réalisé sur la Bresque en amont de la cascade à Sillans. Enfin sur le site du vallon des Carmes, des levés diachroniques de profils en travers ont été réalisés sur le tronçon court-circuité du Fauvery, le 6 juin 2011, le 9 septembre 2011 et le 24 février 2012.

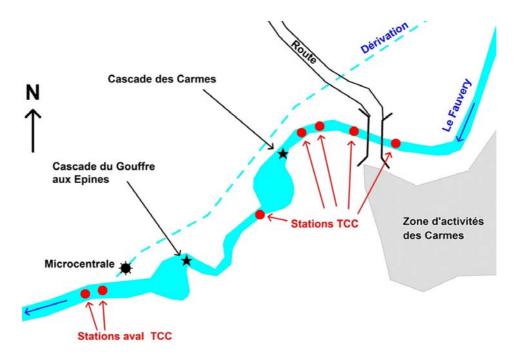


Figure 2 : Croquis de situation des stations sur le Vallon des Carmes

Malgré la survenue de trois crues, dont deux importantes, ces suivis ont montré que le potentiel de croissance travertineuse est encore présent à l'heure actuelle. Les résultats de ces mesures permettent d'établir certains constats. Premièrement, la croissance par progradation des édifices semble moins perturbée par les crues que la croissance verticale. Deuxièmement, les conditions hydrologiques, comme cela a d'ailleurs déjà été signalé par plusieurs auteurs, et les effets de site semblent déterminants quant à l'évolution des édifices. Les débits de crue ne sont pas affectés par le fonctionnement de la microcentrale, et sur le tronçon en gorges (tronçon court-circuité), les écoulements qui sont alors concentrés provoquent des entailles relativement importantes. Sur le tronçon en aval de la microcentrale, où le fond de vallon est plus large et les seuils de tufs moins hauts, la crue de la mi-juin 2010 n'a pas empêché une croissance significative des tufs. Sur ce site, l'énergie des crues est mieux dissipée, car les écoulements sont plus étalés. Les fonctionnements hydrologiques irréguliers s'avèrent défavorables à la croissance travertineuse comme en témoignent les résultats obtenus en aval de la microcentrale qui fonctionne par éclusées. Les mois de mai et juin 2010, pendant lesquels la centrale n'a pas fonctionné, sont ceux où la croissance la plus forte (malgré la crue) a été observée.

Les crues provoquent logiquement des érosions proportionnelles à leur importance. En décembre 2008, une crue de type fréquent, de période de retour entre 1 et 2 ans, a causé assez peu de dégâts sur les édifices. Celle de juin 2010, dont la période de retour peut être estimée trentennale sur le Fauvery, a localement provoqué des incisions allant jusqu'à 20 cm environ. Celle de novembre 2011, dont la période de retour sur le même cours d'eau est supra-centennale, a localement provoqué des incisions allant jusqu'à 60 cm environ. Toutefois, malgré des érosions localisées, des dépôts ont également été observés pour les deux premières crues, ce qui indique une ablation non homogène qui peut dépendre de la topographie et de la courantologie de détail, des caractéristiques de résistances

différentielles du tuf, et d'accidents localisés (chocs provoqués par des matériaux transportés en crue). Une crue du type de celle de novembre 2011 semble, en revanche, avoir des effets érosifs plus généralisés bien que localement plus ou moins importants comme le montrent les profils en travers (Fig. 3). Sur le site du vallon des Carmes, les crues ont un impact relatif sur la croissance générale des édifices travertineux et semblent, malgré quelques érosions locales marquées, ne faire que réduire légèrement la vitesse de croissance globale.

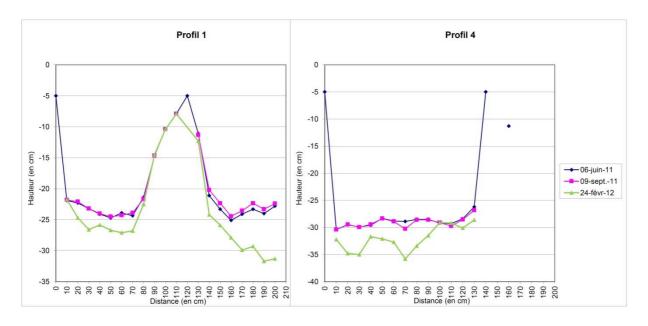


Figure 3 : Évolution des formations travertineuses du Fauvery entre le 6 juin 2011 et le 9 septembre 2012, profils en travers diachroniques

A Sillans, où un suivi plus ponctuel a été réalisé, le dépôt (Tab. 1) fut moindre qu'au Vallon des Carmes durant la même période. Il semble sur ce site très fréquenté que le piétinement soit responsable de nombreuses dégradations sur les édifices en cours de construction (DEGAUGUE, 2010).

La crue de juin 2010, qui a une période de retour estimée à plus de 500 ans (LANG et al., 2011) sur la Floriève (département du Var), a incisé, et presque intégralement enlevé, à Lorgues, une formation de travertins alluviaux (Fig. 4) qui s'était développée sur le radier pavé du pont de la ligne ferroviaire a débuté entre « Central Var » dont la construction 1886 (http://cccp.traindespignes.free.fr/infos-historique-creation.html). Ce dépôt avait atteint jusqu'à 1,4 m d'épaisseur, ce qui représente un exhaussement moyen de 11,2 mm/an en 125 ans. Dans ce laps de temps, la Florièye a subi au moins trois crues qui ont laissé des traces dans les mémoires (en 1907, en 1974 et en 1983). Ces crues ont elles-mêmes pu contribuer à l'accroissement du complexe travertineux puisque des galets, de diamètre allant jusqu'à une quinzaine de centimètres, sont interstratifiés dans la formation. Avant l'incision par la crue de 2010, la surface de la formation s'apparentait à des gours (succession de petits seuils et vasques). En conclusion sur l'influence des crues sur les formations travertineuses, il apparaît, tant sur le Fauvery que sur la Florièye, que ce sont les crues de période de retour les plus rares et donc les plus fortes qui entraînent les incisions les plus importantes alors que les crues plus courantes modifient peu ou pas le profil en long, voire, par l'apport d'éléments (galets, bois morts), peuvent contribuer à l'aggradation des formations travertineuses. Il en ressort dans l'ensemble un bilan où l'aggradation continue (dépôt de tuf) et ponctuelle (arrivée d'éléments de supports végétaux ou minéraux) l'emporterait sur l'incision ponctuelle. L'état d'incision constaté sur de nombreuses formations apparaît de ce fait plus lié aux interventions anthropiques à toutes les échelles de l'hydrosystème qu'à des causes naturelles. Les interventions anthropiques habituelles et séculaires, puis les fortes crues, en provoquant l'incision des formations contribuent à régulariser le profil en long, à l'encontre de la tendance naturelle et normale d'irrégularité en contexte travertineux.



Figure 4 : Formation de travertin alluvial de la Florièye sur le radier pavé du pont de la ligne Central Var à Lorgues (clichés : L. Collange)

Les végétaux et le bois mort constituent une contribution importante à la croissance des constructions travertineuses. Les coupes dans certains édifices montrent des vides correspondant à des empreintes végétales, dont des branches et des troncs. Sur plusieurs sites du bassin versant de l'Argens, il est possible d'observer des bois morts pris dans les formations travertineuses actuelles. Les embâcles de bois et de déchets végétaux constituent un support de travertinisation (Fig. 5) apte à faire progresser rapidement la croissance verticale des édifices et pouvant les renforcer vis-à-vis des creusements (COLLANGE & DAVID, 2014), à l'instar du rôle joué par les barres de fer dans le béton armé, ou par les fibres végétales dans le plâtre armé.



Figure 5 : Dépôt de tuf sur bois mort à gauche et tirefond implanté sur un seuil de tuf à droite (clichés L. Collange)

Les dynamiques latérales sont principalement sous contrôle des évolutions verticales qui connaissent des phases d'aggradation et d'incision. En phase d'aggradation, lorsque les cours d'eau sont comblés par la travertinisation, un étalement dans le fond de vallée se produit, pouvant conduire à la création d'un nouveau lit mineur par incision dans la plaine qui pourra lui-même être comblé, comme cela a été le cas à Pont-de-Joux (département des Bouches-du-Rhône) où trois talwegs, dont deux comblés, se sont succédés depuis un peu plus de 7 000 ans (d'après d'ANNA *et al.*, 1988 in OLLIVIER, 2006). Une perduration de l'aggradation à l'échelle du fond de vallée peut également se produire.

En état incisé des formations, la mobilité latérale est généralement très faible du fait de la cohésion des sédiments composant le complexe travertineux (travertins ou tufs, et sédiments fins tels que les limons en amont des formations carbonatées). Dans ces conditions, l'incision ou la perduration

de l'état incisé peuvent être d'autant plus marquées que la cohésion des berges concentre la puissance érosive en fond de lit mineur et que les formations travertineuses ont provoqué des écarts au profil d'équilibre. Des pseudo-gorges peuvent alors se former dans la plaine alluviale comme c'est le cas notamment sur la moyenne vallée de l'Argens dont la quasi-totalité du linéaire peut être rattachée à des complexes travertineux.

Les configurations géomorphologiques liées au contexte travertineux peuvent également avoir un effet important sur l'hydrologie. Les barrages de travertins du Haut Argens aujourd'hui artificiellement incisés fonctionnent comme des ouvrages écrêteurs de crues comparables à des barrages à pertuis ouvert. Le fractionnement de la pente longitudinale en tronçons moins pentus que la normale sous l'effet du contrôle des édifices travertineux joue également un rôle bénéfique de ralentissement des écoulements et contribue à renforcer l'effet de régulation des débits déjà souvent très marqué en milieu karstique. A contrario, l'incision sur la moyenne vallée de l'Argens, si elle joue un rôle positif localement, en réduisant les débordements, a également comme corollaire de réduire les possibilités d'expansion des crues en lit majeur et donc leur écrêtement. Hormis les cas, non majoritaires, de barrages ayant retenu un plan d'eau jusqu'à leur incision, le phénomène d'incision des formations travertineuses est généralement défavorable, sur l'Argens comme sur d'autres cours d'eau (Huveaune entre Saint-Zacharie et Roquevaire notamment) à l'expansion des crues et donc à une logique de solidarité amont/aval. Cette incision est également défavorable à la conservation des zones humides.

CONDITIONS S'OPPOSANT A LA TRAVERTINISATION, ENSEIGNEMENTS POUR LA GESTION DES HYDROSYSTÈMES FLUVIAUX, PROPOSITION DE MÉTHODES DE SUIVI MORPHOMÉTRIQUE ET DISCUSSION SUR LE POTENTIEL DE RECHERCHE POUR UNE MEILLEURE CONNAISSANCE

Le rôle de la pression anthropique sur le démantèlement des édifices travertineux a fait l'objet d'une synthèse (VAUDOUR, 1986) qui met en exergue : l'attractivité des sites travertineux pour les établissements humains à leur détriment, le déboisement des bassins versants et des environnements immédiats des édifices, l'augmentation de la turbidité et de la pollution des eaux et la dégradation du régime hydrologique (prélèvements réduisant les débits, crues plus brutales notamment). Les politiques de gestion des cours d'eau jusqu'à une époque récente (suppression de la ripisylve, enlèvements systématiques du bois mort, recalibrages, curages) ont entretenu, voire favorisé, ce déclin des édifices travertineux. L'état incisé constitue un système qui tend à s'auto-entretenir en l'absence de non intervention. Un modèle hydraulique, réalisé sur le site du barrage de la route départementale n°34, sur le haut Argens, montre l'effet de l'incision du barrage sur les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement pour différentes conditions hydrologiques (Tab. 2). Les écoulements sont maintenant concentrés dans un chenal étroit et profond alors qu'ils s'étalaient largement avant incision sur toute la crête du barrage. Il en résulte un accroissement des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement défavorable à la travertinisation et surtout à la conservation des dépôts en crue. Avant incision, les faibles lames d'eau des débits courants, associées à des écoulements tout de même vifs, créaient des conditions propices aux dépôts.

Tableau 2 : Conditions hydrauliques (hauteurs d'eau maximums, vitesses moyennes) en l'état actuel incisé et antérieur à l'incision du barrage de travertins de la route départementale n°34 (résultats du modèle hydraulique)

	Lit mineur actuel incisé dans le barrage	Crête du barrage avant incision (bord amont)	Crête du barrage avant incision (bord aval)
Etiage (0,33 m³/s)	0.28 m / 1.06 m/s	0.19 m / 0.12 m/s	0.11 m / 0.64 m/s
Module (1,56 m ³ /s)	0.52 m / 1.45 m/s	0. 31 m / 0.17 m/s	0.20 m / 0.84 m/s
Crue biennale (19 m³/s)	1.67 m / 3.37 m/s	0.62 m / 0.40 m/s	0.46 m / 1.22 m/s
Crue quinquennale (32 m³/s)	2.24 m / 4.01 m/s	0.72 m / 0.51 m/s	0.55 m / 1.37 m/s
Crue décennale (41 m³/s)	2.55 m / 4.18 m/s	0.78 m / 0.57 m/s	0.59 m / 1.37 m/s
Crue vicennale (50 m³/s)	2.85 m / 4.08 m/s	0.83 m / 0.63 m/s	0.63 m / 1.45 m/s
Crue cinquantenale (59 m³/s)	3.14 m / 4.27 m/s	0.87 m / 0.68 m/s	0.67 m / 1.57 m/s

Les crues ne provoquaient qu'une augmentation modérée des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement et ne devaient pas provoquer beaucoup de dégâts. Actuellement, même si une travertinisation perdure en conditions normales d'écoulement, la violence des crues est telle que les dépôts sont le plus souvent détruits. Dans de telles conditions, le fait de laisser des embâcles se fixer apparaît comme le moyen de gestion locale le plus efficace de redémarrer naturellement la croissance des édifices, là où le potentiel de travertinisation existe encore. Ce qui n'exclut pas pour autant d'agir à un niveau global, à toutes les échelles de l'hydrosystème.

La sensibilité de la travertinisation aux perturbations de l'hydrosystème fluvial en fait un bon indicateur de son état. Elle pourrait donc être retenue comme un indicateur (VAUDOUR, 1986) d'état des masses d'eau où ces formations se développent naturellement, dans le cadre de l'application de la Directive Cadre sur l'Eau européenne. Comme tel, et compte tenu de la caractérisation en habitat prioritaire Natura 2000, les gestionnaires de cours d'eau devraient normalement favoriser le maintien et la restauration des édifices travertineux de façon directe par des actions sur le lit mineur et ses berges ou indirectes par des mesures à l'échelle de l'ensemble du bassin versant (topographique et karstique). Dans la première famille d'action, sont envisageables la préservation et la restauration d'une ripisylve aussi dense, large et diversifiée que possible ainsi que la conservation du bois mort en lit mineur voire sa réintroduction (LE LAY Y.F., PIEGAY H., 2007) comme support de travertinisation. Les embâcles de bois formant seuil se révèlent particulièrement favorables à cette dernière. Dans la deuxième famille d'action, toutes les mesures permettant la régulation des quantités par le ralentissement, la rétention et l'infiltration naturelle des eaux, la réduction des prélèvements, ainsi que la préservation et l'amélioration de la qualité des eaux (moindre turbidité notamment) sont également favorables. La préservation et la restauration des bois, haies, le maintien d'un couvert permanent et le non-labour sur les sols agricoles et diverses mesures agro-environnementales, la rétention des eaux plutôt que leur drainage, l'assainissement poussé des eaux usées apparaissent comme autant de mesures à envisager. Pour la première famille d'action, il est en fonction des enjeux en zone inondable, parfois difficilement envisageable de maintenir les édifices en formation ou de les restaurer. En zone urbaine inondable, cela peut même se révéler impossible. Une gestion différenciée est donc nécessaire en fonction des enjeux comme cela est aujourd'hui de plus en plus courant en matière d'entretien des cours d'eau. Les interventions parfois nécessaires de destruction, d'incision et d'arasement des formations travertineuses sur les zones à enjeux devraient s'accompagner de mesures de compensation comme leur restauration hors de ces zones où elles permettent également de favoriser l'expansion des crues et donc contribuent à la réduction du risque inondation pour les enjeux.

Un suivi morphométrique de cette travertinisation permettrait de juger de l'efficacité des mesures prises pour la restauration du bon état. Dans cette optique, il peut être utile de définir les contours d'un tel suivi sur la base de l'expérimentation réalisée au Vallon des Carmes. Sur ce site, l'équipement des stations, réalisé le 22/08/2008, a consisté en la fixation de plusieurs tirefonds (Fig. 5) sur des seuils en tufs. Le suivi de l'évolution a ensuite été réalisé par comparaison entre les distances, mesurées au pied à coulisse, qui séparent le sommet des tirefonds du substrat sur lequel ils sont implantés. Pour chaque tirefond, quatre mesures étaient prises lors des relevés réalisés jusqu'au 04/08/2010 (côté amont, côté aval, côté vers la rive gauche et côté vers la rive droite) et la moyenne de ces mesures retenue comme significative de l'évolution au droit du dispositif. Cette méthode permet un suivi fin, à une échelle inférieure au millimètre, des évolutions mais nécessite la pose et le suivi d'un nombre assez important de tirefonds pour être significative. De plus, un suivi régulier et assez rapproché dans le temps (une fois par trimestre dans l'idéal, et après chaque crue significative) s'avère utile car des tirefonds peuvent se retrouver rapidement masqués par des dépôts. Une intervention régulière permet de doubler ces tirefonds avant leur enfouissement et de désencroûter leur sommet. L'arrachement de tirefonds en crue (chocs d'objets déplacés par le courant), ou le « vandalisme » sur les sites fréquentés, sont également une source potentielle de perte de données qui sera minimisée par une fréquence élevée des visites. Un suivi trimestriel permettrait en outre d'apprécier les variations saisonnières de la travertinisation. Une deuxième méthode consiste à réaliser des profils en travers et des profils en long des tronçons suivis par des moyens topographiques classiques (niveau, théodolite). C'est une méthode de ce type qui a été utilisée entre le 06/06/2011 et le 24/02/2012. Avec une précision moindre, de l'ordre du centimètre (liée à l'incertitude de positionnement des points de mesure entre deux campagnes), cette méthode semble moins adaptée à un suivi fin des dépôts à court terme ou à un suivi des milieux à faible potentiel de travertinisation. Elle pourrait, en revanche, être

intéressante sur les milieux à fort potentiel de travertinisation, sur une échelle de temps pluriannuelle, où elle s'avère moins chronophage. Une campagne de relevés tous les 2 ans peut alors être envisagée dans ce cas. Le point délicat de cette méthode consiste, outre le positionnement des points relevés d'une campagne sur l'autre, à recaler les levés sur de mêmes points de nivellement. Sur certains sites, choisir des points de nivellement de référence proches et stables dans le temps peut s'avérer difficile. L'utilisation de supports de dépôts (comme des tubes de plastique, plaquettes de calcaire ou baguettes de verre), telle qu'elle est parfois pratiquée (Hoffmann, 2005) est très utile pour étudier le potentiel hydrochimique de travertinisation. Elle permet la réalisation de diverses analyses en laboratoire sur les dépôts encroûtant ces supports. Elle ne constitue cependant pas, stricto sensu, une méthode de suivi d'évolution morphologique des formations travertineuses elles-mêmes.

Malgré de nombreuses recherches pluridisciplinaires portant sur les formations travertineuses, le potentiel d'étude pour en assurer une meilleure connaissance reste très important tant elles constituent des enregistreurs intéressants d'évolution de l'hydrosystème fluvial. Les formations incisées du fait de leur cohésion sont souvent bien conservées, visibles tant en fond de lit mineur qu'en berges et livrent de nombreuses coupes interprétables et potentiellement datables. Certaines ont de ce fait été étudiées pour une connaissance des évolutions paléo-environnementales. Une étude plus systématique des coupes existantes, mais impossibles d'accès sans un équipement spécial, serait intéressante sur certaines formations du Haut Argens comme à Saint-Sumian ou de la moyenne vallée comme au Pont de la Tournavelle. La réalisation de sondages sur les formations non ou peu incisées et non étudiées le serait également. Des recherches poussées dans les archives départementales pourraient également livrer des informations quant aux travaux anciens réalisés notamment. Ces études pourraient permettre d'affiner encore la connaissance de ces formations, notamment de leur incision (causes et périodes) pour celles qui en sont affectées. Dans les formations incisées, des cavités naturelles sont parfois mises à jour. L'étude de leur remplissage sédimentaire pourrait permettre une meilleure connaissance paléohydrologique des crues à l'instar du travail réalisé dans les gorges du Gardon (DEZILEAU et al., 2014).

CONCLUSION

La Provence calcaire, et le bassin versant de l'Argens en particulier, par l'abondance des formations travertineuses holocènes et actuelles, constitue un terrain d'étude privilégié de ces dépôts, de leurs dynamiques d'évolution et de leurs incidences sur les dynamiques fluviales. Toutefois, la travertinisation n'est pas liée à un contexte bio-climatique particulier puisque des formations actives existent dans des contextes climatiques et biogéographiques très variés. Les formations travertineuses répondent à une dynamique majeure d'aggradation dont le potentiel est souvent encore présent comme le démontrent les mesures réalisées sur le Vallon des Carmes à Barjols où des vitesses de croissance verticale allant jusqu'à environ 27 mm/an ont pu être observées ainsi que plusieurs observations de terrain en Provence comme dans d'autres régions françaises : Languedoc, Auvergne-Rhône-Alpes, Îlede-France et Bourgogne-Franche-Comté (observations personnelles). Ces formations souffrent néanmoins souvent d'incisions dont la part la plus importante est à imputer à l'action anthropique directe (volonté de drainer des terres sur le Haut Argens notamment) ou indirecte. Les politiques d'entretien séculaire des cours d'eau consistant à curer, déboiser, enlever le bois mort leur ont été peu favorables et leur restauration nécessite une politique inverse là où cela est socialement acceptable, hors zones à enjeux forts d'inondation. Les bénéfices environnementaux attendus sont la restauration de zones humides et le ralentissement des crues par expansion.

Les formations travertineuses très actives en aggradation et peu perturbées favorisent une certaine mobilité latérale et un hydrosystème fluvial de fond de vallée dynamique en constant changement. A contrario, les formations incisées constituent des zones peu évolutives avec une faible mobilité latérale, par l'effet d'un complexe sédimentaire généralement cohésif.

La travertinisation constitue un bon indicateur de l'état des masses d'eau (au sens de la Directive Cadre sur l'Eau) qui en sont le siège. Un suivi morphométrique adapté est donc nécessaire pour juger de leur état et de l'efficacité des mesures prises.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMOROS C., ROUX A.L., REYGROBELLET J.L., BRAVARD J.P. & PAUTOU G., 1987. A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers*, 1:17-36
- BENOIT, J., 1986. La cascade travertineuse de Ban Khouang Si (Laos). Méditerranée, 57 (1-2): 126-128
- BENSETTITI, F., GAUDILLAT, V., HAURY, J. (coord.), 2003. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3 Habitats humides. Cahiers d'habitats Natura 2000. La documentation Française, 457 p.
- CASANOVA, J., 1981. Morphologie et biolithogenèse des barrages de travertin. Mémoire de l'Association Française de Karstologie, 3 : 45-54
- BRLi / IARE, 1997. Etude géomorphologique Aides à la définition de règles de gestion du cours de l'Argens, Conseil Général du Var, 112 p.
- COLLANGE, L. & DAVID S., 2014. Travertine environments: evolutions and potential. Is it possible to restore them? SHF conference: *Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems*, Nantes, 9 p.
- DEGAUGUE, F., 2010. Etude des travertins du site de la Cascade. Sillans-la-Cascade. Var. Mairie de Sillans-la-Cascade, Conseil Général du Var, 100 p.
- DEZILEAU L., TERRIER B., BERGER J.F., BLANCHEMANCHE P., LATAPIE A., FREYDIER R., PAQUIER A., LANG M. & DELGADO J.L., 2014. Reconstitution des crues extrêmes du Gardon à partir d'une analyse paléohydrologique, *La Houille Blanche*, 4 : 44-52
- FRANCO, H., HOUBRECHTS, G., VAN CAMPEHOUT, J., HALLOT, E. & PETIT, F., 2008. Etude géomorphologique des barrages de travertin du Hoyoux. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 50 : 45-56
- GIUDICELLI, J., BOUZIDI, A. & AIT ABDELAALI, N., 2000. Contribution à l'étude faunistique et écologique des simulies (Diptera : Simuliidae) du Maroc IV. Les simulies du Haut Atlas. Description d'une nouvelle espèce. *Annales de Limnologie*, 36 (1) : 57-80
- GIUDICELLI, J., DIA A. & LEGIER P., 1980. Etude hydrobiologique d'une rivière de région méditerranéenne, l'Argens (Var, France). Habitats, hydrochimie, distribution de la faune benthique. *Bijdragen tot de Dierkunde*, 50 : 303-341
- HOFFMANN, F., 2005. Les tufs et travertins en Périgord-Quercy. Karstologia. Mémoires, 13, 260 p.
- LANG, M., JAVELLE, P. & AUBERT, Y., 2011. Estimation de la période de retour de la crue du 15 juin 2010 aux alentours de Draguignan. Note du 15 septembre 2011. 13 p.
- LE LAY Y.F. & PIEGAY H., 2007. Le bois mort dans les paysages fluviaux français : éléments pour une gestion renouvelée. *L'espace géographique*, 36-1 : 51-64
- MAGNIN, F., GUENDON, J.L., VAUDOUR J. & MARTIN P., 1991. Les travertins: accumulations carbonatées associées aux systèmes karstiques, séquences sédimentaires et paléoenvironnements quaternaires. *Bull. Soc. Géol. France*, 162 (3): 585-594
- NICOD J., 1989. Du nouveau sur l'édification des barrages de travertins de Plitvice (Croatie). *Méditerranée*, 68 (2-3): 85-86
- NICOD, J., 2010. Barrages de tufs calcaires et cascades dans le Centre-Var : rapport avec les eaux des sources karstiques, historique et déclin actuel. *Physio-Géo*, 4 : 42-67
- OLLIVIER, V., 2006. Continuités, instabilités et ruptures morphogéniques en Provence depuis la dernière glaciation. Travertinisation, détritisme et incisions sur le piémont sud du Grand Luberon (Vaucluse, France). Relations avec les changements climatiques et l'anthropisation. Thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I, 357 p.
- OLLIVIER, V., GUENDON, J.L., ALI, A., ROIRON, P. & AMBERT, P., 2006. Evolution post-glaciaire des environnements travertineux provençaux et alpins : nouveau cadre chronologique, faciès et dynamiques morphosédimentaires. *Quaternaire*. 17 (2) : 51-67
- PIAS, J., 1976. Formations superficielles et sols d'Afghanistan. *Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M.*, 55, 329 p.
- ROGLIC, J., 1977. Les lacs de Plitvice. Norois. 95 bis : 305-318
- Roux A.L., 1982. Le Haut-Rhône français : lieu privilégié d'une recherche interdisciplinaire sur la gestion écologique des ressources en eau. Revue de géographie de Lyon, 57-1 : 5-6
- VAUDOUR, J., 1986. Travertins holocènes et pression anthropique. Méditerranée, 57 (1-2): 168-173
- WEISROCK, A., 2008. Compte-rendu: Marie-Anne Geurts, Tufs et travertins en bordure du 60e parallèle, Ouest Canadien. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1/2008: 59-60.