



HAL
open science

Vegetation of tidal zones

Étienne Dambrine, L Deveaux, G Guinet, A Guerou, B Boggio, J Girel

► **To cite this version:**

Étienne Dambrine, L Deveaux, G Guinet, A Guerou, B Boggio, et al.. Vegetation of tidal zones. INRAE - CARRTEL. 2024. hal-04725008

HAL Id: hal-04725008

<https://hal.science/hal-04725008v1>

Submitted on 7 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Végétation et végétalisation des zones de marnage : déterminisme environnemental et perspectives liées à l'utilisation de la télédétection



E. Dambrine, L. Deveaux, G. Guinet, A. Guerou, B. Boggio, J. Girel

Résumé

Cette étude se compose de deux parties.

Dans la première, on caractérise la couverture végétale et précise les éléments environnementaux critiques influençant la présence de végétation sur la zone de marnage des retenues artificielles de Serre-Ponçon et de Villerest. Dans la deuxième, on explore les possibilités offertes par la télédétection pour mesurer la présence et la progression de la végétation sur les zones de marnage dans ces deux retenues

A Serre-Ponçon, en amont de la Durance, la zone de marnage est découverte durant l'hiver et le printemps, lorsque le niveau d'eau s'abaisse en moyenne de 20 m, et noyée durant l'été, lorsque l'eau remonte à son niveau maximal. Lorsqu'elle est présente, la végétation se développe dans la ceinture couvrant environ 10 m d'altitude sous le niveau maximal des eaux, sur les pentes faibles des anciens cônes de déjection torrentiels, où un sédiment lavé et graveleux, qui assure une stabilisation vis à vis du battillage, recouvre l'ancien horizon B de sol, qui joue le rôle de réserve d'eau et d'éléments minéraux. Des plantes généralement pérennes colonisent partiellement la partie supérieure des anciens cônes de déjection. Elles possèdent des racines pivot leur permettant de prospecter les horizons de sols enfouis. Parmi celles-ci, *Rorippa sylvestris* offre le potentiel de végétalisation le plus prometteur. La télédétection permet de suivre le marnage et précise la progression de la végétation sur les zones où nos observations montraient qu'elle est peu présente.

A Villerest, à l'aval de la retenue de Grangent, sur la Loire, la zone de marnage est découverte durant l'été et l'automne et le printemps, lorsque le niveau d'eau s'abaisse en moyenne de 15 m, et noyée durant l'hiver et le printemps, lorsque l'eau remonte à son niveau maximal. Les plantes annuelles colonisent très largement l'ensemble des pentes, faibles et fortes et jusqu'au niveaux les plus bas, tandis que les pérennes sont peu représentées. La colonisation est plus faible lorsque le drainage interne au sol est réduit. Le succès des annuelles pourrait provenir de la fertilisation assurée par les blooms, liés à la richesse trophique du lac, tandis que la banque de graines pourrait provenir du barrage en amont. La télédétection permet de préciser la progression de la végétation au cours de la saison, et ceci depuis que des images spot existent. Cette possibilité pourra être mise à profit sur les retenues en faible pente.

Ainsi, si les pérennes dominent à Serre-Ponçon par rapport aux annuelles, et vice-versa à Villerest, l'âge de la retenue peut être invoqué mais probablement aussi la position dans la chaîne des retenues qui doit influencer la densité de graines, en enfin le niveau trophique de la retenue, qui doit conditionner la vitesse de croissance, qui est l'élément clé pour des annuelles. Serre-Ponçon est oligotrophe et en amont, Villerest est eutrophe et en aval. Les pérennes bénéficient de la présence d'un ancien horizon de sol enterré, les annuelles de la fertilisation par l'eau.

Les observations sont magnifiquement illustrées par la mesure du NDVI sur les images Spot des deux retenues. Mieux, cette mesure permet de suivre la dynamique de cette végétation au cours de la saison, et au cours des années précédentes, et ceci depuis que ces images sont disponibles.

Ces prospections de terrain, associées aux images satellites permettent de dresser une carte d'identité de ces zones de marnage dans différents contextes et sous différentes contraintes, et des opportunités qu'elles offrent. Une généralisation à l'ensemble des réservoirs est donc envisageable.

Remerciements

Ce rapport est issu de prospections menées à Serre Ponçon avec Léo Deveaux (M1-Ecomont) et à Villerest avec Baptiste Boggio et Jacky Girel. Nous remercions Sylvain ABDULHAK, Stéphanie Huc et Guillaume Terpereau, du Conservatoire Botanique National Alpin de Gap-Charance, Christophe RAPUC du Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement de Serre-Ponçon, qui nous ont guidé dans cette première étape de terrain. Le stage de Gabriel Guinet, sous la direction d'Adrien Guerou a permis d'explorer la colonisation végétale saisonnière et inter-annuelle de ces zones grâce aux images satellitaires. Nous remercions André Evette (Lessem, Inrae), Florent Arthaud (Univ-SMB), Vincent Chanudet, Fred Jacob, Fred Leblanc et Agnès Barillier (EDF) pour leur soutien. Cette pré-étude (Jalela) a été financée par un contrat EDF-USMB.

1. Introduction

Les retenues produisent de l'énergie, régulent le débit des rivières, fournissent de l'eau potable, de l'eau d'irrigation et favorisent le tourisme. L'utilisation des retenues comme stockage temporaire implique des variations périodiques, journalières, saisonnières ou interannuelles du niveau de remplissage, en fonction de son usage, ce qui définit les contraintes écologiques associées au marnage. Si l'objectif principal est la production d'hydro-électricité aux pics de consommation, l'eau sera préférentiellement turbinée durant l'hiver, et le remplissage s'effectuera au cours du printemps/été suivant le régime hydrologique des affluents. Si la retenue sert principalement pour l'irrigation, le réservoir se videra au cours du printemps et de l'été. Au-delà de ces généralités, les régimes de marnage sont très divers et créent une gamme de contraintes écologiques très ouverte. Dans le contexte actuel de changement climatique, on pourrait s'attendre à une augmentation globale du marnage annuel, causé par des périodes de sécheresses plus intenses, ou plus fréquentes, et des périodes de pluie plus aléatoires (Pachauri et al., 2014).

L'érosion par différents facteurs (batillage des vagues, gel, pluies sur zones asséchées, vent) de la zone de marnage (Hirsch et al., 2017) induit une redistribution des particules fines des sols vers la zone toujours en eau et le sédiment (Felix Faure et al., 2018). D'autre part, l'hydromorphie causée par la saturation induit des redistributions de fer et de nutriments dans les profils. Ces zones de marnages sont peu propices au développement de la végétation : le sol remobilisé chaque année rend l'enracinement difficile (Jiao et al., 2009) et le batillage des vagues induit des contraintes structurelles sur les organes aériens. Lors des périodes exondées, les plantes peuvent souffrir de sécheresse en cas de sol sableux, tandis qu'elles sont noyées lors de hautes eaux. Parce que la zone de marnage interrompt la continuité entre écosystèmes terrestre et aquatique, le marnage a des effets négatifs sur les communautés de macrophytes, macroinvertébrés et la faune piscicole (Sutela et al., 2013) qui augmentent en fonction de son intensité et de sa fréquence (Leira & Cantonati, 2008).

La végétalisation des zones de marnage pourrait participer à la stabilisation des sols, freiner leur érosion et la redistribution vers les sédiments (Durán Zuazo & Rodríguez Pleguezuelo, 2008; Ford et al., 2016). Elle pourrait offrir des frayères et zones de nourrissage via l'entomofaune terrestre (Johnson et al., 2007). Dans une perspective plus large, cette végétation pourrait aussi permettre de stocker du carbone et des nutriments, réduire le niveau trophique des lacs, et offrir des écotones plus diversifiés (Drius et al., 2016; Merriman et al., 2017). Ces bénéfices seraient d'autant plus importants que la pente de la zone de marnage est faible car la surface exondée peut alors être très vaste (Leira & Cantonati, 2008).

Enfin, bordant des plans d'eau largement fréquentés et utilisés pour le tourisme, ces zones de marnage, souvent jugées inesthétiques, pourrait être aussi des enjeux paysagers.

Pour consolider ces enjeux, il nous faut préciser les traits des espèces colonisant naturellement ces zones de marnage, les facteurs favorables à la colonisation et comment le marnage les influence. Après une synthèse bibliographique rapide, nous nous appuierons sur les prospections terrestres et utilisant les images satellites menées à Serre-Ponçon et Villerest et l'Arrêt Darré pour ouvrir des perspectives.

2. Revue bibliographique

Les études de la végétation des zones de marnage de barrage, développées à partir des années 70 en France, et associées à des tentatives de végétalisation expérimentales, ont été synthétisées par Fraissé (1999). A la différence avec les berges des rivières, ce domaine est resté assez confidentiel et n'a pas donné lieu à une activité industrielle de restauration des berges. Dans sa synthèse, Fraisse (1999) distingue 3 domaines morphologiques typiques des zones de marnage ; les berges escarpées, les replats vaseux, et les berges sableuses et lessivées. Les berges escarpées sont peu propices à la végétalisation du fait de l'érosion régressive. Les replats vaseux, malgré la battance du substrat, peuvent faire l'objet d'une colonisation luxuriante et monospécifique et fournir des zones de couvert, de nourriture et de reproduction pour la faune terrestre et aquatique. Enfin, les berges sableuses et lessivées, du fait de la pauvreté du substrat seraient peu favorable à la colonisation, et offrent un aspect peu attrayant.

Les espèces pérennes des berges sableuses sont celles appartenant à l'alliance du *Bidention tripartiti*, comme *Rorippa sylvestris*, *Mentha pulegium*, *Carex hirta*, *Plantago major*. Les espèces pérennes des berges escarpées sont les mêmes, auxquelles peuvent s'ajouter des espèces pionnières telles que *Rumex acetosella*, *Gnaphalium luteo album*, *Linaria repens*, *Solanum nigrum* et *Bidens radiata*. Les replats vaseux portent des espèces de la même alliance auxquelles peuvent s'ajouter des peuplements denses et monospécifiques de grands héliophytes tels *Phalaris arundinacea*, *Lysimachia vulgaris*, *Typha latifolia*.

Pour cet auteur, la colonisation spontanée débute toujours en haut de berge, par des espèces annuelles, suivies par des espèces pérennes adaptées à des périodes d'immersion de courte durée. Ces espèces annuelles sont généralement des espèces ubiquistes et pionnières dont les modalités de reproduction (cycle court, constitution de banques de semences) les rendent très performantes pour coloniser des milieux neufs. Par la suite, la colonisation descend vers le bas des berges, toujours initiée par des espèces annuelles, suivies par des espèces pérennes de bas de berge, de plus en plus adaptées à la contrainte de l'immersion. Finalement cette distribution spatiale d'espèces végétales détermine des ceintures de colonisation. L'auteur insiste sur l'importance de la durée. Il cite en exemple les retenues âgées de plus de deux siècles de l'Ouest de la Montagne Noire, dont les berges, vaseuses, sableuses ou escarpées, sont entièrement colonisées malgré un fort marnage.

Les plantes pérennes adaptées possèdent les propriétés suivantes : résistance à l'immersion, plasticité phénologique, multiplication sexuée et asexuée, résistance au stress hydrique et à l'excès d'eau, et résistance des semences à l'immersion. Les caractéristiques propres de chacune des principales espèces se trouvent rassemblées dans le Tableau 1.

Au chapitre des avantages d'une végétalisation, il cite l'activation des chaînes trophiques, la contribution à la lutte contre les risques d'eutrophisation, la création de zones de frayères, la création de zones de couvert pour la faune terrestre et ailée, l'amélioration de la turbidité des eaux, l'amélioration paysagère, la limitation des risques naturels et l'augmentation de l'attrait touristique.

Certaines de ces espèces font l'objet d'études physiologiques soutenant ces observations, en particulier *Rorippa* : dissémination et résistance des graines face à l'eau (Coops & Velde, 1995), adaptation à l'anaérobiose racinaire, morphogénèse foliaire et stomatogénèse (Ikematsu et al., 2023) régénération racinaire (Amano et al., 2020), photosynthèse aquatique (Vartapetian & Jackson 1997 ; Mommer & Visser 2005 ; Stift et al., 2008 ; Akman et al., 2012).

En ce qui concerne les retenues étudiées, des études pionnières de la végétation des berges et des essais de végétalisation ont été menées à Serre-Ponçon par le CBNA et le SMADECEP et soutenues par EDF (Abdulhak, 2015, 2018; Abdulhak et al., 2018), suivant les travaux pionniers de Fraissé (1999). Ces recherches ont été localement développées à la suite de l'apparition de vents de sables, alimentés par les vents thermiques et se nourrissant des particules fines de la surface des zones de marnage (Fig.1C). A Villerest, à notre connaissance, il n'y a pas eu d'études.

Tableau 1 : espèces pérennes des zones de marnage et résistance vis-à-vis des contraintes écologiques (Fraissé, 1999).

Tableau récapitulatif des caractéristiques des dix espèces étudiées			
Nom scientifique (Famille)	Préférences écologiques Affinité vis à vis du substrat (■) Ceinture d'implantation (■)	Résistance à la contrainte Immersion (■) Sécheresse (■) Sédimentation (■)	Attentes et intérêts en végétalisation
Eleocharis palustris (Cypéracées)	■ Replats vaseux et zones de dépôts, sols battants ■ Ceinture médiane	■ Bonne (5 à 6 mois sous 3 à 4 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Bonne (3 à 4 cm)	Écologique (appétence) Fonctionnel (maintien des sols)
Phalaris arundinacea (Graminées)	■ Sols sableux ou battants ■ Ceintures haute, médiane et basse	■ Très bonne (6 à 7 mois sous 3 à 7 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Moyenne (1 à 2 cm)	Écologique (appétence, frayère, couvert) Fonctionnel (maintien des sols) Touristique (fauchable, foulable)
Deschampsia cespitosa (Graminées)	■ Sols sableux ou battants ■ Ceinture haute	■ Moyenne (3 à 4 mois sous 1 à 3 m) ■ Moyenne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Moyenne (1 à 2 cm)	Écologique (appétence) Fonctionnel (maintien plus ou moins bon des sols en place)
Carex hirta (Cypéracées)	■ Berges sableuses et rocheuses ■ Ceintures haute, médiane et basse	■ Très bonne (6 à 8 mois sous 3 à 8 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Moyenne (1 à 2 cm)	Écologique (appétence limitée) Fonctionnel (maintien des sols) Touristique (fauchable, foulable)
Mentha pulegium (Labiées)	■ Sols sableux ou vaseux ■ Ceintures haute, médiane et basse	■ Très bonne (6 à 7 mois sous 3 à 7 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Faible (<1 cm)	Touristique (foulable)
Rorippa sylvestris (Cruclifères)	■ Sols sableux, rocheux ou vaseux ■ Ceintures haute, médiane et basse	■ Très bonne (5 à 7 mois sous 3 à 8 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Moyenne (1 à 2 cm)	Écologique (appétence) Fonctionnel (contribue à fixer les fines)
Lysimachia vulgaris (Primulacées)	■ Sols battants, parfois sols sableux ■ Ceintures haute et médiane	■ Bonne (4 à 5 mois sous 1 à 3 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Bonne (3 à 4 cm)	Touristique (intérêt esthétique et paysager)
Lythrum salicaria (Lythracées)	■ Sols sableux, rocheux ou vaseux ■ Ceinture haute	■ Bonne (5 à 6 mois sous 1 à 3 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Bonne (>1 à 2 cm)	Fonctionnel (maintien des sols) Touristique (intérêt esthétique et paysager)
Cyperus eragrostis (Cypéracées)	■ Sols sableux ■ Ceinture médiane	■ Bonne (5 à 6 mois sous 3 à 4 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Moyenne (1 à 2 cm)	Écologique (appétence) Fonctionnel (maintien des sols) Touristique (intérêt esthétique et paysager)
Scirpus maritimus (Cypéracées)	■ Replats vaseux, parfois sols sableux ■ Ceintures haute et médiane	■ Bonne (5 à 6 mois sous 1 à 4 m) ■ Assez bonne (1 à 2 mois au delà du P.F.P.) ■ Moyenne (1 à 2 cm)	Écologique (appétence) Fonctionnel (maintien des sols)

(P.F.P. : point de flétrissement permanent)

3. Les retenues de Serre-Ponçon et Villerest

3.1. Serre-Ponçon

3.1.1. Localisation et contraintes hydrologiques

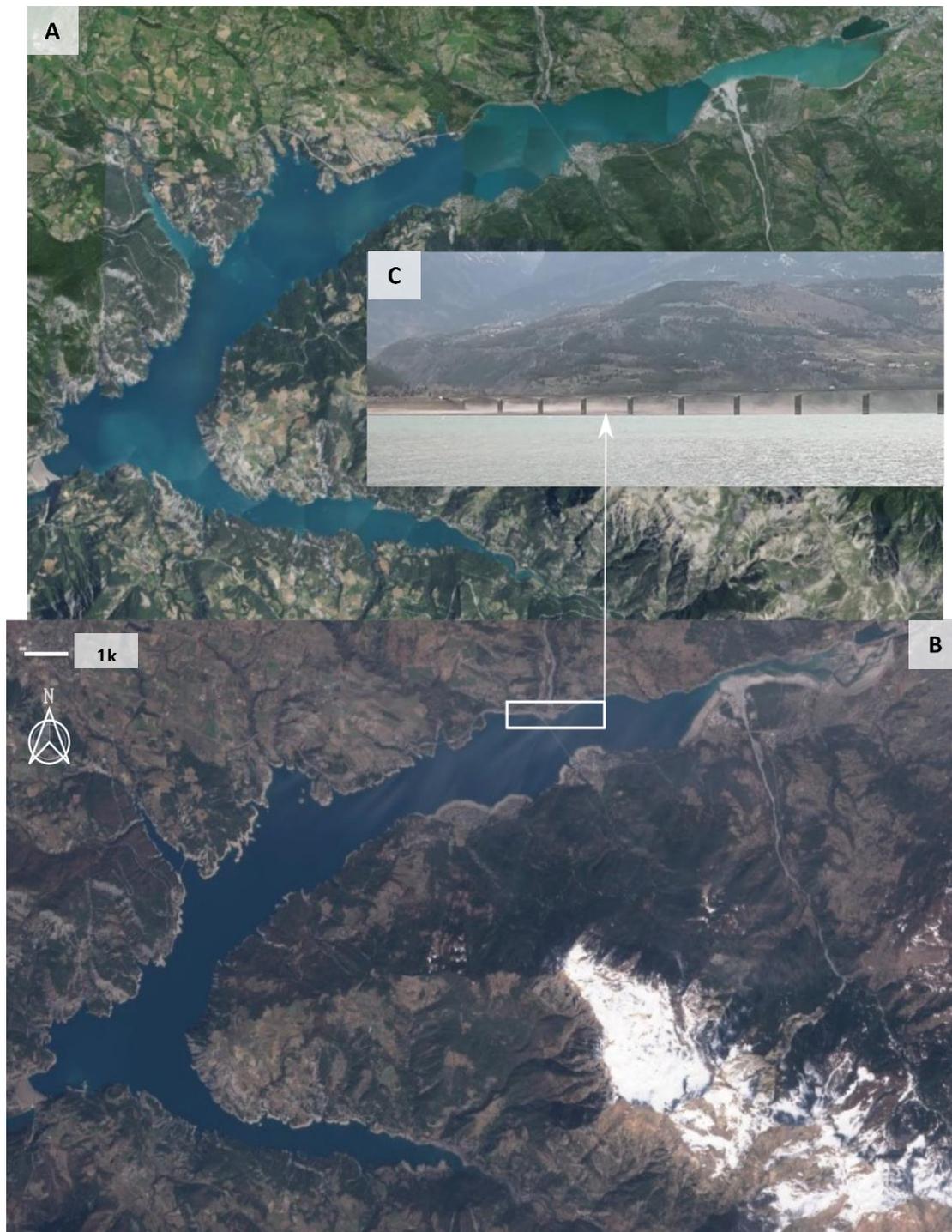


Figure 1 : Photographies aériennes de la retenue et des vents de sables. A. situation estivale avec une côte élevée (@Géoportail.gouv). B. situation hivernale à une cote faible (@fatmap.com). C. Vent de sables au niveau du pont de Savines.

A cheval sur les départements des Alpes de Hautes Provence (04) et des Hautes-Alpes (05), Le barrage est situé à la confluence de la Durance et l'Ubaye (Fig. 1). Remplie pour la première fois en 1961, la

retenue fait 28 km² à la cote maximale (780m NGF). Son exploitation a été concédée à EDF. Ses trois rôles principaux sont la production hydro-électrique, l'irrigation de la basse Durance et la lutte contre les crues. De plus, une convention a été mise en place pour maintenir une cote élevée durant la saison touristique (775m du 01/07 au 31/08, à minima) (Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement de Serre-Ponçon, 2023).

Le régime hydraulique de l'Ubaye et de la Durance dans cette portion est subalpin, de même que le climat, avec une influence méditerranéenne (Blanchard, 1920). L'ensoleillement, l'amplitude thermique journalière et l'architecture de la vallée induisent une activité de brise thermique d'un large secteur Ouest quasi journalière du printemps à l'automne. Le lac couvre des terres noires (marnes callovo-oxfordien) sensibles à l'érosion et des alluvions glacio-lacustres, avec, surtout en rive Sud, des larges cônes de déjection d'alluvions torrentiels mis en place au Würm mais souvent encore actifs. Le lac est oligo-mésotrophe, et les eaux sont considérées en bon ou très bon état écologique suivant les indicateurs.

3.1.2. Contraintes hydrologiques

Le régime hydrologique de Serre-Ponçon varie saisonnièrement et inter-annuellement (Fig. 2). La cote est minimale aux mois de mars et avril. La cote minimale moyenne est de 759m, mais elle présente une forte variabilité (± 8 m). La cote maximale, estivale (première quinzaine de juillet), est plus régulière du fait de la convention pour l'utilisation touristique. Elle se situe en moyenne à 779m ± 1 m. Le remplissage se fait dans une période d'environ 75 jours, grâce aux crues printanières de la Durance et l'Ubaye.

Comme le montre l'histogramme de la Figure 3, à la hauteur de la cote maximale, les vagues battent les berges près de 100 jours par an. En se déplaçant vers les cotes plus basses, la durée de la période ou la berge est soumise au batillage diminue rapidement, Cette durée est particulièrement faible (environ 10 jours) aux cotes 775, 770, et 765-766, et comparativement plus longue aux cotes 773-774 (17 jours), 768 (14 jours) et 764 (13 jours). La cote la plus basse connue sur la période 2000-2022 est à 731m.

A l'inverse et de façon cohérente, on voit grâce à la courbe du nombre de jours passés sous l'eau, que les altitudes les plus élevées de la zone de marnage ne sont noyées qu'environ 50 jours par an, mais que cette durée augmente très rapidement pour dépasser 100 jours à la cote 775, puis près de 200 jours à la cote 770.

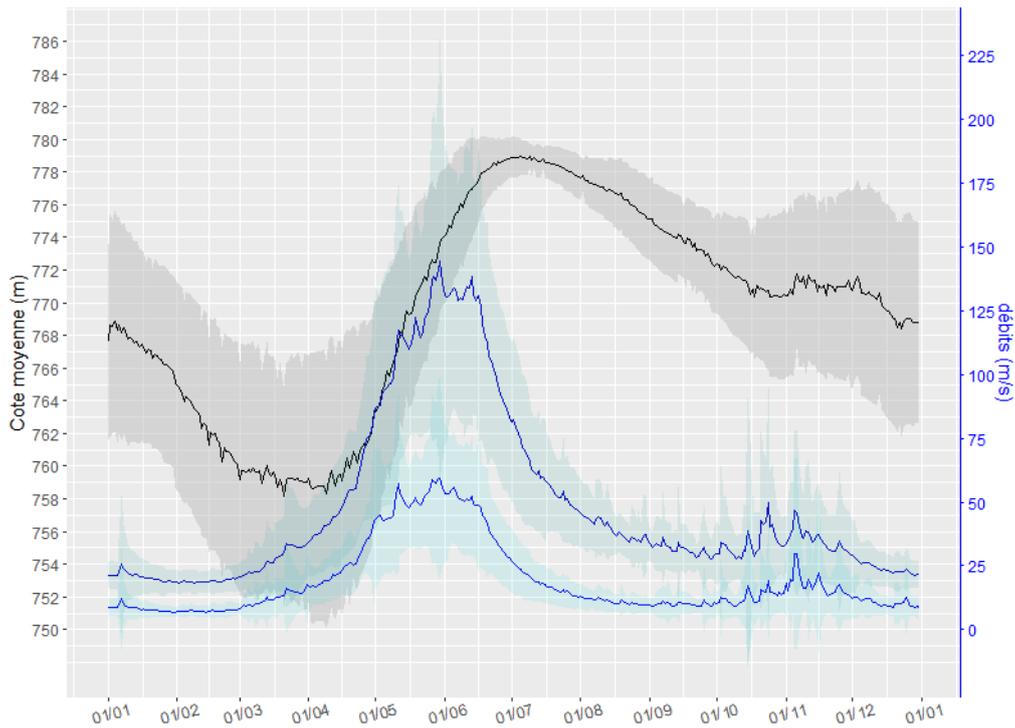


Figure 2 : Moyenne sur 22 ans du niveau d'eau de la retenue et des débits de la Durance et l'Ubaye. Le fond de la courbe représente l'écart-type des valeurs moyennées. La courbe noire représente la cote et se lit avec l'ordonnée de gauche. La courbe en bleu foncé représente le débit de la Durance et la bleu clair celui de l'Ubaye. Ces deux dernières se lisent avec l'ordonnée de droite.

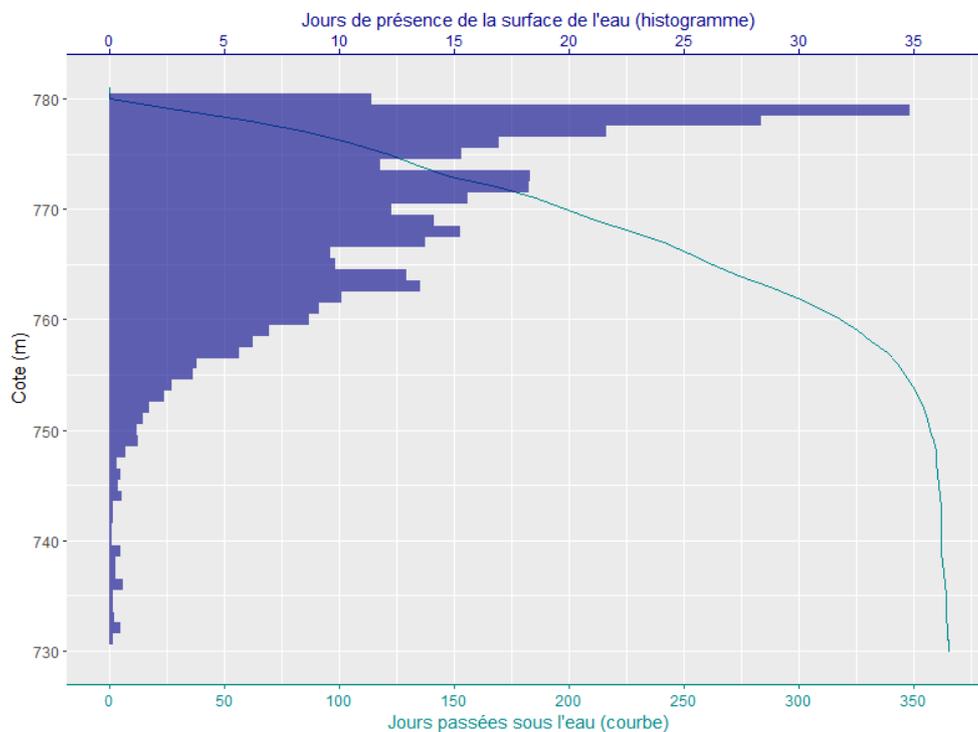


Figure 3 : Pression de battillage et temps relatif d'ennoiement. L'historgramme présente le nombre de jours par an de présence de la surface de l'eau à une cote altitudinale donnée. La courbe représente le nombre de jours par an passé sous la surface de l'eau.

3.1.3. Géographie ante-barrage et usage ancien des sols

Entre les villages d'Embrun, où commence la retenue, et de la Bréole, à proximité du barrage, la Durance s'écoule du Nord-Est vers le Sud-Ouest, dans un paysage de piémont périglaciaire en pente faible, dominée par les reliefs du Mont Guillaume puis du Colombis en rive Nord, et du Morgon en rive Sud. L'Ubaye s'écoule du Sud-Est vers le Nord-Ouest dans un sillon au relief plus marqué et rejoint la Durance juste avant le barrage. Avant la construction du barrage de Serre-Ponçon, la Durance présentait un profil en tresse dans son lit mineur, avec un lit majeur très étendu par endroits, tandis que l'Ubaye présentait un profil mineur plus rectiligne et encaissé, même s'il existait quelques petites zones en tresse (Fig. 4).

En 1948, environ la moitié de la surface aujourd'hui recouverte par le lac était cultivée ou pâturée (Fig. 4A). Les espaces agricoles étaient localisés surtout sur les rives Nord de la Durance et de l'Ubaye - donc exposés au Sud - sur les reliefs en pente faible de piémont périglaciaire, et du cônes de déjection du torrent de Réallon, où se trouvait l'ancien village de Savines. Sur les rives Sud, exposées au Nord, les cultures se trouvaient essentiellement sur les grands cônes de déjections stabilisés des torrents du Morgon (Biaret, Biarnafret et Boscodon) en pente faible (Fig. 4A et B). Dominées par le massif du Morgon, les pentes moyennes étaient occupées par la forêt, et les pentes les plus fortes par des ravins d'érosion.

3.1.4. Prospection

Les prospections ont été effectuées du 31/03 au 05/04, puis du 13 – 26/04. 25 transects, de la surface du plan d'eau (762m le 03/04) vers la berge, avec relevé de végétation et de texture de la surface du sol ont été placés dans des zones actuellement pas ou peu artificialisées, et dans un souci de représentation de l'ensemble des paysages rencontrés. La rive gauche de l'Ubaye en aval de Saint-Vincent les Fort ainsi que la zone de la Durance proche du barrage ont été évitées car très majoritairement formées de ravins en pente forte, ainsi que la queue de retenue, près d'Embrun, car non inondée durant l'été 2022.

La marche d'escalier, longeant la rive a été caractérisée par son inclinaison, sa hauteur et son type de substrat. La texture de surface du sol a été estimée visuellement est en proportion dans 6 classes granulométrique : Particules > 5cm ; 1 - 5 cm ; 5mm - 1cm ; Sable grossier (visible à l'œil) ; Sable fin/sédiment (invisible à l'œil) ; Roche nue. La présence de végétation sur le transect a été notée, et les taxons identifiés, avec l'aide de S. Abdulhak. Une estimation de la pente a été faite pour chaque portion, et la présence d'anciennes souches permettant l'estimation de la quantité de sol érodé ou de matériel sédimenté, a été notée. Des fosses pédologiques ont été creusées afin d'observer la structuration, l'enracinement et la stabilité du sol.

La grande majorité des transects étudiés se situe sur d'anciennes zones agricoles (Fig.4A) sur les grands cônes en rive Sud de la Durance et les petits cônes de l'Ubaye, qui présentent une forte végétalisation et une morphologie particulière. Comparativement, les cônes en rive Nord ont été plus profondément noyés par la retenue, car à une altitude plus faible ou ils ont été fortement remaniés. Par exemple, le grand cône Sud du torrent de Réallon a été sur sa partie Ouest complètement déformé par un enrochement artificiel lors de la création du pont de Savines.

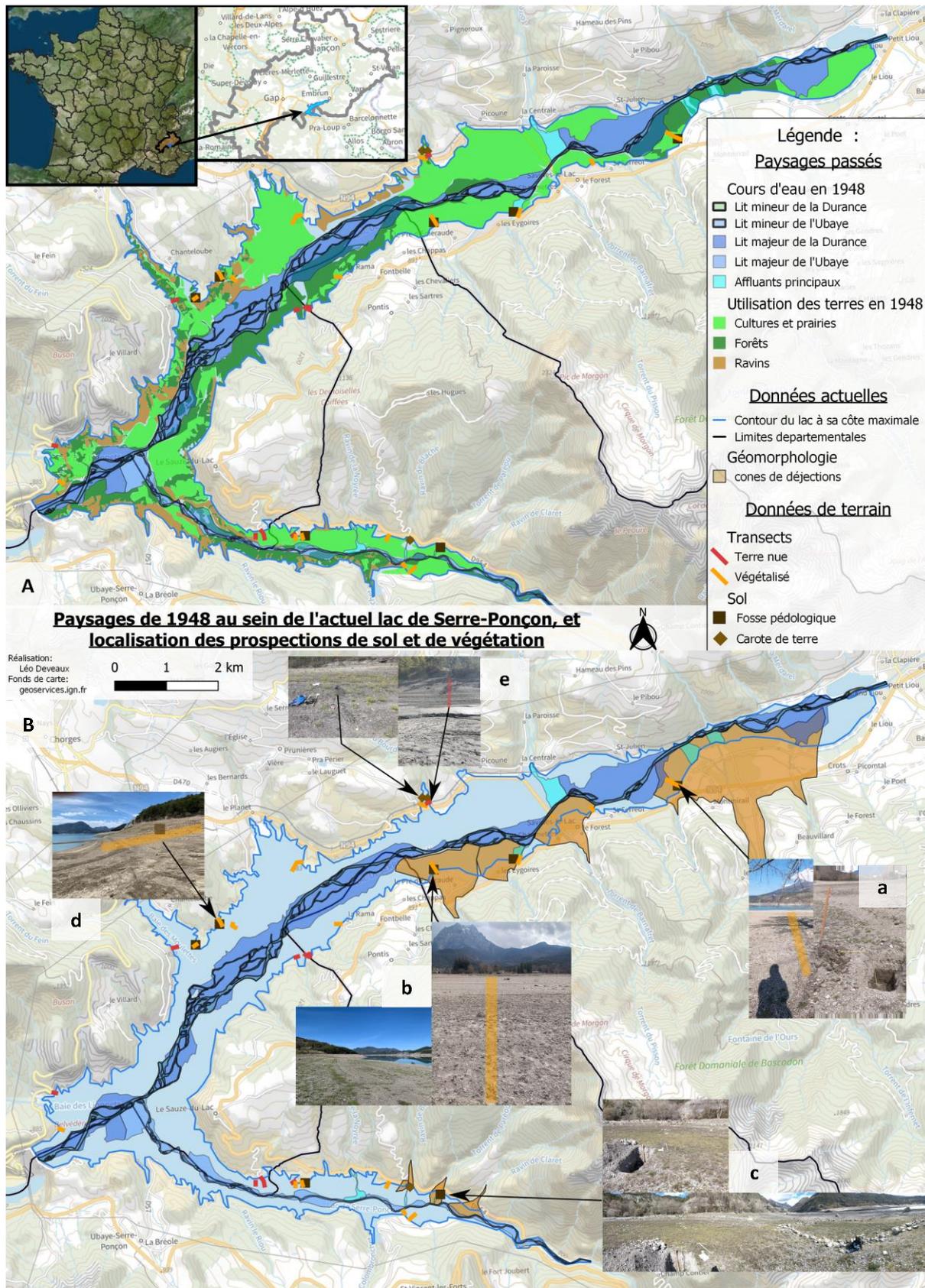


Figure 4 : Cartographie de l'usage des terres en 1948, des prospections effectuées et des cônes de déjections présent sur la retenue de Serre-Ponçon. A. Usages en 1948, lit des rivières et situation de la zone d'étude. B. Localisations des prospections, photos représentatives et cônes de déjections datés du Quaternaire et du Würm.

3.1.5. Marche d'escalier

La rive est bordée par une marche d'escalier de hauteur variable, faible voire inexistante sur les pentes très faibles des grands cônes, elle dépasse 2 mètres de haut dès que la pente est forte. La hauteur de la marche d'escalier semble complexe à comprendre. La Figure 5 représente la morphologie et la hauteur de cette marche tout autour d'une presqu'île près de la baie de Chanteloube. Cette presqu'île de forme allongée est orientée Nord-Sud c'est à dire perpendiculaire à l'axe des vents dominants. Et l'effet de l'orientation n'est pas évident ! La marche d'escalier est la plus haute sous le vent et non au vent, et la plus faible aux deux extrémités. En parcourant les rives, on observe parfois une forte marche d'escalier au vent et faible sous le vent, et parfois l'inverse.

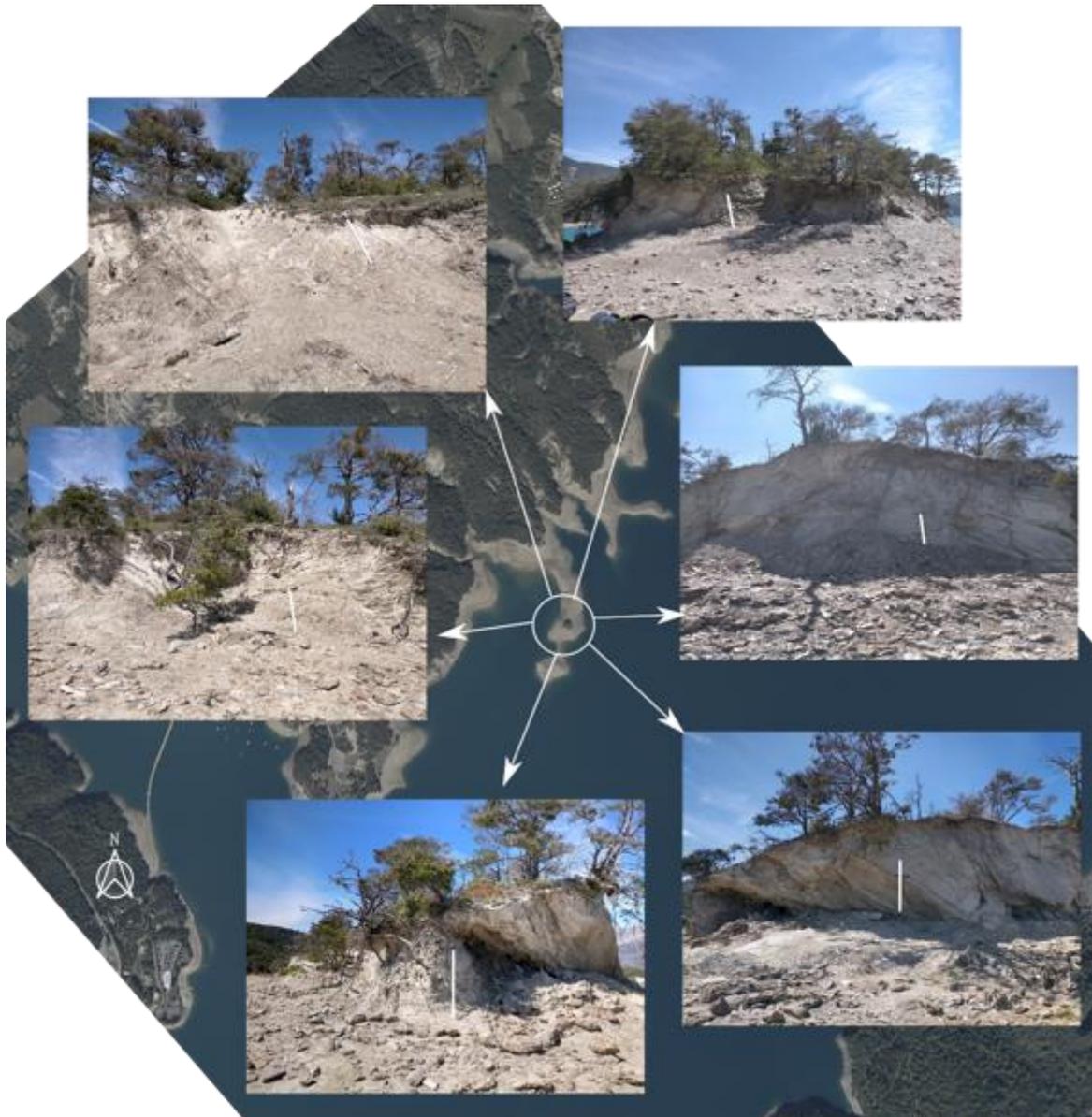


Figure 5 : Photos de la marche d'escalier. L'îlot est situé près de la baie de Chanteloube. Cote du lac sur l'orthophotographie : 771m NGF. La barre blanche représente la tarière mesurant 1,20m.

La présence de végétation forestière profondément enracinée ne semble pas non plus avoir d'effet majeur (Fig. 6), les vagues creusant autour des racines. Les marches de hauteur modérée sont plutôt situées dans une baie, et celles de hauteur accentuée semblent plutôt positionnées sur un cap, mais

n'est pas systématique. La caractéristique la plus évidente liée à la hauteur de la marche est la pente de la berge directement au-dessus de la marche : lorsque la pente est très faible ($<10^\circ$) la marche est petite à inexistante. A partir d'environ 15° , alors une marche de taille variable apparaît. La pente de la marche elle-même semble surtout influencé par le substrat dont elle est constituée : plutôt surplombante sur des conglomérats (Fig.7A), verticale lorsqu'elle est majoritairement formée aux dépens de sol (Fig. 7B), et très variable lorsqu'elle se développe sur des schistes altérés (environ 50° à surplombante), en relation possible avec le pendage de ce dernier (Fig.7C & D).



Figure 6 : Pins déchaussés par le batillage sur la marche d'escalier près de Chanteloube. La marche fait environ 1,80m et est exposée N à NO.

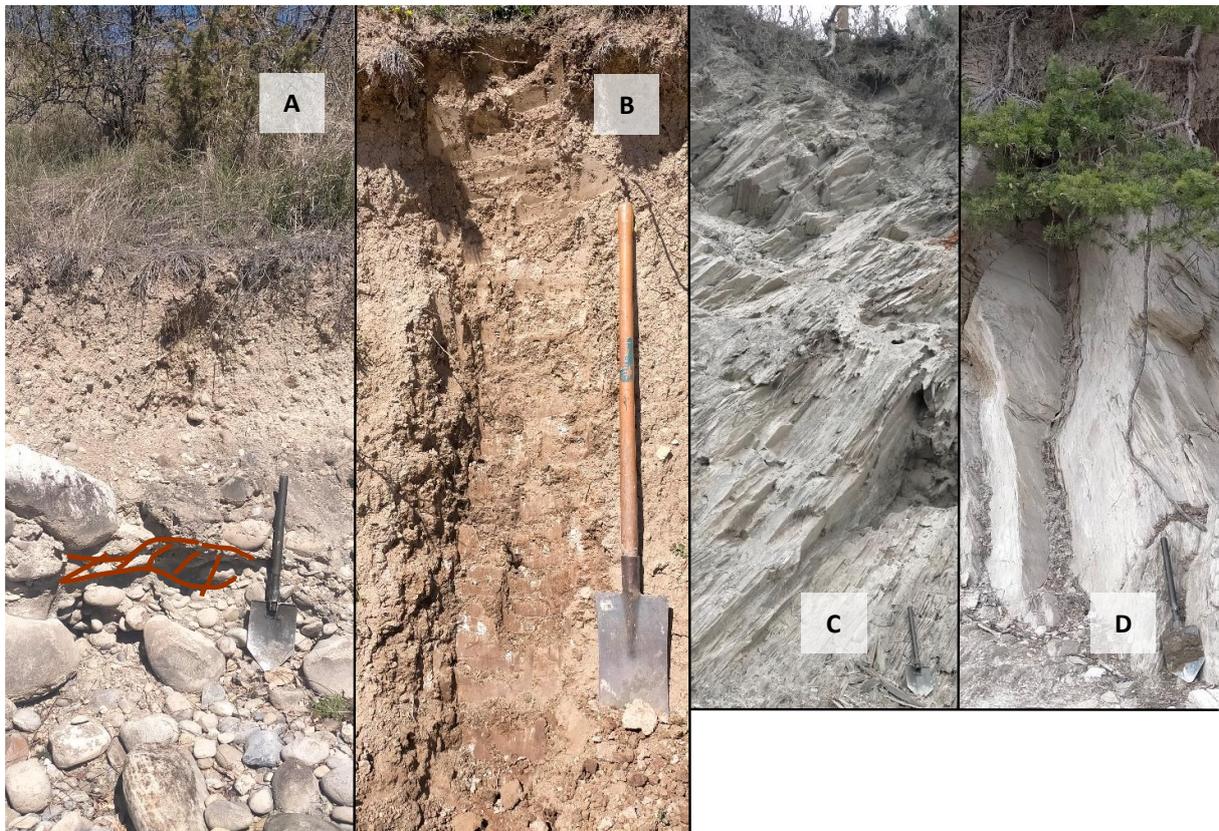


Figure 7 : Inclinaison de la marche d'escalier selon le substrat. A. Marche en conglomérat, le dessin représente un surplomb. Pelle : 60cm. B. Marche constituée de sol. Bêche : 120cm. C & D. Marches en Schiste.

3.1.6. Transects de végétation et fosses

Les résultats des prospections présentant de la végétation ont été synthétisés par zones géographique et selon de grands caractères.

3.1.6.1. Cônes de rives Sud

La pente générale de la zone de marnage et de la berge est de 5 à 10 °. Le profil de sol peut être interprété comme un dépôt graveleux post-barrage reposant sur d'anciens sols agricoles. La partie amont (Fig.e 8) est bien colonisée par *Arenaria serpyllifolia* et *Rorippa sylvestris* (Fig.10.b & d). Ce dernier était encore majoritairement en dormance sur ces zones lors de la phase de terrain. On retrouve également de façon moins abondante mais régulière *Reseda phyteuma* et *Erodium sp.* (probablement *cicutarium*, Fig.10.c & f). La partie aval est presque nue.



Figure 8 : Zone de marnage du Pré d'émeraude. La végétation de la partie supérieur est majoritairement constitué de *Rorippa sylvestris* (en dormance) et *Arenaria serpyllifolia*. Dans la partie médiane on retrouve principalement *A. serpyllifolia*.



Figure 9 : Zone de marnage du torrent de Parréou.

3.1.6.2. Petits cônes rive droite Ubaye

La végétation est plus dense et étendue (Fig. 9) près du village noyé d'Ubaye et sur les anciennes terrasses agricoles du cône du Parréou, que sur les grands cônes de la rive Sud. La fertilité antérieure du site pourrait exercer une influence et fournir une explication sur la densité de la végétation en place.



Figure 10 : Photos des principales espèces rencontrées. a. Saules en courbes de niveau ; b. *Arenaria serpyllifolia* avec son système racinaire ; c. *Reseda phyeuma* ; d. *Rorippa sylvestris* avec son système racinaire ; e. *Melilotus sp.* avec son système racinaire ; f. *Erodium sp.*

On retrouve principalement *A.serpyllifolia*, *Erodium sp.* et *Rorippa sylvestris*. De façon moins abondante et plus localisée on retrouve *Rorippa sp.* (*palustris* et/ou *xanceps*) et *Potentilla reptans* (potentiellement hors d'eau depuis l'automne 2021)

A noter également *Polygonum aviculare*, retrouvée assez bas dans la zone de marnage, éloignée du reste de la végétation et plutôt dans des zones dominées par du sédiment avec quelques zones incluant des blocs > 5mm.

3.1.6.3. Baie de Chanteloube

La végétation observée autour de la baie de Chanteloube présente un enracinement qui passe plus régulièrement dans la couche limono-argileuse (Fig.12). On retrouve également une pente globale plus élevée (15 à 20°), avec une marche bien présente (1.5 à 5m) semblant directement en lien avec la pente qui la domine. Enfin, la végétation est globalement moins présente et moins dense. (Fig. 4.B.d)

Les espèces majoritaires sont *R.phyteuma* et *R.sylvestris* (Fig10 c & d). De façon sporadiques on retrouve *P.reptans*, *A.serpyllifolia* et *Erodium sp.*



Figure 11 : Fosse du torrent de Parréou. La bêche mesure environ 1,40m.



Figure 12 : Fosse de Chanteloube. L'échelle fait environ 90cm.

3.1.6.4. Riou-Bourdou

Dans cette zone, le sol est profond (Fig. 13). En rive gauche, la pente est très forte (35 à 40°) et la végétation quasi-inexistante, mais quelques pieds de *R.phyteuma* sont présent (Fig. 4.B.e). En rive Droite, la pente est assez irrégulière, faible au départ (10°) suivie d'une rupture de pente (25 à 30°) se radoucissant plus bas (20°) (Fig. 4.B.e). On retrouve majoritairement *Melilotus sp.* (*alba* ou *officinalis*, Fig.10.e) sur le haut de la zone de marnage (probablement exondé depuis l'automne 2021) ainsi que *Rorippa sylvestris* sur les deux tiers haut. De façon plus sporadique *Reseda phyteuma* et *Rorippa sp.* (*palustris* et/ou *xanceps*).



Figure 13 : Carotte du Riou-Bourdou rive droite. La tarière fait 1,20m, la carotte est délimitée en marron.

3.1.7. Érosion et végétalisation

3.1.7.1. La « marche d'escalier »

Le dénivelé de la marche est très faible voire invisible sur les grands cônes en pente très faible du versant nord. L'effet de l'orientation de la berge vis à vis du vent dominant n'est pas perceptible, malgré un vent et des vagues provenant très majoritairement de l'Ouest. Lorsque la pente est moyenne à forte, la marche se forme quel que soit le substrat : roche altérée, ou dépôts limoneux. Enfin, la présence d'une végétation ligneuse profondément enracinée ne semble pas limiter la formation de cette marche.

3.1.7.2. Facteurs abiotiques déterminants pour la végétation

Les sols retrouvés sur les différentes zones de prospection sont constitués de 3 horizons distincts, d'épaisseur variable selon le lieu. A la surface on retrouve un pavage plus ou moins grossier. Ce matériel, lavé par le batillage des vagues, repose sur une couche sablo-graveleuse, provenant des sols en place, et des matériaux redistribués depuis la mise en eau de la retenue. Ces deux premières couches sont peu fertiles et drainantes. Elles reposent sur d'anciens horizons B de sols agricoles à dominante limoneuse ou argileuse, qui jouent le rôle de réservoir d'eau et probablement de

nutriments durant l'exondation hivernale. En effet, on observe régulièrement un enracinement pivotant atteignant les anciens sols.



Figure 14 : Ancienne terrasse agricole de Chanteloube. La bêche mesure environ 1,40m.

Cependant, le pavage de surface paraît nécessaire. En effet, à Chanteloube, nous avons pu observer un sol d'ancienne terrasse agricole en pente faible à moyenne, de texture limoneuse, dépourvu de pavage, et qui était également dépourvu de végétation (Fig. 14).

Une pente trop forte semble un facteur empêchant l'implantation de la végétation : les matériaux de surface seraient remobilisés bien plus facilement par le battillage. De plus ces zones en pente forte étaient parfois déjà des zones de ravins avant la retenue.

Lorsque la pente est intermédiaire, on retrouve des ressauts successifs avec une végétation semblant se concentrer sur les parties bombées (Fig.15).



Figure 15 : Ressaut bien visible sur la zone de marnage. Les traits noirs matérialisent les ressauts peu évidents sur la photo. Fosse près du Pont de la grande cote.

Ainsi, les facteurs de surfaces idéaux semblent être une pente faible permettant à l'eau de s'écouler lors de la baisse du lac, et limitant l'effet des vagues. La texture de surface idéale semble être un

équilibre entre des sables et graviers et des blocs. A part *P. aviculare*, aucune végétation n'a été observée dans des zones majoritairement constituées de sédiments fins ou de sables grossier.

3.2. Réservoir de Villerest

3.2.1. Situation générale

Le Réservoir de Villerest est localisé sur la Loire (Fig. 16), en amont de Roanne, à l'aval d'un autre réservoir de grande taille, celui de Grangent et d'une série de retenues sur la Loire et le Lignon. Il couvre 770 hectares (soit le quart de Serre Ponçon) pour 32 km de longueur. Outre la production hydro-électrique, et la prévention de crues dévastatrices, le barrage fait aussi partie du système de sécurité des centrales nucléaires garantissent le refroidissement de leurs réacteurs. Le réservoir a été mis en eau en 1984, soit près de 20 ans après Serre-Ponçon.



Figure 16 : Les barrages de la haute Loire

Il s'insère dans une vallée étroite, qui s'élargit légèrement en amont de Villerest. Le socle géologique est formé d'une coulée de laves anciennes (viséennes). Les roches sont des rhyolithes (laves acides, à plagioclases Na et K, d'une composition proche de granites) et des laves plus alcalines contenant de la calcite, et des microgranites. Ces deux substrats sont présents sur la zone de marnage observée, de manière imbriquée à très faible distance. Les sols non perturbés (Fig. 17), observés dans les prairies et landes en amont des transects sont des sols bruns acides humifères, graveleux, sans caractère andique marqué.



Figure 17 : Sol brun humifère graveleux de prairie au-dessus de la zone de marnage

La cote de la retenue varie entre 315 et 297 m NGF (Fig. 18 et 19). Le niveau est abaissé en été, à partir des mois de Juillet ou d'Aout, la retenue atteint son niveau le plus bas en Octobre,

et le niveau remonte rapidement en Décembre pour atteindre son niveau maximal en Janvier. Ce marnage est donc assez favorable à la végétation, puisque la partie supérieure de la zone de marnage est exondée dès la fin juillet.

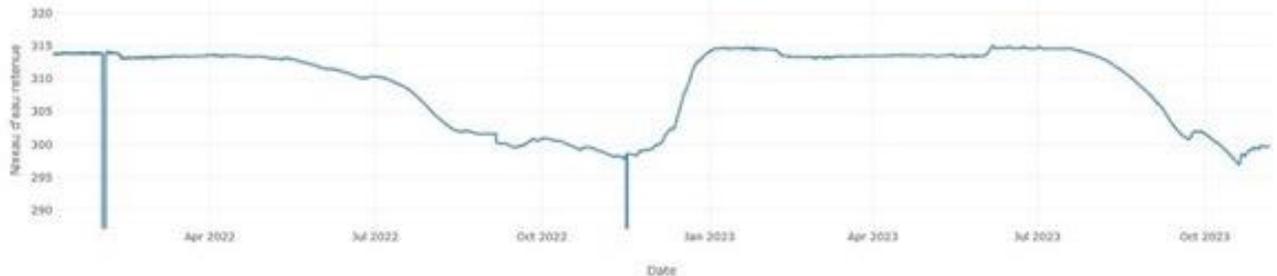


Figure 18 : Variation de la cote à Villerest, en 2022-2023

Commelle-Vernay [Barrage de Villerest] (Loire) - Hauteurs - 13/11/2023 11:18



Figure 19 : Variation de la cote au cours du mois précédent nos observations (9-15/11/2023)

La retenue est eutrophe, avec des blooms à cyanobactéries fréquents en été, qui justifie la fermeture épisodique de la baignade (Fig. 20).



Figure 20 : Blooms à cyanobactéries, observés lors de notre visite et vue par satellite

Les occupations de sols anté-barrage des sols sont renseignés sur la Figure 20. En rive Ouest (gauche), ce sont principalement des prairies et des cultures et en rive Est (droite) et sur toutes les pentes fortes, des forêts.

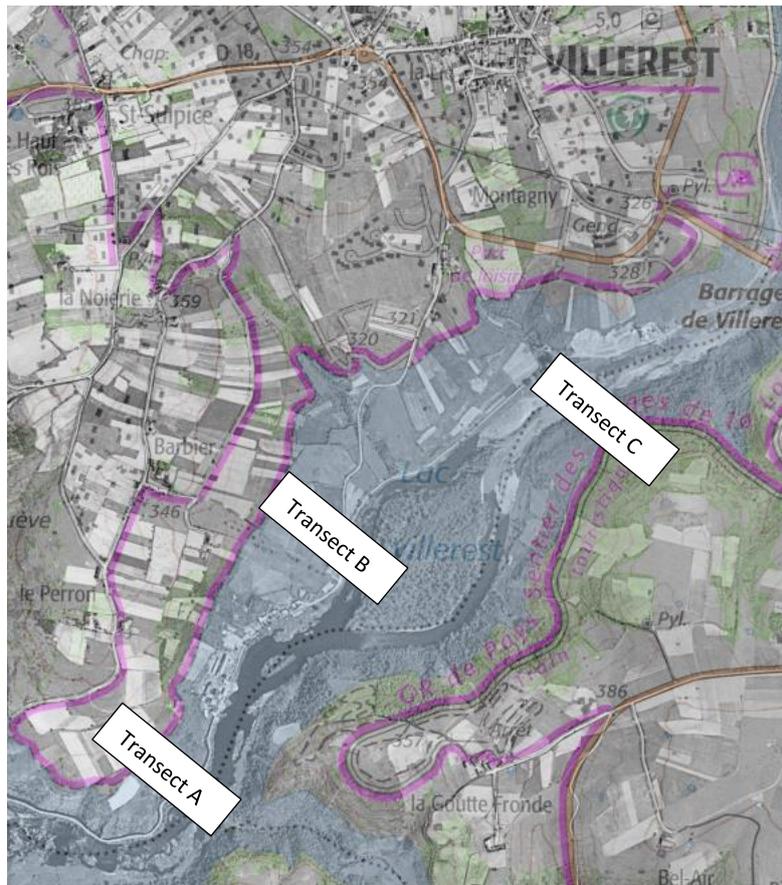


Figure 21 : Usage des sols anté-barrage, d'après la photoaérienne de 1960 (Source géoportail), et position des transects

3.2.2. Végétation et sols

Trois transects ont été étudiés, deux en rives gauche, sur des anciennes prairies et cultures, et un en rive droite, en pente plus forte, principalement sur d'anciennes forêts. Les observations sont très convergentes et donc synthétisées ci-après. De manière générale, la végétalisation de la zone de marnage est très forte (Fig. 22).



Figure 22 : Végétation de la zone de marnage de Villerest, vue de la partie supérieure du transect, à gauche en rive gauche et à droite, en rive droite

En partant de l'amont, on observe :

- Une marche d'escalier de taille variable, mais souvent proche du mètre. Les conditions d'observations sont mauvaises du fait de travaux de pistes et sentiers à ce niveau de sorte que nous n'en parlerons pas.
- Une ceinture de plantes pérennes d'une hauteur de quelques mètres (entre 312 et 315 NGF). Les espèces représentées sont la baldingère (*Phalaris arundinacea*) sur la frange la plus haute, le saule pourpre (*Salix purpurea*), avec racines adventives sur les branches basses (Fig. 22), marquant le niveau le plus élevé du lac, et la laiche glauque (*Carex flaca*) en tapis ras.
- Puis une ceinture marquée par la prédominance des plantes annelles (entre 312 et 305 m NGF). Les plus fréquentes : sont La Renouée persicaire (*Polygonum persicaria*), la Corrigiole des rives (*Corrigiola litoralis*), la digitale (*Digitaria* sp.) et le souchet (*Cyperus eragrostis*). Avec quelques plantes pérennes, un carex formant de gros touradons (*Carex Acutiformis*), et plus rares *Rorippa sylvestris*, *Lysimachia vulgaris* et *Solanum nigrum*.

Les sols sont constitués de trois horizons (Fig. 23) :

- Un dépôt sableux de surface (S), formé par remaniement des colluvions de pente et soustractions des fines.
- Un horizon de gley réduit (Bgr), grisâtre, de texture variable, sableuse à limoneuse, correspondant soit à l'ancien horizon A des sols de prairie, soit à un dépôt de fines consécutif au remaniement de pente.
- Un horizon de gley oxydé (Bgo), parfois aliotique, c'est-à-dire induré, graveleux, correspondant à l'ancien horizon B/BC du sol antérieur.



S : Dépôt sableux de surface

Bgr : Gley réduit

Bgo : Gley oxydé

Figure 23 : Description du sol observé à Villerest.

Dans les zones en dépression, où se rassemblent les eaux drainées, ainsi que dans les zones de sourcins le niveau d'eau affleure sous l'horizon S, dans l'horizon réduit, la végétation est moins dense, la renouée presque absente tandis que la digitale domine.



Figure 24 : Fosse creusée la veille des observations, remplie en une nuit de précipitations, et mettant en avant la présence d'un imperméable.

Après la rupture de pente, dans la pente forte en gradins dominant le lac (entre 305 et 300m NGF), la couverture végétale est forte sur le replat des gradins avec une dominance de renouée et faible, sur la pente du gradin. Le sol est du même type qu'au-dessus (Fig. 25).



Figure 25: Sols présents à mi-hauteur, après la rupture de pente.

A la lisière de l'eau, sur une bande d'un mètre d'altitude non colonisée par les plantes, car dans la zone de battillage la plus récente, on trouve sous/dans le dépôt sableux de surface, un A11 noirâtre et fibreux organique très foncé provenant probablement de dépôts du lac (Fig. 26). Algues et/ou cyanobactéries ? et sous l'eau, des plantes (renouées...) encore vertes.



Figure 26 : Sols au bord de l'eau, et dépôt noirâtre organique.

Dans un petit vallum en pente très faible au contact du lac, le dépôt sableux de surface est épaissi (30-50 cm d'épaisseur). Ce dépôt est érodé en ravines de 50 cm de profondeur au maximum. Dans les ravines apparaît un horizon sédimentaire limoneux réduit Gr de 10 cm d'épaisseur, contenant des déchets plastiques probablement formé en milieu deltaïque quand le lac est assez haut.



Figure 27 : Sol de petits vallums, de formation deltaïque et présentant un horizon sédimentaire limoneux.

4. Perspectives offertes par la télédétection

4 réservoirs ont été choisis pour tester le potentiel de l'outil satellitaire pour identifier et quantifier le développement de la végétation sur la zone de marnage. Trois réservoirs pour lesquels un développement important de la couverture herbacée avait été identifiée (Villerest (ce rapport), Arrêt-Darré (Fraisse 1995) et Naussac (observations de terrain préalables), et un réservoir où nous avons constaté une couverture végétale beaucoup plus discrète (Serre Ponçon).

4.1. Méthode

L'utilisation de la télédétection pour avancer ce projet s'est déroulé en deux phases. La première a consisté à observer des images satellitaires (Sentinel) et aériennes (GeoPortail) des réservoirs à l'œil afin de déterminer les éléments suivants : La période de marnage, (commençant quand la zone de marnage émerge, et terminant quand elle est de nouveau recouverte) pour différentes années, et la confirmation de la présence de végétation sur ces zones. De plus, des informations sur le barrage de chaque réservoir (type de barrage, date de construction, etc.) ont été compilées afin de créer un catalogue contenant une description pertinente d'une vingtaine de réservoirs à fort marnage, susceptibles de porter une végétation temporaire (*Roselend-Beaufort, Bissorte, Sautet, Saint-Pierre-Cognet, Grangent, Rochebut, Girotte, Chatelot, Tolla, Calacuccia, Viam, Chaumettes, Lavaud-Gelade, Roche-Talamy, Naussac, Maury, Puydarrieux, Magnoac, L'Arrêt-Darré, Matemale, Puyvalador, Laouzas*). Très rapidement, il est apparu que les berges en pente forte des réservoirs d'altitude ne portaient pas de végétation, de sorte que nous les avons écartés.

Pour mesurer la couverture végétale, nous avons utilisé la mesure du NDVI. Le NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée) est un calcul qui permet la quantification de végétation grâce aux réflectances. Les plantes absorbent fortement la lumière dans le spectre visible, surtout le rouge, et réfléchissent les ondes proche infrarouge. Faire la différence normalisée entre ces deux longueurs d'onde résulte en un chiffre entre -1 et 1. Cette gamme détermine la quantité de végétation contenue dans un pixel : moins de zéro représente généralement de l'eau, entre 0 et 0.2 représente du sol nu, et au-delà de 0.2 représente de la végétation (un chiffre plus haut indiquant une quantité de végétation plus grande). Pour mesurer les zones de marnage nous avons créé des masques sur la base des couches rasters Surface Water de Theia-Sentinel dans QGIS : l'une représentant le réservoir en eau haute (plein), et une autre représentant le réservoir en eau basse. La zone d'intérêt (le réservoir) est extraite des deux couches raster grâce à un polygone sur mesure créé par l'utilisateur. Ces nouvelles couches raster contenant uniquement les réservoirs sont ensuite converties en couches vecteurs. En catégorisant les couches Vecteurs, les sections représentant l'eau et la terre deviennent distinctes. En ouvrant la table d'attributs, et en supprimant toutes les rangées ayant une valeur de 0, il ne reste que l'eau. Dans les outils de géo-traitement, l'outil « différences symétriques » est appliqué aux deux couches vecteurs. La couche résultante représente la zone de marnage maximale pour le réservoir. Ceci est fait pour chaque réservoir sur les quatre années qui nous intéressent (2020-2023).

Ensuite, un code JAVA écrit par Gabriel Guinet avec l'aide d'Adrien Guerou a été exécuté par Google Earth Engine. Ce code a calculé le NDVI dans le masque de chaque image satellite pendant la période de marnage. Une partie des images non-conforme sont automatiquement enlevées par le code à cause de la couverture de nuages qui recouvre le masque, et le reste (non-entière, problèmes de résolution) a été enlevée manuellement.

Les surfaces maximales des réservoirs, les surfaces annuelles de la zone de marnage, et les périodes de marnage pour les 4 réservoirs et les 4 années sélectionnés sont données dans le Tableau 2. Ces surfaces peuvent être considérables par rapport à la surface totale du réservoir. On remarque que la période de marnage peut être très longue car certaines années le réservoir ne remonte pas à sa côte maximale.

4.2. Résultats

Réservoir	Surface max (km ²)	Deb de Marnage	Fin de Marnage
Arrêt-Darré (0.95 km ²)	0.567 (59.6%)	19-07-2020	31-12-2020
	0.305 (32.0%)	09-07-2021	11-12-2021
	0.741 (78.8%)	24-06-2022	04-06-2023
	0.280 (29.4%)	03-08-2023	26-12-2023
Villerest (1.67 km ²)	0.412 (24.7%)	05-08-2020	28-12-2020
	0.384 (23.0%)	04-09-2021	20-12-2021
	0.424 (25.4%)	06-06-2022	05-01-2023
	0.434 (26.0%)	15-08-2023	18-12-2023
Serre-Ponçon (28 km ²)	6.618 (23.6%)	25-01-2020	24-05-2020
		30-11-2020	13-06-2021
		10-11-2021	29-05-2022
		13-06-2022	23-06-2023
Naussac (10.8 km ²)	1.528 (14.1%)	16-08-2020	27-05-2021
	1.559 (14.4%)	16-07-2021	02-05-2022
	3.134 (29.0%)	27-05-2022	11-06-2023
	4.118 (38.1%)	26-07-2023	16-05-2024

Tableau 2 : Etendues et dates de marnage de 4 réservoirs pour 4 années consécutives

4.2.1. Evolution saisonnière de la végétation au cours de l'année 2023.

A Villerest, la période de marnage du réservoir de débute en mi-août et le réservoir atteint son niveau le plus bas en fin d'automne pour remonter au printemps.

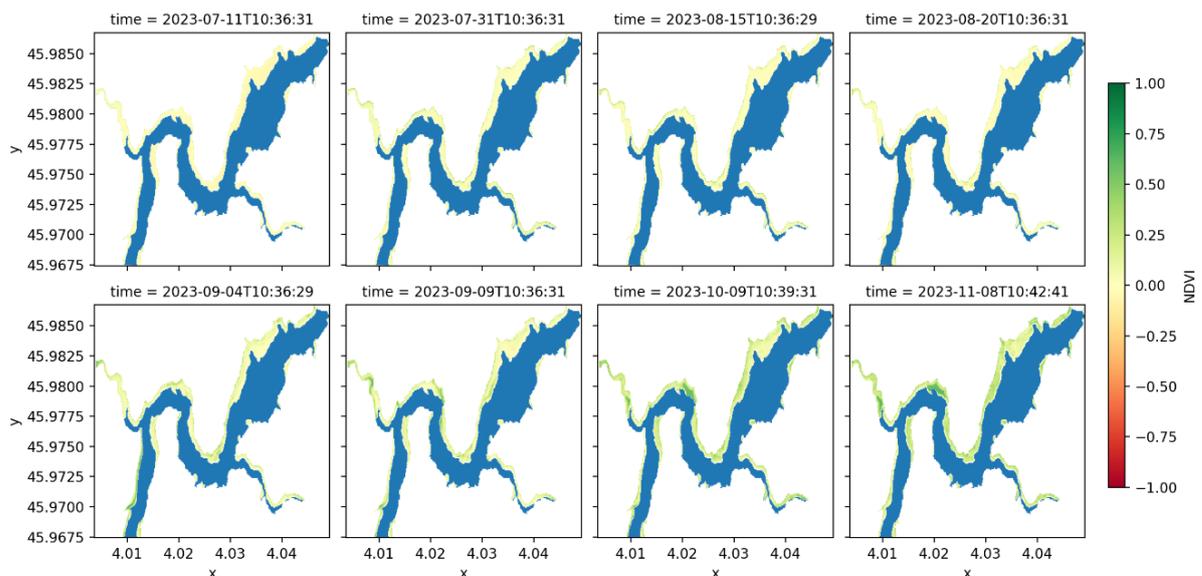


Figure 28 : Série temporelle de l'évolution de NDVI à Villerest de juillet à novembre en 2023

En 2023, l'année de notre visite de terrain, la Figure 28 montre comment la végétation (indiquée en vert) évolue entre le 11 juillet et le 8 novembre sur la zone de marnage (indiquée en jaune) en amont

du barrage. A partir de début septembre, on identifie un liseré de végétation sur la partie supérieure de la zone de marnage. L'ensemble de la zone de marnage apparaît végétalisé dès le début octobre, comme nous l'avons observé sur le terrain, et jusqu'en novembre. On remarque cependant que la zone sud est mal identifiée, et ceci peut être lié à l'interférence de la couverture forestière de bord de barrage, ainsi qu'à la pente forte. A contrario, la zone nord du barrage est couverte de prairies et en pente plus faible.

A Serre Ponçon, le barrage était très bas en hiver 2023 et recommence à se remplir lentement à partir de mars, puis plus rapidement à partir du mois de mai. Au Pré d'Emeraude (voir la photo en Figure 8), on observe une colonisation en tache au centre du cône et un liseré faiblement végétalisé sur la bordure amont. L'ensemble progresse pour couvrir l'essentiel de la zone de marnage à la fin Mai.

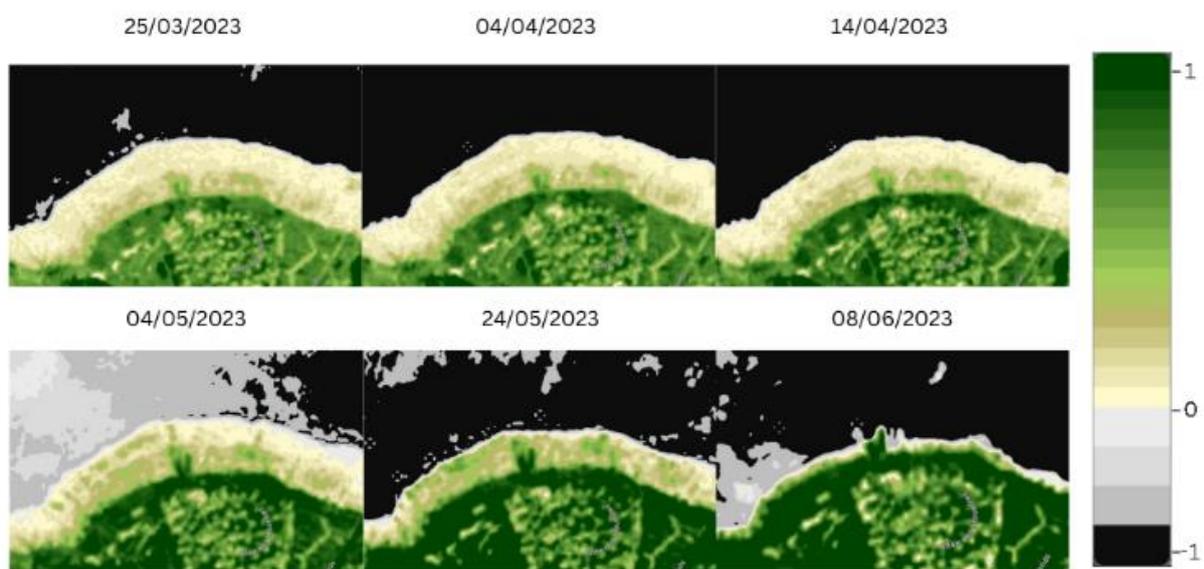


Figure 29: Evolution saisonnière en 2023 de la végétation de la zone de marnage du Pré d'Emeraude (Réservoir de Serre Ponçon).

Sur la zone du Liou (queue du barrage), qui avait été faiblement ennoyée en 2022, on voit une couverture relictuelle faible dès le mois de mars. La progression se marque très clairement jusqu'en mai (Figure 30), en particulier dans la zone sud d'où proviennent les vents de sable, et ou avaient été tentées des plantations expérimentales de Rorippa

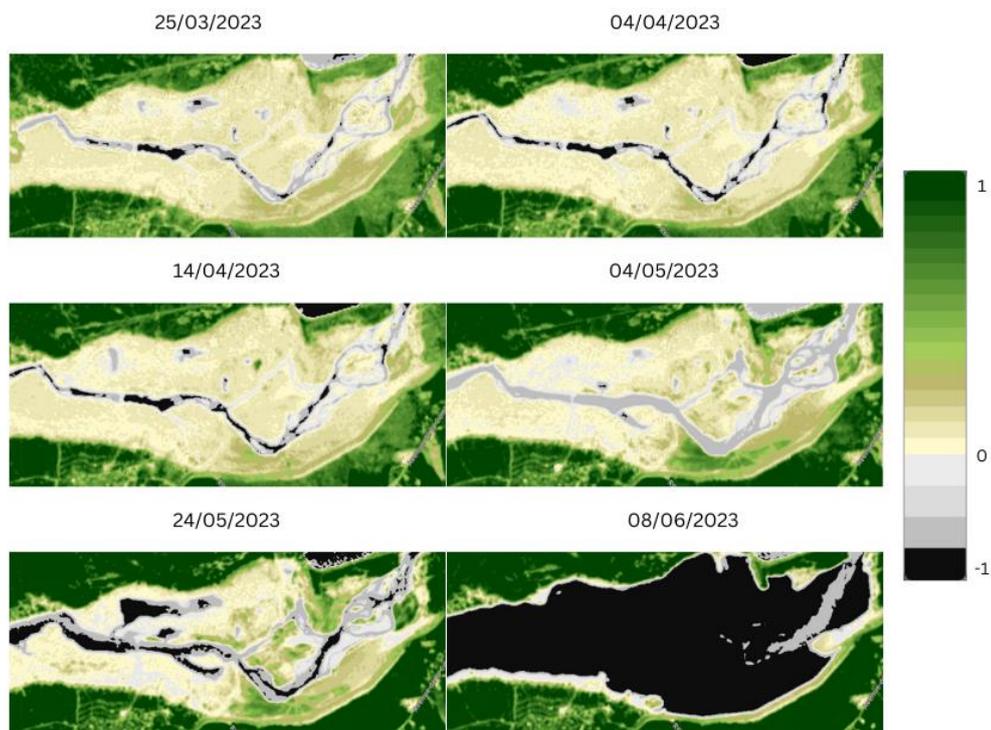


Figure 30: Série temporelle de l'évolution du NDVI au Liou, réservoir de Serre-Ponçon de mars à juin en 2023

4.2.2. Variation interannuelle de la couverture végétale de la zone de marnage

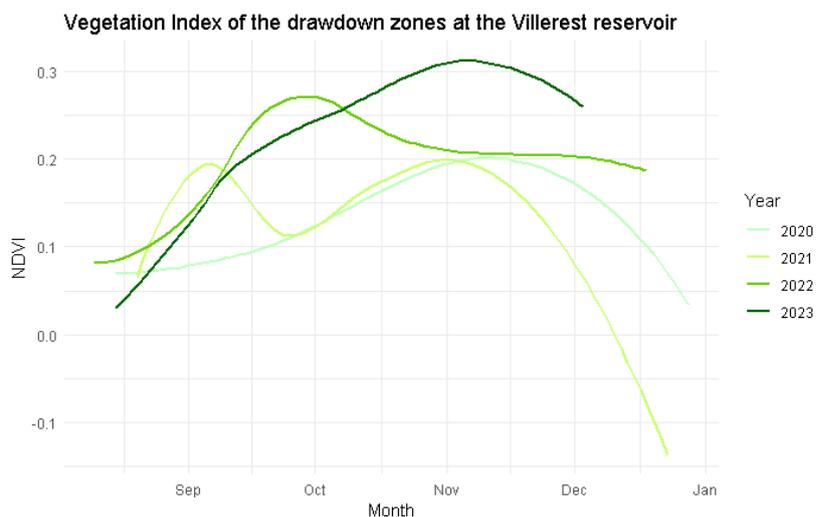


Figure 31: Index de végétation des zones de marnage du réservoir de L'Arrêt Darré de 2020 à 2023 pendant la période de Marnage

A Villerest, la comparaison avec les années antérieures montre que le développement de la végétation varie en fonction de l'année et surtout du marnage. Les valeurs maximales de NDVI des années 2020 et 2021 ont été plus faibles que les deux suivantes, où les zones de marnages étaient moins étendues. Les deux dernières années au contraire ont des zones de marnages plus étendues et

des pics de NDVI plus élevées. La courbe de 2022 diffère des autres par son pic de NDVI fin septembre au lieu de début novembre. Ceci peut être expliqué par les canicules successives de l'été 2022. Les températures plus élevées sont arrivées plus tôt en 2022, déclenchant la période de marnage plus précoce, favorisant le développement des plantes. Le fait que le NDVI diminue puis se stabilise avant de rediminuer peut être lié au stress hydrique.

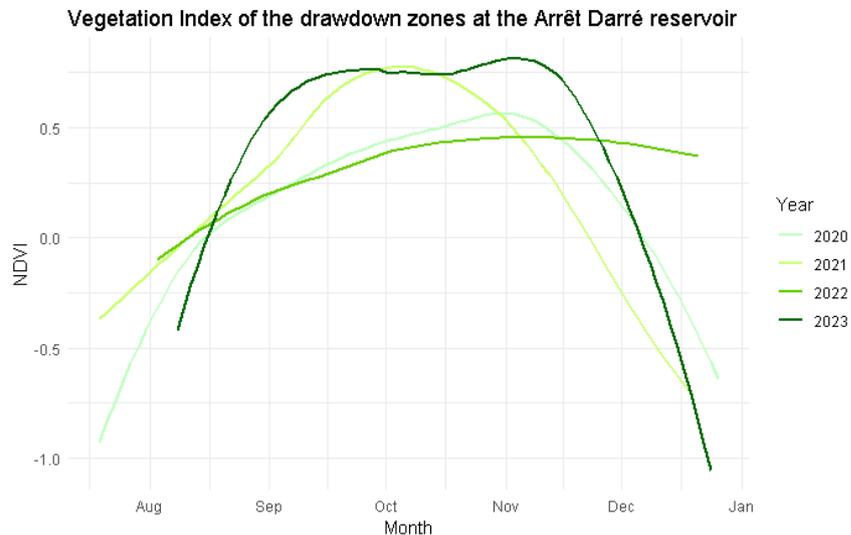


Figure 32: Index de végétation des zones de marnage du réservoir de L'Arrêt Darré de 2020 à 2023 pendant la période de Marnage

La période de marnage du réservoir de l'Arrêt Darré, comme celui de Villerest, débute typiquement en mi-août et le réservoir atteint son niveau le plus bas en fin d'automne pour remonter au printemps, mais comme l'indique le graphique, il y a occasionnellement des exceptions

En 2020, la zone de marnage est plus grande que la norme (deux tiers plus grande). Le pic de NDVI est relativement bas comparé aux années 2021 et 2023, mais proche de 2022. Ce NDVI plus bas sur une zone de marnage très vaste traduirait le fait que les plantes ne sont pas capables de coloniser cette zone agrandie dans la période relativement courte de marnage. En 2022, la période de marnage commence plus tôt et finit plus tard que les autres années et le NDVI est également le plus bas des quatre années, et le plus stable. Cela suggère que le développement de la végétation a été contrôlé par un autre facteur, qui pourrait être la vague de chaleur qui a sévèrement impacté l'Occitanie. En 2021 et en 2023, sur une zone de marnage plus petite, le NDVI est extrêmement haut. Ceci indique que la zone de marnage est complètement couverte.

5. Synthèses et perspectives

Le déterminisme environnemental de la végétation des zones de marnage est multifactoriel, mais de grands principes ressortent de cette étude.

La berge commence par une « marche d'escalier » au niveau supérieur du lac, reflétant l'effet du batillage des vagues lorsque le lac est plein. La pente paraît être le premier facteur réglant d'une part la hauteur de cette marche et en conséquence, la redistribution de matériel érodé à l'aval. En tenant compte de nos observations antérieures sur le Viaur, Sarrans et Guerlédan, outre la pente, la largeur du plan d'eau, parce qu'elle permet le développement de la houle, doit probablement être prise en compte...

La végétalisation de la zone de marnage de Serre-Ponçon est maigre, et réduite à la ceinture supérieure. Les zones végétalisées couvrent surtout les anciens sols agricoles profonds en pente faible des cônes torrentiels, fournissant une réserve d'eau et de nutriments, enfouis sous du matériel graveleux colluvionné. Les plantes colonisatrices sont surtout des pérennes à enracinement pivotant, et tout particulièrement *Rorippa*.

La végétalisation des berges de Villerest est forte, et couvre l'ensemble de la zone de marnage, pentes fortes comprises. Elle est principalement le fait d'espèces annuelles, particulièrement *Polygonum persicaria*, *Corrigiola litoralis*, *Digitaria sp.* et *Cyperus eragrostis*, même si des pérennes sont présentes dans la ceinture supérieure de la zone de marnage. La densité végétale paraît affectée par le degré d'hydromorphie du sol.

Les observations n'ont pas été menées au même moment du cycle hydrologique et le nombre de retenues observées est beaucoup trop restreint pour assoir des conclusions fermes. Mais elles suggèrent des remarques et perspectives à différents niveaux.

Les espèces végétales observées sont celles déjà décrites par Fraissé (1999) dans sa synthèse. Elles représentent donc le potentiel « natif », adapté aux contraintes écologiques du marnage.

Si les pérennes dominent à Serre-Ponçon par rapport aux annuelles, et vice-versa à Villerest, l'âge de la retenue peut être invoqué mais probablement aussi la position dans la chaîne des retenues qui doit influencer la densité de graines, en enfin le niveau trophique de la retenue, qui doit conditionner la vitesse de croissance, qui est l'élément clé pour des annuelles. Serre-Ponçon est oligotrophe et en amont, Villerest est eutrophe et en aval. Deux contraintes/opportunités édaphiques sont apparues. A Serre-Ponçon, l'association pavage en surface-horizons B réservoirs de nutriments et d'eau paraît favorable, voire indispensable. A Villerest, l'hydromorphie réductrice crée une contrainte, et son développement via la formation d'altos imperméables pourrait limiter la végétalisation.

La végétation des zones de marnage peut être évaluée et comprise « d'en haut » par les moyens de la télédétection, et « d'en bas » si l'on veut comprendre la contrainte édaphique. Etant donnée la diversité des régimes hydrologiques, une approche systématique « par le haut » est tentante, pourvu que la zone de marnage soit suffisamment grande pour qu'un indice de végétalisation, type NDVI, soit mesurable. Dans l'absolu, l'hypothèse suivant laquelle la végétalisation serait fonction de la position de la retenue sur la rivière et de son statut trophique est tentante, et doit pouvoir être jugée d'en haut. Il est trop tôt pour systématiser nos observations par le bas, et il faudra donc visiter d'autres sites. Si elle était fondée, on devrait alors aussi évaluer dans quelle mesure cette végétation participe au piégeage des nutriments et à la réduction des flux vers l'aval.

La synthèse effectuée par Fraissé (1999) sur le succès des opérations de végétalisation volontaire date de plus de 20 ans et il est évidemment nécessaire d'aller constater ce que sont devenus ces essais des années 90 ou antérieurs, chose que nous n'avons pas pu faire, hormis très rapidement dans la queue de Serre-Ponçon (Deveaux 2023).

Mais on doit aussi prendre en compte la dimension esthétique, et le fait que des espèces ligneuses, comme les saules, le murier ou la vigne ont été reconnues de longue date (saules et vigne) ou récemment (mûrier) comme résistantes à l'ennoyage de longue durée.

6. Projet

Le projet proposé, qui reprend et muscle le précédent, est le suivant :

- Dans une première phase, on étendra en utilisant la télédétection la mesure du degré de végétalisation des berges à l'ensemble des retenues à fort marnage. On s'attachera à mesurer comment la végétalisation progresse au cours de la saison où la zone de marnage est découverte, et si la végétation est en lien avec le niveau trophique, ou l'occurrence de blooms algaux. En outre, on visitera, avec un protocole du type de celui utilisé pour Serre-Ponçon, les retenues de plaine à faible pente, tels Vassivière et les retenues de la Montagne Noire, décrite par Fraissé comme en équilibre.
- Dans une deuxième phase, on fera l'inventaire des essais anciens de végétalisation, que l'on visitera, après observation « par le haut ».
- Dans une troisième phase, et sans doute en partenariat avec des institutions culturelles et territoriales, et une école du paysage, on proposera un itinéraire de végétalisation intégrant la dimension paysagère, sur une retenue à définir, mais qui pourrait être du type de Villerest.

7. Références

- Abdulahak, S. (2015). Projet d'étude de la végétation et de la végétalisation en flore locale, des rives du lac de Serre-Ponçon. CBNA.
- Abdulahak, S. (2018). Bilan des opérations de plantations sur la zone du Liou pour l'année 2017. CBNA.
- Abdulahak, S., Billard, G., & Marquis, F. (2018). Bilan des opérations de récolte, culture et végétalisation dans le cadre du programme UROS. CBNA.
- Akman, M., Bhikharie, A. V., McLean, E. H., Boonman, A., Visser, E. J. W., Schranz, M. E., & van Tienderen, P. H. (2012). Wait or escape? Contrasting submergence tolerance strategies of *Rorippa amphibia*, *Rorippa sylvestris* and their hybrid. *Annals of Botany*, 109(7), 1263-1276. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs059>
- Amano, R., Nakayama, H., Momoi, R., Omata, E., Gunji, S., Takebayashi, Y., ... & Kimura, S. (2020). Molecular basis for natural vegetative propagation via regeneration in North American lake cress, *Rorippa aquatica* (Brassicaceae). *Plant and Cell Physiology*, 61(2), 353-369.
- Blanchard, R. (1920). Régimes hydrauliques et climatiques. Alpes du Sud et ensemble des Alpes françaises. *Revue de Géographie Alpine*, 8(2), 177-223. <https://doi.org/10.3406/rga.1920.2794>
- Bordes, J.-L. (2005). Histoire, évolution technique et transmission du savoir. In *Les barrages-réservoirs en France : Du milieu du XVIIIe siècle au début du XXe siècle en France* (Vol. 9, p. 70-120). PONTIS CHAUSSEES.
- Cai, X., Lasdon, L., & Michelsen, A. M. (2004). Group Decision Making in Water Resources Planning Using Multiple Objective Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 4-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:1(4))
- Colmer, T. D., & Voeseinek, L. a. C. J. (2009). Flooding tolerance : Suites of plant traits in variable environments. *Functional Plant Biology*, 36(8), 665-681. <https://doi.org/10.1071/FP09144>
- Coops, H., & Velde, G. (1995). Seed dispersal, germination and seedling growth of six helophyte species in relation to water-level zonation. *Freshwater Biology*, 34(1), 13-20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1995.tb00418.x>
- Drius, M., Carranza, M. L., Stanisci, A., & Jones, L. (2016). The role of Italian coastal dunes as carbon sinks and diversity sources. A multi-service perspective. *Applied Geography*, 75, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.08.007>
- Durán Zuazo, V. H., & Rodríguez Pleguezuelo, C. R. (2008). Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1), 65-86. <https://doi.org/10.1051/agro:2007062>
- Félix-Faure, J., Chanudet, V., Walter, C., Gaillard, J., Lissolo, T., Descloux, S., Baudoin, J.-M., & Dambrine, E. (2017). Evolution des sols ennoyés sous les retenues de barrage : Etude et Gestion des Sols.

Ford, H., Garbutt, A., Ladd, C., Malarkey, J., & Skov, M. W. (2016). Soil stabilization linked to plant diversity and environmental context in coastal wetlands. *Journal of Vegetation Science*, 27(2), 259-268. <https://doi.org/10.1111/jvs.12367>

Fraissé, T. (1999). Les études des agences de l'eau n°66. 96.

Gelwick, F. P., & Matthews, W. J. (1990). Temporal and spatial patterns in littoral-zone fish assemblages of a reservoir (Lake Texoma, Oklahoma-Texas, U.S.A.). *Environmental Biology of Fishes*, 27(2), 107-120. <https://doi.org/10.1007/BF00001940>

Hirsch, P. E., Eloranta, A. P., Amundsen, P.-A., Brabrand, Å., Charmasson, J., Helland, I. P., Power, M., Sánchez-Hernández, J., Sandlund, O. T., Sauterleute, J. F., Skoglund, S., Ugedal, O., & Yang, H. (2017). Effects of water level regulation in alpine hydropower reservoirs : An ecosystem perspective with a special emphasis on fish. *Hydrobiologia*, 794(1), 287-301. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3105-7>

Ikematsu, S., Umase, T., Shiozaki, M., Nakayama, S., Noguchi, F., Sakamoto, T., ... & Torii, K. U. (2023). Rewiring of hormones and light response pathways underlies the inhibition of stomatal development in an amphibious plant *Rorippa aquatica* underwater. *Current Biology*, 33(3), 543-556.

Jiao, J., Zou, H., Jia, Y., & Wang, N. (2009). Research progress on the effects of soil erosion on vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 29(2), 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.05.001>

Johnson, K. G., Allen, M. S., & Havens, K. E. (2007). A review of littoral vegetation, fisheries, and wildlife responses to hydrologic variation at Lake Okeechobee. *Wetlands*, 27(1), 110-126. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2007\)27\[110:AROLVF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2007)27[110:AROLVF]2.0.CO;2)

Landry, R. (2013). Type de modes de gestion des crues saisonnières et leurs impacts sur la relation entre le climat et les débits en aval des barrages au Québec (Canada) [Masters, Université du Québec à Trois-Rivières]. <https://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/7308/>

Leira, M., & Cantonati, M. (2008). Effects of water-level fluctuations on lakes : An annotated bibliography. In K. M. Wantzen, K.-O. Rothhaupt, M. Mörtl, M. Cantonati, L. G. -Tóth, & P. Fischer (Éds.), *Ecological Effects of Water-Level Fluctuations in Lakes* (p. 171-184). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9192-6_16

McCann, S., Dale, J., & Hale, P. (1981). Subarctic tidal flats in areas of large tidal range, southern Baffin Island, eastern Canada. *Géographie Physique et Quaternaire*, 35(2), 183-204. <https://doi.org/10.7202/1000436ar>

Merriman, L. S., Moore, T. L. C., Wang, J. W., Osmond, D. L., Al-Rubaei, A. M., Smolek, A. P., Blecken, G. T., Viklander, M., & Hunt, W. F. (2017). Evaluation of factors affecting soil carbon sequestration services of stormwater wet retention ponds in varying climate zones. *Science of The Total Environment*, 583, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.040>

Mommer, L., & Visser, E. J. W. (2005). Underwater Photosynthesis in Flooded Terrestrial Plants : A Matter of Leaf Plasticity. *Annals of Botany*, 96(4), 581-589. <https://doi.org/10.1093/aob/mci212>

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., ... van Ypserle, J.-P. (2014). Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In R. K. Pachauri & L. Meyer (Éds.), EPIC3Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p., pp. 151, ISBN: 978-92-9169-143-2 (p. 151). IPCC. <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>

Salmon, Q. (2022). Evaluation de l'efficacité de zones littorales flottantes artificielles pour atténuer les effets du marnage sur la biodiversité lacustre [These de doctorat, Aix-Marseille]. <https://www.theses.fr/2022AIXM0205>

Stift, M., Luttikhuisen, P. C., Visser, E. J. W., & Van Tienderen, P. H. (2008). Different flooding responses in *Rorippa amphibia* and *Rorippa sylvestris*, and their modes of expression in F1 hybrids. *New Phytologist*, 180(1), 229-239. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02547.x>

Sutela, T., Aroviita, J., & Keto, A. (2013). Assessing ecological status of regulated lakes with littoral macrophyte, macroinvertebrate and fish assemblages. *Ecological Indicators*, 24, 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.06.015>

Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement de Serre-Ponçon. (2023). Le lac de Serre-Ponçon. <http://www.smadesep.com/cms/index.php/le-lac-destination-nautique-2/presentation/>

Tison, J.-M., & de Foucault, B. (2014). *Flora gallica : Flore de France*. Biotope.

Touchart, L. (2014). *Les lacs et les zones humides de Russie*. 125.

Van Eck, W. H. J. M., Van De Steeg, H. M., Blom, C. W. P. M., & De Kroon, H. (2004). Is tolerance to summer flooding correlated with distribution patterns in river floodplains? A comparative study of 20 terrestrial grassland species. *Oikos*, 107(2), 393-405. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2004.13083.x>

Vartapetian, B. B., & Jackson, M. B. (1997). Plant Adaptations to Anaerobic Stress. *Annals of Botany*, 79(suppl 1), 3-20. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a010303>

Voesenek, L. a. C. J., Rijnders, J. H. G. M., Peeters, A. J. M., van de Steeg, H. M., & de Kroon, H. (2004). Plant Hormones Regulate Fast Shoot Elongation Under Water : From Genes to Communities. *Ecology*, 85(1), 16-27. <https://doi.org/10.1890/02-740>