



Les retenues d'altitude pourraient-elles d'avantage contribuer à la biodiversité ?

Baptiste Testi

► To cite this version:

Baptiste Testi. Les retenues d'altitude pourraient-elles d'avantage contribuer à la biodiversité ?. Biodiversité et Ecologie. 2021. hal-03844264

HAL Id: hal-03844264

<https://hal.inrae.fr/hal-03844264>

Submitted on 8 Nov 2022

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.

Master 2 – Biodiversité – Écologie – Evolution Gestion de l'Environnement

**Les retenues d'altitude pourraient-elles d'avantage contribuer
à la biodiversité ?**

Stage effectué par Baptiste TESTI

à INRAE

**Sous la responsabilité de Stéphanie GAUCHERAND (INRAE)
Tuteur académique : Arnaud FOULQUIER**



Financier:



Année Universitaire 2020-2021

Table des matières

I. CONTEXTUALISATION.....	1
ENTREPRISE D'ACCUEIL	1
SITUATION DE LA MISSION DANS LE FONCTIONNEMENT DE L'ENTREPRISE.	1
1. Conception de l'étude.....	2
2. Terrain	2
3. Traitement et analyse des données.....	3
4. Recherche de financements pour poursuite du projet	3
II. RAPPORT DE MISSION	3
INTRODUCTION	3
1. État des lieux sur les retenues d'altitude.....	4
a) Rôle des retenues d'altitude	4
b) Réglementation.....	4
c) Conception.....	5
i. L'étanchéité au cœur de la conception	6
ii. Sécurité publique.....	7
2. Quelle contribution à la biodiversité pour les retenues d'altitude ?	7
a) Etat des connaissances	7
b) Caractéristiques pouvant influencer leur interaction avec la biodiversité	8
MATERIEL ET METHODES	12
1. Récupération de données existantes.....	12
a) Bases de données disponibles	12
b) Obtention de données spécifiques auprès des domaines skiables volontaires	13
2. Récoltes de données sur le terrain	13
a) Choix des sites.....	13
b) Choix des indicateurs	13
i. Indicateurs de biodiversité	13
ii. Physico-chimie	14
c) Protocole.....	16
i. Mesure et prélèvement pour la physico-chimie.....	16
ii. Déroulé d'une visite.....	17
3. Analyse des données	18
RESULTATS.....	18

1. Parc de retenues d'altitude dans les départements concernés par nos visites	18
2. Retenues d'altitude visitées.....	20
a) Caractéristiques et description	20
b) Utilisations	23
c) Physico-chimie	23
d) Biodiversité	28
DISCUSSION	30
1. Faune.....	31
2. Physico-chimie.....	33
3. Végétation	34
4. Contexte paysager.....	37
CONCLUSION	37
BIBLIOGRAPHIE	38
ANNEXE I - CONTACTS	1
ANNEXE II - FICHE TERRAIN.....	2
ANNEXE III - FICHE FORMULAIRE	3
ANNEXE IV - FICHE RETOUR FORMULAIRE (EXEMPLE)	4
ANNEXE V - RETENUES D'ALTITUDES VISITEES	5
ANNEXE VI - CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	6
ANNEXE VII - EXEMPLE DE RETENUE D'ALTITUDE INTEGREE ECOLOGIQUEMENT	7
ANNEXE VIII - PERSPECTIVES ; PISTES D'AMELIORATIONS	8
1. Ingénierie civile et écologique	8
2. Écologie et naturalisme.....	9
3. Étendre la vision à d'autres systèmes similaires.....	10
4. Orientation vers le « multi-usages »	10
5. Adaptation des zones d'implantation	10
6. Gestion adaptée de la maintenance et des utilisations.....	11
7. Adaptation de la conception.....	11

Glossaire des acronymes

- AEP : Alimentation en Eau Potable
- AFC : Analyse Factorielle des Correspondances
- CdA : Compagnie des Alpes
- CdE : Code de l'Environnement
- DCE : Directive Européenne Cadre sur l'Eau
- DDT : Direction Départementale des Territoires
- **DEG : Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane**
- **DS : Domaine Skiable**
- INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
- LQ : Limite de Quantification
- **RA : Retenue d'Altitude**
- SDAGE : Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux
- SAGE : Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux

I. Contextualisation

Entreprise d'accueil

L'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) est un Établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) français sous la tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur, la Recherche et l'Innovation (MESRI) et du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA). Il est issu de la fusion entre l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) au 1^{er} janvier 2020. Le nouvel institut développe donc à partir de cette date les thématiques apportées par les deux anciens instituts. Les recherches qui y sont menées portent sur trois domaines principaux : l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Il s'agit principalement d'une recherche appliquée pouvant venir en appui aux politiques publiques dans des disciplines variées (sciences de l'eau et de la forêt, conservation et restauration de la biodiversité, bioéconomie et économie circulaire, gestion durable des territoires, anticipation et gestion des risques, agriculture numérique, climat, sécurité alimentaire, agroécologie, énergétique...).

INRAE est constitué de 268 unités de recherche, de service ou expérimentale dépendant de 14 départements scientifiques répartis en 18 centres régionaux (métropole et TOM), le siège étant sur deux sites en région parisienne. Le Centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes est le dernier créé et conduit ses activités dans les domaines de l'eau, des risques naturels, de l'aménagement du territoire, de la nutrition humaine et de la biologie des plantes. Il inclut l'ancien centre Irstea de Grenoble, où a physiquement été réalisé le stage, au sein de l'équipe BIOSSES (BIOdiversité et Socio-EcoSystèmes) de l'unité de recherche LESSEM (Laboratoire des EcoSystèmes et Sociétés de Montagne). Le LESSEM s'intéresse à différentes composantes des socio-écosystèmes, notamment en territoires de montagne, et se positionne tout le long du continuum allant de la production académique à l'appui à décision. L'équipe BIOSSES est spécialisée en conservation, restauration et politique de la nature, tant sur les aspects écologiques que sociologiques (interactions entre pratiques de gestion et dynamique des écosystèmes). Les recherches y sont menées en partenariat étroit avec des acteurs opérationnels et les chercheurs de l'équipe contribuent à des conseils scientifiques d'institutions de la nature et à des expertises nationales ou internationales en gestion (e.g. restauration ou revégétalisation des écosystèmes dégradés, lutte contre les espèces exotiques envahissantes...) ou gouvernance.

Situation de la mission dans le fonctionnement de l'entreprise.

Le poste que j'ai occupé était celui de stagiaire écologue. J'y ai réalisé une étude exploratoire sur la contribution des retenues d'altitude (RA*) à la biodiversité en montagne sous la responsabilité scientifique de Stéphanie Gaucherand (Ingénieure des Ponts, des Eaux et des Forêts ; IPEF).

L'objectif était de fournir un état des lieux des biocénoses potentiellement présentes dans les RA tout en tenant compte des usages de ces ouvrages. Il s'agissait donc d'amorcer une étude pluridisciplinaire à l'interface entre écosystèmes aquatiques et sociétés en montagne, en vue de fournir des éléments d'aide à la décision en termes de conception, gestion, voire réglementation concernant les RA. En ces termes, l'étude rejoint parfaitement les thématiques abordées par l'équipe BIOSSES et plus largement de l'unité de recherche LESSEM et de INRAE.

1. Conception de l'étude

Si les objectifs généraux de l'étude et le budget étaient fixés, la mise en œuvre technique restait à définir. Il s'agissait donc de concevoir une étude compatible avec le budget alloué dans le temps imparti par la formation universitaire. Cette première étape a été constituée des démarches suivantes :

- Recherche bibliographique ouverte sur les thématiques associées : conception des retenues d'altitude, fonctionnement écologique des écosystèmes aquatiques, écologie des paysages aquatiques, méthodologies de monitoring et d'analyse de la qualité de l'eau, écologie des groupes d'espèces inféodés à ces milieux, méthodes et techniques d'inventaire de la biodiversité, législation relative à ces ouvrages et leur utilisations, élargissement aux autres types de retenues artificielles... le sujet étant peu documenté en soi, il était nécessaire de bien cerner tous les aspects associés.
- Recueil de données sur les retenues d'altitude auprès des DDT et réalisation d'une base de données géospatialisée.
- Constitution d'un réseau d'acteurs : domaines skiables, services de l'état, associations de protection de la nature, bureaux d'étude, scientifiques relevant de différentes disciplines (écologie aquatique, écologie des amphibiens, génie civil, génie écologique...). La constitution d'un tel réseau offre une certaine visibilité au projet, favorise l'émergence de propositions innovantes. Il favorise également le dialogue entre les parties prenantes.
- Création, par les services informatiques de INRAE, d'une plateforme internet qui nous permettra à l'avenir de centraliser et partager l'état des connaissances de manière interactive avec le réseau constitué voire de les communiquer à un plus large public.
- Définition de la méthodologie et techniques associées (matériel nécessaire, analyses à réaliser, validation des devis) avec l'appui de la responsable du laboratoire de l'équipe et le soutien scientifique de Stéphanie Gaucherand et de collègues INRAE.

2. Terrain

J'ai organisé l'ensemble des sorties de terrain (calendrier, hébergement, véhicules adaptés) en tenant compte des contraintes de stockages et d'acheminement des prélèvements d'eau et en optimisant les déplacements au regard des disponibilités des exploitants de domaines skiables. J'ai préparé le

matériel (flacons de prélèvements, matériel de transport sur site et de conservation, étalonnage des sondes, conception d'outils spécifiques, fiches de terrain). In situ, j'ai réalisé seul ou en binôme les mesures physico-chimiques, les relevés (observations naturalistes, description du site d'étude), les prélèvements d'eau et j'ai échangé avec les exploitants quant aux spécificités de leurs retenues.

3. Traitement et analyse des données

J'ai assuré la saisie, la mise en forme et l'analyse des données obtenues par les différentes sources (questionnaire, services de l'état, terrain et bibliographie).

4. Recherche de financements pour poursuite du projet

J'ai rédigé avec l'appui de Stéphanie Gaucherand et André Evette une participation à un premier appel à projet (interne au LESSEM, accepté) pour financer trois mois de CDD en vue d'une rédaction d'article et de la redéfinition des objectifs pour la recherche de financements à suivre. Au vu de l'engouement des acteurs académiques et non académiques contactés dans le cadre de l'étude, nous persévérons dans ces démarches pour avancer sur cette thématique. J'ai également rédigé et constitué le dossier pour concourir à la campagne interne de recrutement sur un poste durable à INRAE.

II. Rapport de mission

Introduction

Un fort déclin des mares et étangs est observé dans la plupart des pays européens (EPCN 2016). En parallèle, de nombreuses retenues d'eau artificielles ont été et sont encore créées. Elles font désormais partie du paysage aquatique (Oertli 2018) et constituent déjà dans certaines régions la seule alternative aux milieux naturels pour la biodiversité (cf. Zamora-Marín et al. 2021).

Les retenues artificielles ne sont généralement pas conçues et gérées en considération de la biodiversité (Oertli 2018). Elles peuvent néanmoins abriter un certain nombre d'espèces (Fait et al. 2020; Scher 2006; Zamora-Marín et al. 2021) bien que les plus sensibles y soient généralement peu représentées voire absentes (Fait et al. 2020; Scher 2006). Ces nouveaux milieux dans un paysage aquatique altéré et évolutif pourraient être perçus par la faune et la flore comme des opportunités, en termes d'habitat ou de connectivité vers des milieux plus favorables, ou bien s'avérer inhospitaliers et se comporter en pièges écologiques.

Au sein des domaines skiables, on estimait en 2010 qu'un tiers des retenues artificielles destinées à la production de neige, appelées « retenues d'altitude » (Peyras et Mériaux 2009), avaient remplacé des milieux humides naturels (Evette et al. 2011), milieux qui peuvent également montrer une forte régression du fait de l'aménagement des domaines skiables (Gaucherand et Isselin-Nondedeu 2011;

Paccard 2010). Quelle est alors la place occupée par ces nouveaux milieux artificiels que sont les retenues d'altitude (RA*) dans le paysage aquatique de montagne ?

L'objectif du présent travail est d'explorer la contribution des retenues d'altitude, destinées à la production de neige, à la biodiversité au sein des domaines skiables.

Il s'agit ici (i) d'évaluer les caractéristiques des retenues d'altitude favorables ou défavorables à la biodiversité et (ii) d'envisager des solutions d'améliorations de leur contribution à la biodiversité, au regard des contraintes techniques (et réglementaires) liées à ces ouvrages.

Concevoir des retenues artificielles en faveur de la biodiversité demeure une question qui suscite beaucoup d'intérêt. A ce jour l'accent est mis sur l'intégration paysagère or cela relève plus de l'esthétisme que de la fonctionnalité écologique ; des biocénoses riches peuvent en effet être observées dans des réservoirs « inesthétiques » (e.g. bassins d'autoroutes). Certains éléments peuvent y éviter la mortalité d'individus (équipement pour sortie de la petite faune, période de vidange adaptée...), mais à ce jour rien ne semble exister en France pour y favoriser l'installation durable de la biodiversité.

1. État des lieux sur les retenues d'altitude

Les éléments présentés ici résultent d'une revue de littérature associée aux retenues d'altitude, des nombreux échanges (cf. [Annexe I](#)) et des observations réalisées sur le terrain.

a) Rôle des retenues d'altitude

Les retenues d'altitude permettent de disposer d'eau en abondance au moment opportun pour la production de neige (Marnezy 2008). Elles autorisent une production rapide lorsque les conditions sont favorables tout en étalant les périodes de prélèvements (Badré, Prime, et Ribière 2009; Gerbaux et al. 2020), de préférence au printemps où la disponibilité en eau des torrents, sources (trop-plein AEP*) et de ruissellement est élevée, voire en automne quand les précipitations peuvent être importantes (Badré et al. 2009; Marnezy 2008). L'eau d'alimentation de ces RA peut être puisée selon les cas directement dans le réseau hydrographique (captage et dérivation de ruisseaux et torrents, drainage des versants proches, pompage dans un lac naturel ou dans la nappe phréatique...), dans le réseau d'AEP ou bien dans les retenues hydroélectriques.

b) Réglementation

Des guides recensent les procédures juridiques relatives à ces ouvrages (MEEDDAT 2013; Peyras 2006; Peyras et Mériaux 2009) mais nécessitent des mises à jour, les textes évoluant rapidement. Dans tous les cas les principes de gestion de la ressource en eau doivent être respectés (compatibilité avec les SDAGE* ou SAGE*). L'essentiel de la réglementation relative aux retenues est dans le Code de l'Environnement (CdE*) (Valé et Renaud 2020), notamment modifié par le Décret n° 2015-526

du 12 mai 2015 « relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques » et l'Arrêté du 6 août 2018 « fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages ». En voici un survol non exhaustif :

Les équipements de production de neige sont soumis à déclaration ou autorisation (cf. Art. R.214.1 CdE : création de plan d'eau voire de barrage, modalités de vidange et de prélèvements pour remplissage). Les ouvrages sont sous la responsabilité du bénéficiaire et, lorsqu'ils sont classés (Art. R214-112 CdE), sont soumis à des normes particulières de conception (cf. Art. R214-129 à R214-132, R214-115, R214-127, L521-4 CdE), de suivis (notamment les Visites Techniques Approfondies) et d'entretien (Art. R214-122 à R214-125). En ce qui concerne les aspects environnementaux, la réglementation impose au cas par cas, par une évaluation environnementale (cf. R122-2, CdE), la prise en compte de l'impact direct de ces ouvrages sur le milieu lors de leur création et de l'impact sur l'hydrologie et les milieux aquatiques lors de leur utilisation (notamment prélèvements et vidanges, cf. L122-1, R122-5, CdE).

Après construction, l'interaction entre l'ouvrage et la biodiversité à l'échelle locale et paysagère semble limitée aux situations où des espèces à enjeu de conservation sont décelées dans la RA, notamment si celle-ci fait l'objet d'un projet de modification. Les connaissances naturalistes relatives aux domaines skiables (DS*) sont principalement liées aux suivis des observatoires environnementaux et les RA n'en font pas systématiquement partie.

c) Conception

La conception des RA a évolué selon les usages et la réglementation (Peyras et Mériaux 2009). Leur nombre a également considérablement augmenté depuis les années 1990 (Girard et al. 2009). Pour des raisons techniques liées à la sécurité des ouvrages et aux spécificités des zones de montagne, les choix de construction s'orientent vers le génie civil qui présente des techniques et matériaux dont les caractéristiques sont connues et quantifiées (Evette et al. 2011; Girard et al. 2009; Naaïm, Degoutte, et Delorme 2010; Peyras 2006; Peyras et Mériaux 2009).

Les lacs naturels rehaussés par un barrage ne feront pas l'objet de cette étude ; nous nous limiterons aux RA entièrement artificielles que nous décrirons dans cette partie.

En 2008, la littérature recensait une centaine de RA, principalement dans les Alpes (85%) et Pyrénées (15%), les autres massifs n'hébergeant qu'une dizaine de RA au total. Il s'agissait quasi exclusivement des barrages en déblai-remblai étanchéifiés (Evette et al. 2011), et principalement construits sur des replats situés sur les hauteurs (environ 70% à une altitude supérieure à 1500m) afin de favoriser la distribution gravitaire au système d'enneigement (Marnezy 2008). Les volumes étaient

très variées (de 3 000 m³ à 400 000 m³), avec une moyenne de 40 000 m³ en 2008 (Marnezy 2008) et de l'ordre de la centaine de milliers de mètres cubes pour les projets enregistrés à cette date.

i. L'étanchéité au cœur de la conception

Les difficultés d'accès et d'apports de matériaux extérieurs au site justifient cette conception en déblai-remblai. En montagne, le substratum géologique apparaît généralement fracturé et/ou perméable et se caractérise par une faible étanchéité naturelle. Les ouvrages sont alors généralement équipés d'un Dispositif d'Étanchéité par Géomembrane (DEG*), afin d'assurer leur fonction première de stockage d'eau et d'éviter une déstructuration du remblai qu'entraînerait la présence d'eau en son sein. Le DEG est donc un élément central dans la conception des RA (Peyras et Mériaux 2009) et doit généralement être accompagné de dispositifs de drainage et de moyens d'auscultation et de surveillance ([Figure 1](#)) pour s'assurer de l'intégrité du remblai (Girard et al. 2009; Peyras et al. 2010).

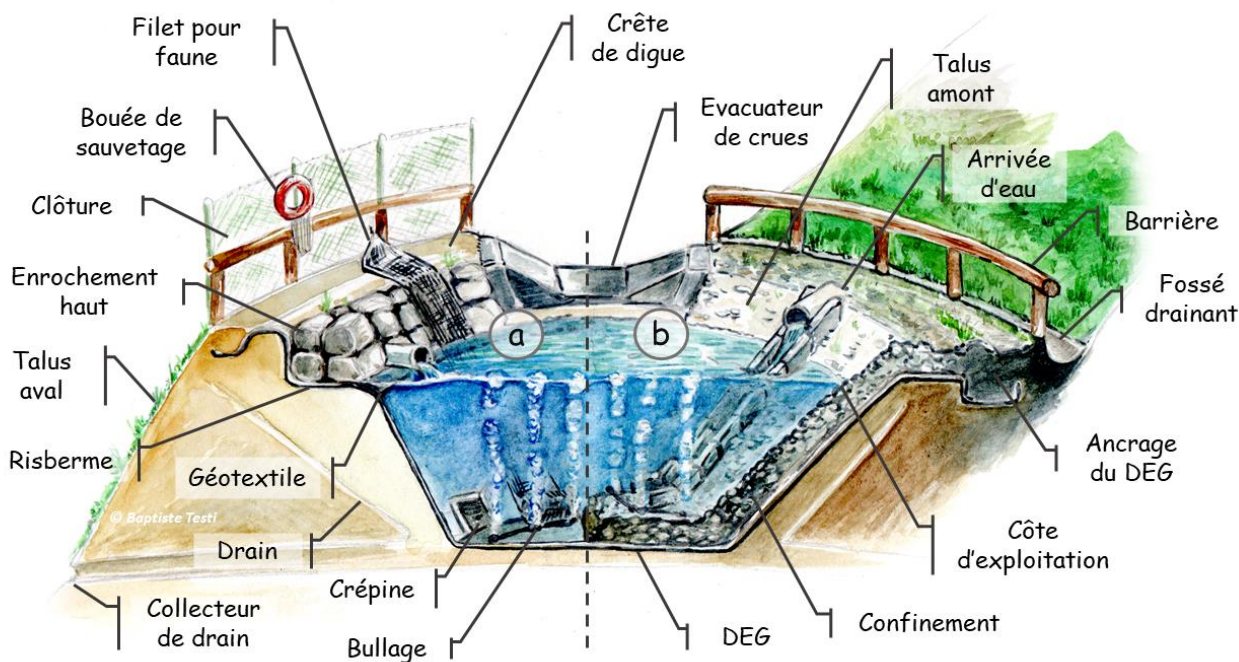


Figure 1. Coupe transversale de retenue d'altitude

Partie gauche (a) : RA sans confinement représentée ici avec un enrochement sur la partie haute. Partie droite (b) RA confinée

En 2008, le DEG n'était protégé par un confinement minéral que pour une minorité des RA ; 90% des RA visitées présentaient un DEG non protégé ou seulement sur la partie haute (Peyras et Mériaux 2009). Cette protection était préconisée pour les RA classées à forts enjeux (Peyras et al. 2010). Pour les RA non confinées, le DEG peut être soumis à un ensemble de contraintes (reptation de la glace, chutes de blocs, érosion de la couche support) menant à des perforations et déchirures. Des examens de contrôle réguliers par vidange de la RA sont alors nécessaires (Girard et al. 2009). Certaines RA

peuvent présenter une protection haute (par enrochement) notamment contre le batillage (effet des vagues sur les berges), qui permet également une meilleure insertion paysagère lors des hautes eaux. Cela pose néanmoins des problèmes d'endommagement par chutes de blocs entraînés par la glace avec la baisse des eaux pendant l'utilisation hivernale, à moins que le niveau d'eau en hiver ne reste en dessous des enrochements (Peyras et al. 2010).

Pour les RA confinées, le DEG est entièrement recouvert par une ou plusieurs couche de matériaux minéraux ([Figure 1](#)). Ce dispositif assure la protection (contraintes physiques, ultra-violets) de la couche géosynthétique (Girard et al. 2009; Peyras et Mériaux 2009) et évite la mortalité d'animaux ne pouvant pas sortir sur une géomembrane glissante (problème identifié dans d'autres types de retenues, cf. Jumeau et al. 2020). Le contrôle et l'entretien de l'ouvrage sont moins contraignants et la durée de vie de la géomembrane est plus élevée.

ii. Sécurité publique

Les RA peuvent être exposées à des aléas spécifiques aux milieux montagnards (avalanches, débordements torrentiels, glissements de versants, chutes de blocs, écroulements...), supplémentaires à ceux existant en plaine. Ayant une situation dominante et proche des installations touristiques dans un contexte à topographie marquée, elles peuvent présenter un risque élevé en cas de rupture du remblai (Evette et al. 2011; Peyras et al. 2010). En 2010, près d'une RA sur deux intéressait la sécurité publique (Evette et al. 2011). Cette proportion n'est probablement pas vouée à diminuer ; du fait de la recherche de maximisation du volume des ouvrages (possibilités de stockage et d'enneigement, cf. Gerbaux et al., 2020) et de leur construction dans des contextes de plus en plus anthropisés (infrastructures touristiques) les RA sont fréquemment sujettes à être classées (Art. R214-122 CdE). Ces enjeux contraignent à la fois le choix du site d'implantation et la conception de l'ouvrage dont la fiabilité doit être conforme à celle d'un ouvrage de génie civil à fort enjeu, et impliquent parfois la mise en place d'ouvrages de protection de la RA elle-même (e.g. dispositif paravalanche, cf. Peyras et al. 2010).

2. *Quelle contribution à la biodiversité pour les retenues d'altitude ?*

a) *Etat des connaissances*

La question des interactions entre retenues artificielles et biodiversité est une problématique émergente (EPCN 2021) et a pu faire l'objet d'études pour certains types de retenues (e.g. Clevenot, Carré, et Pech 2018; Jumeau et al. 2020; Scher 2006; Zamora-Marín et al. 2021). A notre connaissance, un seul jeu de données a permis de comparer la contribution de RA à la biodiversité par rapport à un ensemble de plans d'eau naturels ou semi-naturels (Fait 2017; Fait et al. 2020). Cette étude réalisée dans les Alpes suisses ne considérait cependant que 8 RA sans classification réglementaire particulière. Seules deux RA de ce jeu de données avaient un volume supérieur au volume moyen du

parc de RA françaises (40000m³) et deux autres, dites « mixtes » présentaient une zone aménagée pour favoriser le maintien d'une bande végétale ([Annexe VII - Exemple de retenue d'altitude intégrée écologiquement](#)), ce qui ne semble pas exister en France. Cette étude soulève néanmoins un potentiel d'accueil pour certaines espèces d'invertébrés et amphibiens, malgré la faible diversité d'habitats observés au sein des RA : « minéraux (sables, rochers) ou artificiels (bâches) », pas ou très peu végétalisés contrairement aux milieux naturels (Fait 2017). Dans cette étude, trois espèces d'amphibiens y ont été observées ([Figure 2](#)) : la grenouille rousse (*Rana temporaria*), le crapaud commun (*Bufo bufo*) et le triton alpestre (*Ichthyosaura alpestris*).



Figure 2. Amphibiens des RA.

a : triton alpestre (Ichthyosaura alpestris) prédatant une ponte de grenouille rousse ; b : grenouille rousse (Rana temporaria) ; c : crapaud commun (Bufo bufo).

Les plus grandes diversités de macroinvertebrés (ici coléoptères) ont été observées dans les RA ayant un aménagement pensé pour la biodiversité en leur sein ou à proximité. Tous les groupes ne semblent pas s'accommoder de ces milieux artificiels ; la présence d'odonates par exemple n'a été relevée que dans une seule RA qui était une retenue « mixte ».

b) Caractéristiques pouvant influencer leur interaction avec la biodiversité

Des typologies existent selon le type d'alimentation des retenues collinaires et leur situation dans le réseau hydrographique (cf. Roger 2013; Carluet et al. 2016) et peuvent être reliées à leur impact quantitatif et qualitatif sur l'hydrologie du bassin versant. Ce sont ici les caractéristiques des RA favorisant ou contraignant l'accueil et l'installation de la biodiversité qui nous intéressent. Les digues ont généralement une conception régulière et homogène en termes de composition et de morphologie, conférant des caractéristiques mécaniques uniformes à l'ensemble de l'ouvrage. Toutefois, parmi les RA existantes, les différences de conception (type de substrat/revêtement, pente des berges, mesures de mise en exclos et d'entretien...) pourraient offrir des conditions plus ou moins favorables à la biodiversité. La conception des RA a évolué avec les premiers retours d'expériences et les RA récentes ont tendance à être confinées. La date de création d'une RA est donc généralement associée à certaines caractéristiques pouvant influencer le développement des biocénoses. Aussi, l'âge d'un plan d'eau influe sur sa probabilité d'avoir été colonisé par de nouvelles espèces. Ce paramètre est bien entendu à considérer au regard de la connectivité du milieu avec les autres milieux aquatiques.

La proximité entre milieux aquatiques favorise en effet l'arrivée de pionniers dont la capacité de dispersion varie selon les espèces (Oertli et al. 2017; Oertli et Frossard 2013).

L'angle des pentes des talus est un compromis entre contraintes géotechniques et limitation de l'emprise de l'ouvrage, l'objectif étant la maximisation du volume pour une surface donnée. Il dépend aussi du type de revêtement ; la présence d'un confinement nécessitant des pentes plus douces pour assurer la stabilité des matériaux. La prise en glace est également à prendre en compte et les dégâts sont moindres lorsque le fruit du talus amont (cf. [Figure 4](#)) est inférieur à 1/3 (3 m horizontaux pour 1 m vertical, soit un angle de pente d'environ 18,5°). Toutefois, malgré ces contraintes techniques, beaucoup de RA présentent un talus amont dont le fruit est supérieur à 1/3 (Peyras et Mériaux 2009), ce qui réduit également la portion de berges favorable à l'installation de macrophytes et d'une biodiversité associée. Les berges sont de surcroît soumises à de fortes variations du niveau d'eau (cf. plus loin), ce qui dans tous les cas rend l'installation des biocénoses plus difficile.

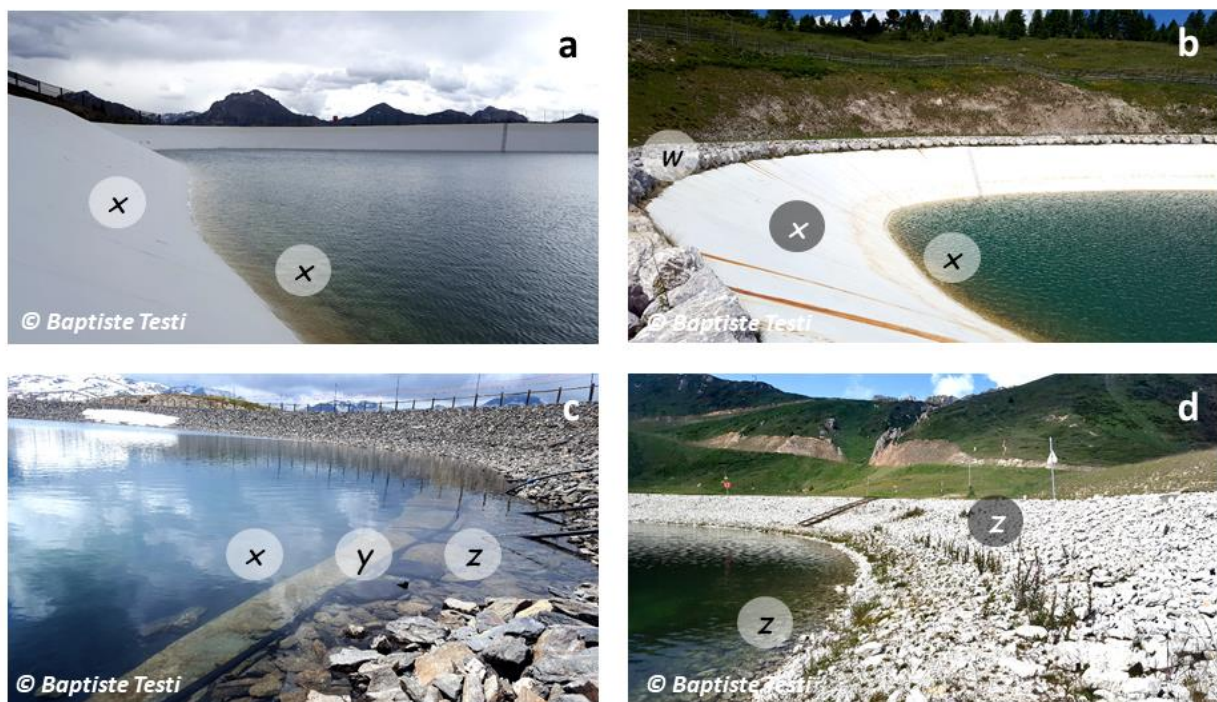


Figure 3. Différents types de retenues selon le confinement du DEG.

a : Pas de confinement ; b : Retenue non confinée avec enrochement en partie haute ; c : Confinement partiel ; d : Confinement total. (w = enrochement haut ; x = géomembrane ; y = géotextile anti-poinçonnement ; z = confinement)

Les RA sans confinement ([Figure 3](#)) présentent un revêtement à moindre rugosité (ce qui empêche l'implantation de la flore et limite l'installation et le déplacement de la faune...) et sont sujettes à des vidanges fréquentes (en moyenne tous les 4 ans) visant à contrôler visuellement et/ou réparer le DEG. Des mortalités d'amphibiens peuvent y être observées (œufs ou têtards lors des vidanges en période de reproduction, adultes ne pouvant sortir en glissant ou se desséchant sur le DEG). La **grande faune**,

plutôt à basse altitude, peut également endommager les DEG voire se retrouver piégée dans les bassins sans pouvoir en sortir, engendrant de la mortalité lorsque le fruit est supérieur à 1/3 (Peyras et Mériaux 2009). Des dispositifs de sécurité (échelles, bouées...) ainsi que des clôtures peuvent être disposées autour de la RA. Des rampes ou filets peuvent également être installés pour aider la petite faune à sortir de l'eau (cf. [Figure 1](#)), mais l'efficacité de ces dispositifs n'est pas démontrée. Les RA confinées ne seraient pas concernées par ces questions.

Les préconisations liées à la surveillance des ouvrages impliquent que le talus amont ([Figure 4](#)) ne doit pas être végétalisé ; le développement racinaire endommage l'ouvrage (structure, étanchéité) et celui-ci doit rester parfaitement visible pour les contrôles. Des interventions régulières doivent donc être réalisées pour limiter le développement de la végétation et éviter que les animaux fouisseurs ne s'y installent. Une flore herbacée éparsée de hauteur modeste et à enracinement superficiel peut toutefois y être tolérée. En revanche le talus aval doit être végétalisé (permet le maintien du remblai et limite son érosion) par une végétation herbacée. La végétation ligneuse est à proscrire dans tous les cas (déstructuration du remblai par les racines, création de voies d'eau préférentielles notamment lors de la décomposition des racines, possibilité d'arrachage d'une partie du remblai prise dans le système racinaire...). En outre, un fossé drainant est généralement prévu en périphérie des RA pour éviter les infiltrations sous le DEG et l'apport de fines dans la RA, ce qui pourrait limiter la possibilité d'installation de végétation.

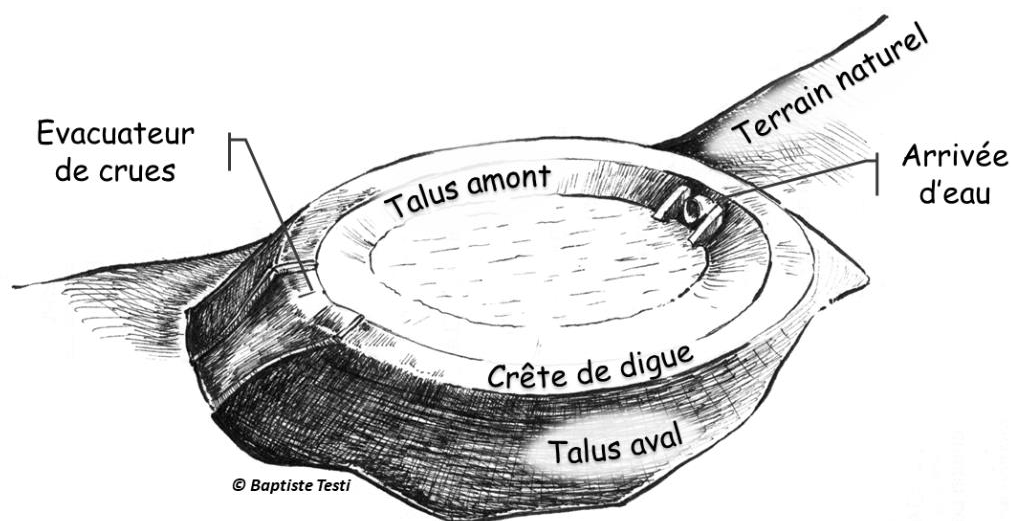


Figure 4. Nomenclature des parties de la digue de barrage d'une retenue d'altitude.

*Dans le cas d'une RA la digue de barrage fait tout le tour de l'ouvrage. L'eau de la RA est donc entourée par le **talus amont** et la **crête de digue** couronne la RA. Le **talus aval** entoure la RA pour rejoindre la topographie du terrain naturel.*

Dans le cas des RA, les origines de l'eau d'alimentation sont très variables et la qualité de l'eau n'est pas toujours fiable aux caractéristiques du BV. Bien souvent l'eau est puisée plus bas dans les cours d'eau, là où le débit est suffisant pour prélever en quantité tout en respectant les débits minimums

réglementaires. Cette eau peut ensuite transiter d'une RA à l'autre, potentiellement dans des BV différents, pour alimenter l'ensemble ou une partie du parc de RA du DS. Il en résulte une certaine variabilité dans leur hydrologie d'un point de vue quantitatif (périodes et vitesses de remplissage) mais également qualitatif si l'eau a subi un pré-traitement (filtration, décantation, traitement aux normes pour AEP...) ou selon le lieu de prélèvement (e.g. à l'aval des DS ou dans des BV à géologie ou utilisations des sols différents). Il est à noter que l'utilisation d'additifs favorisant la production de neige, bien que n'étant pas interdite, semble proscrite des pratiques des nivoculteurs en France.

L'abrasivité de l'eau (due aux matières en suspension) doit être compatible avec le système d'enneigement. Celle-ci peut donc être filtrée et/ou décantée afin d'assurer la longévité des pompes et le bon fonctionnement des enneigeurs. Aussi, l'accumulation de sédiments dans la RA peut obstruer les canalisations et les enneigeurs selon la position de la crépine et diminue le volume utile de la RA. Ces sédiments pourraient pourtant constituer un substrat favorable à l'installation d'un cortège végétal et animal et les matières en suspension pourraient avoir un rôle dans l'équilibre physico-chimique et donc écologique de la RA. La compatibilité d'une petite accumulation de substrat avec l'usage « neige de culture » de la RA reste à préciser.

Les RA sont généralement vidées en grande partie une à plusieurs fois par an selon les volumes nécessaires pour la production de neige en hiver, voire totalement pour les visites de contrôle (avec une fréquence variable selon le type de RA). Leur niveau peut baisser rapidement lorsque les conditions sont favorables à la production de neige. Les remplissages dépendent de la disponibilité de la ressource et des origines de l'eau (prélèvements, gravitaire...). L'eau y a donc un temps de résidence court et il en résulte de fortes variations de niveaux d'eau selon la profondeur de la RA. Ces variations de hauteur d'eau (marnage) impactent principalement la biodiversité dans la zone de battement, voire les espèces pélagiques selon son amplitude. De rares observations d'odonates dans certaines RA (Fait 2017), qui peuvent passer plusieurs années à l'état larvaire, semblent indiquer que certaines espèces peuvent résister à de faibles niveaux d'eau. Toutefois l'impact de ce marnage sur la faune, selon la saison et les particularités montagnardes, reste une problématique ouverte.

La production de neige a un meilleur rendement avec une eau à basse température. Des systèmes de bullage (cf. [Figure 1](#)) peuvent être installés pour refroidir l'eau par injection d'air. L'installation de retenues à haute altitude leur confère une eau plus froide. Le bullage à eau est alors préféré car il nécessite des équipements plus modestes (notamment compresseurs) et à moindre consommation énergétique. Le bullage crée également un brassage de l'eau¹ et évite sa prise en glace, qui couplée

¹ D'autres solutions de brassage peuvent être utilisées (e.g. flotteurs ; <https://aquago.fr/produits/brasseur-etang-submix/>)

aux baisses de niveau d'eau peut contribuer à la dégradation du DEG (arrachage des enrochements, reptation et perforation de la géomembrane), notamment dans les RA non confinées. Parfois, ce brassage peut être réactivé certains jours d'été dans l'optique de limiter le développement algal.

L'introduction de poissons (notamment de salmonidés) dans les plans d'eau naturels comme artificiels peut être fortement problématique pour la reproduction des amphibiens (Morand 2013). Une RA à usage de pêche pourrait donc se comporter en piège écologique pour les amphibiens. Certains macroinvertébrés (corises, coléoptères, éphéméroptères...) sont également sujets à la prédation des poissons (Oertli, Finger, et Ilg 2017; Oertli et Frossard 2013). Cette prédation, lorsqu'elle est exercée sur les espèces brouteuses du phytoplancton peut entraîner un déséquilibre du réseau trophique menant à une augmentation de la masse phytoplanctonique lorsque les conditions y sont favorables (Oertli et Frossard 2013). Les écosystèmes terrestres proches peuvent également être impactés avec la disparition des imagos d'insectes représentant une part de la source de nourriture de certaines espèces (oiseaux, chauves-souris...). Au-delà de la pêche, d'autres activités de loisir, nautiques en particulier, pouvant être mises en place dans les RA pourraient être une source de dérangement pour la faune et la flore.

Matériel et Méthodes

1. Récupération de données existantes

a) Bases de données disponibles

Des données rassemblées concernant les RA proviennent du projet BARALTISUR (ayant mené aux publications de référence sur les RA, dont l'ouvrage coordonné par Peyras et Mériaux 2009), des Directions Départementales des Territoires (DDT) de Savoie, Haute-Savoie et Hautes-Alpes, ainsi que des données de l'étude (Gerbaux et al. 2020) pour les RA de l'Isère (la DDT de ce département ne dispose pas encore d'informations centralisées sur les RA). Nous sommes à ce jour en attente de réponse d'autres DDT afin de couvrir la majorité des RA des Alpes françaises. Les informations récoltées étant de composition variable, nous avons décidé de ne conserver que les principales caractéristiques des RA (volume, année de construction, éventuellement type d'ouvrage et altitude). Toutes ces informations sont rassemblées dans une base de donnée qui a vocation à être complétée par la suite. Lorsque les données n'étaient pas géospatialisées, les RA ont pu être repérées et détournées sur QGIS 3.6 (QGIS Association 2021) à partir d'orthophotos de l'IGN (résolution 20m). L'altitude a été estimée par statistique zonale à partir d'un Modèle Numérique de Terrain pour les polygones réalisés et la surface d'après les caractéristiques géométriques de ces polygones. Afin de ne garder que les RA artificielles, celles étant visuellement des lacs rehaussés d'après les orthophotos ont été exclues pour les statistiques sur les caractéristiques principales.

b) Obtention de données spécifiques auprès des domaines skiables volontaires

Un formulaire à remplir en ligne² a été transmis à des exploitants de DS afin d'obtenir des informations sur les RA dont ils ont la charge. Chaque fois que c'était possible, les réponses obtenues ont été complétées par des observations de terrain et lors d'échanges avec les exploitants sur une version imprimée (le cas échéant avec les réponses déjà fournies ; exemple en [Annexe IV - Fiche retour formulaire \(exemple\)](#), ou bien seulement avec les questions ; [Annexe III - Fiche formulaire](#)).

2. Récoltes de données sur le terrain

a) Choix des sites

Idéalement, nous aurions voulu disposer des données collectées auprès des DDT et des réponses au questionnaire en ligne pour définir un plan d'échantillonnage et ainsi fixer les sites à visiter. Toutefois la situation actuelle impliquant une activité partielle des exploitants a retardé le remplissage du questionnaire en ligne et la récupération des données a été plus longue que prévue. Nous avons donc décidé de réaliser un échantillonnage exhaustif des RA présentes sur les DS exploités par la CdA (financier de l'étude) en les complétant par celles des RA à proximité de nos locaux en Isère après avoir contacté les responsables des DS et présenté le sujet³. Les dates de visites étaient définies lorsque toutes les RA de chaque DS étaient accessibles et que nos correspondants des DS étaient disponibles afin d'optimiser les déplacements et la logistique de terrain.

b) Choix des indicateurs

i. Indicateurs de biodiversité

L'analyse de la composition et de la structure de communautés peut être indicatrice de certaines caractéristiques d'un milieu donné. Certains groupes taxonomiques (phytoplancton, macroinvertébrés aquatiques, macrophytes, poissons) font ainsi l'objet d'une description approfondie pour évaluer la qualité des masses d'eau au regard des besoins biologiques dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau⁴. Cette étude étant une première occasion d'explorer les biocénoses en place dans les RA, l'ambition était de relever les groupes d'espèces observés sans limitation taxonomique en vue de cibler les perspectives de recherches pour les projets futurs et éventuellement de proposer des protocoles adaptés pour une description rigoureuse des communautés. Le choix des relevés a d'abord été influencé par le protocole du projet CIMaE (Lamouille-Hébert 2021). Celui-ci s'intéressant à la description des milieux humides et aquatiques d'altitude par la présence et

² <https://framaforms.org/questionnaire-retenues-et-biodiversite-1616152223> (lien actif jusqu'à fin-août 2021)

³ Celui-ci a été dans l'ensemble bien reçu malgré quelques absences de réponse à nos demandes et relances. La question des aménagements en montagne au regard de la biodiversité demeure un sujet sensible et toute donnée présentée dans ce rapport le sera de façon anonyme.

⁴ <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/fra>

l'abondance de certains taxons. Une première campagne de terrain sur cinq RA des DS à proximité de Grenoble a permis de valider et préciser les observations à réaliser de manière systématique. La biodiversité in-situ a ainsi été appréciée par la présence d'amphibiens (crapaud commun, grenouille rousse et triton alpestre) aux différents stades de leur cycle de vie et de macroinvertébrés aquatiques (benthiques, pélagiques et surfaciques). Les macroinvertébrés sont susceptibles d'être présents dans la plupart des masses d'eau et constituent un groupe privilégié pour les typologies biotiques (Oertli et Frossard 2013). Certains, notamment les insectes à phase adulte ailée, sont de bons disperseurs et donc potentiellement de bons colonisateurs ; nous nous attendions également à en rencontrer lors de nos visites de RA et avons systématiquement relevé leur présence. Ces informations ont été complétées par la description de l'existence et la régularité d'une ceinture végétale (terrestre et/ou liée aux milieux aquatiques) autour de la RA, contribuant à la biodiversité générale de la RA avec les espèces végétales présentes et par son attractivité pour la faune (abri, source de nourriture...). Enfin, nous avons cherché à estimer la productivité primaire phytoplanctonique, nécessaire à la mise en place de réseaux trophiques et de grande importance dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres (cycles des nutriments, oxygénation, transparence de l'eau...). La concentration en chlorophylle a dans l'eau en est un bon indicateur, ainsi que du niveau d'eutrophisation lorsqu'elle est couplée avec les indicateurs de concentration en azote et phosphore (Oertli et Frossard 2013; Pinay et al. 2017). Sa mesure a donc été systématiquement réalisées pour chaque RA visitée.

ii. Physico-chimie

Certains paramètres physico-chimiques reflètent et/ou influencent les activités biologiques dans les milieux aquatiques. La conductivité indique le degré de minéralisation de l'eau et peut être reliée à la nature du BV et au type d'alimentation du plan d'eau. Il s'agit d'un paramètre relativement stable et de fortes variations traduisent souvent des apports exogènes ponctuels en éléments dissous (potentiellement en nutriments). La production primaire est généralement réduite dans les eaux faiblement minéralisés (Lambey et Villaret 2018). La présence d'azote et phosphore dissous biodisponibles influe sur la croissance des espèces photosynthétiques aquatiques (macrophytes, algues, phytoplancton). Les formes assimilables sont principalement l'ammonium, les nitrates (pour les composés azotés) et les orthophosphates. L'oxygène dissous est indispensable à la vie aquatique. Sa concentration dépend des échanges avec l'atmosphère, de l'activité photosynthétique et de la respiration des organismes. Sa solubilité varie avec la température de l'eau et la pression atmosphérique. Une saturation supérieure à 100% d'oxygène dissous est généralement lié à une activité photosynthétique (Lambey et Villaret 2018). Le potentiel hydrogène (pH) peut influencer sur la composition des communautés. Les milieux acides (pH faibles) sont généralement plus pauvres en espèces (celles dépendant de la présence de calcaire tels que certains mollusques et crustacés y sont par exemple sensibles) et accueillent une biodiversité plus spécifique, y compris des espèces boréo-

alpines. Le métabolisme et la physiologie des organismes sont directement liés au pH et la plupart ont besoin d'un pH relativement neutre pour leur développement. Le pH dépend de la géologie du BV, des types de sols et d'alimentation en eau du milieu ainsi que de l'activité photosynthétique du fait des modifications de l'équilibre acido-basique par consommation du CO₂ dissous (Lambey et Villaret 2018; Oertli et Frossard 2013). L'activité photosynthétique étant liée à l'énergie lumineuse reçue, la valeur du pH d'un plan d'eau peut varier au cours de la journée et de la saison, de même que le pourcentage d'oxygène dissous. Le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) peut donner une indication sur le niveau de trophie du milieu ainsi que du pouvoir tampon de l'eau. Un TAC élevé est généralement favorable à l'établissement de biocénoses variées. Il est lié à la concentration en carbonates, en CO₂ dissous et au pH et peut renseigner sur la quantité de carbone inorganique disponible pour la production primaire. La turbidité de l'eau, qui peut être liée à la suspension de matières d'origine organique (plancton, débris animaux ou végétaux...) ou minérale peut influencer sur la quantité de lumière reçue par les organismes photosynthétiques et donc sur les paramètres liés à la production primaire. Enfin, la température de l'eau est un paramètre important ; elle influe sur la vitesse des réactions chimiques (métabolisme, échanges gazeux, processus biogéochimiques...) et détermine la nature et la dynamique des communautés. Il s'agit, comme le pH ou la teneur en oxygène, d'un paramètre variable à l'échelle journalière et saisonnière. La solubilité des gaz diminue avec la température ; la saturation de l'eau en oxygène est donc plus faible pour des températures élevées (Lambey et Villaret 2018; Pinay et al. 2017). Aussi, la mobilité des ions et donc la conductivité de l'eau augmente avec la température.

La mesure de l'ensemble de ces éléments peut renseigner sur le niveau trophique du plan d'eau (Pinay et al. 2017). Tous les groupes biologiques ne présentent pas la même gamme de tolérance aux différents niveaux trophiques (e.g. les amphibiens et odonates y sont peu sensibles) et la richesse spécifique est généralement plus élevée pour des niveaux trophiques intermédiaires (Oertli et Frossard 2013). Les niveaux trophiques les plus élevés sont rarement observés en altitude (Lambey et Villaret 2018). L'analyse conjointe de ces différents paramètres peut permettre de comprendre certains processus dans un milieu donné. Nous avons donc réalisé dans chaque RA des mesures de sondes concernant la concentration et le pourcentage d'O₂ dissous, la conductivité, la température et le pH. Ainsi que des analyses de prélèvements d'eau pour la concentration en chlorophylle a, la turbidité, le Titre Alcalimétrique Complet (TAC), la concentration en ammonium, en nitrates, et en orthophosphates. Sachant que les RA n'auront été visitées qu'une seule fois, il ne s'agira que d'un état à un instant *t*.

c) Protocole

i. Mesure et prélèvement pour la physico-chimie

Les mesures de physico-chimie in-situ ont été réalisées avec un multimètre HQ40d et trois sondes : sonde de conductivité (CDC401), sonde à luminescence pour oxygène dissous (LDO101) et une électrode de pH à électrolyte gel (PHC101). Celles-ci étaient placées à environ 1,5m de la ligne d'eau (x sur la [Figure 5](#)) et les mesures étaient relevées après stabilisation des valeurs mesurées en continu. Les valeurs affichées étaient automatiquement corrigées par la pression atmosphérique réelle pour la sonde à oxygène dissous et la température par chaque sonde. La température a toujours été relevée sur la même sonde après avoir vérifié la cohérence de la mesure avec celle des autres sondes ; les écarts entre les sondes étaient de l'ordre de 0,1°C⁵. Les sondes (pH et conductivité) ont été étalonnées régulièrement à partir de solutions aux caractéristiques connues pendant la durée de la campagne de terrain.

Lorsque les conditions le permettaient, les mesures de sondes ont été relevées à trois endroits différents présentant potentiellement la plus grande variabilité des conditions de la RA (cf. [Figure 1](#) et [Figure 4](#)) : au niveau de l'arrivée principale d'eau (notée « alim »), de l'évacuateur de crue (« évac ») et d'un point autre représentatif de la géométrie du talus aval (« milieu »). Nous avons constaté lors de nos sorties "test" que la physico-chimie de l'eau était homogène au sein de chaque retenue (à moins que l'arrivée d'eau « alim » ne soit active, auquel cas ce point de mesure pouvait se distinguer des deux autres). Nous avons tout de même décidé de réaliser systématiquement trois mesures lorsque c'était possible.

Toutes les analyses des eaux prélevées ont été assurées par le laboratoire « Savoie-Labo⁶ ». Le Titre Alcalimétrique Complet a été mesuré par potentiométrie (NF EN ISO 9963-1), la turbidité par néphélométrie (NF EN ISO 7027-1), les nutriments (ammonium, nitrates et orthophosphates) par Spectrophotométrie automatisée (NF ISO 15923-1) et la chlorophylle a par Spectrophotométrie (méthode LORENZEN, NF T90-117). Les prélèvements ont été réalisés une seule fois, à proximité des sondes de mesure (~ 1,5m de la rive) au point dit « milieu » de la RA, afin de pouvoir associer l'ensemble des relevés de physico-chimie entre eux, à une **profondeur comprise entre 30 et 50 cm** de manière à ne pas prélever accidentellement des matières mises en suspension près du fond. Cela à l'aide d'un récipient en inox préalablement rincé à l'eau de la RA et fixé à une perche de 2m. Les flacons une fois remplis ont immédiatement été **conservés en glacières** à une température de 5°C

⁵ Les valeurs des paramètres étant corrigées par les températures mesurées par chaque sonde, il s'agissait de s'assurer systématiquement de la cohérence des températures affichées entre les différentes sondes. Une différence supérieure à 0,1°C aurait été alarmante.

⁶ <https://www.savoie-labo.com/>

jusqu'à leur transmission au laboratoire d'analyses (la température était vérifiée à la réception des prélèvements). Le délai maximum de 24 heures recommandé par la norme relative à la conservation des échantillons d'eau (NF EN ISO 5667-3) était nécessaire pour obtenir une certification « Cofrac⁷ » de la part du laboratoire.

ii. Déroulé d'une visite

Lors de l'arrivée sur site, les sondes étaient placées dans l'eau au premier point de mesure afin de les acclimater à l'eau de la RA et le prélèvement d'eau était réalisé. Une première photographie de la fiche de terrain ([Annexe II - Fiche terrain](#)) annotée du nom de la RA était prise afin d'identifier la série de photographies suivant. Les éléments descriptifs de la RA (revêtement, géométrie, crête de digue, granulométrie du confinement...), de son contexte (éléments paysagers) et des conditions météorologiques étaient notés sur la fiche de terrain avec les commentaires éventuels de l'exploitant lorsque nous étions accompagnés. La pente du talus amont était mesurée à chaque point de mesure de sonde (cf. [Figure 5](#)).

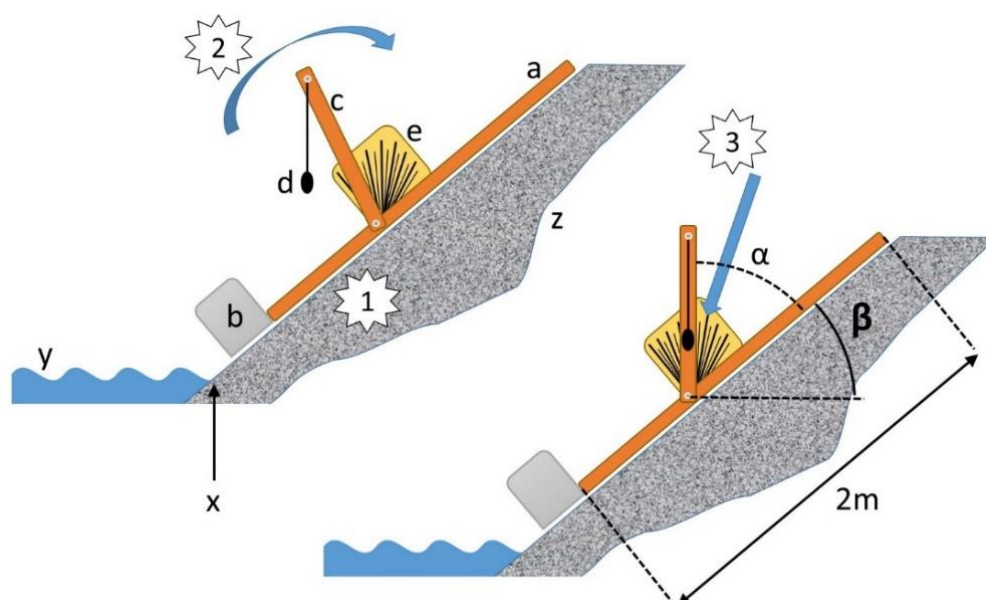


Figure 5. Mesure de la pente des berges (vue en coupe transversale du talus amont).

Elle s'effectue en trois étapes : 1 = placer la perche (a) à plat sur le talus amont, dans le sens de la pente, perpendiculairement à la digue. 2 = manœuvrer le bras articulé (c) jusqu'à ce qu'il soit parallèle au fil à plomb (d). 3 = lire la graduation correspondant sur le cadran gradué (e). La pente du talus en degrés (angle β) correspond à 90° moins la valeur de l'angle α. (a : perche de prélèvement ; b : récipient inox pour prélèvement ; c : bras articulé sur la perche ; d : fil à plomb ; e : cadran gradué ; x : ligne d'eau ; y : eau de la retenue ; z : talus amont)

Le tour de la RA était ensuite parcouru afin de réaliser les trois points de mesure de sondes et de fournir une « note » d'abondance (cf. [Annexe II - Fiche terrain](#)) pour chaque « groupe indicateur » a

⁷ <https://www.cofrac.fr/nos-domaines-dapplication/eau-nature-et-biodiversite/>

l'issue du parcours (grenouille rousse, crapaud commun, triton alpestre, végétation terrestre, végétation liée aux milieux aquatiques, couverture végétale de la crête de digue...). Lors de chaque mesure de sondes, la description de la macrofaune benthique et pélagique été approfondie pendant la stabilisation des mesures en inspectant chaque face des pierres immergées à proximité de la rive (dans le cas des RA à confinement) ou par simple contrôle visuel. Les principaux groupes de macroinvertébrés identifiés étaient notés en commentaires.

Après chaque visite de RA, l'ensemble des éléments matériels ayant été en contact avec l'eau était désinfecté selon un protocole d'hygiène visant à limiter la dissémination de pathogènes des amphibiens (Dejean, Miaud, et Schmeller 2007).

3. Analyse des données

Le traitement des données, les descriptions statistiques et les représentations graphiques ont été réalisées avec la version 4.1.0 du logiciel R (R Core Team 2021) et les packages de base. Le package 'ade4' (Dray et Dufour 2007) a été utilisé pour les analyses multivariées.

Résultats

1. Parc de retenues d'altitude dans les départements concernés par nos visites

La liste des RA recensées pour les départements Isère (38), Hautes-Alpes (05), Savoie (73) et Haute-Savoie (74) est a priori exhaustive (cf. [Figure 6](#)). Au total, 145 RA (artificielles) ont été construites depuis le début des années 1990 dans ces départements, dont la moitié après 2006, avec un volume avoisinant en moyenne les 53000 m³ et cumulant un total d'environ 7,5 millions de m³ sur l'ensemble du parc.

Tableau 1. Volumes, surfaces, altitude et nombres de retenues d'altitude dans les départements recensés.

	Hautes-Alpes	Isère	Savoie	Haute-Savoie	Total
nombre de RA	24	22	45	54	145
nombre de RA visitées	5	6	15	2	28
volume total (m ³)	1 181 821	1 097 300	3 118 736	2 137 765	7 532 622
volume maximal par RA (m ³)	125 000	200 000	403 000	300 000	403 000
volume moyen par RA (m ³)	49 243	52 252	70 880	39 588	52 676
surface totale (m ²)	203 487	188 340	529 070	375 002	1 295 899
surface maximale par RA (m ²)	18 468	42 912	61 826	21 153	61 826
surface moyenne par RA (m ²)	8 479	8 561	12 024	7 075	9 731
Altitude minimale (m)	1454	994	1262	944	944
Altitude moyenne (m)	1994	1737	1999	1473	1762
Altitude maximale (m)	2393	2734	2701	2010	2734
Année de création min.	1989	1993	1999	1990	1989
Année de création médiane.	2002	2006	2007	2004.5	2005.5

Une RA sur deux se trouve à une altitude supérieure à 1716 m et l'ensemble du parc est implanté entre 944 m et 2734 m d'altitude. La surface en eau couvre en moyenne près d'1 ha (environ 9731 m²) pour un maximum de plus de 6 ha et un total cumulé de près de 130 ha ([Tableau 1](#)).

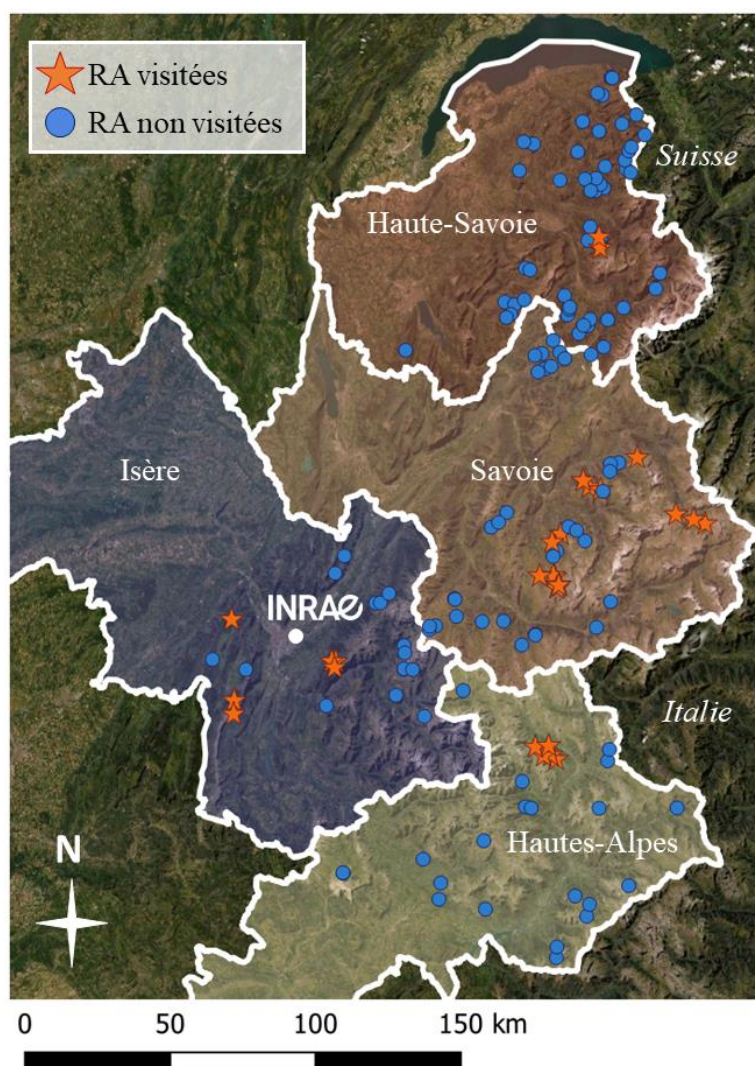


Figure 6. Retenues d'altitude recensées dans quatre départements des Alpes et situation de INRAE Grenoble.

Cartographie des RA recensées dans les départements Hautes-Alpes, Savoie, Haute-Savoie et Isère. Celles visitées dans le cadre de cette étude sont représentées par une étoile orangée. Le site de INRAE Grenoble est localisé avec un point blanc.

La Haute-Savoie est le département rassemblant le plus grand nombre de RA (54) pour plus de 2 millions de m³ à des altitudes généralement inférieures à 2000 m et plus basses que dans les autres départements. L'Isère présente la plus grande gamme d'altitudes d'implantation des RA, ainsi que l'altitude la plus élevée (2734 m). La Savoie maximise le potentiel de volumes stockés avec 3,1 millions de m³ et un volume moyen de 70 880 m³ par RA ([Tableau 1](#)). Les RA y sont également plus grandes (jusqu'à 6 ha et 1,2 ha en moyenne) et plus récentes (la moitié ayant été construites après 2007). Le parc de RA le plus ancien se trouve dans les Hautes-Alpes, à des altitudes relativement élevées (près de 2000 m en moyenne) et peu dispersées (de 1454 m à 2393 m).

On observe globalement une tendance à maximiser le potentiel de stockage et des surfaces plus grandes pour chaque nouveau projet de RA ([Figure 7 gauche et centre](#) ; corrélation entre volume et années - rho de Spearman - et entre surface et années significatives), ainsi qu'une implantation plus haute en altitude ([Figure 7 droite](#) ; corrélation de Spearman entre altitude et années significative).

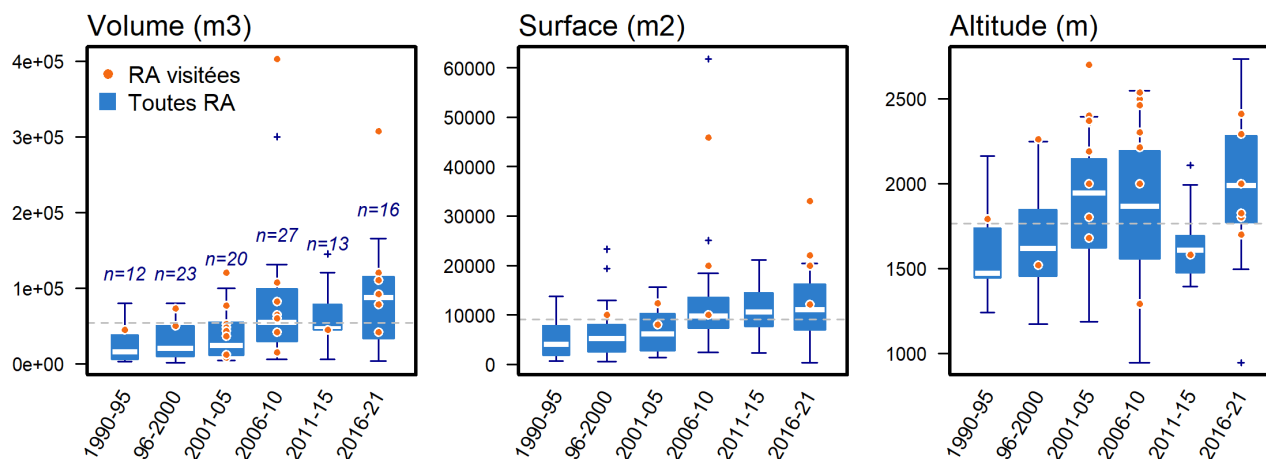


Figure 7. Distribution des volumes, surfaces et altitudes par périodes de 5 ans depuis 1990.

*Les corrélations (rho de Spearman calculé avec la fonction 'cor.test') entre les trois variables et les années sont significatives. Les valeurs sont regroupées par périodes de 4 ans. **gauche** : distributions des volumes (m^3) par période ; **centre** : distribution des surfaces (m^2) ; **droite** : distribution des altitudes (m). En points oranges les RA visitées. Les 'outliers' (RA dont la mesure s'éloigne de la distribution de celle des autres RA) sont représentés par un « + » bleu (ou un point orange si elles ont été visitées).*

Avant 2006 les volumes construits ne dépassaient guère les 100 000 m^3 et présentaient majoritairement des volumes inférieurs à la moyenne totale actuelle. C'est après cette date qu'ont été réalisés des projets aux dimensions considérables pouvant contenir plusieurs centaines de milliers de mètres cubes. Ces cas sont restés exceptionnels et 95% des volumes observés, toutes dates confondues, sont inférieurs 150 000 m^3 .

2. Retenues d'altitude visitées

Parmi ces 145 RA, 28 ont fait l'objet d'une visite avec application du protocole (étoiles orange sur la [Figure 6](#)), soit environ 1/5 du parc total. La plupart des DS de la CdA se trouvant en Savoie, c'est donc dans ce département que la majorité des RA ont été visitées. S'agissant principalement de grands DS à haute altitude, les RA visitées apparaissent dans l'ensemble plus volumineuses et implantées à des altitudes plus élevées (valeurs généralement au-dessus des médianes) que celles du parc recensé ([Figure 7](#)).

a) Caractéristiques et description

Un tableau résumant les caractéristiques principales des RA visitées est donné en annexe ([Annexe V - Retenues d'altitudes visitées](#)). Près de la moitié des RA visitées était revêtue d'un confinement total ([Figure 9](#)). Un quart était confiné en partie haute (confinement 'partiel') et le quart restant présentait

un DEG apparent ('aucun' confinement) avec éventuellement un enrochement recouvrant le DEG au-dessus du niveau des plus hautes eaux (cf. [Figure 3](#)). La plus ancienne RA entièrement confinée que nous ayons visitée date de 2004. Ce mode de conception a supplanté les deux autres à partir de la fin des années 2000 ([Figure 9](#)). Plus récemment, en 2017 et 2019, deux RA ont été construites et immédiatement végétalisées sur la partie hors d'eau du talus amont ([Figure 8](#)) avec des techniques et espèces végétales similaires à celles utilisées pour la re-végétalisation des pistes de ski.



Figure 8. Retenue d'altitude où la partie hors d'eau du talus amont a été activement végétalisée après construction.

Les pentes mesurées sont majoritairement supérieures à un fruit de 1/3 ([Figure 9](#)). Seules 4 RA ont des pentes plus douces que cette valeur (dont 3 sont confinées). La RA confinée ayant des pentes très élevées (environ 35°) est la RA confinée la plus ancienne du jeu de données. Il a été rapporté que des moyens devaient être mis en place pour éviter l'entraînement du confinement avec la prise en glace.

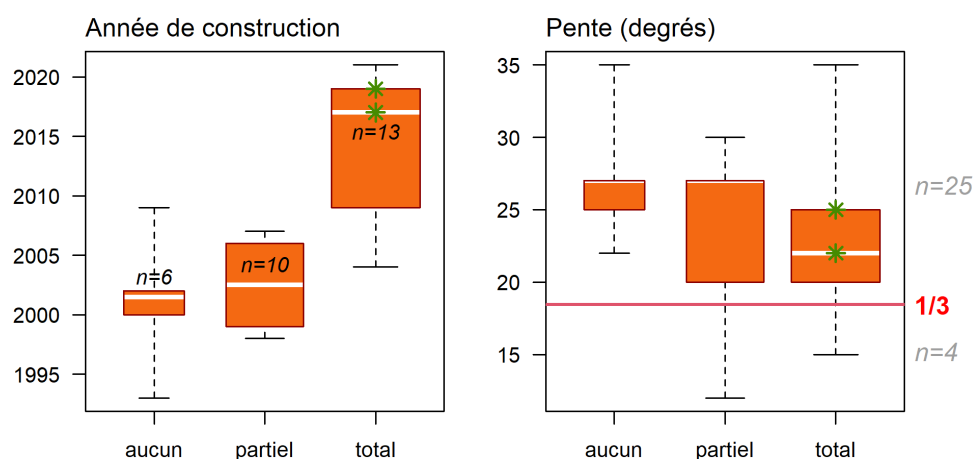


Figure 9. Année de construction et pente des talus amont selon les types de confinement

Gauche : Distribution des années de construction des RA visitées en fonction du type de revêtement ('aucun' = DEG nu ; 'partiel' = confinement de la partie haute ; 'total' = confinement total), le nombre de RA correspondant est précisé en italique. **Droite** : Distribution des pentes (en degrés) selon leur type de revêtement. La **ligne rouge** correspond à un fruit de 1/3. Sont notés **en gris** les nombres de RA dont la pente est inférieure ou supérieure à 1/3. Les **astérisques verts** correspondent aux RA végétalisées.

En comparant la granulométrie des RA construites avant 2006, de conception plus ancienne, avec celles de conception plus récente ([Figure 10](#)), la présence de matériaux fins est plus fréquente dans le confinement des RA récentes et la granulométrie y est moins homogène (les 3 classes de granulométrie, jusqu'à 15 cm y sont quasi-systématiquement présentes simultanément).

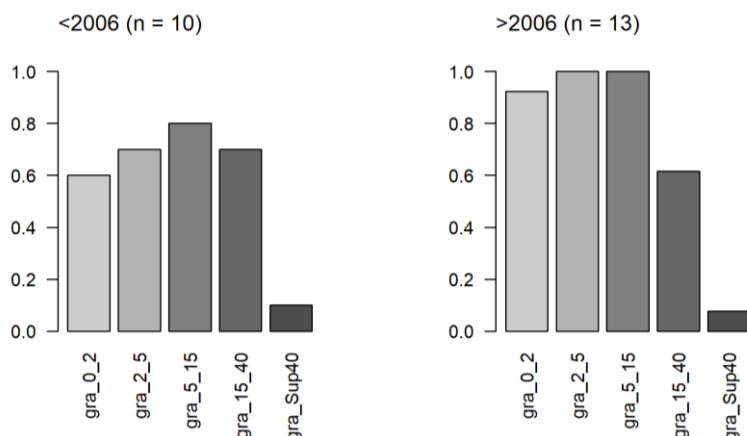


Figure 10. Granulométrie du confinement selon la période de construction.

Proportion de présence des différentes granulométries de confinement sur les RA construites avant (gauche) et après 2006 (droite). 'gra_0_2' = matériaux de taille comprise entre 0 et 2 cm ; 'gra_2_5' = entre 2 et 5cm ; 'gra_5_15' = entre 5 et 15cm ; 'gra_15_40' = entre 15 et 40cm ; 'graSup40' = blocs de taille supérieure à 40cm.

Les RA peuvent au fil du temps présenter une couche fine de sédiments sur le fond (tout au plus de quelques cm d'épaisseur). Cette couche de sédiment est généralement négligeable mais peut être problématique lorsque la crépine est située au niveau du fond de la RA. Il nous avait été précisé via le questionnaire que les dépôts de sédiments étaient généralement quasi inexistantes sur les berges immergées du talus. Cela a pu être vérifié sur le terrain et nous avons précisé cette observation en décrivant la présence et la régularité de cette fine pellicule de dépôts vaseux ([Figure 11](#)).

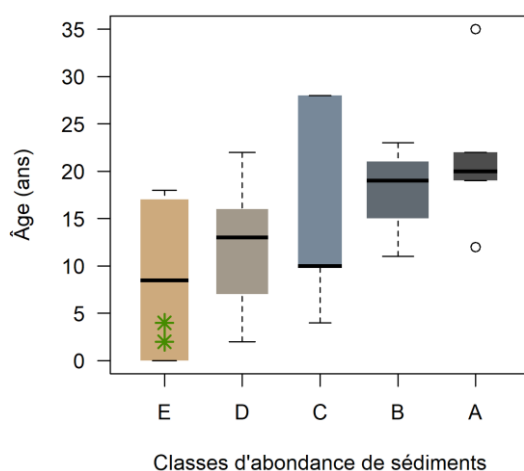


Figure 11. Distribution des âges des retenues d'altitude selon l'abondance et la régularité de la présence d'une fine couche de dépôts vaseux sur la partie immergée sur le talus amont.

Catégories : cf. [Annexe II - Fiche terrain](#). Les RA végétalisées sont représentées par un astérisque vert.

Il en ressort que seules les RA âgées de plus de 10 ans peuvent présenter une fine couche sédimentaire disposée régulièrement le long de la partie immergée du talus amont. Dans l'ensemble le substrat se limite donc majoritairement au revêtement de la RA ; principalement minéral pour les RA à confinement ou inexistant pour les autres.

b) Utilisations

Lors de nos visites du mois de juin, la plupart des RA n'avaient pas atteint le niveau de remplissage prévu et avaient parfois des niveaux encore très bas ([Figure 12](#)).

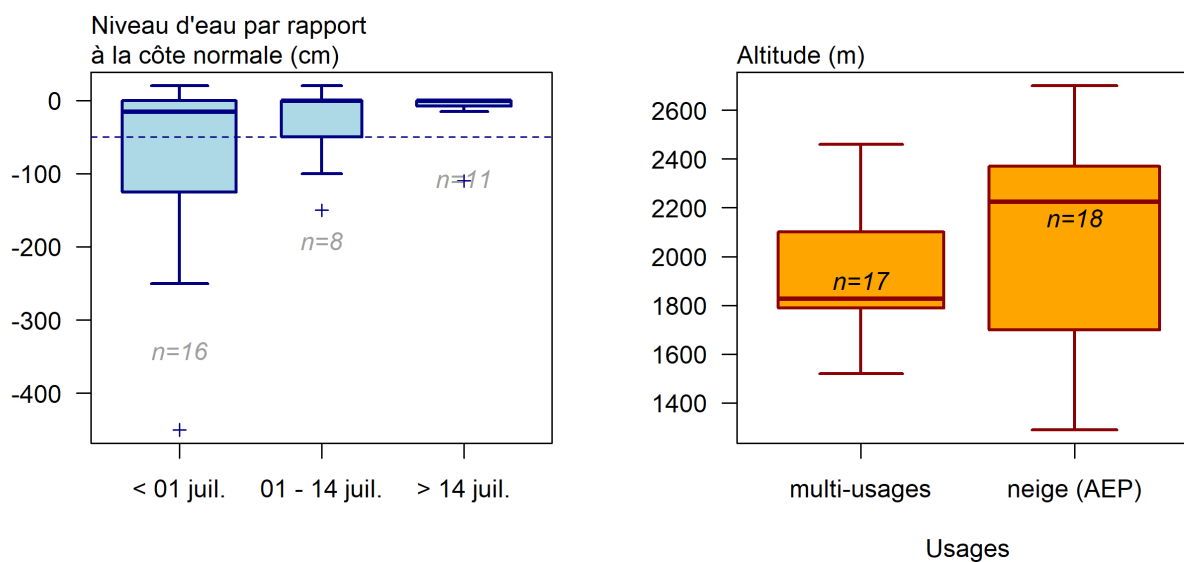


Figure 12. Niveau d'eau observé (gauche) par rapport à la côte d'exploitation et altitude des retenues selon les usages pratiqués (droite).

Début juillet, le niveau de la majorité des RA visitées était à moins de 50 cm de la côte d'exploitation (pointillés) et quasiment toujours au plus haut pour les RA visitées ensuite. Près de la moitié des RA étaient utilisées seulement pour la production de neige (dont, dans deux cas pouvaient servir de réserve AEP). Les autres RA étaient utilisées pour des usages multiples ; majoritairement de la pêche (10 RA sur 15), des espaces de détente (7 RA sur 15) voire des activités nautiques, des réserves d'eau pour l'agriculture (pastoralisme) ou l'arrosage. Ces RA « multi-usages » sont généralement plus basses en altitude que celles prévues uniquement pour la production neige ([Figure 12, droite](#)).

c) Physico-chimie

La [Figure 13](#) permet dans un premier temps de situer la physico-chimie mesurée dans l'eau des RA par rapport à celle potentiellement observée dans les lacs d'altitude (données mesurées dans les lacs sentinelles ; Rimet et al. 2020). Les lacs concernés se situent dans une gamme d'altitude proche de celle des RA visitées, mais majoritairement dans la partie haute. Aussi les mesures dans les lacs d'altitude ont été réalisées plus tardivement, principalement à la fin de la saison estivale, alors que notre campagne de terrain a été réalisée au début de l'été. Les deux jeux de données ne sont donc pas rigoureusement comparables, notamment pour les paramètres à forte variabilité saisonnière, mais

permettent d'avoir une idée des valeurs que peuvent prendre ces paramètres dans des milieux aquatiques de montagne proches. Un test de Wilcoxon a été effectué afin d'apprécier la différence entre les valeurs mesurées pour chaque paramètre dans les deux jeux de données (p-value notée sous les noms des variables dans la [Figure 13](#)).

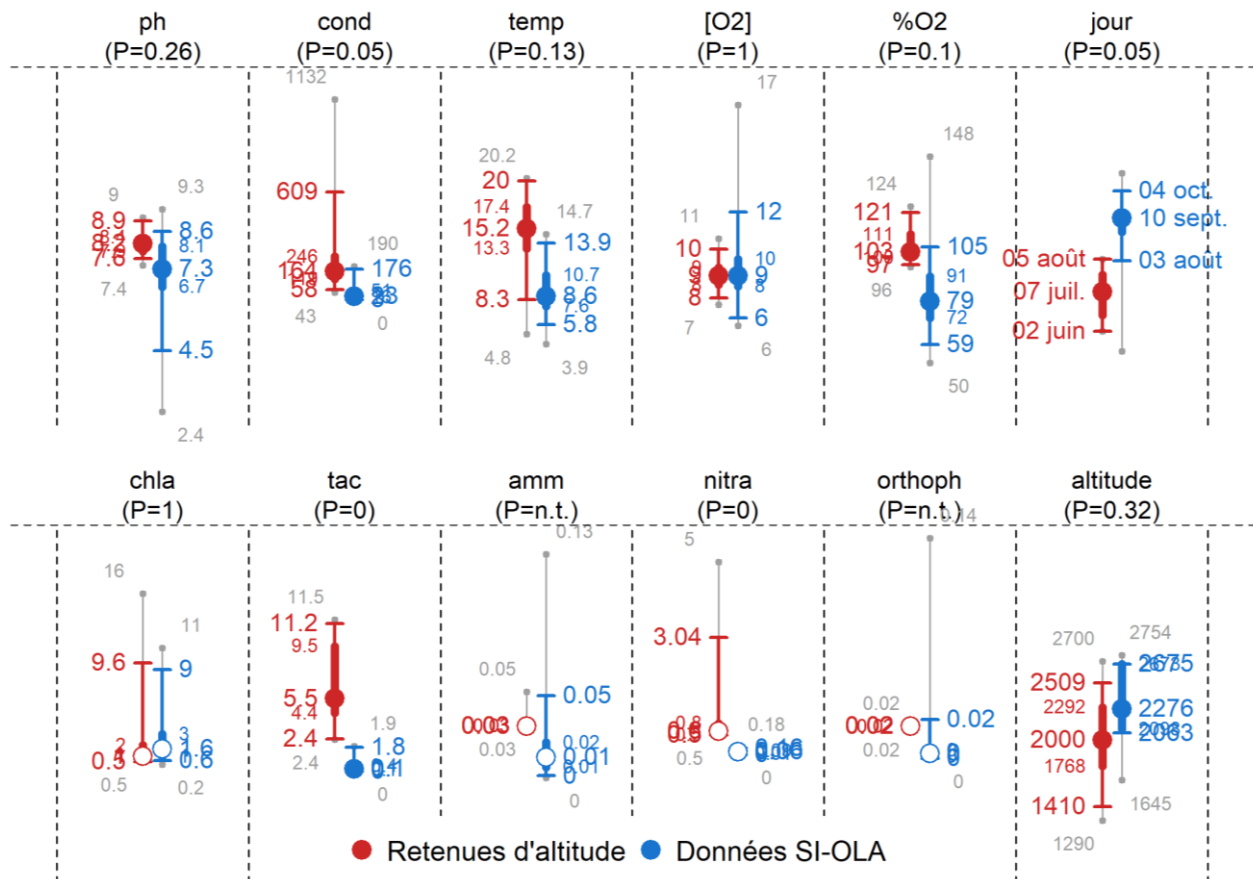


Figure 13. Comparaison de la distribution des paramètres physico-chimiques des retenues d'altitude visitées à celles de lacs d'altitude naturels.

En **rouge** : données RA, en **bleu** : données « Lacs Sentinelles »⁸ (Lacs : Anterne, Brévent, Arpont, Blanc du Carro, Corne, Cornu, Izourt, Jovet, Merlet Supérieur, Mont Coua, Noir du Carro, Pormenaz, Rabuons). **Haut** : en **couleur** : quantiles à 5, 25, 50, 75 et 95% des paramètres mesurés par sonde, et distribution des dates de mesure. En **gris** : quantiles à 0 et 100%. **Bas** : mêmes quantiles pour les paramètres mesurés par analyse d'eau et distribution des altitudes des sites.

Les LQ des concentrations en chlorophylle a, ammonium, nitrates et orthophosphates sont représentés par des **points vides**. '**ph**' = pH ; '**cond**' = Conductivité (μS) ; '**temp**' = Température ($^{\circ}C$) ; '**[O2]**' = Concentration en oxygène ($mg.L^{-1}$) ; '**%O2**' = Pourcentage d'oxygène dissous (%) ; '**chl a**' = Concentration en chlorophylle a ($\mu g.L^{-1}$) ; '**tac**' = Titre Alcalimétrique Complet ($^{\circ}F$) ; '**amm**' = Concentration en ammonium ($mg.L^{-1}$) ; '**nitra**' = concentration en nitrates ($mg.L^{-1}$) ; '**orthoph**' = Concentration en orthophosphates ($mg.L^{-1}$) et '**altitude**' = Altitude (m), '**jour**' = Jour de l'année.

Sous les noms des paramètres sont notées les **p-values** des tests de **Wilcoxon** (comparaison des deux jeux de données). Lorsque trop peu de valeurs mesurées en RA étaient au-dessus des LQ, le test n'a pas été effectué (noté « **n.t.** »).

⁸ Les données disponibles en ligne après inscription sur le site https://si-ola.inrae.fr/si_lacs/login.jsf.

Il apparaît tout d'abord que les concentrations en ammonium, nitrates et orthophosphates des RA n'ont pu être mesurées en dessous de certaines valeurs (limites de quantification ; LQ) selon les méthodes employées par le laboratoire auquel nous avons confié les analyses d'eau et que les concentrations en nutriments azotés et phosphatés dans les lacs étaient généralement inférieures à ces LQ. 100% des RA échantillonnées avaient une concentration en orthophosphates inférieure à la LQ (0.02 mg.L⁻¹), 92% avaient une concentration en ammonium inférieure à la LQ (0.03 mg.L⁻¹), 44% avaient une concentration en nitrates inférieure à la LQ (0.5 mg.L⁻¹) et 12% avaient une concentration en chlorophylle a inférieure à la LQ (0.5 µg.L⁻¹).

Les RA ont dans l'ensemble une eau de physico-chimie assez proche de celle des lacs d'altitude. Des valeurs plus élevées pour certains paramètres peuvent toutefois être mesurées. C'est notamment le cas pour la concentration en nitrates qui a pu atteindre 5 mg.L⁻¹ dans nos mesures alors que celles des lacs d'altitude plafonne à 0,18 mg.L⁻¹ pour une moyenne de 0.06 mg.L⁻¹. Le TAC mesuré était toujours supérieur à celui des lacs, allant jusqu'à 11,5°F. La conductivité de l'eau et la température de l'eau ont tendance à être plus élevés que dans les lacs, de même que les pourcentages d'oxygène dissous (généralement supérieurs à 100% dans les RA).

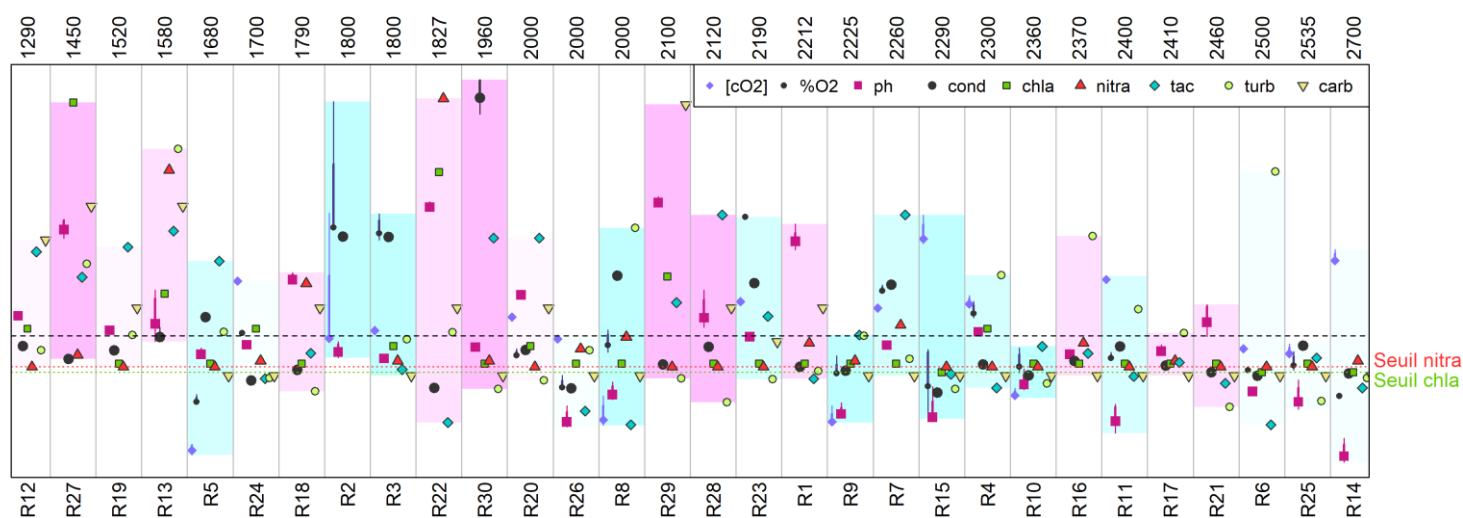


Figure 14. Valeurs centrées-réduites des paramètres physico-chimiques mesurées lors de chaque visite de retenues d'altitudes, triées par altitude croissante.

*Les rectangles encadrant chaque mesure permettent de visualiser la dispersion des paramètres et sont colorés en fonction de la date de visite, depuis le **cyan** (juin) au **magenta** (août) en passant par le blanc. Les RA sont triées selon l'altitude (affichée en haut du graphique). La ligne en **pointillés noirs** correspond à la valeur moyenne de chaque paramètre (centrage). Celles en **pointillés verts et rouges** sont respectivement les LQ des concentration en chlorophylle a et nitrates. La sonde à oxygène dissous était défectueuse pour les dernières dates de terrain, les données ne sont donc pas disponibles les RA correspondant. Noms des paramètres, cf. [Figure 13](#).*

La variabilité et les valeurs des paramètres mesurés ont tendance à diminuer avec l'altitude ([Figure 14](#)), notamment pour ceux potentiellement liés à la productivité du milieu (%O₂, pH, chlorophylle a, TAC). On retrouve parmi les RA échantillonnées un gradient similaire à celui utilisé pour la typologie

des lacs de montagne⁹, avec aux fortes altitudes des RA de type lacs « polaires » à turbidité élevée (e.g. R6, R16) alimentées par une eau riche en farine glaciaire, tandis qu'aux altitudes plus basses la turbidité peut être liée à l'abondance du phytoplancton dans des milieux productifs et les RA peuvent se rapprocher des types de lacs « verts » (e.g. R13).

R13 avait été déclarée être alimentée en partie par un cours d'eau potentiellement fréquenté par un pâturage intense et comme étant sujette à un développement problématique d'algues. Cela se vérifie par des fortes concentrations en chlorophylle a ($5 \mu\text{g.L}^{-1}$) et en nitrates ($3,8 \text{ mg.L}^{-1}$). R2 et R3 sont deux parties de conception différente d'une même RA ayant fait l'objet d'une extension. R3 est entièrement confinée aux pentes douces et R2 l'est partiellement et aux pentes plus fortes. Des mesures de sondes ont été réalisées dans les deux parties comme s'il s'agissait de deux RA différentes et un seul prélèvement d'eau a été réalisé dans la partie récente (R3). Elles montrent peu de variabilité pour les paramètres de sondes entre les deux parties. Cette RA subissait un fort développement d'algues filamenteuses activement retirées de l'eau par l'association de pêche locale le jour de la visite. Des mesures de sondes ont été réalisées dans les zones les plus impactées et révèlent, notamment en R2, des concentrations et une saturation en oxygène beaucoup plus forte que dans les autres zones de la RA. En revanche, le pH et la conductivité étaient stables sur le pourtour de la RA. Le prélèvement d'eau a été réalisé dans une zone visuellement représentative de l'ensemble de la RA. La concentration en nitrates mesurée était de $0,6 \text{ mg.L}^{-1}$ et celle en chlorophylle a de $2 \mu\text{g.L}^{-1}$. La conductivité y était particulièrement forte avec plus de $600 \mu\text{S}$. R16 est une petite RA de $12\,000 \text{ m}^3$ indiquée comme servant de tampon pour le remplissage de R17 et R21 et de bac de décantation. La turbidité y est plus élevée ($3,05 \text{ NFU}$) que dans les deux RA qu'elle alimente (respectivement $1,54$ et $0,39 \text{ NFU}$ pour R17 et R21).

Quelques corrélations (rho de Spearman) apparaissent entre les variables physico-chimiques mesurées au niveau du point de prélèvement d'eau ([Annexe VI - Corrélations entre paramètres physico-chimiques](#)). Le pH est positivement corrélé avec la concentration en chlorophylle a ($\rho = 0,66$). Il est également significativement corrélé au $\% \text{O}_2$ dissous ($0,57$) et au TAC ($0,39$). La température est corrélée négativement à la concentration en oxygène dissous ($\rho = -0,57$) et positivement à la conductivité ($0,45$). Le TAC et la conductivité sont également positivement corrélés ($0,54$). L'ensemble de ces corrélations sont relativement modérées ($\rho < 0,6$), sauf celle entre le pH et chlorophylle a.

Nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les variables physico-chimiques des RA centrées-réduites (nous avons exclu les mesures de la sonde à oxygène qui a cessé

⁹ Cf. <http://www.lacs-sentinelles.org/fr/pages/les-lacs-daltitude>

de fonctionner pendant la campagne de terrain). Le premier axe, qui explique à lui seul 39 % de l'inertie, fait apparaître un gradient de productivité primaire avec des concentrations en nitrates et chlorophylle a élevées pour les faibles valeurs de l'axe, superposé à un gradient de teneur en carbonates et de pH (Figure 15, droite). Ces deux gradients ne sont pas totalement indépendants de celui observé sur l'axe 2 ; celui concernant la productivité primaire s'oriente vers les fortes valeurs de l'axe 2 alors que celui lié à la teneur en carbonates est plutôt lié aux faibles valeurs de l'axe 2. Le deuxième axe, qui explique 22 % de l'inertie, est principalement lié à l'alcalinité du milieu et à la conductivité, celles-ci étant plus élevées pour les valeurs négatives de l'axe 2, et serait donc plutôt lié aux caractéristiques des BV dans lesquels l'eau des RA est prélevée.

Quatre RA dont l'eau contient notamment de fortes concentrations en chlorophylle a s'écartent des autres sur le premier axe. L'ensemble des RA se répartit sur le deuxième axe, mise à part R30, où la conductivité était particulièrement élevée (supérieure à 1100 μ S), qui se distingue donc des autres vers les faibles valeurs de l'axe. Les RA ayant de fortes valeurs sur l'axe 1 ont des eaux plus basiques, ce qui peut être lié à une productivité primaire importante et/ou à la concentration en carbonates et à l'alcalinité de l'eau selon la position sur le deuxième axe.

Le premier axe est positivement corrélé à l'altitude (rho de Spearman : 0,65) et, dans une moindre mesure, négativement à la date de visite (exprimée en jour de l'année ; rho = 0,55) ; la productivité diminue donc avec l'altitude et augmente dans l'ensemble au cours de la saison.

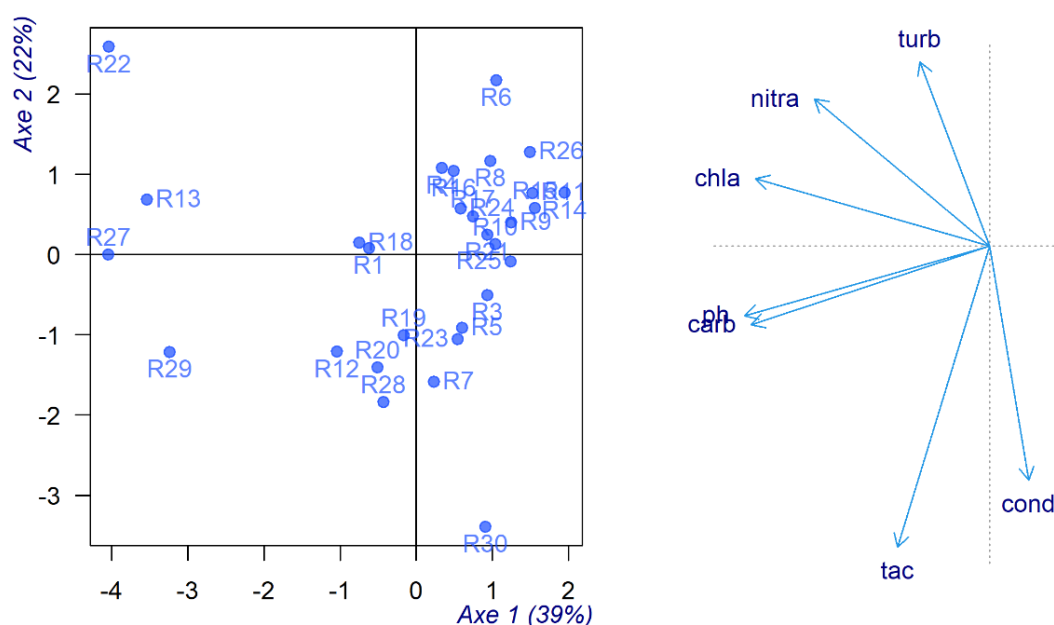


Figure 15. Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les paramètres physico-chimiques centrés-réduits.

Gauche : projection des RA sur le premier plan. **Droite** : projection des variables sur le premier plan: Noms des paramètres, cf. Figure 13.

d) Biodiversité

Une grande majorité (90 %) des RA est fréquentée par une faune macroscopique spontanée au moins une partie de l'année ([Figure 16, haut](#)). Cette faune était constituée d'amphibiens (présents dans 69 % des RA visitées) et/ou de macroinvertébrés aquatiques (62 % des RA). Il s'agissait majoritairement d'hétéroptères (principalement des corixidés, quelques gerridés et notonectidés), de coléoptères (adultes voire larves), des mollusques (gastéropodes) et exceptionnellement des trichoptères et éphéméroptères. Près du tiers des RA (31 %) abrite une faune piscicole introduite, généralement composée de cyprinidés (majoritairement des vairons) et de salmonidés (à défaut d'être systématiquement observés, leur présence est probable dans les RA pêchées).

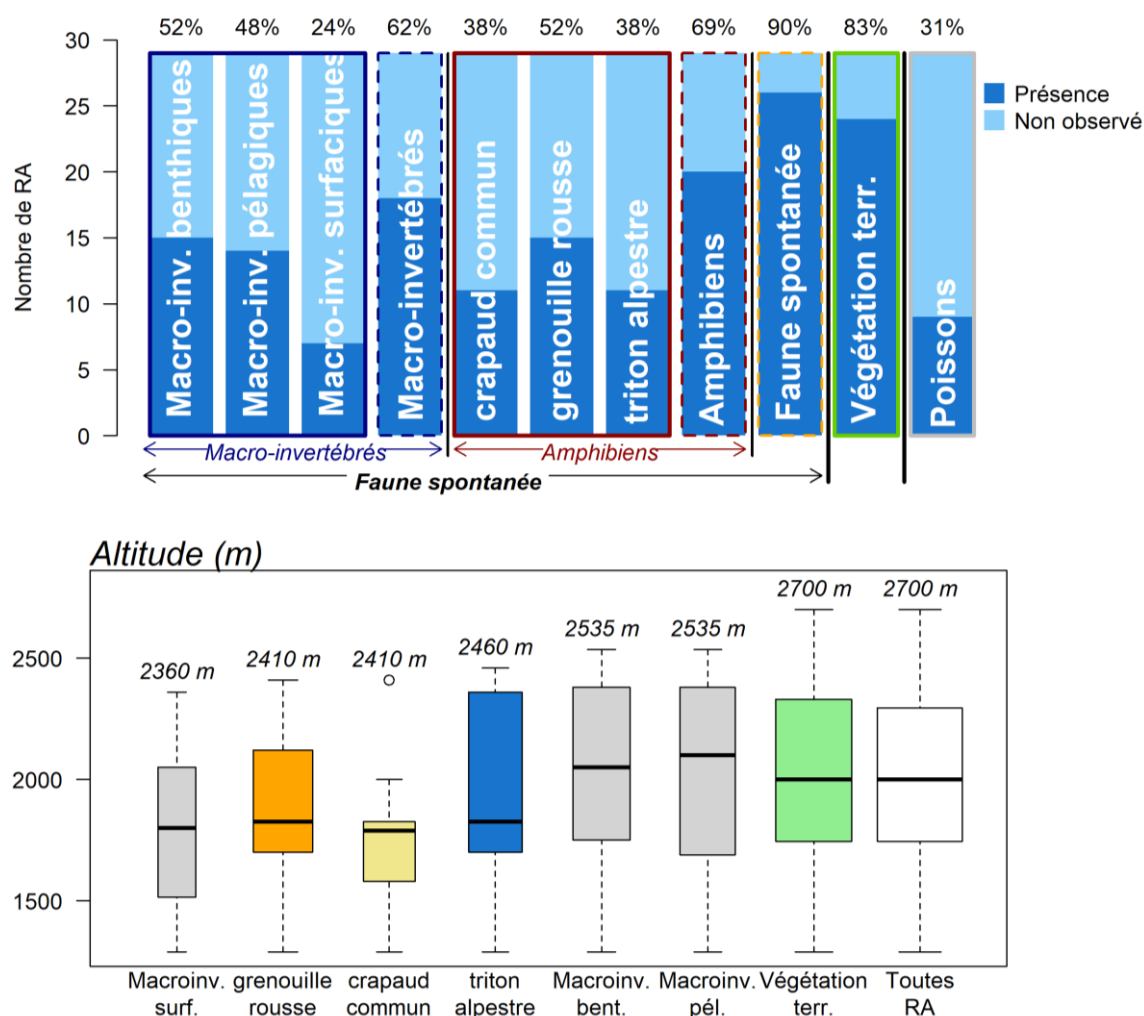


Figure 16. Occurrence des taxons ou groupes observés (*haut*) et distribution de l'altitude des RA où les taxons ont été observés (*bas*).

Haut : Nombre de RA au sein desquelles les différents taxons ont été observés. En **bleu foncé** : présence avérée, en **bleu clair** : taxon non observé. Toute observation d'un individu d'amphibien quel que soit son stade de vie est considérée comme une présence. '**Amphibiens**' : présence d'au moins une des trois espèces. '**Faune spontanée**' : présence d'au moins un des taxons non introduits. '**Végétation**' nombre de RA dans lesquelles au moins un individu d'une espèce végétale vasculaire a été observé sur le talus amont. Sont notés en haut de chaque barre les **pourcentages** de RA représentés par les présences. **Bas :** Distribution des altitudes auxquelles ont été observés les différents taxons. L'altitude notée au-dessus des boîtes à moustaches est l'altitude maximale relevée.

La présence de macroinvertébrés benthiques et pélagiques peut être observée à toutes altitudes jusqu'à 2535 m mais majoritairement parmi les RA les plus hautes, tandis que les surfaciques (gerridés) sont essentiellement présents sur les RA plus basses ([Figure 16, bas](#)). Parmi les amphibiens, le triton alpestre est l'espèce détectée à la plus haute altitude (2460 m), suivi de la grenouille rousse (2410 m) et du crapaud commun qui a été exceptionnellement observée à 2410 m (identifié à cette altitude pour des individus au stade de têtard) mais qui se cantonne en général à des altitudes inférieures à 2000 m.

Des végétaux terrestres se sont installés de manière plus ou moins abondante sur une grande majorité des RA (83 %). Leur présence sur les talus amonts a pu être observée jusqu'à 2700 m pour toute la gamme d'altitudes des RA visitées ([Figure 16, bas](#)). L'abondance et la régularité de cette végétation ont tendance à augmenter avec l'âge des RA, bien qu'aucune différence significative entre les "classes d'abondance" ne soit mise en évidence, et l'installation des premiers végétaux nécessite généralement une dizaine d'années ([Figure 17](#)).

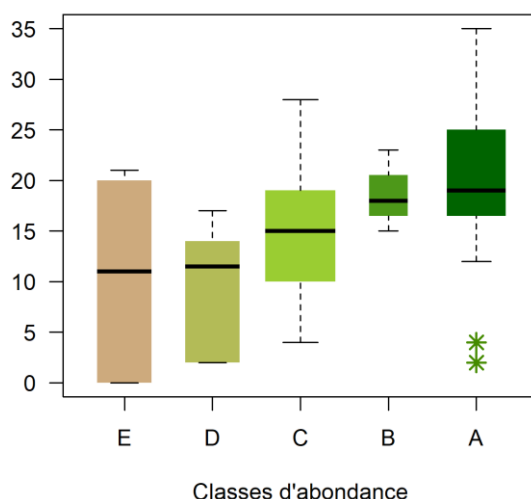


Figure 17. Distribution des âges des retenues d'altitude selon l'abondance et la régularité de la ceinture de végétation terrestre sur le talus amont.

Catégories : cf. [Annexe II - Fiche terrain](#). Les RA végétalisées sont représentées par un astérisque vert.

Nous avons réalisé une AFC sur la présence/absence des différents taxons des retenues d'altitude ([Figure 18](#)). Les 2 premiers axes de l'AFC expliquent 70 % de l'inertie du nuage de points. L'axe 1 (42 % de l'inertie) distingue principalement les RA n'abritant que des macroinvertébrés (groupe de RA constitué de R15, R25, R6, R4, R7 et R11 ; [Figure 18, gauche](#)) des autres RA, voire de celles contenant des poissons pour les fortes valeurs ([Figure 18, droite](#)). L'axe 2 est plutôt lié à la présence de grenouilles et/ou tritons pour les fortes valeurs et à celles de poissons pour les faibles valeurs (R20, R3 et R19 sont par exemple activement pêchées). La présence de crapauds apparaît indépendante de la présence de poissons et d'autres amphibiens.

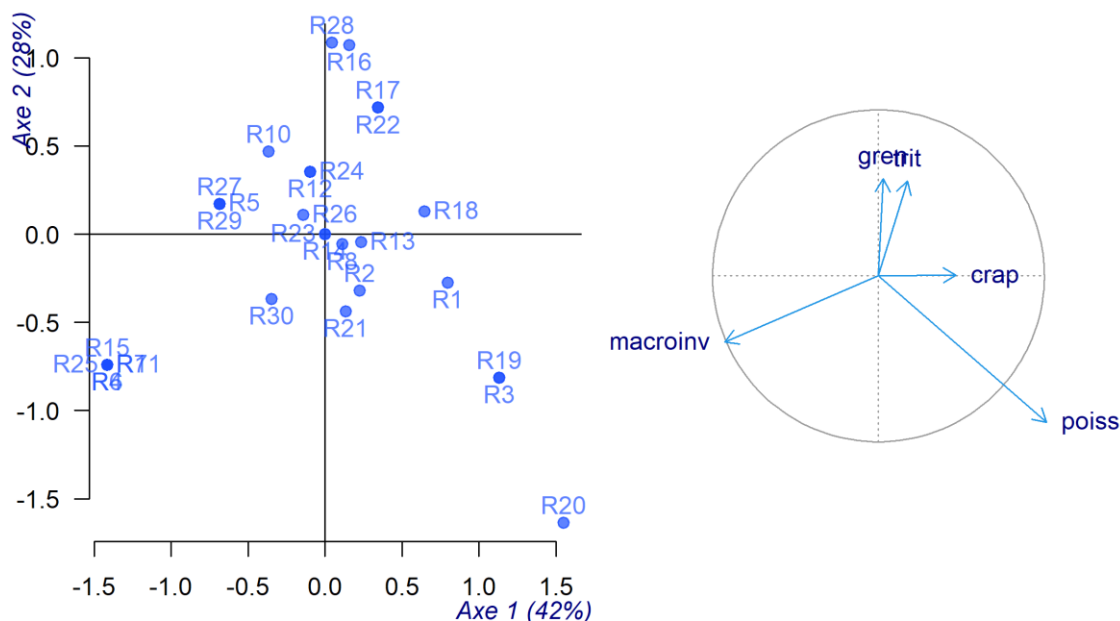


Figure 18. Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) sur les présences-absences des principaux taxons faunistiques observés.

Gauche : projection des coordonnées des lignes (RA). *Droite* : Projection des coordonnées des colonnes (taxons). La présence d'un taxon est effective lorsqu'au moins un individu a été observé quelque soit son stade de vie et son état. '**trit**' = triton alpestre ; '**gren**' = grenouille rousse ; '**crap**' = crapaud commun ; '**poiss**' = poissons ; '**macroinv**' = macroinvertébrés.

Bien que non inclus dans les analyses car trop anecdotiques, d'autres taxons ont également été observés (présence ou indices) entre la crête de digue et l'eau de certaines RA lors des visites : petits mammifères (observation d'hermine, de blaireau, empreintes de marmotte, déjections de lièvre), oiseaux (observations de bergeronnettes posées et chasses d'hirondelles ou martinets), observation de couleuvres à collier (dans une RA à basse altitude), insectes (parfois de nombreux imagos volants, quelques lépidoptères...). Quelques mortalités ont été relevées ; un blaireau noyé et un triton desséché sur la géomembrane dans R18, de nombreuses pontes avortées de grenouille rousse dans R8 dans laquelle se trouvaient aussi des truitelles mortes, de nombreux têtards de crapaud commun échoués dans R13 et quelques adultes d'amphibiens dans des RA différentes.

Discussion

Toutes les visites ayant été prévues à l'avance, les conditions météorologiques n'étaient pas toujours favorables aux observations. Aussi, les dates de visites ayant été définies par DS, les RA visitées un même jour pouvaient être implantées à des altitudes très contrastées. Certaines parmi les plus hautes étaient par exemple encore partiellement recouvertes et/ou entourées de neige et il est probable qu'il était encore trop tôt pour y effectuer des observations naturalistes, alors que les plus basses, visitées le même jour, étaient déjà utilisées par les amphibiens. Il ressort néanmoins de cette exploration d'un échantillon de RA de quelques DS des Alpes françaises que les RA sont fréquentées par une certaine

faune et flore dans l'enceinte formée par leur crête de digue. Cela quels que soient leur type de conception et leurs modalités d'utilisation, et en l'absence de toute action visant à les favoriser.

1. Faune

Les RA peuvent être perçues comme faisant partie du paysage aquatique pour les trois espèces d'amphibiens observées et être utilisées comme site de reproduction pour le crapaud commun et la grenouille rousse (nombreuses observations de pontes et têtards, voire accouplements). Aucun œuf ni larve de triton alpestre n'a été décelé bien que des comportements reproducteurs (mâle agitant sa queue devant la femelle) aient pu être occasionnellement observés. Il est probable que le milieu dépourvu de plantes aquatiques ne s'y prêtait pas, cette espèce ayant pour habitude de pondre sur des feuilles submergées¹⁰, ou qu'un autre substrat ayant échappé à nos observations ait été utilisé pour la ponte. Le remplissage se faisant préférentiellement lors de la fonte printanière, au moment où les débits des cours d'eau sont les plus élevés, les RA présentent généralement un niveau d'eau satisfaisant pour le début de la reproduction. Elles peuvent donc contribuer au maintien des populations d'amphibiens dans les DS en leur fournissant des sites de reproduction ou de déplacements potentiels. La présence de ces espèces d'amphibiens dans les RA n'est pas directement problématique pour la production de neige et elle montre qu'une coexistence est possible. Toutefois certains usages des RA leur sont plus ou moins favorables. Les vidanges, qui concernent notamment les RA non confinées, peuvent porter préjudice à l'accomplissement du cycle de vie, voire à la survie des individus présents. Cela d'autant qu'elles sont généralement réalisées entre le printemps et l'été. Lorsque le besoin de présenter une RA vide peut être connu à l'avance (visites de contrôle des ouvrages, réparations du DEG...), il est donc préférable d'éviter de remplir la RA ou bien de choisir des dates de visites en fin de saison de fréquentation de ces milieux par la faune. Si la vidange des RA peut être problématique pour la faune, elle n'est pas non plus avantageuse pour les exploitants. Lorsque c'est possible, une surveillance subaquatique visuelle (plongeurs, drones) croisée à celle des appareils d'auscultation de l'ouvrage (relevés topographiques, piézométriques...) pourrait fournir un diagnostic satisfaisant des ouvrages tout en les maintenant en eau et en permettant de profiter des eaux de fonte printanières pour le remplissage. Des cas de mortalités d'amphibiens, voire autres animaux, obstruant des canalisations ou éléments du système d'enneigement ont également été relatés malgré la présence d'une crépine. Une réflexion à mener sur un système d'évitement adapté serait donc importante. Aussi, les RA non confinées restent problématiques pour la sortie de l'eau de la faune (y compris des humains), notamment lorsque le niveau de l'eau est plus bas que la côte

¹⁰ https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf-especes/Triton_alpestre-I.alpestris_2015.pdf

d'utilisation. Les dispositifs en place pour favoriser la sortie de l'eau des différentes espèces (échelles, filets, bouées de sauvetage...) ou empêcher l'accès aux RA (clôtures et barrières, effaroucheurs¹¹...) ont une efficacité limitée. Leur utilisation peut être contraignante car elle nécessite leur mise en place ou retrait selon la saison et limite l'intégration paysagère des RA. Apporter un confinement aux RA non confinées résoudrait l'ensemble de ces problèmes (noyades, vidanges, réparations du DEG...) et serait une solution idéale pour certains exploitants. Cette opération nécessite souvent un reprofilage des pentes du talus amont, mais le coût de la fabrication et de la mise en place d'un confinement demeure une proportion acceptable de celui de la RA¹². C'est une option qui a déjà été choisie dans certains DS (souvent accompagnée d'une extension de la RA) et les retours d'expérience en termes d'utilisations des RA sont très favorables. Dans le cas où cette solution n'est pas envisageable, une réflexion serait à mener pour la mise en place d'éléments physiques plus favorables à la sortie de l'eau (pontons légers, géofilets ?). Ces RA non confinées présentent généralement un enrochement en partie haute. Lorsque le niveau de l'eau est à la côte d'exploitation cet enrochement peut être plus facilement accessible pour la faune ou aménageable dans le cas contraire. Une gestion adaptée du niveau de l'eau selon la saison pour les RA non confinées pourrait faire partie des solutions. Dans certains cas, les usages peuvent également avoir un impact indirect sur les amphibiens. Les prélèvements souvent l'aval et transferts d'eau entre RA peuvent contribuer à la dissémination de pathogènes tels que *Batrachochytrium dendrobatidis* (cf. Dejean et al. 2007), cela potentiellement sur une grande partie du DS avec la dispersion de l'eau (neige). Pour certaines RA ayant un rôle secondaire de réserve d'eau potable, l'eau peut être au préalable traitée par rayonnement UV. Cette pratique pourrait être généralisée en tant que solution au coût visiblement acceptable et favoriserait également d'autres usages (e.g. baignade, AEP). Il apparaît dans nos observations que la présence d'amphibiens (notamment grenouille rousse ou de triton alpestre) est rarement associée à celle de poissons ([Figure 18](#)) et lorsque c'était le cas, de grandes quantités de vairons étaient également observées. Il en est de même pour la présence de macroinvertébrés. Ces observations sont en accord avec une certaine pression de prédation de la part des poissons introduits et la présence de petits cyprinidés pourrait éventuellement contribuer à libérer les amphibiens d'une partie de la prédation en s'ajoutant aux proies potentielles. La présence de crapauds semble moins opposée à celle de poissons. Ceux-ci sont normalement moins soumis à prédation du fait de l'émission de substances répulsives

¹¹ Ceux observés consistaient en l'émission de cris d'oiseaux de proie en vue d'éloigner les marmottes. Il s'agissait alors d'éviter la dégradation du DEG par l'action de leurs griffes lors de leurs tentatives de sortie de l'eau, voire leur noyade accidentelle, ainsi que la dégradation de la digue par la création de terriers. Ces dispositifs étaient couplés à des clôtures intégrales, en dessous desquelles des individus parvenaient tout de même à se créer des passages.

¹² A titre indicatif, il nous a été précisé que la fabrication et mise en place d'un confinement 20-200 mm sur le DEG était de l'ordre de 8,5 €HT/m³. Le confinement d'une RA de 300 000 m³, donc de dimensions particulièrement grandes, nécessite environ 15 000 m³ de matériaux, soit un peu moins de 130 000 €HT.

(Duguet et Melki 2003). Au-delà de cet aspect, les poissons peuvent être porteurs sains de ranavirus et leur introduction, si leur statut non-infectieux n'a pas été vérifié¹³ peut être une cause supplémentaire de dissémination de pathogènes. L'activité de pêche peut donc être problématique pour le maintien des populations d'amphibiens et d'invertébrés aquatiques, notamment dans ces milieux dépourvus de végétation aquatique (i.e. d'abris pour les proies). Il a par exemple été rapporté lors de nos visites qu'une population de plusieurs centaines de tritons alpestres ayant pu être préservés lors de l'extension de la RA en question a rapidement disparu suite à l'introduction de salmonidés. Cela pouvait aussi être lié à la présence d'un golf contigu à la RA, potentiellement attractif du fait des mares présentes mais nécessitant un entretien intense de la pelouse, notamment des tontes fréquentes probablement néfastes pour grand nombre de tritons. Il semblerait alors que les interactions entre RA et biodiversités doivent prendre en compte l'ensemble des activités présentes dans les DS. Il convient enfin de rappeler que ces trois espèces d'amphibiens sont protégées au niveau national par l'Arrêté du 8 janvier 2021 « fixant la liste des amphibiens et des reptiles représentés sur le territoire métropolitain protégés sur l'ensemble du territoire national et les modalités de leur protection ». Les spécimens (i.e. individu quel que soit son stade de vie) de crapaud commun (*Bufo bufo*) et de triton alpestre (*Ichthyosaura alpestris*) doivent notamment rester intègres (pas de destruction, mutilation, etc), de même pour la grenouille rousse (*Rana temporaria*), et doivent pouvoir accomplir leur cycle de vie sans perturbation (Art. 3 et 4). Des procès-verbaux suite à des constats de destruction de spécimens d'amphibiens ont déjà été dressés et ces cas auraient sans doute pu être évités (e.g. respecter la saison de reproduction pour les vidanges). La mise en exclos pourrait être une solution pour éviter des interactions néfastes mais ne semble pas efficace pour les amphibiens (cf. Jumeau et al. 2020) et il s'agirait plutôt de chercher à favoriser l'installation et le maintien des amphibiens dans les RA que de leur en empêcher l'accès, ce qui serait de plus bénéfique pour la dynamique des populations locales.

2. Physico-chimie

Les résultats des analyses montrent que la qualité de l'eau est globalement cohérente avec celle des systèmes naturels aux altitudes équivalentes. Des pH et TAC en moyenne plus élevés que dans les lacs sentinelles indiqueraient un contexte géologique plus alcalin pour les RA visitées. L'eau des RA est bien oxygénée sur les rives, généralement saturée du fait d'une activité phytoplanctonique (ce qui peut également expliquer des pH légèrement basiques). Ces milieux présentent donc un certain niveau de productivité primaire favorable à la mise en place d'un réseau trophique. Des analyses des communautés installées auraient permis de préciser la qualité biologique des milieux. A ce jour, le

¹³ <http://www.mercantour-parcnational.fr/fr/actualites/les-ranavirus>

seul indice biologique pouvant être utilisé de façon réglementaire pour un éventuel diagnostic plus approfondi serait l'IPLAC, basé sur le phytoplancton (MTES 2019), car aucun indice à valeur juridique n'existe pour les invertébrés (observés dans les RA) ni les diatomées (probablement présentes) et les autres compartiments pour lesquels des indicateurs existent (macrophytes, poissons) n'ont pas été détectés dans les RA hormis ceux introduits. Certaines RA présentent des signes d'eutrophisation (développement d'algues filamenteuses ou de phytoplancton) ; la concentration en nitrates y est généralement élevée, ainsi que celle en chlorophylle a lorsque c'est le compartiment phytoplanctonique qui prend le dessus. Il est possible de mesurer des concentrations en nitrates modestes malgré des signes d'eutrophisation évidents, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'ils aient déjà été consommés par les producteurs primaires. Une conductivité élevée, notamment lorsque le TAC ou la concentration en carbonates est faible (contrairement à R8 ou R7), peut également alerter ; R3 et R8 présentaient par exemple des concentrations modérées en chlorophylle a et en nitrates et un fort développement d'algues filamenteuses. Celles-ci se sont donc développées au détriment du phytoplancton et la conductivité traduirait alors un apport en éléments chimiques dissous (potentiellement en éléments phosphatés). Les RA ont des eaux généralement plus minéralisées que les lacs naturels, ce qui peut être lié à des prélèvements dans des cours d'eau, plus à l'aval et aux eaux potentiellement plus riches que celles alimentant les lacs d'altitude. Le pâturage, qui concerne une grande partie des DS en été, ainsi que la re-végétalisation active des pistes de ski reprofilées (souvent avec apport de compost) peuvent contribuer à l'enrichissement de ces eaux. Le phénomène d'eutrophisation pouvant être accentué par la présence de poissons zooplanctonophages, comme c'était potentiellement le cas dans R13, une analyse de la composition du zooplancton aurait permis d'apprécier la part relative de cette déstabilisation du réseau trophique et de celle de l'apport en nutriments. Ces cas d'eutrophisation, bien que relativement modérés et peu représentés dans nos observations nous ont été précisés comme étant problématiques pour la production de neige en obstruant les filtres ou les enneigeurs, de même que l'abondance de matières en suspensions. Aussi, la quantité d'oxygène dissous peut fortement diminuer durant la nuit (respiration du phytoplancton) et impacter les espèces aquatiques. Il aurait été intéressant de réaliser des mesures en continu dans les RA à forte saturation en oxygène ou à forte concentration en chlorophylle a afin d'évaluer cet impact.

3. Végétation

La suppression de la végétation terrestre des RA confinées est généralement une contrainte réglementaire pour assurer la visibilité de l'ouvrage lors de visites de contrôle. La végétation permettrait pourtant d'assurer des fonctions favorables aux usages des RA telles que stabiliser les éléments de granulométrie fine du confinement, ou bien à la biodiversité en rendant l'accès à l'eau plus propice pour les amphibiens (le comportement des grenouilles rousses semble par exemple modifié lors de leurs traversées de milieux rocheux ou caillouteux ; Boncourt 2019). La présence de

végétation spontanée sur la majorité des RA indique que son développement est possible. Les processus de végétalisation sont néanmoins longs à ces altitudes, d'autant que les confinements ne présentent que des substrats très minéraux, majoritairement de granulométrie moyenne. La présence d'un fossé drainant les eaux de ruissellement limite également l'apport de fines et de graines depuis les milieux environnants, contribuant probablement à retarder le processus naturel de végétalisation. Les retours d'expérience semblent montrer que cette végétation herbacée n'est pas problématique pour la production de neige et la potentielle obstruction des filtres par des débris végétaux n'est actuellement pas avérée, voire infirmée par certains exploitants. Il serait intéressant en termes d'intégration paysagère et de continuité des milieux de réfléchir à des moyens d'inspection des ouvrages compatibles avec la présence d'une végétation herbacée. Cette nécessité de lutte contre l'installation de la végétation terrestre pourrait d'ailleurs être remise en question : en effet, il existe à présent quelques RA activement végétalisées par une végétation herbacée sans que cela ne semble poser de problème réglementaire. Aussi, l'une des RA visitées, pour laquelle il avait été mis l'accent sur l'intégration paysagère était bordée d'arbres à proximité directe de l'eau, ce qui est normalement proscrit, mais dans ce cas précis (probablement des parties de la RA en déblai seulement) semblait bien accepté. Il en résulte une certaine continuité avec les milieux forestiers à proximité, favorable aux différentes phases de vie des amphibiens, ainsi qu'une grande diversité d'habitats sur le pourtour des rives (avec également des parties couvertes de végétation, d'autres plus minérales, une morphologie générale très hétérogène, des zones immergées à faible profondeur...). La biodiversité aquatique observée dans cette RA était particulièrement élevée (grenouille rousse, nombreuses espèces de coléoptères, hétéroptères et gastéropodes, trichoptères, etc...), toutefois aucune végétation aquatique n'était présente et un fort développement d'algues filamenteuses a pu être noté. Dans les milieux naturels, la végétation aquatique (hydrophytes, hélophytes) fournit des habitats, zones de reproduction et sources de nourriture, diminue les risques d'eutrophisation en contribuant à la régulation des flux de nutriments et permet la stabilisation des berges et de fait la réduction de la turbidité par le maintien du substrat (Fraissé 1999). Cette végétation est toujours absente des RA (seuls deux individus d'hélophytes ont été observés, l'un sur R3 et l'autre sur R12), alors qu'elle peut être présente dans les lacs naturels jusqu'à 2700 m d'altitude¹⁴. Favoriser l'implantation d'une ceinture végétale dans la partie immergée du talus amont pourrait augmenter la contribution des RA à la biodiversité régionale tout en apportant des solutions pour l'usage neige de culture (limitation du développement algal, maintien des fines et du confinement...). Elle pourrait représenter une alternative aux moyens actuellement expérimentés, complexes à mettre en place, voire coûteux et pas

¹⁴ Cf. <https://www.ecrins-parcnational.fr/actualite/botanique-aquatique-lacs-sentinelles>

toujours efficaces ni souhaitables (ultrasons, brassage, filtration, voire bactéries). Aussi, la végétation aquatique fournit des abris au zooplancton phytoplanctonophage et le préserve d'une éventuelle prédation, lui permettant de maintenir un contrôle sur le développement du compartiment phytoplanctonique. Enfin, l'établissement d'une végétation aquatique permettrait le maintien d'une couche de sédiments favorable à l'établissement de certaines espèces (Scher 2006; Zamora-Marín et al. 2021). Dans certains cas, l'eau alimentant les RA transite au préalable par un bac de décantation voire une RA tampon (pour assurer le remplissage des RA principales). L'eau qui en sort semble alors moins chargée en matières en suspension. Une réflexion pourrait être menée pour aménager voire développer de telles RA ou annexes à l'amont ou autour des RA (e.g. en substitution au fossé drainant) en leur conférant un rôle d'assainissement et de filtration à la manière de zones tampon humides. Cela permettrait également de récupérer les eaux de ruissellement pour alimenter les RA en réduisant les risques de pollution (cf. Fait et al. 2020). Bien que les pentes des RA confinées ou partiellement confinées soient généralement supérieures à 20°, l'installation d'une végétation aquatique, même de moindre diversité, demeure envisageable sur les RA existantes. Certaines parties des RA peuvent également présenter des pentes très faibles (pour des raisons topographiques ou à proximité des évacuateurs de crues) et donc une certaine diversité de méso-habitats potentiels. La mise en place de placettes expérimentales de végétalisation aquatique dans différentes parties des RA pourrait faire l'objet de recherches futures (développement de techniques, choix des espèces, gestion du milieu...) afin d'améliorer la contribution des RA à la biodiversité (attraction de nouveaux groupes, abris, supports de pontes d'amphibiens, odonates, etc...), la qualité de l'eau des RA en termes de nutriments, voire stabiliser les éléments fins du confinement qui dans certains cas ont tendance à s'affaisser dans la zone de battillage. Le marnage pourrait être une contrainte majeure pour le maintien d'une ceinture végétale. Celui-ci est néanmoins important en hiver mais quasi inexistant en été dans la plupart des cas et il s'agirait d'une part d'identifier des espèces tolérantes à ces variations de niveau d'eau (la subsistance des roselières nécessite par exemple un certain marnage ; Montuelle et Clémens 2015) et aux conditions inhérentes à l'altitude, ainsi que d'adapter la gestion du niveau de l'eau en hiver (afin d'éviter la prise en glace des plantes submergées et permettre leur recouvrement par une couverture neigeuse protectrice) et au printemps (pour la reprise de la saison végétative).

Un échange avec Raymond Delarze (bureau d'études BEB¹⁵) à propos d'un modèle de RA écologiquement intégrée sur au moins une partie des berges montre que cette réflexion a déjà été menée de façon aboutie du côté des Alpes Suisses ([Annexe VII - Exemple de retenue d'altitude intégrée écologiquement](#)). Les berges de la RA du côté amont de la pente du relief ont été adoucies

¹⁵ <https://www.beb-etudes-biologiques.ch/>

de manière à ce que la pente du terrain naturel rejoigne l'eau de la RA sans discontinuité. Ces berges ont été végétalisées sur les parties en eau et hors d'eau, de même que l'évacuateur de crues. Cette RA est toutefois de dimensions modestes (moins de 30 000 m³) et les enjeux de sécurité sont potentiellement moindres. Toutefois il serait d'autant plus intéressant d'adapter ce type de conception aux RA des Alpes françaises que c'est dans ce type de RA que les maximums de biodiversité ont été observés (Fait 2017).

4. Contexte paysager

Nous nous sommes ici intéressés à la biodiversité présente à l'intérieur des RA. Ces RA appartiennent à un paysage dont la composition et la structure sont susceptibles d'influer sur les processus de dispersion des espèces et donc de colonisation de ces milieux (cf. Boncourt 2019; Lamouille-Hébert 2020; Oertli et Frossard 2013; Scher 2006). Certains macroinvertébrés aquatiques observés dans les RA sont par exemple de bons disperseurs actifs (coléoptères, hétéroptères) et peuvent facilement coloniser les nouveaux milieux, contrairement à d'autres, également observés, dont la dispersion passive dépend de leur environnement direct (e.g. gastéropodes). L'analyse du paysage aquatique, des flux d'eau entre les RA ainsi que de la mosaïque d'habitats environnants permettrait une meilleure compréhension des mécanismes déterminant la composition des biocénoses. Les RA peuvent être utilisées en tant qu'habitat pour l'installation et la reproduction d'individus et permettre ainsi le maintien des populations. Elles peuvent également assurer une certaine connectivité au sein du paysage aquatique et favoriser les déplacements et migrations. Les situer dans leur contexte paysager permettrait une meilleure appréciation de leur contribution potentielle à la biodiversité selon la proximité et l'abondance de milieux similaires, ainsi que de préciser les mesures à entreprendre pour favoriser, ou du moins ne pas entraver cette contribution.

Conclusion

Les projets de RA sont soumis à une instruction conséquente à l'issue de laquelle est attendue, parmi les nombreux volets liés aux spécificités de ces ouvrages (analyse des risques, étude géotechnique, étude hydrologique...), une évaluation environnementale approfondie permettant d'identifier les impacts de la création de l'ouvrage sur l'environnement. A ce jour rien ne semble mis en œuvre pour accompagner l'intégration écologique des RA et les rendre attractives pour la biodiversité. Elles sont malgré tout utilisées par certains groupes d'espèces au-delà d'une simple fréquentation hasardeuse. Certaines pratiques peuvent néanmoins être problématiques pour la biodiversité en place (vidanges, introduction de poissons, suppression de la végétation des talus amont, RA non confinées...). Le choix d'exclure les groupes observés des RA peut être une solution pour éviter toute interaction néfaste entre les usages et la biodiversité. Cela semble toutefois peu efficace d'après la littérature et dans un contexte d'effondrement de la biodiversité, toute opportunité de la favoriser paraît préférable.

Il apparaît de surcroît que les solutions favorables à la biodiversité puissent être également avantageuses pour les exploitants (e.g. développer les moyens de surveillance et d'auscultation existant pour éviter les vidanges et un entretien conséquent de la végétation sur les berges, confiner les RA pour éviter la détérioration du DEG et les réparations fréquentes...). De plus, aménager les RA en faveur de la biodiversité permettrait d'améliorer leur contribution au paysage aquatique des DS tout en apportant d'autres solutions pour les exploitants (amélioration de la qualité de l'eau par une ceinture de végétation aquatique, création de plans d'eau attractifs pour un usage touristique estival...). Ainsi, développer l'intégration écologique des RA pourrait être bénéfique à la fois pour les écosystèmes aquatiques (augmentation de la connectivité, lieux de reproduction...) et les usages. Nous avons tenté d'apporter à travers cette étude exploratoire un ensemble d'éléments susceptibles d'être discutés entre les différents acteurs afin d'amorcer une réflexion sur une base commune vers une amélioration de la contribution des RA à la biodiversité des DS (cf. [Annexe VIII - Perspectives : pistes d'améliorations](#)). Certains pouvant être développés, confirmés, voire infirmés. Il s'agira ensuite de définir les solutions retenues et les orientations à prendre pour leur étude approfondie et leur mise en œuvre. Ce rapport n'a donc pas vocation à être la finalité d'un travail, mais plutôt le début d'une étude ouverte et interactive.

Bibliographie

- Badré, Michel, Jean-Louis Prime, et Georges Ribière. 2009. *Neige de Culture : Etat des lieux et impacts environnementaux. Note socio-économique*. Conseil général de l'environnement et du développement durable.
- Boncourt, Etienne. 2019. « Quantifier la perméabilité des domaines skiables pour la Grenouille rousse (*Rana temporaria*): une approche combinant suivi GPS et génétique du paysage ».
- Bonin, Ludovic, André Evette, Pierre-André Frossard, Patrice Prunier, et Nicolas Valé. 2013. *Génie végétal en rivière de montagne - Connaissances et retours d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrages bois*.
- Carluer, Nadia, M. Babut, J. Belliard, I. Bernez, B. Leblanc, D. Burger-Leenhardt, J. M. Dorioz, O. Douez, S. Dufour, C. Grimaldi, F. Habets, Y. Le Bissonnais, Jérôme Molenat, A. J. Rollet, V. Rosset, S. Sauvage, et P. Usseglio-Polatera. 2016. *Impact cumulé des retenues d'eau sur le milieu aquatique*. AFB.
- Clevenot, Laura, Catherine Carré, et Pierre Pech. 2018. « A Review of the Factors That Determine Whether Stormwater Ponds Are Ecological Traps And/or High-Quality Breeding Sites for Amphibians ». *Frontiers in Ecology and Evolution* 6:40. doi: 10.3389/fevo.2018.00040.

- Dejean, Tony, Claude Miaud, et Dirk Schmeller. 2007. « Protocole d'hygiène pour limiter la dissémination de la Chytridiomycose lors d'interventions sur le terrain ». *Bull. Soc. Herp. Fr.* 134:47-50.
- Dray, Stéphane, et Anne-Béatrice Dufour. 2007. « The Ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists ». *Journal of Statistical Software* 22(1):1-20. doi: 10.18637/jss.v022.i04.
- Duguet, Rémi, et Frédéric Melki. 2003. *Les Amphibiens de France, Belgique et Luxembourg*. Biotope éditions.
- EPCN. 2016. *The Pond Manifesto*. European Pond Conservation Network.
- EPCN. 2021. « 9th European Pond Conservation Network (EPCN) conference », mai 25.
- Evette, André, Laurent Peyras, Hugues François, et Stéphanie Gaucherand. 2011. « Risques et impacts environnementaux des retenues d'altitude pour la production de neige de culture dans un contexte de changement climatique ». *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* (99-4). doi: 10.4000/rga.1471.
- Fait, Pauline. 2017. *Qualité de l'eau des petites retenues d'altitude alpines suisses et évaluation de leur potentiel d'accueil de la biodiversité*.
- Fait, Pauline, Eliane Demierre, Christiane Ilg, et Beat Oertli. 2020. « Small Mountain Reservoirs in the Alps: New Habitats for Alpine Freshwater Biodiversity? » *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 30(4):617-30. doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.3306>.
- Fraissé, Thierry. 1999. *Protection et végétalisation des zones de marnage des plans d'eau*. 66. Agence de l'eau RMC.
- Gaucherand, Stéphanie, et Francis Isselin-Nondedeu. 2011. « Utilisation du système d'information géographique comme outil de gestion de zones humides d'altitude : le cas du domaine skiable de Val Thorens ». *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 5(2):60. doi: 10.3917/set.005.0060.
- Gerbaux, Martin, Pierre Spandre, Hugues François, Emmanuelle George, et Samuel Morin. 2020. « Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures ». *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* (108-1). doi: 10.4000/rga.6724.
- Girard, Hugues, Laurent Peyras, Patrice Mériaux, Gérard Degoutte, et Luc Deroo. 2009. « Dispositifs d'étanchéité par géomembrane des retenues d'altitude : retour d'expérience et recommandations ». 11.
- Jumeau, Jonathan, Julien Lopez, Alain Morand, Lana Petrod, Françoise Burel, et Yves Handrich. 2020. « Factors Driving the Distribution of an Amphibian Community in Stormwater Ponds: A Study Case

- in the Agricultural Plain of Bas-Rhin, France ». *European Journal of Wildlife Research* 66(2):33. doi: 10.1007/s10344-020-1364-5.
- Kellner, Elke, et Manuela I. Brunner. 2021. « Reservoir Governance in World's Water Towers Needs to Anticipate Multi-purpose Use ». *Earth's Future* 9(1). doi: 10.1029/2020EF001643.
- Lambey, Brigitte, et Jean-Charles Villaret. 2018. *Etude de la végétation palustre des mares et bords de lacs de montagne*.
- Lamouille-Hébert, Marie. 2020. « Impact du changement climatique sur la future distribution des espèces d'odonates boréo-alpins. Exemple dans la région de Chamonix (Haute-Savoie) ». Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE).
- Lamouille-Hébert, Marie. 2021. « CIMaE : Écologie et gestion des zones humides d'altitude dans un contexte de changement climatique - Protocole standardisé ».
- Marnezy, Alain. 2008. « Les barrages alpins. De l'énergie hydraulique à la neige de culture ». *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* (96-1):92-102. doi: 10.4000/rga.422.
- MEEDDAT. 2013. *Guide juridique pour la construction de retenues*. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.
- Montuelle, Bernard, et Anne Clémens. 2015. *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions – ouvrage collectif*. ZABR. Graie.
- Morand, Alain. 2013. « Les amphibiens du Parc national du Mercantour (PNM) et du Parco naturale Alpi Marittime (PNAM) : bilan des connaissances et perspectives d'études ». 11.
- MTES. 2019. *Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)*. Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.
- Naaim, Mohamed, Gérard Degoutte, et François Delorme. 2010. « Les vagues dans les retenues d'altitudes : analyse et méthodes pour la prévention ». doi: 10.14758/SET-REVUE.2010.2.13.
- Oertli, Beat. 2018. « Editorial: Freshwater Biodiversity Conservation: The Role of Artificial Ponds in the 21st Century ». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 28(2):264-69. doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.2902>.
- Oertli, Beat, Andrea Finger, et Christiane Ilg. 2017. *Création de mares et étangs alpins pour la promotion de la biodiversité. Guide de «best-practices»*.
- Oertli, Beat, et Pierre-André Frossard. 2013. *Mares et étangs - Ecologie, conservation, gestion, valorisation*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

- Paccard, Pierre. 2010. « Gestion durable de l'eau en montagne: le cas de la production de neige en stations de sports d'hiver. » Université de Savoie.
- Peyras, Laurent. 2006. « Guide pour l'instruction des dossiers d'autorisation ou de déclaration des barrages d'altitude ». 35.
- Peyras, Laurent, et Patrice Mériaux. 2009. *Retenues d'altitude*. Quae.
- Peyras, Laurent, Patrice Mériaux, Gérard Degoutte, Luc Deroo, André Evette, Hugues Girard, Dominique Laigle, et Marc Lefranc. 2010. « Retenues d'altitude pour la production de neige de culture : recommandations pour la conception, la réalisation, la surveillance et la réhabilitation ». *Sciences Eaux et Territoires* Numéro 2. doi: 10.3917/set.002.0092.
- Pinay, Gilles, Chantal Gascuel, Alain Menesguen, Yves Souchon, Morgane Le Moal, Alix Levain, Florentina Moatar, Alexandrine Pannard, et Philippe Souchu. 2017. « L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea ».
- QGIS Association. 2021. *QGIS Geographic Information System*. QGIS.org.
- R Core Team. 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rimet, Frédéric, Orlane Anneville, Denis Barbet, Cécile Chardon, Laura Crépin, Isabelle Domaizon, Jean-Marcel Dorioz, Laurent Espinat, Victor Frossard, Jean Guillard, Chloé Goulon, Valérie Hamelet, Jean-Christophe Hustache, Stéphan Jacquet, Leslie Lainé, Bernard Montuelle, Pascal Perney, Philippe Quetin, Serena Rasconi, Antoine Schellenberger, Viet Tran-Khac, et Ghislaine Monet. 2020. « The Observatory on LAkes (OLA) Database: Sixty Years of Environmental Data Accessible to the Public ». *Journal of Limnology* 79(2). doi: 10.4081/jlimnol.2020.1944.
- Roger, Laetitia. 2013. *Synthèse des connaissances et données existantes sur les retenues collinaires*.
- Scher, Olivier. 2006. « Les bassins d'eau pluviale autoroutiers en région Méditerranéenne: Fonctionnement et Biodiversité. Evaluation de l'impact de la pollution routière sur les communautés animales aquatiques ».
- Valé, Nicolas, et Lou Renaud. 2020. *Les retenues d'eau comme solution d'adaptation au changement climatique ? Synthèse bibliographique et retours d'expériences. Note de Synthèse*. ARRA².
- Zamora-Marín, Jose Manuel, Christiane Ilg, Eliane Demierre, Nelly Bonnet, Alexander Wezel, Joël Robin, Dominique Vallod, José Francisco Calvo, Francisco José Oliva-Paterna, et Beat Oertli. 2021. « Contribution of Artificial Waterbodies to Biodiversity: A Glass Half Empty or Half Full? » *Science of The Total Environment* 753:141987. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141987.

Annexe I - Contacts

*Personnes ayant apporté conseils, connaissances, accompagnement et/ou simples échanges*¹⁶

Arthaud Florent (CARRTEL)	François Hugues (INRAE)	Morand Alain (Cerema)
Assadet Damien (DDT 74)	Gautret Maeva (ABEST)	Moulin Ludovic (Lans-en-Vercors)
Barrier l'Héritier Rachel (INRAE)	Gerbaux Martin (Scopeau)	Oertli Beat (Hepia)
Berard Chenu Lucas (INRAE)	Géromin Frédéric (Chamrousse)	Pagano Audrey (CEN 38)
Brunet Jérôme (Autrans-Méaudres)	Gouttefarde Matthieu (CdA)	Pichenot Julian (Cerema)
Briancon-Marjollet Nicolas (CdA)	Granger Frédéric (CdA)	Péroux Tiphaine (INRAE)
Carlier Nadia (INRAE)	Guilloux Julien (PNE)	Peyras Laurent (INRAE)
Carrel Georges (INRAE)	Heyrman Emmanuel (Chartr.)	Porteret Jérôme (CEN 73)
Chambon Eric (Villard-Corrençon)	Jacquemoud Florent (CdA)	Pulou Jacques (FNE)
Chenal Raphael (CdA)	Jurine Bruno (Val Thorens)	Rebière Delphine (Cerema)
Cognard Jonathan (INRAE)	Krautberger Nicolas (DDT 38)	Reynaud Nathalie (INRAE)
Contamine Christophe (CdA)	Lafaverges Damien (ABEST)	Romieux Nicolas (ABEST)
Debroux François (CdA)	Lamouille-Hébert Marie (FNE)	Rossetto Jérémie (DDT 38)
Decosne Baptiste (CdA)	Lecomte Eric (CdA)	Sculo Malvina (CdA)
Diouloufet Virginie (INRAE)	Leveque Aurélie (CdA)	Seauve Philippe (Karum)
Dublon Julien (INRAE)	Ley Stéphanie (Val Thorens)	Sourellat Aude (CEN 74)
Dupont Stéphanie (FNE)	Logez Maxime (INRAE)	Thivel Jean-François (DDT 73)
Evette André (INRAE)	Lopez-Pinot Dominique (CEN 38)	Tixier Léo (CdA)
Falcy Jean-Philippe (Karum)	Masson Corinne (DDT 05)	Toubin François (DDT 73)
Feraïlle Eric (FNE)	Miaud Claude (CEFE)	Triquet Estelle (CdA)
Fiquet Marc (DDT 05)	Million Marie (DDT 74)	
François Adeline (INRAE)	Mollet Sébastien (OFB)	

- CARRTEL : Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Écosystèmes Limniques
- CdA : Compagnie des Alpes
- CEFE : Centre d'Écologie Évolutive et Fonctionnelle
- CEN : Conservatoire d'Espaces Naturels
- Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
- DDT : Direction Départementale des Territoires
- FNE : France Nature Environnement
- Hepia : Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève
- INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
- PNE : Parc National des Écrins
- PNV : Parc National de la Vanoise

¹⁶ En espérant n'avoir oublié personne...

Annexe II - Fiche terrain

*129-38km/h : Les branches s'agitent

*3 relever température sur sonde pH

Annexe III - Fiche formulaire

Nom DS : Nom retenue : XY retenue :		Contact Nom : Prénom :	
Données dispo ☐ Bathymétrie ☐ SIG ☐ Obs. envt		Tél : Mél :	
Exposition : ☐ N ☐ E ☐ S ☐ O Géol : ☐ Calc ☐ Crist ☐ Autre : Position : ☐ Butte ☐ Plat ☐ Creux ☐ Pente ☐ Autre : Risques : ☐ Aval. ☐ Crue ☐ Gliss. ☐ Blocs ☐ Autre :			Année : Altitude : Classement : Type ouvrage : Profondeur : Surface : Volume : Hauteur digue : Pentes mini : Pentes maxi : Pentes moy : Heau max : Heau min :
Revêtement ☐ Naturel ☐ Geomembrane nue ☐ Enrochement haut ☐ Confin total grossier ☐ Confin total fin ☐ béton ☐ Autre : Alimentation ☐ Surplus AEP ☐ cours d'eau ☐ barrage/hydroelec ☐ Ruissellement, précipitations, fonte... ☐ Autre : Position prélèvement ☐ Amont retenue ☐ Aval retenue ☐ Autre BV ☐ Autre : Période remplissage ☐ prt ☐ été ☐ aut ☐ hiv → nb annuel moyen : utilisations ☐ neige ☐ pastoralisme ☐ baignade ☐ pêche ☐ AEP ☐ Autre : Clôture ☐ totale ☐ partielle ☐ absente ☐ paysagère ☐ Autre : Pré-traitement (e.g. AEP) ☐ oui ☐ non Lutte sédiments ☐ curage ☐ filtrat° ☐ décantat° ☐ absent ☐ Autre : Lutte prise en glace ☐ bullage air ☐ bullage eau ☐ flotteurs ☐ absent ☐ Autre : Epaisseur sédiments Fond : ☐ absents ☐ faible ☐ forte ☐ Autre : Berges sous eau : ☐ absents ☐ faible ☐ forte ☐ Autre : Berges hors d'eau : ☐ absents ☐ faible ☐ forte ☐ Autre :			Annexes ☐ < 500m ☐ > 500m ☐ absents Obs. nat in-situ ☐ oui ☐ non
Biodiversité Hydro-héloph. : ☐ non ☐ oui Vég terrestre : ☐ non ☐ oui Obs. faune : ☐ non ☐ oui Espèce patrim. : ☐ non ☐ oui EEE : ☐ non ☐ oui		Entretien végétation berges : Contrôle végétation aquatique : Contrôle faune terrestre / amphibie / aquatique :	
Commentaires			

<https://framaforms.org/questionnaire-retenues-et-biodiversite-1616152223>

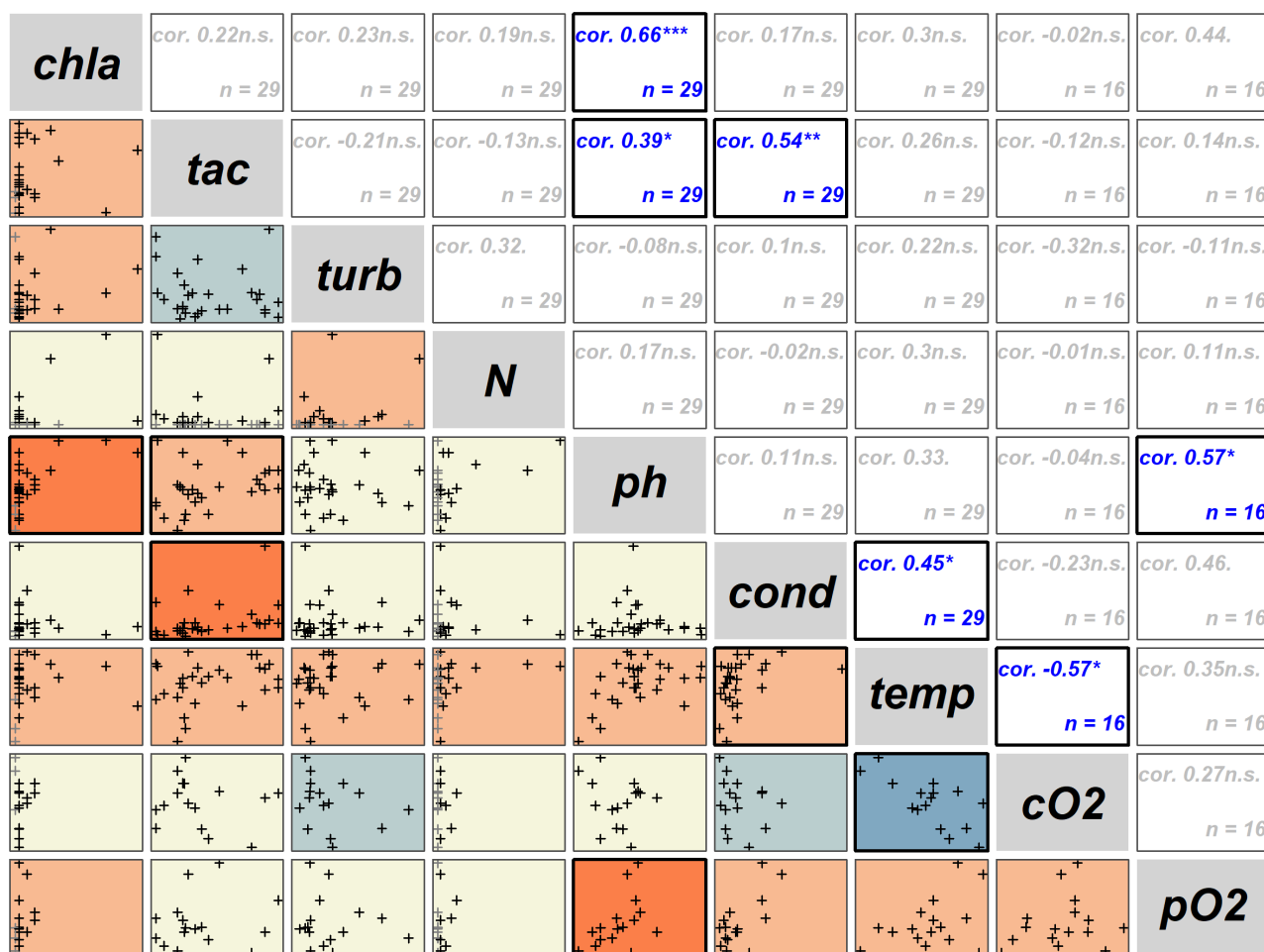
Annexe IV - Fiche retour formulaire (exemple)

Domaine Skiable : ☐ oui ☒ non Correspondant : ☐ oui ☒ non Courriel : ☐ oui ☒ non Tel : ☐ oui ☒ non		partic : oui accomp : oui echang : oui	Nom de la retenue Coordonnées (x ; y)																												
Commentaire visite :			SIG : oui bathy : oui suivis_nat : oui prel_berges : oui prel_embarc : oui																												
	utilisations : -neige -peche -autre period_prelev : -prt -aut -hiv pos_prelev : -avl_RC alim : -cours_eau	Ouvrage : déblai/remblai geologie : -NA risques : -aucun *revetmt : -géomembrane_nue -enrochmt_total *etancheite : geomembrane *confinmt : oui *cloture : -partielle -bois nord plat Barrage C	<table border="1"> <tr> <td>fruit_amt</td> <td>18</td> <td>23</td> <td>34</td> </tr> <tr> <td>volume</td> <td>10500</td> <td>120000</td> <td>403000</td> </tr> <tr> <td>hauteur</td> <td>0</td> <td>11</td> <td>22.7</td> </tr> <tr> <td>surface</td> <td>2800</td> <td>20000</td> <td>45900</td> </tr> <tr> <td>profondeur</td> <td>5.8</td> <td>11</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>altitude</td> <td>1290</td> <td>1800</td> <td>2460</td> </tr> <tr> <td>annee</td> <td>1986</td> <td>2017</td> <td>2021</td> </tr> </table>	fruit_amt	18	23	34	volume	10500	120000	403000	hauteur	0	11	22.7	surface	2800	20000	45900	profondeur	5.8	11	20	altitude	1290	1800	2460	annee	1986	2017	2021
fruit_amt	18	23	34																												
volume	10500	120000	403000																												
hauteur	0	11	22.7																												
surface	2800	20000	45900																												
profondeur	5.8	11	20																												
altitude	1290	1800	2460																												
annee	1986	2017	2021																												
● M. aq. : < 500m ● Obs. EEE : non ● Obs. sp enjeu : oui ● Obs. faune : non ● Obs. phyt. : non ● Obs. Veget. ter. : non ● Obs. Veget. aqu. : non ● épais Sed. (rives) : faible ● épais Sed. (berges) : faible ● épais Sed. (fond) : faible	-caract : Retenue agrandie en 2017 d'où deux types de revêtement -utilisations : Utilisation par le Golf ☐ en période estivale pour arrosage -mesures_biodiv : observatoire environnemental suivi zones humides revégétalisation par graines autochtones -prise_compte_biodiv : à discuter lors de votre visite réhabilitation de zones humides en mauvais état de conservation catalogue de mesures compensatoires -comm_biodiv :																														
-Reglementation : -Entretien :		-Végétation des berges, digues, talus : débroussaillage -Végétation aquatique : aucun (pêche à la mouche en no kill) -Contrôle de la faune terrestre ou amphibie : aucun (les truites du lac empêchent l'installation de tritons) -Contrôle de la faune aquatique : aucun -Dans quel(s) but(s) :																													
percipitations : T° air : id_flacon : heure : x (lon) : y (lat) : pH : O2 % : O2 diss : cond : T° :	vent : nebulosite : id_flacon : heure : x (lon) : y (lat) : pH : O2 % : O2 diss : cond : T° :																														

Annexe V - Retenues d'altitudes visitées

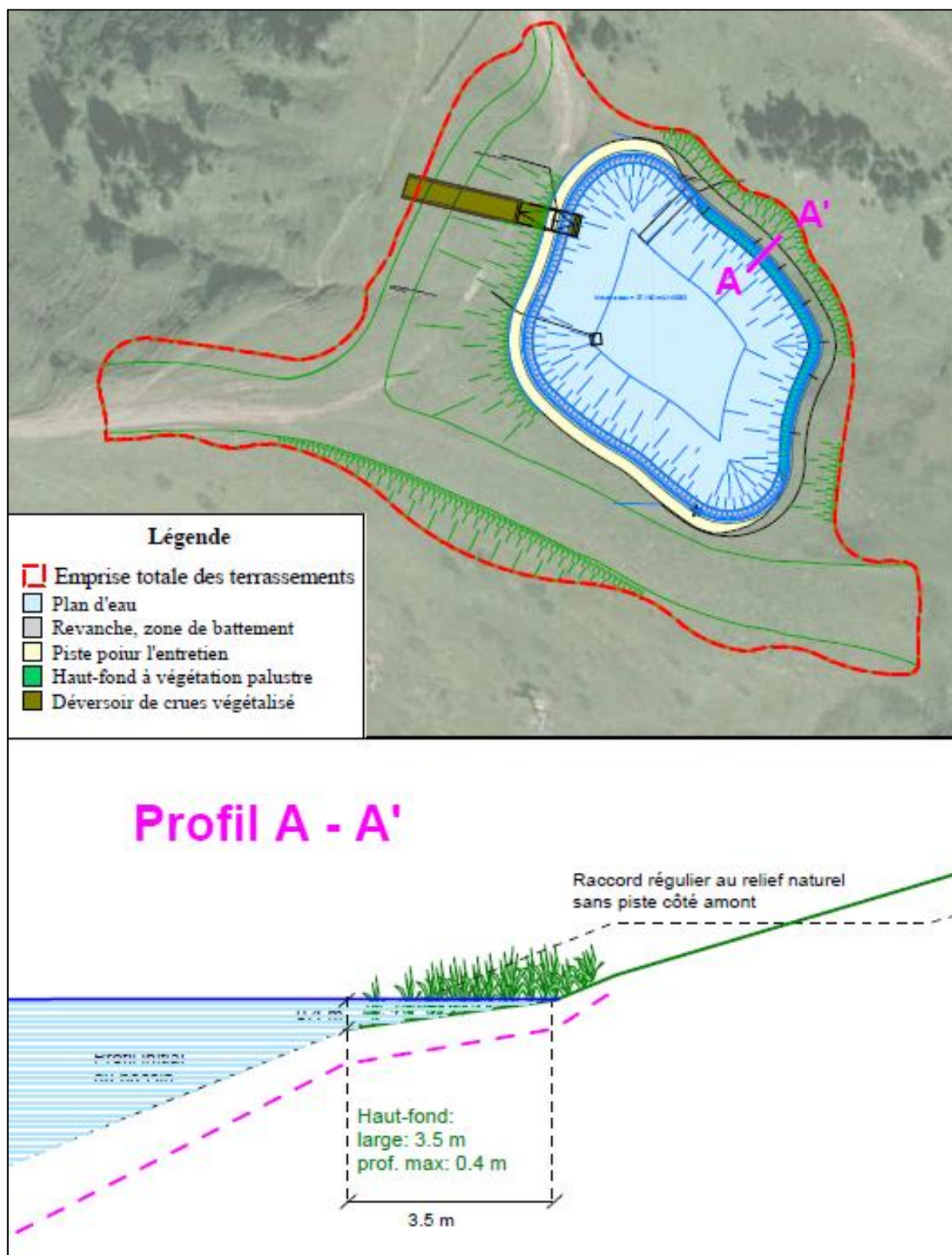
Code RA	Dépt.	Année	Altitude (m)	Volume (m3)	Classement	Confin.	Usages	Alimentation	Pente (°)	Date(s)
R1	73	2008	2212	403000	Barrage C	total	neige, AEP, pastoralisme, peche	cours_eau, surplus_AEP	17	26/07
R2	73	2002	1800	52400	Barrage C	partiel	neige, arrosage, nautique, peche, zen	cours_eau	27	16/06
R3	73	2017	1800	120000	Barrage C	total	neige, arrosage, nautique, peche, zen	cours_eau	15	16/06
R4	05	2009	2300	64370	Barrage C	aucun	neige	retenue	27	24/06
R5	05	2001	1680	7700	non classé	aucun	neige	cours_eau	27	24/06
R6	73	2010	2500	82000	?	total	neige	cours_eau	22	07/07
R7	05	2000	2260	50200	Barrage C	aucun	neige	retenue	27	24/06
R8	73	2006	2000	60000	Barrage C	partiel	neige	cours_eau	20	16/06
R9	73	1986	2225	48260	non classé	naturel	neige, peche, zen	mixte	15	15/06
R10	73	2003	2360	48000	non classé	partiel	neige	AEP	15	15/06
R11	05	2002	2400	42830	Barrage C	aucun	neige	surplus AEP	25	25/06
R12	38	2006	1290	15000	?	partiel	neige	cours_eau	30	13/07 & 08/06
R13	38	2011	1580	45000	?	total	neige, peche, zen	cours_eau	22	22/07 & 02/06
R14	73	2004	2700	36000	?	total	neige	cours_eau	35	07/07
R15	73	2018	2290	78000	?	total	neige	retenue	25	15/06
R16	73	2019	2370	12000	non classé	total	neige, AEP	cours_eau, surplus_AEP	27	23/07
R17	73	2019	2410	307000	Barrage C	total	neige, peche	retenue	20	23/07
R18	38	1993	1790	45000	?	aucun	neige, peche, zen	retenue	35	02/06 & 22/07
R19	38	1998	1520	73000	non classé	partiel	neige, pastoralisme, peche, zen	AEP	12	08/06 & 13/07
R20	38	2003	2000	120000	non classé	partiel	neige, peche, zen	AEP	27	13/07
R21	73	2009	2460	107000	Barrage C	total	neige, AEP, pastoralisme, peche	retenue	20	23/07
R22	38	2021	1827	91700	?	total	neige, nautique	retenue	25	02/06 & 22/07
R23	05	2002	2190	77140	Barrage C	aucun	neige	cours_eau	22	24/06
R24	74	2019	1700	42000	?	total vég.	neige	retenue	25	08/07
R25	73	2007	2535	42000	?	total	neige	cours_eau	30	07/07
R26	74	2017	2000	110000	Barrage C	total vég.	neige, AEP	cours_eau	22	08/07
R27	73	1999	1450	10500	non classé	partiel	neige	cours_eau, surplus_AEP	30	05/08
R28	73	2002	2120	20000	non classé	partiel	neige	surplus AEP	27	05/08
R29	73	2007	2100	47000	non classé	partiel	neige, zen	cours_eau, surplus_AEP	22	05/08
R30	73	1999	1960	59000	non classé	partiel	neige, zen	cours_eau, surplus_AEP	27	05/08

Annexe VI - Corrélations entre paramètres physico-chimiques



Corrélations (Spearman) entre les paramètres au niveau des points de prélèvement d'eau.

Annexe VII - Exemple de retenue d'altitude intégrée écologiquement



(source : R. Delarze (BEB), comm. pers.).

Annexe VIII - Perspectives ; pistes d'améliorations

La volonté de stocker de plus en plus d'eau en montagne semble faire partie des préoccupations de certains acteurs en tant qu'adaptation aux changements climatiques (diminution du volume des glaciers, changement des régimes de précipitations et augmentation des températures). Il est probable que la création de retenues artificielles pour retenir l'eau qui ne serait plus stockée sous forme solide et en différer la restitution devienne une solution privilégiée (cf. Kellner et Brunner 2021), potentiellement à court terme (« programme 100 retenues pour la région » de la stratégie régionale de la région Auvergne-Rhône-Alpes pour l'horizon 2040) et que la question dépasse la simple utilisation de la ressource pour des besoins industriels (production de neige voire d'électricité). Bien que la création de retenues en adaptation aux changements climatiques soit discutable (cf. Valé et Renaud 2020), il apparaît tout de même urgent de commencer dès maintenant à mener une réflexion approfondie quant à une intégration écologique efficace de la conception des retenues à venir.

Il convient avant tout de préciser que rechercher des solutions d'amélioration de contribution à la biodiversité des RA ne vise pas à remplacer les écosystèmes perdus ni à créer des écosystèmes de substitution mais se rapproche plutôt de l'idée du « toit végétalisé » en architecture. Il s'agit en effet de chercher à limiter l'impact de l'ouvrage une fois construit et à favoriser son interaction avec la biodiversité, cela de manière additionnelle aux efforts de conservation des milieux aquatiques et humides naturels réalisés en parallèle.

1. Ingénierie civile et écologique

Le génie végétal est de plus en plus utilisé en alternative ou en complément du génie civil dans les ouvrages soumis à des contraintes hydrauliques, y compris en milieux montagnards (Bonin et al. 2013). Dans ces cas, en plus de répondre aux mêmes attentes mécaniques que le génie civil, le génie végétal permet une meilleure intégration paysagère et surtout une bien meilleure interaction avec la biodiversité en offrant, au sein même de l'ouvrage, des habitats attractifs pour les biocénoses environnantes. S'il ne semble pas possible de s'affranchir totalement du génie civil pour des raisons de sûreté des ouvrages, coupler les techniques de génie végétal à celles de génie civil dans la conception des retenues d'altitude serait bénéfique pour améliorer leur contribution à la biodiversité au sein des domaines skiables. Certaines fonctionnalités (assainissement, filtration des fines, stabilisation du substrat, stabilisation des digues, maintien de végétation en milieux marnant...) pourraient parfois déjà être assurées par des techniques d'ingénierie écologique et fourniraient un meilleur compromis entre usages industriels et prise en compte de la biodiversité. Des techniques de génie végétal pourraient être recherchées/adaptées pour une végétalisation efficace des talus y compris en zone de marnage avec des espèces locales (e.g. fascines d'hélophytes, maintien de semences par géofiles végétaux...). Des zones humides artificielles créées à l'amont de l'alimentation

de la RA, voire de fossés drainants végétalisés, amélioreraient la qualité de l'eau pour les usages industriels (filtration des fines, décantation) mais également sanitaires (assainissement de l'eau), ce qui serait en faveur d'une orientation vers le multi-usages. Elles fourniraient des habitats humides soumis à des contraintes différentes de celles des RA (variations du niveau d'eau, entretien de la flore, prédation par les poissons...). La mise en place de radeaux végétalisés¹⁷ afin de maintenir des habitats malgré le marnage artificiel semble compatible avec la sécurité des ouvrages. Cela sous réserve d'être bien ancrés au fond de la retenue et situés assez loin de l'évacuateur de crues pour ne pas l'obstruer (Laurent Peyras, comm. pers.). La libération de matières en suspension serait négligeable au vu des volumes des ouvrages. Ces radeaux contribueraient également au contrôle des apports excédentaires en nutriments du fait d'une activité photosynthétique par des organes hors d'eau n'étant pas affectés par une augmentation de la turbidité liée à la prolifération du phytoplancton.

2. Écologie et naturalisme

Les milieux aquatiques peuvent constituer l'habitat de nombreuses espèces pour tout ou partie de leur cycle de vie. Ils peuvent également servir de lieu de restauration (e.g. chasses de chiroptères ou d'oiseaux, abreuvement de la faune) ou de repos (étapes migratoires). La mise en place d'observatoires environnementaux dans de nombreux DS fournit aujourd'hui une bonne connaissance des espèces présentes (au moins celles à enjeux de conservation) dont la prise en compte permettraient d'adapter les mesures d'intégration écologique des RA aux communautés locales. Pour certaines espèces la capacité et les modalités de dispersion ont déjà fait l'objet d'études approfondies (e.g. grenouille rousse ; Boncourt 2019, odonates ; cf. Lamouille-Hébert 2020). L'analyse du paysage aquatique en considération de la biologie des espèces serait à prendre en compte dans la gestion des ouvrages ainsi que dans le choix des sites d'implantation. Aussi, la connaissance écologique des espèces végétales locales est nécessaire au développement de techniques de génie végétal adaptées et une réflexion pourrait être menée en relation avec les conservatoires botaniques. Les observations réalisées dans cette étude se limitent à la période estivale mais il serait important d'analyser les interactions entre les espèces présentes et les usages pendant les autres saisons. Certains insectes peuvent passer plusieurs années au stade larvaire aquatique (e.g. odonates), de même que certaines grenouilles ou espèces d'invertébrés peuvent hiverner sous l'eau dans le sédiment. Les RA sont généralement dépourvues de sédiment du fait de l'absence de dépôt ou de curages et subissent de fortes et rapides variations de niveau d'eau en hiver. En connaître les effets sur la faune et la flore sera à prendre en compte dans les choix de rendre ou non certaines RA plus attractives, et pour

¹⁷ e.g. <https://www6.paca.inrae.fr/recover/Zoom-sur/Projet-UIROS> ; <https://aquago.fr/produits/radeau-vegetalise/>

l'établissement d'éventuelles prescriptions de gestion hivernale (e.g. définition d'une hauteur d'eau minimale ; cf. Jumeau et al. 2020).

3. Étendre la vision à d'autres systèmes similaires

Il sera intéressant de croiser les connaissances acquises avec celles liées à d'autres types de retenues car la colonisation de toutes sortes de retenues artificielles (e.g. bassins autoroutiers, bassins d'infiltration de pluviaux...) soulève des questions communes ; favoriser ou empêcher leur fréquentation, quels substituts et améliorations... Il serait aussi pertinent de s'intéresser à la gestion des milieux similaires de la part des autres pays. En suisse, par exemple, tout aménagement économique doit être compensé au niveau écologique. Souvent le choix est fait de reconstruire un nouveau milieu loin de l'ouvrage pour éviter des interactions entre les milieux artificiels et ceux à vocation naturelle (Beat Oertli, comm. pers.). Cela peut s'avérer bénéfique de limiter la connectivité avec les milieux artificiels s'ils s'avèrent être de potentiels pièges écologiques.

4. Orientation vers le « multi-usages »

Actuellement les RA sont principalement destinées à la production de neige et à l'AEP. Toutefois elles sont de plus en plus considérées comme des atouts touristiques. L'orientation des RA vers le multi-usages (e.g. pêche, loisirs estivaux, agriculture, réserves d'eau partagées...) permettrait d'optimiser la ressource (notamment dans les BV où elle est limitée) et d'affranchir les DS du « tout-ski ». Chaque usage devrait toutefois et notamment être considéré au regard de la problématique de la présente étude et des autres usages. Il pourrait être bénéfique pour la biodiversité de compartimenter ces activités dans la RA. Isoler des parties de la RA de la pression de prédation des poissons a par exemple déjà été envisagé dans la configuration d'une RA existante (mise en place de filets) mais semble difficile à mettre en œuvre. Au-delà d'une réflexion technique, la sensibilisation des différents acteurs s'avérerait également utile (e.g. via les fédérations de pêche quant à la propagation de pathogènes des amphibiens avec mise en œuvre de bonnes pratiques ; vérification du statut non infectieux des poissons, désinfection du matériel...).

5. Adaptation des zones d'implantation

La construction en basse altitude pourrait être préférée (topographie, substrat plus étanche en zone alluviale, risques naturels réduits, végétalisation moins contrainte par le climat, plus de possibilités de loisirs...), ce qui peut être plus coûteux énergétiquement (température de l'eau plus élevée et nécessite de pomper jusqu'aux enneigeurs). Techniquement, les terrains les plus propices à la construction des RA sont ceux à topographie douce et généralement occupés par des milieux humides, donc à fort enjeu écologique. Leur destruction nécessiterait une compensation à 200 % et dans certains cas une confrontation avec les activités pastorales. Il semblerait aussi que les enjeux écologiques soient moindres à haute altitude (moins d'espèces) mais que les aleas y soient plus forts.

Les terrains propices à l'implantation des RA semblent donc limités. La tendance actuelle est de construire les nouvelles RA de plus en plus grandes et de les implanter à des altitudes de plus en plus hautes. Une alternative à étudier serait de répartir les nouveaux volumes dans un ensemble de petites RA. Cela permettrait peut-être d'éviter l'impact sur des sites encore vierges et potentiellement éloignés des zones déjà artificialisées et de contourner les zones à fort enjeux avec des projets à moindre emprise individuellement. Aussi, les petites RA seraient moins sujettes à un classement réglementaire, ce qui serait favorable aux possibilités d'intégration de génie végétal dans leur conception.

6. Gestion adaptée de la maintenance et des utilisations

Actuellement l'auscultation des ouvrages nécessite des manœuvres très contraignantes pour la biodiversité (e.g. curages, vidanges, fauches des berges). Développer et/ou généraliser des méthodes de contrôle des ouvrages plus favorables pour les RA où ce n'est pas le cas (e.g. réseau de piézomètres alentours, mesures de niveau de drains, contrôle visuel par des plongeurs, etc) limiteraient ces contraintes. L'absence de vidange systématique permettrait aussi de bénéficier des eaux de fonte, donc de limiter les prélèvements. Une réflexion pourrait être menée sur la gestion des niveaux d'eau adaptée à l'écologie des espèces et aux usages. Il serait également nécessaire de vérifier, en collaboration avec les services de l'état et les spécialistes du génie civil, dans quelle mesure la végétation terrestre herbacée et ligneuse pose ou non problème sur tout ou partie du talus amont. Cela permettrait d'harmoniser les pratiques entre domaines skiables et rendrait vraisemblablement possible la végétalisation au moins partielle de l'ensemble des RA.

7. Adaptation de la conception

Au vu des techniques actuelles utilisées pour la conception des RA, aménager des zones à faible profondeur et pentes très douces pourrait déjà être réalisable. Les rives sont d'une grande importance pour l'accueil de la biodiversité. Ces zones pourraient être favorables à l'accumulation de fines et à l'installation d'une végétation aquatique ou terrestre selon la saisonnalité du marnage. Elles pourraient alors fournir le gîte et des ressources alimentaires pour tout un cortège faunistique. Il serait également envisageable de border certaines rives de risbermes voire petites dépressions pouvant se comporter en mares, permanentes ou temporaires selon leur degré de connexion à la retenue lors des hautes eaux, et fournir des refuges vis-à-vis de la prédation des poissons pour les têtards. Il s'agirait donc de modeler le remblai et/ou le confinement. Les aménagements seront à adapter aux conditions locales, notamment à l'altitude de la RA.

Ces adaptations impliqueraient potentiellement de perdre une partie du volume utile de la retenue et d'adapter les usages à l'écologie des espèces, ce sont donc des compromis entre besoins industriels et prise en compte de la biodiversité qui doivent être établis.

Résumé

Les retenues d'altitude sont des ouvrages permettant de stocker l'eau destinée à la production de neige dans les domaines skiables et d'en disposer en abondance au moment opportun. On dénombre 145 retenues d'altitude dans les 4 départements des Alpes du Nord, cumulant un total de 130 ha de surface en eau et plus de 7,5 millions m³. De nombreux projets sont encore en cours et ces ouvrages sont amenés à faire partie intégrante du paysage aquatique. La visite de 28 ouvrages a fourni un état des lieux sur leurs principales caractéristiques au regard de leur contribution à la biodiversité. Si l'évolution de leur conception depuis les années 1990 a permis de limiter leurs interactions défavorables avec la biodiversité, rien n'est actuellement mis en œuvre pour favoriser ces interactions. Certaines espèces, notamment des amphibiens et macroinvertébrés, utilisent déjà ces milieux. Dans un contexte d'érosion de la biodiversité et de régression des milieux humides, des pistes peuvent être envisagées pour rendre les ouvrages plus attractifs à des biocénoses variées et assurer le maintien des populations tout en évitant d'éventuelles pratiques défavorables.

Abstract

Mountain reservoirs are structures allowing to store water for snow production in ski resorts areas and to dispose of it in abundance at the appropriate time. There are 145 mountain reservoirs in the 4 departments of the Northern Alps, cumulating a total of 130 ha of water surface and more than 7.5 million m³. Many projects are still underway and these reservoirs will become an integral part of the aquatic landscape. The visit of 28 reservoirs enabled us to identify their main characteristics with regard to their contribution to biodiversity. The evolution of reservoir design since the 1990s has limited their unfavorable interactions with biodiversity, but nothing is currently being implemented to promote these interactions. Some species, especially amphibians and macroinvertebrates, already use these water bodies. In a context of erosion of biodiversity and decline of wetlands, some ideas can be considered to make mountain reservoirs more attractive to diversified communities and to maintain local populations while avoiding possible unfavorable practices.