



BC Diagnose Approfondie des lacs de l'Archeboc 12.2013.TELEOS&FD73



Programme pluriannuel d'étude des lacs piscicoles de haute altitude de Savoie – 2010 à 2012

Diagnoses approfondies des lacs de l'Archeboc

Etude de l'état écologique et des potentiels piscicoles des lacs Blanc, Verdet et Noir



Décembre 2013 TELEOS & FSPPPMA.



Liste des participants à l'étude de l'état écologique et des potentiels piscicoles du lac Blanc de l'Archeboc

Fédération des APPMA de Savoie (maître d'ouvrage et d'œuvre, analyses ichtyologiques, organisation logistique)s

- Bertrand LOHEAC (coordinateur, en charge du programme, rapporteur) ;
- Manuel VALLAT ;
- Vincent COURT ;
- Fabrice PIATEK ;
- Jean Yves VALLAT ;
- Gaëtan LOUBARESSE (stagiaire) ;
- Xavier BONFILS (stagiaire) ;
- Rosette VALLAT (bénévole) ;
- Steve CAPUÇON (bénévole).

Aquatix et Aquaventures (prélèvements en plongées)

- Gregory TOURREAU
- Jean Marc BEL
- François VOIDE
- Manon BEL

Teleos-suisse (analyses écologiques)

- François DEGIORGI (rapporteur)
- Hervé DECOURCIERE
- Jonathan PARIS
- Michael GOGUILLY
- Etienne CHANEZ
- Sylvain MARTIN
- Jean Paul VERGON
- Aurélie VERGON DARTOIS
- Ludovic GOGUILLY
- Stéphane ECLERC

Labo QUALIO Université de Franche-Comté (analyses chimiques)

ONEMA (appui logistique et méthodologique)

- Jean Claude RAYMOND

Sommaire

INTRODUCTION : CONTEXTE, PROBLEMATIQUE ET LOCALISATION	3
1. MILIEU ET METHODES	5
1.1. CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES DES 3 LACS.....	5
1.1.1. Morphologie et alimentation du Lac Blanc	5
1.1.2. Morphologie et alimentation du Lac Verdet.....	7
1.1.3. Morphologie et alimentation du Lac Noir.....	8
1.2. DELIMITATION DU BASSIN VERSANT ET OCCUPATION DU SOL.....	9
1.2.1. BV du Lac Blanc	9
1.2.2. BV du Lac Verdet.....	10
1.2.3. BV du Lac Noir.....	10
1.3. GEOLOGIE DES BASSINS VERSANTS DES LACS DE L'ARCHEBOC.....	12
1.4. INVESTIGATIONS STANDARD MISES EN ŒUVRE.....	13
2. ETUDE DES COMPOSANTES PISCICOLES	14
2.1. ESPECE EN PRESENCE ET TYPE DE GESTION PISCICOLE.....	14
2.1.1. Peuplement piscicole potentiel des petits lacs d'altitude	14
2.1.2. Gestion halieutique des lacs de l'Archeboc.....	14
2.2. L'ICHTYOFAUNE DU LAC BLANC (2010).....	15
2.2.1. Protocole des « Filets Verticaux »	15
2.2.2. Application des « Filets Verticaux » au lac Blanc (2010).....	16
2.2.3. Structures du peuplement de poisson du lac Blanc en 2010.....	17
2.2.4. Premier bilan sur les potentiels piscicole du lac Blanc.....	19
2.3. L'ICHTYOFAUNE DES LACS VERDET ET BLANCS (2012).....	20
2.3.1. Protocole CEN.....	20
2.3.2. Application du protocole CEN aux lacs Verdet et Noir.....	20
2.3.3. Structures des peuplements des lacs Verdet et Noir.....	21
2.3.4. Bilan intermédiaire sur les potentiels piscicoles :.....	25
3. ETUDE DES BIOCENOSSES BENTHIQUES.....	26
3.1. METHODOLOGIE.....	26
3.1.1. Principes de l'IBL.....	26
3.1.2. Protocole d'échantillonnage	26
3.1.3. Calcul de l'indice IBL.....	27
3.2. APPLICATION DE L'IBL AUX LACS DE L'ARCHEBOC	29
3.2.1. Composition de l'endobenthos des trois lacs.....	29
3.2.3. Calcul des IBL et interprétations directes	33
3.3. BILAN SUR LES CAPACITES BENTHIQUES DES LACS DE L'ARCHEBOC	36
3.3.1. Classification et typologie fonctionnelle.....	36
3.3.2. Potentiel benthique et production piscicole.....	37
3.3.3. Bilan sur l'application de l'IBL aux lacs d'altitude.....	38

4. METABOLISME PHYSICO-CHIMIQUE DES LACS DE L'ARCHEBOC.....	39
4.1. PHYSICO-CHIMIE DES COLONNES D'EAU.....	39
4.1.1. <i>Physicochimie de la colonne d'eau du lac Blanc.....</i>	<i>39</i>
4.1.2. <i>Physicochimie de la colonne d'eau du lac Verdet.....</i>	<i>40</i>
4.1.3. <i>Physicochimie de la colonne d'eau du lac Noir.....</i>	<i>41</i>
4.2. CHIMIE DES MASSES D'EAU.....	42
4.2.1. <i>Chimie de la masse d'eau dans le lac Blanc.....</i>	<i>42</i>
4.2.2. <i>Chimie de la masse d'eau dans le lac Verdet.....</i>	<i>43</i>
4.2.3. <i>Chimie de la masse d'eau dans le lac Noir.....</i>	<i>44</i>
4.3. CHIMIE DES SEDIMENTS DES LACS DE L'ARCHEBOC.....	45
4.3.1. <i>Chimie des sédiments du lac Blanc.....</i>	<i>45</i>
4.3.2. <i>Chimie des sédiments du lac Verdet.....</i>	<i>46</i>
4.3.2. <i>Chimie des sédiments du lac Noir.....</i>	<i>48</i>
4.4. CHIMIE DE LA NEIGE SUPERFICIELLE DES 3 BV.....	49
4.4.1. <i>Teneur de la neige en éléments nutritifs.....</i>	<i>49</i>
4.4.2. <i>Teneur de la neige en élément trace métalliques.....</i>	<i>50</i>
4.4.3. <i>Bilan sur les signes de pollution atmosphérique.....</i>	<i>50</i>
4.5. BILAN SUR LA CHIMIE ET LA PHYSICO-CHIMIE DES TROIS LACS.....	51
4.5.1. <i>Niveau trophique des lacs de l'Archeboc.....</i>	<i>51</i>
4.5.2. <i>Potentiels de recyclage de la MO.....</i>	<i>51</i>
4.5.3. <i>Contamination métallique.....</i>	<i>52</i>
5. SYNTHESE DIAGNOSTIQUE ET RECOMMANDATIONS.....	53
5.1. CAPACITES BIOGENES LIEES A LA QUALITE PHYSIQUE DES LACS.....	53
5.1.1. <i>Mosaïque d'habitats du Lac Blanc.....</i>	<i>54</i>
5.1.2. <i>Mosaïque d'habitats du Lac Verdet.....</i>	<i>55</i>
5.1.3. <i>Mosaïque d'habitats du Lac Noir.....</i>	<i>56</i>
5.2. METABOLISME THERMIQUE.....	57
5.2.1. <i>Dispositif d'enregistrement thermique.....</i>	<i>57</i>
5.2.2. <i>Métabolisme thermique du lac Blanc.....</i>	<i>58</i>
5.2.3. <i>Métabolisme thermique des lacs Verdet et Noir.....</i>	<i>59</i>
5.2.4. <i>Bilan sur l'approche du métabolisme thermique.....</i>	<i>59</i>
5.3. BILAN SUR LES POTENTIELS ET LE FONCTIONNEMENT DES 3 LACS.....	60
5.3.1. <i>Principes d'une typologie piscicole fonctionnelle.....</i>	<i>60</i>
5.3.2. <i>Type et potentiel piscicole du lac Blanc.....</i>	<i>62</i>
5.3.3. <i>Type et potentiel piscicole du lac Verdet.....</i>	<i>62</i>
5.3.4. <i>Type et potentiel piscicole du lac Noir.....</i>	<i>63</i>
5.4. RECOMMANDATIONS DE GESTION PISCICOLE ET HALIEUTIQUE.....	64
5.4.1. <i>Protection des lacs de l'Archeboc.....</i>	<i>64</i>
5.4.1. <i>Validation de la gestion piscicole du lac Blanc.....</i>	<i>65</i>
5.4.2. <i>Acclimatations complémentaires (lacs Verdet et Noir).....</i>	<i>65</i>
5.4.3. <i>Modulation de la pression de pêche.....</i>	<i>66</i>
5.4.5. <i>Propositions pour un suivi rationnel.....</i>	<i>67</i>
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	68
BIBLIOGRAPHIE CITEE ET UTILISEE.....	70
ANNEXES.....	73

Étude de l'état écologique et des potentiels piscicoles des lacs de l'Archeboc

Introduction : contexte, problématique et localisation

Depuis 2010, la Fédération de Pêche et de Protection du Milieu Aquatique de Savoie a engagé une démarche de connaissance des lacs de montagne, avec le soutien de l'Agence de l'Eau RMC et d'EDF. Cette approche s'appuie sur les travaux effectués par TELEOS en collaboration avec la fédération de pêche de l'Isère et l'ONEMA (TELEOS 2007-2008). Ses objectifs sont triples.

Elle vise d'abord à améliorer les connaissances sur le fonctionnement écologique des plans d'eau d'altitude qui constituent des écosystèmes à la fois fragiles et originaux. Parallèlement, elle a pour but de fonder la gestion halieutique des lacs de montagne sur la prise en compte de leurs capacités biogènes potentielles et de leur état de santé de façon à les valoriser sur le plan halieutique tout en les protégeant. Enfin, il pourra en être déduit la proposition d'un système de suivi scientifique adapté à ces milieux « sentinelles » (LOHEAC et al. 2012).

Dans cette optique, la fédération de pêche du département de la Savoie, a décidé d'appliquer une démarche de diagnose à deux niveaux :

- une série d'études « allégées » dans une vingtaine de lacs d'altitude répartis dans différents massifs du département 73 ;
- trois études approfondies et comparatives, ciblées sur les lacs du vallon du Clou, dans le secteur de l'Archeboc (fig. 1).

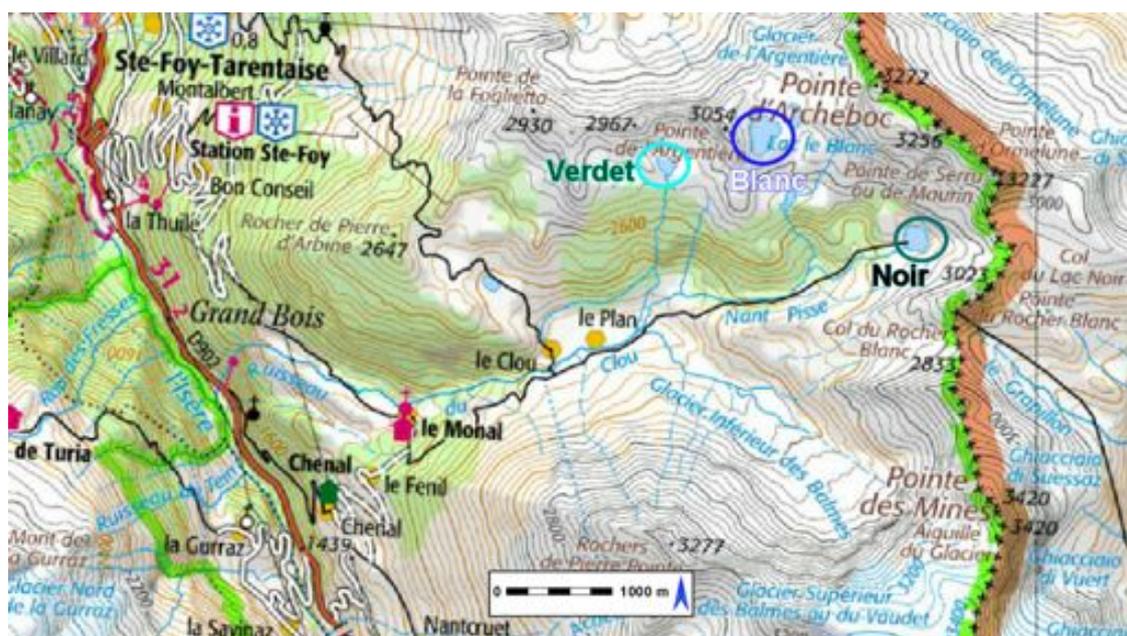


Figure 1. Localisation des lacs Blanc, Verdet et Noir de l'Archeboc (carte IGN-géoportail.fr)

En effet, les lacs de l'Archeboc, sont situés dans un rayon de moins d'un kilomètre et culminent dans une tranche d'altitude similaire comprise entre 2618 et 2850 m. En revanche l'orientation et la nature de leurs bassins versants apparaissent différentes. En outre, comme leurs noms l'indiquent, les masses d'eau respectives des lacs Blanc, Verdet, Noir et montrent des couleurs contrastées. Or, d'après CHACORNAC (1985) ou MARTINOT & RIVET (1987), ce paramètre constitue un descripteur synthétique très global du fonctionnement des lacs d'altitude.

Dans cet ensemble de trois lacs, le lac Blanc constitue le plus proche du type « polaire » très peu productif décrit par ces derniers auteurs. Pourtant, les cristivomers introduits par les pêcheurs en 1990 semblent s'y être acclimatés et avoir fait souche. Aussi il a été décidé de commencer la série des trois études comparatives par ce plan d'eau. Le diagnostic approfondi réalisé sur ce lac en 2010 a donné lieu à un premier rapport, édité en 2011.

Le lac Verdet, pourtant à une altitude proche, apparaît beaucoup plus productif, à la fois parce qu'il est séparé des névés en été et grâce à la couleur qui lui donne son nom et qui évoque une production algale notoire. Il n'a pu être étudié en 2011 à cause d'une succession d'épisodes de mauvais temps qui en ont, à plusieurs reprises, interdit l'accès par hélicoptère.

Il a donc été étudié en 2012, en même temps que le lac Noir. Ce dernier appartient au plan d'eau dont le métabolisme est influencé par d'important flux de matière minérale apportée par un glacier « sale » ou sérac, tout proche.

Durant les deux années d'étude (2010 et 2012) les mêmes analyses standard ont été appliquées au trois plans d'eau. Les investigations ont été choisies et logiquement articulées de façon à obtenir des images comparables de la qualité de chacun des différents compartiments écosystémiques tout en fournissant des principes d'interprétation orientés sur les capacités piscicoles.

Dans un premier temps, les capacités biogènes globales ont été évaluées en étudiant les structures semi quantitative de l'ichtyofaune et du benthos. En effet, les poissons et les macroinvertébrés benthiques constituent des indicateurs synthétiques des potentiels écologiques et de leur état fonctionnel.

Dans un deuxième temps, l'exploration du métabolisme chimique de chacun des trois plans d'eau a permis de préciser leurs potentiels trophiques et leurs états fonctionnels respectifs. Une recherche des causes des éventuels dysfonctionnement a également été amorcée à partir des analyses de la composition chimique de la neige relictuelle des névés de fin de saison.

Dans un troisième temps, la nature et les éventuelles limites des capacités biogènes de chaque plan d'eau ont été réinterprétées en tenant en compte du type écologique, et des capacités habitationnelles de chaque plan d'eau.

Dans un quatrième temps, un premier ensemble de conseil de gestion, de protection et de valorisation des trois lacs a été fondé sur le diagnostic fonctionnel. Il en a aussi été déduit des modalités de gestion halieutique et de suivi scientifique.

1. Milieu et méthodes

1.1. Caractéristiques géographiques des 3 lacs

Les lac Blanc, Verdet et Noir s'étendent respectivement sur 7,7, 1,9 et 3,9 ha pour des altitudes respectives de 2 850, 2 727 et 2 618 mètres (tab. 1). Leurs profondeurs maximales atteignent respectivement 42, 21 et 23 mètres. Compte tenu de leurs surfaces restreintes, ces plans d'eau possèdent un coefficient de creux marqué, en particulier pour le lac Blanc.

Descripteurs	Unités	Lac Blanc	Lac Verdet	Lac Noir
Localisation				
Commune	-	Ste Foy Tarentaise	Ste Foy Tarentaise	Ste Foy Tarentaise
X centre	Long.	6° 57' 58"		
Y centre	Lat.	45° 34' 44"		
Caractéristiques du BV				
Superficie topographique	ha	101	49	124
Altitude moyenne	m	3 050	2 857	2 995
Point culminant	m	3 272	3 053	3 227
Orientation du bassin		SW	S	SW
Dominante géologique		Micaschistes - gneiss	Micaschistes - gneiss	Calcaire - micaschistes
Occupation des sols				
Névés (en fin d'été)	%	12	Trace	6
Minéral (dalles, bloc, éboulis)	%	82	84	75
Lacs ou mares	%	8	5	3
Pelouse (pacage ovin)	%	-	11	16
Forêt	%	-	-	-
Morphologie du plan d'eau				
Altitude	m	2 850	2 727	2 618
Profondeur maximale	m	42	23	18
Superficie	ha	7,7	2,1	3,9
Périmètre	m	1 193	668	803
Sinuosité	-	1,26	1,29	1,14
Proportion de zones littorales	%	8 %	23 %	19 %
Coefficient de creux		0,158	0,151	0,091
Hydrologie				
Alimentation		Sources sous-lacustres Affluents temporaires	Deux tributaires permanents + temporaires	Un tributaire permanent + temporaires + sources ?
Exutoire		Pertes sous-lacustres, vers le torrent du Clou	Emissaire = ruisseau des lacs Verdet, vers le Clou	Emissaire = ruisseau du lac Noir, vers le Clou

Tableau 1. Caractéristiques géographiques globales des lacs étudiés

1.1.1. Morphologie et alimentation du Lac Blanc

La zone littorale est très réduite (fig. 2). Le lac, de forme sub-triangulaire, est peu découpé. Le coefficient de sinuosité de la ligne de rivage ne dépasse guère 1,2.

Le plan d'eau est majoritairement alimenté par la fonte des névés dont certains atteignent à la fin de l'hiver une épaisseur importante. Les circulations hydriques sont complexes. En effet, d'une part, le réseau de faille ou / et d'écoulements hyporhéiques alimente des sources sous lacustres difficiles à localiser. De même, l'exutoire, essentiellement sous-terrain, percole à travers l'ancien verrou glaciaire de la rive sud ouest.

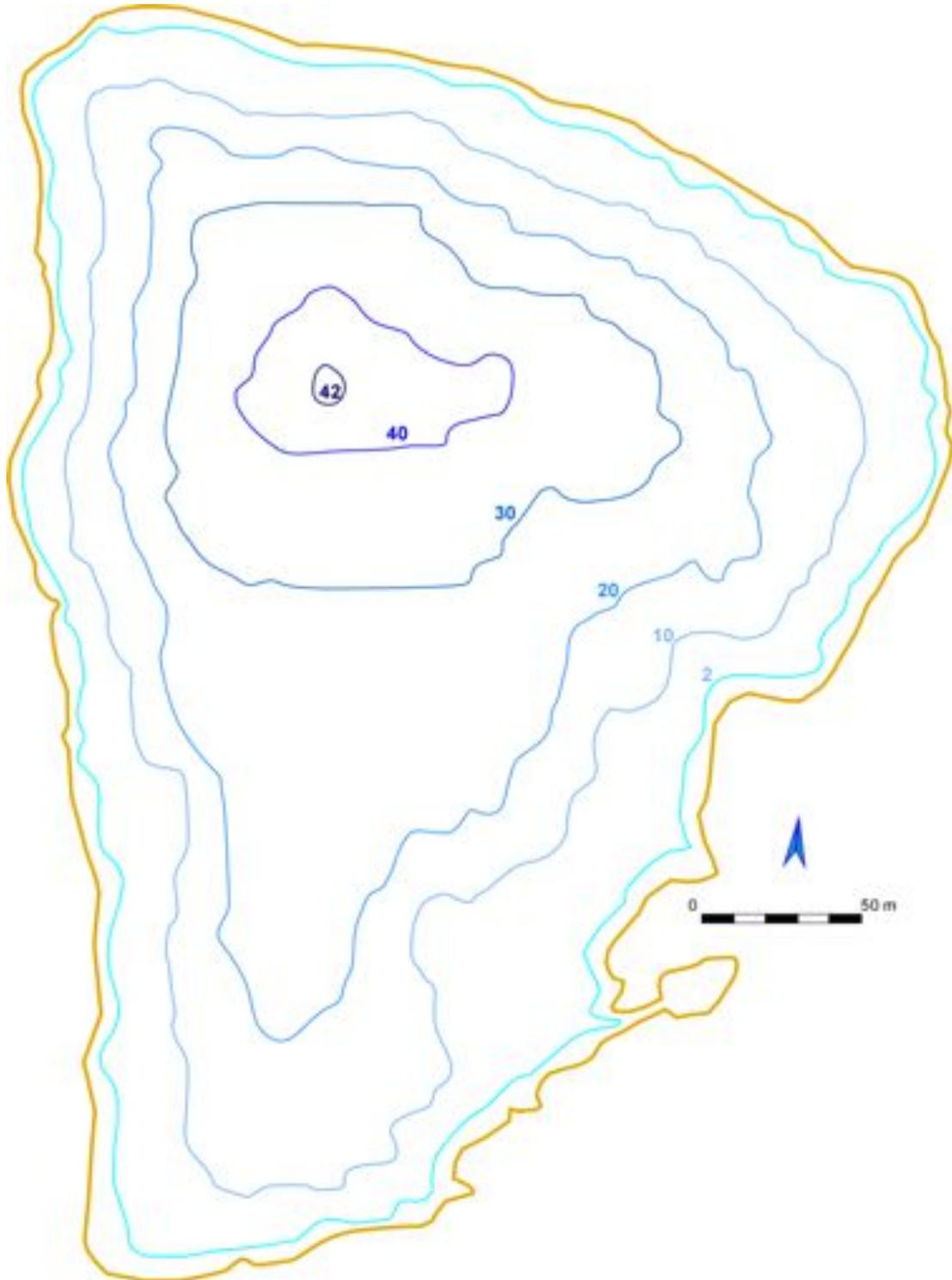


Figure 2. Carte bathymétrique du lac Blanc de l'Archeboc

1.1.2. Morphologie et alimentation du Lac Verdet

Le lac Verdet est plus petit et moins profond, mais un peu plus découpé que le lac Blanc (fig. 3). Le coefficient de sinuosité du rivage s'approche en effet de 1,3. Sa bathymétrie est aussi relativement plus contrastée puisqu'elle comporte un plus grand nombre de hauts-fonds et que les isobathes -2 m et -5 m sont très découpées.

Le plan d'eau est alimenté par la fonte des névés ainsi que par des ruisseaux dont les deux plus importants apparaissent pérennes. Il collecte également l'émissaire du petit lac Verdet qui le joute sur son flanc Est. L'exutoire du lac est constitué d'un torrent permanent, le ruisseau des Lacs Verdets, qui conflue avec le ruisseau du Clou après un court linéaire (1 650 m environ). Ce ruisseau servait aussi à l'alimentation en eau du hameau du Clou.

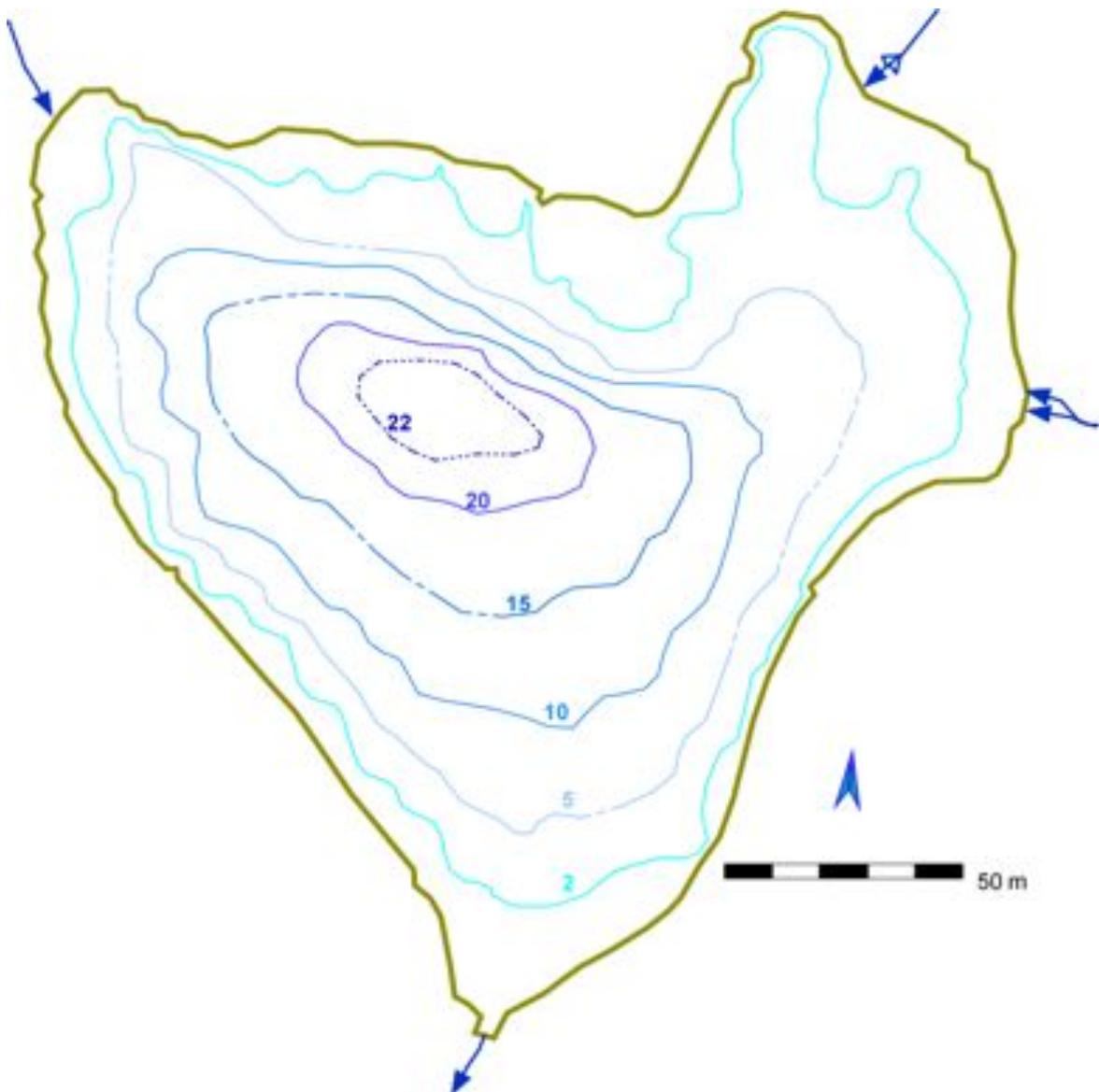


Figure 3. Carte bathymétrique du lac Verdet de l'Archeboc

1.1.3. Morphologie et alimentation du Lac Noir

La cuvette du lac noir est de forme ovoïde. Sa ligne de rivage n'est que faiblement sinueuse (fig. 4). En revanche ses fonds, émaillés de cuvettes à -5 m et parsemés de gros blocs immergés entre -2m et -5m, sont hétérogènes.

Ce lac est alimenté par trois affluents dont deux apparaissent permanent. Son exutoire alimente le ru du Lac Noir, qui se jette dans le Nant Pisse après un cours torrentueux d'un peu plus d'un kilomètre. Ce deuxième ruisseau conflue avec le ruisseau du Clou quelques centaines de mètres plus en aval.

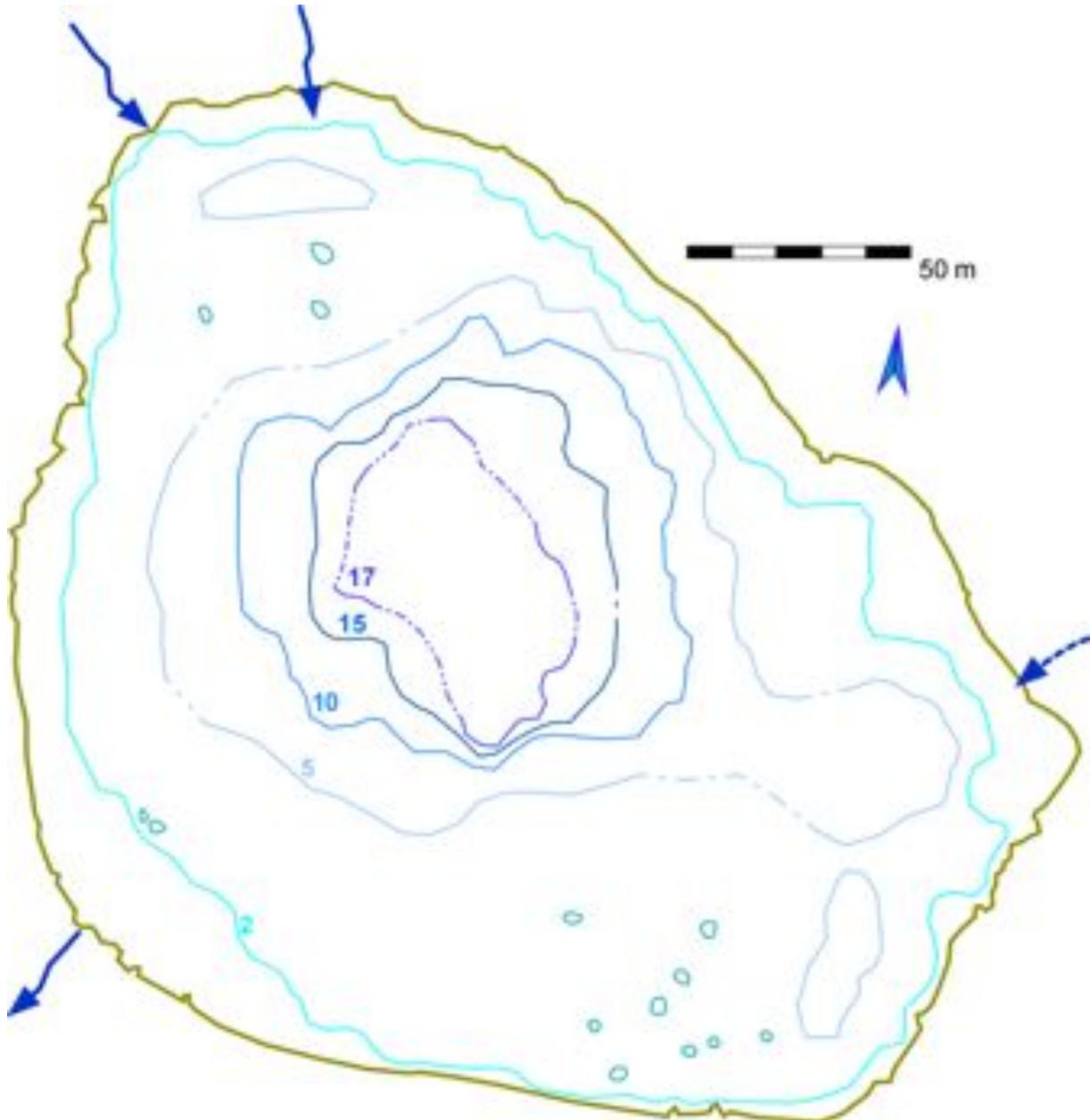


Figure 4. Carte bathymétrique du lac Noir de l'Archeboc

1.2. Délimitation du bassin versant et occupation du sol

1.2.1. BV du Lac Blanc

Le bassin versant du lac Blanc s'étend sur environ 95 ha. Le réseau de faille dont il est parcouru, combinés avec l'étendue et la forme des éboulis très poreux rend sa délimitation précise sujette à caution.

Son point culminant, la pointe de l'Archeboc, s'élève à 3 272 m. La surface est uniquement constitués par des pierriers, des dalles et blocs rocheux ainsi que par des névés dont certains sont permanents (fig. 5).

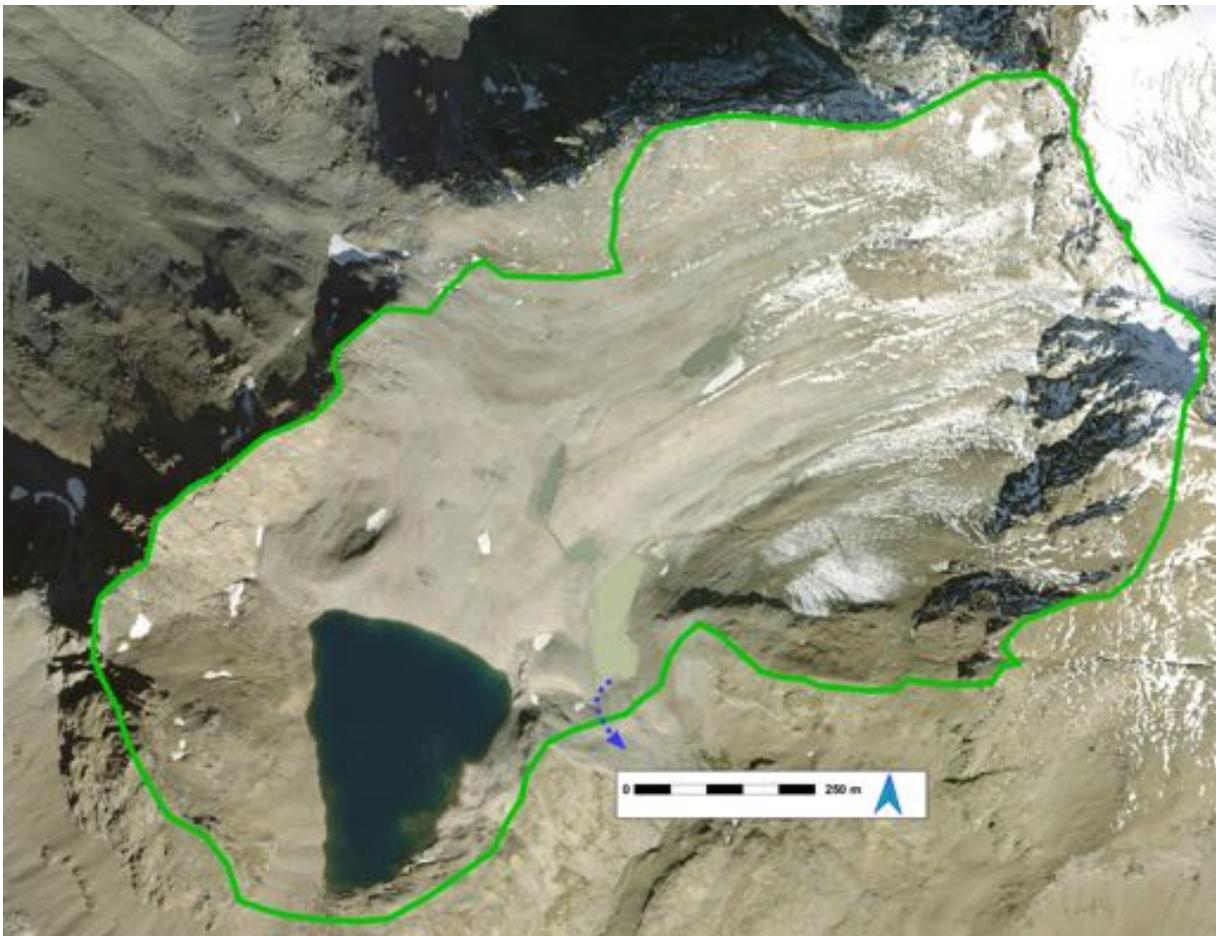


Figure 5. Bassin versant du lac Blanc de l'Archeboc (photo aérienne IGN, géoportail.fr.)

Cet *impluvium* comporte aussi des pièces d'eau peu profondes, glaciées plus de 6 mois par an. La plus aval culmine une altitude inférieure d'un mètre à celle du lac Blanc auquel elle semble reliée par des écoulements sous-terrains. *A contrario*, le plus grand de ces plans d'eau est susceptible, lorsqu'il déborde ou qu'il est surmonté d'un névé en débord, de ménager un autre exutoire au bassin versant, en détournant donc une partie du débit d'alimentation directement vers le torrent du Clou.

1.2.2. BV du Lac Verdet

Le bassin versant du lac Verdet s'étend sur un peu plus de 49 ha, à une altitude comprise entre 3053 et 2727 mètres. Il est orienté plein sud (fig. 6).

Sa surface est surtout composée de pierriers, dalles et blocs, mais elle comporte quelques hectares de pelouses. Elle inclut aussi une deuxième pièce d'eau, le « petit » lac Verdet, qui communique avec le lac principal par un isthme de quelques dizaines de mètres de long.

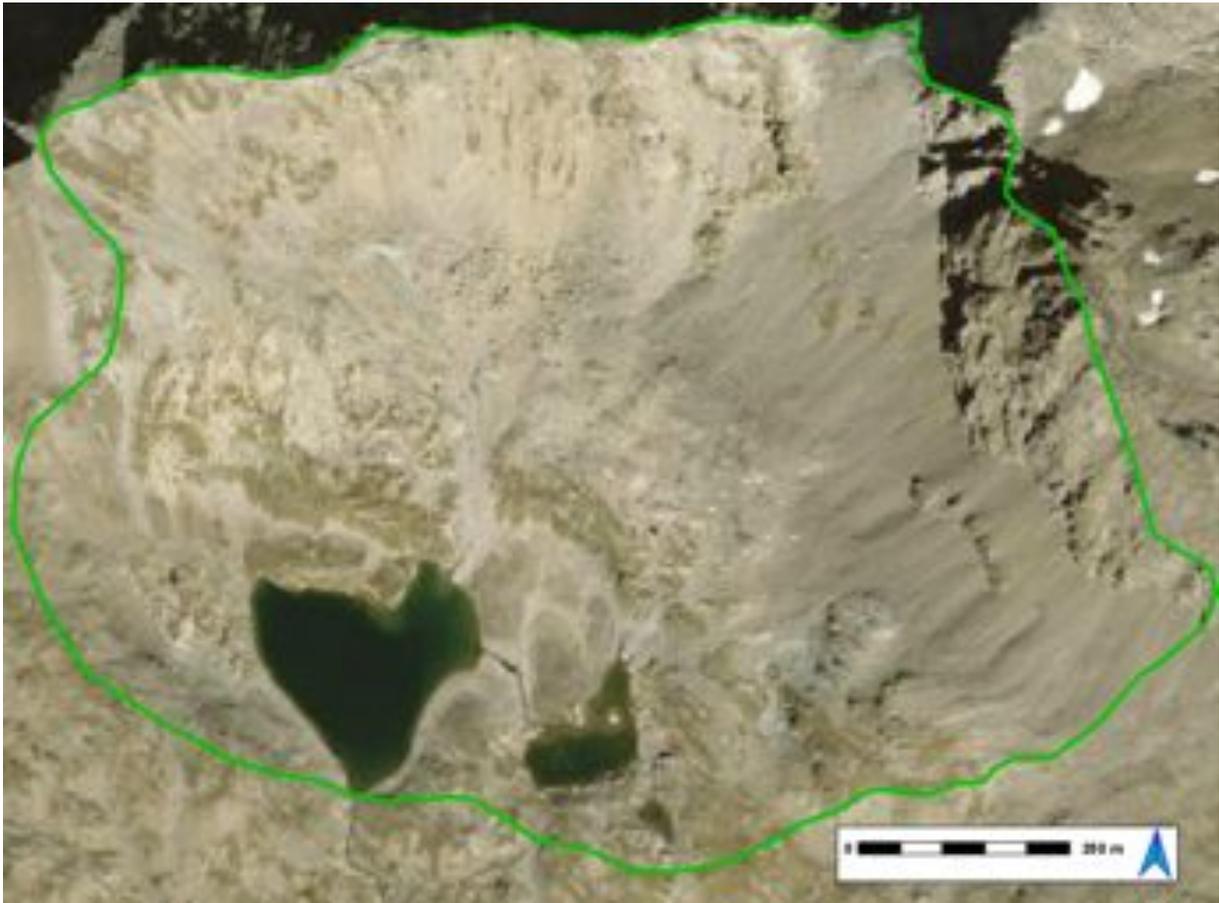


Figure 6. Bassin versant du lac Verdet de l'Archeboc (photo aérienne IGN, géoportail.fr.)

BV du Lac Noir

Le lac Noir est alimenté par un bassin versant d'environ 124 ha dont le point culminant s'élève à 3 227 mètres d'altitude. La surface de cet *impluvium* est dominée par des pierriers, dalles et blocs rocheux (fig. 7). L'activité du glacier de l'Ormelune, tout proche, est susceptible de nourrir les versants ainsi que le chevelu hydrographique puis, *in fine*, le lac, d'éboulis et de moraines actuelles. Le lac est bordé sur ses versant proches de quelques pelouses à l'extension limitée.

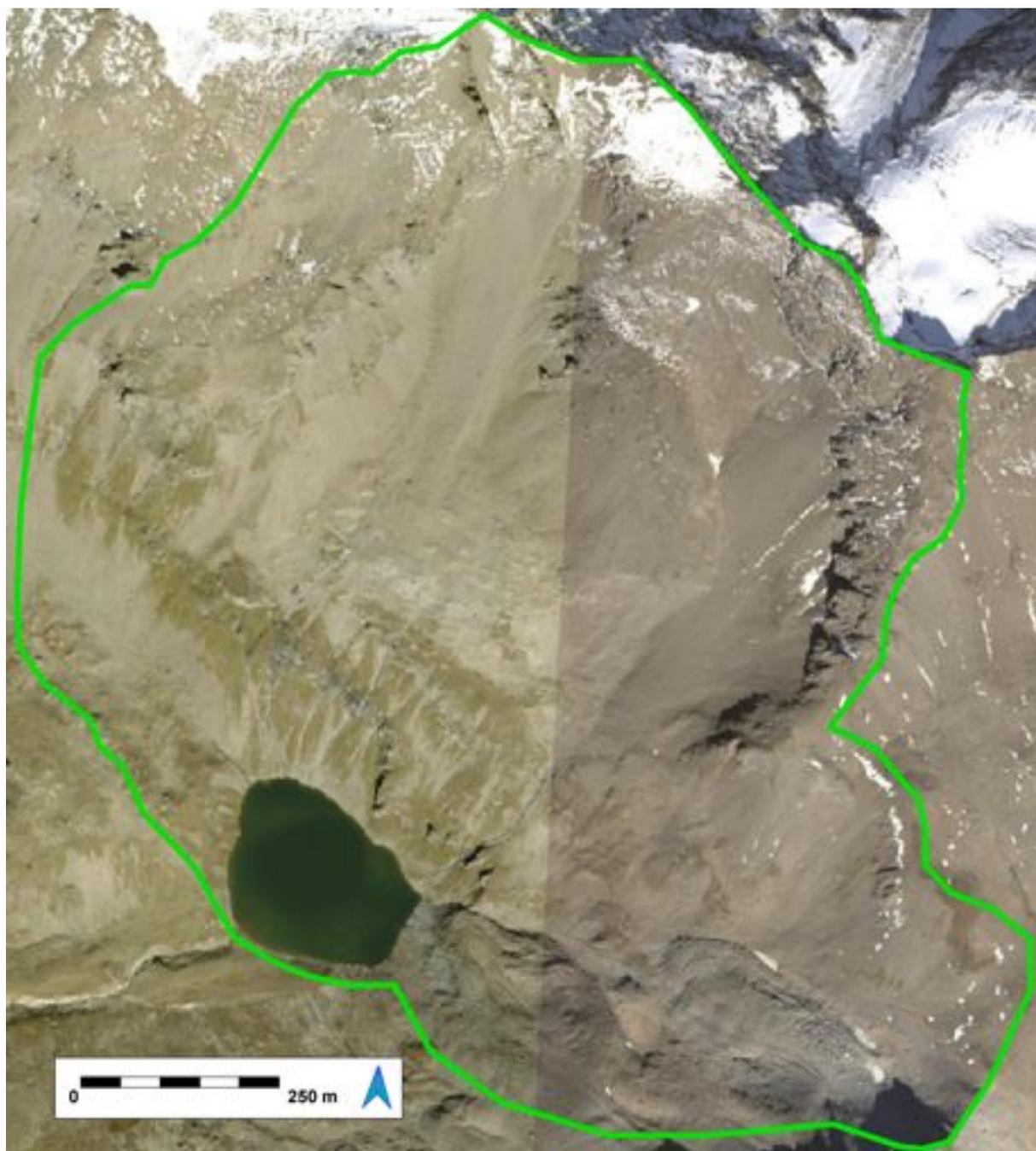


Figure 7. Bassin versant du lac Noir de l'Archeboc (photo aérienne IGN, géoportail.fr.)

1.3. Géologie des bassins versants des lacs de l'Archeboc

Les lacs de l'Archeboc se nichent dans le socle de la Vanoise septentrionale. Ce massif cristallophyllien fait partie de la zone alpine interne dite du Briançonnais.

Aussi, la géologie des bassins versants des lacs Blanc et Verdet est-elle majoritairement métamorphique (fig. 8). Une grande partie de leur surface est recouvert par des pierriers et éboulis constitués de matériels glaciaires wurmiens et récents charriés par l'ancien glacier d'Argentière, encore cartographié au XIXe siècle (cf. carte d'état de 1820-1866, annexe 1).



Figure 8. Géologie des versants des lacs de l'Archeboc (source infoterre.brgm.fr, carte géologique au 1/50 000^e, feuille de Sainte-Foy Tarentaise)

La plupart des terrains affleurants sont constitués de micaschistes indifférenciés antépermien, de Gneiss du Sapey permien, ainsi que de quartzites phylliteux du Permo-Trias. On observe toutefois un affleurement localisé de houiller productif dans la partie apicale du bassin versant du lac Blanc.

Les micaschistes indifférenciés antépermien constituent aussi la majorité du bassin versant du lac noir. Ils sont en grande partie recouverts d'éboulis récents, eux-mêmes nourris par les moraines actuelles du glacier d'Ormelune.

Surtout, les versants du lac Noir comportent quelques affleurements notoires de marbres chloriteux et de dolomies cagneulisées du Trias. Ces terrains sédimentaires, quoique minoritaires, sont reliés par une faille importante à la cuvette lacustre qui pourrait en outre reposer partiellement sur des marbres blancs du Malm.

Les sites miniers ou métallifères de ce secteur sont très peu connus, mais des minéralisations particulières sont signalées par plusieurs auteurs. DEBELMAS (1988-1991) cite en particulier des mines de fer, de zinc, d'uranium, de plomb et d'argent dans la Haute Tarentaise.

La notice de la carte géologique de S^{te}-Foy-Tarentaise au 1/50 000^e indique l'existence de filons d'amiante dans la galerie du Clou ainsi qu' site d'exploitation de galène (minerai de plomb) sous le glacier d'Argentière. La tradition orale mentionne même une mine d'or légendaire dans le vallon du Clou (PNR Vanoise 2007)...

1.4. Investigations standard mises en œuvre

Le diagnostic sur le fonctionnement écologique du lac Blanc a été effectué en 2010 à l'aide d'analyses biologiques et mésologiques appliquées de façon coordonnée (tab. 2). L'utilisation coordonnée des protocoles standardisés proposés par DEGIORGI et al. (2008) a permis d'obtenir des données fiables et comparables.

Compartiment	Méthodes de mesures et descripteurs	Lac Blanc	Lac Verdet	Lac Noir
Poisson	Pêches selon protocole « Filets verticaux »	Du 04 au 05/08/10		
	Pêches selon protocole CEN adapté au lac d'altitude		Du 19 au 21/07/2012	Du 01 au 03/08/2012
Benthos	Indice Biologique lacustre (IBL)	05/08/2010	01/08/12	2/08/12
Phytoplancton	Concentrations en pigments algaux	05/08/2010	02/08/12	02/08/12
Chimie de l'eau	Physico-chimie de la colonne d'eau	04/08/2010	01/08/12	02/08/12
	Analyse nutriments de la colonne d'eau	05/08/2010	02/08/12	02/08/12
	Analyse de l'eau de neige résiduelle	05/08/2010	02/08/12	02/08/12
Sédimentologie	Chimie des sédiments (dont métaux lourds)	05/08/2010	02/08/12	02/08/12
Morphologie	Bathymétrie et cartographie des habitats	03/08/2010	19/07/2012	1/08/2012
Température	Thermographie	Du 15/08/2010 au 2/09/2011	Du 24/09/2010 au 2/09/2011	

Tableau 2. Listes et dates des investigations mises en œuvre dans le lac Blanc de l'Archeboc

La même démarche a été appliquée aux lacs Verdet et Noir entre 2011 et 2012 (tab. 2). Seule la méthode de pêche a changé, la Fédération de Pêche de Savoie ayant adopté et mis en œuvre le protocole CEN modifié et adapté aux lacs de montagne.

2. Etude des composantes piscicoles

2.1. Espèce en présence et type de gestion piscicole

2.1.1. Peuplement piscicole potentiel des petits lacs d'altitude

La plupart des petits lacs alpins sont originellement a-piscicoles depuis les dernières glaciations, en raison de leur altitude et des difficultés de circulation engendrées par la forte pente de leurs tributaires comme de leurs exutoires, quand ils existent. Seuls quelques rares plans d'eau sont peuplés naturellement par des truites qui peuvent y accéder depuis leur émissaire, ou, plus rarement encore, depuis leur afférences.

Malgré cette absence historique d'ichtyofaune, certains systèmes sont susceptibles de s'avérer propices au développement harmonieux d'une ou plusieurs espèces de poisson. Cependant, les conditions mésologiques, très contraignantes, ne permettent au mieux la viabilité que de certaines espèces et dans un nombre limité.

Or, jusqu'à présent, la plupart des démarches de gestion halieutique ont reposé sur des introductions de plusieurs espèces, parfois répétées ou déclinées, souvent sans être raisonnée. Pourtant, les études quantitatives effectuées *a posteriori* ont montré que seules des espèces adaptées au type écologique de chacun des lacs considérés y étaient retrouvées dans des abondances optimales.

2.1.2. Gestion halieutique des lacs de l'Archeboc

A contrario, une seule espèce, adaptée aux plans d'eau d'altitude, a été déversée, le cristivomer (*Salvelinus namaycush*) a été introduite dans les lacs de l'Archeboc étudiés. D'autre part, les déversements ont ensuite été suspendus et la pression de pêche contrôlée jusqu'à ce que leurs effets puissent être vérifiés et analysés.

En outre, dans le cas des lacs Blancs et Verdet, le stade de développement et les quantités des poissons alevinés sont connues et datées (tab. 3). Pour ces deux lacs, l'introduction de cristivomer juvéniles à 3 reprises successives, sans aucune répétition depuis, correspond aux règles de l'art d'un projet d'acclimatation réfléchi. Dans le lac Noir, une seule introduction aurait été effectuée dans les années 1970'.

	<i>Blanc</i> <i>nb stade</i>	Verdet <i>Nb stade</i>	<i>Noir</i> <i>Nb stade</i>
1970'			xxx ? ??
1990	400 0+	300 0+	
1991	500 0+	300 0+	
1993	500 0+	250 0+	
<i>Ouverture</i>	2011	2000 /06 /09	2004/12

Tableau 3. Formules des alevinages réalisés depuis 1970 dans les lacs Blanc Verdet et Noir

Dans le cas du lac Blanc, la pêche n'a jamais été ouverte, de façon à vérifier l'acclimatation puis à observer le développement de la population de cristivomer. Cette configuration a permis, en 2010, d'étudier le potentiel piscicole de ce lac en dehors de l'influence de la pression halieutique. Dans le cas des lacs Verdet et Noirs, la pêche est ouverte tous les trois à huit ans.

2.2. L'ichtyofaune du lac Blanc (2010)

L'ichtyofaune du lac Blanc a été étudié à l'aide du protocole des « filets verticaux » décrit par DEGIORGI (1994) puis finalisé par DEGIORGI *et al.* (2001). Cette méthode permet en effet de prospecter systématiquement tous les compartiments de l'espace lacustre en une seule séquence de 24 heures. Elle permet aussi de repérer la position de chaque capture dans les 3 dimensions.

Les filets verticaux ont été initialement mis au point et utilisés par des auteurs anglo-saxons (HARTMANN 1962, HORAK & TANNER, 1964, LACKEY 1968, BARTOO *et al.* 1973). Ils ont été testés et adaptés sur des lacs français par GRANDMOTTET & VAUDAUX (1989) puis GUYARD *et al.* (1989). Des araignées multimailles équivalentes ont été adjointes à ce dispositif pour les zones littorales.

2.2.1. Protocole des « Filets Verticaux »

Afin d'obtenir une image stable et comparable des populations en présence, ce dispositif a été utilisé selon un protocole standard préalablement mis au point puis testé sur plusieurs lacs (DEGIORGI & GRANDMOTTET 1993), et dont les modalités spatio-temporelles sont brièvement rappelées ci-dessous.

- 1) L'effort de pêche unitaire est constitué d'une batterie de 7 filets verticaux de taille de mailles variant de 10 à 60 mm par pas de 10 mm en passant par une maille de 15. Cet ensemble de 7 filets est disposé sur chaque poste pendant 24 heures.
- 2) Auparavant, l'espace lacustre est divisé en compartiments d'attraction différentielle en suivant un schéma directif basé sur la topographie aquatique : morphologie de la cuvette, substrat-support, hauteur d'eau. En effet, ces éléments définissent des pôles d'attraction autour desquels l'ichtyofaune se répartit suivant des arrangements dynamiques (DEGIORGI & GRANDMOTTET 1993).
- 3) Tous les compartiments sont alors échantillonnés simultanément au cours d'un effort "global" appelé aussi séquence, durant lequel l'effort unitaire est appliqué sur un poste pour chaque pôle.
- 4) Pour mémoire, dans les lacs de plaine, cet effort global est répété 3 fois pour chaque campagne tandis que 2 ou 3 campagnes saisonnières sont préconisées afin de tenir compte de la différence de mobilité des différentes espèces. Dans le cas des lacs de montagne l'effort est réduit à une séquence et à une campagne.
- 5) Une précision de moins de 20% peut alors être espérée pour les abondances numériques et pondérales des espèces dont l'effectif dépasse 5% de l'échantillon total (DEGIORGI 1994). Par conséquent, les Captures Pondérales et Numériques obtenues par Séquence sont comparables d'un lac à l'autre ainsi qu'au cours du temps pour un même plan d'eau.

La carte des pôles d'attraction a été levée en même temps que la carte bathymétrique. Ces approches graphiques caractérisent les potentiels habitationnels aquatiques en évaluant la diversité et la qualité des mosaïques de substrats support littoraux, ainsi que l'importance relative des compartiments littoraux, sublittoraux et pélagiques. Ces différents éléments contribuent à déterminer les capacités d'hébergement d'un lac pour une ou plusieurs espèces de salmonidés.

Parallèlement, la connectivité et l'accessibilité à la faune piscicole, des tributaire a été évaluée afin de quantifier l'importance (abondance et diversité) de la faune benthique aquatique supposée dériver dans le plan d'eau et de participer au régime alimentaire des poissons. La présence de frayères fonctionnelles a également été vérifiée pour les salmonidés qui, comme la truite et le saumon de fontaine, ou plus marginalement l'omble chevalier, sont inféodés aux eaux courantes en ce qui concerne leur reproduction et leurs premières phases de « croissance ».

2.2.2. Application des « Filets Verticaux » au lac Blanc (2010)

Compte tenu des difficultés d'accès aux sites, d'intendance et de coût de l'étude du compartiment piscicole, une seule campagne d'échantillonnage a été menée dans le lac Blanc, au début du mois d'août 2010. Durant cette campagne, une seule séquence de prospection de l'ensemble des pôles d'attraction a été réalisée.

La mosaïque de pole littoraux étant naturellement peu diversifiées et ne comportant que trois pôles, seules trois araignées y ont été tendues (tab. 4). Les talus ont été prospectés à l'aide d'une araignée multimaille de 6 m de haut et la zone centrale à l'aide d'une batterie de filet à enrouleur disposée à proximité du creux, à 40 m de profondeur. L'effort de pêche total déployé a été de 728m².

ZONE	Description	POLE	PROF. (m)	Surface de filet (m ²)
Centrale	pleine eau	CMAX	40	560
Sublittoral	talus	TINF	6	84
Littorale	blocs	LBLO	2	28
	galets	LGAL	2	28
	fond nus (limons)	LFNM	2	28
Total				728
Dates de la tendue			Du 04 au 5/08/10	

Tableau 4. Plan d'échantillonnage et surface de filet tendue dans le lac Blanc de l'Archeboc

2.2.3. Structures du peuplement de poisson du lac Blanc en 2010

Composition et rendements des captures.

L'échantillonnage au moyen de filets verticaux a permis de capturer 47 cristivomer en une nuit dans le lac Blanc (tab. 5). Les rendements de pêche observés sont élevés pour la densité numérique, et moyen pour la densité pondérale.

Espèce	Captures brutes		Rendement volumique (surface de filet)		Rendement par effort en plan (par batterie)		Classes d'abondance	
	num	pond	num	pond	num	pond	num	pond
	nb	g	nb/1000 m ²	g/1000 m ²	nb/10 bat	g/10 bat	cote sur 5	cote sur 5
Cristivomer	47	6 802	65	9 343	94	13 604	5	3
<i>Total</i>	47	6 802	65	9 343	94	13 604	-	-

Tableau 5. Rendements de pêche obtenus par l'application du protocole des filets verticaux dans le lac Blanc en août 2010

Distribution spatiale des captures

Si l'on raisonne en rendement par batterie de filet, c'est à dire en termes de répartition en plan, la majorité des cristivomers a été capturée à proximité des talus peu profonds et des galets littoraux (tab. 6). Les biomasses capturées les plus importantes se répartissent entre ce dernier pôle et les blocs littoraux.

POLE	Effectif	%	Biomasse	%	Rend _{t n}	Rend _{t p}
	nb		g		nb/1000 m ²	Kg/1000 m ²
Cmax zone centrale profonde	3	6%	261	4%	5	0,5
Tinf = talus sous moins de 10 m	13	28%	1067	16%	155	12,7
Lblo = blocs littoraux	8	17%	2467	36%	286	88,1
Lgal = galets littoraux	14	30%	2182	32%	500	77,9
Lfm = sables et limons littoraux	9	19%	825	12%	321	29,5

Tableau 6. Répartition horizontale des captures réalisées en août 2010 dans le lac Blanc de l'Archeboc par l'application du protocole des filets verticaux.

L'examen des rendements « volumiques », c'est-à-dire des captures ramenées à la surface de filet tendue, confirme la forte attractivité de ces deux pôles littoraux. L'attractivité des fonds nus à dominante minérale (limons et sables) au moment des pêches n'est toutefois pas négligeable.

L'analyse de la répartition verticale des captures montre que dans les zones sublittorales et centrales, les cristivomers occupent surtout les tranches d'eau épibenthiques, entre 0 et 3 m au dessus du fond. En particulier, trois cristivomers de 21 à 27 cm ont été capturés en zone centrale à plus de 38 m de profondeur.

Comme ce salmonidé est très oxyphile, cette répartition prouve que les eaux profondes sont bien oxygénées. Elle pourrait aussi indiquer l'existence d'alimentations sous lacustre, vecteurs éventuel de proies terrestres ou de surface.

Structure de l'échantillon de cristivomer

Au vu de la structure en taille des captures et des analyses scalimétriques effectuées par la Fédération de Pêche 73, plusieurs classes d'âge coexistent dans le lac Blanc (fig. 9). Les cristivomers introduits en 1990, 91 et 92 se sont donc bien acclimatés.

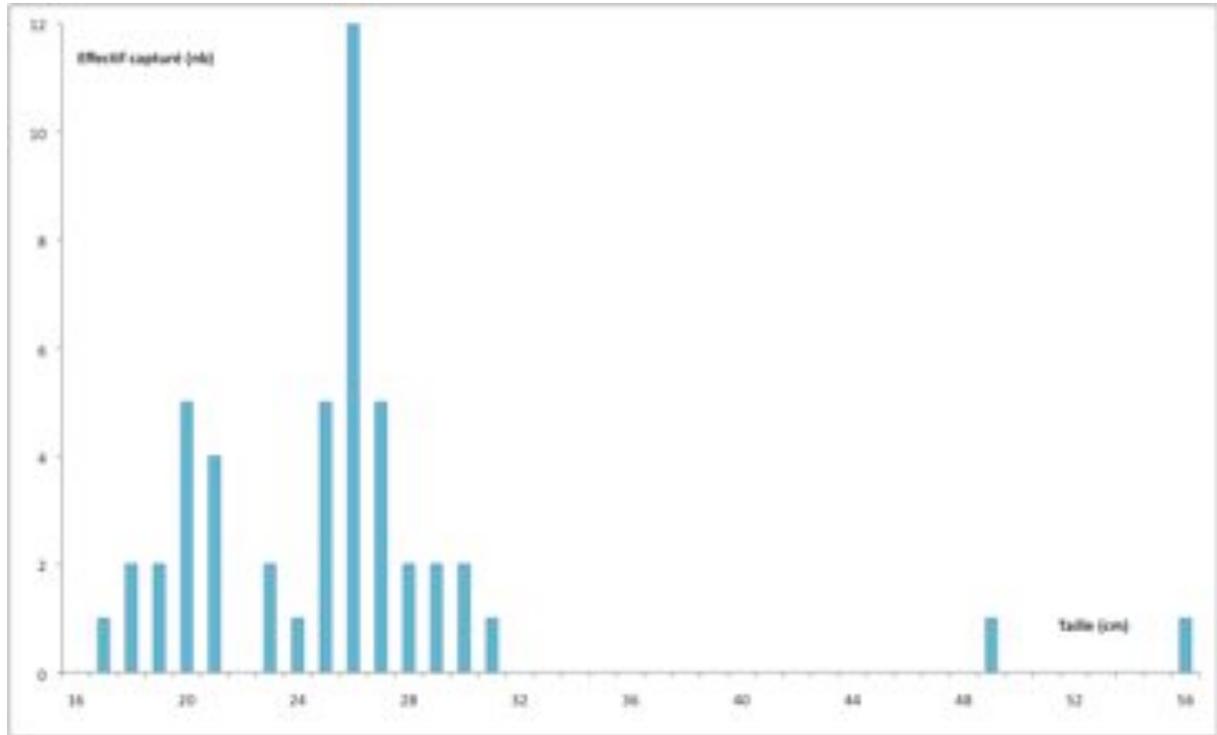


Figure 9. Structure taille fréquence de l'échantillon de cristivomer

On observe aussi l'absence de poissons de taille inférieure à 17 cm qui correspondent aux 0+, sans doute non capturables du fait de leur petite taille, mais aussi les 1+ dont la taille devrait être suffisante pour qu'ils puissent se prendre dans la maille de 10. On en déduit donc qu'ils sont moins capturables, que leur densité doit être très faible, ou que la reproduction ne réussit pas chaque année.

L'état de cette population a aussi été apprécié au travers de l'examen de la distribution en classes d'âges pour le cas où cela a pu être réalisé, puis du coefficient d'embonpoint K des poissons capturés (tab. 7). K traduit l'état général des poissons :

$$K = 100 m / L^3 \quad \text{Avec :} \quad m = \text{masse en g} \quad \text{et} \quad L = \text{taille en cm.}$$

Pour les salmonidés, cet état de santé est réputé optimal quant K s'approche de 1.

Age	Effectif	Taille (cm)	± (cm) à r=5%	K	± à r=5%
2+	1	17,5			
3+	15	20,5	3	0,67	0,19
4+	13	26	3,2	0,53	0,11
5+	2	30	-	0,41	-
8+	2	52		0,95	

Tableau 7. Taille moyenne et coefficient de condition des cristivomers capturés dans le lac Blanc en aout 2010.

Cette approche confirme la maigreur accentuée de la plupart des cristivomers du lac blanc. Elle indique une tendance continue à l'amaigrissement entre la deuxième et la cinquième année. En revanche, l'embonpoint plus marqué des deux cristivomers les plus âgés suggère que la condition de ces poissons s'améliore grandement quand ils deviennent piscivores. Si c'est le cas, il y a fort à parier que le lac abrite quelques très gros poissons de plus de dix ans (fig. 10).



Figure 10. Cristivomer de 63 cm capturé dans un filet vertical à Sills (Suisse) en octobre 2012

2.2.4. Premier bilan sur les potentiels piscicole du lac Blanc

Le peuplement piscicole du lac Blanc est constitué uniquement d'une population de Cristivomer résultant des introductions effectuées au début des années 1990. L'espèce s'est bien acclimatée dans le plan d'eau et sa reproduction est avérée, même si il n'est pas sûr qu'elle réussisse tous les ans.

Les rendements de capture observés à l'aide des filets verticaux indique une densité numérique forte et une biomasse moyenne. Pour un système de nature « polaire » comme le Lac Blanc, l'abondance du Cristivomer peut être considéré comme importante, mais dans l'absolu elle est moins importante que dans des lacs plus productifs.

A titre d'exemple, les rendements numériques et pondéraux par surface de filet observés pour le cristivomer dans deux lacs référentiels du massif de Belledonne (38) prospectés à l'aide du même protocole sont les suivants :

- Crop : 19 individus et 14 348 grammes pour 1000 m² de filets tendus ;
- Doménon : 29 individus et 35 582 grammes pour 1000 m² de filets tendus.

Ces deux lacs abritent donc des biomasses nettement plus élevées mais présentent des densités nettement inférieures à celles qui ont été mesurées dans le lac Blanc. Toutefois, ces deux plans d'eau du massif de Belledonne sont soumis à une forte pression de pêche. Les rendements de capture qui y sont observés indiquent donc une productivité piscicole a priori nettement plus importante que celle qui a été observée en 2010 dans le lac Blanc de l'Archeboc, où aucun prélèvement n'avait été effectué depuis les années 1990.

2.3. L'ichtyofaune des lacs Verdet et Blancs (2012)

2.3.1. Protocole CEN

L'ichtyofaune des lacs Verdet et Noir a été prospectée à l'aide du protocole CEN recommandé par la Directive Cadre Européenne (prEN14757 2005). Cette approche est fondée, comme le protocole des Filets Verticaux sur la prospection systématique de l'espace lacustre à l'aide de filet multimaille de petites dimension. Par conséquent, les rendements de pêche globaux obtenus par chacune des deux approches peuvent être comparé (DEGIORGI 2003, DEGIORGI et al. 2005).

Toutefois, le protocole CEN se distingue des filets verticaux par plusieurs points importants :

- la succession des mailles est différentes et comporte plus de petites mailles et moins de grandes mailles ;
- le dispositif d'échantillonnage comporte deux type de filet agissant différemment ; des filets benthiques et des filets pélagiques ;
- la stratégie de prospection balaye systématiquement les profondeurs mais ne tient pas compte de la diversité des habitats littoraux ;
- la masse d'eau n'est prospectée que dans la zone de profondeur maximale, où sont disposé les filets pélagique sur une même colonne et non sur les autres secteurs ou seule la strate benthique est échantillonnée ;
- les différentes strates de profondeur de la zone pélagique centrale ne sont pas échantillonnées simultanément, mais au cours de nuits successives ;
- il n'y a pas de réplicat de l'échantillonnage des strates pélagiques au profit d'un surcroit de réplicat des strates benthiques.

Dans le cas des lacs de montagne profonds et peu accessibles, la prospection des zones pélagiques profondes a été simplifiée ou supprimée afin de réduire la durée de l'échantillonnage. En effet, chaque tranche de 6 mètres nécessite une nuit de tendue supplémentaire, si l'on ne dispose que d'un filet pélagique.

2.3.2. Application du protocole CEN aux lacs Verdet et Noir

Cette disposition se traduit dans le cas du lac Verdet par une « lacune » d'échantillonnage de la strate pélagique comprise entre 12 et 19 mètres de profondeur. Parallèlement, dans le cas du lac Noir, la strate 12-15 m de la pleine eau n'a pas non plus été prospectée.

Néanmoins, étant donné la surface limitée des deux plans d'eau, le nombre de filets benthiques disposés permet de compenser en partie cette lacune d'échantillonnage (tab. 8 et 9). Dans les 2 lacs, la surface totale de filet tendue atteint 645 mètres carrés pour 7 tendues de filet benthiques et 2 tendues de filets pélagiques.

Date pose	Type de filet	Strate m	Profondeur (m)		Horaire		Durée	Surface m ²
			Début	Fin	Pose	Relève		
18/07/12	benthique	0 à 2,9	2,70	3,30	18h16	06h09	12h07	45
	benthique	3 à 5,9	4,40	3,00	18h21	06h16	11h55	45
	benthique	6 à 11,9	10,00	8,70	18h26	06h23	11h57	45
	benthique	20 à 34,9	22,00	20,70	18h39	06h32	11h53	45
	benthique	12 à 19,9	13,80	13,40	18h49	06h41	11h52	45
	pélagique	0 à 5,9	N/A	N/A	18h19	06h57	12h38	165
19/07/12	benthique	0 à 2,9	3,00	2,00	18h37	06h36	11h59	45
	benthique	12 à 19,9	15,00	16,50	18h31	06h30	11h59	45
	pélagique	6 à 11,9	N/A	N/A	18h10	06h04	11h54	165
<i>Total</i> 7 tendues de filets benthiques et 2 de filet pélagiques								645

Tableau 8. Description de l'effort de pêche appliqué suivant le protocole CEN dans le lac Verdet entre le 18 et le 20 juillet 2012

Date pose	Type de filet	Strate m	Profondeur (m)		Horaire		Durée	Surface m ²
			Début	Fin	Pose	Relève		
01/08/12	benthique	0 à 2,9	1,70	1,50	18 h 33	06 h 26	11 h 53	45
	benthique	3 à 5,9	6,00	4,00	18 h 39	06 h 33	11 h 54	45
	benthique	6 à 11,9	6,00	12,00	18 h 44	06 h 42	11 h 58	45
	benthique	12 à 19,9	17,60	14,50	18 h 49	06 h 49	12 h 00	45
	pélagique	0 à 5,9	N/A	N/A	18 h 10	06 h 00	11 h 50	165
02/08/12	benthique	0 à 2,9	3,00	2,50	18 h 26	06 h 24	11 h 58	45
	benthique	3 à 5,9	5,50	4,50	18 h 37	06 h 31	11 h 54	45
	benthique	12 à 19,9	12,00	17,60	18 h 46	06 h 40	11 h 54	45
	pélagique	6 à 11,9	N/A	N/A	18 h 00	06 h 10	12 h 10	165
<i>Total</i> 7 tendues de filets benthiques et 2 de filet pélagiques								645

Tableau 9. Description de l'effort de pêche appliqué suivant le protocole CEN dans le lac Verdet entre le 01 et le 03 août 2012

Pour des plans d'eau dont la surface ne dépasse pas 4 ha, cet effort de pêche doit être considéré comme important. Il est très similaire à celui qui a été mis en œuvre dans le lac Blancs à l'aide de filet verticaux dont la surface totale s'est élevée à 740 mètres carrés. La localisation des différents filets est indiquée en annexe 2.

2.3.3. Structures des peuplements des lacs Verdet et Noir

Composition et rendements des captures.

L'application de ce protocole aux lacs Verdet et Noir a permis de capturer, respectivement, 74 et 79 cristivomers pour des biomasses respectives de 13,9 et 13,2 kg (tab. 10). Les rendements de pêche observés sont élevés, pour les densités numériques comme pour les densités pondérales.

Descripteur	Unités	LACS	Blanc	Verdet	Noir
Effectif total	nb		47	74	79
Masse total	g		6 802	13 965	13 212
Surface total de filets	m ²		728	645	645
Rendements numériques	nb/1000 m ² de filet		65	115	122
Rendements pondéraux	g/1000 m ² de filet		9 343	21 651	20 484
Cote d'abondance numérique	sur 5		4	5	5
Cote d'abondance pondérale	sur 5		3	4	4
NPUE moyenne (métrique CEN)	nb/m ² /h			0,0094	0,0147
MPUE moyenne (métrique CEN)	g/m ² /h			1,6	2,6

Tableau 10. Rendements des captures obtenus à l'aide du protocole des Filets Verticaux dans le lac Blanc et suivant le protocole CEN dans les lacs Verdet et Noir

Comme pour le lac Blanc, le peuplement piscicole de chacun de ces deux plans d'eau est monospécifique puisqu'il n'est constitué que de cristivomers. En revanche, les deux lacs prospectés en 2012 abritent des biomasses nettement plus importantes que celle qui a été mesurée en 2010 dans le lac Blanc.

Distribution spatiale des captures

Le protocole CEN n'a pas été conçu pour explorer la répartition spatiale de localiser. Néanmoins, il permet de distinguer en partie la localisation des prises. Ainsi, durant les pêches scientifiques, la majorité des captures ont été réalisées dans la zone littorale de chacun des deux lacs (tab. 11). En revanche, la proportion de prises effectuées dans les strates médianes et profondes a été plus importante dans le cas du lacs Verdet.

Compartiments spatiaux	Verdet		Noir	
	Rndt num	Rndt pnd	CnPUE	CmPUE
	nb/1000 m ² fil.	g/1000 m ² fil.	nb/1000 m ² fil.	g/1000 m ² fil.
Zone littorale indifférenciée	211	45 267	389	80 622
Strate benthique des talus et de la zone centrale	142	20 876	77	10 637
Pleine eau au niveau des talus	<i>non prospectée</i>		<i>non prospectée</i>	
Strate superficielle de la zone pélagique	91	20 288	61	3 582
Strate médiane de la zone pélagique	48	12 285	6	1 061
Strates profondes de la zone pélagique	<i>non prospectée</i>		<i>non prospectée</i>	

Tableau 11. Répartition des rendement de capturés réalisées suivant le protocole CEN dans les lacs Verdet et Noir, respectivement fin juillet et début août 2012 (Rndt = rendement ; num = numérique ; pnd = pondéral ; fil. = surface de filet).

Structure des échantillons de cristivomers capturés dans les lacs Verdet et Noir.

La structure en taille des 2 échantillons capturés en 2012 montrent que plusieurs classes d'âge coexistent dans chacun des 2 lacs (fig. 11 et 12). On en déduit que les cristivomers qui y ont été introduits, il y a 20 ans dans le lac Verdet et il y a plus de 40 ans dans le lac Noir s'y reproduisent et se sont bien acclimatés.

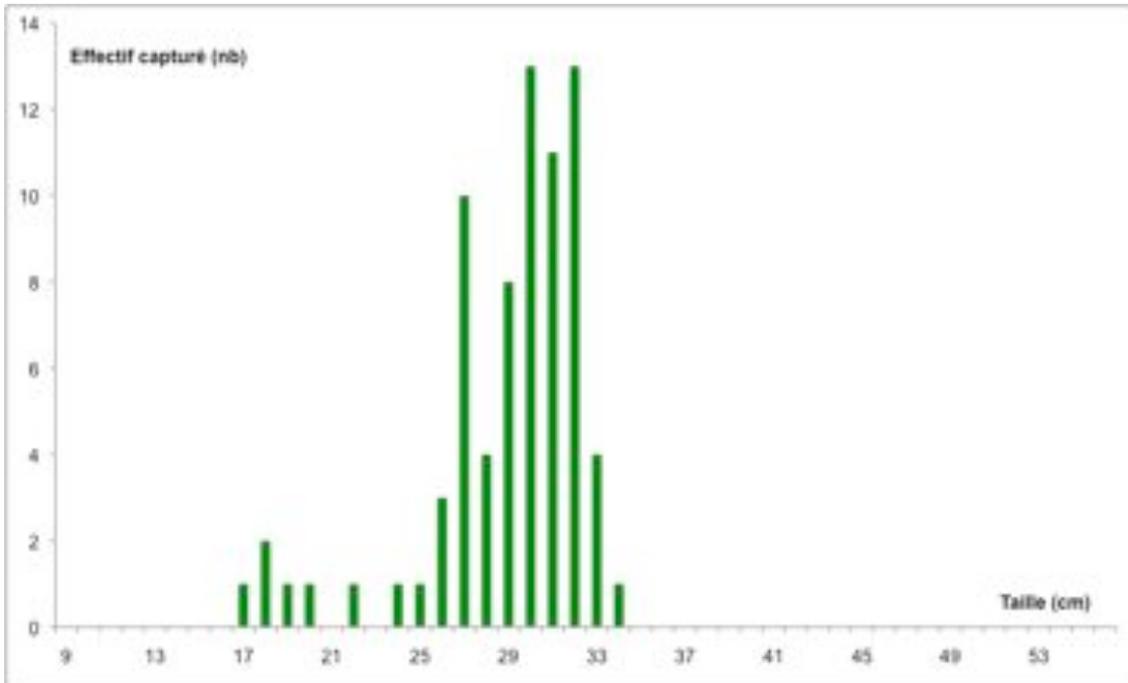


Figure 11. Structure taille nombre de l'échantillon de cristivomers capturés à l'aide de filets multimailles disposés suivant le protocole CEN dans le lac Verdet fin juillet 2012

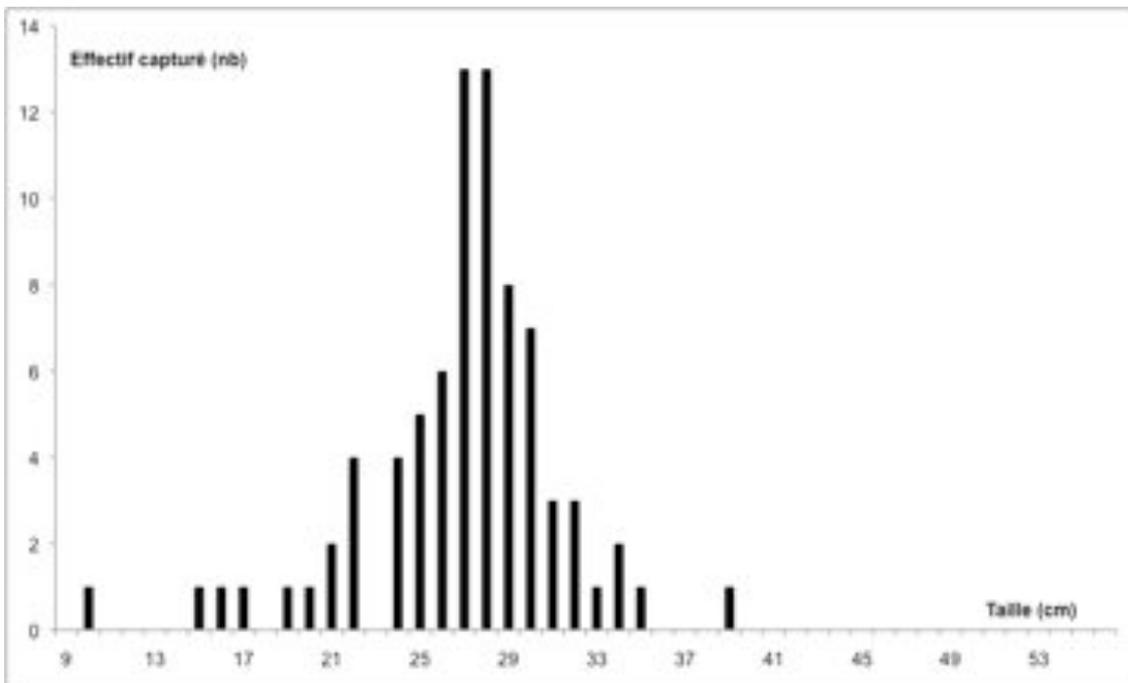


Figure 12. Structure taille nombre de l'échantillon de cristivomers capturés à l'aide de filets multimailles disposés suivant le protocole CEN dans le lac Verdet fin juillet 2012

La structure de ces 2 échantillons apparaît très proche et leurs différences n'apparaissent pas statistiquement significative (test du Chi2 au seuil de 5% d'erreur). On observe dans les deux cas une forte dominance des individus dont la taille est comprise entre 25 et 32 cm.

La différence des tailles de mailles employée rend difficile les comparaisons avec l'échantillon capturé dans le lac Blanc en 2010 à l'aide du protocole des filets verticaux. Néanmoins, on observe une allure similaire des courbes taille fréquence obtenues pour les 3 lacs (cf. fig. 9, 11 et 12).

En particulier, dans les trois échantillons, le nombre capture de juvéniles de un à deux étés est très faible ou nul. Parallèlement, seuls deux individus de plus de 35 cm ont été capturés dans le lac Blanc (jamais ouvert à la pêche et prospecté avec un jeu de maille plus grande), contre 1 seul dans le lac Noir (déjà ouvert une fois à la pêche) et aucun dans le lac Verdet (déjà ouvert deux fois à la pêche).

Or, dans les trois cas, de nombreux juvéniles de l'année ou de plus d'un été ont pu être observés visuellement au moment des campagnes de terrain. Par conséquent, deux hypothèses non contradictoires et peut-être concomitantes peuvent expliquer la prédominance constante des individus dont la taille est comprise entre 25 et 32 cm.

1. Soit les cristivomers appartenant à cette classe de taille sont beaucoup plus mobiles et donc plus capturables que les autres individus.
2. Soit les juvéniles de moins de trois étés dont la taille supposée est comprise entre 5 et 18 cm, occupant surtout des habitats eu-littoraux peu profonds, sont peu vulnérables aux captures tandis que les adultes de grande taille sont à la fois rares et moins mobiles.

Les effets de la deuxième hypothèse ont pu être renforcé, dans le cas du lac Verdet, par la pression de pêche s'exerçant sur les grands individus. Il est aussi possible que la mortalité naturelle augmente pour les individus matures qui ont besoin de plus d'énergie ce qui amplifierait encore la chute des densité de poissons dépassant les 35 cm (LOHEAC 2007). Dans tous les cas, la présence de nombreux juvéniles observables visuellement et la forte densité de captures des immatures montrent que le recrutement est important dans les trois plans d'eau.

En revanche, les cristivomers immatures capturés dans les trois lacs étaient particulièrement maigres (tab. 12). Leur coefficient d'embonpoint (K) très inférieur à 1, indique une condition médiocre, en particulier pour les juvéniles, mais aussi pour les quelques poissons submatures capturés (tailles comprises entre 30 et 40 cm).

Taille (cm)	Blanc K ±	Verdet K ±	Noir K ±
17 à 23	0,67 0,19	0,64 0,15	0,84 0,09
23 à 29	0,53 0,11	0,75 0,11	0,80 0,13
30 à 40	0,41 -	0,72 0,11	0,73 0,14

Tableau 12. Variations de l'embonpoint des cristivomers capturés dans les lacs de l'Archeboc

Ce schéma d'évolution du coefficient d'embonpoint avec l'âge, déjà observé sur un

échantillon de cristivomers capturés à la ligne dans le lac Noir en 2005 (LOHEAC 2006) se retrouve dans les 3 lacs sans que, pour un même lac, les différences observées entre 2 classes de taille soient significativement différentes.

En revanche, l'embonpoint des cristivomers immatures dont la taille est comprise entre 23 et 29 cm est significativement plus important dans les lac Noirs et Verdet que dans le lac Blanc. *A contrario*, les deux cristivomers de plus de 40 cm capturés dans ce dernier plan d'eau avait un coefficient de condition proche de 1. La croissance de ces deux individus semble avoir été plus rapide ou s'être accélérée par rapport à celle des immatures des lacs de l'Archeboc ou d'autres lacs (fig. 13).

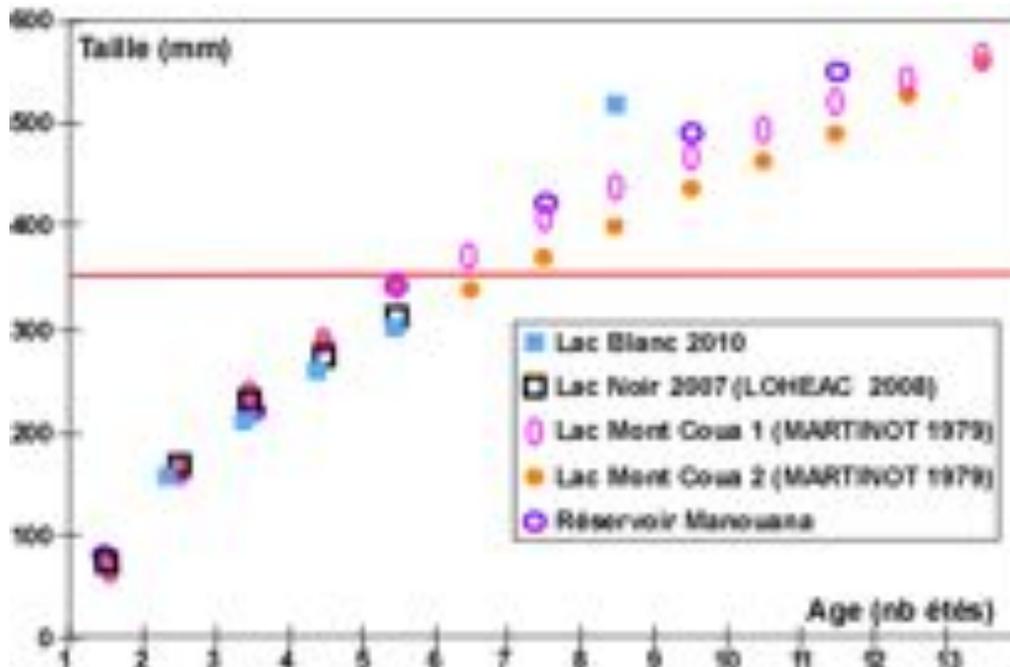


Figure 13. Comparaison des vitesses de croissance du cristivomer estimées d'après mesures scalimétriques directes (lacs Blanc et Noir) et rétrocalculée (Manouana au Canada, Mont Coua en Haute Savoie) sur plusieurs plans d'eau (modifié et adaptés d'après LOHEAC 2008) ; la barre rouge signale la taille légale minimale de capture

Ces deux dernières observations militent en faveur d'un passage au régime majoritairement ou strictement ichtyophage dès lors que la taille dépasse 35 cm, après la maturation des cristivomer. Toutefois elles ne reposent que sur l'analyse scalimétriques de deux individus et devront être vérifiées à l'avenir.

2.3.4. Bilan intermédiaire sur les potentiels piscicoles :

Les trois lacs étudiés sont donc très favorables au cristivomer. Comme les exportations par la pêche à la ligne y sont faibles ou nulles, les rendements de captures des 3 lacs peuvent être utilisée pour approcher leurs productivités piscicoles respectives. Pour en interpréter les différences, les densités de captures numériques et pondérales doivent être rapproché des capacités biologiques liées à la fois à la morphologie des lacs (qualité de l'habitat) et à leur métabolisme chimique (qualité de l'eau, niveau trophique).

3. Étude des biocénoses benthiques

3.1. Méthodologie

3.1.1. Principes de l'IBL

La capacité biogène du lac Blanc et sa fonctionnalité ont été évaluées en analysant la structure des peuplements macrobenthiques à l'aide de la méthode de l'**Indice Biologique Lacustre** (VERNEAUX *et al.* 2004). Cette approche repose sur l'étude de la diversité, de la nature et de la distribution bathymétrique des communautés de macroinvertébrés endobenthiques, qui reflètent les caractéristiques régnant à l'interface eau - sédiment.

Occupant la plupart des niveaux trophiques (des consommateurs primaires et des détritivores aux carnassiers) et bénéficiant de cycles de vie d'au moins une année, le macrobenthos est intégrateur de l'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et biologiques se déroulant dans la masse d'eau et dans les sédiments. L'IBL repose sur un protocole d'échantillonnage reproductible et aboutit au calcul d'un indice, compris entre 0 et 20, sanctionnant la capacité biogène toutes causes confondues.

3.1.2. Protocole d'échantillonnage

Matériel

Les sédiments sont prélevés à l'aide d'un sûrber équipé d'un filet à 250 µm de vide de maille manipulé par un plongeur pour prospecter aussi les substrats durs (fig. 14).

Période d'échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnage du macrobenthos endopélique doivent avoir lieu avant les premières grandes émergences printanières (avril-mai en plaine). Dans le cas des lacs de montagne, il faut attendre le dégel complet du lac et prélever moins de 4 semaines après la débâcle.

Isobathes prospectées et nombre d'échantillons

L'échantillonnage se fait à deux profondeurs :

- en zone littorale à -2 mètres (**ZI = 2m**) ;
- en zone profonde à 2/3 de la profondeur maximale (**Zf = 2/3 Z_{max}**).

Le nombre de prélèvements à effectuer est proportionnel à la longueur de chaque isobathe (L, en km) :

- en zone littorale **nl = 4 log_e(10 LI + 1)** ;
- en zone profonde, **nf = 2.5 log_e (10 Lf + 1)**.

Les échantillons sont répartis sur les 2 isobathes à l'aide de n_f transects. Des points littoraux complémentaires sont intercalés en zone littorale pour atteindre n_l . Chaque échantillon est constitué par le volume de 2 bennes Eckman, sur une surface de $1/20^e$ de m^2 . Dans les cas des lacs de montagne dont les fonds sont constitués de galets, un prélèvement est réalisé en plongée à l'aide d'un filet sùrber (fig. 14).

Tri et détermination

Les échantillons sont lavés sur un tamis de 250 μm de vide de maille puis la macrofaune est triée sous loupe binoculaire. Les prélèvements sont ensuite déterminés au niveau générique à l'exception des Diptères autres que *Chironomidae* (famille), des Nématodes (classe), des Hydracariens (classe) et des Oligochètes pour lesquels on retient 3 groupes : *Tubificidae* avec soies capillaires, *Tubificidae* sans soies capillaires et Oligochètes autres que *Tubificidae*.

3.1.3. Calcul de l'indice IBL

L'Indice Biologique Lacustre intègre cinq descripteurs :

- **vl** : richesse taxonomique littorale égale au nombre de taxons collectés à Zl
- **dl** : densité littorale correspondant au nombre d'individus par m^2 à Zl
- **vf** : richesse taxonomique profonde c'est-à-dire à Zf
- **k** : coefficient de correction du déficit taxonomique entre Zl et Zf : **$k = 0,033.vl + 1$**
- **ql** : qualité de la faune littorale ; cet indice décroît de 1 à 0,1 avec l'augmentation du niveau de tolérance du taxon indicateur le plus sensible échantillonné dans au moins 50 % des échantillons littoraux (tab. 13).

Ces descripteurs permettent le calcul de deux sous indices, l'indice biologique littoral et l'indice de déficit faunistique, dont la combinaison donne l'IBL. :

- ✓ **BI** = $(\sqrt{vl}) * (\ln dl)$ indice biologique littoral exprime le potentiel biogène.
- ✓ **Df** = $[\sqrt{((k*vf)/vl)}]^* ql$ indice de déficit taxonomique décrit la régression de la variété taxonomique avec l'augmentation de la profondeur et de la sensibilité des taxons littoraux. L'examen des facteurs composant ce coefficient permettent de distinguer les lacs bénéficiant de conditions mésologiques optimales en zone profonde et ceux qui présentent des conditions contraignantes dès la zone littorale qui n'abrite alors que des taxons écurées (ql faible).
- ✓ **IBL** = $2,5 \sqrt{(BI*Df)}$. Cet indice variant entre 0 et 20 apprécie la valeur biogène du système toutes causes confondues (VERNEAUX *et al.* 2001) ; il exprime son aptitude à produire de la macrofaune consommatrice et à la conserver avec la profondeur. Il permet également de définir le statut trophique du système, *i.e.* sa capacité à utiliser les ressources trophiques (VERNEAUX *et al.* 1994, 2001).

ql	Taxons repères (occurrence \geq 50 % des prélèvements littoraux)
1.0	<i>Ephemera</i> – <i>Paratendipes</i> – <i>Heterotrissocladius</i> – tout genre de PLECOPTERE
0.9	Tout genre de TRICHOPTERES et EPHEMEROPTERES sauf <i>Ephemera</i> et <i>Caenis</i>
0.8	Tout genre de <i>Diamesinae</i> et <i>Orthoclaadiinae</i> sauf <i>Cricotopus</i> (sensu lato) et <i>Heterotrissocladius</i> . Tout genre de <i>Tanytarsini</i> sauf <i>Cladotanytarsus</i> , <i>Paratanytarsus</i> et <i>Tanytarsus</i>
0.7	Tout genre de <i>Tanypodinae</i> sauf <i>Procladius</i> et <i>Tanypus</i> Tout genre de <i>Chironomini</i> sauf <i>Paratendipes</i> , <i>Dicrotendipes</i> , <i>Glyptotendipes</i> , <i>Tribelos</i> , <i>Chironomus</i>
0.6	<i>Sialis</i> , <i>Pisidium</i> , <i>Cladotanytarsus</i> , <i>Paratanytarsus</i> , <i>Tanytarsus</i> et <i>Prodiamesinae</i>
0.5	<i>Caenis</i> , <i>Tanypus</i> , <i>Dicrotendipes</i> , <i>Glyptotendipes</i> , <i>Tribelos</i> , <i>Cricotopus</i> (sensu lato)
0.4	<i>Chironomus</i> , <i>Procladius</i>
0.3	OLIGOCHAETA sauf <i>Tubificidae</i>
0.2	<i>Chaoborus</i> – <i>Tubificidae</i> sans soies capillaires
0.1	<i>Tubificidae</i> avec soies capillaires, NEMATODA

Tableau 13. Indice de qualité des taxons repères de la zone littorale du lac. Les taxons sont classés dans un ordre d'euryècie croissant



Figure 14. Les fonds des lacs de montagne en général et de ceux de l'Archeboc en particulier étant majoritairement constitués de graviers, galets, blocs ou dalles, le prélèvement des sédiments et la récolte de la faune endobenthique ont été effectués par les plongeurs d'Aquatix et d'Aquaventure à l'aide d'un sûrber, et non à la benne Eckman ni à l'aide de carottier.

3.2. Application de l'IBL aux lacs de l'Archeboc

3.2.1. Composition de l'endobenthos des trois lacs

Endobenthos du lac Blanc en 2010

Dans le cas du lac Blanc, 12 placettes littorales et 4 placettes profondes ont été échantillonnées en août 2010. Toutefois, comme les premières analyses ont montré que cette date pouvait avoir été tardive (plus de 5 semaines après la débâcle), 4 prélèvements littoraux complémentaires ont été effectués au début du mois d'août, trois semaines seulement après la fonte de la glace du lac Blanc.

En 2010, l'échantillon larvaire récolté s'est avéré pauvre en taxons et en individus (tab. 14). La densité du benthos échantillonné variait de 498 /m² en zone littorale (moyenne sur 12 placettes) à 80 /m² en zone profonde (moyenne sur 4 placettes). Sur les 16 placettes, 9 taxons « IBL » ont été identifiés.

TAXONS	Littoral (2 m)		Profond (28 m)
	nb	Oc (%)	nb
<u>Diptères</u>			
<i>Chironomidae</i>			
<i>Chironominae</i>	<i>Tanytarsini</i>	<i>Micropsectra</i>	(7)
		<i>Paratanytarsus</i>	(4)
		<i>Paracladius</i>	1 (1)
<i>Orthoclaadiinae</i>			
<i>Limoniidae</i>	<i>Eriopterini</i>		
<u>Crustacés</u>			
<i>Branchiopodes</i>	Notostracés	<i>Triops</i>	3
<u>Tricladés</u>			
<i>Planariidae</i>	<i>Polycelis</i>	<i>nigra-tenuis</i>	
<u>Oligochètes</u>			
<i>Autres que Tubificidae</i>	(<i>Naididae</i>)		
	(<i>Lumbriculidae</i>)		
<i>Tubificidae</i>	avec soies capillaires		
	sans soies capillaires		
Abondance totale			16
Variété IBL			4

Tableau 14. Liste des macroinvertébrés benthiques prélevés sur le lac Blanc (août 2010) ; l'occurrence (« occ ») est la proportion de placette littorale sur laquelle le taxon a été contacté ; le nombre et l'occurrence des nymphes prélevés sont placés entre parenthèses

La famille des *Chironomidae*, représentée par 3 genres seulement, est dominée par le genre *Paratanytarsus*, appartenant à la sous-famille des *Chironominae*. Ce taxon est présent dans plus de la moitié des échantillons, à la différence de *Micropsectra*, de la même sous-famille, et de *Paracladius*, (sous-famille des *Orthoclaadiinae*), qui n'ont été retrouvés, respectivement, que dans 2 et 4 placettes sur 12.

Dans la zone profonde, la famille des *Chironomidae* est représentée par une larve et une larve appartenant au genre *Paracladius*, mais aussi par 4 nymphes de *Tanytarsus* ainsi que par 7 nymphes du genre *Micropsectra*.

La classe des Oligochètes représente les deux tiers de la densité totale de la zone littorale alors qu'aucun individu n'a été échantillonné en zone profonde. Les oligochètes ont tous été échantillonnés dans des sables et graviers fins.

Enfin, deux échantillons de la zone littorale contiennent une abondance non négligeable d'une espèce de petit crustacé d'eau douce, *Triops*. Ce taxon compte 28 individus dans les prélèvements littoraux et 3 en zone profonde.

Compléments d'échantillonnage dans le lac Blanc (2012)

Au moment des prélèvements réalisés le 04/08/2010, le lac Blanc était dégelé depuis plus de 5 semaines. La très faible densité de la faune prélevée, ainsi que de la présence de nombreuses nymphes nous ont inclinés à suspecter que la date de prélèvement pouvait avoir été trop tardive par rapport au cycle des éclosions propres à ce type de lac « polaire ».

Par conséquent, une campagne de prélèvements supplémentaires, consistant en 4 placettes littorales, a été mise en œuvre le 5/08/2012, cette fois ci moins de 3 semaines seulement après le dégel du lac. Ce complément d'échantillonnage a permis de prélever :

- dans une placette de galet : 16 larves appartenant au genre *Smittia* (sous-famille des *Orthoclaadiinae*) ;
- dans une placette de galet : 1 larve de *Paracladius* et 1 larve de *Micropsectra* ;
- dans une placette de sable et limons : 1 larve de *Smittia*.

Ce « sondage » confirme que l'échantillonnage de 2010 était trop tardif par rapport au dégel du lac. En effet, il n'avait pas permis de contacter le genre *Smittia*, alors qu'il a été décelé en 2012 dans la moitié des placettes prélevées. Or les espèces appartenant à ce genre typique des eaux polaires ont une éclosion très précoces, capable de voler et de se reproduire dès que la température de l'air dépasse 7°C.

Parallèlement, comme *Micropsectra*, lui aussi typique des lacs de montagne oligotrophes ou plus généralement des milieux aquatiques très froids non pollués, ce genre regroupe des espèces oxyphiles et saprophobes (RAE 1989, LANG 2009). Par conséquent, il semble que, comme *Heterotrissocladus*, ces deux genres de chironomides mériteraient d'être associés à un indice de qualité « ql » de 0,9 / 1 voire de 1 / 1 dans la grille IBL.

Endobenthos du lac Verdet en 2012

Dans le cas du lac Verdet, 8 placettes littorales et 4 placettes profondes ont été échantillonnées au début du mois d'août 2012. La densité du benthos échantillonné varie de 6 865 /m² en zone littorale (moyenne sur 8 placettes) à 4 795 /m² en zone profonde (moyenne sur 4 placettes). Sur les 12 placettes prélevées au total, 12 taxons ont été identifiés dont 11 en zone littorale et la totalité en profondeur (tab. 15).

TAXONS	Littoral (2m)		Profond (15m)
	nb	Occ (%)	nb
<u>Diptères</u>			
<u>Chironomidae</u>			
<i>Chironominae</i>	<i>Tanytarsini</i>	<i>Micropsectra</i>	6 25 175
		<i>Paratanytarsus</i>	9 63 51
<i>Diamesinae</i>		<i>Pseudodiamesa</i>	24 38 5
<i>Orthoclaadiinae</i>		<i>Cricotopus</i>	1 13 1
		<i>Paracladius</i>	2 023 100 904
		<i>Psectrocladius</i>	1
<i>Tanypodinae</i>		<i>Holotanypus</i>	14 63 13
<u>Bivalves</u>			
<i>Sphaeridae</i>		<i>Pisidium</i>	257 100 168
<u>Oligochètes</u>			
			42 38
Autres que <i>Tubificidae</i> (<i>Enchytraeidae</i>)			42 38
		(<i>Lumbriculidae</i>)	41 50
		(<i>Naididae</i>)	180 75 187
<i>Tubificidae</i> avec soies capillaires			96 38 165
<u>Nématodes</u>			
			19 50 4
Abondance totale			2746 1918
Variété IBL			11 12

Tableau 15. Liste des macroinvertébrés benthiques prélevés sur le lac Verdet (août 2012) ; l'occurrence (« occ » est la proportion de placette littorale sur laquelle le taxon a été contacté

Les densités littorales et benthiques sont remarquablement élevées pour un lac de montagne. En revanche, la famille des *Chironomidae*, n'est représentée ici que par 7 genres, ce qui reste limité. Elle est ultra-dominée par le genre *Paracladius*, appartenant à la sous-famille des *Orthocladinae*, que se soit dans la zone littorale ou en profondeur. Ce genre peut être considéré comme polluosensible.

Les autres chironomides sont moins fréquents et surtout beaucoup moins abondants. Le genre *Micropsectra*, appartenant lui aussi à la sous-famille des *Orthocladinae* et lui aussi réputé polluosensible a cependant été retrouvé dans toutes les placettes profondes, et il y figure dans des densités non négligeables.

L'échantillon benthique prélevé dans ce lac comporte aussi des densités notoires de Pisidies, que ce soit en zone littorale ou en profondeur. Parallèlement, l'échantillon d'oligochètes est dominé par les *Naididae* dans les deux strates échantillonnées.

Endobenthos du lac Noir en 2012

Dans le cas du lac Noir, 9 placettes littorales et 4 placettes profondes ont été échantillonnées au début du mois d'août 2012. La densité du benthos échantillonné varie de 6 865 /m² en zone littorale (moyenne sur 8 placettes) à 4795 /m² en zone profonde (moyenne sur 4 placettes). Sur les 13 placettes prélevées au total, 10 taxons ont été identifiés dont 8 en zone littorale et 8 en profondeur (tab. 16).

TAXONS	Littoral (2m)		Profond (15m)
	nb	Occ (%)	nb
<u>Diptères</u>			
<i>Chironomidae</i>			
<i>Chironominae</i>	<i>Tanytarsini</i>	<i>Paratanytarsus</i>	1 784 100 58
<i>Diamesinae</i>	<i>Diamesini</i>	<i>Pseudodiamesa</i>	118 56 1
<i>Orthoclaadiinae</i>		<i>Paracladius</i>	2 593 700 700
		<i>Psectrocladius</i>	2 3 3
<u>Bivalves</u>			
<i>Sphaeriidae</i>		<i>Pisidium</i>	51
<u>Planaire</u>			
<i>Dugesiiidae</i>		<i>Dugesia</i>	2 11
<u>Oligochètes</u>			
<i>Autres que Tubificidae</i>	<i>(Enchytraeidae)</i>		277 11
	<i>(Haplotaxidae)</i>		24 44
	<i>(Lumbriculidae)</i>		223 89 83
	<i>(Naididae)</i>		6 22 30
<i>Tubificidae</i>	avec soies capillaires		51
<u>Nématodes</u>			
			242 89 16
Hydracariens			
			30 56
Abondance totale			
			5301 1040
Variété IBL			
			8 8

Tableau 16. Liste des macroinvertébrés benthiques prélevés sur le lac Noir (août 2012) ; l'occurrence (« occ » est la proportion de placette littorale sur laquelle le taxon a été contacté

La faune endobenthique échantillonnée dans le lac Noir est encore plus abondante que celle observées dans le lac Blanc mais elle est en revanche moins variée. Parallèlement, comme dans ce dernier plan d'eau, elle est dominée par des taxons polluo-sensibles et en particulier par le genre *Proclides*, appartenant au groupe des orthocladines. Cette sous-famille regroupe de nombreuses espèces de chironomides réputées oxyphiles et intolérantes à la plupart des pollutions.

En outre, le genre *Paracladius* domine aussi bien l'échantillon littoral que la faune prélevée au fond. Cet échantillon profond comporte aussi des densités non anecdotiques de bivalves (*Pisidium*) et d'Oligochètes *Naididae* qui sont aussi considérés comme polluo-sensibles. Ces tendances, qui accompagnent la conservation de la variété avec la profondeur, militent en faveur d'un bon fonctionnement du métabolisme du lac Noir.

3.2.3. Calcul des IBL et interprétations directes

Qualité biologique du lac Blanc (IBL 2010 corrigé 2012)

Dans le cas du lac Blanc, les résultats obtenus par les prélèvements supplémentaires effectués en 2012 ont été intégrés de façon à corriger le calcul de l'IBL (tab. 17). Les valeurs sont données pour la sensibilité et la variété de la **faune benthique prélevée en 2010** (en comptant les nymphes comme des larves) ainsi qu'avec les **valeurs corrigées d'après les compléments d'échantillonnage et de méthodologie effectué en 2012**.

Descripteurs et indices	Valeurs
vl : variété littorale	9 ou 10
dl : densité littorale (nb/m ²)	498 ou ?
vf : variété faunistique profonde	4 ou 5
k : coefficient de correction	1,33
ql : qualité de la faune littorale	<i>Micropsectra</i> ou <i>Smittia</i> ? 0,8 ou 1
BI : indice biologique littoral	18,6 ou 19,6
Df : Indice de déficit faunistique	0,61 ou 0,82
IBL : Indice biologique lacustre	8,5 / 20 ou 10,0 / 20

Tableau 17. Descripteurs synthétiques de la faune benthique du lac Verdet de l'Archeboc prélevée en août 2010 suivant le protocole IBL (corrigé d'après compléments de mesures en août 2012).

Les faibles valeurs de la variété taxonomique et de la densité littorale sont traduites par un indice biologique littoral faible ne dépassant pas 20/100. Cette valeur confirme le caractère naturellement oligobionte du lac Blanc de l'Archeboc.

Parallèlement, la faune littorale est sensible (indice de qualité entre 0,8 et 1 sur 1). En revanche, l'indice de déficit faunistique (entre 61 et 82 %) suggère l'existence d'un dysfonctionnement du métabolisme de la masse d'eau.

L'IBL qui résulte de ces différentes composantes ne dépasse pas 10/20. Cette valeur très faible sanctionne un lac naturellement peu productif et présentant soit des tendances dysfonctionnelles, soit une importante limitation des transferts trophiques par liée au climat de type polaire subit par le plan d'eau.

La faible valeur de l'indice biologique littoral peut résulter d'un faible potentiel trophique naturel du lac Blanc. En effet, son altitude élevée, la durée de sa prise en glace, la fraîcheur persistante de sa température estivale et sa minéralisation limitée constituent autant de facteurs limitant les capacités biogènes de ses fonds.

La faible occurrence de la faune sensible en zone littorale et la réduction relative de la densité et de la variété faunistique avec la profondeur sont plus difficiles à interpréter puisque l'oxygénation est bonne sur toute la colonne d'eau du lac. La faiblesse des teneurs en matière organique pourrait aussi constituer un facteur limitant la productivité du plan d'eau.

Toutefois, d'éventuelles contaminations métalliques, d'origine géologique ou anthropique, ou en d'autres micropolluants d'origine atmosphérique constitue une autre cause possible de blocage des transferts trophiques. Ces phénomènes sont en effet d'autant plus pénalisant pour les capacités biogènes d'un plan d'eau que celui-ci est rendu vulnérable par les contraintes naturelles comme la durée de la période de gel ou la faible minéralisation.

Suivant une hypothèse explicative alternative, il est possible que la période de l'échantillonnage de 2010 ait été trop tardive puisqu'un nombre de nymphes a été échantillonnées équivalent à celui des formes larvaires dans les placettes profondes. En outre, un genre oxyphile à éclosion précoce a pu être échantillonné en 2012 en réalisant des prélèvements littoraux complémentaires un peu plus tôt par rapport au cycle thermique du lac.

Qualité biologique du lac Verdet (IBL 2012)

En dépit de la forte densité de la faune littorale échantillonnée dans le lac Verdet, les faibles valeurs de la variété taxonomique détermine un indice biologique littoral moyen ne dépassant pas 30/100 (tab. 18). Cette valeur est légèrement supérieure à celle du lac Blanc mais indique que le lac Verdet est lui aussi oligobionte.

Descripteurs et indices	Valeurs
vl : variété littorale	11
dl : densité littorale (nb/m ²)	6 865
vf : variété faunistique profonde	12
k : coefficient de correction	1,36
ql : qualité de la faune littorale	<i>Paracladius (Orthocladinae)</i> 0,8
BI : indice biologique littoral	29,3
Df : Indice de déficit faunistique	0,98
IBL : Indice biologique lacustre	13,4 / 20

Tableau 18. Descripteurs synthétiques de la faune benthique du lac Verdet de l'Archeboc prélevée en août 2012 suivant le protocole IBL

Dans ce plan d'eau, l'absence de déficit de la faune profonde démontre l'efficacité des transferts trophiques et de la minéralisation dans la colonne d'eau. Elle indique que le fonctionnement du métabolisme du lac Verdet est optimal. La capacité biogène globale de ce système en résulte bonne mais pas exceptionnelle car limité par les potentiels naturels.

Qualité biologique du lac Noir (IBL 2012)

La faune littorale du lac Noir est encore plus dense que celle du lac Verdet mais elle apparaît moins diversifiée. L'indice biologique littoral du lac Noir en résulte légèrement inférieur à celui qui est calculé pour le lac Verdet (tab. 19).

Descripteurs et indices	Valeurs
vl : variété littorale	8
dl : densité littorale (nb/m ²)	13 253
vf : variété faunistique profonde	8
k : coefficient de correction	1,26
ql : qualité de la faune littorale	<i>Paracladius (Orthocladinae)</i> 0,8
BI : indice biologique littoral	26,9
Df : Indice de déficit faunistique	0,90
IBL : Indice biologique lacustre	12,3 / 20

Tableau 19. Descripteurs synthétiques de la faune benthique du lac Noir de l'Archeboc prélevée en août 2012 suivant le protocole IBL

Comme dans le cas du lac Verdet, il n'y a pas de perte de variété faunistique avec la profondeur. Cependant, la gamme de variété plus faible des échantillons littoral et profond détermine un indice de déficit faunistique inférieur à 1 indiquant un léger problème dysfonctionnel.

3.3. Bilan sur les capacités benthiques des lacs de l'Archeboc

3.3.1. Classification et typologie fonctionnelle

La méthode IBL fournit des descripteurs de la capacité biogène et du degré de fonctionnement métabolique des écosystèmes lacustres, et débouche sur un indice de qualité globale. Cette démarche permet de comparer les lacs entre eux (fig. 15), puis fournit des guides pour interpréter l'état de chacun des systèmes étudiés.

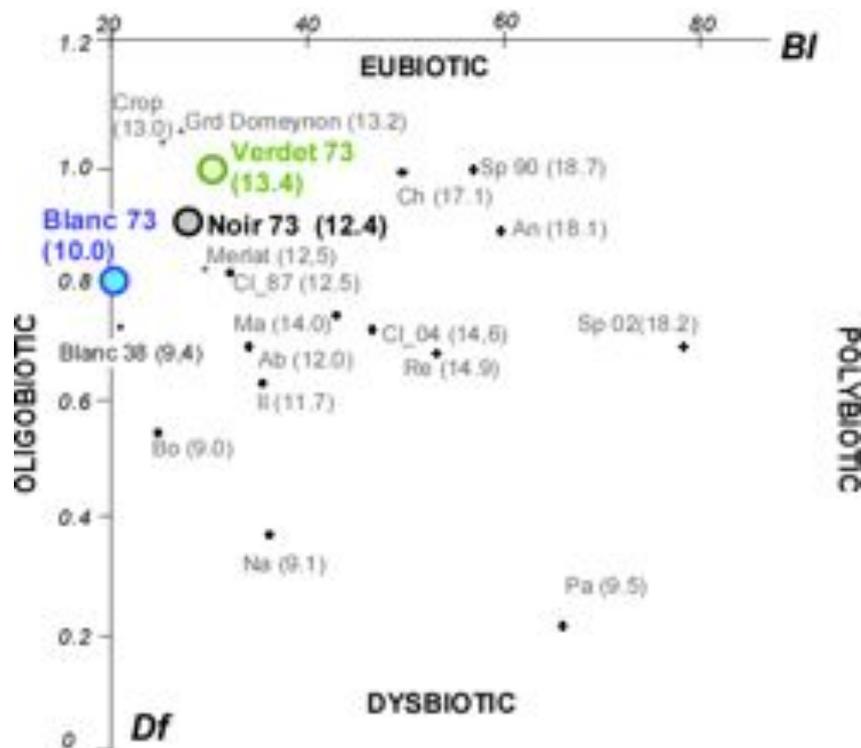


Figure 15. Typologie de 18 lacs français dont 4 du massif de Belledonne et trois de l'Archeboc (graphique complété à partir de VERNEAUX *et al.* 2004a et 2004b)

Jura : Abbaye (Ab), Bonlieu (Bo), Châlain (Ch), Clairvaux (Cl), Ilay (II), Maclu (Ma), Narlay (Na), Remoray (Re), Saint-Point (Sp) Massif Central : Pavin (Pa).

Alpes : Annecy (An), Crop, Grand Domeynon, Blanc 38, Merlat,

Archeboc : lacs Blanc 73, Verdet 73, Noir 73,

Suivant cette approche, les 3 lacs de l'Archeboc étudié sont classés dans un pôle à la fois oligobiotique, c'est-à-dire naturellement peu productif, et eubiotique, c'est-à-dire fonctionnel. Au sein de ce pôle, les 3 systèmes jalonnent un gradient de capacité biogène qui ne suit pas l'étagement en altitude puisque le lac Noir apparaît moins biogène que le lac Verdet, alors qu'il s'étend à une altitude moins élevée.

Les différences observées entre les 3 lacs suivent 2 tendances :

- le lac Blanc apparaît à la fois naturellement moins riche et moins fonctionnels que les deux autres lacs, sans doute à cause de son hydroclimat particulier ;
- les deux autres lacs semblent bénéficier de potentiel littoraux bien supérieurs à celui du lac Blanc et similaire entre eux ; en revanche les capacités de transfert du lac Noir semble un peu moins efficaces que celles du lac Verdet.

3.3.2. Potentiel benthique et production piscicole

Le classement des lacs résultants de l'application de l'IBL est conforme à celui qui est obtenu en comparant les rendements en biomasses de poissons obtenus à l'issus des pêches scientifiques (fig. 16). En effet, que ce soit sur le plan benthique ou sur le plan piscicole, les lacs Verdet et Noir sont associés à des potentiels similaires, bien supérieurs à ceux qui sont déterminés pour le Lac blanc.

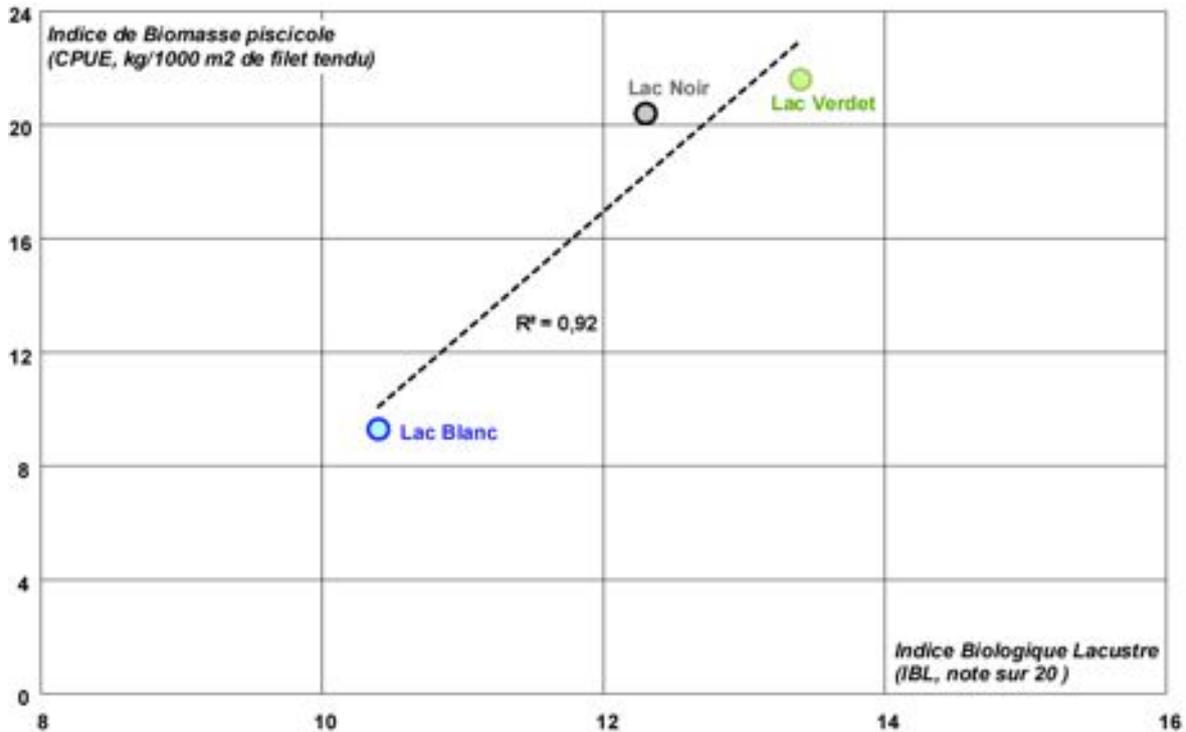


Figure 16. Comparaison des potentiels benthiques et piscicoles des lacs Blanc, Verdet et Noir

La validité de cette observation est cependant rendue sujette à caution par le faible effectif des lacs comparés ainsi que par l'utilisation de deux protocoles de pêches différents. Certes, les deux dispositifs de pêche mis en œuvre sont susceptibles de fournir des images semi-quantitatives globalement similaires (DEGIORGI et al. 2005). Cependant, les écarts entre les tailles respectives des mailles utilisées dans chacun des deux protocoles font craindre une différence d'efficacité de capture pour les crustacés dépassant 35 cm.

Pour la même raison, il est hasardeux d'étendre cette comparaison entre IBL et rendements de pêche aux autres plans d'eau de montagne dans lesquels cette double démarche a été appliquée. En effet, l'ichtyofaune de ces plans d'eau a été prospectée à l'aide de filets verticaux uniquement.

Enfin, les potentiels piscicoles dépendent aussi de la composante habitationnelle, qu'il est délicat de qualifier pour le benthos. Leur prédiction doit pour le moins s'appuyer non seulement sur les capacités nutritives ainsi que sur la fonctionnalité du plan d'eau, bien prises en compte par l'IBL, mais aussi sur l'hétérogénéité et sur l'attractivité piscicole des mosaïques d'habitats aquatiques (cf. ci-dessous).

3.3.3. Bilan sur l'application de l'IBL aux lacs d'altitude

La méthode IBL permet de bien différencier les différences de capacités biogènes et de fonctionnement des lacs de montagne. Les contrastes observés à partir de l'analyse, suivant cette approche, de l'endofaune des trois lacs sont corroborés par les différences de biomasses tels qu'estimé par les rendements des pêches scientifiques. Surtout, ils sont fortement liés aux différences de métabolisme chimique et physico-chimique qui distinguent les trois plans d'eau (cf. § 4).

Toutefois, la comparaison des résultats obtenus dans le lac Blanc en 2010 et en 2012 montre que, dans le cas des lacs dont l'altitude est supérieure à 2 500 m, il est nécessaire de réduire le délai entre dégel du plan d'eau et campagne d'échantillonnage IBL. Des essais dans ce sens devraient aussi être effectués pour les plans d'eau de montagne à des altitudes comprises entre 2 000 et 2 500 m.

Parallèlement, la gamme des indicateurs de polluosensibilité maximales (indice qI de 1 ou de 0,9) devrait être étendue à d'autres groupes typiques des lacs d'altitude comme :

- certains genres de chironomes ne regroupant que des espèces oxyphiles et psychro-sthénotherme comme *Smittia* ou *Micropsectra* (WIEDERHOLM 1980-1981, SAWEDAL 1982, BOGGERO et al. 2006) ;
- certains groupes associés à des milieux apicaux froids, peu nutritifs et bien oxygénés, de type sources rhéocrènes, à l'instar des *Limonidae*, des *Empididae* ou des Triclades oligosaprobies comme *Polycelis nigra*...

4. Métabolisme physico-chimique des lacs de l'Archeboc

4.1. Physico-chimie des colonnes d'eau

4.1.1. Physicochimie de la colonne d'eau du lac Blanc

Le 4/08/2010, des mesures physicochimiques ont été effectuées dans la colonne d'eau du lac Blanc à 40 m de profondeur (tab. 20). La température, la conductivité, la concentration et la saturation en oxygène dissous, le potentiel redox et le pH ont été mesurés tous les mètres jusqu'à -10 m, puis tous les 2 mètres jusqu'à -40 m.

Prof. m	Cond µS/cm	T° °C	[O ₂ dissous] mg/l	Sat. (O ₂ d.) %	pH -	eH mV
0	47	7,1	9,1	108	7,6	145
1	47	7	9,2	108	7,6	146
2	47	6,7	9,0	105	7,5	148
3	47	6,6	9,0	105	7,5	150
4	47	6,3	8,0	93	7,5	152
5	47	6,1	8,0	92	7,5	155
6	47	5,5	7,9	90	7,5	157
7	47	5,4	7,9	89	7,5	160
8	47	5,3	7,7	87	7,5	164
9	47	5,2	7,7	87	7,5	165
10	47	5,2	7,6	86	7,5	166
12	48	5	7,6	85	7,5	169
14	49	4,9	7,5	84	7,5	172
16	52	4,7	7,4	82	7,4	176
18	55	4,6	7,2	80	7,4	178
20	56	4,6	6,7	74	7,4	180
22	58	4,5	7,0	77	7,4	182
24	59	4,4	6,4	70	7,4	184
26	60	4,5	6,5	72	7,3	187
28	61	4,4	5,9	65	7,3	189
30	62	4,3	5,9	65	7,3	191
32	62	4,3	5,9	65	7,3	193
34	63	4,3	5,6	62	7,3	195
36	64	4,2	5,5	60	7,2	198
38	64	4,2	5,0	55	7,2	199
40	65	4,2	4,8	52	7,2	201

Tableau 20. Physico-chimie de la masse d'eau du lac Blanc mesurée le 4/08/2010 à 40 mètres

La température mesurée en surface, très froide pour la saison, limite l'amplitude de la stratification. Elle est liée à la fois à l'altitude, au type d'alimentation du plan d'eau et à la météo très fraîche au moment des mesures.

Les concentrations en oxygène dissous indiquent une tendance à la désoxygénation, croissant avec la profondeur. Les strates les plus profondes demeurent tout de même oxygénées à plus de 50 % tandis que les mesures de pH et d'eH montrent que les conditions restent nettement oxydantes dans toute la masse d'eau.

Nota sur les mesures en oxygènes dissous dans le lac Blanc

Les teneurs en oxygène dissous indiquées par la sonde WTW utilisée ont fait montre d'une grande instabilité : les valeurs indiquées correspondent aux maximales stabilisées atteintes après plusieurs dizaines de secondes. Ce phénomène inhabituel pourrait être dû à l'altitude et aux fluctuations de la pression atmosphériques liées aux conditions météorologiques, elles aussi instables (tempête de neige). Cependant il pourrait aussi traduire une phase de brassage et de précipitation du plancton provoquée par le refroidissement soudain des strates superficielles.

La conductivité atteint des valeurs moyennes dans la gamme rencontrée dans les lacs de montagne hors massifs calcaires (3 à 80 µS/cm pour des plans d'eau entre 1 500 à 2 600 m d'altitude). Les valeurs plus faibles observées en surface traduisent une activité photosynthétique modérée ou/et des conditions physicochimiques favorisant la précipitation des sels dissous.

4.1.2. Physicochimie de la colonne d'eau du lac Verdet

Dans le lac Verdet, les mesures ont été effectuées le 1/08/2012 dans la zone centrale, à 20 m de profondeur (tab. 21). Les mesures ont été réalisées tous les mètres, depuis la surface jusqu'à l'eau de contact.

Profondeur <i>m</i>	Cond µS/cm	T° °C	[O ₂ dissous] mg/l	Sat. (O ₂ d.) %	pH -	eH mV
0	12,2	45	11,5	108	7,9	132
1	12,1	45	11,2	105	7,8	130
2	12	45	11,9	111	7,8	130
3	11,8	46	12	111	7,8	130
4	11,6	47	12,1	112	7,7	129
5	10,4	49	13,4	120	7,7	130
6	9,7	50	13,5	119	7,6	131
7	9,2	53	13,7	119	7,5	133
8	8,7	56	13,5	116	7,5	135
9	8,2	57	13,2	112	7,4	136
10	7,9	62	12,9	109	7,4	138
11	7,6	64	12,8	107	7,4	140
12	7	64	12,9	106	7,4	141
13	6,9	65	12,6	104	7,4	143
14	6,6	65	12,7	104	7,4	143
15	6,3	66	12,7	103	7,4	143
16	6	66	12,8	103	7,4	143
17	5,9	66	12,9	103	7,3	143
18	5,8	67	12,9	102	7,2	142
19	5,7	68	12,9	101	7,1	140
20	5,6	82	12,1	95	6,9	24

Tableau 21. Physico-chimie de la masse d'eau du lac Verdet mesurée le 01/08/2010 à 20 mètres

Les mesures révèlent une conductivité moyenne à faible, équivalente à celle qui avait été observée dans le lac Blanc. En revanche, aucun signe de désoxygénation n'a été observé sur ce lac en milieu d'été.

Parallèlement une légère sursaturation a été observée dans presque toutes les strates, mais de façon plus prononcée dans les 7 premiers mètres. Cette tendance, combinée avec une petite baisse de la conductivité et une augmentation modérée du pH était probablement induite par une production phytoplanctonique sensible.

4.1.3. Physicochimie de la colonne d'eau du lac Noir

Dans le lac Noir, les mesures ont été effectuées le 1/08/2012 dans la zone centrale, à 17 m de profondeur (tab. 22). Les mesures ont été réalisées tous les mètres, depuis la surface jusqu'à l'eau de contact.

Profondeur m	Cond µS/cm	T° °C	[O ₂ dissous] mg/l	Sat. (O ₂ d.) %	pH -
0	12,4	266	9,7	125	7,9
1	12,3	263	9,5	123	7,9
2	11,8	265	9,6	122	7,9
3	11,0	269	9,7	120	8,0
4	9,9	251	10,6	128	8,1
5	9,1	250	10,5	124	8,0
6	8,3	265	9,9	115	7,9
7	7,9	268	9,9	114	7,8
8	7,6	271	9,8	112	7,8
9	7,3	274	10,1	114	7,8
10	6,9	276	10,3	115	7,7
11	6,7	277	10,4	116	7,7
12	6,5	278	10,5	116	7,7
13	6,5	279	10,7	118	7,6
14	6,5	278	10,8	120	7,6
15	6,4	280	10,9	120	7,6
16	6,3	281	11,0	121	7,6
17	6,3	287	4,8	54	7,4

Tableau 22. Physico-chimie de la masse d'eau du lac Noir mesurée le 01/08/2010 à 17 mètres

Les conductivités mesurées dans la colonne centrale du lac Noir sont beaucoup plus élevées que celles qui ont été observées dans les 2 autres lacs étudiés. Elle révèle une minéralisation importante, en relation avec les terrains sédimentaires qui composent une partie des versants de ce plan d'eau (cf. partie « géologie » au § 1).

La sursaturation en oxygènes dissous enregistrée à toutes les strates, y compris les plus profondes quand elles n'étaient pas en contact avec les sédiments, révèle une production primaire active dans toute la colonne d'eau. En revanche, la sous-saturation modérée qui a été mesurée dans les eaux au contact des sédiments indiquait une tendance dysfonctionnelle.

4.2. Chimie des masses d'eau

4.2.1. Chimie de la masse d'eau dans le lac Blanc

Dans le cas du lac Blanc, les analyses chimiques effectuées sur les prélèvements d'eau réalisés le 5/08/2010 à trois profondeurs de la zone centrale profonde confirment la faiblesse de la minéralisation de ce plan d'eau. En outre, au moment des mesures, la biomasse primaire était imperceptible dans la masse d'eau (tab. 23).

Paramètres	Unités	Surface	Thermocline (5m)	Fond (40m)
Calcium	mg/L	7	8	9
Fer	µg/L	<10	<10	<10
Magnésium	mg/L	0,50	0,59	0,66
Manganèse	µg/L	<10	<10	<10
Chlorures	mg/L	<1	<1	<1
Nitrates	mg/L	<1	<1	<1
Nitrites	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01
Ammonium	mg/L	0,01	<0,01	<0,01
Azote Kjeldhal	mg/L	1,4	2,4	1,4
Phosphore total	mg/L	0,013	0,012	0,009
Phosphates (PO4---)	mg/L	0,032	0,026	0,018
DBO5 non diluée	mg de O ₂ /L	0,9	1,1	0,8
Oxydabilité au KMnO ₄	mg O ₂ /L	<1	<1	<1
Carbone Organique Total	mg C/L	0,33	0,57	0,32
Matières en suspension totales	mg/L	0,11	1,06	0,96
Matières en suspension organiques	mg/L	0,04	0,32	0,24
Chlorophylle a	µg/L	<0,5	<0,5	
Chlorophylle b	µg/L	<0,5	<0,5	
Chlorophylle c	µg/L	<0,5	<0,5	
Phéopigment	mg/L	<0,5	<0,5	

Tableau 23. Chimie de la masse d'eau du lac Blanc échantillonnée le 5/08/2010 à 40 mètres

Corrélativement, les taux d'azote minéral et organique étaient très faibles. En revanche, les concentrations en phosphore total et en phosphates, modérées dans l'absolu, sont un peu au delà de celles que l'on s'attendrait à trouver dans un plan d'eau d'altitude. Pour ce type de systèmes situés en contexte géologique non calcaire et alimenté par la fonte de névés, on s'attend en effet à trouver des concentration en phosphore total inférieure à 5 microgrammes par litre.

4.2.2. Chimie de la masse d'eau dans le lac Verdet

Dans le cas du lac Verdet, les analyses chimiques effectuées sur les prélèvements d'eau réalisés au début du mois d'août 2012 à trois profondeurs de la zone centrale profonde confirment la faiblesse de la minéralisation de ce plan d'eau oligocalcique (tab. 24). Comme dans le cas du lac Blanc, les concentrations en pigments chlorophylliens sont très faibles au moment de mesure.

Paramètres	Unités	Surface	Thermocline (5m)	Fond (20m)
Calcium	mg/L	8	8	11
Fer	µg/L	<10	<10	17
Magnésium	mg/L	0,2	0,3	0,4
Manganèse	µg/L	<2	<2	2,9
Chlorures	mg/L	0,12	0,13	0,14
Fluorures	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Sulfates	mg/L	6	7	11
Nitrates	mg/L	0,41	0,41	0,22
Nitrites	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02
Ammonium	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Azote Kjeldhal	mg/L	<1	<1	<1
Phosphore total	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02
Phosphates	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05
DBO5 non diluée	mg de O ₂ /L	0,8	<0,5	1,2
Carbone Organique Total	mg C/L	0,43	0,36	0,69
Matières en suspension totales	mg/L	<2,0	<2,0	2,4
Matières en suspension organiques	mg/L	<2,0	<2,0	2,2
Chlorophylle a	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Chlorophylle b	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Chlorophylle c	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Phéopigment	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05

Tableau 24. Chimie de la masse d'eau du lac Verdet échantillonnée le 02/08/2012 à 20 mètres

Les taux d'azote minéral et organique mesurés dans le lac Verdet sont également très faibles. Les taux de phosphore total ne dépassent pas le seuil de 20 microgrammes par litre normalement associé comme valeur maximale aux lacs oligotrophes, mais le seuil de quantification proposé par le laboratoire ne permet pas de déterminer si ils dépassent les teneurs des lacs d'altitude les moins minéralisés.

Les eaux de contact avec de la strate profonde contiennent des teneurs en fer et en manganèse non nulles contrairement à ce qui est observé dans la masse d'eau. En revanche, les taux de sulfures, chlorures et fluorures sont faibles à nulles. Les concentrations en métaux apparaissant au fond pourraient donc résulter de relargage ou de remise en suspension ponctuels depuis les sédiments.

4.2.3. Chimie de la masse d'eau dans le lac Noir

Les analyses des échantillons d'eau prélevés le 02/08/2012 dans la colonne d'eau centrale du lac Noir confirment l'importance de la minéralisation de ce plan d'eau (tab. 25). En effet, les teneurs en calcium et en magnésium s'y révèlent nettement supérieures à celles qui ont été mesurées dans les lacs Blanc et Verdet. En valeur absolue, elles sont moyennes dans la masse d'eau et fortes dans l'eau de contact.

Corrélativement, les concentrations mesurées dans les strates supérieures sont notoires en fer et forte en sulfates. Les teneurs en cet anion sont même très élevées dans l'eau de contact. Ce faisceau d'information confirme la probabilité de l'existence d'alimentations hydrothermales au fond du plan d'eau.

Paramètres	Unités	Surface	Thermocline (5 m)	Fond (16m)
Calcium	mg/L	41	42	109
Fer	µg/L	13	17	<10
Magnésium	mg/L	7	8	23
Manganèse	µg/L	<2	<2	432
Chlorures	mg/L	0,15	0,16	1,97
Fluorures	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Sulfates	mg/L	80	83	270
Nitrates	mg/L	0,49	0,51	0,32
Nitrites	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02
Ammonium	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Azote Kjeldhal	mg/L	<1	<1	<1
Phosphore total	mg/L	<0,02	<0,02	<0,02
Phosphates	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05
DBO5 non diluée	mg de O ₂ /L	0,5	1,1	1,7
Carbone Organique Total	mg C/L	0,29	0,63	1,18
Matières en suspension totales	mg/L	<2	<2	2,2
Matières en suspension organiques	mg/L	<2	<2	2,2
Chlorophylle a	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Chlorophylle b	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Chlorophylle c	µg/L	<0,05	<0,05	<0,05
Phéopigment	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05

Tableau 25. Chimie de la masse d'eau du lac Noir échantillonnée le 02/08/2012 à 16 mètres

Les teneurs en azote organique et minéral mesurées à cette occasion étaient faibles. Parallèlement, les concentrations en phosphore totale et en phosphates ne dépassaient pas le seuil de quantification qui correspond à la limite supérieure des lacs oligotrophes. En revanche, les très fortes teneurs en manganèse de l'eau de contact indiquent la probabilité de phase d'anoxie des sédiments profonds.

4.3. Chimie des sédiments des lacs de l'Archeboc

4.3.1. Chimie des sédiments du lac Blanc

Les sédiments des points B et C possèdent des teneurs en matières organiques faibles, inférieures à 3 % (tab. 26). Ces valeurs sont en adéquation avec ce type de lac d'altitude dont le bassin versant est ultramajoritairement composé de roche métamorphique, de névé et glaciers.

Paramètre	Unités	Points	B (-26 m)	C (-26m)	D (42 m)
Matières sèches	g/kg		500	477	84,5
Matières organiques	% de MS		2,7	2,9	7,7
COT - Méthode Anne	g/kg de MS		7,94	7,67	38,0
Azote Kjeldhal sur solide	g/kg de MS		1,0	1,3	3,1
C/N			7,6	5,9	12,3
Phosphore total	mg/kg de MS		828	1114	920

Tableau 26. Trophie des sédiments profonds (-26 m) du lac Blanc prélevés le 4/08/2010

Cependant, la faible teneur en matière organique des sédiments profonds témoigne aussi de la faculté du lac à minéraliser et à recycler dans la colonne d'eau ou dans les sédiments superficiels le peu de matière organique produite de manière autotrophe (c'est-à-dire provenant de la production planctonique).

L'échantillon prélevé au point D est atypique. En effet, sa très forte teneur en eau (91,5 %) montre qu'il s'agit d'un prélèvement peu représentatif résultant du raclage d'une zone de dalle recouverte d'une mince couche de fines. Par conséquent, sa plus forte concentration en matière organique doit être considérée avec circonspection : il peut s'agir de sédiments très récents.

Les teneurs en C/N des sédiments prélevés sur les points B et C témoignent d'une provenance autotrophe nette de la matière organique puisqu'ils sont compris entre 5 et 7. Or cette gamme est typique du matériel planctonique dont les apports sédimentaires sont dominant dans ce type de plan d'eau « glaciaire ».

Cependant, la persistance de ces basses valeurs une fois ce matériel déposé pourrait témoigner d'une certaine lenteur de la minéralisation au sein du sédiment. En effet, le recyclage des dépôts d'origine planctonique nécessite un départ d'azote qui se traduit alors, pour ce type de sédiment, par une augmentation du C/N. Dans les meilleurs cas, ce paramètre atteint la valeur ultime de 10, qui peut être considéré comme le repère pour une matière organique complètement minéralisée.

Ce taux de recyclage mitigé de la matière organique pourrait expliquer les taux de phosphore total moyens à forts retrouvés dans les sédiments. Cet élément nutritif est en outre susceptible de rester piégé dans les sédiments bien oxygénés.

En revanche, les analyses d'éléments trace métallique dans les sédiments profonds montrent que les sédiments du lac Blanc sont affectés par 2 types de contaminations (tab. 27).

D'une part, les teneurs notoires en arsenic sont, à elles seules, susceptibles d'inhiber ou d'entraver le développement harmonieux des espèces benthiques sensibles. Cependant, ces fortes concentrations proviennent probablement de l'altération naturelle des roches métamorphiques qui composent le bassin versant et sont donc probablement très peu biodisponibles.

D'autre part, les contaminations plus ou moins accentuées en antimoine, cadmium, chrome, cuivre, étai, nickel, plomb et zinc peuvent provenir soit de minéralisation géologique dans le bassin versant, soit de la pollution atmosphérique. Certaines de ces teneurs sont susceptibles d'inhiber ou d'entraver le développement harmonieux des espèces benthiques les plus sensibles.

Paramètres	Unités	Points	B (-26 m)	C (-26 m)	D (-42 m)
Antimoine	mg/kg de MS		2,7	1,8	4,3
Arsenic	mg/kg de MS		69,6	48,9	68,3
Cadmium	mg/kg de MS		0,8	0,6	1,5
Chrome	mg/kg de MS		42,0	43,2	52,1
Cuivre	mg/kg de MS		50,7	47,8	67,9
Étain	mg/kg de MS		2,6	2,3	3,5
Mercure sur solide	mg/kg de MS		<0,5	<0,5	<0,5
Nickel	mg/kg de MS		48,5	45,3	47,1
Plomb	mg/kg de MS		82,6	71,1	119,0
Zinc	mg/kg de MS		148,0	139,0	164,0

Tableau 27. Éléments traces métalliques décelés en concentrations notoires dans les sédiments profonds du lac Blanc prélevés le 5/08/2010

4.3.2. Chimie des sédiments du lac Verdet

Les sédiments profonds du lac Verdet sont beaucoup plus organiques que ceux du lac Blanc puisque le taux de MO y fluctue entre 10,4 et 12,5 (tab. 28). Toutefois, les sédiments fins prélevés ne sont pas représentatifs de l'ensemble des fonds. Très hétérogènes, ceux-ci se composent majoritairement d'éléments minéraux grossiers.

Parallèlement, cette teneur notable en MO peut résulter d'apports importants ou / et de leur mauvaise décomposition. Or les valeurs de C/N fluctuant entre 6 et 8 correspondent à une origine planctonique dominante. En outre, dans des conditions optimales le C/N du plancton sédimenté évolue vers une valeur d'équilibre de 10.

Dans les sédiments du lac Verdet, les valeurs mesurées pour ce descripteur indiqueraient donc plutôt une minéralisation incomplète des apports autochtones.

On en déduit que les teneurs notoires en matières organiques résultent de matériels planctoniques résiduels accumulés dans des zones de dépôt préférentiel. Dans ce contexte, les taux de phosphores assez importants mesurés dans ces sédiments organiques sont susceptibles d'être relargués dans la masse d'eau à la faveur d'épisodes anoxiques même brefs.

Paramètre	Unités	Points	B (-15 m)	C (-15 m)	Centre (-20 m)
Matières sèches	g/kg		120	160	140
Matières organiques	% de MS		12,5	10,4	11,6
COT - Méthode Anne	g/kg de MS		52,2	43,8	48,7
Azote Kjeldhal sur solide	g/kg de MS		8,8	5,7	7,1
C/N			6,0	7,7	6,8
Phosphore total	mg/kg de MS		1 190	1 250	1 160

Tableau 28. Trophie des sédiments profonds du lac Verdet prélevés le 01/08/2012

Au sein de ces accumulations, des fortes teneurs en éléments traces métalliques ont été observées (tab. 29). En particulier, les concentrations en arsenic mesurées dans les sédiments profonds du lac Verdet sont très fortes. Parallèlement des teneurs notoires en cadmium, cuivre, nickel, plomb et zinc ont également été décelées.

Ces contaminations peuvent être d'origine naturelle ou provenir de pollutions atmosphériques. Dans les deux cas, elles pourraient suffire à expliquer le blocage ou le ralentissement des processus de décomposition de la matière organique.

Paramètres	Unités	Points	B (-15 m)	C (-15 m)	Centre (-20 m)
Antimoine	mg/kg de MS		5,0	<5,0	6,1
Arsenic	mg/kg de MS		195	301	259
Cadmium	mg/kg de MS		1,8	2,3	1,8
Chrome	mg/kg de MS		42	< 2	49
Cuivre	mg/kg de MS		41	37	42
Étain	mg/kg de MS		<5	<5	<5
Mercure sur solide	mg/kg de MS		<0,05	<0,05	<0,05
Nickel	mg/kg de MS		34	29	39
Plomb	mg/kg de MS		118	115	129
Zinc	mg/kg de MS		176	188	202

Tableau 29. Éléments traces métalliques décelés en concentrations notoires dans les sédiments profonds du lac Verdet prélevés le 1/08/2012

4.3.2. Chimie des sédiments du lac Noir

Les teneurs en matière organique des sédiments profonds du lac Noir, intermédiaires entre celles du lac Blanc et celles du lac Verdet (tab. 30), restent supérieures à celles qui seraient attendues pour des lacs d'altitude très peu productifs, dont la teneur en MO des sédiments ne dépasse pas 3 %. En outre, comme dans les sédiments du lac Verdet, ceux du lac Noir contiennent des taux de phosphore relativement élevés.

Paramètre	Unités	Points	B (-12 m)	C (-12 m)	Centre (-18 m)
Matières sèches	g/kg		380	250	190
Matières organiques	% de MS		4,4	6,5	6,6
COT - Méthode Anne	g/kg de MS		19,8	18,7	21,3
Azote Kjeldhal sur solide	mg/kg de MS		1,7	3,3	2,3
C/N	-		11,6	5,7	9,2
Phosphore total	mg/kg de MS		1 140	1 160	874

Tableau 30. Trophie des sédiments profonds du lac Noir prélevés le 01/08/2012

Toutefois, comme dans le cas du lac Verdet, les échantillons ne sont pas forcément représentatifs de l'ensemble des fonds du lac Noir dont une partie est, elle aussi constitué d'éléments minéraux. En outre, pour 2 points sur 3, la valeur du C/N s'approche de 10. Dans le cas d'apports planctoniques dominants, cette valeur repère indique la bonne efficacité de la minéralisation de la matière organique.

En revanche, comme dans le cas des deux autres lacs, les teneurs en plusieurs éléments traces métalliques atteignent dans les sédiments du lac Noir des niveaux susceptibles de perturber le développement harmonieux des espèces benthiques (tab. 31). Dans le plan d'eau considéré, il s'agit en particulier de l'arsenic et du nickel.

Paramètres	Unités	Points	B (-12 m)	C (-12 m)	Centre (- 18 m)
Antimoine	mg/kg de MS		<5	<5	<5
Arsenic	mg/kg de MS		86	95	54
Cadmium	mg/kg de MS		1,3	1,1	1,1
Chrome	mg/kg de MS		76	78	78
Cuivre	mg/kg de MS		96	74	95
Étain	mg/kg de MS		<5	<5	<5
Mercure sur solide	mg/kg de MS		<0,05	<0,05	<0,05
Nickel	mg/kg de MS		133	139	139
Plomb	mg/kg de MS		59	58	51
Zinc	mg/kg de MS		223	196	191

Tableau 31. Éléments traces métalliques décelés en concentrations notoires dans les sédiments profonds du lac Noir prélevés le 02/08/2012

4.4. Chimie de la neige superficielle des 3 BV

4.4.1. Teneur de la neige en éléments nutritifs

Dans la neige de l'année résiduelle recueillie en août 2010 et en août 2012, respectivement sur les versants proches du lac Blancs, puis des lacs Verdet et Noir, aucune teneur excessive en azote n'a pu être détectée (tab. 32). Toutefois les limites de détection pour les nitrates et l'azote organique ou nitreux étaient trop élevées pour repérer des contaminations azotées modérées.

En revanche, des teneurs en excès en phosphore total ont été décelées. Elles correspondent aux valeurs observées dans le cas d'une pollution atmosphérique moyenne.

Paramètres	Unités	B1 Est	B2 Nord	B3 Sud	V1 Nord	V2 Ouest	V3 Est	N1 Nord	N2 Ouest	N3 Est
Azote Kjeldhal	mg/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1,4	<1	<1
Nitrites	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	-	-	-	-	-	-
Nitrates	mg/L	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Phosphore total	mg/L	0,012	0,014	0,018	0,028	0,025	<0,020	0,052	<0,020	0,034
Antimoine	µg/L	0,1	<0,1	<0,1	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Arsenic	µg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cadmium	µg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Chrome	µg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Cuivre	µg/L	<0,1	0,3	0,2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Étain	µg/L	<0,1	<0,1	<0,1	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Mercure	µg/L	<0,1	<0,1	<0,1	0,02	<0,015	0,13	<0,015	<0,015	<0,015
Nickel	µg/L	0,1	0,4	0,4	<1	<1	<1	15	3,7	3,8
Plomb	µg/L	1	0,8	1,4	<1	2,3	<1	<1	<1	<1
Zinc	µg/L	3,3	10,2	13,1	36,8	5,1	8,3	19,4	12,8	25,1

Tableau 32. Azote, phosphore et éléments traces métalliques décelés en concentrations notoires dans la neige superficielle prélevée le 5/08/2010 sur le sommet des névés flanquant le lac Blanc (B1 à B3), puis le 02/08/2012 sur les névés des versants proches des lacs Verdet (V1 à V3) et Noir (N1 à N2).

4.4.2. Teneur de la neige en élément trace métalliques

Les très fortes concentrations en zinc qui ont été mesurées dans la totalité des échantillons de neige indiquent en revanche une forte contamination métallique. En effet, ces teneurs dépassent très nettement la valeur moyenne de **0,15 µg/L** indiquées pour la neige récente prélevée au Groenland par BOUTRON et al. (1991) et déjà considéré par les auteurs comme contaminée par le flux des émissions atmosphériques « moyennes » de l'hémisphère nord.

Des concentrations en plomb très élevées pour de la neige d'altitude ont aussi été décelées dans 4 échantillons sur 9. Quelques mesures témoignent de contaminations insidieuses en mercure (1 prélèvement sur les versant du lac Verdet) ou en cuivre (à proximité du lac Blanc). Enfin, des teneurs importantes en nickel sont également mesurées dans la neige prélevée sur les versants proches du lac Noir.

4.4.3. Bilan sur les signes de pollution atmosphérique

Les teneurs notoires en phosphore et importantes en plusieurs éléments-traces métalliques militent en faveur d'une forte contamination par des flux polluants d'origine atmosphérique. Cependant, comme les analyses ont été effectuées sur des reliques de fin de saison et comme les bassins versant sont parsemés d'éboulis denses et actifs, il existe une probabilité qu'une partie de ces contaminations soit d'origine minérale avec ou sans action d'aérosols très localisés.

On pourrait ainsi expliquer les fortes teneurs en plomb des échantillons recueillis sur les versants des lacs Blanc et Verdet, situé à proximité immédiate du glacier de l'Argentière, près duquel a été exploitée une mine de plomb (notice de la carte géologique de S^{te}-Foy-Tarentaise au 1/50 000^e). Parallèlement, les fortes teneurs en nickel de la neige prélevées à non loin du lac Noir pourraient être liée à des phénomènes d'hydrothermalisme, souvent impliquées dans la géologie de ce métal.

A contrario, les fortes teneurs en arsenic mesurées dans les eaux et les sédiments des plans d'eau, ne sont pas décelées dans la neige. En outre, la littérature géologique n'indique pas de minéralisation particulière en zinc ni en phosphore dans les terrains de ce secteur.

L'hypothèse pollutions d'origine atmosphérique ne peut donc être écartées. Sa confirmation ou son invalidation requerrait des analyses dans la neige fraîche ainsi que dans les pluies stockées dans des pluviomètres. Un tel dispositif permettrait aussi de quantifier les éventuels flux polluants.

4.5. Bilan sur la chimie et la physico-chimie des trois lacs

4.5.1. Niveau trophique des lacs de l'Archeboc

Les métabolismes chimiques des trois lacs de l'Archeboc présente un ensemble de caractéristique typique des systèmes aquatiques d'altitude :

- la stratification estivale est peu marquée du fait de température très froide de l'eau de surface, ce schéma étant plus particulièrement marqué pour le lac Blanc ;
- aucune anoxie n'est décelée dans la colonne d'eau en milieu d'été, même si quelques signes de désoxygénation partielle sont observés dans l'hypolimnion du lac Blanc et dans l'eau de contact du lac Noir ;
- les concentrations en phosphore total mesurées dans l'eau ne dépassent pas les seuils de 20 communément admis comme limite supérieure de l'oligotrophie ;
- les concentrations en azote total mesurées dans la masse d'eau sont très faibles ;
- les concentrations en pigments chlorophylliens sont très faibles même en été.

En revanche, les concentrations de phosphore mesurées dans les sédiments peuvent atteindre des valeurs moyennes, étonnantes dans le cas de lacs de montagne dont l'altitude dépasse 2 500 m. En outre, la minéralisation des eaux du lac Noir, à la fois notoirement calco-magnésienne et fortement sulfatées apparaît très différente de celle des 2 autres lacs qui sont plus faiblement minéralisés.

4.5.2. Potentiels de recyclage de la MO

Parallèlement, les taux de carbone organique et les rapports C/N observés dans les sédiments se différencient d'un lac à l'autre. Ils témoignent pour deux d'entre eux d'une tendance nette à l'accumulation de la matière organique probablement liée à des perturbations des mécanismes de minéralisation.

1. Les sédiments du lac Blanc sont, comme attendus, pauvres en carbone organique mais présentent des C/N inégaux, témoignant d'altérations locales ou intermittentes de la décomposition ultime des matériaux planctoniques sédimentés.
2. Les sédiments du lac Verdet sont plutôt riches en matières organiques et présentent des C/N bas qui inclinent à suspecter le blocage ou l'inhibition du recyclage des apports planctoniques ; ces tendances à l'accumulation ne sont toutefois pas générales mais ne sont observées qu'en certains points de la zone centrale profonde.
3. Les taux de carbone intermédiaire et les C/N proches de 10 mesurés dans les sédiments du lac Noir montrent que les mécanismes de minéralisation semblent mieux fonctionner dans ce lac qui pourrait donc s'avérer plus productif, comme en témoignent aussi les fortes densités de benthos littoraux.

4.5.3. Contamination métallique

Dans les sédiments des trois lacs, on observe des teneurs en éléments traces métalliques (ETM) élevées par rapport aux normes recueillies dans la bibliographie ou indiquée par la grille de qualité des sédiments du SEQ-Eau. Ces contaminations sont pour certaines (et en particulier pour l'arsenic) susceptibles d'expliquer les phénomènes de blocages intermittents ou partiels de la décomposition de la matière organique.

Cependant, une partie au moins de ces ETM et en particulier l'arsenic, le plomb et le nickel pourrait provenir de gîtes métallifères signalés ou suspecté dans les terrains magmato-métamorphiques de ce secteur des alpes (BRGM 2006). D'après cette même source bibliographique, lorsqu'ils proviennent des roches mères, ces éléments sont généralement sous formes de métaux natifs. Dans ce cas, ils seraient alors peu solubles et donc peu bio disponibles.

En revanche, aucune minéralisation de zinc et ou de phosphore n'est signalée dans les sols ou sous sols de ce secteur. Comme des teneurs importantes de ces deux éléments ont été mesurés dans la neige relictuelles des névés de fin de saison ainsi que dans les sédiments des trois lacs, ces contaminations pourraient provenir de flux polluants d'origine atmosphérique.

En effet, les écosystèmes alpins, très arrosés, sont particulièrement vulnérables à ce type de pollutions, surtout lorsqu'ils sont exposés à des vents dominants provenant de zones industrielles proches (NEDJAH I 2004). Or, les lacs de l'Archeboc sont situés à l'ouest de la plaine du Pô et au sud-est de la vallée de l'Isère, et ces deux régions industrielles sont réputées pour émettre des flux d'aérosol métalliques notoires.

Comme les effets de ces pollutions atmosphériques sont susceptibles de se combiner avec les dérèglements climatiques, leurs effets sur les lacs d'altitude doivent être suivis avec attention (ILYASHUK & ILYASHUK 2000).

5. Synthèse diagnostique et recommandations

Pour fonder les principes d'une gestion rationnelle des 3 lacs étudiés, le diagnostic synthétique de leur état de santé et de leur éventuelles altérations fonctionnelles a été établi en confrontant les structures des peuplements de consommateurs (poissons et benthos) aux capacités biogènes optimales de chacun des 3 plans d'eau. Dans cette optique, leurs potentiels écologiques respectifs ont été approchés en analysant la nature et la qualité de leurs mosaïques d'habitats aquatiques, leur métabolisme thermique et leur capacité nutritive.

5.1. Capacités biogènes liées à la qualité physique des lacs

A charge trophique et à fonctionnalité égales, la diversité et la composition des mosaïques d'habitat déterminent les capacités biogènes potentielles des plans d'eau. En particulier, la variété et la nature des habitats littoraux déterminent les potentiels nutritifs pour la plupart des espèces de poisson, ainsi qu'une partie des capacités de transfert des nutriments pour l'ensemble du plan d'eau.

Dans cette optique, la qualité des mosaïques d'habitats des 3 lacs a été caractérisée à partir de la cartographie standard des pôles d'attraction (tab. 33). Selon cette approche, un indice de qualité littoral a aussi été calculé pour chaque lac en pondérant la représentativité surfacique relative de chaque pôle littoral par son indice d'attractivité théorique, déterminé sur un grand nombre de plan d'eau.

Code	Compartiment ou pôle	Unité	Blanc	Verdet	Noir	
C	Zone centrale	%	43	18	11	
T	Zone sublittorale (talus)	%	48	59	72	
L	Zone littorale (prof. < 2 m)	%	9	23	17	
Pôles d'attraction de la zone littorale						<i>Attractivité sur 100</i>
LAFF LEFF	Afférence ou efférence	%		6	3	100
LBLO	Blocs avec anfractuosités	%	44	25	38	80
LGAL	Galets	%	47	5	5	60
LFNM	Fond nu minéral	%	9	64	52	12
	Fond nu organique				2	8
Nombre pôles littoraux			3	4	5	
<i>Indice d'Attractivité Littorale</i>			<i>195</i>	<i>131</i>	<i>180</i>	

Tableau 33. Caractéristiques morphologiques et habitationnelles des trois lacs de l'Archeboc

5.1.1. Mosaïque d'habitats du Lac Blanc

La cartographie des pôles d'attraction du lac Blanc met en évidence une faible proportion de zone littorale (fig. 17). La diversité de la zone littorale est faible, mais elle comporte une proportion importante de substrats très attractifs sous la forme de blocs avec anfractuosités.

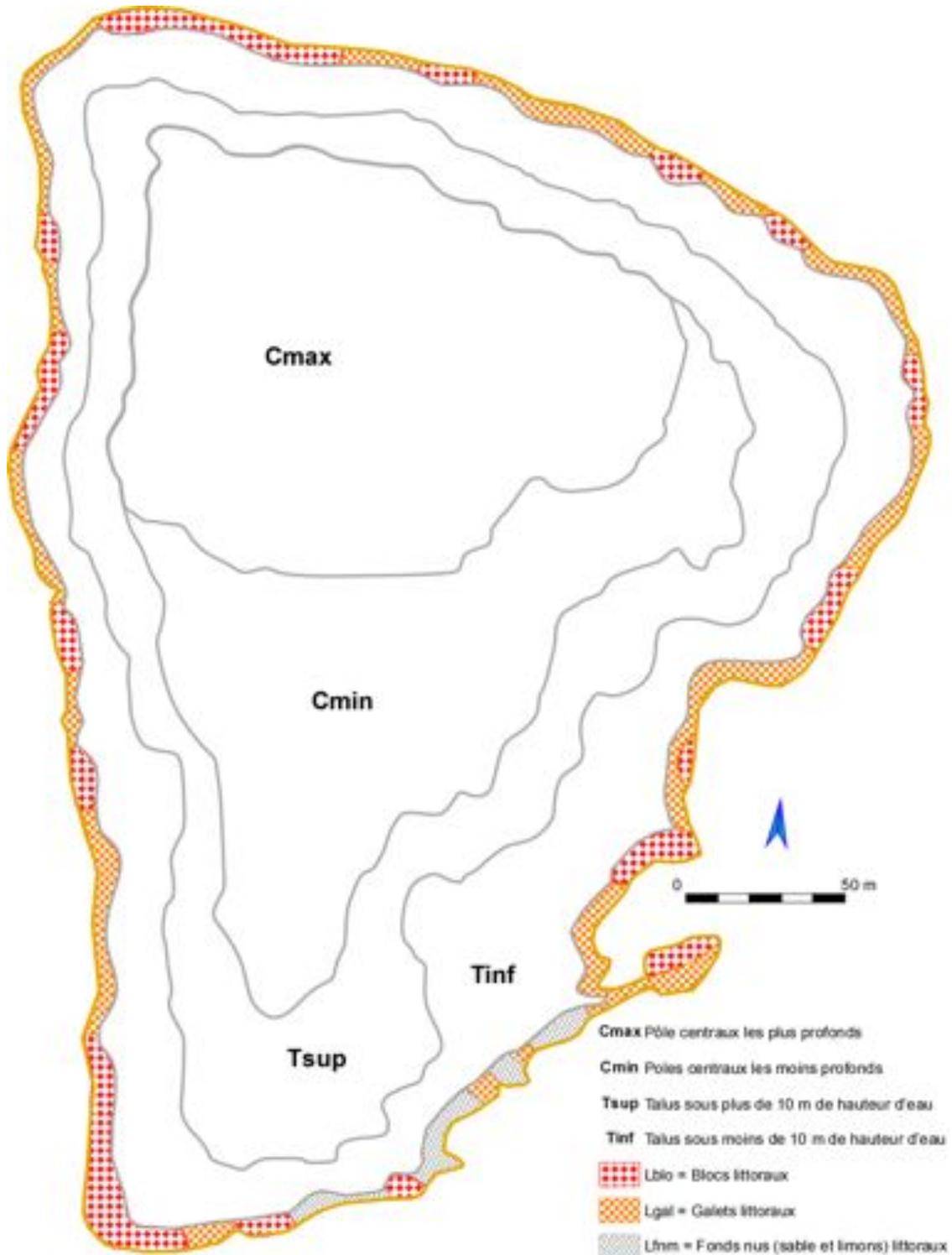


Figure 17. Cartographie standard des pôles d'attraction du lac Blanc (août 2010)

Parallèlement, la mosaïque des profondeurs du lac Blanc est très diversifiée. Comme les fonds sont très bien oxygénés, on en déduit que ce plan d'eau possède une forte capacité habitationnelle potentielle pour les salmonidés en général et pour le cristivomer en particulier.

5.1.2. Mosaïque d'habitats du Lac Verdet

La partie centrale du lac Verdet est moins diversifiée que celle du lac Blanc du fait d'une profondeur maximale moins importante (fig. 18). Parallèlement, une grande partie de la zone littorale est composée de limons de type « farine glacière » qui la rendent moins attractive.

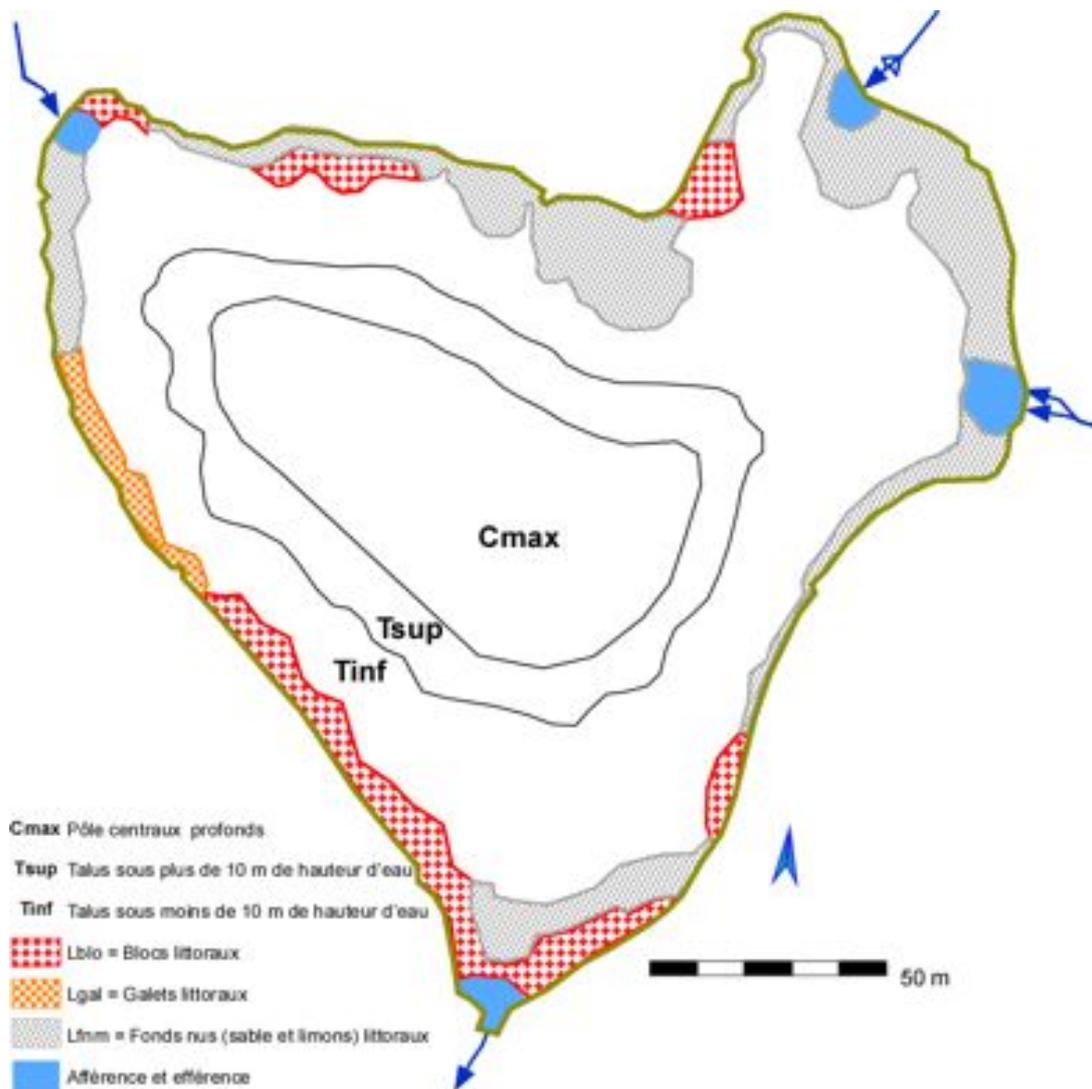


Figure 18. Cartographie standard des pôles d'attraction du lac Verdet (juillet 2012)

En revanche, la diversité et l'attractivité de la mosaïque d'habitats littoraux sont soutenues par la présence de 3 affluents permanents ou sub-permanents ainsi que par la connectivité du lac avec une petite portion de l'émissaire. En outre, des plages de blocs notoires fournissent des caches favorables aux alevins de cristivomers.

5.1.3. Mosaïque d'habitats du Lac Noir

La partie centrale du lac Blanc Noir est, comme celle du lac Blanc, limitée à une cuvette homogène de petite dimension (fig. 19). En revanche, la mosaïque d'habitats littoraux apparaît très diversifiée. En effet, elle comporte de large plage de blocs immergés avec anfractuosités. Quelques placettes de fond nus organiques viennent aussi la diversifier.

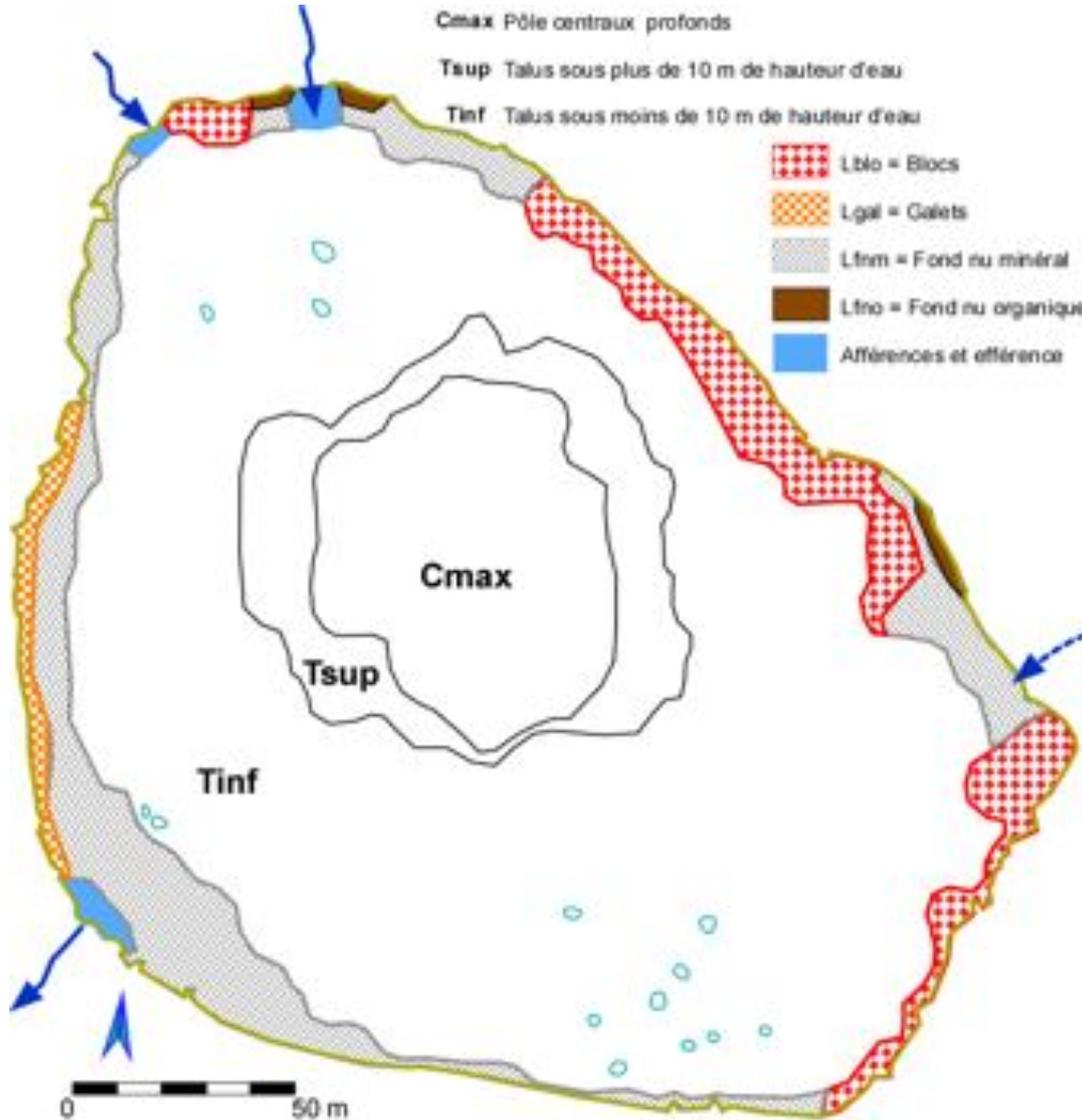


Figure 19. Cartographie standard des pôles d'attraction du lac Noir (août 2012)

La zone littorale du lac Noir bénéficie également de l'attrait de deux affluents très pentus mais dont l'influence rhéologique est sensible. Parallèlement, la cuvette est connectée à l'exutoire circulaire sur quelques dizaines de mètres au moins.

5.2. Métabolisme thermique

5.2.1. Dispositif d'enregistrement thermique

Des enregistrements thermiques ont été effectués dans chacun des 3 lacs à raison d'une mesure toutes les heures en surface, à 2 m de profondeur, ainsi qu'à 2 mètres du fond (fig. 20 - 21, tab. 34 - 35). Ces mesures ont été effectuées, respectivement, durant 12,5 mois entre le 15/10/2010 et le 02/09/2011 pour le lac Blanc, et durant 11,5 mois entre le 24/09/10 et 2/09/11 pour les 2 autres plans d'eau.

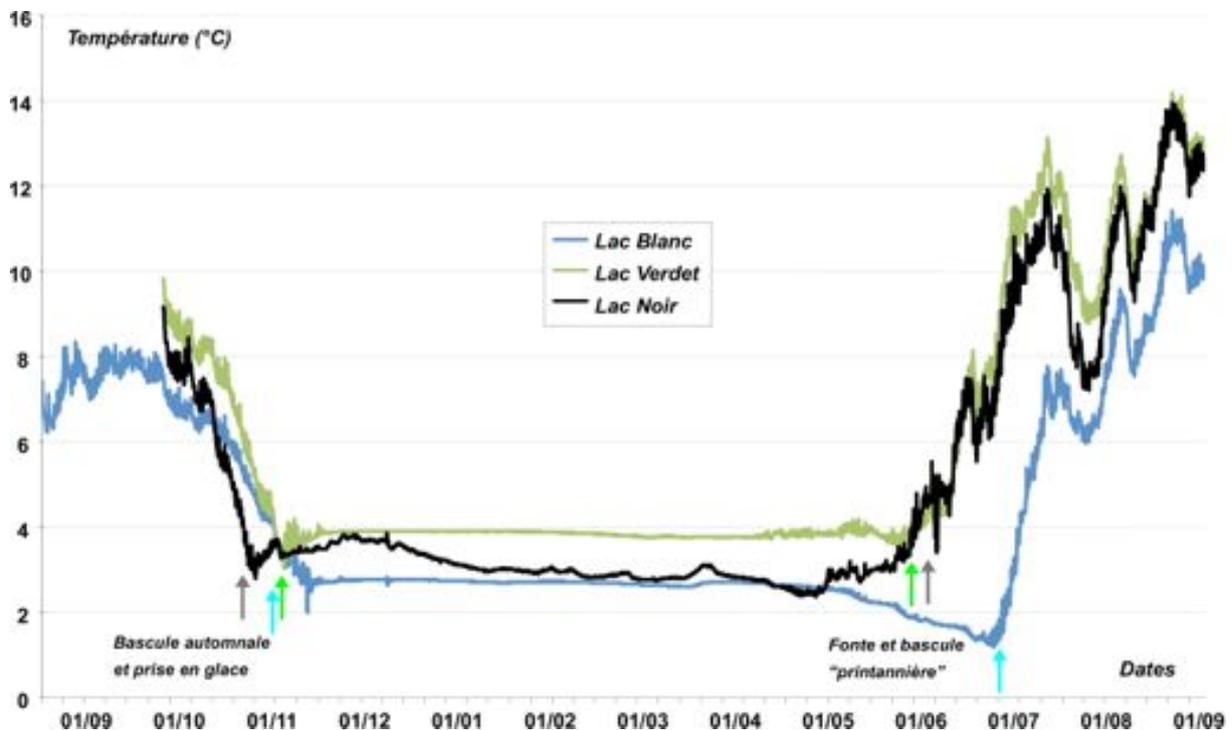


Figure 20. Enregistrement, au pas horaire, de la température de l'eau à 2 mètres de profondeur des lacs Blanc, Verdet et Noir de l'Archeboc du 01/09/2010 au 02/09/2011.

Descripteur thermique	Blanc (-2 m)	Verdet (-2 m)	Noir (-2m)
T° maximale	11,4	14,2	14,0
T° moyenne	4,2	5,9	5,1
T° max. moy. des 30 jours les + chauds	10,8	13,6	13,4
Date du mois le plus chaud	du 1/08/11 au 30/08/11		
T° minimale	1,2	3	2,4
Durée de la prise en glace (hiver 2010/11)	8,5 mois	7 mois	7 mois

Tableau 34. Descripteurs synthétiques du métabolisme thermique de l'épilimnion, à -2 m, des lacs Blanc, Verdet et Noir de l'Archeboc

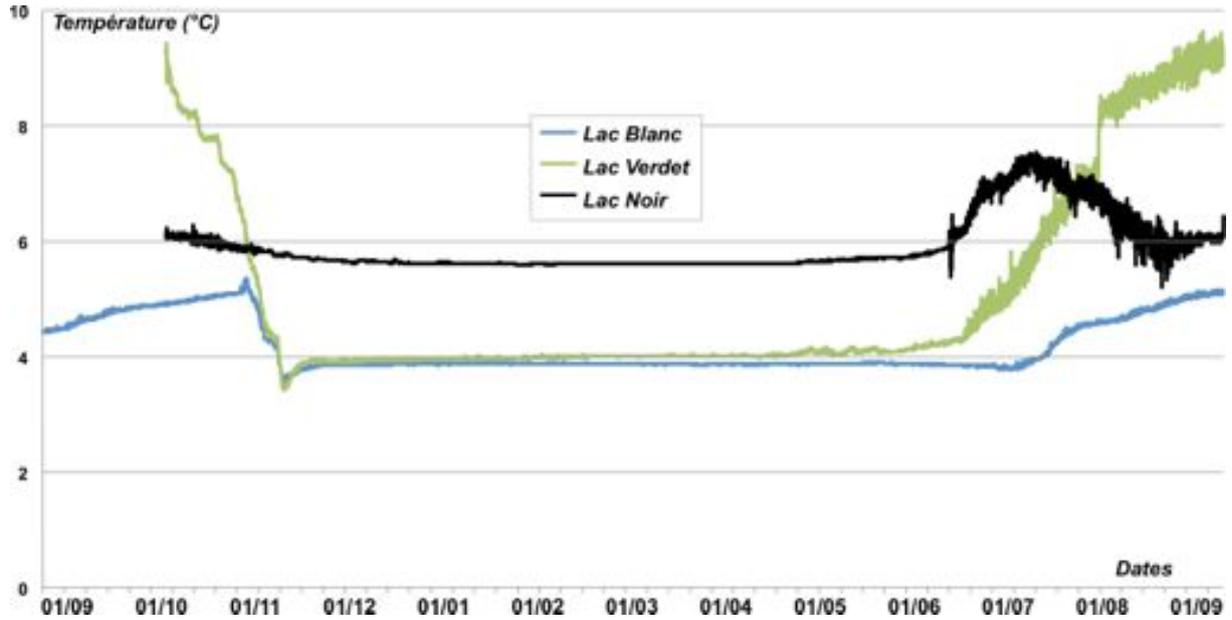


Figure 21. Enregistrement, au pas horaire, de la température de l'eau à 2 mètres de profondeur des lacs Blanc, Verdet et Noir de l'Archeboc du 01/09/2010 au 02/09/2009.

Descripteur thermique	Blanc (-38 m)	Verdet (-19 m)	Noir (-15 m)
T° maximale	5,4	9,6	7,5
T° minimale	3,6	3,4	5,2
T° moyenne	4,2	5,1	5,9

Tableau 35. Descripteurs synthétiques du métabolisme thermique de la zone profonde des lacs Blanc, Verdet et Noir de l'Archeboc

5.2.2. Métabolisme thermique du lac Blanc

Ces enregistrements indiquent que le lac Blanc est un lac très froid, appartenant à la première catégorie thermique (tab. 34). En effet, la température maximale mesurée en surface n'a pas dépassé 11,5° durant l'année de mesures commune pour les trois lacs, tandis que la température maximale du fond reste très proche de 4°C.

La température maximale moyenne des trente jours le plus chaud, qui advient dans l'épilimnion durant la fin du mois d'aout 2011 ne s'élève qu'à 10,8. Pour l'hypolimnion, les dates de réchauffement ou de refroidissements maximaux ne sont pas synchrones avec celle de l'épilimnion, ce qui démontre l'importance de l'inertie thermique du lac Blanc ou et corrobore l'hypothèse d'une alimentation par le fond.

En outre, la durée de prise en glace, qui dure de mi novembre à fin juillet dépasse 8 mois. Enfin la stratification thermique de ce plan d'eau, peu marquée en période estivale, ne s'affirme que durant quelques courtes périodes entre la fin de l'été et le début de l'automne (fig. 20).

5.2.3. Métabolisme thermique des lacs Verdet et Noir

Les lacs Verdet et Noir sont nettement moins froids que le lac Blanc, malgré la faible différence d'altitude des 3 plans d'eau. En surface, leurs températures maximales respectives, très proches l'une de l'autre, dépassent de près de 3 degrés celles qui ont été enregistrées au même moment dans l'épilimnion du lac Blanc. Parallèlement, leur durée de pris en glace est inférieure de plus d'un mois à celle du lac Blanc.

Durant certaines périodes, l'épilimnion du lac Noir apparaît plus frais que celui du lac Verdet. En revanche, la température du fond du premier lac Noir est généralement plus élevée de 2 degrés, sauf dans la période la plus chaude de l'été durant laquelle l'hypolimnion du Verdet s'échauffe d'avantage (fig. 21-22).

Sauf erreur de mesure, la stabilité de la température de l'eau de fond du lac Noir et sa valeur hivernale proche de 6°C inclinent à suspecter l'alimentation du plan d'eau par des arrivées profondes. Ces signes d'hydrothermalisme expliqueraient aussi sa minéralisation prononcée, en calcium, en magnésium et surtout en sulfates (cf. § 4).



Figure 22. Comparaison des « atmosphères » nimbant les lacs Blanc Verdet et Noir (de droite à gauche) en août 2012 (photos Michael GOGUILLY, couleurnature.eu)

5.2.4. Bilan sur l'approche du métabolisme thermique

La portée de ces mesures thermiques et de leur interprétation doit être relativisée au vu de la météo locale particulièrement fraîche des étés 2010 et 2011. En effet, idéalement, ces enregistrements devraient être répétés durant au moins 3 ans pour définir les régimes thermiques caractéristiques de chacun des plans d'eau. Toutefois, la comparaison des relevés obtenus simultanément sur les 3 lacs durant une année complète a permis de différencier leur métabolisme respectif.

Dans un contexte de dérèglement climatique, on en déduit l'intérêt de mettre en place un réseau thermique plus pérenne sur une dizaine de lacs alpins balayant des gammes d'altitude, d'alimentation hydrique et d'orientation contrastées.

5.3. Bilan sur les potentiels et le fonctionnement des 3 lacs

5.3.1. Principes d'une typologie piscicole fonctionnelle

Comme pour de nombreux plans d'eau d'altitude, le potentiel biogène en général et piscicole en particulier des lacs de l'Archeboc apparaît naturellement limité. En effet, leur métabolisme froid comportant une longue période de prise en glace, souvent combiné, comme dans le cas des lacs Noir et Verdet, avec une faible minéralisation bride la production du plancton, du benthos et de l'ichtyofaune.

Cependant, les bassins versants de ces systèmes ne subissent généralement que de faibles pressions anthropiques. Aussi, la grande majorité des lacs de montagne sont eufonctionnels. Lorsque c'est le cas, ils sont donc propices au bon développement et au maintien d'espèces de macroinvertébrés et de poissons très exigeants, justement électifs des milieux aquatiques froids et peu minéralisés.

Dans ce contexte, la démarche typologique proposée par TELEOS et al. (2008) permet de prédire les potentiels biologiques en général et piscicoles en particulier des lacs de montagne en l'absence de perturbation.

A partir de facteurs mésologiques simples, cette approche permet tout d'abord d'approcher le niveau typologique théorique en le plaçant sur une échelle de 9 degrés allant des lacs ultraoligotrophes très froids jusqu'à aux lacs chauds et très productif. Ce niveau typologique théorique, qui détermine les capacités écologiques optimales du plan d'eau, est calculé en utilisant la combinaison linéaire :

- d'un facteur décrivant le régime thermique : la température maximale estivale ;
- d'un facteur décrivant la trophie naturelle hors pollution : la conductivité ;
- d'un facteur morphologique : la surface relative de la zone littorale.

$$\mathbf{Tth = 3,2 \times \ln (Tmm/16) + \ln (Cond/8) + \ln (\%Lit/6)}$$

Où : *Tth* est le type théorique

Tmm est la température maximale moyenne du mois le plus chaud, en °C.

Cond est la conductivité, en $\mu\text{S}/\text{cm}$

% Lit est la surface relative de la zone littorale (profondeur < 2m)

On en déduit la composition « optimale » des peuplements associés aux plans d'eau. En effet, d'après la littérature, comme suivant nos observations de terrain, chacune des espèces adaptées aux lacs de montagne montre des plages de préférences différentes pour les facteurs mésologiques choisis. Corrélativement, sur une série limitée de lac de montagne peu ou pas perturbés, chacun des types théoriques à pu être associé à un ou plusieurs peuplements de même richesses spécifique (tab. 36).

Type de plans d'eau	Lo	L1	L2	L3	L4
Température estivale	Très froide	Très froide	Très froide	Froide	Froide
Minéralisation	Très faible	Faible	Faible	moyenne	Soutenue
Zone littorale	Très réduite	Réduite	Moyenne	Développée	Développée
Renouvellement	Très rapide	Rapide	Moyen	Lent	Lent
<i>Avec afférence ou émissaire "frayable et circulable"</i>	Saumon de f.	Trf ou Saumon de f.	Truite Ombles Truite Vairon Saumon de f. Vairon	Truite Vairon Chabot Ombles Chabot Vairon	Truite Vairon Ombles Loche Chabot
<i>Sans afférence ni émissaire "frayable et circulable"</i>	Cristivomer	Ombles ou Cristivomer	Cristivomer Ombles	Cristivomer Ombles Vairon	Cristivomer Ombles Vairon Loche

Tableau 36. Typologie préliminaire des peuplements piscicoles des lacs d'altitudes (Teleos 2008, modifié et complété d'après cette étude)

Dans un troisième temps, la comparaison des potentiels biologiques qui sont mesurés avec ceux qui sont prédits à l'aide des descripteurs synthétiques du complexe mésologique permet ensuite de préciser le diagnostic sur l'état des plans d'eau étudiés. Comme les lacs de montagne sont souvent isolés sur le plan hydrographique et plus encore en ce qui concerne les possibilités de migration des poissons, cette démarche fournit aussi un guide pour la gestion halieutique.

Dans le cas des lacs de l'Archeboc, le spectre typologique obtenu est très étendu, surtout compte tenu de leur proximité ainsi que de la similarité de leur altitude et de leurs dimensions (tab. 37). La gamme de types obtenus s'étend en effet de 1 à 4 sur une échelle allant de 0 à 9.

Descripteurs		Blanc	Verdet	Noir
<i>Tmm</i>	°C	10,5	13,6	13,4
<i>Cond</i>	µS/cm	47	58	270
<i>%Lit</i>	%	8,8	22	16
<i>Tth</i>	<i>de 0 à 9</i>	0,8 (soit L0-L1)	2,8 (soit L2-L3)	3,9 (soit L4)

Tableau 37. Typologie des lacs de l'Archeboc

5.3.2. Type et potentiel piscicole du lac Blanc

D'après cette approche, le type théorique du lac Blanc d'eau est de 0,8. Ce niveau typologique correspond à un peuplement optimum monospécifique de type « L0 à L1 », naturellement peu à moyennement dense, constitué soit de cristivomers, soit d'ombles chevaliers (tab. 37). En termes de gestion halieutique, le choix du cristivomer comme unique espèce introduite s'est donc avéré pertinent.

Les abondances numérique (très élevée) et pondérale (moyenne à faible) des cristivomers, estimées dans le plan d'eau à l'aide des filets verticaux, est également conforme aux potentiels piscicole optimaux offerts par ce type de plan d'eau. Cette adéquation entre le peuplement en place et le type théorique indique une situation référentielle en ce qui concerne les poissons.

Même si des signes de désoxygénation partielle furent décelés dans l'hypolimnion au moment des mesures, la faible teneur en MO des sédiments et son degré de minéralisation indiquent que les transferts y sont intenses sinon optimaux. En outre, malgré l'importance des teneurs en plomb, en zinc et surtout en arsenic, l'IBL n'indique qu'un faible degré de dysfonctionnement pour ce plan d'eau.

Il ne semble donc pas que l'introduction des cristivomer ait perturbé la chaîne alimentaire ni grevés les capacités de recyclage de ce plan d'eau. Ce point devra tout de même être vérifié à long terme.

5.3.3. Type et potentiel piscicole du lac Verdet

Le type calculé pour le lac Verdet est 2,8. Ce niveau typologique est compatible avec le développement harmonieux de 2 ou 3 espèces en abondances moyennes à fortes (type L2 à L3), centré autour du cristivomer, de l'omble, du vairon ou / et de la truite.

L'abondance moyenne à forte, pour un plan d'eau d'altitude, de la macrofaune benthique littorale et profonde du lac Verdet confirme que son potentiel biologique est nettement plus accentué que celui du lac Blanc. La biomasse piscicole abritait dans le premier de ces deux lacs y sont aussi nettement plus importantes, si l'on en croit les rendements de pêches qui y sont deux fois plus élevés.

La combinaison d'un métabolisme thermique moins froid et d'une zone littorale plus développée explique cette capacité nutritive plus élevée. En revanche, comme seul le seul cristivomer a été introduit dans ce plan d'eau, il est probable que le potentiel piscicole y soit actuellement sous-exploité.

Enfin, la légère tendance à l'accumulation de la matière organique et son degré incomplet de minéralisation montre qu'une partie des flux de matières et d'énergie ne sont pas complètement recyclés dans ce plan d'eau. Cependant, le degré de fonctionnalité du lac Verdet estimé à partir de l'IBL apparaît optimal, en dépit de la présence de contaminants métalliques ou métalloïdes sans doute rendu bénins par le bon taux d'oxygénation des fonds.

5.3.4. Type et potentiel piscicole du lac Noir

Le type théorique calculé pour le lac Noir s'élève à 3,9. Ce niveau typologique est compatible avec le développement harmonieux de 4 à 5 espèces en abondances moyennes à fortes (type L3 à L4), centré autour de la truite, du vairon et de l'omble.

Les capacités nutritives de ce plan d'eau sont en effet soutenues par sa bonne minéralisation ainsi que par l'importance relative de la zone littorale, qui compense son métabolisme froid. Elles se traduisent par les fortes densités de larves de chironomes littorales et profondes, ainsi que par une densité et une biomasse piscicoles importantes, comme en témoignent les rendements de pêches scientifiques.

Le très légers taux de dysfonctionnement indiqué par l'IBL pourrait être lié soit au teneur importante des sédiments en chrome, zinc et arsenic, soit à l'effet des teneurs notoire en soufre lors de phase de consommation de l'oxygène dans l'eau de contact des zones profondes. *A contrario*, les teneurs moyennes à faibles de la matière organique des sédiments, combinées avec son bon degré de minéralisation, indiquent la bonne fonctionnalité de la boucle microbienne dans ce lac.

Dans ce contexte, l'introduction réussie du cristivomer ne semble pas avoir provoqué de déséquilibre trophique dans ce lac. En revanche, ses potentiels piscicoles semblent sous exploités.

5.4. Recommandations de gestion piscicole et halieutique

5.4.1. Protection des lacs de l'Archeboc

Le 3 lacs étudiés sont eufonctionnels, à quelques nuances près. Les faibles signes dysfonctionnels décelés dans leur métabolisme sont probablement liés, pour une part, à la rigueur du climat d'altitude et, pour une autre part, aux teneurs notoires de leurs sédiments en certains éléments traces métalliques (ETM).

Or, ces contaminations sont induites, soit, par les caractéristiques géologiques des bassins versants, soit, par des pollutions atmosphériques. Il n'est donc pas possible de les supprimer ni de les juguler localement. En revanche, il serait judicieux d'établir une surveillance de l'évolution de l'intensité de ces contaminations tout en mesurant la nature et la dynamique des apports atmosphériques. (cf. § 5.4.5 ci-dessous).

Parallèlement, il paraît judicieux de proposer une protection renforcée des lacs en proscrivant tout projet et toute pratiques susceptibles d'induire des pressions sur leur charge trophique, sur leur morphologie ou sur leur hydrologie (tab. 38). En effet, les contaminations en ETM rendent ces plans d'eaux particulièrement vulnérables. Tout apport organique excessif, toute simplification des mosaïques d'habitat, toute modification des taux de renouvellement risquerait de se traduire par des tendances à la désoxygénation qui entraineraient la mise en solution des oxydes métalliques.

Thème	Lac Blanc	Lac Verdet	Lac Noir
Protection (prospective)	Proscrire prise d'eau, digue ou barrage éviter ou limiter pression pastorale		
Acclimatation supplémentaire à envisager	Aucune	Omble ? Vairon ?	Omble ? Vairon ? Truite ???
Pression de pêche	Ouverture tous les trois ans (en alternance) Réduire la taille minimale légale de captures des cristivomers à 30 cm Encourager l'exportation des salmonidés adultes capturés à la ligne		
Suivi de qualité	Analyses des flux polluants dans les précipitations Bilan écologique tous les 4 à 6 ans (Poisons, IBL, PX, sédiments)		

Tableau 38. Synoptique des propositions d'orientation de la gestion des 3 lacs de l'Archeboc

Dans leur état actuel, toutefois, les 3 lacs sont en bon état et présentent des capacités biogènes remarquables. Par conséquent, des principes de valorisation piscicole peuvent être proposés, en prenant soin de tenir compte de leurs types écologiques respectifs et de leurs caractéristiques fonctionnelles.

5.4.1. Validation de la gestion piscicole du lac Blanc

L'adéquation des structures quantitatives du peuplement piscicole du lac Blanc avec son type écologique et son état fonctionnel valide la gestion piscicole menée jusqu'à présent dans ce plan d'eau. En effet, le choix du cristivomer comme unique espèce à introduire a été pertinent. Les modalités de son introduction, puis la mise en réserve du lac pendant une durée dépassant l'âge de maturité des trois premières cohortes ont permis l'implantation d'une population pérenne et dense, sans perturber les capacités de recyclage de la matière organique.

La démarche de vérification avant validation qui a été adoptée pour la première phase de gestion halieutique de ce lac est elle aussi judicieuse puisqu'aucune autre introduction n'a été pratiquée et que la pêche y a été fermée jusqu'à ce que l'étude valide les choix opérés. Une réflexion doit cependant être menée sur la modulation de la pression de pêche de façon à augmenter la densité des individus de taille capturable (*cf.* ci-dessous).

5.4.2. Acclimations complémentaires (lacs Verdet et Noir)

Les lacs Verdet et Noirs sont eufonctionnels et apparaissent sous exploités sur le plan piscicole. Par conséquent, l'instauration de peuplement de poisson en adéquation avec leur type écologique peut être envisagée. En effet, ils n'abritent pour l'instant qu'une seule espèce (le cristivomer) alors qu'ils ont les capacités d'en abriter une ou deux autres en ce qui concerne le lac Verdet, et deux ou trois autres en ce qui concerne le lac Noir.

Le risque d'amorcer ou d'aggraver un éventuel effet « top-down » susceptible de perturber l'efficacité des transferts trophiques en réduisant la densité des invertébrés algophages (en particulier zooplancton) ou détritivore (benthos) est minime. En effet, un tel processus, s'il devait advenir, serait déjà et plus largement produit par les populations de cristivomers, très denses et constituées majoritairement d'individus juvéniles non strictement ichtyophage.

A contrario, l'acclimation d'espèces susceptibles de servir de proie aux cristivomers doperait, dans un premier temps, leur croissance et rendrait leur pression prédatrice plus importantes sur l'ensemble des individus zoo-planctonophages. Dans un second temps, la diversification de la chaîne alimentaire aboutirait à l'augmentation de la densité de salmonidés de taille capturable. La récolte de ces individus par la pêche à la ligne constituerait alors une exportation non négligeable de phosphore et d'azote qui conforterait la fonctionnalité du lac et contribuerait à en prolonger la pérennité.

Dans cette optique, et comme lors de l'introduction réussie du cristivomer dans les trois lacs, l'objectif doit être de choisir des espèces pouvant se reproduire, puis d'adopter des modalités d'introduction qui garantiront leur acclimation. Aucune autre introduction ne devra plus ensuite être pratiquée, de façon à favoriser l'installation d'une souche adaptée à chaque plan d'eau, puis à la protéger.

Dans le cas du lac Verdet, comme les afférences et l'émissaire du plan d'eau ne sont ni circulables ni frayables pour la truite, seule les introductions du vairon ou/et de l'omble chevalier peuvent être envisagées. En effet, le vairon pourra frayer dans les affluents peu profonds, mais aussi dans les franges littorales ventées. L'omble chevalier se reproduit quand à lui sur les talus et dans les fonds des lacs de montagnes en utilisant des frayères similaires à celles des cristivomers.

Dans le cas du Lac Noir, en plus de ces deux espèces, il peut être envisagé d'introduire de la truite. En effet, d'une part, la minéralisation, la diversité des habitats littoraux et les capacités nutritives de ce plan d'eau conviendraient particulièrement à ce salmonidé. D'autre part, le lac Noir est connectif avec un linéaire limité mais non négligeable de son émissaire qui comporte des frayères à truite potentielle.

Pour chacune des espèces qu'il aura été décidé d'introduire dans l'un ou l'autre des deux lacs considérés, il serait préférable de procéder par translocation de juvéniles capturés dans des lacs de montagne proches et donc issus de populations pérennes, déjà adaptées à ce type de milieux. Ces introductions devront être pratiquée à trois reprises, lors de trois années successives.

5.4.3. Modulation de la pression de pêche

Dans chacun des 3 lacs étudiés, les pêches scientifiques ont révélé une forte densité en cristivomer de moins de 35 cm et une très faible densité adultes. Cette configuration, non optimale sur le plan halieutique, induit en outre une intense compétition intra-spécifique opposant en particulier les individus immatures mesurant entre 25 et 35 cm.

In fine, dans un contexte de lacs de montagne présentant une saison de croissance courte avec des phases de faible productivité, les fortes densité d'immatures sont susceptibles de limiter leur propre croissance, voire de réduire leur propre taux de survie. Ce goulot d'étranglement pourrait expliquer la faible densité des adultes, par accroissement de la mortalité au moment de la maturation des gonades.

Aussi, pour juguler les effets de cette compétition intra-spécifique, il serait judicieux de diminuer la taille minimale légale de capture des cristivomers en la ramenant à 30 cm. Le prélèvement raisonné d'une partie des immatures par la pêche à la ligne devrait en effet se traduire, paradoxalement, par accroissement du nombre de « gros » poissons survivants. Ces cristivomers de grande taille, devenus ichtyophages, pourront ensuite à leur tour participer à la limitation de la densité des juvéniles.

Dans la même optique, et pour favoriser l'exportation de nutriments et de carbone sous forme de protéine, il serait aussi pertinent d'augmenter la fréquence des années d'ouverture à la pêche à la ligne de ces lacs. Un rythme d'une année d'ouverture pour deux années de fermeture permettrait de réaliser une permutation régulière tout en offrant une possibilité d'exercer la pêche tous les ans.

5.4.5. Propositions pour un suivi rationnel

En compléments de la présente étude, il serait judicieux de déceler l'origine des contaminations en éléments traces et d'élucider leurs impacts réels sur l'édifice biologique. Pour cela, nous préconisons des analyses régulières d'éléments trace métalliques et de micropolluants organiques dans le foie et la chair d'au moins 6 crustivomeres adultes tous les 3 ans. Dans cette optique, des mesures devraient aussi être réalisées dans les précipitations arrosant le bassin versant (pluie et neige fraîche) durant au moins un cycle annuel tous les 3 ans

Parallèlement, l'installation à demeure de 2 sondes thermographique dans chacun des 3 plans d'eau et leur dépouillement annuel sur au moins 3 années successives (idéalement au moins 6 ans) contribuerait à la mise en place d'un réseau de mesures thermiques dans les lacs alpins. Dans le contexte actuel de dérèglement climatique et de fonte des glaciers, ces milieux nous semblent en effet constituer des témoins précieux pour suivre l'évolution de la température des milieux aquatiques d'altitude.

Enfin, la pertinence de la stratégie de gestion mise en œuvre devra être vérifiée par un suivi de son impact, d'une part, sur les plans d'eau et, d'autre part, sur les peuplements de poissons. Idéalement, le même dispositif d'étude que celui qui a été appliqué ici devrait être répété au moins une fois tous les 6 ans (tab. 39). Toutefois, si une version allégée devait être choisie, il serait indispensable d'appliquer *a minima* sur chaque plan d'eau:

- une pêche scientifique selon le même protocole que celui employé pour l'état initial, mais en rajoutant une maille de 60 au dispositif CEN ;
- un IBL ;
- une série de mesures physico-chimiques sur la colonne d'eau centrale ;
- une analyse complète de trois échantillons sédimentaires en ajoutant la recherche de micropolluants organiques (PCB, pesticides...).

	Année n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5
Analyse précipitations	3 BV			3 BV		
Thermographie	3 lacs	3 lacs	3 lacs	3 lacs	3 lacs	3 lacs
Acclimatation complémentaire	Verdet Noir	Verdet Noir	Verdet Noir			
Ouverture à la pêche	Blanc	Verdet	Noir	Blanc	Verdet	Noir
Analyse de 6 crustivomeres	Blanc	Verdet	Noir	Blanc	Verdet	Noir
Diagnose écologique			Blanc	Verdet	Noir	

Tableau 39. Proposition d'un agenda de coordination des actions de gestion et de suivi de la qualité des trois lacs de l'Archeboc

Enfin, il serait aussi judicieux de mettre en place un carnet de pêche spécifique à ces trois lacs pour pouvoir estimer l'abondance des récoltes et donc des exportations de poissons. En fonction de l'applicabilité de ce dispositif, ce carnet pourra être attribué à un échantillon de pêcheurs volontaires fiables ou à tous les pêcheurs exerçant leur activité sur le lac.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

De 2010 à 2012 un ensemble coordonné d'investigations fournissant des mesures comparables a été appliqué à trois lacs du massif de la Vanoise septentrionale. Le dispositif d'analyses s'est attaché à caractériser à la fois les potentiels biologiques (poissons et benthos) et les paramètres mésologiques (chimie, thermie, morphologie) qui les déterminent.

Cette approche a permis de montrer que les 3 plans d'eau appartiennent à des types écologiques différents malgré leur grande similarité géographique. En effet, s'ils s'étendent à quelques kilomètres les uns des autres, dans une même gamme d'altitude comprise entre 2600 et 2900 m, ils sont caractérisés par des métabolismes thermiques, des gammes de minéralisation et des morphologies différentes. Leurs potentiels biologiques en résultent nettement contrastés.

La prise en compte de leurs capacités biogènes et de leurs particularités fonctionnelles a débouché sur un diagnostic détaillé. L'ensemble de la démarche a permis de proposer des recommandations rationnelles de ainsi que sur la proposition d'un système de suivi.

Le lac Blanc est un plan d'eau profond et très froid, peu minéralisé mais relativement bien oxygéné. Ses potentiels biologiques benthiques sont faibles. En revanche, son potentiel piscicole centré sur le cristivomer est moyen à fort et il est harmonieusement exploité et valorisé. Il en découle les recommandations suivantes :

- proscrire toute introduction supplémentaire ;
- diminuer la taille minimale de capture du cristivomer (de 35 à 30 cm) et augmenter la fréquence des ouvertures à la pêche (de tous les 7 ans à tous les 3 ans).

Le lac Verdet est un lac moyennement profond et froid, peu minéralisé, bien oxygéné. Son potentiel biologique benthique est moyen à fort, son potentiel piscicole est sous-exploité. Il en découle les recommandations suivantes :

- envisager l'introduction du vairon, puis de l'omble chevalier ;
- diminuer la taille minimale de capture du cristivomer (de 35 à 30 cm) et augmenter la fréquence des ouvertures à la pêche (de tous les 7 ans à tous les 3 ans).

Le lac Noir est un lac moyennement profond et froid, très minéralisé, bien oxygéné. Son potentiel biologique benthique est moyen à fort, son potentiel piscicole est fortement sous-exploité. Il en découle les recommandations suivantes :

- envisager l'introduction du vairon, puis de la truite si l'efférence est bien accessible à cette espèce et qu'elle peut bien y frayer et y circuler ;
- diminuer la taille minimale de capture du cristivomer (de 35 à 30 cm) et augmenter la fréquence des ouvertures à la pêche (de tous les 7 ans à tous les 3 ans).

Parallèlement, ces 3 lacs constituent un triptyque de milieux témoins propices à l'installation d'un suivi scientifique de la qualité des masses d'eau d'altitude. En effet, ils recouvrent des types écologiques différents qui ne sont apparemment soumis qu'à des perturbations d'origine atmosphérique. En revanche, la contamination de leurs sédiments par des éléments traces métalliques d'origine géologique ou atmosphérique, et même s'ils apparaissent pour l'instant peu biodisponibles, les rendent très vulnérables à toute pression susceptible d'entraîner une désoxygénation accentuée des fonds.

Une répétition tous les 4 à 6 ans du système de mesures standard appliquées en 2010 et 2012, ou au moins d'une version rationnellement allégée de ce dispositif, permettrait de disposer d'un tableau de bord pour suivre l'évolution de la qualité de ces trois plans d'eau et même de contribuer au *monitoring* des milieux d'altitude. Parallèlement, un tel suivi permettrait d'amender et d'améliorer ou de valider et de transférer ce modèle de gestion halieutique à d'autres milieux d'altitude.



Bibliographie citée et utilisée

- AE RMC, 2006b. *Inventaire exceptionnel de la contamination des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses*. Rapport de synthèse, 25 p. + annexes.
- AUMEN N. G., GRAY S., 1995. Research synthesis and management recommendations from a five-year ecosystem-level study of Lake Okeechobee, Florida (USA). *Arch. Hydrobiol.*, 45: 343-356.
- BORDERELLE A.-L., VERNEAUX V., GERDEAUX D., 2005. Biological quality assessment of three French Alpine lakes (Lake Annecy, Lake Crop, Lake Grand Dometon) using the Lake Biotic Index (LBI). *Arch. Hydrobiol.*, 162: 497-509.
- BRUNDIN L., 1949. Chironomiden and andere Bodentiere der Südschwedischen Urgebirgseen. *Report Instit. Freshwat. Res. Drottningholm*, 30 : 1-914.
- BYSTROM P., PERSSON L., WAHLSTROM E., 1998. Competing predators and prey: juvenile bottlenecks in whole-lake experiments. *Ecology*, 9: 8-24.
- CHACORNAC J.M., 1983. Lacs alpins oligotrophes du Brévent-Carlaveyron (Aiguilles Rouges, Haute-Savoie). Mémoire D.E.A. Univ. Cl. Bernard, Lyon I, 79 p.
- CHARCORNAC J.M., 1986. Lacs d'altitude : métabolisme oligotrophe et approche typologique des écosystèmes. Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard. Lyon I, 1 89 pages.
- CARANHAC F., 2001. Impact des relations intraspécifiques et interspécifiques sur l'abondance des populations. In Gerdeaux D. (Ed.), *Gestion piscicole des grands plans d'eau*, INRA éditions, Paris, 457 p. : 293-310.
- DAVAINE P., BEALL E., 1997. Introduction de salmonidés en milieu vierge (Iles Kerguelen subantarctique) : enjeux, résultats, perspectives. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 344/345 : 93-110.
- DEGIORGI F., 1994. Étude de l'organisation spatiale de l'ichtyofaune lacustre. Prospection multi-saisonnière de 6 plans d'eau de l'Est de la France à l'aide de filets verticaux. *Thèse Univ. Besançon*, Fr.-Comté, 207 p. + annexes.
- DEGIORGI F., DECOURCIERE H., BOURLET G., RAYMOND J.-C., 2010. Diagnose simplifiée du type écologique et du fonctionnement des lacs d'altitude. Note technique rédigée pour la Fédération de pêche de l'Isère : 4 p .
- DEGIORGI F., GUILLARD J., HOLMGREN K., DAHLBERG M., RAYMOND J.C., VERGES C., 2005. Swedish fish sampling, vertical nets and hydroacoustic: three approaches for the study of the fish population of a small lake (Jura, France). *International Symposium on Assessing the ecological status of rivers, lakes and transitional waters*, 11-15 July 2005, (Hull, UK).
- DEGIORGI F., GRANDMOTTET J.-P. RAYMOND J.-C, RIVIER B., 2001. Echantillonnage de l'ichtyofaune lacustre : engins passifs et protocole de prospection. In GERDEAUX D. (ed) "*Gestion piscicole des grands plans d'eau*", INRA éd. Paris, 457 p. : 151-182.
- DEGIORGI F., GRANDMOTTET J.-P., 1992. Impacts de la désoxygénation chronique de l'hypolimnion d'un lac de moyenne montagne sur l'ichtyofaune. *Ichthyophysiological Acta* 15 : 79-97.
- DEGIORGI F., GRANDMOTTET J.-P., 1993. Relations entre la topographie aquatique et l'organisation spatiale de l'ichtyofaune lacustre : définition des modalités spatiales d'une stratégie de prélèvements reproductible. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 329 : 231-243.
- DEGIORGI F., GUILLARD J., GRANDMOTTET J.-P., GERDEAUX D., 1993. Les techniques d'étude de l'ichtyofaune lacustre utilisées en France: bilan et perspectives. *Hydroécol. Appl.* 2 : 27-42.
- DEGIORGI F., GUILLARD J., HOLMGREN K., DAHLBERG M., RAYMOND J.C., VERGES C., 2005. Swedish fish sampling, vertical nets and hydroacoustic: three approaches for the study of the fish population of a small lake (Jura, France). *International Symposium on Assessing the ecological status of rivers, lakes and transitional waters*, 11-15 July 2005, (Hull, UK).

- DUSSART B., 1992. *Limnologie : l'étude des eaux continentales*. Ed. N. Boubée, 2e éd., Paris : 680 p.
- EISLER R., 1998. Nickel hazards to fish, wildlife, and invertebrates: a synoptic review. *U.S. Geological Survey. Biological Science Report*. USGS/BRD/BSR-1998-0001, 76 p.
- EGGERMONT H., HEIRI O., 2011. The chironomid-temperature relationship: expression in nature and palaeoenvironmental implications. *Biol. Rev.*, 64: 01-12.
- ELLIOTT J. M., 1989. Wild brown trout (*Salmo trutta*) : an important national and international resource. *Freshwater Biol.*, 21: 1-5.
- ELLIOTT J. M., 1994. *Quantitative Ecology and the Brown Trout*. Oxford, UK, 286 p.
- FLEMING I. A., PETERSSON E., 2001. The Ability of Released, Hatchery Salmonids to Breed and Contribute to the Natural Productivity of Wild Populations. *Nordic J. Freshw. Res.* 75: 71-98.
- Guide Technique SDAGE n°7, 2002. Pollution toxique et écotoxicologie : notions de bases - 84 pages, AE RMC ed., <http://rdb.eaurmc.fr>.
- HUTCHINSON, G. E., 1964. *A treatise on limnology. vol. 2, Introduction to lake biology and the limnoplankton*. Ed. J. Wiley, New York ,1115 p.
- HYLAND J. L., VAN DOLAH R. F., SNOOTS T. R., 1999. Predicting stress in benthic communities of southeastern U.S. estuaries in relation to chemical contamination of sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(11): 2557-2564.
- IJC (International Joint Commission) 1992. *Great Lakes Basin Watersheds, Area of Concern*. IJC ed., Windsor, Ontario, Canada, 389 p.
- KEITH P., ALLARDI J. (coord), 2001. Atlas des poisons d'eau douce de France. Coll. Patrimoines Naturels, MNHN, 47, 387 p.
- MAC M. J., EDSALL C. C., 1991. Environmental contaminants and the reproductive success of lake trout in the Great Lakes: an epidemiological approach. *J. Toxicol. Environ. Health*, 33(4): 375-394.
- MARTINOT J.-P., RIVET A., 1985. Typologie écologique des lacs de haute altitude du Parc National de la Vanoise en vue de leur gestion. Parc national de la Vanoise, Chambéry, Ministère de l'environnement, 63 p.
- MOORE J. W., RAMAMOORTHY S., 1984. *Heavy metals in natural waters - applied monitoring and impact assessment*. Springer-Verlag NY., 268 p.
- MÜLLER R., 1992. Trophic state and its implications for natural reproduction of salmonid fish. *Hydrobiologia*, 243/244: 261-268.
- MÜLLER R., MBWENEMO BIA M., 1998. Adaptive management of whitefish stocks in lakes undergoing re-oligotrophication: The Lake Lucerne example. *Arch. Hydrobiol.*, 50: 391-399.
- NIVA (Norwegian Institute for Water Research), 2006. Transboundary diagnostic analysis of lake Peipsi/Chudskoe. Project. "Development and Implementation of the Lake Peipsi/Chudskoe Basin Management Programme"
- OEHHA (Office of Environmental Health and Hazard Assessment), 1999. Prevalence Of Selected Target Chemical Contaminants In Sport Fish From Two California Lakes. *Public Health Designed Screening Study*, Final Project Report. California OHHEA, 254 p.
- OLIVER G., DEGIORGI F., COME G., RAYMOND J.-C., 2001. Échantillonnage des alevins en milieu lacustre : deux techniques utilisées selon un protocole standard. In GERDEAUX D. (Ed.), *Gestion piscicole des grands plans d'eau*, INRA éd. Paris, 457 p. : 193-214.
- RICOUX C, GASZTOWTT B., 2005. *Évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition de forts consommateurs de produits de la pêche de rivière contaminés par des toxiques de l'environnement*. Rapport réalisé pour l'Institut de Vieille Sanitaire : 65 p. + annexes.
- ROLLAND R. M., 2000. Ecoepidemiology of the effects of pollution on reproduction and survival of early life stages in teleosts. *Fish and Fisheries*, 1: 41-72.
- RUBIN J. F., GLIMSATER C., JARVI T., 2004. Characteristics and rehabilitation of the spawning habitats of the sea trout, *Salmo trutta*, in Gotland (Sweden). *Fisheries Management and Ecology* 11: 15-22.

- TURESSON H., PERSSON A., BRÖNMARK C., 2002. Prey size selection in piscivorous pikeperch (*Stizostedion lucioperca*) includes active prey choice. *Ecol. Freshw. Fish*, 11(4): 223-233.
- TUVIKENE L., NÖGES P., NÖGES T., 2001. Hypoxia/anoxia in Lake Vortsjarv, Estonia. *Fish Physiology, Toxicology, and Water Quality Proceedings of the Sixth International Symposium, La Paz B.C.S. Mexico January 22-26, 2001*. THURSTONE R.V. ed. US-EPA.
- US EPA, 2002. *Ecological Effects Branch Pesticide EcoToxicity Database*. Ecological Fate and Effects Division, Office of Pesticide Programs. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- VERNEAUX J., VERNEAUX V., GUYARD A. 1993a. Classification biologique des lacs jurassiens à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse des peuplements benthiques. I. Variété et densité de la faune. *Annls. Limnol.*, 29 : 59-77.
- VERNEAUX V., VERNEAUX J., GUYARD A. 1993b. Classification biologique des lacs jurassiens à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse des peuplements benthiques. II- Nature de la faune. *Annls Limnol.*, 29 : 383-393.
- VERNEAUX J., SCHMITT A., VERNEAUX V., 1995. Classification biologique des lacs jurassiens à l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse des peuplements benthiques. III. Relation entre données biologiques et variables du milieu. *Ann. Limnol.*, 31 (4) : 277-286.
- VERNEAUX V., VERNEAUX J., SCHMITT A., LOVY C., LAMBERT J.C., 2004 a. The Lake Biotic Index (LBI) : An applied method for assessing the biological quality of lakes using macrobenthos ; the Lake Châlain (French Jura) as an example. *Ann. Limnol., Int. J. Lim.*, 40(1) : 1-9.
- VERNEAUX V., VERNEAUX J., SCHMITT A., LOVY C., LAMBERT J.C., 2004b. Relationships of macrobenthos with dissolved oxygen and organic matter at the sediment-water interface in ten french lakes. *Arch. Hydrobiol.*, 160: 247-259.
- WERNER E. E., MITTELBACH G. G., HALL D. J. *et al.*, 1983. Experimental tests of optimal habitat use in fish: the role of relative habitat profitability. *Ecology* 64: 1525-1539.
- YEARLEY R.B. Jr., LAZORCHAK J.M., PAULSEN S.G., 1998. Elemental fish tissue contamination in northeastern U.S. lakes: evaluation of an approach to regional assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* 17(9): 1875-1884.
- SAWEDAL L., 1982. Taxonomy, morphology, phylogenetic relationships and distribution of *Micropsectra* Kieffer, 1909 (Diptera: Chironomidae). *Entomol. Scand.* 13: 371-400.
- SÆTHER O. A., 1979. Chironomid communities as water quality indicators. *Holarct. Ecol.*, 2: 65-74.
- WIEDERHOLM T., 1980. Use of benthos in lake monitoring. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 52: 537-547.
- WIEDERHOLM T., 1981. Associations of lake-living Chironomidae. A cluster analysis of Brundin's and recent data from Swedish lakes. *Schweiz. Z. Hydrol./Rev. Suisse Hydrol./Swiss J. Hydrol.*, 43 : 140-141 .

Annexes

Annexe 1. Extrait de la carte d'état major (1820-1840)

Remarque : le lac blanc figure sous l'appellation « lac Brulet »



Annexe 2. Localisation des filets tendus sur les trois lacs

