

RAPPORT DE FIN DE MISSION JEUNES EXPERTS - MJ'Ecko - 2018



Expertise pluridisciplinaire du Lac Titicaca (Bolivie – Pérou) :
Impacts des changements globaux sur la qualité de l'eau et les activités
productives.
Situation actuelle, scénarios et modes de récupération durable des
zones les plus vulnérables.

Maître de stage : Dr. Xavier LAZZARO, IRD/BOREA, 61 rue Buffon, 75231 Paris cedex 5, France /
IRD, La Paz, Bolivie

Organisme d'accueil : Institut de recherche pour le développement – Représentation IRD en Bolivie
Avenida Hernando Siles n° 5290 esq. Calle 7, Obrajes, La Paz, Bolivie

Mission Jeunes Experts, représentée par : BOUHASSOUN Alice, CHAPTAL Elise, FEVRIER Jacques,
FRANCOIS Roman, HESLING Pauline, MENAGE Claire, PICARD Lucille, PLESSIS Marine,
POIRIER Romain, ZIPPER David.

Tuteur de stage : Dr. Smaïl SLIMANI, ISTOM, 4 Rue Joseph Lakanal, 49000 Angers, France

Sommaire

Résumé	10
Remerciements	14
Index	15
Introduction	17
I- Grands principes du fonctionnement écologique d'un lac, et du Titicaca en particulier	20
<i>A- Caractéristiques physiques, chimiques et biologiques lacustres</i>	20
1) Caractéristiques physiques lacustres.....	20
a) Caractéristiques physiques d'un lac générique	20
b) Caractéristiques physiques du Lac Titicaca	22
2) Caractéristiques physico - chimiques lacustres.....	25
a) Caractéristiques physico - chimiques d'un lac.....	25
b) Caractéristiques physico - chimiques du Lac Titicaca	26
3) Caractéristiques biologiques lacustres.....	27
a) Caractéristiques biologiques d'un lac générique	27
b) Relation chlorophylle-phosphore total et nutriments dans un lac générique	28
c) Relation chlorophylle-phosphore total et nutriments du Petit Lac et de la baie de Puno	32
<i>B- Fonctionnement général du réseau trophique</i>	38
1) Structures des cascades trophiques lacustres.....	38
a) Cascades trophiques d'un lac	38
b) Cascade trophique du lac Titicaca	40
2) Eutrophisation.....	42
a) Les macrophytes	43
b) Techniques de biorestauration lacustre	46
b.1- La phytoremédiation	46
b.2- Bio-manipulation	49
c) Causes naturelles et anthropiques de l'eutrophisation	50
c.1- Causes naturelles.....	50
c.2- Le changement climatique et l'eutrophisation	51
c.3- Causes anthropiques appliquées au Lac Titicaca	53
II- Scénarios futurs	56
<i>A- Introduction</i>	56
<i>B- Niveau d'eau</i>	61
<i>C- Eutrophisation et qualité de l'eau</i>	66
1) La concentration de chlorophylle- <i>a</i> , estimée par la sonde FluoroProbe BBE.....	67
a) Le Petit Lac	67
b) Baie intérieure de Puno	68
2) Rejets d'azote et de phosphore d'origine animale et humaine, en fonction de l'évolution de la démographie des villes de El Alto et Puno.....	69
a) Quantité d'azote et de phosphore émise par la population humaine des villes de El Alto et de Puno	69
a.1- El Alto	69
a.2- Puno	70
b) Quantité d'azote émis par l'élevage bovin provenant des municipalités de El Alto et Puno	71
b.1- El Alto	71
b.2- Puno	72
3) La croissance démographique, l'expansion des villes et les résidus solides.....	74
a) El Alto.....	74
b) Puno.....	78

c) La région péruvo-bolivienne du Lac Titicaca	79
4) Assainissements et traitement des eaux.....	80
a) El Alto.....	80
b) Puno.....	80
c) La région péruvo-bolivienne du Lac Titicaca	81
5) L'évolution du secteur piscicole	85
6) La gestion de l'agriculture.....	90
7) L'élevage, le surpâturage et la destruction des bofedales et des totoras.....	92
8) L'application et l'évolution ou non des lois et des réglementations sur l'environnement, les activités anthropiques et les plans d'urbanisations.....	93
a) Politiques environnementales	93
b) Loi sur l'environnement et la gestion des ressources	93
c) Loi sur les activités piscicoles	94
d) Projet National de l'Innovation de la Pêche et de l'Aquaculture (PNIPA).....	95
e) Loi sur les activités minières	95
f) Plan Intégral de Gestion Environnementale des Résidus Solides (PIGAR)	96
9) Tourisme.....	97
10) Activités minières	99
<i>D-Conservation de la biodiversité et bioremédiation.....</i>	<i>101</i>
1) Impacts sur la biodiversité et conséquences	101
a) Intensification du changement climatique et des activités humaines.....	101
b) La déforestation	101
c) Le brûlage des totoras	101
d) Les rétroactions au sein d'un système écologique.....	102
2) Les métaux lourds.....	103
3) Les polluants émergents	103
a) Provenance des perturbateurs endocriniens tels que les médicaments.....	104
b) Exemple de résidus retrouvés aux États-Unis.....	105
c) Exemple résidus retrouvés en Europe	106
d) Cas du lac Léman.....	107
4) Indicateurs de capture du carbone chez les macrophytes (charas, totoras) et le phytoplancton...	108
a) Le phytoplancton.....	108
b) Les macrophytes	110
5) Conclusion.....	111
<i>E-Conclusion des trois scénarios et recommandations.....</i>	<i>112</i>
1) Conclusion.....	112
2) Recommandations et propositions générales	114
III- Gestion binationale actuelle du Lac Titicaca.....	115
<i>A- Gestion du lac Titicaca</i>	<i>115</i>
<i>B- Exemple de gestion de lacs transfrontaliers</i>	<i>118</i>
1) Gestion du lac Léman.....	118
2) Gestion des grands lacs Nord-Américains.....	119
3) Gestion du lac Tchad.....	120
<i>C-Proposition de gestion du Lac Titicaca</i>	<i>122</i>
Annexes :.....	124
<i>Annexe 1 : Approche de Penman (Ramiro Pillco Zolá, et al, 2018) :</i>	<i>124</i>
<i>Annexe 2 : Photographie du matériel de terrain</i>	<i>125</i>

Comment citer ce rapport :

Bouhassoun A., Chaptal E., Février J., François R., Hesling P., Ménage C., Picard L., Plessis M., Poirier R. & Zipper D. (2018) Expertise pluridisciplinaire du Lac Titicaca (Bolivie – Pérou) – Impacts des changements globaux sur la qualité de l’eau et les activités productives – Situation actuelle, scénarios et modes de récupération durable des zones les plus vulnérables. Rapport de fin de mission Jeunes Experts MJ’Ecko. Maître de stage: Dr. Xavier Lazzaro (IRD/BOREA). Tuteur de stage: Dr. Smaïl Slimani (ISTOM). ISTOM, Angers & IRD, La Paz. Octobre 2018, 136 pages.

Table des figures

Figure 1 : Cartographie de l'évolution de la surface en eau entre le lac Tauca et le lac Titicaca (Lazzaro, 2016, modifié d'après Ricardo Céspedes, 2015, Museo de Historia Natrual A. d'Orbigny, Cochabamba).	17
.....	
Figure 2 : Carte des pressions anthropiques subies par le lac (Lazzaro X. 2018).....	18
Figure 3 : Stratification thermique d'un lac en période chaude (Anderson et al., 2007).....	20
Figure 4 : Schéma illustrant la réponse des lacs peu profonds (eau claire/eau turbide) aux changements de concentration en nutriments (milieu oligotrophe/milieu hypertonique) (E. Jeppesen, 1998).....	21
Figure 5 : Carte bathymétrique du Lac Titicaca avec courbes isobathes distantes de 5 m (en haut). Baie intérieure de Puno (en bas à gauche). Petit Lac et baie de Cohana (en bas à droite). © Google Earth.	22
Figure 6: Moyenne des précipitations mensuelles sur le Lac Titicaca en 2015 et 2016.....	23
Figure 7: Carte représentant les différents affluents du Lac Titicaca (Carte élaborée par MJ'Ecko, 2018).	24
.....	
Figure 8 : Schématisation des différentes zones présentes au sein d'un lac (Anderson et al., 2007).	27
Figure 9 : Régression linéaire entre la concentration estivale en chlorophylle-a et le phosphore total dans les lacs japonais (cercles ; Sakamoto 1966) et d'autres lacs nord-américains de la littérature (triangles, Dillon & Rigler 1974). La ligne de régression est celle de Sakamoto (1966). D'après Dillon & Rigler (1974).	29
Figure 10: Effet hypothétique des piscivores sur la relation chlorophylle-PT dans les lacs avec des poissons planctivores (Drenner & Hambright, 2002).	30
Figure 11 : Effet théorique des piscivores sur la relation chlorophylle-phosphore total dans les lacs (Drenner & Hambright, 2002).....	30
Figure 12 : Evolution des biomasses de poissons planctophages, du zooplancton herbivore et du phytoplancton en fonction de la biomasse de piscivores (Drenner & Hambright, 2002).....	31
Figure 13 : Structure des chaînes trophiques en fonction du gradient de nutriments (Jeppesen et al., 2005).	31
.....	
Figure 14 : Carte des différentes stations de prélèvements de nutriments et de chlorophylle dans le Petit Lac. Expédition ECERP d'août 2016 (Lazzaro et al. 2017). (Carte modifiée par MJ'Ecko, 2018).....	33
Figure 15 : Carte des différentes stations de prélèvements dans la Baie d'intérieur de Puno (élaboration MJ'Ecko, 2018).....	34
Figure 16 : ACP entre le phytoplancton et la concentration totale en chlorophylle, sur les données médianes du Petit Lac de l'expédition d'août 2016 (MJ'Ecko, 2018).....	35
Figure 17 : ACP entre la concentration totale en chlorophylle, la conductivité, les nitrites (NO ₂), les nitrates (NO ₃), le phosphore (phosphates PO ₄), le pH, la turbidité et l'oxygène dissous (DO), à partir des données médianes du Petit Lac de l'expédition d'août 2016) (MJ'Ecko, 2018).	35
Figure 18: ACP entre la concentration totale en chlorophylle-a, le phosphore (PO ₄), les nitrites et les nitrates, à partir des données médianes de la Baie intérieur de Puno de l'expédition de juillet 2016) (MJ'Ecko, 2018).	36
Figure 19 : Evolution de la chlorophylle-a totale entre 2014 et 2018 sur la station E2 de la Baie Intérieure de Puno, à trois niveaux de profondeur (surface, intermédiaire et fond) (MJ'Ecko, 2018).....	37
Figure 20 : ACP des données de nitrite, nitrate, phosphore, pH, conductivité et oxygène dissous sur les données de 2008 à 2015 à une profondeur de 20% sur la station à 50m de la station d'épuration de Espinar (sur les données de l'ANA) (MJ'Ecko, 2018).	37
Figure 21 : Schéma théorique d'une cascade trophique pélagique en présence de piscivores (Drenner & Hambright, 2002).	38

Figure 22 : Schéma illustrant deux types de cascades trophiques pélagiques (Drenner & Hambright, 2002).	39
Figure 23: Schéma représentant les différents milieux du lac et les espèces de poissons qui y sont associées (Lauzanne, sd).	40
Figure 24 : Cascade trophique du lac Titicaca (MJ'Echo, 2018).	40
Figure 25 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un milieu oligotrophe (MJ'Echo, 2018).....	42
Figure 26 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un milieu eutrophe (MJ'Echo, 2018).	42
Figure 27 : Illustrations des trois types de réponses possibles d'un écosystème à une perturbation extérieure (Scheffer & Carpenter, 2003).	43
Figure 28 : Schéma exposant les deux hypothèses envisagées suite à une eutrophisation (Hootsmans et al.,1991).....	44
Figure 29 : Principales boucles de rétroaction considérées comme responsables de l'existence d'états alternatifs (eau turbide vs. eau claire) dans les écosystèmes lacustres peu profonds (Lazzaro, 2009, modifié de Scheffer et al., 1993).	45
Figure 30 : Carte de répartition des totoras autour du Petit Lac (Bolivie), à partir d'images Landsat8 et de calibration in situ des signatures spectrales de la réflectance (spectroradiomètre 300-1.000 nm) (Duarte,2018).	47
Figure 31 : Carte de répartition des totoras du Petit Lac (Bolivie) selon leur stade de développement : jeunes ou en bon état (en rose) vs. en senescence ou mauvais état (en vert), à partir d'images Landsat8 et de calibration in situ des signatures spectrales de la réflectance. De façon inattendue, on note que les totoras sont en meilleur état proche de la source de contamination constituée par l'embouchure de la rivière Katari dans la baie de Cohana (Duarte, 2018).	47
Figure 32 : Carte de répartition des totoras dans la Baie Intérieure de Puno (Pérou), Service National des Zones Naturelles Protégées par l'Etat, 2018.....	48
Figure 33 : Schéma conceptuel des interactions entre les problématiques planétaires ((Villeneuve C., 2015).	52
Figure 34 : Échelles géographiques de la qualité de l'air depuis l'air intérieur jusqu'aux phénomènes planétaires (Charpina D., 2016).	52
Figure 35 Carte des activités anthropiques présentes autour du Lac Titicaca (modifiée par MJ'Ecko, 2018).	55
Figure 36 : Evolution des températures de l'air sur une année observée en 2000 et simulée en 2050 selon un scénario pessimiste (Sc worst 2050) et un optimiste (Sc Best 2050) (modélisé grâce à la formule de Penman, voir annexe 1) (MJ'Ecko, 2018).	57
Figure 37 : Evolution annuelle des précipitations en 2000 et simulée en 2050 (modélisé grâce à la formule de Penman, voir annexe 1) (MJ'Ecko, 2018).	58
Figure 38 : Evolution annuelle de l'évaporation du Lac en 2000 et simulée en 2050 (modélisé grâce à la formule de Penman, voir annexe 1) (MJ'Ecko, 2018).	58
Figure 39 : Evolution mensuelle du niveau du Lac Titicaca entre 1914 -2010 (ALT, 2016).	61
Figure 40 : Disponibilité hydrique en Bolivie, A) base : 1961 – 1990 et B) projection du scénario A2 pour la période 2071 – 2100 (BID, 2014).	63
Figure 41 : Demande hydrique en Bolivie, A) base de 2008 et B) projection du scénario A2 pour 2100 (BID, 2014).	63
Figure 42: Schéma du potentiel conflit crée par la diminution du niveau de l'eau et l'augmentation de la demande en cette ressource (MJ'Ecko, 2018).	65
Figure 43 : Station de prélèvement, Fosse de Chúa, station la plus profonde du Petit Lac (MJ'Ecko, 2018).	67
Figure 44 Station de prélèvement à l'entrée de la Baie de Cohana (Lazzaro, 2018).	68

Figure 45 : Évolution des rejets annuels d’azote (bleu) et de phosphore (vert) par les eaux usées en provenance de El Alto dans le cas d’une croissance annuelle de 2% (MJ’Ecko, 2018).	71
Figure 46 : Graphique représentant l’évolution comparée de la population et de la croissance annuelle de la population de El Alto et de La Paz entre 1950 et 2002 (Demoraes, 1998).	74
Figure 47 : Evolution de la population bolivienne urbaine entre 1960 et 2015 (Banque mondiale, 2018).	75
Figure 48 : Evolution de la population dans la ville de Puno de 2000 à 2015 (INEI, 2015).	78
Figure 49 : Image satellite de la Baie intérieure de Puno (Pnuma, 2011).	81
Figure 50 : Carte du Lac Titicaca indiquant les principales villes, leur densité de population, avec la présence (en vert) et l’absence (en rouge) d’un système de traitement des eaux (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo)	82
Figure 51 : Carte du Lac Titicaca indiquant les principales villes, leur densité de population et l’état de fonctionnement des stations d’épurations : déficient (cercles bleus), absent (cercles roses), hors service (cercles vert), fonctionnement normal (jaune), en bon état (violet) (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre).	82
Figure 52 : Carte du Lac Titicaca indiquant la proportion de la population étant reliée aux égouts : avec réseau d’assainissement (marron) et sans réseau (beige) (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre del Lago Titicaca. P10).	83
Figure 53 : Carte du lac indiquant la proportion de la population ayant accès à l’eau potable : avec (vert) et sans (rouge) (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre del Lago Titicaca. P10).	83
Figure 54 : Carte des villes qui génèrent le plus d’eaux usées (MJ’Ecko, 2018).	84
Figure 55 : Evolution de la production de truites dans la région de Puno et au Pérou (1992 – 2017) (Imarpe, colloque mai 2018 à La Paz).	85
Figure 56 : Rôle de la pisciculture sur l’écosystème côtier. Schéma adapté de Folke, 1988 (Petit, 1991).	86
Figure 57 : Projection de l’évolution de la contamination en nutriments azotés et phosphorés en fonction de la production de truites en cages flottantes dans le Département de Puno (MJ’Ecko,2018).	87
Figure 58 : Graphique montrant l’évolution de la consommation de fertilisant en Bolivie entre 2004 et 2010 (JOAPE, 2015).	90
Figure 59 : Graphique montrant l’évolution du nombre de touristes à Puno entre 2009 et 2017 (MJ’Ecko, 2018).	97
Figure 60 : Graphique montrant l’évolution du nombre de touristes dans la région de Puno entre 2009 et 2017 (MJ’Ecko, 2018).	97
Figure 61 : Cycle d’interaction entre phytoplancton (miro-algues) et macrophytes aquatiques (plantes émergentes Totorá, flottantes Lemna et submergées Chara) renforçant l’existence d’états alternatifs (eau claire / eau turbide) (modifié de Scheffer et al. 1998).	102
Figure 62 : Principales voies de contamination du milieu aquatique par les médicaments à usage humain (Lévi, 2006).	104
Figure 63 : Schéma des diverses origines d’antibiotiques et de leurs résidus dans les eaux (Kolpin et al., 2000).	105
Figure 64 : Médiane ($\mu\text{g/L}$) des valeurs de résidus d’antibiotiques retrouvés dans des eaux de surface aux Etats Unis (Kolpin et al., 2000).	105
Figure 65 : Fréquence de quantification (%) des substances pharmaceutiques dans les eaux usées brutes et les eaux traitées (secondaires et tertiaires)	106
Figure 66 : Pompe biologique du carbone (et de l’azote) (UVED, 2008).	108
Figure 67 : Rôle du protozooplancton dans le transfert du carbone entre les deux premiers niveaux trophiques (Quéguinier, 2013).	109
Figure 68 : Rétroactions entre les activités humaines et le changement climatique (MJ’Ecko, 2018).	112
Figure 69 : SWOT** d’un lac transfrontalier (MJ’Ecko, 2018).	116

Figure 70 : Organismes péruviens et boliviens acteurs de la gestion du Lac Titicaca (MJ'Ecko, 2018).	117
Figure 71 : Organisation de la CIPEL (CIPEL, 2014).....	118
Figure 72 : CEGL Gestion des grands lacs américains (MJ'ecko, 2018).....	119
Figure 73 : Organigramme du Conseil du Bassin du Tchad (Commission du Bassin du Lac Tchad, 2016).	121
Figure 74 : Schéma de proposition de gestion pour le Lac Titicaca (MJ'Ecko, 2018).....	122

Table des Tableaux

Tableau 1 : Oxygène dissous, température et taux de saturation en oxygène du Grand Lac, Petit Lac et Baie de Puno en 2015 (IMARPE et al. 2015)	26
Tableau 2 : Concentrations moyennes de nutriments et chlorophylle-a dans le Petit Lac (Lazzaro et al. 2017, expédition binationale ECERP d'août 2016) et dans la Baie Intérieure de Puno (campagne IRD-ISTOM-IMARPE du 06 juillet 2018, non publiée) par rapport aux normes bolivienne (IBNORCA 2010) et péruvienne d'eau potable (Ministerio de Salud; 2011) qui sont très semblables.....	32
Tableau 3 : Tableau des traces de métaux dans les plantes hyper-accumulatrices (Abdelly, 2007).....	46
Tableau 4 : Tableau de la concentration de métaux lourds dans la totora par parties en saison sèche (Manjón Manjón, 2006).	48
Tableau 5 : Tableaux des concentrations de métaux lourds dans la totora par parties en saison humide (Manjón, 2006).....	49
Tableau 6 : Tableau des différents bassins et des sites miniers du territoire du lac Titicaca (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017).	54
Tableau 7 : Tableau représentant les effets des gradients optimiste et pessimiste des activités anthropiques (MJ'Ecko, 2018).	60
Tableau 8 : Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour une population de 922 000 habitants (MJ'Ecko, 2018).	69
Tableau 9 Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour une population de 147 397 habitants (MJ'Ecko, 2018).	70
Tableau 10 : Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour un cheptel de 155 106 bovins (MJ'Ecko, 2018).	71
Tableau 11 : Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour un cheptel de 547 bovins et 3 111 ovins (MJ'Ecko, 2018).	72
Tableau 12 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 922 000 habitants et une émission quotidienne de 0,6 kg/personne (MJ'Ecko, 2018).	76
Tableau 13 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 1 169 319 habitants et une émission quotidienne de déchets solides de : (a) réduite de moitié : 0,3 kg/personne/jour ; (b) inchangée : 0,6 kg/personne/jour ; (c) doublée : 1,2 kg/perso	76
Tableau 14 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 1,3 millions d'habitants et une émission quotidienne de déchets solides de (a) inchangée : 0,6 kg/personne/jour ; (b) doublée : 1,2 kg/personne/jour (MJ'Ecko,2018).	77
Tableau 15 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 147 397 habitants et une émission quotidienne de 0,6 kg/personne (MJ'Ecko, 2018).....	79
Tableau 16 : Quantité de farine de poisson et de soja présente dans l'alimentation des truites selon leur stade de croissance (Patzl Saire, 2013).	86
Tableau 17: Quantités de protéines, lipides et phosphore contenues dans la farine de poisson (IFREMER, 2008).	86

Résumé

Entre les Cordillères Orientale et Occidentale s'est formé un vaste plateau à une altitude moyenne de 4.000 mètres : l'Altiplano boliviano-péruvien. L'accumulation des eaux de pluie dans cette dépression a donné lieu à la formation d'un hydrosystème lacustre d'altitude. S'en est suivie une alternance de glaciations et de longues périodes de réchauffement qui ont occasionné des changements importants de superficie et d'emplacement des milieux lacustres. La masse d'eau lacustre s'est progressivement réduite au cours des temps géologiques en une succession de lacs, et s'est restreinte à la partie nord de l'Altiplano. Le Lac Titicaca comme nous le connaissons actuellement n'a que 9.000 ans et une superficie de 8.560 km².

Le Lac Titicaca, notre zone d'étude, est situé à 3.809 mètres d'altitude, à la frontière entre la Bolivie et le Pérou. Avec la rivière Desaguadero, le lac Poopó et le Salar de Coipasa il forme le système hydrique endoréique (enclavé entre les deux Cordillères sans débouché vers l'Océan) du Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa, appelé TDPS. Lors de notre mission, nous nous sommes particulièrement intéressés aux zones peu profondes. L'une en Bolivie : la Baie de Cohana, située au sud-est du Petit Lac, appelé Lac Huyñamarca (le petit lac) a une surface d'environ 60 km² et une profondeur moyenne < 1 m. La rivière Katari est le principal affluent qui alimente la Baie. En amont, ses affluents (les rivières Seco, Seque et Pallina) traversent la ville d'El Alto (Bolivie) et reçoivent, entre autres, les eaux résiduelles de El Alto et des villages du bassin du Katari. L'autre au Pérou : la Baie de Puno, divisée en deux zones : une Baie intérieure et une Baie extérieure. La Baie Intérieure de Puno (BIP) se trouve au nord-ouest du Grand Lac. Elle représente 0,2% du Lac Titicaca avec une superficie d'environ 17 km². Sa profondeur moyenne est de 2,4 mètres et sa profondeur maximale est de 5 à 6 mètres. Elle est reliée à la Baie Extérieure de Puno (BEP) et au Grand Lac par un canal. La BIP reçoit les eaux résiduelles de la ville de Puno. Les eaux des baies de Cohana et intérieure de Puno sont donc fortement contaminées.

Aujourd'hui ce système de zones littorales et de baies peu profondes est menacé par des pollutions d'origine anthropique (mine, agriculture, élevage pisciculture, industries et tourisme) et par le développement accéléré et anarchique des villes sur ses littoraux, l'installation et l'aménagement des populations dans les villes précèdent la mise en place de services adaptés au respect de la vie humaine et de l'environnement (traitement des eaux, évacuation des eaux résiduelles, traitement des déchets, transport, ...).

La biodiversité aquatique souffre de la surpêche, de l'utilisation anthropiques de certains végétaux (totoras) ou zones végétales (bofedales) essentiel(le)s au développement de la faune et de la qualité des eaux du lac contaminées en grande partie par les rejets des eaux résiduelles urbaines. Lorsque les apports en nutriments (essentiellement l'azote et le phosphore) sont trop importants, on parle alors de phénomène d'eutrophisation. Les nutriments vont engendrer la prolifération de micro-algues du phytoplancton (particulièrement les algues vertes sur le lac Titicaca), ce qui aura pour conséquences : la diminution de la profondeur de la zone photique (présence suffisante de lumière pour effectuer la photosynthèse), la diminution de la quantité d'oxygène dans la colonne d'eau, l'augmentation de particules solides en suspension dans l'eau, l'augmentation de matières organiques décomposables (les phytoplanctons morts) et de bactéries sulfato réductrices, entre autres. La faune et la flore subissent donc de plein fouet les conséquences de cette contamination désastreuse.

Les Hommes également, bien que responsables, subissent les odeurs nauséabondes émanant de certains endroits où l'eau est peu renouvelée. La santé publique est mise en danger car l'eau est polluée aux métaux lourds provenant des mines abandonnées mais dont la contamination perdure depuis des dizaines d'années, les poissons se faisant de plus en plus rares sont également contaminés.

Les problématiques de contamination et d'eutrophisation couplés à celle de l'augmentation de la population, de l'expansion urbaine et du changement climatique rendant la gestion binationale du Lac Titicaca très complexe et extrêmement préoccupante.

Le lac Titicaca est un système hydrique partagé entre les frontières du Pérou et de la Bolivie. Bien que la communication entre les deux pays et l'échange de données scientifiques ne soient pas toujours effectués correctement, ces deux pays le savent : leur lac et les populations humaines, animales et végétales, qui y vivent et jouissent de cet environnement, sont en danger. Les causes et les conséquences des contaminations, disparitions d'espèces, proliférations d'algues ont été identifiées dans de nombreux rapports avant notre venue. La population vivant sur les littoraux du lac (en Bolivie ou au Pérou) et pratiquant des activités socio-économiques comme la pêche ou la pisciculture fait savoir aux deux gouvernements que l'état du lac est déplorable, que les déchets s'accumulent, que les algues abondent, que les odeurs deviennent gênantes pour l'activité touristique, que les poissons se font de plus en plus rare, ... Mais la tâche est rude et les pouvoirs politiques ne font, malheureusement, pas du Lac Titicaca leur priorité.

Des acteurs académiques faisant partie du corps scientifiques (boliviens, péruviens et internationaux), politiques ainsi que de la société civile travaillent sur les sujets et problématiques en relation avec le Lac Titicaca.

Entre 1955 et 1957 avait lieu le 1er agrément des 2 pays pour étudier les caractéristiques hydrologiques du Lac Titicaca. Et en 1992 les deux pays ont créé l'ALT : l'Autorité binationale autonome du système hydrique du Lac Titicaca, Rio Desaguadero, Lac Poopo, Salar de Coipasa (système TDPS).

L'IRD, l'Institut de Recherche pour le Développement, notre organisme d'accueil pour notre mission, est un institut français, acteur de développement, dont le modèle est le partenariat scientifique équitable avec les pays en développement, principalement ceux des régions intertropicales. L'objectif de l'IRD est de mener des recherches scientifiques et de développer des formations académiques avec les partenaires locaux afin de produire des connaissances sur les socio-écosystèmes et de concevoir des solutions adaptées aux défis auxquels l'Homme et la planète font face. En Bolivie, le partenaire principal de l'IRD est l'UMSA, l'Universidad Mayor de San Andrés, la principale université publique du pays. Au Pérou nous avons travaillé avec l'UNAP, l'Universidad Nacional del Altiplano, l'université de la ville de Puno. L'institut de recherche a impulsé la création de l'OBLT (Observatoire Binational du Lac Titicaca) en 2015. Cette entité rassemble la collaboration des institutions scientifiques et techniques boliviennes et péruviennes avec la coopération française (Représentation IRD en Bolivie). L'objectif de l'OBLT est de comprendre les mécanismes de l'eutrophisation, d'effectuer le suivi de la qualité de l'eau, de détecter la détérioration du lac par l'utilisation d'images satellites, de réaliser des campagnes binationales de mesures *in situ*, ... L'IRD s'inscrit donc dans une dynamique sociale et scientifique binationale et leur présence, depuis 50 ans, sur la région du Lac Titicaca est un succès. Notre maître de stage le Dr. Xavier Lazzaro, chercheur hydrobiologiste de l'IRD, est intégré aux projets de l'université et travaille en partenariat avec d'autres chercheurs de l'UMSA en Bolivie, de l'IMARPE (Instituto del Mar del Perú) au Pérou, ainsi que de l'ALT, comme partenaires principaux.

Le Lac Titicaca mobilise de nombreux acteurs entre scientifiques, politiques et membre de la société civile, système que nous avons tenté de comprendre et pour lequel nous avons essayé d'apporter nos connaissances et compétences tout en étant chaleureusement soutenu par l'ensemble de ces entités. Nous avons pu, durant notre mission, rencontrer un certain nombre de ces acteurs. Chaque entité (association, pêcheurs, chercheurs, étudiants, ...) est consciente des enjeux sociaux, économiques et environnementaux qui concernent le futur du Lac Titicaca, de la région de l'Altiplano et de l'avenir incertain d'un grand nombre d'habitants. Cette multitude d'acteurs fait de la gestion et de la compréhension du lac un système complexe et la communication ainsi que l'échange d'informations et le partage de savoir-faire doivent être les mots d'ordre d'un tel système. La Bolivie et le Pérou sont interdépendants par rapport aux ressources du Lac Titicaca. Malheureusement, il y a un déséquilibre des objectifs lacustres et du budget attribué au Titicaca entre ces deux pays. Sa gestion est donc très complexe et sensible. En effet, le Pérou ayant plus de moyen et des eaux plus profondes tend à développer la pisciculture en cages flottantes de façon intensive, tandis que la Bolivie compte peu de fermes piscicoles mais subit plus la contamination

car ses eaux sont moins profondes donc moins renouvelées et avec un stock de nutriments pour le phytoplancton ayant accès à la lumière et à l'oxygène plus important. Cependant les deux pays comportent des zones de contamination critiques (Baie de Cohana en Bolivie et Baie de Puno au Pérou) pour lesquelles les causes sont souvent les mêmes (développement urbain, absence de services publics : traitement des eaux, collecte des déchets, activités minières et industrielles polluantes, ...).

Notre mission Jeunes Experts avait pour ambition, initialement, d'étudier 5 sujets distincts :

- S1 : L'état de l'art et des connaissances actuelles.
- S2 : La phytoremédiation, les capacités des plantes et particulièrement des totoras à fixer les polluants.
- S3 : La cartographie du lac et des activités socio – économiques présentes.
- S4 : La gestion du lac entre les différents organismes en s'appuyant sur l'exemple du lac Léman.
- S5 : Les scénarios futurs d'évolution du système hydrique.

Une fois sur place, la tâche étant dense, nous avons pris la décision de réduire notre mission et de conserver principalement le sujet 5 sur les scénarios, cela étant une des préoccupations majeures et un sujet encore peu abordé par la communauté scientifique péruvo – bolivienne. Avant notre départ, nous avons couvert le sujet S1, de façon non exhaustive. Dans notre rapport pour l'IRD, nous avons inclus des informations et recherches concernant la phytoremédiation (S2), des cartes (S3) et des recommandations de gestion (S4) tout en faisant des scénarios et pronostics de l'état futur du lac le fil conducteur de notre mission. L'objectif final de cette étude, est d'élaborer des scénarios et pronostics futurs en étudiant les impacts des activités anthropiques et du réchauffement climatique, pour ensuite proposer des recommandations et des pistes d'amélioration de la gestion binationale. Ce travail se concentre sur les zones peu profondes (≤ 5 m) du lac, ce sont elles qui reflètent l'état de santé du lac, « lorsque les eaux profondes seront dans le même état que les zones peu profondes, il sera trop tard pour sauver le lac Titicaca » (X. Lazzaro).

Le terrain nous a permis de réaliser l'ampleur du travail et de la zone d'étude. Ces deux aspects ont accéléré notre décision quant à l'allègement de notre mission et à la modification de la méthodologie. De plus le contexte binational de la zone d'étude ne facilite pas les études scientifiques. L'accès aux données n'est pas toujours chose facile. Les opinions concernant la gestion du lac et la responsabilité de chacun des deux pays sur le sort réservé au lac divergent. L'organisation des organismes politiques et scientifiques est correcte, cependant on a pu observer un manque de coordination entre tous ces acteurs. L'avis des scientifiques est-il toujours pris au sérieux ? Le signal d'alarme de certains scientifiques et de la société civile est-il toujours entendu et pris en compte lors des décisions politiques ?

Nous avons pu travailler pendant 5 semaines à La Paz, pendant lesquelles nous nous sommes rendus trois journées sur le terrain (Lac Titicaca). Ces journées étaient primordiales pour nous car nous devons nous rendre sur le terrain pour prendre conscience de ce que l'on étudiait dans les locaux de l'université à La Paz, la capitale administrative de la Bolivie. Nous réalisions des prélèvements avec notre maître de stage Dr. Xavier Lazzaro ainsi que des observations visuelles que nous corrélions avec les données des prélèvements pour ensuite proposer des conclusions et recommandations. Suite à ces 5 premières semaines nous nous sommes rendus de l'autre côté, au Pérou, dans la ville de Puno sur le littoral du Grand Lac. Nous y avons effectué une seule sortie afin de récupérer des échantillons et rendre compte du désastre que cause une ville (même moyenne) en bordure du lac.

Notre méthodologie et organisation reposaient sur les analyses des prélèvements, les analyses visuelles et les ressources bibliographiques que nous avons à notre disposition ainsi que les données qui nous ont été transmises par les différentes institutions. Grâce à ces outils nous avons réalisé les scénarios, des cartes qui ont servi « d'images » aux scénarios pour ensuite proposer des recommandations concernant les activités socio – économiques, la préservation de l'environnement et la qualité de l'eau et la gestion du Lac Titicaca.

Nous avons eu la chance de participer à différents évènements (colloque, conférence, manifestations) qui étaient le reflet de la volonté commune de préserver ce joyau unique et sa biodiversité, de mettre en place des moyens efficaces de services publics autant au Pérou qu'en Bolivie et de redonner l'éclat et la pureté aux eaux du berceau des civilisations pré-colombiennes.

Notre travail présente dans un premier temps les grands principes de fonctionnement des lacs et du Lac Titicaca. Rappeler ces connaissances est essentiel avant de commencer à imaginer des scénarios. Puis nous avons développé des pronostics d'évolution sur les thèmes du niveau de l'eau, de l'eutrophisation et de la biodiversité en prenant en compte pour ces trois aspects l'évolution du climat et l'évolution des activités socio – économiques. Le pronostic de l'eutrophisation prend en considération diverses thématiques (chlorophylle, rejets d'azote et de phosphore, tourisme, mine, agriculture, pisciculture, élevage, gestion des déchets et des eaux usées, démographie et expansion des villes, législation). Des propositions de recommandations accompagnent ces pronostics. Enfin nous proposons une gestion inspirée de celle du Lac Léman dont la gestion est assurée par la CIPEL, la Commission Internationale de Protection des Eaux du Léman.

Remerciements

Nous remercions Dr. Xavier Lazzaro (IRD/BOREA) pour son soutien, ses conseils, son dévouement, sa sagesse, sa patience et ses connaissances qu'il nous a communiqué tout au long de cette étude.

Nous remercions aussi tous les professionnels avec qui nous avons collaboré pour établir notre rapport :

MSc. Javier Nuñez Villalba (IIGEO/UMSA) et étudiants.es
Dr. Darío Achá & Dr. Luis Pacheco (IE/UMSA) et étudiants.es
Dr. Gonzalo Lora (GIRH PNUD/GEF)
Dr. Ramiro Pillco & Dr. Jorge Molina (IHH/UMSA)
Dr. Álvaro Garitano-Zavala (IE/UMSA)
Dra. Patricia Urquieta (CIDES/UMSA)
Dr. Vladimir Orzag (Agronomía UMSA)
Dr. Javier Claros (BioCultura)
MSc. Eric Loayza Torrico (IE/UMSA)
Lic. Carlos Ruiz Vasquez (UNAP)
Com. Monica Medina (RTP)
Plateforme associative Qutamama de Bolivie
Plataforme associative Qotatiti du Pérou
Dr. Smail Slimani (ISTOM)

Nous sommes reconnaissant de nous avoir accueilli et offert une salle d'études pendant la durée de nos séjours à MSc. Javier Nuñez Villalba, Directeur de l'Institut de Recherche en Géographie de l'Université Majeure de San Andrés (IIGEO/UMSA) à La Paz (Bolivie), et à l'Ing. Carlos Ruiz Vasquez, enseignant-chercheur au Vice-Rectorat de Recherche de l'Université Nationale de l'Altiplano (VRI/UNAP) à Puno (Pérou).

Nous tenons également à remercier tous nos donateurs, sans qui notre mission n'aurait pu être effectuée :

Société AIFEC ; Patrick Poirier, Société actu-environnement ; David Ascher, Super U Beaucouzé ; Jean-Jacques et Christophe Blond, Mairie de Mesnil Amelot, Irene Aguiló, Françoise Plessis, Benjamin et Marie Plessis, Nicolas Perin, Léa Thibault, Baptiste Laurent, Patrick Nicoleau, Chloé Salen, Thierry Million, Angelo Deliessche, Sébastien Loulie-Touquet, Célia Legrand, Nicole et Jean-Louis Carsin et M. et Mme Doussain ; l'Institut d'Écologie et l'Institut de Géographie de l'UMSA, l'Hôtel La Paz, l'Hostal Ecuador, et la Red Nacional RTP (Système de Communication Populaire) à La Paz ; l'UNAP, le programme de gestion intégré des ressources hydriques GIRH PNUD/GEF, le Ministère de l'environnement MINAM, l'Autorité Administrative de l'Eau du Titicaca – Autorité Nationale de l'Eau AAA/ANA, l'Institut de la Mer du Pérou IMARPE, le programme spécial du Lac Titicaca PELT, l'Autorité binationale du Lac Titicaca ALT, et l'Hostal Internacional à Puno.

Index

ACP : Analyses en Composantes Principales.

AFD : Agence Française de Développement.

ALT : Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca.

BID : Banco Internacional de Desarrollo.

CBLT : Commission du Bassin du Lac Tchad.

CEGL : Comité Exécutif des Grands Lacs.

CIPEL : Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman.

DICAPI : Direction général des gardes côtes.

ECERP : programa de Expedición Científica de Evaluación de los Recursos Pesqueros, de la ALT

EMALT : Empresa Municipal de Aseo El Alto.

IBCE : Institut Belge du Changement par Émergence.

IMARPE : Instituto del Mar del Perú.

INE : Instituto Nacional Electoral

IRD : Institut de Recherche pour le Développement.

MS : Matière Sèche.

MO : Matière Organique

OBLT : Observatorio Binacional del Lago Titicaca.

OBT : Organisation des Bassins Transfrontaliers.

PELT : Programa Especial del Lago Titicaca.

PNDA : Plan National de Développement de l'Aquaculture.

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.

PTAR : Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

SIGAR : Sistema Integral de Gestión de Aguas Residuales.

SWOT : Strengths Weaknesses Opportunities Threats.

TDPS : sistema hídrico Titicaca - Desaguadero - Poopó - Salar de Coípassa.

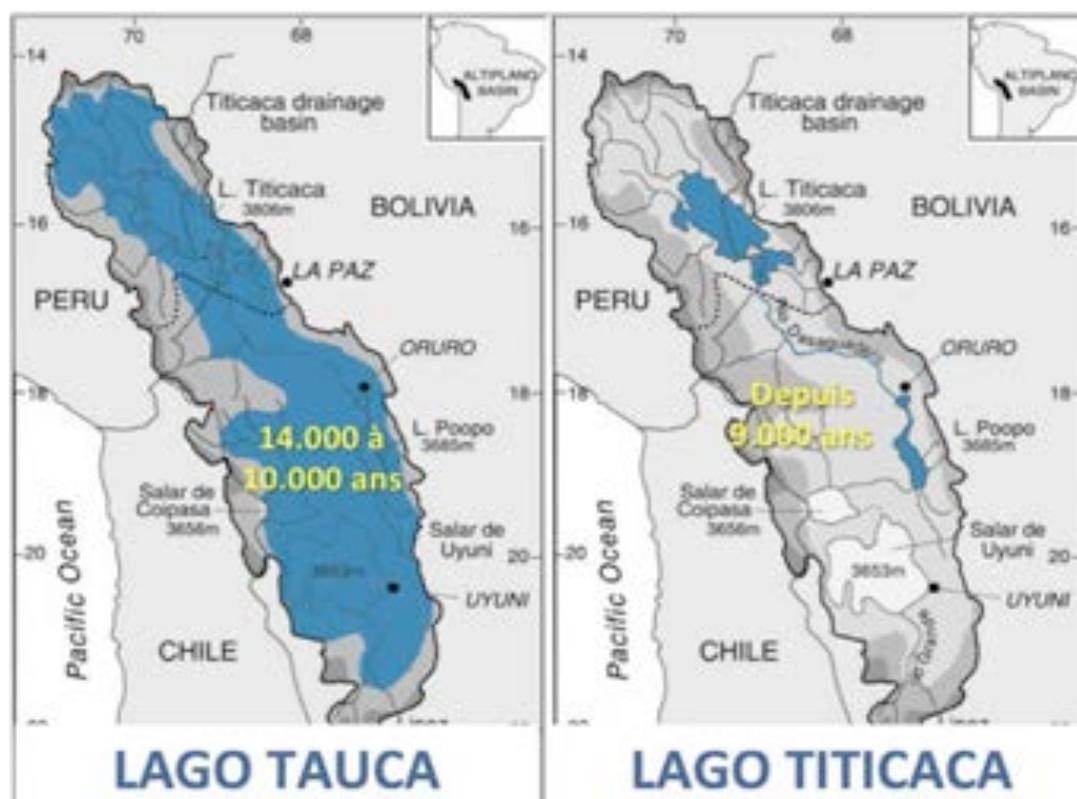
UMSA : Universidad Mayor de San Andrés

UNAP : Universidad Nacional del Altiplano, Puno

UOB : Unidad Operativa de Bolivia (équivalent du PELT au Pérou)

Introduction

Entre les cordillères orientale et occidentale s'est formé un vaste plateau à une altitude moyenne de 4.000 mètres : l'Altiplano boliviano-péruvien. L'accumulation des eaux de pluie dans cette région a donné lieu à la formation d'un hydrosystème lacustre d'altitude, endoréique, c'est-à-dire sans communication avec l'Océan. S'en est suivie une alternance de glaciations et de longues périodes de réchauffement, qui ont occasionné des changements importants de superficie et d'emplacement des milieux lacustres (Dejoux, 1994). Le Lac Titicaca résulte d'une réduction progressive des masses d'eau à travers une succession de lacs au cours des temps géologiques entre le Lac Mataro (55.000 ans BP), Cabana (50.000 ans BP), le Lac Ballivian (40.000 BP), le Lac Michin (30.000-20.000 ans BP) et le Lac Tauca (14.000-10.000 ans BP). Ainsi, actuellement il ne subsiste que le Lac Titicaca (formé il y a 9.000 ans BP), d'une superficie de 8.560 km² au nord, le lac Poopó au centre et les Salares dans le sud (figure 1) (Dejoux *et al.* 1992). Le Lac Titicaca est divisé en deux bassins : le Grand Lac, profond au nord (profondeur moyenne 107 m, maximum 285 m), et le Petit Lac (lac Huyñaymarca), peu profond au sud (profondeur moyenne 9 m, maximum 40 m ; la majeure partie des eaux boliviennes étant ≤ 5 m). Les deux bassins sont reliés par le détroit de Tiquina (40 m de profondeur).



2

Observatoire Binational du Lac Titicaca (OBLT)

Figure 1 : Cartographie de l'évolution de la surface en eau entre le lac Tauca et le lac Titicaca (Lazzaro, 2016, modifié d'après Ricardo Céspedes, 2015, Museo de Historia Natrual A. d'Orbigny, Cochabamba).

Le lac Titicaca, est situé à 3.809 mètres d'altitude, à la frontière entre la Bolivie et le Pérou. Sa surface est de 8.562 km² et il forme avec la rivière Desaguadero, le lac Poopó et le Salar de Coipasa un système endoréique (TDPS). Par ses caractéristiques bioclimatiques et l'isolement de son bassin versant (endoréique), le lac Titicaca est un « hotspot » de biodiversité et d'endémisme. Cependant, cet écosystème est aujourd'hui sujet à de nombreux dérèglements écologiques et victime des nombreuses activités anthropiques qui l'entourent.

Une eutrophisation, d'origine naturelle (sur des temps géologiques) ou anthropique, a lieu lorsqu'un milieu devient trop riche en nutriments (phosphore, azote) entraînant la prolifération importante de la biomasse du phytoplancton. C'est un état écologique observé dans les régions littorales et les baies peuplées du lac Titicaca. Il peut entraîner la prolifération excessive, rapide et incontrôlée de micro-algues, appelée efflorescence du phytoplancton ou 'bloom'. En général, seule(s) une à quelques espèces dominent. C'est un événement extrême grave, mais jusqu'à présent très mal documenté. Suite à une saison des pluies intense et prolongée, en avril-mai 2015, le premier bloom reporté est survenu dans la région nord et centrale du Petit Lac (côté Bolivien) entraînant la mortalité massive de poissons, grenouilles et oiseaux aquatiques.

Cette eutrophisation d'origine anthropique est causée par la croissance démographique intense observée autour du lac (rejets domestiques), et les activités humaines (rejets de l'agriculture, l'élevage, les industries), notamment par le manque d'efficacité des stations d'épuration des eaux usées (leur effacement ou leur absence) des régions entourant le lac. Les eaux usées se déversant dans le lac sont la cause principale de l'eutrophisation du milieu (Lazzaro, 2016) (CNRS, sd). En effet, la population humaine totale vivant autour du lac est recensée à presque 3 millions d'habitants entre les deux pays (Vargas, 2003). L'Altiplano s'urbanise très rapidement. Côté bolivien, l'urbanisation s'est amorcée à partir de 1952, suite à la Révolution nationale. On recense aujourd'hui presque 2 millions d'habitants entre La Paz/El Alto dont 1,2 million le long d'un axe (~50 km) entre El Alto et la Baie de Cohana sur le petit lac. Côté péruvien, l'urbanisation particulièrement développée entre les villes de Puno et Juliaca (> 200.000 habitants), s'étend le long des rives des Baies Intérieure et Extérieure de Puno, sur le Grand Lac.



Figure 2 : Carte des pressions anthropiques subies par le lac (Lazzaro X. 2018).

La carte ci-dessus présente les pressions anthropiques causées par les grandes villes, péruviennes et boliviennes, entourant le lac. Les grandes villes comme Juliaca et Puno au Pérou, et El Alto en Bolivie, impactent grandement l'état écologique du lac (mauvaise gestion des déchets, déversement d'eaux usées domestiques et industrielles, activités agricoles...).

L'IRD est un institut français de recherche en coopération avec les pays du Sud, dont le modèle est le partenariat scientifique équitable avec les pays en développement, principalement ceux des régions intertropicales. L'objectif de l'IRD est de mener des recherches scientifiques et de développer des formations académiques avec les partenaires locaux afin de produire des connaissances sur les socio-écosystèmes et de concevoir des solutions adaptées aux défis auxquels l'Homme et la planète font face. En Bolivie depuis 50 ans, son partenaire principal est l'UMSA, principale université publique du pays. Aujourd'hui l'IRD, et ses partenaires boliviens, participent activement à l'étude du Lac Titicaca en

déployant notamment l'OBLT (Observatoire Binational du Lac Titicaca), s'appuyant sur la collaboration entre institutions scientifiques et techniques boliviennes et péruviennes. Il s'agit d'un projet lancé en 2015 par le Dr. Xavier Lazzaro, chercheur limnologue à l'IRD, UMR-BOREA (Paris). L'IRD, via l'OBLT, a pour objectif de comprendre les mécanismes de l'eutrophisation, le suivi de la qualité de l'eau, à partir de la détection de sa détérioration par l'utilisation d'images satellites, ainsi que la réalisation de campagnes de mesures *in situ*.

La mission, proposée par l'IRD, est d'effectuer une étude des deux principales baies eutrophisées du lac : la Baie de Cohana (Bolivie) et la Baie de Puno (Pérou). La Baie de Cohana située au sud-est du lac Titicaca, dans le Petit Lac ou lac Huyñaymarca qui a une surface d'environ 60 km² et une faible profondeur (en moyenne ≤ 1 m). La rivière Katari est le principal affluent qui alimente la Baie. Les affluents de ce cours d'eau, les rivières Seco et Seque, traversent la ville d'El Alto (Bolivie) et y reçoivent ses eaux résiduelles. La Baie de Puno quant à elle, située au nord-ouest du Grand Lac et est divisée en deux zones : une Baie Intérieure (BIP) et une Baie Extérieure (BEP). La Baie Intérieure de Puno représente 0,2% de la surface du Lac Titicaca avec une superficie de 17 km² pour un volume d'environ 41 km³. Sa profondeur moyenne est de 2,4 mètres et sa profondeur maximale est de 5 à 6 mètres. Elle est reliée par un canal à la Baie Extérieure de Puno qui s'ouvre sur le Grand Lac. La Baie Intérieure de Puno reçoit les eaux résiduelles de la ville de Puno, depuis que la station d'épuration de Espinar a collapsé en 2016, ce qui explique sa forte contamination (ANA, 2017). Il est intéressant (a) d'étudier ces deux baies car il s'agit de zones peu profondes et situées à proximité de grandes villes, et (b) de comparer le fonctionnement de la Baie de Cohana envahie de macrophytes aquatiques émergentes (*Totora*) et distante d'environ 30 km de la principale source de contamination (El Alto), avec celui de la Baie Intérieure de Puno qui ne comporte pas de cordon littoral de macrophytes aquatiques et reçoit en direct les eaux résiduelles de Puno.

L'objectif ultime de cette étude, est d'élaborer des scénarios et pronostics futurs concernant l'état du lac en étudiant les impacts des activités anthropiques et du réchauffement climatique, pour ensuite proposer des recommandations ainsi que des propositions d'amélioration de la gestion binationale. Ce travail se concentre sur les zones peu profondes du lac. Ce sont elles qui reflètent l'état de santé du lac, « lorsque les eaux profondes seront dans le même état que les zones peu profondes, il sera trop tard pour sauver le Lac Titicaca » (X. Lazzaro). Il est essentiel de comprendre, contrôler et de gérer au mieux ces zones sensibles.

I- Grands principes du fonctionnement écologique d'un lac, et du Titicaca en particulier.

Un lac est un écosystème complexe où les organismes vivants interagissent entre eux et étroitement avec le milieu physico-chimique environnant. La dynamique d'un lac est régie par de nombreuses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

Cette première partie a pour objectif de comprendre le fonctionnement écologique général d'un lac. En effet, les lacs répondent à de nombreux principes écologiques fondamentaux, qui sont expliqués plus bas. L'objectif de cette partie est de généraliser le fonctionnement d'un écosystème lacustre au Lac Titicaca. Le lac Titicaca répond-t-il aux grands principes écologiques lacustres ?

A- Caractéristiques physiques, chimiques et biologiques lacustres

1) Caractéristiques physiques lacustres

a) Caractéristiques physiques d'un lac générique

En premier lieu, un lac se définit par sa morphométrie. Puis, d'autres paramètres physiques, propres à chaque lac, entrent en jeu : la température, la lumière et la transparence. Tous ces paramètres influencent et expliquent la dynamique d'un lac.

- **Morphométrie**

La morphométrie prend en compte de nombreux paramètres, tels que la profondeur, le volume d'eau, le périmètre, la forme, ou encore la superficie. Ces paramètres physiques influencent grandement le fonctionnement du lac (temps de rétention de l'eau, stratification thermique, ...). La morphométrie permet d'anticiper le comportement d'un lac par rapport à diverses pressions : par exemple, les lacs les plus profonds, possédant un grand volume d'eau, supportent davantage les apports de polluants que les lacs peu profonds (Anderson et al., 2007).

- **Température**

La stratification thermique (formation de couches d'eau distinctes superposées, due à une différence de température entre les couches entraînant une différence de densité de l'eau) n'a lieu que dans les lacs profonds. Le brassage de l'eau dans les lacs peu profonds est beaucoup plus important, entraînant une homogénéisation de la biodisponibilité des nutriments (phosphore au niveau de la zone benthique) et de l'oxygène (Anderson et al., 2007).

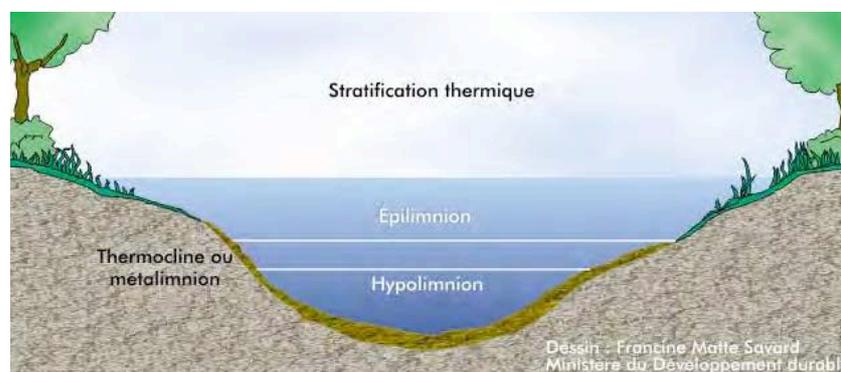


Figure 3 : Stratification thermique d'un lac en période chaude (Anderson et al., 2007)

- La lumière et la transparence

La lumière (radiation solaire incidente) est un facteur abiotique indispensable à la photosynthèse (production de dioxygène dissout) réalisée par les producteurs primaires, comme les macrophytes aquatiques et le phytoplancton. Pour cela, la transparence de l'eau est un paramètre physique essentiel pour le développement biologique aquatique. La transparence de l'eau diminue avec l'augmentation des quantités de matières en suspension dans l'eau (exemple : phytoplancton).

Dans un lac peu profond, la lumière pénètre jusqu'à la zone benthique. La présence de lumière stimule l'activité et le développement du phytoplancton et donc la production d'oxygène dans l'eau (indispensable pour l'activité biologique). D'autre part, par la présence importante de lumière, en milieu peu profond, on observe la présence importante de macrophytes, également à l'origine d'une production importante d'oxygène. Il existe une compétition inter-spécifique entre les macrophytes et le phytoplancton entraînant un équilibre. Cependant, un déséquilibre du milieu (ex : apport excessif en nutriments ou destruction des macrophytes) entraînera une surabondance/disparition d'un des deux compétiteurs.

La transparence de l'eau est un paramètre très important à prendre en compte dans le fonctionnement de l'écosystème : un milieu trop concentré en phytoplancton (du par exemple à une eutrophisation) causera une opacification de l'eau entraînant notamment la mort d'autres espèces aquatiques (Jeppesen E, 1998).

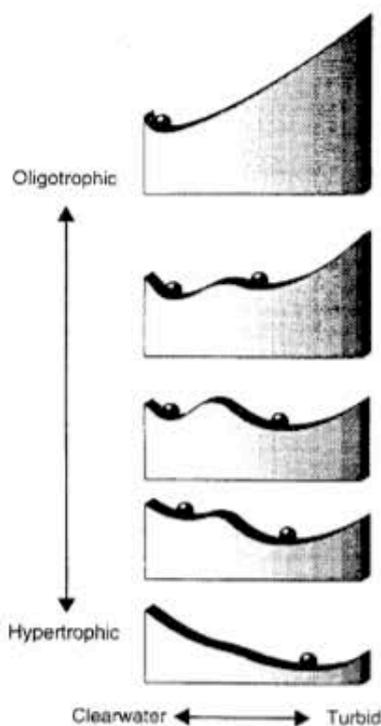


Figure 4 : Schéma illustrant la réponse des lacs peu profonds (eau claire/eau turbide) aux changements de concentration en nutriments (milieu oligotrophe/milieu hypertrophique) (E. Jeppesen, 1998).

Le disque de Secchi est un outil utilisé pour mesurer la transparence de l'eau permettant de déterminer la profondeur de la zone photique où seul parvient 1% de la radiation solaire incidente en surface (Anderson et al., 2007).

b) Caractéristiques physiques du Lac Titicaca

- Morphométrie

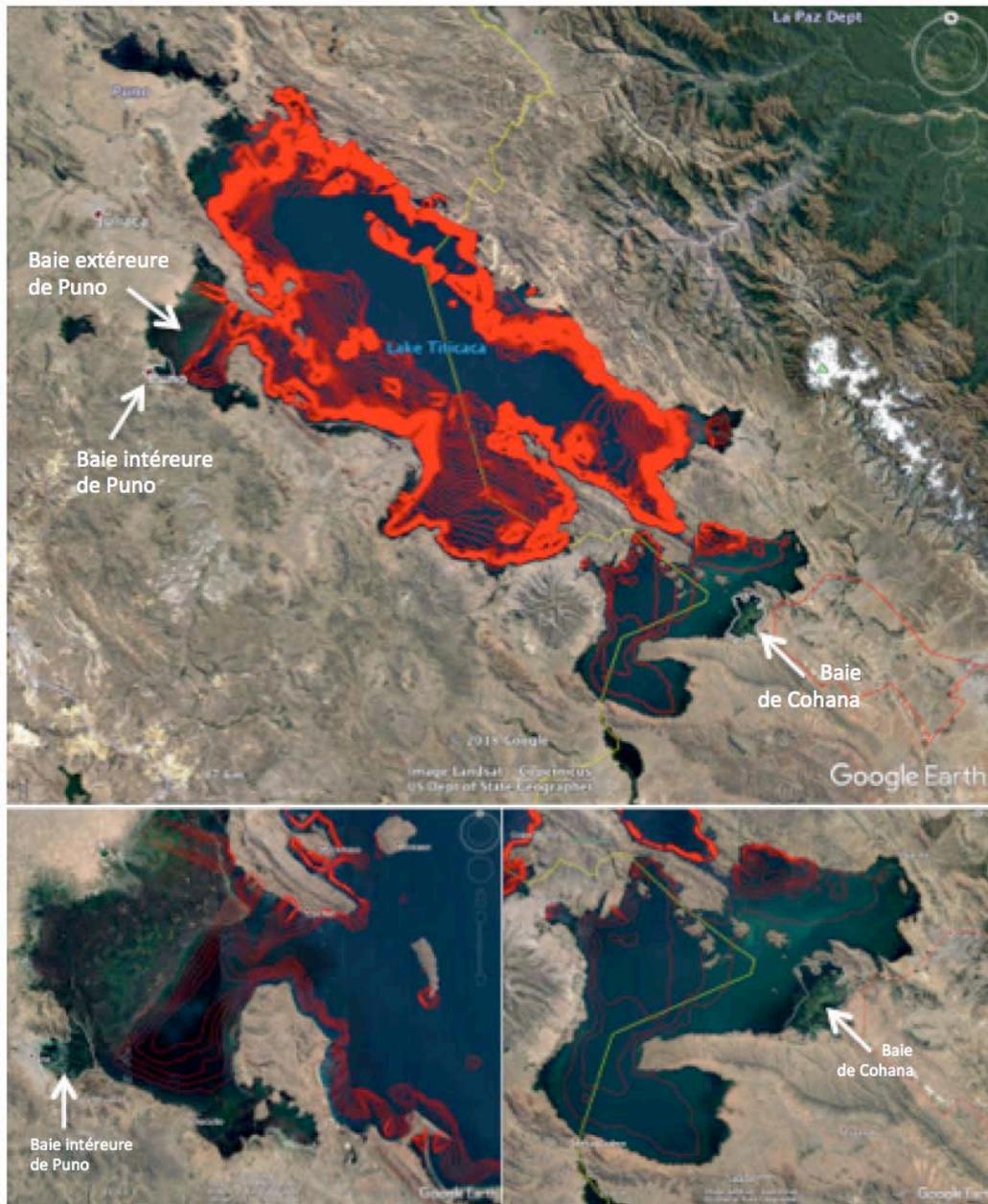


Figure 5 : Carte bathymétrique du Lac Titicaca avec courbes isobathes distantes de 5 m (en haut). Baie intérieure de Puno (en bas à gauche). Petit Lac et baie de Cohana (en bas à droite). © Google Earth.

La différence de bathymétrie entre le Grand Lac et le Petit Lac est visible. La profondeur maximale du Grand Lac est de 281 mètres, tandis que celle du Petit Lac est de 40 mètres. Beaucoup moins profond (moyenne 9 m en raison de l'existence de la Fosse de Chuá de 40 m, mais en général ≤ 5 m dans la partie bolivienne), le Petit Lac est donc plus sensible aux perturbations extérieures (plus faible résilience que le lac profond), comme l'eutrophisation.

Le lac Titicaca est profond uniquement dans le grand lac et la fosse de Chua, cependant la majeure partie du lac reste peu profond et fonctionne donc comme un lac peu profond (ex : baie de Puno, baie de Cohana).

- Température

Par sa situation en zone tropicale (latitude : -15,77° S), son altitude élevée (3.809 m) et ses variations saisonnières de températures (gamme plus faible que l'amplitude jour-nuit) et de précipitations, le bassin du Titicaca correspond à la catégorie des climats tropicaux de montagne semi-arides (selon la méthode THORNWAITE). Le lac possède des caractéristiques particulières, comme une forte radiation solaire UV (+30% par rapport au niveau de la mer), une faible concentration en oxygène dissous (-30%) et une forte amplitude jour-nuit de température de l'air (> 20°C).

La température moyenne annuelle de l'air dans le bassin versant, pour les zones d'altitude inférieures à 4.000 m, est approximativement de 7,9°C, variant de 6,5°C dans les zones éloignées du lac, à 9°C dans les zones proches du lac (Moho). En tenant compte de l'altitude et de la position du bassin, on note que cette température moyenne est relativement élevée : c'est l'effet thermorégulateur du lac.

Au niveau de la mer, sous les latitudes comprises entre le 15^{ème} et le 17^{ème} parallèle, les températures se maintiennent entre 20 et 25°C. En appliquant le facteur de correction admis (-0,5°C pour 100 m d'élévation), la température moyenne devrait être de 0°C à 3.800 m, or elle est de 8,5 °C à Puno (Pérou) est de 8°C à El Alto (Bolivie) (Boulangé et al.,1981). Les températures moyennes de l'eau sont de 11,7 °C pour le Petit Lac et de 12,7 °C pour le Grand Lac (IMARPE et al.,2015)

- Précipitations

Boulangé et Aquize (1981) ont identifié quatre zones selon les taux de précipitations :

- Fortes précipitations (> 800 mm) : au niveau du lac (île Soto, île Taquile, Copacabana et à l'extrémité nord-ouest du bassin : col de la Raya) ;
- Précipitations moyennement fortes comprises entre 700 et 800 mm : situées au nord-est du bassin, au-dessus de 4000 m ;
- Précipitations moyennes comprises entre 500 et 700 mm : au centre et au sud-est du bassin ;
- Faibles précipitations (< 500 mm) : situées au pied de la Cordillère Orientale (Escoma, El Belén).

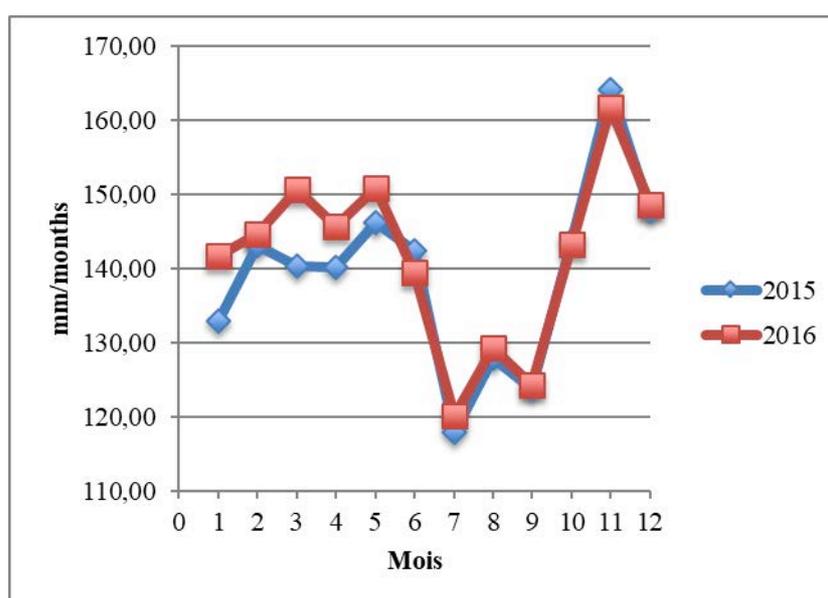


Figure 6: Moyenne des précipitations mensuelles sur le Lac Titicaca en 2015 et 2016.

- Bilan hydrologique

- En gain (Gonzales et al., 2007) :

- Les entrées provenant des affluents sont de $201 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Les précipitations sur le lac et autres sources d'eau sont de $270 \text{ m}^3/\text{s}$.

- En perte (Gonzales et al., 2007) :

- Il y a 92% d'évaporation, ce qui correspond à $436 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Les sorties d'eau à Desaguadero sont de $35 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Les drainages et autres pertes sont négligeables.
 - L'évolution de l'altitude du niveau du lac a été étudiée pour les 30 000 dernières années sur la base des carottes de sédiments du lac.

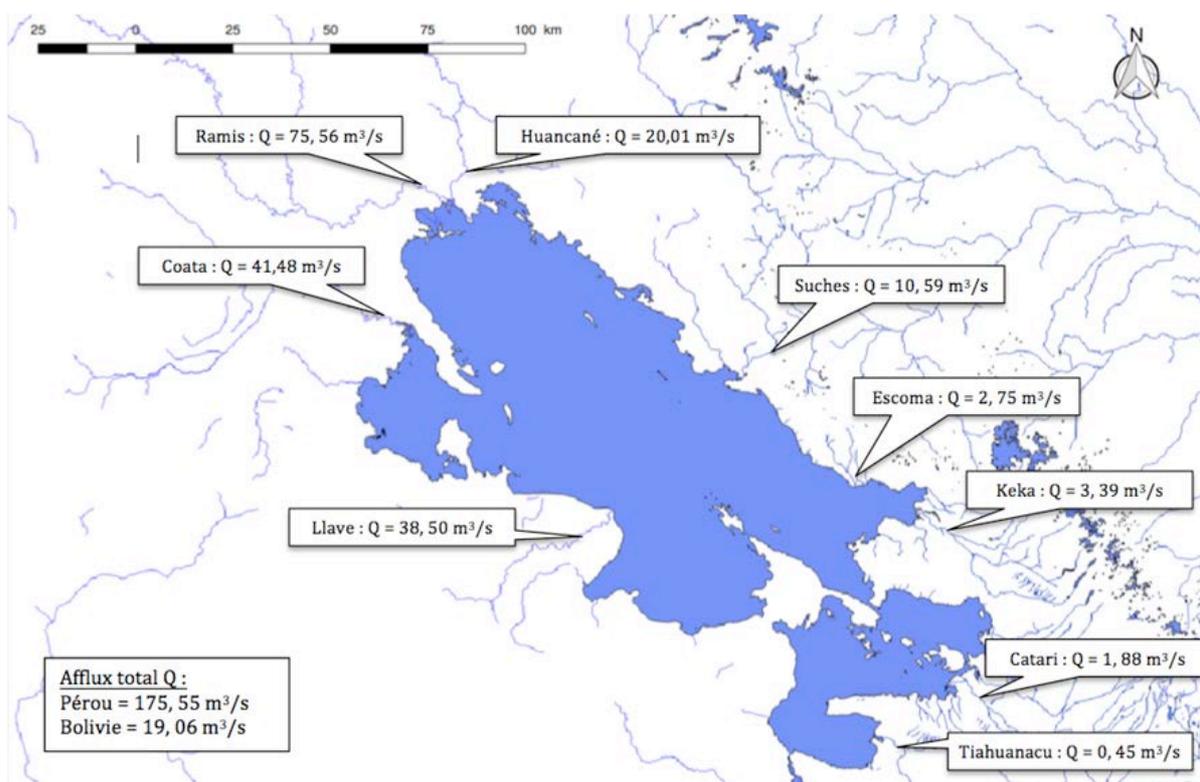


Figure 7: Carte représentant les différents affluents du Lac Titicaca (Carte élaborée par MJ'Ecko, 2018).

- Transparence et lumière

Le Lac Titicaca était qualifié de lac oligotrophe (milieu pauvre en éléments nutritifs), laissant ainsi facilement passer la lumière (moyenne comprise entre 2,2-12m). Au niveau du Grand Lac la transparence est supérieure à 20 m. En 1979 – 1980, celle de la fosse de Chua était de 22 m (Lazzaro, 1981). Suite au bloom de 2015, les zones peu profondes ont vu leur quantité de matières en suspension augmenter dans l'eau avec la prolifération du phytoplancton (forte turbidité).

2) Caractéristiques physico - chimiques lacustres

a) Caractéristiques physico - chimiques d'un lac

Il est indispensable de connaître les paramètres physico - chimiques d'un lac pour en comprendre son état écologique. Parmi les variables physico - chimiques essentielles, on peut citer les nutriments, l'oxygène dissous ou encore le pH.

- Les nutriments

Les nutriments, comme l'azote et le phosphore, sont des éléments chimiques essentiels à la croissance des végétaux aquatiques et des algues (ex : phytoplancton). Par la suite, il sera expliqué que les algues sont à la base de la chaîne alimentaire, on en déduit donc que les nutriments sont indispensables à la vie aquatique (Anderson et al., 2007).

- L'oxygène dissous

L'oxygène est nécessaire à la majorité des organismes vivants aquatiques. Sa biodisponibilité varie en fonction de la profondeur et de la période de l'année. Comme vu précédemment, en période de stratification thermique (saison chaude et froide), les strates ne se mélangeant pas, la biodisponibilité de l'oxygène est hétérogène selon les couches. En période de stratification thermique, l'épilimnion est riche en oxygène et l'hypolimnion en est déficitaire. Cependant, le déficit en oxygène peut être stimulé par d'autres facteurs, comme une forte production primaire (ex : lors d'une eutrophisation) ou par la profondeur du lac (Anderson et al., 2007).

- Acidité de l'eau (pH)

L'intervalle de pH nécessaire au maintien de la vie aquatique est compris entre 6,5 et 9,0. En dehors de ces seuils, de nombreuses fonctions biologiques, comme la respiration ou la reproduction, sont altérées (Anderson et al., 2007).

b) Caractéristiques physico - chimiques du Lac Titicaca

- Nutriments

Les concentrations en nitrates (NO₃⁻), dans le Grand Lac, sont en moyenne de 0,034 mg/L et de 0,015 mg/L pour le Petit Lac. Les concentrations en nitrites (NO₂⁻) sont en moyenne de 0,007 mg/L pour le grand lac et de 0,011 mg/L pour le petit lac. Les concentrations en phosphates (PO₄³⁻) sont en moyenne de 0,061 mg/L pour le Grand Lac et 0,117 mg/L pour le Petit Lac (IMARPE et al., 2015).

- Oxygène dissous

Les concentrations moyennes d'oxygène dissous, les températures et le taux de saturation de trois régions distinctes du Lac Titicaca sont présentés dans le tableau ci – dessous :

Tableau 1 : Oxygène dissous, température et taux de saturation en oxygène du Grand Lac, Petit Lac et Baie de Puno en 2015 (IMARPE et al. 2015) à 3.809 m snm.

Régions du Lac Titicaca	Grand Lac	Petit Lac	Baie de Puno
Oxygène dissous (mg/L)	6,93	6,02	7,29
Température (°C)	11,70	12,70	12,50
Taux de saturation	66,00% (1) 98,73 (2)	58,61% (1) 85,76 (2)	70,70% (1) 105,79 (2)

(1) par rapport au niveau de la mer, (2) par rapport à l'altitude de 3.809 m (cf. la formule de NCSU plus bas). Cependant, au cours de la journée d'un jour ensoleillé le taux de saturation en oxygène dissous peut dépasser de façon transitoire les 100%, en raison de l'intense photosynthèse par le phytoplancton.

Obs. : Le pourcentage de saturation en oxygène dissous (%OD) dans l'eau décroît avec l'augmentation de la température, l'augmentation de l'altitude, l'augmentation de la conductivité et la diminution de la pression atmosphérique. Un calculateur 'DOTABLES' est disponible sur le site de l'USGS (United States Geological Survey, c'est-à-dire l'Institut d'Études Géologiques des États-Unis) : <https://water.usgs.gov/software/DOTABLES/>

Il prend en compte la température de l'eau (°C), la pression barométrique (mm Hg), la conductance spécifique (µSi/cm) et la mesure de OD (mg/L), pour calculer la solubilité de l'oxygène (mg/L) et le pourcentage de saturation (%DO).

Une version simplifiée de ce calcul est proposée sur le site du cours ZO 419 Introduction to Limnology et ZO 519 Limnology, de la North Carolina State University (Université d'État de la Caroline du Nord) aux USA : <https://projects.ncsu.edu/cals/course/zo419/oxygen.html>

Le calcul ne prend en compte qu'une régression polynomiale en fonction de la température (T) :

$$100\% \text{ Sat. O}_2 \text{ Conc.} = 14.59 - 0.3955 T + 0.0072 T^2 - 0.0000619 T^3$$

avec une correction en fonction de l'altitude :

<u>Altitude (m)</u>	<u>Réduction en valeur</u>
0 - 600	1.3% par 100m
600 – 1500	1.0% par 100m
1500 – 3050	0.8% par 100m

Donc, de 0-600 m = - 7,8% ; 600-1500m = -9,0% ; 1500-3809 m = -18,5% (en considérant que la réduction est constante au delà de 3050 m) ; soit une réduction totale de 35,3% à 3809 m par rapport au taux de saturation au niveau de la mer.

Le pourcentage de saturation en oxygène dissous (%OD) est particulièrement faible à l'altitude du Lac Titicaca. En effet, en dessous de 70% de la saturation en oxygène dissous dans l'eau, l'eau d'un lac est peu adéquate au bon développement et maintien de la vie aquatique.

- Acidité de l'eau (pH)

Les valeurs de pH enregistrées sur le Lac Titicaca sont relativement stables. A la surface du Grand Lac, il y a une variation de pH comprise entre 8,34 et 8,90. Le pH du Petit Lac varie entre 8,58 et 8,77. Cependant, dans la Baie de Puno, le pH est légèrement plus élevé (8,79 à 8,93) (IMARPE et al., 2015).

3) Caractéristiques biologiques lacustres

a) Caractéristiques biologiques d'un lac générique

Un lac générique est riche en biodiversité (faune, flore, bactéries), cette diversité est un indicateur de bonne qualité des eaux. Les organismes se répartissent dans le milieu, selon les caractéristiques physico-chimiques de l'environnement et également selon leurs besoins métaboliques. Un lac est, en général, un écosystème riche en biodiversité (faune, flore, bactéries).

La limnologie est la science qui étudie tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques se rapportant aux lacs. C'est l'équivalent de l'océanographie pour les océans. Traditionnellement, la limnologie concerne les lacs profonds qui se stratifient thermiquement : la température diminue en fonction de la profondeur. La limnologie étudie également les lacs peu profonds, qui présentent des caractéristiques physico-chimiques et des fonctionnements hydrologiques différents. Les lacs peu profonds ne présentent pas de stratification thermique, il y a des mouvements importants de l'eau empêchant ainsi la formation de strates d'eau et favorisant une homogénéité de la température et des nutriments (cf. précédemment).

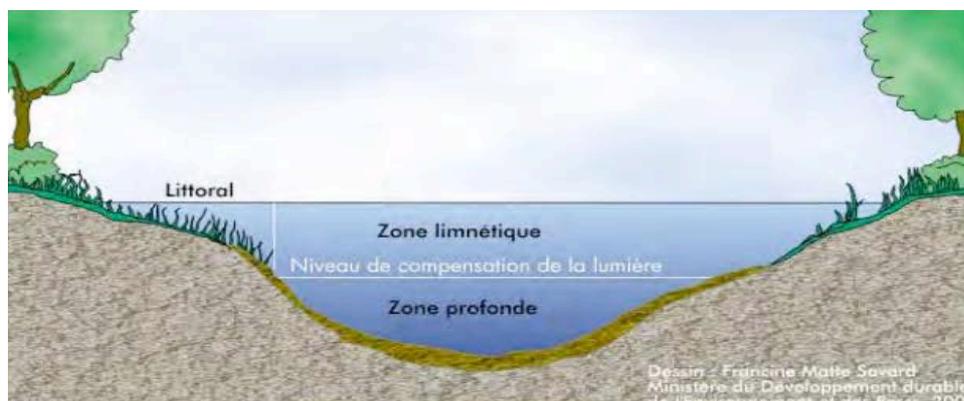


Figure 8 : Schématisation des différentes zones présentes au sein d'un lac profond, c'est-à-dire un lac dont la profondeur s'étend sous la zone euphotique (Zeu = Z1% de la radiation sub-superficielle) où le phytoplancton réalise la photosynthèse (Anderson et al., 2007).

Ainsi, de façon schématique, dans un lac profond, trois principales zones écologiques sont distinguées :

1. La zone littorale (où la lumière pénètre jusqu'au fond) : Les communautés littorales sont dominées par les plantes aquatiques et les algues. Ces dernières sont des habitats de grande importance pour de nombreuses espèces, telles que les petits poissons fourrages, les poissons juvéniles, les insectes et le zooplancton. Ces végétaux, produisant de l'oxygène, permettent aussi le maintien de la vie aquatique.

Le fonctionnement d'un lac peu profond peut être assimilé à celui la zone littorale d'un lac profond. La biomasse de poisson est beaucoup plus élevée dans un lac peu profond que dans un lac profond. Ainsi, la prédation sur le zooplancton augmente considérablement provoquant une activité intense des invertébrés

présents dans la zone benthique. La présence de macrophytes est plus conséquente en zone peu profonde qu'en zone profonde (habitat écologique, production d'oxygène, rôle anti-érosion...) (Jeppesen E, 1998).

2. La zone limnétique : Les communautés limnétiques vivent en eau libre, en zone photique (présence de lumière). Elles sont représentées par le zooplancton (crustacés minuscules), le phytoplancton (algues microscopiques) et par les poissons pélagiques.

3. La zone profonde : La lumière ne pénètre pas jusqu'au fond de l'eau, il existe une limite abstraite : le niveau de compensation de la lumière. Contrairement aux deux zones précédentes, cette zone aphotique n'est pas un lieu de production d'oxygène mais d'utilisation de l'oxygène et de production de gaz carbonique (respiration). Les organismes vivants sont principalement représentés par les bactéries décompositrices de matières organiques et par des organismes n'ayant pas un grand besoin en oxygène (faible concentration de l'oxygène dissous) (Anderson *et al.*, 2007).

Pour comprendre le fonctionnement du Petit Lac, les baies de Cohana et de Puno et les zones littorales du Lac Titicaca en général, il est essentiel de se référer au fonctionnement des lacs peu profonds qui sont colonisés par des macrophytes (plantes) aquatiques, ne se stratifient pas mais au contraire dont la colonne d'eau se mélange fréquemment. Dans ces lacs peu profonds, en général ≤ 5 m de profondeur, le rayonnement solaire visible (PAR 400-700 nm) pénètre jusqu'au fond, c'est-à-dire que la profondeur de la zone euphotique (Z1%), est limitée par le fond du lac. Dans de nombreuses régions les lacs peu profonds sont plus abondants que les profonds et concentrent sur leurs berges d'importantes métropoles urbaines.

b) Relation chlorophylle-phosphore total et nutriments dans un lac générique

Le phosphore total (TP) est une mesure de toutes les formes de phosphore, dissoutes ou particulières. La matière particulaire comprend le plancton vivant et mort. Dans les lacs, la phase dissoute comprend le phosphore inorganique et organique, sous forme de phosphates (PO_4), lesquels sont des nutriments. Dans les lacs tempérés du nord, le nutriment limitant est le plus souvent le phosphore, alors que c'est plutôt l'azote dans les lacs tropicaux.

Dans les lacs, il est maintenant bien démontré qu'il existe en général une relation empirique positive entre la chlorophylle et le phosphore total (PT) qui représente le processus biologique fondamental de la productivité des lacs. Cette relation significative a été mise en évidence pour la première fois par Sakamoto (1966) dans de nombreux lacs japonais. L'auteur a réalisé une régression entre la concentration moyenne estivale de la chlorophylle et la concentration totale printanière en phosphore :

$$\log_{10} [\text{Chl}] = 1,583 \log_{10} [\text{TP}] - 1,134 \quad (\text{voir figure 9})$$

Dans la majorité des lacs tempérés de l'hémisphère nord, comme en particulier dans les lacs du bouclier canadien (Schindler *et al.* 1971), le phosphore est le facteur de contrôle le plus important de l'eutrophisation. La concentration en chlorophylle est un très bon estimateur de la biomasse en phytoplancton. Ainsi, Dillon & Rigler (1974) ont vérifié la généralité de cette relation sur des lacs nord-américains et nord-européens. La pente est légèrement inférieure à celle de Sakamoto, à cause de la méthode de la chlorophylle-*a* qu'il utilisa, au lieu d'un intermédiaire entre *a* et *a-b-c* utilisé par Sakamoto :

$$\log_{10} [\text{Chl } a] = 1,449 \log_{10} [\text{TP}] - 1,136$$

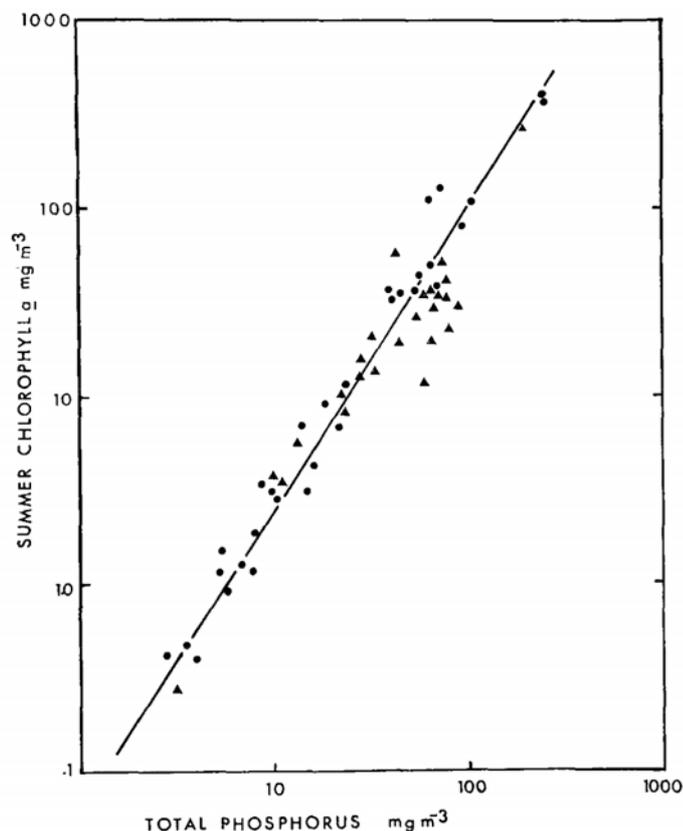


Figure 9 : Régression linéaire entre la concentration estivale en chlorophylle-a et le phosphore total dans les lacs japonais (cercles ; Sakamoto 1966) et d'autres lacs nord-américains de la littérature (triangles, Dillon & Rigler 1974). La ligne de régression est celle de Sakamoto (1966). D'après Dillon & Rigler (1974).

Les effets des ressources (nutriments) et des prédateurs se combinent pour contrôler la structure et la biomasse des communautés aquatiques. Les nutriments favorisent (par les effets ascendants des ressources) la biomasse de phytoplancton. Ces effets se prolongent de façon atténuée vers le sommet des chaînes alimentaires jusqu'aux poissons. A l'opposé, les cascades trophiques (c'est-à-dire que les effets descendants de la prédation des poissons vers les producteurs primaires) altèrent/réduisent la réponse du phytoplancton (Lazzaro, 2009).

Le concept des interactions trophiques en cascade est maintenant admis comme un paradigme de l'écologie, qui est utilisé par les gestionnaires comme base pour les stratégies de gestion des lacs. Selon le concept des cascades trophiques, une augmentation de la biomasse des poissons piscivores, provoque la diminution de la biomasse des poissons planctophages, l'augmentation de la biomasse du zooplancton herbivore, et en conséquence la diminution de la biomasse du phytoplancton.

Ainsi, l'hypothèse des interactions trophiques en cascades prédit aussi que les lacs contenant une biomasse significative de piscivores doit avoir une biomasse plus faible de phytoplancton quelque soit la concentration en phosphore, par rapport aux lacs dépourvus de piscivores (Drenner & Hambright, 2002).

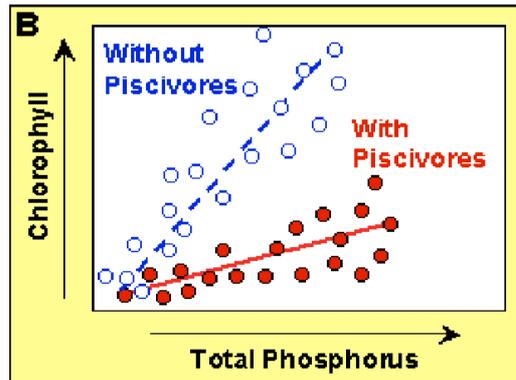


Figure 10: Effet hypothétique des piscivores sur la relation chlorophylle-PT dans les lacs avec des poissons planctivores (Drenner & Hambright, 2002).

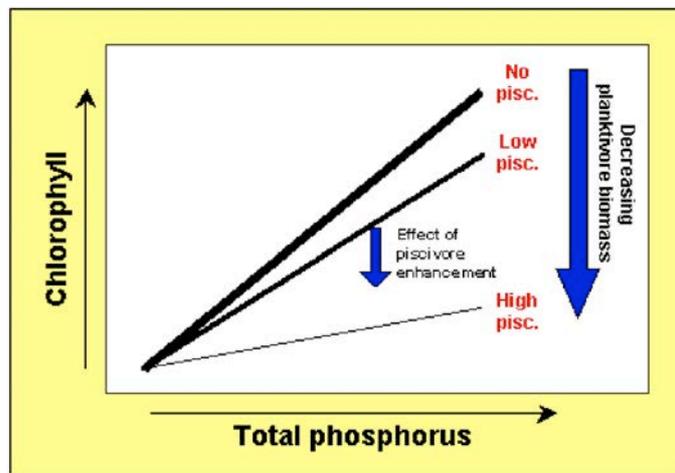


Figure 11 : Effet théorique des piscivores sur la relation chlorophylle-phosphore total dans les lacs (Drenner & Hambright, 2002).

La ligne épaisse indique la relation prédite dans les lacs qui contiennent des poissons planctophages mais pas de poissons piscivores qui fonctionnent donc comme un système à trois niveaux trophiques ; la ligne mince indique la relation prédite dans les lacs abritant beaucoup de poissons piscivores (système à 4 niveaux trophiques) ; la ligne intermédiaire indique la relation prédite dans les lacs contenant une faible biomasse de poissons piscivores (système à 3 niveaux trophiques) (Drenner & Hambright, 2002).

Ces graphiques montrent que la présence de piscivores dans le réseau trophique entraîne une diminution considérable de la concentration en chlorophylle par quantité de PT. Cette diminution s'explique par les interactions prédateurs-proies :

- Présence de piscivores : les poissons piscivores se nourrissent des poissons planctophages. Il y a donc une diminution de la biomasse des planctophages, entraînant l'augmentation de la biomasse du zooplancton herbivore. Comme le zooplancton herbivore se nourrit de phytoplancton, sa biomasse diminue, entraînant une diminution considérable de la concentration en chlorophylle (figure 10).

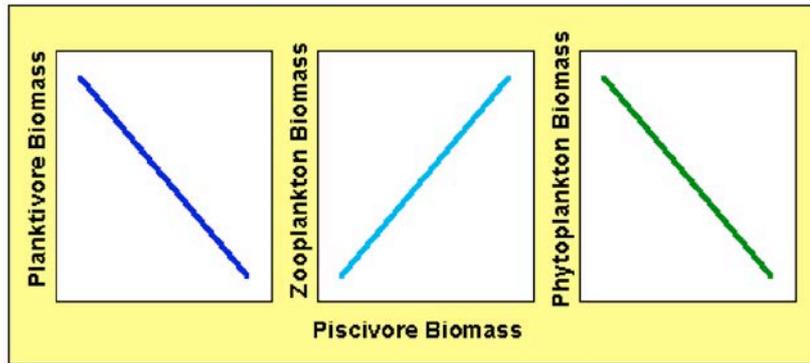


Figure 12 : Evolution des biomasses de poissons planctophages, du zooplancton herbivore et du phytoplancton en fonction de la biomasse de piscivores (Drenner & Hambright, 2002).

- Absence de piscivores : En l'absence de piscivores, la biomasse de poissons planctophages augmente, entraînant ainsi la diminution de biomasse du zooplancton herbivore. En absence de broutage, la biomasse de phytoplancton augmente, ainsi que la concentration en chlorophylle.

En réaction, les interactions entre les organismes ont un impact sur la quantité de nutriments (N, P) disponibles dans le lac. Un changement dans l'architecture (i.e. topologie) de la chaîne trophique peut entraîner un déséquilibre important dans l'écosystème du lac, modifiant sa résilience aux perturbations climatiques et anthropiques (figure 11).

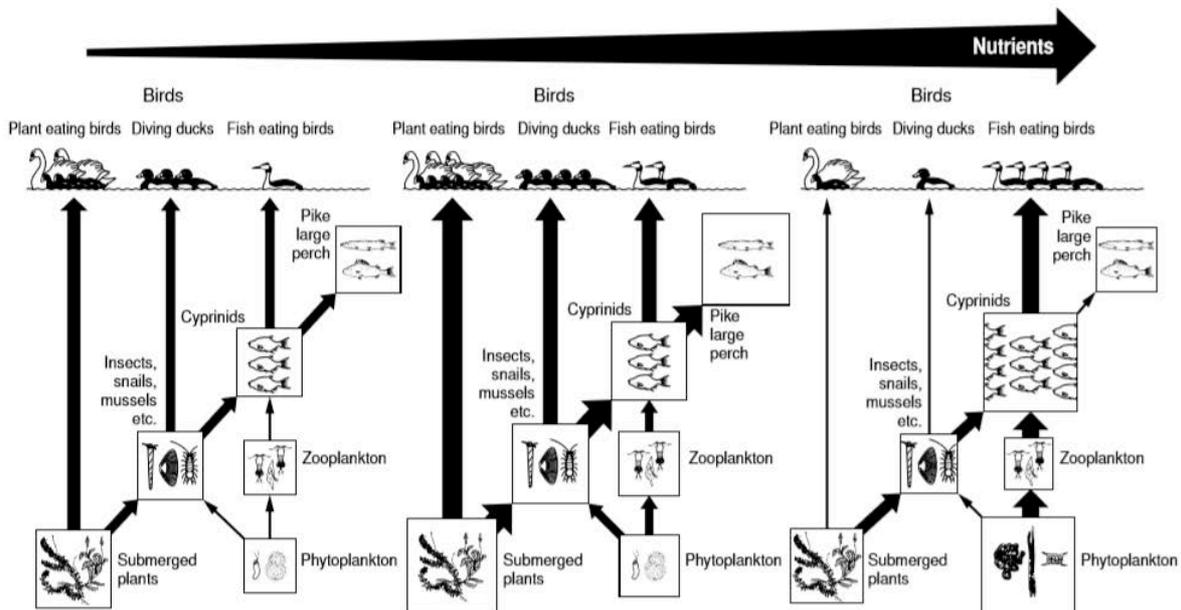


Figure 13 : Structure des chaînes trophiques en fonction du gradient de nutriments (Jeppesen et al., 2005).

c) Relation chlorophylle-phosphore total et nutriments du Petit Lac et de la baie de Puno

Dans les régions peu profondes du Lac Titicaca, les concentrations en chlorophylle et nutriments varient en fonction des conditions météorologiques, en particulier les précipitations et le vent, ainsi que les apports des contaminations anthropiques qui restent l'élément le plus influençant. Cette partie développe les relations entre les concentrations en chlorophylle, nutriments et différents paramètres physicochimiques des Baies de Cohana et de Puno. Comme certaines données ne sont pas disponibles sur la Baie de Cohana, les régions peu profondes du Petit Lac sont comparées à la Baie de Puno.

Le tableau ci-dessous met en lien les taux des différents paramètres physicochimiques du lac avec les normes de potabilité bolivienne et péruvienne.

Tableau 2 : Concentrations moyennes de nutriments et chlorophylle-a dans le Petit Lac (Lazzaro et al. 2017, expédition binationale ECERP d'août 2016) et dans la Baie Intérieure de Puno (campagne IRD-ISTOM-IMARPE du 06 juillet 2018, non publiée) par rapport aux normes bolivienne (IBNORCA 2010) et péruvienne d'eau potable (Ministerio de Salud; 2011) qui sont très semblables.

	Norme Bolivienne de potabilité : valeur maximale acceptable	Petit Lac (août 2016) valeurs médianes	Norme Péruvienne de potabilité : valeur maximale acceptable	Baie intérieure de Puno (juillet 2017) valeurs médianes
pH	6,5 - 9	8,6	6,5 – 8,5	9,8
Conductivité (µS/cm, à 25°)	1.500	1.869	1.500	1083
Turbidité (NTU)	5	1,3	5	-
Nitrite (NO ₂ , mg/L)	0,1	0,003	0,2	-
Nitrate (NO ₃ , mg/L)	45,0	0,032	50,0	1,21
Phosphate (PO ₄ , mg/L)	-	0,096	-	-
Oxygène dissous (OD, mg/L)	-	7,3	-	12,59
Concentration totale en chlorophylle-a (µg/L)	-	1,7	-	127,0

En conditions normales, dans le Petit Lac, il n'y a pas d'excès en nitrates, nitrites et phosphates. Seule la conductivité est plus élevée que la norme bolivienne ce qui en soit n'est pas un problème mais indique seulement une eau riche en minéraux. Dans la Baie de Puno on remarque que la concentration en phytoplancton est de 127 µg/L, un phénomène de bloom est donc en train de se produire. La Baie intérieure de Puno est donc sujette à l'eutrophisation. Il est bon de noter que le pH est au-dessus des normes de potabilité et démontre une alcalinité très élevée.

Pour surveiller ces paramètres, un suivi en certains points précis du lac, tant du côté bolivien que péruvien est effectué, comme le montre les cartes suivantes. Ces zones de prélèvement sont choisies en fonction de caractéristiques telles que la profondeur, la proximité de zones d'activités anthropiques et/ou de zones urbanisées, la contamination de l'eau, ou la biodiversité.

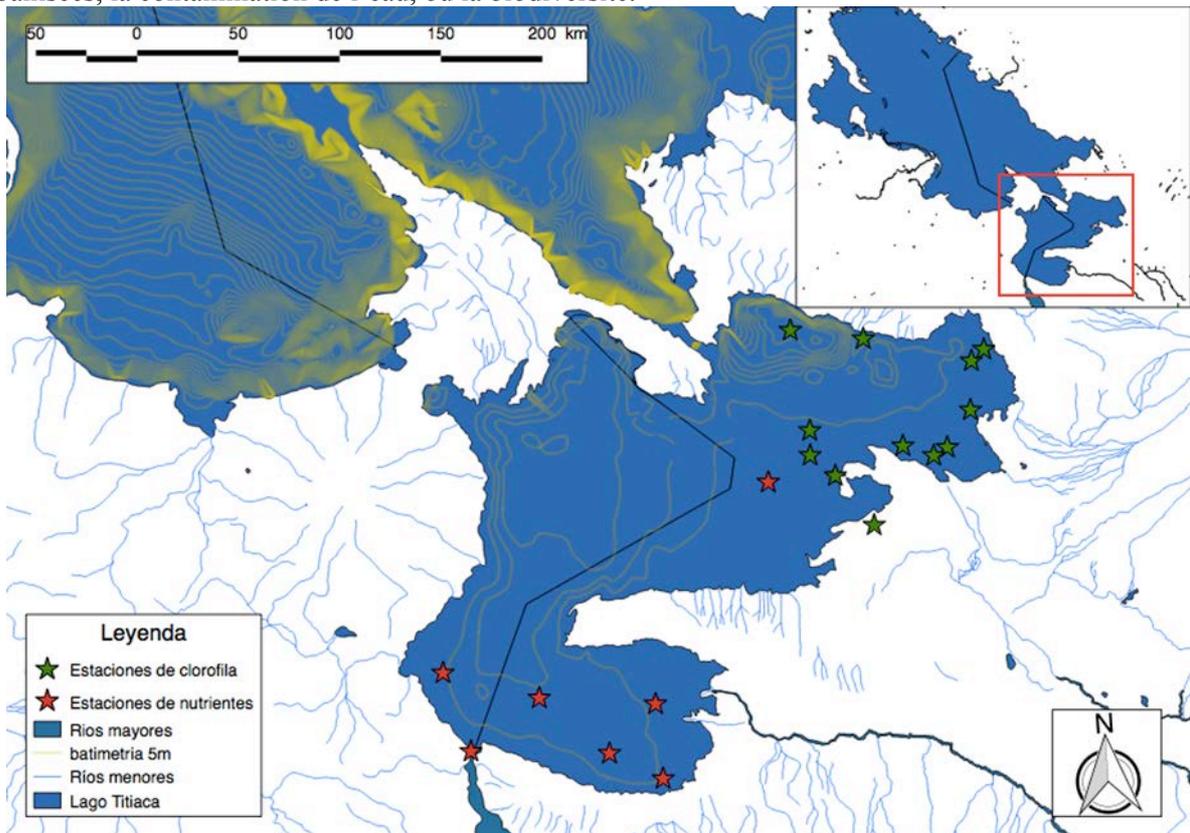


Figure 14 : Carte des différentes stations de prélèvements de nutriments et de chlorophylle dans le Petit Lac. Expédition ECERP d'août 2016 (Lazzaro et al. 2017). (Carte modifiée par MJ'Ecko, 2018)

Du côté bolivien, un suivi de la chlorophylle ainsi que certains paramètres physicochimiques sont effectués tous les 16 jours par l'UMSA et l'IRD (projet PIA-ACC 'Suivi des effets du changements climatique sur le Lac Titicaca à partir d'images satellite' ; P.I. Javier Nuñez IIGEO/UMSA & Xavier Lazzaro BOREA/IRD) grâce à un spectroradiomètre de réflectance Handheld (300-1000 nm), une sonde multiparamètre Hydrolab et une sonde fluorimétrique BBE pour les mesures de la concentration en chlorophylle-*a* le long de profils verticaux de la colonne d'eau à différents points de prélèvements du Petit Lac (environ 5-10 stations par sortie). Les analyses de nutriments sont effectuées une fois par mois, ainsi qu'une fois par an en 85 stations limnologiques couvrant l'ensemble du Petit Lac, lors de l'expédition binationale ECERP sur la qualité de l'eau (Lazzaro et al. 2017). La dernière campagne a été réalisée en août 2016.

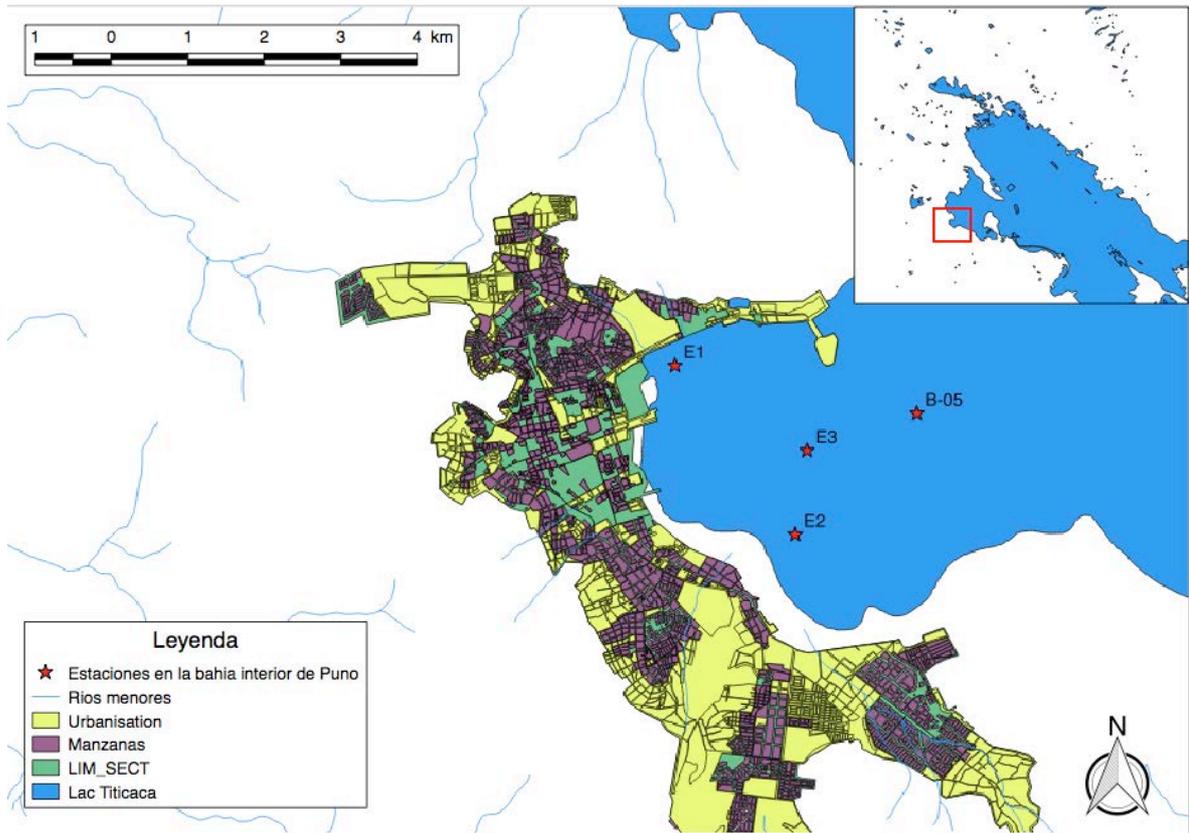


Figure 15 : Carte des différentes stations de prélèvements dans la Baie d'intérieur de Puno (élaboration MJ'Ecko, 2018).

Du côté Péruvien, un suivi des nutriments, de la chlorophylle totale et de certains paramètres physicochimiques est également effectué par l'ANA (Agencia Nacional del Agua) dans la Baie de Puno.

Pour mieux comprendre la relation entre les différents paramètres mesurés, nous avons effectué une analyse en composantes principales (ACP) sur les données de l'expédition binational ECERP d'août 2016 (Lazzaro et al. 2017) qui sont les plus complètes pour le Petit Lac et celles de juillet 2018 pour la Baie intérieure de Puno.

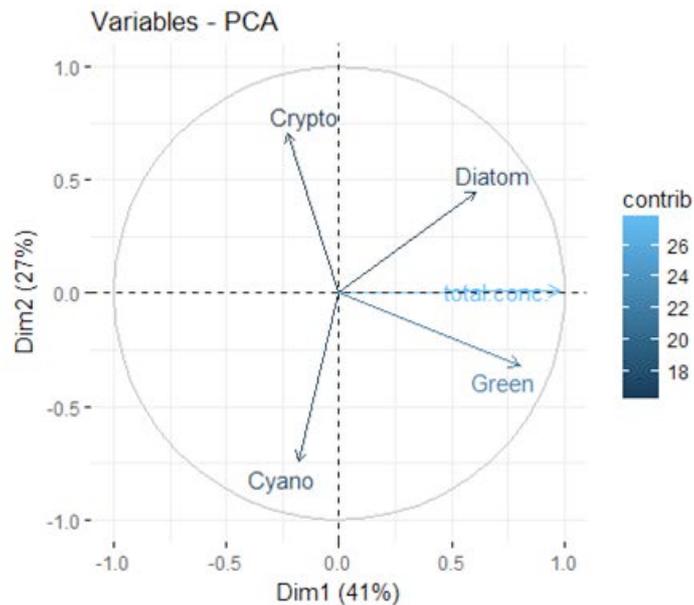


Figure 16 : ACP entre le phytoplancton et la concentration totale en chlorophylle, sur les données médianes du Petit Lac de l'expédition d'août 2016 (MJ'Ecko, 2018).

Dans le Petit Lac, l'ACP sur les valeurs médianes de la colonne d'eau des 85 stations révèle que la concentration totale en chlorophylle-*a* est principalement composée de diatomées et d'algues vertes (figure 14).

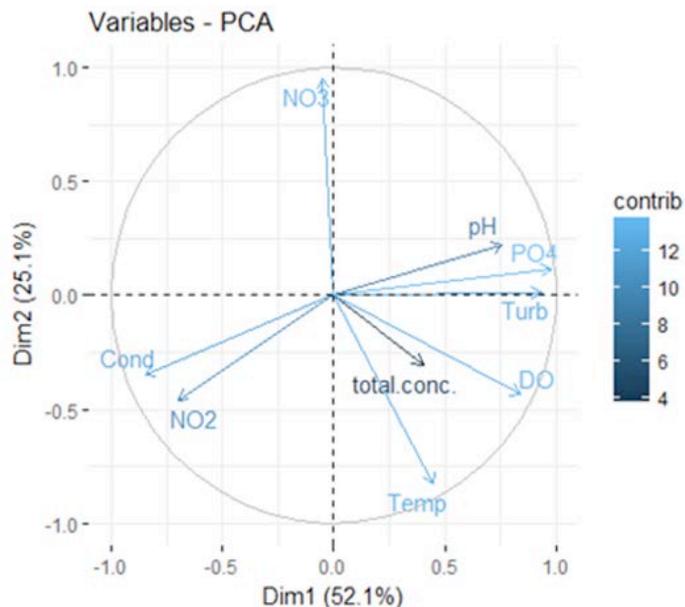


Figure 17 : ACP entre la concentration totale en chlorophylle, la conductivité, les nitrates (NO_3), le phosphore (phosphates PO_4), le pH, la turbidité et l'oxygène dissous (DO), à partir des données médianes du Petit Lac de l'expédition d'août 2016 (MJ'Ecko, 2018).

Afin de comprendre quels paramètres influencent la concentration totale en chlorophylle-*a* de la colonne d'eau, nous avons réalisé deux ACP : l'une sur les données médianes de 2016 du Petit Lac (figure 16) et

l'autre sur la Baie intérieure de Puno (figure 17). L'ACP du Petit Lac montre une corrélation entre le phosphore et la chlorophylle-*a* totale, alors que nitrates et nitrites sont opposés. Le phosphore semble donc être un facteur essentiel limitant à la croissance du phytoplancton et donc probablement un fort apport pourrait contribuer significativement à l'apparition de blooms. L'ACP montre aussi que la concentration en chlorophylle-*a* influence positivement la concentration d'oxygène dissout (DO) et la turbidité de l'eau.

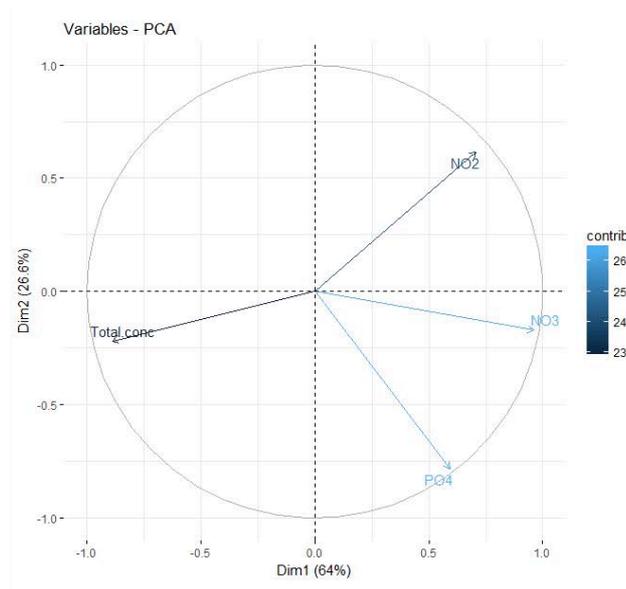


Figure 18: ACP entre la concentration totale en chlorophylle-*a*, le phosphore (PO_4), les nitrites et les nitrates, à partir des données médianes de la Baie intérieure de Puno de l'expédition de juillet 2016) (MJ'Ecko, 2018).

Pour l'ACP sur les données de la Baie intérieure de Puno, aucune corrélation entre le phosphore, les nitrates et les nitrites et la chlorophylle-*a* n'est révélée. Cela nous indique que dans la Baie intérieure les nutriments sont en quantité suffisante pour la prolifération de phytoplancton et ne sont plus les facteurs limitants.

La figure 19 montre l'évolution de la chlorophylle-*a* totale entre 2014 et 2018 sur trois niveaux de profondeur (surface, intermédiaire, fond). Une augmentation de la chlorophylle-*a* est observée au cours des années quel que soit le niveau. Cela indique un problème d'eutrophisation globale de la Baie de Puno de plus en plus intense depuis 2016 avec des concentrations très élevées, $>60 \mu\text{g/L}$ jusqu'à $> 120 \mu\text{g/L}$ en surface.

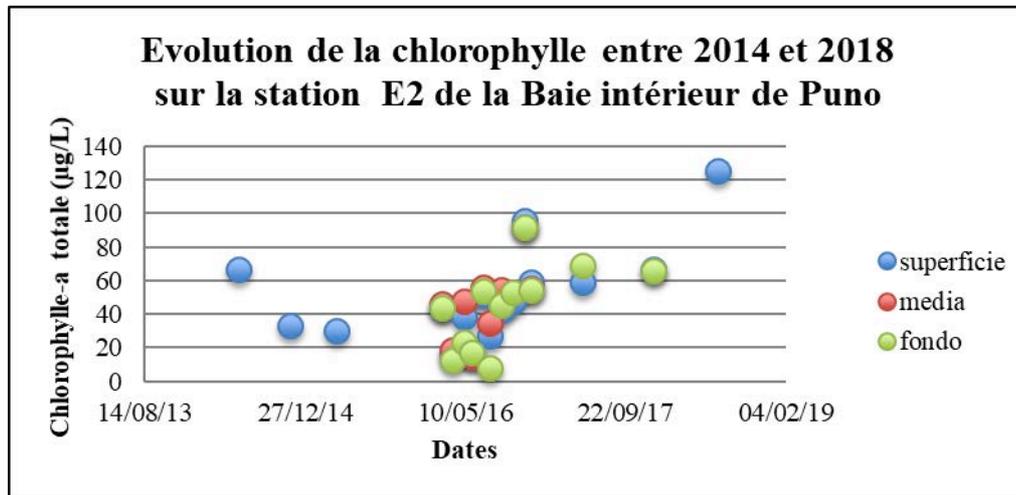


Figure 19 : Evolution de la chlorophylle-a totale entre 2014 et 2018 sur la station E2 de la Baie Intérieure de Puno, à trois niveaux de profondeur (surface, intermédiaire et fond) (MJ'Ecko, 2018).

Afin d'expliquer la forte alcalinité de la Baie intérieure de Puno (constatée dans Tableau 2) une ACP a été réalisée sur les données de nitrite, nitrate, phosphore, pH, conductivité et oxygène dissous de 2008 à 2015 à une profondeur de 20%. L'ACP (figure 20) nous montre que dans le Petit Lac la forte alcalinité est liée à la forte concentration de nitrite.

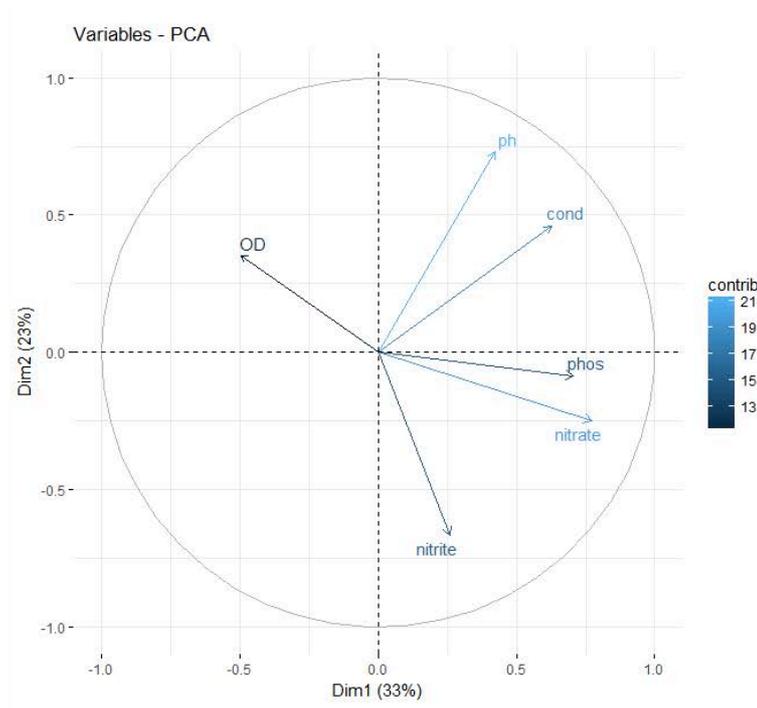


Figure 20 : ACP des données de nitrite, nitrate, phosphore, pH, conductivité et oxygène dissous sur les données de 2008 à 2015 à une profondeur de 20% sur la station à 50m de la station d'épuration de Espinar (sur les données de l'ANA) (MJ'Ecko, 2018).

B- Fonctionnement général du réseau trophique

1) Structures des cascades trophiques lacustres

Le réseau trophique d'un lac regroupe l'ensemble des chaînes alimentaires reliées entre elles, par lesquelles l'énergie et la matière circulent (flux d'azote et de carbone). Cette partie permettra de comprendre le fonctionnement général des cascades trophiques ainsi que le phénomène d'eutrophisation et la bio-manipulation. Ces principes seront mis en lien avec le Lac Titicaca.

a) Cascades trophiques d'un lac

Les cascades trophiques sont les interactions prédateurs-proies au sein d'un écosystème. Il s'agit d'effets de consommation dans les chaînes alimentaires qui fonctionnent selon les modèles HSS^{1e} et EEH². Dans un écosystème, il existe plusieurs cascades trophiques et différents niveaux trophiques (figure 19).

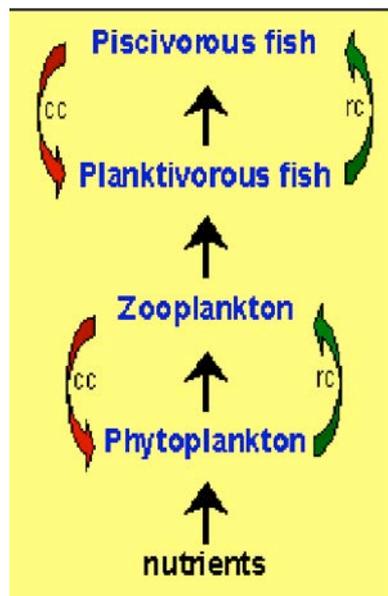


Figure 21 : Schéma théorique d'une cascade trophique pélagique en présence de piscivores (Drenner & Hambright, 2002).

- Les **poissons piscivores** se nourrissent généralement de poissons planctophages, de plus petite taille. La biomasse des poissons piscivores est influencée par la présence/absence des niveaux trophiques inférieurs (Lazzaro, 2009).
- Il existe deux principaux types de **poissons planctophages** :
 - Les prédateurs visuels (chasseurs à vue zooplanctophages) qui sélectionnent et ingèrent leurs proies. Il s'agit de zooplancton de grande taille et/ou pigmenté de couleur sombre (Lazzaro, 2009).
 - Les filtreurs omnivores consomment aussi bien du phytoplankton que du zooplancton par pompage.

¹ établi par Hairston, Smith & Slobodkin, cascades trophiques à trois niveaux

² Modèle Exploitative Ecosystem Hypothesis, cascades trophiques à cinq niveaux

- Le **zooplancton** est un ensemble de micro-crustacés (espèces de différentes tailles) principalement herbivores se nourrissant de phytoplancton. On cite par exemple les Daphnia, zooplancton de grande taille et de grande importance dans le broutage du phytoplancton (brouleurs efficaces) (Lazzaro, 2009).
- Le **phytoplancton** est à la base des chaînes alimentaires aquatiques. Il regroupe l'ensemble des micro-algues en suspension vivant dans la colonne d'eau. Le phytoplancton est essentiel à la vie aquatique puisqu'il produit de l'oxygène par photosynthèse.
- La **communauté benthique** est composée d'un vaste ensemble d'organismes (herbivores, carnivores, détritivores), dont les escargots qui en représentent une grande partie. Ils habitent dans la partie inférieure de la colonne d'eau du lac. Ils jouent également un rôle essentiel dans le recyclage des nutriments.

Les chaînes alimentaires peuvent fonctionner selon trois niveaux trophiques. Le niveau trophique des piscivores constitue un quatrième niveau pas toujours existant (Lazzaro, 2009). Il existe deux types de contrôle des cascades trophiques : le contrôle top-down (« contrôle par les consommateurs ») et le bottom-up (« contrôle par les ressources »).

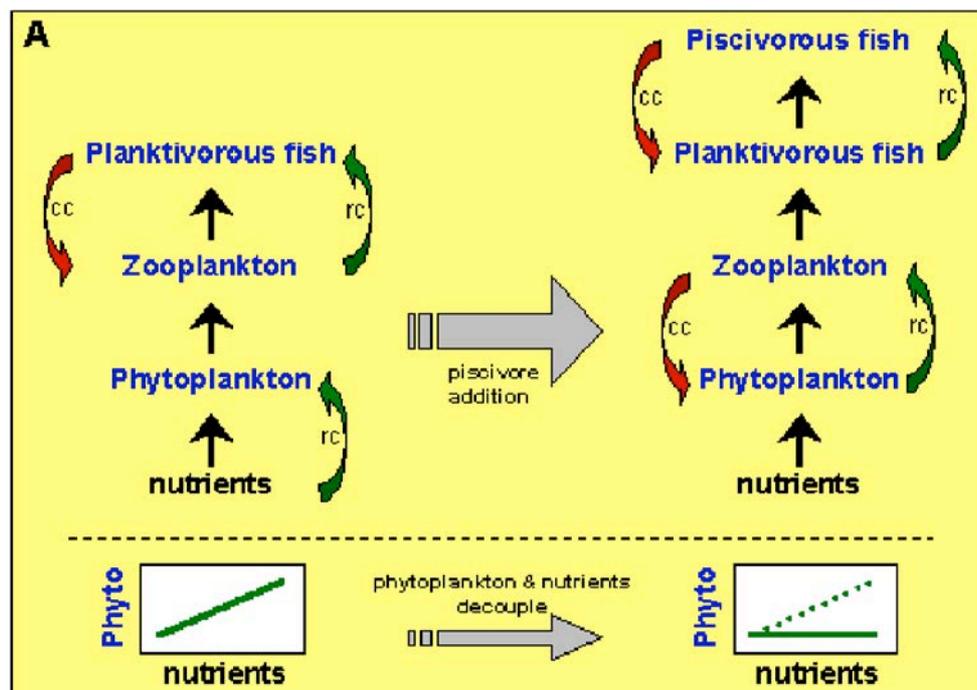


Figure 22 : Schéma illustrant deux types de cascades trophiques pélagiques (Drenner & Hambright, 2002).

A gauche, il s'agit d'un système à trois niveaux trophiques ; à droite, une cascade trophique à 4 niveaux (Drenner & Hambright, 2002).

Commentaires :

- Le Grand Lac : Les espèces de poissons du genre *Orestias* sont natives du lac Titicaca. Il en existe un grand nombre mais seules les principales sont représentées dans la cascade trophique ci-dessus. Nous nous sommes fondés sur le travail de Monroy et al. (2014) qui est le plus complet. Ces auteurs ont analysé les interactions trophiques entre quinze espèces de poissons natifs (*Orestias* spp.) et deux espèces exotiques introduites dans le cadre de la pisciculture, le pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) et la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), capturés dans le nord du Grand Lac du Titicaca. Pour cela, ils ont combiné les connaissances écologiques traditionnelles et les analyses d'isotopes stables ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$). Sur tout le Grand Lac (exceptée la Baie intérieure de Puno) et dans le Déroit de Tiquina, il existe une forte activité piscicole industrielle, principalement l'élevage de truites en cages flottantes. Des cas d'évasion de truites dans les eaux libres du grand lac ont été recensés. Les individus s'y sont reproduits et ont colonisés le lac. Cependant, les individus restent localisés autour des cages flottantes. Même s'il y a très peu d'études sur les oiseaux du Lac Titicaca (Martinez et al., 2006), et aucune approfondie sur le comportement de l'Atitlán Grebe *Podilymbus gigas*, il est connu qu'il se nourrit de poissons de petite taille (juvéniles, *O. ispi*).
- Le Petit Lac : De même que leurs proies préférentielles les *ispi*, les truites libres ne s'aventurent pas dans le Petit Lac, sans doute par manque de proies adaptées. Le bassin est trop peu profond (en particulier côté bolivien) et les eaux littorales peu transparentes pour la pisciculture industrielle de truites. Par contre, on y trouve quelques élevages familiaux pour l'autoconsommation. De très faibles densités de poissons (principalement les *Orestias*) sont recensées dans le petit lac (Lazzaro et al. 2017), résultat de la surpêche, l'eutrophisation, la réduction/disparition du cordon littoral de macrophytes aquatiques (en particulier les totoras), responsable de la perte des habitats de reproduction, alimentation et refuges.

2) Eutrophisation

Dans le phytoplancton, les micro-algues et les cyanobactéries utilisent la lumière et assimilent les nutriments pour leurs métabolismes. Une fois morts, ces organismes tombent en-dessous de la thermocline (pour les lacs profonds) et directement sur le fond (lacs peu profonds) et se constituent en matière organique décomposable, utilisée par les bactéries puis les ciliés pour leur croissance et leur développement, dans le processus de minéralisation des nutriments au profit des producteurs primaires.

L'eutrophisation est une forme de pollution organique, naturelle ou induite par l'homme et/ou le climat, qui se produit dans les écosystèmes qui reçoivent trop de nutriments assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent. Les principaux nutriments à l'origine du phénomène d'eutrophisation sont le phosphore (contenu dans les phosphates) et l'azote (contenu dans l'ammonium, les nitrites et les nitrates). Dans un écosystème en bonne santé, la composition élémentaire moyenne du phytoplancton en C:N:P (carbone, azote, phosphore) est à un niveau d'équilibre 106:16:1, appelé le rapport de Redfield, initialement défini pour les océans (Redfield 1934, 1958). Cependant, le plancton, les macroinvertébrés, les poissons et les micro-organismes qui vivent dans les lacs, pour maintenir constante leur composition corporelle interne (i.e., l'homéostasie), modifient leur environnement chimique externe, ce qui a pour conséquence de refléter leur propre composition en biomasse élémentaire. C'est le principe de stœchiométrie écologique (Sterner et Elser, 2002). Lors d'une eutrophisation cet équilibre stœchiométrique est perturbé (ex : excès de phosphore). L'eutrophisation s'observe surtout dans les écosystèmes dont les eaux se renouvèlent lentement (temps de résidence long).

Dans le cas d'un excès de nutriments dans l'écosystème, le phytoplancton (notamment les cyanobactéries, mais aussi souvent les chlorophycées ou algues vertes) va se multiplier de façon excessive, ce qui peut engendrer un bloom, encore appelé « floraison phytoplanctonique » ou « efflorescence ».

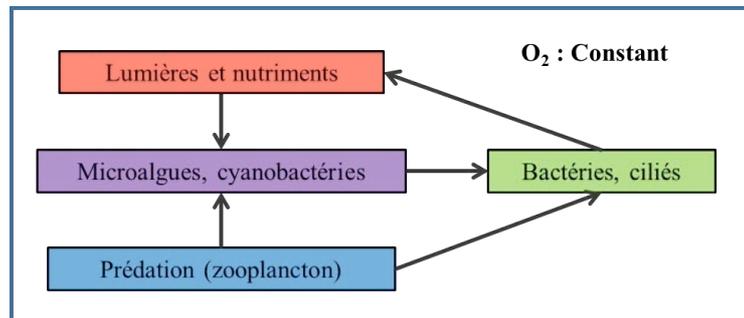


Figure 25 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un milieu oligotrophe (MJ'Echo, 2018).

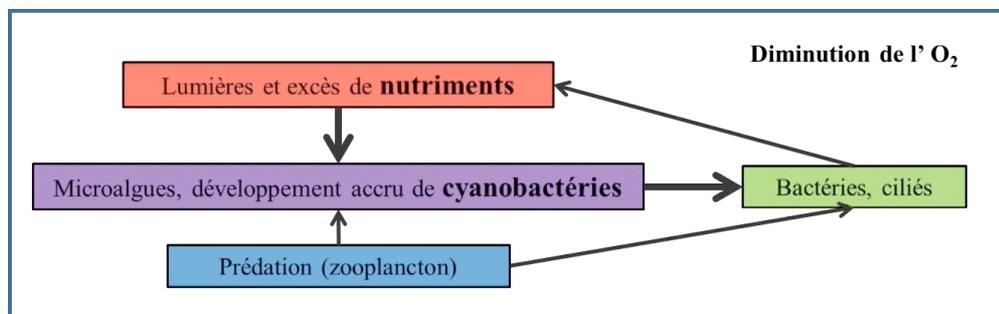
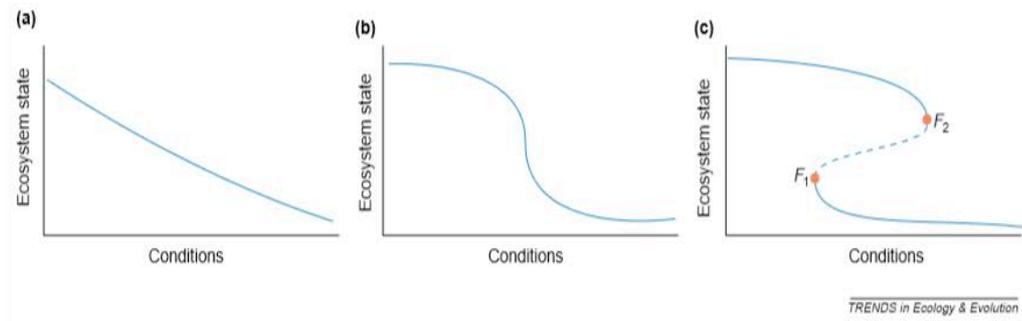


Figure 26 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un milieu eutrophe (MJ'Echo, 2018).

Un bloom est un évènement grave, ponctuel et non prévisible. Lors d'une efflorescence phytoplanctonique, la turbidité de l'eau augmente considérablement. Cette forte turbidité de l'eau opacifie le milieu sous l'efflorescence entraînant la mort de beaucoup d'espèces de producteurs primaires (micro-

algues et macrophytes aquatiques) qui ont besoin de lumière pour leur photosynthèse. De plus, la quantité en nutriments disponible devient insuffisante pour répondre à la forte demande du phytoplancton (grande concentration) : il y a accumulation et mort du phytoplancton. La décomposition du phytoplancton par les bactéries consomme beaucoup d'oxygène. Cet appauvrissement en oxygène qui peut atteindre l'anoxie, provoque l'asphyxie de l'écosystème aquatique (Gulati & van Donk, 2002). Le bloom est un événement extrême grave et d'après les nombreux travaux de Marten Scheffer (Scheffer et al., 1993, 2001 ; Scheffer & Jeppesen, 1997 ; Scheffer, 2010) sur la théorie des états alternatifs, un écosystème aquatique peut répondre de trois façons différentes à un événement extérieur. L'existence d'équilibres stables a été démontré comme caractérisant très souvent les écosystèmes naturels, mais aussi les systèmes naturels et sociétaux en interactions (Walker & Meyers, 2004 ; Liu et al., 2007 ; Scheffer 2009 ; Carter et al., 2014 ; Kramer et al., 2017).



(a) dynamique de l'écosystème légèrement modifiée
 (b) changement profond de l'équilibre à l'approche d'un point critique puis rétablissement de l'équilibre
 (c) dynamique complètement transformée, apparition d'un nouveau point d'équilibre.

Figure 27 : Illustrations des trois types de réponses possibles d'un écosystème à une perturbation extérieure (Scheffer & Carpenter, 2003).

En s'appuyant sur cette théorie, un écosystème aura trois réponses possibles à un bloom. Il est alors possible qu'à la suite d'une eutrophisation et d'un bloom, un lac ne puisse pas retrouver son équilibre initial et que l'écosystème tende vers un nouvel équilibre totalement différent, mais non prévisible. Pour éviter ce type de scénario catastrophique, il est important de tout mettre en œuvre (en particulier, les apports excessifs en nutriments) pour empêcher l'eutrophisation et donc l'apparition de blooms.

a) Les macrophytes

Depuis les années 1980, de nombreux lacs peu profonds d'eau douce ont été eutrophisés (Hootsmans *et al.*, 1991). Les études montrent que ces eutrophisations ont souvent été accompagnées d'une réduction importante de la biomasse et de la diversité des macrophytes (végétaux aquatiques) de l'écosystème. Les macrophytes ont des rôles extrêmement importants dans le fonctionnement du réseau trophique des lacs peu profonds (production d'oxygène, habitats d'autres espèces, rôle anti-érosion, cycle des nutriments...). La disparition des macrophytes entraîne indéniablement celle de nombreuses espèces, et dérègle le réseau alimentaire ainsi que les cycles des nutriments et du carbone. Suite à ces changements conséquents, le phytoplancton se retrouve dominé par les cyanobactéries durant de longues périodes de l'année (Hootsmans *et al.*, 1991). Deux modèles conceptuels sont établis pour expliquer la disparition des macrophytes :

- 1^e modèle³ : La disponibilité en nutriments augmente (eutrophisation) stimulant l'accroissement important de la biomasse de phytoplancton. Comme expliqué précédemment, l'augmentation de la biomasse de phytoplancton entraîne une turbidité de l'eau importante. Conséquemment à cet ombrage, la biomasse des macrophytes (submergés et émergents) diminue entraînant la diminution du stock des poissons piscivores (qui sont des chasseurs à vue) vivant dans les macrophytes : les biomasses de poissons planctonophages et benthivores augmentent fortement suite à la réduction de la pression de prédation et l'augmentation des

³ Etabli par Hrbáček *et al.* (1961), Andersson *et al.* (1978), Andersson (1984) et par Jupp & Spence (1977)

ressources alimentaires (détritiques, plancton). Ces espèces limitent la densité de zooplancton favorisant ainsi l'augmentation de biomasse phytoplanctonique et donc la turbidité de l'eau. Dans ce modèle, le phytoplancton domine la chaîne trophique (Hootsmans *et al.*, 1991).

- *2^e modèle⁴* : Certaines macrophytes sécrètent des substances allélopathiques qui limitent la croissance du phytoplancton (compétition interspécifique) et/ou d'autres macrophytes. La deuxième hypothèse stipule que le développement du périphyton (i.e. biofilm d'algues et de bactéries formant des colonies s'attachant à des substrats) accentue la disparition des macrophytes du système. Le déclin des macrophytes entraîne l'augmentation de la biomasse du phytoplancton (réduction des substances allélopathiques). La turbidité de l'eau augmentant, l'ombrage impacte négativement sur d'autres espèces aquatiques (Hootsmans *et al.*, 1991).

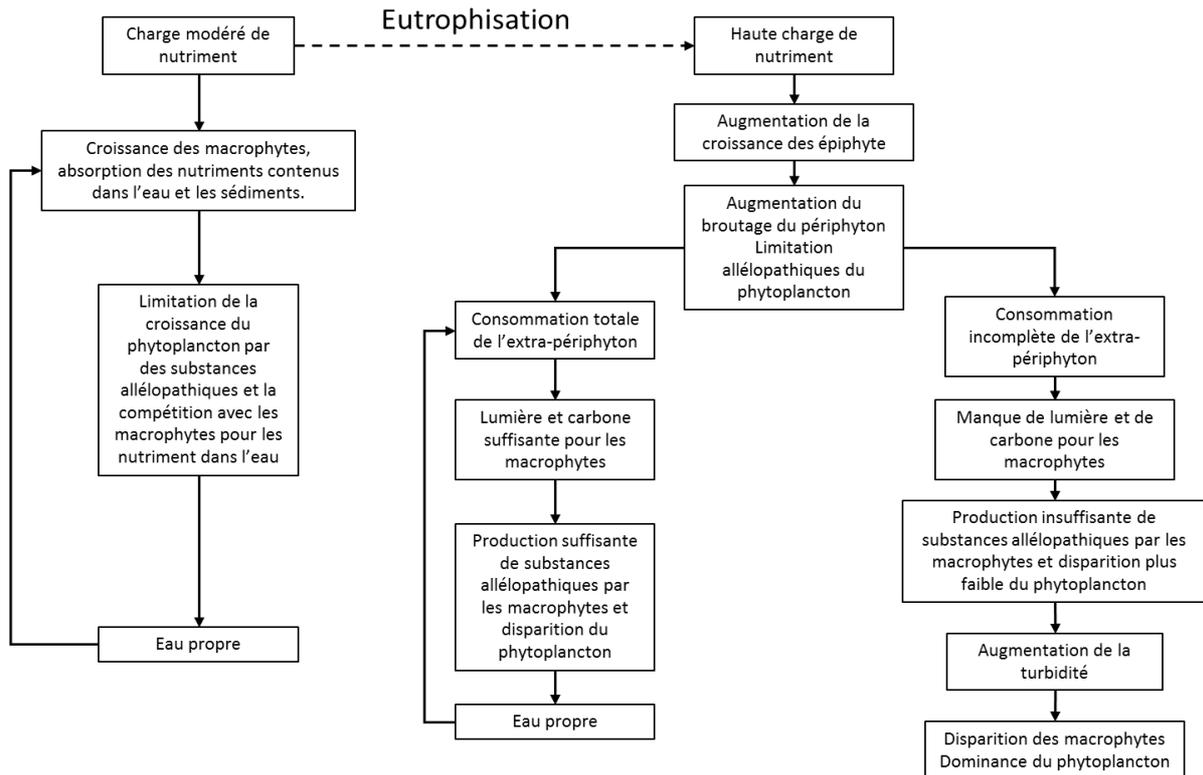


Figure 28 : Schéma exposant les deux hypothèses envisagées suite à une eutrophisation (Hootsmans *et al.*, 1991).

Lorsque les macrophytes se développent, l'eau devient plus transparente, stimulant davantage le développement des macrophytes. Cependant, la lumière est le facteur limitant principal des végétaux aquatiques submergés des lacs eutrophes : sans lumière les macrophytes ne peuvent pas se développer. Il existe donc un mécanisme de rétroaction végétation-turbidité positive dans le développement des plantes aquatiques (figure 26).

⁴ Etabli par Phillips *et al.* (1978)

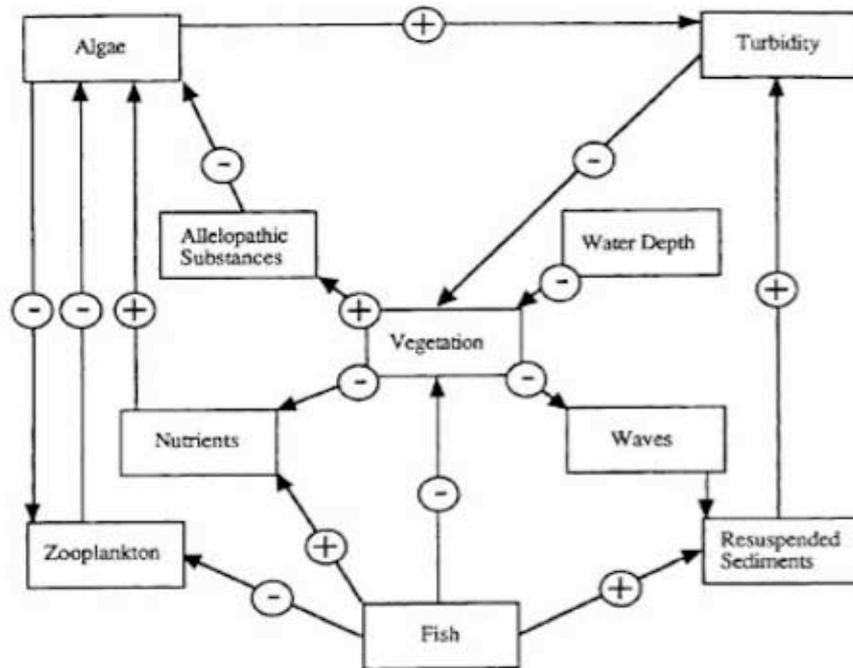


Figure 29 : Principales boucles de rétroaction considérées comme responsables de l'existence d'états alternatifs (eau turbide vs. eau claire) dans les écosystèmes lacustres peu profonds (Lazzaro, 2009, modifié de Scheffer et al., 1993).

Il est reconnu que de nombreux lacs tempérés peu profonds peuvent passer d'un état dominé par les macrophytes avec de l'eau claire à un état turbide dominé par de fortes concentrations en phytoplancton et peu de macrophytes : il s'agit du principe des états d'équilibres alternatifs expliqué précédemment. C'est ce principe qui est utilisé pour la gestion écologique et la restauration par biomanipulation dans les lacs tempérés peu profonds (cf. synthèse par Lazzaro, 2009).

b) Techniques de biorestauration lacustre

b.1- La phytoremédiation

La phytoremédiation repose sur la capacité de certaines plantes à se développer en milieux contaminés et à extraire, accumuler, stabiliser, volatiliser, transformer ou dégrader un agent polluant donné, organique ou inorganique, grâce à leurs interactions avec les microorganismes du milieu (Dabouineau *et al.*, 2015).

Il existe différents types de phytoremédiation selon le type de pollution :

- La *phytoextraction* est une méthode de décontamination des métaux lourds (cuivre, argent, or, mercure, zinc, cadmium, fer, plomb) par les plantes. Elle repose sur la capacité de certaines plantes à avoir des propriétés de tolérance et d'accumulation de ces métaux. Ces plantes sont capables d'extraire et d'accumuler les métaux dans leur partie récoltable. Il faut choisir la plante en fonction du contaminant. Une fois la plante à maturité, celle-ci est récoltée, incinérée et les cendres seront stockées dans un lieu sécurisé. Une partie des métaux pourra par la suite être retraitée, puis réutilisée. La culture de la plante peut être continuée ou renouvelée jusqu'à l'obtention de taux acceptables de métaux (Dabouineau *et al.*, 2015). Actuellement 400 espèces de plantes dites hyper-accumulatrices de métaux lourds sont recensées.

Tableau 3 : Tableau des traces de métaux dans les plantes hyper-accumulatrices (Abdelly, 2007).

Métal	Critères (% MS des feuilles)	Nombre d'espèces
Cadmium	>0.01	1
Cobalt	>0.1	28
Cuivre	>0.1	37
Plomb	>0.1	14
Manganèse	>1	9
Nickel	>0.1	317
Zinc	>1	11

Les parties de la plante accumulatrice diffèrent selon l'espèce de plante et le métal. Les parties accumulatrices peuvent être les racines, les tiges, les feuilles, parfois la sève, les graines ou même des bourgeons. Il est donc important de définir la zone accumulatrice des métaux de la plante afin de définir l'organe à récolter (Dabouineau *et al.*, 2015).

- La *phytodégradation* est une méthode de dépollution des polluants organiques tels que les hydrocarbures, les pesticides... La phytodégradation repose sur la capacité de dégradation des polluants par les plantes cultivées.
- La *phytovolatilisation* est une méthode de transformation et de dégradation par les plantes de certains types de polluants comme les composés organiques et certains métaux (sélénium, mercure) en éléments volatils moins toxiques (peut être dangereux selon la concentration de polluant libéré), qui sont ensuite libérés dans l'atmosphère par transpiration de la plante (Larec *et al.*, 2016).
- La *phytostabilisation* est l'absorption et l'immobilisation des polluants au niveau des racines (rhizosphère) des plantes afin de réduire les phénomènes de lessivage et leur dispersion par le vent (Larec *et al.*, 2016).

Sur le Lac Titicaca, on retrouve une grande diversité de macrophytes (entre flottantes, émergentes et submergées), comme les totoras (*Shoenoplectus californus*). Les totoras sont des macrophytes émergentes très présentes sur le lac et occupent des rôles écologiques importants.

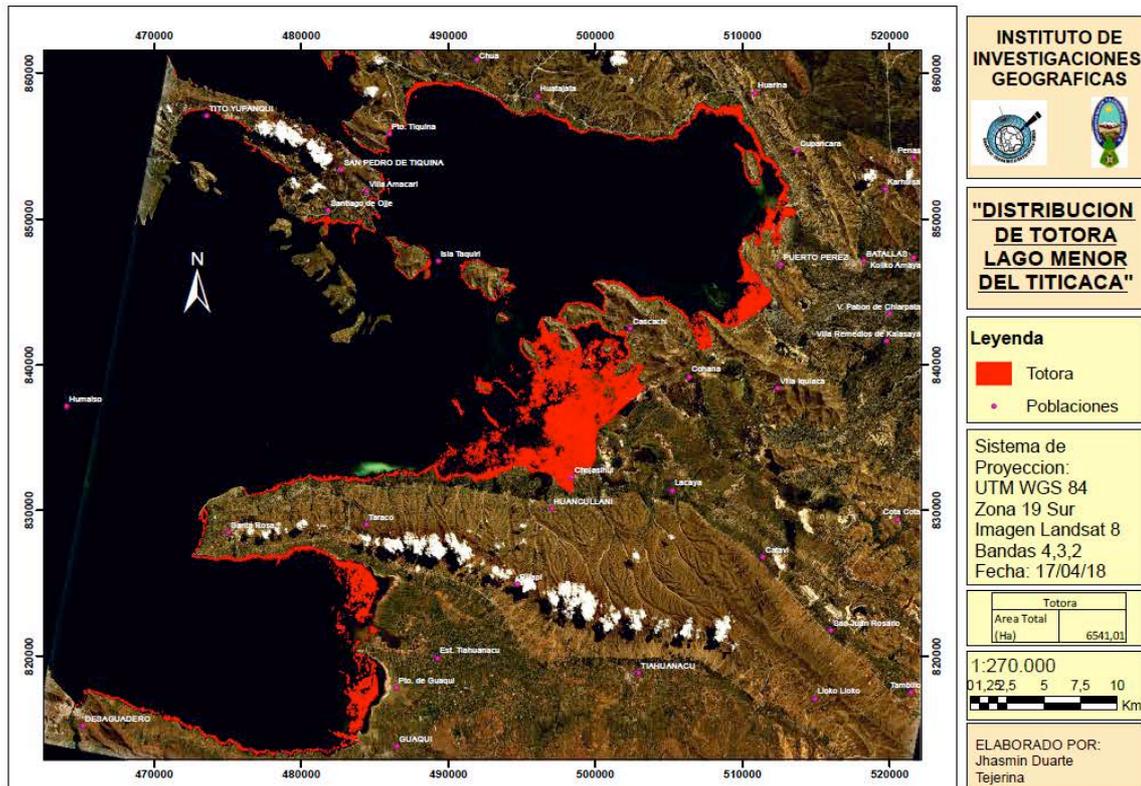


Figure 30 : Carte de répartition des totoras autour du Petit Lac (Bolivie), à partir d'images Landsat8 et de calibration in situ des signatures spectrales de la réflectance (spectroradiomètre 300-1.000 nm) (Duarte,2018).

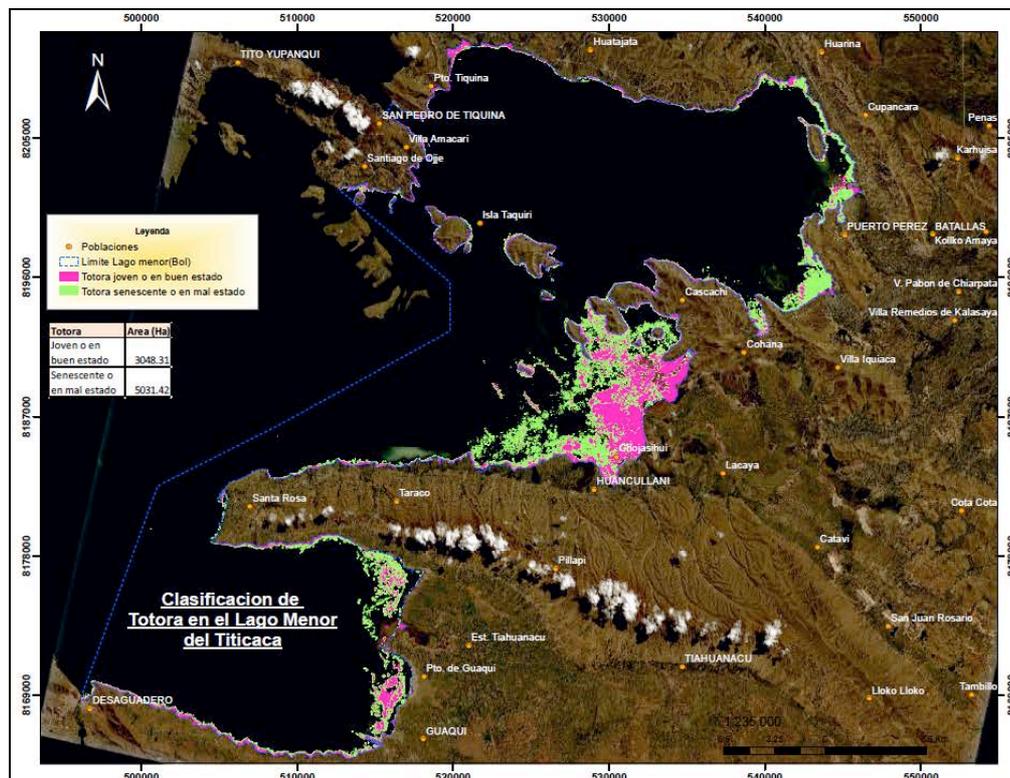


Figure 31 : Carte de répartition des totoras du Petit Lac (Bolivie) selon leur stade de développement : jeunes ou en bon état (en rose) vs. en senescence ou mauvais état (en vert), à partir d'images Landsat8 et de calibration in situ des signatures spectrales de la réflectance. De façon inattendue, on note que les totoras sont en meilleur état proche de la source de contamination constituée par l'embouchure de la rivière Katari dans la baie de Cohana (Duarte, 2018).

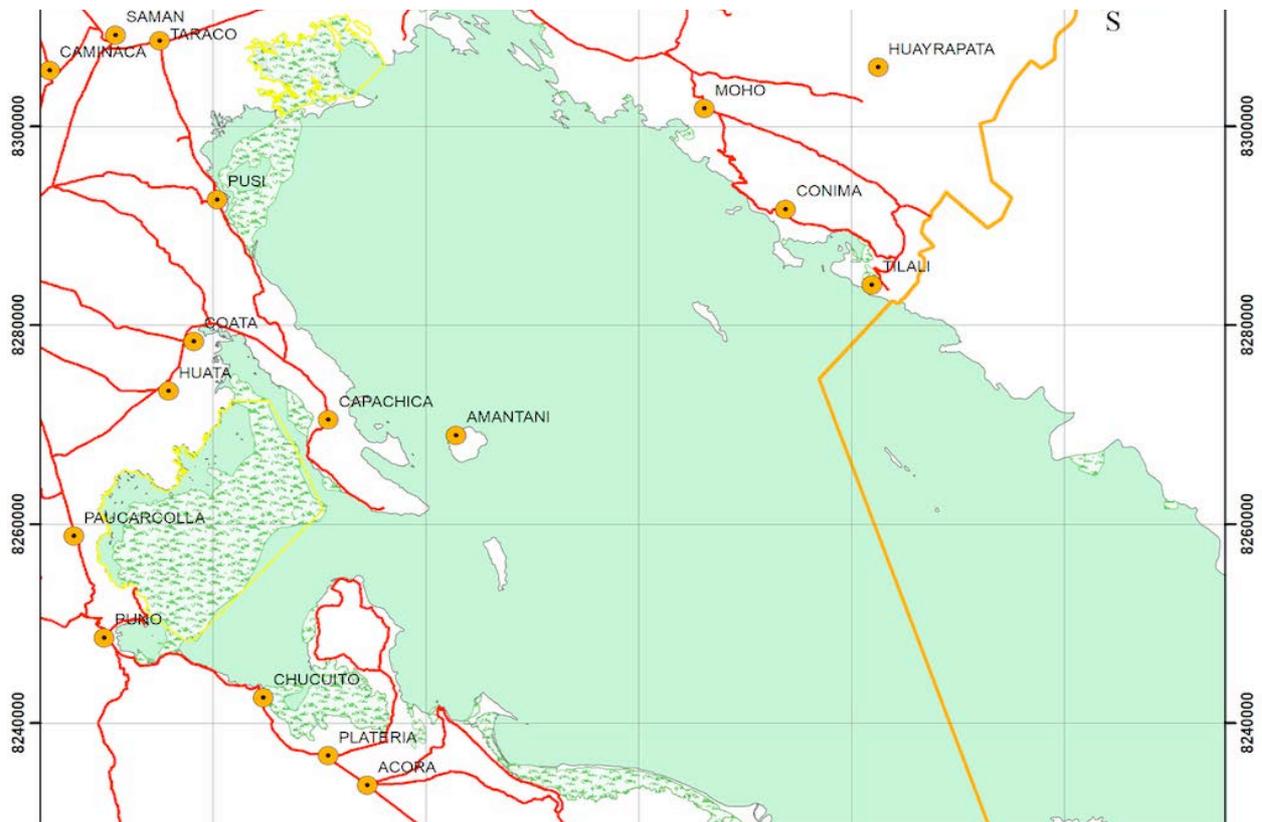


Figure 32 : Carte de répartition des totoras dans la Baie Intérieure de Puno (Pérou), Service National des Zones Naturelles Protégées par l'Etat, 2018

Des études ont montré que les totoras ont une bonne capacité d'accumulation des métaux lourds. Comme expliqué dans le rapport « *Evaluación para la fitoremediación de aguas contaminadas* » (Achá et al., 2015), des projets de décontamination par les totoras sont déjà envisagés sur le Lac Titicaca.

Tableau 4 : Tableau de la concentration de métaux lourds dans la totora par parties en saison sèche (Manjón Manjón, 2006).

Partie	Localisation	Arsénique (mg/kg de MS)	Fer (mg/kg de MS)	Plomb (mg/kg de MS)	Zinc (mg/kg de MS)	Cadmium (mg/kg de MS)
Racines	Rio Poopo	221	21053	601	6305	185
Partie basse de la tige	Rio Poopo	<LD	4040	48	4949	146
Partie haute de la tige	Rio Poopo	<LD	2005	<LD	5480	6
*LD		**	0,03	0,08	0,01	0,02

*LD = Limite de détermination

** Limite de l'appareil pour l'arsenic non définit

Tableau 5 : Tableau des concentrations de métaux lourds dans la totora par parties en saison humide (Manjón, 2006).

Partie	Localisation	Arsenic (mg/kg de MS)	Fer (mg/kg de MS)	Plomb (mg/kg de MS)	Zinc (mg/kg de MS)	Cadmium (mg/kg de MS)
Racines	Rio Poopo	248	16951	220	7319	331
Partie basse de la tige	Rio Poopo	63	936	<LD	909	29
Partie haute de la tige	Rio Poopo	72	1038	<LD	838	6
*LD		**	0,03	0,08	0,01	0,02

*LD = Limite de détermination

** Limite de l'appareil pour l'arsenic non défini

b.2- Bio-manipulation

La biomanipulation est un concept qui regroupe un ensemble de techniques de restauration de lacs tirant parti des mécanismes écologiques naturels. Elles permettent d'orienter un écosystème vers un état stable désirable en modifiant les rapports d'interactions entre les communautés biologiques qui le constituent : comme par exemple réduire/augmenter les pressions de prédation, le broutage de certains compartiments, et/ou le recyclage des nutriments, afin de contrôler sa productivité et son état trophique.

Ces techniques qui relèvent de l'ingénierie écologique ont d'abord été appliquées sur des lacs tempérés (Carpenter *et al.*, 1992 ; Hansson *et al.*, 1998 ; Drenner *et al.*, 1999 ; Jeppesen *et al.*, 2012), puis adaptées aux lacs tropicaux peu profonds (Lazzaro, 1997 ; Jeppesen *et al.*, 2005 ; Lazzaro *et al.*, 2005 ; Lazzaro *et al.*, 2010). Les résultats montrent que ces méthodes sont plus efficaces sur des petits plans d'eau (<25 ha) peu profonds (profondeur moyenne < 2,5 m) (Drenner *et al.*, 1999 ; Meijer *et al.*, 1999 ; Olin *et al.*, 2006). Cependant, pour de nombreuses raisons, les techniques de biomanipulation des lacs tempérés ne sont pas directement transposables aux lacs (sub)tropicaux. En effet, par rapport aux lacs tempérés, dans les lacs (sub)tropicaux les conditions climatiques sont plus stables avec des croissances végétales et des recrutements (reproduction continue) des poissons toute l'année. Leur fonctionnement écologique est généralement beaucoup plus complexe suite à l'importance de l'omnivorie, (consommation sur plusieurs niveaux trophiques), la prépondérance des poissons filtreurs omnivores (détritiphages et phytophages), la rareté des poissons piscivores strictes.

En conséquence les cascades trophiques pélagiques classiques : piscivores → planctophages → plancton, sont de faible intensité et ne s'appliquent pas souvent aux lacs tropicaux peu profonds. Il faut utiliser un autre modèle (Lazzaro, 1997 ; Lazzaro *et al.* 2003 ; Lazzaro, 2009), où les poissons omnivores prédominent, avec modifications des compositions relatives en espèces, ou proportions de groupes fonctionnels. En milieu (sub)tropical, la variabilité interannuelle est bien plus grande que la variabilité saisonnière, rendant très incertaines les prédictions (Lazzaro, 2009). Les manipulations « top-down », i.e. la restructuration des chaînes trophiques par réduction des poissons piscivores, ont donc peu de chances de fonctionner pour y restaurer la qualité de l'eau. Ce sont les réductions de biomasses des poissons filtreurs omnivores qu'il faut utiliser pour réduire le recyclage interne en nutriments et ainsi le phytoplancton et contrôler les blooms (Lazzaro, 1997 ; Pinel-Alloul *et al.*, 1998 ; Lazzaro *et al.*, 2003). Cette technique a été utilisée avec succès sur le lac Paranoá, le lac eutrophe urbain de Brasilia, la capitale du Brésil, qui a permis de réduire considérablement la biomasse du phytoplancton et d'éliminer durablement les blooms récurrents de cyanobactéries (*Cylindrospermopsis reciborskii*) depuis 2000 (Starling *et al.* 2002 ; Lazzaro & Starling, 2005).

c) Causes naturelles et anthropiques de l'eutrophisation

c.1- Causes naturelles

Un lac reçoit de manière naturelle et continue, des quantités de matières nutritives apportées par les torrents et les eaux de ruissellement. Cet apport stimule la croissance et la multiplication excessive de certaines micro-algues du phytoplancton, particulièrement dans les couches d'eaux superficielles car les producteurs primaires ont besoin de lumière pour se développer. Lorsque ces algues en excès se décomposent, elles conduisent à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matières organiques biodégradables.

Dans les profondeurs du lac, là où les algues mortes viennent se déposer, les bactéries aérobies qui s'en nourrissent prolifèrent à leur tour, consommant de plus en plus d'oxygène. Or, en l'absence d'une circulation suffisante des eaux, ce qui est souvent le cas dans un lac profond (stratification thermique), le fond du lac est peu oxygéné et les bactéries finissent par épuiser l'oxygène des couches d'eaux profondes. Elles ne peuvent plus dégrader toute la matière organique morte et celle-ci s'accumule dans les sédiments. Une telle situation, lorsqu'elle se produit, s'aggrave lorsqu'il fait chaud car la solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue lorsque la température augmente.

Ce processus naturel est très lent, il peut s'étaler sur des siècles, des millénaires, et plus encore. Cette eutrophisation dite 'naturelle' correspond au vieillissement des lacs qui est souvent associé au terme « enrichissement » qui reflète le piégeage des nutriments apportés naturellement par le bassin versant, mais aussi l'atmosphère. Mais l'eutrophisation peut être fortement accélérée par l'apport d'effluents domestiques, industriels et/ou agricoles et conduire à la mort de l'écosystème aquatique en quelques décennies voir le même en quelques années. Cette eutrophisation est dite 'artificielle' ou 'anthropique' (appelée 'cultural eutrophication' en anglais) apparaît comme la conséquence des activités humaines. Lorsque les apports externes en nutriments atteignent un niveau extrême, on parle alors d'hyper-eutrophisation ou encore de dystrophisation.

c.2- Le changement climatique et l'eutrophisation

L'eutrophisation est reliée aux problèmes de pollutions, de surexploitation des ressources naturelles, à la clandestinité d'espèces invasives, au réchauffement climatique et donc à l'augmentation du dioxyde de carbone dans les océans, entraîne des véritables modifications de la biodiversité, du fonctionnement et de la structure trophique des écosystèmes aquatiques (Beaugrand G. et al 2010).

Le réchauffement climatique est une conséquence de l'accumulation de gaz à effet de serre (GES). Ce gaz provient principalement d'activités anthropiques (élevages, nucléaires, industries). Ce déchet gazeux issu des activités humaines se retrouve en aérosol dans l'atmosphère. Ces gaz interagissent en partie avec le rayonnement infrarouge venant de la terre. Ils retardent la diffusion de cette chaleur vers l'espace. Sans les GES, la température moyenne terrestre serait de -18°C (Villeneuve C. 2015).

Cette accumulation de GES (méthane, oxyde nitreux) entraîne une augmentation de la chaleur dans l'atmosphère. De plus, la surface de la terre se transforme, ce qui diminue l'albédo et entraîne donc une augmentation de la quantité d'infrarouge réémise (Villeneuve C. 2015).

L'eutrophisation n'entraîne pas un réchauffement climatique mais agit en parallèle avec ce réchauffement climatique comme un facteur néfaste pour l'environnement. L'eutrophisation d'un système lacustre comme le Petit Lac du Titicaca, peut le transformer de puits de carbone, en source de carbone pour l'atmosphère (cf. A. Groleau, IPGP, comm. pers.). Ces deux facteurs sont responsables des enjeux majeurs du XXI -ème siècle :

- Disparition des glaciers de montagne
- Perte de biodiversité marine et terrestre
- Intensification d'évènements climatiques violents
- Problèmes de santé publique, d'agriculture, de foresterie et de production énergétique
- Evaporation accélérée
- Accélération du cycle de l'eau
- Modification des cycles du carbone et de l'azote
- Conditions favorables à l'extension d'aire des parasites des cultures

(Villeneuve C. 2015.)

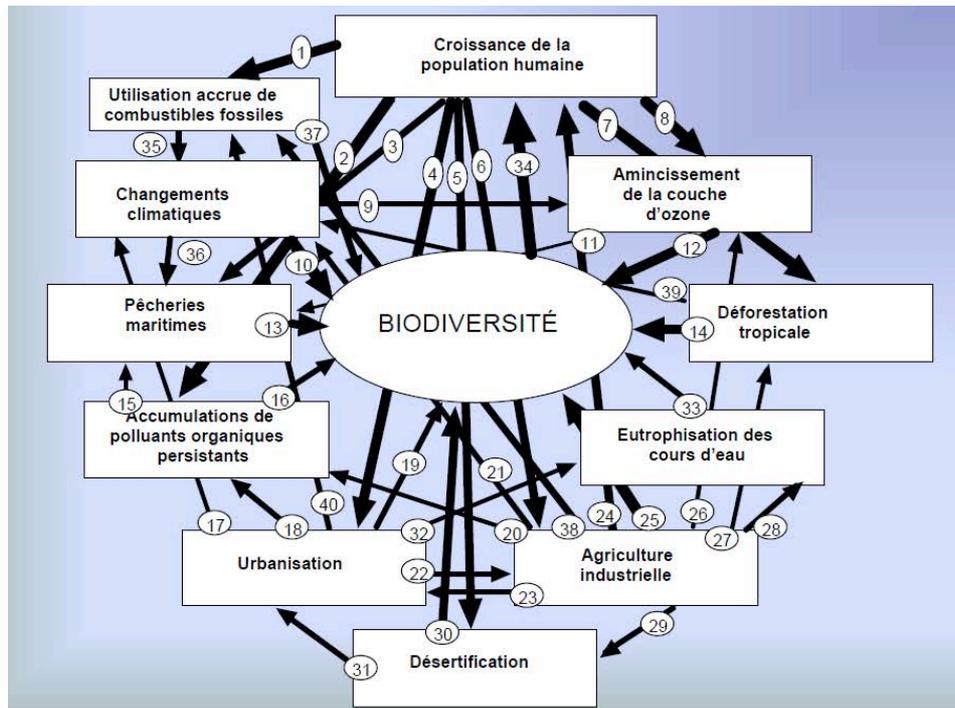


Figure 33 : Schéma conceptuel des interactions entre les problématiques planétaires ((Villeneuve C., 2015).



Figure 34 : Échelles géographiques de la qualité de l'air depuis l'air intérieur jusqu'aux phénomènes planétaires (Charpina D., 2016).

c.3- Causes anthropiques appliquées au Lac Titicaca

- Activités halieutiques

En 2003, les principales espèces de poissons pêchées et produites (principalement en pisciculture) sont les Karachi et les Ispi (espèces natives), le Pejerrey et la Truite (deux espèces introduites). En pêche traditionnelle, ce sont les poissons des genres *Orestias* et *Basilichthys* qui sont les plus pêchés.

Dans les années 1940, la truite (Salmonidé ; sous forme de trois espèces : la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss* - aussi appelée *Salmo gairdneri*, la truite marron *Salmo trutta*, et la truite lacustre *Salvelinus namaycush*) et le pejerrey (*Basilichthys bonariensis*) furent introduits dans le lac, devenant ainsi les nouveaux et seuls prédateurs de sommet de chaîne des espèces natives. Cependant, la truite lacustre ne parvint pas à s'établir en populations libres dans le lac pour des raisons qui restent encore mal expliquées liées à des facteurs environnementaux (Brenner, 1994). La truite est exploitée en cages flottantes isolées familiales (surtout en Bolivie) ou rassemblées en fermes piscicoles industrielles (surtout le long de la côte ouest du Grand Lac, dans le Département de Puno, Pérou) (Revollo et al., 2006). En 2017, il y avait 13 434 ha de production de truites en cages dans les zones aquatiques actives pour le développement de la pisciculture dans le Grand Lac, dont 750 ha qui dédiés à l'élevage de la truite-arc-en-ciel (5,6% de la surface totale). De plus, il y a environ 8 000 ha en cours de traitement avec la DICAPI (Direction Générale des Capitaineries et Garde-côtes) pour obtenir leurs autorisations. Ces principales zones sont situées dans la partie péruvienne. La pisciculture est encadrée jusqu'à 2021 par le Plan National de Développement de l'Aquaculture (PNDA) (Chura et al., 2009).

Le pejerrey a été introduit d'Argentine dans le lac Poopó, en Bolivie, en 1946 (Terrazas, 1966). En 1955, il a émigré vers le Lac Titicaca, en empruntant le fleuve Desaguadero (Everett, 1973). Depuis, il a peuplé la plupart des affluents, comme l'Ilave, le Coata, le Ramis et le Huanané (Bustamante & Treviño, 1977). Les espèces natives ne contribuent pas de façon significative à la production halieutique totale du Lac Titicaca. La production par la pêche artisanale traditionnelle, quant à elle, a considérablement diminuée, notamment dans le Petit Lac, en particulier dans la partie bolivienne où la quantité de poissons est très faible (eutrophisation, surpêche, pollution...).

Les pêcheries artisanales du Lac Titicaca comportent 10 700 pêcheurs, dont 5 400 au Pérou et 5 300 en Bolivie. Le total de captures est de 6 290 tonnes au Pérou et 200 tonnes en Bolivie (Revollo et al., 2006).

- Activités agricoles

Au Pérou, au cours des 12 dernières années, on estime que la superficie consacrée à l'agriculture était de 242 000 ha, dont 117 000 ha de cultures annuelles (107 000 ha sans irrigation et 10 000 ha avec irrigation). Les bovins, les moutons, les alpagas, les lamas, les porcs et les poulets sont les principaux animaux d'élevage (Revollo et al., 2003).

Au sein du système TDPS, la culture principale est la pomme de terre, qui compte pour 58% du revenu brut. En cultures secondaires, il y a l'orge, l'avoine (en cultures fourragères) et la luzerne, qui elles représentent 22,1% de la production totale. D'autres produits sont également cultivés comme le quinoa (5,9%), l'orge en grains (5,7%) et l'oca (tubercule) (3,4%) en cultures vivrières (Revollo et al., 2006). En Bolivie, l'élevage (principalement de bovins) est établi proche des grandes villes (La Paz, El Alto et Oruro).

Sur l'altiplano et autour du Lac, les précipitations, le climat et le sol riche en matière organique font de cette zone une des plus fertiles de toute la région. Il s'agit essentiellement d'une agriculture de subsistance (agriculture familiale). Cependant, les terres agricoles sont très fragmentées et les agriculteurs voient leurs surfaces cultivables diminuer drastiquement. Les productions agricoles ne sont donc plus suffisantes pour subvenir aux besoins des agriculteurs/éleveurs qui doivent réaliser d'autres activités (chauffeurs, ventes sur les routes de produits transformés) (Orzag V. com pers., 2018). De plus, à cause du changement climatique, les pluies et les sécheresses se décalent et les rendements des cultures diminuent (Gomez et al., 2009).

- Exploitation minière

L'exploitation minière représente l'activité la plus polluante. L'activité minière (d'étain, de zinc, d'or, d'argent ou encore d'arsenic) disperse dans l'environnement des métaux lourds, très toxiques (par ex., l'utilisation du mercure pour la séparation de l'or). L'activité minière (artisanale, informelle, coopérative) est la seconde industrie extractive de la Bolivie, après les secteurs pétrolier et gazier. Cette activité représente environ 14% du PIB national et avec les hydrocarbures, 75% des exportations (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017). En 2016, l'industrie minière représentait 26,71% du total des exportations (IBCE, 2017). Pour faire face à ces problèmes de contamination, un programme de recherche nommé ToxBol a été mis en place par l'IRD et ses partenaires pour étudier les sources de contamination, les différents types de propagation et les différents impacts causés par ces pollutions minières sur l'environnement et ses habitants, ainsi que pour développer des bioindicateurs (e.g., Molina et al., 2008 ; Tomanova et al., 2008 ; Moya et al., 2009 ; Barbieri et al., 2011 ; Moya et al., 2011 ; Fontúrbel al., 2011 ; Molina et al., 2012 ; Ruiz-Castell et al., 2013).

Les sites miniers présents autour du Lac Titicaca sont divisés en six bassins. Il y a au total près de 562 sites, mais seulement 112 actifs. Les autres sites sont laissés à l'abandon, quand ils n'ont pas été correctement fermés (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017)

Tableau 6 : Tableau des différents bassins et des sites miniers du territoire du lac Titicaca (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017).

Bassin	Nombre de sites miniers (actifs et passifs)	Rivières principales	Importance des polluants
Crucero - Azangaro Nord-Est du Titicaca	132 sites	Rio Cecilia Rio Azangaro Rio Grande	Très forte
Ayaniri-Pucara Nord du Titicaca	27 sites	Rio Pucana Rio Viltamarca Rio Suches	Faible
Coata Nord-Ouest du Titicaca	247 sites	Rio Chacalaya Rio Cotana Rio Paratia Rio Lemon Verde	Très forte
Ilpa	70 sites	Rio Vilque Rio Cayra	Négligeable
Ilava	30 sites	Rio Causillune Rio Soracucho	Négligeable
Huancané	56 sites	Rio Ticana Rio Choquena	Négligeable

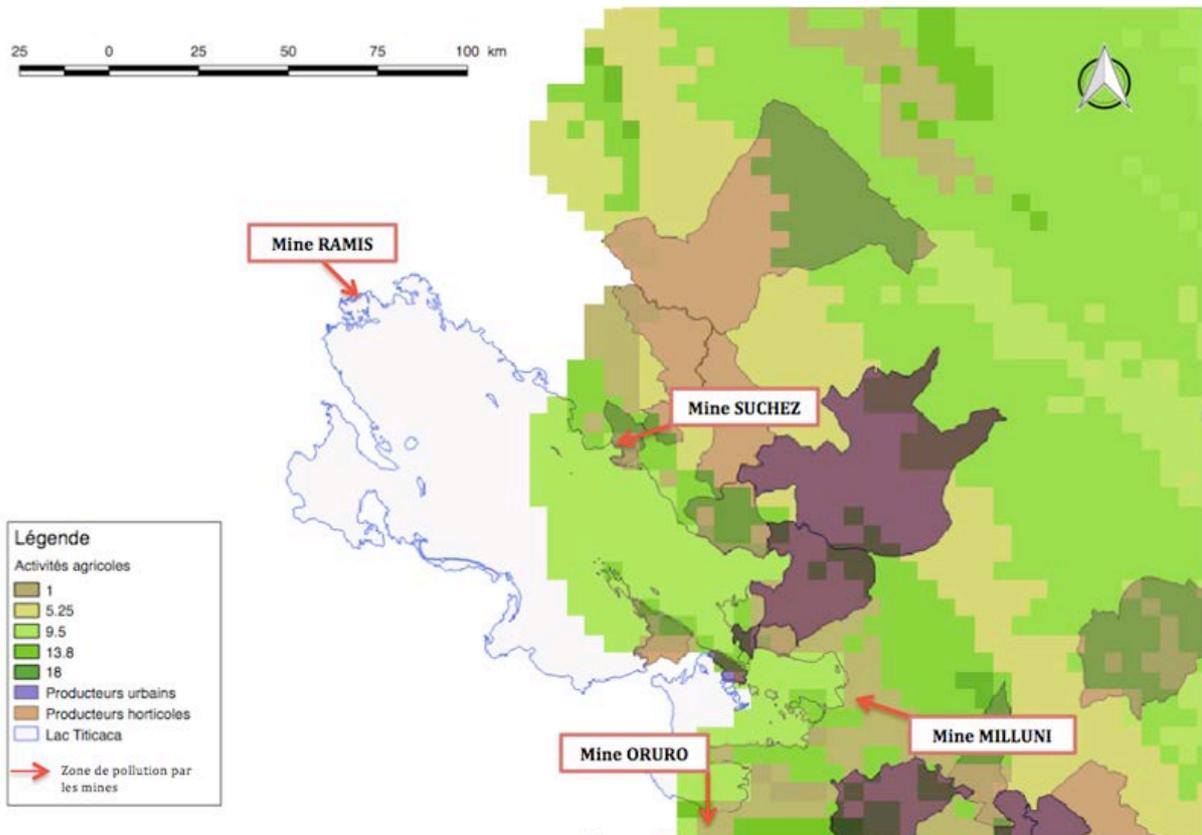


Figure 35 - Carte des activités anthropiques présentes autour du Lac Titicaca (source : GeoVisor IIGEO/UMSA, données ALT ; modifiée par MJ'Ecko, 2018).

II-Scénarios futurs

A- Introduction

Les scénarios sont des descriptions de possibles situations futures. Ils sont particulièrement utiles dans des contextes d'incertitude. Ils schématisent des situations probables, résultantes d'interactions prévisibles entre les facteurs déterminants d'un système. D'après Firmenich-Bianchi (2015), les scénarios sont des énoncés hypothétiques qui doivent montrer un éventail d'options et de situations probables. Ils ne sont pas censés déterminer la date exacte des événements, mais plutôt les successions probables entre eux. Un scénario ne se produira jamais tel qu'il est anticipé, mais il suggère une séquence probable, avec pour objectif la sensibilisation des preneurs de décisions. Il s'agit donc d'une description d'événements et de tendances qui pourraient se produire avec une forte probabilité (Hoffmann & Requena., 2012).

Pour la réalisation de nos scénarios, pour la région de l'Altiplano, nous avons considéré une augmentation de la température de l'air entre 7 et 10°C de l'année 1850 (époque préindustrielle) à 2100 (Hoffmann & Requena., 2012) sur la région de l'Altiplano. La température sur l'Altiplano a déjà augmenté de 1,5°C depuis l'époque industrielle (Hoffmann & Requena., 2012). En effet, d'après les travaux de Bradley et al. (2004), repris par Hoffmann & Weggenmann (2011) et Anthelme et al. (2014), l'impact du réchauffement climatique devrait être plus intense dans les régions tropicales de hautes montagnes, comme c'est le cas pour le Lac Titicaca (16°S, 3.809 m s.n.m) avec une augmentation de l'ordre de 4,0 – 4,5°C entre 2000 et 2080, c'est-à-dire le double du réchauffement moyen anticipé pour la planète.

Une telle augmentation engendrerait l'augmentation de la température de l'eau du Lac Titicaca, des variations de saisonnalité et des conditions arides délétères pour l'environnement du lac. D'ici 2030, les changements devraient être de quelques degrés et induire des variations quantitatives de certains paramètres comme par exemple le niveau d'eau du lac par exemple. Après 2060, la plupart des changements seront qualitatifs, transformant l'écosystème de façon radicale. Ainsi, l'Altiplano Nord qui est aujourd'hui une écorégion semi-humide pourrait se transformer en écosystème semi-aride).

Les trois scénarios sur l'eutrophisation, la hauteur de l'eau et la biodiversité ont été choisis dans le but de représenter de façon la plus probable l'évolution future du système hydrique TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopó et Salar de Coipasa) et du Lac Titicaca en fonction de nos deux zones d'études : le Petit Lac (ou Huiñaimarca, c'est-à-dire peuple éternel en aymara) et la Baie de Puno, principalement la Baie intérieure.

L'utilisation du logiciel Worldclim (Miroc 5) – grâce à l'appui technique de l'ingénieur Carlos Ruiz Vasquez, physicien du Vicerrectorado de Investigación de la UNAP, Puno – a permis de simuler les évolutions de la température et des précipitations en 2050 en prenant l'année 2000 comme référence. La simulation propose deux scénarios :

- Scénario GMC-26 : c'est un scénario optimiste qui simule une augmentation moyenne de la température de 1,5°C de 2000 à 2050.
- Scénario GMC-85 : c'est un scénario pessimiste qui simule une augmentation moyenne de la température de 2,4°C de 2000 à 2050

Les résultats obtenus par la simulation sont présentés graphiquement ci-dessous :

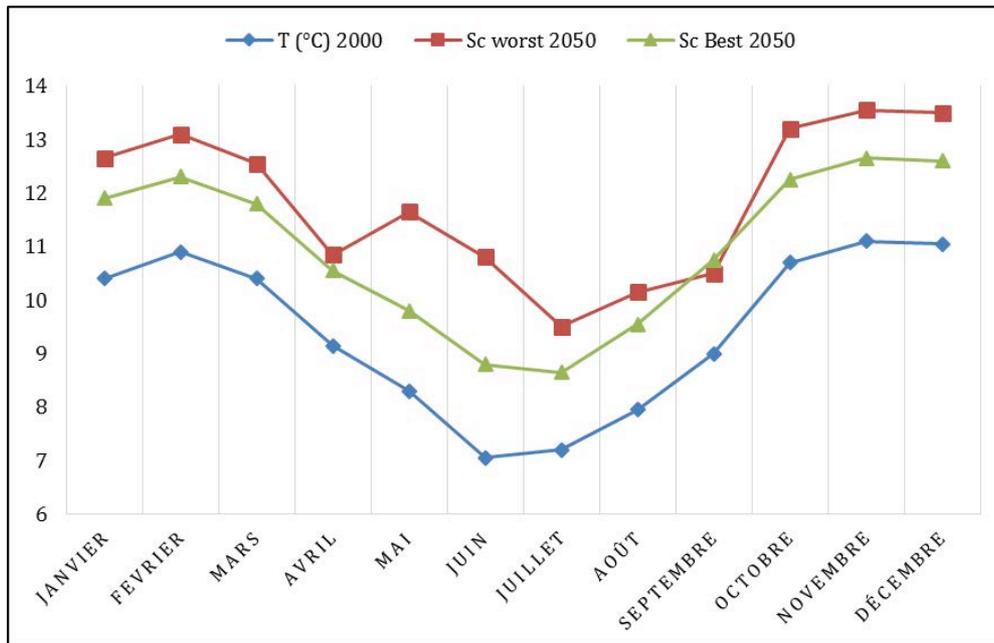


Figure 36 : Evolution des températures de l'air sur une année observée en 2000 et simulée en 2050 selon un scénario pessimiste (Sc worst 2050) et un optimiste (Sc Best 2050) (modélisé grâce à la formule de Penman, voir annexe 1) (MJ'Ecko, 2018).

Courbe bleue : Elle représente l'évolution des températures de l'air au cours de l'année 2000 (année de référence). On observe que la température maximale est de 11,1 °C en novembre. La température minimale est recensée en juin à 7,05°C. Les deux saisons tropicales sont distinguées : la saison sèche (l'hiver) a lieu d'avril à octobre, et la saison humide d'octobre à mars.

Courbe verte : Elle représente l'évolution simulée des températures en 2050 pour le scénario GMC-26 (Best). On observe que la tendance de la courbe suit celle de l'année 2000 mais avec une augmentation moyenne de la température de 1,5°C. La température maximale est attendue à environ 12,65 °C aux mois de novembre et de décembre 2050. Les deux saisons s'étendent aux mêmes périodes qu'en 2000.

Courbe rouge : Elle représente l'évolution simulée des températures au cours de l'année 2050 dans le cas d'un scénario GMC-85 (Worst). La température maximale est atteinte en novembre avec 13,55 °C. La température minimale est de 9,5 °C en juillet 2050. Les deux saisons sont beaucoup moins marquées (irrégularité saisonnière). On observe, en mai (hiver), un nouveau pic de température.

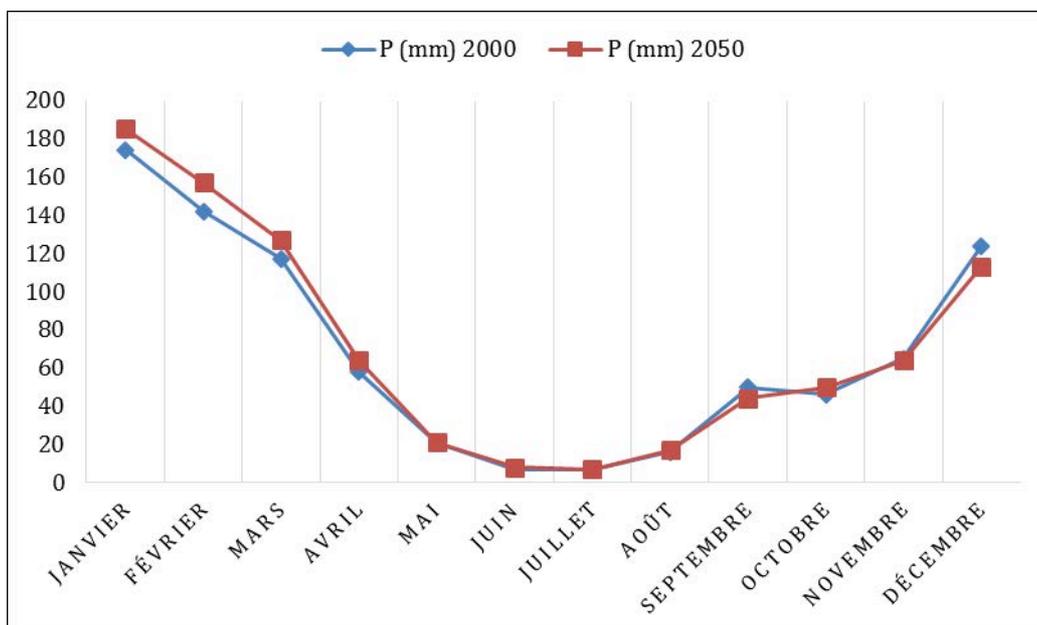


Figure 37 : Evolution annuelle des précipitations en 2000 et simulée en 2050 (modélisé grâce à la formule de Penman, voir annexe 1) (MJ'Ecko, 2018).

La *courbe bleue* représente l'évolution des précipitations en 2000 et la *courbe rouge* celle des précipitations simulées en 2050. On remarque que les deux courbes se superposent tout au long de l'année. Il semblerait donc que le cycle annuel des précipitations ne soit pas affecté par le changement climatique. On observe également comme pour les prévisions de température une saison sèche d'avril à octobre et une la saison humide d'octobre à mars.

Nous avons estimé l'évolution de l'évaporation du Lac à partir des évolutions obtenues avec Worldclim et par l'application de la formule mathématique de Penman (Pillco Zola R. et al. 2016) (voir figure 39).

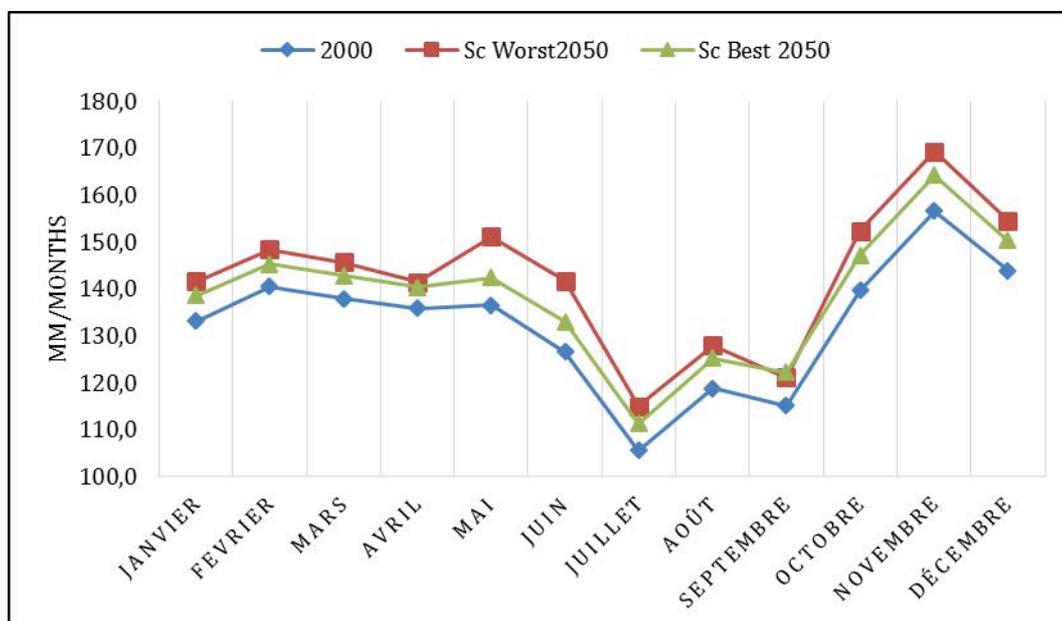


Figure 38 : Evolution annuelle de l'évaporation du Lac en 2000 et simulée en 2050 (modélisé grâce à la formule de Penman, voir annexe 1) (MJ'Ecko, 2018).

Courbe bleue : En 2000, l'évaporation évolue entre un maximum de 156,5 mm en novembre (début de la saison humide) et un minimum de 105,6 mm en juillet (saison sèche). Cependant, cette évolution ne permet pas de définir clairement les deux saisons

Courbe verte : Elle représente l'évaporation simulée en 2050, selon le scénario GMC-26. Le patron d'évolution est semblable à celui de 2000 mais avec une augmentation moyenne de l'évaporation de 6 mm/mois.

Courbe rouge : Elle représente l'évolution annuelle de l'évaporation simulée en 2050, selon le scénario GMC-85. Le patron de la courbe est semblable à ceux des deux courbes précédentes mais avec une augmentation moyenne de 10 mm par rapport à 2000. Cependant, le taux d'évaporation est plus irrégulier que précédemment, avec plus d'oscillations en avril, mai et septembre.

D'après ces résultats, le changement climatique provoquerait d'ici 2050 :

- Une augmentation de la température et de l'évaporation de l'eau du lac quel que soit le scénario envisagé.
- Une irrégularité saisonnière de la température et de l'évaporation pour le scénario le plus pessimiste (GMC-85).
- Les précipitations resteraient équivalentes jusqu'en 2050.

Ces résultats ne donnent qu'une visibilité à court terme sur l'évolution du climat futur (2050). Des changements climatiques plus importants pourraient avoir lieu par la suite.

Les impacts anthropiques et climatiques ont été identifiés afin de sélectionner les paramètres les plus pertinents influençant l'écosystème du Lac Titicaca. Les impacts anthropiques nous ont permis de mettre en avant deux gradients selon le développement humain et les décisions et orientations politiques. Le **gradient -1 représente une vision pessimiste** : il n'y aurait pas d'évolution par rapport à la situation actuelle (politique, écologie, économique et sociale), tandis que le **gradient +1 représente une vision optimiste** du développement des activités influençant le Lac Titicaca, d'une dynamique durable et respectueuse de l'environnement pour les activités socio-économiques, d'une meilleure gestion intégrée du Lac et des politiques, normes et réglementations.

Tableau 7 : Tableau représentant les effets des gradients optimiste et pessimiste des activités anthropiques (MJ'Ecko, 2018).

Gradient -1	Gradient +1
Pas de stations d'épuration	Construction des 13 stations d'épurations prévues dans le bassin du Katari, dans les délais impartis (12 à 18 mois).
Croissance démographique > 2% Expansion incontrôlée de la ville jusqu'au lac.	Croissance démographique < 2% Expansion contrôlée par la mairie de El Alto.
Pas de nouveaux systèmes d'assainissement.	Développement du réseau d'assainissement de El Alto, raccordement aux stations d'épuration dont l'extension de la station de Puchucollo.
Mauvaises pratiques d'exploitation minière, pas de recyclage des déchets.	Contrôle et valorisation des déchets miniers.
Surpêche, pas de respect des périodes de reproduction, pêche des juvéniles. Duplication de la production de truites actuelle (40 000t/an), nourries avec de la farine d' <i>Orestias</i> .	Pêche contrôlée, respect des périodes de reproduction, quotas (quantité), maille (taille). Application des lois et règlements. Pas d'augmentation de la pisciculture, meilleure alimentation.
Pas de sensibilisation de la société à la conservation des écosystèmes.	Sensibilisation générale (les écoles, les mairies, les entreprises ...).
Agriculture intensive, surexploitation des terres arables et irrigation incontrôlée.	Diminution des produits chimiques, agriculture biologique, valorisation des espèces locales, coopératives, irrigation contrôlée.
Elevage bovin sans gestion des déchets organiques, surpâturages	Valorisation des déchets organiques et des espèces locales et gestion du pâturage.
Court terme : Tourisme de masse Long terme : Disparition du tourisme	Ecotourisme (éco lodges), tourisme communautaire, application de quotas.
Pas ou peu d'application des lois et des réglementations. Absence d'évolution des règlements, d'actions politiques et de plans de suivi. Aucune anticipation des risques (systèmes d'alerte précoce), ni de plan d'action en cas d'événements extrêmes.	Application et évolution des lois et des réglementations sur l'environnement, les activités anthropiques, plans d'urbanisations. Transparence dans l'utilisation de l'argent public.
Destruction des bofedales et des herbiers à totoras (ou totorales).	Protection des bofedales et des totorales. Création de réservoirs de récupération de la fonte de glaces. Création d'un parc naturel de protection de la biodiversité et des paysages dans la région littorale du Petit Lac.
Intensification de l'exode rural. Baisse des rendements agricoles et d'élevage. Perte de connaissances sur les systèmes agro-pastoraux	Création d'une dynamique économique durable autour du lac et décentralisation des services publics.
CONCLUSION <ul style="list-style-type: none"> → Intensification des apports en nutriments azotés et phosphorés : eutrophisation (risque de récurrence de blooms). → Urbanisation anarchique. → Augmentation des pollutions. → Baisse de la biodiversité (faune et flore). → Diminution de l'attractivité économique (tourisme, pisciculture, agriculture) et disparition de certains métiers. → Prolifération d'éléments pathogènes. 	CONCLUSION <ul style="list-style-type: none"> → Stabilité écologique (résilience) du lac. → Urbanisation contrôlée et limitée. → Meilleure gestion des activités anthropiques. → Développement économique durable (tourisme, pêche, agriculture, pisciculture). → Amélioration de la qualité de vie.

B- Niveau d'eau

Le niveau d'eau du Lac Titicaca est naturellement influencé par le bilan hydrique qui est la différence entre les apports (précipitations sur le lac et le bassin versant, affluents et fonte des glaciers) et les pertes (évaporation, exutoire au niveau de la rivière Desaguadero, infiltration). On considère comme négligeables les pertes par le Desaguadero (<10%). En effet, les affluents correspondent à 44,37 % des apports en eau (avec 210 m³/s) et les eaux souterraines à seulement 0,13 %. Les pertes les plus importantes sont dues à l'évaporation, estimée en moyenne à 436 m³/s, soit 93,93 %, et au ruissellement de la rivière Desaguadero, où se perdent en moyenne 35 m³/s, soit 4,83 % (PNUMA, 2011).

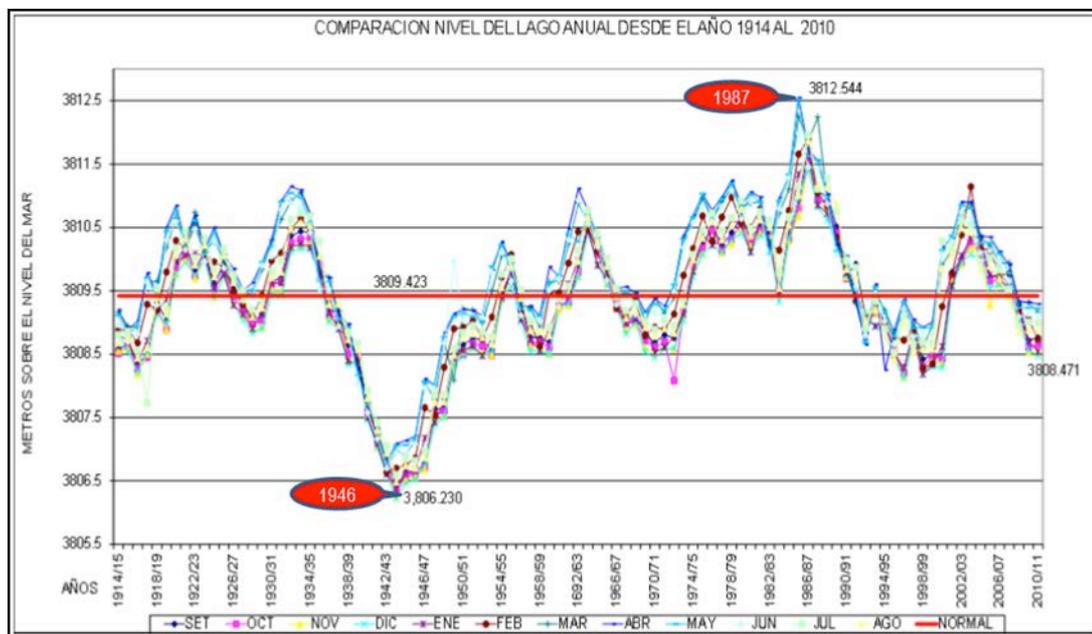


Figure 39 : Evolution mensuelle du niveau du Lac Titicaca entre 1914 -2010 (ALT, 2016).

Grâce aux courbes d'évolution du niveau de l'eau on comprend que le Lac suit un cycle, une dynamique qui se répète. Mais à cause du changement climatique et de l'augmentation de la température prévue entre 7 et 10°C pour 2100 (Hoffmann & Requena., 2012), il est attendu que l'évaporation et le risque de sécheresse soit de plus en plus fort (voir figure 39 : Evolution de l'évaporation annuelle du Lac en 2000 et simulée en 2050) et les précipitations de moins en moins fortes, ce qui pourrait dérégler ce cycle.

De plus dans les Andes centrales, la fonte des glaciers est une conséquence directe de la hausse des températures. La hausse des températures provoque une augmentation de la pluie (plutôt que de la neige) sur les glaciers, augmentant l'absorption de l'énergie solaire, car l'albedo diminuerait, et entraînant alors une accélération de la fonte des glaces (Herzog et al., 2011). Dans *Climate Change : Evidence and Future Scenarios for the Andean Region*, Herzog et ses collègues ont déterminé un léger historique de l'état des glaciers boliviens :

- Entre 1991 et 2002 le glacier de Zongo a perdu 9,4 % de sa surface enneigée.
- Entre 1940 et 2003 le glacier Charquini a perdu 47,4 % de sa surface enneigée.
- Entre 1963 et 2006 : Une analyse aérienne de 21 glaciers de la Cordillera Real a montré qu'en moyenne, les glaciers ont perdu 43 % de leur volume et 48 % de leur superficie (surtout entre 1975 et 2006).

Plus récemment, Rabatel et al. (2013) ont démontré qu'au cours des 3 dernières décennies, le retrait des glaciers des Andes tropicales n'a pas eu d'équivalent depuis l'extension maximale du Petit Âge de Glace, entre le milieu du 17^e siècle et le début du 18^e siècle. La régression des glaciers des Andes tropicales est beaucoup plus prononcée sur les petits glaciers de faible altitude qui pourraient disparaître en quelques années. La variabilité de la température de surface de l'océan Pacifique serait le principal facteur

contrôlant la variabilité du bilan de masse des glaciers à l'échelle décennale. Vuille et al. (2018) révèlent que le retrait des glaciers des Andes tropicales entraîne une augmentation temporaire de l'approvisionnement en eau en aval pendant la saison sèche, mais une réduction des débits sur le long terme.

Or l'eau des glaciers représente 5% des apports hydriques au Lac Titicaca. Leur disparition aurait de lourdes conséquences sur les apports d'eau fournis par les bofedales (tourbières de haute altitude des Andes tropicales), particulièrement pendant la saison sèche (Hoffmann & Requena, 2012). En effet, le rôle des bofedales est primordial car pendant la saison sèche ils amortissent les pertes d'eau dues à l'évaporation. Ils jouent un rôle majeur dans le contrôle du débit des affluents qui se déversent dans le Lac. Ils sont alimentés essentiellement par la fonte des glaciers. Si l'apport d'eau des glaciers est amené à disparaître, le cycle hydrique et l'équilibre naturel du Lac risque d'être bouleversé. La régression des glaciers provoquerait donc pendant une courte période d'intensification des débits des affluents à cause de la fonte des glaces, suivie d'une étape de sécheresse importante (Hoffmann & Requena., 2012 ; Rabatel et al., 2013). De plus les bofedales sont des lieux de pâturage et sont donc soumis à une forte pression toute l'année. S'ils se retrouvent trop abimés voire détruits par le surpâturage les flux d'eau se déversant dans le Lac seront donc modifiés (Quenta et al., 2017).

De plus, les activités anthropiques, comme l'irrigation pour l'agriculture et la destruction des bofedales par l'élevage pourraient entraîner une diminution accélérée du niveau du Lac et altérer la disponibilité en eau pour la consommation humaine et agricole.

En 2014 la BID a produit 2 scénarios (basés sur les scénarios du GIEC), A2 et B2, sur lesquels nous nous appuyeront pour expliquer une potentielle évolution de la disponibilité et la demande en ressources hydriques d'ici 2100. Pour obtenir ces projections futures, les modèles climatiques sont soumis à différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et à différents degrés de développement social et économique compatibles avec ces émissions.

A2 : Croissances démographique et régionale soutenues (c'est-à-dire identiques à aujourd'hui voire supérieure) avec une concentration en CO² pour 2100 de 850 ppm (partie par million).

B2 : Croissance démographique plus faible, un développement économique modéré et une concentration en CO² de 600 ppm.

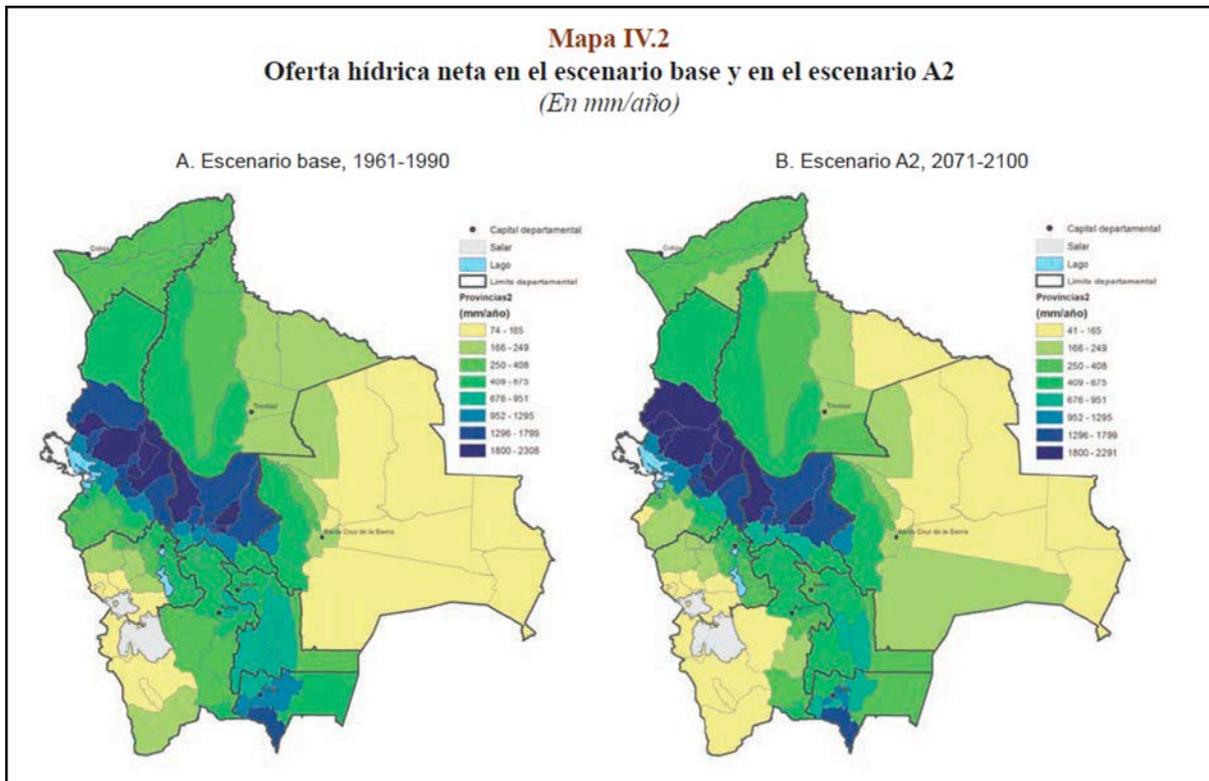


Figure 40 : Disponibilité hydrique en Bolivie, A) base : 1961 – 1990 et B) projection du scénario A2 pour la période 2071 – 2100 (BID, 2014).

A partir de ces cartes on peut conclure que la disponibilité future en eau dans la région de l’Altiplano bolivien pourra être relativement identique à celle de la période 1961 – 1990, soit entre 676 et 1295 mm par an.

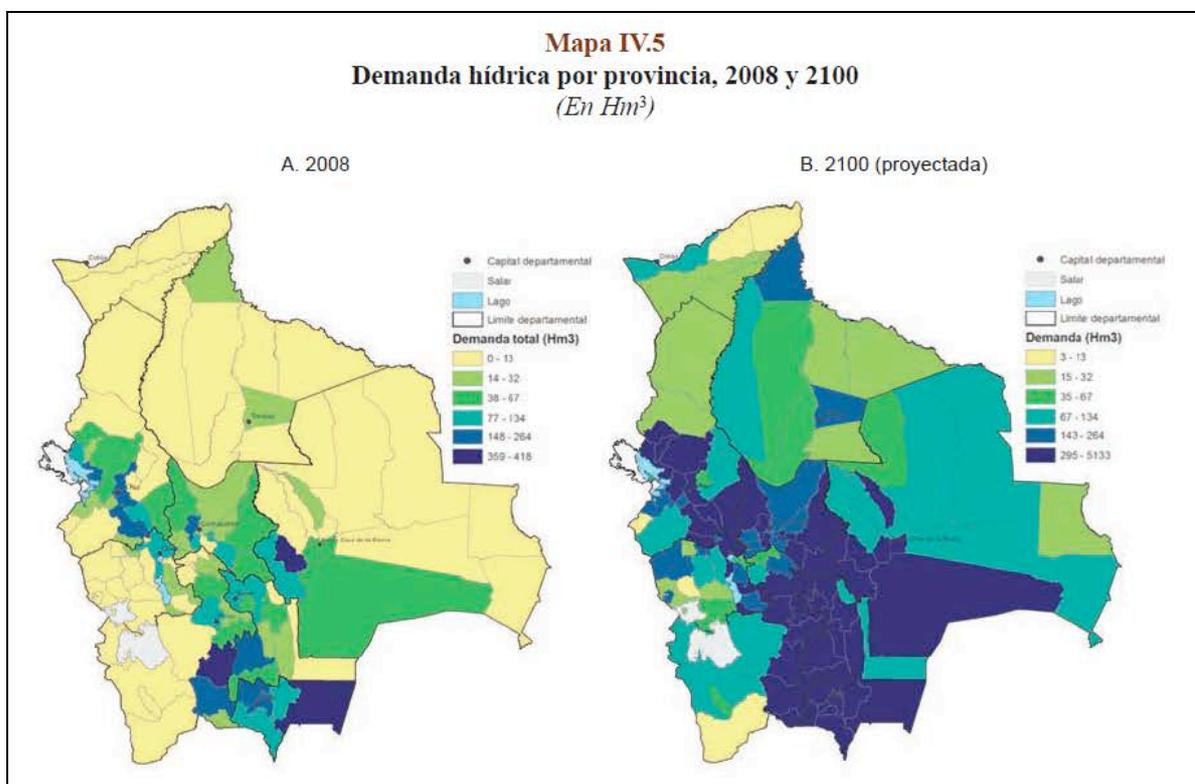


Figure 41 : Demande hydrique en Bolivie, A) base de 2008 et B) projection du scénario A2 pour 2100 (BID, 2014).

En revanche, ces cartes démontrent que la demande hydrique va s'accroître drastiquement. La demande hydrique représente le volume d'eau utilisé par les activités socio-économiques. Elle prend en compte la consommation en eau potable (domestique et industrielle) et l'irrigation agricole.

Selon ces projections, la consommation d'eau passerait de 137 millions de m³ en 2008 à 1.802 millions de m³ en 2100 dans tout le pays (Bolivie) (BID, 2014). Cela peut s'expliquer par divers paramètres : l'augmentation de la population, l'augmentation de la demande en eau potable et l'augmentation de la demande des ménages en ressources alimentaires agricoles ou manufacturés à forte consommation d'eau donc indirectement l'augmentation de l'irrigation.

Actuellement, l'utilisation de l'eau pour l'irrigation est environ 40 fois supérieure à celle de l'eau potable. Il est prévu que la demande en eau pour la production agricole soit multiplié par 12 (BID, 2014).

Certains modèles climatiques prévoient des niveaux de précipitations plus élevés dans les basses terres et plus bas dans les hautes terres. Ces modèles engendreraient donc à long terme une récurrence des inondations dans les basses terres et des sécheresses notamment dans la zone du Lac Titicaca. Pour réduire le coût de la sécheresse il sera donc nécessaire d'étendre la couverture des systèmes d'irrigation, ce qui aura inévitablement des conséquences sur le niveau d'eau du Lac (BID, 2014).

Le changement climatique pourra avoir un impact sans précédent sur certaines activités économiques (notamment agricoles). Il est donc primordial d'attirer l'attention sur quelques points qui pourront devenir critique à l'avenir, comme la nécessité d'irriguer ses cultures, d'adapter ses plantations au nouveau climat de plus en plus sec qui s'imposerait, et la demande en une ressource qui deviendrait de plus en plus rare, donc probablement de plus en plus chère, et de plus en plus polluée.

De plus certains scientifiques comme Hoffmann et Requena (2012) ont prédit pour 2060 une diminution de 40m du niveau du lac Titicaca par rapport à celui de 2012. Une telle prédiction aurait comme conséquence de la disparition du détroit de Tiquina, ayant une profondeur de 40 mètres, la communication avec le Grand Lac serait perdue, le Lac se séparerait en deux, et le petit lac pourrait disparaître.

Finalement, les modèles climatiques prévoient des conditions plus arides dans le futur même si la prévision de la pluviométrie est plus incertaine. Avec le temps, la sécheresse risque de devenir générale et la diminution de la végétation, due à l'aridité, ainsi que la forte évapotranspiration empêcheraient la population de profiter des courtes périodes de pluie. L'effet bénéfique du pouvoir humidificateur du Lac Titicaca diminuerait considérablement, du fait que celui-ci se serait divisé en deux plans d'eau plus petits et moins profonds (Hoffmann & Requena., 2012). Le climat aride qui s'imposerait rapidement dans la région ne permettrait qu'aux petits organismes aquatiques aux temps de génération courts (phytoplanctons, zooplanctons, invertébrés) de s'adapter au nouvel environnement (BID, 2014).

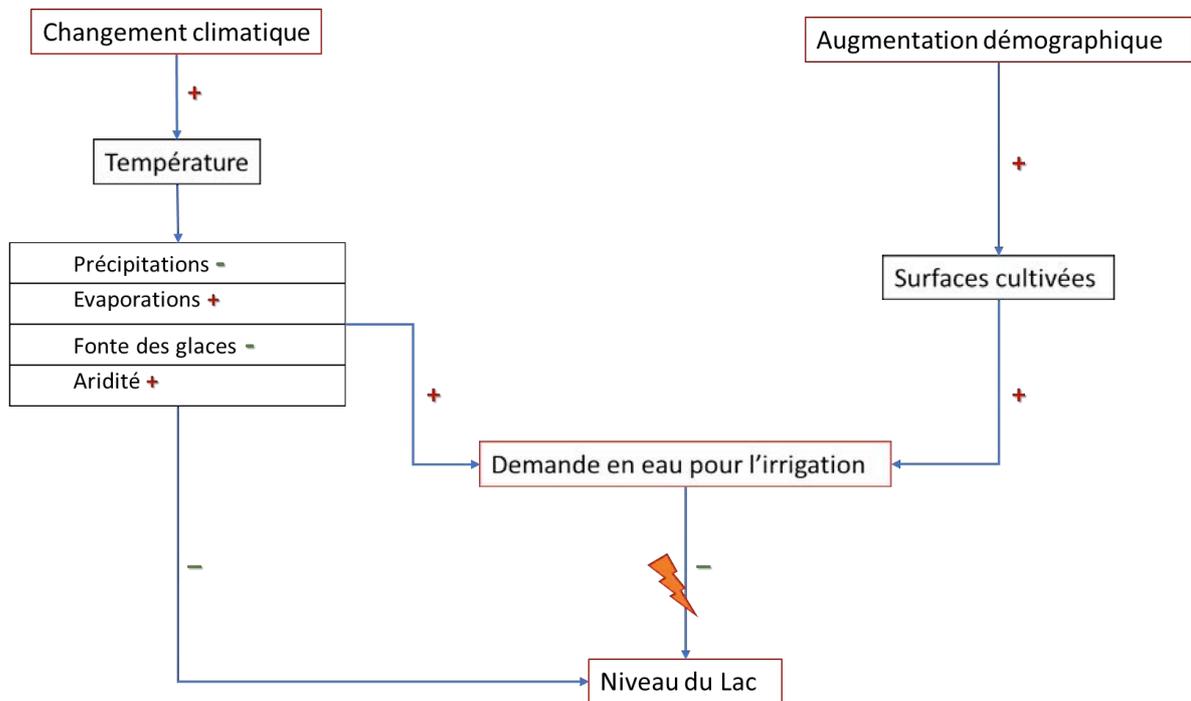


Figure 42: Schéma du potentiel conflit créé par la diminution du niveau de l'eau et l'augmentation de la demande en cette ressource (MJ'Ecko, 2018).

Les variations naturelles du niveau de l'eau nous permettent d'émettre l'hypothèse d'une diminution du niveau de l'eau du Lac. L'évaluation de l'évolution du niveau est peu fiable et demande une étude plus approfondie. Cependant, la demande hydrique humaine risque d'augmenter. Ces deux hypothèses mettent en avant un potentiel conflit entre une ressource qui deviendra de plus en plus rare et à la fois de plus en plus nécessaire et demandée.

Recommandations :

- Prévenir les pertes dues à la variabilité des précipitations : mettre en place des systèmes d'irrigation efficaces face aux précipitations extrêmes et à la sécheresse (exemple : le système goutte à goutte) ; contrôler la déforestation pour ne pas intensifier les problèmes d'inondation dans les basses terres.
- Mettre en place une organisation territoriale et gestion des migrations internes pour limiter le nombre de personnes vivant dans des zones vulnérables face aux phénomènes climatiques et à des potentiels conflits pour les ressources vitales (comme l'eau et les sols fertiles).
- Réduire la pollution des ressources hydriques et valoriser les eaux résiduelles issues des stations de traitement pour l'irrigation.

C- Eutrophisation et qualité de l'eau

L'eutrophisation est un phénomène induit par des causes naturelles, climatiques, ou anthropiques. L'augmentation de la température, l'apport excessif de nutriments, le rayonnement solaire et un faible brassage de la colonne d'eau, sont des facteurs favorables à l'apparition du phénomène d'eutrophisation engendrant ainsi via la photosynthèse une prolifération excessive des algues. Toutes les conditions induites par l'eutrophisation concourent à appauvrir le milieu en oxygène et libérer des gaz nauséabonds (hydrogène sulfuré, ammoniac, méthane) provoquant la mort de nombreuses espèces. Lors de la sénescence du phytoplancton, les algues mortes qui sédimentent vers le fond, entraînent un apport supplémentaire de matière organique, amplifiant ainsi le phénomène (INRA et al, 2017).

Dans le cas du Petit Lac du Titicaca, les mécanismes de l'eutrophisation sont clairement expliqués dans une animation 3D réalisée par Darío Achá et Cecilia Pabon (Problemática del Lago Menor del Titicaca, https://www.youtube.com/watch?v=poH_l6T5jX4). Au cours de ce phénomène les bactéries sulfato-réductrices produisent de l'hydrogène sulfuré (H_2S), un puissant neurotoxique, en plus d'appauvrir la colonne d'eau en oxygène dissous (déjà appauvrie de -30% par la faible concentration due à l'altitude), entraîna en avril-mai 2015, lors de la prolifération (bloom) d'une espèce d'algue verte du phytoplancton (*Carteria* sp.), une mortalité massive de poissons, grenouilles géantes et oiseaux aquatiques.

On parle d'« eutrophisation culturelle » lorsque l'Homme accélère le processus d'eutrophisation en permettant à des quantités excessives de nutriments sous forme d'eaux usées, de détergents et d'engrais d'entrer dans un système hydrique (mer, lac, étang) (Lenntech, 2018). Sur le Lac Titicaca, c'est le cas des zones littorales peu profondes, comme la Baie de Cohana en Bolivie et la Baie de Puno au Pérou.

L'eutrophisation d'un écosystème est principalement influencée par la biomasse du phytoplancton et la concentration des nutriments (phosphore et azote). Ces variables sont les principales prises en compte pour la construction de ce scénario. Enfin, certains paramètres des gradients -1 et +1 des impacts anthropiques ont été retenus en fonction de leur influence sur la qualité de l'eau.

1) La concentration de chlorophylle-a, estimée par la sonde FluoroProbe BBE

La chlorophylle-a est le principal pigment photosynthétique des algues. Elle est considérée comme un proxy de la biomasse du phytoplancton présent dans la colonne d'eau du Petit Lac. Avec les particules minérales en suspension, elle contribue à la turbidité de l'eau. Plus les apports en nutriments (azote et phosphore) sont importants, plus l'écosystème devient propice au développement du phytoplancton (INRA et al., 2017). La biomasse en phytoplancton n'est pas nécessairement corrélée aux concentrations en nutriments. En effet, dans les systèmes écologiquement efficaces le phytoplancton utilise tous les nutriments disponibles. Le phytoplancton se développe jusqu'à ce qu'il s'auto-limite par l'atténuation de la pénétration de la radiation solaire que provoque son importante biomasse en surface. Une trop forte biomasse de phytoplancton représente un risque d'eutrophisation du milieu aquatique et peut, dans les cas les plus extrêmes, provoquer un bloom et des mortalités d'organismes.

La concentration en chlorophylle-a peut être mesurée après filtration sur un filtre en fibre de verre Whatman GF/F (porosité 0,7 μm) par extraction avec différents solvants dont l'acétone, l'éthanol, le méthanol, le chloroforme-méthanol, entre autres, puis lecture au spectrophotomètre à 665 nm, ou par la méthode HPLC (High Performance Liquid Chromatography). Elle peut être aussi estimée (en eq. $\mu\text{g/L}$) *in situ* par fluorescence *in vivo* à l'aide d'un fluorimètre de terrain, comme la sonde FluoroProbe BBE (Moldaenke, Allemagne) capable d'identifier la fluorescence de 4 classes de phytoplancton : les chlorophycées, les diatomées-dinoflagellés, les cryptophycées et les cyanobactéries.

La quantité de chlorophylle est un facteur qui permet de prévenir et d'anticiper un éventuel bloom, dû à une trop grande quantité de nutriments et de phytoplanctons dans le Lac, dont les causes peuvent être dramatiques pour l'équilibre du système aquatique et la qualité de l'eau.

Le changement climatique et les activités anthropiques influencent ce paramètre.

a) Le Petit Lac

Généralement dans le Petit Lac, on remarque très peu de phytoplancton dans le premier mètre de la colonne d'eau. En effet, comme la radiation solaire ultraviolette pénètre profondément (environ 1 m pour les UV-B et 3 m pour les UV-A), le phytoplancton, qui plonge pour se protéger, est peu abondant dans le premier mètre de la colonne d'eau. En général les algues vertes prédominent dans les zones peu profondes et les diatomées plutôt au voisinage du fond. L'environnement de la station de prélèvement influence la présence et la quantité de phytoplancton.

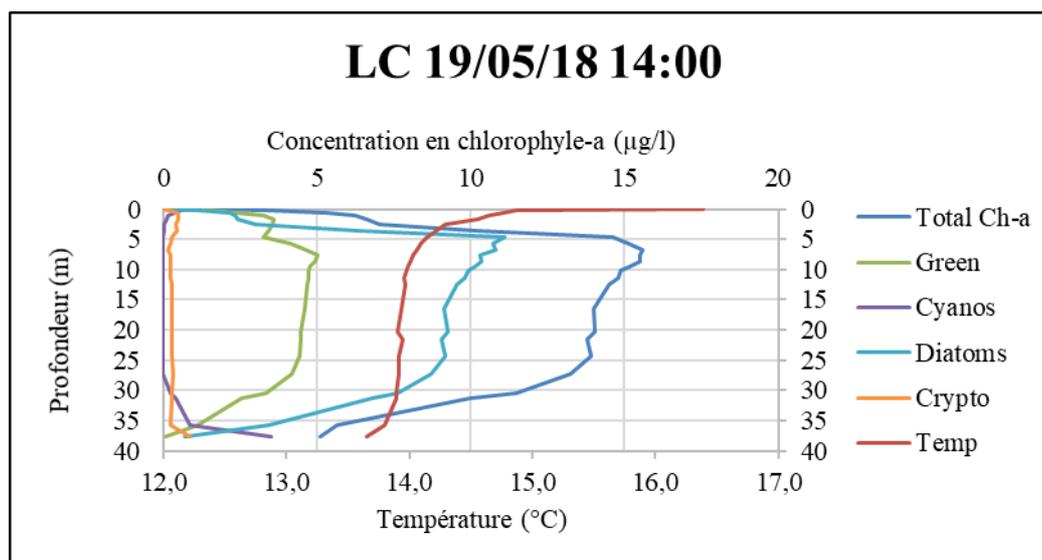


Figure 43 : Station de prélèvement, Fosse de Chúa, station la plus profonde du Petit Lac (MJ'Ecko, 2018).

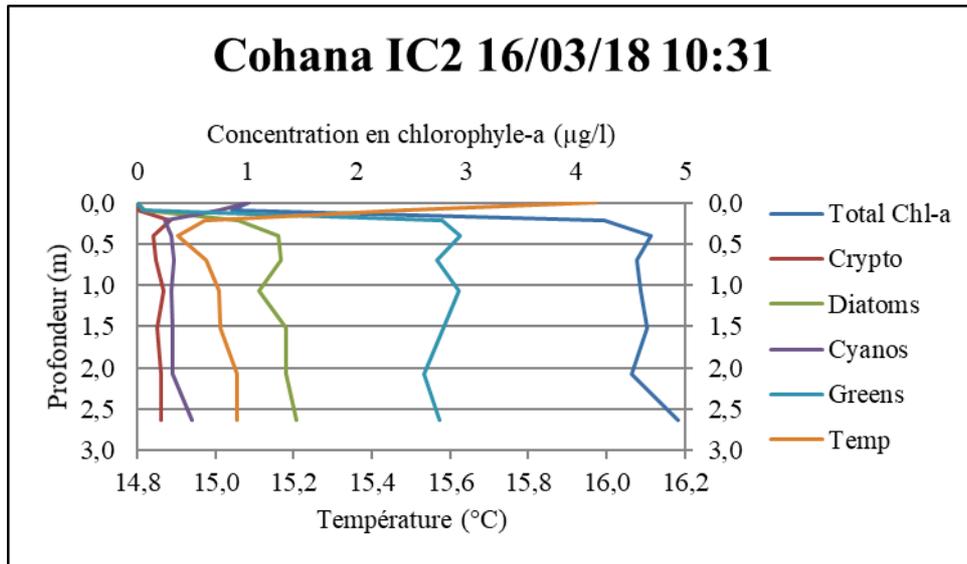


Figure 44 Station de prélèvement à l'entrée de la Baie de Cohana (Lazzaro, 2018).

b) Baie intérieure de Puno

Puno est une ville qui borde le Lac Titicaca sur la partie péruvienne. On distingue la Baie extérieure de Puno et la Baie intérieure de Puno. Elles sont séparées par un important herbier de totoras (= totorales) dont les capacités de bio-dépollution sont essentielles. La Baie intérieure de Puno est peu profonde et contaminée par les rejets de la seule station d'épuration (Espinar) de la ville qui a collapsé il y a quelques années. Les macrophytes aquatiques (totora, chara) sont absentes le long du littoral de Puno et la concentration en chlorophylle-*a* y est très élevée (> 100 eq. µg/L, en juillet 2018 face à Espinar), c'est-à-dire presque constamment au bord du déclenchement d'un bloom. C'est une Baie quasiment fermée et le renouvellement de l'eau y est très faible. Puno représente donc un réel danger pour le Lac. C'est une des seules grandes villes qui bordent une zone peu profonde du Lac sans la protection d'une séparation par une zone humide constituée par un cordon de macrophytes aquatiques. Aussi, les conséquences sur l'écosystème sont graves. Il est donc primordial qu'une ville comme El Alto n'arrive jamais en bordure du Petit Lac.

2) Rejets d'azote et de phosphore d'origine animale et humaine, en fonction de l'évolution de la démographie des villes de El Alto et Puno

a) Quantité d'azote et de phosphore émise par la population humaine des villes de El Alto et de Puno

a.1- El Alto

La population de El Alto est estimée à 922 000 habitants en 2018 (INE, 2018).

Pour une population de 922 000 habitants, les équivalents habitants (ou Eq./Hab.) de IFREMER (2018) permettent d'estimer les rejets d'azote et de phosphore suivants :

Tableau 8 : Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour une population de 922 000 habitants (MJ'Ecko, 2018).

Emission par personne/jour	Emission par personne/an	Emission annuelle de la population
15 g N/pers./jour	5,475 kg N/pers./an	5 048 t N /an
4 g P/pers./jour	1,460 kg P/pers./an	1 346 t P/an

Les émissions annuelles d'azote et de phosphore par la population de El Alto seraient donc de 5 048 t N/an et 1 346 t P/an, respectivement.

Or, une infime partie de ces eaux usées (provenant du quartier de l'Aéroport International de El Alto) est traitée par la station d'épuration de Puchukollo (capacité pour 500.000 habitants) qui fut construite en 1998 lorsque El Alto n'existait pas encore et n'était qu'une banlieue de La Paz autour de l'aéroport. La plus grande partie est rejetée non traitée directement dans le Petit Lac par divers affluents. L'ex-président de l'ALT (Autorité Binationale du Lac Titicaca) Alfredo Mamani Salinas informait en 2015 que 80% des eaux usées de la municipalité de El Alto terminaient directement dans le Petit Lac.

Ainsi, les émissions humaines d'azote et de phosphore rejoignant le Lac sont évaluées à :

$$80\% \times 5\,048 \text{ t N/an} = 4\,038 \text{ tonnes d'azote par an.}$$

$$80\% \times 1\,346 \text{ t P/an} = 1\,076 \text{ tonnes de phosphore par an.}$$

Cependant, l'augmentation de la population est estimée entre 2 et 3% par an (INE, 2018). Ce chiffre induit des conséquences qui pourraient s'avérer dramatiques si l'expansion de la ville n'est pas contrôlée, pouvant faire passer le Petit Lac d'un état oligo-mésotrophe à eutrophe. La population passerait respectivement à 1 291 860 - 1 524 914 habitants en 2035 et 2 119 433 - 3 192 831 habitants en 2060. En 2035, on observerait (par rapport à 2018) alors une augmentation de 40% des rejets azotés et phosphorés provenant de la population de la municipalité de El Alto, atteignant plus de 7 073 - 8 349 tonnes de rejet d'azote/an et plus de 1 886 - 2 226 tonnes de rejet de phosphore/an. En 2060, la population doublerait à triplerait, comme les rejets atteignant 11 604 - 17 481 tonnes de rejet d'azote/an et 3 094 - 4 662 tonnes de rejet de phosphore/an. Les conséquences seraient dramatiques et irréversibles, pouvant rendre le lac totalement eutrophe.

Cependant, cette situation désastreuse ne devrait pas être atteinte dans la mesure où il existe actuellement un programme de financement important de la BID, de l'Union Européenne et de l'AFD (pour un montant total d'environ 200 millions de dollars) pour l'extension de la capacité de la station d'épuration de Puchukollo et son raccordement au réseau d'assainissement de El Alto et la construction 13 stations d'épuration supplémentaires le long du bassin du Katari. Mais, ces STEP, qui pourraient être mise en

service dans les prochains 2 ans, prendraient probablement > 5 ans avant de produire des effets bénéfiques significatifs, compte tenu du temps de dégradation-minéralisation de la considérable quantité de matière organique, nutriments et contaminants accumulée durant plusieurs décennies dans la baie de Cohana. En parallèle, le programme binational GIRH TDPS du PNUD/GEF lance pour 3 ans des projet pilote, dont l'un concernant la phytoremédiation à base de totoras (iles flottantes le long du littoral nord et zones humides dans le bassin du Katari) et l'autre le suivi de la qualité d'eau du Petit Lac (régions nord, centrale et baie de Cohana) avec une composante haute-fréquence (bouée hydro-météo) et satellitaire (Landsat et Sentinelle) couplée à une vérité terrain (fluorescence *in vivo* de la chlorophylle-*a*).

a.2- Puno

La population est estimée à 147 397 habitants (INEI, 2018).

Tableau 9 Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour une population de 147 397 habitants (MJ'Ecko, 2018).

Emission par personne/jour	Emission par personne/an	Emission annuelle de la population
15 g N/pers./jour	5,475 kg N/pers./an	807 t N /an
4 g P/pers./jour	1,460 kg P/pers./an	215 t P/an

Les émissions annuelles d'azote et de phosphore par la population de Puno seraient donc de 688 t N/an et 183 t P/an, respectivement.

Les rejets azotés et phosphorés rejoignant les eaux du Lac (80% des rejets) sont donc évalués à :

80% x 807 t N/an = 646 tonnes d'azote par an.

80% x 215 t P/an = 172 tonnes de phosphore par an.

Il est donc urgent de raccorder l'ensemble des habitations de la région du Lac Titicaca (villes et villages) à un système efficace de traitement des eaux, ce qui permettrait d'atténuer les effets néfastes d'un apport excessif de nutriments azotés et phosphorés dans le Lac.

Si l'on estime que le taux annuel de croissance de la population de El Alto se maintient aux alentours de 2% (INEI, 2018), on pourrait voir les émissions d'azote et de phosphore issues de la population, doubler d'ici 2053 (dans 35 ans). D'ici il faudrait absolument que des mesures soient prises afin de limiter l'arrivée des émissions organiques humaines jusqu'au lac.

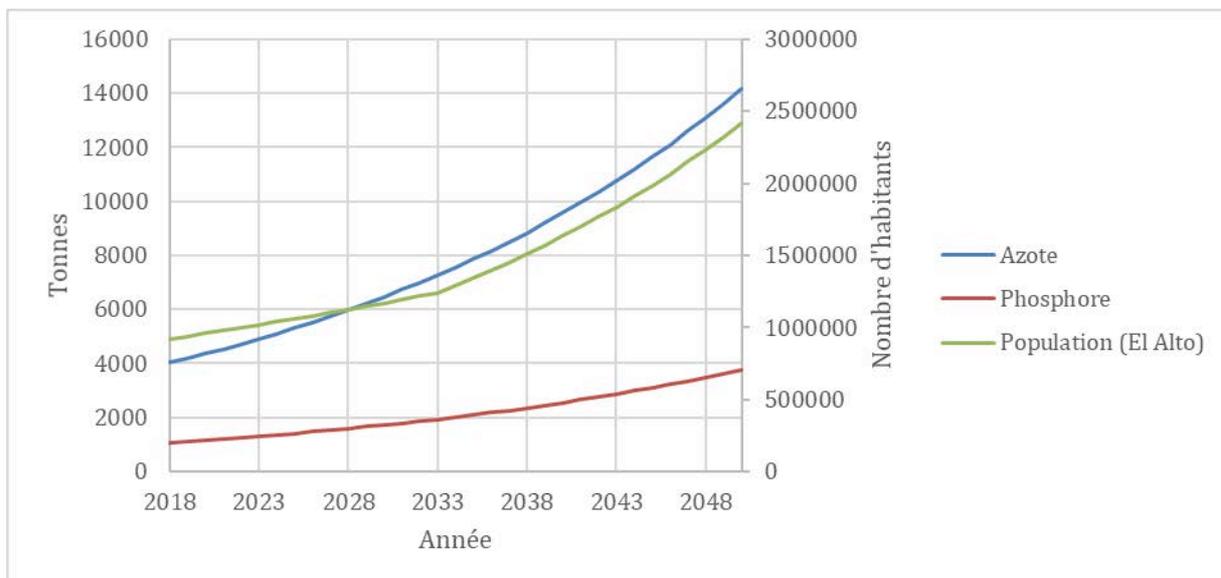


Figure 45 : Évolution des rejets annuels d'azote (bleu) et de phosphore (vert) par les eaux usées en provenance de El Alto dans le cas d'une croissance annuelle de 2% (MJ'Ecko, 2018).

b) Quantité d'azote émis par l'élevage bovin provenant des municipalités de El Alto et Puno

b.1- El Alto

Le cheptel bovin de la municipalité de El Alto est estimé à 155 106 têtes (INE, 2014) dont 9 609 têtes dans la baie de Cohana sur une superficie de 8 372 km² (INE, 2018). Le rejet d'azote par bovin est évalué à 100 kg d'azote/an (Peyraud et al., 1995) et de phosphore à 18,4 kg de phosphore /an (Bachand, 1999).

Tableau 10 : Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour un cheptel de 155 106 bovins (MJ'Ecko, 2018).

Emission par bovin/an	Emission annuelle du cheptel
100 kg N/an	15 511 t N/an
18,4 kg P/an	2 854 t P/an

Or, ces rejets ne se retrouvent pas directement dans le Lac. Une partie est utilisée et valorisée comme engrais pour l'agriculture familiale.

Cependant, l'augmentation de la population, estimée à 2% (INE, 2018) par an conduirait à une augmentation du cheptel de bovins permettant de satisfaire la demande de l'ensemble de la population de la municipalité de El Alto. Donc, cela conduirait à une augmentation des nutriments azotés et phosphorés rejetés par les bovins dans le Lac corrélée à celle de la population humaine.

Il est donc nécessaire dès maintenant de valoriser les déchets organiques émis par les bovins pour l'agriculture notamment.

b.2- Puno

Le cheptel de la municipalité de Puno est estimé à 547 bovins et 3 111 ovins (INEI, 1994). Le rejet d'azote et de phosphore par bovin est évalué à 100 kg d'azote/an (Peyraud et al., 1995) et 18,4 kg de phosphore /an (Bachand, 1999). Le rejet d'azote et de phosphore par ovin est évalué à 13, 4 kg d'azote par an et 6 kg de phosphore/an (CRAAQ, 2003).

Tableau 11 : Estimation des rejets d'azote et de phosphore pour un cheptel de 547 bovins et 3 111 ovins (MJ'Ecko, 2018).

Emission par bovin/an	Emission par ovin/an	Emission annuelle du cheptel
100 kg N/bovin/an	13,4 kg N/ovin/an	96 t N/an
18,4 kg P/bovin/an	6 kg P/ovin/an	29 t P/an

Comme : le poids molaire du N = 14 g et poids molaire du P = 31 g

Donc, le rapport molaire des apports est = $96/14 : 29/31 = 6,9 : 0,9 = 7,7 : 1$

Mais le Ratio de Redfield ou stœchiométrie de Redfield pour le rapport N : P du phytoplancton à l'équilibre dans les océans profonds est = 16 : 1. Aussi, comme 7,7 : 1 est inférieur à 16 : 1, cela suggère que les apports en nutriments apportés par le cheptel seraient plutôt limités en azote et considérables en phosphore, ce qui pourrait favoriser la dominance des cyanobactéries dans les milieux eutrophisés.

Les conséquences indésirables des apports en azote et phosphore sur l'environnement et les solutions qui existent :

Conséquences :

- Prolifération du phytoplancton, en particulier d'abord des chlorophycées (algues vertes) et/ou des dinoflagellés (e.g., *Ceratium*), puis des cyanobactéries lorsque les biomasses seront plus élevées ; avec d'éventuels blooms.
- Accélération de l'eutrophisation : augmentation des concentrations en chlorophylle du phytoplancton $> 10\mu\text{g/L}$ et de l'atténuation de la radiation solaire visible incidente, d'où une dégradation des macrophytes aquatiques submergées (*Chara*) ; réduction de la concentration en oxygène dissous jusqu'à l'anoxie dans les zones les plus profondes) et augmentation du pH > 8 , d'où une fuite des communautés piscicoles ; un développement du périphyton sur les macrophytes, en particulier sur les tiges de *Totora*, atténuant leur photosynthèse et accélérant leur dégradation.
- Pertes d'habitats, en particulier les macrophytes aquatiques (*Totora*, *Chara*) dans les zones littorales peu profondes (liées à l'artificialisation des berges par les riverains qui gagnent du terrain sur le lac) indispensables pour l'alimentation, la reproduction et les refuges des poissons contre les prédateurs ; mais aussi pour les oiseaux aquatiques qui nidifient et s'alimentent dans ces zones.
- Modification de la diversité biologique, en particulier par les menaces sur plusieurs espèces endémiques en danger d'extinction, entre les poissons comme le karachi (*Orestias juteus*), le mauri (*Trichomycterus dispar*) et le suche (*T. rivulatus*), les oiseaux aquatiques comme le zampullin ou keñola (*Rollandia microptera*) et les amphibiens comme la fameuse grenouille géante (*Telmatobius culeus*).
- Augmentation des risques pour la santé humaine : prolifération de coliformes fécaux, et autres vecteurs de maladies.
- Altération des qualités esthétiques : le lac change de couleur vers le vert (chlorophycées), le marron (dinoflagellés) ; les macrophytes filamenteuses prolifèrent, et couvrent les *Chara* du fond ; les tiges des *Totoras* deviennent

noires, elles sont fragiles et courbées ; des Lemna flottantes peuvent couvrir la surface ; de l'écume pourrait apparaître ; la transparence de l'eau est réduite.

- Contamination des sources d'approvisionnement en eau.
- Intensification de l'érosion, donc augmentation de la mise en suspension des polluants, et aussi de la matière organique, des nutriments et augmentation de la turbidité.

Solutions, recommandations :

- Fonctionnement adéquat des fosses septiques et des stations d'épuration (avec mise en service de nouvelles stations le long du bassin du Katari).
- Compléter les stations d'épuration par des zones humides à macrophytes aquatiques afin d'améliorer la rétention des nutriments et certains contaminants.
- Meilleure utilisation (parcimonieuses) des engrais et des pesticides pour l'agriculture.
- Préserver les macrophytes aquatiques littoraux (Totorá, Chara) pour leur rôle de fibre biologique des nutriments et contaminants, les arbres et l'ensemble des végétaux, notamment les plantes riveraines indigènes ayant la capacité de contrôler l'érosion du sol.
- Maintenir l'état naturel des rives, éviter l'artificialisation des berges, sans utiliser de fertilisants ni de pesticides et en limitant les activités anthropiques trop polluantes.
- Conserver et renforcer le cordon littoral de macrophytes aquatiques (Totorá)
- Retenir les eaux pluviales et éviter qu'elles se déversent dans le lac entraînant les nutriments, les fertilisants, les agrototoxiques et les pesticides.
- Eviter à tout prix l'expansion de la ville de El Alto au Lac.

3) La croissance démographique, l'expansion des villes et les résidus solides

a) El Alto

Au cours de l'Histoire, les forts taux de croissance migratoires ont entraîné une saturation de La Paz, enclavée par localisation dans des vallées étroites. Les populations se sont donc installées plus en altitude sur la zone plane de l'Altiplano au niveau de la Serra et de l'Aéroport International (Demoraes, 1998). C'est par ce phénomène qu'est née la ville de El Alto, à l'origine une banlieue de La Paz, une des villes les plus hautes du monde (4 150m). La ville a permis, dans le passé, d'amortir les différentes vagues de migration. Aujourd'hui en pleine expansion elle est une des plus grandes menaces pour l'écosystème andoréique du Lac Titicaca et de son bassin versant. La ville est habitée par près de 922 000 habitants (INE, 2018), principalement de culture Aymara. Les Aymara étaient animistes, et cela impliquait la nécessité de vivre en harmonie avec l'environnement. Mais après la colonisation et la révolution agraire de 1953, les traditions se sont débilitées (Hoffmann & Requena., 2012). La croissance démographique urbaine devint significative en 1950 et s'est considérablement accélérée dans les années 1980, suite à la grande crise économique mondiale, appelée la *decada perdida* en Amérique latine. En Bolivie, cette crise a eu de lourdes conséquences, avec la privatisation des principales mines du pays, la fermeture de nombreuses mines en faillite ou devenues peu rentables (Baby, 1998). Les familles victimes de cette crise migrèrent vers les villes, particulièrement sur l'axe central urbain, reliant La Paz-El Alto et sur l'Altiplano. La ville de El Alto comptait 95 450 habitants en 1976 et 405 500 en 1992 (INE, 2018) soit un accroissement de sa population de 325% en 16 ans. Sur cette même période, un taux de croissance démographique annuelle de l'ordre de 9,23% (INE, 2018) a été enregistré, taux presque record au niveau national et particulièrement élevé dans le contexte sud-américain. Aujourd'hui la croissance démographique de la ville de El Alto se stabiliserait vers 2% par an (INE 2015, 2018). Avec 1,2 million d'habitants pour la « mancha urbana » (i.e. l'extension de la population de El Alto aux municipes voisins de Viacha, Laja, Pucarani) en 2018 et une prévision de croissance démographique annuelle constante de 2%, la projection en 2060 dépasserait 2,7 millions d'habitants.

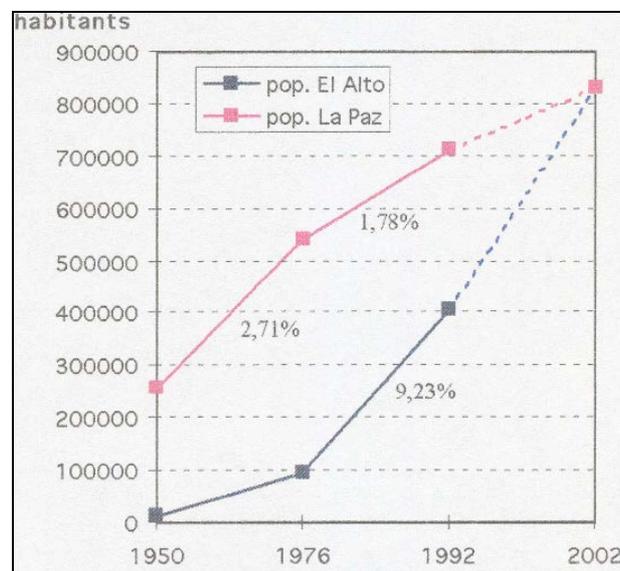


Figure 46 : Graphique représentant l'évolution comparée de la population et de la croissance annuelle de la population de El Alto et de La Paz entre 1950 et 2002 (Demoraes, 1998).

El Alto, ville tentaculaire dont l'expansion se fait de façon horizontale contrairement à la ville de La Paz, voit la quasi-totalité de ses eaux résiduelles domestiques se déverser sans traitement dans le bassin du Katari dans la région nord – est du Petit Lac, au niveau de la Baie de Cohana, augmentant alors les risques d'eutrophisation de cette région vulnérable, car peu profonde (≤ 3 m). La population, en constante augmentation, s'installe aux alentours de la route principale qui conduit au Lac Titicaca, de façon

anarchique. Elle n'est pas accompagnée de plans d'organisations ni de gestion territoriale garantissant l'accès aux services de bases pour la population (traitement des déchets domestiques et industriels, eau, électricité, stations d'épurations, transport, etc). Il existe une réelle insuffisance en infrastructures urbaines. Cela engendre de sérieux problèmes sanitaires, de bien-être, de transports et de contaminations, etc.

Les activités de la ville de El Alto représentent une source importante de déchets qui sont une des causes de la contamination du Lac. On compte notamment des déchets solides d'emballages (plastiques, verre, carton, plomb des batteries, aluminium des canettes), des déchets de constructions, des produits polluants issus des tanneries de cuir et des industries (dont beaucoup sont illégales), des polluants contenus dans l'eau résiduelle de la ville (e.g. provenant des déchets hospitaliers, comme les antibiotiques, Archundia et al. 2017) et enfin l'ensemble des déchets organiques et toxiques des abattoirs. En effet, El Alto compte aujourd'hui 300 abattoirs dont uniquement 11 sont légaux (*sensu* Urquieta P., sociologue au CIDES/UMSA ; Urquieta, 2014). De plus, de nombreuses entreprises industrielles n'hésitent pas à déverser leurs déchets dans le lac ou dans la nature. Or, la ville de El Alto est traversée par 3 des plus grandes rivières du bassin du Katari : le Seco, le Seke et le Negro, qui se déversent dans la baie de Cohana. Par conséquent, l'ensemble des déchets et des polluants issus de la ville se retrouve dans le Petit Lac.

Si la ville de El Alto poursuit son développement jusqu'au Lac sans suivre une planification de son expansion urbaine et ne fait appliquer ni règlements, ni normes, ni lois concernant la gestion des déchets et la qualité des eaux se déversant dans le Lac, les conséquences vont aggraver la santé et le bien être des habitants et d'être irréversibles pour l'écosystème.

On observe sur l'ensemble du territoire bolivien, une tendance de migration vers les grands centres urbains, engendrant une création de quartiers pauvres. Cette évolution crée également une disparition des activités économiques des zones rurales et le vieillissement de la population rurale (Urquieta P., comm. pers.). L'attractivité économique des campagnes est donc décroissante et les grands centres urbains sont de plus en plus des sources de contamination.

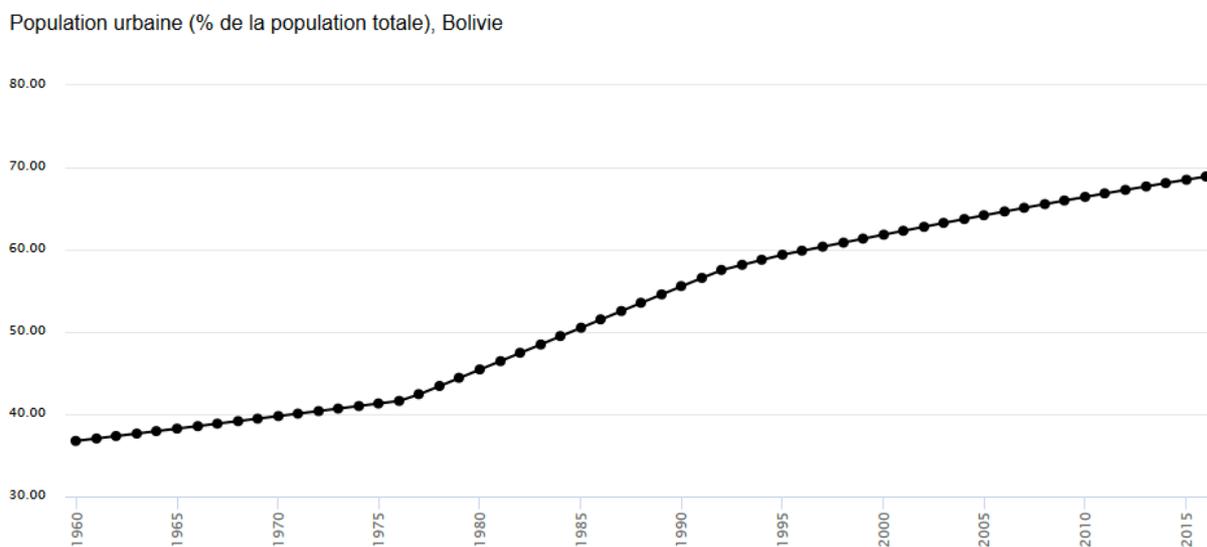


Figure 47 : Evolution de la population bolivienne urbaine entre 1960 et 2015 (Banque mondiale, 2018).

Calcul des déchets solides émis par les habitants de El Alto :

- Actuellement :

On estime à environ 0,6 kg/jour/habitant dans la ville de El Alto.

Tableau 12 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 922 000 habitants et une émission quotidienne de 0,6 kg/personne (MJ'Ecko, 2018).

Quantité de déchets solides émis par personne et par jour	Quantité de déchets solides émis par personne et par an	Nombre d'habitants	Quantité de déchets solides émis annuellement par toute la population
0,60 kg	219,00 kg	922 000,00 habitants	200 996,00 tonnes

Parmi tous ces déchets, la plupart ne sont pas triés, recyclés et collectés de façon adéquate. L'accélération et le désordre croissant des centres urbains ainsi que l'indifférence générale concernant les problématiques environnementales ont contribué et contribuent à l'augmentation des dommages environnementaux et à la contamination du Lac. Les principales zones urbaines n'ont pas mis en place le Plan Intégral de Gestion Environnementale des Résidus Solides (PIGARS). Ils n'ont donc pas réussi, pour le moment, à répondre de manière efficace à la nécessité d'éliminer les résidus solides urbains, source de contamination. La majorité des centres urbains accumulent leurs résidus solides dans des décharges à ciel ouvert, où se fait une sélection artisanale des déchets à des fins de réutilisation et où la majorité des déchets se retrouvent brûlés. La fumée, les cendres et l'accumulation de déchets endommagent l'air, l'eau et le sol et détériorent, par la formation de gaz, liquide, poussière et fumée l'environnement. Ces décharges à ciel ouvert sont le berceau et l'habitat de nombreuses espèces vecteurs de maladies et présentant un danger pour la santé et la sécurité des populations (chiens, porcs, bactéries, ...) (Pnuma, 2011).

- Gradient +1 (croissance démographique de 2%/an) :

Dans ce scénario optimiste où la population augmenterait d'environ 2%/an et une prise de conscience collective serait adoptée on pourrait alors observer une diminution des émissions de déchets solides, des décharges à ciel ouvert et surtout une augmentation du tri, du recyclage et une meilleure collecte des résidus solides dans toutes les régions bordant le Lac Titicaca.

- En 2030, pour 1 169 319 habitants dans la ville de El Alto (922 000 habitants en 2018, croissance de 2%/an) et une quantité de déchets émise divisée par deux (0,3 kg/jour) :

Tableau 13 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 1 169 319 habitants et une émission quotidienne de déchets solides de : (a) réduite de moitié : 0,3 kg/personne/jour ; (b) inchangée : 0,6 kg/personne/jour ; (c) doublée : 1,2 kg/perso

Quantité de déchets solides émis par jour et par personne	Quantité de déchets solides émis par an et par personne	Nombre d'habitants	Quantité de déchets solides émis par an par toute la population
0,30 kg	110,00kg	1 169 319	128 625,10 tonnes
0,60 kg	218,00 kg	1 169 319	254 911,54 tonnes
1,20 kg	438,00 kg	1 169 219	512 161,73 tonnes

- Gradient -1 (croissance démographique de 3%) :

Dans ce scénario pessimiste, où la population augmenterait de façon anarchique (3 %/an), sans plan d'urbanisation, et où les consommations, en corrélation avec la population, continueraient de croître on observera une augmentation des déchets solides. L'indifférence générale quant à l'émission de ces déchets et l'absence de tri feront augmenter la quantité de résidus dans les affluents et le Petit Lac, le dégradant jour après jour et le rendant alors de plus en plus pauvre en ressources piscicoles et moins attractif pour les touristes.

- En 2030, pour 1 314 551,54 habitants dans la ville de El Alto (3%/an) et une quantité de déchets solides émise inchangé (0,6 kg/jour) :

Tableau 14 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 1,3 millions d'habitants et une émission quotidienne de déchets solides de (a) inchangée : 0,6 kg/personne/jour ; (b) doublée : 1,2 kg/personne/jour (MJ'Ecko,2018).

Quantité de déchets solides émis par jour et par personne	Quantité de déchets solides émis par an et par personne	Nombre d'habitants	Quantité de déchets solides émis par an par toute la population
0,6 kg	218 kg	1 314 551,54	286 572,12 tonnes
1,2 kg	438 kg	1 314 551,54	575 773,34 tonnes

b) Puno

Puno se situe au nord-ouest du Grand Lac du Titicaca, au bord de la Baie Intérieure de Puno (BIP) peu profonde (< 5 m). La population de Puno est estimée à 147 397 habitants (INEI, 2018). La BIP communique avec la Baie Extérieure de Puno (BEP), via un canal qui fut creusé entre les totoras pour le passage de la flotte des bateaux de commerce à vapeur. L'eau de la BIP est donc peu renouvelée dans ce système presque fermé. La BEP s'ouvre sur la région la plus profonde du Grand Lac. Les totoras, très denses dans la BEP, ont un rôle essentiel dans le maintien de sa qualité d'eau. En effet, la BIP étant particulièrement polluée par les rejets de la station d'épuration de l'île Espinar, la seule de Puno, les totoras empêchent une grande partie des polluants (déchets solides, métaux, nutriments) de se déplacer vers la BEP. La pisciculture, développée dans la BEP, contribue avec le tourisme dans les îles flottantes des Urus, mais surtout avec la contamination de la ville de Juliaca via la rivière Coata, à l'eutrophisation de la BEP.

Comme en Bolivie, le Pérou a été marqué par un exode rural important débutant dans les années 1940. Les lourdes réformes agraires ont obligé les paysans à migrer vers les villes pour trouver du travail. La population y vit principalement du tourisme. En effet, Puno est le deuxième site touristique le plus visité du Sud du Pérou, après Cuzco (Vargas M. et al. 2003). L'urbanisation est davantage développée, autour du lac, que du côté bolivien.

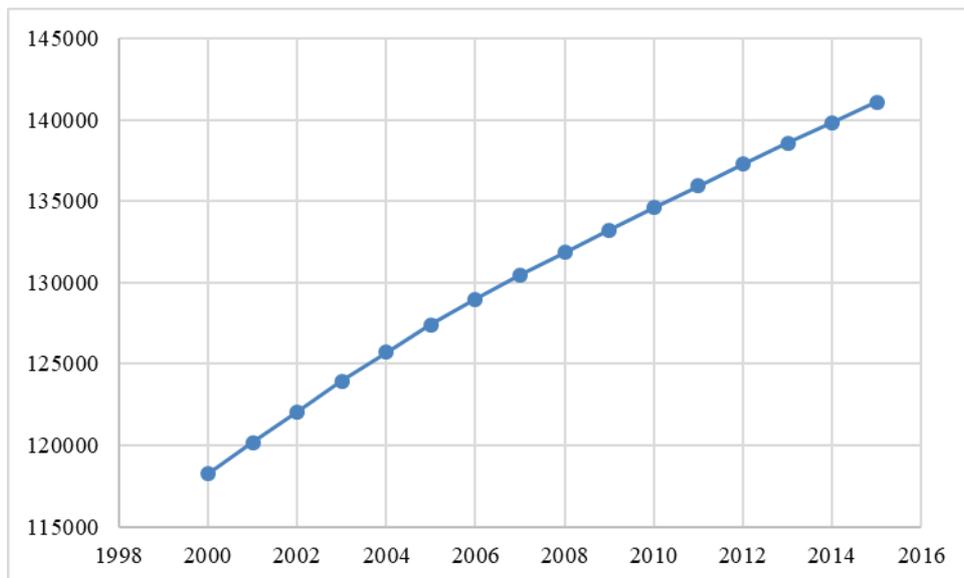


Figure 48 : Evolution de la population dans la ville de Puno de 2000 à 2015 (INEI, 2015).

On observe un taux annuel de croissance qui diminue (2,62% entre 1981 et 1993 et 1,53% an entre 2012 et 2015) mais reste positif. La ville de Puno suit un plan de développement urbain, un instrument technique dont les objectifs sont de conduire et orienter la croissance et le développement de la ville (Ascencio Costa et al., 2010).

A une heure de route de Puno, se trouve Juliaca. La population y est estimée à 225 146 habitants (INEI, 2018). C'est le centre des activités industrielles du Département de Puno. L'activité principale est le textile : il existe un très gros marché du textile en Alpaga (exportations). Comme Puno, Juliaca profite également du tourisme, c'est une ville de transit pour les touristes (Vargas, 2003). La quantité annuelle de déchets solides émis par la ville de Juliaca est évaluée à 40 082 tonnes.

Les effluents industriels de la ville de Puno sont considérés comme quasi-nuls, en comparaison aux effluents d'origine domestique (ANA, 1996).

Tableau 15 : Estimation des émissions de déchets solides pour une population de 147 397 habitants et une émission quotidienne de 0,6 kg/personne (MJ'Ecko, 2018).

Quantité de déchets solides émis par jour et par personne	Quantité de déchets solides émis par an et par personne	Nombre d'habitants	Quantité de déchets solides émis par an par toute la population
0,6 kg	218,0kg	147 397,0	32 280,0 tonnes

Si la ville de Puno poursuit son développement et ne fait appliquer ni règlements, ni normes, ni lois concernant la gestion des déchets et la qualité des eaux se déversant dans le Lac, les conséquences aggraveront la santé et le bien être des habitants, risquant d'être irréversibles pour l'écosystème, particulièrement pour la Baie intérieure de Puno.

c) La région péruvo-bolivienne du Lac Titicaca

L'insuffisance des dispositions en matière d'évacuation des déchets est, dans tous les grands centres urbains du bassin, la cause principale de la contamination organique et de l'eutrophisation. Les zones les plus polluées, affectées notamment par le rejet des eaux usées, sont la Baie de Puno (où sévit un processus d'eutrophisation) et le cours inférieur du Coata (en raison des déchets de la ville de Juliaca) au Pérou, et la Baie de Cohana et la Baie de Copacabana (sur le Grand Lac, dont on ne traite pas ici) en Bolivie. Les villes d'El Alto et Puno rejettent leurs eaux sans aucun traitement, directement dans le Lac Titicaca. Les pollutions issues des déchets industriels, organiques, solides, miniers, toxiques ou des eaux résiduelles aggravent l'état du Lac, chaque jour un peu plus. Le développement des villes et le manque d'infrastructures adaptées ont eu raison de la pureté et la santé du lac Titicaca, autant au Pérou qu'en Bolivie.

Si la croissance démographique continue et particulièrement si elle atteint des taux supérieurs à 3%/an, il est donc urgent de développer sur l'ensemble de la région du Titicaca (villes et villages) un système de collecte, de tri et de recyclage des déchets solides, de qualité.

Afin d'éviter ces conséquences sur les Hommes et le Lac, il est donc important de la part des dirigeants de la ville de El Alto, de Puno et de l'ensemble de la région de l'Altiplano de :

- Mettre en place un suivi de la bonne application des lois, normes et règlements concernant la gestion des déchets issus des villes et des industries.
- Sensibiliser et informer les habitants de El Alto des conséquences des décharges de résidus et de leurs activités sur le Lac, considéré comme sacré, et des solutions qui existent.
- Aménager la ville de El Alto avec l'ensemble des services nécessaires au bien-être des habitants et au maintien de la qualité de l'eau du Lac : stations d'épuration, réseau et système d'assainissement, gestion des déchets, etc.
- Améliorer la capacité managériale, administrative et financière de la collecte des résidus solides (ALT, 2009).

4) Assainissements et traitement des eaux

a) El Alto

Comme cité précédemment la conurbation de La Paz et El Alto est l'un des environnements urbains les plus spectaculaires du monde, notamment à cause de sa forte densité de population et de son ampleur. Il existe de graves conséquences écologique et sociale, comme la contamination des eaux souterraines (destinées à la consommation humaine et à l'irrigation) et la contamination directe rivières qui traverse la ville et qui se déverse dans le lac.

Les inégalités d'accès au service de distribution et d'assainissement de l'eau constituent un bon indicateur des inégalités sociales : 99% des nécessités en termes de services d'eau et d'assainissement sont insatisfaites dans les zones rurales de El Alto, tandis qu'elles sont évaluées à 50,55% dans les zones urbaines.

La collecte des déchets est assurée par l'entreprise EMALT (Empresa Municipal de Aseo El Alto) et concerne seulement 80% des déchets produits. Les 20% restants sont laissés dans les rues, s'accumulent sur les terrains vagues et le lit des cours d'eau de la municipalité. Le manque d'efficacité dans la collecte des déchets de la ville conduit à une pollution de l'eau souterraine et donc à un risque sur la santé de la population.

Enfin le système de collecte des eaux usées pose également des problèmes. Bien plus insuffisant que le service d'eau potable, l'accès à la collecte des eaux usées par le système d'égouts EPSAS concerne seulement 46% des foyers. Les fosses septiques et les puits perdus sont le deuxième type d'infrastructure utilisé et concerne 17,5% de la population. Enfin, 36,5% des foyers interrogés ne disposent d'aucune infrastructure de collecte des eaux usées et 54% de la population de El Alto déverse quotidiennement ses eaux usées sur le terrain, ce qui augmente la pollution des sols et des nappes phréatiques. Ce risque est accru par les activités industrielles et productives, dont 33% ne possèdent pas d'accès au système d'assainissement.

A El Alto le système d'assainissement n'est dans tous les cas pas au point. En effet, les infrastructures de collecte des eaux de pluie sont inadaptées, et lors de la saison des pluies, les inondations provoquées par cette carence occasionnent des dommages sur le réseau d'approvisionnement en eau potable de la ville, et entraînent des contaminations des eaux de surfaces et des eaux souterraines (Cochet, 2009).

b) Puno

La Baie intérieure de Puno représente à peine 0,2% de la surface du Lac Titicaca. Jusqu'aux années 1970, toutes les eaux résiduelles de la ville de Puno étaient déversées sans aucun traitement dans la Baie intérieure de Puno. En 1972, une STEP constituée deux bassins d'oxydation d'une surface totale de 21 hectares ont été construits, connue sous le nom de « El Espinar ». Ce système de traitement primaire fonctionne comme un processus ouvert, dans lequel l'eau résiduelle passe à travers un bassin afin d'être traitée grâce à des processus naturels impliquant des bactéries et des algues. Ce système de traitement est, depuis une dizaine d'années, obsolète car les flux d'eaux résiduelles sont trop importants.

Les eaux résiduelles de la ville de Puno se retrouvent donc directement dans la Baie intérieure de Puno, sans aucun traitement des résidus organiques, toxiques, inorganiques, etc. Le débit est estimé à 177,3 L/s soit environ 5,6 Hm³/an. Plus de 90% viennent directement de « El Espinar » et le reste provient d'autres zones de la ville de Puno (ANA, 2017).

La ville de Juliaca est traversée par des cours d'eau à destination du Lac Titicaca, notamment la rivière Coata, un des principaux affluents du Lac Titicaca, qui se jette dans la Baie extérieure de Puno. Seulement cette ville en pleine expansion ne compte pas sur une station d'épuration fonctionnelle.

L'ensemble des eaux résiduelles, déchets solides et autres substances provenant des industries ou des mines se retrouvent directement dans la rivière Coata. Ce cours d'eau était auparavant une ressource essentielle pour l'ensemble des villages qui séparaient Juliaca des littoraux du Lac Titicaca. Désormais la rivière Coata ressemble à une station d'épuration à ciel ouvert et des centaines de déchets solides bordent ses rives.

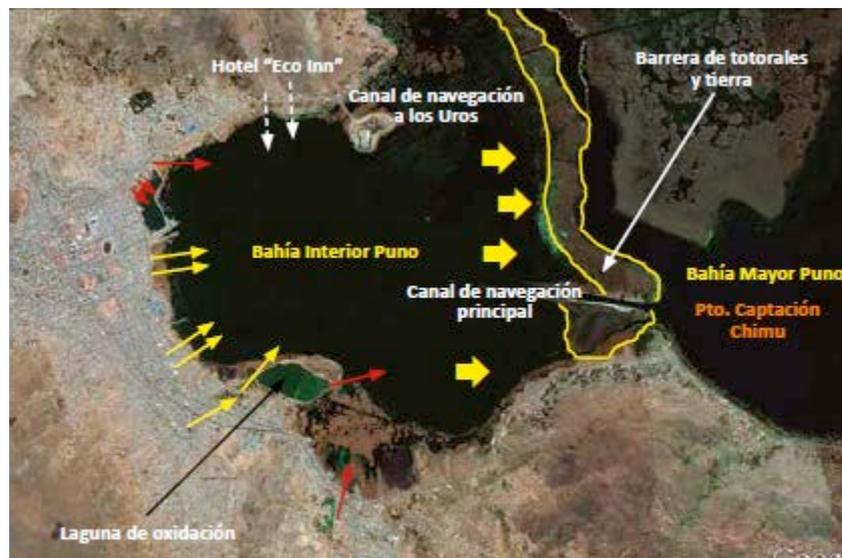


Figure 49 : Image satellite de la Baie intérieure de Puno (Pnuma, 2011).

On remarque la lagune d'oxydation, dont les effets sont à priori peu appréciables, et l'ensemble des entrées des eaux résiduelles (rouge : municipale, jaune : zone de drainage pluvial, blanc : lixiviation) et contaminants. La barrière naturelle de totoras permet de limiter l'export des polluants vers la Baie extérieure de Puno. La ville de Puno, même considérée comme ville moyenne, en bordure du Lac, engendre une réelle contamination dans le Lac. Une ville aussi proche du Lac représente un véritable danger, et il faut, dans ce cas, avoir des stations d'épurations efficaces pour traiter l'ensemble des polluants (eaux résiduelles, déchets industriels, déchets miniers, ...).

c) La région péruvo-bolivienne du Lac Titicaca

L'ALT a réalisé en 2014 le projet SIGAR (Sistema Integral de Gestión de Aguas Residuales), qui a consisté en un diagnostic des systèmes de traitement des eaux usées sur tout le pourtour du lac Titicaca (Pérou/Bolivie). Pendant cette campagne de récolte de l'information 46 sites ont été visités (28 péruviens et 18 boliviens).

Ce qui en est ressortit c'est que seulement 30 possèdent un système de traitement des eaux, les 16 autres utilisent des latrines et des fosses septiques pour l'évacuation de leurs eaux usées.

De plus, sur les 30 sites avec système de traitement, 20 sont des bassins de stabilisation (dont 3 étangs sont hors service) et 9 sont de véritable station d'épuration des eaux usées. En ce qui concerne la conservation et l'exploitation, 12 sont en bon état, 6 sont en relativement bon état, 9 sont en mauvais état et toujours 3 sont hors service. Pour les rejets, 10 se font directement dans le lac, 4 par infiltration dans les berges, 15 dans les principales rivières (effluents du lac). En 2014, seul le PTAR de Batallas utilisait les effluents pour l'irrigation en agriculture.

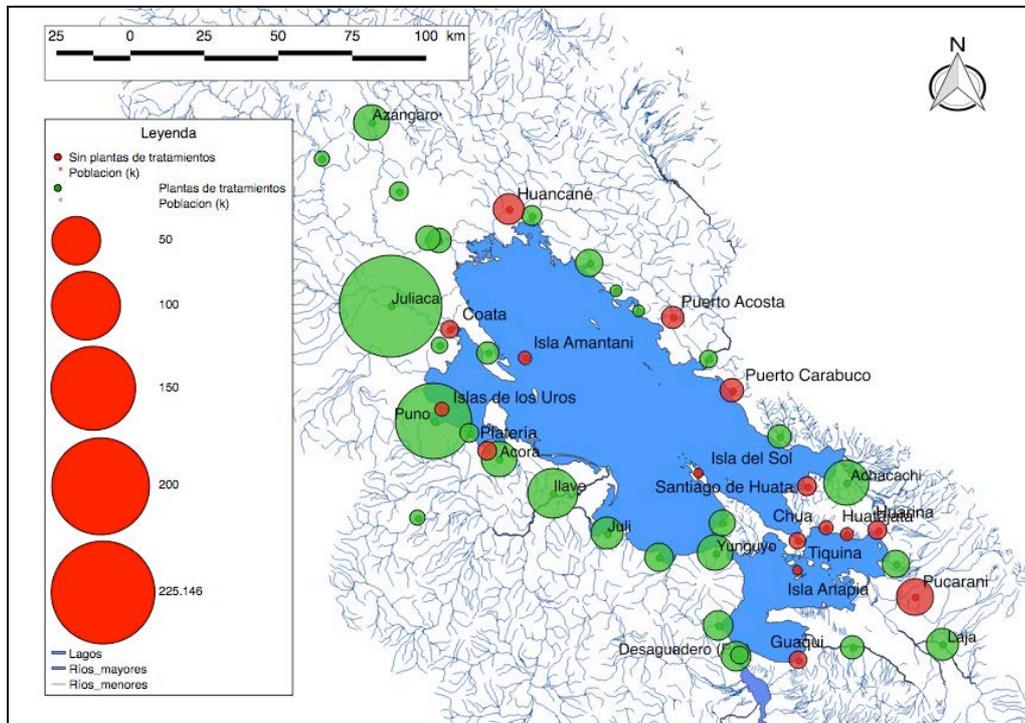


Figure 50 : Carte du Lac Titicaca indiquant les principales villes, leur densité de population, avec la présence (en vert) et l'absence (en rouge) d'un système de traitement des eaux (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo)

La présence de stations d'épurations ne signifie pas pour autant qu'elles soient fonctionnelles.

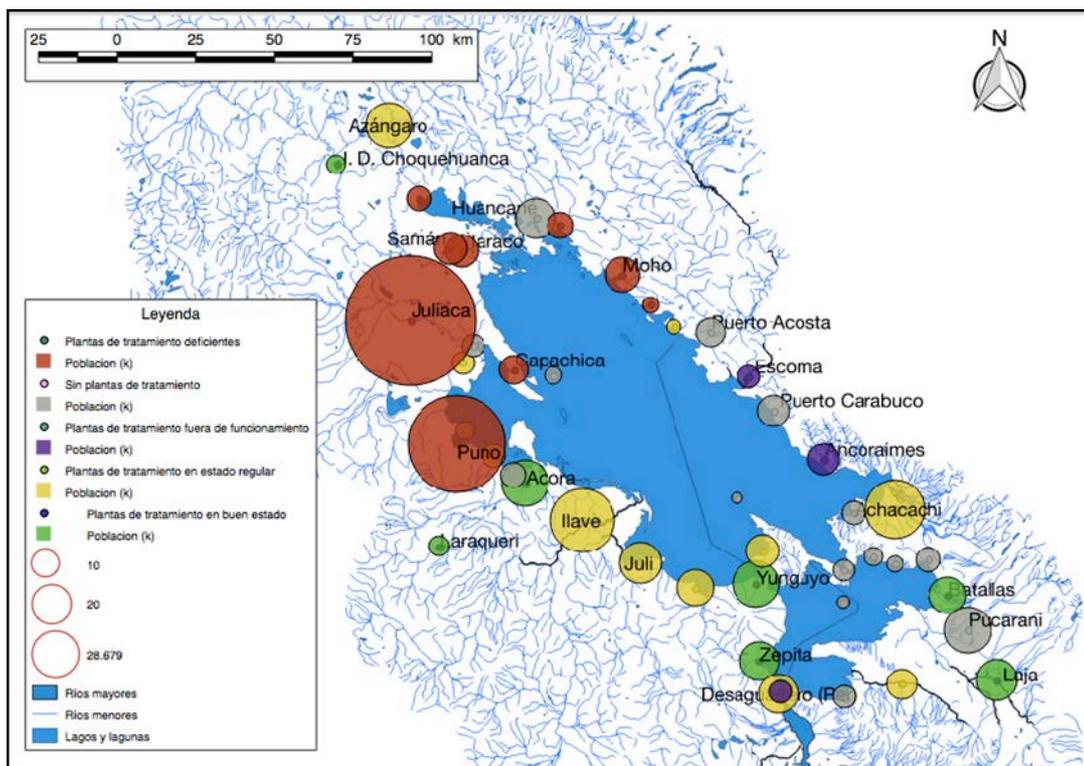


Figure 51 : Carte du Lac Titicaca indiquant les principales villes, leur densité de population et l'état de fonctionnement des stations d'épurations : déficient (cercles bleus), absent (cercles roses), hors service (cercles violets), fonctionnement normal (jaune), en bon état (vert) (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre).

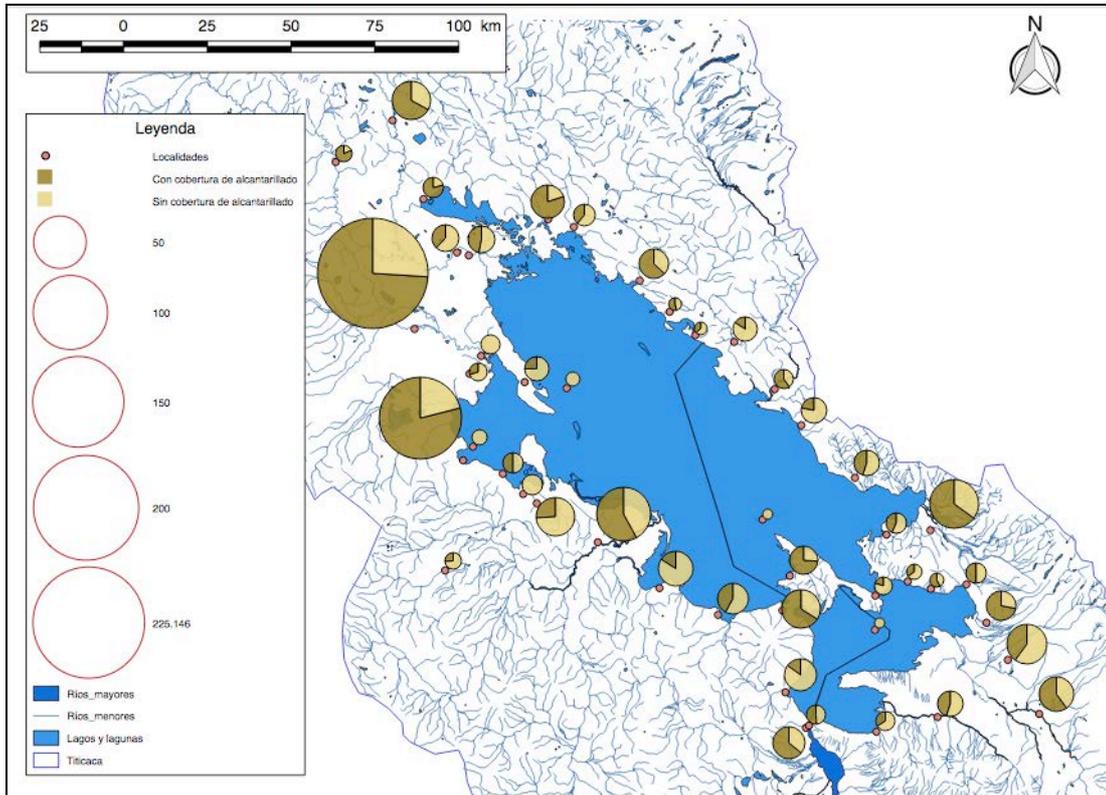


Figure 52 : Carte du Lac Titicaca indiquant la proportion de la population étant reliée aux égouts : avec réseau d'assainissement (marron) et sans réseau (beige) (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre del Lago Titicaca. P10).

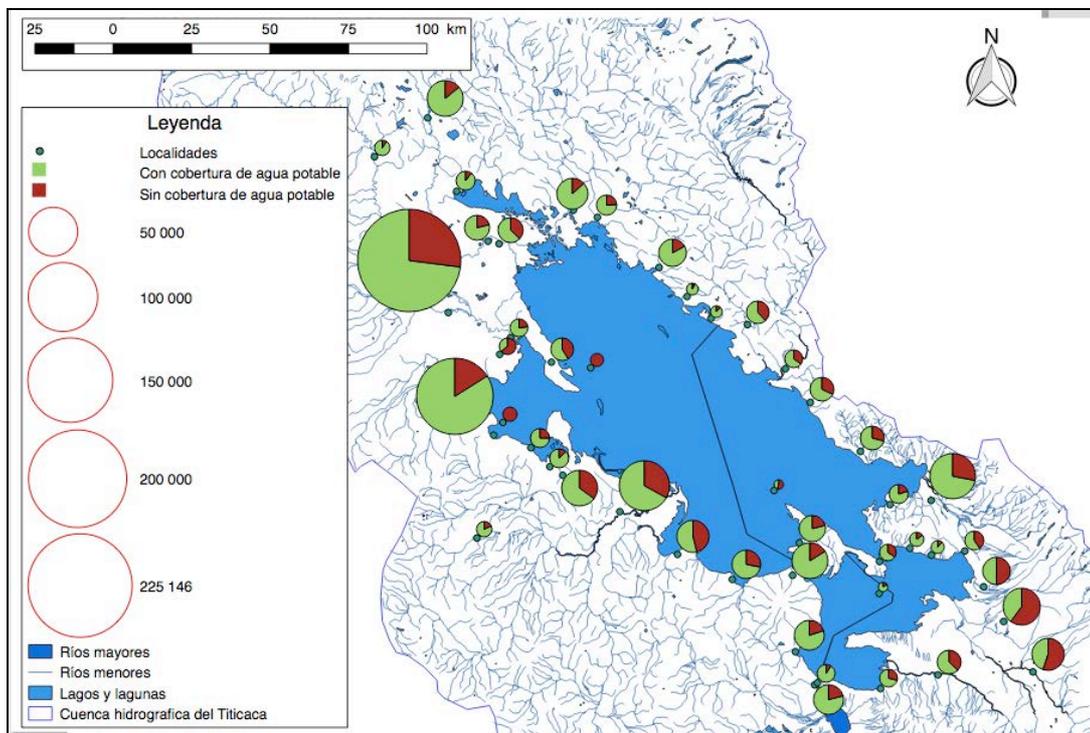


Figure 53 : Carte du lac indiquant la proportion de la population ayant accès à l'eau potable : avec (vert) et sans (rouge) (ALT. 2014. Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre del Lago Titicaca. P10).

Les localités qui génèrent les plus grands volumes d'eaux usées domestiques sont au Pérou : Juliaca, Puno, Ilave, Achacachi, Acora, Juli, Huancané et Desaguadero, et en Bolivie : Desaguadero, Pucarani, Copacabana, El Alto et Laja. Aucune d'entre elles n'a un bon système de traitement des eaux usées. Le cas le plus critique est celui de Desaguadero côté bolivien, dont les effluents s'y déversent directement sans aucun traitement.



Figure 54 : Carte des villes qui génèrent le plus d'eaux usées (MJ'Ecko, 2018).

Pour conclure, les principaux problèmes qui ressortent sont : Le manque de propreté, d'entretien, le mauvais fonctionnement des infrastructures et finalement le manque de prise en charge par les municipalités (ALT, 2014).

En 2014, les recommandations de l'ALT étaient :

- Renforcer ou mettre en place des unités environnementales et sanitaires à travers lesquelles les municipalités génèrent et garantissent la durabilité des systèmes de traitement des eaux usées.
- Préparer un programme de récupération et d'entretien des systèmes de traitement mis en place, principalement orienté vers le nettoyage et l'exploitation des lagunes de stabilisation.
- Élaborer et développer un programme de formation et de préparation pour le personnel, en leur fournissant l'équipement nécessaire.
- Mettre en place un réseau de surveillance de la qualité de l'eau (en laboratoires) proposer des améliorations pour s'assurer que les effluents de ces systèmes sont conformes aux règlements environnementaux respectifs.
- Promouvoir la recherche et le développement de technologies et de systèmes de traitement des eaux usées adaptés aux conditions géographiques et climatiques de la région de l'Altiplano.
- Impliquer la population pour qu'elle joue un rôle de premier plan dans la prévention de la pollution du lac Titicaca par le biais de programmes d'éducation et de sensibilisation sur les questions environnementales.

La question qui se pose est : Qu'en est-il 5 ans plus tard ? Ces recommandations ont-elles été appliquées ? Un projet prévoit d'agrandir la station de Puchokollo en dessous de la ville de El Alto, un autre projet péruvien prévoit l'installation de 6 stations d'épurations. L'Union Européenne, la BID et l'AFD prêtent 200 millions de dollars à la Bolivie pour la mise en place de stations d'épuration le long du bassin du Katari. Des projets avancent mais, une fois ces stations installées, le résultat ne sera pas immédiat et les stations ne représentent pas une solution « miracle », il faut que la population et le gouvernement mettent en place une nouvelle dynamique de consommer, de recycler, de trier et de produire. C'est un ensemble d'actions qui pourront redonner au Lac sa splendeur d'antan.

5) L'évolution du secteur piscicole

Introduites depuis 1940, la production en cages flottantes de truites arc-en-ciel et dorée (respectivement *Oncorhynchus mykiss* et *Salmo aguabonita*) atteint 40 000 tonnes, principalement au Pérou. Le taux de croissance de la pisciculture entre 2010 et 2017 au Pérou a été de 430 % (IMARPE, 2018). Les bénéfices péruviens s'élèvent à plus de 300 millions de soles par an (100 millions de \$). Cette activité économique au Pérou ne se situe pas dans la Baie intérieure de Puno. C'est donc la Baie extérieure de Puno qui est principalement concernée par les impacts de la pisciculture. Les entreprises piscicoles sont principalement des grands groupes péruviens et chiliens, et les petits pisciculteurs tendent à disparaître.

L'espace utilisé pour l'élevage de truite arc-en-ciel en cages flottantes sur l'ensemble du Lac Titicaca est estimé à plus de 20 000 ha (IMARPE, 2015). Et il y a environ 8 000 hectares dont les autorisations sont en cours de traitement avec la DICAPI (Direction Générale des Capitaineries et Garde-côtes). Ces principales zones sont situées dans la partie péruvienne. La pisciculture est encadrée jusqu'à 2021 par le Plan National du Développement de l'Aquaculture (PNDA) (Chura, 2009).

L'IMARPE prévoit d'atteindre une production de 60 000 tonnes de truites d'ici 2021 sur l'ensemble du Lac Titicaca.

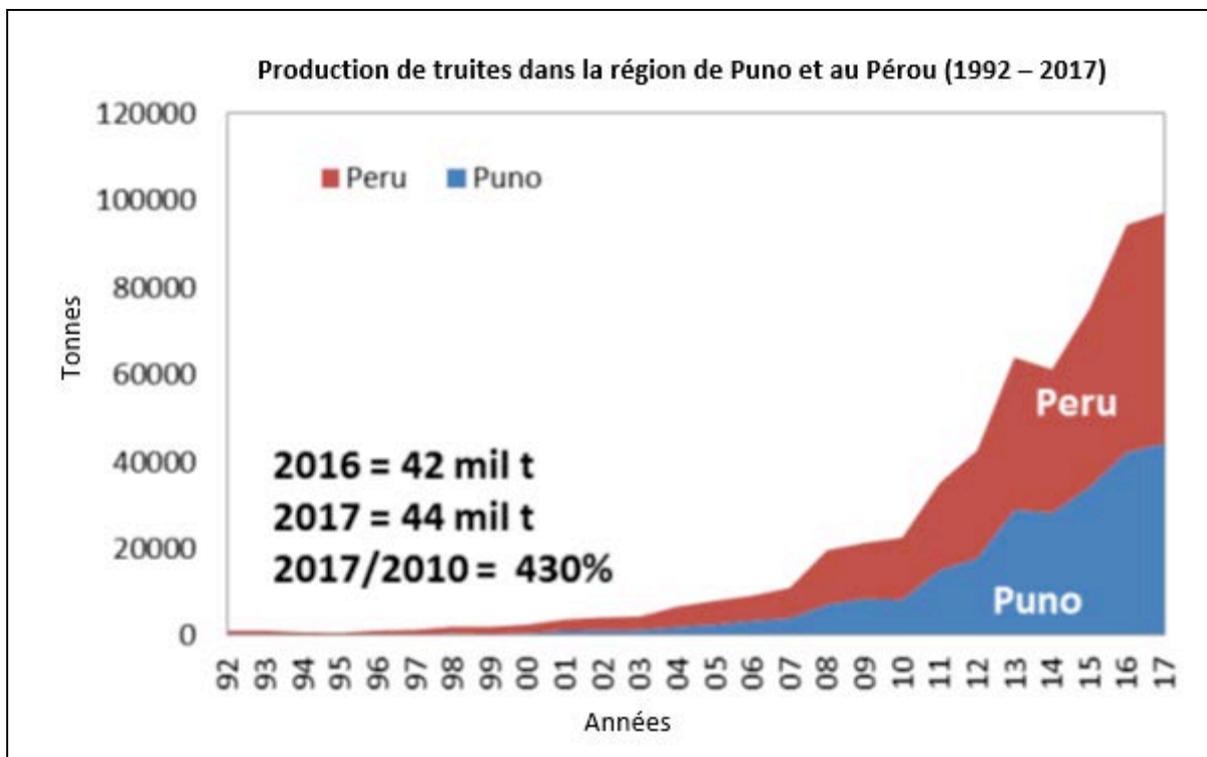


Figure 55 : Evolution de la production de truites dans la région de Puno et au Pérou (1992 – 2017) (Imarpe, colloque mai 2018 à La Paz).

La capacité de production des truites arcs en ciel par les cages flottantes artisanales est de 800 kg et la densité est de 30 kg/m². Dans les cages flottantes semi artisanales, la capacité de production par cage est de 2 tonnes et la densité est de 50 kg/m² et dans les cages industrielles la capacité de production peut atteindre 6 tonnes et la densité est de 60 kg/m² (Cruz et al., 2009).

Ces espèces introduites élevées essentiellement en cages flottantes ont eu un effet considérable sur la biomasse du Lac. Les truites, carnivores, sont souvent nourries avec des pellets, élaborées à partir de farine de poisson d'*Orestias ispii*, de petits poissons pélagiques natifs et endémiques du Lac Titicaca. Seulement il faut près de 5 kg d'ispi pour obtenir 1 kg de farine de poisson (Patz Saire, 2013). Cet indice de conversion, c'est-à-dire la volume d'aliment nécessaire pour fabriquer un kilogramme de poisson est

inférieur à ce qu'il était il y a quelques années. Toutefois, malgré ces progrès, l'élevage de poissons carnivores dépend encore en grande partie des captures de poissons sauvages (Patzi Saire, 2013). La biomasse d'ispi dans le Lac Titicaca est donc corrélée négativement à celle des truites (IMARPE, 2015). En plus de la surpêche, provoquant des conséquences désastreuses sur la biomasse de poissons endémiques du lac Titicaca, la pisciculture contribue également à l'appauvrissement en espèces natives du Lac. La diminution drastique de ressources piscicoles a eu des impacts socio-économiques non négligeables, en plus des impacts écologiques dus à la contamination minière et celle des eaux résiduelles.

Tableau 16 : *Quantité de farine de poisson et de soja présente dans l'alimentation des truites selon leur stade de croissance (Patzi Saire, 2013).*

	Alevins	Juveniles	Engraissement	Adulte
Farine de poisson	52 %	47 %	30 %	30 %
Farine de soja	30 %	30 %	40 %	40 %

Tableau 17: *Quantités de protéines, lipides et phosphore contenues dans la farine de poisson (IFREMER, 2008).*

	Quantité de protéines	Quantité de lipides	Quantité de phosphore
Farine de poisson	70%	15%	15%

Or, 1g de protéine contient, par convention, à 0,156g d'azote. Donc la farine de poisson contient 11% d'azote (70% x 15,6%).

Idéalement les petits poissons utilisés actuellement pour la fabrication de farine et d'huile de poisson (par exemple l'espèce ispi) devraient être destinés à la consommation humaine ou à l'alimentation des espèces piscicoles dont le FIFO (fish in fish out) est le plus faible dans le futur afin de minimiser l'impact de l'activité piscicole sur l'environnement. Le FIFO est un ratio de conversion de l'alimentation piscicole au stade adulte du poisson d'élevage.

Les élevages de truites sont source de contamination du Lac Titicaca. Les formes de pollution issues de la pisciculture sont variées. Elles peuvent être organiques, chimiques, bactériologiques, génétiques, etc. La nourriture et les rejets d'azote et de phosphore impliqués par cet élevage tombent au fond du lac (comme aliments non consommés). Cela contribue à l'enrichissement en nutriments du Lac et donc favorise les risques d'eutrophisation. Les flux polluants étant essentiellement corrélés à l'alimentation, elle-même corrélée aux stocks de poissons, les pollutions vont s'accroître avec le rapport stock-rejet (Petit, 1991).

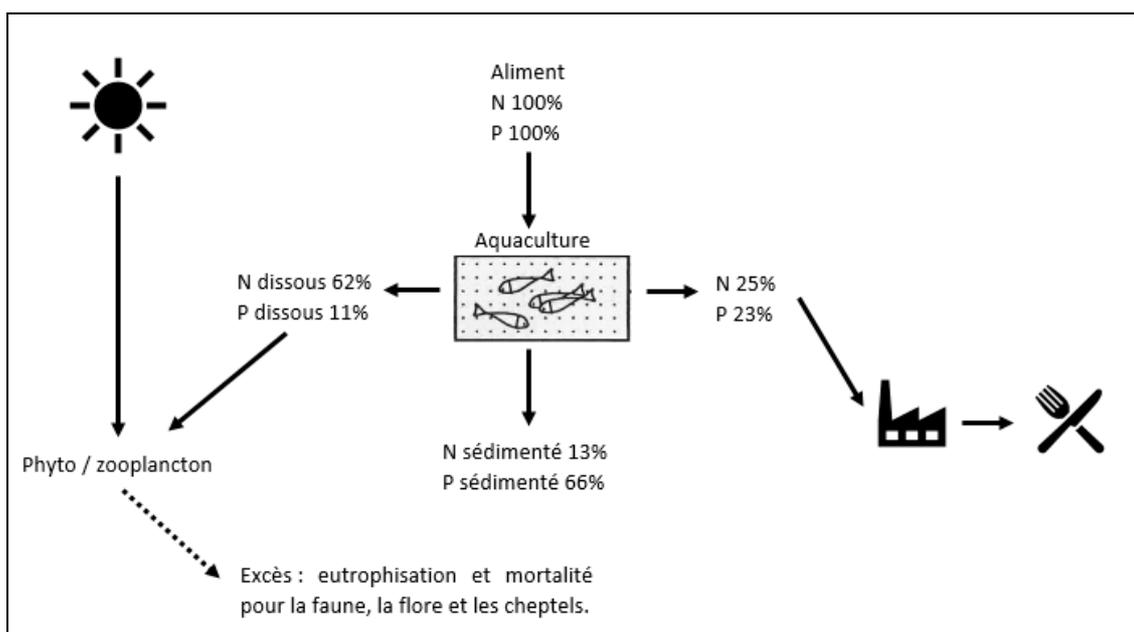


Figure 56 : *Rôle de la pisciculture sur l'écosystème côtier. Schéma adapté de Folke, 1988 (Petit, 1991).*

Ce schéma rend compte de l'impact causé par la pisciculture sur les risques d'eutrophisation d'un écosystème. Parmi les aliments ingérés, plus de 60% du phosphore et 10% de l'azote sédimentent et restent donc disponibles pour le phytoplancton s'ils sont remis en suspension, ce qui représente une ressource en nutriments considérable. Ces nutriments pourront être la cause d'eutrophisation à long terme. Les nutriments dissous alimentent directement les algues phytoplanctoniques, ce qui accroît les risques d'eutrophisation. Ainsi, plus les cheptels de poissons d'élevage sont nombreux, plus les risques d'eutrophisation sont accrus dans l'écosystème concerné.

On peut donc calculer les rejets azotés et phosphorés d'un élevage de poisson (40 000 tonnes/an dans le département de Puno), nourris avec 5 kg de pellets par kilogramme de truite. On fixe la moyenne de farine de poisson dans les pellets à 40%.

Phosphore dissous : $40\ 000 \times (5 \times 40\%) \times 15\% \times 66\% = 1\ 320$ tonnes/an

Azote dissous : $40\ 000 \times (5 \times 40\%) \times 11\% \times 62\% = 5\ 456$ tonnes/an

Phosphore sédimenté : $40\ 000 \times (5\% \times 40\%) \times 11\% = 7\ 920$ tonnes/an

Azote sédimenté : $40\ 000 \times (5\% \times 40\%) \times 13\% = 1\ 144$ tonnes/an

Phosphore total (dissous + sédimenté) : $1\ 320 + 7\ 920 = 9\ 240$ tonnes/an

Azote total (dissous + sédimenté) : $5\ 456 + 1\ 144 = 6\ 600$ tonnes/an

Ces quantités sont largement supérieures à celle des rejets azotés et phosphorés de la ville de El Alto (4 042,7 tonnes d'azote/an et 1 078 tonnes de phosphore/an).

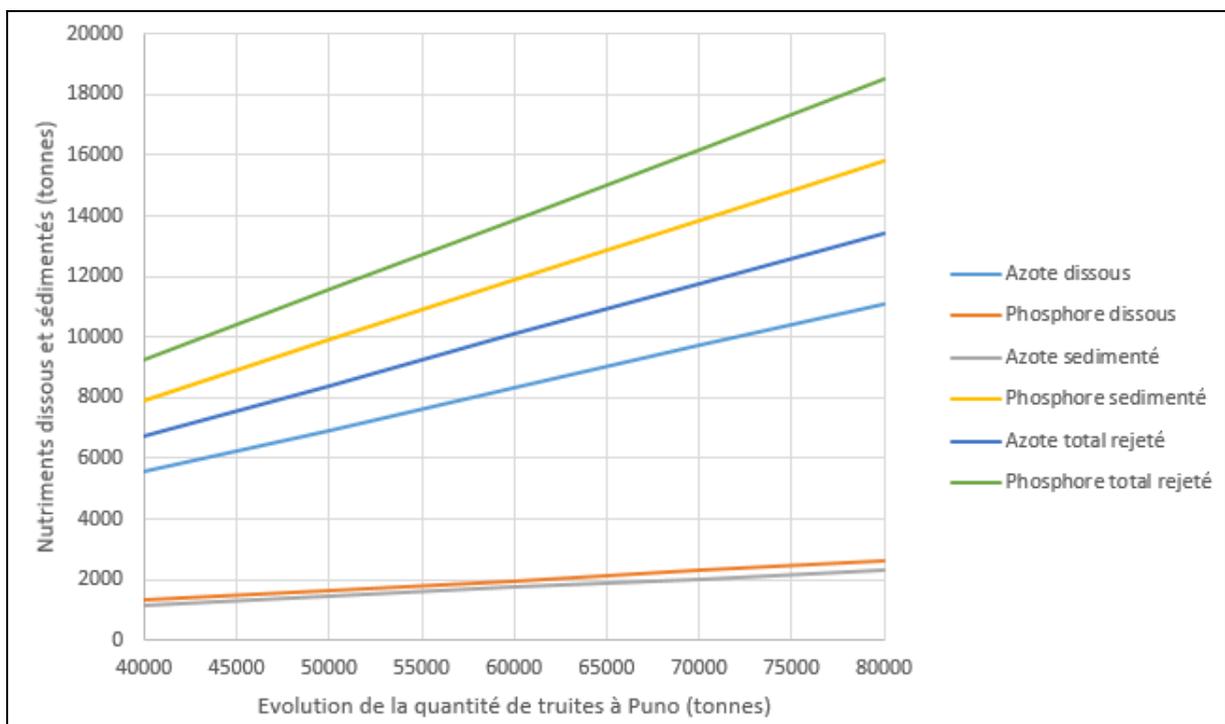


Figure 57 : Projection de l'évolution de la contamination en nutriments azotés et phosphorés en fonction de la production de truites en cages flottantes dans le Département de Puno (MJ'Ecko, 2018).

Cette projection illustre la magnitude de l'augmentation des rejets de nutriments dans le Lac.

Les poissons sont poïkilothermes (leur température corporelle varie avec celle du milieu), donc toute variation de température extérieure impactera leur métabolisme global, leur vitesse de croissance, leur cycle de reproduction et donc le rendement final. La virulence de certains pathogènes, la sensibilité des poissons aux pathogènes et à certaines substances toxiques peuvent également être accrues avec l'augmentation de la température (Lazard, 2017). Comme les scénarios le montrent, on risque d'observer une augmentation de température comprise entre 7 et 10°C d'ici 2100 (Hoffmann & Requena., 2012), ce qui aura sans équivoque des conséquences sur l'activité piscicole de l'Altiplano, bien que l'augmentation de la température de l'eau soit inférieure à celle de l'air. L'augmentation de la température est favorable au développement des efflorescences algales, à l'origine de l'eutrophisation.

Le réchauffement climatique pourrait renforcer la désoxygénation des eaux en profondeur, compte tenu de la réduction de solubilité de l'O₂ dans l'eau, provoquant l'expansion des zones hypoxiques (Seibel, 2011). Des perturbations atmosphériques (e.g vents frais) pourraient alors être susceptibles de provoquer un retournement des eaux les plus profondes vers la surface, désoxygénées et riches en gaz toxique (H₂S) provoquant la mort des poissons retenus dans les cages flottantes (Lazard, 2017).

Il est donc nécessaire d'anticiper les risques et les conséquences d'une production de 70 000 tonnes de truites par an et plutôt tendre vers une production durable et respectueuse de l'environnement. L'augmentation de la production de truites accroîtra l'épaisseur des sédiments organiques au fond du Lac. Il s'en suivra une augmentation des risques d'eutrophisation, une diminution des espèces endémiques à la région du Lac Titicaca et une augmentation de la diffusion de pathogènes des espèces exotiques (Petit, 1991).

Afin de réduire l'impact de l'élevage piscicole sur le Lac et permettre d'éviter l'augmentation des risques d'eutrophisation, il faudrait veiller à :

- La quantité et la qualité d'intrants, source de nourriture pour les truites en limitant par exemple l'utilisation des ipi afin de nourrir les cheptels de poissons d'élevage. De plus, n'utiliser que des granulés extrudés flottants distribués dans un cercle en plastique en surface, afin de contrôler la consommation de la ration et limiter les pertes d'aliments non consommés vers le fond.
- Garantir une gestion durable (respectueuse de l'environnement, des ressources et développant l'économie locale) de l'aquaculture qui conciliera les impératifs environnementaux avec les intérêts de l'industrie et du consommateur (Kuypers, 2009).
- Améliorer l'efficacité des politiques et des instruments de gestion de l'aquaculture (Kuypers, 2009), réviser les normes de densité par cage flottante et d'alimentation.
- Promouvoir un développement d'une aquaculture durable avec un point de vue écosystémique (IMARPE, 2015).
- Délimiter les zones littorales pour les développements des activités de pêche et d'aquaculture (IMARPE, 2018) ; en particulier privilégier les zones suffisamment profondes (> 15 m) avec une bonne circulation des masses d'eau afin d'assurer l'oxygénation et la dilution.
- Suivre un plan binational de développement de cette activité économique (IMARPE, 2018).
- Soutenir le programme de conservation des espèces ichthyologiques natives (*el programa Recuperación de Especies Ícticas Nativas : REINA*) de l'ALT qui intervient sur les îles de Anapia (Pérou) et Suana (République Dominicaine) où se sont construits et installés des laboratoires d'éclosion et de grossissement d'alevins d'espèces natives, ainsi qu'au Centre du PELT à Chucuito (Centro de Investigacion Cientifica y Transferencia Tecnologica – CICTRAT) à 17 kilomètres au sud de Puno. L'installation de banques de germoplasme est également prévue (Ocola Salazar et al., 2017).

- Effectuer un zonage précis des sites aquacoles pour minimiser les risques (Lazard, 2017), en fonction d'une zonification écologique des usages du Lac.
- Mettre en place un suivi local des paramètres de l'environnement, dans la mesure où l'aquaculture est extrêmement sensible aux variations, tant soudaines qu'à long terme, des conditions climatiques (Lazard, 2017).
- Réaliser des programmes de recherche sur l'utilisation de micro algues, zooplancton ou macro invertébrés comme ingrédients des aliments composés pour la pisciculture.
- Innover et créer des cages flottantes plus technologiques qui permettraient de produire plus (pour faire face à la croissance démographique) avec moins d'impact sur l'environnement (voir Beveridge, 1996 ; Chen et al., 1999 ; Perez et al., 2002). Celles-ci devront être implanté de façon optimale, c'est-à-dire là où l'espace aquatique dispose du niveau maximum de circulation et de renouvellement d'eau au détriment de la proximité des berges, plus pratique sur le plan logistique.

6) La gestion de l'agriculture

L'agriculture est le secteur le plus important dans les Andes, bien qu'elle soit principalement familiale (Gomez et al., 2009). D'après Mme Urquieta, sociologue au CIDES, il existe une interface urbano-rurale, c'est-à-dire que la plupart des agriculteurs vivent à la fois en campagne et en ville El Alto. C'est une forme de stratégie afin de ne pas perdre leurs terres.

Le Lac influe sur l'agriculture par l'irrigation et l'agriculture quant à elle peut avoir des conséquences sur la qualité de celui-ci. En effet, l'utilisation de plus en plus importante de produit chimique (fertilisants et agro-toxiques), azotés et phosphorés, impactent considérablement le Lac et augmentent les risques d'eutrophisation. En effet comme vu précédemment, l'azote et le phosphore sont les deux principaux éléments à l'origine de l'eutrophisation.

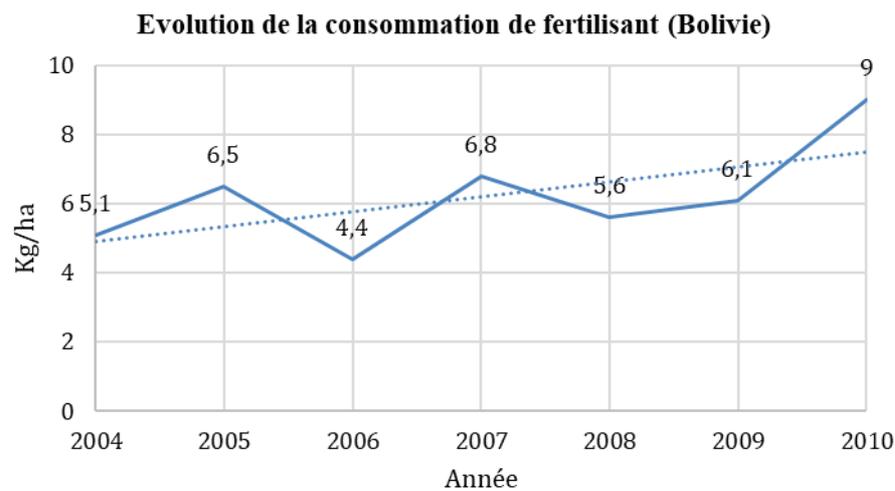


Figure 58 : Graphique montrant l'évolution de la consommation de fertilisant en Bolivie entre 2004 et 2010 (JOAPE, 2015).

Entre 2004 et 2010 il y a eu une augmentation de 43% de la consommation de fertilisants chimique de 43% sur tout le territoire bolivien. Cette augmentation, due à l'arrivée des produits chimiques en Bolivie, a permis aux producteurs d'augmenter leurs rendements pour subvenir aux besoins de la population et théoriquement d'améliorer leur revenu moyen.

Or cette agriculture à prédominance familiale et de subsistance, dont les parcelles en moyenne font 1,5 hectare par famille subit les aléas climatiques (variations de température, décalage des saisons, irrégularité des précipitations, augmentation de la sécheresse). Les cycles se décalent et on observe une réduction de la productivité des cultures. Les agriculteurs ont donc de plus en plus de difficultés à surmonter ces problèmes climatiques (Gomez et al, 2009) (Hoffmann & Requena., 2012).

D'après le PNUD, la région autour du lac est en train de passer d'une économie agricole à une économie d'élevage. Depuis les 30 dernières années la surface occupée pour la culture de la pomme de terre est passée de 35% à 26% et celle pour le fourrage est passée de 39% à 59%. On peut donc imaginer que dans le futur les productions tendront vers des monocultures de fourrage.

On peut donc supposer qu'il va avoir une utilisation croissante des engrais ou une disparition des surfaces dédiées aux cultures vivrières. L'agriculture provoque sur le long terme l'épuisement, la salinisation et l'assèchement des sols. De plus, une mauvaise gestion des cultures entraîne une détérioration des sols (érosion hydrique et éolienne). Par exemple après la récolte des cultures annuelles, le sol est laissé sans aucune protection et subit les aléas climatiques. La dégradation du couvert végétal par l'Homme à cause

de l'élevage (pâturage) et l'extraction de bois (comme le thola et le yareta) sont d'autres causes préoccupantes concernant la dégradation des sols.

Au Pérou, on estime que la superficie nationale consacrée à l'agriculture était lors de la période 2016/2017 de 2 077 000,6 hectares, soit une augmentation de 0,4% par rapport à l'année précédente. Les bovins, les moutons, les alpagas, lamas, les porcs et les poulets sont les principaux animaux d'élevage. Mais on trouve aussi des cuyes (lapins indigènes) et autres léporidés. Ceux-ci se nourrissent en partie de plantes aquatiques (Ministerio de Agricultura y Riego, 2017).

On estime à 211 000,8 hectares la superficie agricole dans la région de Puno. Puno participe à plus de 50% du marché de la viande et de la fibre d'alpaga (respectivement 66% et 56%). Les cultures les plus importantes de la région sont : la pomme de terre (35%), l'avoine fourragère (25%), la luzerne (13%), l'orge (7%), la quinoa (3%) et le café (3%). Bien que les Andes présentent les terres les plus fertiles du pays, ce n'est pas la région qui produit le plus, faute de moyens technologiques et financiers.

La Bolivie et le Pérou sont des pays riches en diversité génétique agronomique (tubercules et céréales andins). Il est donc primordial de préserver cette agro-biodiversité, les pratiques culturelles et les connaissances ancestrales en lien avec le secteur de l'agriculture andine. Dans ce cas la valorisation du métier d'agriculteur et la dynamisation des zones rurales pourraient être intéressantes. De plus il devrait être nécessaire de mettre en place des services de formation agricole à l'utilisation de pesticides et fertilisants, et de sensibilisation au danger de l'excès de ces produits pour les sols, les nappes phréatiques et l'eau du Lac. Le changement climatique risque d'affecter d'une manière plus ou moins intense cette activité socio-économique, mais il ne pourra jamais être contrôlé et l'assèchement et le décalage des saisons pourra obliger les agriculteurs à devoir s'adapter et à changer leurs habitudes agricoles (irrigation, semences plus résistantes à l'aridité, ...).

7) L'élevage, le surpâturage et la destruction des bofedales et des totoras

Les bofedales et les totoras sont des espaces végétaux, aujourd'hui menacés à cause du surpâturage, de la contamination organique animale et du changement climatique. En effet, les bovins tassent le sol, ont tendance à manger les totoras donc détruire les écosystèmes créés par ces plantes et contaminent l'eau en nitrate et en phosphore par leurs rejets organiques. De plus, le changement climatique est responsable de la fonte des glaciers donc les bofedales vont devenir avec le temps l'unique réservoir d'eau pour le Lac. Avec le dérèglement des saisons, induit par le changement climatique, les bofedales sont également menacés par la sécheresse, ce qui pourrait sur le long terme avoir de terribles conséquences sur les flux hydriques du Lac et les zones d'élevage et de pâturage.

Les totoras et plus généralement les macrophytes aquatiques permettent de limiter l'érosion et donc la mise en suspension de nombreux sédiments et de retenir les polluants afin d'éviter la dispersion de ceux-ci. Ils contrôlent donc la turbidité et la contamination de l'environnement aquatique dans lequel ils se développent. De plus, ils représentent un lieu d'alimentation et un refuge pour la faune (particulièrement les poissons, mais aussi les oiseaux aquatiques), un nœud primordial pour l'ensemble de la vie aquatique. Les bofedales sont des espaces uniques permettant de garder l'eau de la fonte des glaciers et des précipitations puis de la reverser lentement (avec un effet tampon) dans le Lac selon les saisons. Ils sont primordiaux pour l'élevage, notamment de lamas et pour la qualité et la quantité d'eau du Lac.

En 2009, le Département de La Paz (dans lequel El Alto est inclus) a produit 12 443 tonnes de viande issues de l'élevage de bovins. Au Pérou, l'élevage de bétail est une activité économique primordiale, principalement fondée sur l'élevage d'ovins, d'alpagas, de bovins et avicole. Ces productions sont en constante augmentation pour répondre à l'augmentation de la population et la demande croissante en protéines animales. Les villages de campagnes proches des rivières Ramis et Suches subissent la contamination minière et voit leurs effectifs de bétails se réduire à cause de la pollution (Ocola Salazar et al., 2017).

A Puno, la disponibilité de pâturages naturels a permis le développement de l'élevage extensif, malgré tout, responsable d'une importante pression sur les sols, donc favorisant l'érosion de ceux-ci et sur les plantes aquatiques, notamment les totoras, qui servent de fourrage aux animaux d'élevage.

De plus, d'après la FAO-INRENA (2005), 309 557 hectares ont été déforestés sur l'Altiplano péruvien. Bien qu'elle soit en baisse, la déforestation constitue une menace pour le Lac. Ce sont les populations rurales qui déforestent, de façon démesurée, des arbres et arbustes et particulièrement des totoras pour cuisiner, construire ou chauffer leurs maisons, alimenter le bétail, reconstruire les îles des Uros, ...

Les macrophytes aquatiques (c'est-à-dire les humedales) et les bofedales sont donc des espaces à protéger et à entretenir pour préserver au mieux les écosystèmes du Petit Lac et la qualité de ses eaux. Pour cela, il faut veiller à la surveillance et la gestion des zones pâturées par les bovins afin de contrôler l'apport en azote et en phosphore et d'éviter la pression induite par le surpâturage des zones où poussent les totoras. Les espèces locales d'élevage (tels que les lamas) doivent être valorisées. En effet, leur élevage, moins courant sur l'Altiplano, est source de moins de pollution, de moins de consommation de fourrage et d'eau, les lamas tassent moins le sol que les bovins et causent moins de dommages sur leurs zones de pâturages. La combinaison des deux élevages (bovins pour la viande et le lait et lamas pour la laine et la viande) serait favorable à la protection des bofedales, des totoras et du Lac.

8) L'application et l'évolution ou non des lois et des réglementations sur l'environnement, les activités anthropiques et les plans d'urbanisations

Dans le cadre du système TDPS, il existe des normes juridiques générales qui régissent au niveau binational, national et territorial la gestion de l'environnement et les activités socio-économiques.

a) Politiques environnementales

Au Pérou, une des principales préoccupations des autorités est la formulation de la politique nationale de l'environnement (décret suprême 012-2009-MINAM, publié le 23 mai 2009). Cette politique a pour objectif général d'améliorer la qualité de vie des populations et le développement durable du pays. Cela est formulé dans le Plan National d'Actions Environnementales (PLANAA). La gestion environnementale a établi quatre thématiques essentielles :

- 1) La conservation et utilisation durable des ressources naturelles et le maintien de la diversité biologique,
- 2) La gestion de la qualité environnementale,
- 3) La gouvernance environnementale,
- 4) Les compromis et les opportunités environnementaux internationaux.

De plus, un programme a été établi par les municipalités. Il s'agit d'une proposition volontaire souhaitant mettre en avant trois objectifs fondamentaux des responsabilités qui leur sont assignées :

- 1) Le traitement et la réutilisation des eaux usées domestiques,
- 2) Le recyclage et l'élimination finale des déchets solides municipaux
- 3) L'ordre territorial pour le développement durable.

En Bolivie, le Plan National de Développement se fonde sur des politiques environnementales. Celles-ci ont pour objectifs l'adaptation et l'atténuation du changement climatique, le développement grâce à la valeur ajoutée des ressources naturelles, la durabilité environnementale, et l'harmonie avec la nature. Cela implique des relations entre les êtres humains, et entre la société et l'État avec la nature, favorisant ainsi un développement intégral et divers.

Il est très important que les deux pays mettent en œuvre leurs instruments respectifs de gestion des ressources en eau. Plusieurs lois importantes ont été approuvées ces dernières années, dans lesquelles des instruments-cadres ont été élaborés, tels que le Plan National d'Assainissement de Base, une action sur 10 ans du Ministère du Logement et des Services de Base, la constitution du SENASBA et de l'EMAGUA. Le SENASBA (Service National pour la Durabilité des Services d'Assainissement de Base) développe et renforce les capacités participatives, inclusives, équitables et transparentes des opérateurs pour la durabilité des services d'eau potable et d'assainissement de base, contribuant au bien-être de la population bolivienne. L'EMAGUA (Entité d'Exécution de l'Environnement et de l'Eau) gère et exécute de manière efficace les programmes et les projets d'investissements publics dans l'eau, l'assainissement et l'environnement pour le « bien-être » de la population bolivienne (PNUMA, 2011).

b) Loi sur l'environnement et la gestion des ressources

Au Pérou, le gouvernement d'Ollanta Humala (2011-2016) eut comme caractéristique le vote des « paquetazos normativos », une législation spéciale qui vise à promouvoir l'investissement. Ces « paquetazos » traitent de thèmes très variés dont l'environnement, fragilisent une série de droits territoriaux et affaiblissent la surveillance de l'institution environnementale. Les menaces principales sont les suivantes : l'abandon et l'absence de protection de l'environnement et des territoires des peuples

autochtones et la permission de l'accaparement de leurs terres. Sa particularité la plus dangereuse c'est qu'il simplifie les étapes procédurales pour obtenir une concession minière. Une autre norme (Loi n° 30 327) approuve l'octroi de servitude de terres en jachère et la remise provisoire de ces terres pour des projets de grande envergure. C'est ainsi que le gouvernement continue d'imposer une logique de « simplification administrative » favorisant l'investissement, tout en ignorant les droits comme celui de la consultation préalable et en violant les droits à la propriété, à la possession et à l'autonomie communale quant à l'usage de la terre. Il criminalise aussi l'usage du territoire des peuples autochtones en invoquant le concept d'usurpation aggravée quand il se produit sur « les droits de passage ou emplacement d'une zone octroyée pour des projets d'investissement » (Agurto & Hurtado Mariño). L'ensemble de ces nouvelles lois, sous prétexte de promouvoir les investissements privés et donc relancer l'activité économique, affaiblit considérablement les compétences du MINAM (Ministère de l'Environnement péruvien).

En Bolivie, la Loi sur l'environnement, a un caractère central sur les questions en relation avec l'environnement comme la foresterie, l'eau, la biodiversité et l'exploitation des ressources hydrobiologiques. Cette loi pénalise certains délits contre l'environnement relatifs à la pêche et aux activités piscicoles. Plus précisément lorsqu'une personne empoisonne, contamine ou altère les eaux destinées à la consommation publique, à l'utilisation agricole, industrielle ou piscicole, au-delà des limites admissibles elle peut être poursuivie en justice. De plus, d'après l'article 110 de cette loi, tous ceux qui, avec ou sans autorisation, chassent, pêchent ou capturent, en utilisant des moyens interdits comme des explosifs, des substances toxiques ou des substances causant des dommages sur l'environnement ou menaçant l'extinction des espèces, seront sanctionnés par la privation de liberté pendant un à trois ans et une amende équivalente à 100% de la valeur des espèces capturés. Si la chasse, la pêche ou la capture a lieu dans des zones protégées ou des zones de réserve la pénalité pourra être aggravée (Loi n° 1 333, 1992).

c) Loi sur les activités piscicoles

Au Pérou, l'autorisation pour exercer l'aquaculture est obtenue après vérification des exigences indiquées dans le TUPA (Texto Unico de Procedimientos Administrativos : un document de gestion qui contient les procédures administratives qui, par obligation légale, doivent être initiées par les entités pour satisfaire ou exercer leurs intérêts ou leurs droits) (Ordonnance Régionale n°009-2009-GR-PUNO).

D'ici 2021 un plan national pour le développement de l'aquaculture va être établi au Pérou. La principale mission de ce plan sera de promouvoir la génération des ressources matérielles, financières et technologiques pertinentes ainsi que des services techniques et des conditions institutionnelles appropriées pour faciliter l'investissement privé dans la production de l'aquaculture et la commercialisation des produits de l'aquaculture sur les marchés nationaux et internationaux. Le principal outil de la législation actuelle relative aux pêches est la réglementation de la pêche et de la pisciculture annexée au décret suprême n°22 581 du 14 août 1990. Celle-ci est formellement entrée en vigueur, mais son efficacité réelle est très limitée à l'heure actuelle. En effet, la principale raison du blocage de la mise en œuvre de cette réglementation réside dans la dissolution du CDP (centre de développement des pêches) qui formait son bras opérationnel et exécutif en application à la Loi de décentralisation administrative de 1995.

De plus, le gouvernement n'a accordé au développement de la pisciculture qu'une priorité très limitée. Le financement des programmes et des projets est incertain, surtout avec la décentralisation administrative, processus de transfert de compétences des pouvoirs de l'état vers les collectivités locales, qui bénéficient alors d'une certaine autonomie de décisions et de leur propre budget.

En Bolivie, l'enjeu piscicole a été largement remis en question il y a quelques années. La consommation nationale de poissons est encore trop faible et d'après le gouvernement. Les autorités reconnaissent et valorisent désormais l'importance du poisson pour l'économie régionale et la sécurité alimentaire de la population. Au début du projet, en 2011, les communications et les relations publiques entre les

organismes de pêche et de pisciculture étaient très rares. Dorénavant, grâce à l'appui du projet PPV (« Peces Para la Vida »), un plus grand nombre de leaders locaux savent comment influencer les politiques publiques et commencent à défendre activement le secteur. L'État a récemment approuvé une législation connexe et a fondé l'IPDPACU (Institution Publique Décentralisée de la Pêche et de l'Aquaculture) comme nouvelle autorité nationale responsable du secteur. Les activités de renforcement des organisations et de gouvernance dans le secteur piscicole ont permis de réunir toutes les parties impliquées dans les chaînes de valeur du poisson, et elles ont contribué à faire approuver des outils qui serviront à l'élaboration de nouvelles politiques publiques. Les leçons tirées des expériences locales et nationales forment une base solide, qui permet désormais aux pêcheurs et aux pisciculteurs d'influencer l'élaboration des politiques. À court et à moyen terme, ce processus déterminera l'apport de la production de poisson à la sécurité et à la souveraineté alimentaires de la population bolivienne (Salas & Macnaughton).

d) Projet National de l'Innovation de la Pêche et de l'Aquaculture (PNIPA)

Au Pérou, le PNIPA est un projet qui a été lancé en 2015 par le Ministère de la Production (PRODUCE). Le principe fondamental du PNIPA est de promouvoir la recherche, le développement technologique et l'innovation du secteur piscicole. Ce projet a pour but de :

- Obtenir une meilleure articulation entre les différents agents économiques afin de générer et d'accélérer la dynamique d'innovation de la pêche et de l'aquaculture de façon durable.
- Renforcer les capacités des principaux acteurs nationaux de l'innovation, ainsi qu'identifier, générer, valider et promouvoir l'adoption de produits et de processus innovateurs de la pêche et de l'aquaculture.
- Développer et améliorer la disponibilité du marché des services pour innover dans les produits et les processus de production, de transformation, de commercialisation et de consommation de l'aquaculture nationale.
- Construire un cadre institutionnel systématique et cohérent, garantir une gestion politique et administrative active du processus de rénovation du secteur de la pêche et de l'aquaculture ainsi que la promotion de l'investissement privé.

Il pourrait être intéressant de rendre ce projet binational avec la Bolivie, particulièrement sur la région de l'Altiplano.

e) Loi sur les activités minières

Au Pérou, la loi minière inclut tout ce qui concerne l'utilisation de substances minérales dans le sol et le sous-sol du territoire national, ainsi que dans le domaine maritime. Toutes les ressources minérales appartiennent à l'État, dont la propriété est inaliénable et imprescriptible. En juillet 2004, le Congrès péruvien régla le traitement des résidus miniers. Toutefois, la nouvelle loi comportait certaines lacunes. En effet elle offre aux sociétés minières la possibilité de résilier leurs concessions et de renoncer à leurs droits miniers, transférant ainsi au gouvernement l'obligation et l'énorme charge de remise en état des sites. Et aujourd'hui l'état de plusieurs mines fermées démontre la faille de cette loi. Ces sites fermés continuent de polluer, et ce pendant des dizaines d'années. Le ministère de l'Énergie et des Mines du Pérou proposa une modification de la loi au Congrès et, le 25 mai 2005, ce dernier établit que l'État n'assumerait la réhabilitation des sites abîmés par l'exploitation minière que lorsque les parties responsables ne pourront pas être identifiées. Actuellement, la loi précise que les détenteurs de mines demeurent responsables de la remise en état des sites même en cas de perte ou de résiliation de leurs concessions (Réalité minière, 2012) (SEMANA economica, 2017). Le 22 juillet 2017, un décret suprême (N° 010-2016-MINAM), a été mis en place. Il interdit l'usage, la commercialisation, la distribution et le stockage du mercure dans le but d'extraire de l'or. De plus, il existe également une loi interdisant les mines informelles.

La Bolivie a mis en vigueur une nouvelle loi minière qui donnera à l'État un plus grand contrôle du secteur et lui accordera un monopole sur des minéraux clés comme le lithium. Les règlements promulgués par le gouvernement indiquent que seule la COMIBOL, la commission minière de Bolivie, peut conclure des accords avec des capitaux privés pour exploiter les gisements du pays (Gestion, 2014) (Somos Sur, 2014). La législation est décrite comme relativement laxiste, et il n'y a pas d'interdiction spécifique à l'activité informelle.

f) Plan Intégral de Gestion Environnementale des Résidus Solides (PIGAR)

Ce plan propose des outils de gestion des résidus solides, dans la région du Desaguadero, dont la mise en œuvre contribuera à l'amélioration du service de nettoyage public et permettra de contrer les impacts négatifs dus aux résidus solides qui existent actuellement, protéger la santé de la population et de maintenir un environnement agréable et sain. Ce plan de gestion est dirigé par le Comité Binational de Gestion des Résidus Solides de Desaguadero (CBGRSD) (Pérou – Bolivie). Le rôle de celui-ci est de garantir la mise en œuvre, le fonctionnement et la pérennité du projet à travers la participation citoyenne, les mécanismes de consensus, l'éducation et la sensibilisation à l'environnement, et à travers une proposition technologique viable qui contribuera à la gestion intégrale des déchets solides. La communication sociale, l'éducation et la sensibilisation à l'environnement sont des éléments clés pour créer des conditions favorables au développement de PIGARS. Les actions dans ce domaine devraient être développées parallèlement à l'amélioration du service de nettoyage public afin de renforcer les impacts positifs dans la ville.

Le processus actuel de gestion des déchets solides dans les deux pays est inadéquat et, surtout, l'élimination finale des déchets solides est mal faite. Dans ce contexte, il est nécessaire d'exécuter des actions complémentaires à court terme, et à long terme, qui contribueront à l'efficacité de l'implémentation du projet.

Des lois existent donc mais ne suffisent pas à éviter la surexploitation des ressources naturelles. Il est donc urgent de réviser les lois essentielles relatives au respect de l'environnement et à la contamination de l'écosystème et de mettre en place des organes de surveillance et des sanctions à appliquer dans le cas où il y aurait manquement au respect de la loi.

9) Tourisme

En Bolivie, le secteur touristique a apporté plus de 692 millions de dollars en 2015, soit une augmentation de 5,3 % par rapport à l'année précédente, selon les données de l'Institut national de la statistique (INE, 2018). Ce flux représente 37,2 millions de dollars de plus qu'en 2014, a déclaré l'INE. En moyenne 750 000 visiteurs par an découvrent les secrets des paysages andins, que se partagent le Pérou et la Bolivie, et la vérité sur l'état actuel du lac Titicaca. La Bolivie enregistre chaque année un nombre de visiteurs supérieur à 1 million (1,2 million en 2015), tandis que **le Pérou** enregistre chaque année plus de 3 millions de visiteurs (chiffre en hausse chaque année). Ces augmentations du nombre de visiteurs dans les deux pays, ont un réel impact, positif sur l'économie, bien que les revenus de cette activité soient souvent bénéfiques pour une part infime de la population, mais négatif sur l'environnement et la culture des deux pays.

De plus la ville de Puno et ses environs ont cessé d'être un simple point de transit entre Cuzco et La Paz, devenant une destination à part entière. En effet, il y a eu une augmentation de 59% de visiteurs, dans la région de Puno, depuis 2009. Tandis qu'en Bolivie, Copacabana et les îles du Soleil et de la Lune ont été la principale destination touristique du pays pendant plus d'un demi-siècle. Le Lac Titicaca se retrouve donc particulièrement affecté par cette nouvelle forme d'industrie et pourrait devenir de moins en moins attractif pour cette activité économique si la contamination urbaine et industrielle continue.

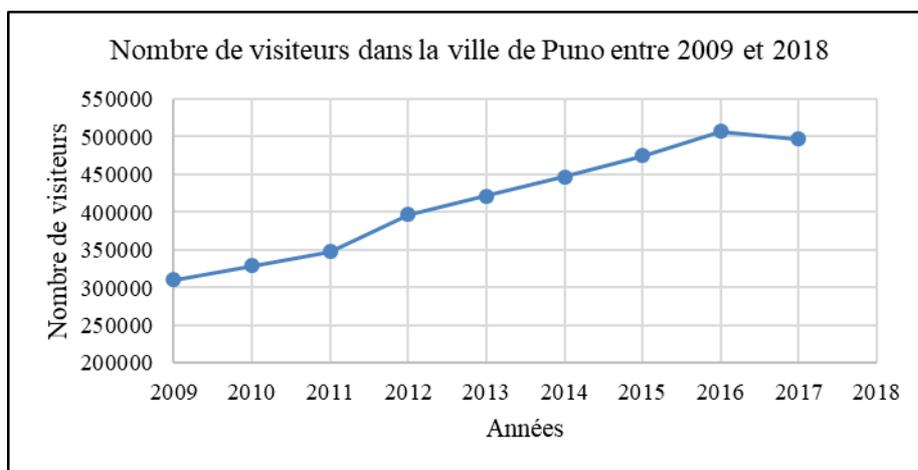


Figure 59 : Graphique montrant l'évolution du nombre de touristes à Puno entre 2009 et 2017 (MJ'Ecko, 2018).

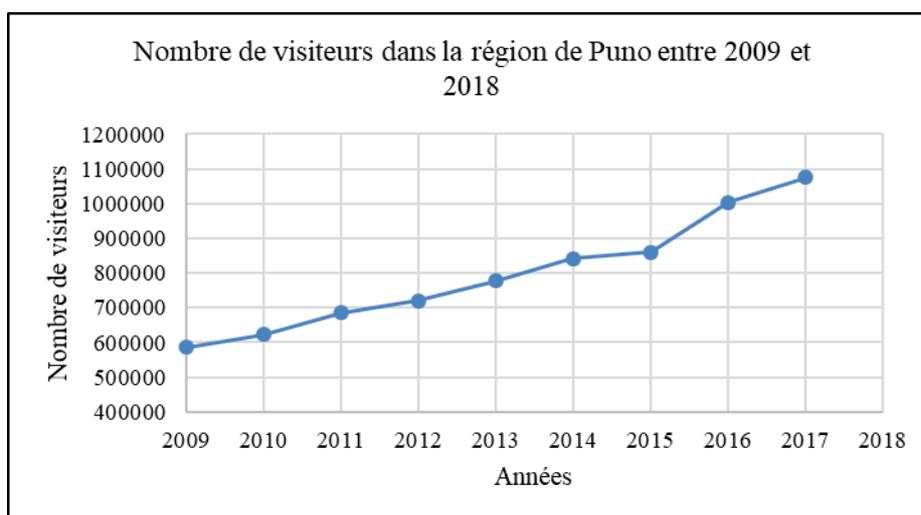


Figure 60 : Graphique montrant l'évolution du nombre de touristes dans la région de Puno entre 2009 et 2017 (MJ'Ecko, 2018).

Le tourisme génère certes des revenus pour la population locale mais est également une source importante de contamination. La croissance de ce secteur a fait exploser le nombre d'infrastructures hôtelières (20% en 5 ans de 2005 à 2010). Le déplacement des touristes (bus, véhicules, bateaux, bacs), le logement et l'alimentation exercent une pression sur les ressources et la santé du lac Titicaca. Les eaux résiduelles des hôtels, les déchets (plastiques, métaux) sur les plages ou les lieux de passages atteignent visuellement et écologiquement cet écosystème. A la pollution des eaux résiduelles de la population et du tourisme, s'ajoute une pollution aux hydrocarbures car le tourisme a fait grimper l'utilisation des transports polluants (Terrazas et al., 2017). Le tourisme intensif dans la zone est en partie responsable de la disparition de certaines espèces endémiques andines (Pnuma, 2011).

Au Pérou, la ville de Juliaca voit transiter des centaines de milliers de visiteurs chaque année. Dans cette ville 200 tonnes de déchets quotidiens sont déversées en grande partie dans la rivière Ramis qui s'écoule dans le lac Titicaca, celui-ci devient un réceptacle à déchets, bien qu'il soit l'une des réserves d'eau douce la plus importante en Amérique du Sud.

L'archipel des îles Uros est une autre hérésie touristique, qui, chaque jour, abime et dégrade un peu plus le Lac, sa biodiversité et la culture andine. Ces îles sont appelées ainsi à cause des premiers habitants aujourd'hui disparus. A l'origine ces îles ont été créées par les Uros au 13^{ème} siècle pour échapper aux Incas, la tribu rivale. Aujourd'hui, elles sont habitées par les Aymaras. Ces derniers occupent les îles flottantes à des fins touristiques, en y perpétuant les traditions Uros. La zone des îles flottantes est la plus touristique de Puno. On compte environ 37 814 de visiteurs étrangers et nationaux en 2017. L'île de Taquile a reçu en 2017, 105 753 visiteurs. Sur les îles des Uros, chaque année, une couche de totoras est rajoutée à ces îles superficielles afin de les maintenir en état. On peut y trouver des boutiques, des chambres, des distributeurs de billets mais aucun système d'épuration efficace n'a été mis en place jusqu'ici.

Tous les déchets (solides, eaux résiduelles, ...) se retrouvent directement dans la Baie Intérieure de Puno. De plus elles sont situées dans une zone protégée, où l'on trouve la plus grande densité de totoras de la région de Puno, macrophytes aquatiques essentielles pour la préservation de la qualité de l'eau du Lac Titicaca. On observe un conflit d'intérêts entre l'autorité en charge de la protection du Lac et particulièrement de cette zone et les habitants des îles, soutenus par le gouvernement péruvien.

Il est donc essentiel de veiller au développement d'une activité touristique respectueuse de l'environnement avec une dynamique durable en accord avec les intérêts de tous, de pratiquer un tourisme qui valoriserait à la fois la culture locale et traditionnelle et le Lac, de déployer des stations d'épurations et des techniques innovatrices (toilettes sèches) et accessibles (hôtel écologique, nourriture traditionnelle), afin de limiter les impacts environnementaux engendrés par cette activité et éviter la détérioration de l'environnement. Un compromis est à trouver entre conservation du Lac Titicaca et de sa faune et flore endémique, et développement économique.

10) Activités minières

Les productions de métaux sur le système TDPS se concentrent principalement sur l'étain, le zinc, l'argent et l'or (souvent de façon illégale) dans les bassins des rivières Ramis au Pérou et Suches en Bolivie. Cette économie est extrêmement polluante, autant pour l'environnement que pour la santé humaine, et est souvent source d'illégalité et d'informalité. L'exploitation minière, bien qu'artisanale, souvent informelle et coopérative, est la seconde industrie extractive de la Bolivie, après les secteurs pétrolier et gazier. Cette activité concerne environ 14% du PIB national bolivien et représente avec les hydrocarbures, 75 % des exportations (Ocola Salazar et al., 2017). Cette activité fait partie d'environ 10% du PIB national péruvien.

Les sites miniers dans la zone Titicaca sont divisés en 6 bassins. Il y a au total près de 862 sites passifs. D'après la loi n° 28721, on considère les sites passifs, les installations, les effluents, les émissions, les restes ou les dépôts des résidus produits par des opérations minières issus de sites actuellement abandonnés ou inactifs. Ces sites peuvent, en effet, faire perdurer une forme de pollution diffuse dans l'environnement et particulièrement les eaux des rivières. Les sites passifs, comme les sites actifs, constituent donc un risque permanent et potentiel pour la santé de la population. Les activités de mineurs privés sont souvent informelles et mal contrôlées. Ces derniers entretiennent toujours l'activité de certaines mines auparavant fermées (Ocola Salazar et al., 2017).

Dans une étude récente (Monroy, 2017), Mario Monroy, docteur en écotoxicologie à l'Université de Barcelone, a fait mention de niveaux de mercure, de cadmium (sous-produit du travail minier ou déchet industriel), de zinc et de cuivre bien au-dessus des normes autorisées (de 5 à 100 fois supérieur) sur quatre types de poissons qui font pourtant partie du régime alimentaire de la population locale, un indicateur fiable du mauvais état écologique du lac au niveau des zones peu profondes (Baie de Cohana et Baie Intérieure de Puni) et aux embouchures des rivières Ramis et Coata dans le nord du Grand Lac. La concentration de mercure dans les poissons de l'espèce *Carachi amarillo* est de 2,51 microgrammes par gramme de poisson sec, une différence quatre fois supérieure à la limite permise par les autorités sanitaires et alimentaires. Les conséquences se reportent alors inévitablement sur l'Homme qui consomme ces poissons et dépend directement ou indirectement des eaux du Lac Titicaca. Par les phénomènes de bioaccumulation et biomagnification, on observe une augmentation de la concentration en polluants au long de la chaîne alimentaire.

Dans le secteur péruvien, aux déchets solides et eaux résiduelles en provenance des villes de Juliaca et Puno viennent s'ajouter les métaux lourds renvoyés par les mines des bassins des rivières Suches et Ramis. Puno est une importante zone de production artisanale d'or, et le bassin de la rivière Ramis est également un endroit où cette production est développée. On y trouve des quantités en mercure très importantes. En Bolivie, on estime à 130 tonnes de mercure émises par an (Mongabay, 2016). La rivière Ramis est l'affluent du Lac Titicaca le plus contaminé, principalement de déchets toxiques et de métaux lourds venant directement des mines et donc la première source de contamination minière du Titicaca. Dans la région de Puno on décompte environ 10 000 mines d'or informelles. Ces organisations impactent considérablement le système hydrique. C'est cette zone qui est la plus contaminée au mercure.

Or, ces métaux lourds présentent une toxicité pour les êtres vivants pouvant affecter le métabolisme des poissons, invertébrés, oiseaux et êtres humains. Par exemple, les concentrations élevées de cuivre affectent les branchies, aussi les organismes aquatiques peuvent mourir par effet d'hypoxie (diminution de la quantité d'oxygène apportée aux organes par le sang) (Terrazas et al., 2017). Le bouleversement de la cascade trophique peut alors augmenter les risques d'eutrophisation.

Les mines peuvent également être à l'origine d'un drainage de pluies acides dont les débits dépendent de la période des pluies et dont le matériel est transporté jusqu'aux eaux alentours. Ils génèrent du sulfate de fer (FeSO_4) et de l'acide sulfurique (H_2SO_4), qui, une fois dans l'eau se transforment en ions sulfates SO_4^{2-} , en ions hydrogène H^+ ce qui a pour conséquence d'acidifier les eaux du lac, en ions ferriques (Fe^{3+})

et en ions ferreux (Fe^{2+}). Ils agissent comme des lixivants, produisant finalement la dissolution des métaux en forme de sulfates.

Cette réaction qui génère des ions hydrogène, se traduit par l'acidification du milieu et la mobilisation des ions métaux. L'effet immédiat de ce phénomène, est de rendre les effluents miniers acides donc plus corrosifs. L'effet conséquent est d'augmenter, dans ces solutions acides, la mobilisation à plus haute teneur de plusieurs métaux lourds, tels que le fer, le zinc, le plomb, le cadmium, le manganèse, etc, leur solubilité augmente donc l'eau devient plus toxique ; qui autrement se trouveraient dans les eaux de surface en quantité négligeables. La présence simultanée de plusieurs métaux peut engendrer une toxicité supérieure à celle de chaque métal séparé. Par exemple, le zinc, le cadmium et le cuivre sont toxiques aux faibles pH et agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues et affecter les poissons. L'acidification à elle seule, est directement à l'origine d'une mortalité importante des populations de poissons et crustacés, de perturbations de leur taux de croissance et de leur reproduction. Les effets indirects de l'acidification sont la dégradation de l'habitat des poissons et des modifications des relations entre prédateurs et proies (interruption de la chaîne alimentaire). L'effet conséquent, outre d'acidifier les eaux de surface, est donc d'augmenter la salinité de ces eaux, et potentiellement leur toxicité.

Le drainage acide est une forme de pollution diffuse qui peut avoir des conséquences dévastatrices sur l'environnement et sur la santé de la population. L'exposition à de l'eau polluée par le drainage minier acide conduit à des cancers, des problèmes dermatologiques et des déficiences cognitives. La présence de métaux lourds compromet le développement du système nerveux des fœtus. L'activité des agriculteurs et des éleveurs qui sont situés en aval des pollutions est mise en danger. Malheureusement ce phénomène peut se poursuivre des centaines d'années après la fermeture de la mine et est considéré comme irréversible à l'échelle humaine (Keita, 2013).

Les autorités compétentes doivent absolument (cf. ANA, 2017) :

- Faire respecter les réglementations en vigueur pour les activités d'extractions de minerais légaux.
- Repérer et éradiquer les activités minières illégales.
- Stopper le transport des combustibles jusqu'aux mines en particulier les mines informelles et illégales. En effet, sans carburant, l'activité cessera.
- Après avoir identifié et éradiqué l'activité informelle d'extractions de minerais, il faudra veiller au développement d'activités socio-économiques plus durables et respectueuses de l'environnement qui permettront aux familles d'anciens mineurs de subvenir à leurs besoins.

(ANA, 2017)

D- Conservation de la biodiversité et bioremédiation

1) Impacts sur la biodiversité et conséquences

a) Intensification du changement climatique et des activités humaines

Deux facteurs principaux vont impacter la biodiversité : (a) l'intensification du changement climatique correspondant à la hausse des températures, au dérèglement de la saisonnalité, à la modification de la qualité de l'eau (eutrophisation) et de la hauteur d'eau (bathymétrie), et (b) les activités humaines en relation avec l'accélération de l'urbanisation. Tous ces paramètres vont altérer les chaînes trophiques, les conditions physico-chimiques (recyclage des nutriments et stœchiométrie, atténuation verticale de la radiation solaire, ...) et biogéochimiques (réduction de la concentration en oxygène dissous, activités des bactéries sulfato-réductrices, production de sulfure d'hydrogène (H₂S), méthylation et déméthylation, ...).

La combinaison de ces facteurs pourrait conduire à la disparition de certaines espèces (comme certaines espèces d'*Orestias*, la grenouille géante (*Telmatobuis culeus*), des oiseaux aquatiques comme le zambullidor du Titicaca (*Rollandia microptera*) qui n'auront pas le temps ni les capacités de s'adapter aux nouvelles conditions de l'environnement. La diminution de la hauteur d'eau va entraîner une augmentation de la salinité (la concentration sera plus importante) et beaucoup d'espèces animales et végétales ne pourront pas s'adapter. D'autres espèces, comme les canards et les mouettes, pourraient trouver un bénéfice à cette modification de la qualité de l'eau.

La boga (*Orestias pentlandii*) et le suche (*Trichomycterus rivulatus*), poissons indigènes du bassin du Titicaca, sont aujourd'hui menacés d'extinction en raison de la prédation par le pejerrey (*Basilichthys bonariensis*) mais aussi par l'exploitation irrationnelle des pêcheurs artisanaux binationaux. La chasse traditionnelle à des fins alimentaires, médicinales ou simplement culturelles a aussi de lourdes conséquences sur certaines espèces déjà menacées d'extinction comme par exemple les espèces de canards *Anas ferruginea*, *Anas puna* et *Anas georgica*, le cormoran (*Phalacrocorax brasilianus*) et les poules d'eau (*Gallinula chloropus* et *Fulica ardesiaca*) (Pnuma, 2011).

b) La déforestation

La déforestation pourrait également avoir de lourdes conséquences sur l'environnement. En effet, le degré de déforestation dans le TDPS est élevé. La déforestation est l'une des principales causes de l'érosion des sols. Elle réduit la production agricole et la capacité de rétention des eaux dans le sol, ce qui a comme conséquences de provoquer des inondations pendant la saison des pluies et de diminuer la disponibilité de l'eau pour la consommation humaine, animale et pour l'irrigation. Dans la partie péruvienne du TDPS la demande de bois de chauffage par personne dans les zones rurales est estimée à 5 m³ par an. Dans le bassin du Titicaca cela engendre la diminution du nombre et de la densité de certains arbres endémiques : mullu mullu mullu (*Ribes brachybotrys*) et kiswara (*Chuquiraga jussieui*) (Pnuma, 2011).

c) Le brûlage des totoras

Le brûlage des totoras dans la Réserve nationale de Titicaca, espace protégé près de Puno, et dans d'autres zones du Lac est également un problème récurrent. En 2009 un total de 1 476 ha de totoras brûlées a été enregistré. Aujourd'hui la combustion de totoras dépasse toutes les attentes mettant en danger la diversité des espèces vivant dans la zone de réserve (oiseaux, poissons, amphibiens, invertébrés ...). Or, la destruction de ces niches écologiques est une catastrophe pour le maintien de la biodiversité. Mais les totoras ne sont pas seulement mis en danger par la main de l'Homme. Le changement climatique, par la baisse du niveau du lac et l'augmentation de la température ont un effet dévastateur pour les macrophytes des zones peu profondes (Pnuma, 2011).

d) Les rétroactions au sein d'un système écologique

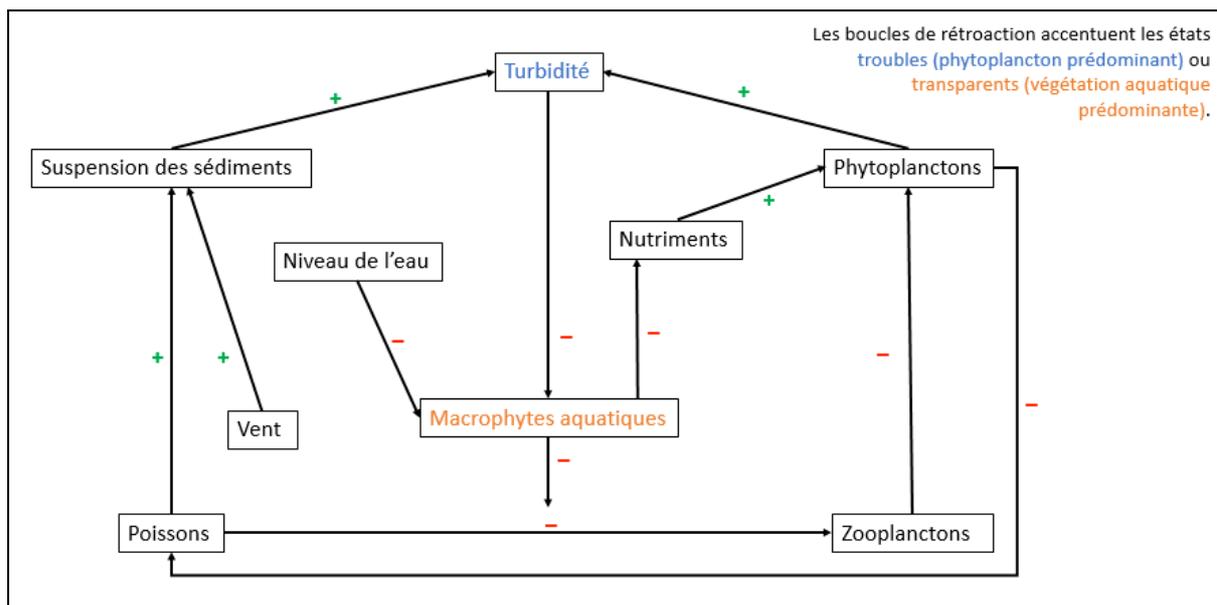


Figure 61 : Cycle d'interaction entre phytoplancton (miro-algues) et macrophytes aquatiques (plantes émergentes *Totora*, flottantes *Lemna* et submergées *Chara*) renforçant l'existence d'états alternatifs (eau claire / eau turbide) (modifié de Scheffer et al. 1998).

A partir des travaux de Scheffer nous avons pu mettre au point un nouveau modèle de rétroaction qui nous permet d'affirmer que les activités anthropiques et le réchauffement climatique vont entraîner une augmentation de la quantité de nutriments dans le Lac, une diminution du niveau de l'eau et des intempéries climatiques de plus en plus violentes et fréquentes.

Ainsi, l'intensification des vents favorisera la resuspension des sédiments, et parallèlement l'augmentation des nutriments entrainera un développement du phytoplancton. Ces deux facteurs vont provoquer une hausse de la turbidité, affectant ainsi la densité des macrophytes aquatiques. La relation poissons-zooplancton sera perturbée par la diminution des macrophytes. En effet elles fournissent un habitat adéquat au zooplancton les protégeant des poissons. Par conséquent, une diminution des macrophytes engendrera une diminution du zooplancton et donc un développement du phytoplancton. De ce constat on peut prédire que la quantité d'oxygène disponible dans le lac s'épuisera, entraînant donc une réduction de la population d'espèces aérobies (poissons, macro-invertébrés). Si on observe une diminution des macro-invertébrés, on risque d'observer également une augmentation du périphyton (algues qui se développent autour des macrophytes) et donc une sénescence rapide des macrophytes aquatiques. De plus la diminution du niveau d'eau pourrait avoir comme conséquence la diminution des plantes immergées (par exemple les charas) et l'augmentation de la densité de plantes émergées (par exemple les totoras).

Dans une centaine d'années, on risque donc d'observer une diminution de la diversité d'espèces natives et probablement une augmentation d'espèces allochtones pour lesquelles le milieu pourrait devenir de plus en plus favorable (par exemple les hyalela, ce qui engendre l'arrivée des flamants roses).

2) Les métaux lourds

Les métaux lourds peuvent également avoir de terribles conséquences sur les espèces animales et végétales et sur les êtres humains. Les concentrations élevées de cuivre affectent les branchies et les organismes aquatiques peuvent mourir par effet d'hypoxie (diminution de la quantité d'oxygène apportée aux organes par le sang). L'effet principal du zinc sur la santé est d'affecter les défenses antioxydantes au niveau transcriptionnel et enzymatique. Le plomb peut produire des effets aigus sur le système nerveux central, des douleurs et des faiblesses musculaires, des crises hémolytiques, des anémies sévères et de l'hémoglobinurie (Terrazas et al., 2017). Le méthyl mercure peut être rapidement absorbé par le phytoplancton et ainsi passer aux organismes supérieurs de la chaîne trophique, il est considéré comme un cation extrêmement dangereux (Monroy et al., 2014 ; Guédron et al., 2017 ; Lanza et al., 2017). Les animaux accumulent plus vite que ce qu'ils peuvent excréter, donc il se produit une augmentation des concentrations dans la chaîne alimentaire (bioaccumulation ou biomagnification) convertissant le méthyl mercure en une menace pour la santé humaine. Ce phénomène s'applique pour tous les polluants (Fonturbel, 2008).

De plus, d'après les deux autres scénarios : niveau de l'eau et eutrophisation. On remarque que le niveau du Lac va très probablement diminuer, ce qui impactera la biodiversité animale et végétale de cet écosystème, car la quantité, corrélée au niveau de l'eau va également diminuer. Ces macrophytes représentent pourtant des niches écologiques pour un bon nombre d'espèces aquatiques. L'érosion, la contamination vont alors probablement augmenter, du fait de la diminution du niveau de l'eau et de la diminution des totoras. L'eutrophisation pourrait impliquer une diminution conséquente de la biodiversité, en effet si elle engendre la création de zones anoxiques, les espèces animales se retrouveraient alors dans une zone sans oxygène.

3) Les polluants émergents

Les polluants émergents, ou micropolluants regroupent un grand nombre de produits chimiques utilisés quotidiennement par la population. Parmi ces contaminants, on recense les perturbateurs endocriniens, les médicaments, les produits cosmétiques et les produits phytosanitaires. Ces micropolluants sont source de préoccupation puisque de nombreux produits pharmaceutiques et ménagers ainsi que des produits chimiques industriels sont utilisés et libérés en continu dans l'environnement. Même en très faibles quantités certains peuvent induire une toxicité chronique, perturber le système endocrinien des humains, de la faune aquatique et favoriser le développement d'agents pathogènes bactériens résistants. Des études réalisées en Europe et en Amérique ont montré que les perturbateurs endocriniens sont de plus en plus présents dans l'environnement (résidus d'hormones des pilules contraceptives, des médicaments, produits issus de l'élevage...), par leur présence dans les eaux usées domestiques et industrielles déversées dans l'environnement. Les perturbateurs endocriniens peuvent générer des cancers (du sein, du testicule, de l'ovaire et de la prostate), des problèmes de reproduction ou encore le diabète (Samia). Ces micropolluants se retrouvent dans les écosystèmes car les stations d'épuration sont incapables de les éliminer. De nombreuses études scientifiques sont en cours afin de mieux comprendre les impacts engendrés par ces polluants et pour trouver des solutions d'épuration (UNESCO, 2014).

a) Provenance des perturbateurs endocriniens tels que les médicaments

Après leurs utilisations thérapeutiques, ou diagnostics, les perturbateurs endocriniens tels que les médicaments ne sont pas toujours totalement métabolisés, se retrouvant ainsi dans les eaux usées, comme on peut le remarquer sur la figure 78 (Fenet et al., 2016).

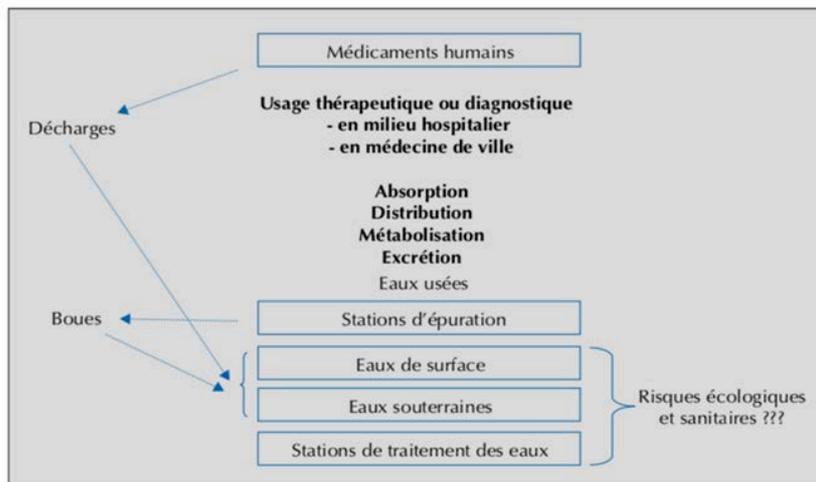


Figure 62 : Principales voies de contamination du milieu aquatique par les médicaments à usage humain (Lévi, 2006).

Les antibiotiques, les hypolipémiants, les anti-inflammatoires non stéroïdiens, les anticonvulsivants, les agents de contraste iodés, les β -bloquants et les contraceptifs sont fréquemment retrouvés dans les eaux usées des stations d'épuration. Le devenir de ces molécules est très variable, dans les stations d'épuration, où différents phénomènes, tels que la sorption et la biodégradation, sont appliqués. Ainsi, si les stations d'épurations ne parviennent pas à éliminer l'ensemble des résidus de médicaments, ils se retrouvent dans les rejets de la station (STEP) et dans les différents niveaux d'eau. (Fenet *et al.*, 2016) Les traces de médicaments ne proviennent pas seulement de l'utilisation humaine mais aussi des activités industrielles pharmaceutiques, des établissements de soin et de l'élevage (figure 78) (Lévi, 2006).

Les concentrations de médicaments retrouvées dans les eaux usées sont comprises entre les nanogramme et microgramme par litre (Lévi, 2006).

b) Exemple de résidus retrouvés aux États-Unis

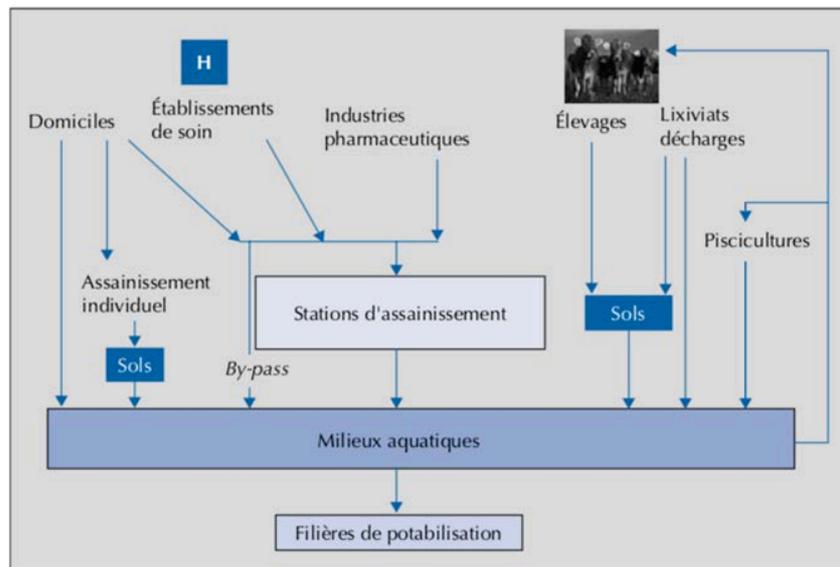


Figure 63 : Schéma des diverses origines d'antibiotiques et de leurs résidus dans les eaux (Kolpin et al., 2000).

D'après cette étude, 50% des eaux de 139 sites, répartis sur le territoire américain, contenaient des traces d'antibiotiques. Ils ont pu détecter des traces d'antibiotiques dans 50 % des eaux de 139 sites répartis sur le territoire américain. Des exemples de molécules d'antibiotique et leur concentration sont exposées dans le tableau ci-dessous (Kolpin et al., 2000).

Antibiotique	Médiane ($\mu\text{g/L}$)
Chlortétracycline	0,42
Ciprofloxacine	0,02
Érythromycine	0,1
Lincomycine	0,06
Norfloxacine	0,12
Oxytétracycline	0,34
Roxithromycine	0,05
Sulfadiméthoxine	0,06
Sulfaméthazine	0,22
Sulfaméthizole	0,13
Sulfaméthoxazole	0,15
Tétracycline	0,11
Triméthoprime	0,15

Figure 64 : Médiane ($\mu\text{g/L}$) des valeurs de résidus d'antibiotiques retrouvés dans des eaux de surface aux Etats Unis (Kolpin et al., 2000).

c) Exemple résidus retrouvés en Europe

Des études ont été réalisées sur les eaux usées brutes (eaux en entrée de STEP), les eaux traitées secondaires (eaux après traitement secondaire) et les eaux traitées tertiaires (eaux après traitement tertiaire) de 21 stations d'épuration pour quantifier les substances pharmaceutiques présentes (Soulier *et al.*, 2011)

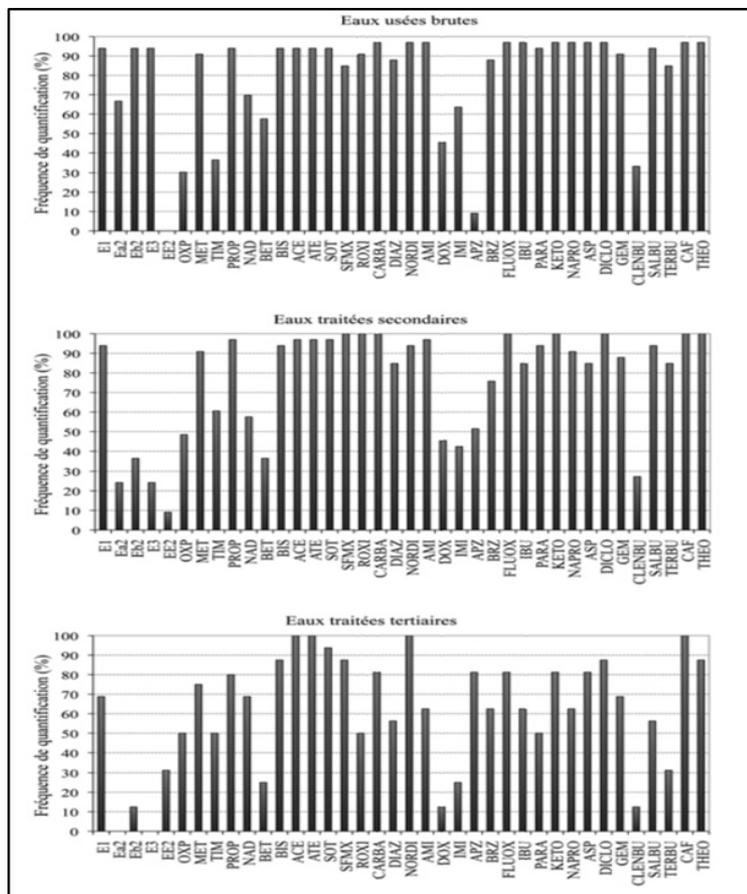


Figure 65 : Fréquence de quantification (%) des substances pharmaceutiques dans les eaux usées brutes et les eaux traitées (secondaires et tertiaires)

D'après cette figure, les substances sont retrouvées dans plus de 80% des eaux traitées des STEP. Cependant, leurs concentrations restent faibles (excepté pour l'ibuprofène, la théophylline, l'aspirine et le paracétamol), inférieures au $\mu\text{g/L}$ sauf pour l'aspirine, du paracétamol, de l'ibuprofène, de la caféine, de la théophylline et du kétoprofène dont les concentrations sont comprises entre la dizaine et la centaine de $\mu\text{g/L}$ dans les eaux usées brutes.

On remarque ainsi grâce à ces rendements d'élimination, une efficacité croissante des procédés primaires, secondaires puis tertiaires :

- Les procédés primaires n'ont que des rendements faibles, inférieurs à 30%. Les traitements biologiques secondaires (comme les boues activées en aération prolongée) ont des rendements supérieurs à 70% pour la moitié des substances étudiées.
- Les procédés tertiaires (osmose inverse, ozonation, filtration sur charbon actif) avancés sont eux encore plus efficaces. Ces procédés pourraient permettre d'améliorer l'élimination de l'œstrone, l'éthinylœstradiol, l'aspirine, la caféine et l'oxprénolol, puisque les stations d'épuration ne sont pas conçues pour éliminer ces micropolluants organiques présents dans les eaux usées. Ces procédés tertiaires, sont onéreux et encore peu utilisés dans le domaine de l'assainissement, sont davantage à envisager (Soulier *et al.*, 2011).

d) Cas du lac Léman

Chaque année, la CIPEL (Commission Internationale de Protection des Eaux du Léman, France-Suisse) réalise un programme d'analyses pour la recherche de micropolluants dans le lac. Ce programme ne se limite pas seulement aux produits phytosanitaires mais aussi aux substances produites par les activités pharmaceutiques ainsi qu'aux perturbateurs endocriniens. Pour les teneurs en métaux lourds, ils sont relativement faibles et satisfont les exigences des législations pour les eaux de boisson. Les concentrations totales en pesticides sont comprises entre 0.1 et 0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ et se stabilisent depuis 2008. Certains médicaments, comme la metformine, la gabapentine, la carbamazépine, le carisoprodol et les agents de contraste ont été relevés à des concentrations importantes dans le lac et dans les rivières (Ortelli *et al.*, 2010).

Des études ont montré que les micropolluants présents dans les rejets de stations d'épuration provoquent un hermaphrodisme chez les poissons mâles exposés, une masculinisation de certaines espèces de poissons femelles exposées aux rejets industriels. On note également un accroissement du taux d'avortement et de stérilité du bétail de ferme buvant l'eau du lac et une féminisation des congénères mâles chez les mouettes présentes dans la région. Dans le cas d'une eau potabilisable, ces micropolluants peuvent avoir des impacts négatifs considérables sur la santé humaine, comme un retard de croissance fœtale ainsi qu'une prévalence accrue des tumeurs de la prostate, des testicules et du sein (Ramseier Gentile *et al.*, 2013).

De nombreuses études montrent que les micropolluants, ou « polluants émergents », ont des conséquences nocives sur la santé humaine ainsi que sur la biodiversité. Ces polluants sont de plus en plus présents dans les eaux usées domestiques et industrielles. Malheureusement, les stations d'épuration ne sont pas conçues pour éliminer ces microparticules, qui se retrouvent alors dans les eaux naturelles (lacs, rivières, eaux souterraines...) causant des désastres écologiques. Actuellement, aucune étude n'a établi de corrélation entre la présence de ces polluants et le phénomène d'eutrophisation.

4) Indicateurs de capture du carbone chez les macrophytes (charas, totoras) et le phytoplancton

a) Le phytoplancton

Le biota marin a un rôle important dans la régulation des cycles biogéochimiques ainsi que dans la fixation du CO₂ atmosphérique qui a un impact sur le contrôle global du climat. La chimie de l'eau utilise le taux de carbone organique dissous (COD) dans l'eau pour suivre l'évolution de la pollution organique des milieux aquatiques.

Il existe des indicateurs de capture du carbone dans le milieu aquatique tels que les totoras ou les charas, et le phytoplancton. Le phytoplancton définit l'ensemble des microorganismes photosynthétiques, passifs, libres et en suspension dans la colonne d'eau. Ce sont des cellules, des filaments, des colonies qui peuvent être motile et dont les déplacements sont restreints aux mouvements de l'environnement aquatique (Groga, 2012). Lorsqu'un groupe de phytoplancton se développe, on appelle cela une diatomée. Cependant, si le milieu est très agité, le phytoplancton ne pourra pas se développer par manque de lumière, car sa principale source d'énergie est issue de la phototrophie (CNRS, 2018).

Grâce à la photosynthèse, le phytoplancton absorbe le carbone minéral dissous dans les eaux pour fabriquer de la matière organique. Le gaz carbonique est stocké dans leurs tissus sous forme de composé organique comme les hydrates de carbonates (UVED, 2008). Elle représente une étape importante de la pompe océanique biologique du carbone. Ce mécanisme s'explique par le transfert vertical du carbone de la surface vers les zones en profondeur, à l'inverse du gradient de concentration.

A la mort de ces organismes, les cadavres et débris tombent en profondeur en entraînant le carbone qui a été fixé. De plus, le transfert vertical du carbone et son stockage, temporaire ou permanent, est encouragé par d'autres mécanismes comme l'agrégation, la plongée du phytoplancton et les produits résultant des prédateurs directs ou indirects du phytoplancton.

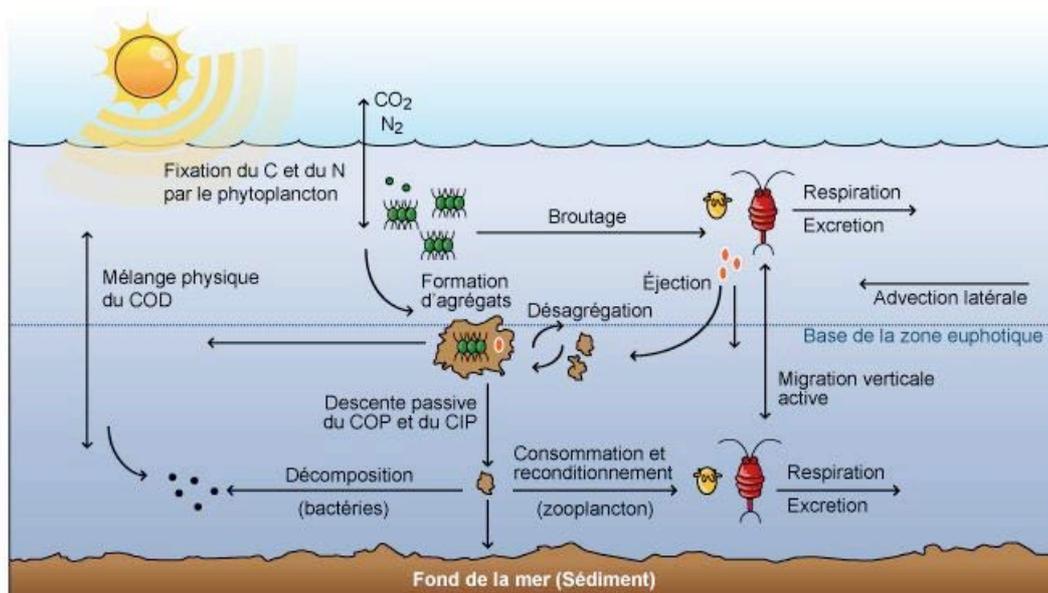


Figure 66 : Pompe biologique du carbone (et de l'azote) (UVED, 2008).

Le potentiel d'exportation verticale de carbone peut être affecté par d'autres processus biologiques tel que la migration verticale du zooplancton ou du necton, l'exsudation et la sécrétion de la matière organique dissoute, la respiration, l'activité exo-enzymatique associée à la solubilisation de la matière particulaire, et les processus hydrodynamiques. Le transfert vertical de carbone organique est associé aux organismes vivants. Cela correspond à la pompe des tissus mous. Le transfert vertical de carbone inorganique (calcite

et aragonite), quant à lui, est seulement associé aux organismes à structure calcaire constituant la pompe de tissus durs ou pompe à carbonate (UVED, 2008). Ces organismes calcaires se trouvent en profondeur et forment des dépôts sédimentaires carbonatés (Quéguiner, 2013).

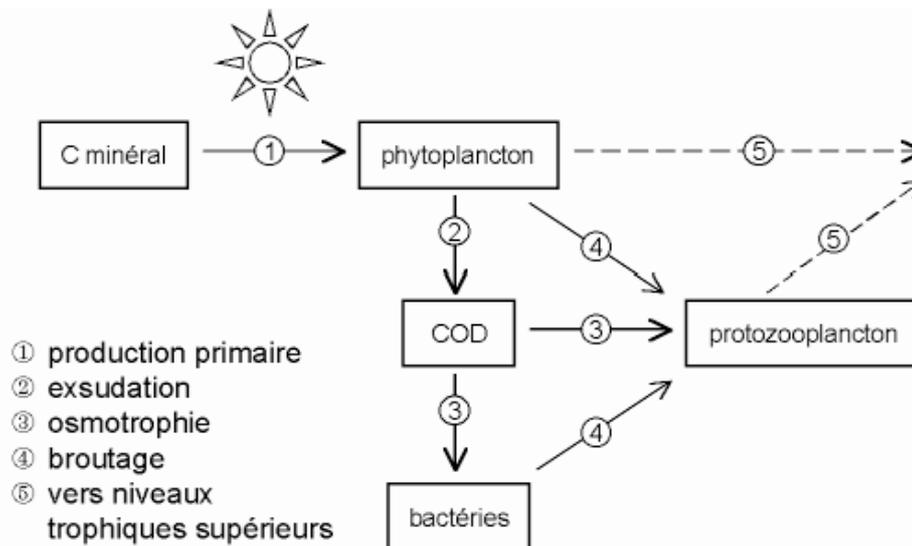


Figure 67 : Rôle du protozooplancton dans le transfert du carbone entre les deux premiers niveaux trophiques (Quéguiner, 2013).

Le rôle du protozooplancton est souvent proportionnel à la biomasse bactérienne. De plus, il est considéré comme essentiel à la chaîne de réutilisation du carbone organique dissous provenant de l'exsudation phytoplanctonique trophiques (Quéguiner, 2013).

Le phytoplancton peut former des efflorescences grâce à plusieurs facteurs, tels que les concentrations élevées en nutriments, la stabilité hydrodynamique, la température et à la lumière. Le phytoplancton peut se situer soit au niveau de la zone euphotique là où l'apport de lumière est le plus important, soit dans les couches inférieures là où les concentrations en nutriments sont plus importantes. Certains sont capables de s'affranchir en partie des besoins en éléments nutritifs grâce à leurs capacités de stockage et de transformation de l'azote atmosphérique. Le taux de croissance et la dépendance aux nutriments du phytoplancton sont également variables. Pour faire face aux variations environnementales, les espèces phytoplanctoniques ont développé des stratégies adaptatives, comme des mécanismes favorisant leur mobilité ou leur migration vers des zones riches en nutriments et en lumière, la compétition interspécifique, et enfin des mécanismes de défense contre la prédation (allélopathie) (Groga, 2012).

L'efficacité d'assimilation des nutriments en conditions oligotrophes semble pouvoir être améliorée avec la turbulence. Cela permet alors aux organismes de se maintenir malgré les conditions de vie non favorables (Cadier, 2016).

De plus, la température contrôle de nombreuses propriétés fonctionnelles fondamentales du phytoplancton et est un facteur de régulation de la production primaire dans la plupart des lacs. En effet, une faible température peut réduire l'activité enzymatique, l'absorption des nutriments et la croissance des algues (Groga, 2012).

La synthèse de matière organique par le phytoplancton nécessite des macronutriments comme le phosphore, l'azote, le fer, et la silice (dans le cas des diatomées et des silico-flagellés) ainsi qu'une multitude de micro-nutriments comme le zinc, le cuivre, le manganèse etc. Les caractéristiques de croissance essentielles à leur utilisation sont utilisées dans la gestion des deux principaux types de modèles de croissance qui servent à décrire les dépendances de la croissance à la concentration de nutriments. Ce sont les modèles de type Monod (1942,1949) qui sont généralement utilisés et pour lesquels l'assimilation des nutriments est directement liée à la concentration dans le milieu (Cadier, 2016).

Le rapport N/P, qui indique la carence en nutriments, est utilisé pour expliquer la dynamique saisonnière des communautés planctoniques. Il permet de déterminer si l'un ou l'autre ou les deux nutriments ont été épuisés jusqu'à limiter leur croissance. C'est pourquoi, le rapport stœchiométrique N/P un indicateur de l'évolution des communautés d'algues (Groga, 2012).

De plus, plusieurs façons de calculer l'incorporation du carbone par le phytoplancton existent : Par exemple, une technique utilisée par l'IRD, l'incubation des populations naturelles de phytoplancton dans des flacons en plastique transparent placés à la profondeur de prélèvement avec un ajout de carbone minéral radioactif (^{14}C). Après quelques heures, il est possible de compter la radioactivité du phytoplancton incubé dans un compteur à scintillation (IRD, 2008).

b) Les macrophytes

Les plantes aquatiques libèrent plus de dioxygène lors de la photosynthèse qu'elles n'en consomment lors de la respiration la nuit. Lors de la photosynthèse, la plante absorbe du dioxyde de carbone, produit du glucose et rejette de l'oxygène. Lors de la phase de respiration, le glucose est une source d'énergie pour la plante, pour absorber de l'oxygène et rejeter du dioxyde de carbone. Les racines des plantes absorbent les substances minérales et les transforment en dioxygène lors de la photosynthèse. Les micro-organismes présents dans l'eau, transforment les impuretés en minéraux, ces minéraux seront dissous et consommés par les plantes lors de la transpiration. La présence de macrophytes révèle le niveau trophique de l'eau, c'est-à-dire la quantité de nutriments présents dans l'eau et surtout dans les sédiments (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2016). Leur présence est importante, car elles contribuent au maintien de l'équilibre de l'écosystème.

Les macrophytes essentiellement constituées d'eau (80 à 90% de leur masse), effectuent le mécanisme de transpiration. C'est au cours de celui-ci que l'eau remonte par les racines grâce au phénomène d'osmose, traverse le végétal et est évacuée par les feuilles, afin d'apporter les éléments nutritifs. Ce liquide, appelé "sève brute", est composé uniquement d'eau et des minéraux. De plus, les macrophytes ont un rôle important dans la filtration de l'eau ainsi que dans l'absorption des substances polluantes et des nutriments en excès. En effet, elles absorbent des nitrates et utilisent le phosphore pour croître ce qui limite la prolifération des algues. C'est pourquoi, elles ont un rôle de purification biologique (Testard, 2013).

De plus, les macrophytes sont des bioaccumulateurs transitoires. Leur capacité de stockage d'éléments inorganiques et leur fonction de redistribution de ces éléments permettent d'assurer leur action dans les cycles géochimiques. On peut observer une perte nette de P et d'N sédimentaires au cours de la phase végétative. Ces nutriments peuvent être recyclés in situ pendant la phase de sénescence et de dégradation de la matière organique. Par conséquent, les macrophytes activent, ou réactivent la circulation des nutriments sédimentaires, mais ils ralentissent celle des éléments dissous dans l'eau, normalement assimilés et recyclés rapidement en eau libre par l'association phytoplancton-bactéries.

Les macrophytes ont une affinité pour certains métaux tels que le zinc, le cuivre, et le bore. Les macrophytes immergées sont des polyconcentrateurs efficaces. Ces plantes peuvent accumuler de l'azote et du phosphore en excès, au-delà de leurs quotas de subsistance qui sont respectivement de 0,13% pour le phosphore et de 1,3% pour l'azote (Denny, 1980). Leur capacité minimale d'extraction et d'immobilisation de l'azote et du phosphore s'établit donc respectivement à 13 et 1,3 kg par tonne produite (MS) et par hectare.

Les macrophytes représentent un réservoir assez considérable de matière organique dissoute, sous forme d'hydrocarbures, de protéines hydrosolubles et d'acides aminés, libérés en totalité dans le milieu après la mort des tissus. La mort des macrophytes tend donc à provoquer la relance successive des productions bactérienne et algale (Testard, 2013).

5) Conclusion

Une des principales clefs de l'amélioration de l'état du Lac et de la préservation de sa biodiversité est l'installation de plusieurs stations d'épuration efficaces, moyen qui pourrait redonner l'éclat et la pureté aux eaux du berceau de la civilisation précolombienne.

L'objectif des années à venir va donc être de protéger et de maintenir la biodiversité malgré les impacts du changement climatique. Afin d'éviter ce désastre écologique, il faudrait :

- Appliquer des mesures de bioremédiation (phytoremédiation ou biomanipulation), c'est-à-dire une restauration par des manipulations écologiques des communautés aquatiques ayant des conséquences favorables sur le fonctionnement à la fois écologique et biogéochimique de l'écosystème).
- Appliquer et faire appliquer des lois, normes et réglementations sur la protection de l'environnement, de certaines espèces et sur la gestion des activités socio-économiques.
- Créer une dynamique durable et respectueuse de l'environnement autour des activités anthropiques particulièrement celles en lien avec les ressources du Lac Titicaca.

E- Conclusion des trois scénarios et recommandations

1) Conclusion

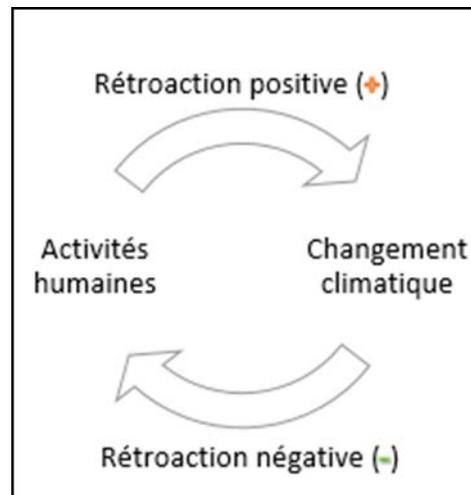


Figure 68 : Rétroactions entre les activités humaines et le changement climatique (MJ'Ecko, 2018).

Ce schéma illustre le lien étroit entre les activités anthropiques et le changement climatique. L'ensemble des paramètres décrits préalablement dans ce qu'implique la hauteur de l'eau, la biodiversité et l'eutrophisation verront leurs conséquences augmenter si les activités humaines n'évoluent pas vers une dynamique plus durable. Si des mesures d'adaptation sont prises rapidement et une vision économique respectueuse de l'environnement est appliquée, alors les effets du désastre écologique pourraient être amortis. Les actions humaines sont déterminantes quant aux conséquences face au changement climatique (Hoffmann & Requena., 2012)

- Scénario pessimiste :

Dans un premier temps, on observe sur le schéma, que les activités, principalement économiques, exercées par l'Homme ont une action positive sur le climat, c'est-à-dire qu'elles accentuent les impacts causés par le dérèglement climatique. L'ensemble des conséquences de ce changement vont donc être amplifiées si les actions de l'Homme ne deviennent pas plus respectueuses de l'environnement, sachant que l'impact du réchauffement climatique est déjà plus important dans les régions tropicales de haute montagne (deux fois plus en moyenne : Bradley et al., 2004 ; Hoffmann & Requena., 2012). Les conséquences impliquent l'augmentation de la fréquence des phénomènes El Niño et La Niña, l'augmentation des précipitations, l'augmentation de l'aridité et la sécheresse, l'augmentation des catastrophes extrêmes, la diminution du niveau du Lac, une extinction de nombreuses espèces, l'augmentation de l'entrée de nutriments entraînant une augmentation des risques d'eutrophisation, une destruction des bofedales, etc.

Dans un second temps, le changement climatique a, quant à lui, une action négative sur les activités humaines. En effet, plus les actions du climat seront amplifiées et moins les Hommes pourront exercer correctement leurs activités. On risque donc d'observer une dépendance alimentaire à d'autres régions et pays, une augmentation des problèmes de malnutrition, une difficulté pour la population à satisfaire ses besoins de base (eau potable, électricité, ...), une prolifération d'éléments pathogènes et une apparition de nouvelles maladies, un exode de plus en plus massif vers les grands centres urbains provoquant la création de bidonvilles, un abandon des terres rurales anciennement exploitées, une diminution des activités économiques autour du Lac et de l'attractivité touristique, etc.

- Scénario optimiste :

Certaines mesures prises en accord entre les politiques, les scientifiques et les parties civiles pourraient permettre de diminuer l'impact engendré par les activités anthropiques et le changement climatique. Cependant elles ne pourront probablement pas changer la tendance.

Les conséquences du changement climatique corrélées à celles des activités anthropiques vont transformer les écosystèmes de façon radicale. Il est donc important que l'état et la société civile déploient des mesures d'adaptation capables d'amortir les effets du désastre écologique à futur avec de nouveaux apprentissages sociaux, indispensables pour s'adapter aux nouvelles conditions. Des lois, réglementations et une fiscalisation environnementale pourraient être mises en place ou améliorées.

Une bonne gestion hydrique (autant pour l'agriculture, l'élevage, l'utilisation humaine) et une bonne gestion des déchets et des eaux usées (stations d'épurations) est essentielle et pourrait faire face au stress et à la contamination hydrique généralisé actuelle. Il sera primordial d'utiliser les technologies adaptées aux conditions de l'Altiplano.

Une agriculture et un élevage durables, basés sur les cultures adaptées à la sécheresse, l'utilisation limitée d'intrants et les camélidés permettraient de faire face à une potentielle pénurie de ressources alimentaires et hydriques.

Un développement d'activités durables et respectueuses de l'environnement permettrait de maintenir stables les conditions économiques de l'Altiplano stables, de dynamiser la zone et de faire perdurer les ressources naturelles pour les générations à venir. Les migrations internes vers les grands centres urbains seraient alors limitées. Les énergies renouvelables pourraient être valorisées et permettraient de substituer les énergies non durables.

Enfin une sensibilisation, et une gouvernance adaptée permettront d'instaurer une conscience collective de recyclage, d'économie d'eau potable, de bonne gestion des ressources naturelles, d'énergie, d'aliments, et de respect de l'environnement et particulièrement du Lac Titicaca.

L'ensemble de ces conditions permettrait donc de diminuer l'impact des activités anthropiques et donc de réduire la rétroaction positive qu'il exerce sur le changement climatique. Des mécanismes efficaces de gouvernance nationale et binationale, en accord avec les circonstances, permettraient la mitigation des effets du changement climatique à des niveaux tolérables, une urbanisation contrôlée, une meilleure gestion des activités anthropiques, une amélioration de la qualité de vie et un développement économique durable de l'ensemble de la région de l'Altiplano.

(Hoffmann & Weggenmann. 2011)

2) **Recommandations et propositions générales**

Ces recommandations sont proposées suite aux études faites sur le terrain et à la bibliographie concernant le sujet de la préservation du Lac Titicaca, des Hommes qui y vivent et des espèces animales et végétales. Elles sont à prendre en compte avec les autres recommandations citées précédemment dans chaque partie spécifique.

- Sensibiliser la population, surtout les jeunes (qui représentent les générations futures) et les politiques (qui sont maîtres des destinées en fonction des décisions qui sont entre leurs mains).
- Rendre essentiels et primordiaux les sujets et problématiques environnementales dans les politiques binationales ; harmoniser les règlements et les procédures entre les deux pays.
- Appliquer et faire évoluer les lois sur la préservation de l'environnement, les activités anthropiques et les plans d'urbanisation ; éviter que des zones urbaines bordent directement le lac (cas de Puno) et que le cordon de macrophytes aquatiques littoraux disparaisse.
- Diversifier les activités économiques et créer une dynamique économique durable ; créer des opportunités laborales en zones rurales afin de désengorger la 'tâche urbaine de El Alto' : e.g. élevage de camélidés plutôt que de bovidés, développement du tourisme respectueux de l'environnement (communautaire) et secteur tertiaire tertiaire comme le télétravail dépendant de bonnes connexions Internet.
- Décentraliser les services publics et améliorer les politiques de planification territoriale afin d'éviter les migrations vers les grands centres urbains ; passer d'une ville 'spontanée' à une ville 'réfléchie' et planifiée.
- Créer et améliorer le fonctionnement des stations d'épurations de l'eau pour l'ensemble des villes et villages de l'altiplano péruvo – bolivien ; coupler l'ingénierie sanitaire classique à la phytoremédiation (ingénierie écologique), avec la création de humedales artificiels à Totora, Lemna, Chara, à la sortie des STEP, comme cela se fait par ex. en Europe , avec les roseraies ; créer le long du littoral du Petit Lac des système de collection, rétention et traitement d'eaux pluviales en provenance du bassin versant, afin d'éviter les apports excessifs en nutriments, matière organique et contaminants dans le Petit Lac. Installer des humedales artificiels dans les villages littoraux (qui ne peuvent héberger de véritables STEP) et renforcer le cordon littoral de macrophytes aquatiques qui sert de filtre biologique naturel, refuges, habitats d'alimentation et de reproduction pour les poissons et les oiseaux aquatiques.
- Améliorer le système de collecte des déchets et limiter l'utilisation du plastique ; implanter le tri sélectif et transporter les déchets ainsi triés vers les plateformes de recyclage des grandes villes.
- Innover dans des systèmes qui permettraient de limiter les pollutions anthropiques (aquaculture, agriculture, élevage) et stopper la contamination minière.
- Augmenter la contribution des énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire, leur usage aussi dans les moyens de transports terrestres et aquatiques..
- Transparence de l'argent public. Développer la pratique des expériences pilote (tests) avant l'implémentation des ouvrages en taille réelle, afin de valider les concepts performants et éviter le gaspillage vers des solutions non adéquates ni fiables (e.g. pour le design des STEP adaptées aux conditions climatiques de l'Altiplano et micro-organismes présents). Optimiser le rendement des STEP existantes en fonction de leur proximité aux sources contaminantes ; partager des infrastructures entre les deux pays (e.g. la STEP de Yunguyo, proche de Copacabana). Réhabiliter les STEP (parmi la 50aine existante) lorsque cela est techniquement et économiquement viable.

III- Gestion binationale actuelle du Lac Titicaca

A- Gestion du lac Titicaca

Actuellement, au niveau transfrontalier (= supra-national) le lac Titicaca est principalement géré par une institution de coordination transfrontalière :

- L'ALT (Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca, Autorité Autonome Binationale du Lac Titicaca, <http://www.alt-perubolivia.org/>), sous la responsabilité des chancelleries des deux pays (= Ministères des Relations Extérieures), qui assure la gouvernance binationale, dont la gestion de la qualité des eaux, des ressources hydriques et hydro-biologiques.

L'OBLT (Observatoire Binational du Lac Titicaca) est un outil scientifique de surveillance, analyse et réflexion (<https://borea.mnhn.fr/fr/OBLT>) soutenu depuis 2015 par l'IRD et l'UMR BOREA (Unité Mixte de Recherche 'Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques). Il permet de stocker et gérer les données et connaissances concernant le lac Titicaca, produites par les institutions techniques, scientifiques et académiques concernées des deux pays. L'OBLT est actuellement un observatoire scientifique de l'environnement, progressivement prendra en compte les aspects sociétaux. Son infrastructure de données spatiales qu'est le GeoVisor IIGEO/UMSA, permet non seulement de stocker des bases de données (bancaisation) validées et actualisées (et enseignées de méta-données), mais de croiser des couches de données interdisciplinaires, développer de la cartographie dynamique, de croiser images satellites et vérités terrain, et – couplé à la modélisation – d'élaborer des scénarios futurs utiles à étayer la prise de décisions.

L'OBLT a établi son plan d'action, de manière à séparer les différentes réflexions sur la manière d'atteindre ses objectifs (Lazzaro X. 2016) :

- Restaurer ou maintenir la qualité de l'eau pour favoriser la conservation, restauration et résilience de l'écosystème. On identifie alors les facteurs principaux de polluants, méthodes de biorestauration, etc.
- La deuxième s'assure donc de la pérennisation de l'usage de l'eau pour la population sur le long terme. Cela implique de vérifier les rejets des villes et leurs doses, et l'impact de la population sur le lac.
- Maintenir ou restaurer une activité économique sur le lac comme la présence de ressources halieutiques tout en faisant attention à son équilibre écosystémique : la ressource piscicole et des infrastructures nautiques respectueuses de l'environnement etc.
- Anticiper les effets du changement climatique et des pressions anthropiques de l'urbanisation de l'Altiplano.

L'ALT et l'OBLT sont indépendants mais complémentaires, travaillant en collaboration avec d'autres organismes péruviens et boliviens (ministères, instituts de recherches, universités, ...). Il existe également un soutien international (scientifique et financier) dans la gestion du lac.

Points Forts

GOUVERNANCE:

- Les OBT* fonctionnent dans le cadre d'un accord multi-états
- Il y a une meilleure collaboration politique et technique entre les états riverains transfrontaliers.

GESTION ET CAPACITES

- Les OBT détiennent une plate forme binationale qui regroupe les données des eaux des lacs.

Faiblesses des OBT

GOUVERNANCE:

- Il n'y a pas de mandat légal pour gérer la totalité des eaux.
- Les problématiques de pollution et de gestion ne sont pas priorisées par les dirigeants des pays
- Les lacs font l'objet d'une ressource économique où les objectifs d'utilisation des états sont différents (dépollution, tourisme, pêche).

GESTION ET CAPACITES

- Les protocoles de partage de données sont souvent inexistantes. Les scientifiques ne partagent pas leurs données publiquement.
- Il y a des pénuries de financement et donc de matériels d'hydrologies et de scientifiques.

Opportunités des OBT

GOUVERNANCE

- Les OBT sont bien placées pour cibler et identifier les impacts importants sur les eaux souterraines transfrontalières : sur l'écoulement des cours d'eau, la qualité de l'eau et la dégradation des nappes.

GESTION ET CAPACITES

- Les OBT peuvent soutenir les projets régionaux qui dépendent des lacs.
- Elles ont la capacité de créer une large base de données et de la partager aux autres OBT afin de servir d'exemple.
- Elles ont la possibilité d'accueillir et de former des jeunes scientifiques dans le domaine de la gestion des eaux

Menaces des OBT

GOUVERNANCE

- Manque de moyens financiers
- Manque de stratégies dans la gestion du lac. Quelles sont les objectifs généraux ? Préserver le lac et les activités anthropiques qui en découlent ?
- L'intérêt du lac n'est pas souvent commun entre les deux pays
- La compréhension du fonctionnement des lacs peut être très complexe. (Altitude, climat ...)

GESTION

- La durabilité des collectes de données et de partage n'est pas assurée.

Figure 69 : SWOT** d'un lac transfrontalier (MJ'Ecko, 2018).

* OBT = Organisation des Bassins Transfrontaliers.

**L'analyse ou matrice SWOT, de l'anglais Strengths (forces), Weaknesses (faiblesses), Opportunities (opportunités), Threats (menaces) est un outil de stratégie d'entreprise permettant de déterminer les options offertes dans un domaine d'activité stratégique.

Les points forts et faibles de la gestion d'un lac transfrontalier sont récapitulés dans le SWOT réalisé ci-dessus. Dans cet exemple de gestion complexe, on recense beaucoup de faiblesses. Il est nécessaire d'exploiter les opportunités globales détaillées dans le SWOT pour obtenir la meilleure gestion possible (Vaessen *et al.*, 2015).

Afin de mieux comprendre les relations entre les différents organismes responsables de la gestion du lac Titicaca un organigramme est présenté ci-dessous :

B- Exemple de gestion de lacs transfrontaliers

1) Gestion du lac Léman

Le lac Léman est un exemple de lac transfrontalier géré bi-nationalement. Il est situé entre la France et la Suisse et représente le plus grand lac alpin.

La CIPEL (Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman) est un organisme public, composé d'ingénieurs et de chercheurs français et suisses. Cette commission comprend trois niveaux d'action :

1. L'organe directeur est composé de treize hauts fonctionnaires suisses et français.
La délégation suisse comporte des conseillers d'états en charge de l'environnement venant de l'office fédérale suisse. Le département fédéral des affaires étrangères suisses est également impliqué. La délégation française est représentée par des cadres de la délégation de la Préfecture de la Région Auvergne Rhône-Alpes, d'agents du Rhône et de conseillers départementaux (de l'Ain et de la Haute-Savoie)
2. Le secrétariat permanent est responsable de la coordination des travaux, de la gestion administrative, technique, scientifique et financière de la commission.
3. La sous-commission technique est composée de scientifiques et d'experts français et suisses (CIPEL, 2014).

L'organisation se décline de la façon suivante :

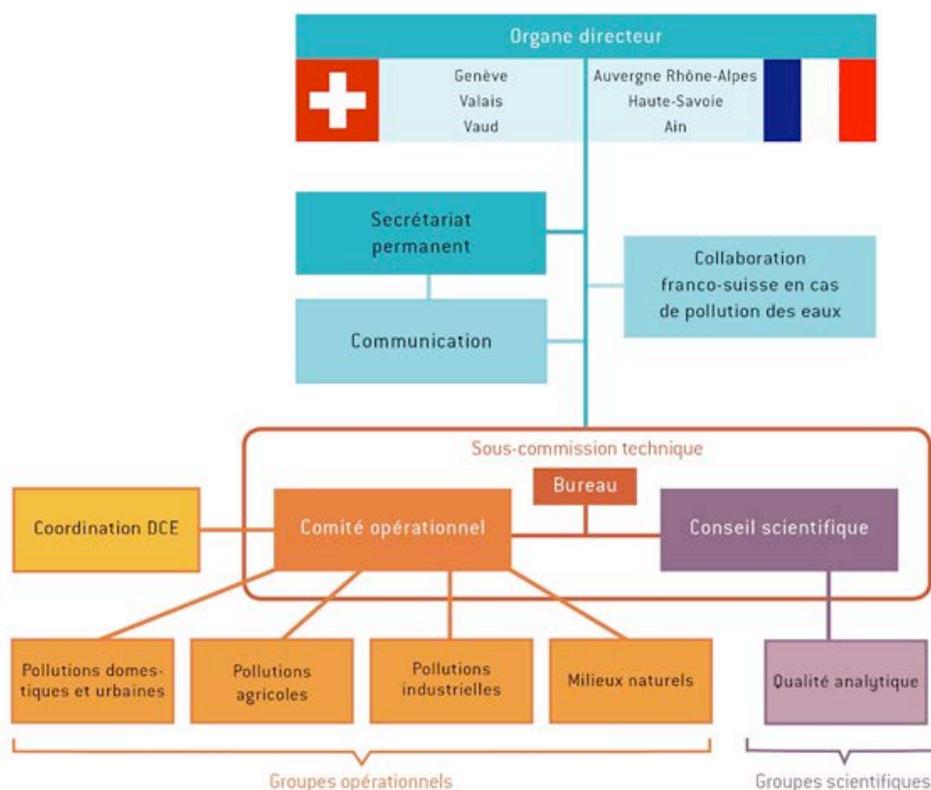


Figure 71 : Organisation de la CIPEL (CIPEL, 2014).

2) Gestion des grands lacs Nord-Américains

Les grands lacs américains, possédant une superficie de 745 600 km² et étendus sur plus de 244 100 km², alimentent 40 millions de personnes en eau potable. Depuis le 19^{ème} siècle, cet écosystème est menacé par l'évolution de l'économie des régions situées au bord des lacs comprenant les grandes villes telles que Chicago. Ainsi, depuis 1972, le Canada et les Etats-Unis ont établi « l'Accord relatif à la qualité des eaux des Grands Lacs », celui-ci est adapté en fonction des enjeux écologiques pesant sur les lacs.

Actuellement, et suivant « l'Accord relatif à la qualité des eaux des Grands Lacs », la gestion des grands lacs américains est réalisée par le CEGL (Comité Exécutif des Grands Lacs). C'est une collaboration canadienne et américaine créée pour maintenir la bonne qualité de l'eau des grands lacs transfrontaliers.

Le secrétariat binational du CEGL s'occupe de la bonne entente, de la bonne gestion et permet également de prioriser les attentes et les objectifs des deux pays. Divers comités en sont membres tels que : les représentants des gouvernements fédéraux, provinciaux, autochtones et municipaux. Ces comités ont priorisé dix thématiques de missions principales, confiées à des agences américaines et canadiennes. Celles-ci sont entourées de sous-comités et d'équipes de travail afin de mener à bien les différentes missions.

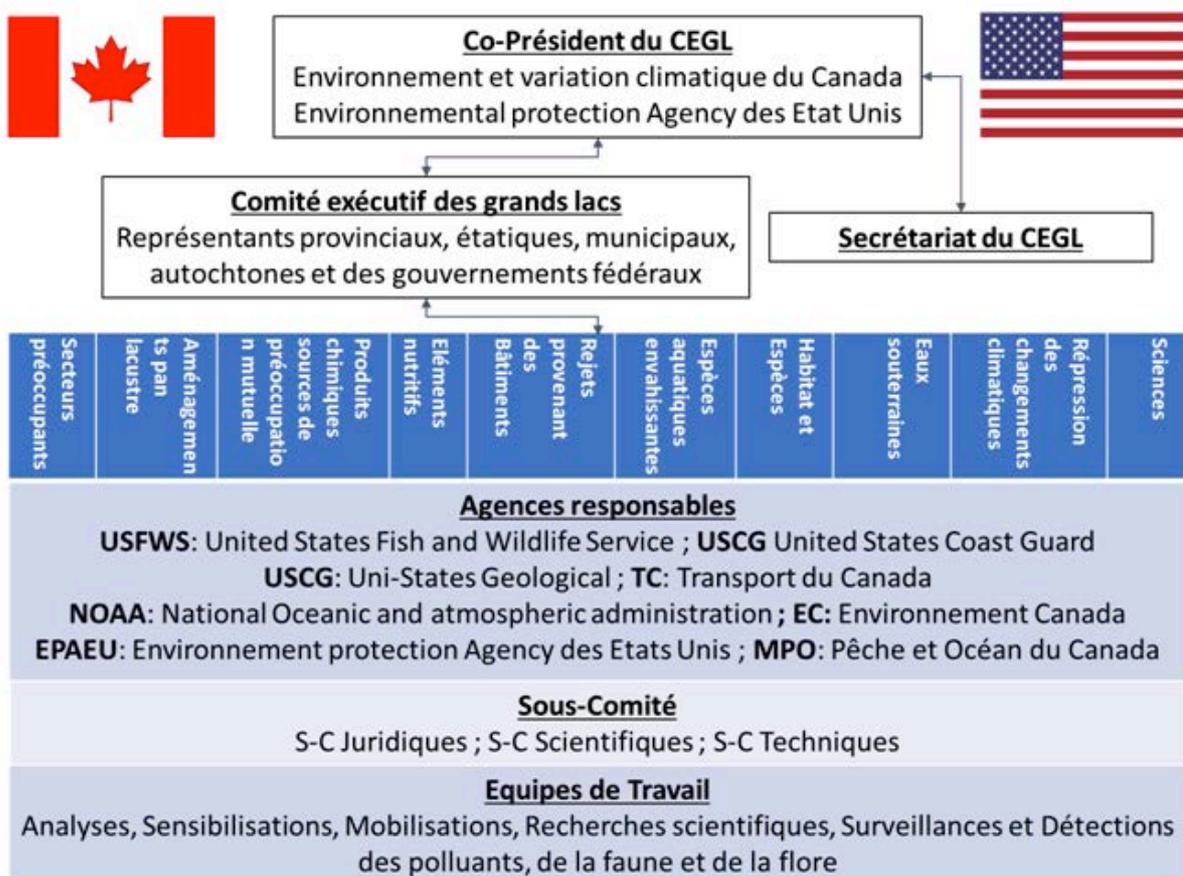


Figure 72 : CEGL Gestion des grands lacs américains (MJ'ecko, 2018).

3) Gestion du lac Tchad

Ace jour, le lac Tchad est un grand lac africain (4^e plus grand) avec une superficie actuelle de 2 000 km², contre 25 000 km² avant 1973. Il est partagé entre quatre pays transfrontaliers : le Tchad, le Niger, le Nigeria et le Cameroun. La population du bassin du lac Tchad est estimée à 37,2 millions d'habitants en 2003.

On retrouve sur le bord du lac d'importantes activités : de pêche, d'élevage, de transport fluvial, d'agriculture (avec de l'irrigation) et de tourisme (ex : safaris). Le lac Tchad rencontre de nombreux problèmes comme une baisse importante du niveau de l'eau, la salinisation de l'eau et l'intensification de la désertification dans un contexte de changement climatique. Ces problèmes impactent fortement les modes de vie des populations locales (ex : malnutrition).

Le lac est géré par la Commission du Bassin du Lac Tchad, créée le 22 mai 1964, par les quatre pays riverains du lac. La République centrafricaine a adhéré à l'organisation en 1996 et la Libye a été admise en 2008. La commission a pour but de gérer de manière durable et équitable le lac Tchad et les autres ressources en eaux partagées, de préserver les écosystèmes du bassin conventionnel du lac et de promouvoir l'intégration régionale, la paix et la sécurité dans l'ensemble du bassin.

La commission du bassin du lac Tchad est organisée en trois niveaux décisionnels :

1. Le sommet des chefs d'état qui est l'instance suprême de décision et d'orientation de la commission. Il se réunit une fois par an.
2. Le conseil des commissaires est l'instance de supervision et de contrôle de la commission. Il se réunit annuellement pour définir le budget et le programme de la commission. Il y a deux commissaires par état membre. Le conseil des commissaires peut également demander le soutien aux comités consultatifs (parties prenantes, bailleurs de fonds, etc)
3. Le secrétariat exécutif applique les décisions pour les deux acteurs précédents selon les principes directeurs définis entre les états membres. Il est divisé en deux directions générales, « administrative et finance » et « des opérations ». La direction générale des opérations a pour objectif d'apporter le soutien scientifique et technique au CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad, 2016).

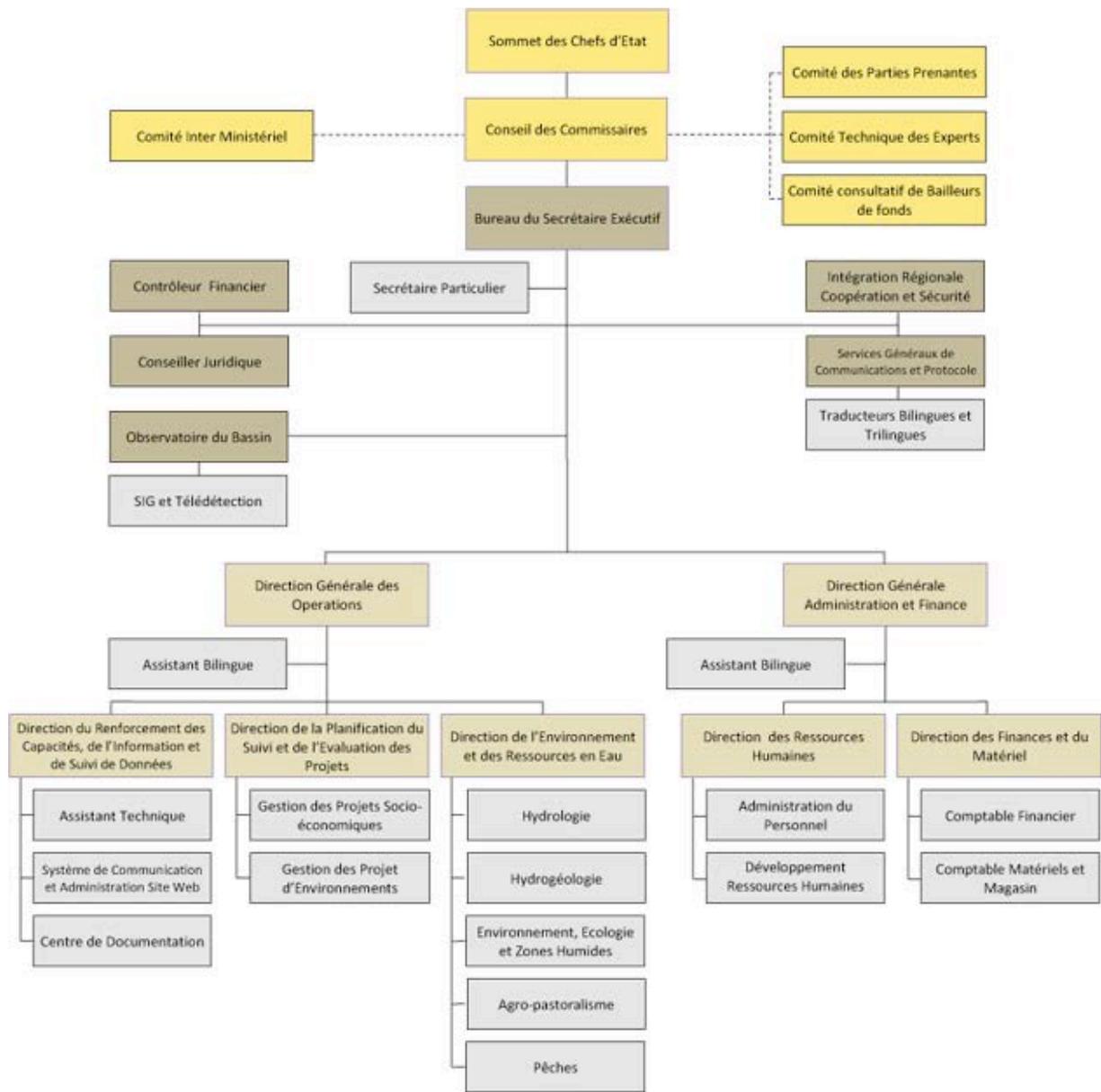


Figure 73 : Organigramme du Conseil du Bassin du Tchad (Commission du Bassin du Lac Tchad, 2016).

C- Proposition de gestion du Lac Titicaca

En s'inspirant de l'organisation de la CIPEL et en reprenant chacun des acteurs boliviens et péruviens agissant dans la gestion du lac, une organisation similaire comprenant un organe directeur, un secrétariat permanent de communication, un comité opérationnel et un conseil scientifique pourrait être envisageable.

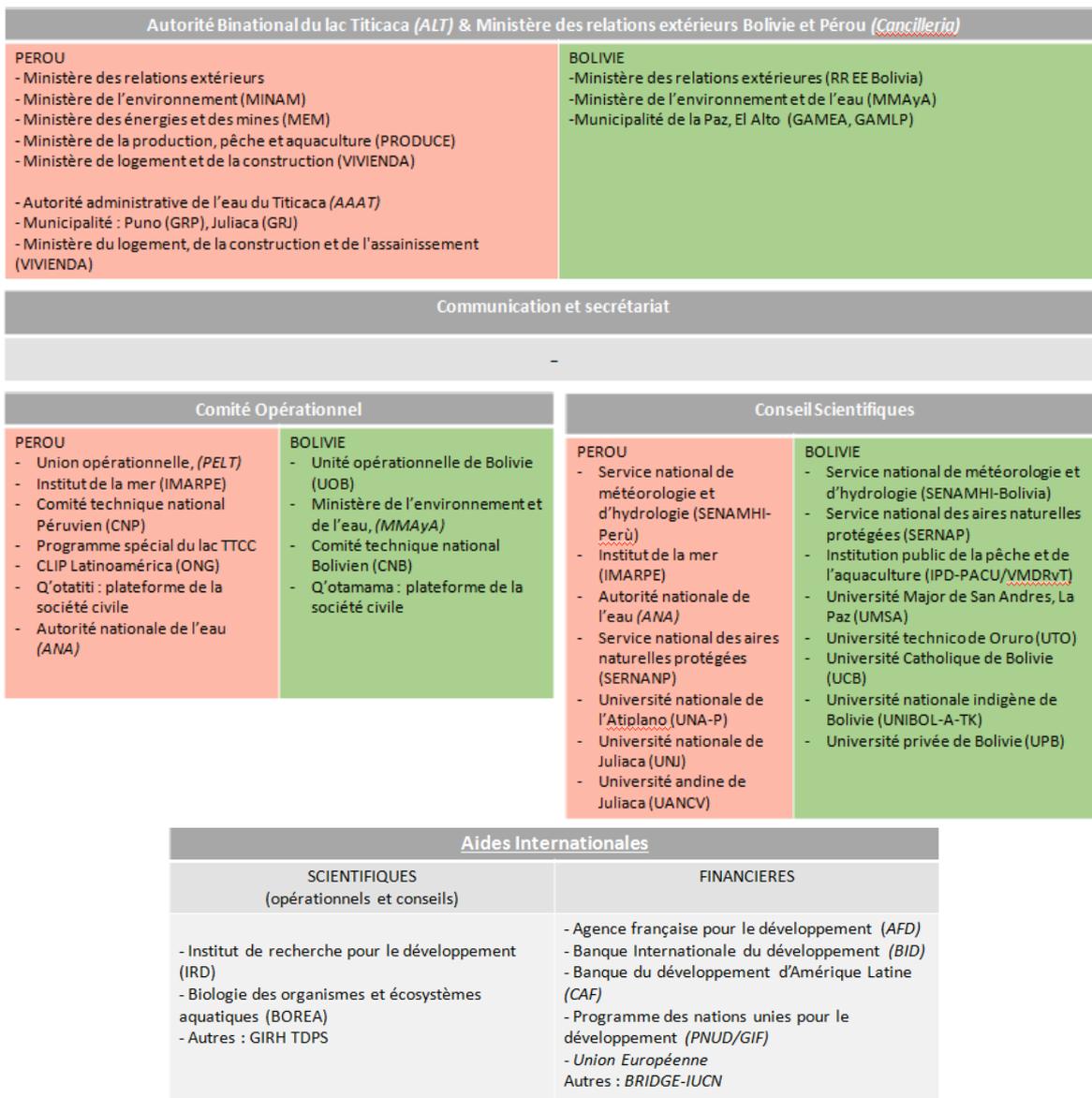


Figure 74 : Schéma de proposition de gestion pour le Lac Titicaca (MJ'Ecko, 2018).

En comparaison avec le schéma d'organisation de la CIPEL, on remarque que le pôle communication et secrétariat est inexistant. Ce dernier pourrait être utile pour centraliser les informations et favoriser la communication entre les deux pays. La mise en place de ce pôle devrait être envisagé afin d'optimiser les relations entre ces deux pays. L'objectif de bonnes ententes est de vouloir créer un projet sur du long terme. L'exploitation des ressources du lac doit être repensée afin que ce soit des objectifs et des cibles communes. Les organismes péruviens et boliviens doivent se concentrer sur des ambitions collectives. De plus, la gestion du lac Titicaca est soutenue par plusieurs acteurs internationaux (scientifiques et financiers) à la différence du lac Léman. Ces organismes internationaux sont des véritables appuis sur lequel l'ALT et l'OBLT peuvent compter. Les gestionnaires du lac devraient penser à une source de financement locale pour l'entretien du lac Titicaca sur du long terme.

FIN



L'équipe MJ'Ecko avec l'association Kota Titi sur les berges du Lac Titicaca (Février J, 2018)

Annexes :

Annexe 1 : Approche de Penman (Ramiro Pillco Zolá, et al, 2018) :

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - Q_{heat})}{\lambda \rho} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (a' + b'U)(e_s - e_a)$$

- E : référence évapotranspiration (mm/j),
- R_n : Radiation net de surface (MJ/m²/j),
- G : densité de flux de chaleur du sol (MJ/m²/j),
- T : Température de l'air à 2 mètres de hauteur (°C),
- U : Vitesse du vent à 2 mètres de hauteur (m/s),
- e_s : pression de vapeur saturante (kPa),
- e_a : pression de vapeur actuel (kPa),
- e_s-e_a : déficit de pression de vapeur saturante (kPa),
- Δ : courbe de pression de vapeur de la pente (kPa/°C),
- γ : constante psychrométrique (kPa/°C).

Détails des calculs :

$$e_a = (e_s * RH) / 100$$

$$RH_{mean} = 50 * e^0(T_{min}) / e^0(T_{max}) + 50.$$

$$e_s = (e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})) / 2$$

$$e^0 = 0,6108 \exp((17,27 * T) / T + 237,3)$$

$$\gamma = (C_p * P_a) / (0,622 * \lambda)$$

$$\Delta = \text{Doc hess (Table 4. Monthly average parameters for evaporation calculations for the 2015-2016 period)} - 127$$

$$\lambda = 2,487 * 10^6 - 2,132 * 10^3 * T_{air}$$

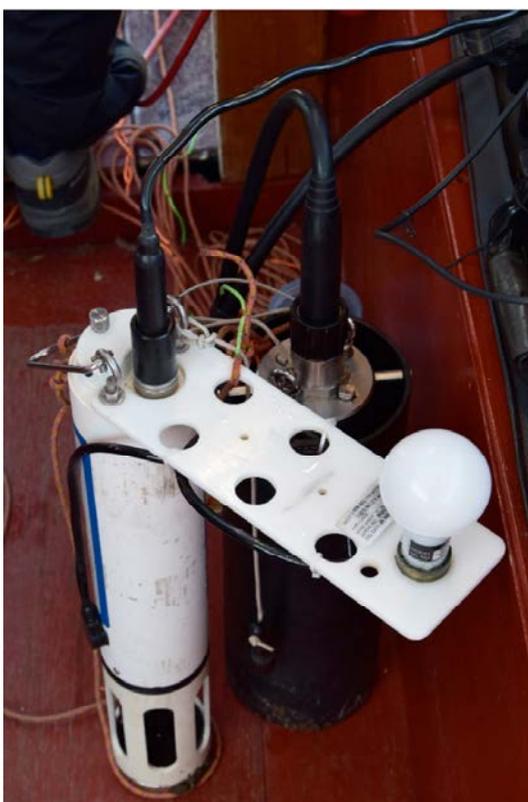
Annexe 2 : Photographies du matériel de terrain



*Bouteille à prélèvement d'eau de type Niskin
(photo J. Février, 2018)*



*Spectroradiomètre Biospherical de radiations UV-
PAR incidentes (photo J. Février, 2018)*



*À gauche : Sonde multiparamètre Hydrolab DS5 :
profondeur, température, pH, conductivité, OD et
%OD, turbidité et radiation solaire incidente
(LiCor PAR sphérique, 400-700 nm).*

*À droite : Sonde fluorimétrique Fluoroprobe BBE
pour la mesure de la concentration en
chlorophylle-a par classes d'agues :
Chlorophycées, Cryptophycées, Dinoflagellés et
Diatomées, et Cyanobactéries.*

(Photo J. Février, 2018)



Sonde spectroradiométrique immergeable Biospherical C-OPS pour la mesure de l'atténuation verticale de 8 longueurs d'onde entre UV-B, UV-A et PAR (Photo J. Février, 2018)



Centrale d'alimentation et d'acquisition Deckbox Biospherical (boîte jaune) et PC portable Panasonic Toughbook CF-19 pour le stockage et l'analyse des données d'atténuation verticale des radiations solaire UV-B, UV-A et PAR (Photo J. Février, 2018)



Profondimètre à main Plastimo (Photo J. Février, 2018)



Cages flottantes pour l'élevage des truites, Puno (Photo J. Février, 2018).

Bibliographie :

- Achá Cordero D., Quezada Portugal J., Guedron S., Sarret G., Point D. & Lazzaro X.**, 2015. Proyecto Piloto AWP 07-P-02: Técnicas de fitoremediación en cuerpos de agua afectados por aguas residuales domésticas. Proyecto Binacional GIRH TDPS PNUD/GEF, 15 p.
- Abdelly C.** 2007. Bioremédiation / Phytoremédiation, Tunis : Université de Tunis.
- Achá Cordero D., Portugal J.Q., Guedron S., Sarret G., Point D., Lazzaro X.** 2015. Evaluación para la fitoremediación de aguas contaminadas.
- Agence de l'Eau Loire-Bretagne.** 2016. Analyse selon les règles d'évaluation de l'Etat des Eaux : Résultats de l'année 2016.
- Agurto J. & Hurtado Mariño J.** 2015. Les « paquetazos normativos » ou paquets législatifs.
- ALT - Autoridad Binacional Autonoma del Lago Titicaca.** 2016. La ALT Gestor del TDPS, Una Cuenca Transfronteriza Compartida.
- ALT - Autoridad Binacional Autonoma del Lago Titicaca.** 2014. Programa SIGAR (Sistema Integral de Gestión de Aguas Residuales). Diagnóstico y Categorización de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el anillo Circunlacustre del Lago Titicaca.
- ALT - Autoridad Binacional Autonoma del Lago Titicaca.** 2009. Proyecto integral de gestión ambiental de residuos solidos en los municipios de Desaguadero (Peru – Bolivia).
- ANA.** 2017. Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca (132).
- ANA.** 1996. Evaluación de la contaminación en el lago Titicaca.
- Anderson C., Lafontaine N., Meunier P., Turgeon S.** 2007. Guide d'élaboration d'un plan directeur de bassin versant de lac et adoption de bonnes pratiques. Québec : Développement durable Environnement et Parcs. [2018/06/01]. www.mdelcc.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/cyanobacteries/guide_elaboration.pdf
- Anthelme F., Cavieres L.A., Dangles O.** 2014. Facilitation among plants in alpine environments in the face of climate change.
- Archundua D., Duwig C., Spadini L., Uzu G., Guédron S., Morel M.C., Cortez R., Ramos Ramos O., Chincheros J., Martins J.M.F.** 2017. How to uncontrolled urban expansion increases the contamination of the Titicaca Lake Bassin (El Alto, La Paz, Bolivia).
- Ascencio Costa N.L., Pineda Arce Latorre J.V.** 2010. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Puno.
- Baby V.** 1998. El Alto de La Paz, cité pauvre d'altitude au cœur de l'Amérique latine. [05/05/2018]. https://www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1998_num_27_2_1144
- Bachand C.** 1999. Les rejets d'azote et de phosphore par les bovins laitiers.
- Baignade naturelle et écologique.** Rôle et fonctionnement des plantes aquatiques. [13/07/2018]. <http://baignade-naturelle-tpe.e-monsite.com/pages/informations/role-et-fonctionnement-des-plantes-aquatiques.html>
- Banque mondiale.** 2018. Perspective monde. [04/09/2018]. <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=1&codeStat=SP.URB.TOTL.IN.ZS&codePays=BOL&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=1&codeStat2=x&codePays2=BO&optionsDetPeriodes=avecNomP>
- Barbieri F.L., Cournil A., Souza Sarkis J.E., Benefice E. & Gardon J.**, 2011. Hair Trace Elements Concentration to describe polymetallic mining waste exposure in Bolivian Altiplano. Biol. Trace Elem. Res. 139: 10-23.

- Beaugrand G. & Goberville E.** 2010. Conséquences des changements climatiques en milieu océanique. Gestion intégrée des zones côtières : risques et responsabilités. Hors-Série 8. Vertigo <https://journals.openedition.org/vertigo/10143#tocto1n10>
- Beveridge M.C.M.**, 1996. Cage Aquaculture. Fishing New Books Ltd. Farnham, U.K., 346 p.
- Bradley R.S., Keimig F.T. & Diaz H.F.**, 2004. Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. Geophysical Research Letters 31 ; L16210, doi:10.1029/2004GL020229
- Brenner T.** 1994. Las pesquerías de aguas continentales frías en América Latina. COPESCAL Documento Ocasional. No. 7. Roma, FAO. 1994. 32p. <http://www.fao.org/docrep/008/t4675s/T4675S04.htm#ch4>
- BID - Banco Interamericano de Desarrollo - Banque interaméricaine de développement.** 2014. La economía del cambio climático en el Estado Plurinacional de Bolivia.
- Boulangé B., Aquize J.E.** 1981. Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, 14 (4) : 269-287. [10/05/2018]. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:01812>
- Bustamante E. & Treviño H.**, 1977. Artes y métodos de pesca del “ispi” *Orestias* sp., en aguas someras y profundas del Lago Titicaca. IMARPE - Puno: 12 p.
- Cadier M.** 2016. Diversité des communautés phytoplanctoniques en relation avec les facteurs environnementaux en mer d'Iroise : approche par la modélisation 3D. France : Université de Bretagne Occidentale, 366 p. Thèse : Sciences de la mer.
- Capblancq J.** 1972. Phytoplancton et productivité primaire de quelques lacs d'altitude dans les pyrénées. *Annales de Limnologie*, 8 (3) : 231-321.
- Capriles J.M., Domic A.I., Hastorf C.A., Moore K.M.** 2014. Fishing and environmental change during the emergence of social complexity in the Lake Titicaca Basin. *Journal of Anthropological Archaeology*, 34 : 66-77.
- Carpenter S.R., Kitchell J.F.** 1992. Trophic Cascade and Biomanipulation: Interface of Research and Management. *Limnology and Oceanography*, 37 (1) : 208-213.
- Carter N.H., Viña A., Hull V., McConnell W.J., Axinn W., Ghimire D. & Liu J.** 2014. Coupled human and natural systems approach to wildlife research and conservation. *Ecology and Society* 19(3): 43.
- Charpina D., Paironb J.-C., Annesi-Maesano I., Caillaud D., De Blaye F., Dixsauf G., Housset g B., Meurice h J.-C., Roussel I., Zmirouj D., Delaval k P., Dalphin J.-C.** 2016. La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. PAPPEI et SPLF http://splf.fr/wp-content/uploads/2017/03/Pollution.RMR_.2016.pdf
- Chen Y.S., Beveridge M.C.M. & Telfer T.C.**, 1999. Physical characteristics of commercial pelleted Atlantic salmon feeds and consideration of implications for modeling of waste dispersion through sedimentation. *Aquaculture International* 7 : 89-100.
- Chura C.R., Hualpa H.M.** 2009. Desarrollo de la acuicultura en el Lago Titicaca (Perú). *Revista AquaTIC*, (31) : 6-19.
- CIPEL.** 2014. Commission internationale pour la protection des eaux du Léman. [10/06/2018]. <http://www.cipel.org/la-cipel/organisation/>
- Cochet L.** 2009. La sécurisation du sous-système d'approvisionnement en eau d'El Alto (Bolivie) à l'épreuve du climat. Grenoble, France : Université Pierre Mendès France, 93 p. Master « EIG » (GODI).
- Commission du Bassin du Lac Tchad.** 2016. Commission du Bassin du Lac Tchad. [11/07/2018]. www.cbtl.org/fr
- Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne.** 2015. Cause et conséquences sur la vie aquatique en eau douce. [09/05/2018]. <http://www.cseb-bretagne.fr/index.php/conferences/proliferation-de-phytoplancton-2015/154-1-4-causes-des-blooms-phytoplanctoniques-et-consequences-sur-la-vie-aquatique-en-eau-douce-m-bormans.html>

- CNRS - Centre National de Recherches Scientifiques.** Ecosystèmes aquatiques continentaux : eutrophisation. [11/07/2018]. <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/eutrophisat.html>
- CNRS - Centre National de Recherches Scientifiques.** 2018. Des robots pour mieux comprendre la floraison du phytoplancton. [12/07/2018]. <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/5389.htm>
- Cruz, R. C., Hualpa, H. M.** 2009. Desarrollo de la acuicultura en el Lago Titicaca (Peru). Revista AquaTIC n°31.
- CRAAQ – Centre de Référence en Agriculture Agroalimentaire du Québec.** 2003. Charges fertilisantes des effluents délevage.
- Dabouineau L., Lamy Y., Collas P.** 2015. Phytoremédiation et phytorestoration ou L'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. *Le Rôle d'eau*, **124** : 8-15.
- Dejoux C., Iltis A.** 1992. Lake Titicaca A Synthesis of Limnological Knowledge. Netherlands : Kluwer Academic Publishers. (Monographiae Biologicae, n. 68).
- Dejoux C.** 1994. Le Lac Titicaca. *La Recherche*, **25** (263) : 276- 284.
- Demoraes F.** 1998. Etude de l'évolution de l'agglomération de La Paz-El Alto depuis les vingt dernières années, compte tenu des contraintes environnementales du site. France : Université de Savoie, 63 p. Département géographie.
- Dillon P.J., Rigler F.H.** 1974 The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology and Oceanography* **19** : 767-773.
- Drenner R.W., Hambright K.D.** 1999. Biomanipulation of fish assemblage as a lake restoration technique. *Arch. Hydrobiol*, **146** : 129-165.
- Drenner R.W., Hambright K.D.** 2002. Piscivores, Trophic Cascades, and Lake Management. *TheScientificWorldJOURNAL*, **2** : 284-307.
- Durate Tejerina J.,** 2018. Distribución espacial de las totoras en el Lago Menor del Titicaca – Analisis multitemporal, propuesta de conservación. Perfil de Licenciatura, IIGEO/UMSA, La Paz, 9 p. Tutor : X. Lazzaro (IRD).
- Everett G.,** 1973. The rainbow trout *Salmo gairdneri* (Rich.) fishery of Lake Titicaca. *J. Fish. Biol.*, **5**: 429–440.
- Fenet H., Gomez E., Leclerc M., Casellas C.** 2006. Devenir des médicaments dans l'environnement. *Environnement, Risques & Santé*, **5** (4) : 243 - 247.
- Firmencich E.** 2015. Metodologia para la construccion de escenarios. [04/06/2018]. https://issuu.com/isnellybalza/docs/metodologia_para_la_construccion_de
- Fonturbel F.E.** 2008. Contaminacion ambiental y cultural en el lago Titikaka, estado actual y perspectivas.
- Fontúrbel F.E., Barbieri E., Herbas C., Barbieri F.L. & Gardon J.,** 2011. Indoor metallic pollution related to mining activity in the bolivian Altiplano. *Environmental Pollution* **159**: 2870-75.
- GEO Titicaca - Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).** 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico TITICACA-DESAGUADEROPOOPÓ-SALAR DE COIPASA (TDPS).
- Gestion.** 2014. Bolivia promulga nueva ley minera. [17/07/2018]. <https://gestion.pe/economia/bolivia-promulga-nueva-ley-minera-61445>
- Gomez C., Fernandez M., Garcia M.** 2009. Adaptation in agricultural systems to climate change in highlands of the Andes. *Earth and Environmental Science*, **6** (412022) : 41-12.
- Gonzales I.M., Roncal R.Z., Miranda A.P., Gotilla J.S.** 2007. Lake Titicaca case study. *Gonzales Roncal. UNESCO*, 30-31.
- Groga N.** 2012. Structure, fonctionnement et dynamique du phytoplancton dans le lac de Taabo (Côte d'Ivoire).
- Guédrón S., Point D., Achá D., Bouchet S., Baya P.A., Tessier E., Monperrus M., Molina C.I., Groleau C.I., Chauvaud C.I., Thebault J., Amice E., Alanoca L., Duwig C., Uzu G., Lazzaro X., Bertrand A.,**

- Bertrand S., Barbraud C., Delord K., Gibon F.M., Ibanez C., Flores M., Fernandez Saavedra P., Ezpinoza M.E., Heredia C., Rocha F., Zepita C. & Amouroux D.,** 2017. Mercury contamination level and speciation inventory in Lakes Titicaca & Uru-Uru (Bolivia): Current status and future trends. *Environmental Pollution* 231 : 262-270.
- Gulati R.D., van Donk E.V.** 2002. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration : state-of-the-art review. *Hydrobiologia*, **478** : 73-106.
- Hansson L.-A., Annadotter H., Bergman E., Hamrin S.F., Jeppesen E., Kairesalo T., Luokkanen E., Nilsson P.A., Søndergaard M., Strand J.** 1998. Biomanipulation as an application of food-chain theory: constraints, synthesis, and recommendations for temperate lakes. *Ecosystems* 1 : 558-574.
- Hoffmann D. & Requena C.** 2012. Bolivia en un mundo 4 grados mas caliente. La Paz, Bolivia : Instituto Boliviano de la Montana, 168 p.
- Hoffmann D. & Weggenmann D.** 2011. Climate change induced glacier retreat and risk management ; Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) in the Apolobamba mountain range, Bolivia.
- Hootsmans M.J.M. & Vermaat J.E.** 1991. Macrophytes, a key to understanding changes caused by eutrophication in shallow freshwater ecosystem. The Netherlands : International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, 1-5.
- IBNORCA,** 2010. Agua potable requisitos. Norma Boliviana NB 512. Carta Revisión ICS 13.060.20. MMAyA. Agua Potable Diciembre 2010, 20 p.
- IFREMER.** 2018. Equivalent habitant. [05/12/2018]. http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire/e/equivalent_habitant.
- IFREMER.** 2008. La farine de poissons et autres produits d'origine aquatique. [24/06/2018]. <http://aquaiculture.ifremer.fr/Fiches-d-information/Filiere-Poissons/La-farine-de-poisson-et-autres-produits-d-origine-aquatique>
- IMARPE., PELT.** 2015. Crucero de evaluación de recursos pesqueros y condiciones limnológicas del lago Titicaca - CR. 1407. Instituto del Mar del Perú, Project Binational Lake Titicaca, Peru : 16-20.
- INE.** 2018. Notas de prensa y monitoreo. [16.07.2018]. <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/tag/La%20Paz>.
- INE.** 2018. Población de El Alto alcanza a más de 922 mil habitantes. [16.07.2018]. <https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/3118-poblacion-de-el-alto-alcanza-a-mas-de-922-mil-habitantes>
- INE.** 2014. Población de El Alto alcanza a mas de 922 mil habitantes. [18/07/2018]. <https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/3118-poblacion-de-el-alto-alcanza-a-mas-de-922-mil-habitantes>
- INEI.** 1994. La actividad pecuaria regional y nacional. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0386/cap0409.htm
- INEI.** 2015. Población 2000 al 2015. [11/08/2018]. <https://proyectos.inei.gob.pe/web/poblacion/>
- INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática)** 2018. Primeros Resultados de los Censos Nacionales 2017.
- INRA., IFREMER., IRSTEA.** 2017. Eutrophisation, manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. [06/07/2018]. <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqué/5197.htm>.
- Instituto Boliviano de Comercio Exterior.** 2017. Cifras del comercio exterior Boliviano. Santa Cruz, Bolivia : CNDA, 4 p. (Comercio Exterior, n. 249)
- IRD - Institut de Recherche pour le Développement.** 2008. Biomasse et production phytoplanctonique. [12/07/2018]. <http://www.atolls-polynesie.ird.fr/fnatoll/prodphy.htm>
- Jeppesen E.** 1998. Ecology of Shallow lakes. Danemark : Ministry of Environment and Energy, p.21-23 [16/10/2018] http://www.dmu.dk/1_viden/2_publicationer/3_fagrappporter/rapporter/FR247.pdf

- Jeppesen E., Søndergaard M., Mazzeo N., Meerhoff M., Branco C.C., Huszar V., Scasso F.** 2005. Lake restoration and biomanipulation in temperate lakes: relevance for subtropical and tropical lakes.
- Jeppesen E., Søndergaard M., Lauridsen T.L., Davidson T.A., Liu Z., Mazzeo N., Trochine C., Özkan K., Jensen H.S., Trolle D., Starling F., Lazzaro X., Johansson L.S., Bjerring R., Liboriussen, Larsen S.E., Landkildehus F., Egemose S., Meerhoff M.** (2012) Biomanipulation as a Restoration Tool to Combat Eutrophication: *Recent Advances and Future Challenges*. *Advances in Ecological Research*, **67** : 411-488.
- JOAPE.** 2015. Agropecuario. 49 p. (Diagnosticos Sectoriales, n. 8).
- Keita M.** 2013. Evaluation environnementale comme outil de prévention et de gestion des risques : cas de l'exploitation de fer au Mali.
- Kolpin D.W., Furlong E.T., Meyer M.T., et al.** 1999-2000. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, a national reconnaissance. *Environ Sci Technol.* 2002 ; 36 : 1202 - 11.
- Kramer, D.B., Hartter J., Boag A.E., Jain M., Stevens K., Ann Nicholas K., McConnell W.J. & Liu J.** 2017. Top 40 questions in coupled human and natural systems (CHANS) research. *Ecology and Society* 22(2): 44.
- Kuypers M.** 2009. Impacts de l'aquaculture de saumon sur l'environnement et analyse des politiques de gestion. Bruxelles, Belgique : Université libre de Bruxelles, 85. Master en Sciences et Gestion de l'Environnement.
- La Nacion.** 2014. Bolivia pone en vigor nueva ley minera. [17/07/2018]. <https://www.nacion.com/el-mundo/bolivia-pone-en-vigor-nueva-ley-minera/GPXNKKRMOJEBHILJ4EKBZ7UP5I/story/>
- Lanza W.G., Achá D., Point D., Masbou J., Alanoca L., Amouroux D. & Lazzaro X.,** 2017. Accumulation in Periphyton of a Tropical High-Altitude Andean Lake. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 72:1–10.
- Larec A., Mathé F.** 2016. La phytoremédiation. *Défis du CEA*, (208). [2018/05/08]. <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/posters/defis-du-CEA-infographie-phytoremediation.pdf>
- Lauzanne L.** sd Especies nativas los orestias. 415-420. [2018/07/17]. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-10/36638.pdf
- Lazard J.** 2017. Les systèmes aquacoles face au changement climatique.
- Lazzaro X.** 1981. Biomasses, peuplements phytoplanctoniques et production primaire du lac Titicaca.
- Lazzaro X.** 1997. Do the trophic cascade hypothesis and classical biomanipulation apply to tropical lakes and reservoirs ? *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26 : 719-730.
- Lazzaro X., Bouvy M., Ribeiro Filho RA., Oliveira VS., Sales LT., Vasconcelors ARM., Mata MR.** 2003. Do fish regulate phytoplankton in shallow eutrophic Northeast Brazilian reservoirs?
- Lazzaro X.** 2009. Rôle structurant des poissons filtreurs omnivores sur la dynamique des communautés planctoniques et les efflorescences dans les lacs tropicaux peu profonds. Université Pierre & Marie Curie (UPMC) - Paris 6, France : IRD.
- Lazzaro X., Pagano M., Corbin D., Carré C., Dione B., Ndour E.H., Lacroix G., Danger M., Benest D., Mériguet J., Oumarou C.** 2010. Eutrophisation, cyanobactéries et biomanipulations : approches expérimentales en lacs tropicaux peu profonds. Cochabamba, Bolivie : Universidad Mayor de San Simon (UMSS).
- Lazzaro X.** 2016. L'Observatoire Binational du Lac Titicaca (OBLT). [05/08/2018]. <https://borea.mnhn.fr/fr/OBLT>
- Lazzaro X., Lanza W.G., Alcoreza M.P., Flores A.J., Fernández L.A., Fernández P.E., Loayza E.Z. & Ibáñez C.,** 2017. Análisis e interpretación de los resultados de la expedición científica de evaluación de las características limnológicas y ecológicas del Lago Menor del Titicaca (programa ECERP, Agosto

- 2016). VRHR/MMAyA, Instituto de Ecología de la UMSA, Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD – Francia ; UMR BOREA). La Paz, Bolivia, Mayo 2017, 90 p.
- Lazzaro X., Starling F.** 2005. Biomanipulation to control eutrophication in a shallow tropical urban reservoir (Lago Paranoá, Brazil). *Reddy V. (Ed.) Restoration and Management of Tropical Eutrophic Lakes. Science Publishers Inc* : 361-387.
- Lenntech.** 2018. Water treatment. [17/06/2018]. <https://www.lenntech.fr/eutrophisation/eutrophisation-effets.htm>.
- Levi Y.** 2006. Inquiétudes sur la présence d'antibiotiques et de bactéries antibiorésistantes dans les eaux. *Environnement, Risques & Santé*, 5 (4) : 261 - 265.
- Le Roux S.** 2018. Le poisson fuit les zones d'oxygène. Ouest-France. Agriculture-Marine. Le marin.
- Liu J. et al.,** 2007. Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science* 317 : 1513-1516.
- Manjón C.A.A.** 2006. Determinacion de metales pesados en plantas acuaticas de la parte norte y noreste de la cuenca del lago Poopo. La Paz, Bolivia : Universidad Mayor de San Andres, 76-78.
- Martinez A.E., Aranibar D.F. & Gutierrez E.R.,** 2006. An assessment of the abundance and distribution of the Titicaca Flightless Grebe *Rollandia microptera* on Lake Titicaca and evaluation of its conservation status. *Bird Conservation International* 16: 237–251.
- Ministerio de agricultura y riego.** 2017. Boletín estadístico de la producción agrícola y ganadera 2017. [06/07/2018]. http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/boletines/prod-agricola-ganadera/prod-agricola-ganadera-ii-trimestre2017_041017.pdf
- Meijer M.L., deBoois I., Scheffer M., Portielje R., Hoeser H.** 1999. Biomanipulation in shallow lakes in Netherlands: an evaluation of 18 case studies. *Hydrobiologia* **408/409** : 13-30.
- Ministerio de Salud,** 2011. Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D.S. N° 031-2010-SA / Ministerio de Salud. Dirección General de Salud Ambiental, Lima, Perú, 44 p.
- Molina C.I., Gibon F.-M., Pinto J. & Rosales C.,** 2008. Estructura de macroinvertebrados acuáticos en un río altoandino de la cordillera real, Bolivia: variación anual y longitudinal en relación a factores ambientales. *Ecología Aplicada* 7:105-116.
- Molina C., Ibañez C., Gibon F.M.,** 2012. Biomagnification process of heavy metals of a hiperhaline lake (Poopó, Oruro, Bolivia): risks to consumer health. *Ecología en Bolivia* 47: 1605-2528.
- Mongabay.** 2016. Bolivia: Mas de 130 toneladas de mercurio son emitidas por año. [13/07/2018]. <https://es.mongabay.com/2016/12/bolivia-mineria-mercurio-contaminacion/>
- Monroy M.** 2017. Investigador tadeista halla metales toxicos en aguas y peces del lago Titicaca. [30/06/2018]. <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/expeditio/264566/investigador-tadeista-halla-metales-toxicos-en-aguas-y-peces-del-lago-Titicaca>
- Monroy M., Maceda-Veiga A. & de Sostoa A.,** 2014. Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern. *Science of the Total Environment* 487 : 233–244.
- Moya N., Gibon F.-M., Oberdorff T., Rosales C. & Dominguez E.** 2009. Comparación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en ríos intermitentes y permanentes del altiplano boliviano : implicaciones para el futuro cambio climático. *Ecología Aplicada*, 8:105-114.
- Moya N., Hughes R.M., Domínguez E., Gibon F.-M., Goitia E. & Oberdorff T.,** 2011. Macroinvertebrate-based multimetric predictive models for evaluating the human impact on biotic condition of Bolivian streams. *Ecological Indicators* 11:840-7.
- Ocola Salazar J.J., Laqui Vilca W.F. & Fermin W.,** 2017 Fuentes contaminantes en la cuenca del lago Titicaca : un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca. El Palomar, Lima : ANA, 188 p. (Calle Diecisiete, n. 355)

- Olin M., Rask M., Ruuhijarvi J., Keskitalo J., Horppila J., Tallberg P., Taponen T., Lehtovaara A., Sammalkorpi I.** 2006. Effects of biomanipulation of fish and plankton communities in ten eutrophic lakes of southern Finland. *Hydrobiologia* **553** : 67-68.
- Ortelli D., Edder P., Rappin F., Ramseier S.** 2010. Métaux et micropolluants organiques dans les rivières et les eaux du Léman. Campagne 2010, 2011, 65 - 86 p.
- Orzag V.** 2018. Agronome - *Communication personnelle*.
- Patzi Saire B.** 2013. Tesis de grado, evaluacion de dos tipos de alimentos en alevinos de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), en estanques en la comunidad.
- Perez O.M., Telfer T.C., Beveridge M.C.M. & Ross L.G.,** 2002. Geographical Information Systems (GIS) as a simple tool to aid modelling of particulate waste distribution at marine fish cage sites. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **54** : 761-768.
- Petit J.** 1991. L'aquaculture : un problème pour l'environnement ? *INRA Productions animales*, **4** (1) : 67-80.
- Peyraud J., Vérité R., Delaby L.** 1995. Rejets azotés chez la vache laitière : effets du type d'alimentation et du niveau de production des animaux.
- Pillco Zolá R., et al.** 2018. Modeling Lake Titicaca Daily and Monthly Evaporation. 8 p.
- Pillco Zola R., Bengtsson L., Berndtsson R., Horst P., Canedo C., Mollericon L.** 2016. Climate changes scenarios impact on the lakes of TPDS – Poopo and Titicaca. Bolivie : Universidad Mayor de San Andres, Suecia : Universidad de Lund. 15 p.
- Pinel-Alloul B., Mazumder A., Lacroix G. & Lazzaro X.,** 1998. Les réseaux trophiques lacustres : structure, fonctionnement, interactions et variations spatio-temporelles. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° spécial : 163-197.
- PNUMA -Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.** 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico TITICACA-DESAGUADEROPOOPÓ-SALAR DE COIPASA (TDPS) - GEO Titicaca.
- Quéguiner B.** 2013. Structure et Fonctionnement des Ecosystèmes Pélagiques Marins. Centre d'Océanologie de Marseille : Aix-Marseille Université, 93 p.
- Quenta Herrera E.** 2017. Structure multi-échelles de la biodiversité aquatique d'écosystèmes alpines sous l'influence du changement climatique. Tours, France : Université François-Rablais, 160 p. Thèse (écologie).
- Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Cáceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J.-E., Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Ménégoz M., Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M. & Wagnon P.,** 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, **7** : 81–102.
- Ramseier Gentile S., Edder P., Loizeau J.L.** 2013. Polluants émergents ; stratégie de surveillance de la contamination des eaux de surface et implications pour le traitement des eaux potables. Cas du Léman. Genève, Suisse : Archives des sciences. 173 - 174 p.
- Réalité Minière.** 2012. Les sociétés canadiennes exerçant des activités à l'étranger sont-elles soumises à une réglementation environnementale plus laxiste?. [17/07/2018]. <https://www.miningfacts.org/Environnement/Les-societes-canadiennes-exercent-des-activites-a-letranger-sont-elles-soumises-a-une-reglementation-environnementale-plus-laxiste/>
- Redfield A.C.,** 1934. On the proportions of organic derivatives in the sea water and their relation to the composition of plankton. In : James Johnstone Memorial Volume, ed. Daniel R. J., editor. (Liverpool: University Press of Liverpool), 176–192.
- Redfield A.C.,** 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* **46** : 205–221.
- Revollo Vargas M.F., Liberman Cruz M., Lescano Rivero A.** 2003. Lake Titicaca, management experience and lessons learned. <http://www.worldlakes.org/uploads/Titicaca%2012.03.pdf>

- Revollo Vargas M.F., Liberman Cruz M., Lescano Rivero A.** 2006. Lake Titicaca. *Experience and Lessons Learned Brief*, 377-387.
- Ruiz-Castell M., Carsin A.E., Barbieri F.L., Paco P., Gardon J. & Sunyer J.**, 2013. Child patterns of growth delay and cognitive development in a bolivian mining city. *Am. J. Hum. Biol.* 25: 94-100.
- Sakamoto M.** 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Arch. Hydrobiol.* 62: 1-28.
- Salas R., Macnaughton Alison.** 2015. Amélioration de la gouvernance du secteur piscicole dans le bassin amazonien de la Bolivie.
- Samia K.** Caractérisation des micropolluants organiques (perturbateurs endocriniens) et minéraux contenus dans les eaux résiduaires brutes et traitées des stations d'épuration de la région d'Alger. Elimination de ces micropolluants par procédé d'adsorption et pa (Doctoral dissertation, Université Saad Dahlad de Blida 1).
- Scheffer M.**, 1998. Ecology of shallow lake. Springer, 357 p.
- Scheffer, M.** 2009. Critical transitions in nature and society. Princeton University Press, 387 p.
- Scheffer, M.** 2010. Foreseeing tipping points. *Nature* 467 : 411-412.
- Scheffer M., Carpenter S.R.** 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 18 (12) : 648-656.
- Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C. & Walker B.**, 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413 : 591-596.
- Scheffer M. & Jeppesen E.**, 1997. Alternative stable states. In : Jeppesen E., Søndergaard M., Søndergaard, Christoffersen K. (eds.). The structuring role of submerged macrophytes. Springer, 423 p.
- Scheffer M., Houser S.H., Meijer M.-L., Moss B. & Jeppesen E.**, 1993. Alternative equilibria in shallow lakes. *TREE* 8 : 275-279.
- Schindler D.W., Armstrong F.A.J., Holmgren S.K., Brunskill G.J.** 1971. Eutrophication of Lake 227, Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 28: 1763-1782.
- Sebastian K., Herzog Rodney Martinez Peter M., Jørgensen Holm Tiessen.** 2011. Climate Change: Evidence and Future Scenarios for the Andean Region.
- Seibel B.A.** 2011. Critical oxygen levels and metabolic suppression in oceanic oxygen minimum zones.
- SEMANAeconomica.** 2017. Ejecutivo aprobó decreto que modifica la Ley General de Minería. [17/07/2018]. <http://semanaeconomica.com/article/sectores-y-empresas/mineria/208703-ejecutivo-aprobo-decreto-que-modifica-la-ley-general-de-mineria/>
- Somos Sur.** 2014. Ley Minera: Análisis para una decisión soberana. [17/07/2018]. <https://www.somossur.net/bolivia/40-economia/mineria-en-bolivia/1361-analisis.html>
- Soulier C., Gabet V., Lardy S., Lemenach K., Pardon P., Esperanza M., Miede C., Choubert J.-M., Martin S., Bruchet A., Coquery M., Budzinski H.** 2011. Zoom sur les substances pharmaceutiques : présence, partition, devenir en station d'épuration. *TSM/Astee*, 63 - 77 p. (TSM numéro 1/2, 106e année).
- Starling F., Lazzaro X., Cavalcanti C. & Moreira R.**, 2002. Contribution of omnivorous tilapia to eutrophication of a shallow tropical reservoir: evidence from a fish kill. *Freshwater Biology* 47 : 2443–2452.
- Sterner R.W., Elser J.J.** 2002. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. *Princeton University Press*, 464 p.
- Terrazas V.W.**, 1966. Problemas de conservación de los recursos pesqueros de Bolivia. Ministerio de Agricultura., La Paz, Bolivia.
- Terrazas E. M., et al.** 2017. Determinación interactiva de metales totales en las aguas de la bahía interior del Lago Titicaca- Puno Peru. Artículo original, vol 19 n°2 : 125 – 134.

- Testard P.** 2013. Rôle des macrophytes littoraux dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres. [12/07/2018]. <http://baladesnaturalistes.hautefort.com/archive/2013/02/20/macrophytes-littoraux-et-ecosystemes-lacustres.html>
- Tomanova S., Moya N. & Oberdorff T.,** 2008. Using macroinvertebrate biological traits for assessing biotic integrity of Neotropical streams. *Riv. Res. Appl.* 24:12301239.
- Urquieta P.,** 2014. Los desafíos de las ciudades vulnerables. Construcción de ciudad y co-gestión del riesgo entre Estado y sociedad. *Bulletin de l'Institut français d'études andines* 43(3) : Políticas de vivienda posdesastres en América Latina.
- UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement Durable).** 2008. La Pompe Biologique - processus d'adsorption de CO₂ par le phytoplancton. [12/07/2018]. http://www.cima.ualg.pt/piloto/UVED_Geochimie/UVED/site/html/2/2-3/2-3-1/2-3-2-4.html
- Vaessen V., Brentführer R.** 2015. Évaluation des besoins et du cadre de gestion des eaux souterraines dans les organisations de bassins transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, CapNet, RAOB, et IGRAC. Hannover, Allemagne : GmbH, 7-11.
- Villeneuve C.** 2015. Vivre les changements climatiques. University of Québec. Chicoutimi <https://www.researchgate.net/publication/267260292>
- Vuille M., Carey M., Huggel C., Buytaert W., Rabatele A., Jacobsen D., Soruco A., Villacis M., Yarleque C., Elison Timma O., Condom T., Salzmänn N. & Sicart J.-E.,** 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews* 176 : 195–213.
- Walker B. & Meyers J.A.,** 2004. Thresholds in Ecological and Social–Ecological Systems: a Developing Database. *Ecology and Society* 9: 3 ; <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art3/>