



Décembre 2011

ÉTUDE ECOLOGIQUE RELATIVE AU RETABLISSEMENT D'UN MARNAGE SUR LE LAC D'ANNECY



Vanne clapet du canal du Thiou



Marais de l'Enfer

Etude réalisée avec le soutien financier de :



Assistance au pilotage de l'étude et validation scientifique : Professeur G. Blake

Préambule

La stabilisation du niveau du Lac d'Annecy, par la régulation des débits des canaux du Thiou et du Vassé, a été identifiée comme un des facteurs responsables de la régression des roselières au cours du XX^{ème} siècle. Dans ce contexte et faisant suite aux différentes études réalisées depuis 2007, le SILA a initié une réflexion sur l'opportunité de modifier la gestion du niveau du Lac à des fins environnementales. C'est l'objectif du présent document qui se décompose en quatre modules principaux :

- Module 1 : Caractérisation de l'hydrologie du Lac et de sa gestion hydraulique.
- Module 2 : Synthèse bibliographique des expériences menées en termes de marnage ayant pour objectif une amélioration des herbiers d'hélophytes en général et de phragmitaie en particulier.
- Module 3 : Détermination des relations entre niveaux du Lac et la mise en eau des secteurs de roselières.
- Module 4 : Proposition et étude des impacts de différents scénarii de gestion hydraulique du Lac d'Annecy en utilisant en particulier les résultats des modules 1 et 3.

Ce dossier a été réalisé par les personnes suivantes :

- Muriel Haond (CNR) - module 1 : § 1, §2, §5, §6, §7, §8,
- Laurent Bourgoïn (SAGE Environnement) : module 1 : § 3 et § 4, modules 2, 3 et 4,
- Solène Nozay (SAGE Environnement) : module 2,
- Christophe Moiroud (CNR) : conseiller technique pour les modules 3 et 4.

Ont également participé à la réalisation des relevés topographiques de terrain nécessaires à la mise en œuvre du module 3 :

- Pierre Yves Mevellec (SAGE Environnement),
- Julien Lechanoine (SAGE Environnement),
- Camille Banne (SAGE Environnement),
- Jean Baptiste Fortin (SAGE Environnement),
- Franck Auger (SAGE Environnement)
- Laurent Bourgoïn (SAGE Environnement).

SOMMAIRE

MODULE 1

1	OBJECTIFS DU MODULE	11
2	PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT	11
3	REGULATION DU LAC D'ANNECY	12
3.1	HISTORIQUE	12
3.1.1	Les premiers travaux.....	12
3.1.2	Le projet de Sadi Carnot	13
3.2	LA REGULATION ACTUELLE	13
4	LES OUVRAGES ET LES METHODES DE REGULATION	14
4.1	LES OUVRAGES	14
4.2	METHODES DE REGULATION	16
4.3	ACTIVITES DEPENDANTES DU THIOU	16
5	HYDROLOGIE ET BILAN HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU LAC D'ANNECY	18
5.1	DONNEES CLIMATIQUES	18
5.1.1	Pluviométrie au droit du Lac.....	18
5.1.2	Température	21
5.2	DONNEES HYDROMETRIQUES	22
5.2.1	Affluents instrumentés	22
5.2.2	Emissaires du Lac	28
5.3	EVAPORATION AU DROIT DU LAC	31
5.4	PRELEVEMENTS POUR ACTIVITES HUMAINES	32
5.5	FORMULATION DU BILAN HYDRIQUE	34
6	ANALYSE DES CHRONIQUES DE NIVEAU	37
6.1	HISTORIQUE DE LA REGULATION DU LAC	37
6.2	EVOLUTION DU NIVEAU MOYEN DE LA RETENUE ET DU MARNAGE ANNUEL	37
6.2.1	Niveau moyen annuel du Lac.....	37
6.2.2	Niveau moyen mensuel	38
6.2.3	Niveau moyen journalier	42
6.3	ETUDE DES EXTREMES	44
6.3.1	Recensement des extrêmes.....	44
6.3.2	Dates d'observation des extrêmes	45
6.3.3	Recensement des débordements extrêmes	46
7	SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU LAC EN REGIME NATUREL	48
7.1	COURBES DE TARAGE DES EMISSAIRES EN ECOULEMENT LIBRE	48
7.1.1	Emissaire du Thiou :	48
7.1.2	Emissaire du canal du Vassé	49
7.1.3	Courbe de tarage des émissaires	50
7.2	COURBE DE CAPACITE DU LAC	51
7.3	SIMULATION DU NIVEAU DU LAC EN REGIME NATUREL ET SOUS CONDITIONS CLIMATIQUES ACTUELLES	52
7.4	SIMULATION DU NIVEAU DU LAC EN REGIME NATUREL AVEC HYPOTHESES DE CONDITIONS CLIMATIQUES A HORIZON 2050	53
8	CONCLUSION DU MODULE 1.....	57

MODULE 2

1	REMARQUES	58
2	SYNTHESE.....	58

MODULE 3

1	METHODOLOGIE	67
1.1	ELABORATION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN	67
1.2	LES SIMULATIONS D'EXONDATIONS- INONDATIONS	67
2	RESULTATS ET COMMENTAIRES.....	70
2.1	SIMULATIONS DE HAUSSES DU NIVEAU DU LAC.....	70
2.2	SIMULATIONS DE BAISES DU NIVEAU DU LAC	72
2.3	CONCLUSION.....	78

MODULE 4

1	DONNEES ECOLOGIQUES SUR LE ROSEAU ET EFFETS DU NIVEAU DES EAUX SUR SON DEVELOPPEMENT ..	83
1.1	PHENOLOGIE DU ROSEAU (<i>PHRAGMITES AUSTRALIS</i>)	83
1.2	FICHE D'IDENTITE D'UNE ROSELIERE AQUATIQUE.....	84
1.3	FACTEURS INFLUENÇANT L'EVOLUTION DES ROSELIERES	85
1.4	AUGMENTATION/BAISSE DU NIVEAU DES EAUX	85
2	L'AVIFAUNE.....	87
3	LE CASTOR.....	88
4	LES ODONATES.....	89
5	PEUPLEMENT PISCICOLE DU LAC D'ANNECY	90
5.1	DONNEES DE CADRAGE DISPONIBLES	90
5.2	CARACTERISTIQUES ET REPARTITION DU PEUPLEMENT PISCICOLE EN ZONE LITTORALE.....	91
5.3	GROUPES D'ESPECES POTENTIELLEMENT INFLUENCEES.....	93
6	DEFINITION DES SCENARII HYDROLOGIQUES ET EVALUATION DE LEUR FAISABILITE TECHNIQUE	93
6.1	SCENARIO N°1 - TYPE « CONDITIONS PRIVILEGIEES POUR LE ROSEAU»	94
6.2	SCENARIO N°2 - TYPE EVOLUTION « REGIME NATUREL » APPLIQUEE AUX CONDITIONS ACTUELLES.....	96
6.3	SCENARIO N°3 CONSTRUIT A PARTIR DE LA COURBE DE NIVEAUX SIMULEE A L'HORIZON 2050 MAIS APPLIQUEE (EN PARTIE) AUX CONDITIONS DE REGULATION ET CLIMATIQUES ACTUELLES	97
6.4	TABLEAU DE SYNTHESE DES TROIS SCENARII	99
7	LES IMPACTS ENVISAGES	100
7.1	SCENARIO 1	100
7.1.1	La roselière aquatique	100
7.1.2	Les oiseaux.....	106
7.1.3	Le castor.....	107
7.1.4	Les odonates.....	107
7.1.5	L'ichtyofaune	108
7.1.6	Les sédiments	110
7.2	SCENARIO 2	111
7.2.1	La végétation	111
7.2.2	La faune	112
7.2.3	Les sédiments	117
7.3	SCENARIO 3	117
7.3.1	La végétation	117
7.3.2	La faune	123

7.3.3	Les sédiments	123
7.4	LES INDICATEURS A SUIVRE	124
8	CONCLUSION	127
9	FICHES DE SYNTHESE	129

RESUME DE L'ETUDE

126

Liste des figures

MODULE 1

figure 1	Courbes hypsométriques – affluents du Lac d'Annecy	12
figure 2	Localisation des exutoires du Lac et des micros centrales	15
figure 3	Pluviométrie de l'année hydrologique 1966-1967 – source ORSTOM [4]	19
figure 4	Précipitations mensuelles, période 1976 -2010 – Lac d'Annecy	20
figure 5	Précipitations annuelles – Cran-Gévrier	20
figure 6	Température moyenne annuelle °C , période 1976 – 2010 – Cran Gévrier	21
figure 7	Débits moyens mensuels spécifiques – affluents instrumentés	23
figure 8	Ajustement de Gumbel – station de la Bornette à Lathuile	25
figure 9	Répartition saisonnières des crues extrêmes – affluents du Lac d'Annecy	27
figure 10	Chronique des débits annuels du Thiou et du canal du Vassé, 1967 - 2010	29
figure 11	Evolution des débits mensuels du Thiou et du canal du Vassé	29
figure 12	Coefficients mensuels des débits sortants et des apports instrumentés	30
figure 13	Répartition saisonnière des crues extrêmes des canaux d'Annecy	31
figure 14	Evaporation mensuelle – retenue du Lac d'Annecy	32
figure 15	Evolution des prélèvements annuels pour activités humaines – pompage d'Annecy	34
figure 16	Lames d'eau écoulées trimestrielles (mm) – BV d'Annecy	35
figure 17	Evolution du niveau moyen annuel du Lac d'Annecy pour différentes périodes historiques	38
figure 18	Evolution mensuelle du niveau du Lac d'Annecy – début du XX ^{ème} Siècle	39
figure 19	Evolution mensuelle des débits et précipitations - Lac d'Annecy – début du XX ^{ème} Siècle	40
figure 20	Evolution des niveaux mensuels du Lac d'Annecy pour différentes périodes	41
figure 21	Evolution des niveaux extrêmes mensuels du Lac d'Annecy pour différentes périodes historiques .	42
figure 22	Evolution des niveaux journaliers du Lac d'Annecy pour différentes périodes	43
figure 23	Chroniques historiques des cotes extrêmes annuelles	44
figure 24	Répartition des cotes maxima annuelles en fonction du régime hydraulique du Lac d'Annecy naturel ou influencé	45
figure 25	Répartition des cotes minima annuelles en fonction du régime hydraulique du Lac d'Annecy naturel ou influencé	46
figure 26	Recensement des cotes extrêmes du Lac : supérieures à 1m30 / zéro de l'échelle du Pont de la Halle	47
figure 27	Recensement des étiages extrêmes du Lac : inférieurs ou égaux à 40 cm / zéro de l'échelle du Pont de la Halle	47
figure 28	Courbe de tarage écoulement libre – canal du Thiou	49
figure 29	Courbe de tarage écoulement libre – canal du Vassé	50
figure 30	Courbe de tarage – Emissaires du Lac d'Annecy en écoulement libre	51
figure 31	Courbe de capacité du Lac d'Annecy - source Orstom	52
figure 32	Evolution de la cote du Lac d'Annecy en régime naturel et régulé, sous conditions climatiques actuelles	53
figure 33	Evolution de la cote du Lac d'Annecy en régime naturel pour différents scénarii de changement climatique à horizon 2050	55
figure 34	Evolution de la cote du Lac d'Annecy en régime naturel pour différents scénarii de changement climatique à horizon 2050	56

MODULE 3

figure 1	: Localisation des secteurs ayant fait l'objet de relevés topographiques	69
figure 2	: Surfaces totales exondées pour les trois secteurs	73
figure 3	: Pourcentage de roselières exondées pour les trois secteurs.....	74
figure 4	: Pourcentages de surfaces exondées non végétalisées par rapport à la surface de roselières aquatiques	74
figure 5	: Taux d'occupation par la phragmitaie entre les cotes 445,91 et 446,91	76
figure 6	: Répartition des roselières par profondeur.....	76
figure 7	: Répartition des surfaces exondées pour les trois secteurs.....	78
figure 8	Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau simulées de 446,41 et 447,41	80
figure 9	Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau simulées de 446,41 et 447,41	81
figure 10	Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau simulées de 446,41 et 447,41	82

MODULE 4

figure 1	Résultats bruts lors de l'échantillonnage de la zone littorale du Lac d'Annecy	91
figure 2	Distribution verticale des captures réalisées sur la zone littorale prospectée du Lac d'Annecy	92
figure 3	Chronique mensuelle des niveaux du Lac dans le cas du scénario 1	95
figure 4	Chronique mensuelle du débit du Thiou dans le cas du scénario 1	95
figure 5	Chronique annuelle des niveaux du Lac dans le cas du scénario 2	96
figure 6	Chronique mensuelle du débit du Thiou dans le cas du scénario 2	97
figure 7	Chronique annuelle des niveaux du Lac dans le cas du scénario 3	98
figure 8	Chronique mensuelle du débit du Thiou dans le cas du scénario 3	98
figure 9	Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 1	102
figure 10	Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 1	103
figure 11	Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 1	104
figure 12	Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 2	114
figure 13	Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 2	115
figure 14	Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 2	116
figure 15	Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 3	119
figure 16	Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 3	120
figure 17	Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 3	121

Liste des tableaux

MODULE 1

tableau 1.	Liste des postes pluviométriques –source Météo-France	18
tableau 2.	Pluviométries annuelles – Lac d'Annecy	18
tableau 3.	Précipitation mensuelles en mm – observations au poste de Cran-Gévrier, période 1976 - 2010	19
tableau 4.	Température mensuelle en °C – poste de Cran Gévrier 1976- 2010	21

tableau 5. Recensement stations hydrométriques – bassin du Lac d’Annecy (source : Banque Hydro)	22
tableau 6. Débits moyens mensuels et annuels– affluents instrumentés	23
tableau 7. Débits caractéristiques de crues des affluents instrumentés du Lac d’Annecy	26
tableau 8. Débits caractéristique d’étiages - affluents instrumentés du Lac d’Annecy	27
tableau 9. débits moyens mensuels et annuel – canaux d’Annecy.....	28
tableau 10. Débits caractéristiques de crue – canaux d’Annecy période 1993 - 2010.....	30
tableau 11. Débits caractéristiques des étiages – émissaires du Lac d’Annecy.....	31
tableau 12. Evaporation mensuelle et annuelle calculée pour le Lac d’Annecy.....	32
tableau 13. Prélèvements mensuels dans Lac d’Annecy pour activités humaines (10^3 m^3) – source Communauté de l’Agglomération d’Annecy.....	33
tableau 14. Prélèvements annuels dans Lac d’Annecy pour activités humaines (10^3 m^3) – source Agence de l’Eau RMC	33
tableau 15. Prélèvements mensuels dans Lac d’Annecy pour activités humaines (10^3 m^3).....	34
tableau 16. lames d’eau écoulées (mm) – bassin versant d’Annecy	35
tableau 17. Bilan hydrique mensuel du Lac d’Annecy – m^3/s	36
tableau 18. Variation du marnage annuel du Lac – début XX ^{ème} Siècle.....	40
tableau 19. Synthèse du marnage moyen annuel du Lac en fonction de la régulation.....	41
tableau 20. Synthèse du marnage annuel pour différents pas de temps – mensuel et journalier.....	43
tableau 21. Cotes moyennes journalières extrêmes annuelles par période historique	45
tableau 22. Présentation des hypothèses retenues pour les 9 scénarii de changement climatique à horizon 2050	54
tableau 23. Bilan hydrique annuel des 9 scénarii de changement climatique retenus	54

MODULE 3

tableau 1. : Marais de l’Enfer - Données de surfaces pour une simulation à la hausse de la cote du Lac.....	70
tableau 2. Sentier des Roselières - Données de surfaces pour une simulation à la hausse de la cote du Lac.....	70
tableau 3. : Bout du Lac - Données de surfaces pour une simulation à la hausse de la cote du Lac	71
tableau 4. : Marais de l’Enfer - Données de surfaces pour une simulation à la baisse de la cote du Lac	72
tableau 5. : Données de surfaces pour une simulation à la baisse de la cote du Lac.....	72
tableau 6. : Données de surfaces pour une simulation à la baisse de la cote du Lac.....	73

Liste des annexes

Annexe 1	Bibliographie relative au module 1
Annexe 2	Relation systèmes orthométriques NGF - IGN
Annexe 3	Arrêtés préfectoraux concernant l’autorisation de la remise en état des micros centrales des Forges et des Papeteries.
Annexe 4	Implantation des stations hydrométriques et pluviométriques
Annexe 5	Recensement des sources de données
Annexe 6	Répartition saisonnière des volumes entrant en jeu dans le bilan hydrique du Lac d’Annecy
Annexe 7	Evolution des niveaux mensuels extrêmes du Lac par saison et par période historique
Annexe 8	Profil en long du canal du Thiou
Annexe 9	Profil en long du canal du Vassé
Annexe 10	Evolutions historiques mensuelles du niveau du Lac + Simulation écoulement libre – climat actuel
Annexe 11	Evolutions mensuelles du niveau du Lac : climat actuel et à Horizon 2050
Annexe 12	Synthèse bibliographique – Evolution de la climatologie du Lac d’Annecy à l’horizon 2050
Annexe 13	Règlement de 1877

Remarque :

Sauf mention contraire dans le texte, les altitudes indiquées sont données dans le système orthométrique IGN. Les correspondances entre le système NGF (antérieures à 1969) et IGN sont rappelées en annexe 2.

MODULE 1 :

Caractérisation de la gestion du niveau du Lac d'Annecy

SYNTHESE

Cinq chapitres principaux constituent ce module.

Phases 1 : Rappel des consignes et objectifs de régulation du Lac

Le Lac est domaine d'Etat qui depuis la fin du XIX^{ème} Siècle a confié à la Ville d'Annecy la responsabilité des manœuvres de vannes. Le niveau du Lac doit être maintenu le plus près possible de la "cote légale de retenue" qui a été fixée à 80 cm à l'échelle de lecture située au Pont de la Halle. Cependant, compte tenu des risques d'inondation dus aux conditions météorologiques très variables selon les saisons, et inversement en période d'étiage, des seuils de sécurité à respecter ont été établis par les services techniques de la ville d'Annecy :

- en période d'hiver : cote mini 60 cm et cote maxi 70 cm,
- en période d'été : cote mini 70 cm et cote maxi 90 cm.

Phase 2 : Description des ouvrages de régulation au droit des différents émissaires

La Ville dispose de trois déversoirs équipés de jeux de vannes de retenue pouvant évacuer un débit maximal de 51 m³/s :

- le canal du Thiou (canal principal) dont les vannes ont été changées en 1965,
- le canal du Vassé,
- le canal Saint Dominique.

Précisons que la quasi-totalité du débit sortant transite par les deux premiers canaux, le troisième étant anecdotique.

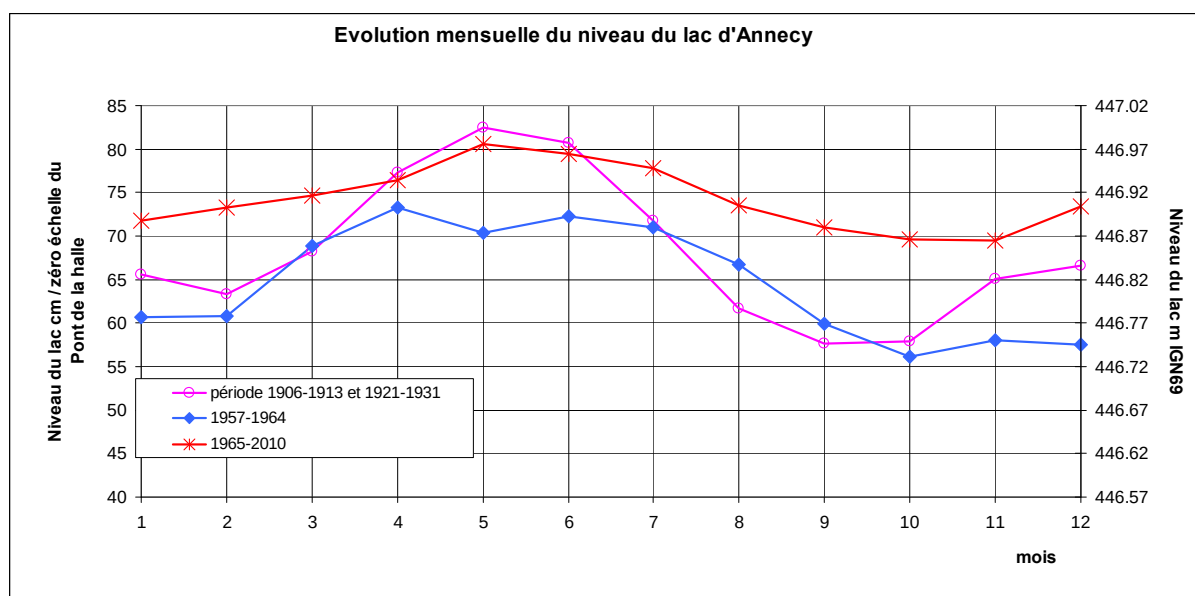
Phase 3 : Connaissances hydrologiques :

La présente étude a permis de mettre à jour les connaissances hydrologiques du bassin versant du Lac d'Annecy (apport moyen, débits extrêmes, bilan hydrique mensuel...) Le volume annuel d'eau entrant en jeu dans le bilan hydrique a été estimé à 290,4 10⁶ m³. Les données hydrométéorologiques récentes ont confirmé que la dernière décennie est plus sèche que la normale : un déficit de 13% du débit des émissaires du Lac (Thiou et canal du Vassé) a été enregistré.

Phase 4 : Chroniques historiques :

Le niveau du Lac est régulé depuis 1874. Des travaux de modernisation des ouvrages de régulation ont eu lieu en 1965 ; ils ont eu pour effet d'augmenter la stabilisation de la cote du Lac. Entre temps, de 1906 à 1914 plusieurs phases de travaux ont été réalisées au droit du Thiou et du canal du Vassé (curage, recalibrage, bétonnage). Elles ont permis d'améliorer les écoulements dans les canaux d'Annecy.

Les chroniques mensuelles du niveau du Lac ont été collectées sur la période 1957-2010. Des données plus ponctuelles ont également permis d'avoir des informations sur le marnage mensuel du niveau du Lac d'Annecy au début du XX^{ème} Siècle. Le graphique qui suit apporte des éléments sur l'évolution mensuelle de la cote du Lac depuis 1900.



Les événements extrêmes (crues et étiages) du niveau du Lac ont été recensés :

- pour les crues, on note une baisse du nombre d'événements forts depuis les travaux de calibrage et bétonnage des canaux d'Annecy entre 1906 et 1914 ;
- pour les étiages, on constate que la mise en place de la régulation a limité l'apparition des étiages extrêmes. Ce phénomène s'est renforcé avec la modernisation des ouvrages de régulation en 1965.

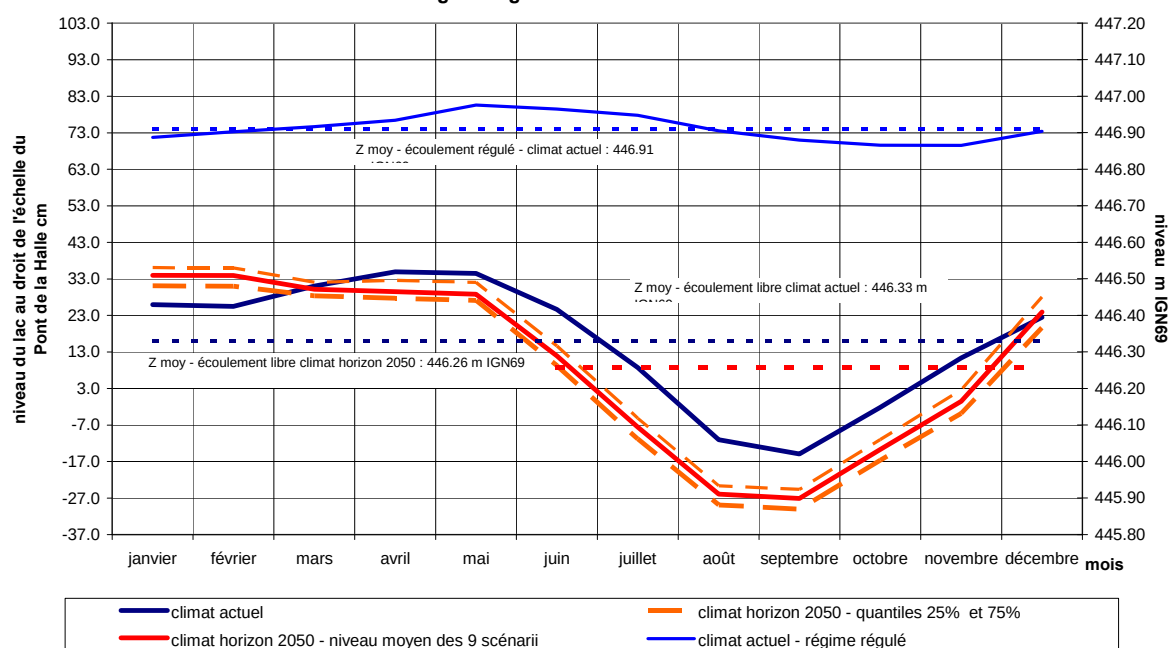
Phase 5 : Simulation du régime naturel du Lac

A partir des courbes de tarage des émissaires du Lac, de la courbe de capacité de la retenue et du bilan hydrique mensuel calculé dans la première partie de l'étude, le régime naturel du Lac en écoulement libre a été modélisé sous conditions climatiques actuelles. La simulation fait apparaître un marnage annuel de la cote moyenne mensuelle du Lac de 50 cm contre seulement 11 cm en régime régulé.

Une synthèse bibliographique a été menée pour faire l'état des lieux des connaissances scientifiques sur le changement climatique dans les Alpes à horizon 2050. Suite à cela, 9 scénarii de changement climatique ont été retenus. Le régime naturel du Lac a été calculé pour chacun de ces scénarii. Les résultats des simulations des 9 scénarii sont proches ; le marnage annuel de la cote moyenne du Lac à horizon 2050 est évalué à 60 cm. La principale différence entre la simulation sous condition

climatique actuelle et sous condition de changement climatique concerne l'étiage : la cote minimale à horizon 2050 est inférieure de 10 cm par rapport à l'étiage actuel en régime naturel.

Evolution du régime du niveau du lac d'Annecy
Climat actuel et hypothèses du Climat à Horizon 2050
régime régulé et écoulement naturel



1 OBJECTIFS DU MODULE

Le présent module consiste à compiler, analyser et synthétiser les informations historiques permettant de caractériser la gestion du niveau du Lac. Il se compose pour cela de 5 chapitres principaux :

- Rappel des consignes et objectifs de régulation du Lac d'Annecy, (§ 3)
- Description des ouvrages de régulation du Lac, (§ 4)
- Description de l'hydrologie du bassin versant du Lac avec mise à jour du bilan hydrique au pas de temps mensuel, (§ 5)
- Recensement et analyse des chroniques historiques du niveau du Lac en remontant le plus loin possible et en identifiant les différentes évolutions, (§ 6)
- Evaluation de ce que serait le régime naturel du niveau du Lac c'est-à-dire en écoulement libre donc non régulé. A partir des connaissances scientifiques actuelles sur le changement climatique dans les Alpes, le régime naturel du Lac sera simulé à horizon 2050. (§ 7)

2 PRESENTATION GENERALE DU BASSIN VERSANT

Le Lac d'Annecy se situe dans la partie la plus externe des Alpes occidentales. Son bassin versant occupe l'extrémité Nord d'une des cluses transversales, reliant les massifs internes à l'avant pays alpin. La cluse d'Annecy sépare les massifs subalpins des Bornes, au Nord Est, et des Bauges au Sud-Ouest.

Le bassin versant draine une superficie de 278 km² dont 27 km² sont occupés par le Lac. Il est encadré par :

- A l'Est par les crêtes du Veyrier et de la Tournette,
- Au Sud par la Dent de Cons et de l'Arcalod,
- A l'Ouest par la voute du Semnoz.

Le Lac occupe la partie septentrionale de son bassin versant.

Le bassin versant du Lac d'Annecy est un bassin montagnard avec une altitude moyenne de 900 m. Il est situé dans une zone essentiellement calcaire et marneuse. L'altitude maximale correspond à la pointe de la Tournette à 2 351 m ; le point bas correspond au Lac dont la cote moyenne est de 446.9 m (IGN 69). La pente moyenne du bassin d'alimentation est élevée (6%). La figure 1 présente Les courbes hypsométriques du bassin versant du Lac et de ses principaux affluents

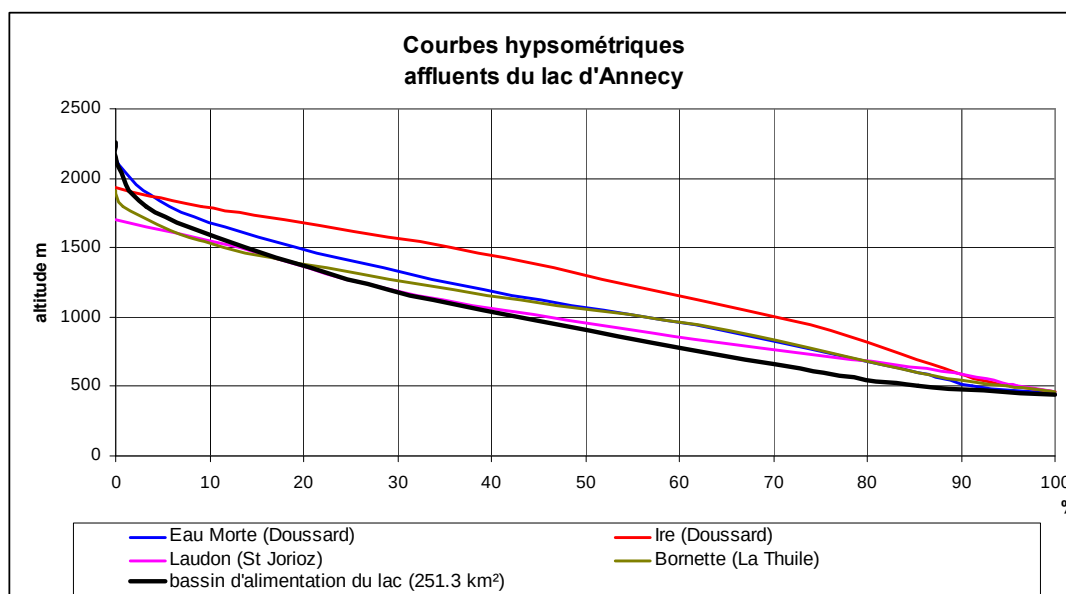


figure 1 Courbes hypsométriques – affluents du Lac d'Annecy

Le Lac d'Annecy est né il y a 18 000 ans des fontes glaciaires. Il est aujourd'hui principalement alimenté par 4 affluents : l'Eau Morte, l'Ire, la Bornette et le Laudon. Les affluents sont concentrés au Sud du Lac, secteur qui correspond à l'extension maximale du bassin versant. Le Thiou lui sert de déversoir naturel vers le Fier (affluent du Rhône). Vers la Puya, une source sous-lacustre, alimentée par les infiltrations karstiques provenant du Semnoz, débouche dans le gouffre du Boubioz (80.6 m de profondeur).

Au niveau climatologie, la région annécienne est sous double influence océanique et continentale. Le climat est influencé par la morphologie (orientation des vallées, exposition des versants...) et également par la présence du Lac qui apporte un effet adoucissant.

3 REGULATION DU LAC D'ANNECY

3.1 Historique

Source bibliographique : [7] & rencontre avec les Services Techniques de la ville d'Annecy le 21/03/11.

3.1.1 Les premiers travaux

Depuis le XV^{ème} Siècle, le souci de discipliner l'écoulement du Lac et d'améliorer l'évacuation de ses crues via ses trois exutoires (Thiou, Vassé et Saint Dominique) a été une des préoccupations essentielles des organisateurs de la cité d'Annecy. C'est entre 1827 et 1855 que l'on voit apparaître les premières réalisations importantes de curages systématiques, la rectification du Thiou (par le recoupement de méandres) à l'aval de l'île Saint-Joseph, l'aménagement à peu près définitif des quais et des canaux (tout au moins en ce qui concerne leur tracé) et l'idée d'un système de régulation du Lac.

Vinrent ensuite le projet de l'ingénieur Sadi Carnot en 1870 (cf. ci-dessous) et ce qui en résulte : les systèmes de régulation des canaux (qui ont fonctionné jusqu'en 1964) et le règlement de 1877 ; le

dragage en 1884-1906 du chenal du Thiou, les bétonnages en 1913 et 1914 du canal du Thiou entre les vannages et l'usine Sainte-Claire, et du Vassé entre la rue Vaugelas et la rue de la République.

3.1.2 Le projet de Sadi Carnot

En 1874, des barrages surgissent en travers des canaux et, trois ans plus tard, un règlement toujours officiellement en vigueur en détermine les conditions d'emploi. Entre les vannes industrielles auxquelles avait incombé jusqu'alors la mission de commander le Lac et l'entrée des canaux s'interpose une valve indépendante et un répartiteur de débit. Grâce à ces ouvrages et à la faveur d'un rehaussement d'une vingtaine de centimètres du niveau moyen, une réserve supplémentaire est constituée. Celle-ci assure aux usines un appoint d'énergie et à la ville de meilleures conditions d'utilisation du port et des canaux aux jours de pénurie. Les vannes d'Annecy ont incontestablement contribué à fixer les caractères de l'hydrologie de la cluse ainsi que la physionomie de la ville et de son Lac.

À la suite de sept années d'observations (1862-1868) sur les niveaux du Lac et les débits des canaux, Sadi Carnot arrête le 5 mars 1870 un projet détaillé, approuvé le 10 septembre par le ministère des Travaux publics de l'époque. Le barrage principal est établi entre le pont Perrière et l'étrave du palais de l'Île. Aux vannes automobiles à débit constant, inventées par Carnot, sont substituées des vannes ordinaires, mais, et c'est l'essentiel, les niveaux extrêmes prévus en 1870 ont été conservés après deux années d'essais.

Commencés le 16 juin 1874, achevés le 7 juillet suivant- les trois barrages du Thiou (10 vannes, 18,60 m d'ouverture), du Vassé (5 vannes, 9,50 m d'ouverture), du canal Saint-Dominique, (4 vannes, 7,60 m d'ouverture) sont immédiatement entrés en service.

Régulariser l'écoulement du Lac, procurer aux usines une alimentation à peu près constante, maintenir dans le Lac et la ville une couche d'eau suffisante pour rendre la navigation facile et empêcher toute exhalaison malsaine, tels sont les buts assignés par le règlement de 1877 aux ouvrages d'Annecy.

Les derniers travaux permettant de réguler de manière plus précise le niveau du Lac ont été réalisés en 1965, année durant laquelle les vannes à glissières de l'exutoire principal (le Thiou) ont été remplacées par une vanne motorisée encore en fonctionnement de nos jours.

Ajoutons que le niveau du Lac se lit historiquement à l'échelle fixée au pont de la Halle, à Annecy, et dont le zéro est celui de l'eau le 26 août 1862.

En amont des trois barrages, la cote maximum conventionnelle est de 80 cm¹ (446,69 m N.G.F.) par rapport au zéro de cette échelle, cote de consigne conservée de nos jours.

3.2 La régulation actuelle

Source bibliographique : [8] & rencontre avec les Services Techniques de la ville d'Annecy

Le Lac est domaine d'Etat qui depuis la fin du XIX^{ième} Siècle a confié à la Ville d'Annecy la responsabilité des manœuvres de vannes. De manière générale, il est défini qu'en période normale,

¹ Cette cote 80, approuvée dès le 4 décembre 1876 par le ministère des Travaux Publics, est d'ailleurs moins celle du Lac que celle des canaux. Elle est en effet mesurée en un point où les eaux sont déjà animées d'une vitesse appréciable et où des remous se produisent en période de crue. On sait déjà que les cotes du pont de la Halle et du pont de Pâquier ne concordent pas.

quand il n'y a pas de risques de crues, la cote de consigne du Lac d'Annecy doit se situer entre 75 cm et 80 cm, et que la cote mini ne doit pas descendre en dessous de 60 cm, soit.

- Altitude IGN 69 de la cote 80 cm à l'échelle de lecture située au Pont de la Halle : 446.97m.

- Altitude IGN 69 de la cote 60 cm à l'échelle de lecture située au Pont de la Halle : 446.77 m.

La cote 80 cm a longtemps été considérée comme étant une cote d'alerte ou de sécurité qu'il ne fallait impérativement pas dépasser, quelle que soit la saison. Cependant, cette règle ne s'avère pas absolue.

En effet, suivant les saisons et les conditions météorologiques locales changeantes, la cote d'alerte 80 cm peut même ne rien vouloir dire. En effet, en début de saison d'été par exemple (pour un été normal), une réserve d'eau suffisante permettant de maintenir un bon niveau du Lac notamment pour les activités touristiques doit être maintenu jusqu'à fin septembre.

A savoir qu'en période d'été, avec un ensoleillement normal et une température ambiante moyenne comprise entre 25°C et 30 °C, le niveau du Lac baisse régulièrement d'un demi-centimètre tous les deux jours, pour un débit mini d'eau dans les canaux du Lac compris entre 1 m³ à 2 m³ / seconde. Selon les services techniques de la ville d'Annecy, ce débit minimal est indispensable pour l'esthétique et la propreté des canaux du Lac, mais aussi pour tous les utilisateurs de l'eau du Lac, comme les usines par exemple qui utilisent l'eau (Cf. plus bas).

A l'inverse en période d'hiver, à l'automne, ou en début de printemps, les services technique en charge de la régulation doivent tenir compte et réagir en fonction des chutes et fontes des neiges, des pluies abondantes et des redoux où il est important de ne pas dépasser la cote 80 qui est alors à considérer à ce moment-là comme une cote d'alerte à ne pas atteindre.

Ainsi, l'ensemble des différentes contraintes ont conduit les services techniques de la ville d'Annecy à établir des seuils de sécurité à respecter en termes de cotes:

- en période d'hiver : cote mini 60 cm et cote maxi 70 cm,
- en période d'été : cote mini 70 cm et cote maxi 90 cm.

Comme le montrent ces valeurs, la marge de manœuvre demeure relativement faible (20 à 30 cm), d'autant que le niveau du Lac peut monter de 20 centimètres en une nuit², et que la surface libre de la section d'évacuation des trois déversoirs du Lac d'Annecy (cf. § suivant) n'est que de 45 m² pour un débit maxi de 51 m³/s, toutes vannes ouvertes.

4 LES OUVRAGES ET LES METHODES DE REGULATION

Source bibliographique : [8]

4.1 Les ouvrages

Le Lac d'Annecy dispose de trois déversoirs équipés de jeux de vannes de retenue, disposés de la façon suivante :

² Selon des témoignages du personnel en charge de la régulation du niveau du Lac, rencontré en 2011 lors de cette étude, des phénomènes encore plus rapides de montée des eaux sont de plus en plus fréquemment observés, phénomènes dus probablement pour une part significative à l'urbanisation croissante du bassin versant générant une augmentation des surfaces imperméabilisées et une diminution du temps de concentration.

- Pour le canal du Thiou : (canal principal) : Une vanne unique de retenue se trouvant en amont du Pont Perrière entre le quai du Semnoz et le quai Perrière. C'est un clapet vanne de 16 m de long dont la manœuvre se fait par moto-réducteur électrique.

La section de l'ouvrage est de 24 m² (16 m x 1.5 m). La hauteur maximum de retenue est de 0.80m. La vanne qui est motorisée permet un débit totalement libre des eaux du Lac. Elle a été installée en Novembre 1965 pour remplacer les anciennes vannes à glissières qui se trouvaient devant le Palais de l'île. Son ouverture totale permet un débit maximum de 40 m³/s.

- Pour le canal du Vassé : Jeux de cinq vannes à glissières, commandées également par moto-réducteurs électriques. L'ouvrage est situé sous la voûte du Pont Albert Lebrun. La surface de section libre sous vanne 13.5 m² pour une largeur de l'ouvrage de 23m.

- Pour le canal Saint Dominique : Jeux de quatre vannes à glissières, à commande manuelle, qui se trouvent le long du quai du Semnoz à quelques mètres en amont du clapet vanne du Thiou. La surface libre de l'ensemble est de 4.48 m²

Le débit maximum pour ces deux derniers canaux étant de 11,5 m³/s.

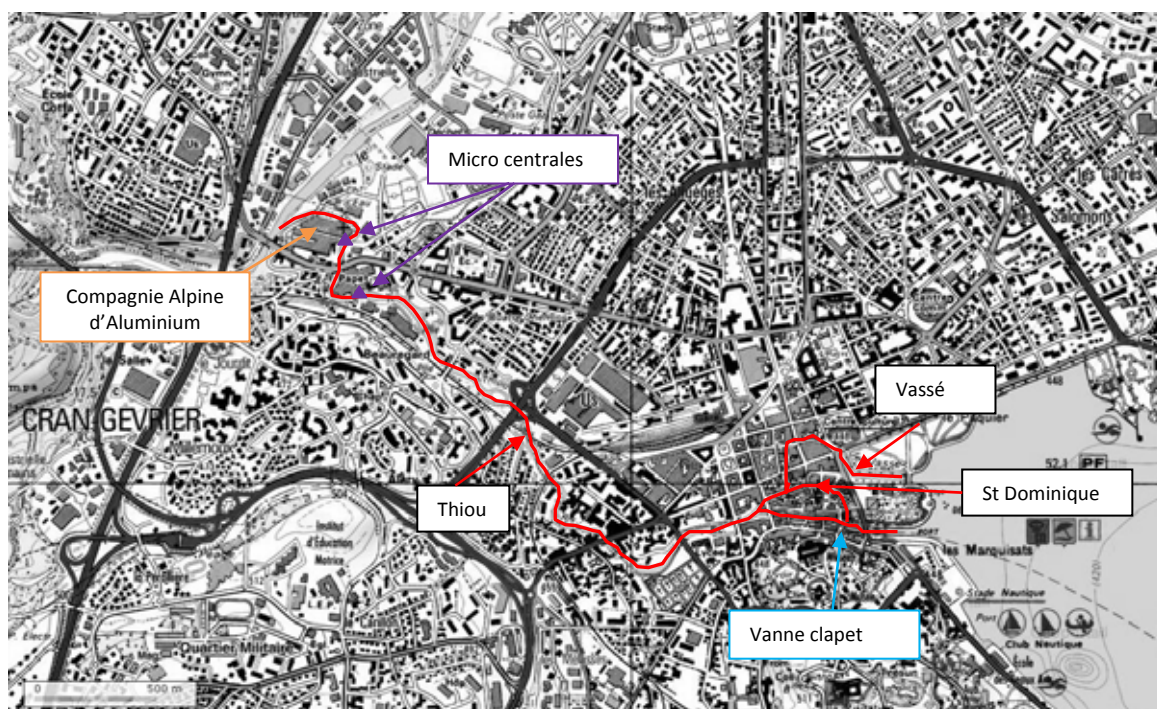


figure 2 Localisation des exutoires du Lac et des micros centrales

Vingt et une autres vannes de retenue servant à régler le débit d'eau dans les différents canaux sont dispersées beaucoup plus en aval du Lac, jusqu'au barrage situé sur la commune de Cran Gévrier (vannes Mercier). Ces vannes « annexes » n'ont pas pour vocation de régler le niveau du Lac en tant que tel (uniquement contrôlé par les trois ouvrages sus-mentionnés), elles permettent de réguler le niveau des canaux dans la vieille ville en configurant le faciès plus ou moins lentique de ces derniers (rôle essentiellement liés au tourisme).

4.2 Méthodes de régulation

La lecture de la cote du Lac se fait visuellement tous les jours de l'année, trois fois en période normale (5 h, 8 h, et 17 h) et jusqu'à six fois par jour quand le temps est plus ou moins incertain.

Tous les renseignements et données sont ensuite consignés dans un registre et sur ordinateur.

Chaque mois, un état des côtes et débits du Lac est communiqué aux différentes administrations intéressées par la régulation du Lac.

Les manœuvres des vannes (régulation du débit) se décident par les services techniques de la Ville d'Annecy. En période d'incertitude du temps, de doute et de risques possibles, toutes les vannes placées sur le parcours du Thiou, en aval, sont déjà ouvertes en totalité plusieurs jours à l'avance, dans l'éventualité d'une ouverture importante des vannes de retenue.

Une fois décidée, chaque manœuvre fait l'objet de démarches auprès des différents utilisateurs des eaux du Lac.

Quand tous les usagers sont prévenus, que les anciens débits et nouveaux débits ont été annoncés, que l'heure de la manœuvre a été communiquée, la manœuvre est faite par l'un des responsables du service de la Propreté Urbaine de la Ville d'Annecy, qui est habituellement chargé de cette prestation. Les manœuvres se font de jour comme de nuit. Après chaque manœuvre le responsable de service doit vérifier sur place si les usiniers ont bien manœuvré leurs propres vannes, et si l'écoulement des eaux se fait normalement dans les différents canaux qui évacuent l'eau au Fier.

Rappelons que chaque fois qu'une vanne est manœuvrée en amont, les vannes situées en aval doivent aussi et à nouveau être réglées.

La fréquence des manœuvres peut varier de deux fois par jour à dix par mois. Chaque manœuvre nécessite en moyenne de 0 h 30 à 1 h d'intervention. Une manœuvre de moyenne importance immobilise trois à quatre agents durant 2 h à 3 h.

Pour le calcul des débits, lorsque la manœuvre a été décidée, ces derniers sont calculés par l'un des responsables du service, à l'aide d'abaques et courbes qui, en fonction des ouvertures de vannes et des hauteurs d'eau prises au niveau des différentes échelles de lecture placées dans les canaux du Lac permettent d'en déterminer la quantité d'eau à évacuer.

4.3 Activités dépendantes du Thiou

Peu d'activités dépendent de ce cours d'eau. Ainsi, la DDT et la DREAL³ contactées à ce sujet précisent les points suivants :

♦ En termes d'activité industrielle, seule une entreprise utilise actuellement les eaux du Thiou. Il s'agit de la Compagnie Alpine d'Aluminium spécialisée dans les traitements de surface et qui est autorisée à prélever les volumes suivants:

- 400 m³ par heure (soit environ 0,11 m³/s)
- 5000 m³ par jour

♦ En termes d'hydroélectricité, 2 micro-centrales localisées sur Cran Gévrier sont actuellement exploitées par la SARL COEXHYE :

³ DDT : Service Eau et Environnement, personne contactée Mr DAMOUR ; DREAL : Personne contactée Mr CLARY

- une micro-centrale de puissance brute maximale de 624 kW au droit de la chute dites des Forges. L'exploitant est autorisé à turbiner 6 m³/s. Le débit réservé ne doit pas être inférieur à 0,750 m³/s.

- une micro-centrale de puissance brute maximale de 703 kW au droit de la chute dites des Papeteries autorisée à turbiner 7 m³/s. Le débit réservé ne doit pas être inférieur à 0,188 m³/s. A compter du 1^{er} janvier 2014, et en application de l'article L 214-18 du Code de l'Environnement, le débit réservé ne devra pas être inférieur à 0,750 m³/s.

Nous faisons figurer en annexe les arrêtés préfectoraux concernant ces deux installations.

La DDT précise que le fonctionnement actuel du vannage ne favorise pas l'hydroélectricité car il s'agit d'un fonctionnement « tout ou rien » :

- en période normale : le débit est régulé à 2,5 m³/s environ, ce qui est insuffisant pour des centrales équipées à 6 ou 7 m³/s,
- une fois que le Lac est monté jusqu'à une cote haute, les vannes sont ouvertes en grand, avec un débit de l'ordre de 20 à 30 m³/s pendant 2 à 3 jours max, jusqu'à ce que le Lac atteigne la cote basse. Ce débit est majoritairement déversé sur les micro-centrales du Thiou.

Précisons que la centrale EDF localisée plus à l'aval sur le Fier (centrale localisée à la chute dite de Brassilly et de puissance brute maximale de 2884 kW), est autorisée en référence à l'arrêté préfectoral du 21 septembre 1994 à turbiner un débit entrant de 14 m³/s, le débit réservé étant de 2,7 m³/s.

5 HYDROLOGIE ET BILAN HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU LAC D'ANNECY

5.1 Données climatiques

5.1.1 Pluviométrie au droit du Lac

L'établissement du bilan hydrique nécessite de connaître les précipitations mensuelles tombant directement sur le Lac. Nous faisons l'hypothèse que les précipitations reçues par la surface du bassin versant sont déjà prises en compte dans les apports d'eau amenés par les affluents.

Les caractéristiques des postes pluviométriques identifiés sur le bassin versant du Lac sont présentées dans le tableau 1.

N°poste	Poste	altitude	période disponible	Précipitation annuelle en mm / période disponible
74093001	Cran-Gévrier	426 m	1976-2010	1 245
74104001	Doussard	465 m	1991-1998	1 184
74187001	Montmin	1 050 m	1976-2009	1 584
74242001	Saint Jorioz	460 m	1976-1980	1 480

tableau 1. Liste des postes pluviométriques –source Météo-France

Le poste de Montmin n'est pas retenu pour l'estimation des précipitations au droit du Lac d'Annecy en raison de l'altitude trop élevée de ce poste qui, de ce fait, bénéficie d'une pluviométrie nettement supérieure par rapport à celles des postes situés à proximité du Lac. E. Benedetti-Crouzet [1] a identifié un gradient pluviométrique positif de 70 mm/an pour 100 m sur la totalité du bassin versant.

Les séries des postes de Doussard et de Saint Jorioz sont de longueurs trop faibles pour être considérées comme représentatives du secteur étudié. La pluviométrie de ces 2 postes a cependant été rapprochée de celle enregistrée au poste de Cran-Gévrier, pour des courtes périodes, afin d'étudier la variabilité spatiale des précipitations sur le bassin récepteur du Lac d'Annecy.

Période	Poste	Précipitation annuelle en mm
1991-1998	Cran-Gévrier	1 063
	Doussard	1 184
1976 - 1980	Cran-Gévrier	1 364
	Saint Jorioz	1480

tableau 2. Pluviométries annuelles – Lac d'Annecy

Les précipitations annuelles des trois postes pluviométriques sont proches. Les isohyètes de l'année hydrologique 1966-1967, représentées sur la figure 3, confirment que la pluviométrie mesurée à Cran-Gévrier peut être considérée comme représentative de la pluviométrie au droit du Lac d'Annecy.

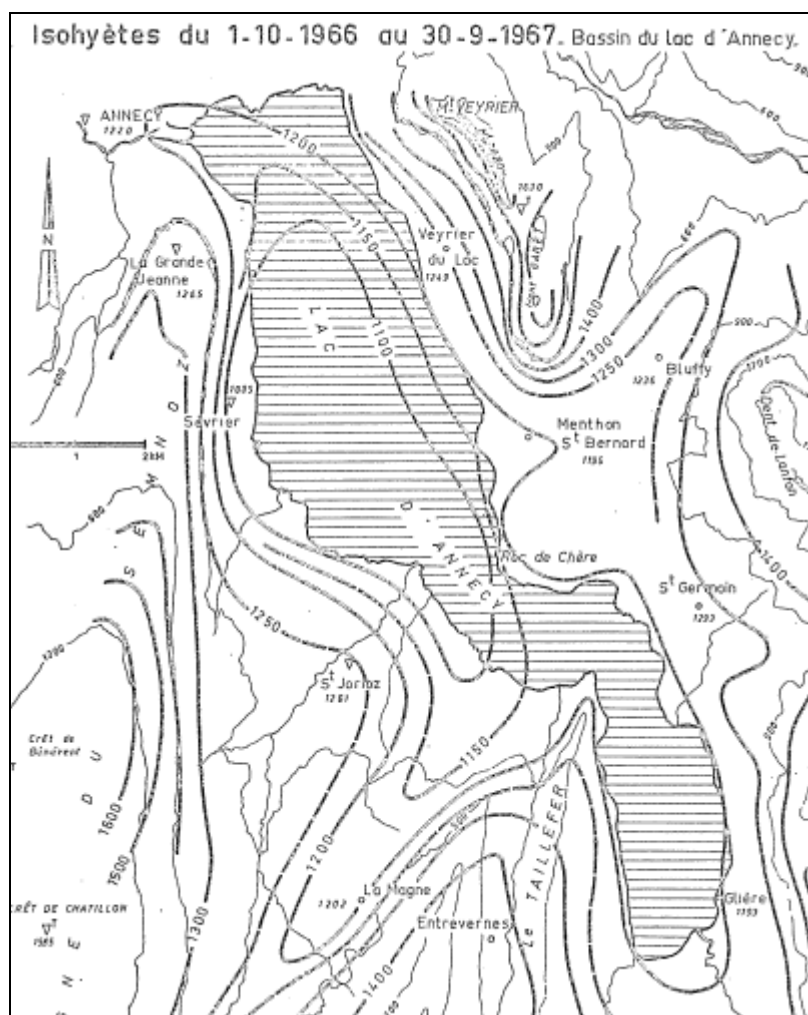


figure 3 Pluviométrie de l'année hydrologique 1966-1967 – source ORSTOM [4]

Les valeurs mensuelles de précipitation sur le Lac d'Annecy, retenues pour la présente étude, sont données dans le tableau 3.

Pluie mm	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	annuel
Cran Gévrier Lac d'Annecy	99	89	99	94	111	109	101	100	112	119	102	111	1 245

tableau 3. Précipitation mensuelles en mm – observations au poste de Cran-Gévrier, période 1976 - 2010

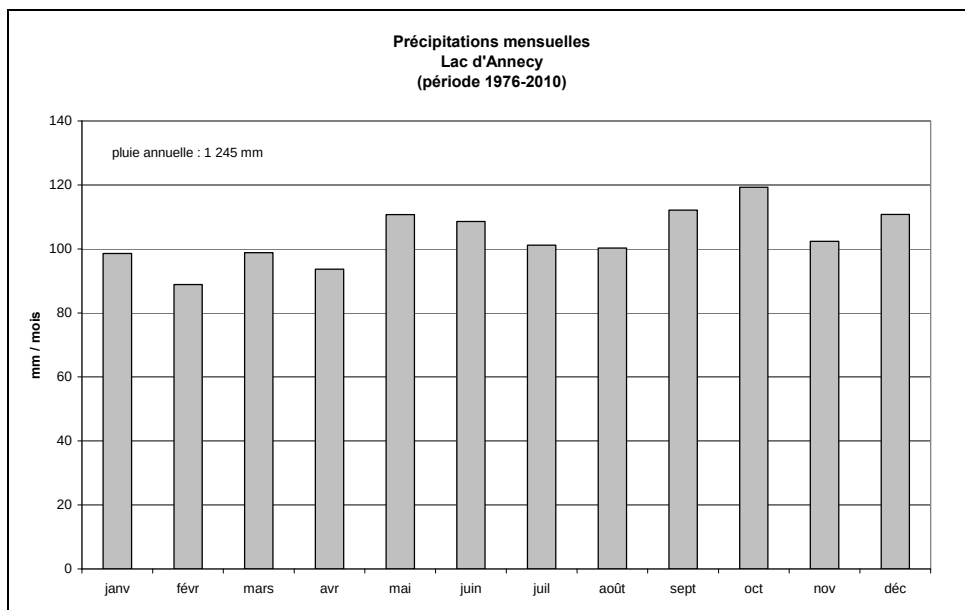


figure 4 Précipitations mensuelles, période 1976 -2010 – Lac d’Annecy

La répartition mensuelle des précipitations est régulière (cf. figure 4). Deux saisons plus pluvieuses sont identifiées : printemps (mai – juin) et automne (septembre – octobre).

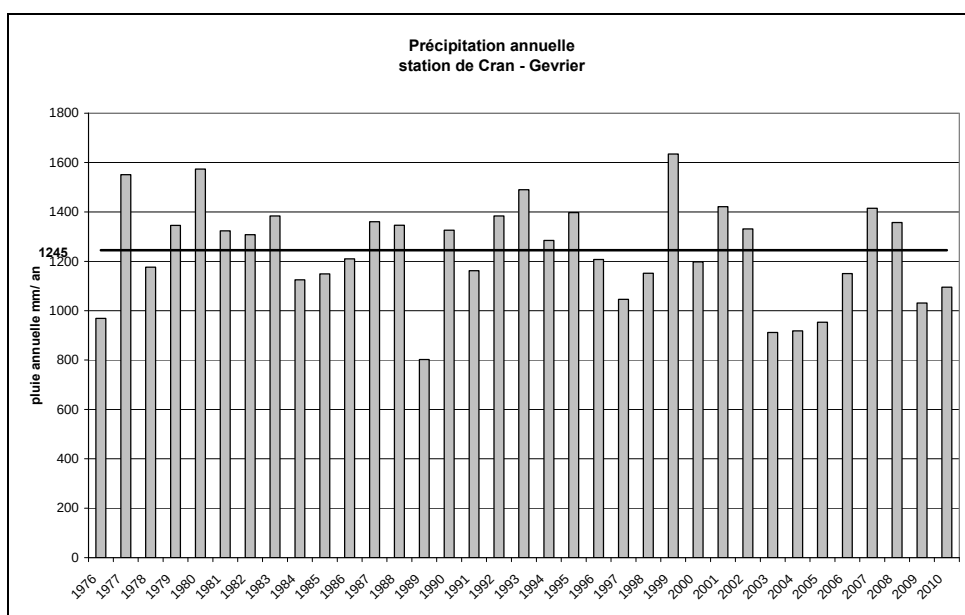


figure 5 Précipitations annuelles – Cran-Gévrier

La figure 5 indique que la variabilité annuelle de la pluviométrie est très conséquente. Pour la station de Cran-Gévrier les précipitations annuelles, observées sur la période 1976 -2010, présentent un minimum de 802 mm en 1989 et un maximum de 1 634 mm en 1999.

A noter que la pluviométrie moyenne directe sur le Lac de la dernière décennie (2001-2010) est de 1 158 mm/an ce qui représente un déficit pluviométrique de 7% par rapport à la période totale (1976-2010).

5.1.2 Température

Une seule station météorologique disposant d'une chronique de température suffisamment longue et récente pour être représentative du bassin annécien a été identifiée :

- station de Cran-Gévrier, gérée par Météo France, disposant d'une chronique de températures journalières pour la période 1976 -2010, soit 35 ans de données.

Les températures moyennes, minimales et maximales mensuelles et annuelles ont été calculées :

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	Oct	nov	déc	annuel
T°moy (°C)	1.4	3.0	6.5	9.6	14.2	17.7	20.1	19.5	15.8	11.5	5.6	2.3	10.6
T°max (°C)	4.6	6.8	9.8	14.7	17.1	23.9	24.3	24.5	19.0	15.1	8.8	4.9	11.9
T°min (°C)	-4.1	-1.3	3.4	7.0	10.5	14.6	16.5	16.9	12.9	9.2	2.5	-0.6	9.2

tableau 4. Température mensuelle en °C – poste de Cran Gévrier 1976- 2010

La température annuelle est variable avec une moyenne de 10.6 °C pour un maximum observé de 11.9°C (2003) et un minimum de 9.2°C (1980) sur les 35 années étudiées. La figure 6 permet d'identifier une tendance actuelle des températures annuelles à la hausse. Pour la dernière décennie, 2001 – 2010, la température moyenne annuelle est de 11.2 °C, soit +0.6°C par rapport à la période totale disponible.

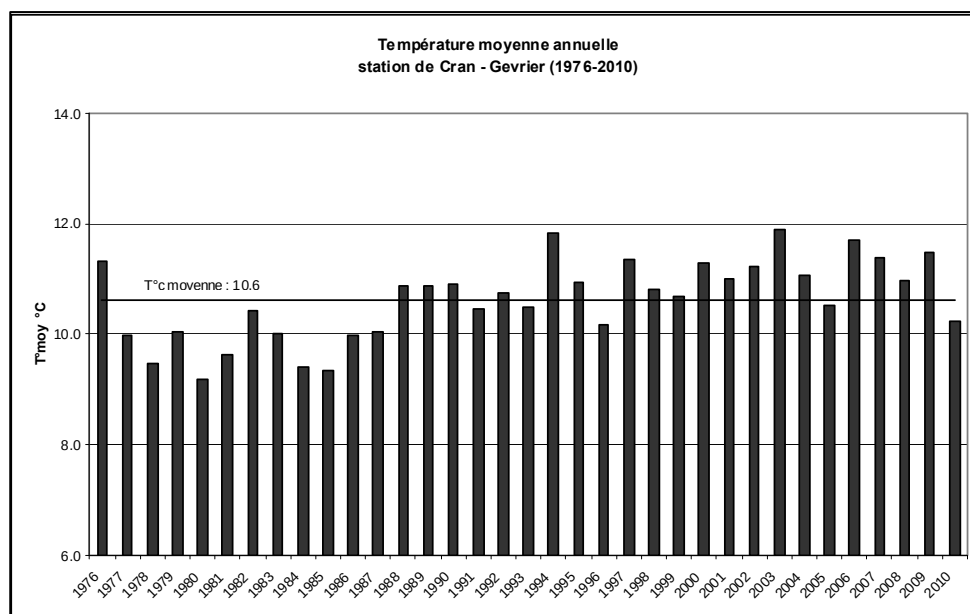


figure 6 Température moyenne annuelle °C , période 1976 – 2010 – Cran Gévrier

5.2 Données hydrométriques

5.2.1 Affluents instrumentés

Les sept affluents les plus importants du Lac sont :

- L'Eau Morte,
- L'Ire,
- Le Laudon,
- La Bornette,
- Le Ruisseau d'Entrevernes,
- Le Nant d'Oy,
- Le Bilon.

4 affluents sont instrumentés. Les caractéristiques des stations hydrométriques sur le bassin versant du Lac d'Annecy sont listées dans le tableau 5.

affluent	N° poste	station	gestionnaire	superficie Km ²	altitude m	période	commentaires B.Hydro sur qualité données
Eau Morte	V1235610	Doussard	DREAL RA	92.5	452 m	1975-2010	données 2010 provisoires
Ire	V1235210	Doussard	DREAL RA	27.1	452 m	1972-2010	débats douteux de 1972 à 1979
Laudon	V1237410	St Jorioz	DREAL RA	29.2	455 m	1977-2010	données 2010 provisoires
Bornette	V1235420	Lathuile	DREAL RA	11.6	452 m	1987-2010	données 2010 provisoires
Bornette	V1235410	Doussard	DREAL RA	10	510 m	1974-1987	débats douteux sur toute la période

tableau 5. Recensement stations hydrométriques – bassin du Lac d'Annecy (source : Banque Hydro)

Les débits de l'Ire à Doussard ont été exploités uniquement sur la période 1980 – 2010 pour ne travailler qu'avec des données valides.

La station de la Bornette à Doussard n'a pas été retenue pour la suite de l'étude en raison de la qualité douteuse de ces données.

Les 4 stations hydrométriques retenues drainent une superficie de 160.4 km² ce qui représente 64% du bassin d'alimentation du Lac.

5.2.1.a Apports moyens

Le tableau 6 fournit les débits moyens mensuels calculés pour les 4 affluents instrumentés du bassin annécien.

		Eau Morte à Doussard (92.5 km ²)	L'Ire à Doussard (27.1 km ²)	Le Laudon à St-Jorioz (29.2 km ²)	La Bornette à Lathuile (11.6 km ²)	Total BV instrumenté (160.4 km ²)
	Période d'étude	1975-2010	1980-2010	1977-2010	1987 - 2010	
Débit moyen mensuel (m³/s)	Janvier	2.90	0.89	1.02	0.40	5.20
	Février	3.05	0.85	1.03	0.38	5.31
	Mars	3.90	1.29	1.12	0.55	6.86
	Avril	4.16	1.68	0.98	0.54	7.36
	Mai	4.22	1.78	0.77	0.35	7.12
	Juin	2.89	1.09	0.57	0.30	4.86
	Juillet	1.96	0.60	0.32	0.20	3.08
	Aout	1.15	0.37	0.20	0.13	1.86
	Septembre	1.50	0.61	0.35	0.21	2.67
	Octobre	2.08	0.90	0.64	0.33	3.95
	Novembre	2.45	0.95	0.75	0.41	4.57
	décembre	3.04	1.02	1.01	0.43	5.50
Module annuel	absolu m³/s	2.77	1.01	0.73	0.35	4.86
	Spécifique l/s/km²	30.0	37.1	25.0	30.3	30.3
Débit moyen (m³/s) Période : 2001 - 2010		2.24	0.82	0.61	0.29	3.95

tableau 6. Débits moyens mensuels et annuels– affluents instrumentés

Une diminution de l'hydraulicité des cours d'eau, de l'ordre de 19%, est constatée lors de la dernière décennie.

Les hydrogrammes, en débit spécifique, des affluents instrumentés du Lac d'Annecy ont été rapportés sur la figure 7 .

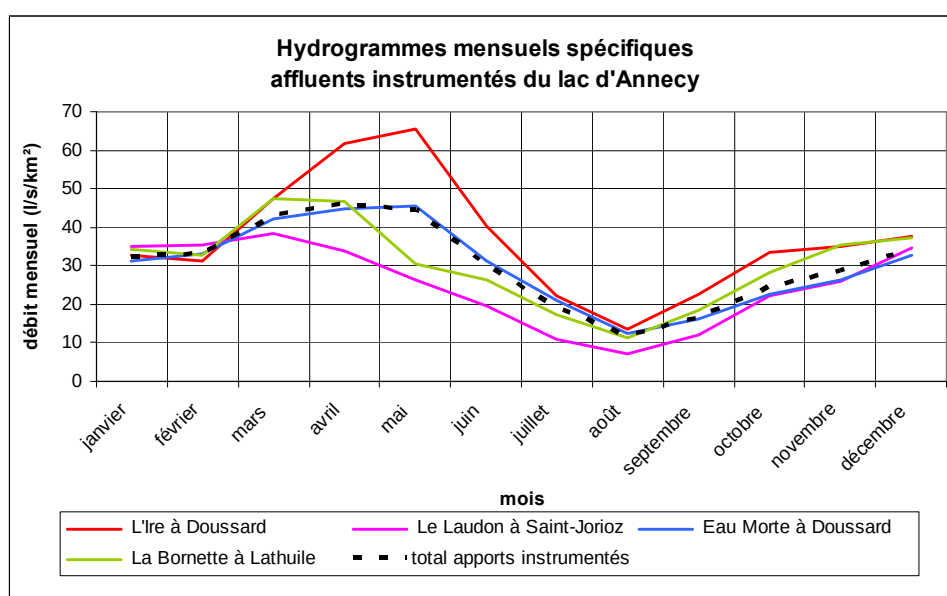


figure 7 Débits moyens mensuels spécifiques – affluents instrumentés

Les affluents du Lac présentent un régime hydrologique de type nivo-pluvial caractérisé par une période de hautes eaux principales de mars à mai correspondant à la fonte nivale printanière. Une deuxième période de recrudescence des débits, moins marquée, est observée d'octobre à novembre en lien avec les pluies automnales. La période des basses eaux est observée en été, de juillet à septembre avec un minimum en août.

Des particularités peuvent être notées en ce qui concerne la réponse à la fonte nivale :

- L'Ire présente un pic de fonte nivale de plus de 60 l/s/km² d'avril à mai, ce qui est beaucoup plus élevé que sur les 3 autres bassins.
- La fin de fonte nivale est observée dès le mois de mai sur le Laudon et la Bornette alors que pour l'Eau Morte et l'Ire la baisse des apports s'amorce qu'à partir de juin.

Ces différences de fonctionnement sont liées aux caractéristiques spécifiques de chaque affluent en particulier les expositions et les gammes d'altitudes drainées par les bassins versants.

5.2.1.b Crues

5.2.1.b.i Valeurs caractéristiques

Les débits caractéristiques des crues ont été calculés à partir des chroniques historiques par ajustement de Gumbel. Les valeurs obtenues ont été critiquées et comparées aux informations disponibles sur la Banque Hydro et dans l'étude de vulnérabilité de la ressource en eau de l'agglomération annecienne de 1998 réalisée par SOGREAH [3].

- Eau Morte (Doussard) et Laudon (Saint Jorioz)

Pour l'Eau Morte à Doussard et le Laudon à Saint Jorioz, les résultats obtenus sont conformes aux valeurs annoncées par la Banque Hydro et par SOGREAH [3]. Ils sont présentés dans le tableau 7.

- Ire (Doussard)

Pour l'Ire à Doussard, les valeurs obtenues sont inférieures à celles annoncées par la Banque Hydro et par SOGREAH [3]. Ces 2 études ont été menées sur la période complète de la chronique en conservant les années 1972 à 1979 pour lesquelles les informations sont indiquées douteuses, en particulier dans la gamme des forts débits, par le gestionnaire de la station. Le choix est donc fait de privilégier nos résultats, calculés uniquement sur la période 1980-2010. Les valeurs retenues sont disponibles dans le tableau 7.

- Bornette (Lathuile)

La visualisation de l'ajustement de Gumbel pour la station de la Bornette permet d'identifier une anomalie dans la chronique des débits instantanés maximums annuels extraits de la Banque Hydro (cf figure 8).

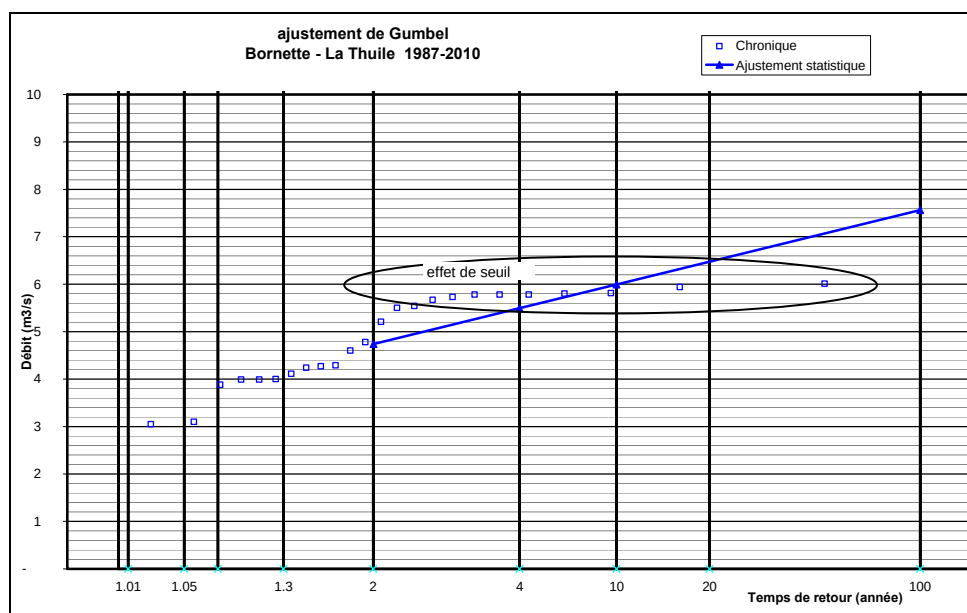


figure 8 Ajustement de Gumbel – station de la Bornette à Lathuile

Un “effet de seuil” pour les débits extrêmes autour de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ a été identifié. Le gestionnaire de la station a été questionné sur la fiabilité de la courbe de tarage de cette station pour les forts débits. Aucun élément de réponse ne nous a été fourni.

Nous avons fait le choix de conserver les résultats issus de l’ajustement de Gumbel pour les fréquences de retour inférieur ou égal à 5 ans. Ces résultats sont homogènes avec ceux obtenus lors de l’étude menée par SOGREAH [3].

Pour la crue centennale, nous avons privilégié la valeur fournie par SOGREAH [3] qui est issue d’une étude hydraulique spécifique dont les références ne sont pas précisées. En l’absence d’éléments complémentaires, il est impossible de déterminer le débit de la crue de fréquence de retour 10 ans qui est également non disponible dans l’étude 1998.

Le tableau 7 synthétise les débits caractéristiques de crue retenus pour les 4 affluents instrumentés du bassin annécien.

		Eau Morte (Doussard)	Ire (Doussard)	Laudon (Saint Jorioz)	Bornette (Lathuille)
		92.54 km²	27.1 km²	29.2 km²	11.64 km²
		1975-2010	1980-2010	1977-2010	1987-2010
	Période de calcul				
Crue biennale	m3/s	28	16	17	5
	l/s/km²	300	590	590	410
Crue quinquennale	m3/s	35	21	21	5.5
	l/s/km²	380	760	720	470
Crue décennale	m3/s	41	24	24	-
	l/s/km²	440	870	810	-
Crue centennale	m3/s	57	33	31	⁴ 26
	l/s/km²	620	1 220	1 070	2 230
Maximum Observé	Date	janv-04	déc-94	déc-97	juin-10
	m3/s	48	33	27	6
	l/s/km²	510	1 200	940	520

tableau 7. Débits caractéristiques de crues des affluents instrumentés du Lac d'Annecy

5.2.1.b.ii Répartition saisonnière des crues extrêmes

Pour chaque station hydrométrique, une analyse a été réalisée en vue de déterminer la répartition saisonnière des crues extrêmes. Pour cela les 10 plus fortes crues historiques annuelles observées sur chaque affluent ont été étudiées. Les résultats sont synthétisés sur la figure 9. Il en ressort que la période la plus à risque pour les crues exceptionnelles correspond à la saison hivernale (décembre à février).

⁴ Donnée issue de l'étude de vulnérabilité de la ressource en eau de l'agglomération annecienne (SOGREAH 1998) [3]

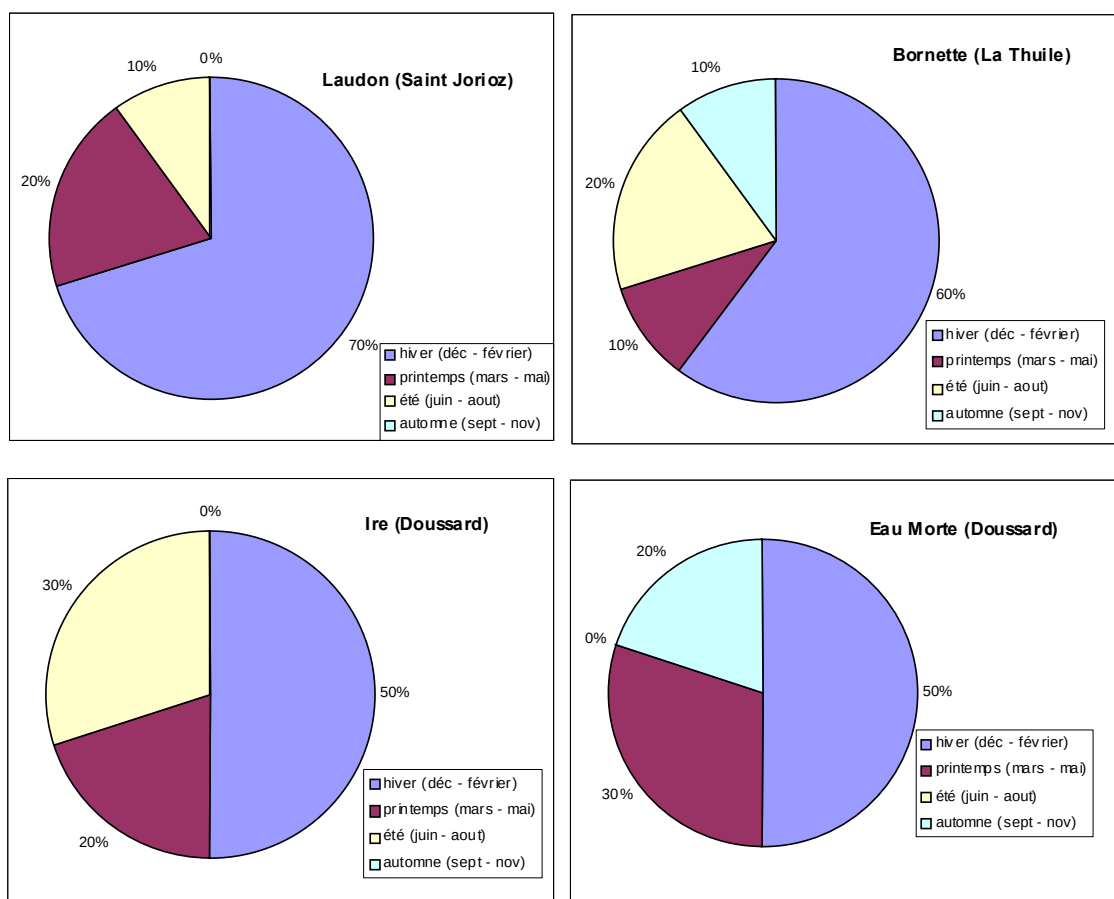


figure 9 Répartition saisonnières des crues extrêmes – affluents du Lac d'Annecy

5.2.1.c Etiages

Deux paramètres ont été calculés pour caractériser les étiages des affluents instrumentés du Lac d'Annecy :

- QMNA5 : débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée,
- VCN 10 : débit moyen minimal sur 10 jours consécutifs.

Les résultats sont présentés dans le tableau 8.

	station	Eau Morte (Doussard)		Ire (Doussard)		Laudon (Saint Jorioz)		Bornette (Lathuile)	
	superficie	92.54 km²		27.1 km²		29.2 km²		11.64 km²	
	période	1975-2010		1980-2010		1977-2010		1987-2010	
QMNA5	m³/s	0.62		0.14		0.03		0.04	
	l/s/km²	6.7		5.2		1.0		3.4	
débit minimal mensuel observé	m³/s	0.43	oct-09	0.07	juil-03	0.01	août 89	0.02	juil-03
	l/s/km²	4.6		2.6		0.3		1.7	
VCN10 fréquence quinquennale	m³/s	0.48		0.08		0.003		0.02	
	l/s/km²	5.2		3.0		0.1		1.7	
Vcn10 min observé	m³/s	0.37	août 94	0.04	août 94	~0.0	août-03	0.01	août-03
	l/s/km²	4.0		1.3		~0.0		0.6	

tableau 8. Débits caractéristique d'étiages - affluents instrumentés du Lac d'Annecy

Les données de l'étude de SOGREAH [3] n'ont pas pu être comparées à ces résultats car le type de paramètre d'étiage étudié n'est pas précisé.

5.2.2 Emissaires du Lac

Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment, le Lac d'Annecy dispose de trois émissaires :

- le canal du Thiou : exutoire naturel du Lac d'Annecy qui renvoie les eaux du Lac vers le Fier (affluent du Rhône),
- le canal du Vassé : canal artificiel qui rejoint le Thiou dans Annecy,
- le canal st Dominique (ou canal Saint François) : canal artificiel reliant le Thiou au canal du Vassé.

Les débits du Thiou et du Vassé sont suivis quotidiennement par les services techniques de la mairie d'Annecy. Les débits du canal Saint Dominique ne sont pas enregistrés, ils apparaissent comme négligeables comparés à ceux du Thiou et du Vassé.

5.2.2.a Débits moyens

Les débits moyens mensuels et annuel des émissaires (canal de Vassé et Thiou) du Lac d'Annecy ont été calculés sur la période 1967 -2010, non compris les années 1970 à 1974.

m3/s	janv	fév	mars	avril	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	an
Thiou et Vassé	9.73	9.91	10.95	12.01	11.15	8.17	5.31	3.37	4.62	6.28	7.76	9.38	8.22

tableau 9. débits moyens mensuels et annuel – canaux d'Annecy

Le module annuel de 8.22 m³/s est cohérent avec la valeur de 8.25 m³/s indiquée dans l'étude de SOGREAH [3] et calculée sur une période plus restreinte : 1967 -1993.

Une forte variabilité de l'hydraulicité annuelle est constatée avec un maximum de 12 m³/s (43.3 l/s/km²) en 1968 et un minimum de 3.56 m³/s en 1989 (12.8 l/s/km²) pour la période 1965 – 2010 (cf. figure 10). On notera en particulier les années 2003, 2004 et 2005 où pendant 3 années consécutives le débit moyen annuel des exutoires du Lac d'Annecy a été compris entre 5,1 et 5.5 m³/s.

Le débit moyen de la dernière décennie, 2001-2010, est de 7.15 m³/s soit un déficit d'hydraulicité de 13%.

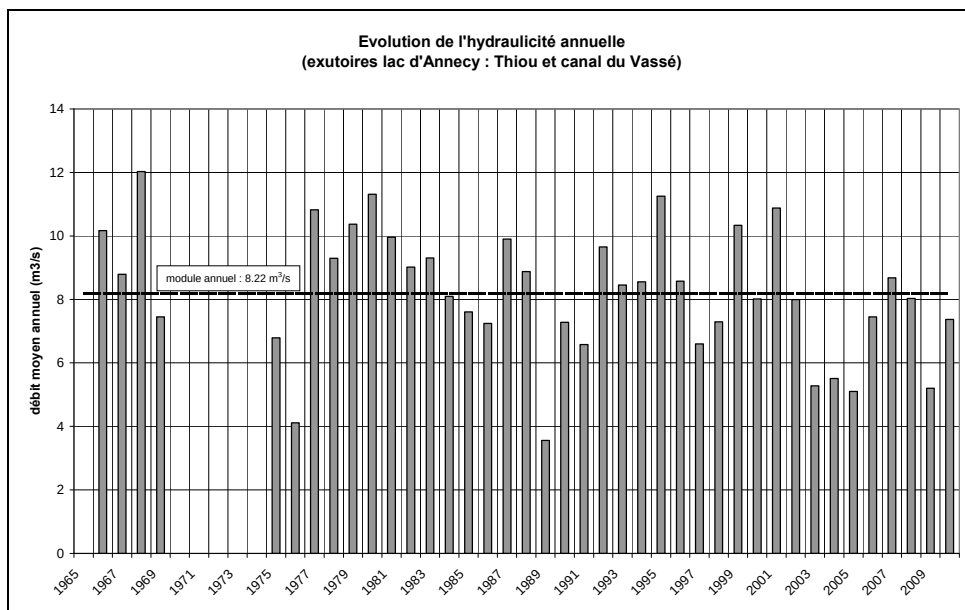


figure 10 Chronique des débits annuels du Thiou et du canal du Vassé, 1967 - 2010

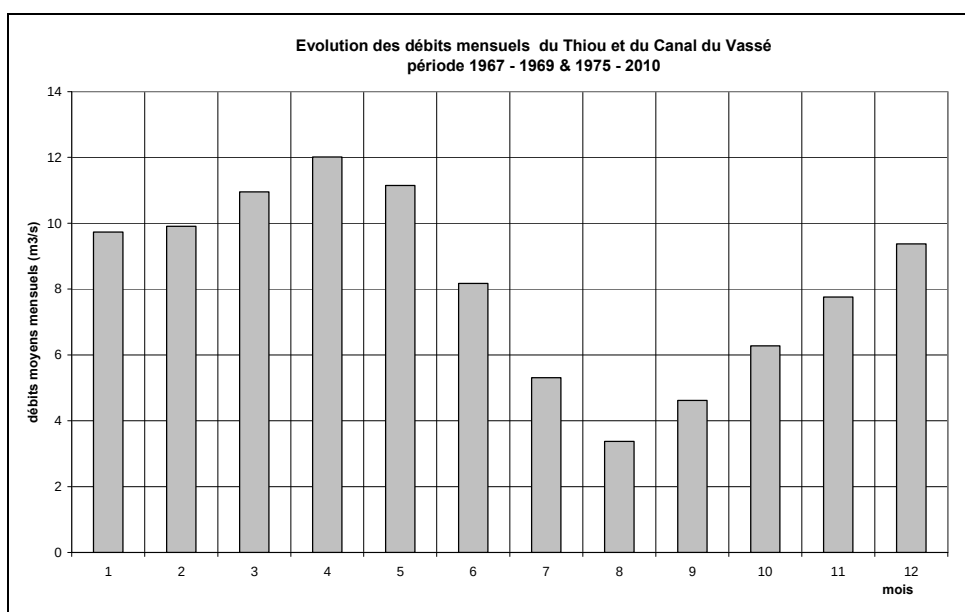


figure 11 Evolution des débits mensuels du Thiou et du canal du Vassé

Bien que les débits du Thiou soient en partie artificiels en raison de la régulation de la cote du Lac, le régime hydrologique des émissaires du Lac peut être considéré de type nivo-pluvial, similaire à celui observé sur les affluents instrumentés du Lac : les hautes eaux principales correspondent à la fonte nivale printanière, une seconde recrudescence des débits est observée à l'automne alors que l'étiage est enregistré en été.

Les coefficients mensuels de débits (pour un mois donné rapport du débit moyen mensuel au module annuel) des émissaires et des affluents instrumentés sont comparés sur la figure 12. Ce paramètre permet de confirmer qu'au pas de temps mensuel, le régime hydrologique des émissaires du Lac est relativement proche de celui observé pour les apports entrants. Au pas de temps mensuel,

les effets tampon de la retenue sont visibles uniquement de janvier à mai avec des débits sortants plus soutenus que les apports entrant de janvier à février, ce phénomène s'inverse de mars à mai.

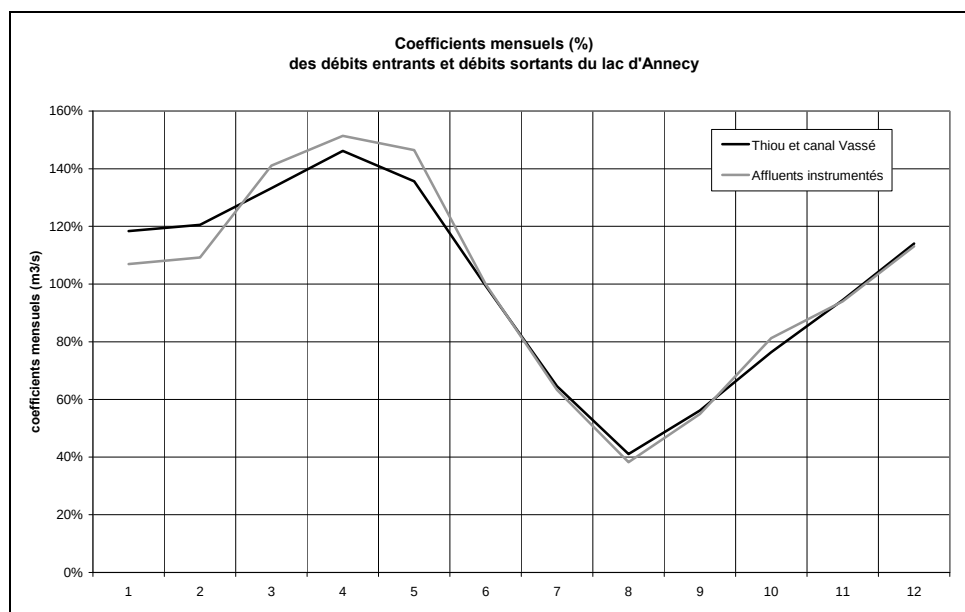


figure 12 Coefficients mensuels des débits sortants et des apports instrumentés

5.2.2.b Crues

Suite aux travaux de modernisation des ouvrages de régulation du Lac et de recalibrage des canaux en 1965, le débit maximum qui peut transiter dans les canaux d'Annecy est évalué à 51,5 m³/s avec 40 m³/s pour le canal du Thiou et 11.5 m³/s pour les canaux du Vassé et Saint Dominique. Au-delà, les canaux déborderaient ce qui ne s'est pas produit depuis 1965.

Les débits de crue caractéristiques des canaux d'Annecy ont été calculés à partir de la chronique des débits journaliers disponibles sur la période 1993 – 2010. Les résultats sont présentés dans le tableau 10.

Canaux	278 km ²	m3/s l/s/km ²	Crue biennale	crue quinquennale	crue décennale	crue centennale	maximum observé	
			34	38	40	50	Juillet 1997	42
			122	137	145	180		150

tableau 10. Débits caractéristiques de crue – canaux d'Annecy période 1993 - 2010

Au regard des débits spécifiques, on note une forte atténuation des crues des émissaires du Lac par rapport à celles des affluents. Elle s'explique par l'effet de rétention naturel du Lac mais également par la régulation mise en place depuis 1965 qui permet de gérer au mieux et d'écarter les crues en sortie du Lac.

A noter que le débit de la crue centennale correspond au débit maximum pouvant être évacué avant débordement des canaux d'Annecy.

Les valeurs de crues caractéristiques annoncées dans l'étude de SOGREAH [3] étaient relativement similaires à nos résultats avec une crue décennale de 42 m³/s et une crue centennale de 55 m³/s et ce bien que la période de calcul était totalement différente : 1967 -1984.

La répartition saisonnière des 10 plus fortes crues historiques annuelles observées sur la période 1996-2010 a été étudiée. Comme pour les apports du Lac, la saison hivernale (décembre à février) apparait la plus à risque.

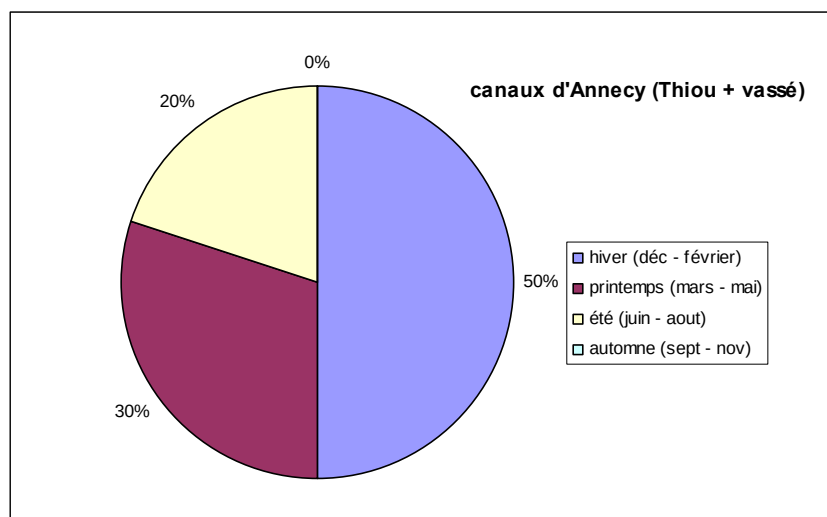


figure 13 Répartition saisonnière des crues extrêmes des canaux d'Annecy

5.2.2.b.i Etiages

Les débits d'étiage des émissaires du Lac d'Annecy ont été calculés. Les résultats sont présentés dans le tableau 11. Les valeurs du VCN10 de période de retour 5 ans et du QMNA5 des émissaires du Lac sont de l'ordre de grandeur des étiages calculés pour les affluents (Ire et Eau Morte).

			QMNA5	QMNA observé		VCN10 5 ans	VCN10 observé		Min absolu journalier	
		Période	1963 – 2010			1996 – 2010				
Canaux	278 km²	m3/s	1.13	août	0.42	1.45	août 1998	1.25	29&30 &	0.0
		l/s/km²	4.1	1976	1.5	5.2		4.5	31 oct 98	0.0

tableau 11. Débits caractéristiques des étiages – émissaires du Lac d'Annecy

5.3 Evaporation au droit du Lac

Les pertes mensuelles par évaporation sur le Lac d'Annecy ont été estimées par application de la formule de Turc. Les résultats sont présentés dans le tableau 12.

$$E_{(mm / mois)} = 0.015 * \left(\frac{T}{T + 15} \right) * (R_g + 50)$$

Formule de Turc

Avec :

T : température mensuel en °C

Rg : rayonnement global en cal/cm²/mois

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
T (°C)	1.4	3.0	6.5	9.6	14.2	17.7	20.1	19.5	15.8	11.5	5.6	2.3	10.6
Rg (cal/cm²)	3 832	6 375	9 881	10 912	12 544	12 802	14 692	13 661	11 943	8 678	4 313	3 694	9 444
E (mm)	5.0	16.2	45.0	64.1	91.8	104.3	126.6	116.2	92.3	56.9	17.8	7.5	743.6
E (m³/s)	0.05	0.18	0.46	0.68	0.94	1.10	1.29	1.19	0.98	0.58	0.19	0.08	0.64

tableau 12. Evaporation mensuelle et annuelle calculée pour le Lac d'Annecy

A titre d'information, l'évaporation annuelle évaluée lors de l'étude de SOGREAH [3] est de $0.60 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une lame d'eau annuelle de 690 mm. Aucune information n'est donnée sur la répartition mensuelle de l'évaporation ni sur la période de calcul

Lors du bilan hydrique du Lac d'Annecy réalisé sur l'année hydrologique 1966-1967 [4], l'évaporation mensuelle a été mesurée. Ces valeurs historiques, issues de mesures de terrain, ont été rapprochées des résultats théoriques obtenus par application de la formule de Turc sur figure 14. Elle confirme l'allure de la répartition mensuelle de l'évaporation calculée par la formule de Turc et permet de valider les résultats du tableau 12.

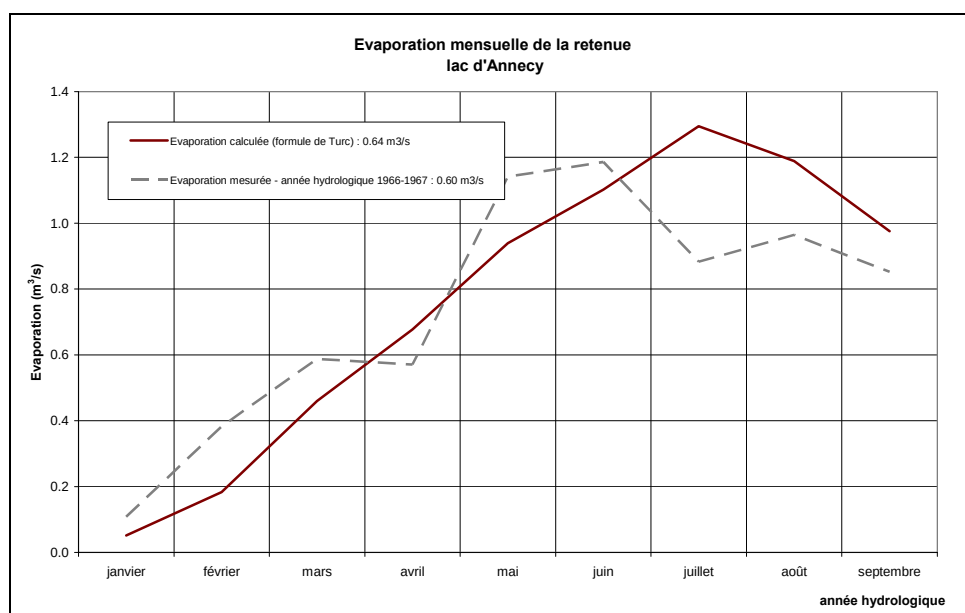


figure 14 Evaporation mensuelle – retenue du Lac d'Annecy

5.4 Prélèvements pour activités humaines

Les prises d'eau pour les activités humaines (principalement alimentation en eau potable) ont été recensées autour du Lac. Elles sont localisées sur 5 communes riveraines :

- Annecy : prise d'eau de la Puya et prise d'eau de la Tour,
- Saint Jorioz,
- Talloires,
- Menthon Saint Bernard,
- Veyrier du Lac.

La Communauté de l'Agglomération d'Annecy dispose des volumes mensuels prélevés par les villes d'Annecy et de Saint Jorioz (cf. tableau 13).

Volume annuel prélevé 10^3 m^3	Période de l'histoire	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
Annecy	1989 & 1994-2010	813	751	823	803	833	872	913	853	812	832	777	798	9 879
St Jorioz	2006-2009	35	33	32	38	45	48	59	68	49	47	38	32	524
total		848	784	854	842	877	920	972	921	861	879	815	830	10 403

tableau 13. Prélèvements mensuels dans Lac d'Annecy pour activités humaines (10^3 m^3) – source Communauté de l'Agglomération d'Annecy

Des informations sur les prélèvements annuels réalisés par les communes de Talloires, Menthon Saint Bernard et Veyrier du Lac ont été téléchargées depuis le site Internet de l'Agence de l'Eau RMC.

Volume annuel prélevé 10^3 m^3	Période de l'histoire	Prélèvements annuels 10^3 m^3
Talloires	1987-1996	270
Menthon Saint Bernard	1987-2009	238
Veyrier du Lac	1987-2008	79
Total		587

tableau 14. Prélèvements annuels dans Lac d'Annecy pour activités humaines (10^3 m^3) – source Agence de l'Eau RMC

Les prélèvements de Talloires, Menthon Saint Bernard et Veyrier du Lac sont très faibles en comparaison des prélèvements réalisés par les pompages d'Annecy et Saint Jorioz. Ils représentent seulement 5% des volumes totaux prélevés sur le Lac d'Annecy. Pour établir le bilan hydrique du Lac d'Annecy, il est nécessaire de disposer des prélèvements au pas de temps mensuel. En l'absence d'informations complémentaires, le volume annuel ($587 \text{ } 10^3 \text{ m}^3$) prélevé par les villes de Talloires, Menthon St Bernard et Veyrier du Lac a été réparti sur les 12 mois de l'année en imposant la même répartition mensuelle que celle observée pour le prélèvement de la commune de Saint Jorioz (présence d'un pic de volume prélevé pendant la saison estivale en lien avec l'augmentation de la population).

Le tableau 15 synthétise les volumes mensuels prélevés dans le Lac par les communes riveraines et qui seront exploités par la suite pour établir le bilan hydrique du Lac d'Annecy.

Volume prélevé	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
10^3 m^3	896	829	903	890	927	972	1 026	972	909	928	861	878	10 990
m^3/s	0.33	0.34	0.34	0.34	0.35	0.37	0.38	0.36	0.35	0.35	0.33	0.33	0.35

tableau 15. Prélèvements mensuels dans Lac d'Annecy pour activités humaines (10^3 m^3)

L'étude SOGREAH [3] indique un débit prélevé pour l'alimentation en eau potable aux différentes prises d'eau du Lac de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui correspond à un volume annuel de $9\,461\,10^3 \text{ m}^3$. Depuis 1998 on note une augmentation des prélèvements d'eau potable de 15% (soit $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) essentiellement liée à l'augmentation des captages de la commune d'Annecy (cf. figure 15).

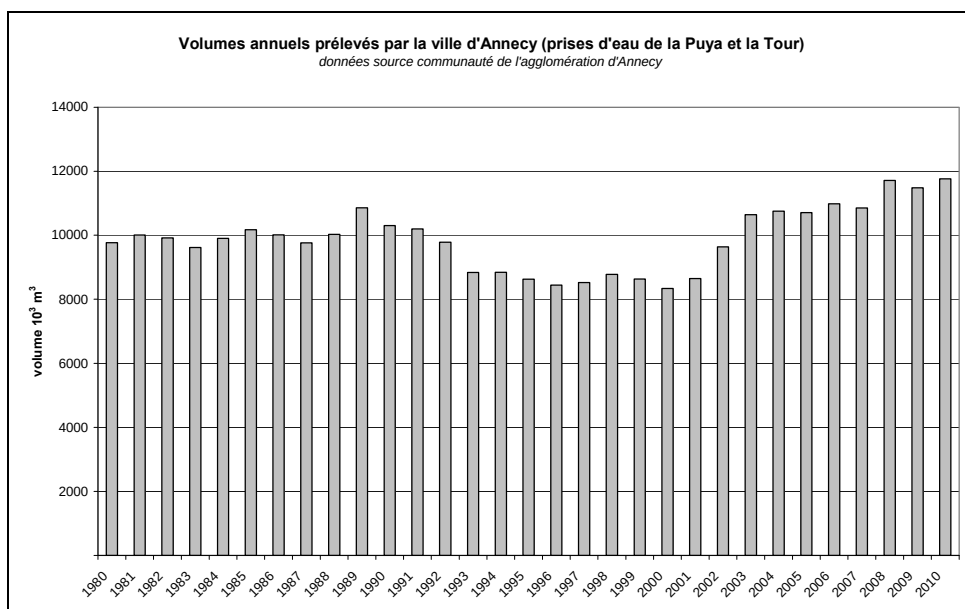


figure 15 Evolution des prélèvements annuels pour activités humaines – pompage d'Annecy

5.5 Formulation du bilan hydrique

La formulation du bilan hydrique du Lac d'Annecy peut s'écrire sous la forme :

$$Q_{\text{aff_inst}} + Q_{\text{BVI}} + P_{\text{lac}} = Q_{\text{émissaire}} + AEP + E_{\text{lac}} + \Delta R \text{ (m}^3/\text{s)}$$

avec :

- $Q_{\text{aff_inst}}$: apport des affluents instrumentés, 160 km^2 (Bornette, Laudon, Ire et Eau Morte)
- Q_{BVI} : apport des affluents non instrumentés (90 km^2) et apport sources lacustres
- P_{lac} : précipitation directe sur le Lac d'Annecy (27.8 km^2)
- $Q_{\text{émissaire}}$: débit des émissaires (Thiou et canal Vassé)
- AEP : débit prélevé sur le Lac pour les activités humaines (essentiellement alimentation en eau potable)
- E_{lac} : évaporation directe sur le Lac
- ΔR : stockage ou déstockage lié au fonctionnement de la retenue

Au pas de temps annuel, le terme ΔR peut être négligé. Les éléments identifiés dans les chapitres précédents permettent ainsi d'estimer le terme Q_{BVI} annuel par la formule suivante:

$$Q_{BVI} = Q_{\text{émissaire}} + AEP + E_{\text{lac}} - (Q_{\text{aff}_{\text{inst}}} + Pl_{\text{lac}}) \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{soit } Q_{BVI} = 8.22 + 0.35 + 0.64 - (4.86 + 1.08) = 3.26 \text{ m}^3/\text{s}$$

En lien avec l'écologie des roseaux, les lames d'eau trimestrielles écoulées au droit des bassins versants instrumentés et non instrumentés ont été calculées. Les résultats sont présentés en tableau 16 et en figure 16.

Lames d'eau écoulées (mm)	Eau Morte à Doussard (92.5 km²)	L'Ire à Doussard (27.1 km²)	Le Laudon à St-Jorioz (29.2 km²)	La Bornette à Lathuile (11.6 km²)	BV non instrumenté (90 km²)	Total BV instrumenté (160.4 km²)
1 ^{er} trimestre	277	291	282	298	337	301
2 ^d trimestre	320	440	208	270	378	339
3 ^{ème} trimestre	132	155	79	124	150	135
4 ^{ème} trimestre	217	281	219	266	277	248
annuel	945	1 167	788	958	1 143	1 023

tableau 16. lames d'eau écoulées (mm) – bassin versant d'Annecy

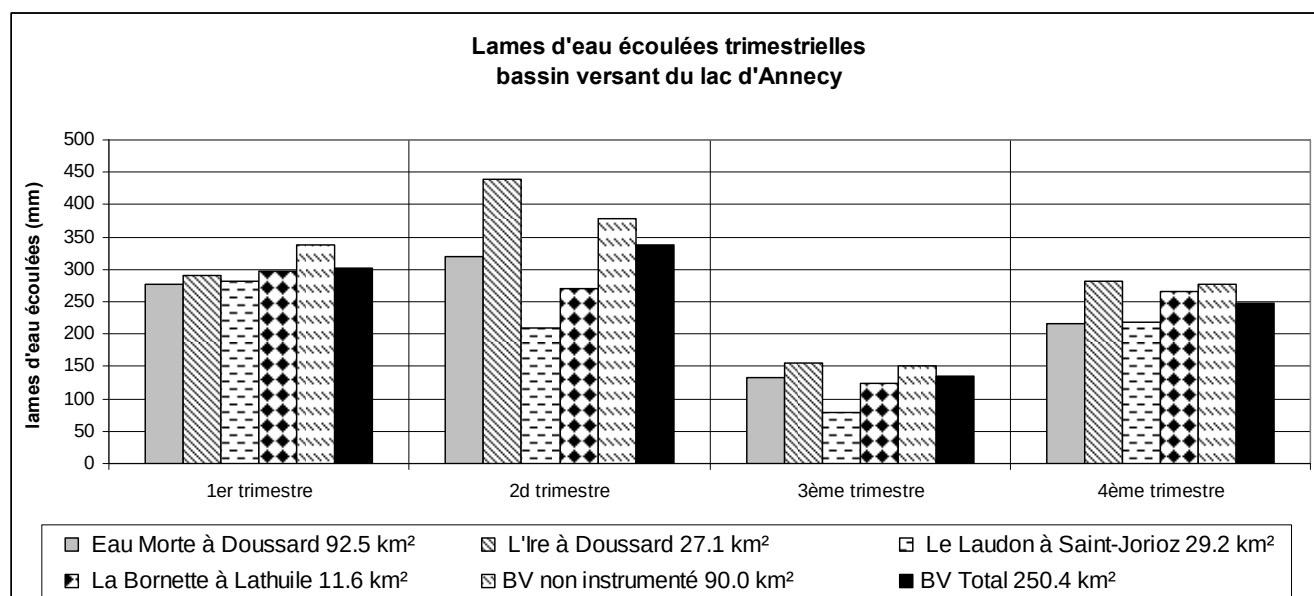


figure 16 Lames d'eau écoulées trimestrielles (mm) – BV d'Annecy

En faisant l'hypothèse que la répartition mensuelle des débits spécifiques du bassin non instrumenté est identique à celle des 160 km² contrôlés, le bilan hydrique mensuel a été déterminé. Il est présenté dans le tableau qui suit.

		AN	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Entrant	$Q_{\text{aff inst}}$	4.86	5.2	5.3	6.9	7.4	7.1	4.9	3.1	1.9	2.7	4.0	4.6	5.5
	Q_{BVI}	3.26	3.49	3.57	4.61	4.94	4.78	3.26	2.07	1.25	1.79	2.65	3.07	3.69
	PI_{lac}	1.08	1.01	1.01	1.01	0.99	1.13	1.15	1.04	1.03	1.19	1.22	1.08	1.13
	Total entrant	9.21	9.70	9.88	12.48	13.29	13.03	9.27	6.18	4.13	5.65	7.82	8.72	10.3 ₃
sortant	E_{lac}	0.64	0.2	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.2	1.0	0.6	0.2	0.1
	$Q_{\text{émissaire}}$	8.22	9.73	9.91	10.95	12.01	11.15	8.17	5.31	3.37	4.62	6.28	7.76	9.38
	AEP	0.35	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
	Total sortant	9.21	10.08	10.51	11.73	13.03	12.43	9.62	7.00	4.94	5.96	7.16	8.26	9.77
Variation retenue	ΔR	0.00	-0.38	-0.63	0.75	0.26	0.60	-0.35	-0.82	-0.81	-0.31	0.66	0.46	0.56

tableau 17. Bilan hydrique mensuel du Lac d'Annecy – m³/s

Le bilan hydrique moyen annuel du Lac d'Annecy est ainsi estimé à 9.21 m³/s soit un volume 290,4 10⁶ m³. Il est identique à celui fournit dans l'étude SOGREAH-1998 (290 10⁶ m³/an) mais à l'intérêt de fournir des informations au pas de temps mensuel pour comprendre l'alimentation et le fonctionnement hydraulique du Lac.

Le volume de la retenue du Lac d'Annecy pour une cote normale (80 cm à l'échelle du Pont de la Halle) est de 1 026 10⁶ m³. Le renouvellement des eaux du Lac est de l'ordre de 3,5 années.

6 ANALYSE DES CHRONIQUES DE NIVEAU

6.1 Historique de la régulation du Lac

Comme nous l'avons déjà précisé auparavant (§ 3), la régulation du Lac d'Annecy par des ouvrages régulateurs est effective depuis 1874. Le règlement associé a été établi trois ans plus tard en 1877. Depuis cette date, les canaux du Thiou et du Vassé sont affranchis du fonctionnement hydraulique naturel du Lac. Des travaux de dragage (1884 et 1905), de curage (1904 – 1905) et de bétonnage des canaux (1914) ont permis d'améliorer l'écoulement des canaux d'Annecy. Ils ont eu pour conséquence d'augmenter la capacité du débit sortant au droit des émissaires du Lac, réduisant dans le même temps le risque de crues majeures.

Plus récemment, des travaux de modernisation des systèmes de régulation et de recalibrage des canaux ont été réalisés en 1965. Ils ont permis d'augmenter les effets de la régulation en réduisant le marnage du niveau du Lac.

L'étude de l'évolution des chroniques de niveau du Lac doit donc tenir compte de 3 périodes historiques :

- avant 1874 : écoulement naturel du Lac,
- de 1874 à 1964 : 1^{er} régulation du Lac avec différentes phases de travaux de dragages, curages et bétonnage,
- après 1965: modernisation des ouvrages de régulation et recalibrage des canaux.

Les chroniques historiques du niveau du Lac et des informations associées ont été recensées. L'annexe 5 synthétise les éléments collectés.

6.2 Evolution du niveau moyen de la retenue et du marnage annuel

6.2.1 Niveau moyen annuel du Lac

Nous ne disposons pas de chronique des niveaux du Lac avant la mise en place de la régulation de 1874. Seules des informations ponctuelles ont été recensées dans la littérature en particulier dans les articles de H.Onde [2]. La cote moyenne du Lac, par rapport au zéro de l'échelle du Pont de la Halle, peut être estimée à :

- 80 cm en 1840,
- 53 à 58 cm en 1855.
- 46 cm de 1862 à 1868.

Le règlement de la régulation du Lac de 1877 fixe l'amplitude des niveaux normaux extrêmes à 55 cm avec une cote conventionnelle de 80 cm par rapport au zéro de l'échelle du Pont de la Halle. L'étiage conventionnel est fixé à la cote 25 cm : à partir de ce niveau les canaux d'Annecy ne laissent s'écouler que les débits entrants soit les apports des affluents et des sources lacustres. Dans la réalité, la cote moyenne annuelle du Lac observée entre 1906-1913 & 1921-1931 se situe entre 65 et 70 cm ce qui est inférieure à la cote moyenne conventionnelle.

De 1933 à 1956 nous ne disposons pas d'éléments permettant de déterminer la cote moyenne du Lac. Les chroniques mensuelles des services techniques de la mairie d'Annecy débutent en 1957 et permettent de déterminer la cote moyenne annuelle du Lac avant et après les travaux de 1965 :

- Période 1957 -1964 : 65 cm
- Période 1966 – 2010 : 74 cm

Les travaux de 1965 ont permis d'exhausser la cote moyenne annuelle du Lac de près de 10 cm. De 1975 à 2010, le niveau moyen annuel du Lac a été seulement une seule fois inférieur à 70 cm (65 cm en 2003) alors que ce phénomène était régulièrement observé avant 1965.

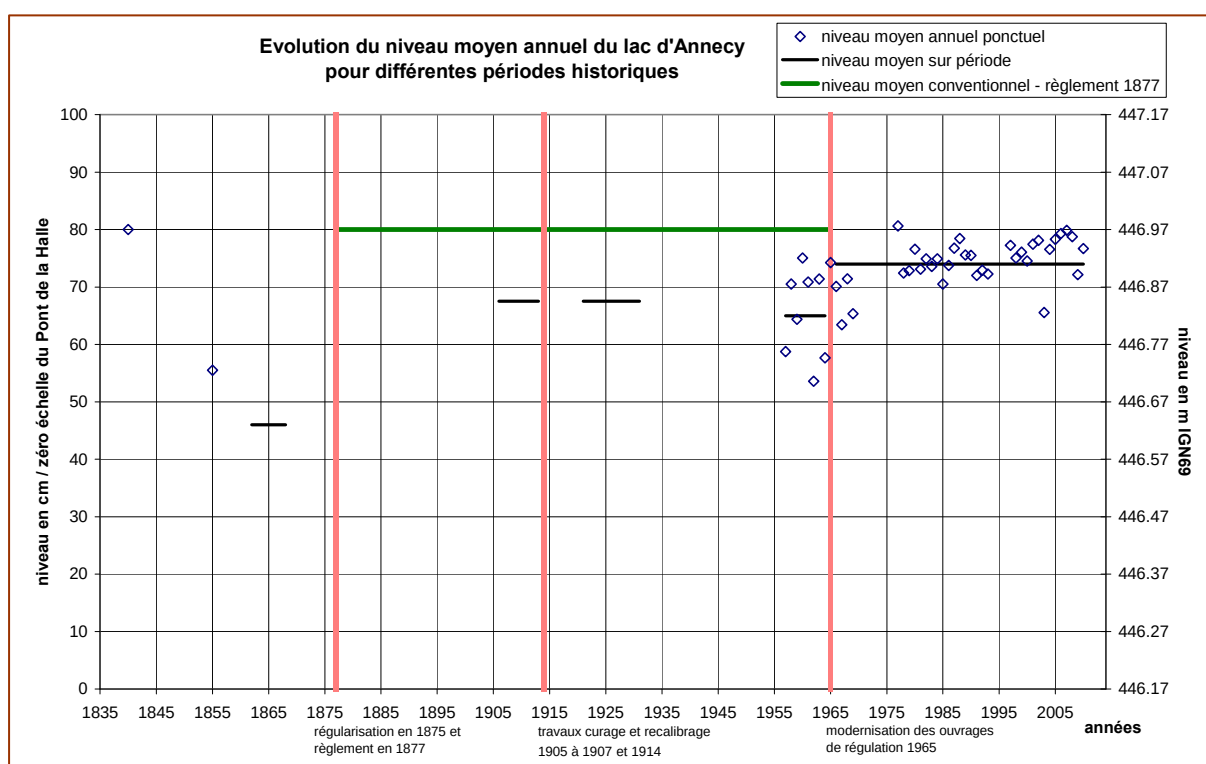


figure 17 Evolution du niveau moyen annuel du Lac d'Annecy pour différentes périodes historiques

La cote moyenne annuelle de la dernière décennie (2001-2010) avec une valeur de 76 cm est peu impactée par rapport à la faiblesse de l'hydraulicité des apports entrants et sortants du Lac.

6.2.2 Niveau moyen mensuel

Nous ne disposons que de très peu d'informations sur l'évolution mensuelle du niveau du Lac avant 1910.

Les seuls éléments recensés sont issus des travaux d'A Cronard [6]. Ils consistent en des graphiques de l'évolution journalière de la cote du Lac pour les années 1865 et 1892 à 1902. Ils ne sont pas suffisamment précis pour être numérisés et exploités.

Les écrits de H.Onde [2] indiquent le niveau moyen mensuel du Lac pour 2 périodes anciennes : 1906-1913 et 1921-1931, soit avant et après les travaux de bétonnage de 1914 des 2 canaux. Leurs évolutions sont comparées sur la figure 18.

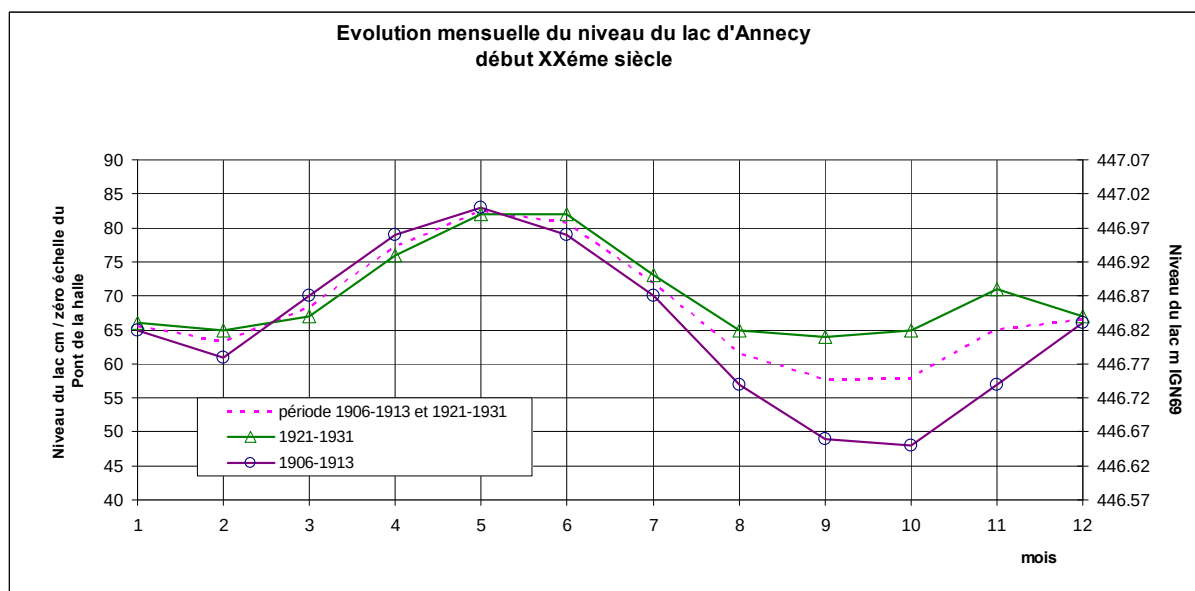


figure 18 Evolution mensuelle du niveau du Lac d'Annecy – début du XX^{ème} Siècle

De fortes différences de fonctionnement du niveau du Lac d'Annecy sont observées essentiellement sur la période d'août à novembre. Pour les années 1906-1913, les étiages du Lac sont plus sévères avec une cote minimale atteignant 48 cm (octobre) contre 64 cm (septembre) pour la période 1921 – 1931. Ces 2 périodes présentent des hydraulicités annuelles similaires avec des modules du Thiou de 9.15 m³/s pour la période 1906-1913 et 9.36 m³/s pour la période 1921-1931.

Les débits moyens mensuels du Thiou n'apportent pas d'éléments intéressants sur la compréhension de l'hydraulicité de ces 2 périodes car ils sont non naturels du fait de la régulation. Il serait nécessaire de disposer de l'hydrogramme mensuel des apports du Lac pour comprendre les différences d'hydraulicité des deux périodes, en particulier concernant la présence d'un étiage automnal sévère pour la période 1906-1913. Ces informations ne sont pas disponibles, par contre l'analyse de la pluviométrie à Annecy confirme la présence de mois d'août et septembre plus arrosés sur la période 1921-1931 qui expliquerait le fait que l'étiage associé soit peu marqué sur le Lac (cf. figure 19).

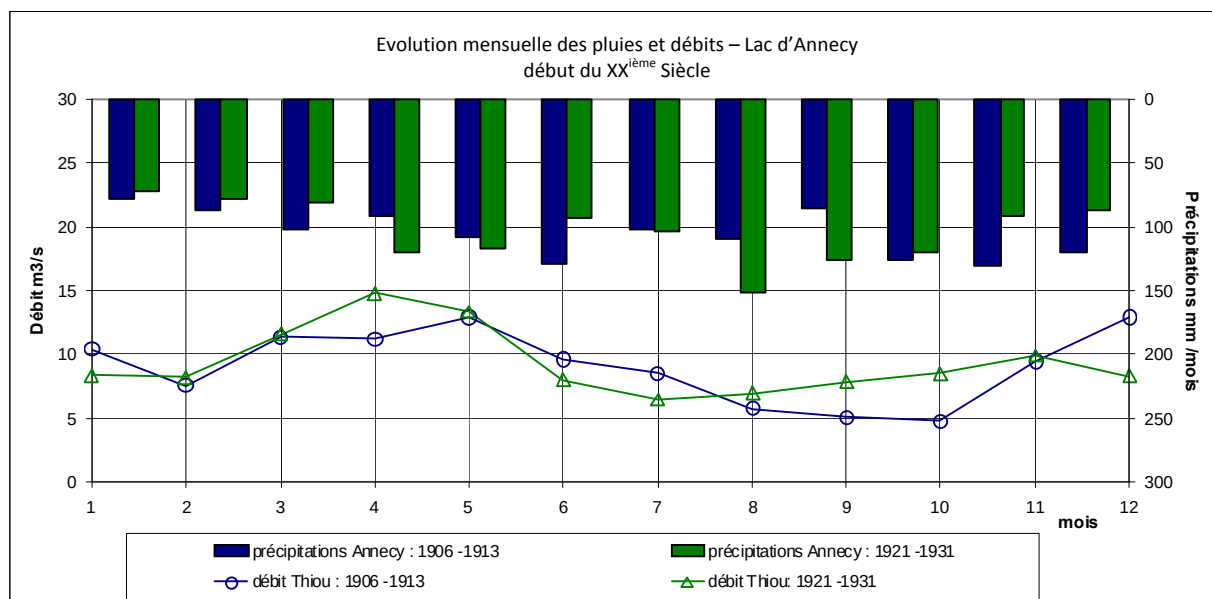


figure 19 Evolution mensuelle des débits et précipitations - Lac d'Annecy – début du XX^{ème} Siècle

Au final, on retiendra que le marnage annuel du Lac d'Annecy au début du XX^{ème} Siècle était de l'ordre de 25 cm avec des variations importantes en fonction de l'année considérée.

période	Maximum moyen		Minimum moyen		Marnage moyen annuel
	Niveau cm	mois	Niveau cm	mois	Niveau cm
1906 - 1913	83	mai	48	octobre	35
1921 - 1931	82	mai	64	septembre	18
Total	82	mai	58	octobre	25

tableau 18. Variation du marnage annuel du Lac – début XX^{ème} Siècle

Nous disposons des chroniques mensuelles du niveau du Lac de 1957 à 2010. Le marnage annuel a été calculé pour 2 périodes distinctes : avant et après modernisation des ouvrages de régulation du Lac (1965).

Les évolutions des niveaux mensuels de la cote du Lac sont présentées graphiquement sur la figure 20. Le marnage moyen annuel, calculé à partir de ces limnigrammes moyen mensuel, est synthétisé dans le tableau 19.

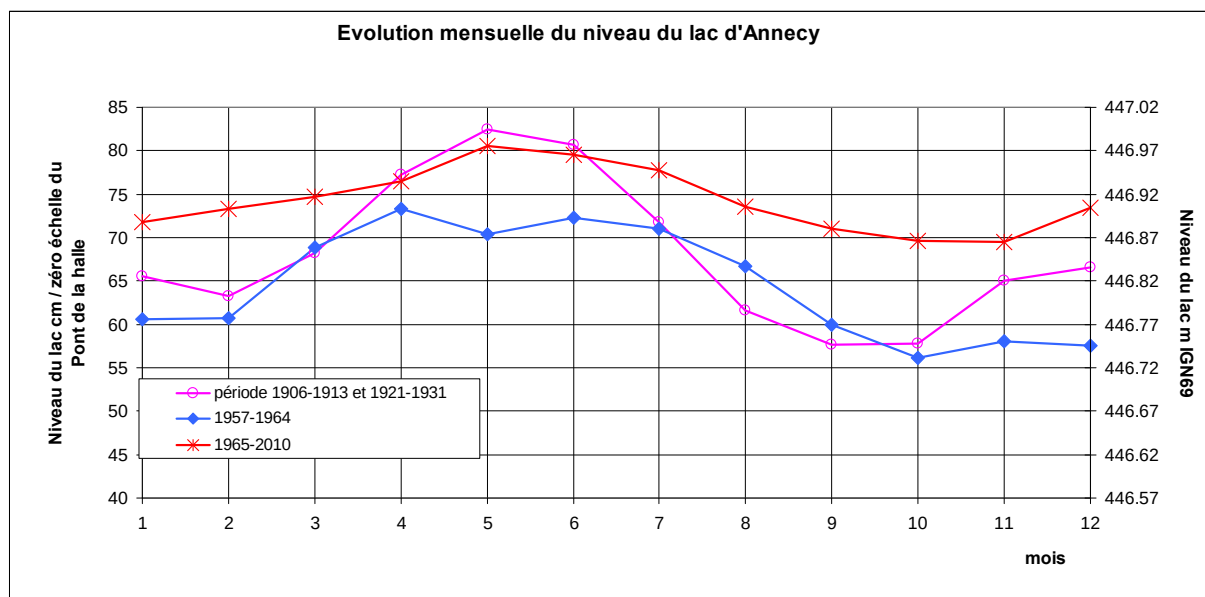


figure 20 Evolution des niveaux mensuels du Lac d'Annecy pour différentes périodes

période	Définition de la période	Maximum moyen		Minimum moyen		Marnage moy. annuel
		Niveau cm	mois	Niveau cm	mois	Niveau cm
Avant 1874	Avant régulation	Information non disponible				
1874 à 1906	Après régularisation de 1874 + règlement de 1877					
1906 - 1913	Après travaux de recalibrage de 1906	83	mai	48	Oct.	35
1921 - 1931	Après travaux de recalibrage de 1914	82	mai	64	Sept.	18
1906 -1913 & 1921 -1931	Début XX ^{ème} Siècle	82	mai	58	Oct.	25
1957 -1964	Milieu XX ^{ème} Siècle	73	Avril - Mai	56	Oct.	17
1966 - 2010	Modernisation des ouvrages	81	Mai	70	Oct- Nov	11
2001- 2010		84	Mai	71	Oct.	14

tableau 19. Synthèse du marnage moyen annuel du Lac en fonction de la régulation

Remarque :

Le marnage annuel du niveau Lac sur la dernière décennie (2001-2010), identifiée comme “sèche”, a été calculé. Avec une valeur de 14 cm, il est supérieur au marnage de la période complète 1966-2010. La différence n'est pas liée à la période d'étiage mais aux hautes eaux qui sont plus élevées de + 3 cm (84 cm pour 2001-2010 contre 81 cm pour 1966-2010). En effet au cours de la dernière décennie, la cote moyenne mensuelle du Lac pour le mois de mai n'est jamais passée en dessous de 80 cm alors que le niveau mensuel du Lac a été enregistré 14 fois en dessous de 80 cm pour ce même mois sur les 30 années disponibles de 1966 -2000 (1 année sur 2).

Les valeurs présentées ci-avant dans le tableau 19, sont des marnages moyens annuels déterminés sur des limnigrammes moyens mensuels calculés pour une période donnée. La figure 21 présente les résultats de marnages annuels issus d'un autre calcul. Cette fois ci pour chaque année de la période, le marnage annuel a été déterminé à partir des cotes moyennes mensuelles extrêmes, le marnage interpériode correspond à la moyenne des marnages annuels ainsi identifiée. Les cotes extrêmes et le marnage annuel interpériode sont de ce fait plus marqués avec notamment les valeurs suivantes pour le marnage annuel interpériode :

- Période 1957 -1964 : 38 cm,
- Période 1965 -2010 : 22 cm,
- Période 2001 -2010 : 20 cm.

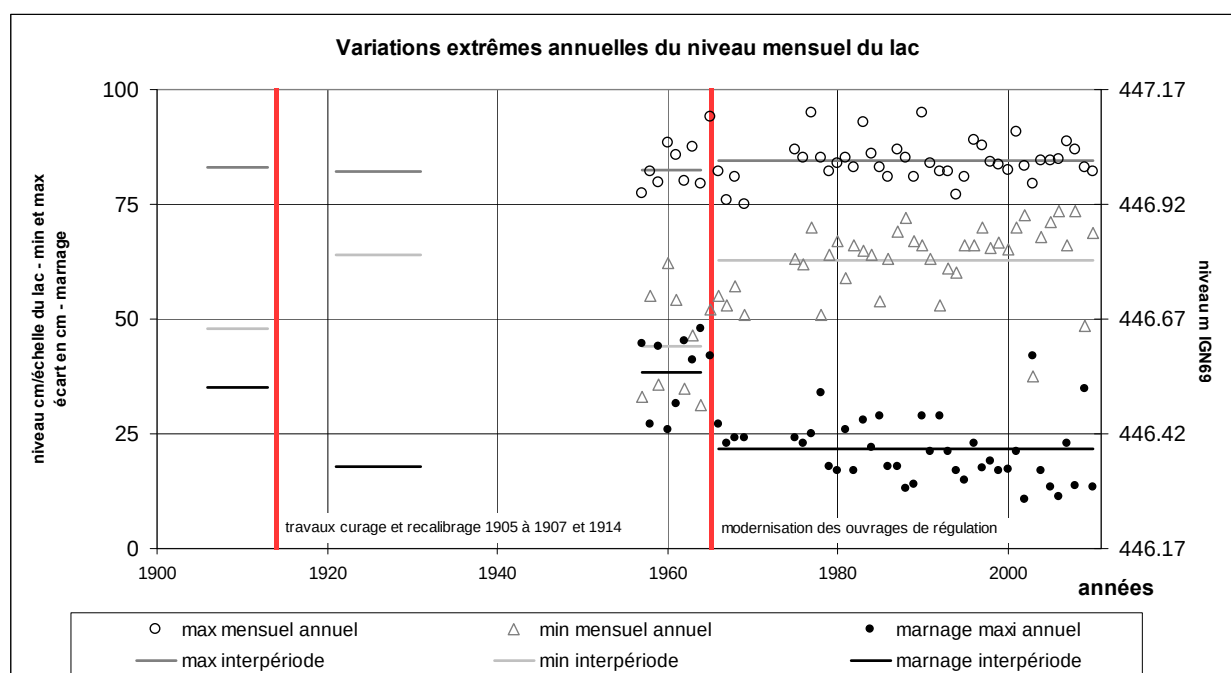


figure 21 Evolution des niveaux extrêmes mensuels du Lac d'Annecy pour différentes périodes historiques

6.2.3 Niveau moyen journalier

Les marnages présentés dans le chapitre précédent sont des marnages annuels calculés sur des niveaux moyens mensuels. Il est intéressant de les comparer à des marnages annuels calculés sur des niveaux moyens journaliers. L'objectif est de quantifier les écarts entre les marnages annuels de ces 2 pas de temps. Cette analyse a été réalisée pour les périodes disposant de chroniques journalières et mensuelles des niveaux du Lac soit 1957 -2010.

	Définition de la période		maximum moyen	minimum moyen	Marnage moyen
			Niveau cm	Niveau cm	Niveau cm
Marnage mensuel	1957 -1964	Milieu XX^{ème} Siècle	83	44	38
	1966- 2010	Modernisation des ouvrages	85	63	22
Marnage journalier	1957 -1964	Milieu XX^{ème} Siècle	104	36	68
	1966- 2010	Modernisation des ouvrages	96	59	37

tableau 20. Synthèse du marnage annuel pour différents pas de temps – mensuel et journalier

Les résultats présentés dans le tableau 20 confirment que le marnage maximum observé est très différent s'il est calculé à partir de données de niveaux mensuels ou journaliers.

Ces deux approches sont intéressantes à observer car si du point de vue du cycle biologique du roseau, c'est le pas de temps sur des niveaux moyens mensuels qu'il faut regarder, les niveaux moyens journaliers apportent de l'information quant aux éventuels effets mécaniques sur les roselières dus par exemple à la houle et/ou aux flottants.

La figure 22 compare l'évolution moyenne du niveau du Lac d'Annecy au pas de temps journalier pour les périodes historiques 1957 -1964 et 1966 -2010 soit avant et après modernisation des ouvrages de régulation des canaux d'Annecy. Nous notons que la période avant 1965 présente de nombreuses fluctuations qui ne sont pas visibles pour la période après 1965. Ce phénomène peut avoir deux origines :

- une période 1957-1964 trop courte qui ne permet pas de lisser correctement les événements exceptionnels observés (ex crue autour du 1^{er} juillet),
- la modernisation des ouvrages de la régulation en 1965 qui a permis d'améliorer la gestion du niveau du Lac.

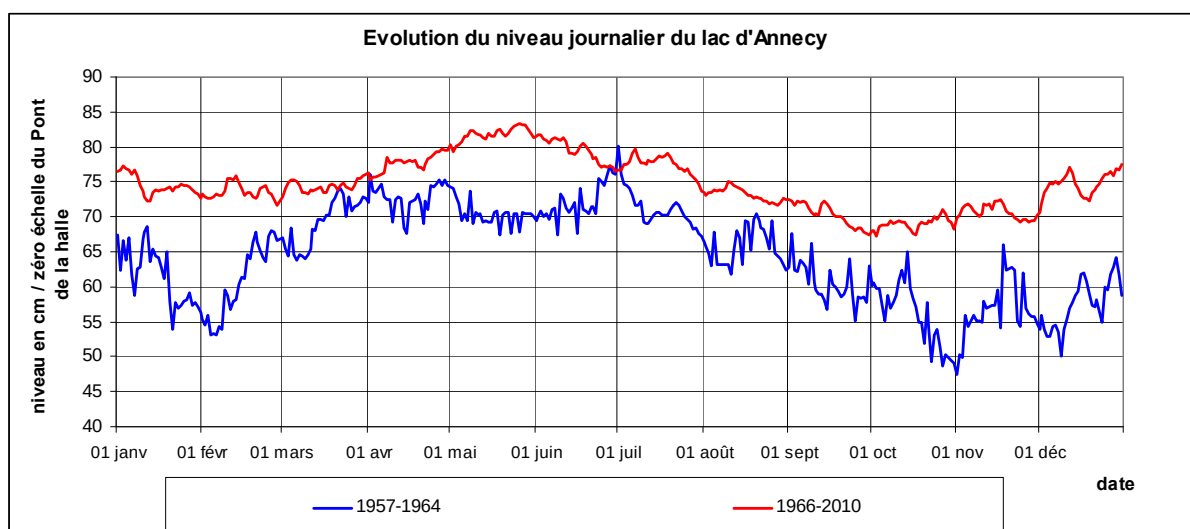


figure 22 Evolution des niveaux journaliers du Lac d'Annecy pour différentes périodes

6.3 Etude des extrêmes

Remarques : Les niveaux du Lac par rapport à l'échelle du Pont de la Halle sont exprimés en mètres dans ce chapitre.

6.3.1 Recensement des extrêmes

Les informations historiques concernant l'observation des niveaux extrêmes enregistrés (crues et étiages) sont nombreuses dans la littérature et permettent de remonter loin en arrière. Les données relatives aux débordements sont toutefois à exploiter avec prudence. Ainsi le niveau maximum enregistré lors de certaines crues anciennes exceptionnelles est lié non seulement à un événement météorologique remarquable mais également à la formation d'embâcles, au droit des canaux d'Annecy, qui ont eu pour effet d'augmenter la cote du Lac « artificiellement ». Ceci est vrai essentiellement pour les événements de crue observés avant les travaux de recalibrage et de curage des canaux (1906 et 1914).

A partir des éléments et séries à notre disposition, les chroniques historiques des cotes extrêmes journalières du Lac d'Annecy ont été reportées sur la figure 23.

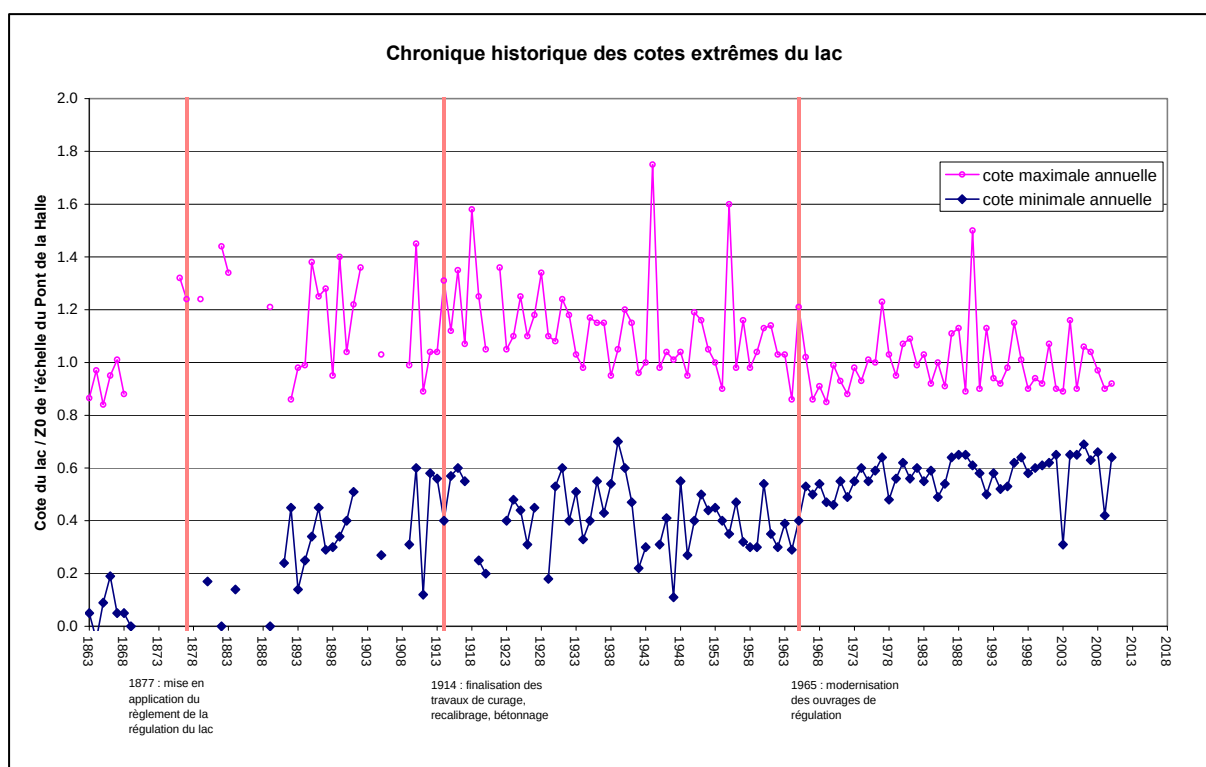


figure 23 Chroniques historiques des cotes extrêmes annuelles

Les données des cotes extrêmes avant 1914 sont discontinues et donc difficilement exploitables. Dans la littérature, il est fait référence à des crues exceptionnelles. Nous citerons en particulier janvier 1651 avec une cote atteinte de 2m70 (par rapport au zéro de l'échelle du pont de la Halle) et février 1711 avec 3m10. Or ces crues exceptionnelles ont le plus souvent une origine non hydrologique ; elles sont la conséquence d'embâcles formés au droit des canaux d'Annecy et ne sont pas imputables seulement à un événement extrême météorologique. Pour cette raison, nous avons fait le choix de ne pas les intégrer dans la figure 23.

La comparaison des périodes récentes, avant et après modernisation des ouvrages de régulation (soit 1914 -1965 et 1966-2010), met en évidence une diminution nette de la cote journalière maximale annuelle et inversement une augmentation et une stabilisation de la cote journalière minimale annuelle autour de 60cm.

	Cote moyenne maximale annuelle	Cote moyenne minimale annuelle
cm par rapport au zéro de l'échelle du Pont de la Halle		
1914 – 1965	1,13	0,41
1966 - 2010	1,00	0,57

tableau 21. Cotes moyennes journalières extrêmes annuelles par période historique

6.3.2 Dates d'observation des extrêmes

L'évolution des dates d'apparition des extrêmes annuels a été analysée pour différentes régulations. La répartition mensuelle des niveaux maxima annuels du Lac est présentée sur la figure 24, celle des niveaux minima annuels sur la figure 25.

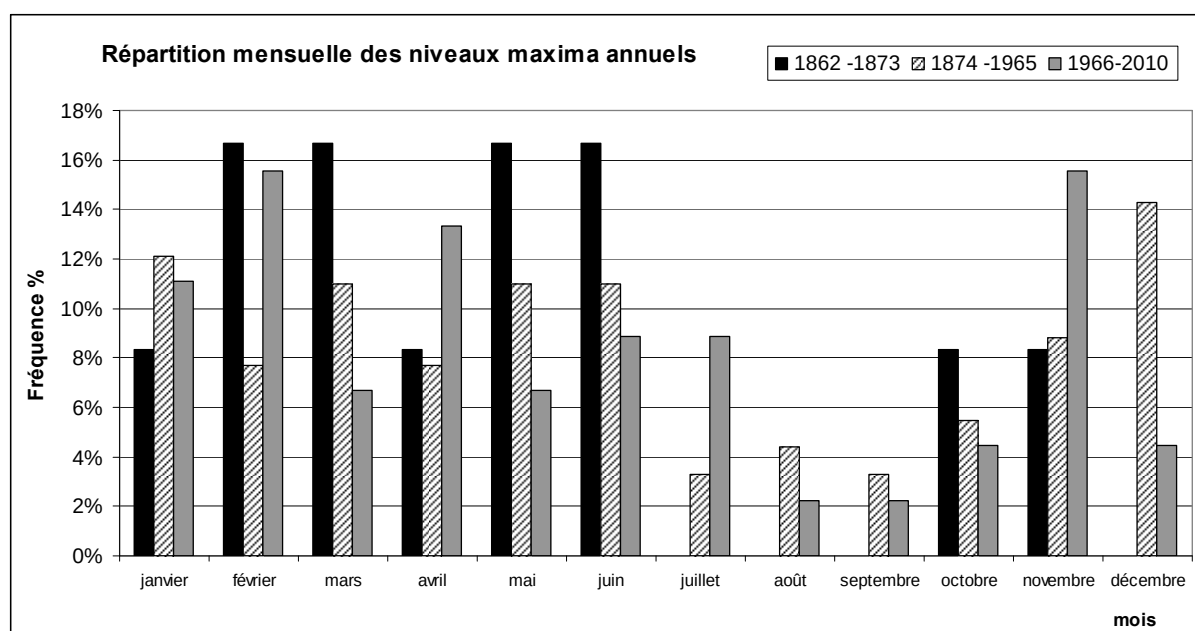


figure 24 Répartition des cotes maxima annuelles en fonction du régime hydraulique du Lac d'Annecy naturel ou influencé

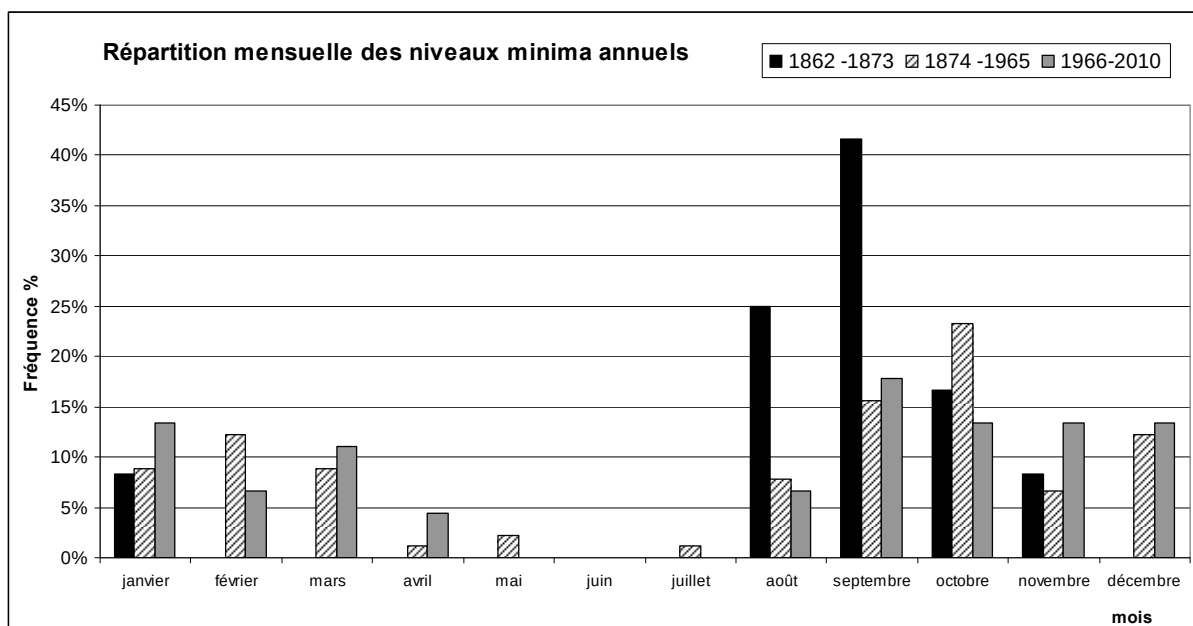


figure 25 Répartition des cotes minima annuelles en fonction du régime hydraulique du Lac d'Annecy naturel ou influencé

Cette analyse met en évidence des différences de fonctionnement du régime du Lac essentiellement avant et après 1874.

- En régime naturel avant 1874, le fonctionnement hydraulique du Lac était plus marqué avec deux périodes très distinctes : une période courte d'étiage d'août à novembre et une période des hautes eaux plus étendue couvrant les mois d'octobre à juin.
- En régime régulé, après 1874, la période d'étiage s'est étendue d'août à mars. Les très basses eaux ont une fréquence faible d'être observées uniquement entre avril et juillet. Les crues peuvent être enregistrées tout au long de l'année avec un risque minimal de juillet à octobre. Les figure 24 et figure 25 ne permettent pas d'identifier de différence notable entre les périodes historiques avant et après 1965. La modernisation de la régulation du Lac en 1965 a eu peu d'impact complémentaire.

6.3.3 Recensement des débordements extrêmes

H.Onde [2] a recensé les débordements historiques du Lac d'Annecy ayant dépassé la cote 1.30 m (par rapport au zéro de l'échelle du Pont de la Halle) avant 1944. Nous avons complété son recensement en intégrant les crues de plus de 1m30 de 1945 à nos jours. La liste des événements identifiés est présentée sur la figure 26.

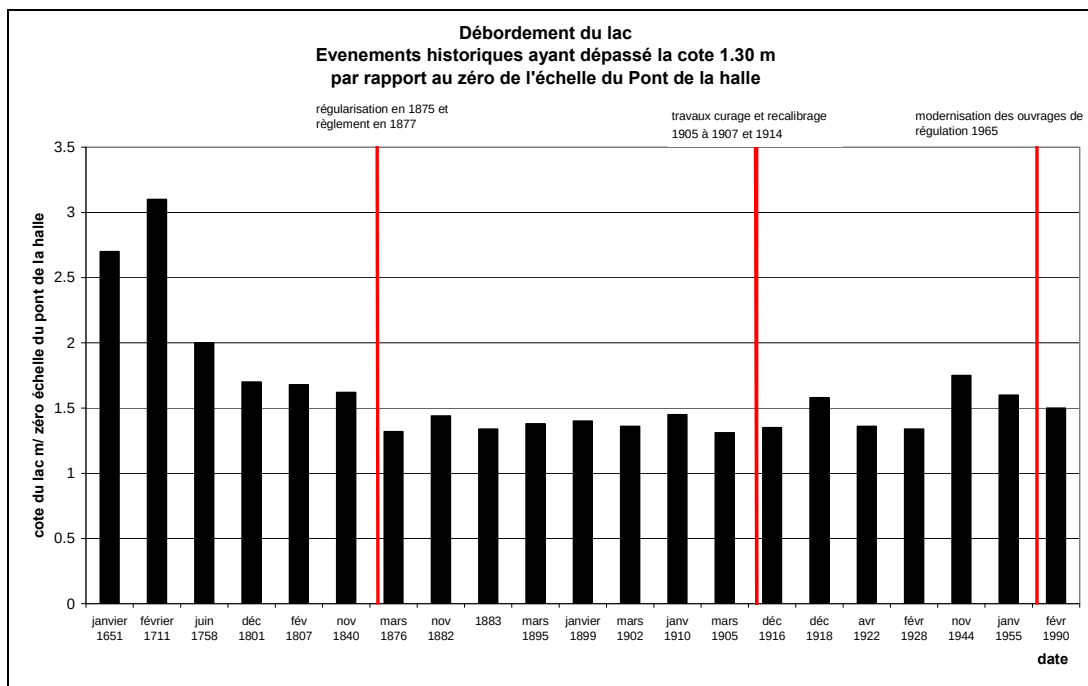


figure 26 Recensement des cotes extrêmes du Lac : supérieures à 1m30 / zéro de l'échelle du Pont de la Halle

Depuis la modernisation des ouvrages de régulation du Lac, ce type de débordements extrêmes est peu fréquent : en 45 ans, il a été observé une seule fois en février 1990. Pour comparaison de 1874 à 1914, 8 événements ont dépassé la cote 1.30m en 40 ans, et 6 événements de 1915 à 1965 soit en 51 ans.

La même analyse a été faite sur les étiages sévères n'ayant pas dépassé la cote 0.40 m (ou 40 cm) (par rapport au zéro de l'échelle du Pont de la halle). La synthèse est présentée sur la figure 27.

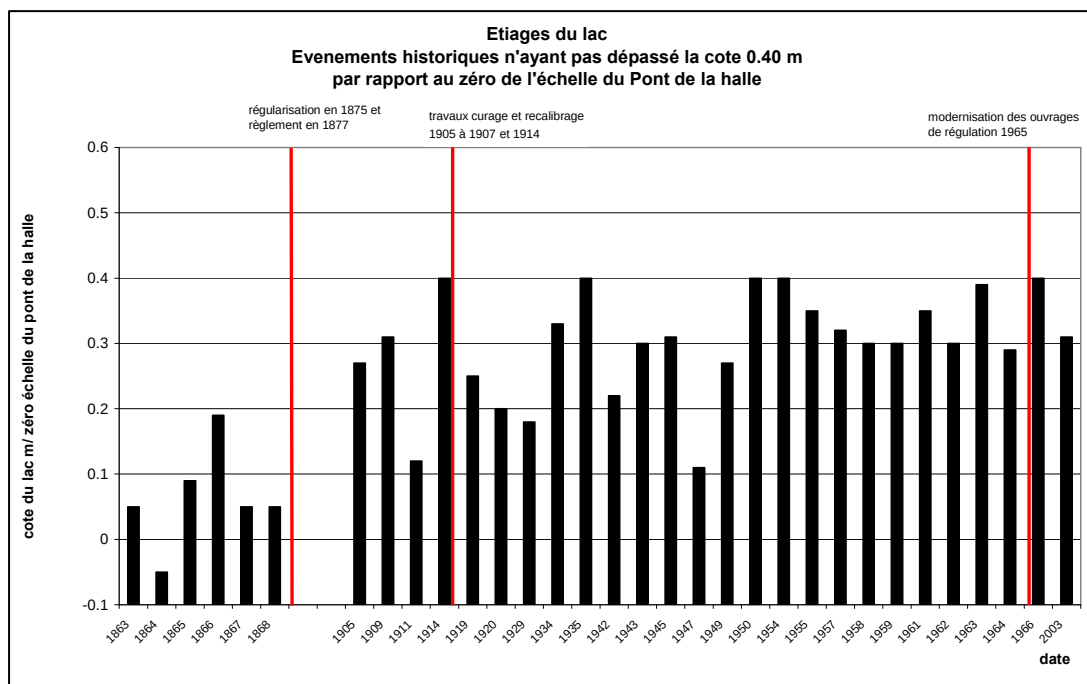


figure 27 Recensement des étiages extrêmes du Lac : inférieurs ou égaux à 40 cm / zéro de l'échelle du Pont de la Halle

Comme pour les débordements, depuis la modernisation des ouvrages de régulation du Lac, les étiages extrêmes sont peu fréquents : 2 en 45 ans. Pour comparaison de 1915 à 1965, 20 années sur 51 ont présenté des cotes inférieures ou égales à 0.40m. De 1905 à 1914, la cote minimale du Lac a été inférieure ou égale à 0.40 m lors de 5 années. De 1874 à 1905, nous ne disposons pas d'assez d'informations pour annoncer de chiffres.

7 SIMULATION DU FONCTIONNEMENT DU LAC EN REGIME NATUREL

7.1 Courbes de tarage des émissaires en écoulement libre

Les débits sortants du Lac sont calculés quotidiennement à l'aide d'abaque par les services techniques de la mairie d'Annecy. Seuls sont mesurés les débits des émissaires du Thiou et du Vassé, les débits du canal Saint Dominique sont considérés comme négligeables.

7.1.1 Emissaire du Thiou :

En régime régulé, l'écoulement dans le canal du Thiou est fonction :

- de la cote du Lac mesurée au droit de l'échelle historique du Pont de la Halle (zéro échelle : 446.17 m IGN69),
- de l'ouverture des vannes du canal Saint Dominique,
- de la position du clapet déversant situé entre le Pont de la Halle et le Pont Perrière,
- des manœuvres des vannes du Pont de la République et de la manufacture qui induisent un freinage aval,

Les anciennes vannes situées plus en aval n'interviennent pas directement sur le débit du Thiou mais elles doivent être manœuvrées pour être positionnées correctement par rapport au débit imposé par la vanne clapet.

Lors des crues, ou pour anticiper une montée de la cote du Lac, le clapet vanne peut être manœuvré de façon à être totalement effacé. Les vannes aval peuvent également être complètement ouvertes. Dans cette configuration, les débits dans le canal du Thiou sont en écoulement libre et ils sont uniquement fonction de la cote du Lac mesurée à l'échelle du Pont de la Halle.

Pour établir la courbe de tarage du canal du Thiou en écoulement libre, des jaugeages ont été réalisés de décembre 1965 à mars 1968 par l'ORSTOM [4]. La gamme des cotes jaugées du Lac est comprise entre 446.67 m IGN69 et 447.25 m IGN69. En dessous de la cote 446.67 m IGN69, aucune information n'est disponible sur la méthode d'extrapolation de la courbe. Le débit nul est imposé pour une cote de Lac à 445.63 m IGN69 qui correspond au point haut du canal soit le seuil formé par le radier du Pont Morens situé à 443 m de l'entrée du canal.

Cette courbe de tarage est encore utilisée par les services techniques de la ville d'Annecy pour estimer les débits du Thiou en écoulement libre pour une hauteur du Lac comprise entre 446.91 et 447.4 m IGN 69.

Aucun reprofilage du canal du Thiou n'a été réalisé depuis 1967. De plus les services techniques de la ville d'Annecy réalisent un entretien régulier du canal ce qui permet de faire l'hypothèse que les conditions hydrauliques n'ont pas évolué. Les jaugeages datant de 1968 sont encore valables pour construire la courbe actuelle de tarage du Thiou. A partir des jaugeages disponibles et des caractéristiques géométriques du canal du Thiou, la courbe de tarage de cet émissaire a été recalculée par application de la formule de Manning. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 28. La courbe de tarage déterminée par la formule de Manning est identique à celle construite dans l'étude de 1968 toute gamme de cote confondue. Pour la suite de l'étude elle sera considérée comme la courbe de tarage de référence pour le canal du Thiou en écoulement libre.

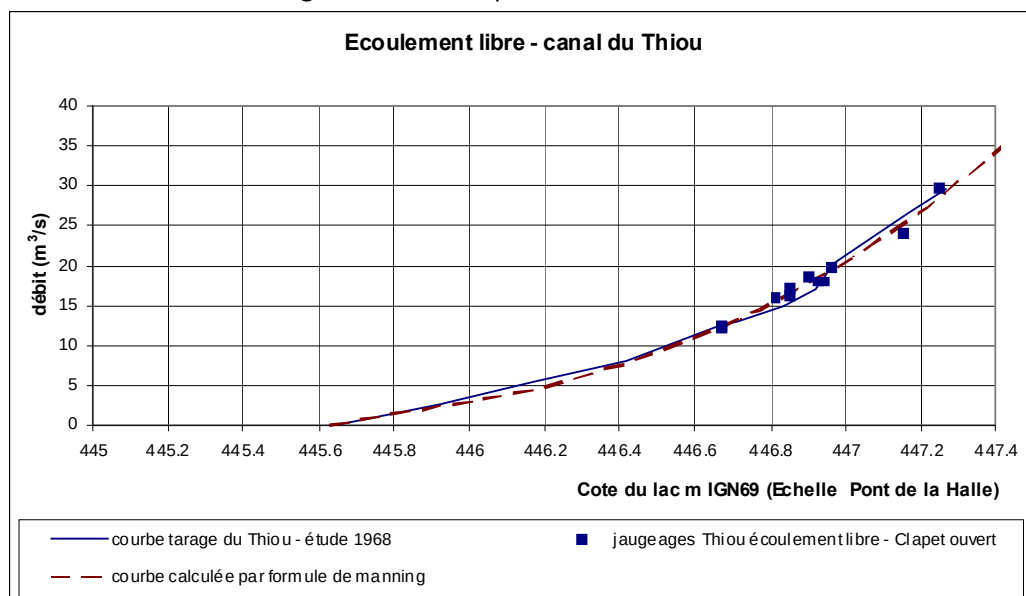


figure 28 Courbe de tarage écoulement libre – canal du Thiou

La fiabilité de la courbe de tarage du canal du Thiou est considérée comme :

- fiable pour une cote du Lac supérieure à 446.6 m IGN69 du fait de la présence de jaugeages qui permettent de valider sa construction,
- incertaine pour une cote du Lac inférieure à 446.6 m IGN69 du fait de l'absence de jaugeage permettant de valider les calculs hydrauliques.

7.1.2 Emissaire du canal du Vassé

En régime régulé, l'écoulement dans le canal du Vassé est fonction :

- de la cote du Lac,
- des 5 vannes glissières situées sous la voute du pont Albert Lebrun
- des vannes aval.

Comme pour le Thiou, lors des crues les vannes du canal du Vassé sont manœuvrées de façon à s'effacer et être sans impact sur les débits. Dans ces conditions le régime hydraulique du canal Vassé peut être considéré en écoulement libre.

Les services techniques de la Mairie d'Annecy disposent d'une courbe de tarage construite à partir de :

- jaugeages pour les hauteurs du Lac comprises entre 446.3m et 447 m IGN69,
- extrapolation au-delà de la cote 446.7 et en dessous de 446.3 m.

Un débit nul est imposé pour la cote du Lac 445.90 m IGN69 qui correspond au point haut du profil en long du canal de Vassé situé en amont immédiat du Pont Albert Brun.

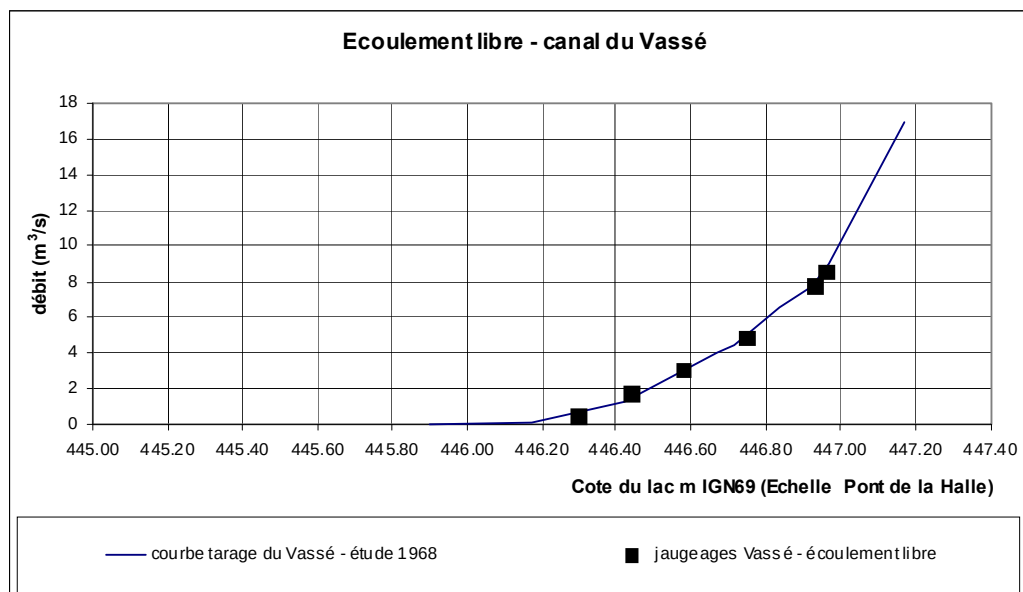


figure 29 Courbe de tarage écoulement libre – canal du Vassé

Le canal du Vassé n'a pas connu de reprofilage depuis 1968 et l'entretien du lit est assuré régulièrement par les services techniques de la ville d'Annecy. Aussi, en l'absence d'éléments complémentaires nous considérerons la courbe de tarage de la mairie comme la courbe de tarage de référence du canal Vassé pour la suite de l'étude. La fiabilité de la courbe de tarage du canal de Vassé est considérée comme :

- fiable pour une cote du Lac comprise entre 446.3 et 447 m IGN69 du fait de la présence de jaugeages qui permettent de valider sa construction,
- incertaine pour une cote du Lac inférieure à 446.3m m IGN69 et supérieure à 447 du fait de l'absence de jaugeage permettant de valider l'extrapolation.

7.1.3 Courbe de tarage des émissaires

A partir des courbes de tarage du Thiou et du Vassé présentées aux chapitres précédents, une courbe de tarage a été construite pour évaluer les débits sortants totaux au droit des émissaires (Thiou et canal de Vassé) à partir de la hauteur lue à l'échelle du Pont de la Halle (cf. figure 30).

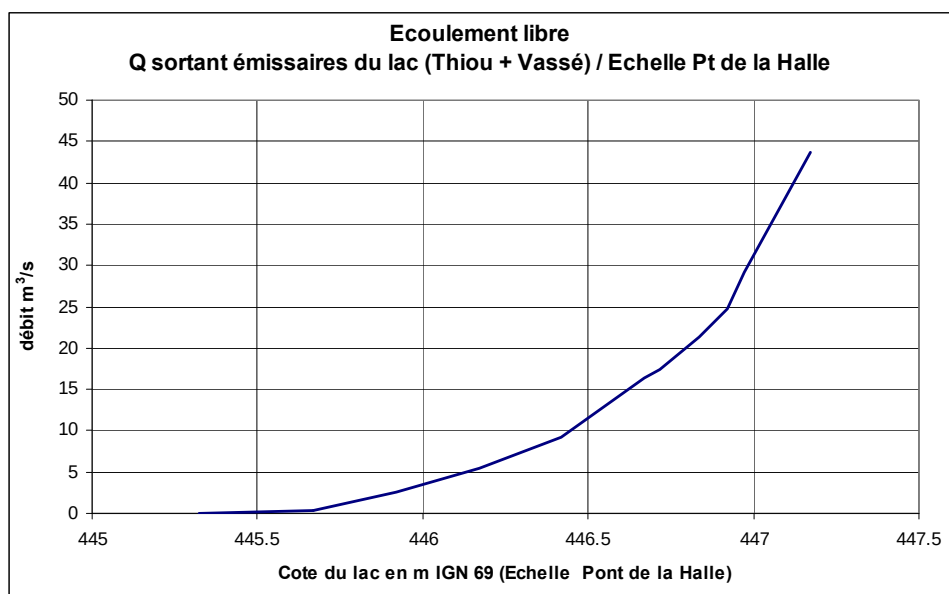


figure 30 Courbe de tarage – Emissaires du Lac d’Annecy en écoulement libre

Remarque :

Plusieurs phases de travaux de recalibrage des canaux du Thiou et du Vassé ont eu lieu depuis la mise en œuvre de la régulation du Lac (1867) ce qui a eu pour effet d’augmenter la débitance des exutoires du Lac d’Annecy en écoulement libre de façon conséquente. Ainsi d’après H.Ondre [1], le curage des canaux entre 1905 et 1907 a entraîné une augmentation du débit sortant de l’exutoire de 19 m³/s pour une hauteur d’eau de 0.80 m à l’échelle du Pont de la Halle. De ce fait l’écoulement libre actuel du Thiou et du Vassé est très différent de l’écoulement libre avant mise en place de la régulation en 1874.

7.2 Courbe de capacité du Lac

La modélisation du fonctionnement hydraulique du Lac d’Annecy nécessite de disposer de la courbe de capacité du Lac de type $\text{Volume Lac} = f(\text{Hauteur cote du Lac})$. Cet élément est fourni dans l’étude de l’ORSTOM [4]. La courbe de capacité correspondante, et qui sera utilisée pour la suite de l’étude, est présentée en figure 31.

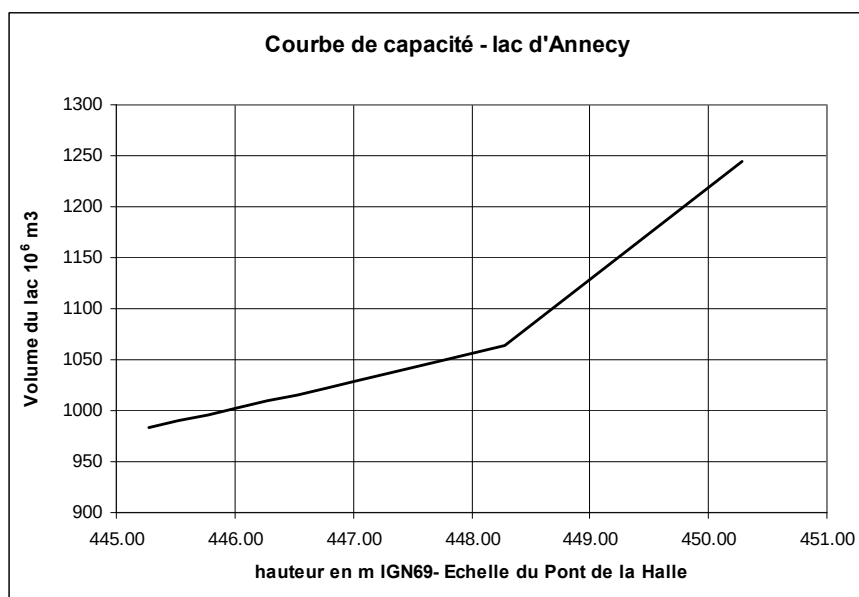


figure 31 Courbe de capacité du Lac d'Annecy - source Orstom

7.3 Simulation du niveau du Lac en régime naturel et sous conditions climatiques actuelles

La simulation du régime naturel du niveau du Lac, au pas de temps mensuel et avec les conditions climatiques actuelles, consiste à résoudre le système des 4 équations suivantes:

$$Z_{lac_naturel}(t) = f_1(V_{lac_naturel}(t))$$

$$V_{lac_naturel}(t) = V_{lac_naturel}(t-1) + \Delta R_{naturel}(t)$$

$$\Delta R_{naturel}(t) = Q_{aff_inst}(t) + Q_{BVi}(t) + Pl_{lac}(t) - (Q_{émissaire_naturel}(t) + AEP(t) + E_{lac}(t))$$

$$Q_{émissaire_naturel}(t) = f_2(Z_{lac_naturel}(t))$$

Avec :

- $Z_{lac_naturel}$: cote du Lac (échelle du Pont de la Halle) en régime naturel (m IGN 69),
- $V_{lac_naturel}$: volume du Lac en régime naturel (10^6 m^3)
- $Q_{émissaire_naturel}$: débit des émissaires (Thiou et canal Vassé) en régime naturel,
- $f_1()$: courbe de capacité du Lac d'Annecy (cf. figure 31),
- $f_2()$: courbe de tarage des émissaires du Lac en régime naturel (cf. figure 30).

Et les paramètres suivants identifiés lors du bilan hydrique (cf. tableau 17).

- Q_{aff_inst} : apport des affluents instrumentés, (Bornette, Laudon, Ire et Eau Morte),
- Q_{BVi} : apport des affluents non instrumentés et apport sources lacustres,
- Pl_{lac} : précipitation directe sur le Lac d'Annecy (27.8 km^2),
- AEP : débit prélevé sur le Lac pour les activités humaines,
- E_{lac} : évaporation directe sur le Lac.

L'évolution mensuelle de la cote du Lac, en régime naturel et sous conditions climatiques actuelles, ainsi déterminée est présentée sur la figure 32. A titre de comparaison, l'évolution moyenne de la cote du Lac régulé calculée sur la période 1965 -2010 (exclues les années 1975-1976 et 1994 à 1996 car données non disponibles au pas de temps mensuel) a été rapprochée sur la même figure.

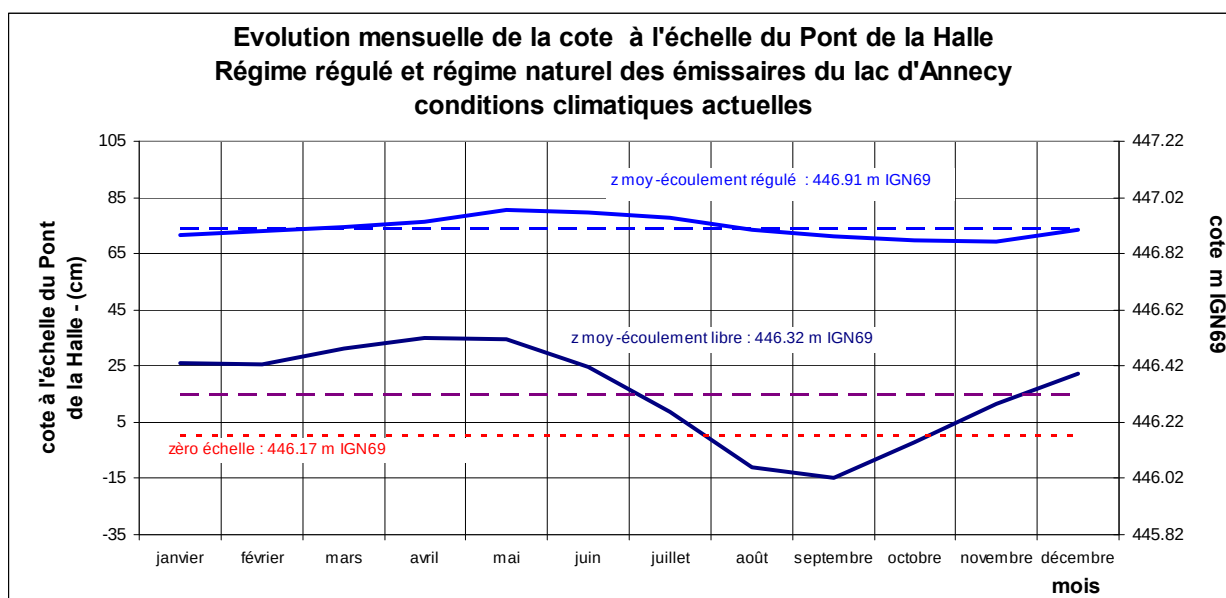


figure 32 Evolution de la cote du Lac d'Annecy en régime naturel et régulé, sous conditions climatiques actuelles

Sous conditions climatiques actuelles, la cote moyenne annuelle du Lac est beaucoup plus basse en écoulement libre (446.32 m IGN69) qu'en régime régulé (446.91 m IGN69). La différence est de 60 cm.

La simulation du régime naturel indique un marnage maximum annuel également plus élevé; il est de 50 cm avec une cote mensuelle maximum observée en avril – mai (446.5 m IGN 69) et un minimum en septembre (446 m IGN 69). Pour comparaison le marnage annuel en écoulement régulé n'est que de 11 cm (446.97 m IGN 69 en mai contre 446.86 m IGN 69 en octobre).

7.4 Simulation du niveau du Lac en régime naturel avec hypothèses de conditions climatiques à horizon 2050

La simulation du régime hydrologique du Lac d'Annecy à horizon 2050 a été modélisée. Ce travail a nécessité de tenir compte des effets du changement climatique dans les Alpes sur les précipitations et les régimes hydrologiques des cours d'eau. Les hypothèses retenues pour la simulation, concernant le changement climatique et ses effets attendus, sont issues des connaissances scientifiques actuelles ; aucune étude spécifique n'a été mise en œuvre. Pour cela un travail de synthèse des connaissances scientifiques actuelles a été mené. L'annexe 12 présente les résultats de cette recherche bibliographique.

La synthèse des travaux récents sur les effets du changement climatique à horizon 2050 nous a amené à retenir 9 scénarii de changement climatiques probables impliquant trois variables : la pluie, la température et les débits. Le détail du choix de ces 9 scénarii est présenté dans le chapitre 8 de l'annexe 12.

Pour quantifier l'évolution des volumes d'eau captés dans le Lac pour l'activité humaine, nous nous sommes basés sur les données de l'INSEE qui estiment l'augmentation de la population française de +16.7% à horizon 2050. N'ayant aucune information sur les évolutions éventuelles des captages dans le Lac d'Annecy pour le futur, nous avons fait le choix d'établir un ratio :

$$AEP_{2050} = AEP_{actuel} * 1.167$$

Des volumes mensuels et annuels identiques pour l'AEP ont été imposés au 9 scénarii retenus.

Les paramètres appliqués aux variables température, pluie et débit sont rappelés dans le tableau 22 pour les 9 scénarii retenus pour le changement climatique à horizon 2050.

Variation des températures (en °C)	T1	T2	T3
Automne	1.4	2.1	3.0
Hiver	1.2	1.8	2.8
Printemps	1.1	1.8	2.8
Été	1.7	2.7	4.0

Variation des Précipitations (en °%)	P1	P2	P3
Automne	-11.0	-6.0	-2.0
Hiver	2.0	8.0	16.0
Printemps	-7.0	0.0	6.0
Été	-20.0	-17.0	-9.0

Variation des débits (en %)	T1 P1	T1 P2	T1 P3	T2 P1	T2 P2	T2 P3	T3 P1	T3 P2	T3 P3
Automne	-25	-17	-10	-27	-16	-09	-30	-24	-14
Hiver	+14	+18	+33	+16	+25	+38	24	+35	+46
Printemps	-12	-05	+00	-16	-11	-04	-27	-21	-12
Été	-41	-32	-20	-43	-37	-30	-47	-44	-31

tableau 22. Présentation des hypothèses retenues pour les 9 scénarii de changement climatique à horizon 2050

Les 9 scénarii ont été appliqués au bilan hydrique mensuel actuel du Lac déterminé au chapitre 5.5. Les valeurs résultantes sont précisées dans le tableau 23.

scénario	Bilan hydrique volume annuel		Variation des volumes d'eau du bilan hydrique Horizon 2050 / climat actuel
	10 ⁶ m ³	m ³ /s	
actuel	290.3	9.20	
T1 P1	255.9	8.12	-11.7%
T1 P2	274.9	8.72	-5.2%
T1 P3	301.0	9.54	3.7%
T2 P1	251.7	7.98	-13.3%
T2 P2	272.5	8.64	-6.1%
T2 P3	296.9	9.41	2.3%
T3 P1	243.9	7.73	-16.0%
T3 P2	263.2	8.35	-9.2%
T3 P3	292.1	9.26	0.7%
moyenne	272.5	8.64	-6.1%

tableau 23. Bilan hydrique annuel des 9 scénarii de changement climatique retenus

Les scénarii à horizon 2050 intégrant le scénario de pluie P3 présentent une augmentation du bilan hydrique par rapport aux conditions climatiques actuelles en raison d'une augmentation des pluies d'hiver (+16%) qui ont un impact fort sur les débits d'hiver (de + 33 à +46%). Les 6 autres scénarii, n'intégrant pas P3, indiquent une diminution des volumes d'eau mis en jeu dans le bilan hydrique annuel de l'ordre de -5 à - 16%. En moyenne, le bilan hydrique des 9 scénarii étudiés fait apparaître une diminution annuelle de -6% du volume d'eau par rapport à la condition climatique actuelle.

La figure qui suit permet de comparer les résultats de la simulation du régime naturel du niveau du Lac d'Annecy à horizon 2050 pour les 9 scénarii de changement climatique retenus. Le niveau moyen et les quantiles 25% et 75% des 9 scénarii ont été calculés et sont également reportés sur la figure.

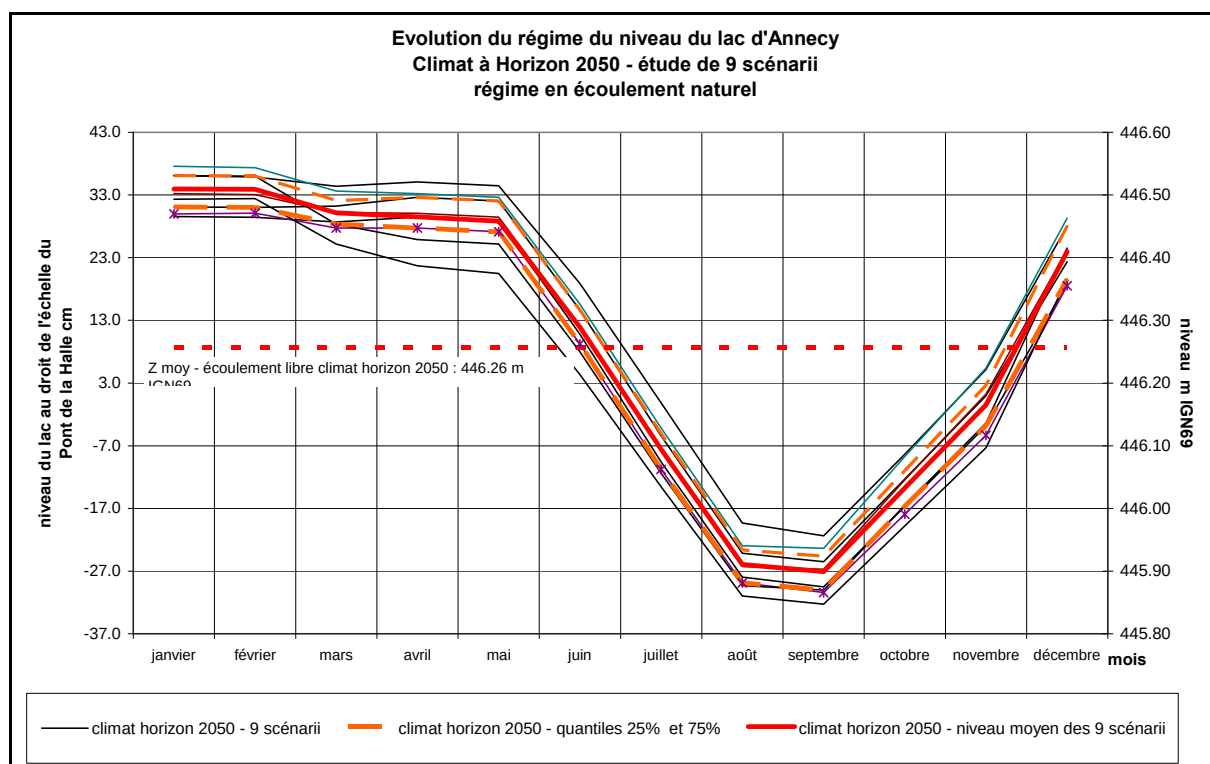


figure 33 Evolution de la cote du Lac d'Annecy en régime naturel pour différents scénarii de changement climatique à horizon 2050

L'application des 9 scénarii de changement climatique à horizon 2050 donne des résultats homogènes concernant le régime hydraulique du Lac d'Annecy. Au final nous retenons pour la courbe moyenne et les courbes quantiles 25% et 75% pour comparer les évolutions du niveau du Lac sous conditions climatiques actuelles et à horizon 2050 (cf. figure 34).

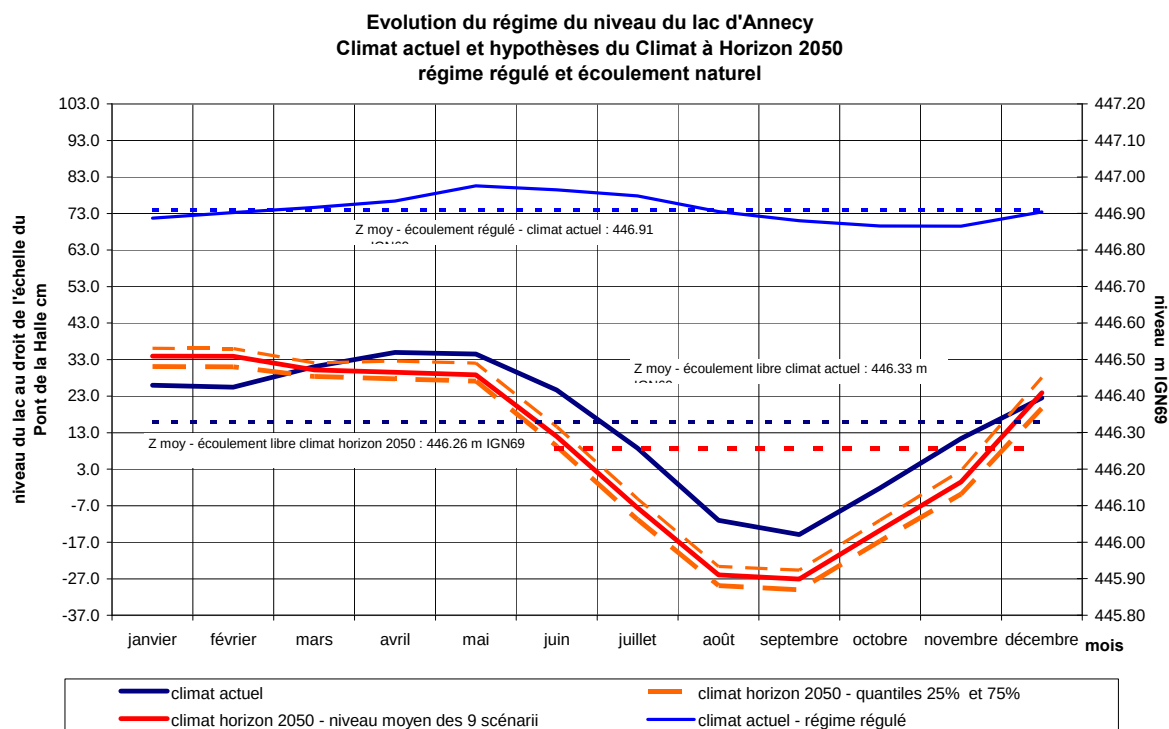


figure 34 Evolution de la cote du Lac d'Annecy en régime naturel pour différents scénarii de changement climatique à horizon 2050

La différence principale entre écoulement libre en conditions climatiques actuelles et écoulement libre à horizon 2050 sont observées lors des basses eaux avec un étiage plus marqué à horizon 2050 : le niveau du Lac descend à la cote 445.90 m IGN 69 contre 446.00 en conditions climatiques actuelles. L'étiage est constaté dans les 2 cas à la même période soit entre août et septembre.

Les niveaux du Lac pour la période des hautes eaux sont à des cotes similaires pour la condition climatique actuelle et à horizon 2050 : 446.5 m IGN69. La différence est liée à la date d'observation de cette cote maximale : sous conditions climatiques actuelles le niveau maximal du Lac est atteint pour les mois d'avril à mai alors qu'à horizon 2050 il est observé un peu plus tôt, soit entre janvier à février.

En régime naturel, le marnage annuel de la cote mensuelle du Lac est évalué à 60cm à horizon 2050 contre 50 cm pour la simulation sous condition climatique actuelle.

Concernant le niveau moyen annuel du Lac d'Annecy, sous conditions climatiques à horizon 2050 il est inférieur de 6 cm par rapport au niveau moyen annuel estimé en écoulement libre et en conditions climatiques actuelles.

8 CONCLUSION DU MODULE 1

Ce module a permis de synthétiser et mettre à jour les connaissances hydrologiques du bassin versant du Lac d'Annecy. Le débit moyen annuel sortant des exutoires Thiou et canal du Vassé est évalué à 8.22 m³/s. Au cours de la dernière décennie (2001-2010) un déficit d'hydraulicité de 13% a été identifié. En l'état des connaissances scientifiques actuelles, il n'est pas possible de conclure si ce déficit est lié à une période cyclique plus sèche ou à une tendance avérée et durable en lien avec le changement climatique.

La mise en place d'ouvrages de régulation sur les canaux d'Annecy (1874) et la modernisation de ce système (1965) ont eu un impact sur l'évolution du régime saisonnier des niveaux du Lac. En régime régulé, le marnage annuel a été progressivement réduit avec une forte diminution des cotes minimales observées lors des étiages estivaux et du début de l'automne.

En plus de la régulation, les travaux de curage, recalibrage et bétonnage des canaux du Thiou et du Vassé (1906 à 1914 et 1965) ont contribué à la diminution des débordements extrêmes du Lac.

En raison de ces différentes phases de travaux, l'écoulement dans les canaux d'Annecy a été fortement modifié. De ce fait l'écoulement libre actuel (en effaçant les ouvrages de régulation) n'est pas comparable avec le régime naturel du Lac d'avant 1874. La simulation du régime naturel du Lac a été modélisé en conditions climatiques actuelles et à horizon 2050 pour apporter des éléments de réflexion pour étudier la modification de la gestion du Lac à des fins environnementales.

MODULE 2 :

Synthèse bibliographique d'expériences de marnage

1 REMARQUES

Depuis plus d'une dizaine d'années, des opérations de restauration des roselières à grande échelle ont été menées sur différents lacs alpins sans pour autant évoquer spécifiquement la thématique du marnage. Ainsi et comme le montre bien la synthèse ci-dessous et bien que ce phénomène soit reconnu comme un des facteurs explicatifs de la régression de certaines roselières, il n'existe quasiment aucun retour d'expérience à ce sujet traitant notamment des éventuels gains écologiques. Les seuls éléments concernant des observations de modifications d'un cortège floristique suite à un changement de régime hydrologique d'un lac ont trait au Lac de Neuchâtel Seuls. Nous les évoquons brièvement à la fin de cette synthèse, ils ont été transmis généreusement par la Grande Carrière⁵ organisme gestionnaire des zones marécageuses localisées en particulier au Sud de ce Lac.

2 SYNTHÈSE

Comme l'ont souligné Wantzen K. M. *et al.* (2008), les fluctuations du niveau de l'eau affectent l'écologie des lacs de plusieurs façons. Or, même si ces phénomènes ont été largement étudiés pour les rivières, il n'en demeure pas moins un manque général de connaissances pour des écosystèmes tels que les lacs.

Scientifiquement, il est toutefois désormais acquis que la régulation du niveau des lacs a des effets négatifs sur les roselières, l'épuration du Lac et le peuplement piscicole. En ce qui concerne les roselières, cela a pour effet de concentrer l'énergie de la houle sur une même tranche d'eau, favoriser l'érosion de la berge lacustre (support physique des roselières) et fragiliser les tiges par accumulation de flottants. En ce qui concerne les franges de Lac qui ne sont plus exondées, ceci a pour conséquence de réduire la progression des roselières par bourgeonnement des rhizomes (racines) et limiter la dépollution des sédiments par l'action bénéfique de l'oxygène de l'air. Pour ce qui est de l'impact sur le poisson, on constate dans les lacs régulés une diminution de la productivité piscicole de bord (CISALB, 2007).

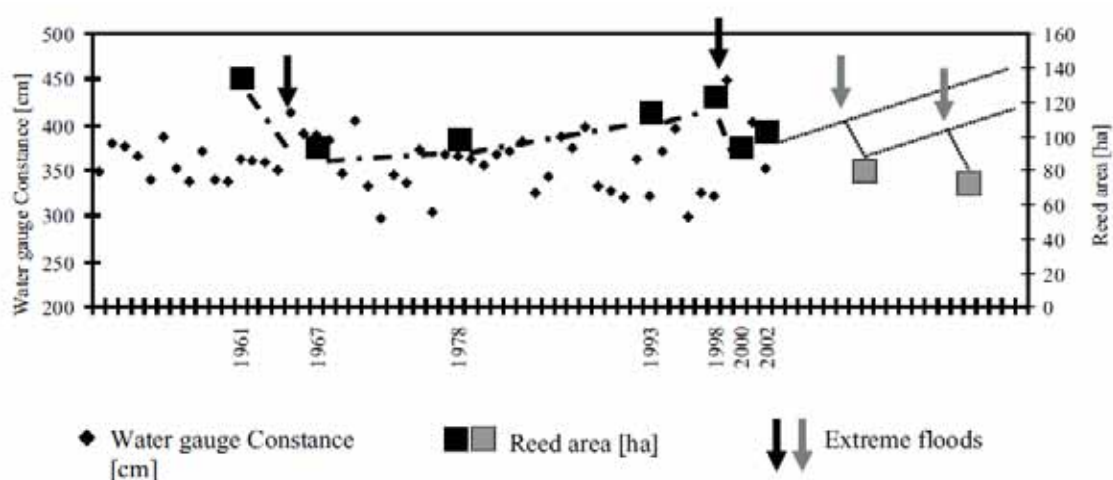
Au travers du recueil d'une centaine de publications, Ostendorp (1989) identifie plusieurs facteurs potentiels de régression des roselières qu'il classe sous 5 grandes catégories : la destruction directe ; les dommages mécaniques (vagues et débris flottants) ; la pression de pâturage (oiseaux d'eau, rats musqués, ragondins, etc.) ; la qualité de l'eau et des sédiments (eutrophisation) ; la

⁵ Mail de Christian Clerc au SILA – Mars 2011

régulation du niveau des lacs et les effets associés. Il souligne également le manque de recherches actuelles sur ces sujets.

Quelques études ont toutefois été menées, dont certaines concernent les effets de la fluctuation du niveau d'eau sur le roseau (*Phragmites australis*) :

- Entre autres, dans son étude, Dienst *et al* (2004) présente les principaux effets des variations du niveau de l'eau sur la dynamique des ceintures de roseaux du Lac de Constance en Allemagne (un des derniers lacs dont le régime hydrique présente un caractère essentiellement naturel avec une moyenne de fluctuations annuelles de 1,43 m entre les niveaux bas de Janvier / Février et les niveaux hauts de Juin / Juillet (Ostendorp *et al.*, 2003)). Il se base notamment sur l'analyse de photographies aériennes ainsi que sur le modèle de croissance du roseau (RGM) établi par Böcker *et al.* (2003) pour montrer que les inondations extrêmes de 1965 et 1999 ont induit une forte régression des roselières au sein du Lac. Il démontre ainsi que les tiges de roseaux soumises à une trop longue et trop grande submersion n'arrivent pas à subsister et prouve par conséquent un lien direct ou indirect du niveau de l'eau sur la dynamique des roselières.



Reed areas of the years 1961, 1967, 1978, 1993, 1998, 2000 and 2002 in comparison with the annual mean water levels (May and June) of the time period 1951 - 2002 and prediction (grey colour) of the areas in case of a higher frequency of extreme floods in the future.

Source : Dienst M., Schmieder K. & Ostendorp W., 2004. Effects of water level variations on the dynamics of the reed belts of Lake Constance. *Limnologia* 34 : 29–36

- Selon Brix (1999), la stabilité des roselières dépend du maintien de leur processus naturel de progression et de régression. Or, dans de vastes régions de l'Europe, celui-ci s'est déplacé vers un processus de dépérissement (Den Hartog *et al.*, 1989). Sachant que l'équilibre entre les eaux libres et la végétation de roseaux est un paramètre clé pour la qualité écologique de nombreuses zones humides européennes, leur fonctionnalité est remise en question avec le recul des roselières. C'est pourquoi, l'affaiblissement des *Phragmites* observé ces dernières années dans de nombreuses parties de l'Europe a conduit à la mise en place du projet EUREED et de la coopération entre universités et instituts de recherche de plusieurs pays européens.

Leurs recherches conjointes montrent que le recul des roselières est causé par un certain nombre de facteurs environnementaux qui ont été induits par les changements anthropiques des dernières décennies. Parmi ceux-ci, la gestion du niveau d'eau serait l'un des facteurs clés qui influencerait sur la dynamique de croissance des roseaux.

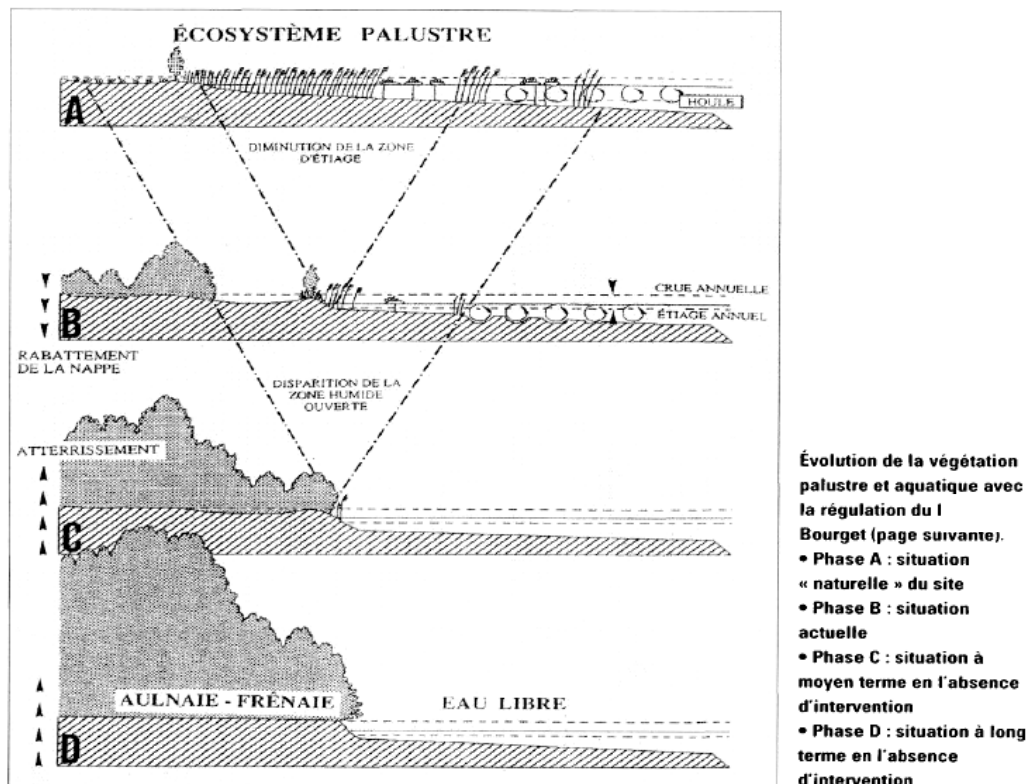
Par exemple, la réduction des fluctuations du niveau d'eau due à son contrôle artificiel peut contribuer à l'accumulation de produits de décompositions phytotoxiques tels que des sulfites et des acides monocarboxyliques (acétique, propionique, n-iso-butyrique et caproïque) dans les sédiments, ce qui affecte la croissance du roseau (Armstrong *et al.*, 2001).

De même, Rea N. (1996) combine observations sur le terrain avec littérature et fait valoir que les niveaux d'eau stabilisés contribuent à la diminution des roseaux par un manque de reproduction végétative et générative, et que les conditions eutrophiques exacerbent cette situation.

- Nechwatal *et al.* (2008) ont également montré sur le Lac de Constance que la fluctuation du niveau de l'eau et de la température ont une influence importante sur la performance d'un champignon pathogène au roseau (*Pythium phragmitis*), et suggèrent ainsi que les changements climatiques favorisent le développement de cette espèce et donc l'affaiblissement des entités de roselières.

- De façon plus générale, Hill *et al.* (1998) ont comparé quant à eux la végétation des rives entre les lacs régulés et non régulés au Canada. Ils ont observé que les communautés végétales sur les lacs régulés étaient moins diversifiées (les espèces rares en sont généralement absentes) et contenaient des espèces plus exotiques. Selon leurs études la fluctuation du niveau d'eau optimale pour maintenir une végétation rivulaire indigène serait de 1 à 2 m. Par ailleurs concernant la roselière, l'étude de Pichon *et al.* réalisée en 1993 sur le Lac de Saint Point et Remoray soulignait qu'une augmentation du niveau maximum influencerait favorablement l'extension spatiale des ceintures émergées de type roselière et cariçaie. Concernant la baisse des niveaux d'eau, cette étude ne précisait toutefois pas les impacts attendus sur ce type de végétation.

- Plus localement, il a été montré que la régulation des fluctuations saisonnières du niveau d'eau du Lac du Bourget depuis 1982 a induit des impacts non négligeables sur la végétation et les habitats naturels (Miquet A., 1997). La figure ci-dessous illustre l'évolution des ceintures de végétation sous l'effet de la régulation du Lac. À savoir que la végétation immergée et flottante se trouve également menacée (affouillement, perte de la protection physique offerte par la roselière). Quant aux zones terrestres influencées par la nappe du Lac (soit au moins une centaine de mètres, SOGREAH données non publiées), elles connaissent du fait de la baisse du niveau une accélération des processus d'embroussaillage, d'où un vieillissement et une banalisation du milieu naturel, étudié notamment par Pautou *et al.* (1992). Précisons qu'un projet d'essai de rétablissement de marnage sur le Lac du Bourget est à l'étude depuis maintenant près d'une quinzaine d'années. Les conditions de marnage envisagées porteraient sur une baisse de 40 cm pendant une durée de trois semaines en octobre-novembre et cela tous les 4-5 ans. Cette expérience n'a pas encore été mise en œuvre.

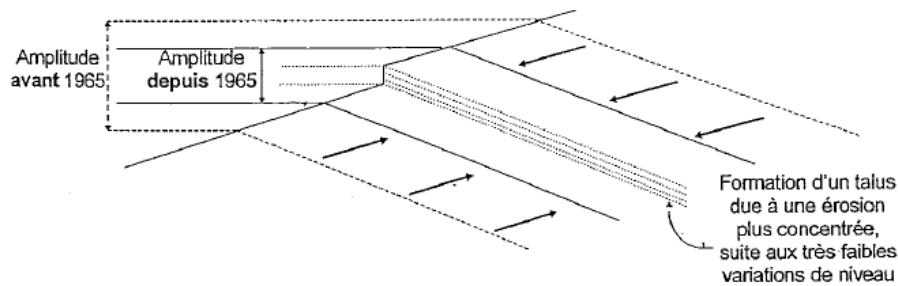


La progression des groupements arbustifs aux dépens de la roselière, n'est pas le seul méfait imputable à la régulation du niveau d'eau. D'autres facteurs interviennent dans la régression des roselières, telles que :

- concentration des impacts dus au battillage des flottants (cotes fixes) : érosion directe, ou création de lésions sources de parasitoses et nécroses ;
- destruction directe par étouffement sous accumulation de déchets flottants (constriction de l'espace de divagation, donc des surfaces de dépôt) ;
- suppression des périodes d'étiage (aggravant l'effet de la pollution des sédiments, qui ne sont plus capables de se minéraliser aussi bien) ;
- aggravation de l'effet mécanique de la houle (érosion des rhizomes) ;
- disparition des micro-variations de niveaux, favorable au roseau sur le plan physiologique

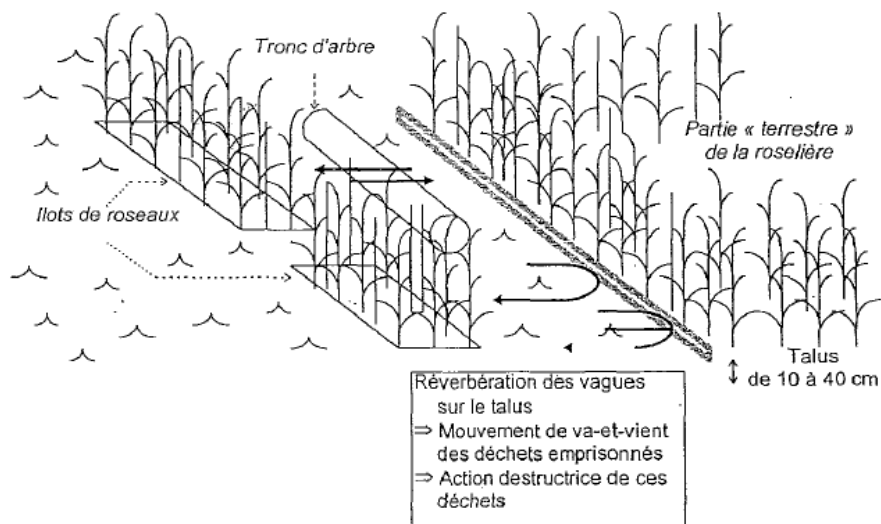
En ce qui concerne le Lac d'Annecy, les conclusions sont quasi identiques et montrent également que la suppression du marnage naturel a été fortement dommageable pour les roselières (Blake G., 1992 ; Charles F., 1998 et SILA , 2007) :

[En effet, celles-ci sont implantées sur des terrains marécageux qui sont le résultat d'un délicat équilibre entre terre et Lac. Les fortes amplitudes de niveau, lors des crues d'une part, rechargent en eau les terres situées plus en retrait du littoral, et en période d'étiage d'autre part, découvrent des terrains favorables aux roseaux. La surface potentiellement colonisable par les phragmites se réduit donc à une bande de plus en plus étroite. En outre, la stagnation des eaux entre des niveaux extrêmes de plus en plus rapprochés concentre l'action érosive de la houle sur une même partie du littoral, ce qui entraîne la formation d'un talus de 10 à 40 cm de hauteur (cf. figure ci-dessous).

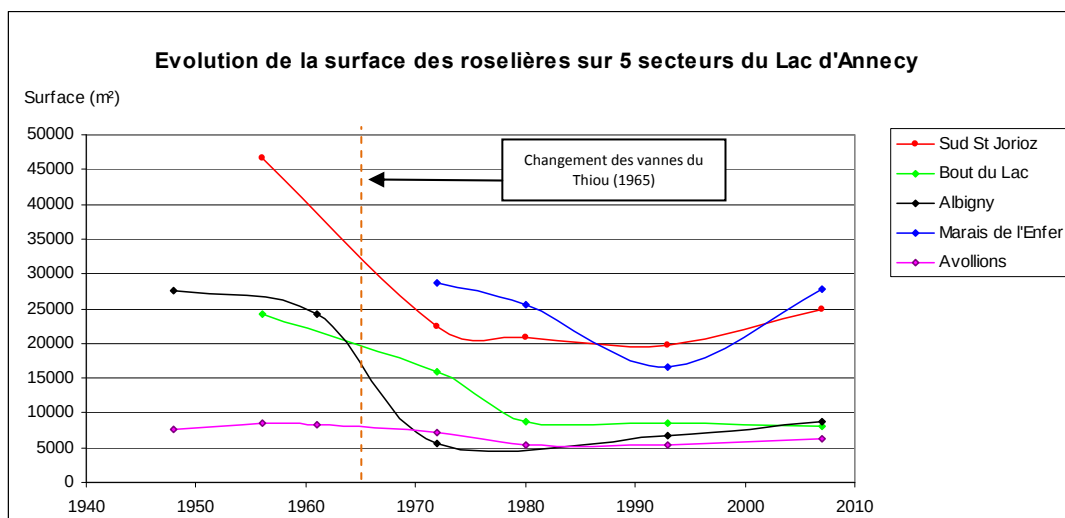


Conséquences sur le rivage de la diminution des amplitudes de niveau

La présence de ce trottoir a une double conséquence : il ne permet plus la dépose des déchets flottants sur une grande surface du littoral, car il constitue le plus souvent un obstacle infranchissable. Les flottants stagnent donc à proximité de la rive et le talus réverbère fortement les vagues, qui ne perdent rien de leur puissance en se réfléchissant sur ce miroir. Les vagues effectuent un aller-retour, tout en entraînant les flottants. Ceux-ci exercent donc une action mécanique destructive sur les roseaux de la « zone d'érosion », parfois conscris sur des îlots. (cf. Figure ci-dessous).]



Le processus de destruction des roselières aquatiques



Source : SAGE Environnement ; 2007 - Etude de l'état des roselières du lac d'Annecy et propositions d'action de restauration ; SILA.

Finalement, bien que la littérature fait fréquemment allusion à un rôle du régime de l'eau sur le déclin du roseau, ce facteur n'a pas reçu la même attention singulière que l'eutrophisation, le type de sédiments, l'action des vagues, l'attaque des insectes, la faible diversité génétique, le pâturage, la force de la tige et les effets chimiques et physiques des tapis d'algues, etc. (Rea N., 1996). Or, ceux-ci, étudiés séparément ou en combinaison restreinte, ne sont pas parvenus à expliquer de façon spécifique le recul des roselières. Ainsi, un accord a été établi dans la littérature qui veut que le déclin de roseaux est engendré par une combinaison de facteurs (Van der Putten, 1997) dont les régimes hydriques stabilisés semblent être l'élément précurseur.

- Pour revenir à la thématique spécifique de l'influence du marnage sur les ceintures d'hélophytes en général et du roseau en particulier, il est intéressant d'évoquer pour finir, le cas du Lac de Neuchâtel⁶ :

Pour rappel, le niveau du Lac de Neuchâtel a subi 2 étapes de régulation principales, l'une durant la période 1868-1891 et communément appelée 1^{ère} Correction des Eaux du Jura (1^{ère} CEJ) et l'autre durant la période 1962-1973 et communément appelée 2^{ème} Correction des Eaux du Jura (2^{ème} CEJ). La 1^{ère} CEJ a conduit à un abaissement du niveau du Lac de Neuchâtel d'environ 3 mètres sans modification de son régime annuel moyen, soit basses eaux plutôt en hiver et hautes eaux plutôt en été, et en maintenant l'amplitude de fluctuation entre hautes eaux et basses eaux moyennes que l'on peut fixer à environ 2 mètres (environ 3 mètres pour l'amplitude de fluctuation entre le maxima et le minima mesurés entre 1891 et 1962). La 2^{ème} CEJ a conduit à un resserrement de cette amplitude de fluctuation des eaux, toujours sans modification de son régime annuel moyen, soit basses eaux plutôt en hiver et hautes eaux plutôt en été, qui a été réduite à environ 0.7 mètre entre hautes eaux et basses eaux moyennes (environ 1.5 mètre pour l'amplitude de fluctuation entre le maxima et le minima mesurés depuis 1973).

⁶ Eléments transmis par mail par Christian Clerc, biologiste à la Grande Caricaie.

Si la 1^{ère} CEJ est clairement à l'origine de la formation, par exondation de hauts-fonds, de ceintures marécageuses plus ou moins végétalisées et boisées comprenant les marais que gère aujourd'hui la Grande Cariçaie, la 2^{ème} CEJ semble avoir conduit à la modification de certaines d'entre-elles soit :

- pour la marge la plus proche du Lac : disparition des cordons littoraux sableux régulièrement exondés et avec eux d'espèces telles que la Renoncule radicante ou encore la Littorelle, disparition des ceintures de nénuphars, recul localisé du marais non-boisé compensé par le développement de certains massifs de roselière lacustre ;
- et pour la marge la plus éloignée du Lac : densification généralisée des ligneux, particulièrement des ligneux à feuilles caduques dans les pinèdes alluviales, colonisation de ceintures marécageuses non-boisées par les ligneux.

Il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure la 2^{ème} CEJ n'aurait fait qu'accélérer une dynamique évolutive inexorable et déjà en mouvement après la 1^{ère} CEJ ou dans quelle mesure cette 2^{ème} CEJ a réellement changé la donne au niveau paysager. Quoi qu'il en soit ces corrections ont bien montré toute l'importance du paramètre « niveau du Lac » parmi la complexité des paramètres régissant l'évolution paysagère du site.

In fine, il faut bien admettre qu'il n'existe pas d'expérimentation concrète de retour à un marnage et faisant l'objet de constat d'impact à une échelle appropriée vis-à-vis de certains indicateurs biologiques. En effet et même si sur le Lac d'Aiguebelette, quelques observations ont pu être faites sur la faune aquatique suite à quelques fluctuations de niveau⁷, aucun retour d'expérience basé sur de réels protocoles de marnage et d'observations des impacts n'existe à ce jour.

⁷ Mars 2011, mail de Michel TISSUT au SILA.

Références bibliographiques

- Armstrong J., Afreen-Zobayed F., Blyth S. & Armstrong W., 1999. *Phragmites australis*: effects of shoot submergence on seedling growth and survival and radial oxygen loss from roots. *Aquatic Botany* 64 : 275-289.
- Armstrong J. & Armstrong W., 2001. An overview of the effects of phytotoxins on *Phragmites australis* in relation to die-back. *Aquatic Botany* 69 : 251–268.
- Blake G., 1992. Étude de la dégénérescence des roselières. Université de Savoie. p. 8.
- Brix H., 1999. The European Research Project on Reed Die-back and Progression (EUREED). *Limnologica* 29 : 5-10.
- Charles F., 1998. Régulation du niveau et du débit du Lac d'Annecy. Stage de deuxième année. Institut National Agronomique de Paris – Grignon. 58 p.
- CISALB - Comité intersyndical pour l'assainissement du Lac du Bourget, 2007. Pas de baisse sans curage des ports. La lettre d'information du contrat, N°6 : 14-15.
- Clerc C. – Mars 2011 Mail adressé au SILA concernant quelques observations sur le Lac de Neuchâtel – La Grande Carrière.
- Den Hartog C., Kvet J. & Sukopp H., 1989. Reed: A common species in decline. *Aquatic Botany* 35 : 1-4.
- Dienst M., Schmieder K. & Ostendorp W., 2004. Effects of water level variations on the dynamics of the reed belts of Lake Constance. *Limnologica* 34 : 29–36.
- Hill H.M., Keddy P.A., Wisheu I.C., 1998. A hydrological model for predicting the effects of dams on the shoreline vegetation of lakes and reservoirs. *Environmental Management* 22 (5) : 723-736.
- Miquet A., 1997. La régulation du Lac du Bourget (France) : nouveau fonctionnement hydraulique, impacts environnementaux / Regulation of the Lac du Bourget (French Alps) : environmental impact of new management rules. *Revue de géographie alpine*. Tome 85 N°2. pp. 11-21.
- Nechwatal J., Wielgoss A., Mendgen K., 2008. Flooding events and rising water temperatures increase the significance of the reed pathogen *Pythium phragmitis* as a contributing factor in the decline of *Phragmites australis*. *Hydrobiologia* 613 : 109-115.
- Ostendorp W., 1989. "Die-back" of reeds in Europe – A critical review of literature. *Aquat. Bot.* 35, 5-26.
- Ostendorp W., Dienst M. & Schmieder K., 2003. Disturbance and rehabilitation of lakeside *Phragmites* reeds following an extreme flood in Lake Constance (Germany). *Hydrobiologia* 506-509 : 687-695.
- Pautou G., Girel J. & Borel J.L., 1992. Initial repercussions and hydroelectric developments in the french upper Rhône valley : a lesson for predictive scenarios propositions. *Environmental Management* 16 : 231-242.
- Pichon F. Mauvais Ch., Schaefer O., 1993, Les Lacs de St Point et Remoray – vers une maîtrise optimale du niveau d'eau – Protocole de gestion et de suivi basé sur l'étude des édifices biologiques. Syndicat mixte des deux lacs :St Point et Remoray. 155 p.
- Rea N., 1996. Water levels and *Phragmites*: Decline from lack of regeneration and dieback from shoot death. *Folia Geobotanica. Phytotax* 31: 85-90.

- SAGE Environnement ; 2007 – Etude de l'état des roselières du lac d'Annecy et propositions d'action de restauration – Document 1 – Rapport ; 106 p + Document 2 – Annexes. SILA.
- TISSUT M. – Mars 2011 – Mail adressé au SILA concernant quelques observations sur le Lac d'Aiguebelette.
- Van der Putten W.H., 1997. Die-back of *Phragmites australis* in European wetlands: an overview of the European Research programme on Reed Die-back and progression (1993-1994). *Aquat. Bot.* 59 : 263-275.
- Wantzen K. M., Rothhaupt K.-O., Mörtl M., Cantonati M., Tóth L. G., Fischer P., 2008. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: an urgent issue. *Hydrobiologia* 613 : 1–4.

MODULE 3 :

Détermination des relations entre les niveaux du Lac et la mise en eau des secteurs de roselières

1 METHODOLOGIE

L'objectif de ce module est d'étudier la relation entre le niveau du Lac et l'état d'inondation/exondation des roselières aquatiques.

1.1 Elaboration du Modèle Numérique de Terrain

Pour mener à bien cette phase, un modèle numérique de terrain a été élaboré⁸ sur trois secteurs (les Marais de l'Enfer, le Sentier des Roselières et le Bout du Lac) de manière à disposer d'un outil topographique permettant de simuler pour différentes cotes, l'importance des surfaces exondées ou inondées.

Pour chacun des trois sites à cartographier, les prospections ont consisté à effectuer des relevés GPS⁹ de précision centimétrique le long de transects perpendiculaires à la berge tant du côté aquatique (jusqu'à 1, 5 m de profondeur) que du côté terrestre. Ces investigations ont été réalisées durant les semaines 13, 14, 15 et 39 de l'année 2011.

Pour les zones plus au large non prospectables à pied, les données de bathymétrie acquises lors des études d'AVP des protections des roselières (réalisées par l'entreprise Bathys) ont été également exploitées.

Au total ce sont près de 14200¹⁰ points qui ont été saisis et qui ont permis d'obtenir des courbes de niveau suffisamment précises (précision décimétrique à centimétrique) de part et d'autre de la berge actuelle.

Ce modèle numérique de terrain a été réalisé avec le logiciel Autocad Quovadis

1.2 Les simulations d'exondations- inondations

Conformément au cahier des charges, les amplitudes testées par pas de 10 cm se situent pour chacun des trois secteurs entre les cotes d'alertes actuelles à savoir 447.42 (cote d'alerte de crue) et 446.42 (cote d'alerte étiage sévère).

Concernant les exondations, et dans la mesure où la cote d'étiage sévère testée ne permettait pas selon nous une exondation suffisante des surfaces de roselière pour une bonne interprétation, nous

⁸ Logiciel utilisé : Autocad Quovadis

⁹ GPS haute précision utilisant le système Orphéon – les points cachés (mauvaises réception éventuelle due par exemple aux arbres) ont été relevés au théodolite

¹⁰ 4000 points sur les Marais de l'Enfer, 4800 points sur le Sentier des Roselières et 5400 points sur le Bout du Lac.

Etude écologique relative au rétablissement d'un marnage sur le Lac d'Annecy - SILA

avons réalisé deux autres simulations aux cotes 446,16 et 445,91 qui sont intégrées aux résultats du paragraphe suivant.

Ainsi le tableau ci-dessous résumé les cotes de niveau d'eau testées par rapport à la cote 446,91.

Cotes testées (IGN 69)												
445,91	446,16	446,41	446,51	446,61	446,71	446,81	446,91	447,01	447,11	447,21	447,31	447,41

Pour chaque cote testée (à la hausse ou à la baisse), le pourcentage de roselière exondé ou inondé, a été ensuite calculé pour chacun des trois sites par rapport à la surface de roselière aquatique du secteur considéré¹¹ et pour un niveau « moyen » du Lac de 446,91 qui correspond à la cote moyenne observée sur la période 1965 – 2010 (cote 74 à l'échelle du Pont de la Halle).

¹¹ Données acquises lors de la cartographie des roselières aquatiques en 2007 et localement réactualisées en 2011 (pour le Bout du Lac)



Localisation des secteurs ayant fait l'objet de relevés topographiques

figure 1 : Localisation des secteurs ayant fait l'objet de relevés topographiques

2 RESULTATS ET COMMENTAIRES

Pour chacune des situations (à la hausse ou à la baisse), nous faisons figurer à la suite les tableaux par secteurs ainsi que des graphes permettant d'illustrer ces chiffres.

Les planches cartographiques (figure 8 à figure 10) faisant apparaître l'emprise des surfaces exondées et inondées pour les cotes testées les plus proches des cotes extrêmes du cahier des charges figurent également à la suite.

2.1 Simulations de hausses du niveau du Lac

Marais de l'Enfer

Surface totale de roselière aquatique du secteur depuis la cote 446,91 : 26 898 m²

(Chiffre servant de référence pour le calcul des pourcentages apparaissant ci-dessous)

Cotes à l'échelle du Pont de la Halle (cm)	Cotes (IGN 69)	Surfaces totales inondées (m ²)	Surfaces de roselières terrestres inondées (m ²)	Proportion de roselière terrestre inondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)	Autres surfaces végétales (boisement) (m ²)
124	447,41	Données topo non dispo	13678	50,9	Données topo non dispo
114	447,31	Données topo non dispo	13566	50,4	Données topo non dispo
104	447,21	Données topo non dispo	12938	48,1	Données topo non dispo
94	447,11	12988,25	10127	37,7	2832
84	447,01	4742,49	3327	12,4	979
74	446,91				

tableau 1. : Marais de l'Enfer - Données de surfaces pour une simulation à la hausse de la cote du Lac

Sentier des roselières

Surface totale de roselière aquatique du secteur depuis la cote 446,91 : 21 252,42 m²

(Chiffre servant de référence pour le calcul des pourcentages apparaissant ci-dessous)

Cotes à l'échelle du Pont de la Halle (cm)	Cotes (IGN 69)	Surfaces totales inondées (m ²)	surfaces de roselières terrestres inondées (m ²)	Proportion de roselière terrestre inondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)	Surfaces végétales autres (boisement) (m ²)
124	447,41	10374	6395	30,1	3861
114	447,31	8843	5898	27,8	2945
104	447,21	10374	5268	24,8	2145
94	447,11	8843	4167	19,6	1792
84	447,01	10374	2707	12,7	529
74	446,91		1165 m ² Surface de roselière terrestre dont la cote est <446,91		

tableau 2. Sentier des Roselières - Données de surfaces pour une simulation à la hausse de la cote du Lac

Bout du Lac

Surface totale de roselière aquatique du secteur depuis la cote 446,91 : 9 903,16 m²

(Chiffre servant de référence pour le calcul des pourcentages apparaissant ci-dessous)

Cotes à l'échelle du Pont de la Halle (cm)	Cotes (IGN 69)	Surfaces totales inondées (m ²)	surfaces de roselières terrestres inondées (m ²)	Proportion de roselière terrestre inondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
124	447,41	14955	14955	151,0
114	447,31	13301	13301	134,3
104	447,21	12105	12105	122,2
94	447,11	10802	10802	109,1
84	447,01	7526	7526	76,0
74	446,91	2036 surf<446,91	2036 surf<446,91	

tableau 3. : Bout du Lac - Données de surfaces pour une simulation à la hausse de la cote du Lac

La valeur 2035, 68 m² correspond aux surfaces de roselières données par le modèle comme étant sous la cote 446,91 (de nombreuses dépressions sont observées à l'arrière de la ligne de berge sur ce secteur)

Concernant les Marais de l'Enfer, on observe pour ce secteur des surfaces significatives qui seraient inondées dès la cote 447,11 (94 cm)¹² puisque plus de 10 000 m² de roselières terrestres seraient concernés ainsi que près de 2900 m² de boisement localisé en bordure proche du Lac.

Le secteur du Sentier des Roselières étant quant à lui plus urbanisé, on observe beaucoup moins de roselières terrestres sur cette zone. Ainsi les valeurs tant en proportions qu'en valeurs absolues sont plus faibles puisqu'on note pour la cote extrême une inondation d'un peu plus de 6000 m² de phragmitaie sèche, ce qui représente moins de 25 % de la surface de roselières aquatique du secteur.

Pour la zone du Bout du Lac, et comme pour les Marais de l'Enfer qui contiennent des roselières, les simulations montrent une augmentation des mises en eau importante mais assez régulière de ces milieux. Cette inondation est significative dès la cote 447,11 (94 cm) avec plus de 10 000 m² inondés ce qui correspond à une valeur supérieure au doublement des surfaces de roselières aquatiques du secteur. Pour la cote extrême de 447,41 (124 cm), on multiplierait par 1,5 la surface de roselière aquatique actuelle du simple fait de l'inondation.

¹² Cote correspondante à l'échelle au Pont de la Halle - ces cotes apparaissent entre parenthèses dans la suite Etude écologique relative au rétablissement d'un marnage sur le Lac d'Annecy - SILA

2.2 Simulations de baisses du niveau du Lac

Les tableaux ci-dessous résument pour chacun des trois secteurs et pour chaque cote, la surface totale exondée, surface qui est ensuite ventilée entre surface végétalisée (roselière à minima voire scirpaie et mélange des deux formations pour le marais de l'Enfer) et surfaces dénudées.

Marais de l'Enfer

Surface totale de roselière aquatique du secteur depuis la cote 446,91 : 26 898 m²
(Chiffre servant de référence pour le calcul des pourcentages apparaissant ci-dessous)

Cotes à l'échelle du Pont de la Halle (cm)	Cotes (IGN 69)	Surfaces totales exondées (m ²)	Surfaces exondées actuellement en roselière aquatique (m ²)	Surfaces exondées actuellement en scirpaie (m ²)	Surfaces exondées actuellement en mélange roselière aquatique et scirpaie (m ²)	Surfaces exondées actuellement non végétalisées (m ²)	Taux d'occupation par la végétation à la cote considérée	Proportion de roselière aquatique exondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
74	446,91							
64	446,81	1093	408			685	37,3%	1,5
54	446,71	2399	980			1419	40,9%	3,6
44	446,61	4254	1968			2286	46,3%	7,3
34	446,51	7351	4169			3182	56,7%	15,5
24	446,41	12101	8096		96	3909	66,9%	30,5
-1	446,16	25731	17746	322	1183	6480	69,0%	70,4
-26	445,91	44367	23389	741	2107	18130	52,7%	94,8

tableau 4. : Marais de l'Enfer - Données de surfaces pour une simulation à la baisse de la cote du Lac

Sentier des roselières

Surface totale de roselière aquatique du secteur depuis la cote 446,91 : 21 252,42 m²
(Chiffre servant de référence pour le calcul des pourcentages apparaissant ci-dessous)

Cotes à l'échelle du Pont de la Halle (cm)	Cotes (IGN 69)	Surfaces totales exondées (m ²)	Surfaces exondées actuellement en roselière aquatique (m ²)	Surfaces exondées actuellement non végétalisées (m ²)	Taux d'occupation par la végétation à la cote considérée	Proportion de roselière aquatique exondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
74	446,91					
64	446,81	914	182	732	19,9%	1
54	446,71	1833	664	1169	36,2%	3
44	446,61	3309	1710	1599	51,7%	8
34	446,51	5536	3488	2048	63,0%	16
24	446,41	8807	6038	2769	68,6%	28
-1	446,16	19719	14785	4934	75,0%	70
-26	445,91	30647	19795	10852	64,6%	93

tableau 5. : Données de surfaces pour une simulation à la baisse de la cote du Lac

Bout du Lac

Surface totale de roselière aquatique du secteur depuis la cote 446,91 : 9 903,16 m²
(Chiffre servant de référence pour le calcul des pourcentages apparaissant ci-dessous)

Cotes à l'échelle du Pont de la Halle (cm)	Cotes (IGN 69)	Surfaces totales exondées (m ²)	Surfaces exondées actuellement en roselière aquatique (m ²)	Surfaces exondées actuellement non végétalisées (m ²)	Taux d'occupation par la végétation à la cote considérée	Proportion de roselière aquatique exondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
74	446,91					
64	446,81	605	205	400	33,8%	2,1
54	446,71	1113	491	622	44,1%	5,0
44	446,61	1741	847	894	48,6%	8,6
34	446,51	2770	1360	1410	49,1%	13,7
24	446,41	4150	2080	2070	50,1%	21,0
-1	446,16	10856	4724	6132	43,5%	47,7
-26	445,91	18515	8418	10097	45,5%	85,0

tableau 6. : Données de surfaces pour une simulation à la baisse de la cote du Lac

Nous faisons figurer à la suite, le graphe synthétisant pour les trois secteurs et pour chaque cote simulée, la surface totale exondée.

Surfaces totales exondées pour les trois secteurs

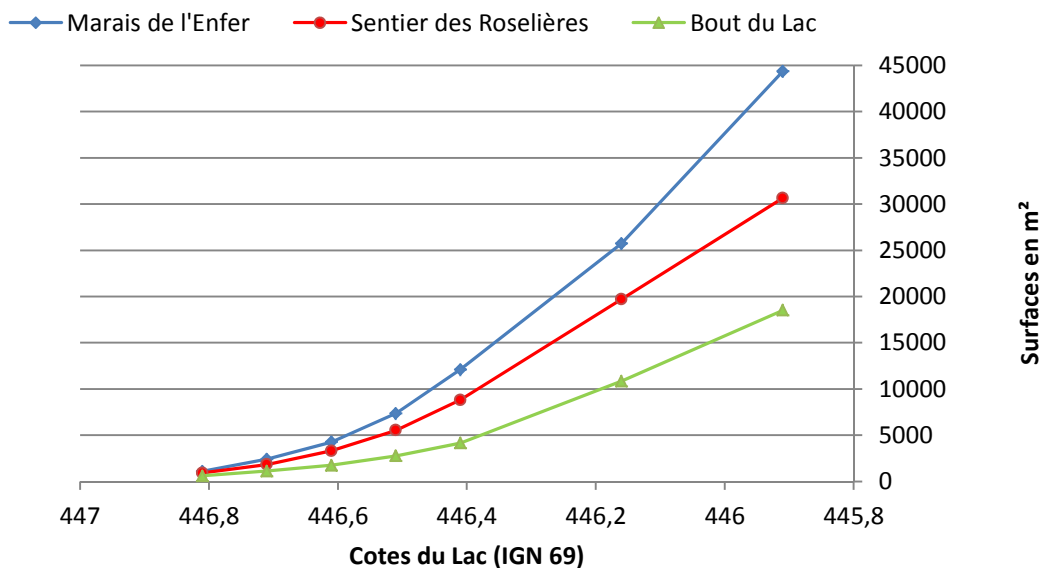


figure 2 : Surfaces totales exondées pour les trois secteurs

Comme le montre la figure 2 entre les cotes 446,91 (74 cm) et 445,91 (-26 cm), les valeurs totales de surfaces exondées pour chaque cote ne suivent pas de loi linéaire. On observe par ailleurs, des différences notables entre les trois secteurs, ce qui ne fait que confirmer les observations de terrain quant aux différences d'extension de la beine et de déclivités pour les Marais de l'Enfer, le Sentier des Roselières et le Bout du Lac.

Il est en particulier intéressant de remarquer ces différences entre d'une part les surfaces exondées pour les Marais de l'Enfer et le Sentier des Roselières où la configuration des beines est relativement étendue et plane et d'autre part celles du Bout du Lac pour lequel la beine est plus étroite. Cette disparité des surfaces exondées apparaît à partir de la cote 446,51 (34 cm) pour s'amplifier pour les cotes inférieures.

Précisons que chacun des trois secteurs étudiés est relativement comparable en longueur de berge :

- Marais de l'Enfer $\approx$ 1150 m
- Sentier des Roselières $\approx$ 1010 m
- Bout du Lac $\approx$ 900 m

Pourcentage de roselières exondées pour les trois secteurs entre les cotes 445.91 et 446,91 (IGN 69)

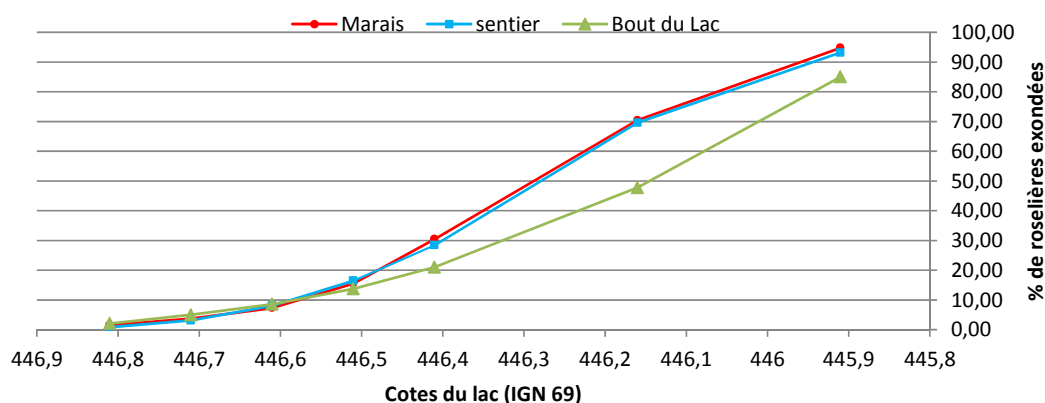


figure 3 : Pourcentage de roselières exondées pour les trois secteurs

Pourcentage de surfaces exondées actuellement non végétalisées par rapport à la surface totale de roselières aquatiques

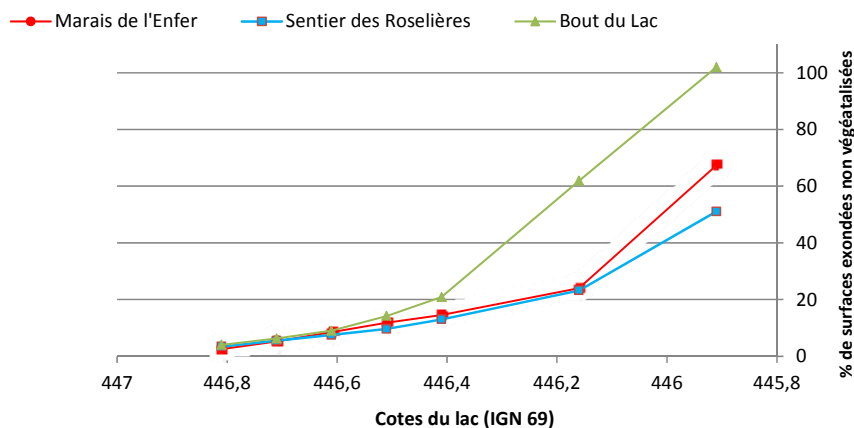


figure 4 : Pourcentages de surfaces exondées non végétalisées par rapport à la surface de roselières aquatiques

Concernant le pourcentage de roselières aquatiques exondées par rapport à la surface totale du secteur, en lien avec la figure 3 plusieurs observations sont à faire pour chaque zone :

♦ Pour les Marais de l'Enfer, la surface de roselières aquatiques (en mélange ou non avec de la scirpaie) qui serait exondée à la cote 446,41 (24 cm) représente 30 % des roselières du secteur (8096 m²). Ce chiffre monte à 70 % (17 745 m²) pour la cote 446,16 (-1 cm) et à plus de 94 % (23 388 m²) pour la cote 445,91 (- 26 cm). Ainsi comme le montre ce graphe, il y a une rupture dans la proportion de roselière exondée, cette dernière augmentant sensiblement plus rapidement en dessous de la cote 446,41 (24 cm).

♦ Pour le Sentier des roselières, il est étonnant d'observer la même rupture des valeurs entre la cote 446,41 (24 cm) pour laquelle 28, 4% (6038 m²) de roselières seraient exondées et les cotes 446,16 (-1 cm) et 445,91 (- 26 cm) pour lesquelles le modèle numérique donne des exondations respectives de 69,5 % (14785 m²) et 93,1 % (19795 m²). Cette similitude se voit très bien sur le graphe puisque les courbes sont quasiment confondues.

♦ Pour le Bout du Lac, les valeurs sont inférieures aux valeurs précédentes puisque le pourcentage exondé à la cote 446,41 (24 cm) n'atteint que 21 % (2080 m²), 47,7 % à la cote 446,16 (-1 cm) soit 4723 m² et 85 % à la cote 445,91 (- 26 cm) soit 8417 m². Comme semble le montrer le graphe, la rupture évoquée précédemment semble être observée à une cote plus basse (en dessous de 446,16) (- 1 cm).

Une des **informations principales** que nous apportent ces observations est que la répartition des roselières aquatiques sur nos trois secteurs semble assez singulière dans la mesure où comme le traduit d'une autre manière la figure 6, les surfaces les plus importantes ne sont pas localisées à proximité des berges mais au contraire davantage au large là où les profondeurs d'eau sont plus grandes.

Si l'on observe à présent le taux d'occupation par la phragmitaie de la surface exondée (rapport entre la surface de roselière exondée et la surface totale exondée – Cf. graphe ci-dessous) dont les informations recoupent celles évoquées précédemment, on s'aperçoit que :

- l'on a des valeurs basses pour le sentier des roselières (<40 %) pour les cotes supérieures à 446,71 (54 cm) et que l'on dépasse les 60 % pour les cotes inférieures à 446,51 (34 cm),
- l'on a une courbe quelque peu comparable sur le Marais de l'Enfer, mais avec des taux globalement plus faibles
- le Bout du Lac se distingue des autres secteurs car il demeure quasiment en permanence en deçà des 50 %

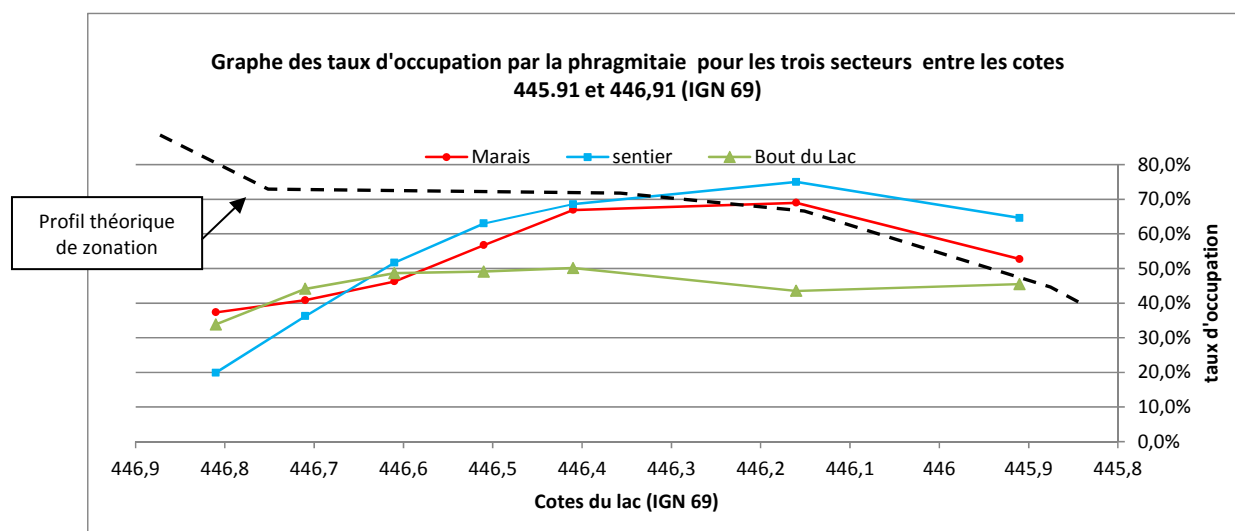


figure 5 : Taux d'occupation par la phragmitaie entre les cotes 445,91 et 446,91

Si l'on raisonne à présent en profondeur d'eau, on note que sur les Marais de l'Enfer et le Sentier des Roselières, 69,5 % et plus de 71 % des phragmitaies aquatiques se répartissent dans des profondeurs supérieures à 50 cm¹³. Ce chiffre atteint 79 % pour le Bout du Lac pour lequel on note même que plus de 50 % des roselières sont implantées au-delà des 75 cm de profondeur.

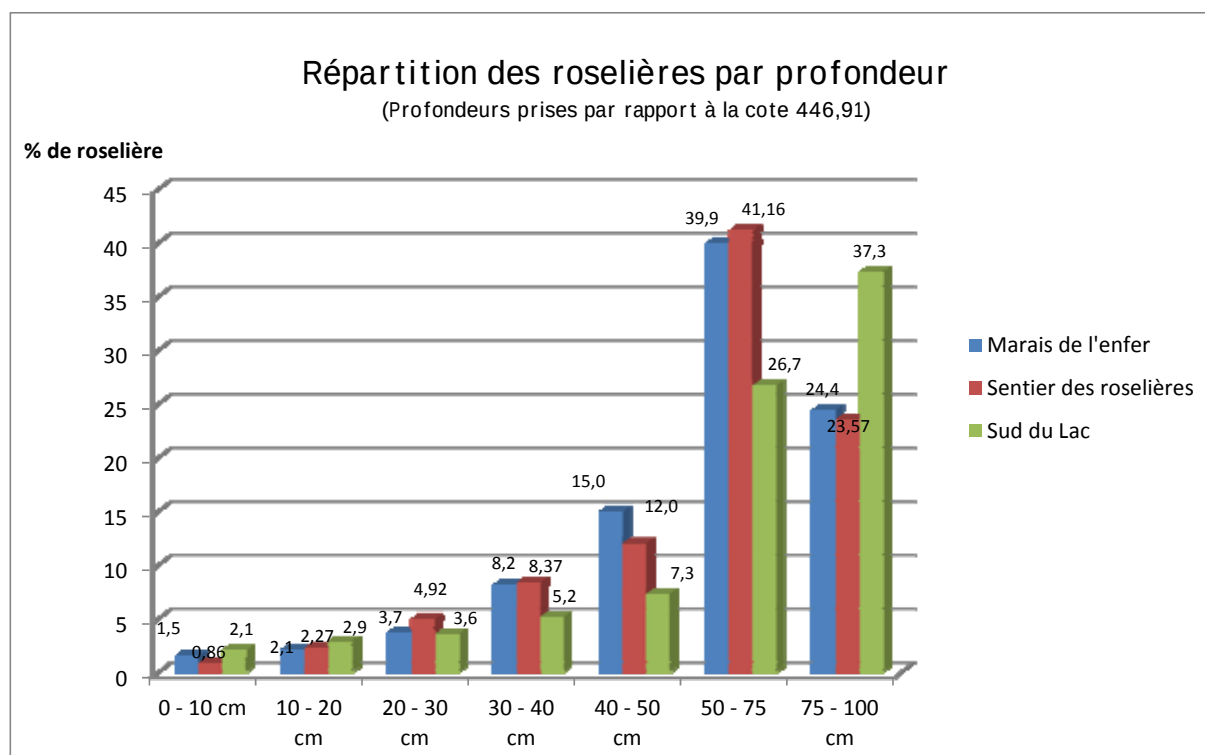


figure 6 : Répartition des roselières par profondeur

¹³ Profondeur calculée par rapport à la cote 446,91 (74 cm).

Pour ce qui a trait aux proportions de surfaces exondées non végétalisées par rapport aux zones végétalisées (phragmitaies), la figure 4 montre des tendances aussi très similaires pour les trois secteurs jusqu' à la cote 446, 51 (34 cm) avec des valeurs nettement inférieures à 20 %. En dessous de cette cote, la proportion de surfaces exondées dénuées de végétation pour le Bout du Lac augmente plus rapidement que les deux autres secteurs pour finir à la dernière cote par être plus importante que les surfaces de roselières.

Cette augmentation s'observe également pour les deux autres secteurs mais en deçà de la cote 446, 16 (-1 cm) (où les valeurs demeurent inférieures à 25 %) et pour buter sur des valeurs demeurant inférieures à 70 % pour les Marais de l'Enfer et inférieures à 60 % au Sentier des Roselières.

En s'affranchissant à présent des proportions et en raisonnant en surfaces absolue, la figure 7 qui détaille cette ventilation entre zones dénudées et zones végétalisées pour les trois secteurs montre que :

- Pour le Bout du Lac, une répartition assez égalitaire est notée pour chaque cote entre ces deux types de surfaces.

- Pour les deux autres secteurs, il en va tout autrement. En effet pour les cotes hautes de l'intervalle qui nous intéresse, ce sont les surfaces non végétalisées qui sont dominantes tendance qui s'inverse très nettement dès la cote 446,51 (34 cm) à partir de laquelle les surfaces exondées sont majoritairement des roselières aquatiques.

Répartition des surfaces exondées

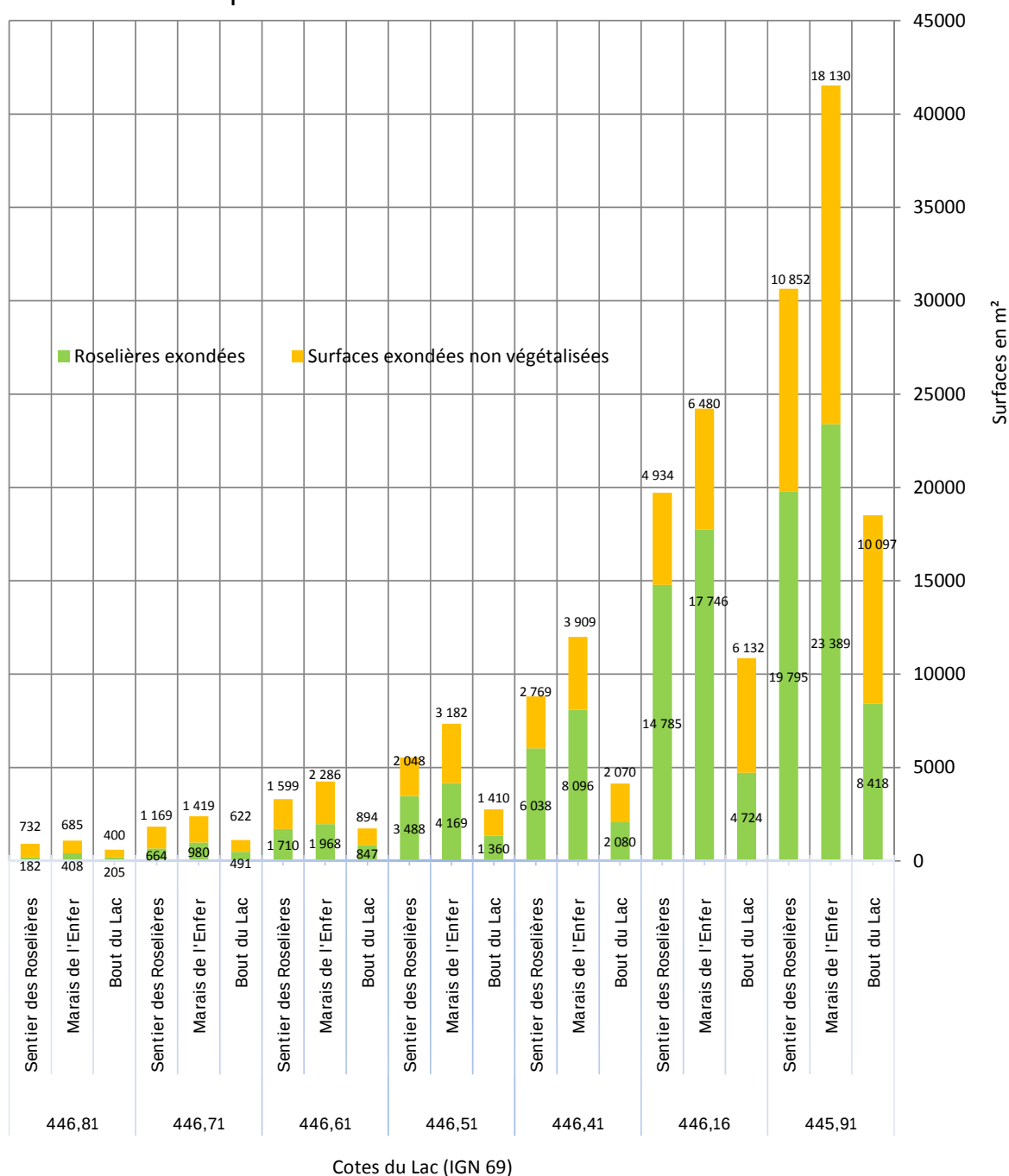


figure 7 : Répartition des surfaces exondées pour les trois secteurs

2.3 Conclusion

Les simulations d'exondation d'inondation à différentes cotes du Lac combinées avec la cartographie actuelle des roselières ont permis de déterminer les différents chiffres de surfaces concernés pour une hausse ou une baisse de la ligne d'eau.

Pour une hausse des niveaux compris entre 446,91 et 447,41 les chiffres font apparaître des mises en eau significatives de roselières terrestres notamment sur les Marais de l'Enfer et le Bout du Lac.

Pour une baisse de la ligne d'eau entre 446,91 et 445,91, les résultats montrent notamment que pour les trois secteurs étudiés, la répartition des roselières aquatiques est plus importante au large (entre 50 cm et 1 m de profondeur) que près de la berge là où est censée se développer pleinement la zone d'accumulation. Par ailleurs, cette exondation progressive des roselières s'accompagne également d'exondation de surfaces dénudées. Si notamment pour les deux secteurs des Marais de l'Enfer et du Sentier des Roselières, les proportions demeurent modestes (par rapport à la surface de roselière du secteur considéré), les chiffres de surfaces sont néanmoins significatifs y compris pour le Bout du Lac.

En termes de taux d'occupation, ces derniers sont assez faibles pour les cotes supérieures à 446,61 (sauf au Bout du Lac où le taux demeure quasiment toujours inférieur à 50 %).

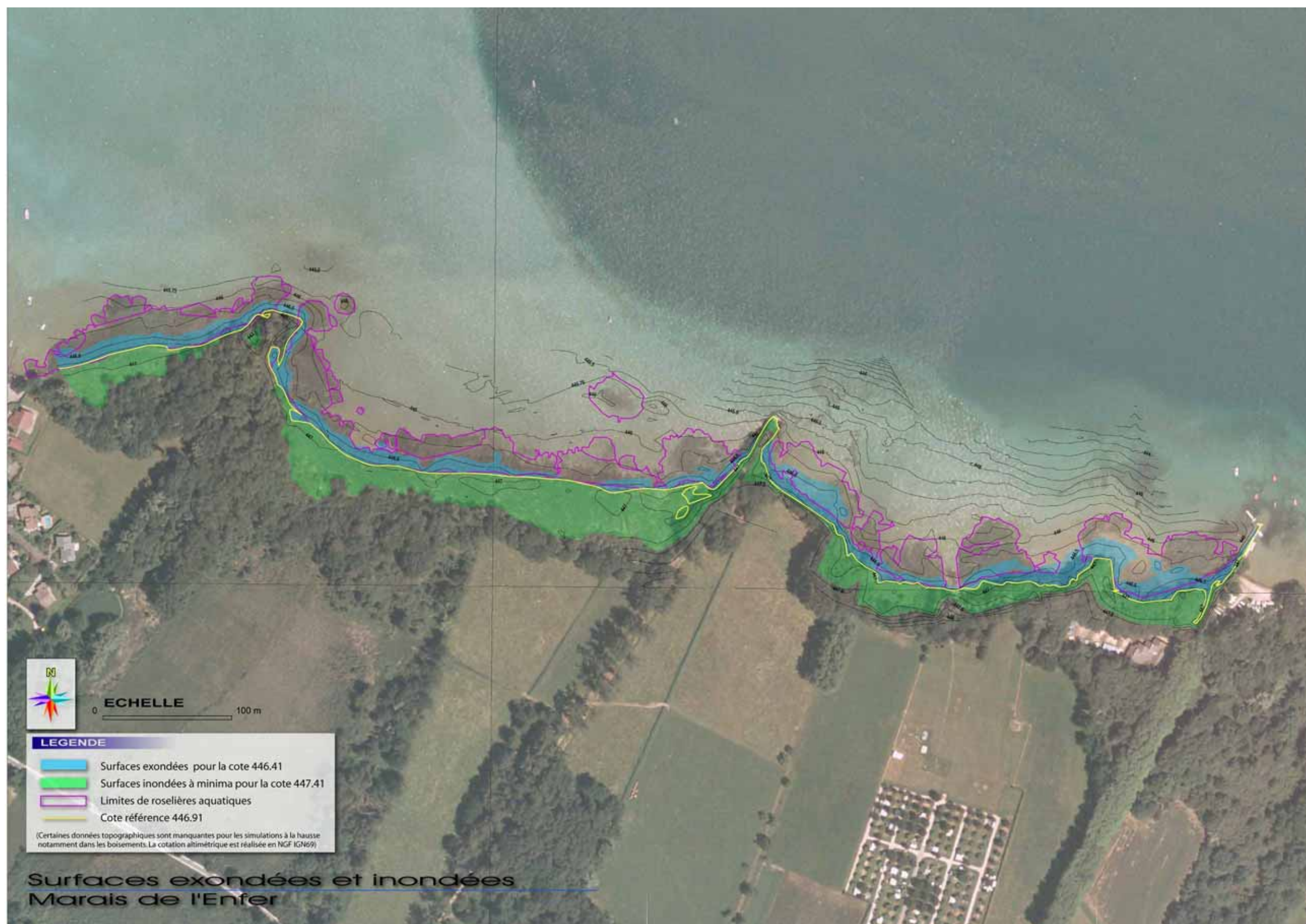


figure 8 Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau simulées de 446,41 et 447,41

figure 9 Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau simulées de 446,41 et 447,41



figure 10 Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau simulées de 446,41 et 447,41



MODULE 4

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer l'impact écologique du rétablissement du marnage selon trois scénarii hydrologiques modélisés grâce aux modules 1 et 3.

Les indicateurs écologiques suivants ont été retenus quant à cette évaluation qualitative des impacts :

- aspect végétal : végétation hélophytique en s'attachant en particulier aux phragmitaies aquatiques,

- aspect faunistique avec l'avifaune, l'ichtyofaune, le Castor et les invertébrés via les odonates. Ces indicateurs faunistiques ont été retenus en raison de leur importance du point de vue de la caractérisation de l'écosystème lacustre et littoral et/ou de leur utilisation plus ou moins soutenue de l'habitat roselière aquatique.

Dans un souci de clarté, ce module comporte trois thématiques :

- Une première concerne des données de cadrage relatives à chaque indicateur. Elles sont précisées le cas échéant notamment pour la faune, par l'état des connaissances sur le Lac d'Annecy grâce à des données récentes.¹⁴

- Une seconde concerne la définition des scénarii retenus,

- Une troisième traite des impacts de chaque scénario sur chacun des indicateurs en s'intéressant avant tout aux trois secteurs du module 3 à savoir, les Marais de l'Enfer, le sentier des roselières et le Bout du Lac.

1 DONNEES ECOLOGIQUES SUR LE ROSEAU ET EFFETS DU NIVEAU DES EAUX SUR SON DEVELOPPEMENT

1.1 Phénologie du roseau (*Phragmites australis*)

Elle se résume schématiquement comme suit

- Rhizome pérenne (rôle de support, oxygénation des racines et accumulation des réserves),
- Tige annuelle, début de croissance en avril,
- Fin de croissance en juin-juillet suivi de floraison (panicule),
- Production de graines à l'automne (panicule plumeuse),
- Perte des feuilles qui jaunissent en novembre-décembre,
- Tiges qui meurent et sèchent en décembre mais restent sur pied quelques mois ou années avant de casser et de se décomposer,
- Habitat très productif en termes de biomasse végétale produite par année (1.3 – 4 kg matière sèche/m²/an).

¹⁴ Etudes ONEMA, étude LPO et contacts téléphoniques avec ASTERS et la LPO en particulier.

Du point de vue des besoins physiologiques, *Phragmites australis* se caractérise par une amplitude écologique assez large. L'espèce accepte quasiment tous les types de sols inondés à condition qu'ils ne soient ni trop acides ni trop à l'ombre (espèce héliophile). L'espèce est par ailleurs particulièrement adaptée à la fluctuation du niveau de l'eau.

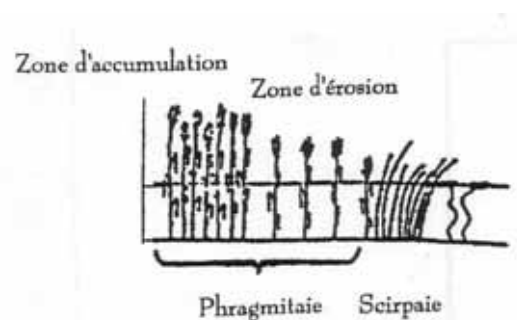
Sa présence en eau salée (Camargue) et son utilisation comme système d'épuration domestique (filtres plantés de macrophytes) sont quelques-unes des illustrations de cette « plasticité » écologique.

1.2 Fiche d'identité d'une roselière aquatique

Les roselières aquatiques forment la première bordure de végétation émergente des Lacs et des cours d'eau lents. Elles colonisent, en franges riveraines ou en îlots, des zones d'eau peu profondes dont la hauteur n'excède généralement pas 1,6 m. Les roselières aquatiques sont dominées par des plantes spécialisées, les hélophytes (Roseau commun ou Phragmite en premier lieu, Jonc et Massette dans une moindre mesure), dont les organes aériens (tiges, feuilles, fleurs) se développent essentiellement à partir d'un système racinaire submergé, les rhizomes qui permettent un clonage végétatif. Ainsi, avec un rhizome de 50 à 70 cm contenant assez de réserves, un Roseau peut constituer une roselière monospécifique par simple multiplication végétative et cette expansion peut atteindre plusieurs mètres par an en conditions optimales.

Morphologiquement une roselière aquatique est constituée de deux zones distinctes :

- la zone d'accumulation à l'interface terre-eau, où la production de matière végétale est supérieure au taux de décomposition de cette matière. Elle constitue également le réservoir depuis lequel, grâce aux rhizomes, le maintien et le développement de la phragmitaie sont possibles.
- la zone d'érosion située plus au large, qui constitue le premier rempart notamment face aux phénomènes ondulatoires de l'eau comme la houle et le batillage. Il s'agit en général d'un secteur qui se différencie morphologiquement du précédent par une taille et une densité de tiges inférieures.



Une des caractéristiques majeures des roselières est leurs fortes productivités primaires causées par une importante accumulation de matière organique. Cette forte accumulation demeure néanmoins réduite par la décomposition et minéralisation par la microflore et microfaune et l'exportation par les herbivores ou facteurs physiques (mouvements d'eau, vent). Rappelons que la décomposition dépend principalement de la température de l'eau, de la teneur en O₂ et en nutriments, et du degré d'humidité de la litière (avec interactions multiples entre ces facteurs).

Une accumulation extrême peut être observée et correspond à la formation de litière qui stocke l'eau, les métabolites de la décomposition et temporairement les gaz issus également de cette décomposition. Ce phénomène permet le maintien de roselières denses s'il y a un enfoncement de la surface du marais (subsidence).

L'effet de l'accumulation de matière au sol sous forme de litière protège les rhizomes et les bourgeons du gel et des intempéries, les tiges sèches sur pied facilitent le transport d'O₂ vers les rhizomes. En eau profonde, l'accumulation de litière limite la productivité (densité) des roselières par manque d'oxygénation des sédiments.

1.3 Facteurs influençant l'évolution des roselières

Malgré la plasticité apparente du roseau, et comme le laissent supposer les éléments évoqués ci-dessus, certains facteurs favorisent l'expansion de l'espèce notamment les sols inondés par 0, 2 à 1 m d'eau, avec un substrat constitué d'alluvions argileux ou sablo-argileux riches en éléments nutritifs. Ainsi pour ce dernier aspect notamment, le développement de la roselière est favorisé par les sels nutritifs (eaux eutrophes avec pH optimal de 5,5 à 7,5) mais l'eutrophisation excessive des plans d'eau liée à un enrichissement trop important en nutriments se traduit à l'inverse par une diminution de la teneur en oxygène dans la colonne d'eau, les eaux interstitielles et le sédiment. Par ailleurs, une forte teneur en azote favorise la croissance des tiges (plus hautes mais moins solides) et les algues qui se développent en manchons autour des tiges (périphyton) occasionnant des fragilités mécaniques.

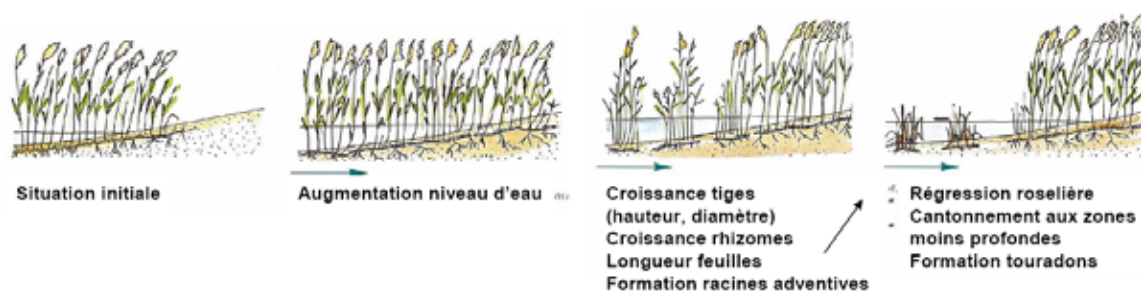
Les facteurs limitant l'expansion de l'espèce sont le manque d'eau en surface et en profondeur pendant une période prolongée, une eau stagnante, une absence d'assec périodique ou un courant trop important (>0,2 m/s) et bien sûr une pollution trop intense.

1.4 Augmentation/baisse du niveau des eaux

1.4.1.a Généralités

Une augmentation importante du niveau moyen de l'eau peut conduire sous certaines conditions à un appauvrissement des sédiments en oxygène et se traduire par :

- Une réduction de biomasse car l'allocation des réserves au rhizome se fait moins bien,
- Une augmentation du rapport biomasse aérienne/biomasse souterraine,
- Une augmentation du diamètre de la tige et de la longueur des feuilles,
- La formation de racines adventives au niveau des nœuds submergés,
- Une plus grande sensibilité à d'autres stress (vagues, eutrophisation, etc.)



Source : Poulin B. ; avril 2010 – Formation diagnostic des roselières Plan National d'Action du Butor étoilé ; Tour du Valat.

A contrario une hausse peut néanmoins permettre d'élargir la surface de dissipation énergétique des vagues et contribuer bénéfiquement à disperser plus en arrière de la roselière les flottants diminuant de fait les « effets de cordons » voire de sapement de berges observés sur Annecy notamment au Bout du Lac.

Une hausse peut permettre en outre de limiter la colonisation par les ligneux qui est souvent une conséquence indirecte d'une modification d'une gestion ou d'un usage antérieur. Du côté terrestre,

les roselières sont susceptibles d'être remplacées par des forêts inondables. Les aulnes, frênes ou saules s'installent lors des périodes de bas niveaux d'eau. Adaptées aux perturbations (grandes capacités de rejet de souche et de propagation végétative), elles sont difficiles à contrôler.

D'une manière générale, les baisses de niveaux d'eau en fin d'été ont un effet quant à eux plutôt favorable au niveau des sols en assurant un apport d'oxygène qui favorise la décomposition de la matière organique et diminue ses effets induits possibles. Le roseau en particulier tolère très bien les sécheresses relativement prolongées. Tout comme la hausse, ces baisses contribuent également du point de vue mécanique à élargir la bande de dissipation énergétique des vagues.

1.4.1.b L'importance des variations saisonnières du niveau des eaux

Le printemps - une période importante pour la croissance du roseau

La croissance du roseau démarre vers le mois d'avril. Elle se traduit en premier lieu par l'élongation de la pousse (ou bourgeon) initiée à la fin de l'été précédent et portée sous l'eau par les racines. Ceci nécessite de puiser dans les réserves de ce dernier afin que la future tige « perce » la colonne d'eau et puisse entamer le cycle de la photosynthèse qui verra la production des matières nutritives (sucres, ...) nécessaires à son développement annuel et à celui des racines (expansion, mises en réserves pour l'hiver suivant, ...).

Durant la période où le végétal puise dans les réserves, il est donc important que le niveau d'eau ne soit pas trop haut afin de permettre à la nouvelle pousse de sortir rapidement de l'eau au-delà de laquelle le développement des feuilles initiera la photosynthèse, seul gage de son autonomie énergétique.¹⁵

La période de fin d'été - une période propice à la minéralisation

Rappelons que la quantité d'O₂ dans le sol dépend du bilan entre les entrées depuis la surface (eau ou air) et les sorties par l'oxydation du sol, la respiration et la décomposition. L'oxygène est en faible quantité dans un sol inondé car sa concentration est faible dans l'eau. En outre, plus il y a de matière organique, plus la demande biologique en oxygène est élevée et moins il y a d'oxygène libre.

Un sol oxygéné est clair et a relativement peu de matière organique accumulée.

Un sol anoxique se traduit par des fermentations (production d'alcools), des dégagements de méthane (bulles, dégagements de gaz) et des réactions de réduction (transformation de soufre en sulfure donnant odeur d'œuf pourri ou formation de fer ferreux donnant un sol noir). Certains des composants réduits ont une toxicité directe sur les organismes vivants et en particulier sur la croissance des racines et rhizomes. Le stress anoxique sur la roselière se traduit par la formation de touradons, l'effondrement du tapis de rhizomes qui n'est plus porteur et des remontées de paquets de rhizomes libres et flottants.

¹⁵ Ces réserves jouent un rôle fondamental pour la plante et lui confèrent une forte résistance aux stress mais aussi un retard dans la réponse (les rhizomes tolèrent l'absence totale d'oxygène pendant un mois et ont des réserves pour 3 saisons de croissance en moyenne).

Une exondation en fin d'été notamment au niveau de la zone d'accumulation favorise donc la minéralisation de la matière organique et la remise à disposition de nutriments assimilables par les rhizomes. Cette minéralisation saisonnière dont l'intensité est fonction du temps d'exondation et des températures durant cette période, s'effectue néanmoins sur de faibles épaisseurs en général et il est important dans la mesure du possible pour des sédiments très anoxiques, d'effectuer des exondations annuelles.

Au-delà de la période propice, les niveaux peuvent être élevés ou bas l'hiver, en fonction des contraintes d'usages, mais un assèchement hivernal n'aura pas le même impact sur la décomposition qu'un assèchement estival ou post estival du fait principalement des différences de température (températures basses en hiver qui ne permettent pas l'activation de la flore bactérienne nécessaire à la décomposition de la matière organique).

2 L'AVIFAUNE

Pour de nombreuses espèces d'oiseaux, les roselières jouent les mêmes rôles : zone de reproduction, de refuge (notamment pendant la migration hivernale) et une zone d'alimentation. Au sein de ce type de milieu, deux facteurs conditionnent étroitement la diversité de l'avifaune : D'une part la superficie de la roselière et d'autre part la diversité des micro-habitats présents (effets de lisière auxquels répondent très bien les oiseaux). Or, les éléments déterminant pour ce second facteur résultent de l'hétérogénéité des zones exondées, inondées, et de la densité de la couverture végétale.^{16, 17}

En ce qui concerne Annecy, si de nombreuses espèces migratrices sont susceptibles de passer de manière plus ou moins ponctuelle en période post et pré nuptiale sur le Lac et à proximité des roselières (80 espèces migratrices y ont été dénombrées au cours des différentes années), les zones littorales de ce Lac ne sont pas actuellement connues comme accueillant régulièrement une grande diversité d'hivernants. Ainsi parmi les espèces les plus représentées, nous pouvons citer notamment le Grèbe huppé (*Podiceps cristatus*), le Fuligule morillon (*Aythya fuligula*) et Fuligule milouin (*Aythya ferina*) ou encore la Foulque macroule (*Fulica atra*).¹⁸

En termes de nidification, il ressort que relativement peu d'espèces fréquentent les roselières pour se reproduire. Il s'agit en particulier :

- du Grèbe huppé (*Podiceps cristatus*)
- de la Rousserolle effarvatte (*Acrocephalus scirpaceus*)
- de la Foulque macroule (*Fulica atra*)
- du Canard colvert (*Anas platyrhynchos*)

¹⁶ ONC : Le roseau; 1ère partie; Bull. Mens. de l'ONC N°105 septembre 1986; Environnement Participation Aménagement, Vincent SCHRICKE, ONC, CNERA,

¹⁷ La capacité d'accueil d'une phragmitaie peut s'avérer importante : Dans une phragmitaie de Moravie (Tchécoslovaquie), 25 espèces ont été recensées avec une moyenne de 25-30 nids/ha, incluant des espèces peu communes à rares voire très rares.

¹⁸ Sources : LPO, 2010 Rapport de synthèse de l'avifaune des roselières du Lac d'Annecy, 19 p.
& Contact téléphonique avec la LPO 74

- du Cygne tuberculé (*Cygnus olor*)
- et du Râle d'eau (*Rallus aquaticus*) – espèce non contactée lors de l'étude 2010 mais figurant dans la base de données LPO

Le Martin pêcheur (*Alcedo atthis*) souvent contacté à proximité immédiate des roselières ne niche cependant pas dedans mais les fréquente notamment pour son alimentation (chasse d'alevins).

Précisons que la rousserolle turdoïde semble très peu présente sur le site des roselières du Lac. L'espèce a été notée deux fois, en 2003 et 2005, avec des individus chanteurs sur les roselières de Saint-Jorioz. Un couple nicheur a également été noté durant l'été 2011 sur les roselières d'Albigny.¹⁹ Il est possible que les roselières du Lac ne conviennent pas (ou plus) à cette espèce qui apprécie avant tout les parties denses plus au large des roselières lacustres.

3 LE CASTOR

Espèce emblématique, le Castor a été réintroduit en 1972 au Bout de Lac. Depuis, il semble que l'espèce se soit bien développée. Elle est à présent observée jusqu'à l'extrémité Nord du Lac où des individus fréquentent les alentours du Port d'Albigny. Un terrier hutte a même été érigé sur ce secteur où de nombreux arbres sont protégés par les services techniques de la Mairie d'Annecy le Vieux.

La roselière lacustre n'est pas indispensable à l'espèce qui est en définitive assez éclectique dans le choix de ses habitats du moment que subsistent une ressource alimentaire suffisante (aulnes, saules, ..) et des caches dans les berges qui peuvent être naturelles ou non. Elle fréquente ainsi aussi bien les zones très calmes et sauvages de l'Eau morte que le Port de Doussard.

La roselière lacustre constitue néanmoins un gage pour l'espèce en termes de corridor biologique et de zone de refuge. L'espèce l'intègre en outre souvent dans son domaine vital puisqu'il s'agit de zone naturelle calme à proximité de laquelle se localise une ressource alimentaire indispensable à son cycle (ligneux) et à l'édification de ses terriers-huttes.

L'espèce fréquente très régulièrement les roselières du Bout du Lac. Elle semble également assez présente sur les Marais de l'Enfer (bien que de manière moins importante). En revanche peu d'indices de fréquentation ont été observés sur le secteur du sentier des roselières.²⁰

Rappelons que l'espèce ne consomme pas le roseau et ne l'utilise pas non plus pour la construction de terriers-huttes.

¹⁹ Avifaune du Lac d'Annecy – Synthèse des suivis de prospections menées par le LPO Haute Savoie sur le Lac d'Annecy en 2011. LPO-SILA

²⁰ Observations L. Bourgoin – SAGE Environnement.

4 LES ODONATES

D'une manière générale, parmi le très grand groupe des invertébrés omniprésents dans les roselières, tant dans l'espace aquatique qu'aérien, il est possible d'observer des larves d'odonates, d'éphémères, de trichoptères,... De même, à l'état adulte, de nombreux coléoptères aquatiques, des spongiaires, des crustacés, des arachnides,... qui ne sont pas forcément inféodées aux roselières, fréquentent néanmoins abondamment ce type de milieu. Mais, la densité et le nombre d'espèce augmentent avec le nombre de micro-habitat et leur surface.

En revanche, la partie aérienne est plus pauvre en invertébrés, seules les insectes volant et les parasites occupent l'espace²¹.

Concernant plus particulièrement le groupe des odonates, aucune espèce n'est strictement et exclusivement inféodée à la roselière lacustre. Néanmoins cette végétation hélophytique contribue largement à la diversification du peuplement. Cet habitat et ses lisières sont en effet abondamment fréquentés par les imagos pour la chasse d'autres invertébrés mais aussi pour la ponte et le développement des larves dans la litière et les sédiments.

Pour la majorité des espèces, il faut plusieurs semaines (entre 2 et 9 suivant l'espèce) pour voir éclore les œufs (dans l'hypothèse où il n'y a pas de diapause hivernale). Les larves sont très mobiles et peuvent s'enfouir dans les sédiments ou la matière organique pour résister à des périodes d'assez prolongées.

Sur le Lac d'Annecy, il n'y a pas de données détaillées et récentes concernant les roselières. Les données ci-dessous ont été transmises par ASTERS et concernent le Bout du Lac (partie roselière). Elles ont été récoltées entre 1987 et 1999.

Les espèces suivantes ont été observées :

- *Ischnura elegans*
- *Coenagrion puella*
- *Gomphus vulgatissimus*,
- *Onychogomphus forcipatus forcipatus*,
- *Gomphidae sp.*
- *Aeshna cyanea*,
- *Aeshna sp.*
- *Anax imperator*
- *Cordulia aenea*
- *Libellula fulva*
- *Libellula quadrimaculata*
- *Orthetrum cancellatum*

Aucune de ces espèces n'est rare tant à l'échelon nationale qu'à l'échelle régionale.

Précisons qu'il est quasiment certain que la diversité soit en réalité plus importante sur les roselières du Lac d'Annecy.

²¹ ONC : Le roseau; 1ère partie; Bull. Mens. de l'ONC N°105 septembre 1986; Environnement Participation Aménagement, Vincent SCHRICKE, ONC, CNERA,

5 PEUPLEMENT PISCICOLE DU LAC D'ANNECY

5.1 Données de cadrage disponibles

Le tableau ci après présente l'évolution du peuplement et les espèces recensées dans le cadre des investigations piscicoles mises en œuvre sur le Lac d'Annecy²².

Espèce	1868	1928	1931	1983	2007
Anguille	x		1		
Loche franche	x		1		
Blennie				10	11
Chabot	x		1		10
Ablette			2	10	9
Brème			1	6	
Brème bordelière		x		10	
Carpe	x		1	8	
Goujon			1	7	4
Chevesne	x		1		12
Vandoise					11
Vairon	x		1		
Gardon	x	x	3	1	2
Blageon	x		1		
Tanche	x		1	4	8
Brochet				8	5
Lote	x		3	9	12
Perche	x		3	2	1

²² ONEMA, 2007. Echantillonnage du peuplement piscicole du Lac d'Annecy – Application du protocole EN 14757

Corégone		x	2	3	3
Truite	x		2	10	
Ombre Chevalier		x	4	5	7

Les échantillonnages ont été menés selon des méthodes de pêche au filet, et fournissent donc une image du peuplement global du Lac, espèces littorales comme pélagiques confondues. Une étude piscicole complémentaire portant sur la zone littorale²³ a permis de cibler les habitats comme le peuplement piscicole présents sur cette zone non investiguée spécifiquement jusqu'alors.

Précisons qu'un nouvel échantillonnage réalisé en octobre 2010, selon la même méthodologie, a également mis en évidence la présence de la truite et du rotengle.²⁴

5.2 Caractéristiques et répartition du peuplement piscicole en zone littorale

Dans le cadre de cette étude, des pêches électriques ont été menées sur différents habitats de berge et permettent d'apprécier assez finement la répartition spatiale des espèces en présence. Précisons néanmoins que dans la mesure où les échantillonnages n'ont été réalisés qu'une seule fois au printemps (fin avril 2009), ces investigations ne sont pas le reflet de la fréquentation piscicole de la zone littorale de façon absolue.

Seuls les points structurants sont repris dans le présent paragraphe mais cette étude constitue une référence documentaire particulièrement adaptée à cette thématique.

Comme le montre le tableau ci-dessous, les espèces dominantes en zone littorale (lors des investigations d'avril 2009) sont la Blennie, le Gardon et la Perche.

Espèces Code	Effectifs			Densités (ind./1000m ²)		
	Grand lac	Petit lac	Total	Grand lac	Petit lac	Total
BLE	36	49	85	110,78	134,06	123,1
BRO	1	1	2	3,08	2,74	2,9
CHA		2	2		5,47	2,9
CHE		1	1		2,74	1,4
GAR	29	16	45	89,24	43,77	65,2
GOU	2		2	6,15		2,9
LOF		1	1		2,74	1,4
LOT		3	3		8,21	4,3
PER	31	32	63	95,40	87,55	91,2
PFL		2	2		5,47	2,9
TAN	13	1	14	40,00	2,74	20,3
TRF	7	16	23	21,54	43,77	33,3
Diversité	7	11 – 1 (pfl)	12			
Total	119	124	243	366,2	339,2	351,9

figure 1 Résultats bruts lors de l'échantillonnage de la zone littorale du Lac d'Annecy

BLE : Blennie, **BRO** : Brochet, **CHA** : Chabot, **CHE** : Chevesne, **GAR** : Gardon, **GOU** : Goujon, **LOF** : Loche franche, **LOT** : Lote, **PER** : Perche, **PFL** : Ecrevisse de Californie, **TAN** : Tanche, **TRF** : Truite fario.

²³ ONEMA, 2010. Echantillonnage de la faune pisciaire de la zone littorale du Lac d'Annecy – Campagne d'avril mai 2009.

²⁴ ONEMA, novembre 2010. Echantillonnage du peuplement piscicole du lac d'Annecy Réseau de Contrôle de surveillance (Année 2010) : Eléments d'analyse Rapport d'étape - version provisoire,

La Blennie affectionne ce secteur rivulaire où elle peut accomplir la totalité de son cycle biologique, notamment car il abrite son habitat de prédilection : les supports minéraux. Elle revêt de plus un caractère patrimonial de par son statut d'espèce protégée.

Le Gardon et la Perche sont deux espèces réparties à plus large échelle sur le Lac d'Annecy. A l'inverse de la Blennie, elles présentent une grande plasticité habitationnelle, peuvent se reproduire sur différents types de supports présents également dans des zones plus profondes du Lac (de type hydrophytes, tapis de Characées...). Elles ne sont pas électives de la seule frange littorale et peuvent occuper différentes strates lacustres au gré de leur régime alimentaire.

Enfin, la présence de jeunes individus de Truite est relativement inattendue et jusqu'alors méconnue des gestionnaires et des pêcheurs.

Enfin, la répartition verticale de ces espèces constitue un dernier élément structurant dans le cadre de cette problématique.

De manière plus ciblée pour ce qui concerne l'habitat roselière, l'étude de 2010 a permis de contacter trois espèces au sein de ce milieu : La Perche, le Gardon et la Blennie mais en faibles effectifs.

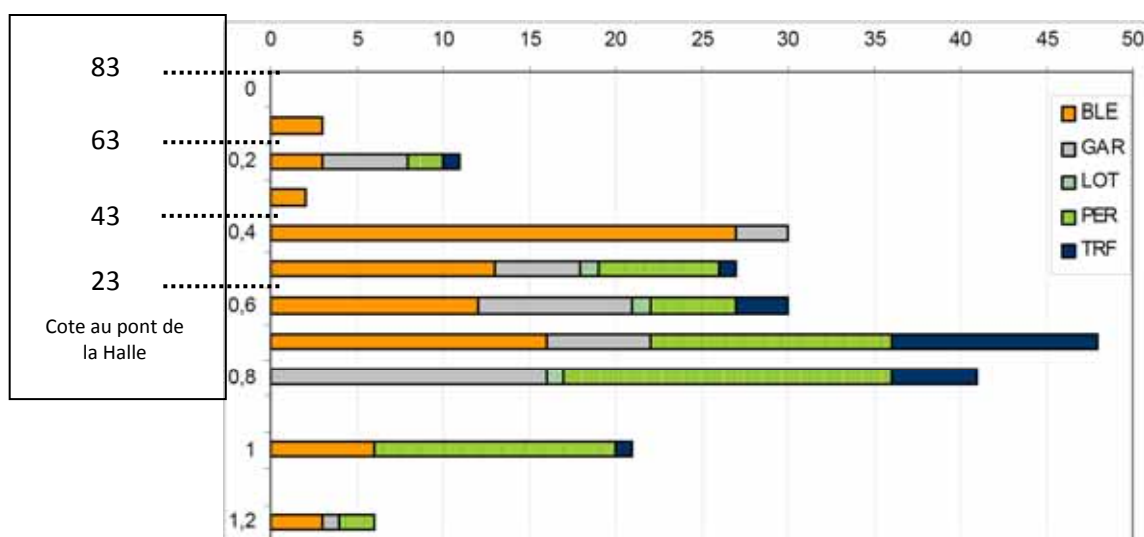


figure 2 Distribution verticale des captures réalisées sur la zone littorale prospectée du Lac d'Annecy

Cette figure révèle une certaine hétérogénéité de l'occupation de cette zone littorale au printemps :

- Les strates les plus occupées se situent entre 0,4 et 0,8 m de profondeur, profondeur calculée par rapport à la cote 447 (IGN 69 ou 446,72NGF) qui était la cote observée durant les investigations de fin avril 2009. Rappelons que cette cote de 447 IGN69 correspond à la cote 83 cm à l'échelle du pont de la Halle.

- une relative désaffection de la frange rivulaire (0 - 30 cm), au profit des strates inférieures. L'influence de la houle courante et/ou du batillage pourrait l'expliquer.

5.3 Groupes d'espèces potentiellement influencées

Même si l'étude réalisée par l'ONEMA en 2009 n'est qu'une image du peuplement à une seule période de l'année, qui plus est peu fréquentée, des éléments intéressants peuvent néanmoins être exploités.

Ainsi, lorsque l'on associe le peuplement piscicole global du Lac d'Annecy et celui observé lors des investigations piscicoles menées en zone littorale, un certain nombre d'espèces sont potentiellement influencées par cette problématique de marnage : toutes celles qui ont été rencontrées en zone littorale d'une part, mais aussi celles qui accomplissent une partie de leur cycle biologique en berge.

Des regroupements d'espèces présentant des comportements semblables peuvent être réalisés :

- Les espèces lithophiles de bordure : Chabot, Blennie fluviatile, Goujon, Lotte ;
- Les espèces présentant des juvéniles en berge : Perche, Gardon, Truite
- Les espèces qui se nourrissent, tout au moins partiellement, en berge : Carpe, Tanche, Brème ;
- Les espèces qui rejoignent la berge pour se reproduire : le Corégone, et la Truite pour accéder aux affluents, ainsi que potentiellement le brochet.

Précisons déjà à ce stade que les scénarii décrits dans la suite n'auront qu'un faible impact négatif sur l'ichtyofaune. En effet ils se caractérisent par des fluctuations saisonnières maximales de la cote du Lac d'Annecy de l'ordre de 35 à 40 cm autour de son niveau « moyen » - cote 74 cm. Sur le plan qualitatif, cette amplitude s'avère assez proche des variations enregistrées au début du XXème siècle dans un système déjà régulé.

Sur le plan quantitatif, la répartition verticale des captures en zone littorale (Cf. figure ci-dessus) constitue un élément structurant. En effet, la strate la plus rivulaire située entre 0 et 40 cm (cote 83 à 43 à l'échelle du pont de la Halle) se révèle peu attractive pour le peuplement piscicole du Lac d'Annecy. C'est pourtant principalement cette tranche d'eau qui est directement concernée par les exondations saisonnières envisagées.

6 DEFINITION DES SCENARII HYDROLOGIQUES ET EVALUATION DE LEUR FAISABILITE TECHNIQUE

On appelle ici scénario un profil d'évolution répété annuellement et qui décrit les niveaux du Lac au pas de temps mensuel. Ce pas de temps mensuel a été retenu eu égard à l'écologie du roseau pour lequel des pas de temps plus petits n'ont que très peu d'influence.

Suite aux éléments du module 1 et 3, trois scénarii hydrologiques différents ont été retenus pour simuler une amplification du marnage du Lac. Ils ont été choisis en accord avec le Maître d'ouvrage notamment en ce qui concerne les valeurs extrêmes.

Une modélisation du fonctionnement du lac a été calée à partir des éléments suivants, déterminés ou recensés lors du module 1 :

- le bilan hydrique actuel (cf. tableau 17) : apports entrants, précipitations, AEP,
- La courbe de capacité du lac (cf. figure 31)
- la courbe de tarage des émissaires du lac (cf. figure 30),

La faisabilité technique des trois scénarios retenus a été validée par la modélisation. Cette dernière a permis de confirmer que l'évolution mensuelle de la cote du lac proposée était réaliste en fonction des apports d'eau entrant et qu'un débit minimal était assuré au droit des émissaires du lac. Les débits mensuels du Thiou résultant de la modélisation seront présentés dans les paragraphes suivants pour chaque scénario retenu.

Rappelons à titre de comparaison avec les valeurs qui seront affichées ci-dessous que le marnage annuel du niveau Lac sur la dernière décennie (2001-2010), identifiée comme "sèche", a été calculé. Avec une valeur de 14 cm, il est supérieur au marnage de la période complète 1966-2010 qui est de 11 cm.

Comme évoqué ci-dessus vis-à-vis de l'écologie du roseau, chaque scénario propose des objectifs de niveau à tenir en moyenne mensuelle. Cependant dans les faits et dans l'hypothèse d'une phase opérationnelle, des variations sur quelques jours seront bien évidemment possibles, par rapport aux autres contraintes spécifiques liées à la régulation du lac (prévention des inondations notamment).

6.1 Scénario n°1 - type « conditions privilégiées pour le roseau »

Il s'agit d'un régime hydraulique regroupant les conditions favorables pour le roseau telles qu'évoquées dans le paragraphe précédent. Pour cela, les caractéristiques suivantes ont été retenues :

- Hiver relativement haut (cote 105 à l'échelle soit environ 447,22 en IGN 69),
- Descente progressive à partir de mai pour accompagner le démarrage de la croissance des roseaux,
- Stabilisation à un niveau « bas » (entre la cote 60 et la cote 40 soit entre 446,77 et 446,57)²⁵ pendant la première quinzaine de juin pour favoriser la sortie des nouvelles pousses de roseaux de l'eau,
- Augmentation jusqu'à un niveau moyen sur juillet/août (cote 70 soit 446,87 en IGN 69),
- Diminution puis stabilisation sur septembre-octobre (cote 40) pour permettre notamment la minéralisation des sédiments exondés,
- Retour progressif à un niveau haut en fin d'automne/début hiver (cote 105).

Le marnage moyen annuel pour ce scénario est de 65 cm

²⁵ Cette cote correspond à la cote d'étiage observée 31 octobre 2009 sur le Lac.

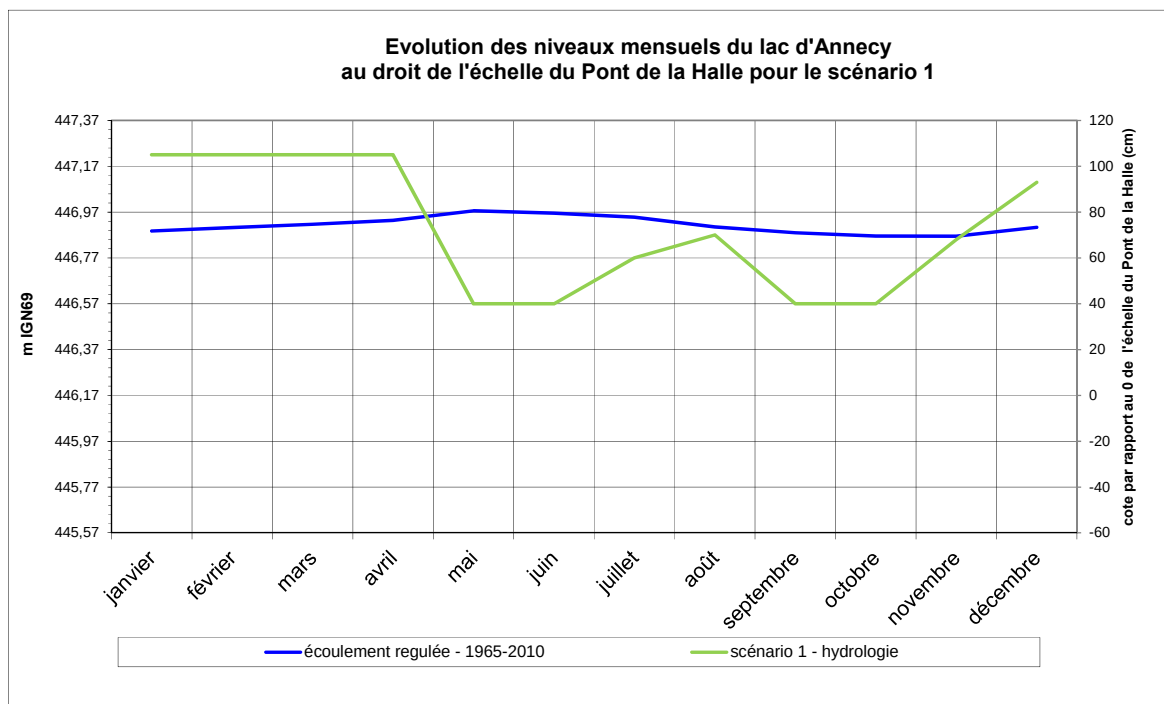


figure 3 Chronique mensuelle des niveaux du Lac dans le cas du scénario 1

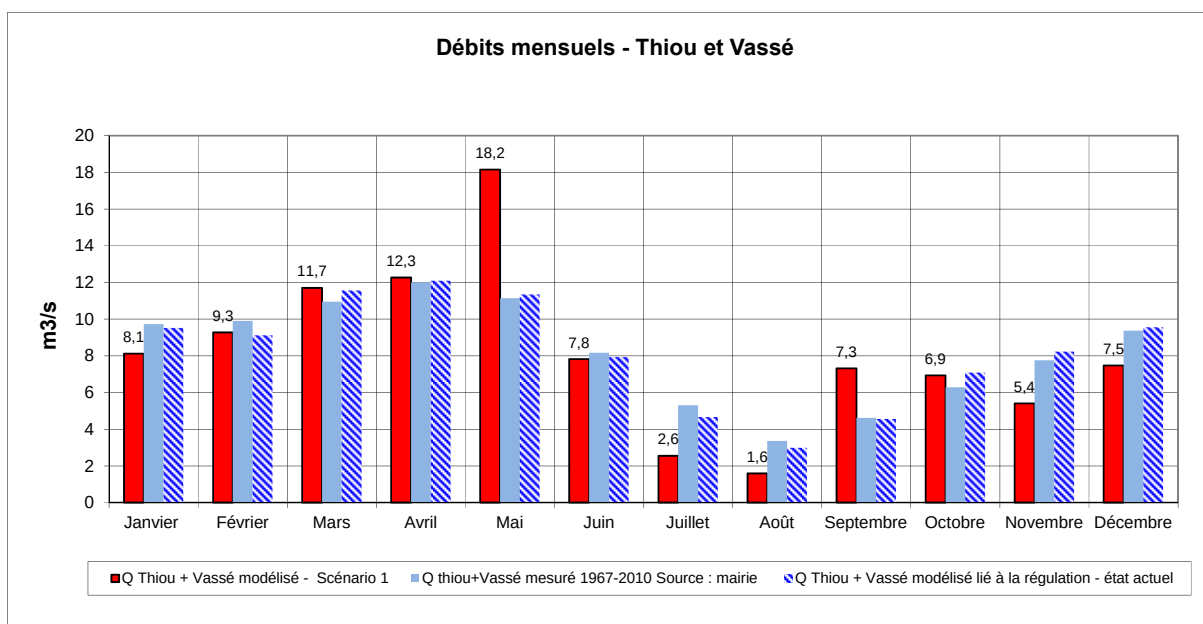


figure 4 Chronique mensuelle du débit du Thiou + Vassé dans le cas du scénario 1

La figure 4 compare les débits mensuels du Thiou (+ Vassé) mesurés par les services techniques de la mairie d'Annecy et les débits mensuels modélisés avec pour hypothèses de régulation de la cote du lac le scénario 1 et les conditions actuelles. Les débits modélisés avec la régulation actuelle sont très proches des débits mesurés ce qui confirme la fiabilité de la modélisation. Comme le montre ce graphe, le scénario 1 induit pour le Thiou un débit minimal mensuel de l'ordre 1,6 m³/s en période d'étiage (août).

6.2 Scénario n°2 - type évolution « régime naturel » appliquée aux conditions actuelles

Il s'agit d'un scénario dont la courbe modélisée en « écoulement libre »²⁶ au cours du module 1 est conservée, mais est transposée au niveau moyen contemporain du Lac, c'est-à-dire autour de la cote 74 (altitude 446,91 IGN69) qui correspond à la cote moyenne observée sur la période 1965-2010.

- Fin d'hiver relativement haut (cote 93 à l'échelle soit environ 447,11 en IGN 69),
- Descente très progressive à partir de fin mai,
- Stabilisation à un niveau « bas » (entre la cote 47 et 43 à l'échelle soit entre 446,64 et 446,6) pendant août et septembre,
- Retour progressif à un niveau haut de 447,01 (84 cm à l'échelle) en fin d'année.

Nous faisons apparaître ci-dessous le graphe illustrant ce scénario d'évolution ainsi que le débit du Thiou modélisé dans ces conditions.

Le marnage moyen annuel pour ce scénario est de 50 cm.

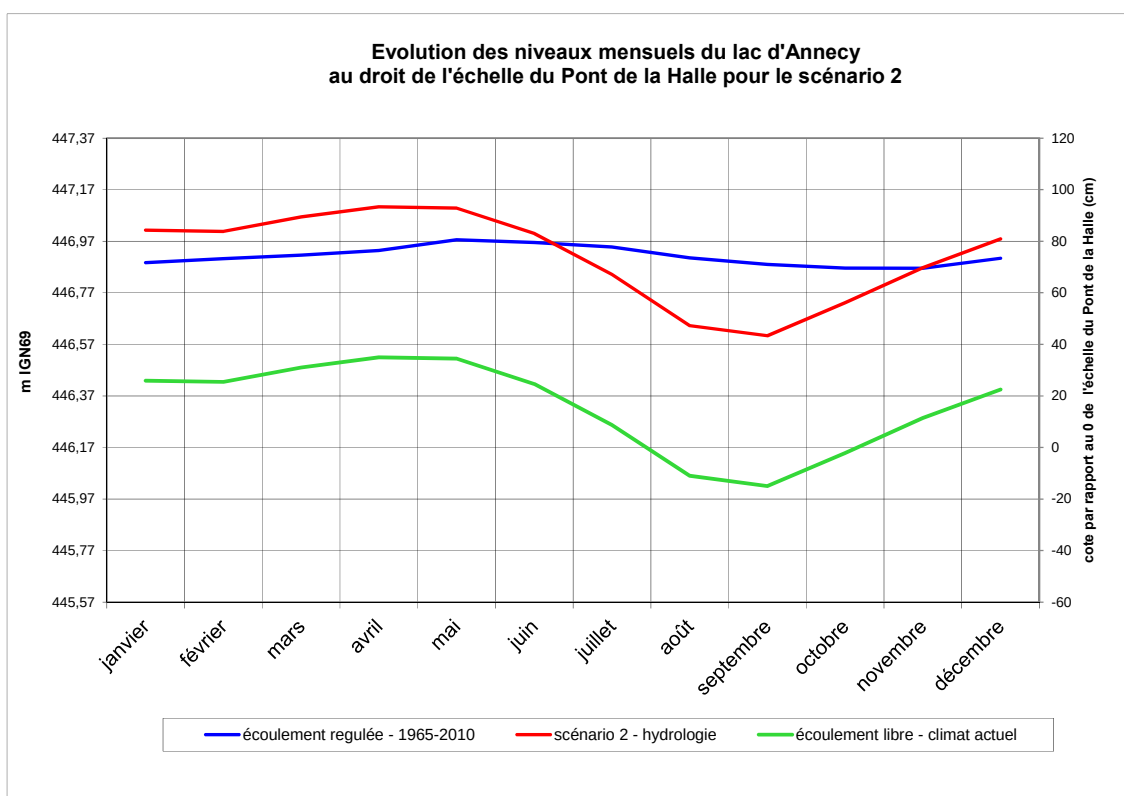


figure 5 Chronique annuelle des niveaux du Lac dans le cas du scénario 2

²⁶ Nous entendons ici « écoulement libre » écoulement en mettant les vannes du Thiou l'horizontal ce qui correspond à la cote -75 cm à l'échelle du Pont de la Halle (445,42 IGN 69). Notons que même en écoulement libre, l'écoulement du Lac est influencé par la section utile du chenal qui a été semble-t-il modifiée par les travaux de 1870.

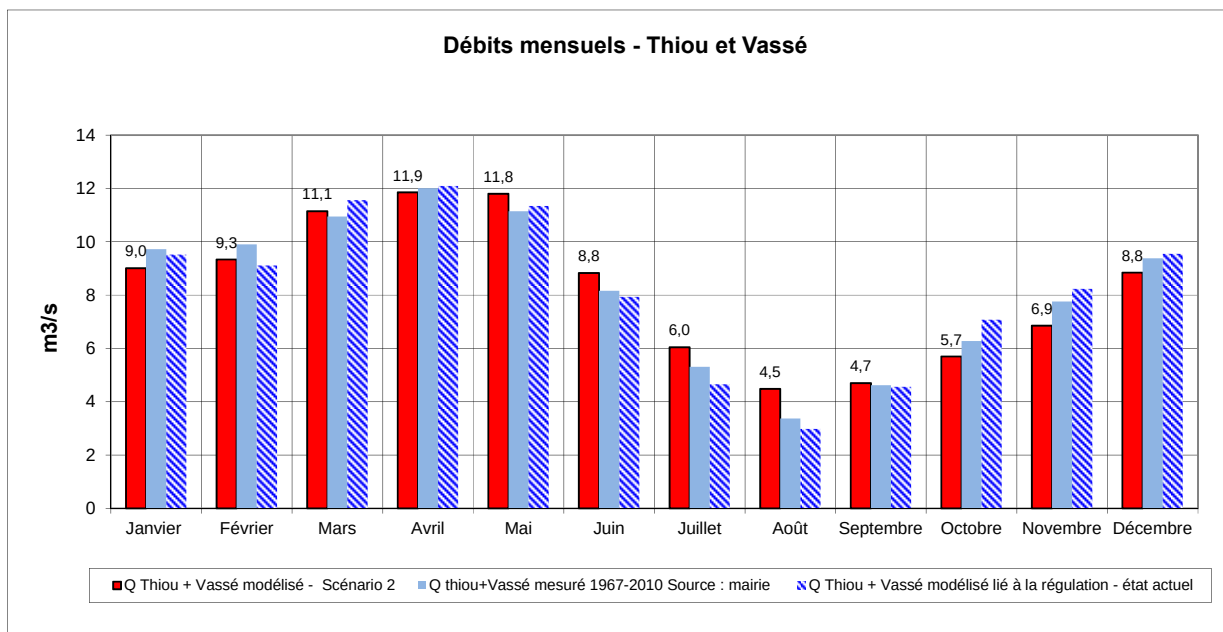


figure 6 Chronique mensuelle du débit du Thiou+ Vassé dans le cas du scénario 2

6.3 Scénario n°3 construit à partir de la courbe de niveaux simulée à l'horizon 2050 mais appliquée (en partie) aux conditions de régulation et climatiques actuelles

Il s'agit d'un scénario tenant compte partiellement de la courbe simulée à l'horizon 2050 dans la fin du module 1, mais transposée aux conditions de régulation actuelles ainsi qu'aux conditions climatiques actuelles.

Les niveaux simulés à l'horizon 2050 dans le module 1 font apparaître notamment :

- Un hiver à niveau moyen dans le but de prévenir les inondations comme aujourd'hui (cote 70 soit 446,87 en IGN 69),
- Un stockage en fin de printemps le plus long possible pour anticiper la sécheresse estivale (cote 90 soit 447,07 IGN 69),
- Une diminution significative jusqu'en juillet-août, comparable à l'épisode de 2003,
- Une augmentation dès que possible en fin d'été pour retrouver un niveau moyen à l'automne.

Le marnage moyen pour ce scénario est de 74 cm.

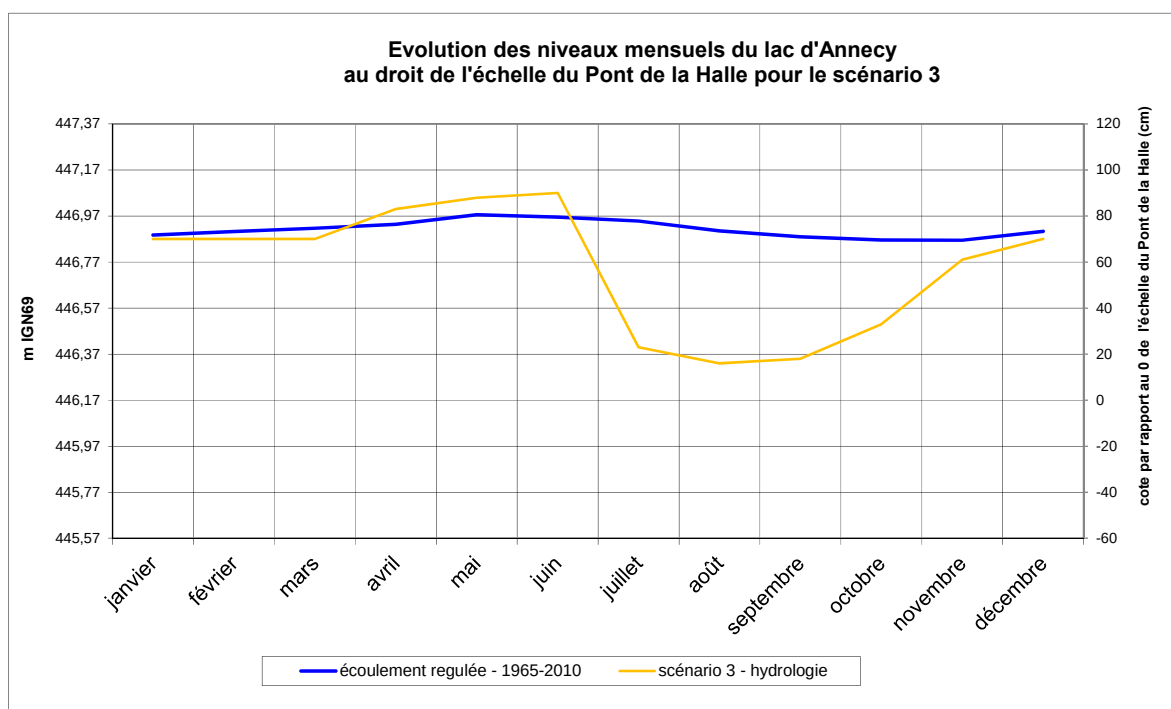


figure 7 Chronique annuelle des niveaux du Lac dans le cas du scénario 3

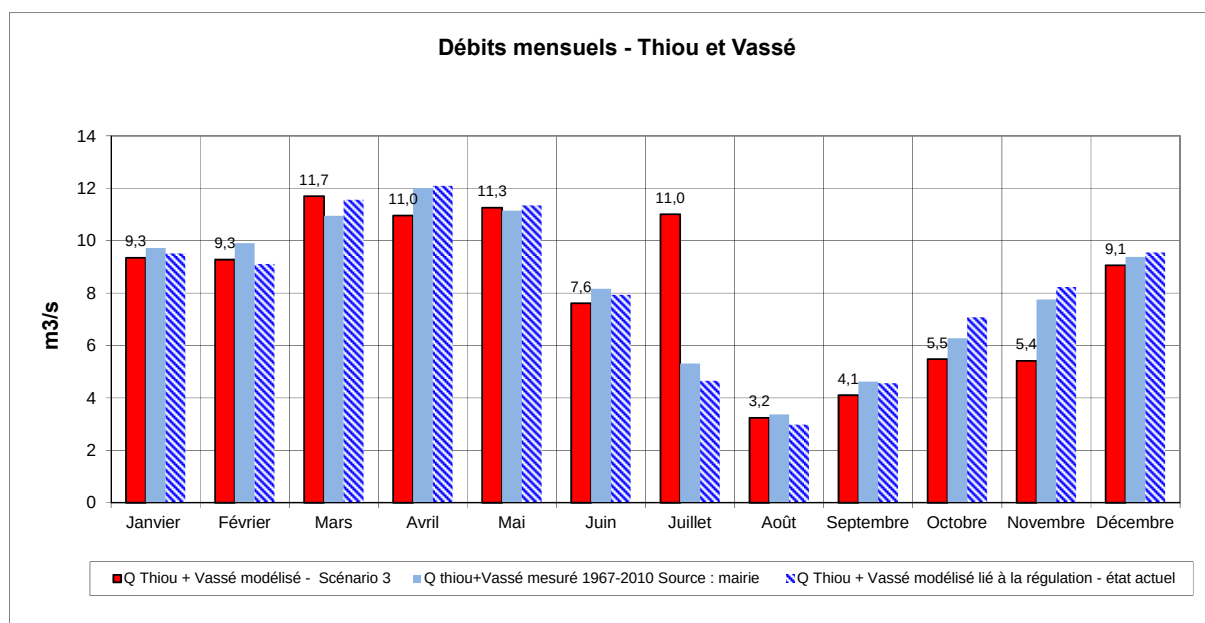


figure 8 Chronique mensuelle du débit du Thiou + Vassé dans le cas du scénario 3

6.4 Tableau de synthèse des trois scénarii

Nous faisons figurer à la suite les valeurs des moyennes mensuelles pour les trois scénarii évoqués dans les paragraphes précédents.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
écoulement libre - climat actuel	446,43	446,42	446,48	446,52	446,51	446,42	446,26	446,06	446,02	446,15	446,28	446,40	446,33
écoulement régulée - 1965-2010	446,89	446,90	446,92	446,93	446,98	446,96	446,95	446,91	446,88	446,87	446,87	446,90	446,91
scénario 1 - hydrologie	447,22	447,22	447,22	447,22	446,57	446,57	446,77	446,87	446,57	446,57	446,85	447,10	446,90
scénario 2 - hydrologie	447,01	447,01	447,06	447,10	447,10	447,00	446,84	446,64	446,60	446,73	446,87	446,98	446,91
scénario 3 - hydrologie	446,87	446,87	446,87	447,00	447,05	447,07	446,40	446,33	446,35	446,50	446,78	446,87	446,75
moyenne -écoulement libre - climat actuel	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33	446,33
moyenne - climat actuel	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91	446,91

7 LES IMPACTS ENVISAGES

Ils sont traités vis-à-vis de :

- la végétation hélophytique en particulier les phragmites,
- de la faune en particulier celle dont certaines espèces sont en relation avec les zones littorales du Lac à une période de leur cycle biologique à savoir : l'ichtyofaune, l'avifaune, les odonates et le Castor.

Pour chacun des scénarii envisagés une cartographie des niveaux extrêmes est présentée faisant apparaître les surfaces exondées et inondées concernées.

Précisons que vis-à-vis de la qualité physico-chimique de l'eau, nous pouvons déjà préciser que quelque que soit le scénario envisagé, les impacts seront quasi nuls ou tout du moins négligeables à l'échelle du Lac et cela au vu de sa masse d'eau (volume de l'ordre de 10^9 m³) et des zones concernées par le marnage (secteurs d'interface terre-eau).

7.1 Scénario 1

7.1.1 La roselière aquatique

Comme évoqué précédemment, par construction, il s'agit du scénario hydrologique le plus favorable vis-à-vis des besoins des roselières aquatiques. L'impact écologique à ce niveau, du moins en l'état des connaissances actuelles de l'espèce est clairement considéré comme positif puisqu'en appliquant ce schéma de régulation, on traite l'une des causes principales de dégradation des roselières aquatiques mentionnée abondamment dans la littérature.

Néanmoins, il est important d'être particulièrement prudent quant à la vitesse de réponse de cet habitat (et cela quel que soit le scénario) qui est rarement inférieur à quatre ou cinq années mais dont l'inertie peut être plus élevée en fonction notamment de l'état de dégradation des roselières²⁷. Or, il s'avère que sur Annecy, cet état de dégradation est relativement et localement bien avancé (mitage important, densité faible des roseaux, ...). Ainsi dans les faits, il faut avoir à l'esprit que même en rétablissant les conditions relativement favorables du point de vue hydrologique avec le marnage, le temps de réaction reste difficilement quantifiable et demeure très certainement hétérogène d'un secteur à un autre.

En outre et comme nous l'avons mentionné dans le module 2, il faut bien convenir également du manquement généralisé de retour d'expérience sur ce type de problématique. En effet, si la plupart des grands lacs possédant historiquement des roselières aquatiques ont vu une régulation des niveaux s'installer au cours des années, aucun n'a fait l'objet d'un véritable « retour en arrière » en termes de rétablissement de marnage basé sur les besoins de cet habitat.

Cette réelle absence interroge donc à juste titre quant à la réversibilité de cette dégradation (et notamment la vitesse) même si de fortes suspicions existent, suspicions qui sont basées sur des observations d'autres situations ponctuelles où des recolonisations d'espaces par la phragmite aquatique ont pu être observées.

²⁷ G. Blake- 2011 – Communication personnelle

Ainsi dans le cas présent, et comme le précise le § 1, ce scénario comporte trois périodes propices à la phragmitaie aquatique à savoir :

- Deux périodes de « basses eaux » :

- une en fin de printemps qui favorisera la sortie de l'eau rapide des nouvelles pousses, (mentionnons qu'actuellement cette période correspond à la période de haute eaux du Lac – observations 1965 - 2010 illustrée par la courbe bleue des graphes du § 6 de ce module),
- une en fin d'été qui permettra une oxydation des couches superficielles des sédiments nécessaire au processus de minéralisation débouchant à la remise en circulation des nutriments²⁸.

- Une période de « hautes eaux » durant l'hiver qui permettra d'une part un élargissement de la surface de dissipation énergétique des vagues (origine houle et/ou batillage) et d'autre part une dispersion des flottants et de la matière organique en arrière de la roselière (élimination du cordon parfois présent, reconnexion locale entre roselière terrestre et aquatique).

Nous faisons figurer ci-dessous les valeurs de roselières exondées et inondées pour les cotes extrêmes de ce scénario.²⁹

Cote haute (IGN 69) 447,22 soit 105 cm à l'échelle du Pont de la Halle	Secteurs	Surfaces totales inondées (m²)	Surfaces de roselières terrestres inondées (m²)	Autres surfaces (boisement...) (m²)
	Marais de l'Enfer	≥ 13103	13103	(données topo non disponibles)
	Sentier des roselières	7671	5463	2208
	Bout du Lac	12201	12201	-

Cote basse (IGN 69) 446,57 soit 40 cm à l'échelle du Pont de la Halle	Secteurs	Surfaces totales exondées (m²)	Surfaces exondées actuellement végétalisées (m²)	Surfaces exondées actuellement non végétalisées (m²)	Taux d'occupation par la végétation à la cote considérée (%)	Proportion de roselière aquatique exondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
	Marais de l'Enfer	5343	2617	2726	49	9,7
	Sentier des roselières	4100	2334	1766	56,9	11
	Bout du Lac	1938	1023	915	52,7	10,3

Valeurs de surfaces inondées et exondées pour le Scénario 1

²⁸ Ajoutons que les résultats d'analyses de sédiments effectués en 2009 au sein des roselières ne montrent pas des valeurs très élevées de Carbone organique

²⁹ Ces surfaces ont été calculées grâce au Modèle Numérique de Terrain réalisé lors du Module 3

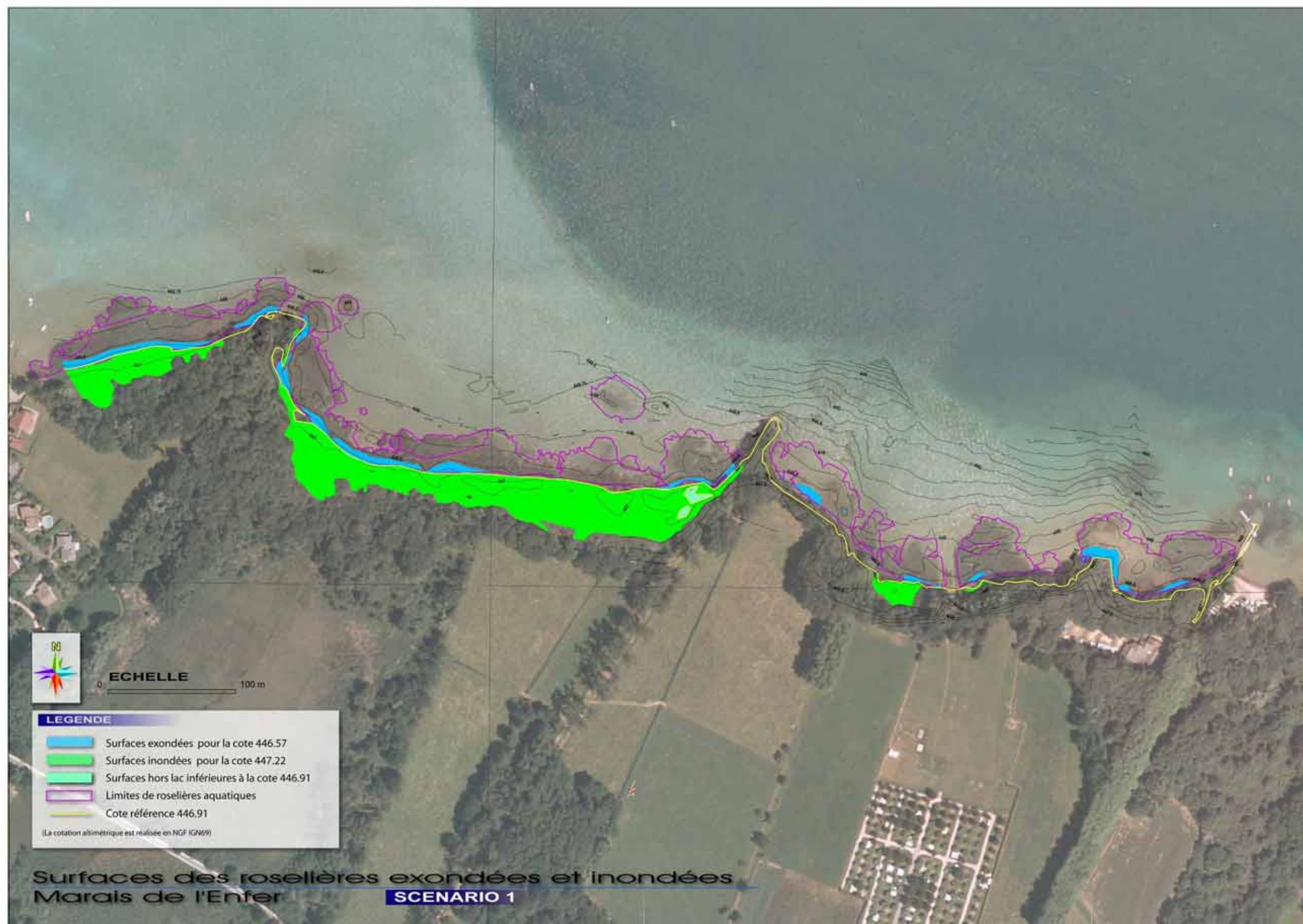


figure 9 Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 1

figure 10 Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 1



figure 11 Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 1



L'application de ce scénario de manière régulière sur le Lac (c'est-à-dire de manière continue tous les ans) permettrait très probablement de gagner des surfaces de roselière aquatique (voire également de la Scirpaie lacustre à *Schoenoplectus lacustris*).

En effet, rappelons que comme le mentionne le module 3, la cote d'exondation maximale pour ce scénario (446,57 soit 40 cm à l'échelle du Pont de la Halle) s'inscrit dans la frange où des surfaces actuellement dénudées pourraient être colonisées : Pour nos trois secteurs (Marais de l'Enfer, sentier des roselières et Bout du Lac), la zone comprise entre la cote de référence 446,91 (74 cm) et cette cote de 446,57 contient en effet entre 9 et 11 % des roselières aquatiques de ces secteurs avec des taux d'occupation³⁰ pour cette dernière cote compris entre 49 % et 56,9 %.

Ainsi la stimulation de la roselière sur cette frange telle qu'évoquée au travers de ces périodes bénéfiques de hautes et basses eaux, laisse prévoir une augmentation potentielle de ces taux d'occupation (à terme jusqu'à 100 % ?).

En outre, il est important de faire observer que la zone d'influence d'un tel rétablissement est plus étendue que les simples surfaces exondées à la cote minimale. En particulier l'abaissement de la cote au début de la période de croissance favorisera les roselières en deçà de la cote 446,57 par une moindre colonne d'eau à franchir pour les pousses localisées plus au large et notamment dans la zone d'érosion.

Par ailleurs, une mise à disposition supplémentaire des nutriments assimilables par les rhizomes se fera également sentir plus au large avec des potentialités supérieures en termes de colonisation et densification. En fonction de cet enrichissement des sédiments du fait de leur exondation régulière quelques développements d'algues benthiques en automne pourraient d'ailleurs potentiellement être observés suite à la remise en eau de ces zones.

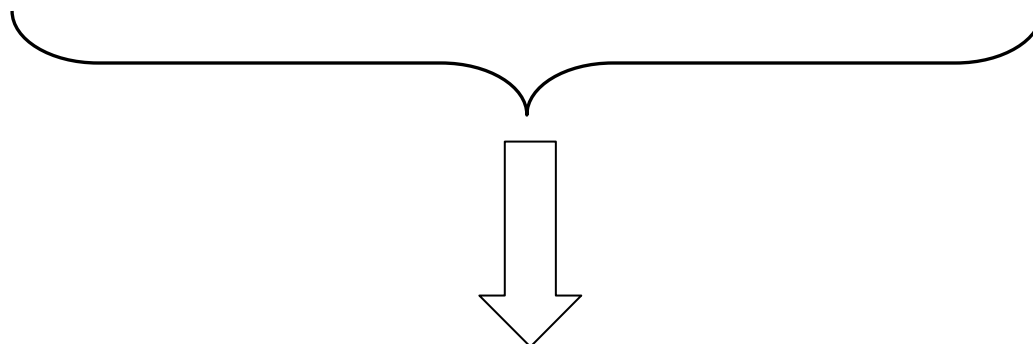
Pour la cote haute (447,22), la mise en eau de zones de roselières actuellement terrestres est importante notamment sur les Marais de l'Enfer et le Bout du Lac puisqu'elle serait respectivement supérieure à 1,3 ha et 1,2 ha.

Concernant les hydrophytes et en particulier les characées, leur quasi absence sur la bande de marnage envisagée (sur les trois secteurs étudiés), laisse présager un impact quasi nul du scénario.

In fine on peut conclure que vu la répartition des roselières sur les trois secteurs étudiés le scénario 1 devrait influencer de manière importante la qualité des roselières, ce que nous pouvons résumer via le tableau ci-dessous :

³⁰ Rapport entre la surface végétalisée exondée et la surface totale exondée

	Cote basse fin de printemps	Cote basse post estivale	Cote haute hivernale
Pour les surfaces exondées à la cote 446,57	Facilite et accélère le développement des pousses de l'année (zone d'accumulation)	Minéralisation des sédiments Remise à disposition des nutriments pour les rhizomes	
Pour les surfaces non exondées	Favorise la sortie des pousses de l'année car diminution de la colonne d'eau - Epargne les réserves des rhizomes (en zone d'accumulation et zone d'érosion)	Profit indirect mais significatif du fait du renforcement des rhizomes	
Pour les surfaces inondées à la cote 447,22			Distribution de la matière organique à l'arrière – atténuation de l'effet de marche entre les différentes roselières (Marais de l'Enfer et Bout du Lac)



Extension significative des roselières aquatiques : Augmentation des taux d'occupation (colonisation des surfaces dénudées –Développement et stimulation de la zone d'accumulation)
Extension vraisemblable vers le large (stimulation de la zone d'érosion)

A ce stade et pour finir, il est important de faire observer que les zones actuellement en cours de restauration et de mise en protection (pieux jointifs) répondront très certainement plus rapidement que les autres puisque le facteur « houle et batillage » (dont l'influence est accentué en raison de l'absence de marnage important) aura été résolu sur ces secteurs.

7.1.2 Les oiseaux

Ce scénario de par l'impact positif qu'il aura sur les roselières aquatiques (tant qualitativement que quantitativement) contribuera à termes à offrir à l'avifaune de plus grandes surfaces végétalisées en phragmitaie aquatique ce qui constitue un gain écologique pour cette classe de vertébrés en particulier pour certaines espèces spécialisées comme les rousseroles et certains anatidés

Par ailleurs de manière générale il est important de rappeler qu'au-delà du gain brut en termes d'habitats, une variation du niveau de l'eau au cours d'une période de plusieurs semaines (voire de

mois) favorise le développement d'une flore et d'une microfaune particulières constituant une des bases des chaînes alimentaires lacustres et qui est abondamment exploitée par l'avifaune.

Ainsi notamment la baisse des eaux printanière et post estivale pourrait par exemple favoriser au travers de l'exondation de petites surfaces la fréquentation de certains limicoles (devenus particulièrement occasionnels sur Annecy) ou ardéidés (hérons, aigrettes) en halte migratoire.

Concernant la baisse en période printanière, l'impact potentiel sur la nidification des espèces utilisant cet habitat (Foulque, Grèbe huppé, Rousserole effarvatte) sera faible. En effet, comme déjà évoqué, même pour la cote basse, il demeure des surfaces significatives de roselière en eau dont les conditions d'inondation conviendront à ces espèces qui disposeront donc de secteurs pour se reproduire (la majorité d'entre elles se reproduisent d'ailleurs assez peu près des berges – secteurs les premiers concernés par l'exondation printanière). En outre et c'est un point important à signaler, ces espèces ont la capacité de faire plusieurs couvées lors de l'été (jusqu'à 3 couvées par exemple pour certaines rousserolles).

7.1.3 Le castor

Rappelons que l'espèce fréquente le Lac du Nord au Sud.

Concernant la gestion des niveaux d'eau, nous pouvons d'ores et déjà écrire que eu égard à la relative plasticité de l'espèce ainsi qu'aux amplitudes considérées, l'impact ne sera pas négatif et cela quel que soit le scénario considéré.

Cette espèce semble en effet apte à supporter de grosses variations de niveaux d'eau. Ainsi par exemple et sans préjuger de l'état des populations, sur la Drac et la Dranse, de nombreux indices de présence (voire des individus) ont été observés sur des tronçons subissant d'importantes écluses pour la production d'énergie hydrauliques.³¹

Ainsi, la gestion hydraulique du Lac telle que prévue ici au travers des différents scénarii n'aura selon nous pas ou peu d'influence sur l'espèce dans la mesure où sa ressource alimentaire n'est pas affectée.

En revanche, en termes de gain d'habitat il paraît clair que toute augmentation des surfaces de l'habitat roselière aquatique jouant notamment le rôle de corridor biologique pour l'espèce ne peut lui être que favorable. A ce titre, ce scénario 1 théoriquement le plus bénéfique pour le développement de la phragmitaie aquatique induira donc à moyen terme un impact positif.

7.1.4 Les odonates

Comme évoqué précédemment, aucune espèce n'est exclusivement inféodée à la roselière aquatique. Néanmoins comme pour le Castor, une augmentation de l'habitat roselière telle que pressentie dans le cas de ce scénario, ne pourra qu'avoir un impact positif sur les populations d'odonates de par l'augmentation de la capacité d'accueil, de la ressource alimentaire pour les larves due à l'augmentation vraisemblable en biomasse des autres cortèges d'invertébrés,etc..

³¹ Observations L. Bourgoïn, Q. Dumoutier de SAGE Environnement

Signalons néanmoins que pour les espèces qui fréquentent ce type d'habitat pour pondre éventuellement sur des tiges, une exondation des œufs durant cette période provoquerait leur destruction. Ceci pourrait se produire éventuellement pour des espèces précoces (pour la baisse du printemps) et tardives pour la baisse post estivale.

Rappelons toutefois que la baisse de 30 cm envisagée durant les deux périodes basses ne concerne qu'une faible partie de roselière du côté « berge » au regard de celles qui resteraient en eau. Par ailleurs, les odonates pouvant utiliser les tiges comme support de ponte ne montrent pas de préférence particulière pour les zones proches du rivage. L'impact de la régulation paraît donc très faible voire nul et ne concerne aucune espèce en particulier puisqu'aucune n'est spécialisée sur les roselières.

Au bilan l'impact est bien positif pour cette classe d'invertébrés de par les nombreux bénéfices qu'offrira l'extension des roselières aquatiques.

Pour ce qui a trait aux invertébrés autres que les Odonates, il est important de faire remarquer que d'une manière générale, l'émersion des sédiments favorisant l'oxygénation de ceux-ci pendant la période activité des insectes (comme c'est le cas pour les trois scénarii envisagés ici) peut être bénéfique à la présence de certaines larves d'insectes exigeantes.

7.1.5 L'ichtyofaune

En termes de gain brut d'habitat lié à la roselière lacustre, ce scénario constitue un impact indubitablement positif puisque l'augmentation surfacique de cet habitat ne peut qu'augmenter l'offre faite aux espèces dont les alevins les fréquentent en tant que zones refuges et de nourrissage.

Au-delà de ce gain d'habitat dont l'intérêt est net, il convient de s'intéresser aux éventuelles conséquences négatives en termes de rétablissement marnage :

Influence sur les espèces lithophiles de bordure

De par sa faible amplitude (au regard de la colonne d'eau utilisée par la faune piscicole) et la frange rivulaire peu attractive qui sera concernée, l'influence du marnage sur ces espèces est considérablement réduite. L'abaissement envisagé pourra entraîner un « dérangement » nécessitant un déplacement de proche en proche vers une zone sensiblement plus profonde, un phénomène tout à fait commun en conditions non régulées et ne mettant pas en péril les populations considérées.

Influence sur les espèces se nourrissant en berge

Il en va de même pour les espèces s'alimentant en zone littorale. La zone de berge de faible profondeur ne représente qu'une partie de l'habitat de nourrissage, qui s'étend dans une gamme de profondeur supérieure à celle du marnage, généralement sur tout le plateau littoral.

Influence sur les juvéniles présents en berge

Les juvéniles de Gardon, de Perche et de Truite ne sont significativement présents en berge qu'en dessous de la cote 40, et ne seront donc pas affectés directement par le marnage dans le cas de ce scénario (il en est de même pour les deux autres scénarii). De plus, une évolution de la cote d'eau de quelques dizaines de centimètres à l'échelle saisonnière ne posera aucun problème à ces espèces à forte mobilité et plasticité habitationnelle.

Influence sur les espèces qui gagnent la berge peu profonde pour se reproduire

- Cas du Brochet

Les brochets ne recherchent pas de manière exclusive certaines espèces de végétaux pour leur fraie. Leurs œufs peuvent être observés sur toutes sortes de plantes : Elodées, Myriophylle, Fontinale, Hippuris, Carex, Phragmite et diverses autres graminées³². En l'état des connaissances sur le Lac d'Annecy, rien ne permet de conclure quant à la fréquentation plus ou moins prononcée des roselières pour la reproduction. Il est en fait vraisemblable que l'espèce puisse les utiliser tout comme le sont les hydrophytes immergées plus au large sur la berge comme tend à le montrer une étude récente sur le Lac du Bourget pour lequel la reproduction semble se faire majoritairement dans des zones plus profondes (4 à 8m) au sein notamment de tapis de characées.³³

L'augmentation des surfaces de roselière remplaçant des endroits actuellement dépourvus de végétation offrira donc potentiellement un habitat qui pourrait être utilisé par l'espèce (il sera en tous cas plus favorable que les zones dénudées).

Par ailleurs, comme nous l'avons déjà évoqué pour la végétation, l'augmentation des niveaux d'eau en hiver envisagée dans ce scénario 1 avec une trentaine de cm au-dessus du niveau moyen observé ces dernières années (446,91) mettra en eau des surfaces significatives de roselières actuellement terrestres. Ceci concerne notamment les Marais de l'Enfer voire Bout du Lac à termes où la connectivité avec le Lac pourrait être localement rendue effective. Même si la lame d'eau demeurera très faible sur ces secteurs, on ne peut exclure localement que quelques individus soient susceptibles de venir frayer.

- Cas du Corégone et de la Truite fario

Le Corégone, et dans une moindre mesure la Truite, sont les deux seules espèces sur lesquelles la baisse du niveau des eaux pourrait avoir une incidence, car leur phase de reproduction pourrait être affectée directement (Corégone) ou indirectement (Truite).

En effet, le Corégone se reproduit dans des zones de faible profondeur (généralement inférieure à 1 m d'eau), sur des substrats sablo-graveleux, de décembre à janvier. La durée d'incubation est de l'ordre de six semaines (et fonction de la température de l'eau) et les premières larves mobiles sont généralement rencontrées début mars et ce jusqu'à mi avril minimum³⁴. Cette phase hivernale de développement des œufs avant émergence des larves (qui sont alors mobiles et peuvent suivre les fluctuations de niveau) s'avère donc particulièrement sensible, notamment dans le cadre de la présente problématique de marnage. Une exondation significative de la zone littorale durant cette période réduirait considérablement la réussite de la reproduction de cette espèce. Or le scénario 1 ne prévoit pas de phase d'abaissement durant la période sensible qui couvre la reproduction suivie de l'incubation des œufs. L'impact à ce niveau est donc nul. En effet, de décembre à la fin du

³² GILLET C., 1989. Le déroulement de la fraie des principaux poissons lacustres. Hydroécol. Appl (1989). pp.117-143.

³³ S. Cachera & J. Schneiner, 2005. Etude spatio-temporelle de la reproduction du brochet (*Esox lucius*) dans le Lac du Bourget. CISALB & AAPPMA du Lac d'Aiguebelette.

³⁴ CRETENOT L. et GERDEAUX D., 1996. Croissance et alimentation des larves de Corégone (*Coregonus lavaretus*) dans le Lac d'Annecy de mars à avril 1996. Bull. FT. Pêche Piscic. (1997) 346 : 519-526

printemps le niveau sera maintenu à cote haute – cote 105 puis commencera descendre début avril. Rappelons que la cote moyenne du Lac au cours de ces dernières années est de 446,91 et que les zones de reproduction de cette espèce se localisent donc majoritairement au-dessous de cette cote, cote qui sera atteinte aux environs de début mai.

Précisons même que dans notre cas, la cote 105 cm envisagée durant la période de reproduction pourrait même conduire éventuellement à une augmentation des sites de fraie puisque certains secteurs propices à l'espèce comme les plages de Saint Jorioz et Sévrier seraient partiellement mis en eau.

La Truite quant à elle, gagne les affluents pour trouver des zones favorables à sa reproduction. Cette phase de migration couvre tout l'automne et le début de l'hiver, et survient fréquemment au profit d'un coup d'eau. Le scénario 1 implique une cote basse du Lac durant la fin de l'été avec une remontée amorcée en début d'automne. Il interroge donc quant à un éventuel effet de « marche » au niveau des zones de confluence durant l'automne. En effet, en fonction des configurations morphodynamiques des confluences (Laudon, Ire, Eau morte, Bornette...), de la présence/absence de cônes de déjection, un abaissement du Lac pourrait faire affleurer des plages de dépôt et constituer des radiers potentiellement moins franchissables pour cette espèce. Cette moindre connectivité pourrait alors constituer un facteur limitant (ou retardant) la remontée de ces géniteurs.

En l'état, pour ce scénario et même si le risque de synchronisme entre période d'éventuelle exondation des confluences et début de remontée des poissons demeure faible, de notre point de vue, il serait opportun de mettre en œuvre une évaluation de la connectivité de ces zones qui sont utilisées par l'espèce. Ceci permettrait de qualifier cet éventuel risque de déconnexion pour les cotes post estivales et automnales dont la cote la plus basse est la cote 40 cm à l'échelle du Pont de la Halle.

7.1.6 Les sédiments

Cet aspect concerne les sédiments actuellement inondés en permanence et qui seront par la suite exondés périodiquement tous les ans. Comme nous l'avons évoqué dans le § 1.4.1.b ainsi que dans le § 7.1.1 ci-dessus, une émergence en fin d'été notamment de par les phénomènes d'oxydation induits par l'oxygénation (qui déclenche les processus de décomposition bactérienne si la température est suffisante), favorise la minéralisation de la matière organique et la remise à disposition de nutriments assimilables (Phosphore et Azote notamment) par les rhizomes notamment au niveau de la zone d'accumulation.

Il en résulte logiquement un confortement de la roselière voire une expansion si ces phénomènes sont enclenchés régulièrement et sur une période suffisamment longue.

Le scénario 1 rentre dans ce cadre et donc nous pouvons dire que du point de vue des roselières, la qualité physico-chimique des sédiments sur les parties exondées seront de meilleure qualité.

7.2 Scénario 2

Rappelons qu'il s'agit d'un scénario dont la courbe modélisée en « écoulement libre » au cours du module 1 est conservée, mais est transposée au niveau moyen contemporain du Lac c'est-à-dire autour de la cote 74 (altitude 446,91 IGN69) qui correspond à la cote moyenne observée sur la période 1965-2010.

7.2.1 La végétation

Nous faisons figurer ci-dessous les valeurs de roselières exondées et inondées pour les cotes extrêmes de ce scénario.

Cote haute (IGN 69) 447,10 soit 93 cm à l'échelle du Pont de la Halle	Secteurs	Surfaces totales inondées (m²)	Surfaces de roselières terrestres inondées (m²)	Autres surfaces (boisement, ...) (m²)
	Marais de l'Enfer	12114	9684	2430
	Sentier des roselières	5215	4014	1201
	Bout du Lac	10639	10639	-

Cote basse (IGN 69) 446,60 soit 43 cm à l'échelle du Pont de la Halle	Secteurs	Surfaces totales exondées (m²)	Surfaces exondées actuellement végétalisées (m²)	Surfaces exondées actuellement non végétalisées (m²)	Taux d'occupation par la végétation à la cote considérée (%)	Proportion de roselière aquatique exondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
	Marais de l'Enfer	4509	2084	2425	46,2	7,7
	Sentier des roselières	3512	1864	1648	53	8,8
	Bout du Lac	1660	915,5	744,5	55,1	9,2

Valeurs de surfaces inondées et exondées pour le Scénario 2

Le marnage moyen annuel pour ce scénario est de 50 cm

Concernant les périodes pénalisantes pour le développement du roseau, ce scénario se différencie du précédent notamment par la période des hautes eaux qui demeure au-dessus de la cote 447 (83 cm) pendant toute la période printanière (Mars à Juin inclus). En outre signalons que la cote des hautes eaux pour ce scénario (447,1 soit 93 cm à l'échelle du Pont de la Halle) est inférieure de 12 cm à celle du scénario 1 (447,22 soit 105 cm à l'échelle du Pont de la Halle).

La période de basses eaux (446,60 en septembre soit 43 cm à l'échelle du Pont de la Halle) est en revanche proche de celle du scénario 1.

A la lumière de ces constatations et pour faire référence au scénario 1, il paraît très probable que l'impact de ce scénario n°2 sur la roselière aquatique soit moins bénéfique pour leur développement. La raison principale est liée au maintien d'un niveau haut en période printanière et ceci même si la période d'exondation post estivale demeure conservée (remise à disposition de nutriments pour les rhizomes, développement potentiel d'algues benthiques en automne) et que des surfaces significatives de roselières actuellement terrestres seraient mise en eau durant l'hiver.

Ajoutons par ailleurs que le marnage moyen annuel de ce scénario est inférieur de 15 cm au scénario précédent.

En l'état pour ce scénario, nous pouvons même nous interroger quant à la possibilité d'un effet négatif dans la mesure où le maintien d'une cote haute durant le début de la phase de croissance des pousses, pourrait à terme contribuer à « l'épuisement » des rhizomes et donc potentiellement à une perte de surface. En effet, précisons qu'avec l'application de ce scénario, la majorité actuelle des roselières qui est localisée au-delà de 50 cm de profondeur³⁵ (cf. module 3) aura 10 à 15 cm d'eau en plus à franchir à la période charnière (fin mai début juin) du développement des pousses ce qui est significatif.

En fait pour ce scénario une incertitude demeure notamment entre deux niveaux d'impact qui s'opposent :

Impacts négatifs du fait de niveaux « hauts » au printemps

Versus

Impacts positifs du fait de niveaux bas de fin d'été

Là encore l'absence de réel retour d'expérience à l'échelle qui nous intéresse, empêche de trancher véritablement et cela même si la littérature et l'état des connaissances actuelles sur la physiologie de la roselière aquatique laisse présager que ce type de situation négative (perte de surface de roselière) soit envisageable sur les roselières d'Annecy.

Concernant les hydrophytes, tout comme pour le scénario 1, leur quasi absence sur la bande de marnage envisagée (sur les trois secteurs étudiés), laisse présager un impact nul du scénario.

7.2.2 La faune

♦ Du point de vue comparatif et d'une manière générale, la différence par rapport au scénario 1 concerne la différence de gain (ou de pertes si impact négatif de ce scénario) en termes d'habitat roselière.

Le scénario envisagé ici offrant moins de conditions favorables pour l'expansion et /ou la densification des roselières aquatiques, il sera donc théoriquement moins bénéfique pour la faune en général fréquentant cet habitat.

L'impact d'un tel scénario pourrait même s'avérer négatif sur la faune s'il conduisait à une perte de surface pour la raison évoquée ci-dessus (hautes eaux au printemps).

Cet impact potentiellement négatif du point de vue habitationnel concerne donc l'ichtyofaune, l'avifaune, les odonates et le Castor.

³⁵ Par rapport à la cote 446,91

♦ Du point de vue à présent des impacts directs liés aux périodes de hautes et basses eaux, il n'y a en revanche pas de différence majeure avec le scénario 1.

En effet pour ce qui a trait à l'avifaune, il n'y a pas de dissemblance notable à observer par rapport au scénario précédent. La baisse du niveau envisagée étant décalée plus tard en début d'été, il y a également comme pour le scénario 1, potentiellement un impact possible pour quelques nids qui seraient exondés. Cet impact demeure néanmoins tout aussi faible car il ne concerne d'une part qu'une faible frange en surface et d'autre part des espèces se reproduisant plusieurs fois durant une saison (Grèbe huppé, Rousserole effarvate et Foulque en l'occurrence).

Pour les odonates et le Castor, la gestion hydraulique en termes de basses et hautes eaux n'engendrera également pas de différence significative par rapport au scénario 1 dont les faibles impacts peuvent être repris ici.

En ce qui concerne l'ichthyofaune, la cote du Lac étant maintenue durant tout l'hiver ainsi qu'au printemps, l'ensemble des espèces "sensibles" du Lac utilisant les zones littorales pour se reproduire (Corégone en particulier) auront terminé leur cycle de reproduction : ainsi tout risque d'exondation des œufs est exclu. La cote haute pour ce scénario étant 12 cm plus bas que pour le scénario 1, la mise eau d'éventuelles nouvelles zones de fraie sera effective mais néanmoins moins importante que dans ce même scénario.

Par ailleurs, concernant la Truite, la remontée de la cote du Lac (cotes basses pratiquement identiques entre les deux scénarii) pour le scénario 2 est envisagée en tout début d'automne (1 mois plus tôt que pour le scénario 1). Ceci limite encore d'avantage les risques de déconnexion hydraulique des confluences au moment des premières migrations.

In fine, il est important de retenir que l'impact principal pour la faune risque sera étroitement lié au comportement de la roselière en termes de surfaces gagnées (ou perdues).

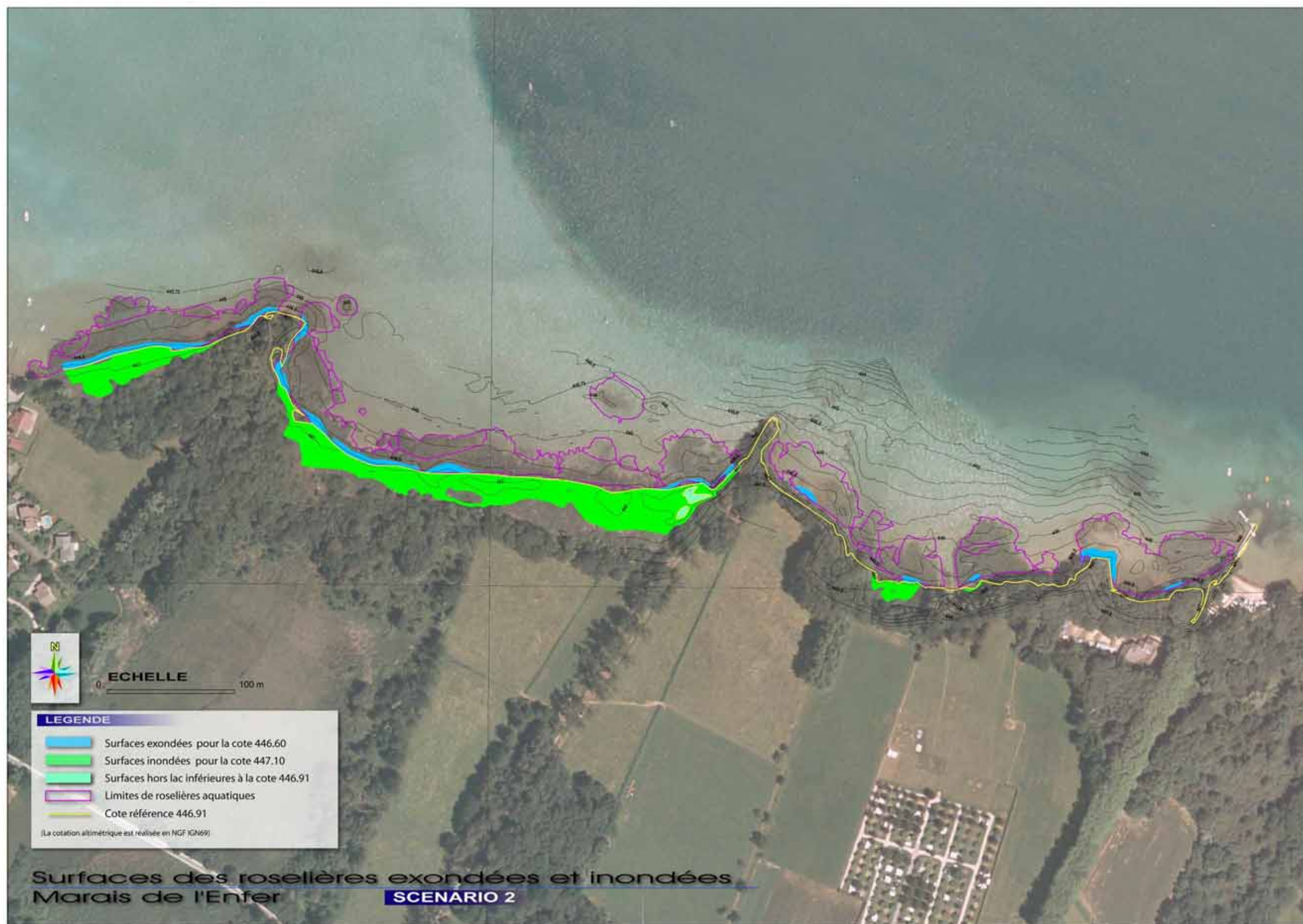


figure 12 Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 2

figure 13 Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 2



figure 14 Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 2



7.2.3 Les sédiments

Comme déjà évoqué dans le § 7.1.6, cet aspect concerne les sédiments actuellement inondés en permanence et qui seront par la suite exondés périodiquement tous les ans durant l'été ou la fin d'été. Dans la mesure où la cote de basses eaux ainsi que la longueur d'exondation sont comparables à celles du scénario 1, ces deux scénarii demeurent équivalents en termes de minéralisation et donc de gains écologiques pour la roselière aquatique.

7.3 Scénario 3

Rappelons qu'il s'agit d'un scénario tenant compte partiellement des niveaux simulés à l'horizon 2050 dans le module 1 avec notamment :

- une période hivernale à niveau moyen (cote 70 soit 446,87 en IGN 69),
- une période de Stockage en fin de printemps le plus long possible pour anticiper la sécheresse estivale (cote 90 soit 447,07 IGN 69),
- une diminution significative sur juillet-août, comparable à l'épisode de 2003 (cote 446,33 soit 16 cm à l'échelle du Pont de la Halle),
- une augmentation dès que possible en fin d'été pour retrouver un niveau moyen à l'automne.

Le marnage moyen pour ce scénario est de 74 cm.

7.3.1 La végétation

Nous faisons figurer ci-dessous les valeurs de roselières exondées et inondées pour les cotes extrêmes de ce scénario 3.

Cote haute (IGN 69) 447,07 soit 90 cm à l'échelle du Pont de la Halle	Secteurs	Surfaces totales inondées (m²)	Surfaces de roselières terrestres inondées (m²)	Autres surfaces (boisement,) (m²)
	Marais de l'Enfer	9822	8038	1784
	Sentier des roselières	4507	3485	1022
	Bout du Lac	9883	9883	-

Cote basse (IGN 69) 446,33 soit 16 cm à l'échelle du Pont de la Halle	Secteurs	Surfaces totales exondées (m²)	Surfaces exondées actuellement végétalisées (m²)	Surfaces exondées actuellement non végétalisées (m²)	Taux d'occupation par la végétation à la cote considérée (%)	Proportion de roselière aquatique exondée par rapport à la surface totale de roselière aquatique du secteur (%)
	Marais de l'Enfer	16232	11876 dont 400 m² de mélange roselière- scirpaie	4356	73,1	44,1
	Sentier des roselières	12407	8864	3543	71,4	41,7
	Bout du Lac	5491	2878	2613	52,4	29

Valeurs de surfaces inondées et exondées pour le Scénario 3



figure 15 Marais de L'enfer - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 3

figure 16 Sentier des roselières - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 3

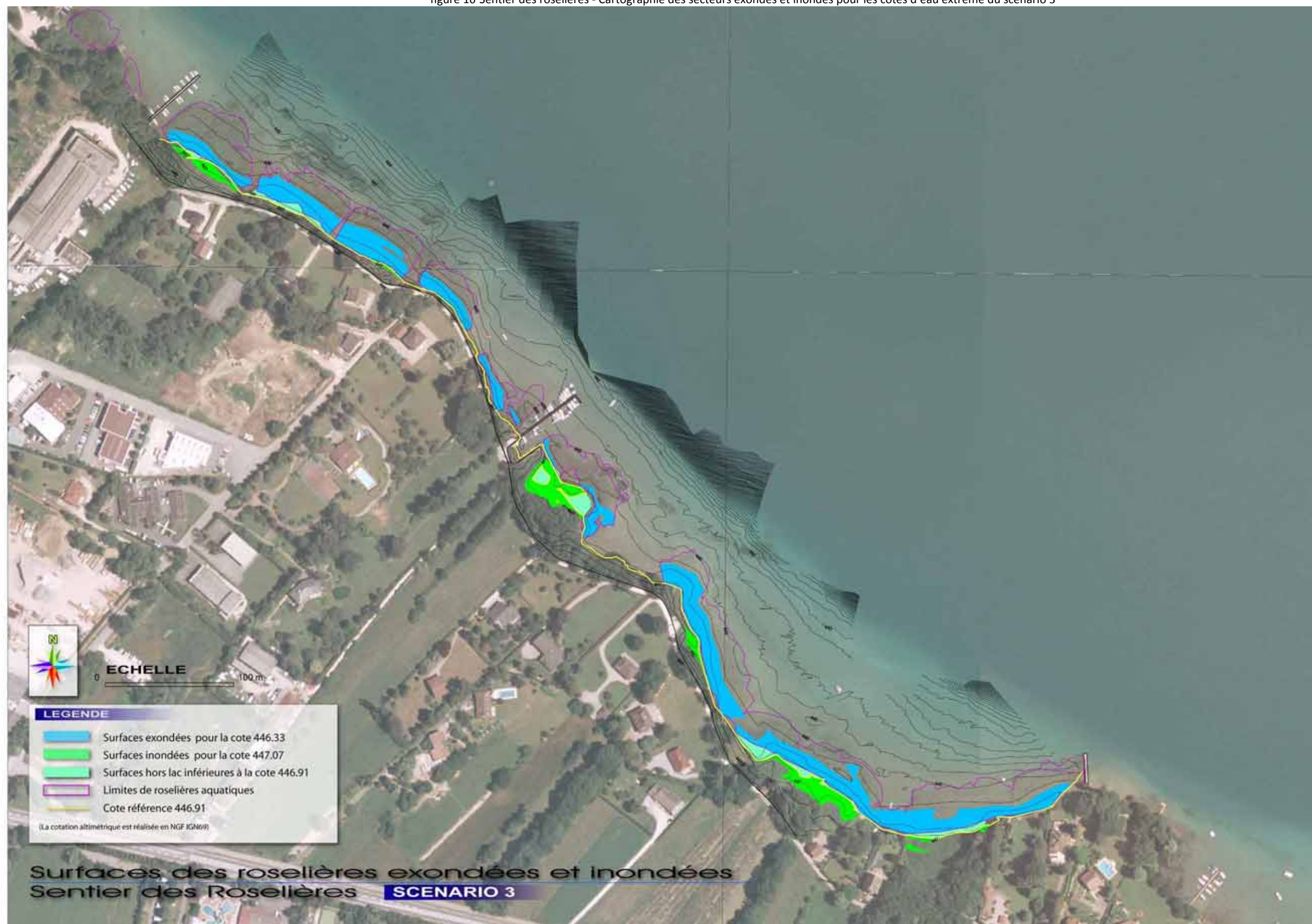


figure 17 Bout du Lac - Cartographie des secteurs exondés et inondés pour les cotes d'eau extrême du scénario 3



Concernant les périodes pénalisantes pour le développement du roseau, ce scénario possède quelques similitudes avec le scénario 2 car on observe un niveau haut jusque tard dans la saison (juin) avec une cote qui demeure au-dessus de la cote 447. Néanmoins signalons que la cote des hautes eaux hivernales pour ce scénario (446,87) est inférieure de 23 cm à celle du scénario 2 et de 35 cm par rapport au scénario 1.

La période de basses eaux est revanche beaucoup plus prononcée et plus étendue que pour les deux premiers scénarii avec des surfaces exondées qui commencent à être significatives par rapport au scénario 1 (facteur entre 2 et 3 suivant les secteurs entre les deux scénarii).

A la lumière de ces constatations et comme évoqué précédemment pour le scénario 2, il paraît très probable que l'impact de ce scénario n°3 sur la roselière aquatique soit moins bénéfique pour leur développement que le scénario 1.

La raison principale est liée au maintien d'un niveau haut en période printanière. Néanmoins et c'est là que s'arrête la similarité avec le scénario 2, l'exondation estivale bien que tardive est relativement rapide (baisse du Lac suivant éventuellement la croissance des pousses du roseau), prononcée (cote 446,33 soit la cote 16 à l'échelle du Pont de la Halle) et assez longue.

Ainsi là encore même si nous pouvons nous interroger sur l'effet négatif d'une cote haute durant le début de la phase de croissances des pousses, l'impact sera semble-t-il moins néfaste que pour le scénario précédent qui observait une lente descente du niveau.

En outre il est probable que l'exondation prononcée et prolongée en été aura un effet positif sur la phragmitaie aquatique : de plus grandes surfaces seront exondées plus longtemps à une période propice à la minéralisation : L'expansion de la roselière vers le large avec une densification de la roselière actuelle sont des hypothèses tout à fait possibles pour ce scénario. Tout comme les scénarii précédents cette forte exondation pourrait s'accompagner de quelques développements d'algues benthiques en automne.

A contrario, du fait de cette longue période à une cote basse (par rapport aux deux autres scénarii), il est pertinent de s'interroger sur l'évolution du cortège floristique à proximité de la berge actuelle : cette période d'exondation en plein été pourrait en effet à termes favoriser la colonisation par d'autres espèces moins caractéristiques mais simplement hygrophiles (*Lythrum salicaria*, *Lycopus europaeus*, *Carex sp.* ...).

In fine il n'est pas impossible d'aboutir à une évolution de la zonation de la végétation qui suivrait peu ou prou l'évolution de la cote moyenne de ce scénario (446,75 soit 58 cm à l'échelle du Pont de la Halle). Cela pourrait se traduire par un léger déplacement de la roselière vers le large et une colonisation des zones de berge actuelle (coté Lac) par des espèces non héliophytes annuelles ou bisannuelles.

Là encore l'absence de réel retour d'expérience à l'échelle qui nous intéresse empêche de trancher véritablement et il faut rester prudent quant aux hypothèses qui viennent d'être émises.

Concernant les hydrophytes, tout comme pour les deux scénarii précédents, leur quasi absence sur la bande de marnage envisagée (sur les trois secteurs étudiés), laisse présager un impact nul du scénario.

7.3.2 La faune

♦ Du point de vue comparatif et d'une manière générale, la différence par rapport aux autres scénarii concerne le gain en termes d'habitat roselière.

Le scénario envisagé ici paraissant intermédiaire entre le scénario 1 et 2 en termes d'expansion et /ou la densification des roselières, il apparaît donc logiquement également médian pour la faune fréquentant cet habitat.

Le déplacement éventuel de la zonation de la végétation évoquée ci-dessus avec une certaine diversification en berge pourrait voir un enrichissement de la faune et dans la mesure où le maintien (voire l'expansion) de la roselière est effectif.

♦ Du point de vue des impacts directs liés aux périodes de hautes et basses eaux, les différences avec les autres scénarii concernent à priori l'avifaune et la Truite.

En effet pour l'avifaune, la forte et longue exondation estivale pourrait commencer à être impactante pour les espèces utilisant les roselières à cette période (Grèbe huppé, Rousserole effarvate et Foulque en l'occurrence) et dépendant du niveau d'eau.

Le niveau d'impact demeure néanmoins largement à nuancer en fonction d'une part de la surface de roselière restant en eau durant cette période (entre 70 et 80 %) et d'autre part de l'expansion de la roselière qui pourrait être observée à termes en suivant cette régulation.

Pour les odonates et le Castor, la gestion hydraulique en termes de basses et hautes eaux n'engendrera également pas de différence significative par rapport aux scénarii précédents dont les faibles impacts peuvent être repris.

En ce qui concerne l'ichyofaune, en lien avec ce qui a été déjà évoqué, la cote haute de la chronique étant maintenue durant tout l'hiver ainsi qu'au printemps, l'ensemble des espèces "sensibles" du Lac utilisant les zones littorales pour se reproduire (Corégone en particulier) auront terminé leur cycle de reproduction : ainsi tout risque d'exondation des œufs est exclu.

Concernant la Truite, la remontée relativement lente de la cote du Lac place ce scénario en première place quant aux interrogations sur la connectivité hydraulique des confluences en milieu d'automne (cote 60 mi-novembre).

Ainsi pour ce scénario il paraît indispensable de mettre en œuvre une évaluation de la connectivité au niveau des confluences pour les cotes envisagées en début et à l'automne.

Précisons que les cotes hivernales bien que plus basses que l'enveloppe actuellement observée sur les chroniques 1965-2010 en demeurent néanmoins proches et ne font pas craindre à priori de risque de discontinuité hydraulique durant cette période.

7.3.3 Les sédiments

Comme déjà évoqué dans le § 7.1.6, cet aspect concerne les sédiments actuellement inondés en permanence et qui seront par la suite exondés périodiquement tous les ans durant l'été. Dans la mesure où pour ce scénario, les surfaces exondées sont plus importantes que pour le scénario 1 et à

une période de plein été, la minéralisation s'effectuera sur des surfaces également plus grandes (plus vers le large) et pourrait être plus efficace du fait de plus hautes températures.
In fine, la remise à disposition de nutriments pour ce scénario 3 pourrait donc être plus importante que pour le scénario.1

7.4 Les indicateurs à suivre

Le caractère expérimental d'un retour à un marnage significatif impose quel que soit le scénario retenu, la mise en œuvre d'un suivi pour évaluer réellement l'impact d'un tel rétablissement sur la végétation aquatique et la faune

◆ Ainsi concernant la roselière, il est important de pouvoir mesurer quantitativement l'évolution qu'induirait la nouvelle régulation. Dans ce but il est proposé deux types de mesure :

- Cartographie précise établie à l'aide d'outils comme les GPS haute précision comme celle établie en 2007 :

Pas de temps d'observation 5- 6 ans.

- Mise en place de points de repères en bordure de certaines roselières actuelles ceci afin de pouvoir observer rapidement sur le terrain le comportement de la phragmitaie en termes de gain ou de perte. Ceci peut être associé à un relevé succinct d'informations complémentaires au sein de quadrats (densité, hauteur, inflorescence, espèces compagnes éventuelles). Nous faisons figurer ci-dessous un schéma de principe de ce moyen simple d'observation.

Notons que ce suivi par la mise en place de repères pourra s'effectuer dans des zones qui font actuellement l'objet de protection (installation de pieux jointifs) et dans des zones qui n'en reçoivent pas, ceci de manière à pouvoir observer d'éventuelles différences en termes de cinétique d'évolution.

Pas de temps d'observation : 3 ans

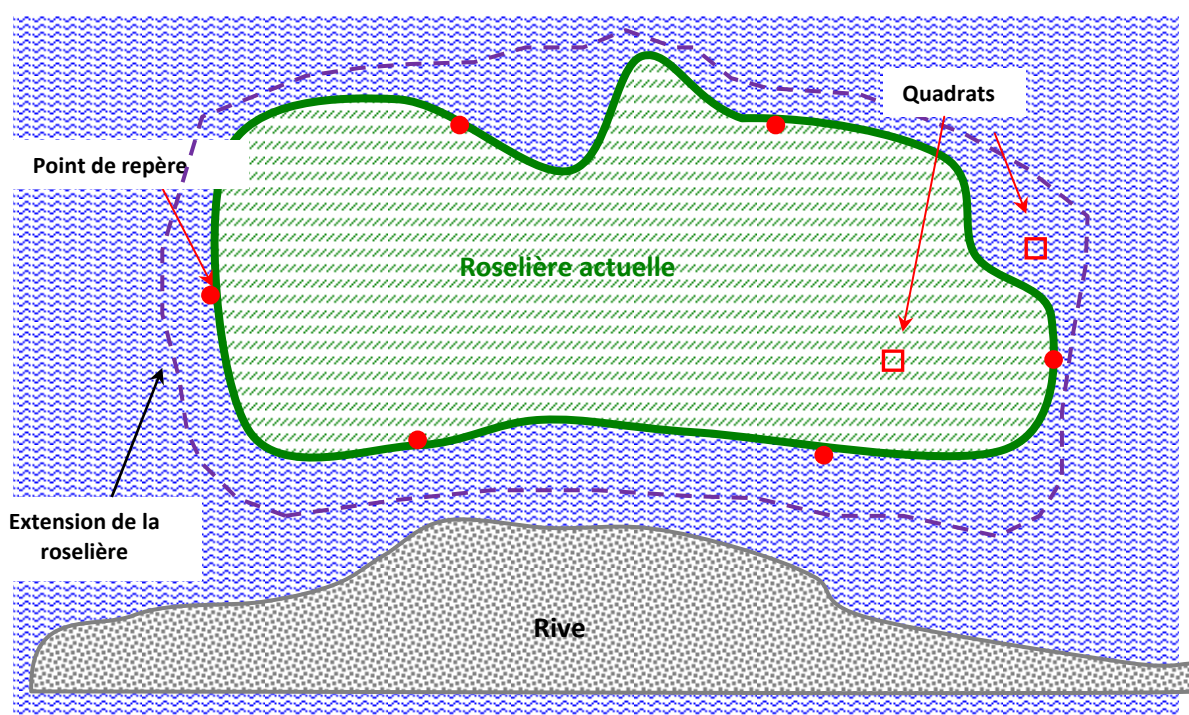


Schéma de piquetage de la roselière actuelle pour observer son évolution – cas d'une progression

♦ Pour la faune, il paraît important :

- D'évaluer quel que soit le scénario envisagé la connectivité hydrauliques des confluences pour les cotes basses envisagées en début d'automne de manière à pouvoir s'assurer que ces cotes ne posent pas de problème particulier concernant la migration de la Truite. Ceci concerne en particulier le scénario 3 dont la période de remontée pourrait coïncider avec le début de la migration.

Pas de temps d'observation : Il s'agit d'un constat unique puisque les scénarii fixent les cotes basses

- De pouvoir qualifier concrètement les éventuelles nouvelles zones de fraie pour le Corégone qu'induirait une montée des eaux durant la période hivernale (scénario 1 et 2).

Pas de temps d'observation : Il s'agit d'un constat unique puisque les scénarii fixent les cotes basses

- De suivre quelques zones test de roselière du point de vue de l'avifaune nicheuse (mise en place d'indice type IPA ou équivalents - Cf. étude LPO 2010) et hivernante pour constater de l'éventuelle évolution tant qualitative que quantitative. Comme nous l'avons déjà évoqué, il est en effet certain qu'une modification significative de l'habitat roselière lacustre soit accompagnée d'une évolution des effectifs voire d'une évolution de la richesse spécifique.

Pas de temps d'observation : tous les 2 à 3 ans

♦ Suivi physico-chimique de sédiments

Le but est de pouvoir suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques des sédiments qui seront exondés raisonnablement sur la base des prélèvements déjà effectués en 2009 et en s'intéressant en particulier aux paramètres pouvant avoir une influence sur la croissance des végétaux.

Dans cette perspective il est proposé pour chaque prélèvement d'analyser les paramètres suivants

- le Carbone organique total
- la granulométrie
- le potentiel redox
- le Phosphore assimilable (PO4)
- l'Azote total (non dosée 2009 mais proposée ici pour permettre quelques comparaisons et quelques rapport (C/N en particulier)).

En termes de localisation de prélèvements et afin d'effectuer des comparaisons, il est intéressant de suivre des zones exondées et non exondées, en roselière (avec un prélèvement en zone d'accumulation et un prélèvement en front) et hors roselière.

Nous faisons figurer ci-dessous un schéma de principe de localisation de ces prélèvements.

Pas de temps d'observation : tous les 2 à 3 ans

● Point de prélèvement

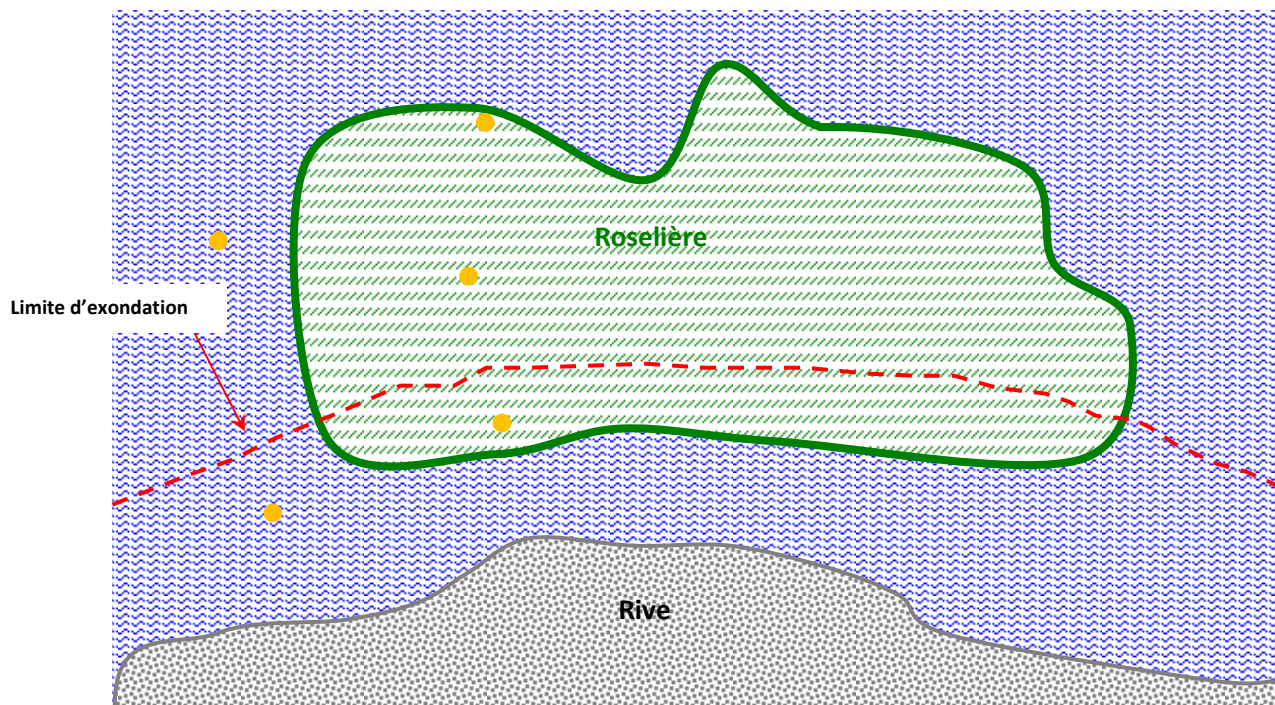


Schéma de principe prélèvement de sédiments – Total 5 prélèvements

8 CONCLUSION

Ce module consacré à l'étude de trois scénarii réalistes de rétablissement de marnage sur le Lac d'Annecy a permis de dégager des tendances évolutives sur quelques indicateurs (végétation hélophytique, avifaune, odonates, Castor, ichtyofaune) en l'état des connaissances actuelles et en s'affranchissant des contraintes socio-économiques.

Ces scénarii hydrologiques construits à partir des modules précédents ont été retenus en fonction de différentes clés d'entrée.

Ainsi :

- le scénario 1 est basé sur les besoins écologiques d'une roselière aquatique avec notamment deux périodes de basses eaux et une période de hautes eaux,
- le scénario 2 reprend quant à lui une évolution des cotes « en régime naturel » (modélisé au module 1) mais transposée à la cote moyenne actuelle,
- le scénario 3 tient compte partiellement des niveaux simulés à l'horizon 2050 dans le module 1.

D'une manière générale, il ressort de l'analyse que concernant la roselière aquatique, le scénario 1 de rétablissement de marnage demeure logiquement et par construction le plus propice à l'expansion des roselières tant vers le front des roselières qu'au sein des zones d'accumulation actuelles dont les taux d'occupation pourraient être réellement améliorés.

Le scénario 2 interroge quant à lui sur deux niveaux d'impact qui s'opposent (hautes eaux au printemps et début d'été *versus* basses eaux en fin d'été) et dont la résultante pourrait faire basculer vers une expansion (impact positif) ou une dégradation des roselières (impacts négatifs).

Le scénario 3 semble quant à lui médian entre les deux scénarii puisqu'avec un niveau estival le plus bas et cela sur plus de deux mois, l'impact positif qu'induirait cette phase compenserait certainement les niveaux assez hauts jusqu'en fin de printemps qui par ailleurs seront baissés rapidement (et donc parallèlement à la croissance des pousses de roseaux). La phase estivale de ce scénario interroge même quant à un éventuel déplacement de la zonation des roselières aquatiques vers le large avec une évolution du cortège floristique à proximité des berges actuelles qui pourraient voir apparaître des espèces hygrophiles moins caractéristiques d'un milieu purement aquatique.

Concernant la faune, deux approches sont nécessaires pour résumer les niveaux d'impact :

- Une première approche concerne le gain ou la perte à termes de l'habitat roselière en fonction du scénario envisagé,
- une seconde approche s'intéresse davantage aux éventuels impacts dus aux périodes de basses eaux et hautes eaux envisagées au cours de l'année.

Ainsi il apparaît clairement que pour la première approche, la positivité ou la négativité des impacts sur la faune en général sera étroitement liée à la réaction des roselières au vu du marnage envisagé. Ainsi, un scénario favorisant une expansion et une densification de la phragmitaie aquatique sur le Lac sera plus propice à la faune que celui induisant une stagnation voire une dégradation de cette dernière. Là encore il semble qu'au vu des éléments évoqués précédemment les scénarii 1 et 3 se détachent du scénario 2 puisqu'ils seraient à priori plus favorables (surtout le 1) au développement des roselières.

Pour la seconde approche, il ressort essentiellement que les impacts demeurent relativement comparables et faiblement négatifs (notamment pour les périodes de basses eaux) d'un scénario à l'autre et cela pour ce qui concerne l'avifaune les odonates, et le Castor, et la quasi-totalité de la faune piscicole. Néanmoins concernant la Truite, des vérifications sont à faire sur la connectivité hydraulique des confluences pour les cotes basses envisagées dans le cadre du scénario 1 et surtout

le n°3, ceci afin de s'affranchir de tout risque de limitation quant aux remontées de géniteurs en début de période de reproduction.

Pour conclure, il est important d'avoir présent à l'esprit que le rétablissement d'un marnage sur le Lac d'Annecy peut être plus ou moins bénéfique sur les roselières aquatiques en fonction notamment des épisodes de hautes eaux et basses eaux retenues. Dans le cadre d'une régulation réaliste en termes de cotes extrêmes, il existe au jour d'aujourd'hui des conditions hydrologiques techniquement possibles à mettre en œuvre qui pourraient être favorables à une expansion et/ou une densification des roselières aquatiques du Lac.

C'est ce que montre au moins un des scénarii étudiés dans le cadre de la présente étude. Outre la phragmitaie aquatique, ce type de scénario aura au final un impact écologique globalement positif notamment sur les espèces animales fréquentant de manière plus ou moins continue cet habitat.

Néanmoins, il convient d'être prudent quant à la vitesse de réponse de cet habitat et cela quel que soit le scénario envisagé dans la mesure où d'une part cette cinétique est liée à l'état de dégradation locale des roselières et d'autre part on constate un réel déficit de retour d'expériences à ce niveau.

9 FICHES DE SYNTHÈSE

Nous faisons figurer à la suite une fiche de synthèse par scénario résumant les éléments principaux évoqués dans les paragraphes précédents.

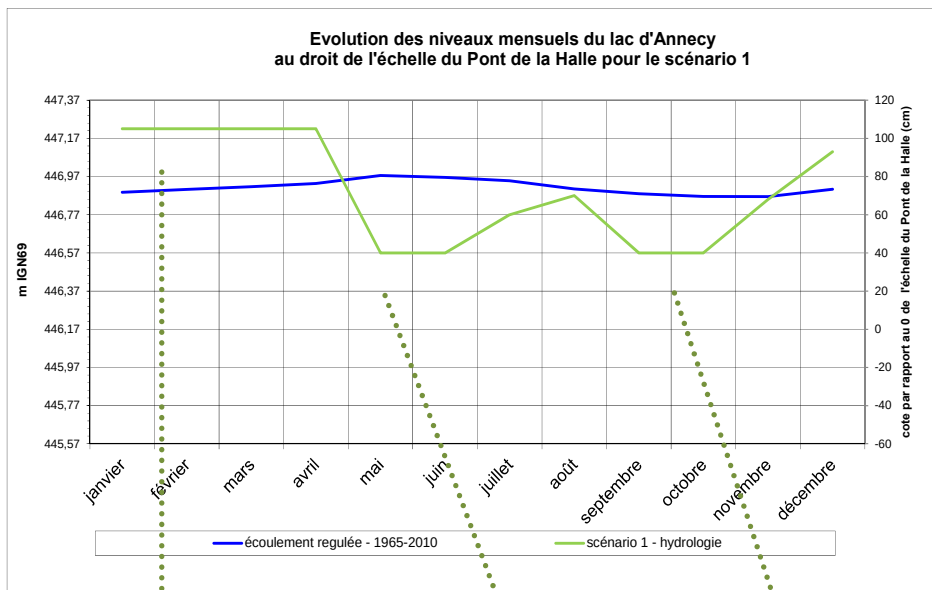
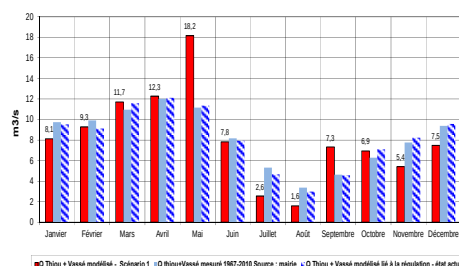
SCENARIO n°1

⇒ Construit à partir des conditions les plus favorables pour les roselières

HYDROLOGIE [MODELISEE]

→ Scénario compatible avec les apports des affluents du Lac
→ Garantit un débit [Thiou + Vassé] même en été
(estimation août : 1,6 m³/s)

Débits mensuels - Thiou et Vassé



IMPACTS PHYSIQUES [MODELISES]

MARNAGE ANNUEL

Rappel marnage annuel moyen 1965-2010 : 11 cm

Scénario n°1
65 cm

PERIODE DE HAUTES EAUX

⇒ Proportion de roselières terrestres inondées / surface roselières aquatiques du secteur

Marais Enfer	Sentier rosol.	Bout du Lac
49%	26 %	123%

PERIODES DE BASSES EAUX

⇒ Surface totale exondée (végétalisée ou non) / surface roselières aquatiques du secteur

Marais Enfer	Sentier rosol.	Bout du Lac
20%	19 %	20%

IMPACTS ECOLOGIQUES [ESTIMES]

Qualité des sédiments littoraux

😊😊 : Dispersion de la matière organique accumulée

😊😊 : Minéralisation des sédiments par mise en assec

Végétation héliophytique (roseaux principalement)

😊😊 : Amélioration de la physiologie du roseau par diminution de l'accumulation de matière organique (réduction de « l'étouffement »)

😊😊 : Mai-juin, facilite la sortie des nouvelles pousses par diminution de l'épaisseur de la tranche d'eau à franchir (**niveaux adaptables en fonction des autres enjeux**)
😊😊 : Bénéfice pour la roselière du fait de la remise à disposition de nutriments occasionnée par la minéralisation post-estivale (mais risque de développement d'algues benthiques en automne ?)

Faune aquatique fréquentant le littoral (groupes cibles : poissons, avifaune, odonates, castor)

😊 ? : Impacts positifs à terme pour l'ensemble de la faune si extension des surfaces de roselières aquatiques (du fait de l'augmentation de cet habitat naturel)
😊 ? : Hautes eaux en période hivernale potentiellement positives pour la reproduction du corégone, dans une moindre mesure pour le brochet
😊 : Pas d'impact significatif pour la faune par rapport aux variations saisonnières extrêmes du niveau
😊 ? : Pour la truite, connectivité hydraulique des affluents du lac au début de l'automne à vérifier

DIVERS

- Remarque : vitesse de réponse certainement très hétérogène d'une zone à l'autre du fait de l'état de dégradation, qui est relativement et localement bien avancé (mitage important, densité faible des roseaux...).

- En cas de mise en place du scénario, différents indicateurs à suivre pour évaluer les impacts sur l'écosystème (cf. rapport d'étude).

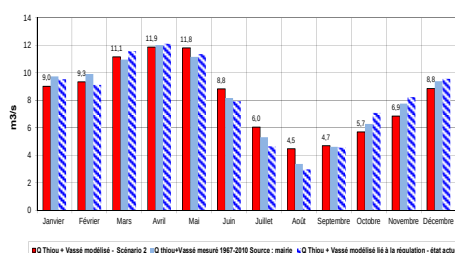
SCENARIO n°2

⇒ Construit à partir des conditions modélisées en « écoulement libre » du lac, mais transposées au niveau moyen contemporain observé entre 1965 et 2010

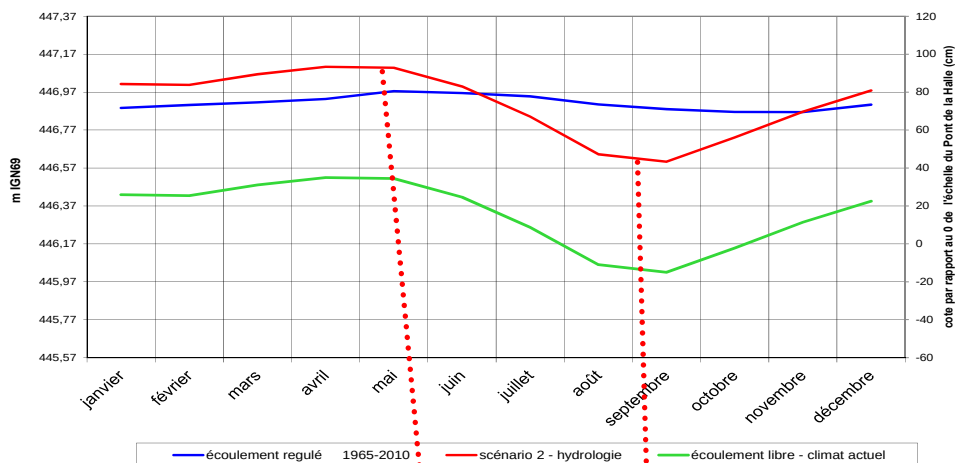
HYDROLOGIE [MODELISEE]

→ Scénario compatible avec les apports des affluents du Lac
→ Garantit un débit [Thiou + Vassé] même en été
(estimation août : 4,5 m³/s)

Débits mensuels - Thiou et Vassé



Evolution des niveaux mensuels du lac d'Annecy au droit de l'échelle du Pont de la Halle pour le scénario 2



IMPACTS PHYSIQUES [MODELISES]

MARNAGE ANNUEL

Rappel marnage annuel moyen 1965-2010 : 11 cm

Scénario n°2

50 cm

PERIODE DE HAUTES EAUX

⇒ Proportion de roselières terrestres inondées / surface roselières aquatiques du secteur

Marais Enfer	Sentier rosol.	Bout du Lac
36%	19%	107%

PERIODE DE BASSES EAUX

⇒ Surface totale exondée (végétalisée ou non) / surface roselières aquatiques du secteur

Marais Enfer	Sentier rosol.	Bout du Lac
17%	17%	17%

IMPACTS ECOLOGIQUES [ESTIMES]

PERIODE DE HAUTES EAUX

Qualité des sédiments littoraux

😊😊 : Dispersion de la matière organique accumulée

Végétation hélophytique (roseaux principalement)

😊😊 : Amélioration de l'état physiologique du roseau par réduction de l'accumulation de matière organique (réduction de « l'étouffement »)
⚠️ : Mai-juin, nécessite de puiser dans les réserves des roselières pour la sortie des nouvelles pousses en raison des niveaux (à adapter si phase opérationnelle ?)

Faune aquatique fréquentant le littoral (groupes cibles : poissons, avifaune, odonates, castor)

😊 ? ou 😊 ? : Impacts dépendent de l'évolution de l'habitat roselières
😊 ? : Hautes eaux en période hivernale potentiellement positives pour la reproduction du corégone (mais de moindre importance par rapport au scénario n°1), dans une moindre mesure pour le brochet
😊 : Pas d'impact significatif pour la faune par rapport aux variations saisonnières extrêmes du niveau
😊 ? : Pour la truite, connectivité hydraulique des affluents du lac au début de l'automne à vérifier

PERIODE DE BASSES EAUX

😊😊 : Minéralisation accentuée des sédiments par mise en assec

😊 : Bénéfice pour la roselière du fait de la remise à disposition de nutriments occasionnée par la minéralisation (mais risque de développement d'algues benthiques en automne ?)

DIVERS

- Remarque : vitesse de réponse certainement très hétérogène d'une zone à l'autre du fait de l'état de dégradation, qui est relativement et localement bien avancé (mitage important, densité faible des roseaux...).
- En cas de mise en place du scénario, différents indicateurs à suivre pour évaluer les impacts sur l'écosystème (cf. rapport d'étude).

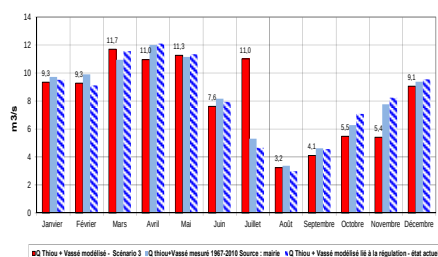
SCENARIO n°3

⇒ Construit à partir de la courbe de niveaux simulée à l'horizon 2050 mais appliquée (en partie) aux conditions de régulation et climatiques actuelles

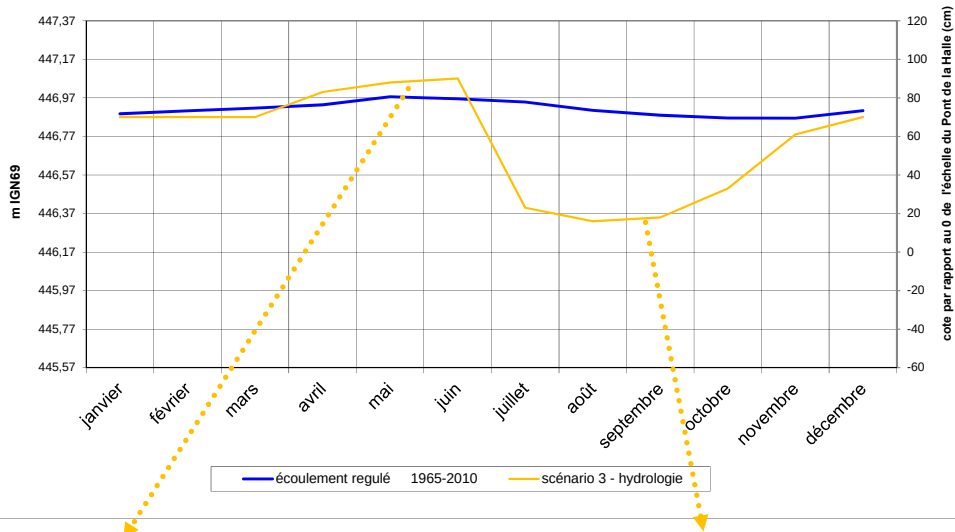
HYDROLOGIE [MODELISEE]

→ Scénario compatible avec les apports des affluents du Lac
→ Garantit un débit [Thiou + Vassé] même en été
(estimation août : 3,2 m³/s)

Débits mensuels - Thiou et Vassé



Evolution des niveaux mensuels du lac d'Annecy au droit de l'échelle du Pont de la Halle pour le scénario 3



IMPACTS PHYSIQUES [MODELISES]

MARNAGE ANNUEL

Rappel marnage annuel moyen 1965-2010 : 11cm

Scénario n°3

74 cm

PERIODE DE HAUTES EAUX

⇒ Proportion de roselières terrestres inondées / surface roselières aquatiques du secteur

Marais Enfer	Sentier rosol.	Bout du Lac
30%	16 %	100%

PERIODE DE BASSES EAUX

⇒ Surface totale exondée (végétalisée ou non) / surface roselières aquatiques du secteur

Marais Enfer	Sentier rosol.	Bout du Lac
60%	58 %	55%

IMPACTS ECOLOGIQUES [ESTIMES]

Qualité des sédiments littoraux

😊😊😊 : Dispersion de la matière organique accumulée en début de printemps

😊😊😊 : Minéralisation des sédiments par mise en assec sur de plus grandes surfaces que les autres scénarii

Végétation héliophytique (roseaux principalement)

😊 : Amélioration de la physiologie des roseaux par la réduction de l'accumulation de matière organique
⊗ : Mai-juin, nécessite de puiser dans les réserves des roselières pour la sortie des nouvelles pousses - Impact néanmoins moins marqué que le scénario n°2

😊 : Bénéfice pour la roselière du fait de la remise à disposition de nutriments occasionnée par la minéralisation (mais risque de développement d'algues benthiques en automne ?)

😊😊😊 : Marnage ⇒ Atténuation notable de l'érosion mécanique liée aux vagues (dissipation sur une surface importante de la roselière)
😊? : Impact global positif à priori ⇒ Extension potentielle des roselières aquatiques : développement et confortement des surfaces actuelles - colonisation des surfaces dénudées – accroissement vers le large
😊? ou 😊? ⇒ Déplacement de la zonation des roselières vers le large ?

Faune aquatique fréquentant le littoral (groupes cibles : poissons, avifaune, odonates, castor)

😊? : Impacts positifs à terme pour l'ensemble de la faune si extension des surfaces de roselières aquatiques (du fait de l'augmentation de cet habitat naturel)
😊 : Pas d'impact significatif avéré pour la faune par rapport aux variations saisonnières extrêmes du niveau
⊗? : Néanmoins interrogation importante pour la truite, en termes de connectivité hydraulique des affluents du lac au début de l'automne - **Point important à vérifier**

DIVERS

- Remarque : vitesse de réponse certainement très hétérogène d'une zone à l'autre du fait de l'état de dégradation, qui est relativement et localement bien avancé (mitage important, densité faible des roseaux...).

- En cas de mise en place du scénario, différents indicateurs à suivre pour évaluer les impacts sur l'écosystème (cf. rapport d'étude).

RESUME

Remarque : Les altitudes indiquées sont données dans le système orthométrique IGN. Les correspondances entre le système NGF (antérieures à 1969) et IGN sont rappelées en annexe 2.

La stabilisation du niveau du Lac d'Annecy, par la régulation des débits des canaux du Thiou et du Vassé, a été identifiée comme un des facteurs responsables de la régression des roselières au cours du XXème siècle. Dans ce contexte et faisant suite aux différentes études réalisées depuis 2007, le SILA a initié une étude sur l'opportunité de modifier la gestion du niveau du Lac à des fins environnementales. Dans cet objectif, elle se compose des quatre modules suivants :

- Module 1 : Caractérisation de l'hydrologie du Lac et de sa gestion hydraulique.
- Module 2 : Synthèse bibliographique des expériences menées en termes de marnage ayant pour objectif une amélioration des herbiers d'hélophytes en général et de phragmitaie en particulier.
- Module 3 : Détermination des relations entre niveaux du Lac et la mise en eau des secteurs de roselières.
- Module 4 : Proposition et étude des impacts de différents scénarii de gestion hydraulique du Lac d'Annecy en utilisant en particulier les résultats des modules 1 et 3.

Module 1

Le Lac est domaine d'Etat qui depuis la fin du XIX^{ème} Siècle a confié à la Ville d'Annecy la responsabilité des manœuvres de vannes. Le niveau du Lac doit être maintenu le plus près possible de la "cote légale de retenue" qui a été fixée à 80 cm à l'échelle de lecture située au Pont de la Halle. La Ville dispose de trois déversoirs équipés de jeux de vannes de retenue pouvant évacuer un débit maximal de 51 m³/s :

- le canal du Thiou (canal principal) dont les vannes ont été changées en 1965,
- le canal du Vassé,
- le canal Saint Dominique.

La quasi-totalité du débit sortant transit par les deux premiers canaux, le troisième étant anecdotique.

Le niveau du Lac est régulé depuis 1874. Des travaux de modernisation des ouvrages de régulation ont eu lieu en 1965 ; ils ont eu pour effet d'augmenter la stabilisation de la cote du Lac. Entre temps, de 1906 à 1914 plusieurs phases de travaux ont été réalisées au droit du Thiou et du canal du Vassé (curage, recalibrage, bétonnage). Elles ont permis d'améliorer les écoulements dans les canaux d'Annecy.

Du point de vue de l'hydrologie du bassin versant du Lac d'Annecy (apport moyen, débits extrêmes, bilan hydrique mensuel...), le volume annuel d'eau entrant en jeu dans le bilan hydrique a été estimé à 290,4 10⁶ m³. Les données hydrométéorologiques récentes ont confirmé que la dernière décennie est plus sèche que la normale : un déficit de 13% du débit des émissaires du Lac (Thiou et canal du Vassé) a été enregistré.

Les événements extrêmes (crues et étiages) du niveau du Lac montrent que :

- pour les crues, il y a une baisse du nombre d'événements forts depuis les travaux de calibrage et bétonnage des canaux d'Annecy entre 1906 et 1914 ;

- pour les étiages, la mise en place de la régulation a limité l'apparition des étiages extrêmes. Ce phénomène s'est renforcé avec la modernisation des ouvrages de régulation en 1965.

L'ensemble de ces données associées aux courbes de tarage des émissaires du Lac et de la courbe de capacité de la retenue ont permis dans le cadre de ce module de modéliser le régime naturel du Lac en écoulement libre sous conditions climatiques actuelles. La simulation fait apparaître un marnage annuel de la cote moyenne mensuelle du Lac de 50 cm contre seulement 11 cm en régime régulé. En outre, une synthèse bibliographique a été menée pour faire l'état des lieux des connaissances scientifiques sur le changement climatique dans les Alpes à horizon 2050. Suite à cela, 9 scénarii de changement climatique ont été retenus. Le régime naturel du Lac a été calculé pour chacun de ces scénarii. Les résultats des simulations des 9 scénarii sont proches ; le marnage annuel de la cote moyenne du Lac à horizon 2050 est évalué à 60 cm. La principale différence entre la simulation sous condition climatique actuelle et sous condition de changement climatique concerne l'étiage : la cote minimale à horizon 2050 est inférieure de 10 cm par rapport à l'étiage actuel en régime naturel.

Module 2

Depuis plus d'une dizaine d'années, des opérations de restauration des roselières à grande échelle ont été menées sur différents lacs alpins sans pour autant évoquer spécifiquement la thématique du marnage. Ainsi bien que ce phénomène soit reconnu comme un des facteurs explicatifs de la régression de certaines roselières, il n'existe quasiment aucun retour d'expérience à ce sujet traitant notamment des éventuels gains écologiques et qui puisse être transposable à notre cas.

Module 3

L'objectif de ce module était d'étudier la relation entre le niveau du Lac et l'état d'inondation/exondation des roselières aquatiques pour trois secteurs du Lac d'Annecy : Les Marais de l'Enfer, le sentier des roselières et le Bout du Lac.

Pour mener à bien cette phase, un modèle numérique de terrain a été élaboré à partir de 14 000 relevés topographiques sur ces trois zones de manière à disposer d'un outil permettant de simuler pour différentes cotes, l'importance des surfaces de roselières (ou surfaces dénuées de végétation) exondées ou inondées.

Les amplitudes testées par pas de 10 cm se situent pour chacun des trois secteurs entre les cotes d'alertes actuelles à savoir 447.42 (cote d'alerte de crue – cote 125 cm à l'échelle du Pont de la Halle) et 446.42 (cote d'alerte étiage sévère - cote 25 cm à l'échelle du Pont de la Halle).

Concernant les exondations, et dans la mesure où la cote d'étiage sévère testée ne permettait pas une exondation suffisante des surfaces de roselière pour une bonne interprétation, deux autres simulations aux cotes 446,16 (cote -1 cm à l'échelle du Pont de la Halle) et 445,91 (- 26 cm à l'échelle du Pont de la Halle) ont été réalisées complémentaires.

Il ressort de ces simulations d'intéressantes informations notamment au niveau de la répartition de la roselière aquatique sur la beine lacustre.

Ainsi pour une hausse des niveaux compris entre 446,91³⁶ et 447,41 (124 cm à l'échelle du Pont de la Halle), les chiffres font apparaître des mises en eau significatives de roselières terrestres. Ainsi notamment on observe pour les Marais de l'Enfer et le Bout du Lac des surfaces importantes de roselières qui seraient inondées dès la cote 447,11 (94 cm) à savoir plus de 10 000 m² pour chacun

³⁶ Cette cote correspond à la cote moyenne observée sur la période 1965 – 2010 (cote 74 cm à l'échelle du Pont de la Halle)

de ces secteurs (représentant plus de 37 % des roselières aquatiques pour ce premier secteur et plus de 109 % pour le second).

Pour une baisse de la ligne d'eau entre 446,91 (74 cm à l'échelle du Pont de la Halle) et 445,91 (- 26 cm), les résultats montrent notamment que pour les trois secteurs étudiés, la répartition des roselières aquatiques est plus importante au large (entre 50 cm et 1 m de profondeur) que près de la berge là où est censée se développer pleinement la zone d'accumulation. Cette exondation progressive des roselières s'accompagne en effet d'exondation notable de surfaces dénudées. Ceci se traduit pour ces trois secteurs par des taux d'occupation (rapport entre la surface de roselière exondée et la surface totale exondée à la cote considérée) qui demeurent assez faibles puisque inférieurs à 50 % pour les cotes supérieures à 446,61 (44 cm à l'échelle du Pont de la Halle). Précisons même que pour le Bout du Lac, ce taux reste en deçà de 50 % pour quasiment toutes les cotes testées.

In fine, ces informations importantes indiquent de réelles potentialités de recolonisation par les roseaux au sein de secteurs peu profonds actuellement peu ou pas colonisés.

Module 4

Ce module qui constitue en quelque sorte l'aboutissement des précédents modules est consacré à l'étude de trois scénarii réalistes de rétablissement de marnage sur le Lac d'Annecy et traite de leurs impacts respectifs sur la végétation hélophytique et la faune (avifaune, odonates, Castor, ichtyofaune). Précisons que ces indicateurs faunistiques ont été retenus en raison de leur importance du point de vue de la caractérisation de l'écosystème lacustre et littoral et/ou de leur utilisation plus ou moins soutenue de l'habitat roselière aquatique.

On appelle ici scénario, un profil d'évolution répété annuellement et qui décrit les niveaux du Lac au pas de temps mensuel. Ce pas de temps mensuel a été retenu eu égard à l'écologie du roseau pour lequel des pas de temps plus courts n'ont que très peu d'influence.

Ces scénarii hydrologiques construits à partir des modules précédents ont été sélectionnés en fonction de différentes clés d'entrée. Ainsi :

- le scénario 1 est basé sur les besoins écologiques d'une roselière aquatique avec notamment deux périodes de basses eaux et une période de hautes eaux (Cf. § ci-dessous),
- le scénario 2 reprend quant à lui une évolution des cotes « en régime naturel » (modélisé au module 1) mais transposée à la cote moyenne actuelle,
- le scénario 3 tient compte pour sa part partiellement la courbe simulée à l'horizon 2050 dans le module 1.

Les marnages envisagés ici oscillent entre 50 et 74 cm en fonction du scénario.

Précisons que comme évoqué ci-dessus notamment vis-à-vis de l'écologie du roseau, chaque scénario propose des objectifs de niveau à tenir en moyenne mensuelle. Cependant dans les faits et dans l'hypothèse d'une phase opérationnelle, des variations sur quelques jours seront bien évidemment possibles, par rapport aux autres contraintes spécifiques liées à la régulation du lac (prévention des inondations notamment).

D'une manière générale et avant de s'intéresser plus en détails aux impacts écologiques, il est important de faire observer qu'il est à présent reconnu scientifiquement que les variations saisonnières de niveaux d'eau jouent un rôle important dans la confortement et la stimulation des roselières aquatiques. Ainsi notamment :

- Des épisodes de hautes eaux en particulier en hiver permettent d'élargir la surface de dissipation énergétique des vagues et contribuent bénéfiquement à disperser plus en arrière de la roselière, les flottants et la matière organique diminuant de fait les « effets de cordons » voire de

sapement de berges observés sur Annecy notamment au Bout du Lac et dans une moindre mesure sur les Marais de l'Enfer.

- Des épisodes de basses eaux contribuent, si elles ont lieu à des périodes favorables, d'une part à la pousse des végétaux (printemps) et d'autre part à la minéralisation de la matière organique (fin d'été) de par l'oxygénation des sédiments et de ses effets induits. Tout comme la hausse, ces baisses contribuent également du point de vue mécanique à élargir la bande de dissipation énergétique des vagues.

Ces observations étant faites, il ressort de l'analyse que concernant la roselière aquatique, le scénario 1 de rétablissement de marnage demeure logiquement et par construction le plus propice à l'expansion des roselières tant vers le front des roselières qu'au sein des zones d'accumulation actuelles dont les taux d'occupation pourraient être réellement améliorés.

Le scénario 2 interroge quant à lui sur deux niveaux d'impact qui s'opposent (hautes eaux au Printemps et début d'été *versus* basses eaux en fin d'été) et dont la résultante pourrait faire basculer vers une expansion (impact positif) ou une dégradation des roselières (impacts négatifs).

Le scénario 3 semble quant à lui médian entre les deux scénarii puisqu'avec un niveau estival le plus bas et cela sur plus de deux mois, l'impact positif qu'induirait cette phase compenserait certainement les niveaux assez hauts jusqu'en fin de printemps qui par ailleurs seront baissés rapidement (et donc parallèlement à la croissance des pousses de roseaux). La phase estivale de ce scénario interroge même quant à un éventuel déplacement de la zonation des roselières aquatiques vers le large avec une évolution du cortège floristique à proximité des berges actuelles qui pourraient voir apparaître des espèces hygrophiles moins caractéristiques d'un milieu purement aquatique.

Concernant la faune, deux approches sont nécessaires pour résumer les niveaux d'impact :

- Une première approche concerne le gain ou la perte à termes de l'habitat roselière en fonction du scénario envisagé,
- une seconde approche s'intéresse davantage aux éventuels impacts dus aux périodes de basses eaux et hautes eaux envisagées au cours de l'année notamment vis-à-vis des cycles biologiques des espèces.

Ainsi il apparaît clairement que pour la première approche, la positivité ou la négativité des impacts sur la faune en général sera étroitement liée à la réaction des roselières au vu du marnage envisagé. Ainsi, un scénario favorisant une expansion et une densification de la phragmitaie aquatique sur le Lac sera plus propice à la faune que celui induisant une stagnation voire une dégradation de cette dernière. Là encore il semble qu'au vu des éléments évoqués précédemment les scénarii 1 et 3 se détachent du scénario 2 puisqu'ils seraient à priori plus favorables (surtout le 1) au développement des roselières.

Pour la seconde approche, il ressort essentiellement que les impacts demeurent peu significatifs et relativement comparables (notamment pour les périodes de basses eaux) d'un scénario à l'autre et cela pour ce qui concerne l'avifaune les odonates, et le Castor, et la quasi-totalité de la faune piscicole. Néanmoins concernant la Truite, des vérifications sont à faire sur la connectivité hydraulique des confluences pour les cotes basses envisagées dans le cadre du scénario 1 et surtout le n°3, ceci afin de s'affranchir de tout risque de limitation quant aux remontées de géniteurs en début de période de reproduction.

In fine, il est important de retenir que le rétablissement d'un marnage sur le Lac d'Annecy, en l'état actuel des connaissances doit être bénéfique pour les roselières aquatiques et l'ensemble des habitats littoraux. Dans le cadre d'une régulation réaliste en termes de cotes extrêmes, et en s'affranchissant de toute contrainte socio-économique, il existe au jour d'aujourd'hui des conditions

hydrologiques techniquement possibles à mettre en œuvre qui pourraient être véritablement favorables à une expansion et/ou une densification des roselières aquatiques du Lac.

C'est ce que montre au moins un des scénarii étudiés dans le cadre de la présente étude. Outre la phragmitaie aquatique, ce type de scénario aura au final un impact écologique globalement positif notamment sur les espèces animales fréquentant de manière plus ou moins continue cet habitat.

Néanmoins, il convient d'être prudent quant à la vitesse de réponse de cet habitat et cela quel que soit le scénario envisagé dans la mesure où d'une part cette cinétique est liée à l'état de dégradation locale des roselières et d'autre part on constate un réel déficit de retour d'expériences à ce niveau.

C'est pourquoi, si un tel rétablissement était envisagé, il serait très important de mettre en place un suivi rigoureux notamment de la végétation des roselières en termes d'évolution quantitative et qualitative mais également au niveau de quelques indicateurs liés à la faune comme par exemple l'avifaune hivernante et nicheuse utilisant ce type d'habitat.

