

ORIGINE DE LA POLLUTION DU LÉMAN PAR LE CHLORURE ¹

PAR

Damien GUMY et Luiz F. de ALENCASTRO

LABORATOIRE DE GESTION DES ECOSYSTÈMES - ECOTOXICOLOGIE,
ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE, CH - 1015 LAUSANNE

RÉSUMÉ

Les différentes sources du chlorure se déversant dans le lac Léman ont été répertoriées et quantifiées à l'aide d'extrapolations. Les résultats présentés sont issus de la littérature, de mesures effectuées par la CIPEL et différents services cantonaux vaudois et valaisans, ainsi que des rapports d'activité des deux salines suisses (les Salines de Bex et celles du Rhin).

Depuis une trentaine d'années, on constate une augmentation constante du stock de chlorure dans le Léman. En effet, la concentration en ion chlorure avoisinait 2 mg/l en 1965, alors qu'elle approche 7.5 mg/l en 2000.

Les résultats de ce travail montrent que les deux sources principales du chlorure sont l'industrie, avec plus de 50 % des apports, et les sels de déneigement, avec environ 20 % des apports. Par contre, les apports provenant de la déphosphatation dans les stations d'épuration sont négligeables (environ 3 %).

Une recherche bibliographique des valeurs de toxicité du chlorure pour différentes espèces aquatiques a également été effectuée. Les concentrations actuelles du Léman en chlorure sont bien inférieures aux valeurs trouvées. Il est possible que certains organismes soient affectés par une telle augmentation de la concentration de chlorure. Les études dans ce domaine sont très sommaires.

1. INTRODUCTION

1.1 Le chlorure

Le chlorure est utilisé en Suisse dans de nombreux domaines : industrie, agriculture, traitement de l'eau, entretien hivernal des routes ... Son utilisation s'est accrue dans la seconde moitié du 20^e siècle, ce qui a entraîné une hausse de sa concentration dans les rivières et dans les effluents des stations d'épuration qui ne le retiennent pas.

Le stock de chlorure du lac Léman a donc régulièrement augmenté depuis les années 60 (par exemple : + 260 % de 1961 à 1999 dans le Petit Lac et + 160 % de 1971 à 1999 dans le Grand Lac).

Dans ce travail, nous analysons les différentes sources de chlorure pour essayer d'estimer leur part respective dans cette augmentation du stock et leur évolution dans le futur.

Nous essayons également de comparer les valeurs obtenues avec les toxicités connues du chlorure pour différentes espèces aquatiques, afin d'apprécier si l'environnement ne court pas un risque à plus ou moins long terme.

Les résultats présentés dans ce rapport sont tous issus de la littérature ou sont le résultat de mesures et d'enquêtes effectuées principalement par la CIPEL (Commission internationale pour la protection des eaux du Léman). Aucune mesure ou expérience n'a été faite par les auteurs, qui se sont contentés de rassembler des informations et d'en tirer des conclusions.

¹⁾ Travail réalisé dans le cadre d'un Séminaire interdisciplinaire 2000 du Département de Génie Rural de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

1.2 Le Léman

La plupart des résultats figurant dans ce rapport sont le fruit d'extrapolations qui se basent sur les données résumées ci-dessous (CIPEL, 2000) :

Volume moyen :	89 km ³ soit 89 milliards de m ³
Temps de séjour théorique des eaux :	11.4 ans
Principaux affluents :	Rhône : 68 % des apports Dranse : 7.5 % Autres affluents : 8.9 % Origines atmosphériques : 7.8 %
Bassin versant	
Surface du bassin versant :	7'395 km ² dont : France : 890 km ² Suisse : 6'505 km ²
Population permanente (01.01.99) :	933'750 dont : France : 125'900 Suisse : 807'850

2. CONCENTRATION ET STOCK DE CHLORURE

2.1 Concentration et stock de chlorure dans le Léman

Des mesures régulières des teneurs en chlorure sont effectuées depuis 1957 pour le Petit Lac, et depuis 1971 pour le Grand Lac. Depuis cette date, les concentrations de chlorure sont mesurées mensuellement en différents points du lac et à différentes profondeurs.

Au début des années 60, la concentration était constante et se situait vers 2 mg/l d'ion chlorure dans le Petit Lac (Annexe 1).

On constate depuis le milieu des années 60 une augmentation plus ou moins linéaire de la concentration : elle est passée de 2 mg/l, à 7.2 mg/l pour 1999. Ce qui représente une augmentation de 260 % en moins de 40 ans (figure 1).

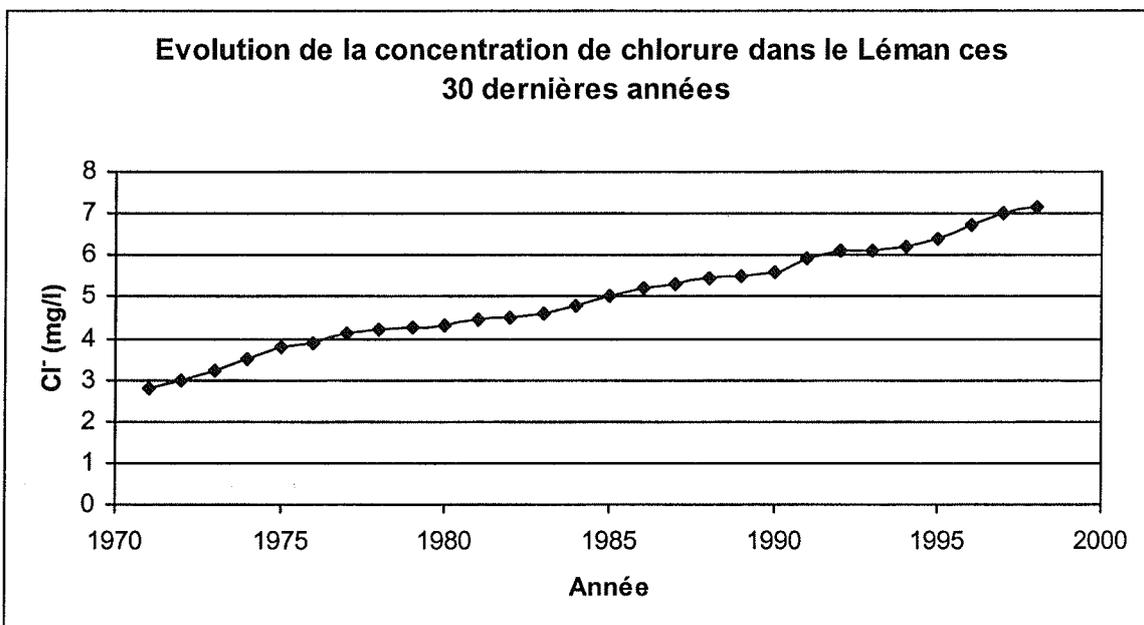


Figure 1 : Concentration de chlorure dans le Léman - moyenne pondérée toutes profondeurs (CIPEL, 2000)

Il n'y a pas de variation saisonnière marquée : l'évolution mensuelle des concentrations moyennes pondérées, ainsi que les valeurs observées en surface pour l'ensemble des stations, ne mettent pas en évidence de variations systématiques.

Le stock de chlorure est passé de moins de 250'000 tonnes en 1971, à plus de 600'000 tonnes en 1999.

L'augmentation moyenne annuelle du stock de chlorure dans le Léman est de l'ordre de 14'500 t/an (figure 2).

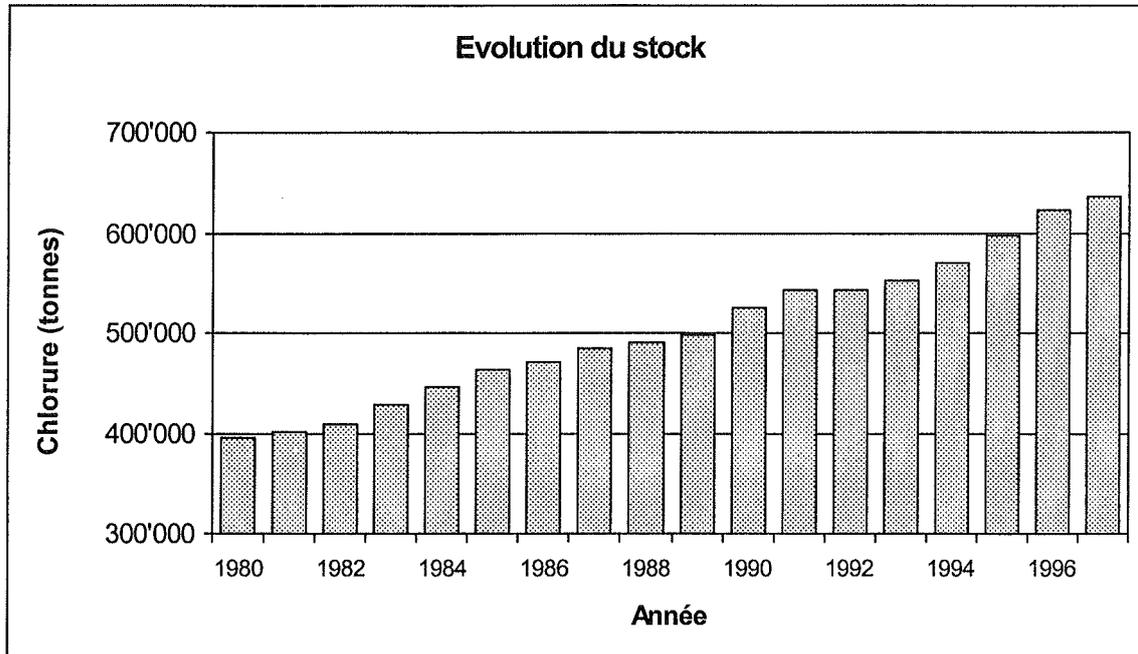


Figure 2 : Evolution du stock de chlorure dans le Léman (CIPEL, 2000)

Des études réalisées dans les années 70, ont montré que les concentrations de chlorure diminuaient sensiblement avec la profondeur, mais qu'elles étaient relativement constantes les années de circulation totale (1971 et 1981) (figure 3).

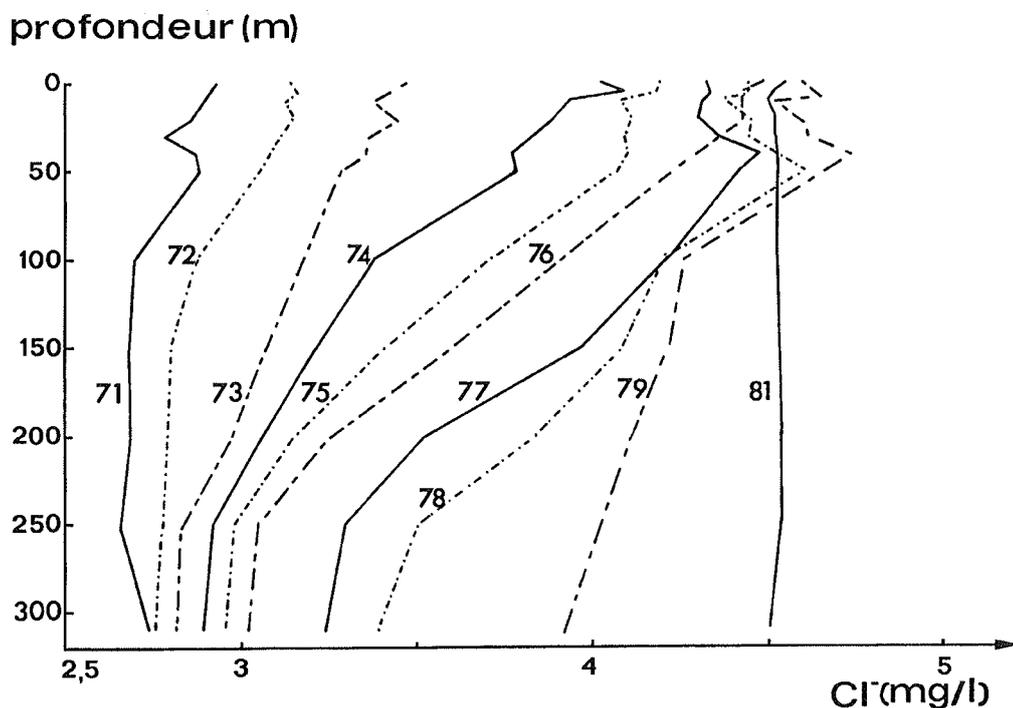


Figure 3 : Concentration de chlorure en fonction de la profondeur - moyennes annuelles - Grand Lac (CORVI, 1984)

2.2 Apports totaux

Les mesures des concentrations de chlorure de ces dernières années du Léman et celles de son émissaire, le Rhône, nous permettent de faire une première estimation des apports totaux de chlorure dans le lac. En effet, on a :

$$\Delta S + Q_s = Q_e$$

avec : ΔS = augmentation du stock de chlorure dans le Léman
 Q_s = flux de chlorure sortant par le Rhône émissaire
 Q_e = flux de chlorure entrant

ce qui nous donne pour les 20 dernières années des apports compris entre 42'000 et 79'000 tonnes de chlorure par an (figure 4).

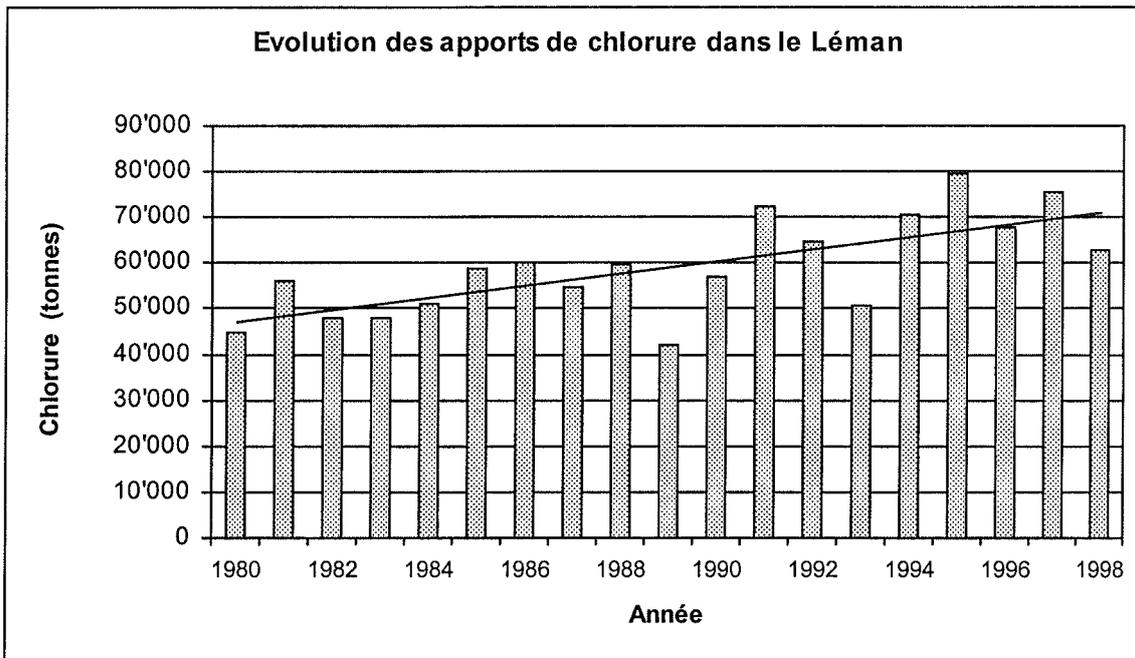


Figure 4 : Apport de chlorure dans le Léman 1980-1998

On constate d'assez grandes variations annuelles des tonnages avec toutefois une nette tendance à l'augmentation. On peut estimer les apports entre 55 et 65'000 tonnes par an pour les années 90.

Si l'on calcule une droite de tendance, on met en évidence cette augmentation des apports, qui passent de 50'000 tonnes pour 1980 à environ 65'000 tonnes pour la fin du siècle.

Ces premières estimations des apports seront comparées aux extrapolations des quantités des différentes sources de chlorure (voir chapitre 4).

3. TOXICITÉ ET NORMES

3.1 Toxicité

Le chlorure n'est pas très toxique pour les organismes aquatiques, mais il peut influencer l'équilibre osmotique du milieu. Toutes les valeurs de toxicité trouvées dans la littérature sont largement supérieures aux concentrations que l'on retrouve dans le Léman ou dans ses affluents. Néanmoins, le manque de données complètes pour les espèces vivant dans le Léman ne nous permet pas de porter un jugement définitif sur les effets de l'augmentation du stock de chlorure sur l'environnement. On ne possède notamment aucune mesure pour le microplancton qui pourrait, s'il était affecté par l'augmentation du chlorure, influencer toute la chaîne trophique.

Il faut également noter que bien que le chlorure soit non toxique pour l'homme, il donne à l'eau de consommation un goût salé désagréable perceptible dès 100 mg/l. C'est pourquoi l'on retrouve souvent des valeurs limites dans les diverses recommandations concernant les concentrations de chlorure à ne pas dépasser pour les eaux de consommation.

Les eaux utilisées à des fins agricoles ne doivent pas être trop chargées en chlorure pour deux raisons :

- il devient toxique pour les plantes à partir d'une certaine concentration dépendante des espèces (limite pour l'eau d'irrigation pour les plantes sensibles : 100 mg/l - Environnement Canada, 2001)
- une eau d'irrigation trop salée peut entraîner la salinisation du sol et le rendre stérile.

Résumé des différents tests sur la toxicité du chlorure :

Espèces	Tests ou effets	Référence
Poissons :		
- Tête de boule (<i>Pimephales promelas</i>)	LC ₅₀ à 96h : 7'650 mg Cl⁻/l	HELLAWELL, 1986
- Poisson rouge (<i>Carasius auratus</i>)	LC ₅₀ à 96h : 7'341 mg Cl⁻/l	HELLAWELL, 1986
- <i>Gambusia affinis</i>	LC ₅₀ à 96h : 9'100 mg Cl⁻/l pour du NaCl LC ₅₀ à 48h : 9'585 mg Cl⁻/l pour du CaCl ₂	HELLAWELL, 1986

Espèces	Tests ou effets	Référence
Invertébrés :		
- Trichoptères	Pas d'effet sur leurs mouvements en dessous de 800 mg Cl ⁻ /l	CROWTHER et HYNES, 1977
- <i>Hydropsyche betteni</i>		
- <i>Cheumatopsyche analis</i>		
Crustacés :	Effets apparents à partir de 1'000 mg Cl⁻/l	
- <i>Gammarus pseudo limnaeus</i>		
- <i>Daphnia magna</i>	KCl EC ₅₀ à 24h : 298.5 mg Cl⁻/l 48h : 128.8 mg Cl⁻/l CaCl ₂ EC ₅₀ à 24h : 1'017.1 mg Cl⁻/l 48h : 680.9 mg Cl⁻/l CaCl ₂ EC ₅₀ à 24h : 621.4 mg Cl⁻/l 48h : 621.4 mg Cl⁻/l	KHANGAROT et RAY, 1989
Macrophytes :		
- <i>Potamogeton alpinus</i>	Seuils de toxicité :	50 mg Cl⁻/l
- <i>Potamogeton crispus</i>	Seuils de toxicité :	300 mg Cl⁻/l

3.2 Normes et recommandations

En Suisse, il existe plusieurs normes ou recommandations concernant les concentrations de chlorure dans les eaux :

- Le Manuel suisse des denrées alimentaires dans sa directive 27A préconise 20 mg/l Cl⁻ comme valeur indicative de qualité et 200 mg/l Cl⁻ comme valeur à ne pas dépasser pour l'eau de boisson.
- L'Ordonnance fédérale suisse du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux, dans son annexe 2, exige une concentration en chlorure inférieure à 40 mg/l Cl⁻ pour les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être.

Il est à noter qu'aucune exigence ne limite les concentrations de chlorure dans les cours d'eau ou dans les effluents des stations d'épuration.

Dans le reste du monde :

- Le Conseil de l'Union Européenne dans sa directive du 3 novembre 1998 fixe à 250 mg/l Cl⁻ la concentration à ne pas dépasser dans les eaux destinées à la consommation.
- L'OMS préconise également une concentration de 250 mg/l Cl⁻ dans l'une de ses directives sur les eaux destinées à la consommation.
- Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection des utilisations de l'eau à des fins agricoles. Eau d'irrigation : la concentration en ion Cl⁻ ne doit pas dépassé 100 mg/l pour les cultures sensibles et 700 mg/l pour les cultures tolérantes (Environnement Canada, 2001).

4. ORIGINE DU CHLORURE

4.1 Bilan

En terme de bilan, les apports de chlorure au Léman sont de quatre types :

- les apports atmosphériques,
- le ruissellement non pris en compte dans les rivières surveillées,
- les apports par les affluents,
- les apports par les stations d'épuration se déversant directement dans le lac.

Les exportations sont d'un seul type :

- le Rhône émissaire.

4.1.1 Les affluents et l'émissaire

Les apports au Léman par les rivières sont calculés à partir des analyses sur des prélèvements en continu (proportionnels aux débits) pour les quatre affluents principaux (Rhône amont, Dranse, Aubonne et Venoge) et de prélèvements sur sept affluents secondaires. Les exportations du lac sont contrôlées sur le Rhône émissaire à Genève.

Les flux de ces 15 dernières années pour les principaux affluents ainsi que celui de l'émissaire (le Rhône) varient fortement d'une année à l'autre (cf. figures 5 et 6). On remarque une augmentation de la concentration et du tonnage dans le Rhône, à l'amont et à l'aval du lac, ainsi que dans tous les affluents du Léman (cf. figure 7 + Annexes 2 et 3).

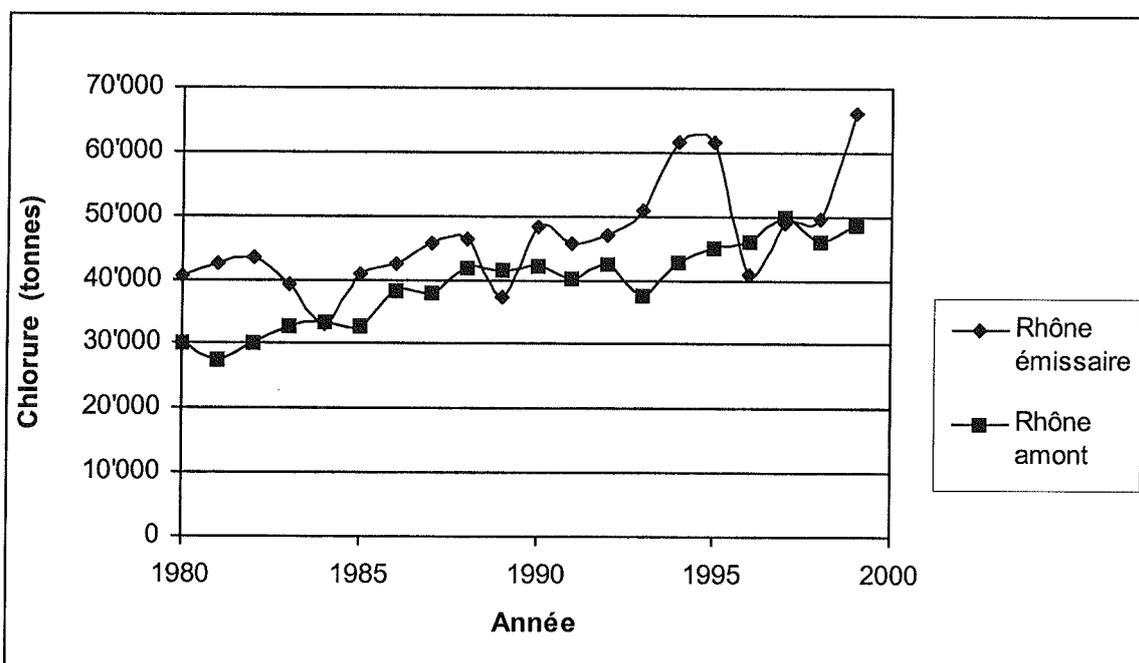


Figure 5 : Tonnage du chlorure dans le Rhône 1980-1999 (CIPEL, 1981 à 2000)

Les apports sont passés de 30'000 tonnes en 1980 à presque 50'000 tonnes d'ion chlorure en 1999 dans le Rhône amont (+ 66 %).

La courbe du Rhône émissaire varie fortement à cause des importantes variations annuelles de débits, mais on peut quand même constater qu'elle suit la même tendance que celle du Rhône amont.

Si l'on compare les flux du Rhône amont avec les apports totaux calculés au chapitre 2.2, 4.1.5 et 4.2.8, on constate que la plupart des apports de chlorure viennent du Rhône (~ 80 %).

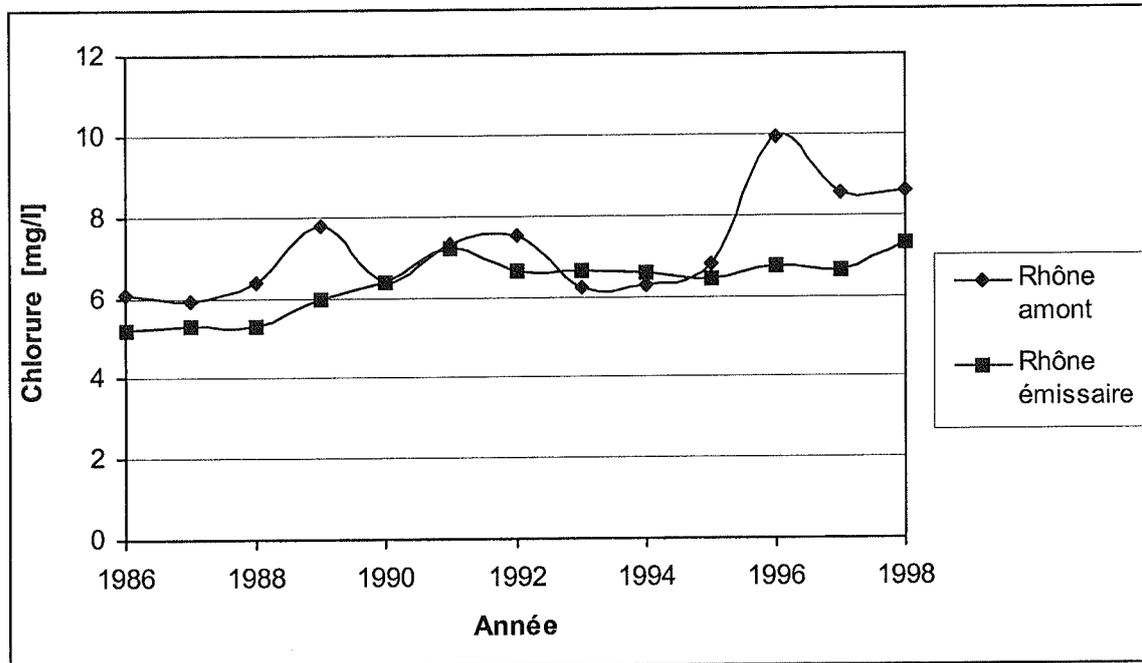


Figure 6 : Concentration de chlorure dans le Rhône amont et émissaire (CIPEL, 1987 à 2000)

Ces quinze dernières années, les apports par les rivières sont passés de 40'000 tonnes à environ 55'000 tonnes de Cl^- par an (figure 7).

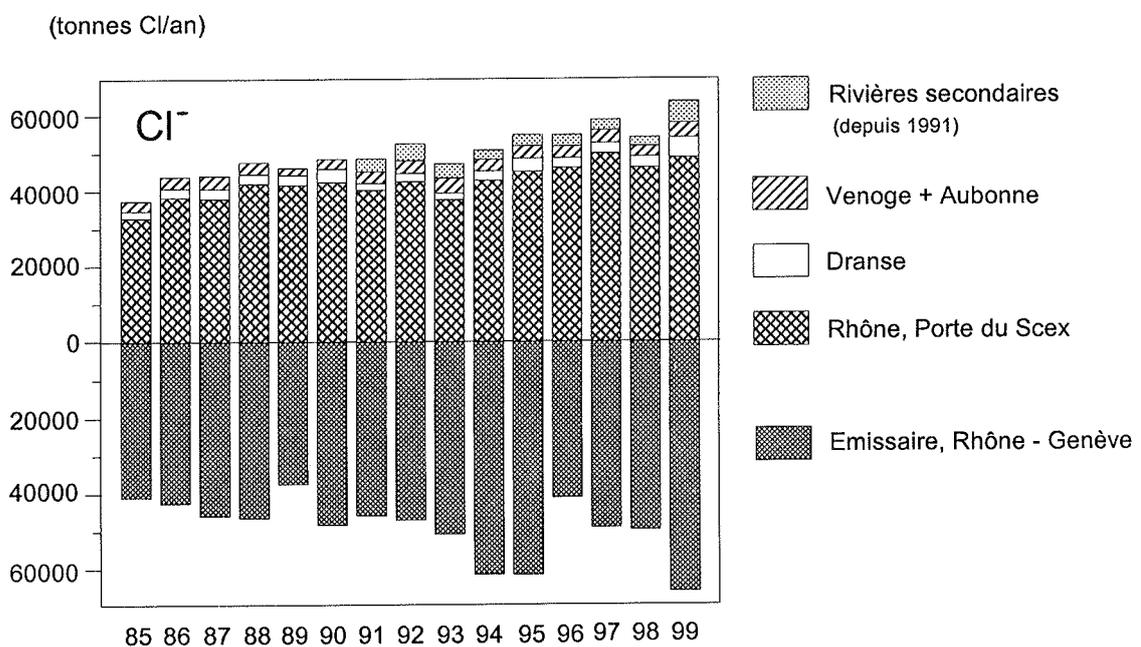


Figure 7 : Apports annuels par les affluents principaux et secondaires et perte annuelle par l'émissaire (CIPEL, 2000)

4.1.2 STEP se déversant directement dans le lac

Les apports provenant des différentes STEP se déversant directement dans le lac ont pu être estimés par l'extrapolation des mesures récoltées par le service des eaux du canton de Vaud dans les différentes STEP vaudoises. Le chlorure est mesuré hebdomadairement dans la plupart des stations vaudoises. On obtient donc les quantités de chlorure déversées dans le lac par les STEP en multipliant les concentrations moyennes par les débits moyens mesurés (voir Annexe 4).

Les STEP concernées sont celles de : Lausanne-Vidy, Gland, Montreux, Morges, Nyon, Rolle, Vevey, Lutry, Saint-Prex pour le canton de Vaud, et celles de Thonon et du Bas-Chablais (Douvine) pour la France.

Les autres STEP ne sont pas prises ici en considération car leurs effluents se déversent dans des rivières. Leurs apports en chlorure sont donc déjà comptabilisés dans le chapitre précédent.

Les mesures de toutes ces stations donnent un apport de chlorure compris entre 5'000 et 5'500 tonnes par an.

On ne constate pas d'augmentation significative des concentrations dans les STEP. Elles sont relativement constantes ces dix dernières années.

Notons encore que les concentrations en chlorure dans les effluents varient très fortement d'une STEP à l'autre, et qu'elles sont largement supérieures à celles des rivières (40 à 150 mg/l Cl⁻).

En 1999, on avait pour :	Lausanne, une moyenne de	63 mg/l Cl ⁻
	Gland	90 mg/l Cl ⁻
	Nyon	140 mg/l Cl ⁻

4.1.3 Les apports atmosphériques

Les apports provenant des précipitations directes ont pu être estimés par des mesures effectuées par différents laboratoires suisses et français (Service cantonal d'écotoxicologie à Genève, Laboratoire du Service des eaux, sols et assainissement vaudois, Station d'hydrobiologie lacustre INRA, Thonon) (CIPEL, 1994).

Les résultats ci-dessous proviennent de la moyenne de 7 stations de mesures situées sur le pourtour du lac.

Année	Cl ⁻ (tonnes/an)
1988	391
1989	299
1991	304
1993	278

On a en moyenne environ 300 tonnes de Cl⁻ par an qui proviennent des précipitations dans le lac. On parle ici des pluies tombant directement sur le Léman, et non de celles tombant sur tout le bassin versant.

4.1.4 Le ruissellement non pris en compte dans les rivières surveillées

La part des apports se faisant par ruissellement ne peut pas être déterminée directement en l'absence de mesures. On ne peut les déterminer qu'indirectement en soustrayant aux apports totaux, les trois autres types d'apports.

Ces apports sont de toute façon assez insignifiants. En effet, si on additionne les apports par les affluents et les apports par les STEP, il ne reste plus grand chose pour le ruissellement.

4.1.5 Récapitulatif

En additionnant les différents types d'apports on obtient les résultats suivants :

Apports :	- Affluents :	55'000	-	60'000	t Cl ⁻ /an
	- STEP :	5'000	-	5'500	t Cl ⁻ /an
	- Précipitations :	300		300	t Cl ⁻ /an
Total :		60'300	-	65'800	t Cl⁻/an

L'estimation par addition des différents apports est du même ordre de grandeur que celle effectuée aux chapitres 2.2 et 4.2.9. Remarque : Ce bilan ne tient pas compte de l'apport par le ruissellement des bassins versants des rivières non surveillées.

4.2 Sources

Les principales sources de chlorure pour la Suisse sont les suivantes :

Sources anthropiques :

- Industrie et artisanat
- Sel de déneigement
- Agriculture
- Sel alimentaire
- Sel régénérant et adoucissant
- Epuration, potabilisation des eaux.

Sources naturelles :

- Erosion
- Précipitations.

Pour chacune d'elles, une estimation de la part des apports qu'elle représente a été effectuée. Les méthodes de détermination seront décrites pour chaque différente source.

Cependant, l'absence de statistiques complètes ne permet pas l'établissement de bilan absolu de répartition.

La quasi-totalité du sel vendu en Suisse provient soit des Salines de Bex pour le canton de Vaud, soit des Salines du Rhin pour tous les autres cantons. La plupart des apports ont pu être estimés par extrapolation des quantités produites par les deux salines (voir Annexes 6 et 7).

Salines de Bex :	surface desservie :	3'212 km ²
	population desservie :	601'800
Salines du Rhin :	surface desservie :	8'073 km ²
	population desservie :	6'271'900

Les extrapolations ont été faites soit en fonction des surfaces, soit en fonction de la population suivant la source considérée, en tenant compte des particularités des différents cantons considérés :

Vaud : très faible industrialisation, % de terres agricoles au-dessus de la moyenne suisse.

Valais : très forte industrialisation le long du Rhône, canton montagneux, % de terres agricoles en dessous de la moyenne suisse.

4.2.1 Industrie et artisanat

Le sel est utilisé en grande quantité par l'industrie pour beaucoup d'applications différentes. Les industries chimiques l'utilisent pour la préparation du chlore, la neutralisation par l'acide chlorhydrique et pour de nombreuses autres réactions chimiques. Le sel est aussi utilisé dans l'industrie pharmaceutique, dans la métallurgie et dans beaucoup d'autres secteurs de l'industrie.

L'industrie chimique représente la source principale des apports de chlorure dans le Léman. Les rapports de gestion des deux salines de Suisse (Saline de Bex et Saline du Rhin), nous permettent d'estimer ces apports. Ils sont de l'ordre de 35'000 à 38'000 tonnes Cl⁻ par an, ce qui représente plus de 50 % des apports.

L'analyse des effluents des stations d'épuration de Viège et Monthey montre l'importance de l'industrie valaisanne dans la part des apports en chlorure. Ces deux stations d'épuration sont de type mixte, c'est-à-dire qu'elles traitent en même temps les eaux usées domestiques et industrielles.

La STEP de Monthey - CIMO traite également les eaux provenant de l'usine NOVARTIS et CIBA-Spécialités, dans lesquelles la concentration moyenne en chlorure pour l'année 1999 dépassait les 4'000 mg/l. Ce qui nous donne pour cette même année un flux proche de 23'000 tonnes d'ion chlorure (valeur confirmée par NOVARTIS).

La STEP de Viège traite également les eaux de l'usine LONZA, où l'on retrouve une concentration moyenne en chlorure également très élevée pour l'année 1999, proche de 2'000 mg/l. Ce qui nous donne pour cette même année un flux proche de 10'000 tonnes d'ion chlorure (valeur confirmée par LONZA).

Ces deux usines contribuent à près de la moitié des apports en chlorure de tout le bassin versant du Léman.

Les quantités de sel utilisées par l'industrie ne cessent de croître ces dernières années (voir Annexe 6). On peut relier l'augmentation de cette source de chlorure à l'expansion de l'industrie chimique.

4.2.2 Sel de déneigement

En association avec d'autres moyens de lutte, les chlorure de sodium et de calcium sont utilisés pour l'entretien du réseau routier. Ces sels contiennent respectivement 60.7 % et 64 % d'ion chlorure. Les chiffres fournis par le service cantonal vaudois des routes et par le service communal lausannois des routes, ainsi que ceux fournis par les Salines de Bex et les Salines du Rhin, nous permettent d'estimer les apports au lac que représente cette source.

Ils sont de l'ordre de 10'000 - 15'000 tonnes par an (moyenne sur ces 30 dernières années), ce qui représente en moyenne environ 15 à 20 % des apports totaux et place cette source en deuxième position après l'industrie.

Ce chiffre varie fortement en fonction des années (conditions météorologiques); en 1994, le canton de Vaud n'a utilisé que 3'500 tonnes de chlorure pour ses routes nationales et cantonales, alors qu'il en a utilisé 13'000 en 1999 (voir Annexe 5). Ces grandes fluctuations conditionnent fortement le total des apports annuels de chlorure au lac. En effet, les années avec des gels fréquents, on est plus proche des 20'000 tonnes. Ces années-là, les salines du Rhin vendent autant de sel destiné au traitement des routes, qu'à l'industrie (voir Annexe 6).

En Suisse, l'Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement (OSubst, 1986) fixe les conditions du salage des routes.

4.2.3 Agriculture

Le chlorure est utilisé dans l'agriculture sous forme de chlorure de sodium pour l'alimentation du bétail et sous d'autres formes dans certains engrais.

Les chiffres fournis par les Salines du Rhin (17'000 tonnes de NaCl vendues par année en moyenne) et par les Salines de Bex (1'300 tonnes), nous permettent d'extrapoler la quantité de chlorure provenant de la consommation du bétail. On arrive à un total de 1'800 tonnes d'ion chlorure par an.

On doit ajouter à ce chiffre la quantité de chlorure provenant des engrais. On admet qu'elle est de l'ordre de 3'400 tonnes Cl⁻/an (enquête Commune de Lausanne, CORVI, 1984). Ce qui nous donne un total de 5'200 tonnes de Cl⁻/an pour l'agriculture, soit environ 7 % des apports totaux.

4.2.4 Sel alimentaire

Selon l'Annuaire suisse de la statistique, la consommation annuelle de sel de cuisine est relativement constante depuis 1950, de l'ordre de 50'000 tonnes par an, ce qui correspond à une consommation journalière moyenne par habitant d'environ 20 g de chlorure de sodium (sel alimentaire "industriel" compris).

Pour le bassin lémanique (904'550 habitants), la consommation de sel de cuisine correspond donc à 6'600 tonnes/an, soit l'équivalent de 4'000 tonnes d'ion chlorure par an qui représentent environ 5 % des apports totaux.

Les Salines du Rhin ont vendu entre 45'000 et 50'000 tonnes de sel alimentaire ces dix dernières années et les Salines de Bex entre 1'500 tonnes et 2'500 tonnes. On arrive donc au même ordre d'estimation que précédemment.

4.2.5 Adoucisseurs d'eau

Le chlorure est utilisé comme adoucisseur d'eau sous forme de NaCl dans les machines à laver la vaisselle par les ménages.

La production de sels adoucisseurs par les Salines du Rhin s'élève en moyenne à 35'000 tonnes de NaCl par an, ce qui représente environ 21'000 tonnes d'ion chlorure pour toute la Suisse.

Cette valeur extrapolée au bassin versant du Léman correspond à 3'000 tonnes de Cl⁻ par an, soit environ 4 % des apports totaux.

4.2.6 Epuration

Afin de lutter contre l'eutrophisation du lac, la déphosphatation est obligatoire en Suisse, comme en France. Celle-ci se fait dans la plupart des STEP de façon chimique par précipitation des ions phosphates par du chlorure ferrique FeCl₃.

Les STEP utilisent une solution à 40 % de FeCl₃, qui contient 262 grammes d'ion chlorure par kilo de solution.

Les quantités annuelles de solution utilisées par la STEP de Vidy (Lausanne) sont de l'ordre de 1'500 à 2'000 tonnes, ce qui représente environ 500 tonnes d'ion chlorure par an.

Par extrapolation, on obtient environ 2'000 à 2'500 tonnes par an pour le bassin versant.

Ces estimations sont confirmées par la comparaison des mesures en entrées et sorties de stations d'épuration vaudoises et valaisannes de ces dernières années :

$$\text{Cl}^- \text{ sortie} - \text{Cl}^- \text{ entrée} = \text{Cl}^- \text{ utilisé pour déphosphater}$$

On obtient à peu près le même ordre de grandeur en utilisant cette deuxième méthode d'estimation (Annexe 4).

La déphosphatation ne représente environ que 3 % des apports totaux, ce qui en fait une source peu importante en comparaison de l'industrie et du traitement des routes.

La quantité de sel utilisée pour la déphosphatation varie en fonction des débits traités par les STEP et de leur teneur en phosphate. Elle est relativement constante et devrait le rester.

4.2.7 Erosion

Les apports dus à l'érosion sont d'origine géologique. La dissolution de chlorure de sodium ou de potassium libère des ions chlorure

Par le biais de l'étude d'IMBODEN (1973), on peut extrapoler la part due à l'érosion à environ 2'300 à 2'900 tonnes/an en pondérant le chiffre suisse par la surface du bassin lémanique.

On peut considérer ces apports comme constants au cours du temps.

4.2.8 Précipitations

Les précipitations contiennent du chlorure provenant principalement du sel marin ainsi que des rejets d'incinération d'ordures ménagères.

L'extrapolation des valeurs obtenues pour les précipitations directes au lac (chapitre 4.1.3) pour tout le bassin versant donne les résultats suivants :

Année	Cl ⁻ (tonnes/an)
1988	5'376
1989	4'111
1991	4'180
1993	3'823

soit un apport d'environ 4'000 tonnes annuel. La totalité n'arrivant évidemment pas au lac, il est difficile d'estimer les apports réels de cette source.

4.2.9 Résumé

La quantité de chlorure utilisée dans le bassin versant, et celle liée à l'érosion et aux précipitations, qui pourraient arriver dans le lac, estimée par addition des différentes sources, est voisine de 70'000 tonnes/an. Ce bilan est légèrement supérieur à ceux estimés précédemment (ch. 2.2 et 4.1.5) en faisant la somme des apports mesurés. Ceci est dû en partie au fait que la totalité des apports des différentes sources considérées n'arrive pas au lac. C'est notamment le cas pour le chlorure provenant de l'agriculture, des précipitations et des sels de déneigement. On reste tout du moins dans le même ordre de grandeur.

Industrie :	35'000	-	38'000	tonnes/an
Déneigement :	10'000	-	15'000	"
Alimentaire :			4'000	"
Adoucisseur d'eau :			3'000	"
Déphosphatation :	2'000	-	2'500	"
Erosion :	2'300	-	2'900	"
Précipitations :			4'000	"
Agriculture :			5'000	"
Total :	66'400	-	75'500	tonnes/an

La répartition des sources en différents secteurs (voir ci-dessous) montre bien l'importance de l'industrie et de l'entretien des routes, qui représentent près de 3/4 des apports à eux deux.

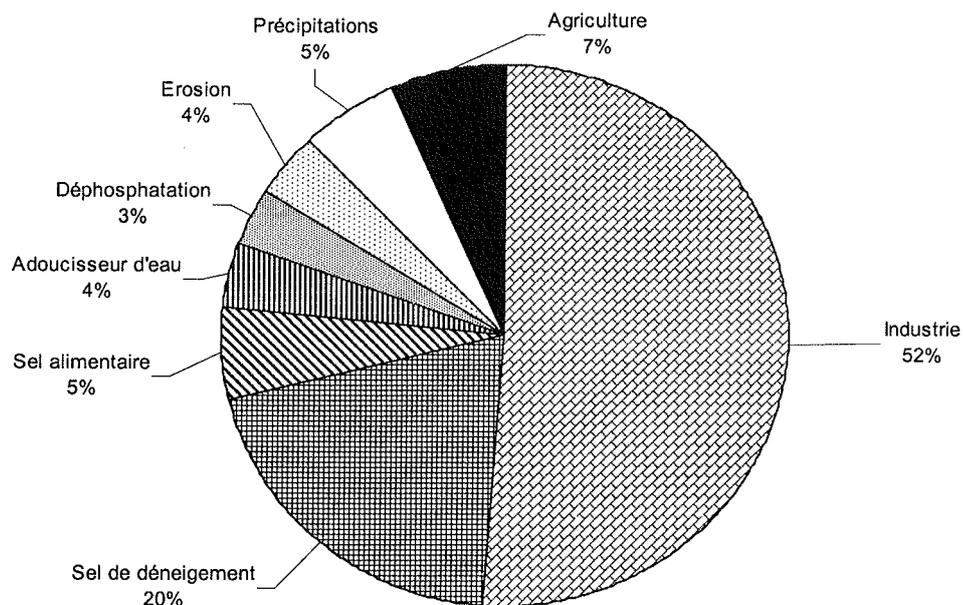


Figure 8 : Répartition des apports de chlorure selon leurs sources pour le bassin versant du Léman

Si on compare cette répartition avec la répartition des ventes de sel des Salines du Rhin, on voit que l'on arrive à peu près aux mêmes pourcentages.

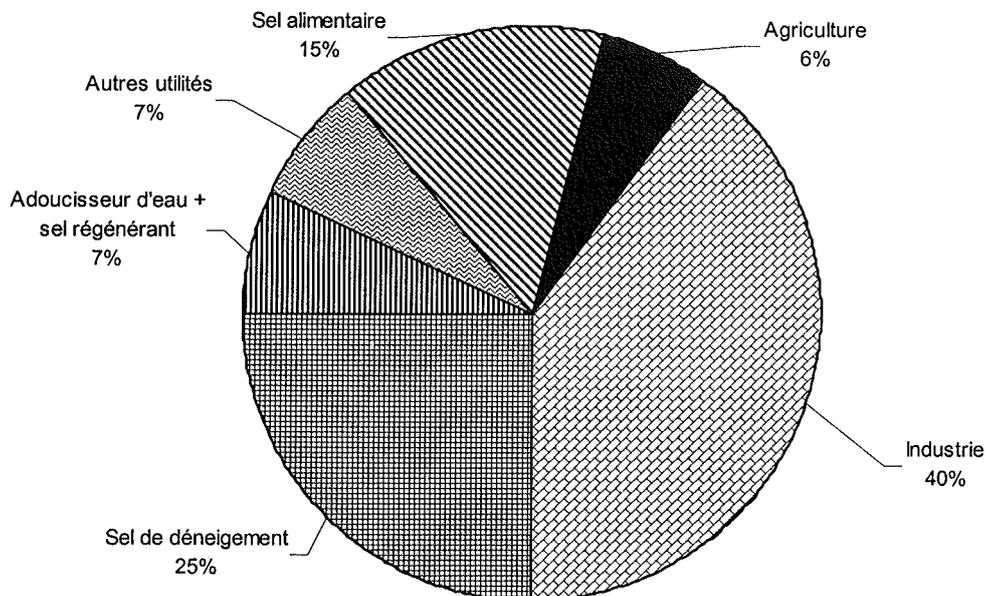


Figure 9 : Répartition des ventes de sel des Salines du Rhin par secteur (source : Rapport de gestion, Salines du Rhin, 2000)

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS ET PRÉVISIONS

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la concentration de chlorure dans le lac et dans ses principaux affluents, notamment le Rhône, est en permanente augmentation depuis le milieu des années 60.

Le début de cette augmentation correspond à l'avènement de plusieurs facteurs qui ont pris de plus en plus d'importance depuis 1960 :

- accroissement du réseau routier et début du salage des routes à grande échelle,
- très nette augmentation des activités de l'industrie chimique au cours de la deuxième moitié du 20^e siècle,
- déphosphatation chimique à l'aide de chlorure ferrique dans les STEP.

L'accroissement de la concentration de chlorure dans les affluents et dans les STEP s'explique par une utilisation toujours plus importante de sels en Suisse. Les ventes de sels toujours plus importantes des deux salines confirment cet état de fait (voir Annexes 6 et 7).

Si l'on regarde la figure 1, on constate que l'augmentation régulière de la concentration suit une droite de pente égale à environ 0.15, c'est-à-dire que la concentration augmente en moyenne de 0.15 mg de chlorure par an. Il est difficile de prévoir comment cela va évoluer, mais on peut s'attendre à ce que cette pente ne fléchisse pas, tant que les concentrations dans les affluents et les STEP ne se stabilisent pas et que la concentration dans le lac ne s'en approche.

Toutefois, un accroissement qui deviendrait exponentiel n'est pas à craindre car aucune des sources de chlorure répertoriées n'est (ou est susceptible de devenir) en hausse exponentielle.

Au rythme actuel d'augmentation, on arriverait à une concentration de 10 mg Cl⁻/l dans la vingtaine d'années à venir.

6. CONCLUSIONS

Nous avons essayé de dresser un bilan aussi exhaustif que possible concernant les sources d'apports de chlorure dans le Léman. Ainsi, on a pu constater que l'industrie occupe la place la plus importante avec près de 40'000 tonnes d'ion chlorure déversés chaque année dans le lac, notamment par deux industries valaisannes, raccordées sur des STEP mixtes, déversant 33'000 tonnes annuellement. Contrairement à ce que l'on aurait pu croire, la déphosphatation ne représente qu'un très faible pourcentage des apports, avec seulement 2'500 tonnes de Cl⁻ déversées.

Bien que nous ne nous approchions pas encore du niveau de concentration d'une eau saumâtre (~1'000 mg Cl⁻/l) ou salée (~10'000 mg Cl⁻/l), l'augmentation progressive de la salinité du Léman est tout de même préoccupante. Une recherche bibliographique des valeurs de toxicité du chlorure pour différentes espèces aquatiques a également été effectuée. Les concentrations actuelles du Léman en chlorure sont bien inférieures aux valeurs trouvées. Il est possible que certains organismes soient affectés par une telle augmentation de la concentration de chlorure. Les études dans ce domaine sont très sommaires.

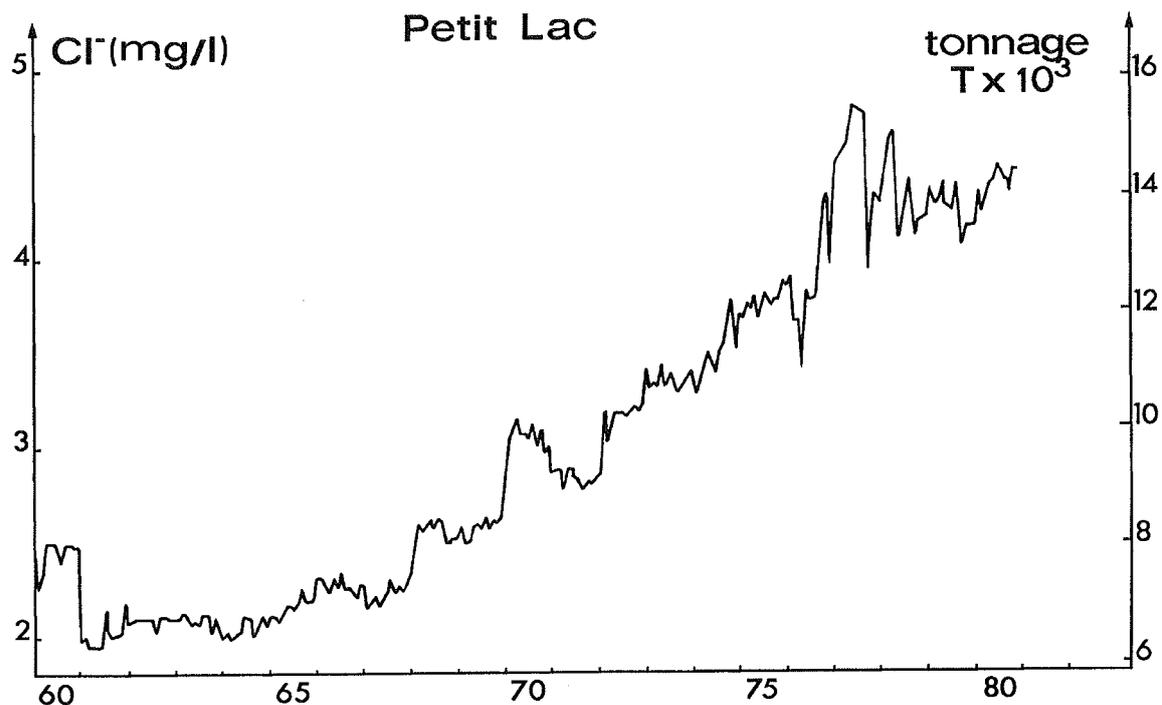
Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les nombreuses personnes avec qui ils ont pris contact et qui les ont aidés d'une manière ou d'une autre dans ce travail. Ils remercient plus particulièrement: les responsables des Salines de Bex et du Rhin, sans qui ce travail n'aurait pas été possible et MM C. CORVI et F. RAPIN pour leurs précieuses aides.

BIBLIOGRAPHIE

- CIPEL (1981 à 2000) : Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique - Campagnes 1980 à 1999. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagnes 1980 à 1999.
- CORVI, C. (1984) : Chlorures. In : Le Léman, synthèse 1957-1982 des travaux de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution. Ed. CIPEL, Lausanne, 183-191.
- CROWTHER, X. et HYNES, X. (1977) : The effect of road deicing salt on the drift of stream benthos. Environ. Pollut., 14, 113-26.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2001) : Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement. Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME).
- HELLAWELL, J.M. (1986) : Biological indicators of freshwaters pollution and environmental management. Pollution monitoring series. Elsevier applied science publishers, 546 pp.
- IMBODEN, D. (1973) : Limnologische Transport- und Nährstoffmodelle. Rev. Suisse Hydrol., 35, 29-68.
- KHANGAROT, B.S. et RAY, P. K. (1989) : Investigation of correlation between physicochemical properties of metals and their toxicity to the water flea. Ecotoxicology and Environment, Safety 18, 109-120.
- NOBEL, W., MAYER, T. et KOHLER, A., (1983) : Submerse Wasserpflanzen ald Testorganismen für Belastungsstoffe. Z. Wasser, Abwasser Forsch., 16, Nr. 3, S, 87-90.
- Osubst (1986) : Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement du 9 juin 1986 (état au 6 mars 2001) (Suisse).
- SALINES DE BEX (2000) : Rapport de Gestion, Exercices 1985-1999.
- SALINES DU RHIN (2000) : Rapport de Gestion, Exercices 1986-1999.

Annexe 1 : Concentration (moyenne mensuelle) en chlorure dans le Petit Lac 1960-1983 (CIPEL, 1984)



Annexe 2 : Concentration en mg Cl^-/l dans les affluents du Léman 1990-1999

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Rhône aval	6.40	7.20	6.63	6.63	6.60	6.44	6.75	6.64	7.30	6.93
Rhône amont	6.40	7.30	7.54	6.24	6.27	6.79	9.93	8.55	8.60	7.08
Dranse	3.40	3.90	3.25	3.27	3.72	4.00	5.21	4.79	5.20	6.71
Aubonne	6.90	5.50	4.83	4.70	4.19	4.59	7.11	6.21	6.40	5.79
Venoge	19.30	21.40	17.70	14.85	16.09	14.23	19.39	17.79	17.60	17.53
Versoix	6.60	9.00	6.89	6.70	6.77	6.36	8.11	6.30	6.60	9.38
Veveyse	7.00	10.30	9.25	7.13	6.54	6.50	15.37	12.18	8.30	14.25
Promonthouse	9.80	10.40	9.58	7.49	6.79	7.21	12.62	9.38	7.70	9.42
Chamberonne	15.70	18.80	19.41	17.52	16.83	21.55	23.45	24.07	21.70	29.52
La Morge	26.40	28.40	27.15	11.10	20.47	18.28	23.04	19.49	21.80	22.80
Eau froide	3.70	3.90	3.98	2.90	2.19	1.66	3.18		2.20	3.90
Dullive	2.10	16.00	18.10	10.86	13.73	13.08	16.08	15.34	12.30	14.81

Annexe 3 : Flux de chlorure des affluents et de l'émissaire 1980-1999 (tonnes/an)

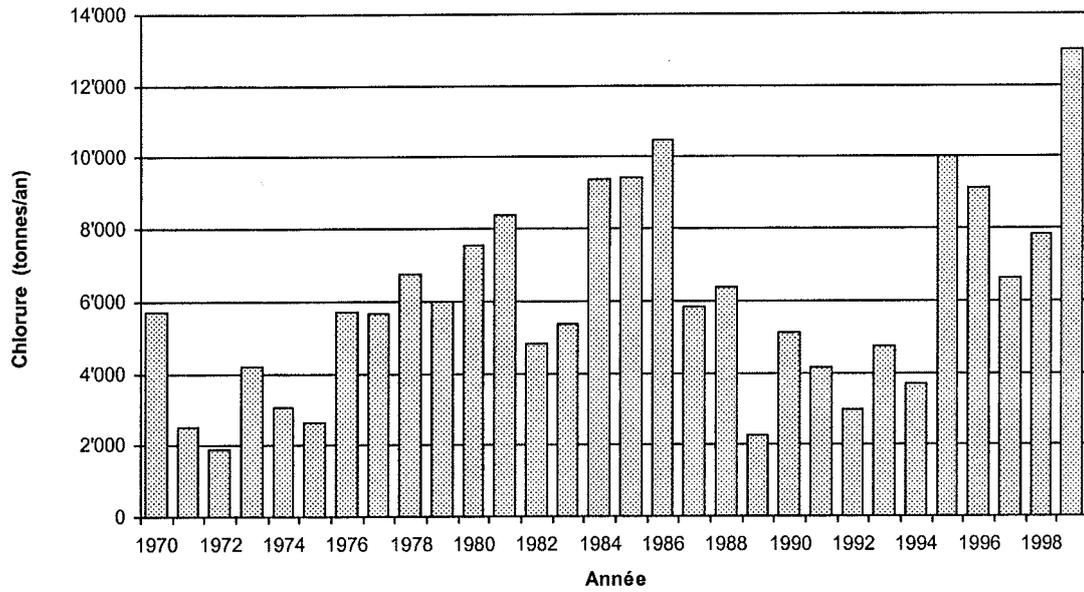
Année	Rhône amont	Dranse	Venoge + Aubonne	Rivières supplém.	Rhône émissaire	Bilan
1980	30 098	1 594	3 854		-40 353	-4 807
1981	27 600	1 714	3 286		-42 600	-10 000
1982	30 000	1 432	3 300		-43 500	-8 768
1983	32 650	1 507	3 143		-39 100	-1 800
1984	33 259	2 200	3 530		-33 115	5 874
1985	32 760	1 984	2 646		-40 836	-3 446
1986	38 300	2 400	3 100		-42 500	1 300
1987	37 965	2 613	3 447		-45 762	-1 737
1988	41 917	2 532	3 150		-46 369	1 230
1989	41 624	2 573	1 844		-37 389	8 652
1990	42 288	3 563	2 632		-48 215	268
1991	40 190	1 832	3 163	3 333	-45 742	2 776
1992	42 419	2 190	3 410	4 546	-46 969	5 596
1993	37 629	1 783	3 924	3 833	-50 829	-3 660
1994	42 786	2 410	3 069	2 494	-61 591	-10 832
1995	45 090	3 433	3 334	2 948	-61 654	-6 850
1996	46 109	2 491	3 169	2 960	-40 988	13 741
1997	49 820	2 833	3 344	2 740	-48 996	9 740
1998	46 118	2 796	2 822	2 290	-49 646	4 379
1999	48 691	5 267	3 928	5 612	-66 048	-2 550

Annexe 4 : Débit et concentration en chlorure à l'entrée et à la sortie de la STEP de Vidy (Lausanne).
Exemple : mois de juin 1999

Date	Débit [m³/j]	Cl⁻ [mg/l] entrée	Cl⁻ [mg/l] sortie
01.06.1999	114 919	39.38	41.1
11.06.1999	124 732	42.74	45.3
12.06.1999	108 586	35.54	38.9
13.06.1999	104 770	34.83	39.6
15.06.1999	117 410	39.03	42.0
16.06.1999	113 475	36.56	40.6
17.06.1999	113 112	37.60	41.1
18.06.1999	108 882	33.41	37.9
19.06.1999	95 493	28.81	32.2
20.06.1999	93 466	29.16	33.0
22.06.1999	105 404	31.80	35.6
23.06.1999	94 572	28.05	33.9
24.06.1999	100 036	30.69	35.8
25.06.1999	99 364	31.50	33.5
28.06.1999	111 675	34.84	38.8
29.06.1999	106 822	33.32	37.1
30.06.1999	99 752	30.10	33.7

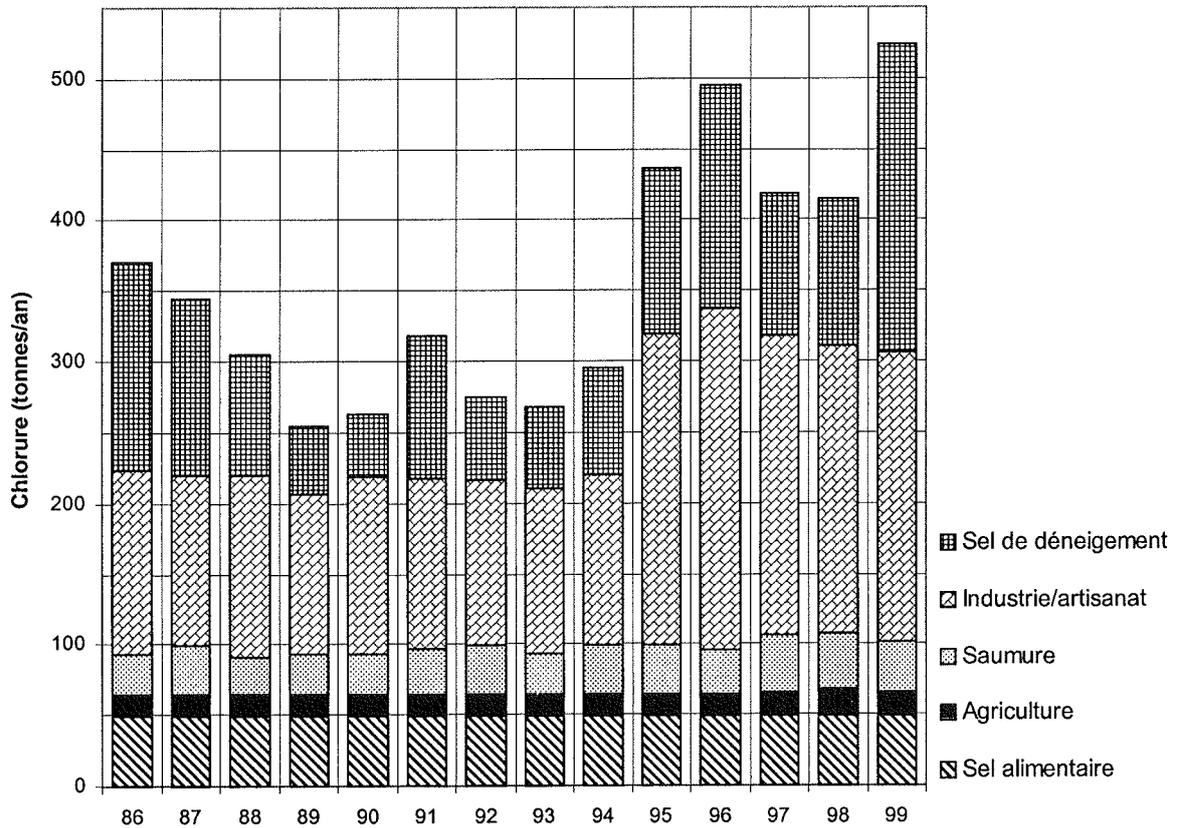
Source: Rapport mensuel STEP de Vidy

Annexe 5 : Tonnes de chlorure utilisées pour le traitement des routes cantonales et nationales dans le Canton de Vaud (1970-1998)



Source : Service des routes cantonal vaudois

Annexe 6 : Vente de sel, en tonnes, des Salines du Rhin de 1986 à 1999

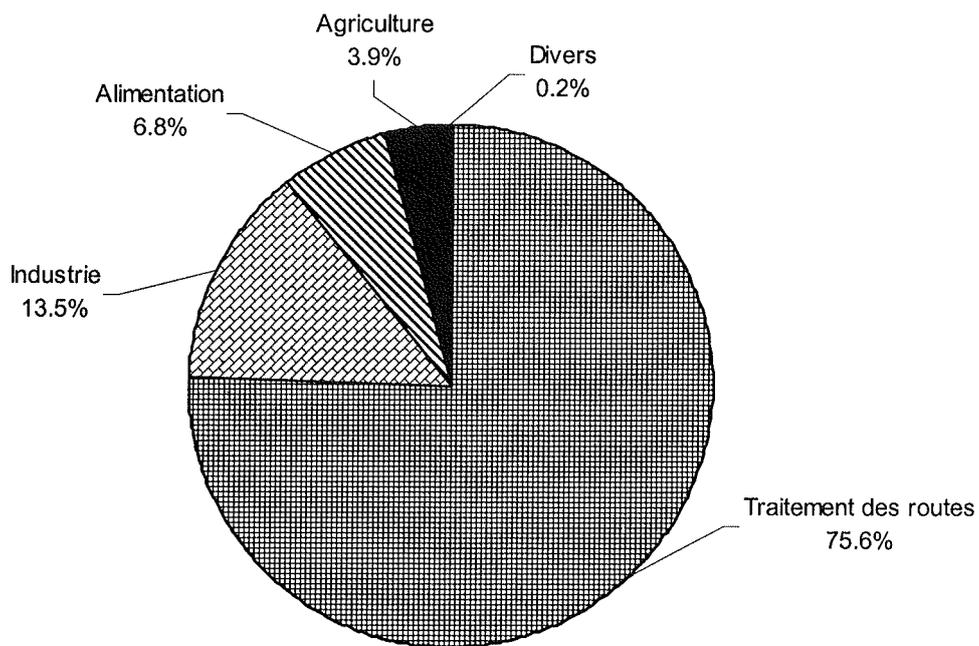


Source: Rapport de gestion des Salines du Rhin, 2000

Annexe 7 : Rapport de Gestion sur l'exercice 1999 des Salines de Bex
(Tonnes de sels vendus / an)

Année	1995	1996	1997	1998	1999
Traitement des routes	19 547	19 369	17 888	14 394	27 961
Industrie	5 075	4 982	5 214	5 093	4 986
Alimentation	1 569	1 816	1 729	1 828	2 518
Agriculture	1 351	1 158	1 036	1 242	1 455
Divers	75	112	48	88	85

Répartition en % de la consommation cantonale 1999 (Vaud)



Source : Rapport de gestion des Salines de Bex, 2000