Zeitschrift: Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 95 (1972)

Artikel: Le sel, agresseur méconnu de notre environnement
Autor: Kubler, Bernard
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-89030

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

INSTITUT DE GÉOLOGIE, UNIVERSITÉ DE NEUCHATEL

NOTE DE GÉOCHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

LE SEL, AGRESSEUR MÉCONNU DE NOTRE ENVIRONNEMENT

par

BERNARD KUBLER

AVEC 2 FIGURES ET 9 TABLEAUX

TABLE DES MATIÈRES

I. Le sel et notre environnement en général 134
Atteinte au sol. — Atteinte à l'atmosphère. — Atteinte aux eaux 135

II. Evolution de la consommation des sels 136
1. Croissance de la consommation totale 136
2. Le trafic automobile : premier responsable de l'augmentation de la consommation des sels en Suisse 139
3. Consommation des sels à adoucir les eaux dures . . . 142
4. Consommation de chlorure de calcium 143
5. Evolution générale et perspective 143

III. Le cheminement des sels 148
1. Infiltration dans les sols 149
2. Infiltration dans les roches 149
3. Infiltration dans les sédiments quaternaires 150
4. Estimation globale du bilan 151
5. Différences dans le temps de parcours des sels 151

IV. Les sources naturelles du sodium 152
1. Sols et roches 152
2. Les teneurs des eaux naturelles en sodium 153

V. Les conséquences 153
1. Les fleuves et rivières 153
2. Les lacs 154
3. Les lacs de nos régions 155

VI. Conclusions 158

Résumé 159

Bibliographie 160

Première partie

LE SEL ET NOTRE ENVIRONNEMENT EN GÉNÉRAL

La question fondamentale à résoudre, lors de la lutte pour la protection de l'environnement, est de reconnaître dans quelle mesure l'activité humaine perturbe les grands cycles naturels et dans quelle partie de ces cycles, la perturbation risque de devenir irréversible.

La mode actuelle est de s'intéresser aux polluants artificiels (donc ceux qui n'existent pas à l'état naturel à la surface de la terre), comme par exemple le DDT, les pesticides en général ou les autres produits de synthèse. Par contre, les nitrates, les nitrites, les phosphates, les bactéries fécales, les engrais naturels en général, dont seule la qualité de polluant est acquise par une augmentation artificielle des tonnages déversés dans nos lacs et rivières, ont attiré l'attention des divers services de la protection des eaux, depuis longtemps déjà. Dans ce cas, l'activité humaine se résume à accélérer considérablement une évolution naturelle, qui aurait duré sinon des centaines, des milliers, voire des millions d'années.

La perturbation du cycle naturel, par le recours généralisé du tout-à-l'égoût, est maintenant assez bien connue pour que chaque commune ou groupe de communes construise les stations d'épuration votées par le peuple. Cependant, il reste encore de très nombreuses connaissances à acquérir, ne serait-ce que sur les cycles des polluants naturels et sur le cycle de l'eau elle-même.

Qu'en est-il du SEL ?

Le sel, qu'il provienne des océans ou qu'il soit exploité à partir des gisements solides continentaux, fait partie intégrante de notre système écologique (Martinez 1971, p. 824).

Dans le passé, sa possession fut jugée si importante, qu'au Moyen Age déjà, il a été la cause de nombreux litiges. Si, depuis la Révolution française, la gabelle, de sinistre mémoire, a disparu, bien des pays ont conservé le monopole de la vente, sous forme de régie ou de régale.

De nos jours, l'accroissement de la population et les besoins nés du progrès technologique ont amené la production mondiale de sel à plus de 126 millions de tonnes par année (Nations Unies, *Annuaire statistique* 1969). Cela représenterait une consommation annuelle de près

de 38 kilos par habitant de la terre. On ne consomme pas impunément une telle quantité de sel. Cela se traduit, pour employer une expression au goût du jour, par des agressions sur l'environnement. Parmi celles-ci, celles qui ont pour origine l'activité industrielle sont les plus faciles à détecter, mais aussi à contrôler.

Atteinte au sol

Les plus localisées consistent en des *effondrements*, détruisant villages et maisons, ou créant des dépressions et même des lacs, au toit des exploitations souterraines peu profondes. Ces phénomènes, à caractère parfois catastrophique, sont bien connus dans le nord de l'Allemagne, dans le Cheshire, en Angleterre, dans la province de l'Ontario, au Canada, sur le pourtour du golfe du Mexique, aux Etats-Unis, plus particulièrement en Louisiane et dans bien d'autres pays, dont la Suisse.

Ce type d'agression est somme toute bénin et reste rarement impuni. Il n'est pas difficile, aux yeux de la loi, de prouver les relations de cause à effet.

Atteinte à l'atmosphère

La pollution de l'atmosphère, par les usines chimiques qui utilisent le sel comme matière première, sont beaucoup plus graves. Le sel est, en effet, le produit de départ pour la production de chlore, de soude caustique et de sodium principalement. Comme exemple de pollution préoccupante à cet égard, on peut citer le couloir mississippien, entre Bâton Rouge et La Nouvelle-Orléans. Dans cette région, la situation géologique est particulièrement favorable au développement industriel rapide. En effet, les dômes de sel de Louisiane fournissent les matières premières : le sel, le soufre et l'énergie, par l'intermédiaire des champs d'hydrocarbures, associés à ces dômes. C'est ainsi, qu'actuellement, plus de 35 usines chimiques majeures se sont installées dans ce couloir, ajoutant leurs polluants à ceux d'agglomérations urbaines se développant rapidement. Des mesures sévères de protection devront être prises, comme à Los Angelès ou à Pittsburg.

Atteinte aux eaux

La pollution des eaux souterraines et de surface est le troisième type d'agression dû au sel. La progression de cette pollution a été, et est toujours, suivie de très près dans les cours d'eaux, fleuves ou rivières, aussi bien d'Europe que d'Amérique.

D'après MARTINEZ *(loc. cit.)*, ce sont plus de 4200 tonnes de sel qui sont rejetées journellement dans le Mississippi par six industries produisant du chlore, de la soude caustique et du sodium métallique, à partir du sel des dômes de Louisiane. Il est prévisible qu'à la longue,

de telles quantités de sel et leur cortège d'éléments-trace vont modifier l'équilibre biologique du fleuve.

Dans le Rhin, en aval de Bâle, LÜSSEM (1970) estime que par des mesures appropriées, prises par les industries de la potasse du Haut-Rhin, on pourrait diminuer la charge en chlorure de 30% à 40%. Il faut avouer que pour le Rhin en général, l'agent permanent de pollution le plus dangereux n'est pas la charge en chlorure, mais les boues ferrugineuses. Pour ce grand fleuve aussi, le biotope est complètement perturbé et la charge en sels minéraux et leurs éléments-trace associés n'y est pas étrangère.

Dans la Werra, dans le nord de l'Allemagne, on a constaté depuis longtemps un changement de la faune et de la flore, en aval des mines de potasse, cette fois. L'augmentation de la charge en chlorure, due aux effluents de ces industries, en est responsable. On voit donc que l'exploitation industrielle du sel se traduit souvent par des agressions visibles et mesurables.

La *consommation* de sel, par contre, est un *agent de pollution plus insidieux*, plus difficile à mettre en lumière. Son influence s'exerce sur nos lacs, rivières et fleuves, mais aussi dans les nappes d'eau potable.

Pour suivre les progrès de cette pollution, il faut disposer de nombreuses données géochimiques sur les eaux, les sols, les roches. Les recherches poursuivies au Laboratoire de pétrographie et géochimie de l'Institut de géologie de l'Université de Neuchâtel, portent justement sur la géochimie de ces trois milieux. Les résultats dûment catalogués permettent déjà quelques ébauches de conclusions. Ils formeront une masse indispensable à la surveillance de l'évolution de quelques aspects de notre environnement.

Deuxième partie

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION DES SELS

1. Croissance de la consommation totale

La croissance rapide de la consommation de sels dans cette dernière décennie est le fait le plus caractéristique. Cette augmentation est plus rapide que l'augmentation de la population. Cela signifie que la consommation en sels par habitant augmente chaque année. Ceci est vrai aussi bien pour le monde entier que pour la Suisse ou le canton de Neuchâtel.

On voit, d'après les chiffres du tableau 1, que la consommation dans le monde a augmenté de plus de 10 kg par habitant en l'espace de huit ans. En Suisse, elle a augmenté de près de 20 kg en dix ans, c'est-à-dire entre 1960 et 1970.

TABLEAU 1

Consommation des sels en Suisse et dans le monde

Années	Population × 1000 habitants	SUISSE Sels				Population × millions habitants	MONDE Sels	
		Cuisine		Totaux			Totaux	
		tonnes	kg/ habit.	tonnes	kg/ habit.		millions tonnes	kg/ habit.
1953	—	—	—	—	—	2,800	54,7	19,5
1954	—	—	—	—	—	—	—	—
1955	5 348 [1]	42 781	—	121 082	—	—	—	—
1956	5 400 [1]	41 999	—	118 776	—	—	—	—
1957	5 453 [1]	42 239	—	127 172	—	—	—	—
1958	5 605 [1]	44 147	—	124 215	—	—	—	—
1959	5 557	43 612	—	134 155	—	—	—	—
1960	5 429	43 742	8,05	149 729	27,58	3,005 [1]	83,7	27,4
1961	—	44 137	—	154 095	—	3,094 [1]	85,1	27,5
1962	5 660	45 413	8,02	167 577	29,61	3,130	91,8	29,3
1963	5 770	46 613	8,08	189 455	32,83	3,176 [1]	96,1	30,3
1964	5 874	49 728	8,47	191 556	32,61	3,204 [1]	99,6	31,1
1965	5 945	50 027	8,46	220 359	37,07	3,241 [1]	109,3	33,7
1966	5 999	50 175	8,36	197 082	32,85	3,277 [1]	111,7	34,1
1967	6 071	50 685	8,35	210 423	34,66	3,314	118,1	35,6
1968	6 147	52 265	8,50	277 783	45,20	3,483 [1]	126,6	37,8
1969	6 224	50 090	8,05	288 471	46,35	3,387	—	—
1970	6 132 [1]	—	—	—	—	3,424 [1]	—	—

[1] Valeurs extrapolées.

Cela signifie la naissance de besoins nouveaux pour le sel, aussi bien dans le monde entier qu'en Suisse. En effet, pour la Suisse (fig. 1) et le canton de Neuchâtel (fig. 2), la consommation en sels totaux augmente beaucoup plus vite que celle en sels de cuisine. En Suisse, la progression des sels de cuisine n'a été que de 7000 tonnes en quinze ans, reflétant étroitement l'augmentation de la population. Par exemple, quoique la consommation de sels de cuisine soit passée, de 1960 à 1969, de 44 000 à 50 000 tonnes environ, la consommation par tête est restée remarquablement stable, oscillant entre 8 et 8,5 kg par habitant. Dans le même temps, la consommation en sels totaux passait de 27,6 à 46,4 kg par habitant.

Le sel de cuisine représentait encore, en 1960, plus du 33% de la consommation totale. En 1969, il ne représente plus que le 17%.

Quels sont ces besoins nouveaux ?

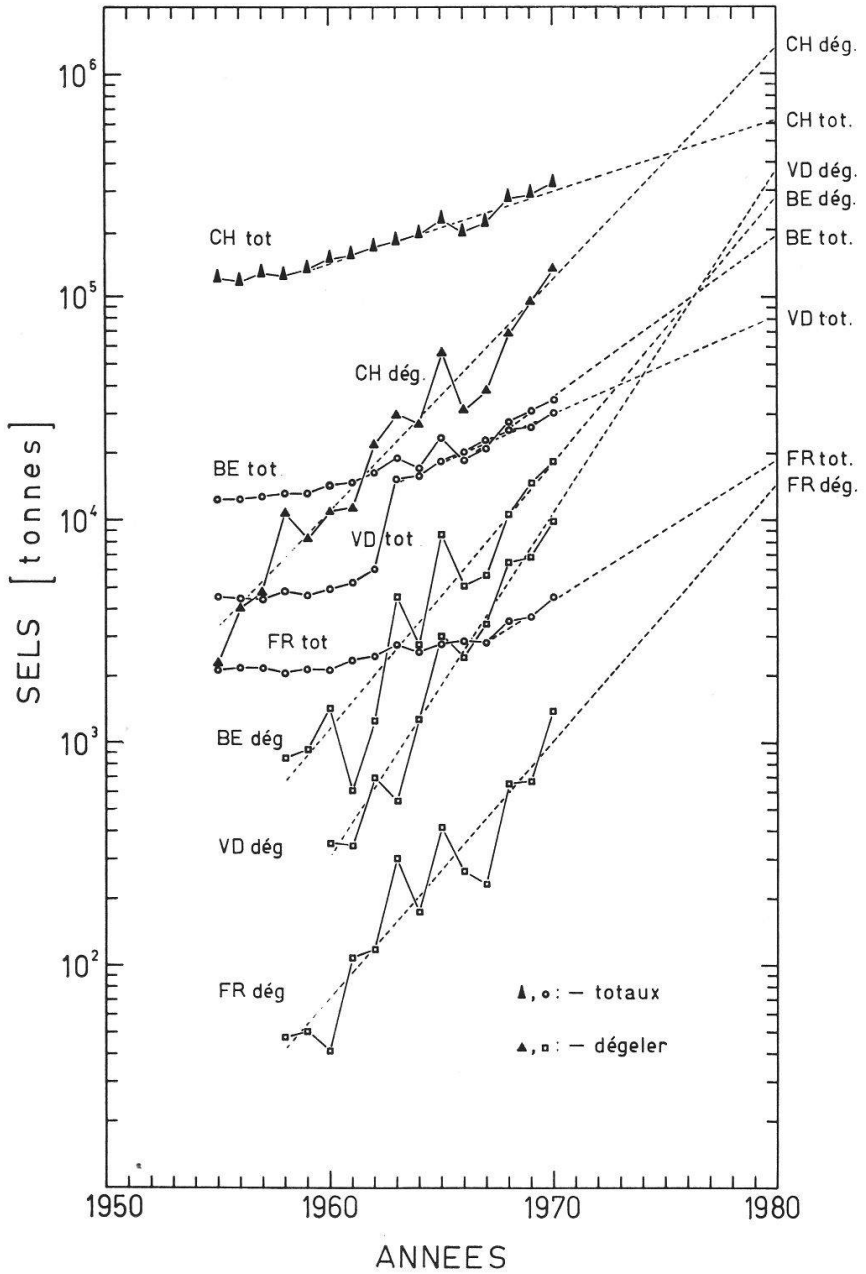

Fig. 1. Consommation des sels totaux et des sels à dégeler (échelle log.).

CH : Confédération ; BE : canton de Berne ; FR : canton de Fribourg ; NE : canton de Neuchâtel ; VD : canton de Vaud.

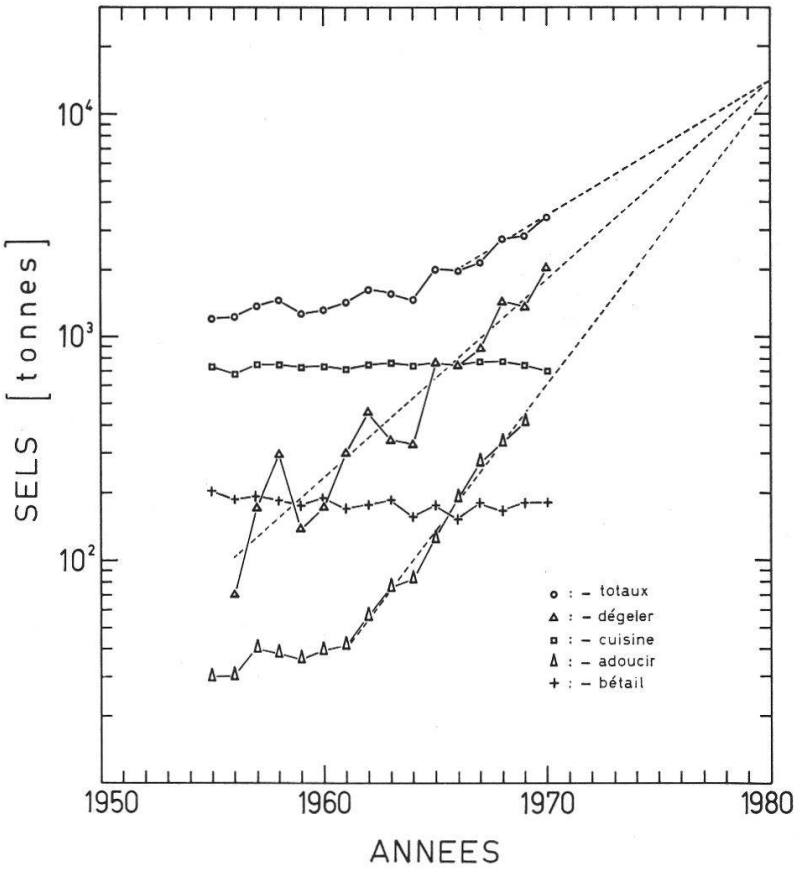

Fig. 2. Consommation des sels dans le canton de Neuchâtel.

A noter, la stabilité pour le sel de cuisine, le sel pour bétail, et les fortes croissances pour le sel à dégeler et le sel à adoucir.

2. *Le trafic automobile : premier responsable de l'augmentation de la consommation des sels en Suisse*

Quoique nous manquions encore de données sélectives pour analyser les diverses destinations du sel *dans le monde*, on peut admettre que la progression de la consommation mondiale par habitant est à attribuer pour une bonne part à la progression de l'activité industrielle, dont les besoins en produits chimiques de base ne cessent d'augmenter.

En Suisse, et en particulier dans le canton de Neuchâtel, le premier responsable de l'augmentation est le sel à dégeler, répandu sur les routes l'hiver, pour faciliter le trafic automobile. Pour le canton de Neuchâtel uniquement, la consommation est passée de quelques tonnes en 1955, à plus de 2000 tonnes en 1970. Ce phénomène est très général pour toute la Suisse, où, dans le même temps, les quantités utilisées

passaient de 2000 tonnes (chiffre approximatif) à plus de 127 000 tonnes, soit une augmentation de plus de soixante fois en quinze ans. Ce n'est qu'en 1965, que la consommation de sel à dégeler a dépassé celle du sel de cuisine. Actuellement, cette consommation est plus de 2,5 fois plus importante pour la Suisse et près de 3 fois pour le canton de Neuchâtel. Le sel à dégeler formait, à lui tout seul, le 45% de la consommation totale de la Suisse, et plus du 58% pour le canton de Neuchâtel.

Mais il y a plus grave : l'accélération, depuis 1965, a prix une allure logarithmique. Certes, la progression a connu des rémissions dues à la clémence des hivers, comme en 1962, 1964 ou en 1966 [1]. L'expérience de ces dix dernières années prouve que ces rémissions n'ont pas empêché la progression moyenne de prendre une allure exponentielle.

En résumé, la consommation totale de sels depuis ces dix dernières années est conditionnée, aussi bien dans sa progression que dans ses fluctuations annuelles, par la consommation de *sel à dégeler*, c'est-à-dire par la nécessité de maintenir un trafic automobile hivernal aussi fluide que possible.

TABLEAU 2

Consommation comparée des sels
Canton de Neuchâtel

Année	Sel bétail		Sel de cuisine		Sel à dégeler		Sel à adoucir		Sels totaux	
		Moyenne glissante		Moyenne glissante		Moyenne glissante		Moyenne glissante		Moyenne glissante
1953	208	—	742	—	7	—	34	—	—	—
1955	203	200	729	716	2	26	30	31	1208	—
1956	189	194	678	720	70	81	30	33	1218	1271
1957	191	188	754	727	171	178	40	36	1386	1357
1958	185	184	750	744	294	200	38	38	1468	1377
1959	175	182	727	736	137	201	36	38	1278	1358
1960	187	177	731	725	172	203	39	39	1327	1344
1961	170	178	717	734	300	309	41	45	1428	1466
1962	178	178	754	744	454	365	56	57	1642	1551
1963	186	174	762	752	342	375	75	71	1582	1570
1964	158	174	740	754	329	480	82	94	1485	1695
1965	177	163	759	748	768	619	125	132	2018	1832
1966	154	171	745	758	759	806	188	196	1993	2059
1967	181	167	770	764	890	1025	274	267	2167	2313
1968	167	176	776	765	1426	1233	338	341	2779	2597
1969	181	177	750	744	1383	1607	413	—	2844	3020
1970	183	—	702	—	2012	—	—	—	3436	—

[1] Au cours de l'hiver 1970-1971, la quantité de sel répandue sur les routes cantonales neuchâteloises est revenue à celle de 1967 (fig. 2).

TABLEAU 3

Consommation des sels à dégeler et des sels totaux
Cantons riverains du lac de Neuchâtel (en tonnes)

	BERNE		FRIBOURG		NEUCHATEL		SUISSE	
Année	A dégeler	Totaux	A dégeler	Totaux	A dégeler	Totaux	A dégeler	Totaux
1955	—	12 312	—	2 128	2	1 208	2 200	121 082
1956	—	12 319	—	2 150	70	1 218	4 129	118 776
1957	—	12 698	—	2 151	171	1 386	4 752	127 172
1958	850	13 133	47	2 029	294	1 468	10 077	124 215
1959	930	13 192	50	2 126	137	1 278	8 255	134 155
1960	1 420	14 235	41	2 126	172	1 327	10 849	149 729
1961	609	14 514	108	2 336	300	1 428	11 466	154 095
1962	1 257	16 480	118	2 445	454	1 642	21 972	167 577
1963	4 574	18 506	302	2 730	342	1 582	29 877	189 455
1964	2 794	17 233	175	2 607	329	1 485	26 700	191 556
1965	8 631	23 384	418	2 798	768	2 019	56 590	220 359
1966	5 088	19 782	266	2 861	759	1 993	31 583	197 082
1967	5 609	21 183	233	2 831	890	2 167	38 847	210 423
1968	10 605	26 704	659	3 554	1 426	2 779	69 513	277 783
1969	14 775	31 067	672	3 690	1 383	2 844	96 061	288 471
1970	18 416	35 016	1 396	4 518	2 012	3 438	127 708	328 144

TABLEAU 4

Part des sels à dégeler en pour-cent des sels totaux

Année	Berne	Fribourg	Neuchâtel	Vaud	Suisse
1955	—	—	—	—	1,8
1956	—	—	5,7	—	3,5
1957	—	—	12,3	—	3,7
1958	6,5	2,2	20,0	—	8,1
1959	7,1	2,3	13,0	—	6,2
1960	9,8	1,9	13,0	7,2	7,2
1961	4,2	4,6	21,0	6,6	7,4
1962	7,6	4,8	27,6	11,7	13,1
1963	24,7	11,1	21,6	3,6	15,8
1964	16,2	6,7	22,2	8,1	13,9
1965	38,0	14,9	38,1	15,7	25,7
1966	25,7	9,3	38,1	12,2	16,0
1967	26,6	8,2	41,1	15,4	18,5
1968	39,9	18,6	51,3	25,0	25,0
1969	47,8	18,2	48,6	26,4	33,3
1970	52,7	30,9	58,6	32,7	38,9

3. Consommation de sels à adoucir les eaux dures

Comme pour le sel à dégeler, il s'agit d'un besoin entièrement nouveau, inconnu il y a une vingtaine d'années. La raison de ce développement tient en trois points :

— la fabrication industrielle de résines synthétiques échangeuses d'ions à des prix relativement bas,

— l'extension des machines à laver le linge et à laver la vaisselle,

— le service d'eau chaude général par habitation.

Pour avoir un linge plus blanc, une vaisselle brillante et des générateurs d'eau chaude qui ne s'entartrent pas, la publicité ne laisse plus aucun citoyen dans l'ignorance : le « calcaire », c'est-à-dire les ions Ca^{++}, est le grand ennemi à éliminer.

Les eaux potables dures passent donc sur des résines ; elles y perdent leurs ions Ca^{++} ; elles y gagnent du Na^{+} ; elles sont ainsi adoucies. Les ions Na^{+}, très solubles, ne se déposent plus, ni dans les chaudières, ni dans les conduites, ni sur le linge ou la vaisselle. Ils s'en vont avec les eaux de rinçage et disparaissent dans le tout-à-l'égout. Une fois que les résines ont échangé le sodium qu'elles avaient adsorbé, contre le calcium des eaux, il faut les régénérer. L'opération est simple ; il suffit de faire passer sur les résines une solution relativement concentrée en Na^{+}, donc en sel, qui, par la loi d'action de masse [1], va déplacer le Ca^{++} adsorbé au profit du Na^{+}. Les résines ainsi régénérées seront de nouveau prêtes à l'emploi. L'enchaînement de ces cycles est automatique, mais chaque cycle de régénération exige une certaine quantité de sel. Suivant l'adoucissement désiré, on compte environ 750 g de sel par mètre cube d'eau à adoucir.

Il ne faut dès lors pas s'étonner que, par la généralisation des installations industrielles et domestiques, la consommation du sel à adoucir *ait presque décuplé* en l'espace de neuf ans. En 1960, la consommation pour l'ensemble du canton de Neuchâtel, était de 39,1 tonnes ; elle a dépassé 412 tonnes en 1969. Elle représente actuellement plus du 55 % de la consommation de sel de cuisine. Sa croissance, très régulière, très soutenue, est logarithmique depuis 1960. Si ce rythme se poursuit à la cadence actuelle, la consommation de sel à adoucir aura rattrapé celle du sel de cuisine en 1971 déjà ou en 1973-1974. La croissance de ce sel ne dépend pas de la rigueur des hivers, mais certainement du nombre d'adoucisseurs vendus et du volume d'eau adoucie. Après la période de stagnation, 1955-1960 (cf. fig. 2), il y a eu une brusque augmentation de la croissance. La consommation a plus que décuplé en dix ans. La croissance est donc plus rapide que pour n'importe quel autre sel.

Les statistiques fédérales concernant ce sel sont à ce jour peu claires. L'Office fédéral de statistique ne peut que collationner les données fournies par les cantons, en les transformant et en les contrôlant brève-

[1] Principe de Le Chatelier.

ment. La disparité intercantonale, la nouveauté de cette consommation ne permettent pas, dans l'état actuel, de gagner une image objective pour l'ensemble de la Confédération, sans une enquête approfondie auprès des cantons.

Cette enquête est en cours.

4. Consommation de chlorure de calcium

Lors du début du salage des routes, plusieurs fondants chimiques, tous à base de chlorure, ont été essayés. Puis, environ dix ans plus tard, l'adjonction de chlorure de calcium au chlorure de sodium s'est généralisée.

Dans le canton de Neuchâtel, ce n'est qu'en 1965 que, timidement, avec 62 tonnes par an, on a commencé à utiliser du $CaCl_2$ pour les routes cantonales. Cet exemple a été suivi par les communes. En sept ans, la consommation cumulée des routes cantonales et des communes a dépassé 1000 tonnes par an, rattrapant la consommation de sel à dégeler. La consommation des communes représente le tiers de celle des routes cantonales. L'augmentation a été plus lente et plus continue. D'après l'enquête récente que nous avons menée, elle a dépassé, elle aussi, celle du sel l'hiver dernier.

Les proportions de sel et de chlorure de calcium dans le mélange sont variables ; elles dépendent de la température. On peut prévoir que le chlorure de calcium va osciller entre 40% et 55% du mélange, suivant que l'on devra éliminer la neige ou le verglas.

La vente de chlorure de calcium n'étant pas un monopole d'Etat, la statistique nationale des tonnages répandus sur les routes est très difficile à établir. Il faudrait mener une enquête dans chaque commune et dans chaque canton, comme nous avons dû le faire pour le canton de Neuchâtel. C'est là un travail qui appartient davantage à l'Office fédéral de statistiques, si on lui en donne les moyens, qu'à nous.

5. Evolution générale et perspectives

Nous ne ferons pas de prévisions pour l'an 2000, et même toutes celles que nous pourrons faire pour 1980 dépendent de la manière d'analyser la progression, du choix de la période de référence pour chacun des sels.

En dehors des extrapolations purement graphiques ou mathématiques, il faut non seulement rechercher les facteurs de saturation possible, mais encore prévoir le moment où ils se feront sentir et avec quelle influence.

Par exemple, pour le *sel à dégeler*, une extrapolation graphique raisonnée amènerait, pour 1980, des consommations déraisonnables — 1 200 000 tonnes pour la Suisse, 250 000 tonnes pour le canton de

Berne, 200 000 tonnes pour celui de Vaud, 13 000 tonnes pour Neuchâtel et 12 000 tonnes pour Fribourg (cf. tableau 5). Par la méthode de calcul — droite de régression linéaire — les chiffres obtenus sont encore plus grands : 1 320 000 tonnes pour la Suisse, 275 000 tonnes pour Berne, 365 000 tonnes pour Vaud, 14 100 tonnes pour Fribourg, et 12 800 tonnes pour Neuchâtel (cf. tableau 8). Ce n'est pas tout : il faut ajouter à ces tonnages ceux du chlorure de calcium qui atteindraient 640 000 à 650 000 tonnes pour la Suisse, 135 000 tonnes pour Berne, 110 000 tonnes pour Vaud, 7000 tonnes pour Neuchâtel, et 6500 tonnes pour Fribourg.

TABLEAU 5

Consommation des sels : prévisions
Sels totaux en tonnes par ans

	Sels totaux en tonnes par ans				
Année	Suisse	Berne	Fribourg	Neuchâtel	Vaud
1955	121 082	12 312	2 128	1 208	4 729
1960	149 729	14 235	2 126	1 327	4 947
1970	328 144	35 016	4 518	3 436	30 377
1980 [1]	700 000	80 000	20 000	15 000	90 000
1980 [2]	—	70 000	9 000	10 000	70 000
	Sel à dégeler				
Année	Suisse	Berne	Fribourg	Neuchâtel	Vaud
1960	10 849	1 420	41	172	354
1970	127 708	18 416	1 396	2 012	9 940
1980 [3]	1 200 000	250 000	12 000	13 000	200 000
1980 [4]	500 000	70 000	5 500	8 000	40 000

[1] Tonnages extrapolés directement de la droite de progression des onze dernières années pour la Suisse et Berne, des sept dernières années pour Vaud, des cinq dernières années pour Neuchâtel et des quatre dernières années pour Fribourg.
[2] Même extrapolation mais solution minimum.
[3] Même extrapolation que sous [1] mais à partir de 1960.
[4] Tonnages calculés dans l'hypothèse que la consommation ne double que tous les cinq ans.

Il faut remarquer que les tonnages extrapolés dépasseraient, pour le sel à dégeler uniquement, ceux des sels totaux en 1980. C'est impossible, mais compréhensible par ce que nous avons vu plus haut.

En calculant un indice au kilomètre carré et sur la base de l'extrapolation graphique, il sera déversé en Suisse et en 1980 : 29 tonnes au km² de sel à dégeler uniquement, 61 tonnes pour Vaud, 36 tonnes pour Berne, 16 tonnes pour Neuchâtel, et 7 tonnes pour Fribourg. Il faut ajouter le chlorure de calcium qui se montera à 16 tonnes au km² pour la Suisse, 34 tonnes pour Vaud, 20 tonnes pour Berne, 9 tonnes

pour Neuchâtel, et 4 tonnes pour Fribourg, soit près de 45 tonnes au km² de fondants chimiques pour la Suisse, 95 tonnes pour Vaud, 56 tonnes pour Berne, 25 tonnes pour Neuchâtel, 11 tonnes pour Fribourg.

TABLEAU 6

Consommation indexée à la surface

Sels totaux en tonne par kilomètre carré					
Année	Suisse	Berne	Fribourg	Neuchâtel	Vaud
1955	2,9	1,8	1,3	1,5	1,5
1960	3,6	2,1	1,3	1,6	1,5
1970	7,9	5,1	2,7	4,3	9,3
1980	16,9	11,6	11,9	18,6	27,7
Sel à dégeler en tonne par kilomètre carré					
Année	Suisse	Berne	Fribourg	Neuchâtel	Vaud
1960	0,3	0,2	0,02	0,2	0,1
1970	3,1	2,7	0,8	2,5	3,1
1980 [1]	9,1	36,4	7,2	16,1	61,5
1980 [2]	12,1	10,2	3,3	9,9	9,7

[1] Tonnages extrapolés comme au tableau 5.
[2] Tonnages calculés en admettant une inflexion de la courbe de croissance en 1970 et un doublement tous les cinq ans.

TABLEAU 7

Canton de Neuchâtel

Fondants chimiques communes et routes cantonales

en tonnes				
Hiver	Sel NaCl		Chlorure de Calcium $CaCl_2$	
	Communes [1]	Routes cantonales [2]	Communes	Routes cantonales
1966-1967	383	485	125	465
1967-1968	323	740	248	621
1968-1969	408	805	342	595
1969-1970	601,5	1 030	492	690
1970-1971	358	638	362	731

[1] Chiffres fournis par les communes après enquête du Laboratoire de minéralogie, pétrographie et géochimie.
[2] Chiffres du Département des travaux publics.

Il existe des motifs d'espérer que de tels tonnages ne seront pas déversés sur les routes en 1980. En effet, on peut prévoir que le kilométrage possible de routes à saler sera atteint entre 1970 et 1980, provoquant un fléchissement dans la courbe moyenne de progression.

Aux Etats-Unis, la pratique de la « route noire » n'a réellement débuté que dans les années 1950. La progression a été presque exponentielle jusqu'en 1965, soit pendant quinze ans ; depuis, la consommation double en cinq ans environ.

Si l'on admet qu'il faudra, en Suisse comme aux Etats-Unis, quinze ans pour qu'un fléchissement apparaisse dans la courbe de consommation, l'inflexion de départ ne s'étant manifestée qu'en 1958, il est alors probable que 1972 ou 1973 soit précisément l'époque du fléchissement pour le sel à dégeler et 1980 ou 1983 éventuellement, pour le chlorure de calcium. Cela nous amène à des prévisions moins catastrophiques de 500 000 tonnes au minimum de sel à dégeler pour la Suisse en 1980, 70 000 tonnes pour Berne, 40 000 tonnes pour Vaud, 8000 tonnes pour Neuchâtel, et 5500 tonnes pour Fribourg, par exemple (cf. tableau 8).

TABLEAU 8

Consommations des sels en 1980
Récapitulation des estimations

	Suisse	Berne	Fribourg	Neuchâtel	Vaud
Sels totaux					
I. Estimation graphique	700 000	80 000	20 000	15 000	90 000
Période de référence	1959-1970	1959-1970	1967-1970	1966-1970	1964-1970
II. Estimation graphique minimum	700 000	70 000	9 000	10 000	70 000
III. Estimation calculée	610 000	187 500	18 500	12 800	81 000
Période de référence	1955-1970	1966-1970	1967-1970	1966-1970	1964-1970
Coefficient de corrélation	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99
Sel à dégeler					
I. Estimation graphique	1 200 000	250 000	12 000	10 000	200 000
II. Estimation	500 000	70 000	5 500	8 000	40 000
III. Estimation calculée	1 320 000	275 000	14 100	12 800	365 000
Période de référence	1955-1970	1958-1970	1958-1970	1956-1970	1960-1970
Coefficient de corrélation	0,97	0,93	0,94	0,95	0,98
Sel à adoucir					
I. Estimation graphique	—	—	—	10 000	—
II. Croissance linéaire	—	—	—	1 200	—
III. 30% des eaux potables adoucies	—	—	—	5 450	—
IV. Estimation calculée	—	—	—	12 000	—
Période de référence	—	—	—	1061-1970	—
Coefficient de corrélation	—	—	—	0,99	—

Pour le sel à adoucir, nous l'avons vu, la croissance ne dépend pas de la rigueur des hivers mais certainement directement du nombre d'appareils vendus et du volume d'eau adoucie. Suivant la période de référence choisie pour les prévisions, la consommation de sel à adoucir devrait rattraper celle du sel de cuisine entre 1971 et 1973, elle atteindrait 3000 tonnes en 1975, soit plus de quatre fois celle du sel de cuisine. Ceci n'est pas souhaitable. En effet, les constructeurs admettent que suivant les résines, 1 kg de sel est capable de diminuer la dureté de 50° ou de 20° français par mètre cube. Dans les régions calcaires, la dureté oscille autour de 20° français. Comme pour des problèmes de corrosion, l'eau ne doit pas être entièrement adoucie, nous avons admis une consommation de 750 g de sel par mètre cube, ce qui mène à une concentration de 255 mg de sodium par litre.

Or, d'après Burger (1963), les besoins moyens réels en eau étaient de 60 000 m³ par jour en 1962 dans le canton de Neuchâtel. Depuis, les besoins ont augmenté de 25%. Si l'on déduit les 15% qui n'arrivent jamais au compteur de l'abonné (pertes dans les réseaux, fontaines, etc.), on peut estimer, d'après la consommation de sel à adoucir, que le 2% à 2½% de toute l'eau potable a été adoucie en 1970.

Si l'on se fie à la progression de ces dix dernières années, on peut calculer d'après la droite de régression avec un coefficient de corrélation de 0,99, que le sel à adoucir dépassera 12 000 tonnes par an en 1980. Ce serait alors 35 tonnes par jour qui seraient déversés dans les égouts. Cela représenterait un adoucissement de 60% de toutes les eaux potables.

Ces prévisions sont-elles vraisemblables ? Nous pensons que les facteurs de saturation ne se dessinent pas aussi bien ici que pour le sel à dégeler. En effet, la mode de ces dernières années a été d'adoucir toute l'eau des villas ou autres constructions neuves. Si 60% des eaux étaient adoucies, cela signifierait donc que 40% des usagers ne seraient pas encore au bénéfice du progrès dans l'art de laver le linge ou la vaisselle. Le facteur de saturation n'est donc pas clair.

Toutefois, nous espérons fermement que l'avenir démentira ces prévisions. Nous espérons qu'à la suite de campagnes d'information, de prises de mesures ou tout simplement par la prise de conscience des fabricants eux-mêmes, l'adoucissement de l'eau sera réservé strictement aux machines à laver, éventuellement au service d'eau chaude.

Dans cet espoir, nous avons calculé que seul le 30% des eaux potables du canton de Neuchâtel seraient adoucies, cela se traduisant alors par une consommation annuelle de 5,450 tonnes de sel. C'est ce chiffre que nous avons retenu pour la suite de nos calculs.

La consommation cumulée de sel à dégeler et de sel à adoucir se situera donc en 1980 entre 12 500 tonnes et 23 000 tonnes par an, représentant un épandage de 15 tonnes ou de 28 tonnes au km², soit une consommation de 70 à 130 kg par habitant.

Ces chiffres sont certes alarmants ; nous espérons fermement qu'ils se trouveront démentis par la réalité. Toutefois, en statistique automobile, il a été prouvé souvent que les prévisions, même les mieux pondérées, ont été dépassées par les faits.

D'autre part, seul le sel à adoucir à usage domestique a été pris en considération. Le développement industriel, surtout dans le besoin d'éliminer les déchets dangereux, contribuera à augmenter la consommation de sel. Il faut mentionner de plus que le troisième étage de traitement des eaux usées, c'est-à-dire, l'extraction chimique des polluants, a recours, dans l'état actuel des recherches, à l'osmose inverse ou l'échange sur des résines, ce qui contribue à augmenter, pour une part au moins, la consommation de sel.

Que deviennent ou deviendront ces sels ? Où iront-ils ? C'est l'objet de la troisième partie.

Troisième partie

LE CHEMINEMENT DES SELS

Le cheminement des sels va dépendre du mode d'utilisation de chacun d'eux — sel à dégeler, sel à adoucir, sel de cuisine, de bétail, sels et saumures industriels, etc. Il sera étroitement conditionné par la nature hydrogéologique de la région où ils seront consommés.

Pour chaque région du globe, une étude sélective devrait être menée.

Nous avons choisi, comme exemple, une unité administrative, le canton de Neuchâtel, pour laquelle non seulement la consommation des divers sels est relativement aisée à connaître, mais où surtout, les recherches hydrogéologiques sont activement poussées à la suite des grands initiateurs du siècle passé et du début de ce siècle, tels que Jaccard et Schardt.

En tout premier lieu, le raccordement au tout-à-l'égout va conditionner étroitement le cheminement de tous les sels.

Les agglomérations urbaines, centres de gravité de la consommation des sels, sont actuellement raccordées entièrement au tout-à-l'égout. Les sels à dégeler, sels à adoucir, sels et saumures industriels et même le sel de cuisine se retrouveront en très peu d'heures aux collecteurs généraux des centrales d'épuration ou, à défaut, directement dans les rivières, fleuves ou lacs. Il est à noter que l'épuration des eaux usées n'arrête pas les sels. L'étendue du réseau collecteur des eaux usées dépend du niveau de vie, de la densité de la population, de l'habitat. En l'absence d'une statistique précise, on admettra, en première approximation, qu'un peu moins de la moitié des consommateurs n'est pas raccordée au tout-à-l'égout.

C'est justement pour ces consommateurs que les connaissances des hydrogéologues deviennent indispensables. Qu'il s'agisse du sel infiltré à partir des routes, des puits perdus, des fosses septiques ou du sel répandu à intervalle régulier dans les champs et dilué dans le purin, les calculs du temps de cheminement de ces sels dépendent des données que l'on a sur les infiltrations dans les tapis végétaux, les sols, les roches, etc.

Prévoir ensuite le cheminement des sels, leur temps d'arrivée aux niveaux de base des drainages naturels, suppose que toutes les questions pratiques ou théoriques de l'hydrogéologie trouvent une réponse. Cela suppose notamment que soient connus le volume des précipitations (eau de pluie, neige), le volume de l'évapotranspiration, celui de l'infiltration à travers les diverses qualités de sols, le volume des eaux de ruissellement superficiel, celui des eaux souterraines. Cela suppose enfin que les temps de résidence, à chacun des niveaux du transport de la goutte d'eau, soient aussi connus.

1. Infiltration dans les sols

Les infiltrations ont lieu dans le *tapis végétal* et les *sols noirs humiques, humolithiques*. La perméabilité dans ces sols est très grande et la rétention du sodium et du chlore, par les mécanismes d'adsorption sur les complexes organo-humiques, de faible durée. Dans les *sols bruns* et les *sols bruns d'accumulation*, qui forment la large majorité des sols du Jura, la circulation est ralentie. Toutefois, les travaux de Pochon montrent que la quantité d'eau recueillie par des drains posés dans la profondeur des sols dépend étroitement des précipitations. En quelques heures ou quelques dizaines d'heures, le sol a tendance à évacuer par l'intérieur et par l'extérieur les eaux en surplus. En période de forte pluviosité ou en période de fonte, la circulation dans les sols est considérablement accélérée. Les pédologues la définissent comme la « vitesse d'avancement d'infiltration maximale ». Elle est de 6 à 30 cm/h (Boulaine 1971). Le problème de l'adsorption du Na^+ dans les *sols bruns* ne se pose pas ou, du moins, ne se pose que temporairement. En effet, toujours d'après les travaux de Pochon, les eaux de percolation des sols sont plus riches ou aussi riches en Na^+ que les eaux de ruissellement ou que les eaux souterraines. Les sols sont donc des donneurs de Na^+.

Pour la partie des eaux qui s'infiltre à travers les sols, nous estimons donc *que le bilan annuel est valable.*

2. Infiltration dans les roches

Les infiltrations ont lieu dans les fissures des *roches nues* ou couvertes de sols humiques et humolithiques, dans les *interstices des ballasts ou des éboulis naturels*, etc. On se place ainsi dans des conditions analogues à celles des pertes et résurgences étudiées au Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel, par MM. Burger (1959), Tripet (1971), Mathey (1969-1970-1971), Daniel et Simeoni (1970), etc. Les plus faibles vitesses mesurées pour le cheminement des eaux, depuis la surface jusqu'à la source, sont de l'ordre de 6 m par heure. Les plus fortes dépassent 300 m/h. En général, les eaux de crue cheminent plus rapidement (par exemple : fonte des neiges) que les eaux d'étiage (Schardt 1904).

D'après ces mesures, il serait permis de penser que pour le Jura, la quasi totalité des eaux de fonte atteint les résurgences naturelles dans

l'année. Ces eaux emprunteraient donc les fissures souterraines les plus ouvertes, c'est-à-dire les « joints de deuxième ordre », de TRIPET *(loc. cit.)*.

On connaît, du reste, des exemples de circulation karstique, pour lesquels, par le dosage du tritium, on a pu prouver que l'âge des eaux était inférieur à un an (BAKALOWICZ 1970).

Toutefois, à la suite des travaux de TOTH (1963) et de KIRALY (1970), sur l'analyse mathématique des écoulements souterrains, que les résultats de HANSHAW et *al.* (1965), de LEVÊQUE et *al.* (1969), de PALOC et *al.* (1967), *in* BAKALOWICZ (1970) ont confirmés, il serait raisonnable d'admettre que, pour une partie au moins des eaux karstiques, le temps de parcours serait supérieur à un an. On pourra préciser ce point pour le Jura neuchâtelois lorsque les résultats des analyses de tritium de MM. OLIVE et BURGER seront publiés. Compte-tenu des travaux de TRIPET *(loc. cit.)* sur le bassin supérieur de l'Areuse, compte-tenu également des résultats provisoires de MATHEY sur le bassin du Val-de-Ruz, nous admettons que le *90 % du sel dilué dans les eaux et infiltré dans les roches mal ou peu couvertes atteindra les niveaux de base des drainages naturels dans l'année.*

3. Infiltration dans les sédiments quaternaires

Le problème est ici fort complexe. Cela revient à poser la question fondamentale du taux de renouvellement des nappes quaternaires si importantes dans l'alimentation en eau potable. Les données à ce sujet sont malheureusement encore rares, parce que difficiles à calculer. Par la méthode du bilan, qui revient à diviser le volume total de l'eau dans la nappe par le volume écoulé (exutoire naturel ou pompage), on a pu calculer, pour une nappe de 10 à 13 millions de m^3 située dans des alluvions, que le renouvellement des eaux de la nappe prenait de trois à cinq mois. MATHEY est arrivé au même ordre de grandeur pour des nappes quaternaires du Val-de-Ruz. C'est une première approximation qui donne un ordre de grandeur, mais qui est entachée d'erreur. En effet, il n'est pas tenu compte de la gamme étendue des perméabilités, par conséquent des vitesses de cheminement de l'eau. Toutes les parties de la nappe ne sont pas homogènes ; le temps de renouvellement n'est pas égal partout. Si l'on fait intervenir au surplus la différence des gradients hydrauliques, on se rend compte que l'image simpliste obtenue par la méthode du bilan n'est qu'une représentation très grossière de ce qui se passe en réalité. Certaines parties de la nappe se renouvelleraient très vite ; pour d'autres, il faudrait des années. Ceci a été mis magistralement en évidence par M. OLIVE (1970), de Thonon. Par l'application de la méthode du tritium aux sources du Chablais, en Savoie, il a pu démontrer que 40 % des eaux de sources étaient plus jeunes qu'un an, 64 %, plus jeunes que deux ans, 78 %, plus jeunes que trois ans et 87 %, plus jeunes que quatre ans. Toutefois, il faut remarquer qu'il y a incompatibilité entre un renouvellement de la nappe tous les trois à cinq mois et le fait que seul le 40 % des eaux de la nappe ait moins

d'un an. En réalité, tout dépend des réserves de la nappe par rapport au volume écoulé. Nous admettrons que dans le Chablais, les réserves sont plus élevées que dans les deux exemples cités ci-dessus. Si l'on ne peut pas estimer à moins d'un an le temps de résidence des eaux dans les nappes quaternaires, *on ne peut pas non plus appliquer un bilan annuel pour les sels.*

4. Estimation globale du bilan

Nous avons vu que pour les infiltrations entre les roches nues et dans les sols, le temps de résidence était inférieur à un an pour la majorité des eaux ; donc, tout le sel répandu dans ces régions avait de fortes chances de se retrouver aux niveaux de base dans l'année. Comme il n'en est pas de même pour les nappes quaternaires, il faut connaître le volume des infiltrations dans ces nappes par rapport au volume global. Il existe de nombreux travaux américains à ce sujet. Mais, pour nos régions, les données sont rares. On doit se contenter des premiers résultats de B. Mathey sur le Val-de-Ruz. Ce val possède un exutoire souterrain, la Serrière, un exutoire de surface, le Seyon. Dans le périmètre d'alimentation, on trouve aussi bien des roches dénudées que des sols ou des dépôts quaternaires. D'après deux méthodes de calcul, B. Mathey arrive à un ordre de grandeur provisoire de 20% d'infiltration dans les nappes quaternaires. Cela signifie que de toutes les eaux qui s'écoulent du Val-de-Ruz, seul le 20% a transité par les nappes quaternaires, dont précisément et en mettant les choses au pire, seul le 40% serait susceptible de ressortir dans l'année.

Si nous appliquons le modèle du Val-de-Ruz, en le corrigeant un peu, à l'ensemble du canton de Neuchâtel, pour lequel nous possédons des statistiques précises sur le sel, nous admettrons en première approximation, que le 90% des eaux d'infiltration a un temps de résidence inférieur à un an ; ce qui veut dire que le 90% du sel dilué dans ces infiltrations se retrouvera dans l'année aux niveaux de base, lac de Neuchâtel, lac de Bienne ou au Doubs.

5. Différences dans le temps de parcours des sels

Pour le sel à dégeler, nous admettrons que la moitié est répandue sur des routes non raccordées au tout-à-l'égout.

Pour le sel de cuisine, la moitié de la consommation ne passe pas non plus directement au tout-à-l'égout. Il faut remarquer que le sel de cuisine est un catalyseur important de la vie, mais il n'est stocké que provisoirement dans la matière vivante. Celle-ci n'est qu'un lieu de transit, n'influençant le bilan que d'une manière infime.

Le temps de parcours *du sel à adoucir* est particulièrement bref. Les chlorures, lors des cycles de régénération, le sodium, lors des cycles d'adoucissement, sont immédiatement rejetés au tout-à-l'égout. Certes,

on peut admettre que le 50% des utilisateurs n'est pas raccordé. Cependant, les appareils d'adoucissement sont surtout posés dans des constructions neuves ou dans des installations industrielles, lesquelles sont, dans leur grande majorité, raccordées au tout-à-l'égout.

On peut donc prévoir que la moitié du sel à dégeler et du sel de cuisine, le 20% du sel à adoucir, le 100% du sel de bétail, devront passer par les stades successifs d'infiltration et de cheminement dans les nappes. Comme le 80% à 90% de ces sels arrivera dans l'année aux niveaux de base, *le bilan annuel est donc justifié pour le 90% de tous les sels.*

On possède, du reste, des preuves indirectes du cheminement rapide du sel pour bétail, comme du sel de cuisine des utilisateurs non raccordés au tout-à-l'égout. Les sources polluées le sont dans leur grande majorité par des infiltrations d'égouts non canalisés, de pertes, de trop-pleins de fosses septiques étanches et à purin. Enfin, c'est presque devenu une règle, qu'à chaque printemps, après perguage, un certain nombre de nappes soient quasi-automatiquement polluées.

Quatrième partie

LES SOURCES NATURELLES DU SODIUM

1. Sols et roches

Les sources naturelles du sodium sont, bien entendu, les formations salifères qui, par le jeu des plissements et de la dynamique propre des sels, sont arrivées en surface ou près de la surface. Là, les sels sont lessivés par les eaux de pluie et les eaux souterraines. C'est la raison pour laquelle on ne trouve pas, dans les pays tempérés, de sels à l'affleurement. Pour les exploiter, il faut aller les chercher en profondeur, comme dans les salines de Bex ou de Rheinfelden.

La charge en chlorures et en sodium des cours d'eau et des lacs ne provient donc pas, dans nos régions, des gisements de sels mais des traces disséminées dans les roches. Les sources du Na sont alors différentes de celles des chlorures. Le Na est libéré par l'altération des silicoaluminates, tels que les plagioclases. Cette altération se situe à la surface des roches, mais principalement dans les sols.

Sur 57 sols jurassiens analysés par Pochon, les teneurs en Na total oscillent en moyenne de 700 à 1100 g par tonne. Il s'agit, comme on le voit, de véritables traces. Mais de plus, tout ce Na n'est pas soluble. D'après les résultats de 16 analyses, le sodium soluble dans l'eau de pluie, par exemple, ne forme que le 3% à 30% du sodium total, représentant des teneurs oscillant entre 30 et 500 g/t du sol total.

Pour gagner une image accélérée des tonnages libérables par l'altération, nous avons mis au point une méthode où l'eau est remplacée, comme agent d'attaque, par l'acide chlorhydrique. Les tonnages livrés par les sols oscillent alors entre 80 et plus de 1000 g/t.

Les roches jurassiennes (calcaires et marnes), soumises au même traitement, seraient susceptibles de livrer de 30 à 250 g/t de Na (48 échantillons de Crétacé) et de 20 à 500 g/t (135 échantillons de Jurassique (PERSOZ, à paraître).

Comparées à celles de roches cristallines, ces teneurs sont très basses ; elles ressortent toutes du domaine des traces. C'est la raison pour laquelle les eaux non polluées du Jura sont très pauvres en Na.

2. Les teneurs des eaux naturelles en sodium

Les eaux de l'Areuse ne contiennent que de 0,7 à 1,5 mg/l de Na. Dans l'Orbe, les teneurs sont du même ordre de grandeur : 1,05 mg/l. Pour le Seyon, les teneurs sont encore plus faibles : de 0,60 à 0,70 mg/l. Pour la Noiraigue et la Serrière, la gamme s'étend de 1,00 à 2,00 mg/l. Ces deux rivières peuvent être touchées par la pollution. Les eaux de la grotte de Vers-chez-le-Brandt, qui ont échappé à toute pollution, ne contiennent que 0,5 à 0,8 mg/l, alors que dans une source polluée des Gorges de l'Areuse, les teneurs dépassent 2,20 mg/l.

D'après les travaux de MISEREZ (1969, 1970*a* et *b*), ceux de STETTLER (inédits), on peut admettre que la teneur des eaux de ruissellement, des eaux de sols et du karst, en dehors de toute pollution, devraient osciller entre 1,0 et 1,5 mg/l en moyenne. Ces teneurs sont, somme toute, peu éloignées de celles de LAHERMO (1970), pour des eaux souterraines de nappes quaternaires de Finlande : 1,6 $\pm$ 1,0 mg/l ou de la Dranse, de Haute-Savoie : 1,6 mg/l (MEYBECK 1970).

Cependant, le lac de Neuchâtel reçoit aussi des eaux des Préalpes et du Bassin molassique, par l'intermédiaire de la Broye et de ses affluents, de la Mentue et, en partie, de l'Orbe, etc. A défaut de données exactes, on peut estimer que les teneurs devaient osciller, avant la pollution, entre celles de la Dranse, 1,6 mg/l et celles du Rhin alpestre, 2,0 mg/l.

Dans nos régions, les eaux de pluie sont pauvres en Na, les teneurs vont, toujours d'après MISEREZ *(loc. cit.)*, de traces non discernables à 0,20 mg/l.

On en conclut *que les teneurs du lac de Neuchâtel devaient osciller à l'origine, entre 1,5 et 2,0 mg/l de Na au maximum.*

Cinquième partie

LES CONSÉQUENCES

1. Les fleuves et les rivières

La progression de la consommation des sels va renforcer la dégradation des biotopes des rivières et fleuves, déjà pollués par les déchets industriels. A la longue, cela pourrait perturber aussi l'approvisionnement des Pays-Bas, par exemple, qui tirent plus du 60% de leur eau

potable du Rhin. Tous les pays en amont sont donc concernés, à commencer par la Suisse. On sait, par exemple, que le Rhin alpestre ne contient que 2,0 mg par litre de Na (MÜLLER 1964). Passé le lac de Constance, les teneurs dans le Rhin à l'émissaire montent à 3,4 mg/l, soit un gain de 1,4 mg/l (MÜLLER, *op. cit.*). Ce gain vient directement de la consommation de sels. En effet, à la Stockacker Ach, on a pu mesurer des concentrations dépassant 106 mg/l de chlorure et à l'embouchure de cette rivière, dans les eaux de surface, les teneurs étaient encore de 32 mg/l de chlorure (MÜLLER 1966). Il ne faut pas oublier que l'effluent d'une station d'épuration contient, par exemple, 81 mg/l de Na et 82 mg/l de Cl (EDEN 1971).

Mais ce sont là des cas encore bénins. Les exemples les mieux étudiés nous viennent des Etats-Unis. L'action du sel se traduit par une atteinte directe à l'équilibre biologique et par un déséquilibre des conditions physicochimiques.

2. *Les lacs*

Exemples connus

Le lac Onondaga, au centre de l'Etat de New York, qui possède le triste privilège d'être classé comme le lac le plus pollué de tout le grand bassin versant du lac Ontario, reçoit journellement 172 tonnes de chlorure de calcium, 74 tonnes de chlorure de sodium, 32 tonnes de sulfate de calcium, 1 tonne d'huile et de graisse, 22 kg de métaux lourds (cuivre, chrome et cyanures) et 200 millions de litres d'eaux usées, partiellement traitées. Ceci a fait disparaître tous les Coregonidae, encore abondants avant 1850.

L'apport de chlorures et de sulfates de Na et de Ca se fait surtout à l'extrémité sud du lac, celui d'eaux usées, à l'extrémité nord. L'abondance des premiers réduit la production primaire d'algues, tandis que les nutrients, provenant des eaux usées, la favorisent. Selon JACKSON (1969), la décroissance de la production primaire du nord au sud du lac est le résultat de la décroissance des nutrients et de *la croissance combinée des sels et des métaux lourds*. C'est là un exemple de l'effet néfaste que provoque une surcharge en sels et en métaux lourds, déversée par l'homme dans un lac qui était à l'état naturel *déjà saumâtre* (1900 mg/l de Cl environ).

Toujours dans l'Etat de New York, la baie d'Irondequoit, une baie communiquant avec le lac Ontario par un étroit chenal, reçoit les eaux d'une banlieue à population relativement dense, qui applique la « politique de la route dégagée » par l'épandage intensif de fondants chimiques.

Durant l'hiver 1969-1970, les eaux de la baie sont passées de quelque 100 à près de 240 mg/l de chlorure. Mais en profondeur, à 21 m, l'augmentation était de 100 à plus de 400 mg/l. Dans la baie, l'irruption en masse des sels à dégeler a provoqué une stratification par densité des eaux du lac, empêchant, selon BUBECK et *al.* (1971), le mélange printanier des eaux et prolongeant d'un mois la stratification estivale. Si

cela n'a rien d'alarmant, le maintien de la stratification crée des défauts d'oxygène au fond du lac, accélérant ainsi, uniquement par la perturbation de l'équilibre physique normal, l'eutrophisation du lac.

Qu'en est-il de nos lacs suisses et limitrophes ?

3. Les lacs de nos régions

a) Situation de quelques lacs

Aucun de nos lacs ne présente encore une augmentation aussi caractéristique que les grands lacs américains. Dans le lac Ontario, par exemple, les teneurs en chlorures ont été multipliées par trois lors de ces soixante-dix dernières années, passant de 7 mg/l environ à plus de 25 en 1969 (BUBECK, *loc. cit.*).

Dans le lac de Constance, pour lequel on dispose de nombreuses mesures de chlorures et de Na, les teneurs en sodium ont été multipliées par deux ces cinquante dernières années : elles atteignent actuellement près de 4 mg/l de Na (MÜLLER, G., communication personnelle). Cependant, l'augmentation est surtout postérieure à la dernière guerre.

Pour le lac Léman, il semble qu'il n'y ait pas de changement depuis 1895 (MEYBECK 1970).

Quant au lac de Neuchâtel, les teneurs atteignent bientôt 3 mg/l de Na, mais, comme nous l'avons déjà vu, nous n'en sommes qu'au début de la croissance de la consommation. Quelles influences les déjections de sel vont-elles avoir ? Les calculs ci-dessous permettront de mieux cerner les grands traits du problème.

b) Hypothèses sur les teneurs naturelles en sodium et la réserve naturelle en sel (NaCl) du lac de Neuchâtel

Nous l'avons déjà vu, il est très difficile de connaître les teneurs en sodium avant la colonisation du pays par l'homme. On sait que les eaux karstiques non polluées ne dépassent pas en moyenne 1,5 mg/l de Na^+ (cf. quatrième partie). On a vu aussi que le Rhin alpestre, dans le bassin duquel une gamme variée de roches affleure, ne contenait en 1964 que 2 mg/l de Na^+ (MÜLLER, *loc. cit.*).

On doit éliminer de notre comparaison le Rhône alpestre. Ses teneurs relativement élevées — 3,26 à 3,65 mg/l de Na^+ — du reste plus élevées que celles du Léman (2,2 à 2,55 mg/l Na, d'après MEYBECK 1970), sont dues en partie à l'industrie chimique, en partie à la présence d'évaporites dans le bassin d'alimentation.

Nous retiendrons donc, comme déjà vu plus haut, que les teneurs originelles des eaux du lac de Neuchâtel ne devaient pas dépasser 2 mg/l de Na et ni être inférieures à 1,5 mg/l de Na avant l'apparition de l'homme.

A partir de cette fourchette, il devient possible de calculer les incidences de l'activité humaine sur les teneurs naturelles.

c) Progression des teneurs en sels et en Na^+ du lac de Neuchâtel à la suite de l'activité humaine

Au tableau 9 figurent les résultats des calculs de l'augmentation des teneurs. Ces calculs sont fondés sur les données et les hypothèses suivantes. Le volume total des eaux du lac est admis à 13,771 km^3 (SOLLBERGER 1966), l'écoulement annuel à 1671 km^3 (contrôlé par le débit moyen de 53,1 m^3/s). Le temps de résidence des eaux, calculé grossièrement par le quotient du volume total au volume annuel écoulé, est de 8,241 années. Il est supposé que la composition du lac est homogène dans tout le volume et que la diffusion du Na^+ et du Cl^- réalise cette homogénéisation en moins d'un an. Il est admis que les processus d'échange d'ions et ceux d'adsorption du Na^+ et du Cl^- par les sédiments sont négligeables. Le lac de Neuchâtel est en effet basique, sa charge en Ca^{++} est beaucoup plus grande que celle en alcalins. La soustraction de Na^+ par les sédiments est donc jugée négligeable.

Enfin, KIRALY (KIRALY et *al.* 1972) a développé une méthode générale grâce à laquelle on peut calculer le temps nécessaire à l'équilibre entre les concentrations d'entrées et les concentrations du lac, compte tenu de la croissance des concentrations d'entrée sous l'effet de l'augmentation de la consommation des sels.

Un des résultats de ces calculs indique qu'il va s'écouler de vingt à vingt-cinq ans jusqu'à l'équilibre, c'est-à-dire du moment où le sel est déversé dans le lac en quantités annuelles constantes jusqu'au moment où les concentrations des eaux du lac seront égales à celles des eaux d'entrée.

Pour les teneurs affichées au tableau 9, nous ne tenons compte que des concentrations d'entrée, donc, précisément, celles qui pourraient, théoriquement, être atteintes pour le lac vingt à vingt-cinq ans plus tard, à condition que la consommation totale de sel dans l'arrière pays soit stabilisée.

Ainsi, on peut admettre que jusqu'en 1955, la consommation de sels totaux dans le bassin du lac de Neuchâtel était stable. Elle oscillait autour de 1,45 tonne de NaCl par km^2, et il arrivait au lac ainsi, bon ou mal an, 3500 tonnes de sel en plus des tonnages naturels. Si l'on admet que les teneurs naturelles étaient de 1,5 mg/l de Na^+, l'apport artificiel dû à l'homme de 3500 tonnes devait faire progresser les teneurs en Na^+ à 2,3-2,4 mg/l. La réserve du lac passait, dans le même temps, de 52 500 à 82 000 tonnes de sel. Dans l'hypothèse d'une teneur originelle de 2,0 mg/l de Na, la réserve du lac, de 70 000 tonnes environ, atteignait plus de 95 000 tonnes et la teneur en Na^+ 2,85 mg/l. Or, six ans plus tard, en 1961, le Laboratoire cantonal mesurait 2,84 mg/l de Na^+. On voit d'après le tableau 6, qu'entre 1955 et 1960, la consommation de sels totaux a peu augmenté aussi bien pour Berne, Fribourg, Neuchâtel ou Vaud. La charge pondérée n'est passée que de 1,45 à 1,50 environ tonne de sel par km^2. On pourrait en déduire que les teneurs originelles devaient se rapprocher de 2 plutôt que de 1,5 mg/l de Na.

En supposant que la consommation des sels n'augmente plus à partir de 1970, les teneurs en Na^+ atteindront entre 4,1 et 5,3 mg/l en 1990-1995.

En 1980, et sur la base d'un doublement des tonnages, tous les cinq ans, la charge moyenne par kilomètre carré atteindrait 20 tonnes de sel environ. Ce n'est qu'après l'an 2000 que les teneurs des eaux du lac oscilleraient entre 12,9 et 13,4 mg/l de Na^+. C'est retrouver là, dans une moindre mesure, la progression bien connue des grands lacs nord-américains.

Cet exemple de la progression des teneurs en sel ou en sodium dans les eaux d'un lac est particulièrement instructif et illustre bien le fait qu'une aggression actuelle de notre environnement se traduit en général dans toute son ampleur, des dizaines d'années plus tard. Pour le moment, le modèle présenté est un modèle simplifié, dans lequel l'influence des courants du lac a été négligée, de même que la possibilité d'une stratification temporaire ou permanente sous l'effet de la densité. Les études de ces prochaines années permettront de contrôler et de corriger le modèle.

TABLEAU 9

Incidences des apports de sel (sels totaux) sur les teneurs en Na^+ des eaux du lac de Neuchâtel

	Hypothèse 1 : 1,5 mg/l Na^+	*Hypothèse 2 : 2,0 mg/l Na^+*
I. Teneurs naturelles		
a) Tonnage exporté	6 400 t/an NaCl	8 500 t/an NaCl
b) Tonnage stocké dans le lac	52 500 t NaCl	70 000 t NaCl
II. Jusqu'en 1955		
Hypothèse		2° Export = import
1° consommation stabilisée		20 à 25 ans plus tard
a) Charge spécifique		1,45 t/km² NaCl
b) Tonnage artificiel importé		3 600 t/an NaCl
c) Tonnage total exporté	10 000 t/an NaCl	12 100 t/an NaCl
d) Teneurs des eaux du lac	2,36 mg/l Na^+	2,85 mg/l Na^+
e) Tonnage stocké	82 000 t NaCl	99 500 NaCl
III. 1970		
a) Charge spécifique		4,5 t/km² NaCl
b) Tonnage artificiel importé		10 950 t/an NaCl
c) Tonnage total exporté	17 350 t/an NaCl	22 450 t/an NaCl
d) Teneurs des eaux du lac	4,1 mg/l Na^+	5,3 mg/l Na^+
e) Tonnage stocké	143 000 t NaCl	185 000 t NaCl
IV. 1980		
a) Charge spécifique		20 t/km² NaCl
b) Tonnage artificiel importé		48 500 t/an NaCl
c) Tonnage total exporté	54 900 t NaCl	57 000 t NaCl
d) Teneurs des eaux du lac	12,9 mg/l Na^+	13,4 mg/l Na^+
e) Tonnage stocké	453 000 t NaCl	470 000 t NaCl

CONCLUSIONS

Comme le sel n'entre pas directement dans les cycles biologiques, qu'il existe à son sujet des statistiques sélectives et que le tonnage rejeté dans les eaux ne cesse d'augmenter, nous sommes exactement dans les conditions favorables pour proposer un *modèle* prospectif sur le cheminement des polluants solubles dans les eaux aussi bien des réservoirs à l'air libre que souterrains.

Certes, à bien des niveaux, il a fallu avoir recours à des approximations, des hypothèses ou des « à priori ». Il s'agit, bien entendu, d'un modèle simplifié dans le sens qu'il n'est pas tenu compte, par exemple, des courants de convection, des cheminements préférentiels ou des gradients de vitesse. Cependant, il représente des conditions limites, celles de l'homogénéité d'un réservoir, ou des vitesses d'écoulement dans une nappe, auxquelles on se référera avec profit.

Au cours de ces prochaines années, l'étude de la distribution des chlorures et du sodium dans les eaux naturelles permettra d'améliorer ce modèle en approfondissant nos connaissances dans des domaines aussi divers que l'âge de l'eau dans les nappes, la dynamique des eaux souterraines ou des lacs, les divers niveaux de rétention dans les sols, les roches ou les sédiments.

En ce qui concerne l'environnement proprement dit, nous sommes capables de prévoir aujourd'hui ce qui va se passer dans dix ans. Grâce aux calculs de Kiraly, il est prouvé que ce que l'on déverse aujourd'hui dans un lac se fera sentir dans toute sa plénitude vingt ou vingt-cinq ans ou même cinquante ans plus tard, suivant le lac.

Nous possédons aujourd'hui déjà des exemples concrets sur les agressions du sel : déséquilibre des biotopes par réductions des espèces et prolifération des individus dans quelques-unes, prolongation ou maintien du défaut d'oxygène dans les fonds de lac par stratification de densité. Ces deux types d'agressions contribuent à accélérer l'eutrophisation contre laquelle on lutte précisément par la construction des centrales d'épuration. Pour ces centrales, en cas de passage de la vague d'eau froide chargée de fondants chimiques, chlorure de calcium et chlorure de sodium, il existe un risque de bloquage de l'activité bactérienne dans les lits de boue activée. Des recherches sont nécessaires dans notre pays pour préciser la sensibilité des biotopes, des bactéries à une salinité mineure mais croissante.

Dans le troisième étage du traitement des eaux usées, c'est-à-dire le traitement chimique, il est prévu de recourir à l'osmose inverse ou à l'échange sur des résines ; deux techniques qui contribueront à accroître massivement le déversement des sels dans les cours d'eau et les lacs.

Des exemples de contaminations temporaires de sources par les fondants chimiques existent déjà dans notre pays.

Enfin, pour le sodium uniquement, celui-ci entre dans la composition de la majorité des détergents phosphatés ou non, biodégradables ou non. L'augmentation de l'alcalinité résultante est aussi un facteur de perturbation du biotope.

Le sel, agresseur méconnu aujourd'hui, risque de devenir trop connu demain. Mais on peut, par des mesures relativement simples et peu coûteuses, casser aujourd'hui déjà, la progression logarithmique de sa consommation. Il faut rechercher une optimisation dans chacune de ses utilisations. Si pour le salage des routes, le problème mérite réflexion, pour l'adoucissement, la solution réside dans le traitement sélectif des eaux destinées au lavage uniquement. Ce n'est pas que l'affaire des gouvernements seuls, cela nous concerne tous.

Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier ici l'Office fédéral des statistiques, le Département des travaux publics, la Régie des sels, le Laboratoire cantonal et les conseillers ou administrateurs de soixante et une communes de la République et Canton de Neuchâtel, dont la compréhension et la collaboration m'ont permis d'assurer la base statistique de ce travail. J'aimerais associer tous les collaborateurs de l'Institut de géologie, Centre d'hydrogéologie et Laboratoire de géochimie, ainsi que ceux du Service des eaux de la ville de Neuchâtel pour leur aide efficace aux divers niveaux de la réflexion et de la rédaction.

Résumé

La production et la consommation mondiale de sel augmentent plus vite que la population. Cela se traduit par des agressions à notre environnement. Celles qui ont pour origine l'activité industrielle et qui se traduisent par des atteintes au sol, aux eaux et à l'atmosphère, sont certes graves, mais restent faciles à détecter. Par contre, la consommation journalière ou saisonnière de petites communautés non industrielles, progresse d'une façon alarmante. Cette augmentation est quasi logarithmique. Elle est due au rapide développement des installations d'adoucissement de l'eau, mais surtout au salage des routes, en complément donc des autres pollutions dues à l'automobile. Par exemple, pour la Suisse, la consommation de sel à dégeler est passée de 10 000 à 128 000 tonnes par an entre 1960 et 1970. Si cette progression était maintenue, elle serait de 1 200 000 tonnes en 1980. Il y a là un grave danger pour les biotopes de nos rivières et lacs, des difficultés pour les centrales d'épuration des eaux usées et un problème pour l'alimentation en eau potable.

Zusammenfassung

Salzproduktion und -verbrauch der Welt nehmen stärker zu als die Bevölkerung. Das führt zu Schädigungen unserer Umwelt. Industrielle Aktivität wirkt sich auf den Boden, das Wasser und die Atmosphäre

aus, zweifellos eine ernste Gefahr, aber hier sind wenigsten die Quellen der Verschmutzung leicht festzustellen. Dagegen nimmt der tägliche oder jahreszeitliche Verbrauch der kleinen, nicht industrialisierten Gemeiden in beängstigender Weise zu. Die Zuwachsrate entspricht fast einer logarithmischen Kurve. Das ist eine Folge der rapiden Entwicklung der Wasserenthärtungsanlagen und vor allem des Salzstreuens auf den Strassen — ein weiterer Verschmutzungseffekt, der zu Lasten des Automobils geht. In der Schweiz ist z. B. von 1960 bis 1970 der jährliche Verbrauch an Strassensalz von 10 000 Tonnen auf 128 000 Tonnen angestiegen. Bei unveränderter Zuwachsrate würden 1980 1 200 000 Tonnen Salz gestreut werden. Darin liegt eine ernste Gefahr für die Biotope unserer Flüsse und Seen, und es sind Schwierigkeiten für Kläranlagen und die Trinkwasserversorgung zu befürchten.

Summary

The worldwide production and consumption of salt increases faster than the population. This translates into an encroachment on our environment. The salts resulting from industrial activity which attack the soil, the water, and the atmosphere are, without doubt, the most serious but they are easily detected. On the other hand, the daily or seasonal consumption by small non-industrial communities is alarming in its progress. This increase, which is almost logarithmic, is due to the rapid development of water-softener installations and, above all, to the salting of roads, thus adding to the pollution already caused by automobiles. For example, in Switzerland the consumption of deicing salt increased from 10,000 to 128,000 tons per year between 1960 and 1970. If this progression were to be continued it would reach 1,200,000 tons by 1980. Therein lies the grave danger to the biotopes in rivers and lakes, the difficulties to be overcome by the water filtration plants, and the problem of te drinking water supply.

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON, P. W. — (1963). Variations in the chemical character of the Susquehanna River at Harrisburg, Pennsylvania. *U. S. Geol. Surv. Water Supply Papers*, 1779 B : 17 pp.

Annuaire statistique de la Suisse. — (1971). Publié par le Bureau fédéral de statistique. 79e année, 663 pp., *Basel* (Birkhäuser Verlag).

BAKALOWICZ, M. — (1970). Hydrodynamique karstique : étude du bassin d'alimentation de la Manavgat (Taurus occidental, Turquie). Thèse 3e cycle Fac. Sci. Paris : 106 pp., 46 fig.

BAKALOWICZ, M., OLIVE, Ph. — (1969). Teneurs en tritium des eaux du karst du Taurus de Pisidie (Turquie). *Centre Recherches Géodynamique, Thonon :* 6 pp.

BOULAINE, J. — (1971). L'Agrologie. *Presses Universitaires de France « Que sais-je ? »* : 1412.

BUBECK, R. C., DIMENT, W. H., DECK, B. L., BALDWIN, A. L. et LIPTON, S. D. — (1971). Runoff of Deicing Salt : Effect on Irondequoit Bay, Rochester, New York. *Science* 172 (3988) : 1128-1131, 7 fig.

BURGER, A. — (1959). Hydrogéologie du Bassin de l'Areuse. *Bull. Soc. Neuchâtel. Géographie* 52 (1), nouv. sér. 11 : 5-304, 29 fig., 6 pl.

— (1963). Répercussions et enseignements de la sécheresse de 1962 sur l'approvisionnement du canton en eau potable. *Rapport à la Commission cantonale des eaux. Département des Travaux publics*, avril 1963 : 47 pp., 15 fig.

Centre d'hydrologie. — (1970). La Serrière - Le Seyon. *Rapport inédit. Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel :* 2 pp., 3 fig.

— (1970). Les Gorges de l'Areuse. *Ibid. :* 2 pp., 1 fig.

— (1970). Le Bassin de l'Areuse. *Ibid. :* 5 pp.

CHARLIER, R. H. et GORDON, B. L. — (1969). Oceanology and Limnology in the Great Lakes. *Assoc. intern. de limnologie théorique et appliquée* 17 : 136-137.

CULKIN, F. et COX, R. A. — (1966). Sodium, potassium, magnesium, calcium, and strontium in sea water. *Deep-Sea Res.* 23 : 789-804 (Springer-Verlag).

DANIEL, C., WITTWEN, C. et SIMEONI, G.-P. — (1970). Essai de coloration à la Grotte de la Cascade, Môtiers (NE). *Cavernes, Bull. des sections neuchâtel. Soc. suisse de spéléologie* 2 : 115-119.

DEIST, J. et TALIBUDDEN, O. — (1967). Ion exchange in soils from the ion pairs K-Ca, K-Rb and K-Na. *Journ. Soil Sciences* 18 :125-137.

EDEN, G. E. — (1971). Idées nouvelles pour l'épuration des eaux. *Symposium sur les derniers développements de la Technologie Britannique*, E. P. F. Zurich, 20-24 septembre 1971 : 10 pp., 1 tabl., 4 fig.

EVIN, J., FLANDRIN, J., MARGRITA, R. et PALOC, H. — (1967). Contribution des analyses chimiques, des colorations et des mesures isotopiques à l'étude des circulations souterraines en réservoirs karstiques. Exemple fourni par la fontaine de Vaucluse et le sondage de Salignan (France). *Mémoires, Intern. Assoc. of Hydrogeologists*, VIII : 298-308.

FETH, J. H., ROBERSON, C. E. et POLZER, W. L. — (1964). Sources of mineral constituents in water from granitic rocks Sierra Nevada, California and Nevada. *U. S. Geol. Surv. Water Supply Papers* 1535-I : 1-70.

GAMBELL, A. W. et FISHER, D. W. — (1960). Chemical composition of rainfall eastern North Carolina and southeastern Virginia. *U. S. Geol. Water Supply Papers*, 1535-K : 1-41.

GORHAM, E. — (1961). Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. *Bull. Geol. Soc. Am.* 72 : 795-840.

HAMMER, U. T. — (1969). Blue-Green algal blooms in Saskatchewan Lakes. *Assoc. intern. de limnologie théorique et appliquée* 17 : 116-125.

HANSHAW, B. B., BACK, W. et RUBIN, M. — (1965). Carbonate equilibria and radiocarbon distribution related to ground-water flow in the floridan limestone aquifère, Hydrologie des roches fissurées. *A. I. H. S. Dubrovnik* 2 : 601-644.

HENSON, E. B. et VIBBER, J. H. — (1969). Precipitation into Lake Champlain, USA : a source of dissolved minerals. *Assoc. intern. de limnologie théorique et appliquée* 17 : 148-153.

JACCARD, A. — (1883). Note sur les Changements du régime des sources dans le Jura neuchâtelois. Recherches hydrologiques pour servir à l'étude des sources du Jura. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 13 : 170-187.

JACKSON, D. F. — (1969). Primary productivity studies in Onondaga Lake, N. Y. *Assoc. intern. de limnologie théorique et appliquée* 17 : 86-94.

KIRALY, L. — (1970). L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing.* 37/91 : 50-57.

KIRALY, L. et KUBLER, B. — (1972). Prévision de la variation du chimisme d'un lac par augmentation des apports solubles. Application : le sodium dans le lac de Neuchâtel (à paraître).

LAHERMO, P. — (1970). Chemical geology of ground and surface waters in Finnish Lapland. *Bull. Comm. Géol. de Finlande* 242 : 1-169, 49 fig., 3 tabl. en dépl., 9 tabl.

LEVÊQUE, P. et PAPAKIS, N. — (1969) Hydrogéologie. Etude de l'activité en tritium de quelques résurgences karstiques en Grèce méridionale. *C. R. Acad. Sci. Paris* 268 : 1023-1025.

LIVINGSTONE, D. A. — (1963). Chemical Composition of Rivers and Lakes. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper* 440-G : 1-64.

LÜSSEM, H. — (1970). Chemische und biologische Veränderungen im Rheinwasser. *Fortschritte der Mineralogie* I-II, 2 : 18-20.

MARTINEZ, J. D. — (1971). Environmental significance of Salt. *A. A. P. G. Bull.* 55/6 : 810-825, 21 fig.

MATHEY, B. — (1970). Détermination du bassin de la Serrière à l'aide de traceurs. *Rapport inédit, Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel :* 43 pp.

— (1970). *Ibid.* Essai complémentaire. *Ibid. :* 4 pp.

— (1971). Essai de coloration des pertes du ruisseau de Vaux à Lignières (NE). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 94 : 119-126.

MEYBECK, M. — (1970). Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. Thèse 3e cycle Fac. des Sci. Paris : 245 pp.

MISEREZ, J.-J. — (1970). Corrélations Na/K dans les eaux karstiques du Jura. *Zeitschr. der Deutsch. Geol. Gesell. Sonderheft Hydrogeologie und Hydrogeochemie, Hannover :* 161-181.

— (1970). Corrélations Na/K dans les eaux karstiques du Jura. Applications aux diagrammes d'équilibre des systèmes Na_2O-resp., K_2O-CO_2-H_2O et Na_2O-resp. K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O. *Annales de Spéléologie* 25/4 : 741-763, 8 fig., 1 tabl.

MÜLLER, G. — (1964). Zur Hydrochemie von Alpenrhein und Seerhein G. W. F. 105 : 810-814, *München* (Verlag R. Oldenburg).

— (1967). Beziehungen zwischen Wasserkörper Bodensediment und Organismen im Bodensee. *Die Naturwissenschaften* 54/17 : 454-466.

— (1970). Zur Hydrochemie des Bodensees. *Fortschritte der Mineralogie* I-II, 2 : 1-34.

MÜLLER, G. et ROPER, H. P. — (1966). Reinhaltung des Rheins. Erste Ergebnisse hydrochemischer Untersuchungen am Bodensee. *G. W. F.* 30 : 825-833, *München* (Verlag R. Oldenburg).

Nations Unies. — (1969). Annuaire statistique.

OLIVE, P. — (1970). Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium. Thèse Fac. Sci. Paris : 138 pp., 54 fig., 20 tabl.

PETCH, M. — (1970). Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de l'Orbe. *Comm. Géotechnique Suisse Soc. helv. sci. nat. Matériaux pour la Géologie de la Suisse, Géophysique* 11 : 95 pp., 15 pl.

POTASH, M., SUNDBERG, S. E. et HENSON, E. B. — (1969). Characterization of water masses of Lake Champlain. *Assoc. intern. de limnologie théorique et appliquée* 17 : 140-147.

SCHARDT, H. — (1903-1904). Origine de la source de l'Areuse (la Doux). *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 32 : 118-139.

SCHWEIZER, H. U. — (1970). Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura). *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Hydrologie,* 17 : 221 pp., 112 fig., 3 cartes.

SERRUYA, C. — (1969). Problems of sedimentation in the Lake of Geneva. *Assoc. intern. de limnologie théorique et appliquée* 17 : 209-218.

SHORT, N. M. — (1961). Geochemical variations in four residual soils. *Journ. of Geol.* 69 : 534-571.

SIEVER, R. K., BECK, C. et BERNER, R. A. — (1965). Composition of interstitial waters of modern sediments. *Journ. of Geol.* 73 : 39-73.

Société des salines suisses du Rhin réunies. — (1961). Notre sel. *Soc. des Salines suisses du Rhin réunies Schweizerhalle :* 51 pp.

SOLLBERGER, H. — (1966). Le lac de Neuchâtel (Suisse). Ses eaux, ses sédiments, ses courants sous-lacustres. Thèse, Univ. Neuchâtel : 434 pp.

TOTH, J. — (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journ. of Geophysical Res.* 68 (16) : 4795-4812.

TRIPET, J.-P. — (1971). Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse, vallées de La Brévine et des Verrières. Rapport final. *Office fédéral de l'Economie hydraulique :* 198 pp.

VERNET, J. P., MEYBECK, M., PACHOUD, A. et SCOLARI, G. — (1971). Le Léman : une synthèse bibliographique (géologie, structure, sédimentation et hydrologie). *Bull. B. R. G. M.* (deuxième série), sect. IV/2 : 47-84, 10 fig., 1 schéma, 9 pl.

WEDEPOHL, K. H. — (1969). Die Zusammensetzung der Erdkruste. *Fortschritte der Mineralogie* 46 (2) : 145-285, 4 fig., 9 tabl.

WHITE, D. E., HEM, J. D. et WARING, G. A. — (1963). Chemical composition of sub-surface waters. Data of Geochemistry, sixth edition, chapter F., *Geol. Surv. Prof. Paper* 440-F : 1-67, 29 tabl.