

QUANTITES DE MATIERES TRANSPORTEES EN SOLUTION ET EN SUSPENSION PAR L'EFFLUENT MAJEUR DES KARSTS BELGES : LA MEUSE

par

Jean-François CLOSE-LECOCQ & Camille EK ¹

(3 figures et 1 tableau)

RESUME. - Des mesures de la charge en solution et en suspension de la Meuse avaient été faites journallement pendant une année par Spring & Prost en 1883. Des mesures analogues (mais non journalières) ont été reprises par Close-Lecocq de 1979 à 1981. Ces deux séries de mesures, faites à un siècle de distance, sont ici comparées. La charge moyenne de la rivière est calculée et son évolution analysée.

La Meuse, effluent principal des formations karstiques de la Belgique a, en amont de Liège, un bassin de 16.400 km²; en moyenne, à la traversée de Liège, la Meuse charrie annuellement plus d'un million de tonnes de carbonates dissous et près de trois cent nonante mille tonnes de matières en suspension. Ceci représente, par rapport aux mesures d'il y a un siècle, une augmentation nette de la charge dissoute et de la charge en suspension. Ces accroissements sont probablement l'effet des activités industrielles dans le sillon Sambre-et-Meuse.

ABSTRACT. - Amount of solved and suspended load in the main outflowing stream of the Belgian karsts : the Meuse River.

Measurements of dissolved and suspended load carried by the Meuse River in Liège, have been done discontinuously during one year. The equations of the regression lines working out the relations between the flow and the suspended and dissolved load have been calculated. From these relations and from daily flow measurements the average load of the river has been estimated.

For a drainage basin of 16.400 km², an average annual flow of 5,708 millions of m³, the average annual suspended load is 388.000 tons, the average annual load of bicarbonate in solution is 1.092.000 tons. The comparison between these results and measurements done by Spring and Prost (1883) at the same place shows that the solved load and the suspended load have considerably increased during the last century. Probably this increase results from the industrial activity of the Sambre-et-Meuse basin.

ZUSAMMENFASSUNG. - Frachtraten des Gelösten und des Schweb im Hauptfluss des belgischen Karstes : der Maas.

Über ein Jahr wurden in Einzelmessungen Ergebnisse der Frachtraten des Gelösten und des Schweb in der Maas bei Lüttich ermittelt. Zwischen der Abflussrate und dem Gelösten bzw dem Schweb wurden die Regressionsgleichungen berechnet. Die durchschnittliche Last des Flusses wurde aus diesen Relationen und den täglichen Abflussraten abgeschätzt.

Für ein Einzugsgebiet von 16.400 km² bei einem durchschnittlichen jährlichen Abfluss von 5.708 Millionen m³ beträgt die durchschnittliche jährliche Schwebtrate 388.000 Tonnen. Die durchschnittliche jährliche Rate des Bikarbonates im Gelösten beträgt 1.092.000 Tonnen.

Der Vergleich mit den Resultaten von Spring und Prost (1883) zeigt, dass die Schwebtrate und die Rate des Bikarbonates im letzten Jahrhundert beträchtlich angestiegen sind. Dieser Anstieg resultiert wahrscheinlich aus der industriellen Nutzung des Beckens von Sambre und Maas.

INTRODUCTION

Dès 1883, W. Spring et E. Prost avaient mesuré, chaque jour, pendant un an, la charge de la Meuse en solution et sa charge en suspension. Les prélèvements journaliers étaient effectués au coeur de la ville de Liège.

Ce travail a montré qu'entre le 13 novembre 1882 et le 13 novembre 1883 la Meuse a transporté, à Liège, 1.081.884 t de matières en solution et 260.035 t en sus-

¹ *Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire, Université de Liège, place du Vingt-Août, 7, B 4000 Liège (Belgique).*

pension, y compris 21.884 t de matières organiques (Spring & Prost, 1883). La quantité d'eau écoulee durant la même période s'élevait à 5.538 millions de m³. La charge en suspension par litre était d'autant plus élevée que le débit était important, tandis que la concentration des matières dissoutes variait en sens inverse. L'un de nous (C. Ek) a depuis lors précisé - et démontré, en ce qui concerne la Meuse - que la quantité de matières évacuées en solution, exprimée en poids par unité de temps, est plus importante lorsque le débit s'accroît (Ek, 1969). Il a étudié les relations entre les variations de débit et les variations du contenu du fleuve en matières dissoutes. L'autre (J.-Fr. Close-Lecocq) a consacré un mémoire de licence aux transports en suspension et en solution de la Meuse (Close-Lecocq, 1981), puis a publié, en collaboration, un travail sur le même sujet dans lequel on trouvera la description des méthodes et techniques employées (Close-Lecocq, Pissart & Koch, 1982).

Il faut préciser ici que la Meuse est de loin le principal effluent des régions calcaires de la Belgique. Son bassin, en amont de Liège, est d'environ 16.400 km² (Vereestraeten, 1970) (bassin de l'Ourthe exclu), comprenant dans la partie belge du bassin, 1.500 km² environ d'affleurements de calcaires paléozoïques et quelque 200 km² de calcaires mésozoïques (jurassiques et crétacés); la partie française du bassin (8.400 km² environ, soit un peu plus de la moitié du bassin fluvial en amont de Liège) s'étend sur le Trias et le Jurassique et comporte environ 4.000 km² de roches calcaires, crayeuses ou dolomitiques, assez souvent impures. On peut considérer que 5.700 km², soit un peu plus du tiers du bassin, sont constitués de calcaires, dont plus de la moitié sont impurs ou comportent de notables intercalations d'autres roches.

LES TRANSPORTS EN SOLUTION

Les mesures de Spring et Prost en 1883 étaient essentiellement menées de la manière suivante : un échantillon de cinq litres d'eau était mis à décanter, puis le liquide clair était siphonné, le reste était filtré, et le poids du dépôt sur le filtre considéré comme représentant la charge en suspension. Dans le liquide clair siphonné, une analyse au permanganate de potassium indiquait la teneur en matières organiques et des analyses chimiques et le poids du résidu sec après évaporation d'un litre d'eau décantée indiquaient la quantité de matières dissoutes transportées.

Après un an de mesures, ils ont calculé que la Meuse à Liège avait évacué à l'état dissous 1.081.884 t de matières, soit plus de quatre fois la quantité transportée en suspension. La concentration moyenne en solution (bicarbonates et autres sels) avait été de 211 mg/l, avec un minimum de 86 mg/l et un maximum de 279 mg/l.

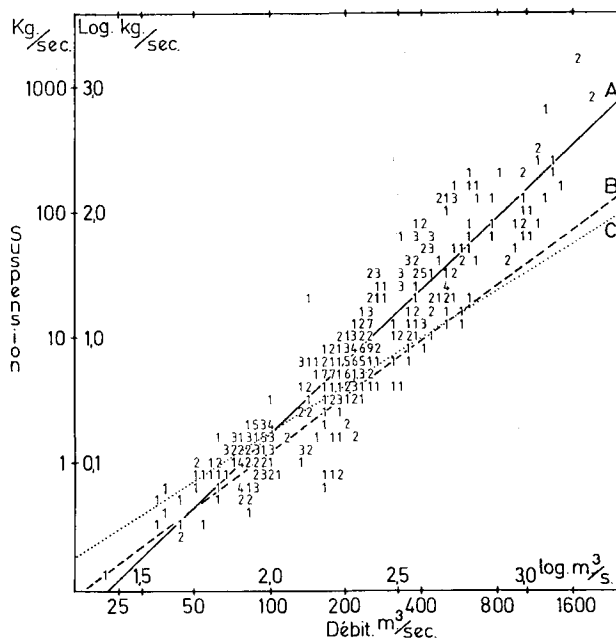


Figure 1

Relation entre le débit liquide exprimé en m³/s et le débit en solution (en kg/s) d'après les données de Spring et Prost (1883). Les chiffres indiquent le nombre de données qui prennent place en chaque point.

Nous avons recherché la droite de régression exprimant le rapport existant entre le débit et la charge en solution pour les 365 données de Spring et Prost. La relation s'écrit $\log s = 0,88558 \log d + 2,5599$ où s est la charge en solution exprimée en kg/s et d le débit exprimé en m³/s. Pour cette formule, le coefficient de corrélation est égal à 0,985. La figure 1 exprime graphiquement la relation.

Spring et Prost ont noté que la charge en solution, exprimée en mg/l, augmente lorsque le débit diminue. C'est ce qui nous est apparu aussi en exploitant les données de 1964 et 1965 du Laboratoire d'analyses de la Centrale électrique des Awirs. La figure 2 montre que l'influence du débit sur la teneur en calcaire dissous est très nette surtout pour les débits de 100 à 2.000 m³/s; La teneur est par contre sensiblement constante pour tout débit de moins de 100 m³/s.

Nous pensons que ce fait s'explique comme suit (Ek, 1969). C'est essentiellement la différence entre précipitations et déficit d'écoulement (dû surtout, à l'échelle de la Meuse, à l'évapotranspiration) qui régit le débit. La variation saisonnière des précipitations est très peu marquée dans notre région. L'évapotranspiration présente au contraire une variation saisonnière importante mais complexe : due en partie à la température (influence sur l'évaporation) et en partie à l'état de la végétation (influence sur la transpiration).

L'augmentation de la dureté des eaux va donc de pair avec l'augmentation de l'évapotranspiration et, de façon plus générale, avec l'augmentation du déficit d'écoulement.

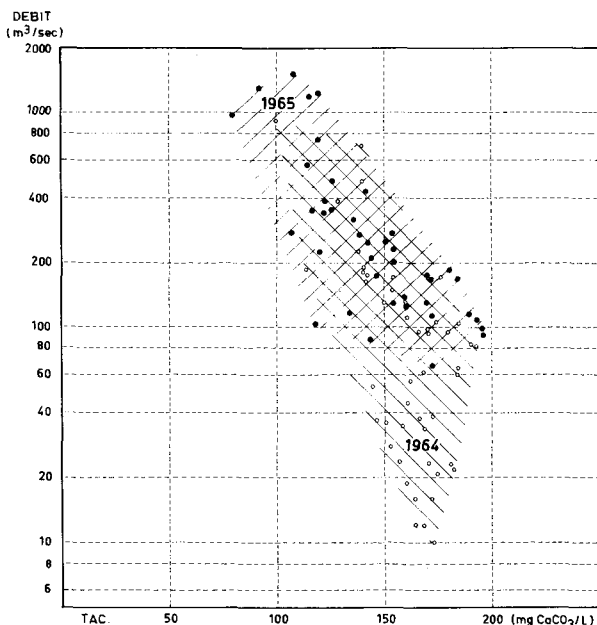


Figure 2

La teneur en calcaire (exprimée par le T.A.C.) de la Meuse en amont de Liège, aux Awirs, en fonction du débit.

Années 1964 (cercles creux) et 1965 (points noirs).

Cette évolution connaît une limite, que montre la partie inférieure de la figure 2 : lorsque le déficit d'écoulement devient tel que la Meuse ne comporte presque plus d'eau de ruissellement, et qu'elle n'est presque plus alimentée que par l'eau des réserves aquifères souterraines, la dureté atteint un seuil : les eaux souterraines élaborées présentent en effet une dureté assez forte, et sont très probablement toujours saturées ou à peu près; une fois reprises par le fleuve, ces eaux se trouvent dans un courant dont le périmètre mouillé est très faible vis-à-vis de la section; l'eau ne peut plus alors exercer qu'une action dissolvante très minime, pratiquement négligeable : la dureté devient constante : elle est essentiellement la dureté acquise antérieurement sous terre. La figure 2 nous indique que la valeur critique de cette dureté est de 150-180 mg/l, et qu'elle fut atteinte en 1964 à partir d'un seuil du débit de l'ordre de 80 m³/sec.

Ce seuil pourrait varier légèrement d'une année à l'autre, selon qu'il est atteint du fait d'une augmentation de l'évaporation, de la transpiration ou de l'infiltration : si ces trois phénomènes sont influencés par la température, le second l'est aussi, par exemple, par l'abondance du feuillage, le troisième par l'état du sol dû à des conditions météorologiques antérieures, etc. Les facteurs de la variation du déficit d'écoulement - et par là du débit du fleuve - sont donc très nombreux, et ont certaines relations d'interdépendance complexes; c'est là qu'il faut chercher la cause de l'importante variabilité de la période - juin à novembre - du maximum annuel de la teneur des eaux en calcaire dissous.

Dans l'ensemble cependant, l'évolution à l'échelle

de l'année de la dureté de la Meuse, effluent général de la région, est essentiellement reliée (par une fonction inverse) à la quantité d'eau écoulée par unité de temps.

On connaît la polémique engagée sur les influences climatiques sur la dissolution du calcaire : est-ce dans les régions chaudes ou dans les régions froides que la dissolution est la plus active ?

Les essais en vue de comparer des régions de zones climatiques différentes se heurtent évidemment à de grandes difficultés : en particulier la quasi-impossibilité de trouver sous des climats bien différents des régions dont le type de calcaire, la structure, l'épaisseur de sol meuble, le relief, etc. soient similaires, et d'éliminer des variables les influences possibles de l'affectation anthropique du sol, etc. . .

De là, l'intérêt et l'importance de l'étude, dans une même région, des variations saisonnières. Cette étude permet en effet - avec les précautions qui s'imposent - d'examiner les comportements des eaux sous les conditions de température variables, dans un cadre géologique et géomorphologique invariable.

Nos observations nous montrent le peu d'importance des saisons en tant que telles sous nos climats : les pCO₂ les plus fortes s'observent en automne, mais il s'agit d'un maximum peu marqué dans les cours d'eau; il faut, pour déceler une évolution saisonnière nette, considérer un grand cours d'eau (en l'occurrence, la Meuse); encore les variations de teneur en bicarbonates sont-elles directement liées aux variations du débit : les débits les plus faibles correspondent aux maxima de dureté de l'eau, mais les débits les plus forts correspondent à des enlèvements de matière dissoute beaucoup plus importants (de l'ordre de cinquante fois plus), contrairement à l'opinion généralement reçue jusque vers 1970, et reprise, par exemple, par Tricart (1965) : "Le 'trafic' est relativement régulier, car les concentrations sont plus fortes en périodes de basses eaux et moindres en période de crue, ce qui égalise jusqu'à un certain point les tonnages kilométriques".

Dans la région étudiée, l'amplitude des températures mensuelles moyennes est de l'ordre de 18°C. L'influence directe de ce rythme annuel est, aussi bien dans le fleuve que dans les moindres ruisselets, imperceptible, alors qu'une amplitude de 18°C fait varier du simple au double le coefficient de dissolution du CO₂ dans l'eau et du simple au triple, en sens inverse, les vitesses de réaction. Nos analyses montrent que ces variations sont, dans la Meuse, négligeables devant l'effet des variations de débit (Ek, 1969, 1973).

D'autre part, nous avons effectué une vingtaine d'analyses pour contrôle, de 1979 à 1981 (voir Close-Lecocq *et al.*, 1982). En nous basant sur ces analyses sur l'équation reliant charge en solution et débit que nous en avons tirée $\log s = 0,835 \log d + 2,715$ (coefficient de corrélation : 0,989)

et sur des tables de débits journaliers de 1958 à 1977,

nous avons calculé que la charge moyenne annuelle de la Meuse durant ces vingt années avait dû être d'environ 1.092.000 t de bicarbonate de calcium par an. Les autres sels dissous (non analysés par nous) représentent, d'après Spring et Prost (*op. cit.*), 300.000 tonnes de plus. Réparti sur l'ensemble du bassin de la Meuse en amont de Liège, ceci représenterait un enlèvement total par dissolution de 85 t/km²/an, dont 67 t/km²/an de bicarbonate de calcium. Pour nous exprimer dans des unités plus courantes en matière de mesure de l'érosion (Corbel, 1961), ceci correspond à 30 m³/km²/an d'enlèvement de matière sous forme dissoute, dont 24 m³/km²/an de bicarbonate de calcium. Et comme un tiers seulement du bassin est constitué de roches solubles à des degrés divers, ceci représente, dans ces roches solubles, un départ de 90 m³/km²/an de matières dissoutes, dont 72 m³/km²/an de calcaire. Ces chiffres sont sensiblement dans les ordres de grandeurs moyens proposés par Bögli (1980, p. 46) dans sa revue des mesures de l'enlèvement par dissolution en climat tempéré. C'est toutefois une mesure un peu forte par rapport à la pluviosité du bassin (de l'ordre du mètre par an) : le chiffre de 90 m³/km²/an cadre mieux avec les données qu'il rapporte pour des régions où la pluviosité est de l'ordre de 2 m par an. Mais la comparaison des résultats de Spring et Prost (1883) avec les nôtres indique que la charge en solution a dû s'accroître de 30 % environ au cours du siècle écoulé (Close-Lecocq *et al.*, 1982, p. 16).

De la sorte, il y a 100 ans, l'enlèvement, de l'ordre de 70 m³/km²/an, cadrait avec les moyennes relevées par Bögli, tandis que le chiffre actuel serait un effet d'actions anthropiques : l'effet du développement des grandes carrières de calcaire et des cimenteries le long du fleuve.

Après avoir calculé les droites de régression entre le débit et la charge (en suspension d'une part, en solution d'autre part), nous avons utilisé les données journalières de débit de la Centrale électrique d'Ampsin pour les années 1958 à 1977 et estimé ainsi la charge moyenne en suspension et en solution au cours de chacune de ces vingt années (Close-Lecocq *et al.*, 1982, p. 11). Les résultats sont consignés dans le tableau 1.

LES TRANSPORTS EN SUSPENSION

Afin de comparer la situation actuelle à celle qu'avaient connue Spring et Prost en 1883, nous avons procédé à 267 prélèvements, à Liège, entre le 17 décembre 1979 et le 17 janvier 1981. Au cours de cette période, la charge maximale observée en suspension a été de 951 mg/l et la charge minimale de 4 mg/l.

Notre méthode de travail a été décrite antérieurement (Close-Lecocq *et al.*, 1982).

Nous avons recherché pour nos 267 données la relation qui unit le débit de la Meuse avec la charge en

Tableau 1

Année	Débit annuel (m ³)	Débit moyen (m ³ /s)	S U S P E N S I O N		S O L U T I O N	
			Estimation d'après l'équa- tion (kg)	Charge moyenne en mg/l	Estimation à partir de l'équation (kg)	Charge moyenne en mg/l
1958	5.664.902.400	179,6	382.118.690	67	1.080.276.500	191
1959	2.628.115.200	83,3	106.031.810	40	541.743.500	206
1960	5.819.126.400	184,5	398.686.752	69	1.114.387.200	192
1961	7.814.534.400	247,8	743.114.304	95	1.435.354.460	184
1962	7.015.939.200	222,5	607.998.528	87	1.297.900.800	185
1963	4.573.411.200	145,0	256.001.472	56	902.715.840	197
1964	2.953.411.200	92,6	112.935.168	38	607.049.860	206
1965	9.933.148.800	314,9	1.046.952.000	105	1.799.089.900	181
1966	10.324.800.000	327,4	1.000.399.680	97	1.873.013.800	181
1967	6.585.840.000	208,8	410.664.384	62	1.256.083.200	191
1968	6.577.459.200	208,5	402.385.536	61	1.259.159.000	191
1969	5.300.380.800	168,1	203.412.384	38	1.050.071.000	198
1970	7.755.436.800	245,9	666.164.960	86	1.437.393.600	185
1971	3.396.470.400	107,7	116.335.872	34	698.282.200	206
1972	4.285.526.400	135,9	144.491.040	34	869.244.800	203
1973	3.843.763.200	121,9	134.561.880	35	781.610.690	203
1974	6.537.456.000	207,3	406.639.872	62	1.247.257.400	191
1975	5.079.369.600	161,1	272.294.784	54	990.541.440	195
1976	2.390.512.200	75,8	59.299.516	25	507.612.960	212
1977	5.692.896.000	180,5	298.613.952	52	1.106.490.200	194
Total	114.172.499.400	Débit moyen	7.769.102.584		21.855.278.350	
	X = 5.708.624.970	$\bar{x}=181,0$	Y = 388.455.129	$\bar{x}=60$	Y = 1.092.763.920	$\bar{x}=194$

suspension. Comme le montre la figure 3, la relation est très bonne (coefficient de corrélation de 0,93). La droite de régression obtenue pour toutes les données de 1979-1980 est exprimée par la formule

$$\log s = 1,9606 \log d - 0,73234$$

où s = le débit solide en g/s et d = le débit liquide en m^3/s .

L'application de cette formule nous a permis de calculer, à partir des débits journaliers à Ampsin-Neuville de 1958 à 1977, la charge transportée par la Meuse en 20 ans.

Ces résultats sont rassemblés au tableau 1. Ils montrent que, en considérant uniquement le débit annuel moyen, il n'est pas possible d'évaluer correctement la charge en suspension.

Ces calculs permettent d'estimer que, de 1958 à 1977, la charge moyenne en suspension de la Meuse à Liège a très vraisemblablement été voisine de 388.000 t par an (1).

Nous avons également calculé l'équation liant charge en suspension et débit pour les 365 données de Spring et Prost (période 1882-1883). Cette équation s'écrit :

$$\log s = 1,4815 \log d + 0,13391$$

Les matières organiques mesurées par Spring et Prost devaient être ajoutées aux matières en suspension afin que leurs données soient comparables à celles que nous avons obtenues. L'équation devient alors

$$\log s = 1,2773 \log d + 0,6734$$

Le coefficient de corrélation n'est cependant plus que de 0,690. Cette droite de régression a été dessinée également sur la figure 3.

Comparer les deux droites de cette figure ne peut se faire qu'avec prudence. Cette comparaison indique que, actuellement, les transports en suspension sont plus importants pour des débits dépassant 100 m^3/s et moins importants pour des débits inférieurs à cette valeur. Au total, le transport annuel moyen est actuellement beaucoup plus important qu'autrefois.

Cette augmentation est fort probablement due notamment à l'aménagement du lit du fleuve pour la navigation. En effet, l'établissement de barrages permet, durant les périodes d'étiage, une sédimentation des particules en suspension (Kirchmann *et al.*, 1975). Spring et Prost avaient déjà remarqué que le maximum de suspension est d'autant plus considérable qu'une période d'étiage longue a existé entre les crues. D'autre part, l'augmentation des surfaces bâties, l'égouttage, les modifications des pratiques agricoles (agrandissement des parcelles, substitution des engrais chimiques au fumier) contribuent à l'augmentation de la charge (Sine & Agnessens, 1978; Pissart & Bollinne, 1978). Il ne faut pas oublier les activités industrielles qui apportent de nombreux sédiments.

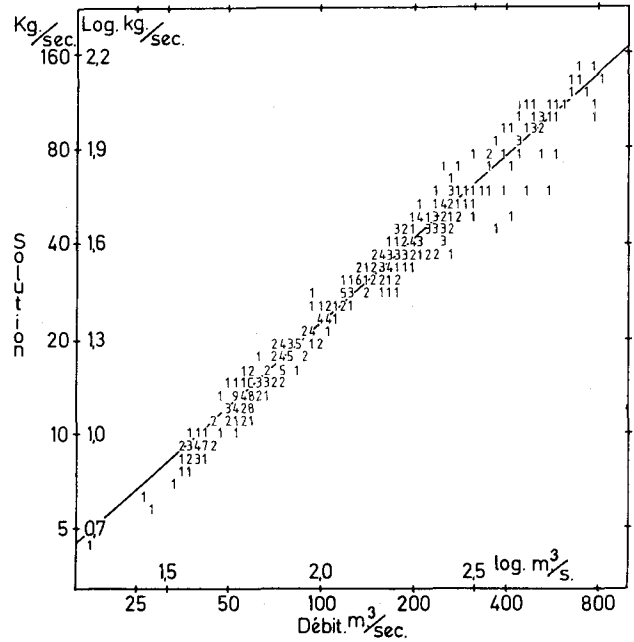


Figure 3. - Relation entre les débits liquides et les débits solides. La droite A et les chiffres se rapportent à nos observations (discontinues) de 1979 à 1981. Les chiffres indiquent le nombre de données en chaque point. La droite B, en tireté, résulte des données en suspension recueillies par Spring et Prost (1883), sans les matières organiques. La droite C, en pointillé, reprend les mêmes données, mais en y ajoutant les matières organiques.

Nous avons étudié par ailleurs (Close-Lecocq, 1981; Close-Lecocq *et al.*, 1982) la composition chimique des sédiments; sur ce plan qualitatif, l'évolution ne paraît pas très importante, si ce n'est l'augmentation de la quantité de calcaire en suspension, très probablement liée au développement des carrières. Les analyses quantitatives révèlent en effet la présence de 16 % de CaO dans les sédiments.

CONCLUSIONS

La Meuse, principal effluent des régions karstiques de la Belgique, transporte chaque année 1.092.000 tonnes de calcaire dissous, auquel il faut ajouter environ 300.000 tonnes d'autres matières dissoutes (Spring & Prost, *op. cit.*) et 388.000 tonnes de matières en suspension. Les matières dissoutes représentent donc, en poids, 80 % de la charge totale, et le calcaire à lui seul 63 %. Pour un bassin (en amont de Liège) de 16.400 km^2 , dont un tiers de roches diversement solubles, elle emporte en moyenne par an 85 t/km^2 soit 30 m^3/km^2 d'éléments dissous et 21 t/km^2 , soit 8 m^3/km^2 de produits en suspension. La matière dissoute, considérée enlevée uniquement dans les roches plus ou moins karstifiables, y représenterait 90 $m^3/km^2/an$.

(1) et non 338.000 comme il a été noté par erreur dans Close-Lecocq *et al.*, 1982, p. 10.

La comparaison de nos analyses avec celles de Spring et Prost (1883) d'il y a un siècle montre que la charge en calcaire dissous s'est accrue d'environ 30 % depuis ce temps, très probablement en relation avec des facteurs d'origine anthropique.

REMERCIEMENTS

Ce travail doit beaucoup à M. G. Koch, chef de la Section des Mesures de bas niveaux au Centre d'Etude de l'Energie nucléaire (C.E.N.) de Mol : son soutien logistique indispensable en matière de prélèvements et d'analyses s'est doublé d'un précieux appui moral et de nombreux avis utiles. Notre gratitude va aussi au Professeur A. Pissart, de l'Université de Liège, sans les conseils et l'aide de qui ce travail n'aurait pu être mené à bien et qui a bien voulu relire nos manuscrits successifs. Nous remercions aussi les membres des Laboratoires de la Section des Mesures de bas niveaux du C.E.N. de Mol et du Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire de l'Université de Liège. Toutes nos mesures ont été faites dans ces Laboratoires ou avec leur matériel, et avec la collaboration de leurs membres.

BIBLIOGRAPHIE

- BÖGLI, A., 1980. Karst hydrology and physical speleology. Berlin (Springer-Verlag), 284 p.
- CLOSE-LECOCQ, J.-F., 1981. Les transports en suspension de la Meuse à Liège et à Tailfer. Mém. de Lic. en Sc. géogr. (inédit), Univ. de Liège, 180 p.
- CLOSE-LECOCQ, J.-F., PISSART, A. & KOCH, G., 1982. Les transports en suspension et en solution de la Meuse à Liège et à Tailfer. Bull. Soc. géogr. Liège, 18 : 5-18.
- CORBEL, J., 1961. Sur la dissolution du calcaire. Rev. de Géogr. de l'Est, 4 : 363-365.
- EK, C., 1969. Facteurs, processus et morphologie karstiques dans les calcaires paléozoïques de la Belgique. Thèse doct., Univ. Liège, vol. 1 : 200 p; vol. 2 : 122 p.; vol. 3 : 154 p.
- EK, C., 1973. Analyses d'eaux des calcaires paléozoïques de la Belgique. Serv. géol. de Belg., Prof. Paper n° 18 : 32 p. et 56 tab.
- KIRCHMANN, R., FIEUW, G., BONNYNS-VAN GELDER, E., CANTILLON, G. & COLLARD, J., 1975. Etude radiosédimentologique de la Meuse et du Canal Albert. Groupe mixte C.E.N./S.C.K.-I.H.E. (Ministère de la Santé publique). Document de travail (diffusion restreinte), 270 p.
- MEYBECK, M., 1976. Dissolved and suspended matter carried by rivers : composition, time and space variations, and world balance. Presented at : Interaction between sediments and fresh water. Intern. Symp. Amsterdam, 1976. Publ. Dr. W. Junck, B.U., The Hague (Netherlands). Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen : 25-32.
- PISSART, A. & BOLLINNE, A., 1978. L'érosion des sols limoneux cultivés de la Hesbaye. Aperçu général. Pédologie, 28 (2) : 161-183.
- SINE, L. & AGNEESSENS, J.P., 1978. Etude des débits solides et du phénomène de migration dans une rivière drainant un bassin agricole. Pédologie, 28 (2) : 183-191.
- SPRING, W. & PROST, E., 1883. Etude sur les eaux de la Meuse. Ann. Soc. géol. Belg., 11 : 123-220.
- TRICART, J., 1965. Principes et méthodes de la Géomorphologie. Paris, 496 p.
- VEREERSTRAETEN, J., 1970. Hydrologie du bassin de la Meuse. Rev. belge de Géogr., 94 (1-3) : 1-139.