



Transports en suspension et en solution par la Moselle en périodes de crue

Zuhair Kattan, Jean-Luc Probst

► To cite this version:

Zuhair Kattan, Jean-Luc Probst. Transports en suspension et en solution par la Moselle en périodes de crue. Journées d'Hydrologie de Strasbourg 1986 " CRUES ET INONDATIONS", Oct 1986, Strasbourg, France. pp.143-167. hal-01520892

HAL Id: hal-01520892

<https://hal.science/hal-01520892>

Submitted on 2 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 4576

To cite this version : Kattan, Zuhair and Probst, Jean-Luc
Transports en suspension et en solution par la Moselle en périodes de crue. (1987) In: Journées d'Hydrologie de Strasbourg 1986 " CRUES ET INONDATIONS", 16 October 1986 - 18 October 1986 (Strasbourg, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Journées d'Hydrologie de Strasbourg
CRUES ET INONDATIONS
16, 17 et 18 Octobre 1986

*TRANSPORTS EN SUSPENSION ET EN SOLUTION
PAR LA MOSELLE EN PERIODES DE CRUE*

*Zuhair KATTAN *, Jean-Luc PROBST **

RESUME

On présente dans cette étude les résultats des campagnes de prélèvements et d'analyses qui ont été effectués sur la Moselle à Millery au cours de différents épisodes de crue. On cherche ici à déterminer l'origine et la dynamique de transfert des éléments dissous et particulaires transportés par le fleuve. On compare l'évolution des concentrations des éléments avec celle des débits liquides et on détermine la nature de leur relation. On utilise enfin un modèle hydrologique simple (HYDEC) basé sur un découpage des hydrogrammes de crue et un modèle de mélange des flux de matières entre réservoirs pour calculer soit les concentrations soit les débits des différents écoulements. Ces modèles permettent enfin de déterminer les relations entre les charges en éléments dans le fleuve et les débits des différents écoulements.

ABSTRACT : SUSPENDED AND DISSOLVED LOADS BY THE MOSEL RIVER DURING STORMFLOW PERIODS

The authors present the analysis results of the samples which have been collected in the Mosel river at Millery gauging station during the storm runoff periods. The objectives are to determine the origine and the transfer dynamic of the solute and particulate loads transported by the Mosel river. Then, we compare the behaviour of the element concen-

* Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface.
Institut de Géologie 1 rue Blessig-67084 STRASBOURG Cedex - FRANCE -

trations with the variations of the river discharge and we determine the relationships discharge - concentration. A simple hydrological model (HYDEC) based on the hydrograph component separation, and a mixing model allow to calculate the concentrations or the discharges of the different runoff components. These models allow to determine the relationships between the river loads and the different runoff component discharges.

* * *

I - INTRODUCTION

Dans le cadre d'une ASP-PIREN EAU (1984-1986) et en collaboration avec l'Agence de l'Eau Rhin Meuse (Metz), nous avons effectué un suivi géochimique de 2 cycles hydrologiques complets (1984 à 1986) sur la Moselle à Millery (BV = 6850 km³). L'objectif de ce suivi est d'une part l'établissement de bilans chiffrés des flux de matières dissoutes et particulaires et d'autre part la compréhension des mécanismes qui régissent à l'échelle d'un grand bassin, en région tempérée industrielle, la dynamique et le transfert des éléments libérés par l'érosion (mécanique et chimique) et apportés par les pollutions (ponctuelles et diffuses).

Les périodes de crues jouent un rôle important dans l'exportation de la plupart des éléments. Le suivi géochimique de ces épisodes à un pas de temps réduit (2 ou 4 heures) est indispensable pour calculer avec précision les flux de matières à l'exutoire d'un grand bassin. Ces épisodes sont des périodes clefs dans le cycle hydrologique des fleuves pour comprendre l'origine et la dynamique de transfert des éléments qui sont exportés par les fleuves. C'est en effet au cours de ces périodes que les écoulements de surface (ruissellements hypodermique et superficiel) alimentent la rivière et viennent modifier les régimes hydrologiques et géochimiques des écoulements de base (aquifères souterrains). On présente ici d'une part les résultats obtenus durant ces épisodes concernant l'évolution des concentrations des éléments en solution et des sédiments en suspension (compositions chimiques et minéralogiques) et d'autre part les méthodes d'étude utilisées pour comprendre l'évolution de ces concentrations.

II - CARACTERISTIQUES DU BASSIN DE LA MOSELLE

Le bassin de la Moselle à Millery couvre dans le Nord-Est de la France une superficie de 6850 km² (fig. 1). L'altitude moyenne de ce bassin est de 397 m. La Moselle et son affluent principal, la Meurthe, drainent le versant Lorrain du Massif des Vosges. La Moselle prend sa source à une altitude de 1226 m dans le massif des Vosges et rejoint le Rhin en Allemagne. Le bassin de la Moselle est soumis d'une part au climat du Plateau Lorrain de type océanique tempéré et d'autre part au climat du massif Vosgien, océanique froid. Les précipitations moyennes annuelles varient de 600 mm à plus de 1900 mm. Le débit moyen interannuel, calculé pendant la période 1971-1983 est de 105 m³/s à la station de Millery. Le régime de la Moselle est de type pluvial et les débits maximums peuvent être observés du mois de décembre au mois de février. L'hydrologie de la Moselle est relativement simple (FRECAUT, 1972 et GILLE, 1985) et la propagation des crues est un phénomène simple et rapide. En effet le substratum est relativement imperméable, le profil en long est assez pentu (1/1000), et le bassin est finalement relativement compact et homogène. Toutes ces caractéristiques physiographiques et hydrologiques jouent un rôle important pour les transferts de matière à l'échelle de ce bassin, notamment pour les transferts en périodes de crue.

D'un point de vue géologique on peut distinguer pour simplifier deux unités géologiques principales :

- le socle vosgien avec des schistes et des granites
- la couverture secondaire avec les formations sédimentaires du Trias (grès, argiles, marnes et calcaires) et du Jurassique (marnes et calcaires).

III - METHODES DE PRELEVEMENTS ET D'ANALYSES

Les données de base qui ont été utilisées dans cette étude concernent les analyses journalières des formes de l'azote dissous (N-NO₃⁻, N-NO₂⁻ et N-NH₄⁺) et du phosphore dissous et particulaire (P-PO₄³⁻ et PP) (MORANGE et SALLERON, 1982). Ces analyses ont été effectuées au cours du cycle 1980-1981 sur des échantillons moyens journaliers (un prélèvement toutes les 12h30) prélevés par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse avec un échantillonneur automatique ISCO.

Nous disposons ensuite d'une série de prélèvements et d'analyses effectuées conjointement par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et notre laboratoire au cours des cycles hydrologiques 1984-1985 et 1985-1986. Au cours de ces deux cycles, plusieurs épisodes de crue ont été suivis et

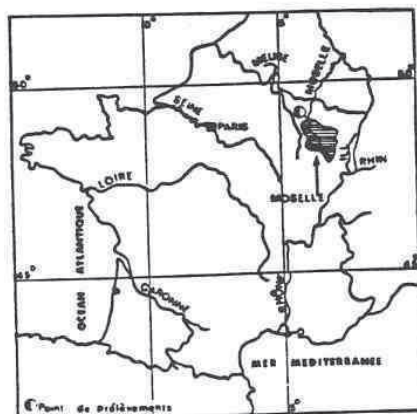


Fig. 1 - Carte de situation du bassin de la Moselle à Millery.

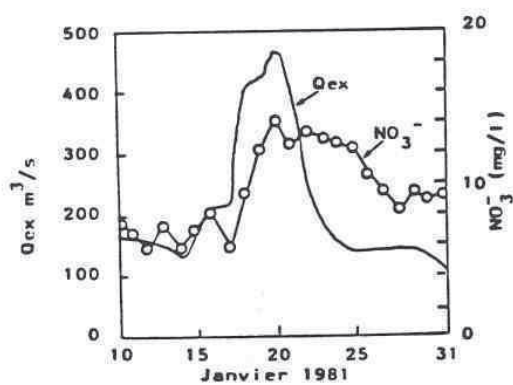
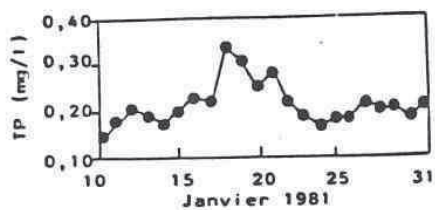
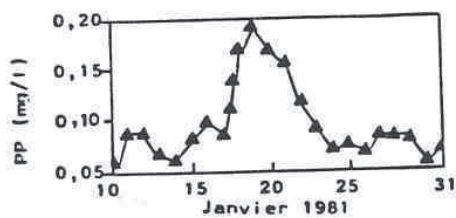


Fig. 2 - Crue de Janvier 1981 : Evolutions comparées des débits et des concentrations en :

- a - nitrate (NO_3^-)



- b - phosphore total (TP)



- c - phosphore particulaire (PP)

les échantillons d'eau ont été prélevés toutes les 2 heures ou 4 heures avec un échantillonneur ISCO.

Pour le cycle 1980-1981 les méthodes d'analyses ont déjà été décrites par KATTAN et al. (1986). Pour les cycles 1984 à 1986, les échantillons prélevés en périodes de crue ont été analysés dans notre laboratoire. Le PH et la conductivité ont été mesurés sur le terrain. La charge en suspension (M.E.S en mg/l) a été obtenue par filtration sur filtre millipore de porosité 0,45 μ m. Pour les éléments dissous, les analyses sont effectuées sur le filtrat. Toutes les techniques d'analyses sont décrites par KREMPP (1982). En ce qui concerne les sédiments en suspension les analyses chimiques et minéralogiques (diffractométrie de rayons X) ont été effectuées sur le matériel recueilli après centrifugation sur un échantillon de 20 l d'eau brute. Les techniques d'analyses chimiques de ces matériaux sont décrites par SAMUEL et ROUAULT (1983).

IV - RÔLE DES CRUES DANS L'EXPORTATION DES ÉLÉMENTS

De nombreux auteurs ont déjà décrit le rôle important joué par les crues dans l'exportation des sédiments en suspension. PROBST et BAZERBACHI (1986) montrent sur la Garonne amont que la crue du 14 décembre 1981 a exporté 25% du total des sédiments évacués par le fleuve cette année là. Il n'est pas possible d'aborder ici le bilan de l'ensemble des éléments exportés au cours des crues de la Moselle. Nous avons donc choisi, à titre d'exemple de présenter les résultats obtenus au cours du cycle 1980-1981 en ce qui concerne l'azote et le phosphore (Tableau I). Ainsi au cours de ce cycle les écoulements de crue représentent 64% de l'écoulement annuel sur la Moselle. De même, les flux de N et de P exportés au cours des périodes de crue représentent respectivement de 57% à 75% des flux annuels.

V - ÉVOLUTIONS DES CONCENTRATIONS DES ESPÈCES DISSOUES ET PARTICULAIRES AU COURS DES CRUES

Les fluctuations des concentrations en éléments dissous et particuliers dans les eaux fluviales sont dues à de nombreux facteurs mais le plus important, notamment en période de crue, est la variabilité des débits. Ainsi de nombreux auteurs se sont attachés à déterminer les relations qui existent entre les concentrations et les débits des fleuves (EDWARDS, 1973 ; GLOVER et JOHNSON, 1974 ; HAUBERT, 1975 ; WALLING et FOSTER, 1975 ; JOHNSON et al. 1979 ; FOSTER, 1980 ; PROBST, 1983 ; EDWARDS et al. 1984 ; DAVIES et KELLER, 1984 ; HEYBECK, 1985 ; PROBST, 1986 ; PROBST et BAZERBACHI, 1986).

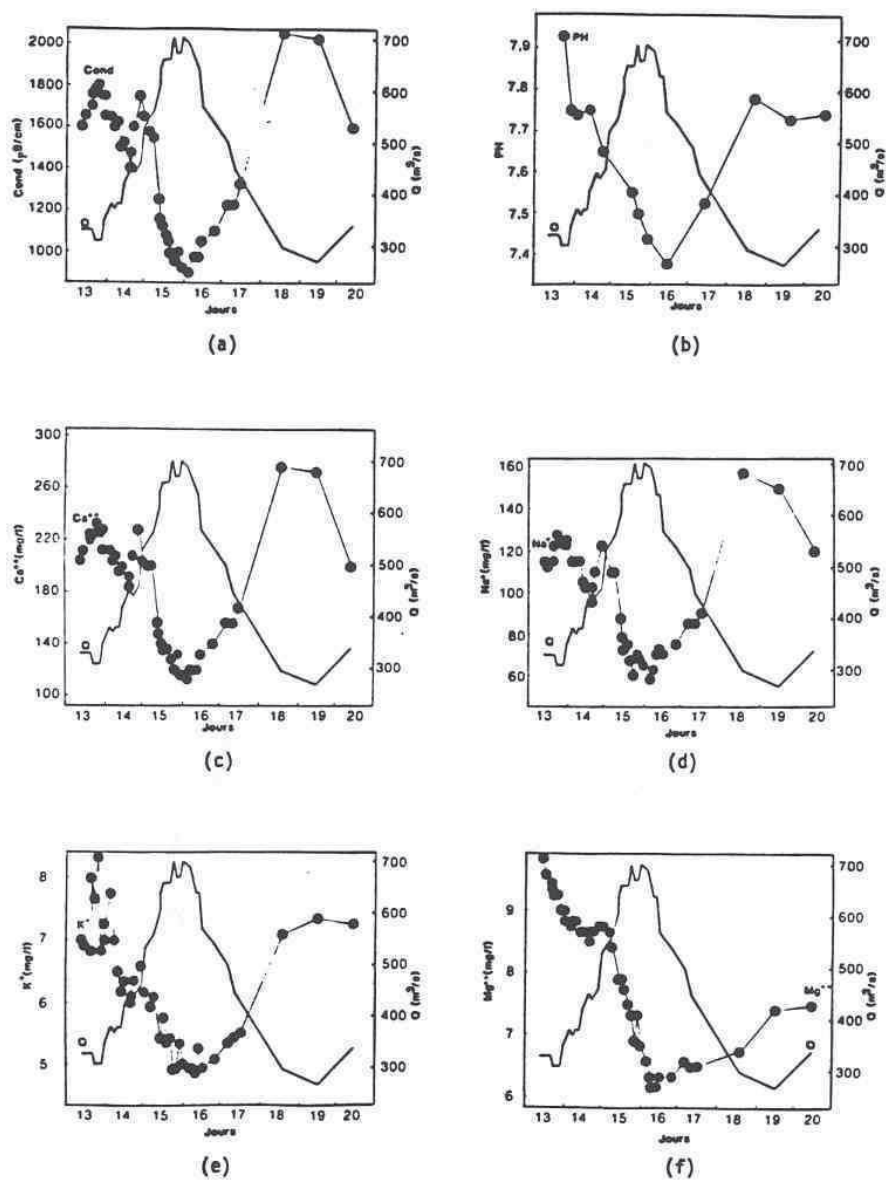
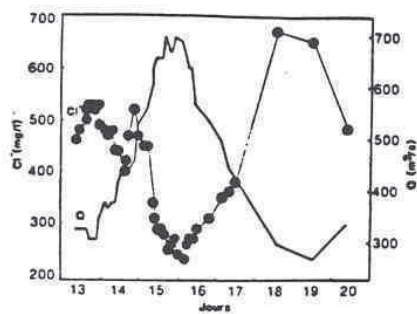
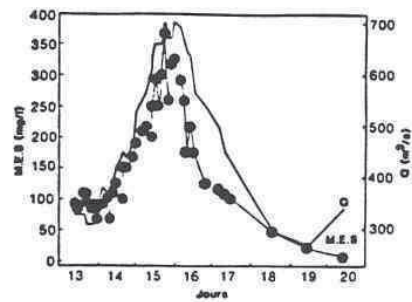


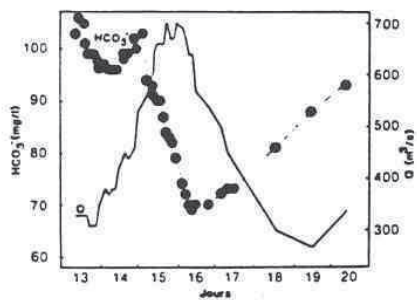
Fig. 3 - Evolutions comparées des débits et des concentrations en éléments dissous et en matières en suspension au cours de la crue de Janvier 1986.



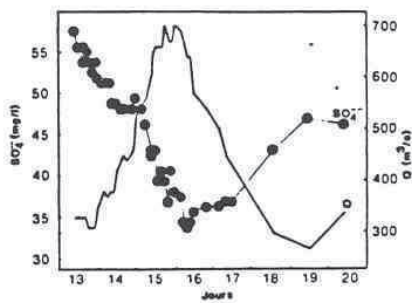
(g)



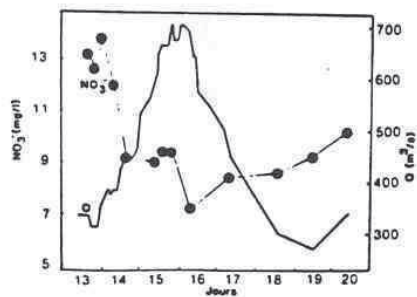
(h)



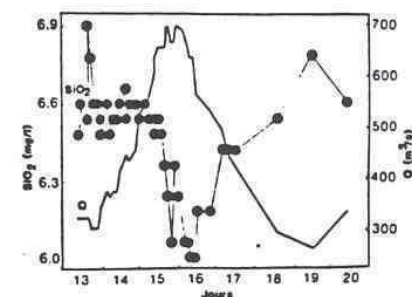
(i)



(j)



(k)



(l)

Fig. 3 - Evolutions comparées des débits et des concentrations en éléments dissous et en matières en suspension au cours de la crue de Janvier 1986 - (suite).

Les écoulements de crue et les transferts de matières au cours de ces épisodes sont les résultats des modifications climatologiques, hydrologiques, géomorphologiques et géochimiques qui ont affecté le bassin versant et le lit du fleuve. Au cours de ces épisodes les réservoirs de surface se remettent en marche, provoquant le ruissellement hypodermique et la lixiviation des sols, le ruissellement superficiel et l'érosion mécanique et, enfin la remise en suspension et en solution des produits de l'altération accumulés dans le lit du cours d'eau durant les épisodes précédents.

De nombreuses crues ont été suivies sur la Moselle à Millery et il n'est pas possible ici de présenter tous les résultats qui ont été obtenus sur ces épisodes. Aussi nous avons choisi de présenter ici à titre d'exemple les résultats obtenus au cours de crue de Janvier 1981 (pour l'azote et le phosphore, fig. 2 a, b et c). Contrairement à la plupart des espèces en solution dont les concentrations diminuent quand les débits augmentent, les nitrates (crue de Janvier 1981) le phosphore (total et particulaire) et les matières en suspension (M.E.S, fig. 3, h), voient leurs teneurs augmenter avec les débits. En ce qui concerne le phosphore et les matières en suspension, le maximum des concentrations correspond au maximum de crue. Par contre, pour les nitrates, on peut observer fréquemment un décalage entre la courbe des concentrations et l'hydrogramme de crue, le maximum des teneurs en nitrates correspond en effet à la descente de crue. Ce phénomène a déjà été observé par différents auteurs et en particulier sur des bassins versants à vocation agricole (FOSTER, 1981 ; PROBST, 1983 ; PROBST et al. 1985 ; TAKEUCHI et al. 1984 ; SUSSMANN, 1983). On peut donc dire que ces éléments sont en quelque sorte concentrés dans les eaux fluviales par un apport des eaux de surface.

Inversement, la plupart des concentrations en éléments dissous diminuent quand le débit augmente. Pour certains éléments comme les chlorures, le calcium, le sodium, le potassium et la conductivité, le minimum des concentrations correspond au maximum de crue et la courbe de variation des concentrations est relativement symétrique par rapport au minimum (fig. 3). Ces éléments sont directement apportés dans les eaux de la Moselle par les rejets salins des soudières du bassin de la Meurthe. Ces éléments représentent environ 80% de la charge totale dissoute des eaux de la Moselle et la conductivité de ces eaux est donc étroitement liée à ces rejets. Il s'agit donc ici d'une dilution de ces rejets ponctuels par un apport des eaux de surface.

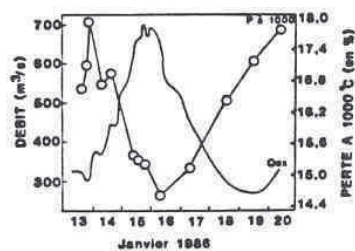
Par contre, pour les autres éléments (SiO_2 , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- , Mg^{++}) et le PH, (fig. 3), le minimum des concentrations est décalé par rapport au maximum de crue. De plus la diminution des concentrations est plus rapide que l'augmentation. Ces éléments sont étroitement liés au cycle de l'érosion chimique et aux apports diffus sur le bassin versant.

VI - EVOLUTION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES MATIERES EN SUSPENSION AU COURS DES CRUES

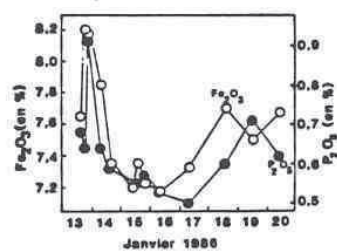
La composition chimique des sédiments qui sont transportés par les fleuves reflète la composition chimique des sols et des roches du bassin versant. On a reporté dans le tableau II, à titre de comparaison, la composition chimique moyenne des sédiments transportés par la Moselle au cours de la crue de Janvier 1986 et celles de quelques fleuves européens. Il faut signaler que cette composition chimique moyenne est relativement constante d'une crue à l'autre pour un bassin donné (PROBST et BAZERBACHI, 1986). Comme on peut le voir sur le tableau II, la composition des sédiments de la Moselle est tout à fait comparable à celle des sédiments qui sont transportés par les fleuves européens. Le rapport R ($R = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), défini par NKOUNKOU et PROBST, (1987), est égal à 2,25 pour la Moselle, 2,95 pour le Rhône, 2,83 pour le Rhin, 2,29 pour la Loire, 2,54 pour la Meuse, 1,88 pour la Garonne et 2,53 pour l'Ems, alors que pour les sédiments des fleuves équatoriaux et tropicaux, ce rapport varie autour de 1. Au cours de la crue (fig. 4), la composition chimique de ces sédiments varie. La perte à 1000 °C qui représente la matière organique (C, N, O et H), les carbonates et l'eau, diminue quand le débit augmente. Il faut rappeler ici que quand le débit augmente, la charge en sédiments du fleuve augmente. On peut donc considérer ici que quand la charge en suspension augmente, les sédiments transportés sont de moins en moins organiques (car il n'y a pas ici de carbonates en suspension) et donc de plus en plus minéraux.

Les teneurs en silice et en aluminium évoluent en sens inverse. Quand le débit et la charge solide augmentent, les sédiments transportés sont relativement plus riches en silice et moins riches en aluminium. D'après les analyses minéralogiques (diffraction de RX) qui ont été effectuées, on peut attribuer cette augmentation de silice, d'une part à une augmentation du quartz associée à une augmentation des fractions granulométriques plus grossières et d'autre part à une augmentation des minéraux silicatés plus riche en silice (feldspaths et illites).

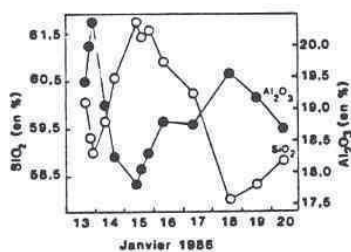
Les teneurs en TiO_2 et BaO suivent l'évolution des teneurs en silice et inversement les teneurs en Fe_2O_3 suivent l'évolution des teneurs en Al_2O_3 . On remarque aussi qu'en début de crue, dès le "premier flot", la variation de composition chimique des suspensions enregistre un court "signal". Ainsi, la perte à 1000 °C, et les concentrations en aluminium, fer, phosphore, magnésium, manganèse et potassium augmentent alors que celles en silice, calcium et sodium diminuent. On pourrait attribuer ce premier signal à une remise en suspension des sédiments accumulés sur le fond du lit durant la période qui précède la crue. Les sédiments du fond du lit sont, en effet en période d'écoulement des nappes, enrichis en matières organiques qui sont peut être ici associées au fer et à l'aluminium. De plus durant ces périodes d'écoulement de base, une grande partie du phosphore apporté par les rejets domestiques est piégé dans les sédiments du lit du cours d'eau (PROBST, 1985 ; PILLEBOUE et DORIOZ, sous presse). Ce phosphore est alors remis en suspension lors du premier flot. Les teneurs moyennes en calcium et magnésium sont du même ordre de grandeur mais elles évoluent en sens



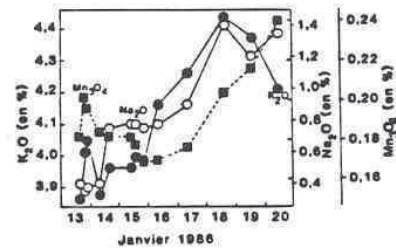
(a)



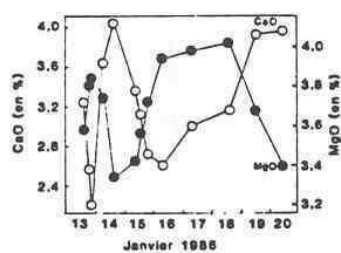
(b)



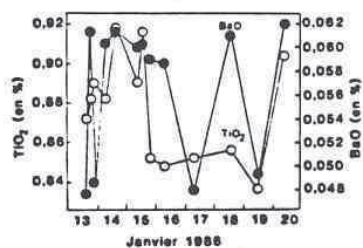
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 4 - Evolutions de la composition chimique des éléments en suspension et de la perte à 1000°C au cours de la crue de Janvier 1986. La perte à 1000°C est exprimée en % du poids de matière séchée à 110°C. Les teneurs en éléments sont exprimées en % du poids de matière calcinée à 1000°C.

inverse au cours de la crue. Cette évolution pourrait traduire ici un échange dans les sédiments transportés au cours de la crue entre le calcium et le magnésium. De plus la courbe de variation des teneurs dans les sédiments en suspension (fig. 4,e) évoluent dans le même sens. Ainsi plus la solution est riche en Ca^{++} et plus les teneurs en Ca^{++} dans les sédiments sont élevées.

En ce qui concerne le sodium, les teneurs dans les sédiments augmentent du début à la fin de la crue. On peut alors supposer là encore qu'il y a un enrichissement en Na^+ des sédiments à partir de la solution. Nous rappellerons en effet que les eaux de la Moselle sont très riches en Na^+ , Ca^{++} et en Cl^- , éléments qui sont apportés par les rejets des soudières dans lesquels 2/3 des chlorures (CaCl_2) sont associés au calcium et 1/3 au sodium (NaCl).

Espèces	Exportation annuelle en tonnes	Exportation aux cours des crues en tonnes	en %
N- NO_3^-	9685	6545	68
N- NH_4^+	1765	1112	63
P- PO_4^{3-}	700	395	57
P-P	620	462	75
T-P	1320	857	65
Volume d'eau écoulé	4,26. 10 ⁹ m ³	2,71. 10 ⁹ m ³	64

TABEAU I : Bilans des exportations annuelles d'azote et de phosphore et contributions des périodes de crues sur le bassin de la Moselle à Millery au cours du cycle hydrologique 1980-1981.

	Ems (1)	Garonne (1)	Maas (1) (Meuse)	Loire (1)	Rhône (1)	Rhin (1)	Moselle (1)
SiO_2	64,6	57,7	60,6	60,1	46,5	57,2	59,3
Al_2O_3	9,6	22,4	14,2	18,4	10,0	14,0	18,8
Fe_2O_3	15,9	8,3	9,7	7,8	5,7	6,2	7,5
TiO_2	0,63	0,83	1,16	0,88	0,48	0,9	0,86
MnO	0,36	0,22	0,91	0,21	0,12	-	0,19
P_2O_5	1,31	0,31	2,7	0,33	0,55	0,65	0,61
CaO	1,42	2,73	4,8	6,6	18,3	10,2	3,1
MgO	1,05	2,89	1,7	2,49	1,94	2,95	3,6
Na_2O	0,59	0,76	0,88	1,03	1,02	0,13	0,78
K_2O	1,43	4,09	2,38	3,76	2,12	1,3	4,04

TABEAU II: Comparaison des compositions chimiques des sédiments en suspension transportés par les principaux fleuves européens.
1 - D'après MARTIN et MEYBECK (1978), 2 - Cette étude.

VII - RELATIONS DEBIT-CONCENTRATION ET ORIGINE DES ELEMENTS

La dispersion des points qui peut être observée sur une relation débit-concentration établie pour un cycle hydrologique complet, peut être attribuée aux variations de concentration au cours des différents épisodes de crue. Ainsi, de nombreux auteurs (HENDRICKSON et KRIEGER, 1960 ; TOLER, 1965 ; GREGORY et WALLING, 1973 ; HAUBERT 1975 ; JOHNSON et EAST, 1982 ; DAVIS et KELLER, 1983 ; ETCHANCHU, 1983) ont montré qu'au cours des épisodes de crue, les relations débit-concentration étaient cycliques. ROCHE (1973), CARMOUZE (1976), KATTAN (1984) KATTAN et al. (1987), GAC et KANE (1986) ont également décrit des cycles saisonniers dans les relations annuelles débit-concentration en M.E.S pour les fleuves des régions tropicales.

En ce qui concerne la crue de Janvier 1986 sur la Moselle, les relations débit-concentration sont également cycliques traduisant des phénomènes d'hystérésis entre la montée et la descente de crue. Ainsi, à débit égal, les concentrations sont plus élevées en montée de crue qu'en descente et en général décroissantes pour les éléments en solution. Les écarts de concentration entre la montée et la descente de crue varient suivant les éléments. En ce qui concerne les éléments en solution, la décroissance de la relation débit-concentration traduit finalement un phénomène de dilution des concentrations.

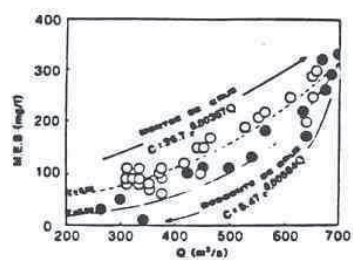
On peut comparer sur la figure 5, pour chaque élément, la dilution observée dans les eaux de la Moselle avec la dilution théorique (courbe en tiretés). L'équation de cette courbe de dilution théorique est de la forme :

$$C = a \cdot (1 / Q) \quad (1)$$

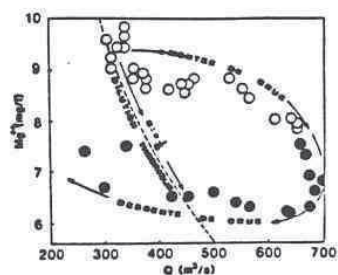
$$\text{avec} \quad a = C_b \cdot Q_b \quad (2)$$

C_b et Q_b sont la concentration d'un élément donné et le débit de rivière juste avant la montée de crue. a est donc le flux d'un élément donné avant la crue. L'équation (1) représente donc la dilution du flux a dans un volume d'eau croissant. Ainsi, on considère dans cette équation, que les eaux apportées à la rivière par les écoulements de surface ne sont pas chargées en éléments ($C = 0$). On peut ainsi distinguer sur la figure 5, deux familles d'éléments :

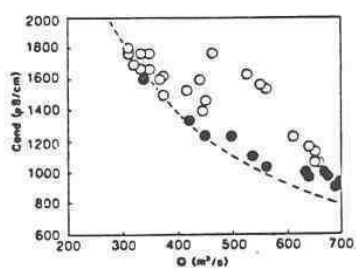
- (1) - Ceux dont la concentration suit plus ou moins au cours de la crue la courbe de dilution théorique. C'est le cas de tous les éléments (Na^+ , Ca^{++} , K^+ et Cl^-) qui sont d'origine ponctuelle prédominante (rejets des soudières). On peut cependant observer une augmentation des concentrations en montée de crue pour des débits compris entre 400 et 500 m³/s. Ce décrochement par rapport à la courbe de dilution théorique correspond certainement à une augmentation du flux des rejets au cours de la crue.



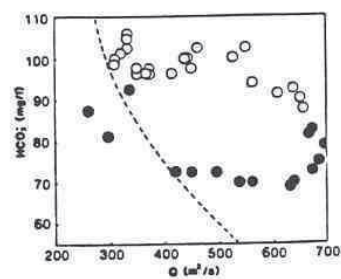
(a)



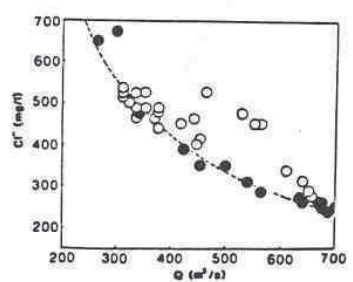
(b)



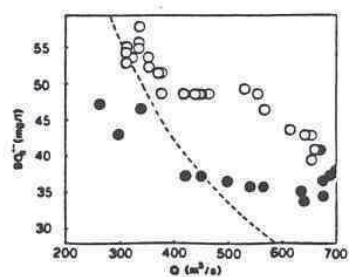
(c)



(d)

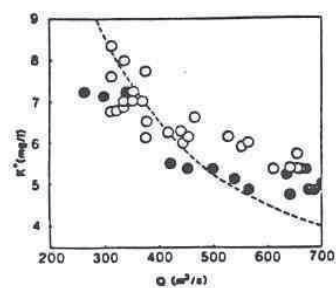


(e)

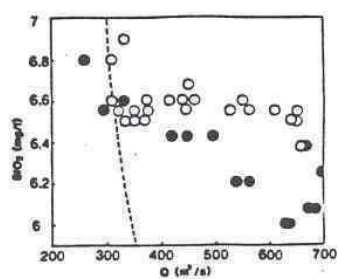


(f)

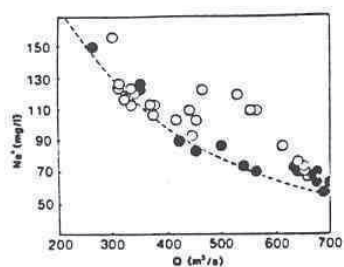
Fig. 5 - Relations débit-concentration des éléments en solution et des sédiments en suspension au cours de la crue de Janvier 1986. Comparaison avec les courbes de dilution théorique (pour les éléments en solution).



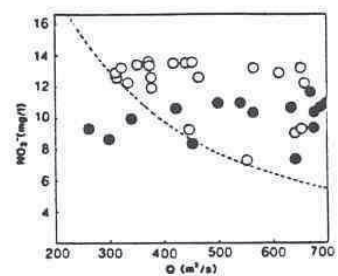
(g)



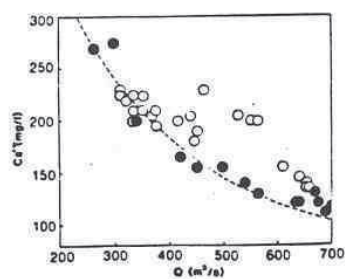
(h)



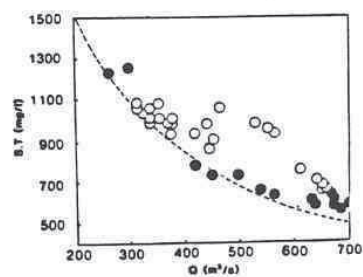
(i)



(j)



(k)



(l)

Fig. 5 - Relations débit-concentration des éléments en solution et des sédiments en suspension au cours de la crue de janvier 1986. Comparaison avec les courbes de dilution théorique (pour les éléments en solution) - (suite).

- (ii) - Ceux dont la concentration s'écarte rapidement de la courbe de dilution théorique. C'est le cas des éléments (Mg^{++} , HCO_3^- , SO_4^{--} , SiO_2 et NO_3^-) liés au cycle de l'érosion chimique et aux apports diffus sur le bassin. Les concentrations de ces éléments dans les écoulements de surface (ruissellements hypodermique et superficiel) ne sont donc pas négligeables.

VIII - APPLICATION DES MODELES DE MELANGES A L'ETUDE DES CRUES

Le flux total d'un élément donné à l'exutoire d'un bassin versant résulte du mélange des flux venant des différents réservoirs hydrologiques. Dans le cas d'un mélange de 3 types d'écoulement, le modèle s'écrit :

$$C_t.Q_t = C_r.Q_r + C_h.Q_h + C_n.Q_n \quad (3)$$

$$\text{avec} \quad Q_t = Q_r + Q_h + Q_n \quad (4)$$

C sont les concentrations et Q les débits. Les indices t, r, h et n se rapportent respectivement à l'écoulement fluvial total, au ruissellement superficiel, au ruissellement hypodermique (ou ruissellement retardé) et aux écoulements des nappes. Ce modèle (équation 3) fonctionne avec conservation de masse et sans interaction chimique.

Ces modèles ont été appliqués pour la première fois en hydrologie de surface par LA SALA (1967), ARCHER et al. (1967) et PINDER et JONES (1969). Depuis de nombreux auteurs ont utilisé ces modèles soit pour calculer des débits des différents écoulements à partir des paramètres chimiques, soit pour calculer les concentrations des éléments dans les eaux des différents réservoirs à partir des débits des différents écoulements.

1 - Calcul des concentrations dans les réservoirs et relations avec les débits des différents écoulements

Dans de récents travaux (PROBST 1983 et 1986, PROBST et BAZERBACHI 1986, PROBST et al. 1985, ETCHANCHU et PROBST 1986 a et b, KATTAN et al. 1986 et 1987) nous avons utilisé ces modèles de mélanges couplés à un modèle hydrologique simple (HYDEC) pour calculer les concentrations dans les différents réservoirs, pour déterminer les relations entre les concentrations mesurées dans la rivière et les débits des différents écoulements, et enfin pour simuler les flux de matières en période de crue. Le modèle hydrologique, mise au point par PROBST (1983), est basé sur un découpage horizontal classique des hydrogrammes de crue. L'application de ce modèle hydrologique sur les crues de la Moselle nous a permis de faire une simulation des débits des différents écoulements au cours de la crue (fig. 6a). On peut donc calculer à partir de l'équation

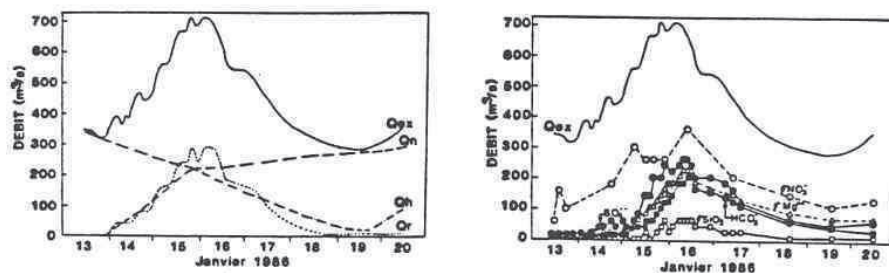
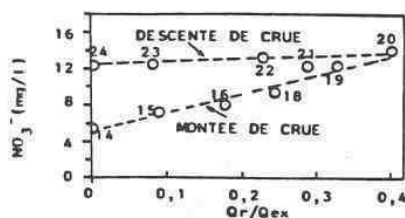
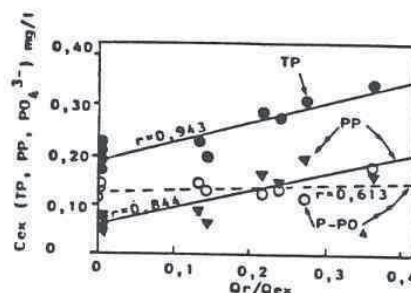


Fig. 6 - Estimation des débits des différents écoulements.

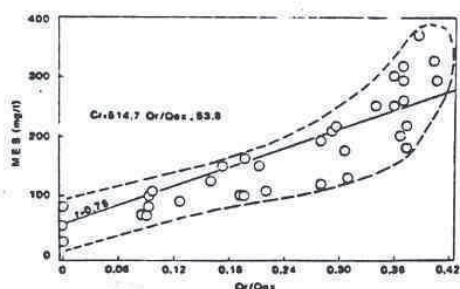
- a - à partir du modèle hydrologique (HYDEC).
Qr, ruissellement superficiel
Qh, ruissellement hypodermique
Qn, écoulement des nappes et
Qex, débit fluvial total.
- b - à partir des méthodes chimiques.
Courbes de variations du débit.
Qr estimées à partir de NO_3^- ,
 SO_4^{2-} , HCO_3^- , Mg^{++} et SiO_2 .



- 7a -



- 7b -



- 7c -

Fig. 7 - Relations entre les concentrations en NO_3^- (7a), en phosphore P-PO_4 , PP, TP (7b), en MES (7c) mesurées en rivière et les rapports des débits Qh/Qr pour les nitrates (NO_3^-), et Qr/Qt pour le phosphore et les MES.

(3) les concentrations des éléments dans les différents réservoirs (tableau III). Les concentrations (Ct) et le débit (Qt) sont mesurées à l'exutoire dans la rivière, les débits Qr, Qh et Qn sont estimés à partir du modèle hydrologique. Les calculs ont été effectués seulement pour les éléments qui ont une origine diffuse (érosion et pollution). Ainsi les nitrates, les bicarbonates, et la silice sont plus concentrés dans les écoulements hypodermiques alors que les M.E.S et le phosphore sont plus concentrés dans le ruissellement superficiel. Pour les autres éléments, les concentrations maximales ont été calculées dans les écoulements de nappes. Pour améliorer les relations débit-concentration, il faut donc corréler la concentration mesurée dans la rivière, non pas au débit total, mais au débit de l'écoulement qui est responsable de son exportation. On a pu montrer dans de récents travaux les excellentes relations qui existent entre la charge en suspension et le débit du ruissellement superficiel et le phosphore ou entre le ruissellement hypodermique et les nitrates sur les bassins versants agricoles (PROBST, 1983, 1985, PROBST et al. 1985, ETCHANCHU et PROBST al. 1986b, KATTAN et al. 1986). Pour le bassin de la Moselle, KATTAN et al. (1986) ont déjà déterminé les relations phosphore-ruissellement superficiel et nitrates-ruissellement hypodermique (fig. 7 a et b).

Comme on peut le voir sur la figure 7c, il y a également une très bonne relation entre la charge en suspension mesurée dans la rivière et le débit du ruissellement superficiel responsable de l'érosion mécanique sur les versants.

Crue	Espèces	Cr	Ch	Cn	Ct
Janv 1980	NO ₃ ⁻	6,7	18,3	8,1	10,12
Janv 1980	P-PO ₄ ³⁻	0,263	0,048	0,137	0,15
Janv 1980	P-P	0,273	0,194	0,042	0,17
Janv 1980	T P	0,536	0,242	0,179	0,32
Janv 1986	MES	620	24	25	223
Janv 1986	SiO ₂	4,8	7,7	6,6	6,4
Janv 1986	Mg ⁺⁺	4,6	8,0	9,1	7,2
Janv 1986	SO ₄ ⁻⁻	23,7	40,1	54,3	39,4
Janv 1986	HCO ₃ ⁻	38	117	99	85

Tableau III: Estimations des concentrations des éléments dans les différents écoulements à partir du modèle de mélange

avec Cr : concentrations dans les eaux du ruissellement superficiel.
 Ch : concentrations dans les eaux du ruissellement hypodermique (retardé).
 Cn : concentrations dans les eaux des nappes souterraines.
 Ct : moyennes des concentrations mesurées dans la Moselle au cours des crues.

2 - Simulation des flux

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre précédent, les relations débit-concentration en période de crue sont en général cycliques. L'utilisation de ces relations pour calculer les flux de matières en période de crue devient donc difficile et les calculs imprécis. Certains auteurs ont donc utilisé les modèles de mélange pour calculer les variations de concentration et de flux dans la rivière en période de crue (DUPRAZ, 1984 ; EBISE, 1984 ; ETCHANCHU et PROBST, 1985b ; KATTAN et al. 1985). Ces modèles permettent en effet de tenir compte des différents écoulements, et d'expliquer les différences de concentration observées dans la rivière entre la montée et la descente de crue. Pour le bassin de la Moselle, nous avons choisi de présenter ici à titre d'exemple les résultats obtenus en ce qui concerne les nitrates et le phosphore total (crue de Janvier 1981), et la silice et les M.E.S (crue de Janvier 1986). Ainsi comme on peut le voir sur la figure 8, il y a, pour ces éléments, un très bon ajustement des flux simulés à partir des modèles de mélange aux flux calculés à partir des concentrations et des débits mesurés en rivière.

3 - Estimation des débits des différents écoulements

Parallèlement aux méthodes purement hydrologiques, de nombreux auteurs ont utilisé les paramètres physico-chimiques et plus récemment isotopiques pour estimer les débits des différents écoulements qui alimentent le débit fluvial en période de crue. On peut citer les travaux de TOLER (1965), PINDER et JONES (1969), GAC (1980), BLAVOUX et MUDRY (1983), et EBISE et al. (1984) qui ont utilisé les paramètres chimiques. Sur des bassins agricoles, TAKEUCHI et al. (1983) et EBISE (1984) ont estimé les composantes de l'écoulement fluvial à partir des nitrates. La conductivité (NAKAMURA, 1971 ; PILGRIM et al., 1978 et 1979) et la température de l'eau (KOBAYASHI, 1981) ont également été utilisées pour séparer les écoulements. Enfin, on peut citer les méthodes isotopiques basées le plus souvent sur le rapport $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ ou le rapport $^3\text{H} / ^1\text{H}$ (DYNCER et PAYNE, 1971 ; MEROT et al., 1981 ; BOTTOMLEY et JOHNSTON, 1985). Dans tous les cas, on doit considérer que les valeurs des différents paramètres sont connus dans les différents réservoirs. Les auteurs sont donc obligés au préalable d'émettre des hypothèses ou de faire des mesures sur les paramètres utilisés pour la séparation des composantes de l'écoulement. L'estimation du débit des différents écoulements est toujours basée sur le couplage d'un modèle de mélange (équation 3) et d'un modèle hydrologique (équation 4). Cette démarche a été appliquée sur le bassin de la Moselle à la crue de Janvier 1986.

Les paramètres utilisés pour le calcul des débits sont tous d'origine diffuse : SO_4^{--} , NO_3^- , HCO_3^- , Mg^{++} et SiO_2 . A partir des équations (3) et (4) on peut exprimer les débits des 3 types d'écoulements Q_r , Q_h et Q_n comme suit :

$$Q_r = Q_t (C_t - C_h) - Q_n (C_n - C_h) / (C_r - C_h) \quad (5)$$

$$Q_h = Q_t (C_t - C_n) - Q_r (C_r - C_n) / (C_h - C_n) \quad (6)$$

$$Q_n = Q_t (C_t - C_h) - Q_r (C_r - C_h) / (C_n - C_h) \quad (7)$$

De la même manière, si l'on regroupe pour simplifier, les écoulements hypodermique et souterrain, on se retrouve dans le cas d'un modèle de mélange à 2 réservoirs :

$$C_t \cdot Q_t = C_r \cdot Q_r + C_b \cdot Q_b \quad (8)$$

avec $Q_b = Q_h + Q_n \quad (9)$

et $Q_t = Q_r + Q_b \quad (10)$

A partir de l'équation (8), on peut calculer le débit du ruissellement superficiel :

$$Q_r = (C_t \cdot Q_t - C_b \cdot Q_b) / (C_r - C_b) \quad (11)$$

A partir de l'équation (10), on remplace dans l'équation (11) le débit Q_b par l'expression suivante :

$$Q_b = Q_t - Q_r \quad (12)$$

On peut alors exprimer le débit Q_r à partir des équations (11) et (12) uniquement en fonction des concentrations C_r et C_b et du débit total :

$$Q_r = (Q_t (C_t - C_b)) / (C_r - C_b) \quad (13)$$

En ce qui concerne la crue de Janvier 1986, les hypothèses de départ sur les concentrations sont les suivantes :

- (i) - La concentration des eaux de ruissellement superficiel (C_r) est égale à la concentration des eaux de pluies. On considère ici pour le bassin de la Moselle les valeurs moyennes données par BOURRIE (1978).
- (ii) - La concentration moyenne C_b du mélange des eaux "nappes-eaux hypodermiques" peut être assimilée ici à la concentration mesurée en rivière juste avant la montée de crue.

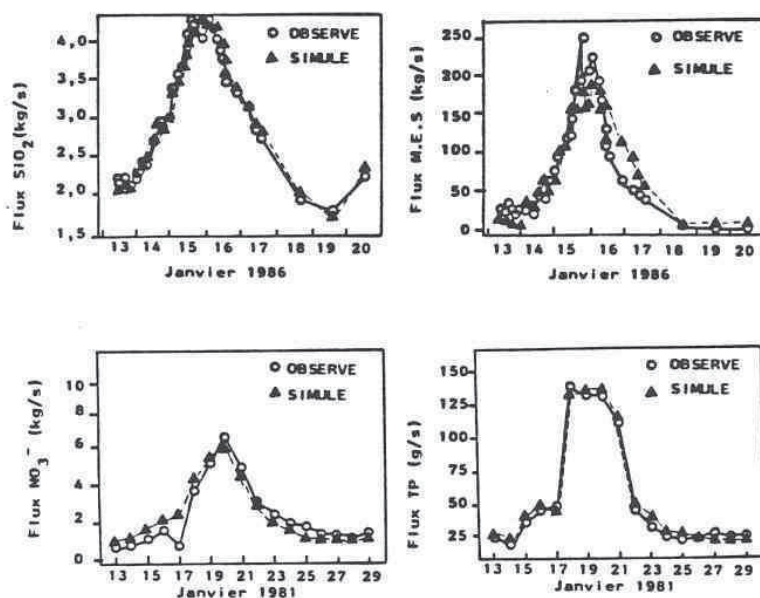


Figure 8 - Comparaisons des flux de matières calculées à partir des échantillons prélevés et des flux de matières simulés à partir du modèle de mélange au cours de la crue de Janvier 1981 pour NO_3^- et TP, et au cours de la crue de Janvier 1986 pour SiO_2 et MES.

On a reporté sur la figure 6b, à titre d'exemple, les variations du débit du ruissellement superficiel calculées à partir de l'équation (13) en attribuant différents paramètres chimiques. Les résultats obtenus sur cette figure montrent que les sulfates, les bicarbonates et le magnésium donnent à peu près les mêmes variations de débits que celles qui ont été calculées sur la figure 6a, à partir du modèle hydrologique (HYDEC). En revanche, les variations obtenues à partir des nitrates et de la silice, sont respectivement supérieures et inférieures aux débits calculés à partir des autres paramètres chimiques. Ces différences peuvent être expliquées, par une différence de concentration entre l'eau de pluie et l'eau de ruissellement. Ainsi, d'après l'équation (13), si on considère que la charge en silice du ruissellement (Cr) n'est pas nulle, on augmente le débit calculé du ruissellement. En revanche, en ce qui concerne les nitrates, si on diminue la charge dans le ruissellement, on augmente le débit du ruissellement estimés à partir de cet élément. Ce raisonnement paraît tout à fait plausible en ce qui concerne la silice, par contre, en ce qui concerne les nitrates, la question reste pour le moment posée.

CONCLUSIONS

On connaît bien maintenant en hydrologie de surface, l'importance des crues dans le cycle hydrologique. On a donc voulu montrer dans cette étude que les périodes de crues jouent également un rôle important dans la dynamique et le transfert de matières à l'échelle des bassins versants. Les exemples qui ont été choisis ici sur le bassin de la Moselle montrent bien que les crues sont des périodes clef pour l'établissement des bilans chiffrés des flux de matières et pour la compréhension de l'évolution et de l'origine des éléments transportés par le fleuve. On a donc voulu au travers de cet exemple, présenter quelques méthodes qui permettent d'étudier la variabilité de la composition chimique des eaux et des sédiments au cours de ces crues. Les phénomènes de dilution ou de concentration des teneurs des éléments transportés par le fleuve peuvent être associés aux variations de son débit. Cependant, on a pu voir que les variations de concentrations ne sont pas les mêmes d'un élément à l'autre. De plus pour un élément donné, il y a une différence de variation, à débit égal, entre la montée et la descente de crue. On peut alors expliquer ces différences par deux méthodes :

- (i) - En comparant la dilution observée à la dilution théorique du flux venant des nappes dans un volume d'eau de concentration nulle.
- (ii) - En corrélant les teneurs mesurées dans le fleuve, non pas au débit fluvial total mais aux débits des différents écoulements sur le bassin.

L'utilisation d'un modèle hydrologique simple permet de corréler les variations enregistrées dans la rivière aux contributions respectives des débits et des flux venant des différents réservoirs hydrologiques. Ces modèles, déjà utilisés par de nombreux auteurs, sont simples mais ils permettent de faire soit une première estimation des concentrations dans les différents écoulements connaissant leurs débits, soit réciproquement de calculer respectivement les débits de ces écoulements à partir de leurs concentrations. Ces deux utilisations du modèle de mélange ont été appliquées sur les crues de la Moselle en ce qui concerne les débits des écoulements. Enfin, la variation des concentrations qui peut être observée au cours d'une crue, est un facteur limitant dans le calcul précis des flux. Dans le cas d'un manque de données ou d'une limitation volontaire du nombre de prélèvements, on peut améliorer le calcul des flux de matières en utilisant ces modèles de mélange et en faisant des hypothèses simples sur les concentrations dans les différents écoulements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARCHER R.J. LA SALA A.M.Jr. et KAMERER J.C. 1967 - Chemical quality of streams in the Erie-Niagara basins, New-York. *New-York state water Resources com. Basin Planning Report*, ENB-4, 104 p.
- BLAVOUX B. et MUDRY Y. 1983 - Séparation des composantes de l'écoulement d'un exutoire karstique à l'aide des méthodes physico-chimiques. *Hydrogéologie - Géologie de l'ingénieur*, 4, pp. 269-278.
- BOTTOMLEY D.C. et JOHNSTON L.M. 1985 - Neutralization of acid runoff by groundwater discharge to streams in canadian precambrian shield watersheds. *J. Hydrol.*, 75 : pp. 1-26.
- BOURRIE G. 1978 - Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré - Application aux granites des Vosges et de la Margeride. *Sci. Geol. Mem.* 52, Strasbourg, 174 p.
- CARNOUZE J.P. 1976 - La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. Contribution à l'analyse biodynamique d'un système endoréique en milieu continental. *Trav. Doc. ORSTOM*, n° 58, 418 p.
- DAVIS J.S. et KELLER H.M. 1983 - Dissolved loads in streams and rivers. Discharge and seasonal related variations. *A.I.H.S. Publ.* 141, pp. 79-89.
- DINCER T. et PAYNE B.R. 1972 - An environmental isotope study of the south - western karst region of Turkey. *J. Hydrol.*, 14, pp. 233-258.
- DUPRAZ C. 1984 - Bilans des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans trois bassins-versants comparatifs à végétations contrastées (Mont-Lozère, France). *These Doc. Ing.* Univ. Orléans. 363 p.
- EBISE S. 1984 - Separation of runoff components by NO₃-N loading and estimation of runoff loading by each component. *A.I.H.S. Publ.* 150, pp. 393-405.
- EBISE S. MURADKA K. et SATO T. 1984 - Runoff analysis by water quality hydrological approach. *Proc. of 28th Jap. Conf. on Hydraulics*, pp. 547-552.
- EDWARDS A.M.C. 1973 - The variation of dissolved constituents with discharge in some Norfolk rivers. *J. Hydrol.*, 18, pp. 219-24.
- EDWARDS A.M.C. CREASEY J. et CRESSER N.S. 1984 - The conditions and frequency of sampling for elucidation of transport mechanism and element budgets in upland drainage basins. *A.I.H.S. Publ.* 150, pp. 187-202.
- ETCHANCHU D. 1983 - Hydrologie et géochimie des crues sur le bassin versant du Girou (terrefort toulousain). *Mem. D.E.A.* Université Toulouse III, Toulouse, 61 p.

ETCHANCHU D. et PROBST J.L. 1986a - Erosion et transport de matière en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 302, Série II, n° 17, pp. 1063-1067.

ETCHANCHU D. et PROBST J.L. 1986b - Dynamique et origine des nitrates sur un bassin agricole du Sud-Ouest de la France : Le Girou. XXXième Congrès de l'Association Française de Limnologie, Thonon les Bains, 27 au 30 Mai 1986. 15 p.

FOSTER I.D.L. 1980 - Chemical yield in runoff and denudation in a small arable catchment, East Devon, England. J. Hydrol. 47, pp. 349-368.

FOSTER I.D.L. 1981 - Modelling nitrate behaviour in a small catchment, East Devon, U.K. AGRO-Ecosystemes, 6, pp. 325-341.

FRECAUT R. 1972 - La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviales en milieu tempéré océanique. These Doct. d'Etat. Université de Nancy, Institut de Géographie, 840 p.

GAC J.Y. 1980 - Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Trav. Doc. ORSTOM, Paris, n° 123, 251 p.

GAC J.Y. et KANE A. 1986 - Le fleuve Sénégal : I. Bilan hydrologique et flux continentsaux de matières particulières à l'embouchure. Sci. Geol. Bull. 39, 1, pp. 99-130.

GILLE E. 1985 - Contribution à l'étude hydrologique des bassins de la Meuse et de la Moselle : Problématique de l'utilisation d'un modèle couplé à discrétisation spatiale. These 3ième cycle, Université Pierre et Marie Curie, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, 213 p.

GLOVER B.J. et JOHNSON P. 1974 - Variations in the natural chemical concentration of river water during flood flows, and the lag effect. J. Hydrol. , 22, pp. 303-316.

GREGORY K.J. et WALLING D.E. 1973 - Drainage basin form and process. A geomorphological approach. Edward Arnold, London, 458 p.

HAUBERT M. 1975 - Bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne : la Drance de Bellevaux, Haute Savoie. These 3ième cycle, Université Paris VI (CRG Thonon les Bains), 331 p.

HENDRICKSON G.E. et KRIEGER R.Z. 1960 - Relationship of chemical quality of water to stream discharge in Kentucky. Inter. Geol. Cong. , 21st, Copenhagen 1960, Geochem. Cycles, pt. 1, pp. 66-75.

JOHNSON F.A. et EAST J.W. 1982 - Cyclical relationships between river discharge and chemical concentration during flood events. J. Hydrol. , 57, pp. 93-106.

JOHNSON N.M., LIKENS G.E., BORMANN F.H., FISHER D.W. et PIERCE R.S. 1979 - A working model for the variation in stream water chemistry at

the Hubbard Brook experimental forest, New Hampshire. *Water Res. Res.*, 5, 6, pp. 1353-1363.

KATTAN Z. 1984 - Hydrologie de surface et érosion mécanique sur les bassins amont du Chari-Logone et du Sénégal. *Rapport D.F.A.*, Univ. Strasbourg, 53 p.

KATTAN Z., SALLERON J.L. et PROBST J.L. 1986 - Bilans et dynamiques de transfert de l'azote et du phosphore sur le bassin de la Moselle (Nord-Est de la France). *Sciences de l'Eau*, 4, pp. 93-122.

KATTAN Z., GAC J.Y. et PROBST J.L. 1987 - Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin: estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. Hydrol.*, (sous presse).

KOBAYASHI D. 1981 - Separation of runoff components by stream temperature. *Verh. Intern. Verein. Limnol.* 21, pp. 150-154.

KREMPP G. 1982 - Techniques de prélèvement des eaux naturelles et des gaz associés. Méthode d'analyse des eaux et des roches. *Notes techniques de l'Institut de Géologie*. Strasbourg, 59 p.

LA SALA A.M.Jr. 1967 - New approaches to water resources investigations in upstate New-York. *Ground Water*, 5, 4, pp. 6-11.

MARTIN J.M. et MEYBECK M. 1978 - Major elements contents in river dissolved and particulate loads. In : *Biogeochemistry of Estuarine Sediments*. *Proc. of a Symp.*, Meheux, Chesco Press, pp. 95-110.

MEROT Ph. BOURGUET M. et LEUCH M. 1981 - Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18 mesuré dans les pluies, le sol, le ruisseau. *CATENA*, Vol. 8, pp. 69-81.

MEYBECK M. 1985 - Variabilité dans le temps de la composition chimique des rivières et de leurs transports en solution et en suspension. *Rev. Fr. Sci. Eau*, 4, pp. 93-121.

MORANGE H. et SALLERON J.L. 1982 - Etude des apports d'azote et de phosphore dans les rivières du bassin de la Moselle. *Rapport A.F.B.R.N.*, Metz, 115 p.

NAKANJIRA R. 1971 - Runoff analysis by electric conductance of water. *J. Hydrol.*, 14, pp. 197-212.

NKOUNKOU R.R. et PROBST J.L. 1987 - Hydrology and geochemistry of the Conco river system. In : "Transport of carbon and minerals in major world rivers". Part 4, eds. E.T. Degens, S. Kempe and G. Wei-bin, Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, SCOPE/UNEP Sonderb. (in press).

PILGRIM D.H. HUFF D.D. et STEELE T.D. 1978 - A field evaluation of subsurfaces and surface runoff. II. Runoff processes. *J. Hydrol.* 38 : pp. 319-341.

PILGRIM D.H., NUFF D.D. et STEELE T.D. 1979 - Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff. *Water. Res. Res.*, Vol. 15, n° 2, pp. 329-339.

PILLEBOUE E. et DORIOZ J.M. (sous presse). Mass-balance and transfer mechanisms of phosphorus in a rural watershed of Lac Lemán, France. In "Sediment and water interaction", Int. Ass. Sediment water Science, Proc. 3rd Sediment, Freshwater Symp., Edit. P. G. SLY, Springer Verlag, pp. 91-102.

PINDER G.F. et JONES J.F. 1969 - Determination of the the groundwater component of peak discharge from chemistry of total runoff. *Water. Res. Res.*, 5 (2), pp. 438-445.

PROBST J.L. 1983 - Hydrologie du bassin de la Garonne. Modèle de mélanges. Bilan de l'érosion. Exportation des phosphates et des nitrates. *Thèse 3ième cycle*, Université Toulouse III, 148 p.

PROBST J.L. 1985 - Nitrogen and phosphorus exportation in the Garonne basin (France) *J. Hydrol.*, 76, pp. 281-305.

PROBST J.L. 1986 - Dissolved and suspended matter transported by the Girou river (France) : Mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin. *Hydro. Sci. J.*, 31, 1, pp. 61-79.

PROBST J.L., KATTAN Z. et ETCHANCHU D. 1985 - Exportation des nitrates sur 4 bassins versants français agricoles. *Proc. Int. Congress "Nitrate in water"*, 22-24 Octobre 1985, Paris, 8 p.

PROBST J.L., et BAZERBACHI A. 1986 - Transports en solution et en suspension par la Garonne Supérieure. *Sci. Geol., Bull.*, 39, 1, pp. 79-98.

ROCHE N.A. (1973). Tracage naturel salin et isotopique des eaux du système hydrologique du lac Tchad. *Thèse Doct. d'Etat*, Université de Paris VI - ORSTOM, 398 p.

SAMUEL J. et ROUAULT R. 1983 - Les méthodes d'analyse des matériaux géologiques pratiquées au laboratoire d'analyses spectrochimiques. *Notes techniques de l'Institut de Géologie*, Strasbourg, 46 p.

SUSSMANN V.W. (1983). Comparison of water quality in drainage basins under agricultural and forest land use. *A.I.H.S. Publ.* 141, pp. 431-444.

TAKEUCHI K., SAKAMOTO Y. et HONGO Y. 1984 - Discharge characteristics of NO₃ for the analysis of basin wide circulation of water and environmental pollutants in small river basin. *J. Hydroscl. and Hydraul. Engineering*, 2 (1), pp. 73-85.

TOLER L.G. 1965 - Relation between chemical quality and water discharge in Spring Creek, Southwestern Georgia, U. S. *Geol. Survey Prof.* Paper 525-C, pp. 209-213.

WALLING D.E. et FOSTER I.D.L. 1975 - Variation of suspended sediment properties. *A.I.H.S. Publ.* n° 137, Proc. of Exeter Sump., pp. 409-419.