

Analyse statistique des relations liant les paramètres de qualité d'eau et le débit du Rhin en huit stations de 1959 à 1974

C. SABATON

*Electricité de France, Etudes et Recherches,
6 Quai Watier, F-78400 Chatou, France*

RESUME Dans cette étude, les données de qualité d'eau observées en huit points du Rhin de 1959 à 1974 ont été analysées. De l'analyse des concentrations mesurées ressort une certaine homogénéité de la structure des données pour les stations aval (de Braubach à l'embouchure): importante covariation des paramètres débit, concentrations en DBO5, en NH_4 , oxydabilité au KMNO_4 et pH (aux faibles débits correspondent de faibles pH, de fortes concentrations en DBO5 et en NH_4 , de fortes oxydabilités au KMNO_4 et inversement). Seuls l'oxygène dissous et les nitrates semblent liés à la température. Afin de voir si les covariations entre débit et concentrations sont en fait liées à la dilution, une analyse a été effectuée à partir des flux calculés: une très grande covariation entre débit et flux de DBO5, de KMNO_4 , de NO_3 , d'oxygène dissous, de déficit en oxygène (à forts débits, forts flux) est mise en évidence. Une conclusion importante apparaît dans le fait que l'hypothèse d'apports sensiblement constants au cours de l'année n'est pas réaliste; au contraire le flux est d'autant plus grand que le débit est grand.

Statistical analysis of the relationship between water quality parameters and discharge at eight stations on the Rhine from 1959 to 1974

ABSTRACT In this study, water quality data collected at eight stations on the Rhine from 1959 to 1974 have been analysed. Statistical analysis of measured concentrations shows a certain homogeneity in data structure for downstream stations (from Braubach to the delta area) with significant covariations between discharge, BOD5 concentrations, NH_4 concentrations, KMNO_4 oxydability and pH (low discharge corresponding to low pH, high NH_4 and BOD5 concentrations, high KMNO_4 oxydability and vice versa). Only dissolved oxygen and nitrates seem to be linked with temperature. In order to determine if covariations between discharge and the different concentrations are in fact connected with dilution, a statistical analysis of computed fluxes has been carried out. At each station very significant correlations are apparent between discharge and the flux of the following parameters: BOD5, KMNO_4 , NO_3 and dissolved oxygen. It appears that the hypothesis of constant input all the

year round is not acceptable. On the contrary, the higher the discharge, the higher the input flux seems to be.

INTRODUCTION

La Commission Internationale pour la protection du Rhin contre la pollution présente chaque année les tableaux numériques des analyses physico-chimiques de l'eau du Rhin. Ces analyses sont effectuées en huit points de prélèvements (Fig.1) depuis plus de 20 ans de la manière suivante:

- En 1959 et antérieurement, un prélèvement tous les 15 jours, généralement dans la matinée.
- Depuis 1960, un prélèvement tous les 15 jours, le jour étant tiré au hasard dans la quinzaine considérée - l'heure, laissée au

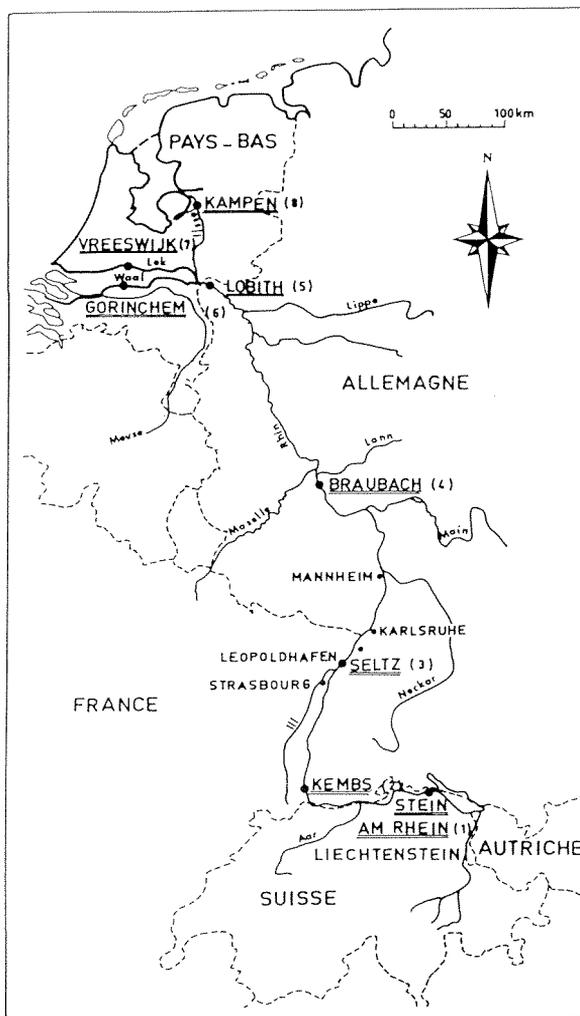


FIG.1 Les huit stations de mesures.

choix de l'opérateur, se situe généralement dans la matinée.

La présente étude donne une description détaillée de certains des paramètres mesurés - température, débit, oxygène dissous, DBO5, NH_4 , NO_3 , oxydabilité au KMNO_4 , pH - à partir des données de 1959 à 1974, seuls relevés que nous possédions actuellement sur support informatique, le but étant d'essayer de déterminer l'évolution de ces différents paramètres dans l'espace et dans le temps, et de mettre en évidence d'éventuelles relations ou covariations de ces paramètres entre eux.

PRESENTATION GENERALE DES DONNEES

L'étude en chaque station des courbes chronologiques des moyennes saisonnières et des courbes classées de chacun des paramètres retenus a permis de dégager un certain nombre de points concernant l'évolution du Rhin d'amont en aval:

- Les débits, DBO5, déficits en oxygène sont en moyenne assez faibles aux stations suisses et françaises (Stein, Kembs et Seltz), importants à Braubach et Emmerich-Lobith et redécroissent aux stations plus en aval (Gorinchen, Vreeswijk et Kampen). L'oxydabilité au KMNO_4 est également plus forte à Braubach et Emmerich-Lobith qu'aux stations aval.

- Les concentrations en ammoniacque et en ion nitrate les plus faibles sont par contre observées à Braubach; elles augmentent lorsque l'on se déplace vers l'aval.

- Le pH varie peu le long du Rhin. Il semble cependant légèrement acide à Braubach et Emmerich-Lobith, plutôt basique plus en aval.

L'évolution des différents paramètres dans le temps est plus difficile à discerner.

Deux périodes de faibles débits sont observées: de l'automne 1962 à l'automne 1964 et à partir de l'année 1971. L'évolution des différents paramètres peut être liée à ces faibles débits.

La comparaison, pour chaque paramètre, de ces deux périodes permet de supposer que, à débit faible constant, l'évolution moyenne est la suivante:

- augmentation de la concentration en oxygène dissous à Stein, Kembs et Vreeswijk; diminution à Braubach, Emmerich-Lobith et Kampen,

- augmentation de la DBO5 en presque toutes les stations exception faite à Vreeswijk où aucune évolution n'est discernable,

- l'oxydabilité au KMNO_4 semble décroître presque partout, exception faite à Kampen où elle ne semble pas avoir évolué,

- la concentration en ammonium a augmenté à Braubach et Kampen; elle semble être restée constante ailleurs,

- la concentration en ion nitrate a subi une augmentation en tous les points de mesure.

ANALYSE, STATION PAR STATION, DES PARAMETRES MESURES

Description des analyses statistiques effectuées

Après cette description rapide des différents paramètres étudiés, une

étude plus détaillée a été entreprise, station par station, afin d'essayer de préciser les relations et covariations de ces paramètres. Pour ce faire, le tableau des données a été, en chaque station, étudié de la manière suivante:

- Les différents paramètres ont été mis en classes de niveaux: des classes 1 de "très faible niveau", aux classes 5 de "très fort niveau". Les notions de faibles et forts niveaux sont ici très relatives et sont liées à la station étudiée (faibles ou forts niveaux pour la station analysée).

- L'analyse des correspondances du tableau de mesures mis sous forme disjonctive complète est alors effectuée; les "proximités" entre les niveaux des différents paramètres seront visualisées dans le premier ou dans les deux premiers plans principaux.

- Les proximités entre jours de mesures sont visualisées par leur projection sur les premiers plans factoriels. Néanmoins, il est difficile, sur un graphique plan, de reconnaître et de regrouper quelques 200 "points-jours". Parallèlement, une classification automatique des jours - par la méthode des "nuées dynamiques" - a permis de déterminer des "groupes" de jours voisins, groupes projetés sur les plans factoriels.

- Les importantes covariations mises en évidence entre débit et concentrations pouvant être en partie liées à la dilution, les analyses précédemment décrites ont été ensuite reprises à partir du tableau des flux calculés des différents paramètres chimiques et biologiques.

A titre d'exemple on décrira plus en détail l'analyse faite pour la station de Braubach.

Analyses statistiques des données observées à la station de Braubach

Huit paramètres y sont étudiés: la température de l'eau, son débit, la concentration en oxygène dissous, la DBO₅, l'oxydabilité au KMNO₄, les concentrations en ammoniacque, en nitrates, le pH. 401 jours de mesure complète sont disponibles. Le Tableau 1 donne les

TABLEAU 1

	Temp.	Débit	OD	DBO	Oxy. au KMNO ₄	NH ₄	NO ₃	pH
Temp.	1	-0.	-.57	-0.17	-0.19	-0.34	-0.56	-0.11
Débit	-0.	1	0.55	-0.22	-0.61	-0.59	0.15	0.35
OD	-0.57	0.55	1	-0.18	-0.39	-0.37	0.32	0.30
DBO	-0.17	-0.22	-0.18	1	0.43	0.47	0.22	-0.30
Oxy. au KMNO ₄	-0.19	-0.61	-0.39	0.43	1	0.64	-0.	-0.33
NH ₄	-0.34	-0.59	-0.37	0.47	0.64	1	0.21	-0.42
NO ₃	-0.56	0.15	0.32	0.22	-0.	0.21	1	-0.08
pH	-0.11	0.35	0.30	-0.30	-0.33	-0.42	-0.08	1

coefficients de corrélation entre les différents paramètres.

Ils sont dans l'ensemble assez faibles; les plus forts obtenus sont de l'ordre de 0.6 entre débit, oxydabilité au $KMNO_4$ et concentration en ammoniacque.

Analyse des données de températures, de débit, de concentrations étudiées et de pH La Fig.2 donne la projection des classes de paramètres et des jours de mesures dans le premier plan principal du tableau des données mis sous forme disjonctive complète. Les jours sont regroupés en classes (chacune étant représentée par un numéro

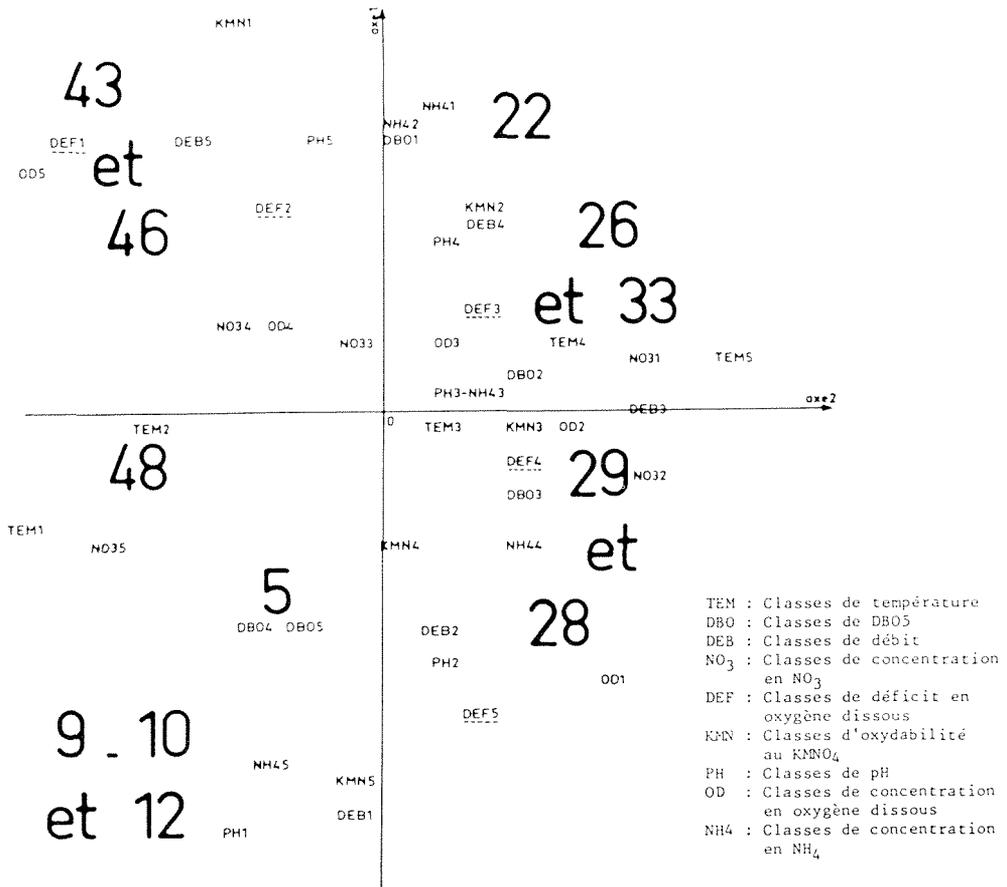


FIG.2 Analyse factorielle du tableau des concentrations station de Braubach. Plan factoriel 1-2.

sans signification particulière) obtenues par classification automatique. A cette représentation factorielle est joint un tableau donnant les caractéristiques moyennes des groupes de jours voisins (Fig.2 bis).

Sur l'axe 1 s'échelonnent les différentes classes de débit et de pH - dans l'ordre, des classes 1 aux classes 5 - et les différentes classes d'oxydabilité au $KMNO_4$, de NH_4 , et, quoiqu'un peu moins

étalées de DBO5 - dans l'ordre, des classes de fortes valeurs aux classes de faibles valeurs. L'axe 2 est celui des températures et des nitrates.

Groupe	Saison	Débit	CONCENTRATIONS				Oxydabilité au KMNO ₄	pH
			OD	DBO5	NH ₄	NO ₃		
43	Hiver	fort	très forte	faible	assez faible	> moyenne	faible	> moyenne
46	Automne Printemps	très fort	forte	faible	faible	< moyenne	faible	> moyenne
22	Eté	fort	moyenne	faible	très faible	faible	faible	fort
26	Eté	> moyenne	< moyenne	< moyenne	faible	faible	faible	assez fort
33	Eté	fort	< moyenne	> moyenne	faible	moyenne	faible	moyen
29	Eté	< moyenne	faible	moyenne	moyenne	< moyenne	moyenne	< moyenne
28	Eté	assez faible	faible	forte	forte	faible	forte	assez faible
9	Hiver	< moyenne	> moyenne	assez forte	forte	très forte	> moyenne	faible
10	Hiver Printemps	faible	< moyenne	forte	très forte	très forte	> moyenne	faible
12	Printemps Automne	très faible	très faible	très forte	très forte	faible	très forte	très faible
5	Hiver	faible	assez forte	forte	forte	moyenne	forte	faible
48	Hiver	> moyenne	forte	forte	< moyenne	très forte	< moyenne	> moyenne

FIG.2 bis Caractéristiques moyennes des principales formes fortes de la classification - station de Braubach.

L'oxygène dissous semble influencé par les deux premiers facteurs, vu l'échelonnement de ses classes le long d'une des deux diagonales principales. A une extrémité de l'axe 1 se trouvent donc les jours de fort débit, faible oxydabilité au KMNO₄, faible concentration en NH₄, faible DBO5 et fort pH; les groupes d'hiver et d'automne d'un côté avec concentration en NO₃ moyenne à forte (groupes 43 et 46), les groupes d'été de l'autre (22-26 et 33). A l'autre extrémité de l'axe 1 se trouvent les jours de faible débit, forte oxydabilité au KMNO₄, forte concentration en NH₄, forte DBO5 et faible pH; les groupes d'hiver d'un côté avec moyenne à forte concentration en NO₃ (groupes 9-10-12 et 5), les groupes d'été de l'autre avec faible concentration en NO₃ (groupes 28 et 29). L'oxygène dissous suit la température: concentrations faibles à moyennes en été (faibles à

faible débit, moyennes à fort débit), concentrations fortes à moyennes l'hiver (fortes à fort débit, moyennes à faible débit). Il faut noter que les jours postérieurs à 1969 se trouvent plus particulièrement du côté des faibles débits avec de fortes concentrations en DBO5 (groupes 10-12 et 28).

La covariation des paramètres: débit, $KMNO_4$, DBO5, NH_4 et pH est telle qu'on trouve dans le plan 1-3 (Fig.3) une structure parabolique très caractéristique (effet Guttman). Les classes de paramètres s'y échelonnent des classes de fort débit, fort pH, faible oxydabilité au $KMNO_4$, faibles concentrations en NH_4 et DBO5, aux classes de faible débit, faible pH, forte oxydabilité au $KMNO_4$, fortes concentrations en NH_4 et DBO5. Les groupes de jours s'organisent le long de cette parabole des jours de forts débits - et valeurs correspondantes des différents paramètres hormis température, oxygène dissous et NO_3 - aux jours de faibles débits, et ce indépendamment de la saison. Les classes de pourcentage de déficit en oxygène suivent - dans les deux plans - celles des concentrations en oxygène dissous, les forts déficits voisinant avec les faibles concentrations.

L'analyse du tableau des flux devrait montrer si l'importante

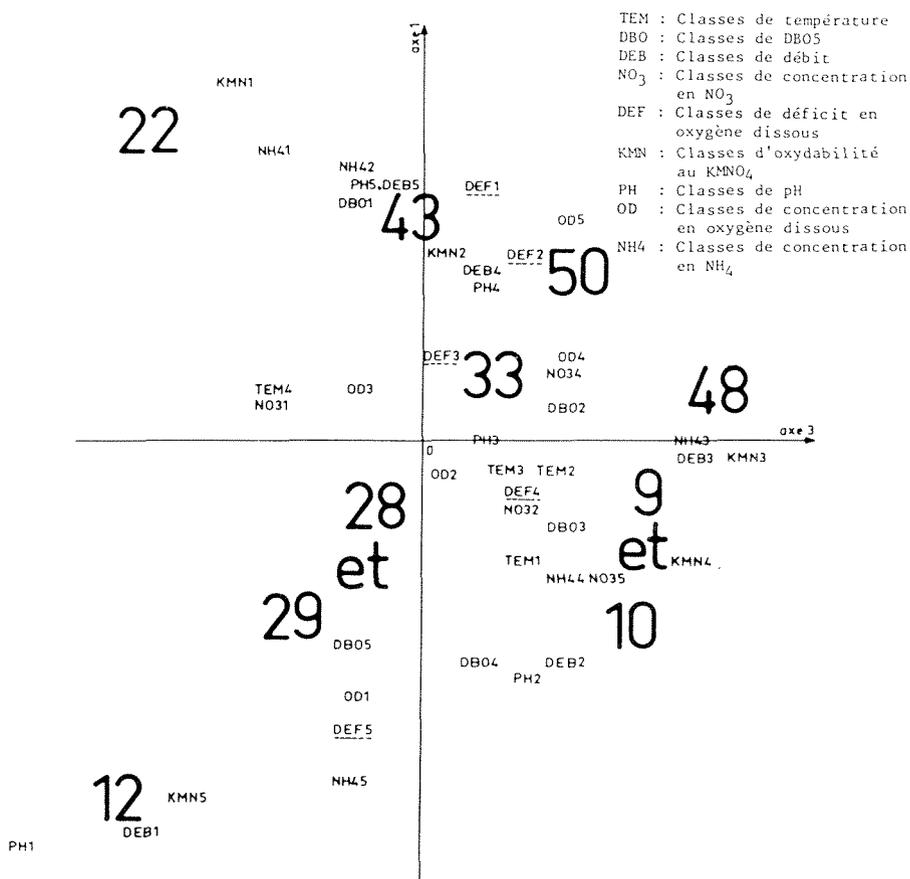


FIG.3 Analyse factorielle du tableau des concentrations - station de Braubach. Plan factoriel 1-3.

structure trouvée est due au phénomène de dilution: les concentrations seraient alors inversement proportionnelles au débit, ce qui expliquerait la covariation des différents paramètres.

Analyse des données de température, de débit, de flux et de pH La Fig.4 donne les projections dans le plan principal des classes de paramètres et des groupes de jours de l'analyse des correspondances du tableau disjonctif complet construit à partir des flux calculés (caractéristiques des groupes données, Fig.4 bis).

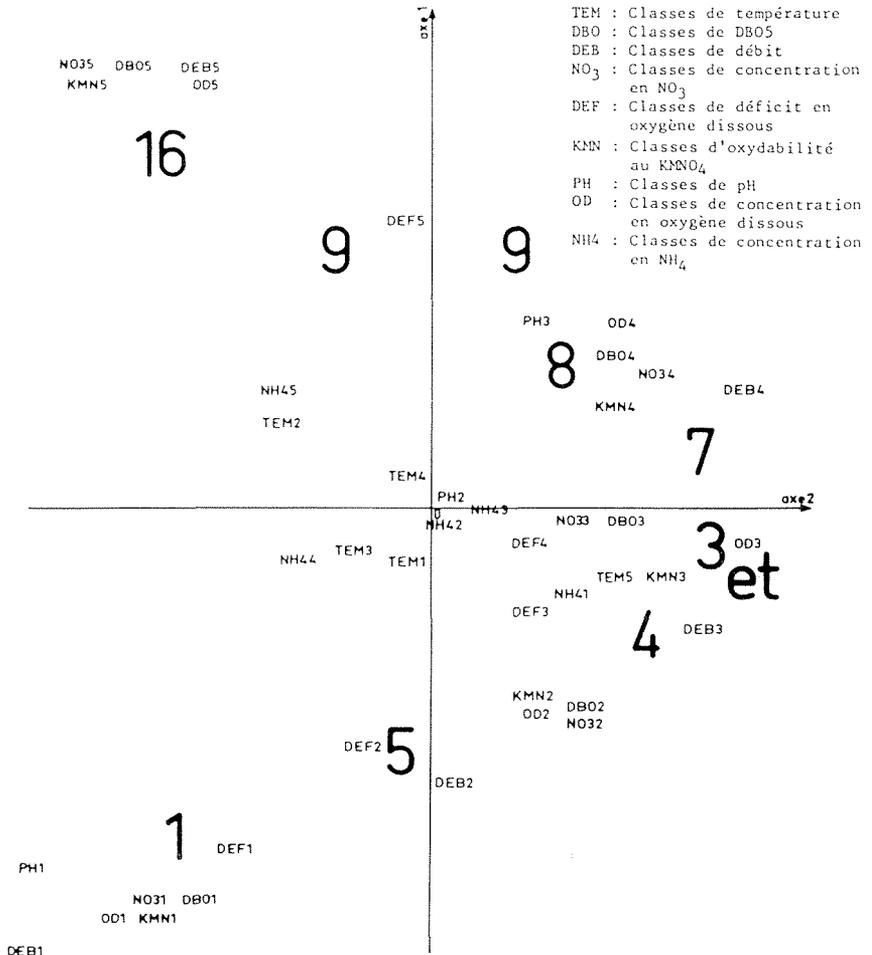


FIG.4 Analyse factorielle du tableau des flux - station de Braubach. Plan factoriel 1-2.

On retrouve ici la structure parabolique rencontrée précédemment. Les classes de débits, de flux d'oxydabilité au KMNO₄, de DBO₅, d'oxygène dissous, de déficit en oxygène (tous positifs dès la station 3), de NO₃ s'échelonnent des fortes aux faibles classes le long de la parabole: les forts débits voisinant les forts flux, les

faibles débits voisinant les faibles flux.

Seul le flux de NH_4 ne suit pas le débit. Le troisième facteur est peu net et n'est pas représenté ici. Notons cependant que les classes de NH_4 s'échelonnent grossièrement sur l'axe 3.

La liaison débit-concentration en NH_4 peut donc s'expliquer par le phénomène de dilution vu l'indépendance entre le débit et le flux de NH_4 . L'importance des liaisons débit-flux d'oxydabilité au $KMNO_4$, débit-concentration en DBO_5 , implique par contre que les oxydabilités

← FLUX →

Groupe	Saison	Débit	OD	Déficit OD	DBO_5	NH_4	NO_3	Oxydabilité au $KMNO_4$	Ph
16	Hiver Automne	très fort	très fort	Fort	très fort	très fort	très fort	très fort	> moyenne
9	Toutes saisons	fort	fort	fort	fort	moyen	fort	fort	> moyenne
8	Toutes saisons	fort	fort	moyen	< moyenne	moyenne	fort	fort	> moyenne
7	Eté	> moyenne	moyen	moyen	moyen	faible	< moyenne	< moyenne	> moyenne
3	Printemps Eté	< moyenne	< moyenne	faible	faible	faible	faible	< moyenne	> moyenne
4	Printemps Eté	faible	faible	< moyenne	faible	faible	faible	assez faible	< moyenne
5	Printemps Automne	très faible	très faible	faible	très faible	très faible	très faible	très faible	> moyenne
1	Hiver Automne	très faible	très faible	faible	faible	> moyenne	faible	très faible	faible

FIG.4 bis Caractéristiques moyennes des principales formes fortes de la classification - station de Braubach.

au $KMNO_4$ et les concentrations en DBO_5 ne sont pas simplement inversement proportionnelles au débit et qu'un autre phénomène que la dilution lie ces trois paramètres.

Principaux résultats obtenus aux huit stations étudiées

De l'analyse des concentrations ressort une certaine homogénéité de la structure des données pour les stations aval (de Braubach à l'embouchure); les stations amont (Stein, Kembs et Seltz) présentent par contre un certain nombre de traits particuliers:

- A Stein, le Rhin a un régime nival. L'oxygène dissous et la DBO_5 prennent leurs fortes ou faibles valeurs simultanément - fortes valeurs principalement en hiver. Les déficits en oxygène sont plutôt négatifs à fort débit, positifs à faible débit.

- A la station de Kembs, le Rhin a toujours un régime nival. Les concentrations en oxygène dissous suivent la température: fortes

l'hiver, faibles l'été. Aucune loi ne se dégage pour la DBO5. Les déficits en oxygène sont, comme à Stein, négatifs à fort débit, positifs à débit faible.

- Peu de tendances se dégagent de l'étude des concentrations mesurées à Seltz. Aucune structuré dans les données et aucune liaison entre les différents paramètres n'apparaissent. Ceci est peut-être dû à une qualité douteuse des données en cette station.

Un certain nombre de tendances générales se dégagent aux stations plus en aval (voir par exemple les résultats obtenus à Braubach):

- Importante covariation des paramètres débit, concentration en DBO5 (mis à part à Kampen), en NH_4 , oxydabilité au KMNO_4 et pH: aux faibles débits correspondent de faibles pH, de fortes concentrations en DBO5 et en NH_4 , de fortes oxydabilités au KMNO_4 , et inversement.

- La température semble varier indépendamment de ces paramètres. Elle varie simultanément aux concentrations en oxygène dissous et en nitrates (faibles concentrations en oxygène et en nitrates à fortes températures).

- Les déficits en oxygène dissous sont positifs et suivent les concentrations en oxygène dissous (à forte concentration en oxygène, faible déficit, et inversement).

Des particularités ressortent en différentes stations. L'analyse statistique ne peut que les mettre en évidence mais n'en donne pas d'explications:

- A Braubach et Emmerich-Lobith, la variation de l'oxygène - dans les plages de fortes concentrations l'hiver, de faibles concentrations l'été - se fait de la manière suivante: les plus fortes concentrations s'observent à forts débits, les plus faibles à faibles débits.

- A Gorinchen, les concentrations en NO_3 sont plutôt fortes à moyennes l'hiver (fortes à débits faibles, moyennes à forts débits) et faibles à moyennes l'été (faibles à forts débits, moyennes à faibles débits).

- A Vreeswijk, la DBO5 varie simultanément à la température et aux concentrations en oxygène dissous et nitrates (fortes DBO5 à fortes températures).

- A Kampen, les fortes DBO5 ne s'observent en moyenne qu'à faibles débits, alors que les faibles DBO5 s'observent indifféremment à forts ou faibles débits.

CONCLUSION

La présente analyse montre que la qualité de l'eau du Rhin s'est sensiblement dégradée au cours de la période étudiée - 1959-1974. Depuis les années 1974, un effort important a été fait pour réduire les rejets industriels; il serait intéressant d'analyser les données de qualité d'eau observées ces dernières années pour voir dans quelles mesures il a porté ses fruits.

L'analyse statistique a mis en évidence un certain nombre de propriétés liées aux diverses stations d'observations de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin Contre la Pollution. Il ressort en particulier une analogie de structure des données pour les stations à l'aval de Braubach. Cette analyse confirme le fait que d'une manière générale, la charge augmente avec le débit. L'hypothèse d'effluents à flux sensiblement constant au cours de

l'année n'est absolument pas vérifiée ici; une modulation contrôlée des flux en fonction du débit est bien sûr irréaliste à l'échelle du bassin versant.

L'analyse statistique ne permet pas d'identifier les causes de ce phénomène; il pourrait s'agir aussi bien d'une remise à disposition des matières ayant sédimenté que d'apports plus importants liés au lessivage des sols au moment de l'augmentation du débit.

