

Analyse de séries temporelles de mesures de l'oxygène dissous et du pH sur la Loire au niveau du site nucléaire de Dampierre (Loiret) : 1. Compréhension des variations temporelles des teneurs en oxygène dissous et du pH en relation avec des données hydrométéorologiques

*Analysis of data series measurements of dissolved oxygen and pH in the Loire River at Dampierre nuclear power plant :
1. Temporal patterns of dissolved oxygen and pH in relation to hydrometeorological data.*

Florentina Moatar⁽¹⁾, Alain Poirel⁽²⁾, Charles Obled⁽¹⁾

(1) Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement UMR 5564 (CNRS-INPG-ORSTOM-UJF), BP 53, 38 041 Grenoble cedex 9

(2) EDF – Division Technique Générale 21, avenue de l'Europe, BP 41, 38 040 Grenoble cedex 9

Résumé. – Pour la surveillance hydroécologique des centrales nucléaires, des stations automatiques mesurent en continu quatre paramètres physico-chimiques : la température de l'eau, la teneur en oxygène dissous, le pH et la conductivité électrique. Ces stations produisent au pas de temps horaire, des mesures de qualité de l'eau en amont, en aval et au droit du rejet des centrales.

Dans cette première partie nous présentons les variations temporelles de l'oxygène dissous et du pH dans le secteur eutrophisé de la Loire Moyenne sur une période de 5 années (1990-1994). Il s'agit de mettre en évidence les fluctuations de ces deux variables suivant deux échelles de temps différentes, le cycle saisonnier et le cycle journalier, et d'expliquer l'influence de l'hydrométéorologie sur ces variations.

L'oxygène dissous a été étudié à partir de sa valeur minimale journalière (O_{2min}) et de ses amplitudes journalières ($O_{2max} - O_{2min}$). Le cycle annuel de la valeur minimale est relativement corrélé à la température de l'eau et présente un écart type interannuel faible et constant. Par contre, le cycle annuel des amplitudes journalières d'oxygène dissous est plus complexe, avec un écart type variable au cours de l'année en fonction du mois. Il reflète à la fois les variations du régime hydraulique et celles de l'activité saisonnière des organismes photosynthétiques.

Le pH est, comme l'oxygène dissous, fortement lié au développement phytoplanctonique. La moyenne et l'écart type des valeurs journalières interannuelles présentent les mêmes caractéristiques saisonnières que celles des amplitudes d'oxygène dissous.

A une échelle plus fine, une relation entre les composantes horaires (heure du minimum et du maximum, amplitude du cycle journalier) et les variables hydrométéorologiques telles que le débit et le rayonnement solaire a pu être mise en évidence.

Les analyses et résultats, développés dans cette première partie sont issus des travaux qui s'inscrivent dans une recherche beaucoup plus vaste de critique et validation de données. Cette dernière s'appuie sur la mise au point de modèles qui visent à reproduire les chroniques afin de contrôler la cohérence des séries de mesure. La méthodologie de critique des quatre paramètres physico-chimiques sera présentée dans la deuxième partie de cet article (à paraître).

Mots clés. – Oxygène dissous, pH, Loire, cycle annuel, cycle journalier.

Abstract. – In the framework of regular hydroecological monitoring in the vicinity of nuclear power stations, four physical and chemical parameters are continuously and automatically recorded : water temperature, dissolved oxygen, pH and conductivity. Using a one-hour time step, the recorders measure water quality upstream, downstream and on a level with the releases from the plant.

The first part of this paper presents temporal patterns of dissolved oxygen and pH in the eutrophic intermediate reach of the Loire River over a 5-year period (1990-1994). Fluctuations in these two variables are shown on two different time scales, seasonal and diurnal, in relation to hydrometeorological conditions.

Dissolved oxygen was studied on the basis of the daily minimum (DO_{min}) and daily amplitude ($DO_{max} - DO_{min}$). The annual cycle of the minimum value is relatively well correlated to water temperature, with a moderate and constant standard deviation from year to year. The annual cycle of daily amplitudes, however, is more complex, with a deviation that varies during the year, depending on the month. The cycle reflects both variations in hydraulic regime and variations in the seasonal level of phytoplankton photosynthesis.

Like DO, pH is strongly linked to phytoplankton growth. Means and standard deviations of pH show the same seasonal characteristics as DO amplitudes.

Taking a more limited time scale, a relationship was pointed up between time factors (hour of daily minimum and maximum, daily amplitude) and hydrometeorological variables such as discharge and solar radiation.

The analyses and results given in this first publication are part of a much broader project to verify and validate data. The methodology includes fine-tuning of models designed to reproduce data series so as to verify consistency in the measurements. The second part of the paper will present the quality-control method used to check the four physical and chemical parameters.

Key words. – Dissolved oxygen, pH, Loire, annual cycle, diurnal cycle.

1. INTRODUCTION

Une surveillance hydroécologique est réalisée au droit des centrales nucléaires implantées le long des rivières (Khalanski, 1996). Elle consiste en des campagnes de mesures des indicateurs de qualité d'eau (8 à 11

campagnes par année) et des mesures en continu de quatre paramètres physico-chimiques représentatifs : la température, l'oxygène dissous, le pH et la conductivité électrique.

Sur la Loire Moyenne, les premières campagnes de mesures spécifiques ont débuté dès 1977 sur le site

de Dampierre-en-Burly à la demande de EDF. Ces suivis ponctuels (environ tous les mois) ont donné lieu à des analyses synthétiques et focalisées sur les mesures effectuées en été :

⇒ recherche des tendances d'évolution par le biais de moyennes mobiles,

⇒ analyse des relations entre les diverses grandeurs par la technique des composantes principales (Lair et Sargos, 1993, Lair *et al.* 1996).

La Loire Moyenne est un fleuve typiquement eutrophe, dans lequel les éléments nutritifs sont en quantité suffisante pour ne pas être limitants, et permettent donc un développement important du phytoplancton. Les valeurs de chlorophylle a (chl_a) inférieures à 10 mg/m³ en hiver peuvent atteindre entre 140 et 250 mg/m³ en période d'étiage estival dans la Loire moyenne à Dampierre (Khalanski, 1987, Oudin, 1990).

Cette forte évolution saisonnière de la biomasse phytoplanctonique se traduit par des variations annuelles importantes de certaines caractéristiques physico-chimiques et plus particulièrement de la teneur en oxygène dissous et du pH.

Parallèlement, les données en continu dont nous disposons montrent que des cycles journaliers très marqués se produisent.

Il nous a paru intéressant d'étudier les variations temporelles de ces variables, d'abord à l'échelle annuelle, mais aussi journalière et horaire.

Nous disposons des séries de mesures en continu (au pas de temps horaire) enregistrées entre 1990 et 1994.

Il faut signaler qu'à ces échelles, journalière et même horaire, aucune étude n'avait encore été publiée sur ces données.

L'origine de ces travaux s'inscrit dans une recherche beaucoup plus vaste concernant la mise au point de modèles qui visent à reproduire les chroniques afin de contrôler la cohérence des séries de mesures via des procédures de tests statistiques (Moatar, 1997; deuxième partie de cet article).

Ce travail a demandé de comprendre, au moins quantitativement et parfois qualitativement, le fonctionnement et les successions d'équilibres, donc de processus dominants, qui prennent place dans un tronçon de rivière.

Cet article cherchera à mettre en évidence :

⇒ les variations de l'oxygène dissous et du pH suivant deux échelles de temps différentes : celle de la saison et celle du jour, et,

⇒ tenter d'expliquer l'influence de l'hydrométéorologie sur ces variations.

2. SITE ET DONNEES D'ETUDE

2.1. Site

Le Centre Nucléaire de Production Electrique (CNPE) de Dampierre-en-Burly est situé sur la Loire Moyenne

à environ 550 Km de la source du fleuve. A Gien, peu en amont du CNPE, la surface du bassin versant atteint 35 500 km². (cf. fig. 1).

Le suivi physico-chimique de l'eau est réalisé par des stations localisées

en trois points caractéristiques :

- la station « amont » est installée en amont du seuil d'alimentation sur une drôme flottante à l'entrée du canal d'amenée du CNPE,

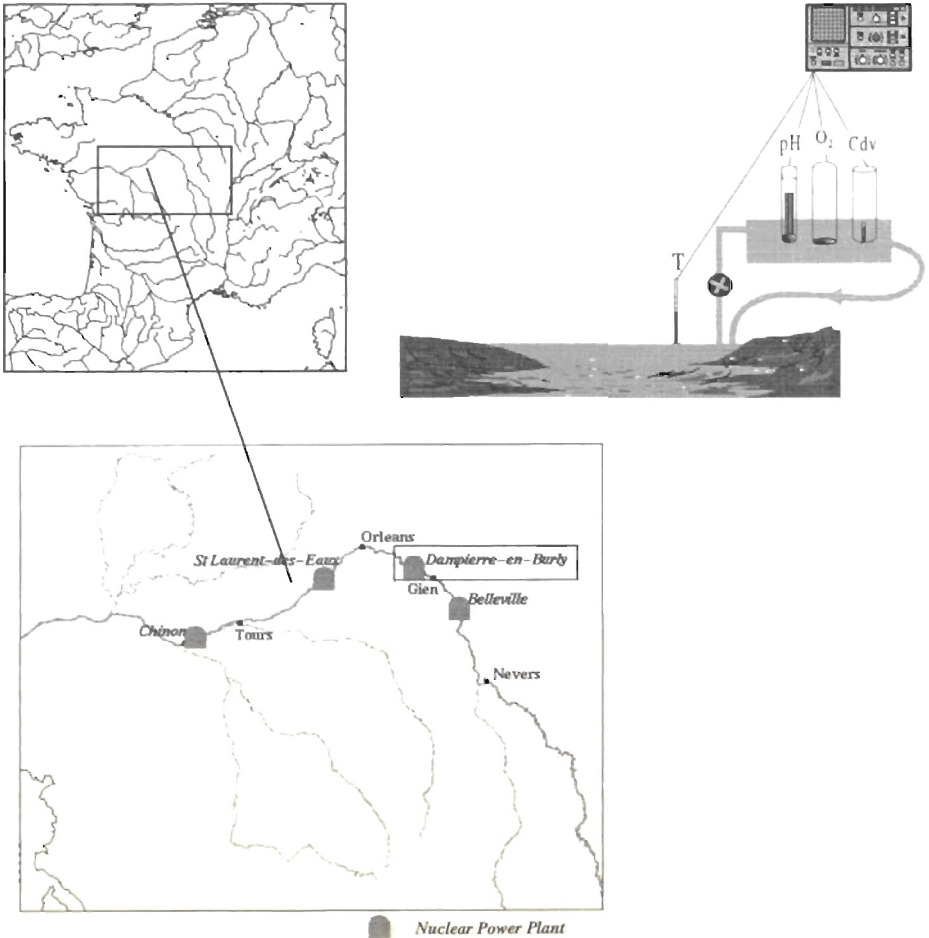


Fig. 1. – Localisation et équipement du site d'étude de Dampierre en Burly.

Schéma d'une station de mesure en continu : température (T), pH, oxygène dissous (O₂), conductivité électrique (Cdv).

Fig. 1. – Location and equipment of the Dampierre en Burly study site.

On-line monitoring sketch of the water quality : water temperature (T), pH, dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (Cdv).

- la station contrôlant le rejet est située sur un ponton flottant à l'extrémité aval du canal de rejet du CNPE,
- la station aval est située sur un ponton flottant en bordure de rivière à 5 km en aval du point de rejet.

Afin de s'affranchir d'éventuelles influences du rejet de la centrale sur la qualité de l'eau de la Loire, nous avons utilisé ici les données de la station de référence amont pour l'analyse de l'influence de l'hydrométéorologie sur le pH et oxygène dissous.

2.2. Les données de base mesurées en continu

2.2.1. Oxygène dissous et pH

Les valeurs de pH et oxygène dissous sont mesurées en continu par des stations multiparamètres qui mesurent aussi la température et la conductivité électrique. Une représentation schématique de la mesure en continu des quatre paramètres est donnée dans la fig. 1. On notera qu'à partir du ponton une pompe prélève de l'eau, qui passe sur les capteurs sauf pour la température, mesurée directement dans la rivière.

Les stations fournissent une valeur par heure, qui représente l'intégration des données enregistrées toutes les 5 secondes, entre l'heure ronde et plus 50 minutes (les 10 minutes suivantes sont occultées pour ne pas tenir compte des valeurs perturbées

pendant le cycle de nettoyage des capteurs).

La mesure d'oxygène dissous est réalisée avec une sonde Rosemount 430 et un transmetteur Rosemount 1181 O₂ avec une précision donnée par le constructeur de 0.2 mg/l pour des mesures entre 0 et 20 mg/l.

La mesure de pH est réalisée avec une sonde modèle 318 Rosemount et un transmetteur deux fils Rosemount 1181 pH / redox avec une précision donnée par le constructeur de 0.03 pour une échelle 0-14 unité pH.

Un entretien simple avec réétalonnage est effectué chaque semaine. De plus, une maintenance plus complète est réalisée chaque trimestre. En prenant en compte la précision du capteur, du transmetteur, de l'appareil d'étalonnage et de l'étalonnage lui-même, on estime l'incertitude réelle (2 écart type) à 8% pour l'oxygène dissous et à 0.3 unité pour le pH.

2.2.2. Données hydrométéorologiques

Les données hydrométéorologiques utilisées dans ce travail concernent les débits de la Loire sur le site de Dampierre (données EDF) ainsi que le rayonnement global journalier (en W/m²) mesuré à la station de Tours et fourni par Météo France. La répartition des débits dans l'année est schématisée sur la fig. 2 qui fournit les quantiles 10, 25, 50, 75 et 90% des débits journaliers sur la période 1936-1992 à Blois. On constate une

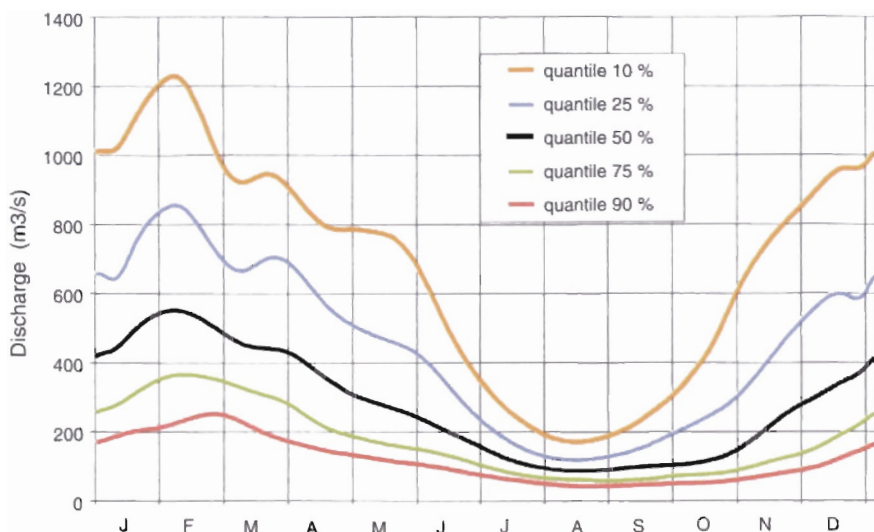


Fig. 2. – Quantiles des débits à Blois (1936-1992).

Fig. 2. – Quantiles of water discharge at Blois (1936-1992).

période d'étiage marquée et reproductible en août (quantile 50 % = 88 m³/s).

3. ANALYSE DE L'OXYGÈNE DISSOUS

3.1. Description des données disponibles

La fig. 3 présente les valeurs minimales et maximales journalières pour les 5 années d'étude ainsi qu'un exemple type de l'évolution de l'oxygène dissous sur une journée du mois de mai 1992.

Les plus faibles valeurs d'oxygène dissous minimales journalières sont observées en été pendant les mois de juillet (1991, 1993) et août (1990,

1992, 1994). En moyenne mensuelle, elles varient entre 6.2 et 6.9 mg/l suivant l'année, avec des écarts types de 0.6 à 0.9 mg/l.

Les plus fortes valeurs d'oxygène dissous maximales journalières se produisent aussi en été. Le mois d'occurrence est par contre plus variable suivant l'année : juin (1991), juillet (1994), août (1992, 1993), septembre (1990). La moyenne mensuelle de ces mois varie entre 14.8 mg/l en 1992 avec un écart type de 1.8 et 17.6 mg/l en 1990 avec un écart type de 1.6 mg/l.

En hiver (novembre, décembre, janvier), l'oxygène dissous a des taux compris entre 11 mg/l et 12,5 mg/l et avec des écarts types de 0.4 à 1.2 mg/l.

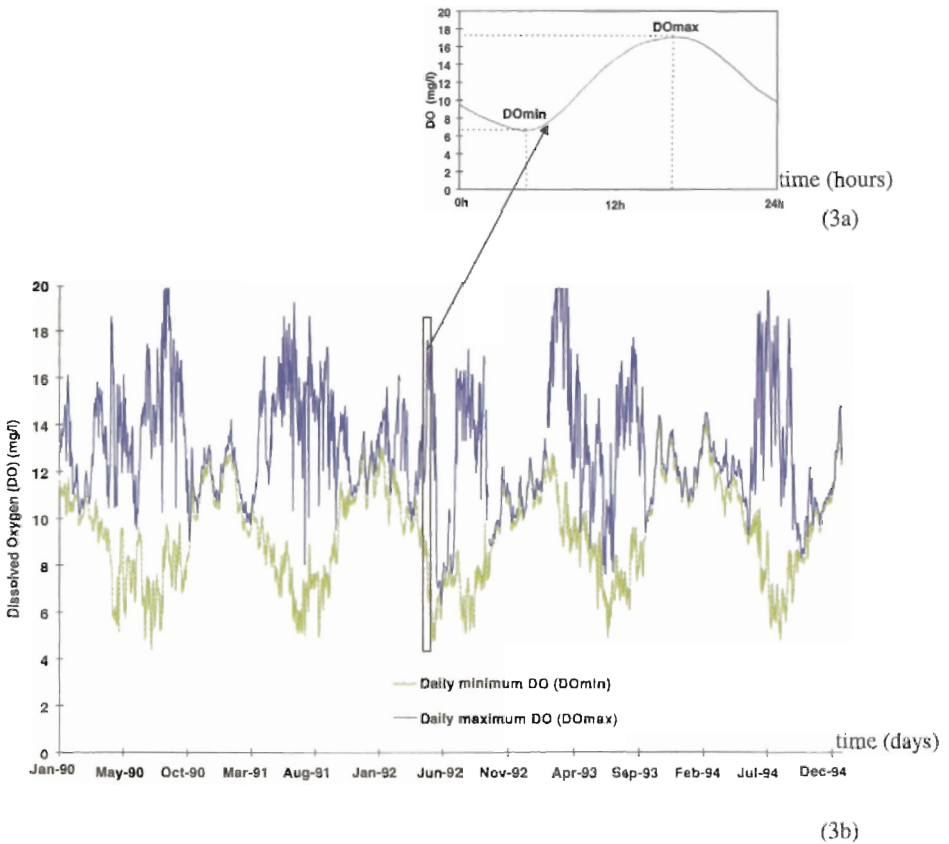


Fig. 3. – a) Exemple type de l'évolution horaire de l'oxygène dissous (mai 1992).
 b) Représentation des valeurs minimales journalières et maximales journalières d'oxygène dissous pendant la période d'étude 1990-94.

Fig. 3. – a) Typical DO evolution in a day of May 1992

b) Variation of daily minimum and maximum DO for the study period 1990-94.

3.2. Caractérisation de l'oxygène dissous selon les processus prédominants

Fondamentalement c'est l'équilibre avec l'oxygène dissous atmosphérique qui tend à ramener l'oxygène dissous au taux de saturation. Mais dans les eaux riches en matières organi-

ques, comme c'est le cas de la Loire, l'oxygène dissous se trouve rarement à l'équilibre. Il est le plus souvent :

⇒ soit en sursaturation, pendant le jour, du fait de l'oxygène produit par la photosynthèse, qui excède les processus de consommation.

⇒ soit en sous-saturation, pendant la nuit, du fait de l'oxygène dis-

sous consommé par la respiration, la décomposition de la matière organique et des réactions chimiques.

La part prise par ces différents processus dans le bilan d'oxygène dissous est difficile à estimer.

Si l'on calcule le pourcentage en saturation correspondant au minimum et au maximum d'oxygène dissous dans la journée, on remarque que, si les sous-saturations pour les valeurs minimales sont faibles (en moyenne 90% en hiver et 80% en été), les sursaturations pour les valeurs maximales journalières sont par contre très fortes en saisons estivales. Pendant ces périodes, les sursaturations sont en moyenne de l'ordre de 180% et peuvent atteindre 230% (cf. fig. 4).

Nous avons donc décidé d'étudier la chronique horaire de l'oxygène dissous au travers de deux paramètres qui semblent suivre des comportements spécifiques particuliers :

⇒ les valeurs minimales journalières, O_{2min} , principalement contrôlées par l'équilibre avec l'atmosphère et secondairement par les phénomènes de respiration phytoplanctonique et de décomposition de la matière organique.

⇒ les amplitudes journalières ($O_{2max}-O_{2min}$), contrôlées par la photosynthèse et la respiration phytoplanctonique et la décomposition de la matière organique. Or cette dégradation (DBO5) vient surtout du phytoplancton mort, ce qui explique la

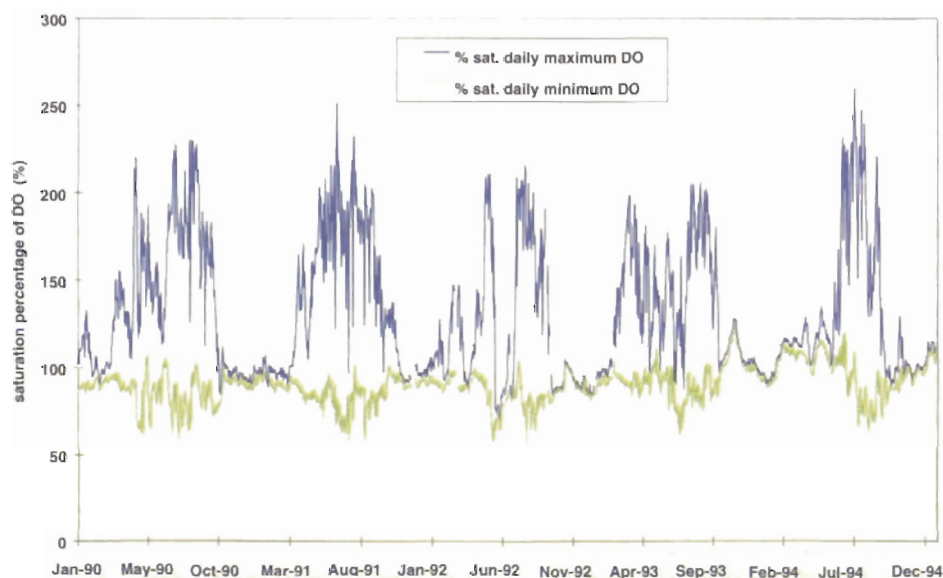


Fig. 4. – Représentation des taux de saturation en oxygène correspondant aux valeurs minimales et maximales dans la journée.

Fig. 4. – Variation of DO saturation level : percentages corresponding to the daily minimum and maximum DO.

bonne corrélation avec la chlorophylle *a* (Khalanski, 1989; Moatar, 1997).

Dans un premier temps, nous allons montrer l'influence de la température de l'eau sur la valeur minimale; elle influe à la fois sur la solubilité de l'oxygène et sur les activités métaboliques de respiration du phytoplancton.

Dans un deuxième temps nous mettons en évidence l'influence des variables de forçage «débit» et «rayonnement solaire» sur les amplitudes journalières.

3.3. Valeur minimale d'oxygène dissous : cycle annuel

La fig. 5a présente l'évolution moyenne au cours de l'année des valeurs minimales journalières d'oxygène dissous calculées sur 5 années ainsi que le lissage réalisé par décomposition en série de Fourier avec deux harmoniques. Les traits, qui forment un intervalle autour de la moyenne, correspondent aux valeurs moyennes ± 1 écart type, calculées sur un échantillon de 5 jours consécutifs des 5 années disponibles, i.e., 25 valeurs. Cet intervalle, relativement constant, montre une faible variabilité d'une année sur l'autre.

La fig. 5b présente les températures moyennes journalières de l'eau pour les mêmes années. On remarque que les plus faibles valeurs d'oxygène dissous correspondent aux plus fortes valeurs de température de l'eau

de fin juillet et début août. De même, les valeurs minimales journalières d'oxygène dissous les plus élevées ont lieu au même moment que les plus faibles températures de l'eau : en décembre et janvier.

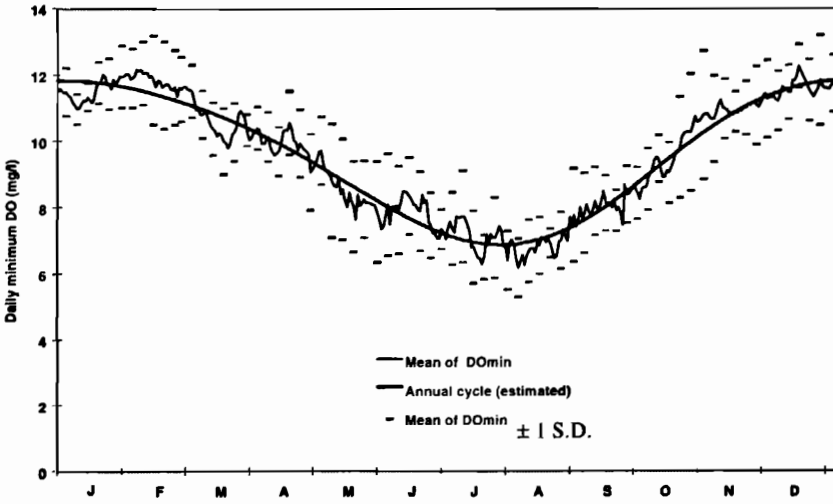
3.4. Valeur minimale journalière d'oxygène dissous : composante à court terme

On appelle composante à court terme de la valeur minimale journalière d'oxygène dissous (notée $O_2\text{min-U}$ dans la fig. 6a), la chronique obtenue après soustraction du cycle annuel. Cette série a été étudiée en fonction de la composante à court terme de la température de l'eau. La relation entre ces deux composantes est quasi linéaire (cf. fig. 6b).

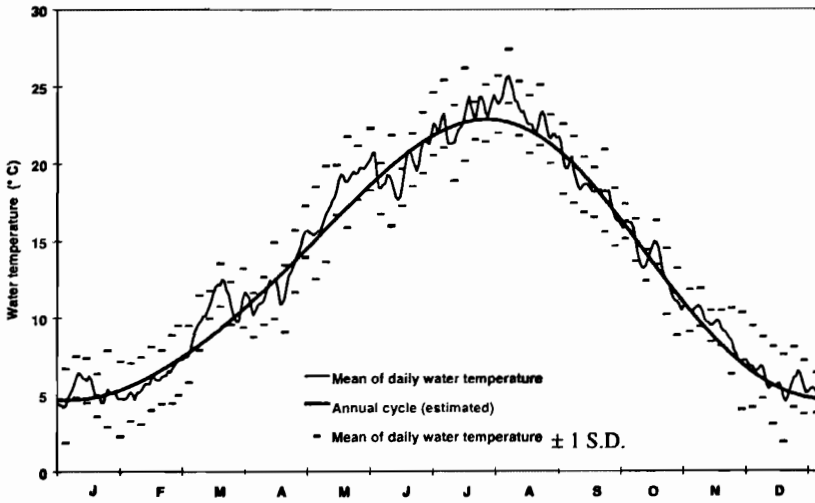
Ceci tend à prouver que la température de l'eau (moyenne journalière entre 0h et 24h de la veille) explique le minimum de l'oxygène dissous (min. entre 0h et 24h du jour).

3.5. Amplitudes journalières d'oxygène dissous : cycle annuel

La fig. 7 présente les amplitudes journalières pour chaque jour de l'année. Le trait continu représente la moyenne interannuelle calculée à partir des 5 années tandis que les traits discontinus forment un intervalle autour de la moyenne correspondant à ± 1 écart type. Au contraire des valeurs minimales journalières d'oxygène dis-



a)

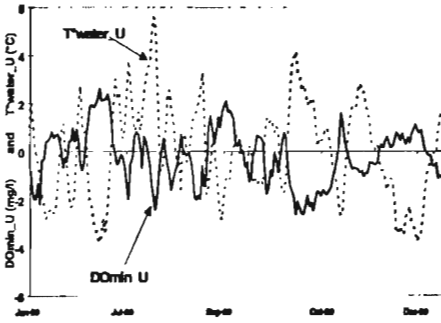


b)

Fig. 5. – Cycle annuel de la valeur minimale journalière d'oxygène dissous (a) et de la température de l'eau (b).

Fig. 5. – Annual cycle of daily minimum DO (a) and of water temperature (b).

(6a)



(6b)

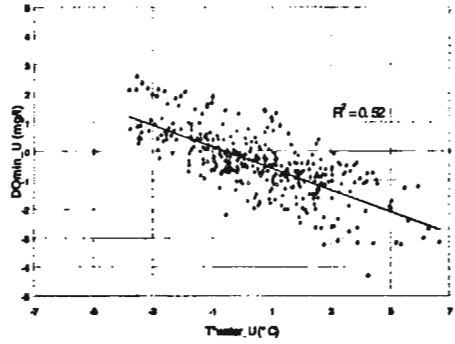


Fig. 6a. – Composantes à court terme de la valeur minimale d'oxygène dissous et de la température de l'eau (chronologie).

6b. – Composantes à court terme de la valeur minimale d'oxygène dissous et de la température de l'eau (nuage de points).

Fig. 6a. – Short term evolution of DO_{min} and the water temperature (time series).

6b. – Short term evolution of DO_{min} versus short term evolution of water temperature.

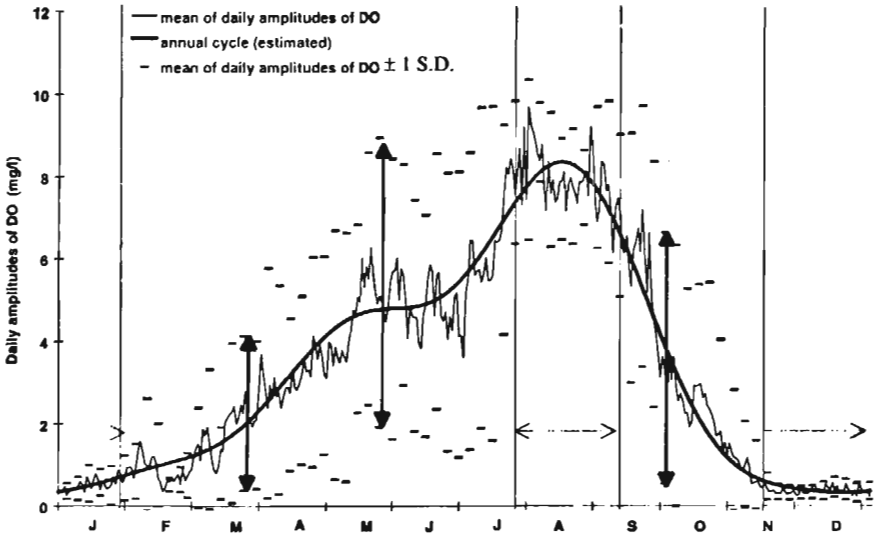


Fig. 7. – Cycle annuel des amplitudes journalières d'oxygène dissous.

Fig. 7. – Annual cycle of daily amplitude of DO.

sous, les amplitudes journalières présentent des écarts types avec une variation annuelle marquée et non corrélée aux valeurs moyennes inter-annuelles.

Ceci s'explique par le fait que le cycle annuel des amplitudes d'oxygène dissous reflète à la fois les variations du régime hydraulique et celle de l'activité saisonnière des organismes photosynthétiques.

- durant les mois de novembre, décembre et janvier des amplitudes pratiquement nulles (0.3 mg/l) sont observées quelque soit l'année. Les conditions climatiques ne favorisent pas le développement phytoplanctonique.

- les plus fortes amplitudes journalières sont observées de fin juillet jusqu'au début septembre (8 mg/l en moyenne avec des écarts types relativement faibles et constants de 1 à 2 mg/l). Cela est à rapprocher du régime hydrologique; les crues de la Loire sont très rares à cette période qui se caractérise généralement par une faible hydraulicité (cf. fig. 2) qui favorise le développement phytoplanctonique.

- les périodes de printemps, début été et automne sont caractérisées par des amplitudes très variables d'une année sur l'autre qui sont en concordance avec la variabilité hydrologique à cette période (cf. fig. 2) et les facteurs physiques, chimiques et biologiques qui conditionnent la quantité et la qualité du phytoplancton.

Nous montrons dans la fig. 8 les chronologies hebdomadaires de concentration en chlorophylle a entre 1990 et 1994 pour la Loire en amont d'Orléans. Il s'agit de la station de mesures du quai du Roi où un suivi du phytoplancton est réalisé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. Le débit est représenté sur le même graphique.

L'observation de ces graphes montre à l'échelle hebdomadaire une relation forte entre les deux variables (chl_a et débit). Cette relation avait déjà été mise en évidence par analyse en composante principale sur les données mensuelles (Lair et Sargos, 1993). Deux explications complémentaires peuvent être avancées :

- Lorsque le débit est faible, le temps de séjour de la masse d'eau dans le tronçon de rivière est long : le phytoplancton peut alors se développer, sa croissance étant conditionnée par les facteurs physiques, chimiques et biologiques.

- Lorsque le débit augmente, la teneur en phytoplancton diminue; il y a tout d'abord un effet instantané de dilution du phytoplancton présent par l'eau de ruissellement puis une limitation de croissance par la diminution du temps de séjour.

On constate aussi que les pics correspondant à des poussées d'algues apparaissent pendant l'étiage à des époques différentes selon les années.

De manière à visualiser graphiquement l'influence de l'activité photosynthétique du phytoplancton nous avons

évalué la série des amplitudes journalières lissée à Dampierre par des moyennes mobiles d'ordre hebdomadaires (cf. fig. 9). La comparaison des figures 8 et 9 montre la cofluctuation des deux variables.

3.6. Amplitudes journalières d'oxygène dissous : relation avec le rayonnement et le débit

Après cette description qualitative, nous avons essayé de quantifier les amplitudes journalières d'oxygène dissous en fonction des variables de forçage : rayonnement solaire et débit.

Plusieurs études antérieures ont montré la relation entre la production photosynthétique et l'intensité lumineuse pour différents milieux aquatiques. Cette relation est généralement décrite de la façon suivante : la production photosynthétique augmente de façon linéaire avec l'intensité lumineuse pour les faibles intensités, elle atteint ensuite un palier (plateau saturant); dans certains cas, elle peut ensuite décroître pour de plus fortes intensités. Les modèles mathématiques pour représenter cette relation sont nombreux (fonction puissance, hyperbole, tangente-hyperbolique, Steele, 1962, Lassby & Platt, 1976). Ils ont été validés pour différents milieux. En ce qui concerne les rivières, ces modèles ont été établis pour des périodes de débit relativement constant. (Cosby & Hornberger, 1984)

A partir de nos séries de données, nous avons tracé les amplitudes jour-

nalières observées d'oxygène dissous en fonction du rayonnement global journalier mesuré (cumul quotidien du rayonnement global sur plan horizontal) et pour diverses gammes de débit (cf. fig. 10). Ces amplitudes représentent l'effet de la production photosynthétique journalière. Pour une tranche de débit donné on remarque la croissance des amplitudes d'oxygène dissous en fonction de l'intensité lumineuse jusqu'à une valeur maximale, elle même fonction de la gamme de débit considérée. L'amplitude reste ensuite constante (phénomène de plateau saturant) et dans notre cas on ne note pas de décroissance significative au delà de l'intensité lumineuse « optimale ».

Les courbes présentées sur le même graphique correspondent au calcul de la formule suivante :

$$\Delta O_2 = \frac{a \cdot Q}{(b \cdot Q^2 + (1 - 2 \cdot \sqrt{(b \cdot c)}) \cdot Q + c)} \cdot \tanh(d \cdot Ray)$$

Les quatre paramètres (a, b, c, d) ont été ajustés par la méthode des moindres carrés.

a	b	c	d
9.11	0.02	85.19	0.01

3.7. Cycle journalier d'oxygène dissous : synthèse

Nous représentons ci-après les cycles journaliers d'oxygène dissous (valeurs calculées par moyenne mobile des données horaires sur 24

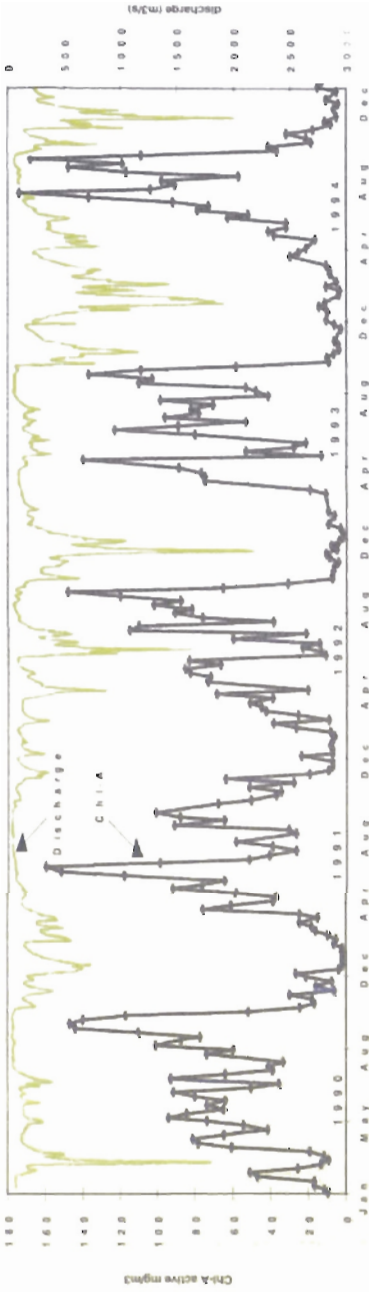


Fig. 8. — Mesures de chlorophylle a (fréquence quasi hebdomadaire) au Quai du Roi et débit journalier (1990-1994).
 Fig. 8. — Variation of chlorophyll-a (weekly frequency) and discharge, upstream Orleans at Quai du Roi (1990-1994).

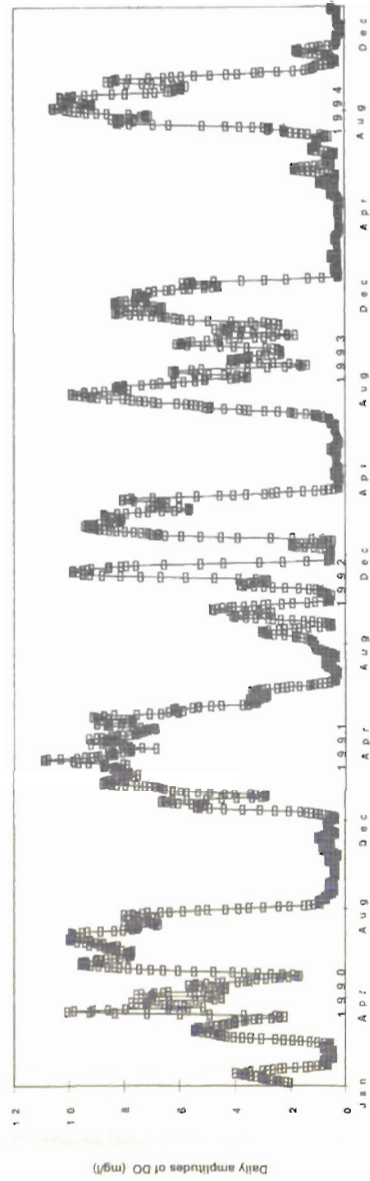


Fig. 9. — Moyenne mobile (d'ordre 7) des amplitudes journalières d'oxygène dissous à Dampierre (1990-94).
 Fig. 9. — Moving average (7 days order) of daily amplitude of DO at Dampierre.

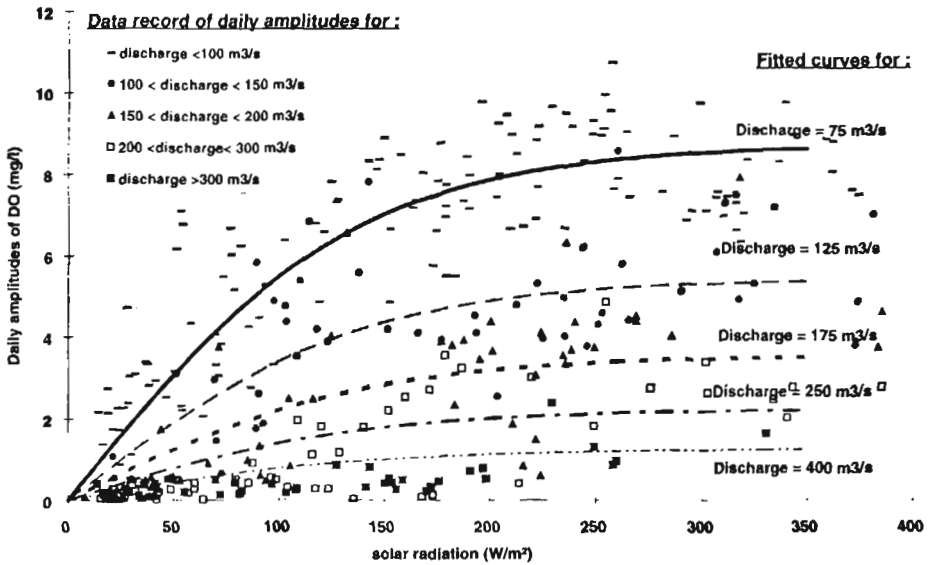


Fig. 10. – Représentation des amplitudes journalières d'oxygène dissous en fonction du rayonnement global journalier.

Fig. 10. – Daily DO amplitudes versus light intensity for five ranges of discharge (measured data and fitted curves).

points et centrées) et le débit pour l'année 1992 (cf. fig. 11).

Dans les périodes de débit stable, le cycle journalier a la même forme pour divers mois de l'année : on constate une croissance des concentrations au cours de la journée (maximum vers 15 à 16 heures) et une décroissance la nuit (minimum entre 5 et 6 heures) (cf. figure 12). Cette constatation est vérifiée sur une grande partie des rivières françaises. C'est notamment le cas pour une rivière comme la Seine à Chatou (Mouchel *et al.*, 1994). On retrouve le même phénomène dans les étangs ou bassins de piscicultures (Ginot, 1990 ; Barthelemy et Goubier, 1991).

En périodes de hautes eaux, les cycles se décalent et une inversion entre l'heure de l'apparition de la valeur minimale et celle de la valeur maximale journalière se produit (cf. fig. 12). En effet, l'oxygène dissous atteint sa valeur minimale dans la journée (vers 14 heures) et sa valeur maximale dans la nuit (vers minuit). En hautes eaux la photosynthèse est faible et le cycle est contrôlé par l'équilibre avec l'atmosphère. Dans la journée l'eau est plus chaude et la solubilité est donc moins forte (d'où une plus faible valeur d'oxygène dissous), alors que la nuit l'eau est plus froide, la solubilité est plus forte, d'où une plus forte valeur d'oxygène dissous.

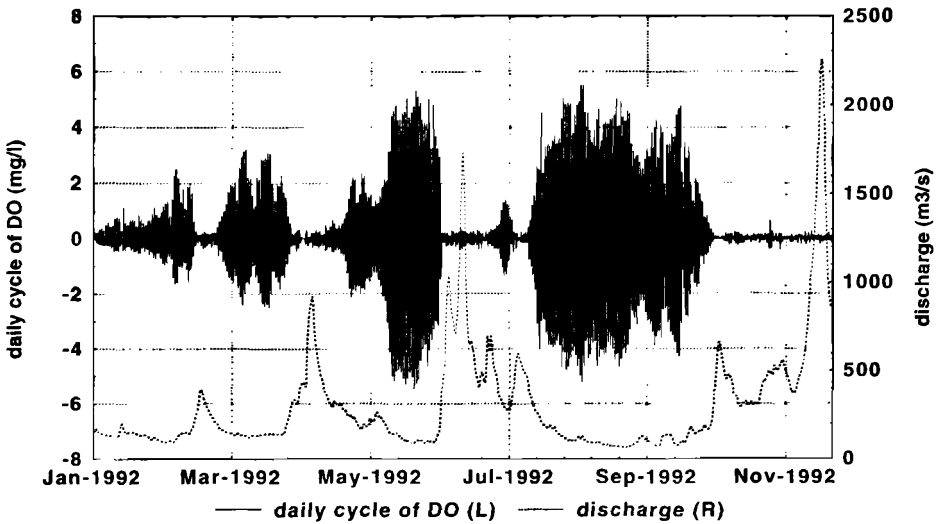


Fig. 11. – Les cycles journaliers d'oxygène dissous et le débit à Dampierre en 1992.
 Fig. 11. – Daily cycles of DO and discharge during 1992 at Dampierre.

4. ANALYSES DU PH

4.1. Description des données disponibles

Le pH est étroitement lié à la concentration en CO_2 dissous. Celui-ci dépend des processus qui gouvernent l'oxygène dissous, mais aussi de l'équilibre calco-carbonique et de l'échange de CO_2 avec l'atmosphère.

Dans les eaux naturelles, le pH varie généralement autour d'une valeur moyenne de 7.5 unité pH (Bengen *et al.*, 1992). Dans le cas d'un développement végétal important, le pH s'élève au fur et à mesure que la photosynthèse consomme du CO_2 (Dusart, 1992).

Comme la Loire est une rivière eutrophisée, en période d'été et d'étiage, le pH est contrôlé par la photosynthèse. De ce fait, les valeurs de pH en moyenne journalière sont plutôt de l'ordre de 9 et les cycles journaliers peuvent atteindre jusqu'à une unité pH. La fig. 13 montre les valeurs minimales et maximales journalières ainsi qu'un exemple de l'évolution du pH sur une journée (août 1994).

Pendant les périodes d'hiver et des crues d'été, le contrôle est pris par la physico-chimie de l'eau.

Pour les années d'étude, les plus faibles valeurs sont de 7.2 unités pH et les plus fortes de 9.7 (en moyenne mensuelle).

Contrairement aux valeurs minimales et maximales d'oxygène dissous, on remarque une co-fluctuation entre

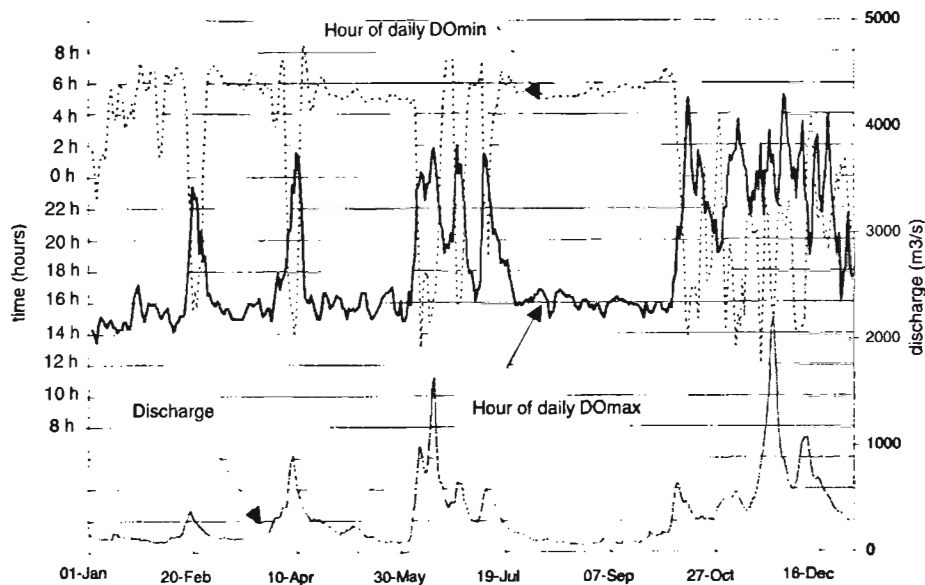


Fig. 12. – Heures d'apparition de la valeur minimale et maximale journalière d'oxygène dissous – 1992.

Fig. 12. – Times of maximum and minimum daily values of DO – 1992.

les valeurs minimales et maximales journalières pendant la période d'été. De ce fait, nous avons choisi de travailler sur les moyennes journalières.

4.2. Moyenne journalière de pH : cycle annuel

Comme on peut le remarquer dans la fig. 14, la moyenne et l'écart type des valeurs journalières interannuelles du pH présentent les mêmes caractéristiques saisonnières que celles des amplitudes d'oxygène dissous (cf. fig. 7 et fig. 14).

Le développement du phytoplancton atteint chaque année régulièrement son maximum en août, période des basses eaux (fig. 2 et analyse de

Dachary, 1974), La photosynthèse devient alors le facteur de contrôle prépondérant, et les valeurs de pH varient de 9 à 9.3 avec des écarts types de 0.2 à 0.3.

Au contraire, pendant les périodes de novembre à février, l'absence du phytoplancton laisse le contrôle du pH aux processus physico-chimiques et plus particulièrement à l'équilibre calco-carbonique. Le pH varie autour de 7.5 avec des écarts type de 0.2 à 0.4 unités pH.

Au printemps, au début de l'été et à l'automne, les poussées algales sont irrégulières, en fonction de l'apparition des crues, ce qui explique un écart type sur le pH plus important.

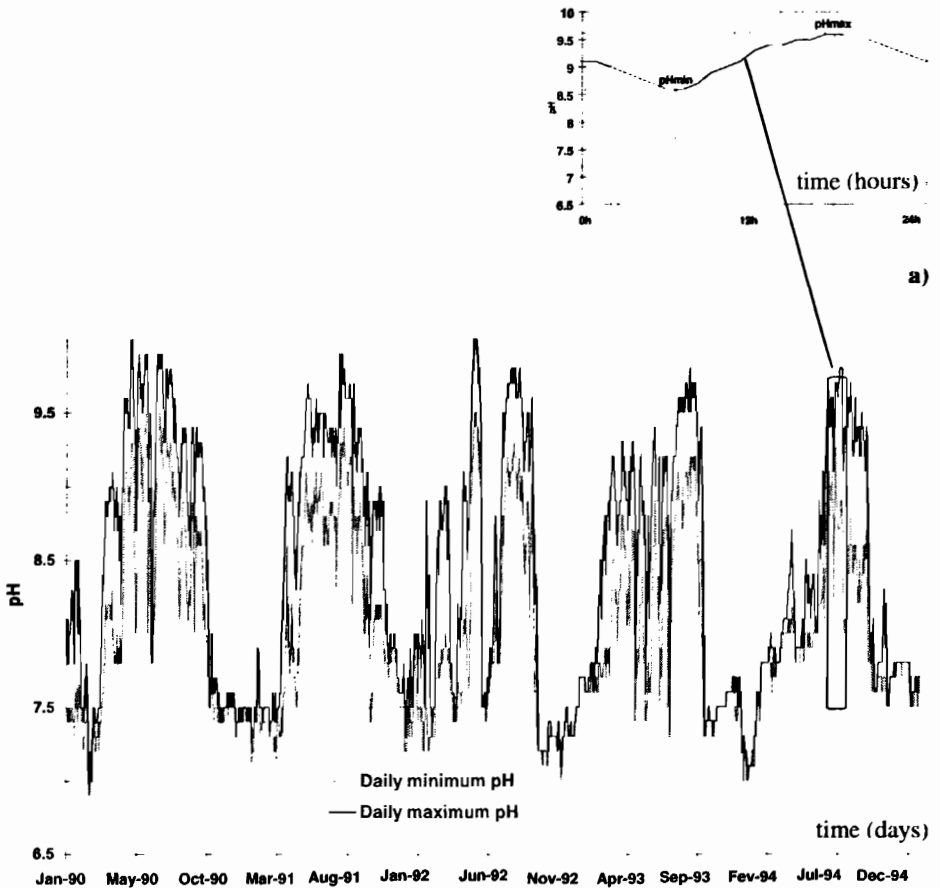


Fig. 13. – a) Exemple type de l'évolution du pH sur une journée du mois d'août 1994. b) Représentation des valeurs minimales journalières et maximales journalières de pH pour la période d'étude 1990-94.

Fig. 13. – a) Typical evolution of pH for a day in August 1994

b) Variation of daily minimum and maximum pH for the study period 1990-1994.

4.3. Moyenne journalière de pH : relation avec le débit

Nous montrons dans la fig. 15 les histogrammes du pH en fonction de la saison (hiver : octobre-février ; été : mars-septembre) et pour trois gammes de débits ($Q < 120 \text{ m}^3/\text{s}$; $120 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 400 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q > 400 \text{ m}^3/\text{s}$).

On retrouve la période d'hiver, avec des pH relativement constants quel que soit le débit, sauf pour les débits inférieurs à $120 \text{ m}^3/\text{s}$, ou l'échantillon n'est pas représentatif à cause du faible nombre d'observations (cf. tableau 1). Par contre pour la période d'été, la distribution des histogrammes change suivant le dé-

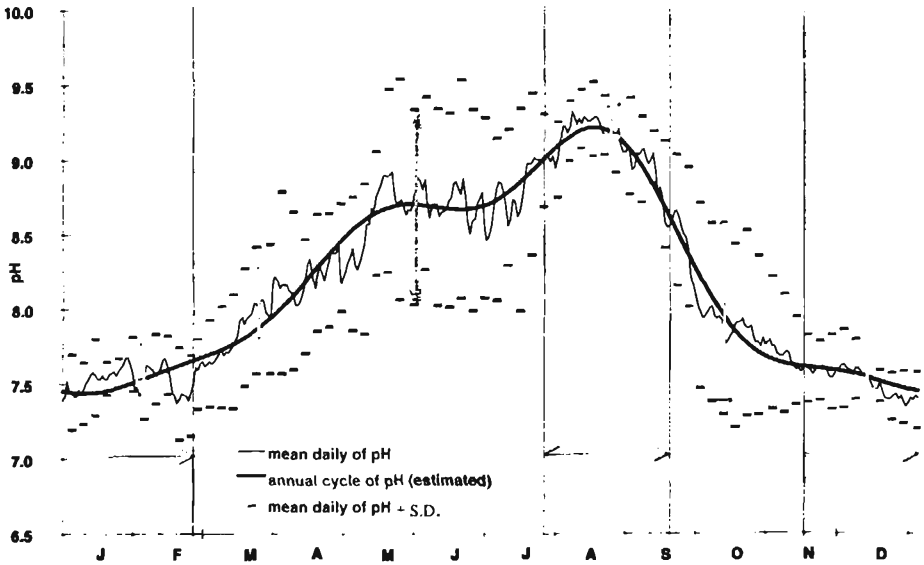


Fig. 14. – Cycle annuel de la moyenne journalière du pH.
 Fig. 14. – Annual cycle of daily.

Tableau 1 : Statistiques descriptives du pH en fonction de la saison et du débit

Période	Débits Q (m ³ /s)	Nombre d'observations	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
<i>hiver</i>	Q<120	135	8.2	7.3	9.0	0.48
<i>hiver</i>	120 <Q<400	492	7.6	7.1	8.6	0.29
<i>hiver</i>	Q<400	283	7.5	7.0	8.0	0.25
<i>été</i>	Q<120	400	9.1	8.1	9.7	0.29
<i>été</i>	120<Q< 400	425	8.5	7.3	9.7	0.53
<i>été</i>	Q>400	90	7.7	7.3	8.2	0.23

bit. Pour des débits inférieurs à 120 m³/s, le pH varie autour de 9.1 avec des écarts types de 0.3. Pour des débits entre 120 et 400 m³/s, le pH varie autour de 8.5 avec un écart

types de 0.5. Et enfin pour des débits supérieurs à 400 m³/s, le pH se rapproche des mêmes valeurs d'hiver (moyenne de 7.7 et écart type de 0.23).

4.4. Relation entre pH et oxygène dissous

Dans les § 3.5. et § 4.2. nous avons montré que les séries des amplitudes journalières d'oxygène dissous et de pH ont des évolutions similaires au cours de l'année, plus particulièrement durant les périodes où ces deux variables sont gouvernées par les processus biologiques. Nous présentons ici la relation entre les composantes à court terme de ces deux séries. Dans la fig. 16, nous avons représenté le nuage de points de ces deux variables.

On remarque une relation linéaire malgré une dispersion assez élevée. Cette dispersion s'explique en partie par la saturation des cycles mesurés en pH (une précipitation de la calcite peut en rendre compte) ou en oxygène dissous (limite supérieure de mesure à 20 mg/l) ainsi que par d'éventuelles erreurs de mesures.

4.5. Cycle journalier du pH : synthèse

Nous présentons ci-après les cycles journaliers (valeurs calculées par moyenne mobile des données horaires sur 24 points et centrées) de pH et le débit pour l'année 1992 (cf. fig. 17)

On peut remarquer la concomitance des cycles de pH et de oxygène

dissous (fig. 11 et fig. 17). Toutefois, on note que les amplitudes des cycles de pH diminuent pendant les périodes de très fortes variations journalières d'oxygène dissous. Pendant ces périodes, la forte activité photosynthétique provoque une augmentation du pH moyen par la consommation du CO₂ dissous. La partie supérieure du cycle dépasse souvent pH9 et se trouve tronquée. A pH9, la concentration de [CO₃²⁻] n'est plus négligeable et si la constante K_s du carbonate de calcium (K_s = [CO₃²⁻][Ca²⁺]) est atteinte ou dépassée, il y a formation de la calcite CaCO_{3(solide)}. A partir de ce stade d'équilibre, le pH ne peut plus augmenter.

La précipitation du CaCO₃ fait diminuer la (CO_{2total} (eq.1) d'un facteur 1 et l'alcalinité (Alc) d'un facteur 2 (eq. 2).

$$\Sigma\text{CO}_{2\text{total}} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{H}_2\text{CO}_3]$$

eq.1

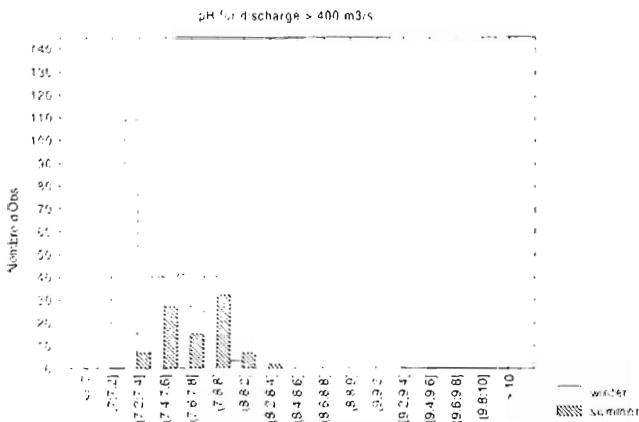
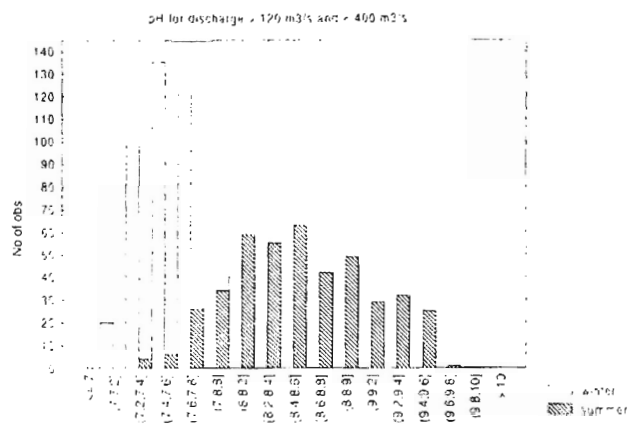
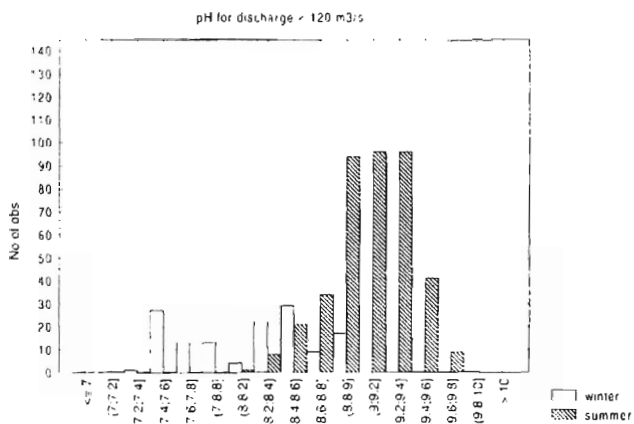
$$\text{Alc} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

eq. 2

Ce déséquilibre entraîne une augmentation de [H⁺] donc une diminution du pH. Le pH atteint une valeur limite de saturation. Elle dépend de la concentration en ions [Ca²⁺] et du K_s qui est fonction lui-même de la température de l'eau. Les cycles ne

Fig. 15. – Histogrammes de distribution du pH moyen journalier en fonction de la saison et du débit.

Fig. 15. – Histogram showing pH versus season and discharge.



sont donc pas saturés au même niveau suivant la période de l'été.

6. CONCLUSIONS

L'analyse des données d'oxygène dissous et pH mesurées en continu dans le cadre des programmes de surveillance hydroécologique, a permis d'apporter des informations nouvelles sur l'évolution de ces variables, notamment sur des échelles de temps courtes (journée, heure), ainsi

que sur l'influence des variables hydrométéorologiques.

Jusqu'à présent les séries de mesures d'oxygène dissous et pH ont essentiellement été étudiées pour les lacs et étangs de pisciculture (pour l'oxygène dissous, Lee H.S. & Lee J. H.W., 1995; pour le pH, Nesmerak I. & Straskraba M., 1985). Pour les rivières, les campagnes d'observations n'ont porté que sur de courtes périodes (1 à 2 mois dans des saisons différentes) avec des débits relativement stables et peu variés par rapport à l'étendue des gammes annuelles

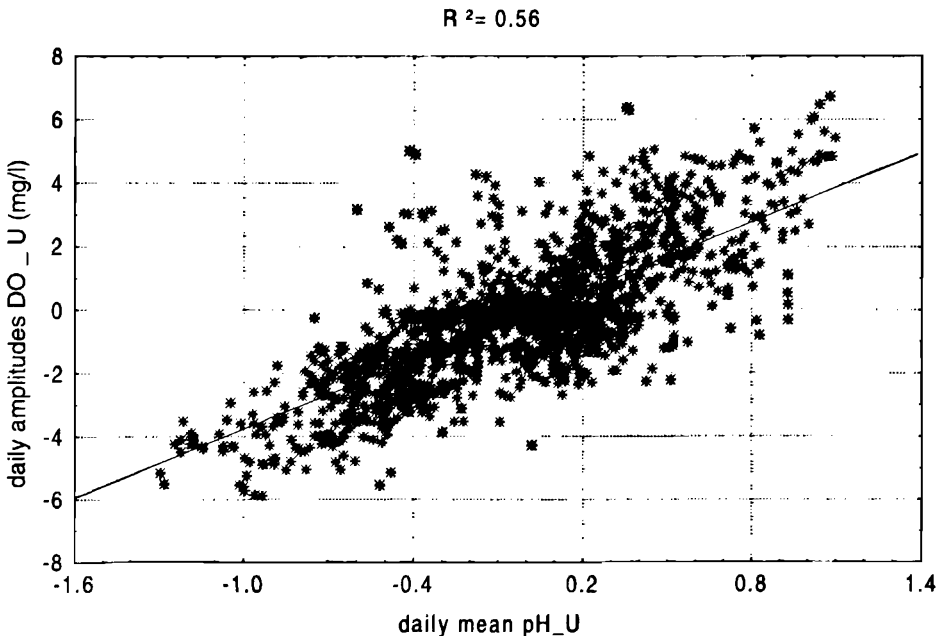


Fig. 16. – Amplitudes journalières d'oxygène dissous (DO-U) en fonction du pH (pH-U) après désaisonnalisation des variables.

Fig. 16. – Short term evolution of DO amplitudes (daily amplitudes DO-U) versus short term evolution of daily mean pH (daily mean pH-U).

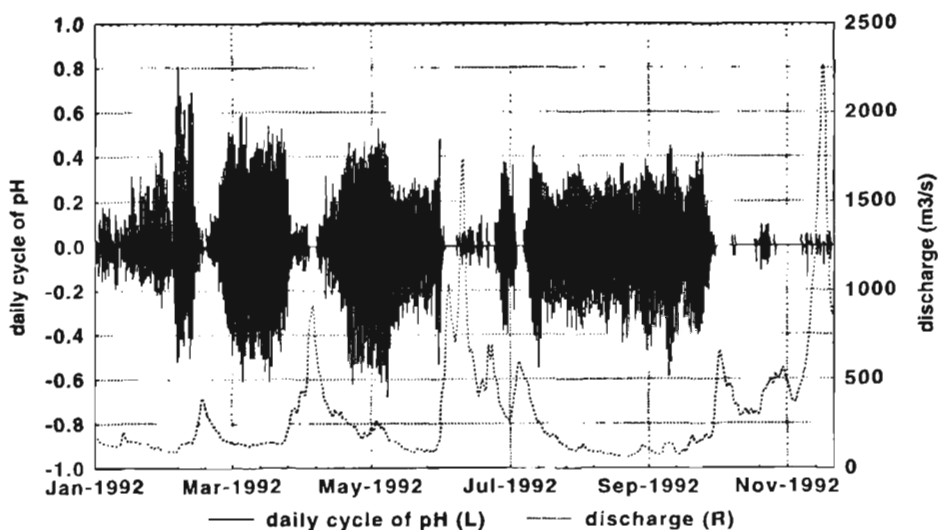


Fig. 17. – Les cycles journaliers de pH et le débit à Dampierre en 1992.

Fig. 17. – Daily cycles of pH and discharge during 1992 at Dampierre.

(pour l'oxygène dissous, Schurr & Ruchti, 1977).

Les données étudiées dans cet article sont peu communes, de par leur quantité et leur pas de temps (5 ans au pas de temps horaire). Elles ont permis de mettre en évidence l'évolution dynamique des paramètres aux différentes échelles de temps depuis l'année jusqu'à la journée.

Au-delà de la pure description des phénomènes observés, des interprétations confirmant en général les connaissances antérieures, ont pu être proposées.

Un des points les plus intéressants réside, peut être, dans le fait que les processus généralement observés uniquement dans les périodes où ils sont dominants ont pu être ici suivis

de façon continue tout au long de l'année.

L'analyse fait ressortir aussi, suivant la gamme de débit de la rivière, les paramètres physique ou biologique qui prédominent.

La compréhension des processus n'est pas que pure spéculation scientifique; elle conduit à des applications pratiques importantes. Il est intéressant de pouvoir vérifier qualitativement si une variable mesurée se comporte comme on peut s'y attendre ou si au contraire son évolution s'écarte d'un comportement prévisible.

Un écart par rapport à un comportement « normal » devient le signe d'un dysfonctionnement de la chaîne de mesures.

Les évolutions et interrelations mises en évidence dans cet article peuvent être représentées dans une modélisation globale des processus, où de façon plus pragmatique, comme cela a été fait ici, simulées par des modèles partiels. Ces modèles permettent d'estimer de façon indépendante une variable à partir de la connaissance des autres et de prévoir ainsi son évolution probable. Une des applications directes dans l'utilisation de ses relations et modèles développés ici est le contrôle et la validation des données, qui sera l'objet de la deuxième partie de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Barthelemy D. & Goubier M. (1991). Etude du cycle nyctéméral de la teneur en oxygène dissous en bassins de pisciculture par la méthode des moyennes mobiles. Relation avec la température et l'insolation. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 4, n° 3, pp. 393-414.
- Bengen D., Lim P., Belaud A. (1992). Qualité des eaux de trois bras morts de la Garonne : variabilité spatio-temporelle. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 5, n° 2, pp. 131-156.
- Cosby B.J. & Hornberger (1984). Identification of photosynthesis-light models for aquatic systems. Theory and simulation; 2. Application to a macrophyte dominated stream. *Ecological Modelling*, 23, pp. 1-51.
- Dachary M. (1974). Hydrologie de la Loire en amont de Gien (précipitations, écoulement). *Nouvelles Editions Latines*, Paris, 2 vol. 619 pages.
- Dussart B. (1992) deuxième édition. Limnologie. L'étude des eaux continentales. *Editions Boubée, Paris*, 680 pages.
- Ginot V. (1990). Modélisation de l'évolution nyctémérale de l'oxygène dissous en étang. *Thèse de Doctorat de l'Université Claude Bernard - LYON I* (France), 203 pages.
- Gosse Ph, Gras R., Videmont M. (1994). Prévion à court terme de la température d'une rivière de plaine. *Actes du Congrès annuel de la Société Française des Thermiciens, 17-19 mai*, CNAM, Paris, pp. 519-523.
- Khalanski M. (1987). Impact hydrobiologique du centre de production nucléaire de Dampierre-en-Burly. - Bilan - *Rapport HE/32-87.17* (Diff. EDF).
- Khalanski M. (1989). Impact hydrobiologique du C.P.N de Saint-Laurent-des-Eaux. - Bilan sur la période 1977-1988. - *Rapport HE/31-89.23* (Diff. EDF).
- Khalanski M. (1996). La surveillance hydroécologique des centrales nucléaires. *Actes du Colloque « Mesurer l'eau »* - Montbard, 27 et 28 juin, pages : 22-30.
- Lair N, Sargos D., Reyes-Marchant R. (1996). Synthèse des études hydrobiologiques réalisées en Loire moyenne au niveau du site nucléaire de Dampierre-en-Burly (France). *Hydroécol. Appl.* 8, vol. 1-2, pp. 35-84.
- Lair N, Sargos D. (1993). A 10 year study at four sites of the middle course of the River Loire. 1. Patterns of change in hydrological, physical and chemical variables in relation to algal biomass. *Hydroécol. Appl.* 5, vol 1, pp. 1-27.
- Lee H.S. and Lee J.H.W. (1995). Continuous monitoring of short term dissolved oxygen and algal dynamics. Technical Note. *Water Research*, vol. 29, n° 12, pp. 2789-2796.
- Marcotte N. Et Duong V.L. (1973). Le calcul de la température de l'eau des rivières. *Journal of Hydrology*, n° 18, pp. 273-287.

- Moatar F. (1997). Modélisations statistiques et déterministes des paramètres physico-chimiques utilisés en surveillance des eaux de rivières : Application à la validation des séries de mesures en continu (Cas de la Loire Moyenne). *Thèse de doctorat, Instit. National Polytechnique de Grenoble*, 290 pages.
- Mouchel J.M., Simon L., Maldiney M.A. (1994). Impacts en Seine des rejets urbains de temps de pluie sur les concentrations d'oxygène dissous. *La Houille Blanche*, 1/2, pp. 135-141.
- Nesmerak I. & Straskraba M. (1985). Spectral Analysis of the Automatically Recorded Data from Slapy Reservoir, Czechoslovakia. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* n° 70, vol. 1, pp. 27-46.
- Oudin L.C. (1990). Modélisation de l'eutrophisation en Loire. Modèle POLUPA. *La Houille Blanche* 3/4, pp. 195-206.
- Reynolds C.S. (1984). The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge, 384 pages.
- Schurr J.M. & Ruchti J. (1977). Dynamics of O₂ and CO₂ exchanges, photosynthesis, and respiration in rivers from time-delayed correlations with ideal sunlight. *Limnol. Oceanogr.*, 22(2) : 208-225.