

Principes de la régulation hydrochimique d'un système lacustre (Une approche par bilans de matières)

Jean-Pierre CARMOUZE*, Georges PEDRO**

RÉSUMÉ

Les différents types de régulation de la concentration d'un élément quelconque dissous dans un milieu lacustre sont analysés, dans le cas d'un système :

- homogène et soumis à un régime permanent,
- homogène et hors du régime permanent,
- non homogène et en régime permanent.

Une distinction est faite entre les aspects climato-géographique et biogéochimique de la régulation, et une subordination du second aspect par rapport au premier est mise en évidence.

Les grands traits qui se dégagent de l'analyse sont les suivants :

Il n'existe pas de régulation hydrochimique globale d'un système lacustre, mais une régulation spécifique de la concentration de chacun de ces éléments. En effet, un milieu lacustre peut jouer pour certains éléments le rôle de bassin de concentration, pour d'autres de bassin de dilution.

Une perturbation donnée du régime des apports peut provoquer des variations opposées de la concentration d'un élément, selon que celui-ci se « concentre » ou se « dilue » dans le milieu. L'amplitude des variations dépend du taux de renouvellement de la matière.

Chaque élément a sa propre hétérogénéité spatiale ; celle-ci est en relation avec le mode de distribution des courants de matière. Des brassages internes l'atténuent. L'effet d'atténuation est fonction du taux de renouvellement de la matière.

D'une manière générale, l'instabilité temporelle et l'hétérogénéité spatiale d'un milieu sont d'autant plus prononcées que le taux de renouvellement de la matière dans ce milieu est élevé.

La conclusion débouche sur le choix de la maille d'observation (période d'observation, unité de temps, comparimentage du milieu) qu'il faut retenir en fonction du type de régulation de la concentration de l'élément en question et des caractéristiques morphologiques et hydrologiques du milieu lui-même.

MOTS-CLÉS : Hydrochimie — Système lacustre — Courants de matière — Régulation — Hétérogénéité spatiale — Fluctuations temporelles.

SUMMARY

ELEMENTS OF HYDROCHEMICAL REGULATION OF A LAKE SYSTEM. AN APPROACH THROUGH MATTER BALANCES

The different types of the regulation in the concentration of any element dissolved in a lacustrine environment are analysed in the following systems :

* Hydrobiologiste O.R.S.T.O.M., C.R.O., BPV 18, Abidjan (Côte d'Ivoire).

** I.N.R.A., Département de Science du Sol. C.N.R.A., route de Saint-Cyr, 78000 Versailles (France).

- an homogeneous one in steady-state,
- an homogeneous one in nore steady-state,
- a non homogeneous one under in steady-state.

The climato-geographical aspect of the regulation is distinguished from its biogeochemical aspect ; the dependence of the second aspect upon the first one is revealed.

The main features which come out of the analysis are the following ones :

There is not any global hydrochemical regulation of a lacustrine system but a specific regulation of the concentration of each element. As a matter of fact, a lacustrine environment can act as a concentration basin for some elements and as a dilution basin for the other ones.

A given disturbance in the supply flow can result in opposite variations upon the concentration of an element according to whether this element is concentrated or diluted in the environment. The amplitude in the variations depends upon the turnover of the matter.

Each element has its own space heterogeneity which is dependent upon the process of distribution in the currents of matter and is reduced by internal mixings. The influence of this reduction is dependent upon the turnover of the matter.

On the whole, the time instability of the environment and its space heterogeneity are all the more marked as the turnover of the matter is high in this environment.

The conclusion results in selecting the observation network (period of observation, unit of time and spacial division of the environment) which must be considered according to the type of regulation in the concentration of the element and the morphological and hydrological features of the environment itself.

KEY WORDS : Hydrochemistry—Lake system—Currents of matter—Regulation—Space heterogeneity—Time fluctuations.

RESUMEN

PRINCIPIOS DE LA REGULACIÓN HIDROQUÍMICA DE UN SISTEMA LACUSTRE (UNA APROXIMACIÓN POR MEDIO DE LOS BALANCES DE MATERIAS)

Los diferentes tipos de regulación de la concentración de cualquier elemento disuelto en un medio lacustre se analizan en los sistemas siguientes :

- un sistema homogéneo que está sometido a un régimen permanente,
- un sistema homogéneo fuera del régimen permanente,
- un sistema no homogéneo con un régimen permanente.

En la regulación, se distinguen los aspectos climatogeográficos de los aspectos biogeoquímicos ; se subraya que el segundo aspecto depende del primero.

Las principales características que se desprenden del análisis son las siguientes :

No existe una regulación hidroquímica global en un sistema lacustre pero existe una regulación específica de la concentración de cada uno de sus elementos. En efecto, puede desempeñar un medio lacustre el papel de medio de concentración para algunos elementos y de medio de dilución para los demás.

Una determinada perturbación en el régimen de los aportes puede provocar variaciones contrarias de la concentración de un elemento según que este se concentre o se diluya en el medio. La amplitud de las variaciones depende de la tasa de renovación de la materia.

Cada elemento tiene su propia heterogeneidad espacial que depende de la distribución de las corrientes de materia y que se halla reducida por mezclas internas. La influencia de la reducción depende de la tasa de renovación de la materia.

Por lo general, la inestabilidad temporal del medio y su heterogeneidad espacial son tanto más pronunciadas cuanto que es elevada la tasa de renovación en estos medios de la materia.

La conclusión llega a escoger una red de observación (período de observación, unidad de tiempo, división espacial del medio) que hay que considerar con arreglo al tipo de regulación en la concentración del elemento de que se trata y a las características morfológicas y hidrologicas del propio medio.

PALABRAS CLAVES : Hidroquímica — Sistema lacustre — Corrientes de materia — Regulación — Heterogeneidad espacial — Fluctuaciones temporales.

1. INTRODUCTION

L'étude hydrochimique complète d'un milieu a non seulement pour objet de mesurer les caractéristiques chimiques de ce milieu, mais encore de déterminer la nature et la contribution des facteurs qui contrôlent ces dernières ; ce qui revient à définir les courants de matière (eau-constituants dissous) entrant et sortant aux frontières du milieu, puisque ce sont eux qui par leur combinaison règlent les concentrations en éléments dissous.

Ces courants ne sont pas uniformément répartis au niveau des frontières et ils varient dans le temps. Il faut donc les définir en tout instant et en toute région chimiquement différenciée. Il s'agit là d'une tâche difficile, non seulement au stade de la collecte des données, mais aussi à celui de leur traitement. En pratique, un seul cas est simple à résoudre, c'est celui d'un milieu assimilé à *un système à la fois homogène chimiquement et entretenu par un régime stationnaire* : ses caractéristiques sont alors *indépendantes dans le temps et dans l'espace*.

Pour généraliser l'application de ce modèle, il faut contourner l'obstacle de l'évolution temporelle du milieu et celui de son hétérogénéité spatiale.

En ce qui concerne *l'évolution dans le temps* d'un milieu, on peut utiliser le fait que celle-ci présente très souvent un caractère approximativement périodique qui, selon les paramètres retenus pour définir le système, se manifeste le plus fréquemment :

- par l'alternance de crues et de décrues du milieu,
- par, à la fois, l'alternance des crues et décrues et par le rythme biologique,
- par l'influence prépondérante du rythme biologique.

Par conséquent, les concentrations de constituants dissous, si l'on choisit un intervalle de temps adéquat, prennent des valeurs qui oscillent autour de valeurs *moyennes*. Il est alors possible de définir un état hydrochimique moyen ; cet état étant considéré comme l'état d'équilibre du milieu par rapport au régime moyen des courants de matières relatifs à la même période de temps.

En ce qui concerne *l'hétérogénéité spatiale*, qui vient de ce que les courants sont inégalement répartis et d'intensité variable à l'intérieur du milieu, elle peut être atténuée en divisant le milieu lui-même en un certain nombre de compartiments de moindre hétérogénéité qui sont alors définis par des caractéristiques chimiques moyennes. Ainsi, il devient possible de découper le milieu naturel en un ou plusieurs systèmes en régime permanent. Pour se rapprocher davantage de la réalité, on peut ensuite étudier les fluctuations du milieu (ou des compartiments) par rapport à l'état d'équilibre moyen pris comme référence. En somme, le problème revient à trouver des unités de temps et d'espace appropriées.

En adoptant cette *approche dynamique simplifiée* qui procède de *l'analyse compartimentale*, nous allons envisager les différents types de régulation de la concentration d'un élément dissous quelconque dans le but de dégager les principes généraux devant nous guider dans toute étude hydrochimique.

Il reste difficile de mener l'analyse en tenant compte de l'ensemble des courants de matières susceptibles d'intervenir. En fait, ceux-ci peuvent être classés en deux groupes qui d'après leur nature font apparaître un aspect *climato-géographique* et un aspect *biogéochimique* de la régulation de la concentration de tout élément dissous (CARMOUZE et PEDRO, 1977). Celle-ci peut alors être exprimée en fonction de cette dualité. Nous verrons que ce choix se justifie d'autant mieux que la régulation biogéochimique est toujours subordonnée à celle climato-géographique.

2. LES DIVERS COURANTS DE MATIÈRE : INVENTAIRE, NOMENCLATURE ET PROBLÈME DE LEUR SUBORDINATION HIÉRARCHISÉE

Les courants de matière entrant et sortant au niveau du milieu ont pour agent véhiculaire l'eau, le vent ou bien encore la force motrice d'un processus physique ou chimique. Ils peuvent être regroupés en deux ensembles (tabl. I) :

— le premier est constitué par des courants véhiculés par l'eau ou *courant hydraulique* et ceux véhiculés par le vent ou *courant éolien*. Les courants hydrauliques comprennent ainsi les apports et les pertes par les fleuves (affluents et effluents), les apports et les pertes par voie souterraine (résurgences et infiltrations) et les apports et les pertes par l'atmosphère (pluies, embruns). Les courants éoliens sont représentés par les précipitations sèches. Il s'agit dans tous les cas de *courants de transport* ;

— le second groupe contient l'ensemble des courants qui sont engendrés par le déroulement d'un processus physique ou chimique, que ce soit au sein de la matière inerte ou vivante. Les apports au milieu résultent alors de phénomènes de diffusion, désorption, dissolution, dégradation de matière organique..., les pertes découlant

TABLEAU I

Courants de matière intervenant dans le fonctionnement d'un système lacustre

		Courants entrants φ_e^E	Courants sortants φ_e^S
Courants hydriques		affluents, pluies, résurgences $\varphi_e^{RZ} \varphi_e^{Pl} \varphi_e^A$	effluents, évaporation, infiltrations $\varphi_e^{eZ} \varphi_e^{ev} \varphi_e^{in}$
		Courants entrants	Courants sortants φ^S
Courants de constituants dissous (i)	Courants hydrauliques $(\varphi_i)_h$	$\varphi_i^{sf} \varphi_i^{pl} \varphi_i^{r^e} \dots (\varphi_i^E)_h$ associés dans l'ordre à $\varphi_i^{sf} \varphi_e^{pl}$ $\varphi_i^{r^e} \dots \varphi_e^E$	$\varphi_i^{ef} \varphi_i^{ev} \varphi_i^{in} \dots (\varphi_i^S)_h$ associés dans l'ordre à $\varphi_i^{ef} \varphi_e^{ev}$ $\varphi_e^{in} \dots \varphi_e^S$
	Courants éoliens $(\varphi_i)_{e^e}$	précipitations sèches φ_i^{ps}	
	Courants de processus $(\varphi_i)_{pr}$	tout courant de réaction produisant un enrichissement de milieu en i (diffusion, désorption, dissolution, anabolisme...) $(\varphi_i^E)_{pr}$	tout courant de réaction produisant un appauvrissement du milieu en i (adsorption, diffusion, précipitation, catabolisme...) $(\varphi_i^S)_{pr}$

de phénomènes de diffusion, adsorption, absorption, néoformation, précipitation, production de matière organique. Ce sont des *courants de processus*.

En pratique, ces divers courants ne sont pas indépendants. Bien au contraire, il existe entre eux une subordination hiérarchisée qui est parfaitement définie : ainsi, les courants de processus sont subordonnés aux courants hydrauliques, qui sont eux-mêmes subordonnés aux courants d'eau, ceux-ci étant à leur tour en partie fixés par la morphologie du milieu envisagé.

En effet, la morphologie d'un milieu lacustre détermine généralement la surface en eau, puisque tout système lacustre correspond à une dépression, dont le taux de remplissage est déterminé par le niveau du rebord inférieur de la cuvette qui joue le rôle d'exutoire :

— tout d'abord, la surface en eau S^M fixée par ce niveau détermine, pour un contexte climatique donné (hauteur des pluies h_{pl} et hauteur d'eau évaporée h_{ev} au cours de l'intervalle de temps retenu), les courants d'eau relatifs aux pluies et à l'évaporation :

$$\varphi_e^{pl} = S^M \cdot h_{pl} \qquad \varphi_e^{ev} = S^M \times h_{ev}$$

— elle détermine ensuite les courants d'eau relatifs aux résurgences et aux infiltrations, puisque celles-ci sont réglées par les dénivelées entre les plans d'eau des nappes adjacentes au milieu et le plan d'eau lacustre ;

— elle contrôle enfin, pour un régime donné des apports, le courant d'eau sortant relatif aux affluents ; ce dernier est un courant de réajustement.

D'un autre côté, une interdépendance se manifeste systématiquement entre certains courants d'eau d'origine climatique. Ainsi les courants relatifs aux pluies et à l'évaporation varient souvent en sens inverse. Dans les régions fortement humides, l'évaporation est généralement plus faible ; au contraire, elle devient élevée dans les régions arides.

Enfin, les courants hydrauliques ont eux-mêmes les mêmes liens de dépendances que ceux caractérisant les courants d'eau qui leur sont associés, étant donné qu'ils leur sont directement proportionnels.

En somme, ce sont les courants hydrauliques qui pré-règlent la concentration des éléments dissous. Puis, en fonction de cette pré-régulation, prennent naissance des courants de processus qui, par effet rétroactif, modifient à leur tour les courants hydrauliques sortants.

3. RÉGULATION HYDROCHIMIQUE D'UN MILIEU HOMOGENÈ EN RÉGIME PERMANENT (SITUATION MOYENNE)

Rappelons qu'un système est à l'état stationnaire lorsque la somme des transferts de matière au niveau de ses frontières est à tout instant nulle ; la somme des courants sortants, $\Sigma\varphi_M^s$, est égale à celle des courants entrants $\Sigma\varphi_M^e$. En hydrochimie, il faut qu'il y ait égalité entre les courants d'eau d'un côté et ceux des constituants dissous d'un autre côté, puisque ce sont eux qui régissent respectivement le volume d'eau et la réserve de i du milieu et par la même la concentration de i , $[i]^M$: pour l'eau, $\Sigma\varphi_e^e = \Sigma\varphi_e^s$; pour chaque constituant i , $\Sigma\varphi_i^e = \Sigma\varphi_i^s$ (*).

Généralement, lorsque l'état hydrochimique d'un milieu lacustre est maintenu à un niveau stationnaire, le fonctionnement de ce milieu correspond à un cas particulier du régime stationnaire, celui pour lequel chacun des courants reste constant dans le temps. Il s'agit alors d'un régime stationnaire à courants constants ou encore d'un régime permanent. C'est ce régime que nous allons envisager.

3.1. Expression générale de la concentration stationnaire d'un élément dissous

L'expression de la concentration stationnaire d'un élément dissous i est déduite du bilan des courants de i établis aux frontières du milieu.

D'après le recensement des courants dans le tableau I, le bilan général d'un constituant i est le suivant :

$$\Sigma\varphi_i^{af} + \Sigma\varphi_i^{ré} + \Sigma\varphi_i^{pl} + \Sigma\varphi_i^{é} + \Sigma(\varphi_i^e)_{pr} = \Sigma\varphi_i^{ef} + \Sigma\varphi_i^{in} + \Sigma\varphi_i^{ev} + \Sigma(\varphi_i^s)_{pr} \quad [1]$$

Ce bilan peut être simplifié en admettant, ce qui est généralement le cas, que les pertes par embruns et les apports éoliens (**) sont négligeables par rapport aux autres courants, puis transformé en introduisant les concentrations de i des eaux des affluents, des résurgences, des pluies, des effluents et des infiltrations, soit dans l'ordre : $[i]^{af}$, $[i]^{ré}$, $[i]^{pl}$, $[i]^{ef}$ et $[i]^{in}$ et les courants d'eau associés φ_e^{af} , $\varphi_e^{ré}$, φ_e^{pl} , φ_e^{af} et φ_e^{in} . Il vient finalement :

$$\Sigma\varphi_e^{af}[i]^{af} + \Sigma\varphi_e^{ré}[i]^{ré} + \Sigma\varphi_e^{pl}[i]^{pl} + \Sigma(\varphi_i^e)_{pr} = \Sigma\varphi_e^{ef}[i]^{ef} + \Sigma\varphi_e^{in}[i]^{in} + (\varphi_i^s)_{pr}$$

Si l'on retient le cas d'un milieu chimiquement homogène, les concentrations en i des eaux qui sortent du milieu sont égales à celles des eaux du milieu lui-même $[i]^M$, soit $[i]^{in} = [i]^{ef} = [i]^M$.

Par suite, l'expression du bilan peut à nouveau être simplifiée :

$$\Sigma\varphi_i^{af}[i]^{af} + \Sigma\varphi_e^{ré}[i]^{ré} + \Sigma\varphi_e^{pl}[i]^{pl} + \Sigma(\varphi_i^e)_{pr} = [i]^M \{ \Sigma\varphi_e^{ef} + \Sigma\varphi_e^{in} \} + \Sigma(\varphi_i^s)_{pr} \quad [2]$$

Ainsi la valeur de la concentration de i , qui est entièrement définie dans cette équation, est déterminée par la seule combinaison des courants de i aux frontières du milieu aqueux. Par conséquent, *il y a autant de valeurs de $[i]^M$ que de régimes permanents établis dans le milieu, c'est-à-dire de combinaisons possibles entre les différents courants de i dans la mesure où ces derniers répondent à la double condition : $\Sigma\varphi_i^e = \Sigma\varphi_i^s$ et $(\varphi_i)_n = c^t$ (n désignant quelconque courant hydraulique).*

Regroupons d'un côté les courants hydrauliques et d'un autre côté les courants de processus pour faire apparaître la double nature climato-géographique et biogéochimique de la régulation de la concentration de i .

Ainsi on peut envisager :

— qu'il pénètre dans le milieu un courant hydraulique total de i , $(\Phi_i^e)_h = \Sigma\varphi_i^{af} + \Sigma\varphi_i^{ré} + \Sigma\varphi_i^{pl}$ véhiculé par un courant d'eau total $\Phi_{ei}^e = \Sigma\varphi_e^{af} + \Sigma\varphi_e^{ré} + \Sigma\varphi_e^{pl}$ ayant une concentration moyenne en i égale à $[i]^e$;

(*) Il est insuffisant de dire que l'hydrochimie d'un milieu est à l'état stationnaire lorsque les concentrations de matière restent constantes dans le temps, car il est tout à fait possible de rencontrer des cas où le volume d'eau et les réserves en constituants dissous subissent de concert des variations dans les mêmes proportions. Les concentrations restent alors effectivement constantes, mais le volume d'eau et les réserves en constituants dissous ne sont plus des grandeurs stationnaires. Dans un état stationnaire, ce sont donc les propriétés extensives du système (volume d'eau-réserves en éléments dissous) qui doivent être maintenues constantes et non les propriétés intensives (concentration de matière).

(**) Les courants de transport éolien, qui sont de nature climato-géographique, sont généralement négligés en raison de leur faible importance ou encore de la difficulté que l'on a à les estimer. Les courants, lorsqu'ils ne sont pas négligeables, peuvent être assimilés dans les calculs à des courants de processus entrant.

— qu'il sort du milieu un courant hydraulique total de i , $(\Phi_i^s)_h = \Sigma\varphi_e^{af} + \Sigma\varphi_e^{in}$ véhiculé par un courant d'eau total $\Phi_{ei}^s = \Sigma\varphi_e^{af} + \Sigma\varphi_e^{in}$ ayant une concentration moyenne en i égale à $[i]^s = [i]^M$;

— qu'il sort ou qu'il entre un courant de processus net, $(\Phi_i^{sn})_{pr}$ ou $(\Phi_i^{en})_{pr}$ selon que $\Sigma(\varphi_i^s)_{pr} - \Sigma(\varphi_i^E)_{pr}$ est >0 ou <0 .

On obtient alors deux équations générales :

$$\text{soit } (\Phi_i^E)_h = (\Phi_i^s)_h + (\Phi_i^{sn})_{pr} \quad \text{ou} \quad \Phi_{ei}^E [i]^E = \Phi_{ei}^s [i]^M + (\Phi_i^{sn})_{pr} \quad [3]$$

$$\text{soit } (\Phi_i^E)_h + (\Phi_i^{en})_{pr} = (\Phi_i^s)_h \quad \text{ou} \quad \Phi_{ei}^E [i]^E + (\Phi_i^{en})_{pr} = \Phi_{ei}^s [i]^M \quad [4]$$

Relions les courants de processus aux courants hydrauliques par l'intermédiaire de deux coefficients α_i et β_i .

$$\alpha_i = (\Phi_i^{sn})_{pr} / (\Phi_i^E)_h = (\Phi_i^{sn})_{pr} / \Phi_{ei}^E [i]^E$$

$$\beta_i = (\Phi_i^{en})_{pr} / (\Phi_i^s)_h = (\Phi_i^{en})_{pr} / \Phi_{ei}^s [i]^M$$

α_i = taux d'appauvrissement du milieu en i par un courant de processus net sortant et

β_i = taux d'enrichissement du milieu en i par un courant de processus net entrant (*).

[3] et [4] sont alors transformés :

$$\Phi_{ei}^E [i]^E = \Phi_{ei}^s [i]^M + \alpha_i \Phi_{ei}^E [i]^E$$

$$\Phi_{ei}^E [i]^E + \beta_i \Phi_{ei}^s [i]^M = \Phi_{ei}^s [i]^M$$

d'où :

$$\frac{[i]^M}{[i]^E} = \frac{\Phi_{ei}^E}{\Phi_{ei}^s} (1 - \alpha_i) \quad [7]$$

$$\frac{[i]^M}{[i]^E} = \frac{\Phi_{ei}^E}{\Phi_{ei}^s} (1 / 1 - \beta_i) \quad [8]$$

Ainsi la concentration de i dans le milieu $[i]^M$ par rapport à celle des eaux d'apport en i , $[i]^E$, est directement fonction du rapport entre les courants hydriques totaux entrants et sortants véhiculant i , $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^s$, qui expriment la régulation climato-géographique et d'un facteur $1 - \alpha_i$ ou $1 / 1 - \beta_i$ qui rend compte de la régulation biogéochimique.

Examinons successivement la régulation climato-géographique seule, puis la régulation mixte climato-géographique et biogéochimique.

3.2. Régulation climato-géographique

Le taux d'appauvrissement ou d'enrichissement du milieu en i est nul ($\alpha_i = 0$; $\beta_i = 0$). $[i]^M$ est uniquement contrôlé par le terme climato-géographique de la régulation. Cela concerne des éléments tels que Na ou Cl qui ne sont généralement pas engagés de façon notable dans des processus biogéochimiques. Pour bien souligner ce cas particulier, attribuons à $[i]^M$ le symbole $[i]^{MG}$.

D'après [7] ou [8] on obtient :

$$\frac{[i]^{MG}}{[i]^E} = \frac{\Phi_{ei}^E}{\Phi_{ei}^s} \quad [9]$$

L'évolution dans le milieu de la concentration de i des eaux d'apport, $[i]^{MG} / [i]^E$, est alors uniquement fonction du rapport entre les courants hydriques entrants et sortants véhiculant i .

Trois cas se présentent :

— $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^s > 1 \Rightarrow [i]^{MG} > [i]^E$, le milieu est un *bassin de concentration* pour i . Le fait que les courants d'eau sortant véhiculant i sont inférieurs aux courants d'eau entrants véhiculant i , implique au regard de l'équilibre hydrique que les courants d'eau sortants non chargés en i sont supérieurs aux courants entrants non chargés en i . C'est le cas pour un grand nombre d'éléments dissous quand, dans le milieu, l'évaporation est supérieure aux pluies (**);

(*) α_i et β_i ont une valeur propre à un état stationnaire donné. Ils ne traduisent évidemment pas une relation linéaire entre courants hydrauliques et de processus lorsque l'on passe à un autre équilibre.

(**) Ceci est vrai lorsque $[i]^{pl}$ est faible ou nul.

— $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S < 1 \Rightarrow [i]^{MG} < [i]^E$, le milieu est un *bassin de dilution* pour i . Pour des raisons inverses à celles avancées dans le cas précédent, on peut penser à un milieu où les pluies sont supérieures à l'évaporation ;

— $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S = 1 \Rightarrow [i]^{MG} = [i]^E$, le milieu ne modifie pas la concentration en i des eaux d'apport. On s'approche de cette situation, lorsque les précipitations et l'évaporation se contrebalancent ;

Si l'on revient à la valeur elle-même de la concentration de i dans le milieu, celle-ci est faible si les eaux d'entrée sont pauvres en i ($[i]^E \rightarrow 0$), sauf évidemment si $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S$ est $\gg 1$; elle est au contraire élevée si les eaux d'entrée sont riches en i ($[i]^E \gg 0$), sauf lorsque $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S \ll 1$.

3.3. Régulation mixte climato-géographique et biogéochimique

Les taux d'appauvrissement et d'enrichissement en i du milieu par voie biogéochimique α_i et β_i sont compris entre 0 et 1. $[i]^M$, selon que le courant net du processus est sortant ou entrant, est calculé à partir de [7] et [8]. On peut également utiliser les formes modifiées de ces équations, à l'aide de [9], qui font apparaître $[i]^{MG}$ qui est fixé par la pré-régulation climato-géographique.

$$\begin{aligned} [i]^M &= [i]^{MG} \cdot (1 - \alpha_i) & [10] \\ \text{ou} \quad [i]^M &= [i]^{MG} \cdot (1 / 1 - \beta_i) & [11] \end{aligned}$$

On retrouve alors les trois situations précédentes, plus deux cas limites (tabl. II) :

(a) $[i]^{MG} \cdot (1 - \alpha_i)$ ou $[i]^{MG} \cdot (1 / 1 - \beta_i) > 1 \Rightarrow [i]^M > [i]^E$. — Le milieu est un bassin de concentration pour i . On remarque que dans un contexte climato-géographique donné, c'est-à-dire pour $[i]^{MG}$ donné, le facteur de concentration $[i]^M / [i]^E$ est d'autant plus grand que :

- α_i est petit lorsque le courant de processus net est sortant,
- ou β_i est grand lorsque le courant de processus net est entrant.

Dans ce dernier cas, on peut avoir affaire à un milieu qui, s'il n'y avait pas de courant de processus net entrant, serait un bassin de dilution pour i . En effet en reprenant [8], on remarque qu'il est tout à fait possible d'avoir $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S < 1$ (soit $[i]^{MG} < 1$), tandis que pour de fortes valeurs de β_i l'expression $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S \cdot (1 / 1 - \beta_i)$ peut devenir > 1 . On peut penser, à titre d'exemple, à la libération de Ca provenant de la dissolution de CaCO_3 présent dans le fond du lac qui l'emporterait sur un courant de sortie de Ca nécessaire pour satisfaire les besoins de certains organismes.

(b) $[i]^{MG} \cdot (1 - \alpha_i)$ ou $[i]^{MG} \cdot (1 / 1 - \beta_i) < 1 \Rightarrow [i]^M < [i]^E$. — Le milieu est un bassin de dilution de i . Pour $[i]^E$ donné, on constate que $[i]^M$ est d'autant plus faible que :

- α_i est grand lorsque le courant de processus net est sortant,
- β_i est petit lorsque le courant de processus net est entrant.

Ici, on peut tomber sur un milieu qui, s'il n'y avait pas de courant de processus net sortant, serait un bassin de concentration pour i , puisque l'on peut avoir, en se référant à [7], $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S > 1$ (soit $[i]^{MG} > 1$), alors que pour de fortes valeurs de α_i , $\Phi_{ei}^E / \Phi_{ei}^S \times (1 - \alpha_i)$ peut être < 1 . Ce cas est fréquent lorsque l'on a affaire à des sels nutritifs (PO_4 , NO_3 , $\text{SiO}_4\text{H}_4\text{...}$). Les apports sont en grande partie utilisés par les organismes vivants et en très faible partie recyclés. Les concentrations de ces éléments sont de ce fait maintenues à un niveau très bas.

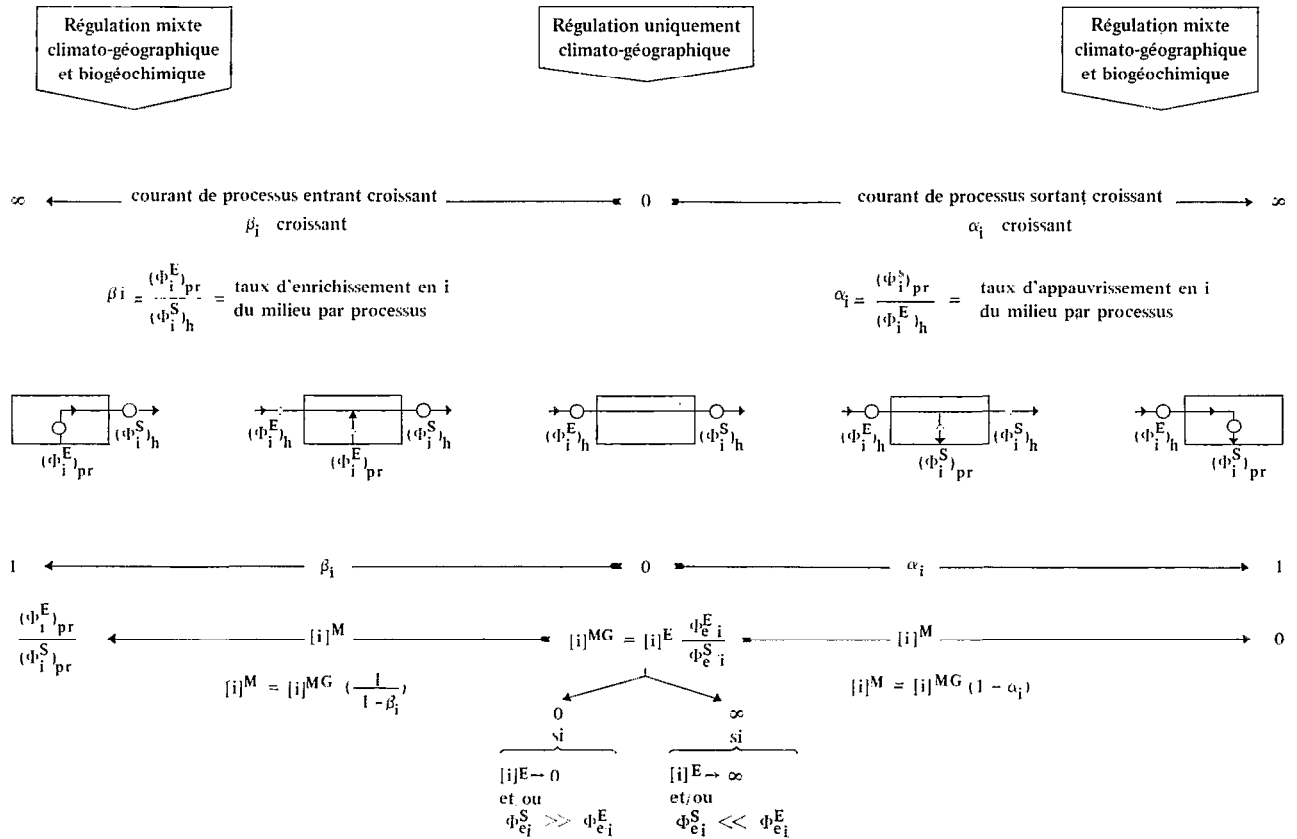
(c) $[i]^{MG}(1 - \alpha_i)$ ou $[i]^{MG} \cdot (1 / 1 - \beta_i) = 1 \Rightarrow [i]^M = [i]^E$. — Le milieu ne modifie pas la concentration en i des eaux d'apport. La pré-régulation climato-géographique peut fixer $[i]^{MG} > 1$ ou < 1 , mais cette valeur peut être abaissée ou augmentée par respectivement l'intervention d'un processus net sortant ou entrant et pour une certaine valeur de α_i ou β_i , selon le cas, et devenir égale à $[i]^E$.

(d) *Le premier cas limite* est celui pour lesquels les départs de i sont exclusivement assurés par le courant de processus sortant ($\alpha_i = 1$). Le courant sortant de processus devient égal au courant hydraulique entrant de i (cf. l'équation [5]). Il n'y a donc pas de courant hydraulique sortant de i et la concentration $[i]^M$ devient alors nulle. C'est ce qui se produit par exemple, lorsque les diatomées consomment entièrement la silice dissoute au fur et à mesure de son arrivée dans le lac, c'est-à-dire qu'elles utilisent la totalité des apports au cours de leur prolifération.

(e) *Dans le second cas limite*, les entrées de i sont exclusivement assurées par le courant de processus entrant ($\beta_i = 1$) (cf. l'équation [6]). Le courant net entrant du processus en i est égal au courant hydraulique de sortie

TABLEAU II

Les différents types de régulation d'un élément dissous dans un milieu lacustre en fonction des contributions climato-géographiques et biogéochimiques



de i . Par conséquent, les courants hydriques entrants ne contiennent pas l'élément i . Le bilan de i est de ce fait simplifié : $(\Phi_i^E)_{pr} = [i]^M \Phi_{ei}^S$. Ainsi, pour un courant hydraulique de sortie donné, $[i]^M$ est d'autant plus grand que $(\Phi_i^E)_{pr}$ est grand, et inversement. Pour illustrer ce cas, on peut penser à des eaux très faiblement minéralisées, notamment dépourvues de calcium pénétrant dans un milieu lacustre au fond duquel du carbonate de calcium, serait dissous : la concentration en Ca serait alors contrôlée par la vitesse de dissolution du carbonate et par le courant hydraulique de sortie de Ca.

Le tableau II résume les différents types de régulation qui viennent d'être évoqués, tandis que les figures 1 et 2 illustrent l'évolution de la concentration en i des eaux d'apport dans le milieu en fonction des contributions climato-géographiques et biogéochimiques.

4. RÉGULATION HYDROCHIMIQUE D'UN MILIEU NON HOMOGENE EN RÉGIME PERMANENT (HÉTÉROGÉNÉITÉ SPATIALE ET INFLUENCE DES BRASSAGES INTERNES D'EAUX)

Il est fréquent de rencontrer des milieux à l'intérieur desquels on observe une différenciation spatiale de la concentration des éléments dissous. Celle-ci provient d'une répartition non uniforme des courants de i .

— Les courants de transport, qui sont essentiellement des courants hydrauliques, peuvent être répartis inégalement à l'intérieur du milieu. Il y a des zones où prédominent les apports (zone d'influence des affluents, des résurgences...) et aussi des zones où prédominent les pertes (zones d'où partent des effluents, des

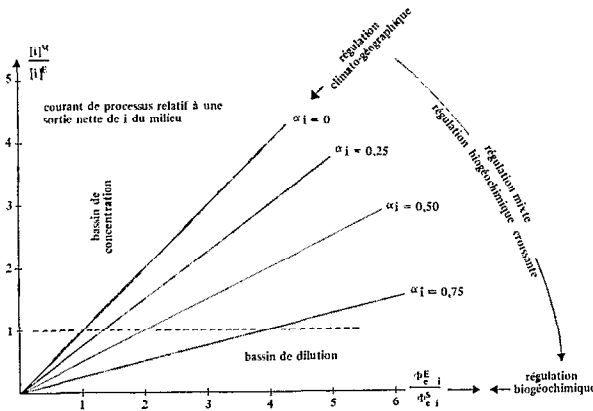


FIG. 1. — Évolution du rapport des concentrations en i des eaux du milieu lacustre et des eaux d'apport, $[i]^M/[i]^E$, en fonction du rapport des courants d'eau entrants et sortants, chargés en i pour différentes valeurs du taux d'appauvrissement en i du milieu, α_i , par processus biogéochimique

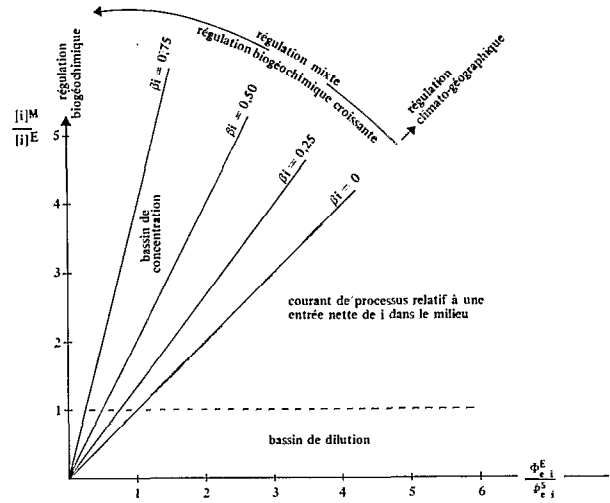


FIG. 2. — Évolution du rapport des concentrations en i des eaux du milieu lacustre et des eaux d'apport $[i]^M/[i]^E$ en fonction du rapport des courants d'eau entrants et sortants chargés en i pour différentes valeurs du taux d'enrichissement en i du milieu, β_i , par processus biogéochimiques

infiltrations...). De plus, dans des lacs de grandes dimensions, on peut noter l'existence des gradients spatiaux de pluviosité, et simultanément des gradients inverses de taux d'évaporation.

— Les courants de processus sont eux aussi inégalement répartis dans le milieu. Ils sont d'ailleurs souvent surbordonnés à la prérégulation climato-géographique. Ainsi, dans le cas d'un milieu caractérisé par un accroissement progressif de la salure des eaux à partir de la source d'alimentation, un sel peu soluble précipite lorsque le produit de solubilité des éléments qui le constituent est dépassé. L'apparition d'un courant de processus peut encore être liée à l'activité biologique, qui elle-même peut être totalement différente, qualitativement et quantitativement, d'une région à l'autre.

En conséquence si l'on veut appréhender la distribution spatiale des concentrations en i dans un milieu, il faut avant tout établir la régulation de [i] dans chacune de ses régions homogènes.

Lorsque l'on a affaire à un milieu à n régions assimilées à des compartiments A, B, C... dans lequel A alimente B, B alimente C..., il s'agit alors de définir de proche en proche la régulation de la concentration de i dans A par rapport à la concentration en i des eaux d'apport, la régulation de la concentration de i en B par rapport à la concentration de i dans A et ainsi de suite.

Les différents cas de régulation de la concentration de i qui peuvent se produire dans un compartiment quelconque sont alors les mêmes que ceux que l'on a envisagé pour comprendre la régulation dans un milieu entièrement homogène : par exemple, le milieu M de concentration $[i]^M$ devient le compartiment B de concentration $[i]^B$; les eaux d'apport de concentration $[i]^E$ deviennent les eaux en provenance de A de concentration $[i]^A$. C'est la raison pour laquelle nous ne repasserons pas en revue les différentes régulations intervenant au niveau des compartiments. En revanche, il existe dans un milieu, même lorsque la circulation générale de la matière est bien établie, c'est-à-dire lorsque la matière (eau-sels dissous) traverse successivement les compartiments A, B, C..., des échanges dans les zones limitrophes entre A et B, B et C... Ces derniers ont alors tendance à atténuer toute hétérogénéité spatiale. C'est l'influence de ces mélanges que nous allons examiner.

Partons de l'exemple le plus simple, celui d'un milieu lacustre hétérogène au sein duquel on arrive à délimiter deux compartiments A et B, disposés en série. Nous envisageons ici le cas où A alimente B.

(a) $[i]^B$ est réglé par une régulation climato-géographique et des mélanges entre A et B (fig. 3).

Les courants de mélange sont : $(\Phi_e^m)^{A \rightarrow B}[i]^A$ et $(\Phi_e^m)^{B \rightarrow A}[i]^B$. Mais nous admettons que ces mélanges ne provoquent pas de changement de volume, ni dans A, ni dans B, de sorte que l'on a : $(\Phi_e^m)^{A \rightarrow B} = (\Phi_e^m)^{B \rightarrow A}$. On peut alors écrire ces courants sous la forme simplifiée Φ_e^m . Le bilan de i dans B est le suivant :

$$[i]^A \{ \Phi_e^{A \rightarrow B} + \Phi_e^m \} = [i]^B \{ \Phi_e^{B \rightarrow ex} + \Phi_e^m \}$$

$$\text{d'où } \frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{\Phi_e^{A \rightarrow B} + \Phi_e^m}{\Phi_e^{B \rightarrow ex} + \Phi_e^m}$$

Faisons apparaître le facteur d'évolution de la concentration de i lors du passage de A à B en l'absence de mélange : $[i]_0^B / [i]_0^A$, qui traduit l'hétérogénéité maximale. On trouve alors :

$$\Phi_e^m = 0, \quad [i]_0^B / [i]_0^A = \Phi_e^{A \rightarrow B} / \Phi_e^{B \rightarrow ex}$$

et on obtient selon que l'on exprime le courant d'entrée ou de sortie du compartiment B.

$$\frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{[i]_0^B / [i]_0^A + \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex}}{1 + \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex}}$$

ou

$$\frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{1 + \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow B}}{\frac{[i]_0^B}{[i]_0^A} + \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow B}}$$

(b) $[i]^B$ est réglé par une régulation mixte comprenant un courant de processus net sortant et des mélanges entre A et B (fig. 4).

Le bilan de i dans B est : $[i]^A \{ \Phi_e^{A \rightarrow B} + \Phi_e^m \} = [i]^B \{ \Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \alpha_i^B) + \Phi_e^m \}$

$$\frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{\Phi_e^{A \rightarrow B} (1 - \alpha_i^B) + \Phi_e^m}{\Phi_e^{B \rightarrow ex} + \Phi_e^m}$$

Pour $\Phi_e^m = 0$, $\frac{[i]^B}{[i]^A} \Rightarrow \frac{[i]_0^B}{[i]_0^A} = \frac{\Phi_e^{A \rightarrow B} (1 - \alpha_i^B)}{\Phi_e^{B \rightarrow ex}}$

on a donc :

$$\frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{[i]_0^B / [i]_0^A + \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex}}{1 + \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex}}$$

ou

$$\frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{1 + \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow B} (1 - \alpha_i^B)}{\frac{[i]_0^B}{[i]_0^A} + \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow B} (1 - \alpha_i^B)}$$

(c) $[i]^B$ est réglé par une régulation mixte avec courant de processus net entrant et des mélanges entre A et B (fig. 5).

Le bilan de i dans B est :

$$[i]^A \{ \Phi_e^{A \rightarrow B} + \Phi_e^m \} = [i]^B \{ \Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \beta_i^B) + \Phi_e^m \}$$

$$\frac{[i]^A}{[i]^B} = \frac{\Phi_e^{A \rightarrow B} + \Phi_e^m}{\Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \beta_i^B) + \Phi_e^m} \text{ et pour } \Phi_e^m = 0, \frac{[i]_0^B}{[i]_0^A} = \frac{\Phi_e^{A \rightarrow B}}{\Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \beta_i^B)}$$

$$\text{Soit } \frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{1 + \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow ex}}{\frac{[i]_0^B}{[i]_0^A} + \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow ex}}$$

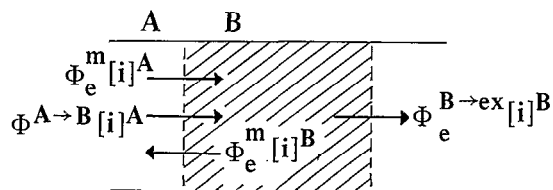


FIG. 3. — Régulation de $[i]^B$ par les courants hydrauliques traversant le compartiment B et des courants de mélange entre les compartiments A et B

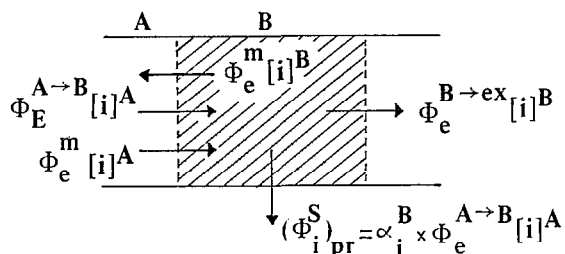


FIG. 4. — Régulation de $[i]^B$ par les courants hydrauliques traversant le compartiment B, un courant de processus net sortant de B et des courants de mélange entre A et B

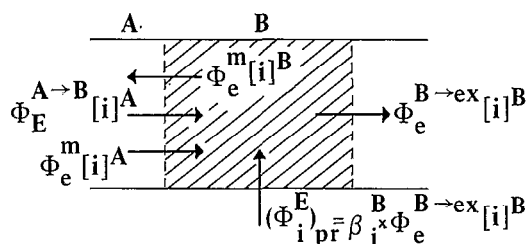
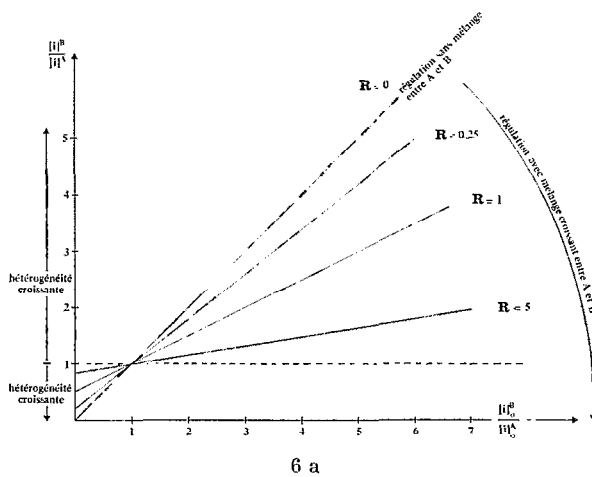
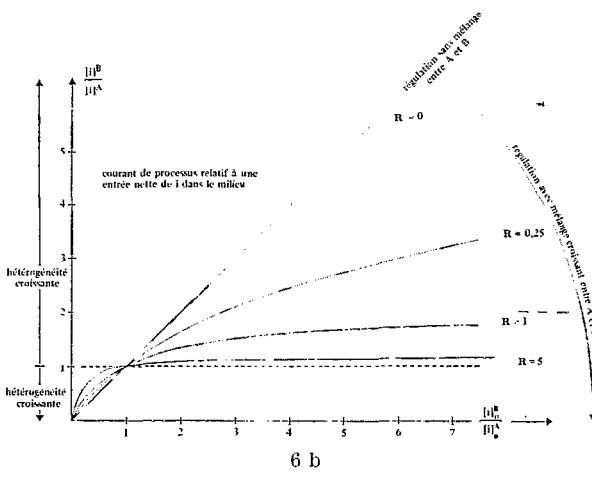


FIG. 5. — Régulation de $[i]^B$ par les courants hydrauliques traversant le compartiment B, un courant de processus entrant dans B et des courants de mélange entre A et B



6 a



6 b

FIG. 6. — Évolution de la concentration d'un élément dissous i en passant du compartiment A au compartiment B, $[i]^B/[i]^A$, en fonction de l'hétérogénéité spatiale milieu en dehors de tout mélange $[i]_o^B/[i]_o^A$ pour différentes valeurs du rapport R

(a) $R = \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex}$ dans le cas des régulations des figures 3 et 4; $R = \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \beta_i^B)$ dans le cas de la figure 5
 (b) $R = \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex}$ dans le cas des régulations des figures 3 et 5; $R = \Phi_e^m / \Phi_e^{A \rightarrow B} (1 - \alpha_i^B)$ dans le cas de la figure 4

$$\text{ou } \frac{[i]^B}{[i]^A} = \frac{[i]_o^B/[i]_o^A + \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \beta_i^B)}{1 + \Phi_e^m / \Phi_e^{B \rightarrow ex} (1 - \beta_i^B)}$$

Ainsi d'une manière générale, et en se référant à ces différentes équations, on constate que l'atténuation de l'hétérogénéité entre A et B (c'est-à-dire la tendance du rapport $[i]^B/[i]^A$ à tendre vers 1) est d'autant plus forte :

- que l'hétérogénéité maximale est élevée;
- que le rapport entre le courant hydrique de mélange et le courant d'entrée de A vers B est élevé (ce dernier courant, dans le cas d'une régulation de i accompagnée d'un courant de processus sortant dans B, étant diminué du courant hydrique fictif qui transiterait de A vers B une quantité de i équivalente à celle qui y disparaît par processus).

— que le rapport entre le courant hydrique de mélange et le courant de sortie de B est élevé (ce dernier courant, dans le cas d'une régulation de i accompagnée d'un courant de processus entrant dans B, étant diminué du courant hydrique fictif qui évacuerait de B une quantité de i équivalente à celle qui y entre par processus).

Dans le cas particulier où l'hétérogénéité maximale est égale à 1, l'hétérogénéité observée est évidemment égale à 1 quelle que soit la valeur de courant hydrique de mélanges et ceux d'entrée et de sortie au niveau de B (fig. 6a et b).

5. RÉGULATION HYDROCHIMIQUE D'UN MILIEU HOMOGENE HORS DU RÉGIME PERMANENT (FLUCTUATIONS TEMPORELLES)

Envisageons un milieu en état d'équilibre dynamique à un instant donné. Toute modification de l'un des courants réglant le volume d'eau du milieu et la réserve d'un quelconque constituant dissous i provoque un déplacement de l'état d'équilibre dynamique.

— Si ce changement est permanent, le milieu passe alors à un nouvel état d'équilibre dynamique.

— Au contraire, si ce changement n'est rien d'autre qu'une perturbation limitée dans le temps, un déséquilibre momentané apparaît entre les apports et les pertes en eau et/ou en éléments dissous. Il en résulte une variation du volume d'eau et/ou des réserves en éléments dissous et, par suite, des concentrations de ces éléments. Puis, lorsque la perturbation disparaît, le milieu revient progressivement à l'état initial.

Trois cas peuvent se présenter :

— Si la perturbation a pour origine un courant de processus, ou encore un courant de transport éolien, seule la réserve dans le milieu de l'élément envisagé varie tandis que le volume d'eau ne change pas. Cette situation se rencontre tout particulièrement lorsque l'on considère des constituants dissous dont les concentrations sont en partie réglées par des courants de processus biochimiques, ces derniers ne variant qu'en fonction de l'activité biologique du milieu.

— A l'opposé, si la perturbation résulte d'un courant hydrique, seul le volume d'eau change. C'est le cas lorsque le régime des apports en pluies est modifié (dans la mesure où celles-ci ne contiennent pas l'élément en question).

— Enfin, si la perturbation a pour origine un courant hydraulique, généralement le volume d'eau et les réserves en éléments dissous du milieu sont simultanément modifiés.

Pour notre analyse, nous allons envisager seulement ce dernier type de perturbation qui est le plus général des trois, et ceci dans le cas d'un milieu homogène.

Considérons le milieu en question à l'état stationnaire à un instant donné t . Il apparaît entre les instants t et $t + \Delta t$ un écart dans le régime des apports égal à $\Delta\Phi_e^E$; d'où une variation du volume d'eau (accroissement ou diminution selon le cas). Simultanément, il y a modification des autres courants qui tendent à atténuer la perturbation.

Ainsi, le volume d'eau qui s'évapore varie approximativement dans le même sens que le volume du lac, puisqu'il est fonction de la surface en eau. De même, le courant de décharge par effluent est en relation directe avec la hauteur du plan d'eau. D'une façon moins étroite, il en est de même des infiltrations. Il apparaît donc un effet rétroactif proche à chaque milieu; celui-ci est relativement malaisé à évaluer, mais d'une manière générale : $\Delta V^M < \Delta\Phi_e^E$.

Il en est de même pour les variations des stocks en éléments dissous, $\Delta(i)^M$, dans la mesure où les variations des courants hydrauliques de i sont en grande partie fonction de celles des courants d'eau associés. Ainsi, $\Delta(i)^M < \Delta\Phi_{ei}^E \times [i]_{\Delta t}^E$ (*), en posant que $[i]_{\Delta t}^E$ est la concentration moyenne en i des eaux excédentaires (ou déficitaires) chargées en i ; ou encore $\Delta(i)^M < \Delta\Phi_e^E \times [i]_{\Delta t}^E$, en posant que $[i]_{\Delta t}^E$ est la concentration moyenne en i de toutes les eaux sédentaires (ou déficitaires) chargées ou non en i .

Étant donné que les modifications des courants sortants d'eau et de sels dissous, consécutives aux modifications des courants entrants correspondants sont difficiles à évaluer et, de toute manière, spécifiques de chaque milieu, nous admettons ici en première approximation qu'au cours de la période de temps Δt les variations du

(*) On admet en première approximation que les courants de processus ne sont pas modifiés par la perturbation. Ils ne modifient donc pas eux-mêmes le stock de i .

du volume d'eau et les réserves en éléments dissous sont respectivement égales aux variations des courants entrants d'eau et des éléments dissous, soit :

$$\Delta\Phi_e^p = \Delta V^M \text{ et } \Delta\Phi^p \times [i]_{\Delta t}^e = \Delta(i)^M; (\Delta V^M \text{ et } \Delta(i)^M \text{ sont pris en valeurs absolues}).$$

Le volume devient alors égal à : $V_t^M + \Delta V^M = V_{t+\Delta t}^M$ et la réserve en i à : $(i)_t^M + \Delta(i)^M = (i)_{t+\Delta t}^M$.

D'où la nouvelle valeur de la concentration de i , $[i]_{t+\Delta t}^M$:

$$[i]_{t+\Delta t}^M = \frac{(i)_t^M + \Delta(i)^M}{V_t^M + \Delta V^M} = \frac{[i]^M V_t^M + [i]_{\Delta t}^e \Delta V^M}{V_t^M + \Delta V^M}$$

Pour calculer $[i]_{t+\Delta t}^M$, admettons que $[i]_{\Delta t}^e = [i]^e$, qui est en fait la concentration moyenne des eaux d'apport véhiculant ou non i , lorsque le régime permanent est établi (*). Il vient :

$$[i]_{t+\Delta t}^M = \frac{[i]^M V_t^M + [i]_{\Delta t}^e \cdot \Delta V^M}{V_t^M + \Delta V^M}$$

Introduisons alors le rapport entre la concentration du milieu avant la perturbation et celle des eaux qui entrent, soit $[i]^M / [i]^e$.

$$\text{On a : } [i]_{t+\Delta t}^M = \frac{[i]^M \{ V_t^M + [i]^e / [i]^M \Delta V^M \}}{V_t^M + \Delta V^M}$$

$$\text{et : } \frac{[i]_{t+\Delta t}^M}{[i]^M} = \frac{1 + \frac{\Delta V^M}{V_t^M} \times \frac{1}{[i]^M / [i]^e}}{1 + \frac{\Delta V^M}{V_t^M}} \quad [12]$$

Grâce à cette relation, il devient aisé de constater que, à la suite d'une modification dans le régime des apports, l'évolution dans le temps de la concentration $[i]^M$ d'un milieu initialement à l'état d'équilibre est fonction :

— du facteur d'évolution dans le milieu de la concentration en i de l'ensemble des eaux d'entrée véhiculant ou non i , $[i]^M / [i]^e$, c'est-à-dire du rapport entre la concentration de i dans le milieu et celle des apports lorsque le milieu est en état d'équilibre dynamique ;

— de l'importance du volume d'eau excédentaire ou déficitaire relativement au volume initial du milieu.

La figure 7 donne une représentation graphique de cette évolution.

A l'aide de cette figure, analysons maintenant les effets d'un excédent et d'un déficit d'apport dans les deux types de milieu, celui dans lequel i se concentre et celui dans lequel il se dilue.

(a) *Le milieu est un bassin de concentration* : $[i]^M > [i]^e$

— Lorsque l'on est en période de crue, c'est-à-dire que $\Delta V > 0$ (fig. 7, quadrant D), $[i]^M$ diminue, et cela d'autant plus vite que le volume d'eau excédentaire est élevé relativement au volume initial du milieu et que le facteur d'évolution de la concentration de i des eaux d'apport dans le milieu $[i]^M / [i]^e$ est élevé.

— Lorsqu'il y a décrue avec $\Delta V < 0$ (fig. 7, quadrant A), $[i]^M$ alors augmente et ce, dans des proportions d'autant plus grandes que le volume d'eau déficitaire est important par rapport au volume d'eau initial du milieu et que le facteur d'évolution de la concentration de i des eaux d'apport dans le milieu $[i]^M / [i]^e$ est grand.

D'une façon générale la concentration d'éléments dissous qui se concentrent dans un milieu est d'autant plus modifiée par une perturbation donnée du régime des apports que ce milieu a un faible volume et que le facteur de concentration des éléments en question est élevé.

(*) Il s'agit d'un cas particulier qui implique que, lors de la perturbation, les courants d'eau et les courants hydrauliques d'apport varient dans les mêmes proportions. Généralement il n'en est pas ainsi; il faut alors évaluer $[i]_{\Delta t}^e$ en pondérant chacun des courants hydriques et hydrauliques.

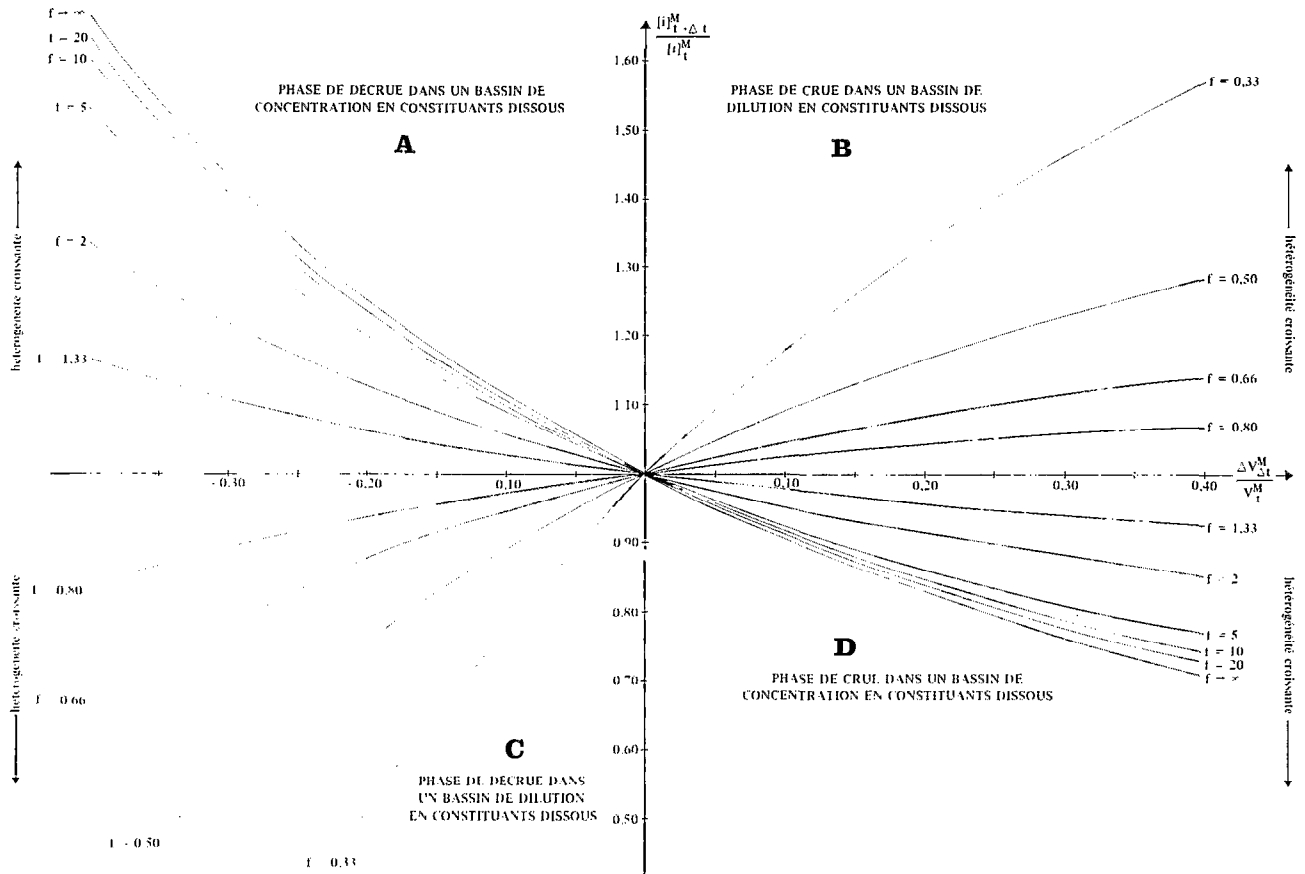


FIG. 7. — Évolution de la concentration d'un élément dissous dans un milieu lacustre au cours du temps, Δt , $[i]_{t+\Delta t}^M / [i]_t^M$ en fonction de la variation relative du volume de ce milieu au cours de la même période, $\frac{\Delta V_{\Delta t}^M}{V_t^M}$ pour différentes valeurs du taux de concentration ou de dilution de la concentration des eaux d'apport en i , $f = \frac{[i]^M}{[i]^E}$ dans le milieu. $[i]^M$ et $[i]^E$ sont les concentrations respectives des eaux du lac et des eaux d'apport en i

(b) Le milieu est un bassin de dilution : $[i]^M < [i]^E$

— Lorsque $\Delta V > 0$ (cas d'une crue) (fig. 7, quadrant B), $[i]^M$ croît de façon d'autant plus marquée que le volume d'eau excédentaire est important relativement au volume d'eau initial du milieu et que le facteur d'évolution des eaux d'apport dans le milieu $[i]^M / [i]^E$ tend vers 0.

— Lorsque $\Delta V < 0$ (le lac est en décrue) (fig. 7, quadrant C), $[i]^M$ diminue, cela dans des proportions d'autant plus grandes que le volume d'eau déficitaire est grand par rapport au volume d'eau initial du milieu et que le facteur d'évolution de la concentration des eaux d'apport dans le milieu tend vers 0.

La concentration d'éléments dissous qui se diluent dans un milieu est donc *d'autant plus modifiée par une perturbation* du régime des apports donnée que ce milieu a un *faible volume* et que le facteur de dilution des éléments est élevé.

6. GRANDS TRAITES DE LA RÉGULATION HYDROCHIMIQUE D'UN SYSTÈME LACUSTRE

A la suite de cette analyse sur la régulation hydrochimique d'un système lacustre, il devient possible de dégager toute une série de points, dont certains vont apparaître d'emblée évident. D'autres en revanche sont généralement très mal perçus, et c'est la raison pour laquelle nous allons tenter de les faire ressortir au cours d'une présentation synthétique.

(a) *L'analyse de l'évolution de la concentration* d'un élément dissous quelconque, *i*, dans un milieu homogène et à l'état stationnaire, relativement à sa concentration dans les eaux d'apport a permis de préciser la manière dont cette évolution est fixée par la *combinaison* des courants entrants et sortants de l'élément en question aux frontières du milieu :

— certains courants sont caractéristiques du milieu envisagé. Ce sont des courants hydrauliques (associés à des courants hydriques). Ils prérèglent l'évolution de la concentration de *i* des eaux d'apport dans le milieu. Cette prérégulation, dénommée *climato-géographique* de par la nature des courants participants, est la même d'un élément à l'autre ;

— d'autres courants, en revanche, sont spécifiques de l'élément, se surimposent aux courants hydrauliques et modifient ainsi la prérégulation climato-géographique. La contribution de ces courants à la régulation définitive, qui est de par sa nature *biogéochimique*, diffère d'un élément à l'autre.

Les différents courants de l'élément dissous s'établissent aux frontières du milieu selon un ordre bien défini, mais généralement complexe. Il existe en effet une subordination hiérarchisée d'un grand nombre d'entre eux. Par exemple, *les courants de processus sont subordonnés aux courants hydrauliques qui sont eux-mêmes subordonnés aux courants d'eau, ceux-ci étant à leur tour fixés en partie par la morphologie du milieu lacustre étudié.*

Ainsi, l'accroissement ou la diminution de la concentration d'un élément dissous dans un milieu, relativement à sa concentration dans les eaux d'apport, est fonction des diverses conditions climato-géographiques.

Le tableau III regroupe les diverses combinaisons possibles.

TABLEAU III

Évolution de la concentration en un élément dissous *i* des eaux d'apport dans un milieu lacustre en fonction de la combinaison des conditions climato-géographiques et biogéochimiques

Intervention des cond. climato-géographiques \ Intervention des cond. biogéochimiques	Conditions biogéochimiques sans effet (pas de courant de processus net entrant ou sortant) (4)	Conditions biogéochimiques avec effet de concentration (courant de processus net entrant) (5)	Conditions biogéochimiques avec effet de dilution (courant de processus net sortant) (6)
Conditions climato-géographiques sans effet (pluies = évaporation) (1)	$\frac{[i]^{MG}}{[i]^E} = 1$	$\frac{[i]^M}{[i]^E} > 1$	$\frac{[i]^M}{[i]^E} < 1$
Conditions climato-géographiques avec effet de concentration (pluies < évaporation) (2)	$\frac{[i]^{MG}}{[i]^E} > 1$	$\frac{[i]^M}{[i]^E} > 1$	$[i]^M/[i]^E > 1$ si (2) > (6) $[i]^M/[i]^E = 1$ si (2) = (6) $[i]^M/[i]^E < 1$ si (2) < (6)
Conditions climato-géographiques avec effet de dilution (pluies > évaporation) (3)	$\frac{[i]^{MG}}{[i]^E} < 1$	$[i]^M/[i]^E > 1$ si (3) < (5) $[i]^M/[i]^E = 1$ si (3) = (5) $[i]^M/[i]^E < 1$ si (3) > (5)	$\frac{[i]^M}{[i]^E} < 1$

A l'examen de ce tableau on constate que, pour un milieu donné et avec un contexte climato-géographique commun à tous les éléments dissous, la concentration d'un élément donné *i* peut croître ou décroître en fonction des conditions biogéochimiques. Un milieu lacustre peut donc jouer pour certains éléments le rôle d'un bassin de concentration, pour d'autres celui d'un bassin de dilution (*). Dans ces conditions, on voit combien il est insuffisant d'étudier l'état hydrochimique d'un milieu à partir de mesures aussi globales que la conductivité ou la salinité.

(*) Les études hydrochimiques des lacs Tchad (CARMOUZE, 1976), Titicaca et Poopó (CARMOUZE *et al* 1978), menées dans cet esprit, en sont une illustration concrète.

Ainsi, *il n'existe pas de régulation hydrochimique globale d'un système lacustre, mais une régulation spécifique de la concentration de chacun de ses éléments.*

Il faut ajouter que lorsqu'un système fonctionne en *régime permanent* la régulation des éléments dissous en son sein ne dépend que du sens et de l'intensité des courants de matière, et non du volume et des réserves salines de ce milieu. Par conséquent, dans ce cas, *la régulation hydrochimique est indépendante de la vitesse de circulation de la matière dans le milieu.*

(b) *L'hétérogénéité hydrochimique* fréquemment observée en milieu lacustre résulte essentiellement d'une répartition non uniforme des courants de chacun des constituants dissous. Cette répartition qui diffère d'un élément à l'autre conduit à autant d'hétérogénéité spatiale qu'il y a d'éléments. Pour tenir compte de cette hétérogénéité, on distingue des régions de moindre hétérogénéité que l'on assimile à des compartiments homogènes. Au niveau de chacun d'eux, on retrouve évidemment les mêmes types possibles de régulation que ceux qui ont été envisagés au niveau du milieu pris dans son ensemble.

Toutefois, entre compartiments voisins, il existe des brassages qui réduisent l'hétérogénéité du milieu. En leur absence, on observerait une hétérogénéité maximale inhérente à la combinaison des courants de matière à l'exclusion des courants de mélange.

L'atténuation de l'hétérogénéité par brassage entre deux compartiments en série A et B, est fonction :

- de l'hétérogénéité maximale,
- de l'importance du courant de mélange par rapport au courant hydrique passant de A à B (ce dernier pour un courant de processus net sortant, étant diminué d'un courant hydrique fictif qui introduirait une quantité de l'élément dissous en question égale à celle qui sédimente en B), ou encore de l'importance du courant de mélange par rapport au courant hydrique sortant de B véhiculant l'élément dissous (ce dernier étant diminué d'un courant hydrique fictif qui éliminerait une quantité de l'élément dissous égale à celle qui entre en B par processus biogéochimique).

D'une manière générale, la tendance à l'homogénéisation est d'autant plus efficace :

- que *l'hétérogénéité maximale est élevée* : plus le gradient spatial des éléments dissous est élevé, plus il est atténué pour un brassage et une circulation d'eau donnés. L'hétérogénéité maximale diffère d'un élément à l'autre. Celle-ci dans un compartiment à « concentration » est inférieure à l'hétérogénéité imposée par la régulation climato-géographique pour un élément qui est l'objet d'un appauvrissement biogéochimique, supérieure pour un élément objet d'un enrichissement biogéochimique : ainsi l'atténuation de l'hétérogénéité est plus forte pour des éléments tels que Na et Cl que pour des éléments tels que SO_4 , HCO_3/CO_3 , Ca..., qui sédimentent partiellement. Dans un compartiment de « dilution », c'est l'inverse qui se produit. Les brassages réduisent donc non seulement les gradient spatiaux de chacun des éléments mais aussi les écarts des gradients spatiaux entre éléments.

- que *la circulation d'eau d'un compartiment à l'autre est faible*, pour une hétérogénéité maximale et un brassage interne donné. Par conséquent, ce sont les milieux *endoréiques* et faiblement ouverts qui ont tendance à être les plus homogénéisés;

- que *le brassage interne est important* pour une circulation d'eau à travers le milieu et une hétérogénéité maximale donnée. Or d'une façon générale les zones limitrophes sont d'autant plus développées par unité de surface du plan d'eau que le milieu est profond. Donc, toutes choses étant égales par ailleurs, *les brassages sont plus importants dans les lacs profonds que dans les lacs plats*. Par ce biais, l'effet d'homogénéisation est alors indirectement fonction du volume du milieu. Cela nous conduit à formuler une remarque plus générale qui inclut à la fois la circulation de l'eau à travers le milieu et sa morphologie : *l'homogénéité par brassage interne est d'autant plus efficace que le taux de renouvellement de l'eau est faible.*

(c) *Le sens de la variation de la concentration d'un élément i* d'un milieu homogène et considéré à l'état stationnaire est, à la suite d'une perturbation momentanée des apports, fonction du sens d'évolution de la concentration des eaux d'apports dans le milieu. Quant à l'importance de cette variation, elle dépend à la fois :

- du facteur d'évolution de la concentration de l'élément i dans le milieu par rapport à celle des eaux d'apport (taux de concentration ou de dilution),
- du volume d'eau,
- de la réserve en i du milieu.

Si par exemple, la concentration de i du milieu est égale à celle des eaux d'apport, une perturbation dans le régime des apports ne modifie en rien la concentration de i dans le milieu. La réserve en i et le volume d'eau

augmentent ou diminuent dans les mêmes proportions, selon que la perturbation représente un excédent ou un déficit des apports.

Mais dans la plupart des cas, la perturbation modifie la concentration de i dans le milieu. Elle a alors d'autant plus d'effet que le facteur de concentration ou de dilution de l'élément dissous dans le milieu lui-même est élevé. Cela se conçoit aisément à travers les deux cas de figure qui peuvent se présenter :

— lorsque le milieu, pour l'élément en i , est un bassin de concentration, il se trouve que la réserve en i par unité de volume d'eau est plus élevée dans le milieu que dans les eaux d'apport. Aussi, à la suite d'une perturbation, *la réserve est-elle plus tamponnée que le volume*. En conséquence, pour une perturbation représentant un excédent d'apport (une crue par exemple), le volume d'eau croît plus vite que la réserve en i et la concentration de i dans le milieu diminue ; à l'opposé, si cette perturbation correspond à un déficit des apports (une décrue par exemple), c'est l'inverse qui se produit ;

— lorsque le milieu, pour l'élément i , est un bassin de dilution la réserve en i par unité de volume est plus faible dans le milieu que dans les eaux d'apport. A la suite d'une perturbation, *le volume d'eau est plus tamponné que la réserve en i* . Ainsi, lorsque cette perturbation représente un excédent des apports, la réserve en i croît plus vite que le volume d'eau ; de ce fait, la concentration en i dans le milieu croît. En revanche, si la perturbation correspond à un déficit des apports, c'est le résultat inverse qui est obtenu.

Au total, on constate que, de même que l'on ne peut pas parler de la régulation hydrochimique d'un système sans étudier, cas par cas, la régulation des différents composants dissous, de même, on ne peut pas parler de l'instabilité hydrochimique d'un milieu sans considérer chacun des éléments dissous.

Cela étant, pour un facteur de croissance ou de décroissance déterminé de la concentration de i des eaux d'apport dans le milieu et pour une perturbation donnée (c'est-à-dire un excédent ou un déficit des apports donnés), la modification de la concentration en i du milieu dépend encore du volume d'eau ou de la réserve en i . Elle est ainsi d'autant plus grande :

— que le volume d'eau est faible, ou encore que le renouvellement des eaux est élevé quand il s'agit d'un bassin de concentration ;

— que la réserve en i est faible ou encore que le renouvellement de i est élevé, quand on a affaire à un bassin de dilution.

D'une manière générale, étant donné que pour une concentration déterminée de i , la réserve en i est d'autant plus faible que le volume d'eau est lui-même faible (et inversement), on peut dire qu'un *milieu est d'autant plus instable que le renouvellement de la matière* (eau-constituants dissous) *est élevé* (*). C'est le cas notamment des lacs *plats*, et cela est vrai d'ailleurs quels que soient les éléments, qu'ils se concentrent ou bien qu'ils se diluent dans le milieu.

En résumé, une perturbation donnée du régime des apports peut provoquer des variations *opposées* de la concentration d'un élément, selon que celui-ci se « concentre » ou se « dilue » dans le milieu. L'amplitude des variations est fonction du taux de renouvellement de la matière.

Or, nous avons déjà remarqué que l'écart entre le gradient spatial de la concentration d'un élément dissous et son gradient maximal en l'absence de brassages internes est d'autant plus important que le taux de renouvellement de l'eau est faible.

Dans ces conditions, on aboutit aisément à la conclusion générale suivante : *les lacs plats sont à la fois plus instables et plus hétérogènes que les lacs profonds*, et cela quels que soient les constituants dissous envisagés. Ces considérations, faites au niveau d'un milieu pris *dans son ensemble*, restent vraies au niveau des compartiments, c'est-à-dire des *régions*.

7. RÉFLEXIONS D'ORDRE MÉTHODOLOGIQUE

D'un point de vue strictement *méthodologique*, trois éléments se dégagent de cette analyse : ils procèdent de la spécificité de la régulation elle-même de chacun des éléments dissous, de la subordination mutuelle des différents courants de processus et enfin de la subordination hiérarchisée des courants de processus aux courants de transport.

(*) Ces remarques ont été vérifiées dans le cas d'un lac plat, le lac Tchad (CARMOUZE, 1976) et celui d'un lac profond, le lac Titicaca (CARMOUZE *et al*, 1981).

7.1. Spécificité de la régulation (maille d'observation)

L'approche proposée repose avant tout sur la caractérisation de la régulation moyenne des concentrations des constituants dissous envisagés, et implique en second lieu de suivre les variations temporelles de ces concentrations par rapport à leurs valeurs moyennes prises comme référence (cela étant réalisé au niveau du milieu, ou, lorsque l'hétérogénéité spatiale est bien marquée, au niveau des différents compartiments de plus grande homogénéité). On est amené à procéder de la sorte pour chaque élément dissous puisque la concentration de chacun d'eux a sa propre régulation moyenne, ses propres variations temporelles et sa propre distribution spatiale. Ainsi le problème majeur qui se pose, consiste à définir une maille d'observation qui convienne à chaque type de régulation, c'est-à-dire à la fois :

- une période d'observation,
- une unité de temps,
- et un compartimentage du milieu approprié.

C'est d'ailleurs là une opération qui n'est pas toujours aisée à réaliser. En effet, la maille d'observation nécessaire à appréhender la régulation moyenne d'un élément dissous ne doit tenir compte que de la combinaison qui détermine celle-ci (autrement dit, les caractéristiques du milieu qui sont le volume d'eau et les réserves en constituants dissous n'entrent pas en jeu). En revanche, pour saisir les régulations temporelles et spatiales de la concentration de l'élément en question, la maille à définir doit faire intervenir, comme nous l'avons vu, le taux de renouvellement de la matière, qui est, quant à lui, propre au milieu. En conséquence, on est conduit obligatoirement à choisir une maille d'observation qui soit appropriée, non seulement à l'élément en question, mais aussi au milieu lui-même. C'est la raison pour laquelle ce choix n'est pas évident.

Dans la pratique toutefois, il peut être orienté d'après la nature des courants qui régissent les éléments dissous de la façon suivante :

— pour les éléments dissous qui sont essentiellement contrôlés par les courants de transport et éventuellement des courants de processus géochimiques, les variations temporelles de ces courants sont telles que la **période d'observation** à retenir doit être de l'ordre de la *décennie* (au cours de cette période une phase de crue et de décrue pluriannuelle peut généralement être observée), l'**unité de temps**, *l'année* (voire le *mois* si l'on veut tenir compte des fluctuations saisonnières).

Quant au compartimentage, il dépend de l'hétérogénéité spatiale qui résulte avant tout de la distribution non uniforme des courants de matière à l'intérieur du milieu, mais aussi de l'importance des brassages internes. Là, comme nous l'avons vu, intervient la morphologie du lac : le découpage spatial doit être généralement plus poussé dans un lac plat que dans un lac profond ;

— pour les éléments dissous pour lesquels les courants de processus biochimiques sont prédominants, il faut envisager une tout autre maille d'observation. La considération d'une période d'observation décennale n'est généralement pas utile, car les variations annuelles de ces courants de processus sont faibles par rapport aux variations saisonnières, voire journalières. *L'année* devient alors une **période d'observation** suffisante. Par ailleurs, les courants de processus biochimiques fluctuent souvent à une échelle plus courte que celle relative aux courants de transport et aux courants de processus géochimiques. C'est ce qui se produit lorsque les activités bactériennes et algales contribuent pour une part notable à la régulation d'un élément. Il faut alors passer à une **unité de temps** plus courte : la *saison*, le *jour*, voire *l'heure*, à choisir selon le rythme des fluctuations de l'activité biochimique qui concerne l'élément envisagé.

Pour ces éléments, il est en outre nécessaire de procéder très souvent à un compartimentage, sinon plus complexe, du moins différent de celui des autres éléments dissous. Ainsi, un découpage selon l'axe vertical s'impose notamment pour les lacs profonds.

Il s'agit bien évidemment là de considérations générales qui ne doivent pas masquer la difficulté du choix des mailles. En réalité, lorsque l'on aborde l'étude d'un milieu, ce n'est qu'au fil des résultats que l'on peut modifier de façon appropriée les différentes mailles d'observation retenues *a priori* ; il faut néanmoins bien prendre soin au départ de choisir toujours des mailles fines (unités de temps et d'espace, petites), quitte à les élargir ultérieurement.

7.2. Interdépendance des régulations (choix des éléments)

La régulation biogéochimique contrairement à la régulation climato-géographique peut être distincte d'un élément à l'autre. Elle est souvent spécifique du « contexte biogéochimique du milieu » (composition minérale des eaux, constitution minéralogique des sédiments, nature des matériaux organiques vivants et inertes), dans la

mesure où les réactions à travers lesquelles il est engagé sont fonction de ce contexte. En effet cette régulation peut être en grande partie contrôlée par un courant de processus « mixte » en ce sens que ce courant contrôle par ailleurs la régulation de la concentration d'autres éléments dissous. En exemple, on peut citer que le courant de précipitation du calcium sous forme de carbonate dépend directement de la concentration de l'ion CO_3^{2-} présente dans le milieu, et inversement.

Cette imbrication des régulations pose un deuxième type de problème celui du *choix des éléments* qu'il faut prendre en considération pour traiter tel ou tel autre aspect de l'hydrochimie d'un milieu.

Or, un choix raisonné implique de connaître pour chaque élément les réactions à travers lesquelles il est susceptible de s'engager au sein d'un contexte biogéochimique donné. Cela suppose donc au départ de procéder à un inventaire général relatif à ce contexte. Une telle information, qui est indispensable pour un élément donné, l'est au même titre d'ailleurs pour les autres éléments qui lui sont associés.

En poussant cette démarche au plus loin, qui consiste à étudier la régulation des concentrations des différents éléments qui sont associés directement ou indirectement pour connaître la régulation de la concentration complète de chacun d'eux, on est amené à envisager quasiment *l'ensemble des constituants dissous du milieu*. Dans la pratique, de même que pour le choix des mailles d'observation on a tendance à regrouper les éléments en deux catégories : ceux qui sont essentiellement contrôlés par les courants de transport et des courants de processus géochimiques, et ceux qui sont essentiellement contrôlés par des courants biochimiques, de même on conserve habituellement cette division quant au choix des éléments à considérer pour l'étude d'un système donné. Cela vient du fait que les premiers correspondent généralement aux éléments majeurs qui concernent la connaissance hydrogéochimique générale du milieu, alors que les seconds ne caractérisent le milieu que du point de vue hydrobiochimique. Évidemment, ce choix doit être aménagé au même titre que celui des mailles d'observation. Il n'y a d'ailleurs pas de frontière rigoureuse entre ces deux aspects, d'autant que celle-ci est susceptible de se déplacer d'un milieu à un autre. A titre d'exemple, citons la silice dissoute SiO_4H_4 qui peut être considérée, soit comme un élément majeur dans certains systèmes (elle est alors contrôlée essentiellement par des courants hydrauliques et par des courants de processus géochimiques ; le lac Tchad en est un exemple ; cf. CARMOUZE, 1976), soit comme un élément mineur dans d'autres cas (elle est alors en grande partie contrôlée par des processus biochimiques ; on peut citer ici le lac Titicaca ; cf. CARMOUZE, ARZE et QUINTANILLA, 1977).

7.3. Problème de la subordination de la régulation biogéochimique à la régulation climato-géographique (systèmes hors d'équilibre thermo-dynamique)

Le dernier point sur lequel il nous paraît important d'insister est celui qui découle de *la subordination des courants de processus à ceux de transport dans tout système lacustre*.

D'une manière générale en effet, la régulation climato-géographique tend à imposer au milieu des caractéristiques chimiques telles que certains processus sont susceptibles de prendre naissance. Les valeurs de concentrations « climato-géographiques » des constituants engagés dans ces réactions sont alors modifiées. Par suite, la régulation climato-géographique en est modifiée d'autant. Ainsi, s'établit une première boucle de rétroaction négative, qui peut être suivie d'autres boucles jusqu'à ce que le système atteigne un état de stabilité dynamique (régime stationnaire).

Or, si les processus biochimiques sont difficiles à prévoir, du moins quant à leur intensité, en revanche un grand nombre de processus géochimiques obéissent à des lois thermodynamiques simples. Dans ce dernier cas, la concentration d'un constituant dissous i participant à une ou plusieurs réactions est contrôlée à la fois par des facteurs climato-géographiques qui conduisent à une valeur de la concentration telle que $[i]^{M^G}$ (définie dans le § 3) et par une (ou plusieurs) contrainte(s) thermodynamique(s) qui tend à imposer une autre valeur $[i]_{th}^M$ vérifiant la (ou les) relation(s) d'équilibre thermodynamique de la (ou des) réaction(s) mise(s) en jeu. Or, dans un système dynamique comme l'est un milieu lacustre, cette relation est à tout moment déplacée en raison de la circulation de la matière au sein du milieu, et à tout instant plus ou moins parfaitement rétablie par suite du déroulement de la réaction.

Pour une prérégulation climato-géographique donnée, il existe donc *une seule* valeur de processus, qui assure la vérification de la relation thermodynamique. Hors de cette valeur, l'état stationnaire du milieu est maintenue, mais avec une valeur de $[i]^{M^G} \neq [i]_{th}^M$, qui signifie que l'état d'équilibre thermodynamique n'est pas vérifié. Il apparaît ainsi ce qu'on peut appeler un *déséquilibre thermodynamique contrôlé*. Il est dit « contrôlé » dans la mesure où il est en grande partie déterminé par la combinaison des courants de transport.

De ces divers éléments, il résulte en définitive que, pour appréhender les conditions de déroulement des processus géochimiques au sein de tout système naturel, il apparaît nécessaire aujourd'hui de passer par la

connaissance des flux de matière établis aux frontières du milieu. Dans ces conditions, c'est bien la thermodynamique du non-équilibre qu'il est indispensable d'utiliser, puisqu'elle intègre ces paramètres contrairement à la thermodynamique de l'équilibre. Elle seule devrait donc pouvoir combler les insuffisances de cette dernière et devenir ainsi un meilleur outil de description et de prévision des processus géochimiques. Nous envisagerons cet aspect du problème dans une note ultérieure.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.
le 20 mars 1981.*

BIBLIOGRAPHIE

- CARMOUZE (J.-P.), 1976. — La régulation hydrogéochimique du lac Tchad. *Trav. et Doc. de l'O.R.S.T.O.M.*, Paris, n° 58, 418 p.
- CARMOUZE (J.-P.) et PEDRO (G.), 1977. — Contribution des facteurs géographiques et sédimentologiques à la régulation saline d'un milieu lacustre. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Hydrobiol.*, vol. XI, n° 4 : 269-283.
- CARMOUZE (J.-P.), ARZE (C.) et QUINTANILLA (J.), 1978. — Circulación de materia (agua, sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre del Altiplano : la regulación hidrica é hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol.*, vol. X, n° 1 : 49-68.
- CARMOUZE (J.-P.), 1979. — The hydrochemical regulation of Lake Tchad-Workshop on African Limnology Nairobi, 12-23 décembre 1979, O.R.S.T.O.M., Paris, 34 p. *multigr.*
- CARMOUZE (J.-P.), ARZE (C.) et QUINTANILLA (J.), 1981. — L'hydrochimie du lac Titicaca et de ses tributaires (sous presse).